



ニューラルネットワークを利用した「設計ノウハウ」の獲得とシステム化の実証的研究

堤, 和敏

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

1994-09-21

(Date of Publication)

2013-10-04

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

乙1874

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.11501/3105474>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D2001874>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



神戸大学博士論文

ニューラルネットワークを利用した
「設計ノウハウ」の獲得とシステム化の
実証的研究

平成6年8月

堤 和 敏

神戸大学博士論文

ニューラルネットワークを利用した
「設計ノウハウ」の獲得とシステム化の
実証的研究

平成6年8月

堤 和敏

【目次】

第1章 序 論	
第1節 緒 言	- 1 -
1. 設計ノウハウの共有化、標準化、システム化の必要性	- 1 -
2. 構造部材断面推定のシステム化に関する既往の研究	- 2 -
3. 「設計ノウハウ」の分析	- 5 -
第2節 「経験的知識」のシステム化	- 6 -
1. エキスパートシステム	- 6 -
2. ファジイ理論	- 8 -
3. ニューラルネットワーク	- 10 -
4. システム統合化への動き	- 12 -
5. 本論文の位置づけ	- 12 -
第3節 構造部材断面推定における知識分析とシステム化	- 13 -
1. 部材断面推定における知識	- 13 -
2. システム化対応	- 17 -
第4節 本研究の目的と構成	- 18 -
1. 本研究の目的	- 18 -
2. 本研究の構成	- 19 -
【参考文献】	- 21 -
第2章 ニューラルネットワーク	
第1節 緒 言	- 25 -
第2節 ニューラルネットワークの基本原理	- 26 -
1. 基本原理	- 26 -
2. ニューラルネットワークの基本構成	- 27 -
3. バックプロパゲーションアルゴリズム	- 29 -
4. 線形重回帰分析との比較	- 32 -
第3節 結語	- 33 -
【参考文献】	- 34 -
第3章 平均建物重量の推定に関する研究	
第1節 緒 言	- 35 -
第2節 ニューラルネットワークによる平均建物重量の推定	- 37 -
1. 平均建物重量に影響を及ぼす要因	- 37 -
2. 入力データ・教師信号のモデル化	- 39 -
3. 学習用データと検証用データ	- 42 -
4. 推定結果	- 45 -
5. 考察	- 51 -
第3節 結 言	- 52 -
【参考文献】	- 54 -

第4章 構造特性係数 D_s の推定に関する研究	
第1節 緒言	- 55 -
第2節 D_s 値推定のモデル化	- 56 -
1. D_s 値に影響を及ぼす要因	- 56 -
2. 入力・教師信号のモデル化	- 62 -
3. 検討用データ	- 64 -
4. ニューラルネットワークの構成	- 67 -
5. 学習方法	- 67 -
第3節 D_s 値の推定	- 68 -
1. 学習データの選定	- 68 -
2. 推定結果と実際値との比較	- 70 -
3. 入力パラメータに関する検討	- 73 -
4. 重回帰分析による D_s 値の推定	- 76 -
5. 考察	- 77 -
第4節 結言	- 78 -
【参考文献】	- 79 -
第5章 耐震壁の負担せん断応力度の推定に関する研究	
第1節 緒言	- 81 -
第2節 耐震壁の幾何配置による分類と負担せん断応力度	- 83 -
1. 分析に使用したモデル	- 83 -
2. 解析方法	- 83 -
3. 分析結果	- 85 -
第3節 連層耐震壁のみ存在する場合の負担せん断応力度の推定	- 87 -
1. 連層壁の負担せん断応力度に影響を及ぼす要因	- 87 -
2. 入力・教師信号のモデル化	- 89 -
3. 学習・検証用データ	- 90 -
4. ニューラルネットワークの構成	- 97 -
5. 学習方法	- 97 -
6. 推定結果と実際値との比較	- 98 -
7. 考察	- 102 -
第4節 独立壁・取り付き壁と混在する場合の連層耐震壁負担せん断応力度の推定	- 103 -
1. 連層壁の負担せん断応力度に影響を及ぼす要因	- 103 -
2. 階層型ニューラルネットワークの構成	- 105 -
3. 学習用基本壁配置と学習方法	- 105 -
4. 検証方法	- 107 -
5. 内挿性検証用壁配置モデル	- 107 -
6. 外挿性検証用壁配置モデル	- 107 -
7. 推定結果と実際値との比較	- 109 -

8. 考察	- 111 -
第5節 独立壁・取り付き壁と連層壁が混在する場合の独立壁・取り付き壁負担せん断応力度の推定	- 112 -
1. ニューラルネットワークの構成	- 112 -
2. 学習用基本壁配置と学習方法	- 113 -
3. 検証方法	- 114 -
4. 推定結果と実際値との比較	- 115 -
5. 考察	- 117 -
第6節 結 言	- 118 -
【参考文献】	- 120 -
第6章 部材断面推定のシステム化と検証	
第1節 緒 言	- 121 -
第2節 構造部材断面推定のシステム化	- 121 -
1. 部材断面の推定フロー	- 121 -
2. 各推定ステップに必要な情報・知識の詳細	- 125 -
3. システムの構成	- 143 -
第3節 設計例1：SRC造14層事務所ビルによる検証	- 147 -
1. 検証モデル	- 147 -
2. 推定結果	- 148 -
3. 推定結果に基づく断面に対する保有水平耐力	- 153 -
4. 推定値と実際値との比較・考察	- 154 -
第4節 設計例2：RC造5層店舗ビルによる検証	- 157 -
1. 検証モデル	- 157 -
2. 推定結果	- 158 -
3. 推定結果に基づく断面に対する保有水平耐力	- 161 -
4. 推定値と実際値との比較・考察	- 162 -
第5節 結語	- 164 -
【参考文献】	- 165 -
第7章 結論	- 167 -
【添付資料】	
資料-1 設計物件一覧	- 171 -
資料-2 ニューラルネットワークの構成に関する考察	- 173 -
資料-3 記号一覧	- 193 -

第 1 章 序 論

第 1 節 緒 言	- 1 -
1. 設計ノウハウの共有化、標準化、システム化の必要性	- 1 -
2. 構造部材断面推定のシステム化に関する既往の研究	- 2 -
3. 「設計ノウハウ」の分析	- 5 -
第 2 節 「経験的知識」のシステム化	- 6 -
1. エキスパートシステム	- 6 -
2. ファジイ理論	- 8 -
3. ニューラルネットワーク	-10-
4. システム統合化への動き	-12-
5. 本論文の位置づけ	-12-
第 3 節 構造部材断面推定における知識分析とシステム化	-13-
1. 部材断面推定における知識	-13-
2. システム化対応	-17-
第 4 節 本研究の目的と構成	-18-
1. 本研究の目的	-18-
2. 本研究の構成	-19-
【参考文献】	-21-

第1節 緒 言

1. 「設計ノウハウ」の共有化、標準化、システム化の必要性

(a) 組織設計として

設計という行為は、設計者個人の経験や能力に大きく依存する。

個人として依頼を受け設計を行う場合には問題はないが、設計組織として依頼を受けた場合に担当者によって設計の品質に差異が生じれば問題となる。設計組織としての品質を一定に保つ方策を考えなければならない。

(b) 意匠設計と構造設計・設備設計との係わりにおいて

意匠設計を行う上で、構造部材断面の大きさや、壁の配置等を考慮し、総合的に設計を行う事が重要である。しかし、構造部材断面の大きさや壁配置を考慮する事は構造設計の経験がなければ難しく、現実には構造設計者に相談しなければならない。

構造設計者を抱えている設計事務所は問題ないが、通常の設計事務所では構造設計者を抱えてはいない。構造設計者がいなくても、構造計画のアドバイスを行えるシステムが必要である。この事は、設備に関しても同様である。

(c) 専門分化から統合化をめざして（将来構想）

建築は、意匠、構造、設備、施工一体となった総合技術である。過去において建築は「棟梁」1人によって監理されていたが、現代の複雑で大規模かつ高度な機能を要求される建築のもとでは必要とされる知識が広範になり専門分化されている。しかし、よりよい建築物を作るためには、専門分化から再統合への道をめざさなければならない。そのためには、各専門分野の知識・ノウハウを集約し、誰でもがその専門知識を取り出し、簡単に利用できるシステムが必要である。

そこで、設計者各個人が持っている「設計ノウハウ」の共有化・標準化・システム化が必要となってくる。これらの「設計ノウハウ」を共有化、標準化する方法としては、以下のような方法が考えられる。

- ①「設計ノウハウ」集（マニュアル）を作成する。
- ②チェック機関を設置して、設計の各段階で品質のチェックを行う。
- ③コンピュータによる「設計ノウハウ」のシステム化を行い、自動的・強制的にチェック・アドバイスを行う。

①と②の方法が従来行われてきた方法であるが、①では、マニュアルの内容が設計の中に反映されている保証はないし、また「設計ノウハウ」の中には、マニュアル（言葉や図）で説明できないことも多々ある。②の方法では、チェック

する時期が重要になり、頻繁にチェックを行う必要がある。また、人間である以上、チェック漏れは免れない。従って、従来の①と②の方法では、完全には「設計ノウハウ」の共有化・標準化を行うことはできない。

一方、最近のコンピュータハードの性能アップとA.I.・ファジィ理論・ニューラルネットワーク・オブジェクト指向型システム等の人工知能的システム化手法の発展により、従来の単なる計算の延長ではなく、より知的な分野を対象としたシステム^{1) 2)}や構造計画指向型^{3) 4)}のコンピュータ利用が試みられるようになり、コンピュータによる「設計ノウハウ」のシステム化が可能な状況となってきている。従って、本論は、新しい情報処理技術であるニューラルネットワークを用いることにより、コンピュータによる「設計ノウハウ」の共有化・標準化・システム化をめざし、その第1歩として構造設計における構造計画段階での「構造部材断面の推定」を対象とした「設計ノウハウ」の共有化、標準化の試みを行った。

2. 構造部材断面推定のシステム化に関する既往の研究

構造設計の流れは、以下の通りである。

- ① 構造計画を行い、1)耐力壁の配置を含めた架構形式の検討、2)構造種別の検討、3)荷重・外力の設定、4)構造部材断面の推定、5)基礎工法等を決定する。
- ② 一貫構造設計プログラムを使って、構造計画に基づいた応力解析、断面設計、保有水平耐力の算定を行う。
- ③ 構造計画で仮定した断面が、経済性・施工性・必要耐力・変形性能といった構造設計の所要の品質を満足しているかどうか検討を行う。
- ④ 所要の品質を満足していない場合には、②（場合によっては①：架構形式や、構造種別の変更を含む）に戻って、仮定断面を変更して再実行を行う。

従って、構造計画に問題が有れば、②～④の作業を繰り返し行わなければならない。非効率であるとともに、経済性・施工性・建物の変形性能といった構造設計の品質にも大きく影響を及ぼす事になる。この構造計画は、設計する建物が持つ（あるいは持つべき）構造性能・経済性・施工性等を考慮して設計者の過去の経験・ノウハウに基づき行われており、設計者個人の能力に大きく依存しているものである。従って、構造計画段階での「設計ノウハウ」の共有化・標準化・システム化を行う事が重要である。

本論文は、構造計画の中の「構造部材断面の推定」に着目して、「設計ノウハウ」のシステム化をめざしている。以下に、「部材断面推定」のシステム化に関する既往の研究について述べる。

(a) 部材断面の一般的な推定法

構造計画段階での部材断面の推定法については、多くの構造計画の参考書に記載されている^{5) 6) 7)}。概要を以下に示す。

- 1) 設計者の過去の設計物件に対する経験に基づいて、床面積当たりの平均建物重量（地上部の地震力算定用建物重量／地上部の全床面積）を仮定する。
- 2) 床面積当たりの平均建物重量をもとに、建物重量、層せん断力等を求める。
- 3) 柱・壁のせん断力負担割合を仮定して、柱の負担せん断力を求める。
- 4) 柱の負担せん断力より柱、梁の部材応力を算定し、軸応力度・引張り鉄筋比・せん断応力度等が所定値を満足するように部材断面を求める。

しかし、これらの参考書では、平均建物重量や柱・壁のせん断力分担割合の仮定について一般的な傾向については述べられているが、個々の建物についてどう適応していくかについては述べられていない。実際に設計を行う上でこれらの平均建物重量や柱・壁のせん断力分担割合をどう設定するかは重要なポイントであるが、現状は設計者の判断にまかされていて、設計者の能力に大いに依存しているところである。このような部分には「設計ノウハウ」の共有化・標準化・システム化が必要である。

一方、部材断面の推定に論理的な意味付けを与える試みとして逆問題型の制約設計法や最小重量設計法をめざした最適設計法が提案されている。

(b) 逆問題型制約設計法・最小重量を目標とした最適設計法

逆問題型制約設計法とは、従来の検証型の設計（最初に断面を設定し、その断面が必要な性能を満足しているかを検証する設計法）に対して、制約条件（1次固有周期、材端歪、層塑性率等）を設定し、制約条件を満足するような部材剛性・断面を直接的に求める設計法であり中村等^{8) 9) 10)}によって提案されている。この設計法は、制約条件に対して直接的に部材断面を求める事が出来るために非常に魅力的な設計法ではあるが、閉形解としての定式化を前提としているために部材の軸伸縮やせん断変形については考慮されていない。また、制約条件（材端ひずみ、1次固有周期、層塑性率等）をどう設定するかについては論じられておらず、設計者がこの制約条件を入力するには、相当の設計能力が要求される。「設計ノウハウ」を持っている人が利用できる設計法であり、本論のテーマである「設計ノウハウ」の共有化・標準化とは方向性が異なっている。

また、最小重量・最小コスト設計を目標とした最適設計法については、鋼構造に対しては中村等^{11) 12)}によって、RC造に対しては今井等^{13) 14) 15) 16)}によって提案されている。この設計法は、最小重量・最小コストという単一の目標に対しては、設計者の経験の多少に拘らず、バランスのとれた設計を可能にすると言う点で有効である。しかし、実際の設計においては、最小重量・最小コストという設計が最適であるとはいえない。その時の社会環境によって変化するものである。例えば、労務事情が悪いときであれば、施工の容易さ（部材種類が少ない、断面形状が同じである等）が最も重要な課題であり、建築費に余裕がある場合は、構造性能（強度だけではなく、変形性能やエネルギー吸収能力および構造的な美しさ等）を重視した設計を行い、一方、建築費に余裕がない場合に

は、コストを第1に考えた設計を行う事になる。

また、最近の労務事情から言えば、コストを最小にする事と、重量を最小にする事とは等価ではない。なぜならば、コンクリートの数量を減らすためには、応力なりに必要な最低断面を求めなければならないために断面の種類を増やす事になる。断面の種類が増えれば、型枠の転用回数が少なくなり、コンクリート材料費は安くなるが型枠工事比は大幅にアップする事になる。

このような総合的なバランスを考えて実際の設計は行われており、最小重量・最小コストを単一目標とした設計法では、実務に使用するには限界がある。

また、逆問題型設計法にしても最適設計法にしても、現段階では、適応できるモデルに対する制限が厳しく、実際の複雑な建物への適用には、まだまだ時間を要すると思われる。

単一目標ではなく、総合的な観点からの「設計ノウハウ」のシステム化が必要である。

(c) 耐震構造計画支援システム

河村等^{17) - 20)}は、ファジィ理論をベースに実務設計者のアンケート調査をもとにした主観的・総合的(経済性・安全性・美観等)な観点から単一目標ではない多目的な最適耐震構造計画手法の研究を積極的に進めている。しかし、アンケート調査だけでは、実務設計者の一般的な概念についての知識しか得られず、設計者が持っている臨機応変で細やかな知識の獲得は難しく、実用化にはまだまだ時間を要すると思われる。

また、著者等²¹⁾は、目標とする構造性能を入力し、入力された構造性能を満足するような部材断面を推定する構造計画支援システムの開発を行っているが、目標性能を入力するためには、構造設計の専門的知識と経験が必要であり、誰でもが使えるシステムにはなっていない。

(d) 「設計ノウハウ」の分析が必要

設計は最小重量や最小コストといった単一目標に対して行われているのではなく、安全性・経済性・施工性・美観等の総合的な観点から行われており、それらのバランスをどうとるかが「設計ノウハウ」となっている。従って、力学的な観点からだけでは「設計ノウハウ」のシステム化を行うことはできない。しかし、力学を無視して「経験」や「勘」だけでシステム化を行っても、根拠がないものになってしまう。「力学」・「経験」・「勘」これらをうまく組み合わせたシステム化が必要である。そのためには、「設計ノウハウ」がどのような「知識」で構成されているか、またその「知識」をシステム化するにはどのような手法を用いたら良いか分析を行う必要がある。次項で、「設計ノウハウ」に含まれている「知識」の分析を行う。

3. 「設計ノウハウ」の分析

「設計ノウハウ」には、設計を行う上での全ての「知識」が含まれる。

本論では、構造設計を対象に「知識」の分析を行うことにする。

この「知識」は、大きく「一般的知識」と「経験的知識」に分類することができる。「一般的知識」は、各種規準・文献等を通して誰でも得る事が出来る「知識」であり、主なものとして以下の項目があげられる。

- ・各種構造架構方式の一般的特徴
- ・各種基礎工法の一般的特徴
- ・構造計算の手順
- ・建物重量が与えられた場合の外力の算定法
- ・外力・部材断面が与えられた場合の部材応力の算定法
- ・部材応力が与えられた場合の部材断面の設計法
- ・構造計算書作成法
- ・構造図作成法
- ・各種構造計算プログラムの操作法等

一方、「経験的知識」は、長年の構造設計を通して、自分で獲得した知識であり、誰でもが得る事が出来るものではなく、個人に依存している。また、「経験的知識」は大きく「経験的明示知識」と「経験的非明示知識」に分類する事が出来る。「経験的明示知識」は、「状況」と「知識」との間の因果関係を言葉で説明可能な「知識」であり、一方、「経験的非明示知識」は、その因果関係を言葉では説明することが困難な「知識」と定義する事が出来る。

主なものとして以下の項目があげられる。

「経験的明示知識」

- ・各種構造架構方式の選択法
- ・各種基礎工法の選択法
- ・使用材料（コンクリート強度、鉄筋強度、鉄筋径等）
- ・部材断面の制約条件（最小断面、最小鉄筋本数等）
- ・部材の目標性能（引っ張り鉄筋比、せん断応力度、軸応力度等）

「経験的非明示知識」

- ・建物形状・構造種別による平均建物重量の推定法
- ・壁配置による壁のせん断力分担割合の推定法
- ・建物形状・壁配置による構造特性係数 D_s 値の推定法
- ・壁配置による偏心率の推定法

これらの「ノウハウ」の内、「一般的知識」については、各種構造解析・設計プログラムが既に開発され実用化されているが、「経験的知識」については、まだ実用化されていない。従って、この「経験的知識」のシステム化、特に「経験的非明示知識」の獲得が「設計ノウハウ」のシステム化の重要なポイントとなる。

第2節 「経験的知識」のシステム化

この「経験的知識」に関するシステム化手法としてエキスパートシステム、フuzzy理論、ニューラルネットワークなどの応用が考えられる。以下にこれらのシステムの特徴と、本論文の位置づけを述べる。

1. エキスパートシステム

エキスパートシステムは、特定分野の専門家の経験や知識をコンピュータ上の知識ベースに蓄積し、これを利用して推論エンジンにより問題を解決、あるいは助言を与えるシステムである。エキスパートシステムの基本構成を図-1.1に示す。

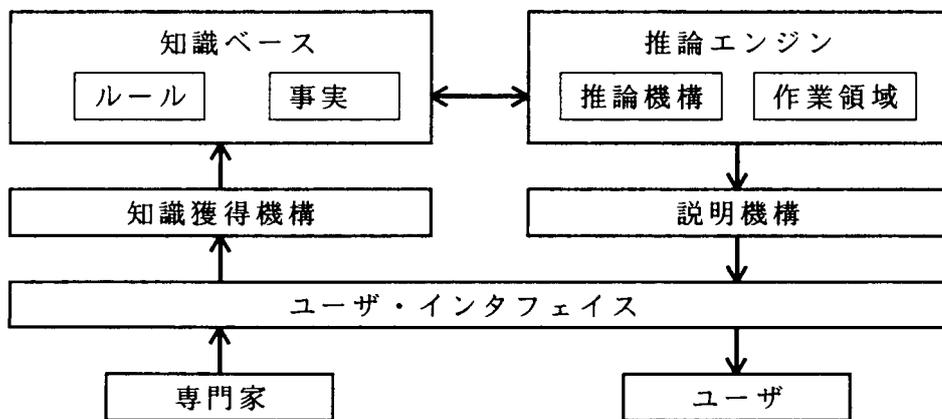


図-1.1 エキスパート・システムの構成

a) 知識獲得

エキスパートシステムにおける知識獲得は、専門家へのインタビューやアンケート調査等により行われるため、知識が明示的に表現されている事が前提となる。

従って、「一般的知識」や「経験的明示知識」に対しては有効であるが、「経験的非明示知識」に対しては、限界がある。

b) 知識表現

知識表現には、経験的知識を表すプロダクション・ルール、対象の属性を示すフレーム、また事実や知識をネットワーク構造により表現する意味ネットワークがある。

プロダクション・ルールは知識を「IF～THEN～」形式で表現するものであり、表現形式が平易で、かつ人間の思考形態と類似しており最も利用されているが、ルール数が増大したり、相矛盾するルールが存在する場合等の処理は困難である。

フレームは、ミンスキーにより提案されたフレーム理論に基づく知識表現方法で、同一の概念を持つ知識群を統一的に記述する事が出来る。また、フレームに階層構造を持たせる事により、上位フレームから下位フレームに情報の継承が自動的に行われる。さらに、フレーム理論に、オブジェクト指向の考え方を導入し、フレームの中にメソッドやトリガーなどの付加手続きを記述する事により、宣言型知識と手続き型知識を統合化する事が出来るようになっている。

意味ネットワークは、事実知識をネットワーク構造により表現するため、概念間の関係を視覚的に理解することはできるが、判断や評価等の知識を表現する事は難しい。

c) 推論方法

知識ベースに蓄積された知識を用いて推論を行う方法として、後ろ向き推論と前向き推論とがある。

後ろ向き推論は、与えられた問題に対して現在の事実から起こり得ると考えられる仮説を立て、その仮説を証明するために推論規則を後ろ向きにたどっていくものである。すなわち、プロダクションルールの「IF条件部 THEN結論部」において、仮説を結論部に持つルールをルール群の中から探し、そのルールの条件部を新たな仮説としてたて、次々と繰り返していき、仮説が事実と一致するかどうかを確かめる推論方法である。主に診断問題に利用される。

前向き推論は、後ろ向き推論とは逆に、あるルールの条件部が、与えられた問題の現在の事実と一致したときに、結論部を新たな事実として組み込み、この新たな事実とルール群の条件部が一致するかどうかを確かめ、一致するものがなくなったときの結論部を結論とする推論手法である。主に計画設計問題に利用されている。

d) 建築分野における主な適用例

多くの研究開発がなされているが、その大部分は特定の狭い領域における診断型問題を対象としている。設計・計画型の問題も研究されているが、まだ実用化のレベルには達していないと思われる。

- ・構造設計一貫システムと連動した保有水平耐力評価システム¹⁾
- ・構造解析手法選定システム²⁾
- ・杭形式選定システム³⁾
- ・基礎工法選定システム⁴⁾
- ・工程計画システム⁵⁾
- ・地震リスク評価システム⁶⁾
- ・オフィスプランニング・システム⁷⁾
- ・コンクリートひび割れ対策システム⁸⁾
- ・ビル設備異常診断システム⁸⁾
- ・土地開発企画立案システム⁸⁾

e) 問題点

エキスパートシステムの問題点として以下の項目が考えられる。

- ・知識の獲得が難しく、特に知識が明示的に表現できない「経験的非明示知識」に対しては、知識獲得が困難。
- ・知識は本来「曖昧性」を持っており、この「曖昧性」への対応が困難。
- ・直列的な探索問題であり、ルール数が増大した場合に組み合わせ爆発が起こる可能性が高い。
- ・言語処理をベースにしているために、大量の数値データの扱いが難しい。
- ・対象領域が狭い。

2. ファジィ理論

ファジィ理論は、エキスパートシステムにおける推論や知識にあいまい性を付与し、より現実に近い情報処理を可能とするシステムである。

a) 知識獲得

ファジィ理論における知識獲得も、エキスパートシステムと同様に専門家へのインタビューやアンケート調査等により行われ、知識が明示的に表現されている事が前提となっている。従って、「一般的知識」や「経験的明示知識」に対しては有効であるが、「経験的非明示知識」に対しては、限界がある。

b) 知識表現

知識表現には、経験的知識を表すファジィ・ルールと知識の曖昧性を表現するメンバーシップ関数がある。

ファジィ・ルールも知識を「IF 前件部 THEN 後件部」形式で表現するが、プロダクション・ルールとの違いは、前件部・後件部をファジィ集合²⁹⁾として扱っている点である。従って、知識に曖昧性を持たせる事が可能になり、より人間の思考形態に近づいてきた。

メンバーシップ関数は、曖昧さのグレードを関数で表現したものであり、人間の主観的な概念をコンピュータ上で数学的に扱う事が出来るようにしたものである。しかし、メンバーシップ関数をどう決めるかは、決める人間の主観によるものであり一般性があるかどうかは問題である。

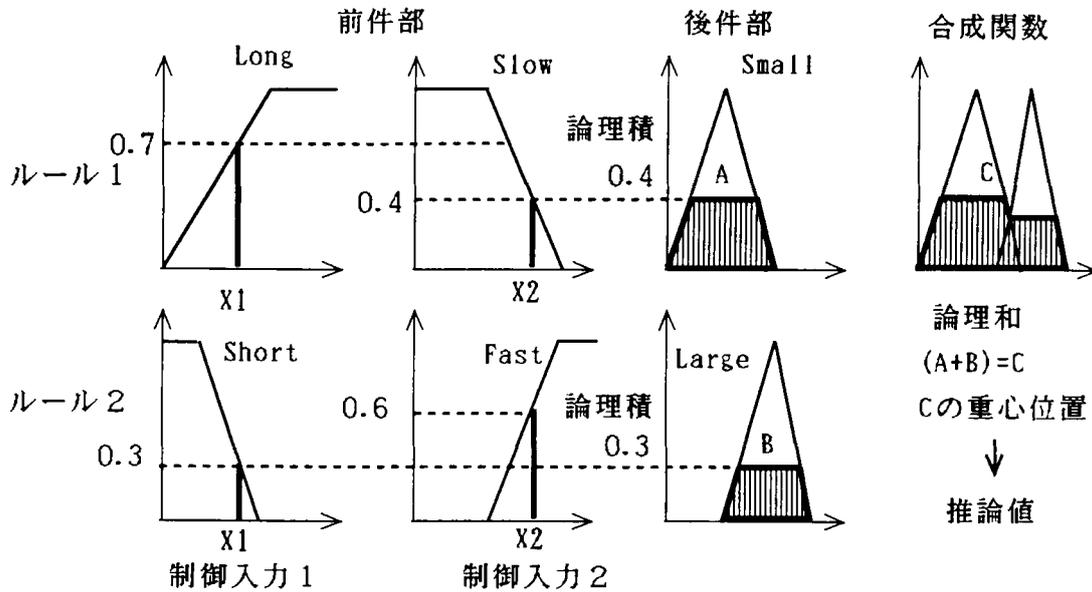
c) 推論方法

ファジィ推論は、下記の手順で行われる。

- ①与えられた入力に対して、適合するルールの前件部ファジィ集合の適合度を求める。
- ②各入力変数毎に得られた適合度のルールに対するMIN（論理積）をとる。
- ③得られたMINのグレード値で後件部のファジィ集合をカットする。

- ④各ルールから求められた頭切り後のファジィ集合のMAX（論理和）をとる。
- ⑤④で求めた合成メンバーシップ関数の重心をとり、推論値を出力する。

ファジィ推論のメカニズム例を図-1.2に示す。



ルール1 IF X1 is Long and X2 is Slow THEN Y is Small
 ルール2 IF X1 is Short and X2 is Fast THEN Y is Largeの場合

図-1.2 ファジィ推論のメカニズム例³⁰⁾

d) 建築分野における主な適用例

制御に関するもの^{31) 32)}と構造計画支援^{17) 18) 19) 20) 33)}に関するものが発表され研究が進められている。

e) 問題点

ファジィ理論の問題点として以下の項目が考えられる。

- ・知識に曖昧性を付加でき、「経験的明示知識」を、より設計者の感覚に近づけることができるが、知識獲得手法そのものを与えるものではない。最近では、知識獲得部分にニューラルネットワークを組み込む研究が進められている。¹⁹⁾
- ・推論結果がファジィ集合として出力される。その集合をどう解釈するかという点（最適性の保証）に決めてとなる方法が確立されていない。
- ・メンバーシップ関数の決め方が主観的であり、客観的な評価法が必要。
- ・直列的な探索問題であり、ルール数が増大した場合に組み合わせ爆発及び曖昧さの爆発が起こる可能性が高い。

3. ニューラルネットワーク

ニューラルネットワークは、人間の神経回路を模したネットワークを用いて、いくつかの実例を教師信号として自己学習する事により、任意の入力に対して出力を行う工学的情報処理システムである。

a) 知識獲得

ニューラルネットワークでの知識獲得は、対象とする現象（入力信号）とその結果（教師信号）を組として、多くの事例を学習する事によって行われる。

したがって、知識が明示的に表現されていなくても、知識が盛り込まれている事例（図面も含む）が存在すれば知識獲得を行う事が出来、「経験的非明示知識」の獲得に有効である。

図-1. 3に階層型ニューラルネットワークの概念図を示す。

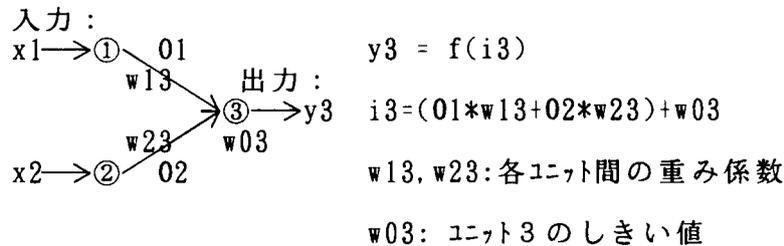


図-1. 3 階層型ニューラルネットワークの概念図

図中に○で示すものがユニットで、各ユニットは図中に示すように矢線で結合されている。ユニット(j)を考えたときにユニット(i)からユニット(j)への入力 0_i とユニット(j)の出力 y_j との間には、下式の関係がある。

$$y_j = f(\sum w_{ij} * 0_i + w_{0j}) \tag{1.1}$$

w_{ij} : ユニット i, j 間の重み係数
 w_{0j} : ユニット j のしきい値

$f(x)$ は、入出力関数であり、通常はシグモイド関数が用いられる。

$$f(x) = \frac{1}{1 + \exp(-x)} \tag{1.2}$$

これらのユニットを、階層的に組み合わせていくことにより複雑で非線形的な現象をも表現することができる。学習とは、図-1. 3に示すネットワークの各ユニット間で、入力信号を入力したときの出力値と教師信号との誤差を許容誤差以下に納めるような重み係数を求める事に相当する³⁵⁾。各ユニットの重み係数は誤差逆伝搬法³⁴⁾により、下式で示す重み係数の修正式に従って教師信号と出力値との2乗誤差の総和を減少させるように、順次重み係数を更新していくことによって求めることができる。

$$\Delta w_{ij}[n+1] = -\eta * \partial E / \partial w_{ij} + \alpha * \Delta w_{ij}[n] \quad (1.3)$$

$\Delta w_{ij}[n]$: nステップにおける重み係数の修正量

$$\Delta w_{ij}[n] = w_{ij}[n] - w_{ij}[n-1]$$

E : 教師信号と出力値の2乗誤差の総和

$\eta \cdot \alpha$: 学習速度を決める重み更新係数

i, j : 隣接する層のユニット番号を示す。

$i=0$ の時、 w_{0j} はユニットjのしきい値を示す。

b) 知識表現

a) で述べたように、知識は各ユニット間の重み係数として分散的に表現される。従って、推論結果の道筋を説明する事は難しく、推論結果の局所的な変更も容易ではない。

c) 推論方法

推論は、各ユニット毎に、式(1.1)を使って行われる。この式は、並列処理を可能とするものであり、推論時間を大幅に短縮する事が可能である。

d) 建築分野における主な適用例

機械学会の分野では、構造システムの最適化、複合材料設計、欠陥同定問題、構造同定問題、超音波非破壊評価問題、知的適応構造物の設計問題といった満足化・最適化問題、逆問題といった幅広い分野で研究が進められている。³⁶⁾

土木分野でも橋梁の景観設計へニューラルネットワークを適用する³⁷⁾など積極的に研究が進められている。

建築の分野においては、地震動予測³⁸⁾や復元力モデルの作成^{39) 40)}等に適用例がみられるだけで、やっと研究が始められた段階である。

e) 問題点

- ・学習は事例データに依存する。そのデータが適切かどうかの保証はない。
- ・知識が各ユニット間の重み係数として表現されるため、推論結果の道筋を説明する事は難しく、推論結果の局所的な変更も容易でない。

以上を整理して、表-1.1にそれぞれのシステムの特徴を示す。^{41) 42)}

4. システムの統合化への動き

表-1. 1に示すようにエキスパートシステム、ファジィシステム、ニューラルネットワークには、それぞれ長所・短所があり、お互いに補完し合っていることがわかる。従って、それぞれのシステムを統合化しようという試みがなされている。^{4.1) 4.2)} 統合化の課題として、知識表現に関する課題（記号データとパターンデータの扱い、記号処理と数値計算との扱い等）、知識獲得に関する課題（経験的非明示知識の獲得手法について）、推論技法に関する課題（組み合わせ爆発問題等）があるが、現在のところは、知識獲得手法としてニューラルネットワークを利用する動きが中心である。^{1.9)}

これらのシステムを統合化する事により、「経験的知識」に関するシステム化は可能であると思われる。

さらには、「一般的知識」である各種構造設計プログラムと統合化する事により、より高次の「設計ノウハウ」に関するシステム化も実現可能と思われる。

5. 本論文の位置づけ

本論文は、「設計ノウハウ」のシステム化を行う上で「経験的非明示知識」の獲得が最も重要である、との認識にたつて、「経験的非明示知識」の獲得に最も適しているニューラルネットワークに着目し、設計者の経験・ノウハウが盛り込まれている図面及び計算書を事例データとして、学習を行う事とする。ニューラルネットワークにより得られた学習結果と「一般的知識」・「経験的明示知識」との組み合わせを行う事により「設計ノウハウ」のシステム化を試みる。

表-1. 1 システムの特徴

	エキスパートシステム	ファジィ理論	ニューラルネットワーク
知識表現	プロダクションルール 意味ネットワーク フレーム 曖昧性への対応困難	プロダクションルール メンバーシップ関数 曖昧性への対応可	ネットワーク構成 重み係数 しきい値 曖昧性への対応可
知識獲得	top down的 知識の表現力必要 専門家の知識 ヒヤリング、アンケート 知識の変更容易	top down的 知識の表現力必要 専門家の知識 ヒヤリング、アンケート 知識の変更容易	bottom up的 知識の表現力不要 事例学習 変更困難(再学習)
推論・探索	処理結果の説明可 変化への対応低い 直列処理: 組合せ爆発 論理的	処理結果の説明可 変化への対応低い 直列処理: 組合せ爆発 論理的	処理結果の説明不可 変化への対応可 並列処理: 高速 直感的

第3節 構造部材断面推定における知識分析とシステム化

本論文は、「設計ノウハウ」のシステム化への第1歩として、構造計画段階における部材断面の推定法を対象として、構造設計者が持っている「ノウハウ」の獲得を行い、システム化を行った。本節では、部材断面の設定法の概要と、必要な「知識」を示し、システム化への対応策を論じる。

1. 部材断面推定における知識

本論では、建物としての目標耐力を必要保有水平耐力とし、偏心が無く、変形はあまり問題とならない中低層のRC/SRC構造物を対象とする。部材断面の設定法は、種々考えられるが終局耐力を前提とした一般的な方法を下記に示す。

① 建物重量等の算定

構造種別、建物規模等により平均建物重量を仮定し、各階の床面積および柱1本当たりの荷重負担床面積に、仮定した平均建物重量を乗じて、各階の建物重量、柱長期軸力、基礎設計用長期軸力を算定する。

ここで、各階の床面積および柱1本当たりの荷重負担床面積は、図面より誰でも読み取れる情報である。しかし、平均建物重量は、構造種別・建物形状・建物規模等によって異なるものであり、定式化する事は難しく、誰でもが設定できるものではない。設計者が経験的に設定しなければならない「経験的非明示知識」である。

② 必要保有水平耐力の算定

①で求めた各階の建物重量より、 A_i 分布に従い地震力によって各階に生じる水平力を求める。建物のエネルギー吸収能力等を考慮して構造特性係数 D_s 値を仮定し、必要保有水平耐力を算定する。

ここで、 A_i 分布、地震力によって各階に生じる水平力、 D_s 値が設定された後での必要保有水平耐力の算定法については、政令や、建設省告示で示されており「一般的知識」である。しかし、 D_s 値の推定法については、保有水平耐力の解析を行った後での設定法については、建設省告示の付則に示されているが、構造計画段階での推定法については一般的概念しか示されておらず、誰でもが設定できるものではない。設計者が経験的に設定しなければならない「経験的非明示知識」である。

③ 柱・壁の必要負担せん断耐力の推定

②で求めた必要保有水平耐力に対して壁の負担すべきせん断耐力を仮定し、残りを柱の負担せん断耐力とする。この柱負担せん断耐力を耐力壁の付帯柱ではない柱の本数で除して、柱の一本当たりの必要負担せん断耐力を求める。

耐力壁付帯柱でない柱本数は、図面から誰でも読み取れる情報である。しかし、壁の負担せん断耐力については、耐力壁の形状や配置状況によって異なるものであり、定式化する事は難しく、誰でもが設定できるものではない。

本論では、壁の耐力は、壁長さに壁厚及び壁のせん断応力度を乗じて求める。壁長さは、図面より読み取れる情報であり、壁厚は、建物層数や階高より推定できる「経験的明示知識」で求める事が出来る。しかし、壁のせん断応力度は、設計者が経験的に設定しなければならない「経験的非明示知識」である。

④ 梁の必要耐力の算定

③で求めた柱必要負担せん断耐力から、柱の反曲点位置を仮定し柱の必要曲げ耐力、梁の必要曲げ耐力、梁のせん断耐力を求める。

ここで、柱の反曲点位置が仮定出来れば、柱の必要曲げ耐力、梁の必要曲げ耐力、梁のせん断耐力は、力学的関係から誰でも求められる「一般的知識」である。一方、柱の反曲点位置は、厳密には、柱・梁の剛性や配置位置によって異なるが、計画段階で使用する際には中間層 0.5 最上層 0.4、最下層 0.60程度というように「経験的明示知識」として与える事が出来る⁴³⁾。

⑤ 梁断面の推定

④で求めた梁の必要曲げ・せん断耐力より、梁部材の目標性能（引張り鉄筋比、せん断応力度等）を満足するように梁断面を推定する。また、推定した断面での実際の梁の曲げ耐力を算定する。

目標性能と曲げ耐力との関係式は、実験式として与えられていて「一般的知識」である。目標性能については、例えば引張り鉄筋比1.0%以下、せん断応力度 $0.15F_c$ (F_c : コンクリートの圧縮に対する材料強度 kg/cm^2) 以下というように「経験的明示知識」として与える事が出来る⁴³⁾。

⑥ 柱の必要耐力の算定

⑤で求めた梁断面の曲げ耐力に対して、割増し係数を乗じて、梁降伏系を保証するために必要な柱耐力の算定を行う。

ここで、梁降伏系を保証するための割り増し係数は、1.3~2.0程度^{44) 45)}と、「経験的明示知識」として与える事が出来る。

⑦ 柱断面の推定

⑥で求めた柱必要耐力に対して目標性能（引張り鉄筋比、軸応力度、せん断応力度等）を満足するように柱断面を推定する。

目標性能と耐力との関係式は、実験式として与えられていて「一般的知識」である。目標性能については、例えば引張り鉄筋比0.8%以下、長期軸応力度 $0.2F_c$ 以下、せん断応力度 $0.1F_c$ 以下というように「経験的明示知識」として与える事が出来る⁴³⁾。

⑧ 壁の断面推定

③で求めた壁の必要せん断耐力・壁厚を満足するように、壁せん断補強筋を求める。壁せん断耐力と壁せん断補強筋との関係は、実験式として与えられている「一般的知識」である⁴³⁾。

⑨基礎設計用長期軸力を満足するような場所打ち杭の杭径と基礎断面を推定する。

本論では、場所打ち杭基礎を対象とする。

敷地地盤のボーリング柱状図より、杭支持位置とN値を設定し、杭の単位面積当たりの許容支持力を算定する。①で求めた、基礎設計用長期軸力を杭の単位面積当たりの許容支持力で除し、必要な杭断面積を求め、杭径を算定する。算定した杭径にたいして基礎の断面を設定する。

ここで、ボーリング柱状図より、杭支持位置とN値を設定する知識は、「経験的明示知識」である。また、N値と杭径および許容支持力との関係は、実験式で与えられていて「一般的知識」である。

以上を整理して部材断面推定における知識の分類を、表-1. 2に示す。

表-1.2 部材断面推定における知識の分類

	図面・前ステップ	一般的知識	経験的明示知識	経験的非明示知識
①	各階床面積 柱1本負担床面積	各種荷重算定式		平均建物重量
②	建物高さ 敷地地盤情報 各階建物重量	必要保有水平耐力 算定式		構造特性係数
③	柱本数 必要保有水平耐力 壁長さ		壁厚	壁せん断応力度
④	階高 標準スパン長 柱1本せん断力	柱モーメント算定式 梁モーメント算定式 梁せん断力算定式	柱反曲点位置	
⑤	梁必要耐力	引張り鉄筋比と 曲げ耐力関係式 せん断補強筋比と せん断耐力関係式	目標構造性能 梁成と梁幅の関係 引張り鉄筋有効成 と梁成との関係 断面制約条件	
⑥	梁実際の耐力		柱耐力割り増し率	
⑦	柱必要耐力	引張り鉄筋比と曲 げ耐力との関係式 せん断補強筋比と せん断耐力との関 係式	目標構造性能 引張り鉄筋有効成 と柱成との関係 断面制約条件	
⑧	壁長さ、壁厚 壁必要せん断耐力	せん断補強筋比と 耐力との関係式		
⑨	ボーリング柱状図 基礎用長期軸力	N値・杭径・許容 支持力との関係式 杭径と基礎幅との 関係式	柱状図からの支持 地盤の推定	

2. システム化対応

1. で述べたように、部材断面の推定を行うためには、「一般的知識」、「経験的明示知識」、「経験的非明示知識」のシステム化が必要である。

「一般的知識」と「経験的明示知識」については、通常の手続き的アルゴリズムでシステム化を行った。しかし、「経験的非明示知識」については、通常アルゴリズムでは困難である。したがって、本論では部材断面推定を行う上での「経験的非明示知識」である「平均建物重量の推定」、「構造特性係数 D_s 値の推定」、「壁負担せん断応力度の推定」については、ニューラルネットワークを用いて知識獲得・システム化を行った。

本来、「経験的明示知識」については、曖昧さを含んでおり、ファジィ理論を使うことがより設計者の感覚に近いものになると思われるが、本論文では、「経験的非明示知識」の獲得に重点をおいているので、手続き的アルゴリズムで処理を行った。

学習して獲得した知識と手続き的アルゴリズムとを統合化することによって、部材断面推定のシステム化は可能となる。

図-1. 4 にシステムフロー図を示す。

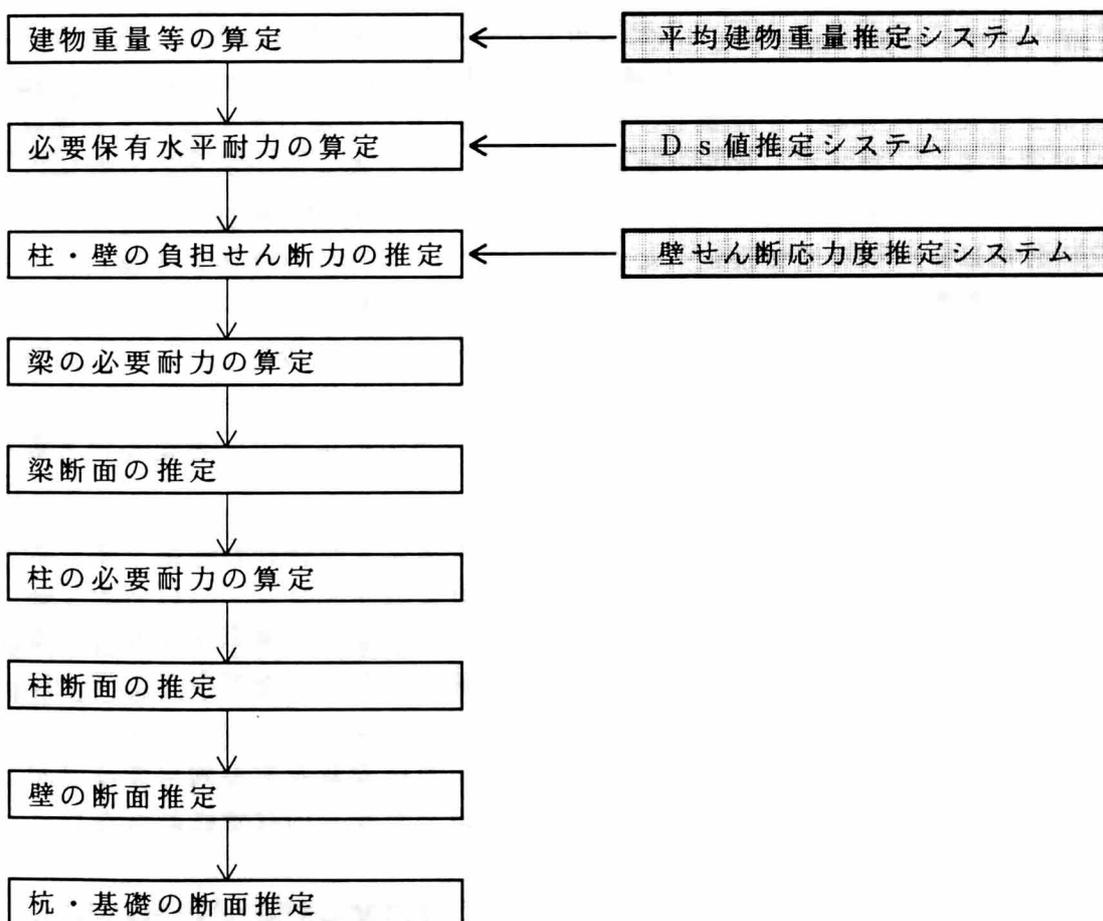


図-1. 4 システムフロー図（図中網掛け部はニューラルネットワークを示す）

第4節 本研究の目的と構成

1. 本研究の目的

本論文は、構造計画段階における部材断面推定に関する知識を、各種規準・文献等を通して得られる「一般的知識」、長年の構造設計を通して自分で得た知識の中で「状況」と「知識」との間の因果関係を言葉で説明可能な「経験的明示知識」、説明が困難な「経験的非明示知識」に分類し、「経験的非明示知識」の獲得をニューラルネットワークを利用して行う事により、構造設計の経験が少ない設計者に対しても、品質の高い部材断面の推定が可能となるようなシステム化手法の提案を行ったものである。

そのために、部材断面推定手法における「知識」の分析を最初に行い、「経験的非明示知識」として「平均建物重量の推定」、「構造特性係数 D_s 値の推定」、「壁負担せん断応力度の推定」が重要である事を示した。

次に、実際に設計された物件の設計図書を収集して建物形状等のデータとこれらの「経験的非明示知識」との関係をニューラルネットワークで学習・検証を行いニューラルネットワークが「経験的非明示知識」の獲得に有効である事を示す。

さらに、ニューラルネットワークを利用した「経験的非明示知識」と通常のアプローチで処理できる「一般的知識」、「経験的明示知識」とを統合化した「部材断面推定システム」を構築し、検証モデルに対して本システムにより部材断面を推定する。最後に、推定された断面を使用して保有水平耐力の算定を行い、目標とした保有水平耐力を満足しているかどうかの実証的検証を行う。

本論文の目的は、「部材断面推定」における本システムの妥当性を示す事により、以下のように要約できる。

- ①ニューラルネットワークが、「部材断面推定」における「設計ノウハウ」の獲得に有効である事を示す。
- ②構造設計の経験が少ない設計者でも「構造部材断面」の精度良い推定を行う事が出来る事を示す。
- ③本手法を発展させる事により、構造設計のみならず、設計全般に亘る「設計ノウハウ」のシステム化が可能である事を示す。

上記に述べた本論での成果は、建築設計において次のような意義を有している。

- (1) 組織設計として、担当者の設計経験に因らず、設計品質を確保する事が出来る。
- (2) 専門的な構造知識を必要としないため、意匠設計者でも利用する事が出来、計画の初期段階から構造部材断面を考慮した総合的な意匠計画を行う事が出来る。
- (3) 従来、建築設計において意匠・構造・設備と専門分化が進んでいたが、各専門分野の「ノウハウ」の知識獲得及びシステム化への可能性を開く事により、意匠・構造・設備を総合的に設計する統合化への道筋を拓く事が出来る。

2. 本研究の構成

【第1章：序論】*¹

第1章は序論で、本論文の位置づけ、目的、内容のあらましを述べる。

「設計ノウハウ」のシステム化の第1歩として、部材断面の推定に着目し、経験の少ない設計者でも精度の良い部材断面の推定を行えるようにするためには、「経験的非明示知識」の獲得が重要である事を示す。また、部材断面推定における「経験的非明示知識」としては、「平均建物重量の推定」、「構造特性係数 D_s 値の推定」、「壁負担せん断応力度の推定」が重要である事を示す。

【第2章：ニューラルネットワーク】

第2章は、「経験的非明示知識」の知識獲得として重要な役割を果たす、ニューラルネットワークの概要・基本原理を示し、また既存の統計処理である重回帰分析との違いについて考察を行う。

【第3章：平均建物重量の推定に関する研究】*²

第3章では、「経験的非明示知識」の1つである「平均建物重量の推定」に着目し、著者の設計経験と力学的な要因、及び誰もが入力できることを考慮して、「平均建物重量の推定」に必要な入力パラメータを提案する。また、これらのパラメータを利用してニューラルネットワークにより学習・検証を行い、構造計画段階で使用するには十分な精度で推定する事が出来る事を示す。

【第4章：構造特性係数 D_s 値の推定に関する研究】*³

第4章では、「経験的非明示知識」の1つである「構造特性係数 D_s 値の推定」に着目し、著者の設計経験と力学的な要因、及び誰もが入力できることを考慮して、「構造特性係数 D_s 値の推定」に必要な入力パラメータを提案する。また、これらのパラメータを利用してニューラルネットワークにより学習・検証を行い、構造計画段階で使用するには十分な精度で推定する事が出来る事を示す。また、学習データの選択について、誰でも容易に行う事が出来る機械的選択法を提案する。

【第5章：耐震壁負担せん断応力度の推定に関する研究】*⁴

第5章では、「経験的非明示知識」の1つである「耐震壁負担せん断応力度の推定」に着目する。連層壁の負担せん断応力度は、連層壁のみ存在する場合の連層壁の基本せん断応力度に、取り付け壁や独立壁が混在する事によって生じる補正せん断応力度の和で表される事を示す。したがって、連層壁のみ存在する場合と、取り付け壁・独立壁とが混在する場合の2ケースに分けて考察を行う。

*¹ 本章の内容の一部は、構造工学論文集Vol.40B(文献47)において発表している。また、現在、日本建築学会構造系論文集(文献49)に投稿中である。

*² 本章の内容は、日本建築学会構造系論文集No.458(文献46)において発表している。

*³ 本章の内容は、構造工学論文集Vol.40B(文献47)において発表している。

*⁴ 本章の内容の一部は、日本建築学会構造系論文集No.456(文献48)、また第5回建築・土木コンピュータ利用国際会議(文献3)において発表している。また、現在、日本建築学会構造系論文集(文献49)に投稿中である。

1) 連層壁のみ存在する場合(基本せん断応力度)

著者の設計経験と力学的な要因、及び誰もが入力できることを考慮して、「連層壁の基本せん断応力度の推定」に必要な入力パラメータを提案する。
また、これらのパラメータを利用してニューラルネットワークにより学習・検証を行い、構造計画段階で使用するには十分な精度で推定する事が出来る事を示す。

2) 取り付き壁・独立壁が混在する場合(補正せん断応力度)

著者の設計経験と力学的な要因、及び誰もが入力できることを考慮して、「耐震壁の補正せん断応力度の推定」に必要な入力パラメータを提案する。
また、これらのパラメータを利用してニューラルネットワークにより学習・検証を行い、構造計画段階で使用するには十分な精度で推定する事が出来る事を示す。

【第6章：部材断面推定のシステム化と検証】*5

第6章では、前章までに得られた「経験的非明示知識」を利用して部材断面推定を行うためのシステム化手法の提案とシステムの構築を行った。

本システムでは、「経験的非明示知識」をニューラルネットワークで学習させる事により、誰でも意匠計画図より読み取れる簡単な情報を使用してシステムを構成する事が出来る事を示す。

次に、SRC造事務所ビル、RC造店舗ビルのモデルを作成し、本システムで推定した部材断面を使用して、保有水平耐力の検証を行う。これらの検証により本システムが構造計画段階で有効なツールとなり得る事を例証する。

【第7章：結論】**

第7章は結論である。各章で得られた結果及び本論の意義を述べている。

【資料-1：設計物件一覧】

本論で学習・検証用に使用した設計物件の概要を示す。

【資料-2：ニューラルネットワークの構成に関する考察】

ニューラルネットワークは、複数のユニットを階層的に組み合わせる事によって構成される。しかし、その組み合わせに関する系統的な手法は存在せず、試行錯誤的に決めなければならない。本論を展開する上で、事前にネットワークの構成に関する検討を行ったのでその概要を示す。使用したデータは、3章で用いた平均建物重量に関するデータである。

【資料-3：記号一覧】

本論で使用している記号の一覧表を示す。

*5 本章の内容の一部は現在、日本建築学会構造系論文集(文献49)に投稿中である。

*6 本章の内容は現在、日本建築学会構造系論文集(文献49)に投稿中である。

【参考文献】

- 1)堤和敏・松林隆道・片岡裕美・薦野和彦：A. Iツールを利用した構造設計エキスパートシステムの研究 その2 保有水平耐力評価パイロットシステムの開発 日本建築学会大会学術講演集A, 1991. 9, pp. 1373-1374.
- 2)広瀬啓一・新美勝之・中井正一・他：大規模柔軟構造物の振動解析 -オブジェクト指向による問題解決-； 第14回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集 1991年12月 pp. 103-108.
- 3)K. Tsutsumi, A. Tani, H. Kawamura, T. Matsubayashi, H. Kataoka, K. Komono and Y. Fukushima; "Study of a Computer System for Evaluation of Bearing Wall Stresses in Structural Planning," Computing in Civil and Building Engineering, Jun., 1993 pp. 817-824.
- 4)神原浩・河村廣・谷明勲：インテリジェントファジィネットワークによる構造計画（オブジェクト指向的推論による全体構造計画）；第15回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集 1992年12月 pp. 299-304.
- 5)谷資信・豊島光夫「構造の計画と計算 下」構造計算シリーズ1 丸善 1975年1月 pp. 281-304.
- 6)矢野克巳・梅村魁・小林紳也・松井源吾・望月洵「新建築学体系25 構造計画」 彰国社, 1981年8月 pp. 142-145, p. 108.
- 7)建築知識：1990年4月号
- 8)中村恒善、小坂郁夫「水平力を受ける弾性平面建築骨組のひずみ制御設計」、日本建築学会構造系論文報告集、第363号、pp. 1-11. 1986年5月
- 9)中村恒善、小坂郁夫「平面建築骨組の1次固有周期および1次ひずみモード制御設計」、構造工学論文集、第35号B、pp. 9-17. 1989年3月
- 10)中村恒善、小坂郁夫「弾塑性骨組の指定設計用変形指標に対する2段階地震応答制約設計法」、日本建築学会構造系論文報告集、第439号、pp. 89-101. 1992年9月
- 11)中村恒善「建築骨組の最適設計」、丸善、1980年
- 12)中村恒善、竹脇出「弾性支持されたせん断型構造物の1次固有周期制約条件下の最適設計」、構造工学論文集、Vol. 31B、pp. 93-102. 1985年3月
- 13)小阪義夫、今井信宏「鉄筋コンクリート骨組の最適設計に関する研究 その1 最適化計算法および多層多スパン骨組への適用」、日本建築学会構造系論文報告集、第290号、pp. 23-32. 1980年4月
- 14)今井信宏「鉄筋コンクリート骨組の最適設計に関する研究 その2 最適化計算における初期設計解の推定」、日本建築学会構造系論文報告集、第350号、pp. 16-27. 1985年4月
- 15)今井信宏「鉄筋コンクリート骨組の最適設計に関する研究 その3 動的応答を考慮したRC骨組の設計」、日本建築学会構造系論文報告集、第360号、pp. 31-43. 1986年2月
- 16)今井信宏「新耐震設計法ならびに地震時塑性層間変位を考慮した鉄筋コンクリート骨組の最適設計」、日本建築学会構造系論文報告集、第377号、pp. 52-63. 1987年7月

- 17)河村廣「ファジィネットワークの構造計画への応用（条件付きシングルトンを含むファジィシステムを構造単位として）」、第13回情報システム利用技術シンポジウム論文集 pp.37-42. 1990年12月
- 18)神原浩・河村廣・谷明勲「インテリジェントファジィネットワークによる構造計画（オブジェクト指向的推論による全体構造設計システム）」、第15回情報システム利用技術シンポジウム論文集 pp.299-304. 1992年12月
- 19)桑本保彦・河村廣・谷明勲「ニューロファジィネットワークによる構造計画（ファジィ合成則によるRC連層耐震架構の解法）」、第16回情報システム利用技術シンポジウム論文集 pp.325-330. 1993年12月
- 20)大町靖高・河村廣・谷明勲「拡張ファジィ統合則による主観的建築構造評価の同定 -二項から三項ファジィ関係へ-」、第16回情報システム利用技術シンポジウム論文集 pp.331-336. 1993年12月
- 21)片岡裕美、松林隆道、堤和敏：構造計画支援システム「FIND」の開発、第16回情報システム利用技術シンポジウム、pp.37-42. 1993年12月
- 22)中井正一「知識ベースアプローチによる構造解析」、第12回情報システム利用技術シンポジウム論文集 pp.205-210. 1989年
- 23)河添斉・中嶋文子・田中宏隆「杭形式選定システムの開発」、第10回電子計算機利用シンポジウム論文集 pp.271-276. 1988年
- 24)有泉浩蔵・原田和明・宮崎祐助・茶谷文雄・中尾通夫・佐原守「AI技術を利用した建物基礎選定システムの開発」、第14回情報システム利用技術シンポジウム論文集 pp.91-96. 1991年
- 25)田村恭・嘉納成男・湯浅洋一「工程計画のためのエキスパートシステム（その3）OPS5による工程計画のアルゴリズム化」、第10回電子計算機利用シンポジウム論文集 pp.305-310. 1988年
- 26)辰巳安良・長能正武・杉本三千雄・瀬谷均・佐藤吉之「建築物の地震リスク評価のためのエキスパートシステム」、第14回情報システム利用技術シンポジウム論文集 pp.109-114. 1991年
- 27)榎本ハルヲ・村井敬・杉田哲也「『オフィスプランニング・エキスパートシステム』の開発」、第13回情報システム利用技術シンポジウム論文集 pp.175-180. 1990年
- 28)日経AI別冊「エキスパートシステム最前線 統合化へ加速」1988年7月
- 29)Zadeh, L. A., "Fuzzy Sets," Information and Control, Vol. 8, 1965, pp. 338-353.
- 30)東大先端研グループ「最先端技術のすべて辞典」：日本実業出版社 p.149 1993年5月
- 31)新宮・川西・春本・船本「地震力を受けるシェル構造へのファジィ制御の応用」第6回ファジィシステムシンポジウム講演論文集 pp.227-230. 1990年9月
- 32)山田・河村・谷・亘理「最大化決定によるファジィ制震構造システム」第14回情報システム利用技術シンポジウム論文集 pp.283-288. 1991年12月
- 33)古田均・亀井正博・金吉正勝・田中洋「ファジィ理論を用いたケーブル構造物の形状決定法」、第16回情報システム利用技術シンポジウム論文集

- pp. 337-342. 1993年12月
- 34)Rumelhart, D. E., Hinton, G. E. and Williams, R. J., "Learning Representations by Back-Propagation Errors," Nature, 323-9, Oct. 1986, pp. 533-536.
- 35)八名和夫・鈴木義武「ニューロ情報処理技術 基礎と応用」海文堂 P41-P48
1992年2月
- 36)矢川元基編:計算力学とC A Eシリーズ1 2、ニューラルネットワーク、
培風館、1992年5月
- 37)古田均・保田敬一「橋梁の景観設計へのニューラルネットワークの適用」、第
3回システム最適化に関するシンポジウム講演論文集, 1993年12月 pp. 141-146.
- 38)桑本保彦・山田稔・河村廣・谷明勲「ニューラルネットワークによる地震動予
測」、日本建築学会大会(北陸) 学術講演梗概集 A pp. 1541-1542、1992年8月
- 39)山本広祐「ニューラルネットワークによる履歴挙動のモデリングと数値解析へ
の応用」、構造工学論文集、38A、(1992)、pp. 85-94.
- 40)吉川和秀「ニューラルネットワークによる復元力モデルの作成」、第16回情
報システム利用技術シンポジウム、pp. 73-76. 1993年12月
- 41)上坂吉則:ニューラルネットワークとA Iの統合に関する調査研究;ニューラ
ルネットワークとA Iの統合に関する講演会 1992年9月, pp. 73-80.
- 42)太原育夫・武井欣二・浅川和雄・小池誠彦:パネルディスカッション「ニュー
ラルネットワークとA Iの統合上の課題」;ニューラルネットワークとA Iの
統合に関する講演会 1992年9月, pp. 81-115.
- 43)構造計算指針・同解説(1991年版)、日本建築センター、pp. 230-234,
P312, P23-24, P240-250.
- 44)滝沢春男・関弘義:梁崩壊型R C骨組みを実現する柱、梁耐力比、日本建築学
会梗概集(関東)、pp. 2203-2204、昭和59年10月
- 45)久保哲夫・中瀬知幸:梁崩壊制御の靱性R C造建物の柱、梁耐力比に関する基
礎的研究(その1、その2)、日本建築学会梗概集(北海道)、pp. 695-698、
昭和59年10月
- 46)堤和敏、河村廣、谷明勲:ニューラルネットワークを利用した平均建物重量推
定システムの研究、日本建築学会構造系論文集、NO. 458、1994年4月号、
pp. 171-177.
- 47)堤和敏、河村廣、谷明勲:ニューラルネットワークを用いた構造設計における
「経験的非明示知識」の知識獲得に関する研究-構造特性係数 D_s 値の推定法
を対象として-、構造工学シンポジウム論文集 1994年3月、pp. 261-267.
- 48)堤和敏、谷明勲、河村廣、松林隆道、片岡裕美:ニューラルネットワークを利
用した構造計画段階での連層壁応力度推定システムの研究、日本建築学会構造
系論文集、NO. 456、1994年2月号、pp. 81-86.
- 49)堤和敏、河村廣、谷明勲:ニューラルネットワークを利用した「設計ノウハウ」
のシステム化に関する研究-構造部材断面推定を対象として-、日本建築学会
構造系論文集(現在投稿中)

第 2 章 ニューラルネットワーク

第 1 節 緒 言	- 25 -
第 2 節 ニューラルネットワークの基本原理	- 26 -
1. 基本原理	- 26 -
2. ニューラルネットワークの基本構成	- 27 -
3. バックプロパゲーションアルゴリズム	- 29 -
4. 線形重回帰分析との比較	- 32 -
第 3 節 結語	- 33 -
【参考文献】	- 34 -

第1節 緒言

ニューロ研究は、人間の神経回路に着目し、神経回路をどのように数学的に解明していくかという点から出発した。1943年、McCullochとPitts¹⁾は、ニューロンの数式モデルとして線形しきい値素子を用い、この素子を用いて情報処理が可能であることを提案した。1949年には、Hebb²⁾が、教師信号に対するニューロンの差に比例してニューロンの結合重みを逐次更新することにより、ニューロン出力を教師信号に近づけていく学習則を提案した。1958年、Rosenblatt³⁾は、パーセプトロンと呼ばれるニューロモデルを発表し、パターン認識や汎化能力等の有効な概念を証明した。この後もニューロ研究は活発に進められ1960年代はニューロ研究の第1次ブームとも言われているが、1969年Minsky⁴⁾らによりパーセプトロンの限界を指摘され、このブームも鎮静化した。しかし、1970年代後半には、RumelhartとMcClellandを中心に、ニューラルネットワークの考え方を認知と学習のモデルとして用いた認知心理学的研究がスタートし、ニューロ研究が再び活発化してきた。

1982年Hopfield⁵⁾は、連想記憶のモデルと統計物理学とを結び付け、ネットワークの解析にエネルギー最小化の概念を導入した。また、「巡回セールスマン問題」に見られる組み合わせ最適化問題に対して、ニューラルネットワークが有効であることを示した。また、Hinton等により、確率的に動作するニューラルネットワーク：ボルツマンマシンが提案された。1986年、Rumelhart等が、多層パーセプトロンにおける誤差逆方向き伝搬学習法⁶⁾を発表し、第2次ニューロ研究ブームの引き金となった。

最近では、応用技術の研究がすすみ、ニューラルネットワークの学習機能を利用して、音声処理⁷⁾、さらに、欠陥同定⁸⁾や構造システムの最適化⁹⁾、非線形挙動のモデリング¹⁰⁾や壁応力度の推定¹¹⁾といった構造工学の分野でも応用されている。¹²⁾

本章では、ニューラルネットワークの基本原理について述べる。

第2節 ニューラルネットワークの基本原理

1. 基本原理

ニューラルネットの基本となる素子は、図-2. 1(a)に示される多入力1出力の素子であり、ニューロン、ニューロユニット、ユニット等呼ばれるが、本論では、単にユニットと呼ぶことにする。

ユニットへの入力値を x_1, x_2, \dots, x_n 、それぞれの入力値に対するユニットの重み係数を w_1, w_2, \dots, w_n 、ユニットでのしきい値を θ とすると、ユニットからの出力値 y は、下式で表される。

$$y = F\left(\sum_{i=1}^n x_i w_i - \theta\right) \quad (2.1)$$

$F(x)$ は、ユニットの入出力特性を示し、図-2. 2に示す特性がよく用いられる。図-2. 2(a)の場合は、入力の重み付き総和がしきい値 θ を越えると、出力パルスが発生することを示し、マッカロとピッツのモデル¹⁾と呼ばれている。ここで仮に、常に1の値をとる入力 x_0 を新たに考え、この0番目の入力に対するユニットの重みを $-\theta$ と定義すると、式(2.1)は、下式のように簡略化でき、図-2. 1(b)の様に図示される。このとき w_0 は、バイアスと呼ばれる。

$$y = F\left(\sum_{i=0}^n x_i w_i\right) \quad (2.2)$$

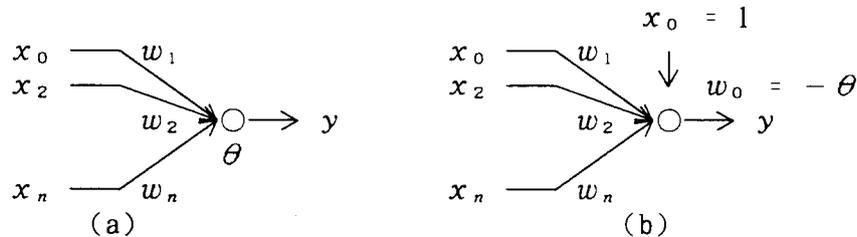


図-2. 1 ニューラルネットの基本素子

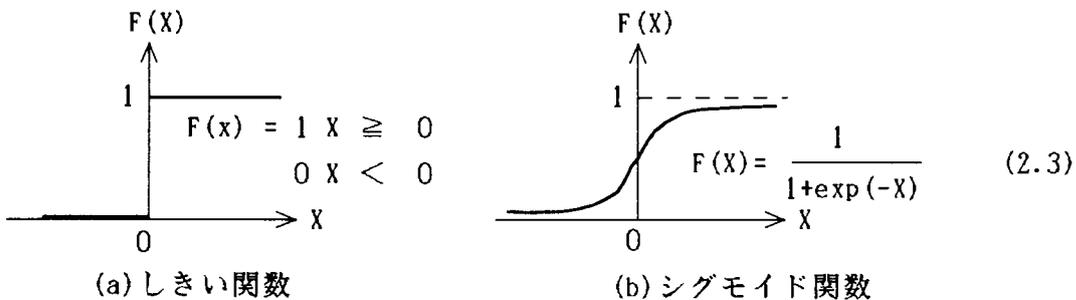


図-2. 2 入出力関数

2. ニューラルネットワークの基本構成

ニューラルネットのユニットが相互に結合し合ってニューラルネットワークが構成される。主なネットワークの構成を以下に述べる。

(1) 階層型ネットワーク

Rosenblatt³⁾により提案されたもので、パーセプトロン型ネットワークとも呼ばれている。この構成は図-2.3に示すように、入力層、中間層、出力層からなり、それぞれの層は1個以上のユニットから成り立っている。あるユニットは、その層内のユニットとの結合はなく、その属する層の一つ下の層に属する全てのユニットの出力を入力として受け取り、その情報を加工して一つ上の層に属する全てのユニットに出力する。このようにして、入力層に入力された情報が、中間層を経るに従って加工処理されて出力層に伝達される。

現在、工学的応用において最も利用されているネットワークである。

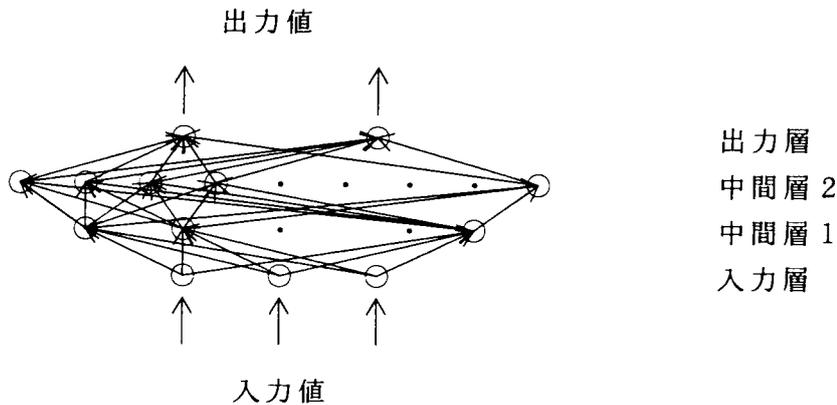


図-2.3 階層型ニューラルネットワーク

(2) 相互結合型ネットワーク

このネットワークは、階層型ネットワークのような階層構造ではなく、図-2.4に示すように相互に結合し合っているようなネットワークである。従って、階層型ネットワークのように情報伝達が、入力側から出力側へ一度だけ加工処理されて終了するのではなく、ある初期状態から出発して、ある安定な平衡状態に達するまでネットワークの状態変化が続行される。

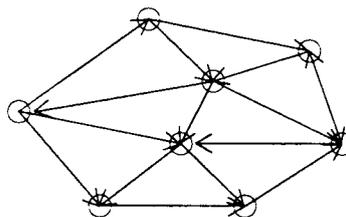


図-2.4 相互結合型ネットワーク

今、ネットワークのある状態 α における関数 E を考える。

$$E[\alpha] = F\left(\sum_{i=0}^n x_i[\alpha] w_i[\alpha]\right) \quad (2.4)$$

$x_i[\alpha]$: 状態 α でのユニットへの入力値 $w_i[\alpha]$: 状態 α でのユニットの重み係数

ネットワークの平衡状態において E が極小値をとるとき E は、ネットワークのエネルギーと呼ばれる。従って、最適化問題の目的関数が E になるようなネットワークを作ることが出来れば、最適化問題はニューラルネットワークによって解くことが出来ることになる。⁵⁾

このネットワークは、巡回セールスマン問題などの組み合わせ最適化問題に利用されている。

3. バックプロパゲーションアルゴリズム (誤差逆伝搬法) ^{*)}

ニューラルネットワークの学習アルゴリズムである誤差逆伝搬法について述べる。今、M層の階層型ニューラルネットワークを考える^{1,3)}と、第m層i番目のユニットの入力の総和 ${}_m x_i$ は下式で表される。

$${}_m x_i = \sum_{j=0}^{m-1} {}_m w_{ij} {}_{m-1} y_j \quad (2.5)$$

${}_m w_{ij}$: m層のi番目のユニットへの重み係数
 ${}_{m-1} y_j$: m-1層のj番目のユニットの出力
 ${}_{m-1} N$: m-1層のユニットの数

第m層i番目のユニットの出力 ${}_m y_i$ は下式で表される。

$${}_m y_i = F({}_m x_i) \quad (2.6)$$

$F(x)$: 入出力関数で式(2.3)で示されるシグモイド関数を使用する。

第0層は入力層であり、 ${}_0 y_i$ ($i=1 \sim {}_0 N$) は、外部から与えられる入力信号を示す。学習パターンとして一組の入力 ${}_0 y_i$ ($i=1 \sim {}_0 N$) と教師信号 t_i ($i=1 \sim {}_m N$) が与えられている場合を考える。

入力信号が与えられれば、式(2.5)、(2.6)を使用して、重み係数を与えることにより出力層に向かって順次各層のユニット出力を求めることが出来る。

重み係数は、通常初期値として乱数で与えられているために、最初の計算では、求めた出力値と教師信号の値とは、大幅に異なった値となっている可能性が高い。

今、教師信号とニューラルネットの出力値との2乗誤差の総和を E とすると、学習とは、この E を暫時小さくするような重み係数を求めることと言い替えることが出来る。

$$E = 0.5 \sum_{i=1}^{{}_m N} ({}_m y_i - t_i)^2 \quad (2.7)$$

E を小さくするような重み係数を求めるために、 E のネットワークに含まれる全ての重み係数に関する偏微分 $\frac{\partial E}{\partial {}_m w_{ij}}$ ($m=1 \sim M, i=1 \sim {}_m N, j=0 \sim {}_{m-1} N$) を求める。

この値が正の値をとる場合には、誤差が増加することを示し、負の値をとるとき誤差が減少することを示している。従って、重み係数を下式に示す修正式に従って更新していけば、徐々に誤差が減少することになる。下式で、重み更新係数 $\eta \cdot \alpha$ を考慮することによって、収束速度を早めることが出来るが、あまり大きくすると不安定になる。

$${}_m w_{ij}[n+1] = {}_m w_{ij}[n] - \eta \frac{\partial E}{\partial {}_m w_{ij}} + \alpha ({}_m w_{ij}[n] - {}_m w_{ij}[n-1]) \quad (2.8)$$

n : 学習サイクルを表すパラメータ
 η : 重み更新係数 ($\partial E / \partial {}_m w_{ij}$ に比例)
 α : 重み更新係数 (一学習前の重み更新係数変化に比例)

次に、 $\frac{\partial E}{\partial {}_m w_{ij}}$ を具体的に評価する。式(2.7) より

$$\frac{\partial E}{\partial {}_m y_i} = {}_m y_i - t_i \quad (i=1 \sim {}_m N) \quad (2.9)$$

また、
$$\frac{\partial E}{\partial_M x_i} = \frac{\partial E}{\partial_M y_i} \cdot \frac{\partial_M y_i}{\partial_M x_i} \quad (2.10)$$

$\frac{\partial_M y_i}{\partial_M x_i}$ は、入出力関数 $F(x)$ の微分であり、式(2.3)より

$$F'(x) = \frac{e^{-x}}{(1+e^{-x})^2} = F(x) \{1-F(x)\} \quad (2.11)$$

従って、式(2.9)、(2.10)、(2.11) より

$$\frac{\partial E}{\partial_M x_i} = ({}_M y_i - t_i) {}_M y_i (1-{}_M y_i) \quad (2.12)$$

同様にして

$$\frac{\partial E}{\partial_M w_{ij}} = \frac{\partial E}{\partial_M x_i} \cdot \frac{\partial_M x_i}{\partial_M w_{ij}} \quad (2.13)$$

式(2.5)より

$$\frac{\partial_M x_i}{\partial_M w_{ij}} = {}_{M-1} y_j \quad (2.14)$$

よって、式(2.12)、(2.13)、(2.14)より

$$\frac{\partial E}{\partial_M w_{ij}} = ({}_M y_i - t_i) {}_M y_i (1-{}_M y_i) {}_{M-1} y_j \quad (2.15)$$

となる。式(2.15)の右辺は、予め学習パターンとして与えられた教師信号と、入力パターンを与えることによって計算されるユニット出力からなっており、全て計算可能である。

中間層ユニットについても同様に行うことが出来る。

M-2層を示す添字を k、M-1層を示す添字を j とする。

評価関数 E の M-1層の j 番目のユニット出力値 ${}_{M-1} y_j$ ($j=1 \sim {}_{M-1} N$) に関する偏微分は

$$\frac{\partial E}{\partial_{M-1} y_j} = \sum_{i=1}^{mN} \frac{\partial E}{\partial_M x_i} \cdot \frac{\partial_M x_i}{\partial_{M-1} y_j} = \sum_{i=1}^{mN} \frac{\partial E}{\partial_M x_i} {}_M w_{ij} \quad (2.16)$$

$\frac{\partial E}{\partial_M x_i}$ は、出力層への重みに関する偏微分を行った際に式(2.12)で既に求めている。次に、 $\frac{\partial E}{\partial_{M-1} x_j}$ は、

$$\frac{\partial E}{\partial_{M-1} x_j} = \frac{\partial E}{\partial_{M-1} y_j} \cdot \frac{\partial_{M-1} y_j}{\partial_{M-1} x_j} = \frac{\partial E}{\partial_{M-1} y_j} {}_{M-1} y_j (1-{}_{M-1} y_j) \quad (2.17)$$

従って、E の重み係数 ${}_{M-1} w_{jk}$ に関する偏微分は、

$$\frac{\partial E}{\partial_{M-1} w_{jk}} = \frac{\partial E}{\partial_{M-1} x_j} \cdot \frac{\partial_{M-1} x_j}{\partial_{M-1} w_{jk}} = \frac{\partial E}{\partial_{M-1} x_j} {}_{M-2} y_k \quad (2.18)$$

となり、以下同様の手順で、各層 m ($m=M-2, \dots, 1$) のユニットへの重みに関する偏微分を、順次入力層の方向(逆方向)へ、層ごとに計算して求めることが出来る。

以上を整理すると重み修正アルゴリズムは、下記の通りである。

- 1) 重み係数の初期値を乱数を用いて設定する。
- 2) 学習データ y_i ($i=1 \sim N$) をニューラルネットに与え、入力層から出力層に向かって、式(2.5), (2.6)を用いて各層のユニット出力 y_{mj} ($m=1 \sim M, j=1 \sim N$) を求める。
- 3) 評価関数 E の重み係数 w_{mj} ($m=1 \sim M, j=1 \sim N$) に関する偏微分 $\frac{\partial E}{\partial w_{mj}}$ を式(2.12)~(2.21)を使って求める。
- 4) 重み係数の更新を式(2.8)により行う。
- 5) E が充分小さくなるまで2)~4)を繰り返す。

以上は、学習データが一組の場合であったが、学習データが複数あった場合も同様にして重み係数を更新することが出来る。

学習データとして L 組の入力 $y_{i,l}$ ($i=1 \sim N, l=1 \sim L$) と教師信号 $t_{i,l}$ ($i=1 \sim N, l=1 \sim L$) が、与えられたとき教師信号とニューラルネットの実際の出力との2乗誤差の総和 E は、

$$E = \frac{1}{2} \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^N (y_{i,l} - t_{i,l})^2 = \sum_{l=1}^L E_l \quad (2.19)$$

となり、各層の重み係数に関する偏微分は、各学習データの組に対する偏微分の和として表される。

$$\frac{\partial E}{\partial w_{mj}} = \sum_{l=1}^L \frac{\partial E_l}{\partial w_{mj}} \quad (2.20)$$

右辺の $\frac{\partial E_l}{\partial w_{mj}}$ は、一組の学習データの時に述べた方法で計算を行うことができる。

一括修正方式は、全学習データにわたって総和をとり式(2.8)により重み係数を更新する方法であり、複数の学習データがある場合の正統法である。

一方、逐次修正方式は、一組ごとの評価関数 E に対して重み更新を行い、各学習データに対する E が全て充分小さくなるまで重み更新を繰り返す方法である。

バックプロパゲーションアルゴリズムそれ自体は、一般性の高い優れたアルゴリズムであるが、個々の問題に応用する場合には次のような問題点があることが指摘されている。¹³⁾

- 1) 中間層の数、各層のユニット数、収束速度を決める重み更新係数 $\eta \cdot \alpha$ を決める必要があるが、それらを決める系統的な手法はなく、問題に応じて経験的に決めなければならない。
- 2) バックプロパゲーションアルゴリズムは極小値探索手法であり、評価 E が極小値を多く含む場合、大域的な最小値に収束しない可能性がある。
- 3) ニューラルネットワークを期待通り動作させるためには、経験に基づいた職人芸的な要素が必要とされる。

4. 線形重回帰分析との比較

統計的予測手法として重回帰分析¹⁴⁾がある。重回帰分析では、最初にデータをフィットさせる関数式を選定しなければならない。この関数式に対して平均2乗誤差評価に応じてフィッティングが実行される。従って、この関数式を簡単に特定することができれば、重回帰分析でも十分に推定が可能であるが、特定することが難しい場合は、推定は困難となる。

一方、ニューラルネットワークでは、関数式を特定する必要はなく、階層構造（中間層数、中間ユニット数）や打ち切り誤差等を設定するだけでよく簡単に利用することができる。中間層数やユニット数の組み合わせに関する系統的な手法は存在しないが、中間層数1層でも、ユニット数を適当な数用いれば任意の関数が近似できると証明されているし、また、経験的に中間層のユニット数は入力層のユニット数の2倍程度有れば良いとされている。¹⁵⁾

いま、線形重回帰分析を例にとると p 個の説明変数と1個の目的変数に対して線形重回帰式は、下式で示される。

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^p a_i x_i \quad (2.21)$$

y : 目的変数

a_i : 偏回帰係数

x_i : 説明変数

この式は(2.1)式から推測されるように、入出力関数を $F(x) = x$ とした場合の中間層が無いニューラルネットワークと等価である。従って、線形重回帰分析は、ニューラルネットワークに包含されると考えられる。

ニューラルネットワークでは、入出力関数にシグモイド関数を使うことによっても、また中間層を追加することによっても、入出力データ間の非線形性を考慮することが可能である。

資料-2で、重回帰分析による推定値と実際値との関係、また、中間層が無いニューラルネットワークによる推定値と実際値との関係について考察を行っているが、その結果でも、重回帰分析と中間層の無いニューラルネットワークの結果は、ほぼ一致していることがわかる。

実際の工学の問題では、純粋な線形問題は少なく、何等かの非線形性を持っていると思われる。その様な非線形問題に対して重回帰分析で精度をあげるためには、その問題に適した非線形関数を見つけだし高度な数式を扱う非線形回帰分析を行うか、入力パラメータそのものを見直しを行う必要がある。しかし、ニューラルネットワークでは、中間層の層数やユニット数を変えることによって精度をあげることができ、実用性が高い。

第3節 結語

ニューラルネットワークは、人間の神経回路を模したネットワークを用いて、いくつかの実例を教師信号として自己学習する事により、任意の入力に対して出力を行う工学的情報処理システムである。

また、ニューラルネットワークは、統計的手法である線形重回帰分析を包含するものであり、線形重回帰分析と比較して容易に精度を確保することができ、実用性が高いシステムである。

階層型ニューラルネットワークは、ユニットを階層的に組み合わせていき、各ユニットを結合させる事により、複雑で非線形的な現象をも表現することができる。ニューラルネットワークでの知識獲得は、対象とする現象（入力信号）とその結果（教師信号）を組として、多くの事例を学習する事によって行われる。

したがって、知識が明示的に表現されなくても、知識が盛り込まれている事例（図面も含む）が有れば、その事例を基に知識獲得を行う事が出来、「経験的非明示知識」の獲得に有効である。

また、学習によって得られた知識は、各ユニット間の重み係数として表現されるために、一旦学習を終了してしまえば、新たなデータに対する推定は、通常のマトリックス計算と同じ処理となり、通常のプログラム言語でシステム化することが出来る。したがって、ニューラルネットワークを利用して「経験的非明示知識」を獲得する事により「一般的知識」、「経験的明示知識」との統合化が容易となり、「設計ノウハウ」のシステム化が可能である。

【参考文献】

- 1) McCulloch, W. and Pitts, W.; A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity, Bulletin of Mathematical Biophysics 9, pp.127-147, 1943
- 2) Hebb, D.; The organization of behavior, New York: Wiley, 1949
- 3) Rosenblatt, F.; The perceptron: a probabilistic model for information storage and organization in the brain, Psychological Review 65, pp. 386-408, 1958
- 4) Minsky, S. and Papert, S.; Perceptrons, MIT Press, 1969
- 5) Hopfield, J.; Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities, Proceedings of the National Academy of Sciences 79, pp.2554-2558, 1982
- 6) Rumelhart, D., Hinton, G. and Williams, R.; Learning representations by back-propagation errors, Nature 323, pp.533-536, 1986
- 7) Kohonen, T.; The neural phonetic typewriter, IEEE Computer, 21, 3, pp.11-22, 1988
- 8) 望月義彦、矢川元基、吉村忍、”階層型ニューラルネットワークと計算力学に基づく逆問題解析法（学習・推定メカニズムの検討と定量的欠陥同定への適用）”、日本機械学会論文集、57-540(A), (1991), pp.1922-1929.
- 9) 岸、有馬、前田、”神経回路網モデルによる船体中央横断面の離散的最適設計”、関西造船協会誌、214, (1990), pp.11-17.
- 10) 山本広祐、”ニューラルネットワークによる履歴挙動のモデリングと数値解析への応用”、土木学会構造工学論文集、38A(1992), pp.85-94.
- 11) K. Tsutsumi, A. Tani, H. Kawamura, T. Matsubayashi, H. Kataoka, K. Komono and Y. Fukushima; "Study of a Computer System for Evaluation of Bearing Wall Stresses in Structural Planning," Computing in Civil and Building Engineering, Jun., 1993, pp.817-824.
- 12) 矢川元基編、「ニューラルネットワーク」、計算力学とCAEシリーズ12、培風館
- 13) 八名和夫、鈴木義武、「ニューロ情報処理技術」、海文堂
- 14) 奥野忠一・久米均・芳賀敏郎・吉澤正、「多変量解析法」日科技連
1973年2月 pp.25-157.
- 15) 市川紘、「階層型ニューラルネットワーク 非線形問題解析への応用」、共立出版、1993年6月、pp.29-30.

第 3 章

平均建物重量の推定に関する研究

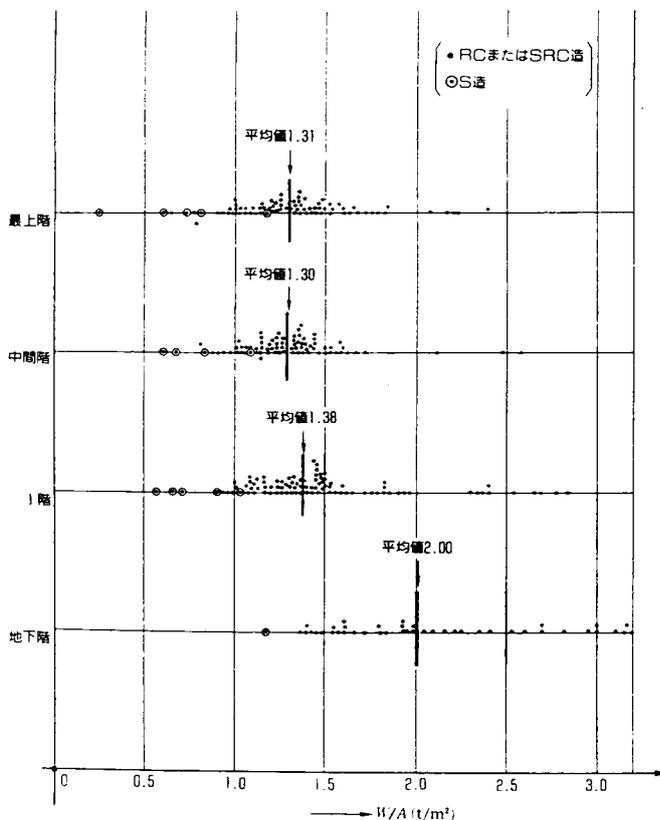
第 1 節 緒 言	- 35 -
第 2 節 ニューラルネットワークによる平均建物重量の推定	- 37 -
1. 平均建物重量に影響を及ぼす要因	- 37 -
2. 入力データ・教師信号のモデル化	- 39 -
3. 学習用データと検証用データ	- 42 -
4. 推定結果	- 45 -
5. 考察	- 51 -
第 3 節 結 言	- 52 -
【参考文献】	- 54 -

第1節 緒言

本章では、構造計画段階における部材断面推定のシステム化を行う上で、「経験的非明示知識」である「平均建物重量」についてニューラルネットワークによる知識獲得手法とその推定精度について考察する。

田中等¹⁾は、この床面積当たりの平均建物重量をRC・SRC・S造の108設計例について調査を行っている。(図-3.1) この図からもわかるように、RC・SRC造の場合の床面積当たりの平均建物重量は、大部分は1.0t/m²~1.5t/m²の間に集中しているが、建物の形状等によっては0.6t/m²~3.0t/m²の間に広く分布している。一方S造については例が少ないが、それでも0.3t/m²~1.1t/m²の間に広く分布している。このように、建物の形状によって非常にバラツキの大きい平均建物重量を仮定する事は、豊富な設計経験が必要である。

従来、このような設計者の経験に依存するものについては、システム化は困難であったが、新しいコンピュータのパラダイムであるニューラルネットワークを用いる事によって可能となると思われる。



このような経験・ノウハウをシステム化することができれば、経験を積んでいない若手の設計者でも、精度の良い部材断面を仮定する事が可能となり、品質の高い構造設計を行う事が出来るようになると思われる。

以上のような基本的認識の下で、本章では、この設計者の経験と勘によって評価していた平均建物重量を建物形状や用途等をパラメータとしてニューラルネットワークを用いて推定する方法を提案している。

図-3.1 ラーメン構造の単位当たりの荷重¹⁾

第3章 平均建物重量の推定

第2節では、地下階をのぞく地上部の全床面積に対する平均建物重量の推定を行っている。最初に、平均建物重量に影響を与える要因を分析し、ニューラルネットワークの入力パラメータを決定し、ニューラルネットワークの階層構造を設定する。

次に、過去の設計例の中で学習に用いる設計例と検証に用いる設計例を選び出し、それぞれの設計例に対して入力・出力パラメータの値を算定し、学習データ・検証データを作成する。学習に用いる設計例は、(株)フジタで、1992年の1年間に当社保有の『B U I L S Y S - V 3』²⁾を使用して実際に設計、または計画を行った物件25例を採用した。また、検証に用いる設計例は、1992年以外の期間に『B U I L S Y S - V 3』を使用して実際に設計または計画を行った物件10例を採用した。

学習データをこの学習用設計例の中から選び出し、ニューラルネットワークに学習させ、得られた知識を用いて検証データに対して、平均建物重量の推定を行った。最後に、この推定した平均建物重量と実際に荷重拾いを行って算定した平均建物重量とを比較して、この提案の検証を行った。

第3節では、検証結果に基づき考察及び結論を述べる。

第2節 ニューラルネットワークによる平均建物重量の推定

ニューラルネットワークは第2章で述べたように、人間の神経回路を模した工学的情報処理システムであり、ある入力信号に対して、特定の出力を返すシステムである。従って、入力信号を何にするかが重要な問題となる。

ベテラン設計者が平均建物重量を仮定する際には、外見上は即座に数値を出しているように見えても、実際は、建物形状（スパンが大きい、壁が多い、形状が複雑等）・用途（倉庫、事務所、住宅等）・構造種別（RC造、SRC造、S造等）を見て一瞬の内に判断を行っていると思われる。従って、これらの平均建物重量を仮定する際に設計者が判断の根拠としている要素を分析し、これらを入力信号とする事により、ニューラルネットワークは精度の良い学習を行う事が出来ると思われる。

1. 平均建物重量に影響を及ぼす要因

平均建物重量は、地下階を除く地上部の建物重量を地上部の総床面積で除したものと定義する。

地下階を除いている理由は、通常、地下階は耐力壁が多く、部材断面寸法決定の支配的な要因にはならず、地上部の最下層で断面が決定される場合が一般的であるためである。

建物重量を構成している荷重は、① スラブ重量、② 柱重量、③ 大梁重量、④ 小梁重量、⑤ 壁重量、⑥ 塔屋階重量、⑦ その他設備荷重、そして⑧ 積載荷重がある。それぞれの荷重について、床面積当たりの荷重変動の要因を建物形状・用途との関係で検討してみる。

①スラブ重量は、スラブ厚と仕上げ荷重によって構成される。スラブ厚は、スパン長の違いは小梁の本数で対処可能であり、建物用途によって決定される場合が多い。一方、仕上げ荷重も建物用途によって、ほぼ決定される。

②柱重量は、柱断面によって支配される。柱断面は、柱の負担軸応力度とせん断応力度によって決定されるケースが多い。軸応力度は、建物階数とその層の位置、および柱の負担面積によって変動する。せん断応力度は、柱の負担面積および耐力壁のせん断力負担割合による影響が大きい。従って、建物階数と、その層の位置、また耐力壁がどの程度存在するかが入力パラメータとして必要な要素となる。

③大梁重量は、大梁断面によって支配される。大梁断面は、大梁の負担曲げモーメントと負担せん断応力度によって決定されるケースが多い。負担曲げモーメントは、柱の負担せん断力に依存しており、建物階数、その層の位置および耐力壁のせん断力負担割合による影響が支配的である。また、せん断応力度は、スパン長に依存している。従って、建物階数、その層の

位置、耐力壁がどの程度存在するか、またスパン長等が入力パラメータとして必要な要素となる。

- ④小梁重量は、小梁断面によって支配される。小梁断面は、スパン長と、建物用途による影響が支配的である。
- ⑤壁重量は壁量によって決定され、壁量は建物用途に依存している。
- ⑥塔屋階重量・⑦その他設備荷重は、建物規模、建物用途に依存している。
- ⑧積載荷重は、建物用途に依存している。

また、一般的にスパン長、スパン数は同じであっても平面形状が複雑なほど平均建物重量は重くなる傾向にある。

これらの傾向を考慮すると、建物の平均建物重量を推定するためには、

- ①地上部の構造種別、
- ②建物地上部層数、
- ③地上部の主な用途、
- ④柱一本当たりの床面積、
- ⑤耐力壁の存在率、
- ⑥平面形状特性

をパラメータにすれば良いと思われる。

厳密には、その他の因子の影響も考えられ、因子分析等の高度な手法により分析を行う事も考えられるが、ニューラルネットワークは、その様な高度な手法を採用する必要はなく、設計者の経験に基づいてパラメータを設定する事が出来る点に実務利用を行う上で大きなメリットがある。

2. 入力データ・教師信号のモデル化

入力情報は、全ての建物に適用できるように一般化し、数値化を行う。

数値化に当たっては、それぞれのパラメータの値が[0.2]程度となるように規
準化を行った。一般化の手法を次ぎに述べる。

① 地上部の構造種別

層の構造種別をRC造、SRC造、S造に分類し、それぞれの構造種別に対
して、平均的な床面積当たりの建物重量（構造種別係数と呼ぶことにする）
を設定する。

表-3.1 構造種別と構造種別係数

構造	RC造	SRC造	S造
係数	1.2	1.3	0.8

また、柱と梁で構造種別が異なる場合はそれぞれの構造種別係数の平均値
を取る。

地上部の構造種別としては、層の構造種別係数に層の床面積を乗じた値を
地上部の全床面積で除した値(RST)を採用する。

$$RST = \sum (st_i * A_i) / \sum A_i$$

RST : 地上部構造種別係数

st_i : i層の構造種別係数 i=1~N_{zu}

A_i : i層の床面積 (m²) i=1~N_{zu}

N_{zu} : 地上層の層数

RSTの値は、0.8~1.3の値となるので、入力値(IN1)としては、値の幅を広
くするために下式のようにモデル化した。

$$IN1 = (RST - 0.7) * 2.0 \tag{3.1}$$

② 建物地上階数

建物地上部の階数に0.1を乗じたものを入力値 IN2 とする。

$$IN2 = N_{zu} * 0.1 \tag{3.2}$$

N_{zu} : 地上層の層数

③ 地上層の主な用途

層の用途としては、その層で最も支配的な用途の地震時積載荷重とその
用途での仕上げ荷重を加算したものを使用する（用途係数と呼ぶ）。

表-3.2 用途と地震時積載荷重一覧

住居	事務室	教室	店舗	集会(固定)	集会(その他)	車庫
60	80	110	130	160	210	200

第3章 平均建物重量の推定

地上部全体としての用途係数(LD) は、各層の用途係数(LDi)に各層の床面積を乗じた値を地上部の総床面積で除した値を採用する。

$$LD_i = L_{si} + f_i$$

$$LD = \sum (LD_i * A_i) / \sum A_i$$

LD : 地上部の用途係数 (kgf/m²)

LD_i : i層の用途係数 (kgf/m²)

L_{si} : i層の代表的な地震時用積載荷重 (kgf/m²)

f_i : i層の代表的な仕上げ荷重 (kgf/m²)

A_i : i層の床面積 (m²) i=1~Nzu

このLDの値は、0 ~ 600 kgf/m² 程度の値になるので入力値(IN3)としては300kgf/m² で除した値を使う事にする。

$$IN3 = LD / 300 \quad (3.3)$$

④ 柱一本当たりの負担面積

柱1本当たりの負担面積とは、地上部の全床面積を地上部の柱本数で除したものである。

$$AC = \sum A_i / \sum NC_i$$

AC : 地上部の柱1本当たりの負担面積 (m²)

NC_i : i層の柱本数

A_i : i層の床面積 (m²) i=1~Nzu

このACは、5~70 m² 程度の値となるので、入力値(IN4)としては、50 m² で除した値を使用する事にした。

$$IN4 = AC * 0.02 \quad (3.4)$$

⑤ 耐力壁の存在率

X, Y両方向で地上部の全スパン数に対して、耐力壁の存在するスパン数の比を採用する。

$$RW = \sum WSX_i / \sum SX_i + \sum WSY_i / \sum SY_i$$

RW : 地上部の耐力壁の存在率

WSX_i : i層のX方向の耐力壁が存在するスパン数

WSY_i : i層のY方向の耐力壁が存在するスパン数

SX_i : i層のX方向の全スパン数

SY_i : i層のY方向の全スパン数 i=1~Nzu

RW の値は、0~2.0の範囲にあるので入力値(IN5)としてはこの値をそのまま使用する。

$$IN5 = RW \quad (3.5)$$

⑥ 平面形状の特性

地上部の建物外周面積と、地上部の総床面積の比を採用する。

$$RP = \sum (LP_i * H_i) / \sum A_i$$

RP : 地上部の平面形状特性

LP_i : i層の建物外周長さ (m)

H_i : i層の階高 (m)

A_i : i層の床面積 (m²) i=1~Nzu

RPの値は、0.1~2.5程度の範囲にあるので、入力値(IN6)としてはこの値をそのまま採用する。

$$IN6 = RP \quad (3.6)$$

教師信号は、地上部の地震時建物総重量を地上部の総床面積で除した値を採用する。

$$AW = \sum W_i / \sum A_i$$

AW : 地上部の床面積当たりの平均建物重量 (tf/m²)

W_i : i層の建物地震時層重量 (tf)

A_i : i層の床面積 (m²) i=1~Nzu

AWの値は 0.6~2.5 tf/m² 程度の値となる。ニューラルネットワークの制約として、出力は [0,1] の範囲に限られるために、教師信号(OUT)としては、下記のように規準化した。

$$OUT = (AW - 0.5) * 0.5 \quad (3.7)$$

3. 学習用データと検証用データ

ニューラルネットワークに学習させる学習データは、学習用設計物件の中だけから選び、検証用設計物件は考慮しない。こうする事により、検証の一般性を保証する。

学習用設計物件について、2. で述べた入力データと教師信号、及び実際の平均建物重量値の一覧を表-3.3に示す。

表-3.3 学習用物件に対する入力データ・教師信号および平均建物重量一覧

物件	入力データ						教師信号	平均建物重量 tf/m ²
	IN1	IN2	IN3	IN4	IN5	IN6		
1	0.2	0.4	0.51	0.67	0.01	0.70	0.38	1.25
2	1.0	0.8	0.34	0.25	1.29	1.27	0.52	1.54
3	1.0	0.4	0.72	0.98	0.01	0.34	0.37	1.24
4	1.1	0.7	0.45	0.73	0.29	0.39	0.37	1.24
5	1.0	1.1	0.26	0.57	1.00	0.47	0.34	1.18
6	1.2	1.0	0.54	0.76	0.01	0.58	0.31	1.12
7	1.2	1.0	0.58	0.55	0.01	0.62	0.44	1.38
8	0.6	0.4	0.40	0.66	0.01	0.47	0.20	0.89
9	1.0	1.3	0.25	0.32	0.98	0.93	0.43	1.36
10	0.2	0.4	0.40	0.22	0.01	1.02	0.16	0.81
11	1.0	1.0	0.42	0.57	1.00	0.67	0.46	1.42
12	1.2	0.8	0.29	0.70	0.62	0.76	0.28	1.06
13	1.0	0.9	0.26	0.49	0.44	0.62	0.41	1.32
14	1.2	0.8	0.30	0.65	0.86	0.53	0.43	1.36
15	0.2	0.1	0.60	1.03	0.01	0.28	0.08	0.66
16	1.2	1.4	0.37	0.95	0.24	0.40	0.28	1.05
17	1.2	0.8	0.39	0.31	0.88	1.69	0.85	2.20
18	1.1	0.4	0.84	0.72	0.01	0.55	0.69	1.87
19	1.0	0.6	0.28	0.65	0.01	0.35	0.45	1.39
20	0.7	1.1	0.56	0.53	0.01	0.95	0.42	1.34
21	1.0	0.4	0.61	1.08	0.23	0.17	0.31	1.11
22	1.0	1.4	0.33	0.29	0.04	1.06	0.80	2.09
23	0.2	1.4	0.35	0.52	0.03	0.76	0.38	1.25
24	0.2	0.5	0.71	0.51	0.01	0.55	0.16	0.81
25	0.2	0.8	0.44	0.50	0.01	0.64	0.24	0.97

一方、検証用設計物件について、2. で述べた入力データ、及び実際の平均建物重量値の一覧を表-3.4に示す。

表-3.4 検証用物件に対する入力データおよび平均建物重量一覧

物件	入力データ						平均建物重量 tf/m ²
	IN1	IN2	IN3	IN4	IN5	IN6	
26	1.0	0.7	0.19	0.65	1.00	0.47	0.97
27	0.2	0.9	0.27	0.12	0.01	2.28	0.84
28	1.2	1.2	0.22	0.63	0.79	0.67	1.09
29	1.2	1.2	0.22	0.81	1.00	0.45	1.04
30	1.0	0.3	0.33	0.44	0.80	0.99	1.78
31	1.0	0.4	0.32	0.46	0.17	0.60	1.08
32	0.2	0.9	0.39	0.52	0.01	0.72	1.22
33	1.2	0.3	0.60	0.97	0.32	0.13	1.04
34	1.0	0.5	0.78	0.53	0.27	0.52	1.64
35	1.0	0.4	0.23	0.58	0.38	0.37	0.90

図-3.2に、それぞれの入力パラメータに対する学習用設計物件と検証用物件との関係を示す。図中、○印が学習用設計物件であり、◎印が検証用設計物件である。横軸は、各パラメータに対する入力値、縦軸は、各物件の床面積当たりの平均建物重量である。

検証は、それぞれの学習ケースに対して、下記の3ケースを行った。

- ① 再現性の検証 : 学習データに対する検証
- ② 内挿性の検証 : 学習用設計物件の中で、学習に使用しなかった物件に対する検証
→ 学習データを選定する際にこれらのデータをも考慮しているという意味で内挿に当たる。
- ③ 外挿性の検証 : 検証用物件に対する検証。
→ 学習データの選定にこれらのデータを考慮していないという意味で外挿に当たる。

また、検証の手順は下記の通りである。

- ① それぞれの検証モデルに対して求めた6個の入力データをニューラルネットワークに入力し、出力結果を求める。
- ② ニューラルネットワークの出力結果(OUT)は、平均建物重量を[0,1]の範囲に規準化したものであるから、式(3.7)より下式によって、ニューラルネットワークの結果を平均建物重量に変換する。

$$AW = OUT * 2.0 + 0.5 \quad (3.8)$$

- ③ ニューラルネットによって求めた平均建物重量と実際の平均建物重量とを比較する。

第3章 平均建物重量の推定

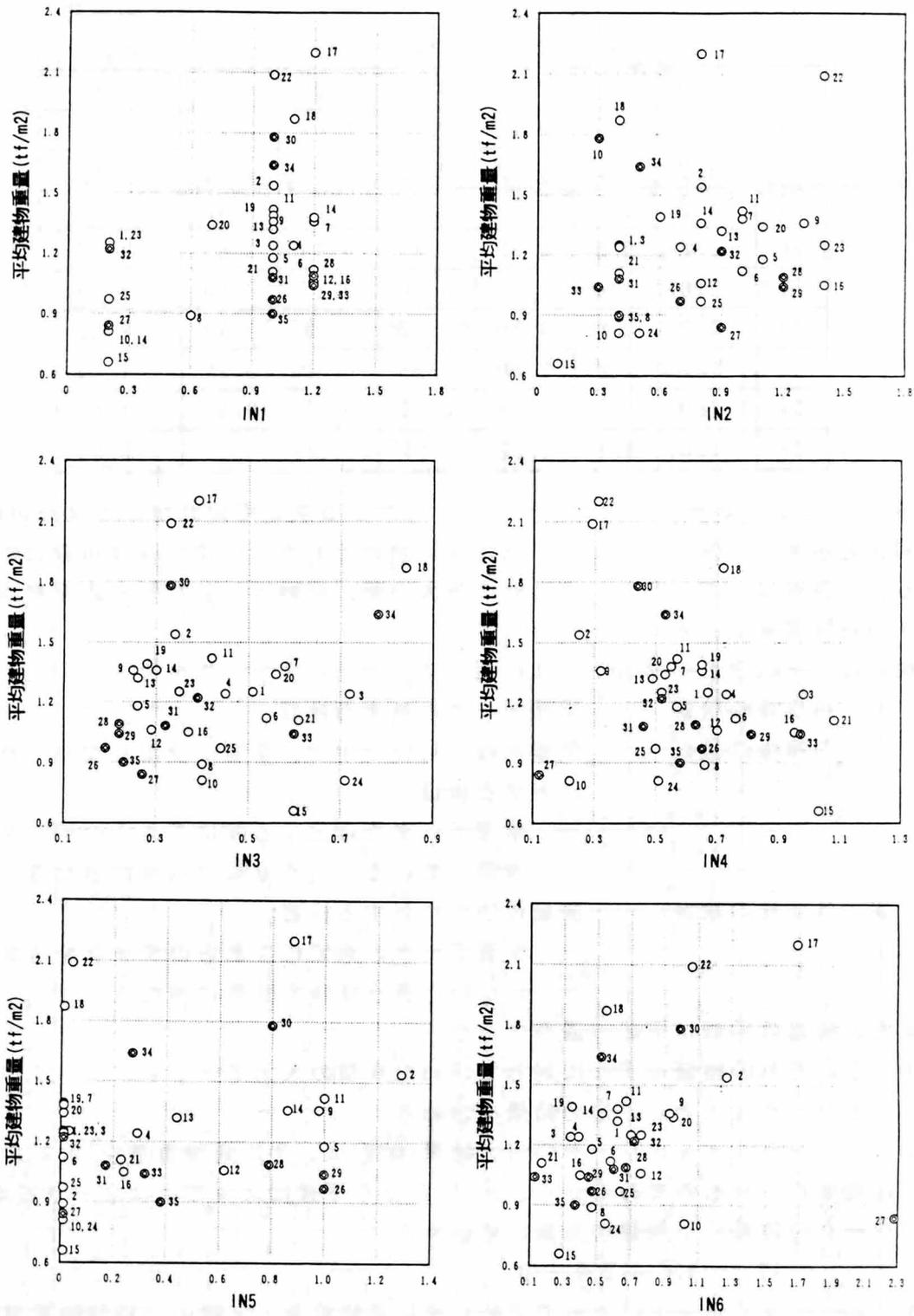


図-3.2 入力パラメータと平均建物重量との関係

4. 推定結果

推定を行う上で、学習データの選定が重要である。学習データの善し悪しが、推定精度に大きく影響を及ぼす。

本項では、学習データの選定と推定精度との関係を考察するために、学習用データ群の中から下記の6ケースについて学習データを選択し、それぞれのケースについて学習を行い、その学習結果を用いて他のデータに対する推定を行い推定精度の検証を行った。学習データの選定は、ST25を除きできるだけ片寄らないように行った。

(1) 学習データの選定

学習は下記の6ケースを行った。

① ST6 (学習に使用した物件数6件)

RC・SRC・S造それぞれの3グループの中で、最も軽い物件と最も重い物件の2例、計6個を学習データとする。学習に使用した物件番号は1, 6, 15, 17, 21, 22であり、図-3.3に示した学習用物件に対する入力値と教師信号との関係図の中で、●印で示している。

② ST9 (学習に使用した物件数9件)

RC・SRC・S造それぞれの3グループの中で、最も軽い物件と最も重い物件及び中間の3例、計9個を学習データとする。学習に使用した物件番号は、ケース①に7, 9, 10を追加したものであり、図-3.3に示した学習用物件に対する入力値と教師信号との関係図の中で、追加した分を◇印で示している。

③ ST12 (学習に使用した物件数12件)

ケース②に他の入力パラメータの影響を考慮して学習データ数を12個とした。追加した物件番号は、8, 18, 24で、図-3.3に示した学習用物件に対する入力値と教師信号との関係図の中で、追加した分を◆印で示している。

④ ST15 (学習に使用した物件数15件)

ケース③に他の入力パラメータの影響を考慮して学習データ数を15個とした。追加した物件番号は、3, 16, 25で、図-3.3に示した学習用物件に対する入力値と教師信号との関係図の中で、追加した分を□印で示している。

⑤ ST18 (学習に使用した物件数18件)

ケース④に他の入力パラメータの影響を考慮して学習データ数を18個とした。追加した物件番号は、2, 12, 13で、図-3.3に示した学習用物件に対する入力値と教師信号との関係図の中で、追加した分を■印で示している。

⑥ ST25 (学習に使用した物件数25件)

学習用物件全部を学習データとした場合である。図-3.3に示した学習用物件に対する入力値と教師信号との関係図の中では、○印で示している。

図-3.3で◎印は、検証用物件を示している。

第3章 平均建物重量の推定

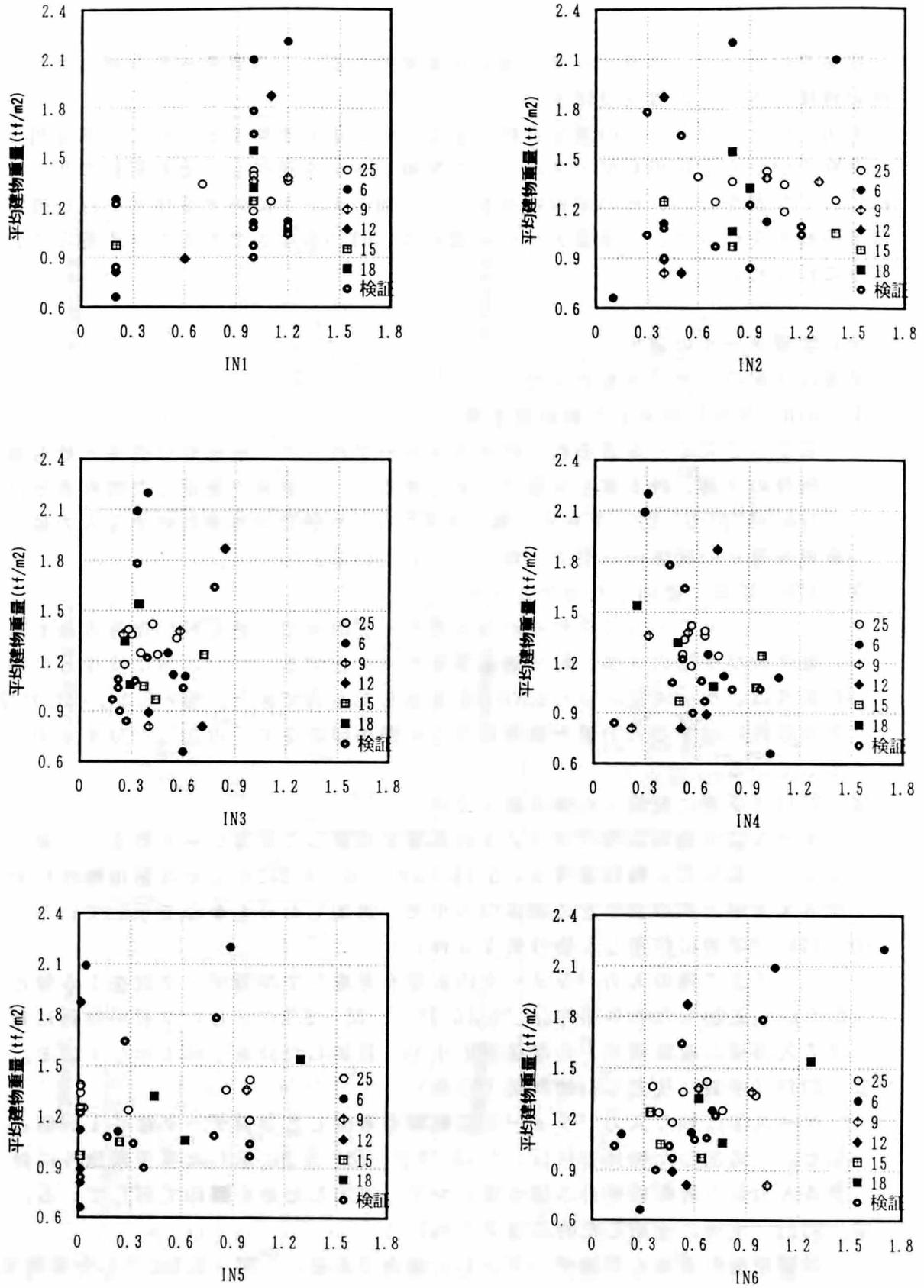


図-3.3 学習用物件・検証用物件と学習データとの関係 (ケース①～⑤)

(2) ニューラルネットワークの構成

資料-2の考察に基づき、中間層1層、中間ユニット数15（入力ユニット数の2.5倍）の図-3.4に示すニューラルネットワークを使用する。

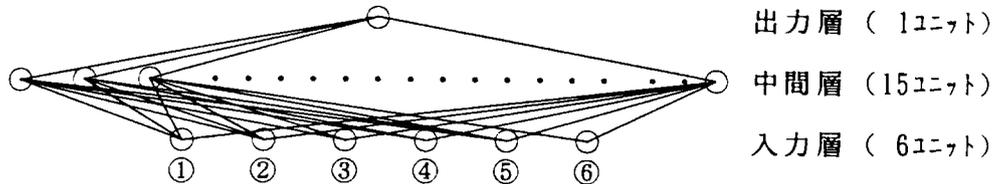


図-3.4 ニューラルネットワークの構成

(3) 学習方法

学習は、学習データをそれぞれ図-3.4に示す階層型ニューラルネットワークに、6個の入力値と1個の教師信号とを1セットにして学習させた。

重み更新係数³⁾は資料-2で考察したように $\eta=0.10$, $\alpha=0.95$ を使用した。打ち切り誤差は、資料-2で考察したように0.001である。

(4) 学習回数

学習回数を表-3.5に示す。

表-3.5 学習回数一覧

	ST6	ST9	ST12	ST15	ST18	ST25
学習回数	510	641	458	594	881	1292

(5) 推定結果

各学習ケース毎にニューラルネットワークによって推定した平均建物重量と実際の平均建物重量とを比較（以降、推定比と呼ぶ。推定比=推定値/実際値）した表を表-3.6～表-3.8に示す。

表中、網掛けした部分は、学習に使用した物件（再現性）に対する推定比であり、推定精度は非常に良いことがわかる。物件番号1～25は内挿性の検証に対応し、物件番号26～35は、外挿性の検証に対応する。

図-3.5に学習データ数の違いによる推定値と実際値との関係を示す。図中横軸は、実際の平均建物重量値、縦軸は推定した平均建物重量値を示す。○印は内挿性の検証、●印は外挿性の検証に対応している。

第3章 平均建物重量の推定

また、図-3.6に学習ケースST18とST25に対する推定比の誤差と学習データとの関係を入力パラメータIN1, IN6に対して示す。 図中○印は、学習に用いた物件、◎印は推定比が1.0に対して±15%の相対誤差範囲にある物件、◆印は相対誤差範囲が±15%をこえ±30%の範囲にある物件、▲印は相対誤差範囲が±30%をこえ±50%の範囲にある物件、●印は、相対誤差範囲が±50%をこえる物件である。 また、実線は学習に使用したデータに対する入力パラメータ（IN1, IN6それぞれ単独）と平均建物重量との単回帰直線⁴⁾であり、回帰係数の標準偏差を σ とすると破線は単回帰直線に対して $\pm\sigma$ （68%）信頼区間を示している。

表-3.6 推定値と実際値との比較

NO	実際値 tf/m ²	各学習ケースに対する推定値/実際値					
		ST6	ST9	ST12	ST15	ST18	ST25
1	1.25	0.98	0.97	0.91	0.96	0.91	0.90
2	1.54	1.51	0.93	0.91	0.90	0.99	1.00
3	1.24	0.75	0.86	1.10	1.04	1.02	0.98
4	1.24	1.06	0.83	0.81	0.90	0.82	1.02
5	1.18	1.71	0.81	0.65	0.78	0.80	1.04
6	1.12	1.05	1.10	1.08	1.12	1.05	1.04
7	1.38	0.97	0.94	0.96	0.96	0.96	1.01
8	0.89	1.21	1.00	1.03	1.02	1.10	1.16
9	1.36	1.69	1.00	1.00	1.00	1.01	1.00
10	0.81	2.37	1.04	1.06	1.04	1.03	1.04
11	1.42	1.41	0.75	0.81	0.89	0.71	0.93
12	1.06	1.52	1.12	1.55	1.59	1.08	1.05
13	1.32	1.33	0.84	0.81	0.87	0.88	0.94
14	1.36	1.31	0.75	0.81	0.91	0.69	1.04
15	0.66	1.16	1.13	1.15	1.08	1.07	1.12
16	1.05	1.28	1.04	0.67	0.94	1.02	1.01
17	2.20	1.01	1.00	1.00	1.01	1.01	1.01
18	1.87	0.56	0.62	1.00	0.96	0.99	1.00
19	1.39	0.81	0.64	0.55	0.58	0.67	0.93
20	1.34	1.28	1.55	1.54	1.57	1.53	0.99
21	1.11	0.94	0.96	0.96	1.00	0.97	1.00
22	2.09	0.99	1.01	1.00	1.01	1.01	1.01
23	1.25	1.61	1.58	0.77	1.00	1.07	1.02
24	0.81	1.64	1.42	1.09	1.13	1.09	1.07
25	0.97	1.70	1.48	0.85	0.95	1.03	1.03
26	0.97	1.92	0.93	0.86	0.95	0.90	1.24
27	0.84	2.53	1.26	1.30	1.48	1.24	2.70
28	1.09	1.76	1.02	1.03	1.14	1.00	1.07
29	1.04	1.82	1.00	0.83	1.09	0.89	0.99
30	1.78	1.02	0.59	0.92	0.90	0.95	0.89
31	1.08	1.24	0.84	1.16	1.13	1.22	1.39
32	1.22	1.42	1.32	0.77	0.90	0.96	0.94
33	1.04	1.12	1.02	1.08	1.10	1.23	1.69
34	1.64	0.83	0.65	0.93	0.94	0.97	1.18
35	0.90	1.54	0.89	0.91	0.95	1.05	1.50

第3章 平均建物重量の推定

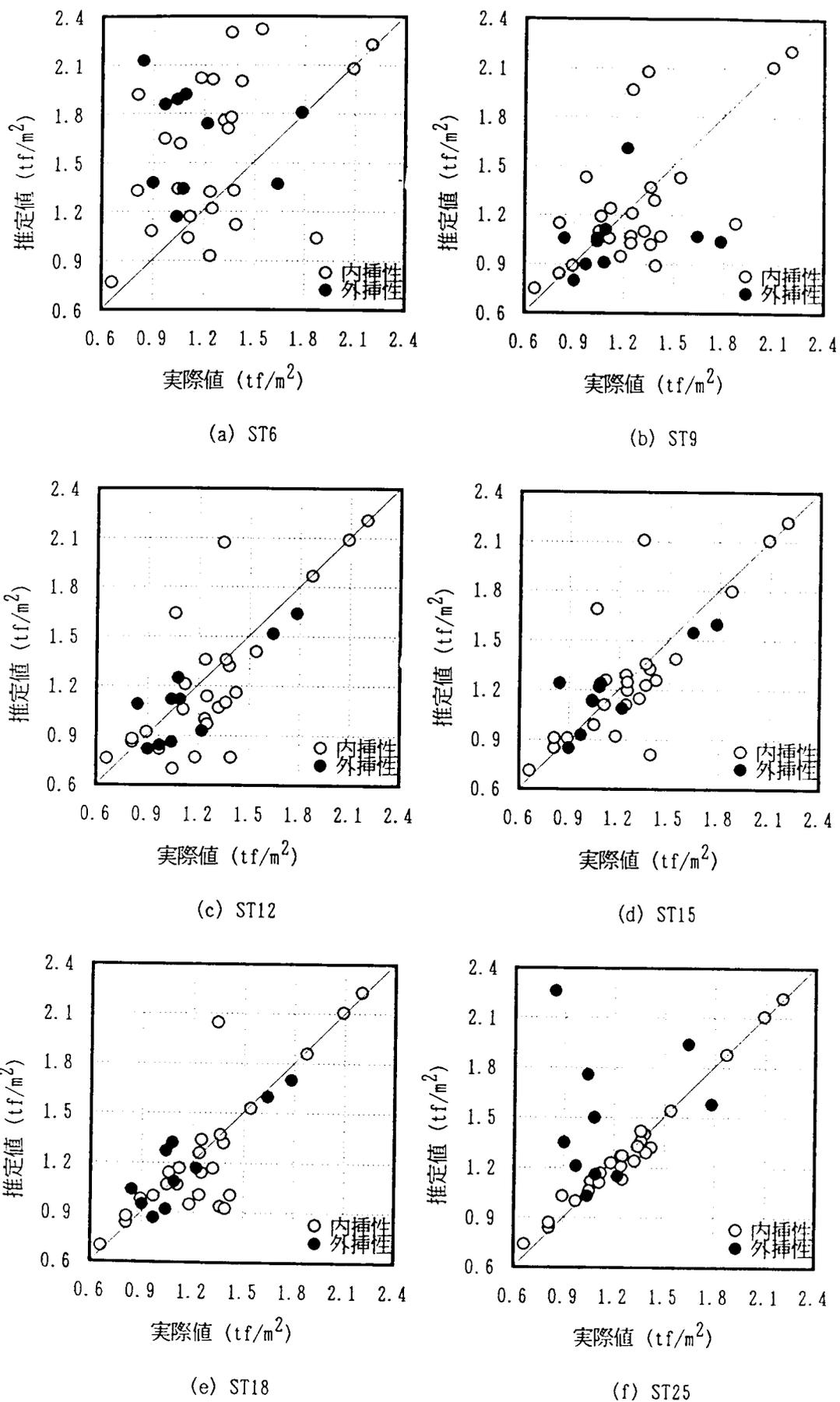


図-3.5 学習データ数の違いによる推定値/実際値の比較図

第3章 平均建物重量の推定

表-3.7 再現性・内挿性に対する検討

再現性 内挿性	各学習ケースに対する推定値/実際値					
	ST6	ST9	ST12	ST15	ST18	ST25
最大値	2.37	1.58	1.55	1.59	1.53	1.16
最小値	0.56	0.62	0.55	0.58	0.67	0.90
平均値	1.27	1.01	0.96	1.01	0.98	1.01
標準偏差	0.39	0.26	0.23	0.21	0.17	0.06

表-3.8 外挿性に対する検討

外挿性	各学習ケースに対する推定値/実際値					
	ST6	ST9	ST12	ST15	ST18	ST25
最大値	2.53	1.32	1.30	1.48	1.24	2.70
最小値	0.83	0.59	0.77	0.90	0.89	0.89
平均値	1.52	0.95	0.98	1.06	1.04	1.36
標準偏差	0.50	0.23	0.16	0.18	0.14	0.54

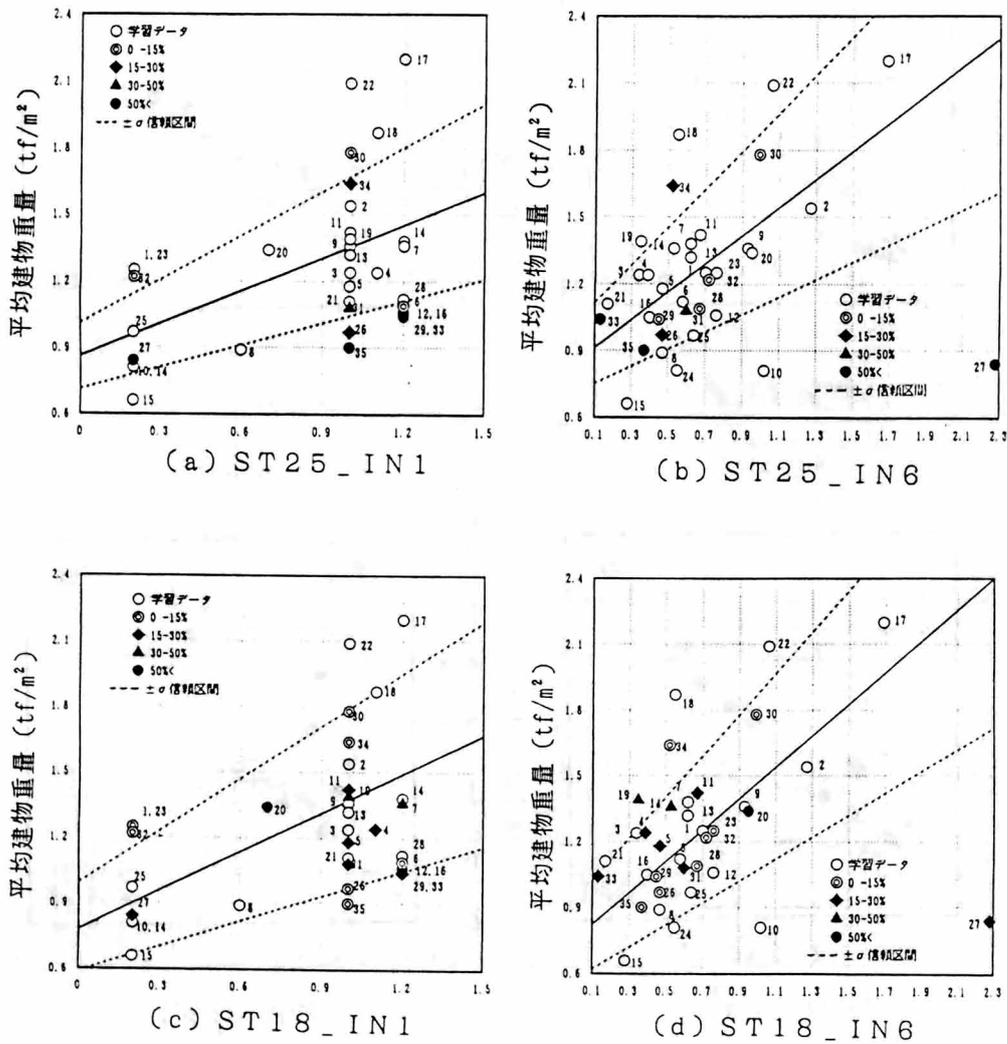


図-3.6 推定値と実際値との関係 (ST25, ST18)

5. 考察

- 1) 表-3.7、表-3.8より内挿性・外挿性とも入力パラメータの数の3倍の学習データがあれば推定比の平均値をほぼ1.0、標準偏差を内挿性、外挿性とも0.15程度に納めることが出来る。

これは、推定比が正規分布に従うと仮定すると、全データの約70%を推定比の誤差15%以内に、全データの約95%を誤差30%以内に納めることが出来ることを示している。

- 2) 表-3.8より学習用データ群を全数学習させた場合には、外挿性の検証では推定比の最大値が2.70、標準偏差は0.54と極端に悪くなっている。この原因は、学習用データ群と検証用データ群との相対位置に関係があると思われる。

学習ケースST18の場合(図-3.6(c))では、全データがほぼ68%信頼区間の中に入っているが、学習用データ群を全数学習させた場合、検証用物件の大部分(物件番号26, 27, 31, 33, 34, 35)が図-3.6(a), (b)のどちらかでは68%信頼区間の外側にはみ出している。検証用データの大部分が学習データに対する68%信頼区間の外側にはみ出したために、外挿性の推定精度が悪くなったものと思われる。

学習データを増やしたことによって学習データの入力値と平均建物重量値との間のばらつきが少なくなり、そのため信頼区間の幅が狭くなり、未学習データを68%信頼区間の中に納めることが出来なくなってしまうことになる。これは、必要以上に学習させた(過剰学習)ことを意味している。

本例の学習データ群と検証データ群との場合は、ST18が、学習データとしては適当である。

- 3) 学習データに対する68%信頼区間の範囲と未学習データの分布との間には、推定精度に関して強い相関があると思われる。この区間内に未学習データを納めておけば、推定比に対して標準偏差0.15程度の精度で推定可能と思われる。

- 4) 物件11, 14, 19は、図-3.6(c)では、68%信頼区間の中央付近におさまっているのに、推定比の誤差は大きくなっている。この現象は、他のパラメータによる影響も考える必要があることを示している。

図-3.6(d)の図を見ると、これらの物件は、68%信頼区間の外側付近に位置していることが分かる。複数の入力パラメータを考慮している場合には、特定のパラメータだけではなく、その他のパラメータの影響を考慮して総合的に評価することが必要である。

- 5) 本報で学習用として収集したデータは、(株)フジタで「BUILSYS-V3」を使用して1992年度に実施または計画を行った物件である。従って、この学習データの68%信頼区間に全て(過去及び将来)の物件が納まるとは考えられない。従って、今後実績データを蓄積し、学習データの68%信頼区間と実績データとの関係について定期的に見直しを行う必要がある。

第3節 結語

本研究は、設計者の持っているノウハウのシステム化を目的とし、本章では、構造計画を行う上で最も基本となる平均建物重量の推定をニューラルネットワークを用いて行った。

推定する手法としては、ニューラルネットワークの他にも多変量解析等が考えられるが、ニューラルネットワークの最大の特徴は、

- ①複雑で高度な因子分析等の解析を行う必要はなく、経験的に持っている知識をもとに入力パラメータを選定することによって容易にネットワークを構成することが出来る
 - ②少ないデータでも学習することが出来る
- ことである。

従って、多変量解析等の知識を持っていなくても、またたくさんの蓄積データを持っていなくても、構造設計の知識を持っていれば一般の構造設計者でも容易にネットワークを構成することが出来る。

平均建物重量の推定に当たっては、平均建物重量に影響を与える要因として、①地上部の構造種別、②地上部の層数、③地上部の主な用途、④柱一本当たりの負担床面積、⑤耐力壁の存在率、⑥平面形状特性の6個を経験的に選び出し、それらをモデル化し、入力パラメータとした。

ニューラルネットワークの構成は、本問題に最適なニューラルネットワークを決定するために、事前に重み更新係数の取り方、中間層数及びユニット数の選定についてパラメータ解析を行い検討を行った(資料-2)。本例のように出力と入力パラメータの間にある程度の線形関係がある場合には、複雑なネットワークを構成する必要はなく、中間層は1層、中間ユニット数は、入力パラメータの2.5倍の15個とした。重み更新係数は、値が大きいほど収束が早く、内挿性に対しては精度が良い場合もあるが、未学習データに対する安定度から $\alpha = 0.1$ 、 $\eta = 0.95$ とした。

本報で学習用として収集したデータは、(株)フジタで「BUILSYS-V3」を使用して1992年度に実施または計画を行った物件である。従って、このデータが全て(過去及び将来)の物件をカバーしているとはいいがたい。実際に検証用データとして1992年度以外に実施または計画を行った物件を収集したが、学習用データ群の領域からはみ出している物件も見られた。このような学習用データ群が不完全な場合には、学習用データ群の中からどのデータを学習データとして採用するかを選定することが重要である。稀にしかないような特殊なケースやある分野に片寄ったデータは採用しない方がよい。この選択には、設計者の経験やノウハウが重要である。また、実際設計した物件のデータを蓄積しておき、定期的に学習用データの見直しを行うことが重要である。

第3章 平均建物重量の推定

学習データが妥当である（全体の性状を代表している）ならば、入力パラメータの2倍～3倍の学習データで外挿性に対する推定値／実際値の標準偏差は0.15程度となり、構造計画段階においては十分な推定精度を有している。

以上の考察により、以下の結論が得られた。

- 1) ニューラルネットワークを利用することにより、設計者が持っている平均建物重量を推定するに必要な入力パラメータに関する経験的知識（設計ノウハウ）と簡単な建物情報を利用することによって、平均建物重量推定システムを容易に構築することが出来た。

本システムは、18個の実際に設計・計画された物件のデータを学習させることにより全データの約70%を推定誤差15%以内に、全データの約95%を推定誤差30%以内で推定し、構造計画時に使用するには十分な精度で推定することが出来た。

本システムを利用することにより、過去の設計経験では平均建物重量を設定できない経験の少ない構造設計者でも精度良く平均建物重量の推定を行うことが出来、構造計画時のツールとして有効である。

- 2) 学習データの見直しは定期的に行う必要がある。ある一定期間内に、推定した値と実際設計して求めた値との誤差が所定値（例えば15%）をこえる物件が多く現れる場合には、学習データと実際のデータとを考慮して見直しを行い、再学習を行う必要がある。

この見直しに際しては、学習データに対する各入力パラメータの68%信頼区間内にデータが納まるように学習データを選択する必要がある。この見直しにより、推定精度をより高めることが出来る。この範囲に納まっている場合には、推定比分布の標準偏差は、ほぼ0.15程度に納めることが出来ると思われる。

- 3) 本論で得られた結論は、限定された学習データと検証データに基づくものであり、特にその数値的な知見は建築構造物全般に対して必ずしも有効であるとはいえないが、本論で提案した手法や手続きは、一つの平均建物重量の推定システムと捉えれば、ビル物建築に対して応用性、一般性の高いツールと見ることが出来る。

【参考文献】

- 1) 田中義吉「略算法における荷重の考え方について」：建築知識1990年4月号
P.99～P.100
- 2) B C J - 電 1 7 4 : ビルディングレター 91.4増刊号
- 3) 八名和夫・鈴木義武「ニューロ情報処理技術 基礎と応用」海文堂 P41-P48
- 4) 奥野忠一・久米均・芳賀敏郎・吉澤正「多変量解析法」 日科技連 pp.25-
157

第 4 章

構造特性係数 D_s 値の推定に関する研究

第 1 節 緒 言	- 55 -
第 2 節 D_s 値推定のモデル化	- 56 -
1. D_s 値に影響を及ぼす要因	- 56 -
2. 入力・教師信号のモデル化	- 62 -
3. 検討用データ	- 64 -
4. ニューラルネットワークの構成	- 67 -
5. 学習方法	- 67 -
第 3 節 D_s 値の推定	- 68 -
1. 学習データの選定	- 68 -
2. 推定結果と実際値との比較	- 70 -
3. 入力パラメータに関する検討	- 73 -
4. 重回帰分析による D_s 値の推定	- 76 -
5. 考察	- 77 -
第 4 節 結 言	- 78 -
【参考文献】	- 79 -

第1節 緒言

構造計画段階において部材断面推定システムを構築する上では、建物が持つべき必要保有水平耐力の設定が重要である。本章では、この建物が持つべき必要保有水平耐力を設定するために必要な「経験的非明示知識」である「構造特性係数 D_s 値」に関して、ニューラルネットワークを利用した知識獲得手法について考察する。

従来、部材断面の仮定は、1次設計レベルのみで行い、部材断面を決定した後で2次設計にすすみ保有水平耐力の確認を行っていた。従って、経験の少ない設計者では、2次設計時において、設定した断面では保有水平耐力を満足していない場合も生じ、再度1次設計に戻り断面修正を行うこともあった。このような手戻りを無くすためには、仮定断面を設定する際に、最初から保有水平耐力を意識して、対象建物が持つべき必要保有水平耐力を満足するように設計しておかなければならない。必要保有水平耐力は、建物のエネルギー吸収能力より決まる構造特性係数 D_s 値と建物平面・立面的な剛性バランスより決まる剛性率・偏心率とによって決定される。これらの仮定の善し悪しが構造設計そのものの善し悪しに大きく影響を及ぼす事になる。 D_s 値は、保有水平耐力の解析を行った結果、各部材が負担している応力度等によって決定されるために、構造計画段階のように保有水平耐力の解析結果はなく、建物形状や部材配置情報しかないような状態で設定するには、豊富な経験と工学的センスが必要である。

このような経験・工学的センスのシステム化が可能であれば、経験の少ない設計者でも、精度の良い部材断面を設定する事が出来、品質の高い構造設計を行う事が出来るようになると思われる。

以上のような基本的認識の下で、本章では、この設計者の経験と勘によって評価を行っていた構造特性係数 D_s 値を建物形状や部材配置情報等をパラメータとしてニューラルネットワークを用いて推定する方法を提案する。

第2節では、 D_s 値を推定するに当たってのニューラルネットワークのモデル化について考察する。最初に、 D_s 値に影響を与える要因を分析し、ニューラルネットワークの入力パラメータを決定し、数値モデル化を行い、ニューラルネットワークの階層構造を設定する。次に、(株)フジタで実際に設計または計画を行った(資料-1)物件で保有水平耐力の検討を行った物件39例を選定し(X, Y方向それぞれ1例とした)、学習データを作成する。

第3節では、ニューラルネットワークによる D_s 値の推定結果と実際値との比較考察を行う。また、統計的推定手法である重回帰分析による推定も行い、ニューラルネットワークとの比較を行う。

第4節では、 D_s 値の推定に関してまとめを行い、結論を述べる。

第2節 D_s 値推定のモデル化

ニューラルネットワークは第2章で述べたように、人間の神経回路を模した工学的情報処理システムであり、ある入力信号に対して、特定の出力を返すシステムである。従って、入力信号を何にするかが重要な問題となる。

ベテラン設計者が D_s 値を仮定する際には、外見上は即座に数値を出しているように見えても、実際は、建物形状（スパンが大きい、壁が多い、形状が複雑等）・構造種別（RC造、SRC造、S造等）を見て一瞬の内に判断を行っていると思われる。従って、これらの D_s 値を仮定する際に設計者が判断の根拠としている要素を分析し、これらを入力信号とする事により、ニューラルネットワークは精度の良い学習を行う事が出来ると思われる。

1. D_s 値に影響を及ぼす要因

D_s 値は、建築物の振動減衰性及び各階の靱性に応じて必要保有水平耐力を低減するための係数であり、計算を行う階の架構の形式及び架構の性状によってその数値が規定されている。¹⁾

(1) 建築センター指針¹⁾による D_s 値の算定

建築センター指針は、下記に示す影響因子によって D_s 値を規定している。

1) 剛接架構材の靱性と破壊形式（柱群種別）

RC造の場合は、表-4.1に示す柱と梁の条件によってFA～FDに分類される。

表-4.1 RC造に対する柱群種別の分類

柱群種別		FA	FB	FC	FD
共通条件		曲げ破壊であること			左記以外
柱の条件	h_0/D の下限値	2.5	2.0	-	
	σ_0/F_c の上限値	0.35	0.45	0.55	
	ptの上限値	0.8%	1.0%	-	
	τ_u/F_c の上限値	0.1	0.125	0.15	
梁の条件	τ_u/F_c の上限値	0.15	0.20	-	

h_0 : 柱のうちのり高さ (cm)

D : 柱のせい (cm)

σ_0 : 崩壊メカニズム時の軸方向応力度 (kgf/cm²)

τ_u : 崩壊メカニズム時の平均せん断応力度 (kgf/cm²)

F_c : コンクリートの材料強度 (kgf/cm²)

pt: 引張り鉄筋比

第4章 構造特性係数 D_s 値の推定

SRC造の場合は、表-4.2に示す柱の条件によってFA~FDに分類される。

表-4.2 SRC造に対する柱群種別の分類

柱の破壊モード	$N/N_0 \leq 0.3$		$N/N_0 \leq 0.4$		$N/N_0 > 0.4$
	$sM_0/M_0 \geq 0.4$	$sM_0/M_0 < 0.4$	$sM_0/M_0 \geq 0.4$	$sM_0/M_0 < 0.4$	
曲げ	FA	FB	FB	FC	FD
せん断	FB	FC	FC	FD	

- N : メカニズム時の軸方向荷重 (tf)
- N_0 : SRC断面としての最大圧縮耐力 (tf)
- sM_0 : 鉄骨断面の曲げ耐力 (tfm)
- M_0 : SRC断面としての曲げ耐力($N=0$) (tfm)

S造の場合は、表-4.3に示す柱・梁の幅厚比によってFA~FDに分類される。

表-4.3 S造に対する柱群種別の分類

柱群種別				FA	FB	FC	FD
柱	H型鋼	フランジ	SS400級	9.5	12	15.5	左記以外
			SM490級	8	10	13.2	
		ウェブ	SS400級	43	45	48	
			SM490級	37	39	41	
	角型鋼管		SS400級	33	37	48	
			SM490級	27	32	41	
	円形鋼管		SS400級	50	70	100	
			SM490級	36	50	73	
梁	H型鋼	フランジ	SS400級	9	11	15.5	
			SM490級	7.5	9.5	13.2	
		ウェブ	SS400級	60	65	71	
			SM490級	51	55	61	

2) 耐力壁及び筋かいの靱性と破壊形式（壁・筋かい種別）

RC造の場合は、表-4.4に示す耐力壁のせん断応力度によってWA~WDに分類される。

表-4.4 RC造に対する壁種別の分類

耐力壁の種類		WA	WB	WC	WD
共通条件		せん断破壊する恐れがないこと			
τ_u/F_c の上限	一般	0.2	0.25	-	左記 以外
	壁式構造	0.1	0.125	0.15	

SRC造の場合は、表-4.5に示す耐力壁の破壊モードによってWA、WCに分類される。

表-4.5 SRC造に対する壁種別の分類

耐力壁の種類	WA	WC
破壊モード	せん断破壊以外	せん断破壊

S造の場合は、表-4.6に示す筋かいの有効細長比によってBA~BCに分類される。

表-4.6 S造に対する筋かい種別の分類

BA	BB	BC
$\lambda e \leq 50/\sqrt{F}$	$50/\sqrt{F} < \lambda e \leq 90/\sqrt{F}$	$90/\sqrt{F} < \lambda e < 200/\sqrt{F}$
	$200/\sqrt{F} \leq \lambda e$	

λe : 筋かい材の有効細長比

F : 筋かい材の基準強度 (tf/cm²)

第4章 構造特性係数 D_s 値の推定

3) 各鉛直部材におけるせん断力分担率

RC造の場合は、表-4.7に示す柱群種別、壁種別と壁のせん断力分担率によって D_s 値が規定されている。

表-4.7 RC造に対する D_s 値

	WA			WB			WC			WD		
	R1	R2	R3									
FA	0.30	0.35	0.40	0.35	0.40	0.45	0.35	0.40	0.50	0.40	0.45	0.55
FB	0.35	0.40	0.45	0.35	0.40	0.45	0.35	0.45	0.50	0.40	0.50	0.55
FC	0.40	0.45	0.45	0.40	0.45	0.50	0.40	0.45	0.50	0.45	0.50	0.55
FD	0.45	0.50	0.55	0.45	0.50	0.55	0.45	0.50	0.55	0.45	0.50	0.55
壁式	-	-	0.45	-	-	0.50	-	-	0.55	-	-	0.55

R1 : $\beta_u \leq 0.3$ R2 : $0.3 < \beta_u \leq 0.7$ R3 : $0.7 < \beta_u$
 β_u : 耐力壁のせん断力分担率

SRC造の場合は、表-4.7に示す柱群種別、壁種別と壁のせん断力分担率によって決まるRC造の D_s 値より 0.05 を引いた値として規定されている。

S造の場合は、表-4.8に示す柱群種別、壁種別と壁のせん断力分担率によって決まるRC造の D_s 値より 0.05 を引いた値として規定されている。

表-4.8 S造に対する D_s 値

	BA	BB			BC		
	R0	R1	R2	R3	R1	R2	R3
FA	0.25	0.25	0.30	0.35	0.30	0.35	0.40
FB	0.30	0.30	0.30	0.35	0.30	0.35	0.40
FC	0.35	0.35	0.35	0.40	0.35	0.40	0.45
FD	0.40	0.40	0.45	0.50	0.40	0.45	0.50

R0 : $\beta_u = 0$ R1 : $\beta_u \leq 0.3$
 R2 : $0.3 < \beta_u \leq 0.7$ R3 : $0.7 < \beta_u$
 β_u : 筋かいが分担する保有水平耐力の分担率

(2) 入力パラメータの分析

本論では、構造計画初期段階での D_s 値の評価を対象としている。すなわち、保有水平耐力の算定はもちろん、部材断面すら求められていない段階を対象としている。そういう状況では、建築センター指針に示されている表は使用できない。利用できる情報は、建物形状、部材配置といった、意匠図より読み取れる簡単な情報だけである。実際、設計者は、図面を見ただけで過去の経験や工学的センスによって瞬間的に D_s 値を推定している。これらの設計者が瞬間的に判断の基礎としている因子を明確にし、それらをニューラルネットワークの入力パラメータとする事によって設計者が持っている D_s 値推定のためのノウハウをシステム化することができると思われる。

本論では D_s 値は方向別に建物全体として考えるものとし、最も D_s が大きくなる層を対象として考えた。また、筋交いを持つ鉄骨造については、設計の実例がなかったので、今回は対象外とした。

D_s 値を決定づけている最も支配的な要因は、1. 項でみたように下記の4項目である。

- ① 対象層の構造種別
- ② 剛接架構材の靱性・破壊形式
- ③ 耐力壁（筋交い）の靱性と破壊形式
- ④ 耐力壁（筋交い）のせん断力分担率

①の対象層の構造種別は、構造設計者が既に決定しているものであり、自明の項目である。

②の剛接架構材の靱性・破壊形式は、架構の変形性能に関するものであり、直接的には求める事が出来ない。しかし、架構の変形性能は、部材のせん断スパン比の影響が大きい事が知られている。従って、柱に対しては階高、梁に対してはスパン長が重要なポイントになると思われる。

③の耐力壁の靱性と破壊形式も、直接的には求める事が出来ない。しかし、耐力壁の破壊形式は、耐力壁相互の配置関係によって決まる場合が多く、耐力壁が単独で存在しているか、縦に連続しているか、横に連続しているかが重要なポイントとなる。本章では、縦に連続している耐力壁を連層壁と呼び、その他の壁をせん断壁と呼ぶ事にする。また、連層壁では、そのプロポーシオン（連層壁の高さ／幅）も破壊形式に重要な要素となる。従って、連層壁及びせん断壁が、対象層の中にどの程度存在しているか、また連層壁のプロポーシオンがどの程度であるかが重要なポイントになると思われる。

④耐力壁のせん断力分担率も、直接的には求める事が出来ない。耐力壁でも、その壁が連層壁であるか、せん断壁であるか、によっても分担率は変わってくる。

また、連層壁でもその壁のプロポーシオンによっても変わってくる。従って、連層壁及びせん断壁が、対象層の中にどの程度存在しているか、また連層壁のプロポーシオンがどの程度であるかが重要なポイントになると思われる。

第4章 構造特性係数D s 値の推定

以上の考察をベースとして、著者の設計経験をもとに入力パラメータとして、下記のパラメータを採用することにした。

- 1)対象層の構造種別、
- 2)建物地上部層数、
- 3)対象層の階高、
- 4)当該方向平均スパン長
- 5)当該方向対象層の連層壁の存在率
- 6)当該方向対象層のせん断壁の存在率

それぞれの入力パラメータは、数値化を行うが、それぞれのパラメータの値が平均値0.0、標準偏差1.0となるように規準化を行った。数値化の手法を次に述べる。

2. 入力・教師信号のモデル化

1) 地上部の構造種別に関するパラメータ (IN1)

層の構造種別をRC, SRC, S構造に分類し、それぞれの構造種別に対して、平均的な床面積当たりの建物重量（構造種別係数と呼ぶことにする）を表-4.9のように設定する。床面積当たりの建物重量を採用したのは、D s 値の推定だけでなく、他の項目の推定にも使うために、共通な指標として建物重量を採用した。また、柱と梁で構造種別が異なる場合はそれぞれの構造種別係数の平均値を取るものとし、IN1は、下式で算定する。

$$IN1 = (RST - a1) / \sigma 1 \quad (4.1)$$

$$RST = \Sigma(sti * Ai) / \Sigma Ai$$

a1 : 地上部構造種別係数の全データ平均値 (=1.16)

$\sigma 1$: 地上部構造種別係数の全データ標準偏差(=0.16)

Ai : i層の床面積 (m²) i=1~Nzu

Nzu : 地上層の層数

表-4.9 構造種別と構造種別係数(sti)

構造	RC造	SRC造	S造
係数	1.2	1.3	0.8

2) 建物地上層数に関するパラメータ (IN2)

建物地上部の層数を Nzu とし、全データの層数の平均値をa2(=7.08)、標準偏差を $\sigma 2$ (=3.51)として、下式で求める。

$$IN2 = (Nzu - a2) / \sigma 2 \quad (4.2)$$

3) 対象層の階高 (IN3)

D s 値が最大となる層の階高をHとし、全データの対象層の階高の平均値を a3 (=3.74)、標準偏差を $\sigma 3$ (=0.85)として、下式で求める。

$$IN3 = (H - a3) / \sigma 3 \quad (4.3)$$

4) 当該方向の平均スパン長 (IN4)

当該方向建物の長さをL、スパン数をNsとすれば、当該方向の平均スパン長は L/Ns で求められる。全データの当該方向の平均スパン長の平均値を a4(=7.03)、標準偏差を $\sigma 4$ (=1.84)として、下式で求める。

$$IN4 = (L/Ns - a4) / \sigma 4 \quad (4.4)$$

5) 連層壁の存在率に関するパラメータ (IN5)

連層壁の存在率は、当該方向対象層の全スパン数(S)に対して、連層壁の存在するスパン数(Wrs)の比 Wrs/S で求められる。全データの当該方向の連層壁の存在率の平均値を $a5(=0.11)$ 、標準偏差を $\sigma 5(=0.26)$ として、下式で求める。

$$IN5 = (Wrs/S - a5) / \sigma 5 \quad (4.5)$$

6) せん断壁の存在率に関するパラメータ (IN6)

せん断壁の存在率は、当該方向対象層の全スパン数(S)に対して、せん断壁の存在するスパン数(Wss)の比 Wss/S で求められる。全データの当該方向の連層壁の存在率の平均値を $a6(=0.11)$ 、標準偏差を $\sigma 6(=0.26)$ として、下式で求める。

$$IN6 = (Wss/S - a6) / \sigma 6 \quad (4.6)$$

7) 教師信号 (OUT)

教師信号は、 D_s 値を採用するが、ニューラルネットワークの制約として、出力は $[0, 1]$ の範囲に限られるために、教師信号(OUT)としては、下記のように規準化した。

$$OUT = (Ds - 0.25) * 3.0 + 0.05 \quad (4.7)$$

3. 検討用データ

検討用データとして、(株)フジタで、1992年以降、実際に設計、または計画を行った物件のうち、当社保有の『BUILSYS-V3』²⁾を使用して保有水平耐力の検討を行った物件39例を採用した。

検討用データについて、2. で述べた入力データと教師信号、及び実際の D s 値の一覧を表-4. 11、図-4. 1に示す。

また、表-4. 10に入力パラメータと D s 値との間の統計処理で用いる相関係数³⁾を示す。相関係数の算定は Excel⁴⁾を使用した。

図-4. 1、表-4. 10より、入力パラメータと D s 値との間の相関は小さく、統計学的には、良いデータとはいえないと思われる。

表-4. 10 入力パラメータと D s 値との相関係数

	IN1	IN2	IN3	IN4	IN5	IN6	Ds
IN1	1.00						
IN2	0.35	1.00					
IN3	-0.25	-0.28	1.00				
IN4	0.20	-0.14	0.12	1.00			
IN5	0.26	0.30	-0.36	0.39	1.00		
IN6	0.19	-0.18	-0.02	-0.09	-0.10	1.00	
Ds	0.41	0.35	-0.14	-0.09	0.08	0.17	1.00

第4章 構造特性係数D s 値の推定

表-4.11 学習用データ群に対するデータ一覧

物件	入力データ						教師信号	D s
	IN1	IN2	IN3	IN4	IN5	IN6		
1	0.26	0.26	-1.10	0.09	1.49	-0.43	0.50	0.40
2	0.26	-0.88	1.02	0.45	-0.43	-0.43	0.20	0.30
3	0.88	0.83	0.78	-0.94	-0.43	-0.43	0.50	0.40
4	0.26	1.69	-0.16	-0.83	2.26	-0.43	0.50	0.40
5	-2.24	-0.88	-1.05	-1.96	-0.43	-0.43	0.20	0.30
6	0.26	0.83	-1.10	-0.40	-0.43	-0.43	0.65	0.45
7	0.88	0.26	0.31	1.30	-0.43	-0.43	0.05	0.25
8	0.26	0.55	-0.75	-0.37	1.10	-0.43	0.95	0.55
9	0.88	0.26	1.49	-0.53	-0.43	-0.43	0.50	0.40
10	-2.24	-1.45	0.96	0.49	-0.43	-0.43	0.05	0.25
11	0.88	0.26	-0.16	0.23	3.41	-0.43	0.35	0.35
12	0.26	-0.88	1.49	0.53	-0.43	-0.43	0.65	0.45
13	0.26	-0.31	0.90	-0.31	-0.43	-0.43	0.20	0.30
14	0.26	-0.88	0.90	0.53	-0.43	0.10	0.80	0.50
15	0.26	1.97	-0.87	-0.38	-0.09	-0.43	0.65	0.45
16	0.26	-0.02	-1.22	-0.62	-0.43	-0.43	0.20	0.30
17	0.88	1.40	-1.10	-0.44	-0.43	-0.43	0.50	0.40
18	0.26	-1.16	0.25	0.77	-0.43	-0.43	0.20	0.30
19	0.26	-0.88	-0.75	-0.16	-0.43	0.06	0.35	0.35
20	-2.24	0.55	1.79	1.56	-0.43	-0.43	0.35	0.35
21	0.26	-0.59	-0.16	-0.16	-0.43	0.53	0.95	0.55
22	0.26	-0.88	-0.87	-0.31	-0.43	-0.43	0.20	0.30
23	0.26	0.26	-0.99	-1.32	0.83	1.49	0.50	0.40
24	0.26	-0.88	1.02	0.42	-0.43	-0.43	0.20	0.30
25	0.88	0.83	0.78	0.57	-0.43	-0.43	0.05	0.25
26	0.26	1.69	-0.16	-0.87	-0.43	-0.43	0.80	0.50
27	-2.24	-0.88	-1.05	-0.72	-0.43	-0.43	0.20	0.30
28	0.26	0.83	-1.10	2.05	3.41	-0.43	0.50	0.40
29	0.88	0.26	0.31	0.23	-0.43	1.68	0.50	0.40
30	-2.24	-1.45	0.96	0.33	-0.43	-0.43	0.20	0.30
31	0.26	-0.88	1.49	0.50	-0.43	-0.43	0.65	0.45
32	0.26	-0.88	0.90	0.53	-0.43	-0.09	0.80	0.50
33	0.26	1.97	-0.87	-1.06	-0.43	-0.43	0.65	0.45
34	0.26	-0.02	-1.22	1.89	3.41	-0.43	0.50	0.40
35	0.88	1.40	-1.10	2.59	3.41	-0.43	0.35	0.35
36	0.26	-1.16	0.25	-0.21	-0.43	1.87	0.50	0.40
37	0.26	-0.88	-0.75	-0.54	-0.43	0.06	0.80	0.50
38	-2.24	0.55	1.79	-2.11	-0.43	-0.43	0.20	0.30
39	0.26	-0.88	-0.87	-0.78	-0.43	1.03	0.95	0.55

第 4 章 構造特性係数 D_s 値の推定

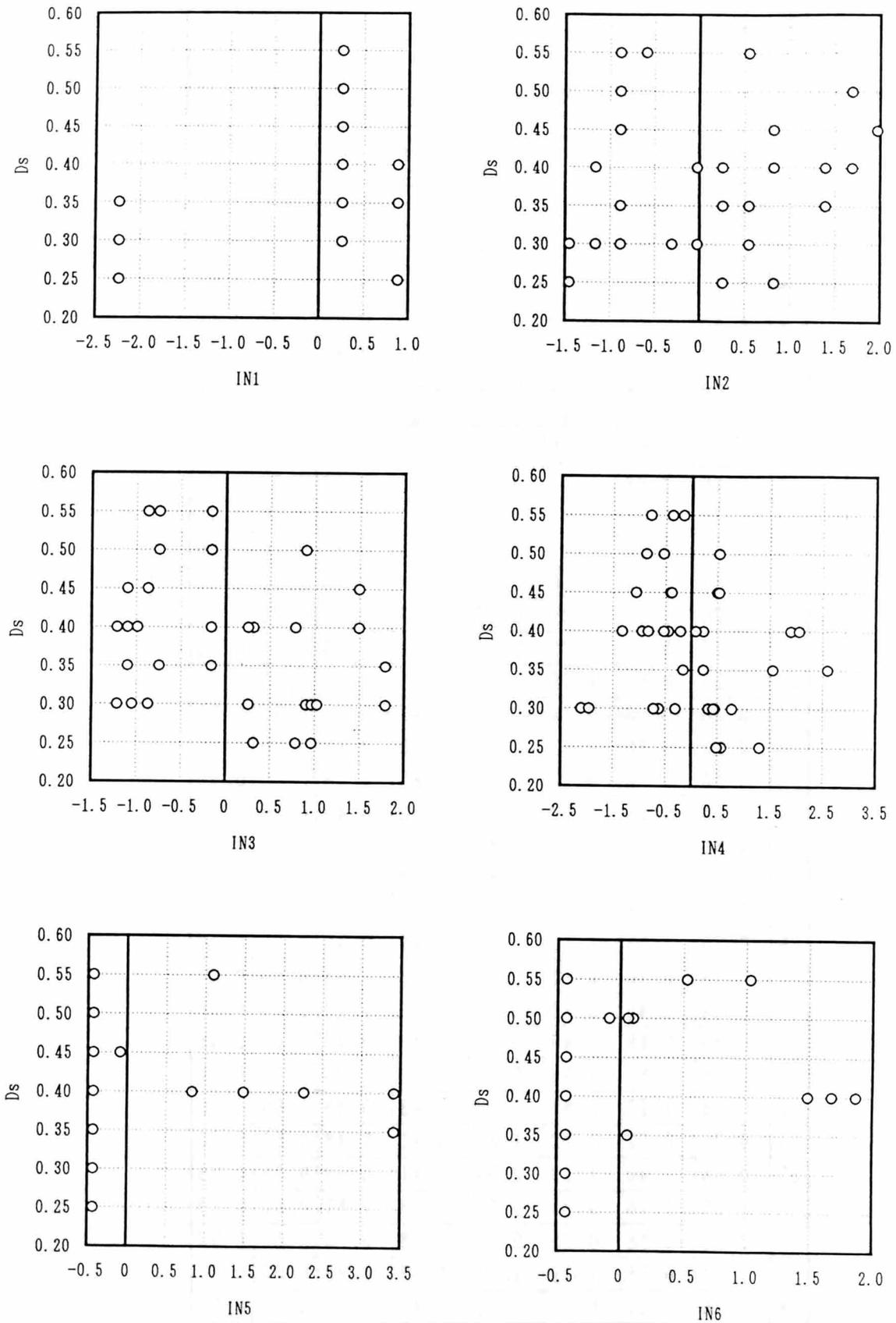


図 - 4. 1 入力パラメータと D_s 値との関係

4. ニューラルネットワークの構成

階層型のニューラルネットワークの場合、中間層数と中間ユニット数の組み合わせで無数のネットワークが考えられるが、これらの組み合わせに関する系統的な手法は存在せず、試行錯誤的に決めなければならない。

本章では、資料-2で考察した結果を用い中間層は1層、中間ユニット数は、入力パラメータの2.5倍の15として図-4.2に示す階層型ニューラルネットワークを採用する。

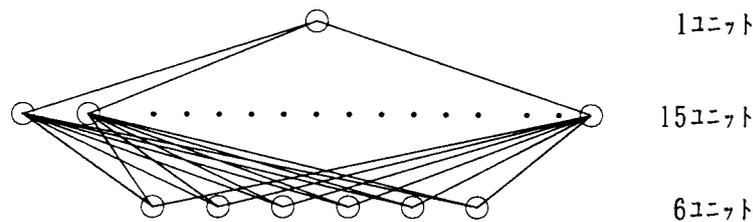


図-4.2 ニューラルネットワークの構成

5. 学習方法

学習は、学習データをそれぞれ図-4.2に示す階層型ニューラルネットワークに、6個の入力値と1個の教師信号とを1セットにして学習させた。

学習に使用したプログラムは、文献⁵⁾に掲載されているバックプロパゲーションアルゴリズムプログラムをベースに一部修正して使用した。重みの修正法は評価関数 E として全学習データにわたって教師信号と出力値の2乗誤差の総和をとる一括修正法と、一組の学習データに対して評価関数 E を求め重み更新を行い各学習データに対する E がすべて十分小さくなるまで繰り返す逐次修正法があるが、本論では非線形問題において学習効率がよい⁶⁾とされている逐次修正法を使用した。

学習のスピードを決定する重み更新係数⁵⁾ η 、 α は、大きな値を採用すると学習回数は少なくてすむが、あまり大きな値をとると収束しない場合もある。

本章では、資料-2で考察した結果を用い $\eta=0.10$, $\alpha=0.95$ とした。また打ち切り誤差は、0.001とした。

第3節 D_s 値の推定

1. 学習データの選定

ニューラルネットワークの場合、学習データの選択が重要であり、データ全体の特性を代表するようにバランス良くデータを選ぶ必要がある。この学習データの選定は、入力パラメータが1個ならば2次元図にデータのバラツキを表現することが出来るために、視覚的に選択が可能であるが、複数個の場合には多次元空間の中からデータを選定することになり、試行錯誤を行っていた。本論文では、このような経験と勘に頼った選定法に対して、誰でも確実に学習データを選定することが出来る機械的選択法を提案する。機械的選択法は、下記の手順で行うことができる。

1) 初期学習データを任意に選択する。

初期学習データの選定は、下記の方法が考えられる。

- a) ある1個の入力パラメータに着目し、そのパラメータに対してデータ群の中から外周と中央に位置するデータを適宜選択する。
- b) データ群をある特性（例：構造種別、建物高さ、壁の有無等）に従って数種類に分類し、その中から適宜選択する。

2) 選択された学習データに対して学習を行い、学習結果を用いて全データの推定を行う。

3) 推定した結果、推定値と実際値の比（推定比）が最大・最小となっている物件を1個ずつ選び出し、そのデータ（2個）を新たに学習データとして追加する。

4) 2)、3)を繰り返し、推定誤差が所定の値となるまで行う。

本論での初期学習データは、全データを表-4.12のように分類し、その中から任意に1個ずつ13個（表中網掛けデータ）を選択した。

その後の学習データは、推定誤差を①推定比が1.20~0.80の範囲になるまで、②推定比が1.10~0.90の範囲になるまでと2段階に設定して、2)の方法により行った。

下記で追加学習が1個しかないものは、推定比の最大または最小のどちらかが推定誤差の所定値を満足していたために学習させる必要がなかったことを示している。

学習ケースと学習に使用した物件番号を以下に示す。

- 1) ST13 (物件番号 2, 3, 4, 6, 8, 10, 11, 13, 14, 17, 23, 29, 35)
- 2) ST15 (ST13 + 物件番号 7, 12 計 15件)
- 3) ST16 (ST15 + 物件番号 16 計 16件)
- 4) ST18 (ST16 + 物件番号 20, 37 計 18件)
- 5) ST19 (ST18 + 物件番号 1 計 19件)
- 6) ST21 (ST19 + 物件番号 5, 26 計 21件)

第4章 構造特性係数D s 値の推定

- 7) ST23 (ST21 + 物件番号 34, 38 計 23件)
- 8) ST25 (ST23 + 物件番号 30, 36 計 25件)
- 9) ST27 (ST25 + 物件番号 18, 19 計 27件)
- 10) ST28 (ST27 + 物件番号 33 計 28件)
- 11) ST30 (ST28 + 物件番号 9, 27 計 30件)
- 12) ST32 (ST30 + 物件番号 15, 32 計 32件)
- 13) ST33 (ST32 + 物件番号 22 計 33件)

表 - 4. 1 2 構造分類と物件番号との関係

	壁種別	構造	物件番号
低層 5層 以下	連層壁	RC	
		RC以外	
	せん断壁	RC	14, 19, 21, 32, 36, 37, 39
		RC以外	
	壁なし	RC	2, 12, 18, 22, 24, 31
		RC以外	5, 10, 27, 30
中層 6層 9層	連層壁	RC	1, 8, 28, 34
		RC以外	11
	せん断壁	RC	23
		RC以外	29
	壁なし	RC	13, 16,
		RC以外	3, 7, 9, 20, 25, 38
高層 10層 14層	連層壁	RC	4, 15
		RC以外	35
	せん断壁	RC	
		RC以外	
	壁なし	RC	6, 26, 33
		RC以外	17

2. 推定結果と実際値との比較

ニューラルネットワークの出力結果(OUT)は、D_s値を[0,1]の範囲に規準化したものであるから、式(4.7)より下式によって、ニューラルネットワークの結果をD_s値に変換する。

$$D_s = (OUT - 0.05) / 3.0 + 0.25 \quad (4.8)$$

各学習ケース毎にニューラルネットワークによって推定したD_s値と実際保有水平耐力の算定結果求めたD_s値とを比較(以降、推定比と呼ぶ。推定比=推定値/実際値)した表を表-4.13~表-4.15に示す。

表中、網掛けした部分は、学習に使用した物件(再現性)に対する推定比であり、推定精度は非常に良いことがわかる。網掛け以外の部分は、検証用に使用した物件に対する推定比である。

図-4.3に学習データ数の違いによる推定値と実際値との関係を示す。図中横軸は、実際のD_s値、縦軸は推定したD_s値を示す。●印は学習データに対応し、○印は検証データに対応している。

表-4.13 各学習ケースに対する学習回数の比較

	各ケースに対する学習回数					
	ST13	ST16	ST21	ST25	ST30	ST33
学習回数	117	204	214	334	798	431

表-4.14 各学習ケースに対する推定比の比較

	各ケースに対する推定比					
	ST13	ST16	ST21	ST25	ST30	ST33
最大値	1.89	1.51	1.56	1.27	1.11	1.09
最小値	0.59	0.56	0.60	0.80	0.86	0.94
平均値	1.04	1.01	1.01	1.00	1.01	1.00
標準偏差	0.33	0.17	0.15	0.07	0.04	0.03

表-4.15 各学習ケースに対する推定比の比較

物件	実 際 値	各ケースに対する推定比					
		ST13	ST16	ST21	ST25	ST30	ST33
1	0.40	1.37	1.37	1.01	1.01	1.02	1.00
2	0.30	1.07	1.11	1.09	1.07	1.06	1.07
3	0.40	0.99	1.00	1.00	1.00	1.04	1.00
4	0.40	1.00	1.01	1.01	1.01	1.04	1.00
5	0.30	0.90	0.87	1.00	1.01	1.00	1.01
6	0.45	1.00	1.00	0.98	0.98	1.01	0.99
7	0.25	1.89	1.01	0.97	0.94	0.96	0.96
8	0.55	0.98	0.98	0.95	0.96	1.00	0.99
9	0.40	0.76	1.07	1.04	0.92	1.03	1.00
10	0.25	1.01	1.00	0.99	1.09	1.10	1.09
11	0.35	1.00	1.00	1.00	1.00	1.06	1.00
12	0.45	0.59	0.97	0.97	0.98	1.01	0.99
13	0.30	1.03	0.99	1.02	1.00	1.03	1.02
14	0.50	0.95	0.98	1.01	1.01	1.01	1.07
15	0.45	0.71	1.04	1.08	1.06	1.11	1.01
16	0.30	1.73	0.99	1.03	1.03	1.01	1.03
17	0.40	1.01	1.00	1.01	1.01	1.02	1.00
18	0.30	1.66	0.94	0.83	0.80	0.99	0.98
19	0.35	1.56	0.84	1.26	1.27	1.01	1.02
20	0.35	0.69	1.51	1.00	1.00	1.00	1.01
21	0.55	0.96	0.91	1.01	1.02	0.93	0.94
22	0.30	1.81	0.90	1.11	0.99	0.99	0.98
23	0.40	1.01	1.00	1.00	1.00	1.02	1.00
24	0.30	1.07	1.10	1.09	1.07	1.06	1.08
25	0.25	1.58	1.24	1.06	0.98	0.99	1.03
26	0.50	0.63	0.95	1.01	1.00	1.02	1.00
27	0.30	0.90	0.85	0.89	0.97	1.00	1.00
28	0.40	0.90	1.11	0.73	1.00	0.97	0.97
29	0.40	1.01	1.01	1.00	1.00	1.02	1.00
30	0.30	0.84	0.84	0.84	0.93	0.93	0.94
31	0.45	0.59	0.96	0.96	0.98	1.02	1.01
32	0.50	0.87	0.89	0.91	0.92	0.86	0.97
33	0.45	0.69	1.12	1.09	1.06	1.03	1.00
34	0.40	1.04	1.24	0.60	1.00	1.01	1.00
35	0.35	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.00
36	0.40	1.17	1.32	1.34	1.00	1.02	1.01
37	0.50	1.07	0.56	0.99	0.99	1.00	0.99
38	0.30	0.78	0.95	1.56	1.01	1.02	1.01
39	0.55	0.88	0.60	0.92	0.98	1.02	1.02

第4章 構造特性係数 D_s 値の推定

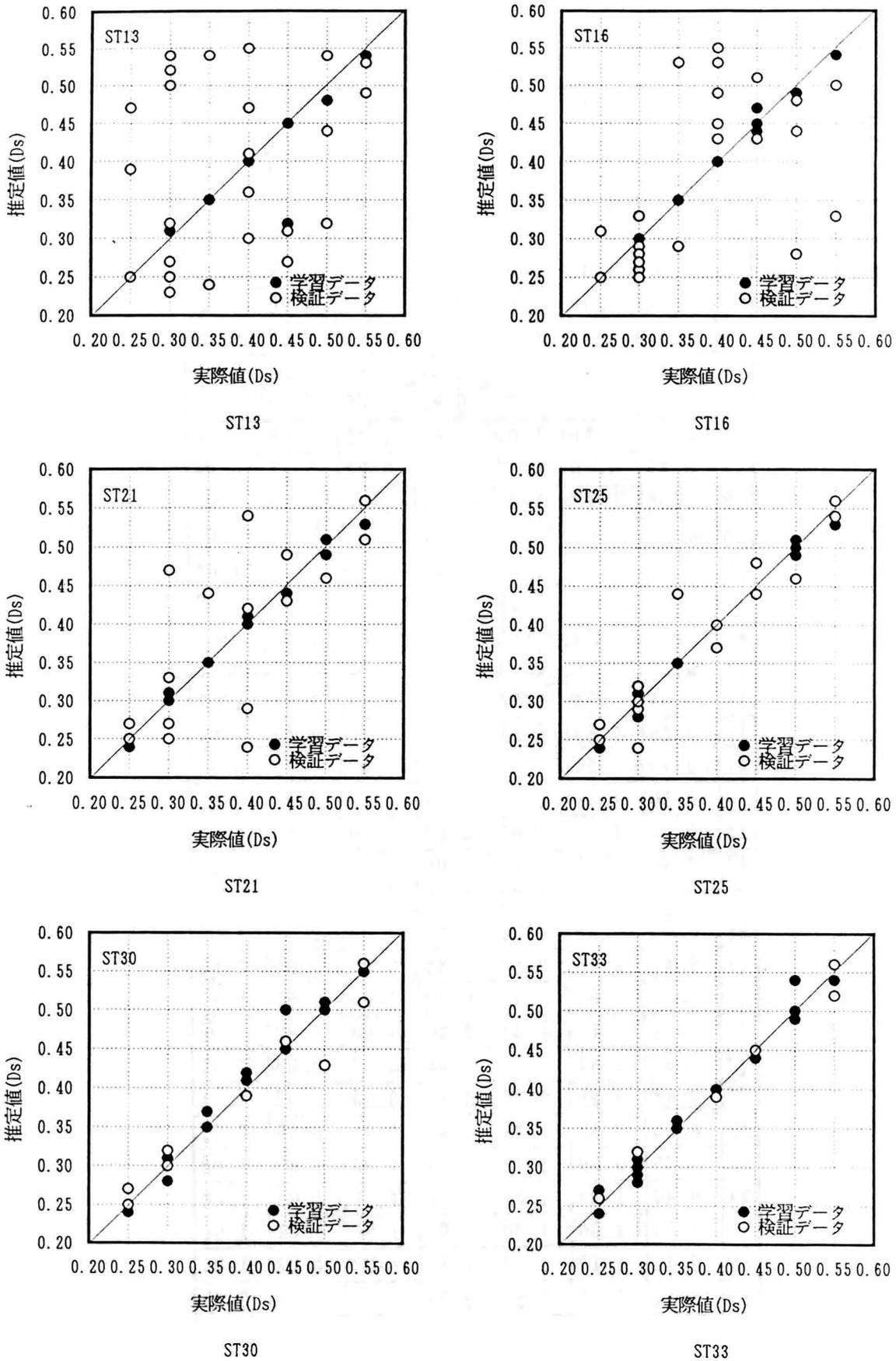


図 - 4. 3 各学習ケースに対する推定比の関係

3. 入力パラメータに関する検討

今回選択した入力パラメータとD s 値の間には、図-4. 1からも分かるように統計学的には相関が小さいパラメータが含まれている。これらのパラメータが、ニューラルネットワークにとって妥当であったかどうかの検討を行うために、一例として下記3ケースの追加学習を行った。

- a) STI4 スパン長に関するパラメータ IN4を除いた5個の入力パラメータに対する学習
- b) STI3 階高に関するパラメータ IN3を除いた5個の入力パラメータに対する学習
- c) STI2 層数に関するパラメータ IN2を除いた5個の入力パラメータに対する学習

それぞれ学習に使用した物件はST25と同一である。

図-4. 4に入力パラメータ5個の場合の実際値と推定値との関係を、表-4. 16～表-4. 17に推定比及び学習回数・打ち切り誤差の比較を示す。

3ケースとも学習の収束は遅く特にSTI4では学習回数2000回（誤差0.01以下）を越えてからの誤差の収束がほとんど見られなかったので2000回で学習を打ち切った。

STI2以外のケースでは推定精度がパラメータ6個の時より悪くなっているが、表-4. 11より下記の原因が考えられる。

- 1) STI4では5個の入力データが全く同じなのに、D s 値が違う物件番号の組み合わせ(N03, N025)、(N02, N030)、(N019, N036)、(N020, N038)が存在している。
- 2) STI3では4個の入力データと出力値が全く同じなのに、入力値が違う組み合わせ(N02, N022)が存在している。

本論では、このようなデータが存在しているデータ群を「ユニークでない」と定義する。「ユニークでない」データ群を学習データとして用いる場合には、学習の収束・推定精度とも悪くなると思われる。

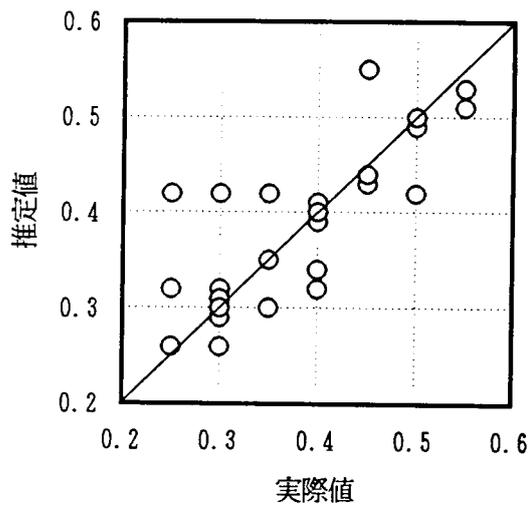
従って、入力パラメータの選定を行う場合には、学習データ群の各パラメータの値が「ユニーク」となるように選定することが重要である。

表-4. 16 入力パラメータの違いによる検討

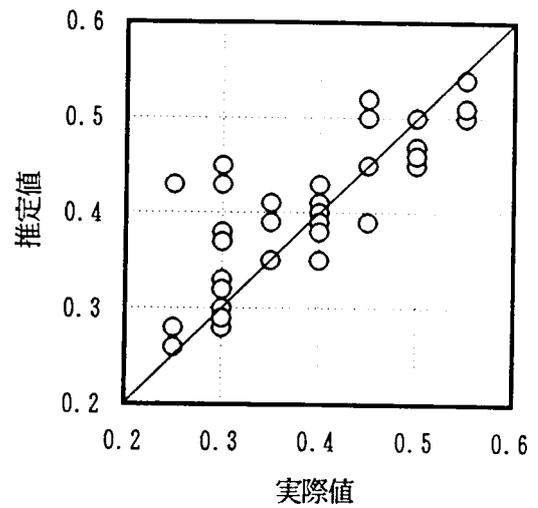
入 力	学 習 ケ ー ス	推 定 比				学 習	
		最大	最小	平均	標準偏差	回数	誤差
6	ST25	1.27	0.80	1.00	0.07	334	0.001
5	STI4	1.67	0.79	1.02	0.16	2000	0.009
	STI3	1.73	0.86	1.05	0.18	2000	0.009
	STI2	1.18	0.76	0.97	0.09	2000	0.007

表-4.17 入力パラメータ数の違いに対する推定比の比較

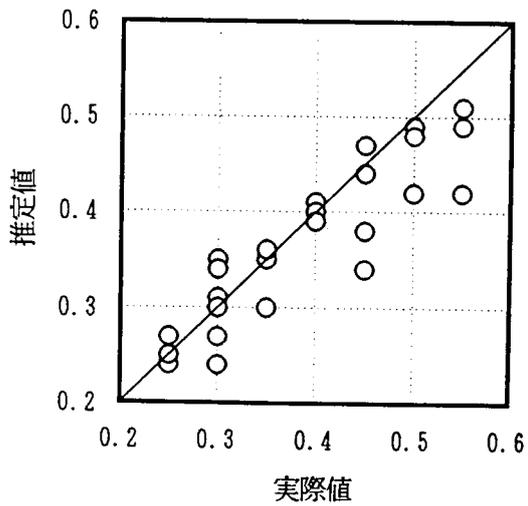
物件	実 際 値	入力パラメータ			
		6	5		
		ST25	STI4	STI3	STI2
1	0.40	1.01	1.02	1.07	1.01
2	0.30	1.07	1.01	1.25	1.02
3	0.40	1.00	0.79	1.04	1.01
4	0.40	1.01	1.00	1.02	1.01
5	0.30	1.01	1.00	1.00	1.00
6	0.45	0.98	0.95	0.99	0.77
7	0.25	0.94	1.02	1.11	0.96
8	0.55	0.96	0.93	0.92	0.93
9	0.40	0.92	0.99	0.94	0.99
10	0.25	1.09	1.67	1.73	1.09
11	0.35	1.00	0.99	0.99	0.99
12	0.45	0.98	0.97	0.87	0.99
13	0.30	1.00	1.07	0.94	1.01
14	0.50	1.01	0.99	0.95	0.99
15	0.45	1.06	1.22	1.15	0.85
16	0.30	1.03	1.04	1.09	1.18
17	0.40	1.01	1.02	1.02	0.98
18	0.30	0.80	0.87	1.50	0.81
19	0.35	1.27	1.20	1.18	1.02
20	0.35	1.00	0.85	1.10	0.85
21	0.55	1.02	0.93	0.92	0.76
22	0.30	0.99	0.96	0.96	1.13
23	0.40	1.00	0.99	1.00	0.99
24	0.30	1.07	1.01	1.23	1.02
25	0.25	0.98	1.27	1.05	1.01
26	0.50	1.00	1.00	0.99	0.99
27	0.30	0.97	1.00	1.05	1.01
28	0.40	1.00	0.85	0.88	0.96
29	0.40	1.00	0.99	1.00	1.00
30	0.30	0.93	1.39	1.42	0.90
31	0.45	0.98	0.97	0.86	0.99
32	0.50	0.92	0.84	0.91	0.84
33	0.45	1.06	1.21	1.10	1.04
34	0.40	1.00	0.98	0.99	0.99
35	0.35	1.00	0.99	0.99	0.99
36	0.40	1.00	0.99	0.99	0.99
37	0.50	0.99	0.84	0.90	0.96
38	0.30	1.01	1.00	0.98	1.00
39	0.55	0.98	0.97	0.99	0.89



ST14



ST13



ST12

図-4.4 入力パラメータが5個の場合の推定比の関係

4. 重回帰分析による D s 値の推定

統計的手法である重回帰分析³⁾によって D s 値を推定する。偏回帰係数は下記の2ケースに対して求めた。

- 1) 入力パラメータが6個
- 2) 入力パラメータが5個(スパン長に関するパラメータ IN4を除く)

それぞれのケースとも全物件を対象とした。

図-4.1、表-4.10より分かるように、入力値と D s 値の間には統計的に相関があるとはいいがたい。

このような、相関があまりない場合の重回帰分析による D s 値の推定は、信頼性が低くなる。図-4.5に線形重回帰分析による推定値と実際値との関係と比較した図を示す。線形回帰分析は、Excel⁴⁾を使用した。

線形回帰式は下式のようになる。

- 1) 入力パラメータが6個の場合

$$D_s = 0.384 + 0.024IN_1 + 0.020IN_2 + 0.001IN_3 - 0.008IN_4 - 0.002IN_5 + 0.019IN_6 \quad (4.9)$$

重相関係数	0.50	分散比 F 値	1.48
重決定係数	0.25	F 値に対応する有意水準 α	0.22

- 2) 入力パラメータが5個の場合(IN4を除く)

$$D_s = 0.393 + 0.020IN_1 + 0.013IN_2 - 0.009IN_3 - 0.004IN_5 + 0.040IN_6 \quad (4.10)$$

重相関係数	0.45	分散比 F 値	1.72
重決定係数	0.21	F 値に対応する有意水準 α	0.16

図よりも分かるが重回帰式の当てはまり精度を示す決定係数³⁾は、1)の場合 0.25 2)の場合 0.21 と 1 に対して非常に小さい。また、回帰による変動の不偏分散と回帰からの残差変動の不偏分散の比である F 値³⁾に対する有意水準 α の値も、1)の場合、0.22 2)の場合も 0.16 と一般的な有意水準 α 値である 0.05 の値と比べて非常に大きく、線形回帰分析では D s 値の推定は難しいといえる。

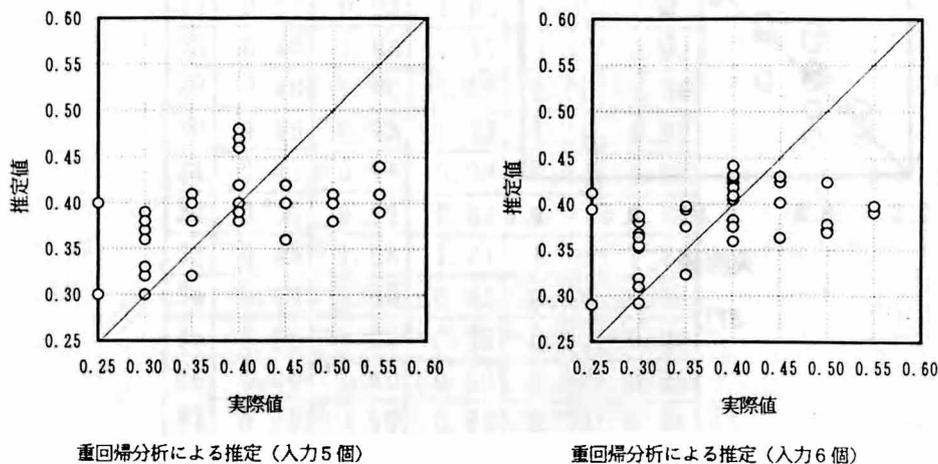


図-4.5 重回帰分析による推定

5. 考察

以上の結果より、以下の考察を得た。

- 1) 本手法による学習選択法は、誰でも確実に学習精度を上げることができる有効な手法である。
- 2) 入力パラメータと出力値との間の相関係数が小さくても、ニューラルネットワークは十分な推定精度を確保することが出来る。従って、経験や、勘と言った曖昧な要素もニューラルネットワークでは有効である。
一方、線形重回帰分析では、本ケースのように入力パラメータと出力値との間の相関係数が小さいと、推定精度は低く、推定精度を高めようとする入力パラメータの見直しや、高度な非線形数学式の定式化等を行わなければならない、一般の構造設計者には実用的ではないと思われる。
- 3) ニューラルネットワークで入力パラメータ6個の場合、学習ケースST25で推定比の標準偏差を0.07に抑えることができた。これは、推定比が正規分布に従うと仮定すると全データの約7割のデータを推定誤差7%以内に、全データの95%を推定誤差14%以内に推定できることを示し、構造計画で利用するには十分な精度であると思われる。
- 4) ニューラルネットワークで入力パラメータ6個の場合、学習ケースST33で推定比の標準偏差を0.04に抑えることができた。これは、全データの約7割のデータを推定誤差4%以内に、全データの95%を推定誤差8%以内に推定できることを示し、構造計画では、十分すぎる精度であると考えられる。
- 5) ニューラルネットワークでの入力パラメータの設定においては、学習時の数値データ間の組み合わせが「ユニーク」であることが望ましい。
「ユニーク」であるとは、ある1個のパラメータを除く他のパラメータの値が同じであるデータ群に対して、残りの1個のパラメータの値は、異なった値を持たないことを言う。
- 6) D s 値の場合、IN3, IN4を除いた5個の入力パラメータの場合にはこのネットワークは「ユニーク」とは言えない。
また、IN2を除いたケースでは、推定精度は確保されるが学習効率が悪く（入力パラメータ6個の場合の約6倍の学習回数が必要）、最初に設定した入力パラメータの数は妥当であったといえる。

尚、本報で学習用として収集したデータは、(株)フジタで「BUILSYS-V3」を使用して1992年度に実施または計画を行った物件である。従って、この学習データが全て(過去及び将来)のデータを代表しているとは考えられない。従って、今後とも実績データを蓄積し、学習データと実績データとの関係を定期的に見直すことが必要である。

第4節 結語

本章で得られた結論を以下に述べる。

- 1) ニューラルネットワークは、統計的手法である重回帰分析と比較して、容易に精度を確保することができ実用性が高いシステムである。
特に、入力パラメータと出力値との間に相関関係が認めがたいものについても非常に有効である。
- 2) ニューラルネットワークを利用することにより構造設計ノウハウを容易にシステム化することができ、組織設計としてのノウハウの共有化・標準化が可能である。
- 3) 構造設計ノウハウのシステム化は、目標とするターゲットに対して影響を及ぼしていると思われる要因を選び出し、過去の設計例を基に数値化し、本論で示した機械的選択法によって学習させることによって容易に行うことができる。
- 4) 構造計画段階での D_s 値の推定は、建物形状、壁配置に関する簡単な6個のパラメータ（構造種別、層数、階高、スパン長、連層壁の存在率、せん断壁の存在率）で推定可能である。
- 5) 学習データの見直しは定期的に行う必要がある。
学習データの見直しを行い本報で提案した手法に基づき再学習を行うことにより推定精度を高めることができる。

【参考文献】

- 1)日本建築センター：構造計算指針・同解説 1991年版 pp.15-24.
- 2)BCJ-電174:ビルディングレター 91.4増刊号
- 3)奥野忠一・久米均・芳賀敏郎・吉澤正「多変量解析法」日科技連 pp.25-157
- 4)Excelは米国マイクロソフト社の登録商標。
- 5)八名和夫・鈴木義武「ニューロ情報処理技術 基礎と応用」海文堂 P41-P48
- 6)矢川元基編:計算力学とCAEシリーズ12、ニューラルネットワーク、培風館、1992.

第5章

耐震壁の負担せん断応力度の推定 に関する研究

第1節 緒 言	- 81 -
第2節 耐震壁の幾何配置による分類と負担せん断応力度	- 83 -
1. 分析に使用したモデル	- 83 -
2. 解析方法	- 83 -
3. 分析結果	- 85 -
第3節 連層耐震壁のみ存在する場合の負担せん断応力度の推定	- 87 -
1. 連層壁の負担せん断応力度に影響を及ぼす要因	- 87 -
2. 入力・教師信号のモデル化	- 89 -
3. 学習・検証用データ	- 90 -
4. ニューラルネットワークの構成	- 97 -
5. 学習方法	- 97 -
6. 推定結果と実際値との比較	- 98 -
7. 考察	- 102 -
第4節 独立壁・取り付き壁と混在する場合の連層耐震壁負担せん断応力度の推定	- 103 -
1. 連層壁の負担せん断応力度に影響を及ぼす要因	- 103 -
2. 階層型ニューラルネットワークの構成	- 105 -
3. 学習用基本壁配置と学習方法	- 105 -
4. 検証方法	- 107 -
5. 内挿性検証用壁配置モデル	- 107 -
6. 外挿性検証用壁配置モデル	- 107 -
7. 推定結果と実際値との比較	- 109 -
8. 考察	- 111 -
第5節 独立壁・取り付き壁と連層壁が混在する場合の独立壁・取り付き壁負担せん断応力度の推定	- 112 -
1. ニューラルネットワークの構成	- 112 -
2. 学習用基本壁配置と学習方法	- 113 -
3. 検証方法	- 114 -
4. 推定結果と実際値との比較	- 115 -
5. 考察	- 117 -
第6節 結 言	- 118 -
【参考文献】	- 120 -

第1節 緒 言

本章では、構造計画段階における部材断面推定システムを構築する上で重要な「経験的非明示知識」である「耐震壁負担せん断応力度の推定」に関し、ニューラルネットワークを利用した知識獲得手法について考察する。

部材断面の推定を行う際には、建物が持つべき必要保有水平耐力を、フレームと壁にどの程度分担させるかが重要な要素となる。壁は、建物の中における平面及び立面での配置状態によって、その負担せん断耐力が大きく変化する。特に連層壁のような浮き上がり崩壊系や曲げ崩壊系を示す壁と、せん断崩壊系を示す独立壁等が同一建物の中に混在する場合は、その負担せん断耐力の評価は難しく、豊富な経験と工学的センスが必要である。

また、壁の負担せん断耐力は、同じ状況（崩壊系、位置等）の壁であっても壁長さによって変化するために一般化することは難しい。一方、壁のせん断応力度は、壁形状・配置によって崩壊系が定まり、崩壊系と壁位置によってある程度一般化できると思われる。従って、個々の壁のせん断応力度(τ_{wi})が推定できれば、壁の負担せん断耐力(Q_w)は、壁厚（経験的に知られている： t_w ：同一層同厚とする）を乗じる事により、下式で求めることができる。

$$Q_w = t_w * \Sigma(\tau_{wi} * L_{wi}) \quad (5.1)$$

- Q_w : 壁の必要せん断耐力 (tf)
 L_{wi} : 個々の壁の長さ (m)
 τ_{wi} : 個々の壁の負担せん断応力度

本論では汎用性を持たせるために壁の負担せん断応力度を推定し、推定された負担せん断応力度に、壁長さ、壁厚を乗じて壁の負担せん断耐力を求める事にする。

このような経験・工学的センスのシステム化が可能であれば、経験の少ない設計者でも、精度の良い部材断面を設定する事が出来、品質の高い構造設計を行う事が出来るようになると思われる。

以上のような基本的認識の下で、本章では、この設計者の経験と勘によって評価を行っていた壁の負担せん断応力度を建物形状や部材配置情報等をパラメータとしてニューラルネットワークを用いて推定する方法を提案する。

第2節では、耐震壁の負担せん断応力度と耐震壁の配置との関係を分析し、耐震壁は、浮き上がりまたは曲げ崩壊系を示す「連層壁」、せん断崩壊系を示す「独立壁」、連層壁に接する「取り付け壁」の3種類に分類でき、これらの壁が混在する場合の連層壁の負担せん断応力度は、連層壁だけが存在する場合の負担せん断応力度（基本せん断応力度）と、独立壁や取り付け壁が存在する事によって生じる応力度（補正せん断応力度）の和で表されることを示す。

第3節では、浮き上がり降伏系を示す連層壁だけが存在する建物の連層壁の負担せん断応力度（基本せん断応力度）について考察する。最初に、連層壁の負担せん断応力度に影響を及ぼす要因の分析を行い、ニューラルネットワークの入力パラメータを決定し、数値モデル化を行う。次に、浮き上がり崩壊系を示す連層壁を持つ建物モデルを作成し、学習用データ・検証用データを作成する。さらに、ニューラルネットワークの階層構造を設定し、学習を行い、検証データに対する推定精度の検証と考察を行った。

第4節では、浮き上がり降伏系を示す連層壁にせん断降伏系を示す独立壁、又連層壁に接する取り付け壁とが混在した建物の連層壁の補正せん断応力度について考察する。最初に、独立壁や取り付け壁と共存する連層壁を持つ建物モデルを作成し、学習用データ・検証用データを作成する。次に、ニューラルネットワークの階層構造を設定し、学習を行い、検証データに対する推定精度の検証と考察を行った。連層壁の基本せん断応力度と補正せん断応力度が推定できれば、独立壁や取り付け壁と共存する連層壁の負担せん断応力度は、それらの応力度を加算する事によって求めることができる。

第5節では、第4節を発展させ、浮き上がり降伏系を示す連層壁にせん断降伏系を示す独立壁、又連層壁に接する取り付け壁とが混在した場合に、連層壁の補正せん断応力度と同時に、独立壁・取り付け壁の負担せん断応力度をも学習を行い、推定・検証を行った。学習に使用したモデルは、第4節と同様である。

第6節では、壁の負担せん断応力度の推定に関してまとめを行い、結論を述べる。

第2節 耐震壁の幾何配置による分類と負担せん断応力度

耐震壁の配置は無数に考えられるが、終局強度設計を前提に考えた場合、連層壁架構中の壁要素は、浮き上がりまたは曲げ崩壊系を示す「連層壁」、せん断崩壊系を示す「独立壁」、連層壁に接する「取り付け壁」の3種類に分類できる。

本節では、「連層壁」と「独立壁」、「取り付け壁」が混在する場合に「連層壁」の応力度に着目し、「独立壁」、「取り付け壁」が存在することによる「連層壁」の応力度変化について分析を行った。

1. 分析に使用したモデル

本論では、浮き上がりによって耐力が決定される8層連層壁モデルを対象とした。

独立壁・取り付け壁が混在する事による連層壁の応力度変動を分析するために、図-5.1に示す連層壁のみ存在する基本建物モデルと、図-5.2に示す、連層壁と独立壁・取り付け壁が混在する学習用壁配置モデルを作成し、各モデルに対する保有水平耐力の算定を行い、保有水平耐力時の連層壁の負担せん断応力度の分析を行った。

連層壁と独立壁の組み合わせをSタイプ、取り付け壁との組み合わせをTタイプとする。

2. 解析方法

解析は、当社保有の『BUILSYS-V3¹⁾』を使用し、荷重増分法による保有水平耐力の算定を行った。保有水平耐力としては、基礎に浮き上がりが生じ層間変形角が1/50に達したときとした。壁の応力は、一般化を行うためにせん断応力度を $\sqrt{F_c}$ で除した値を使用した。

第5章 耐震壁せん断応力度の推定

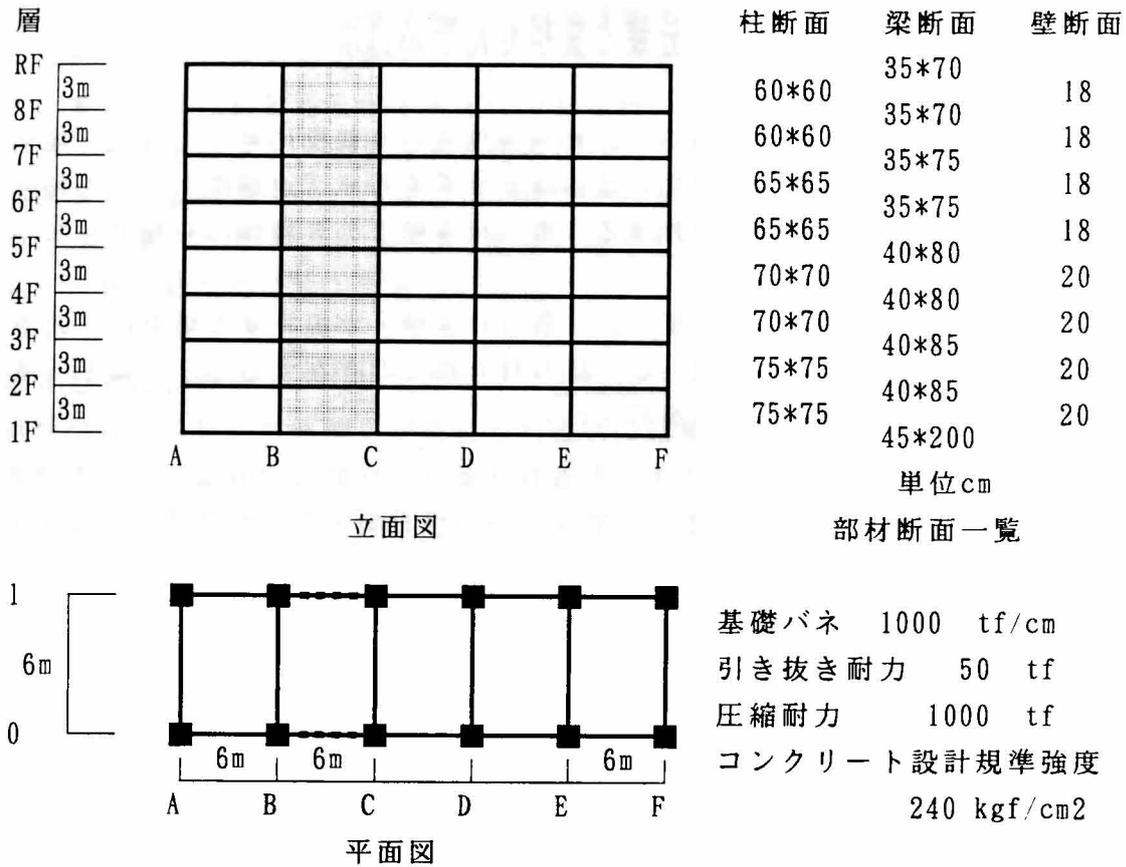


図-5.1 基本建物モデル

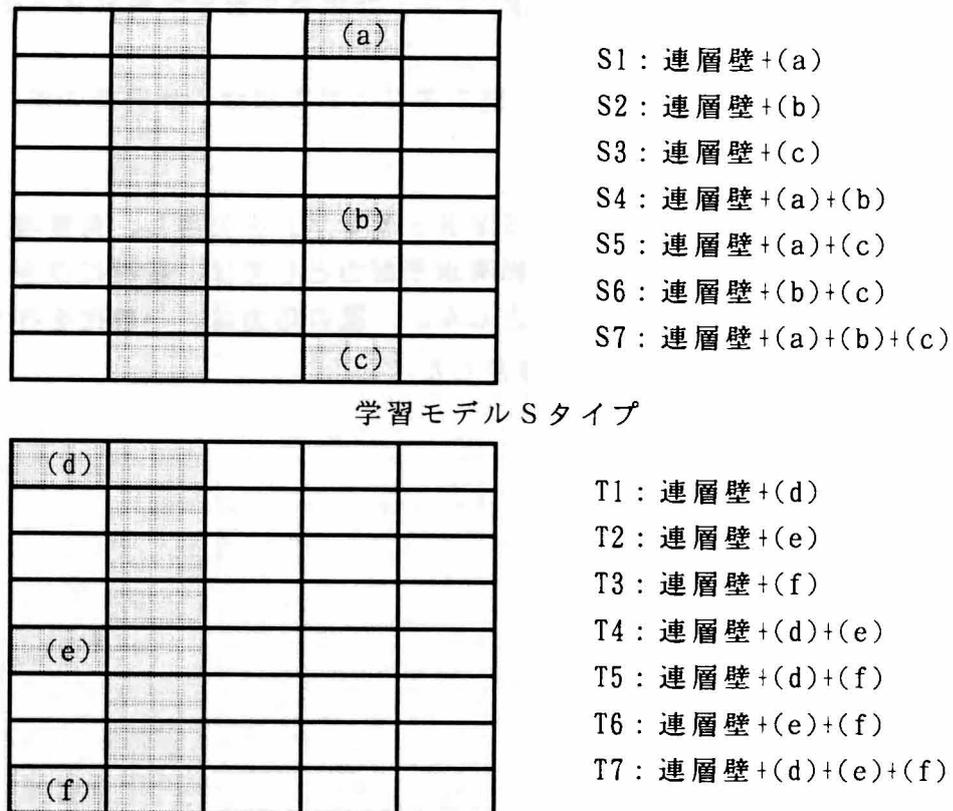


図-5.2 学習用壁配置モデル

3. 分析結果²⁾

Sタイプ、Tタイプの差異を図-5.3、5.4に示す。図より以下のことが推察される。ただし、Tタイプでの連層壁の応力度は取り付き壁と連層壁のせん断耐力の和を連層壁の断面積で除した値を使用している。図中、横軸の数字は、最上層から数えた対象層の層位置である。

【Sタイプの傾向分析】

- 1) 対象層のみに壁が存在する場合、対象層での応力度の差異は最も大きく、逆せん断応力となっている。
- 2) 他の層にも壁が存在する場合、対象層のみに壁が存在する場合に比べて対象層での応力度の差異は小さくなるが、その割合は、他の壁が存在する層が下層にあるほど大きい。
- 3) 対象層に壁が存在しない場合は、他の層に壁が存在することにより対象層の応力度は増加するが、対象層の上下層に壁が存在する場合はその増加割合は少ない。

【Tタイプの傾向分析】

- 1) 対象層に壁が存在する場合、対象層での応力度は大きくなり、対象層が下層であるほど大きくなる。
- 2) 他の層にも壁が存在する場合、対象層のみに壁が存在する場合より、他の壁が存在する層が対象層より上層である場合は小さくなり、逆に他の壁が存在する層が下層であるならば大きくなる。
- 3) 複数層に壁が存在する場合は、他の層一層だけに壁が存在する場合よりも対象層での差異は小さくなっている。
- 4) 対象層に壁が存在しない場合、対象層が最下層以外では応力度の差異は小さい。

以上の分析結果より、次の仮定を使用する事が出来る。

- 1) 連層壁架構中の壁要素は、浮き上がりまたは曲げ崩壊系を示す「連層壁」、せん断崩壊系を示す「独立壁」、連層壁に接する「取り付き壁」の3種類に分類できる。
- 2) 連層壁のせん断応力度(τ)は、連層壁のみ存在する場合の応力度、すなわち基本せん断応力度(τ_0)と、独立壁・取り付き壁が混在する事により派生する補正せん断応力度($\Delta\tau$)との代数和として与える事ができる。
- 3) 補正せん断応力度($\Delta\tau$)は各層ごとに求める事とするが、当該層の位置(例えば3層目、5層目等)や独立壁・取り付き壁の配置関係(たとえば当該層より2層上に独立壁が2枚、1層下に取り付き壁が1枚等)を変数として考慮する事により、どの層に関しても同一の関数で与えられる。

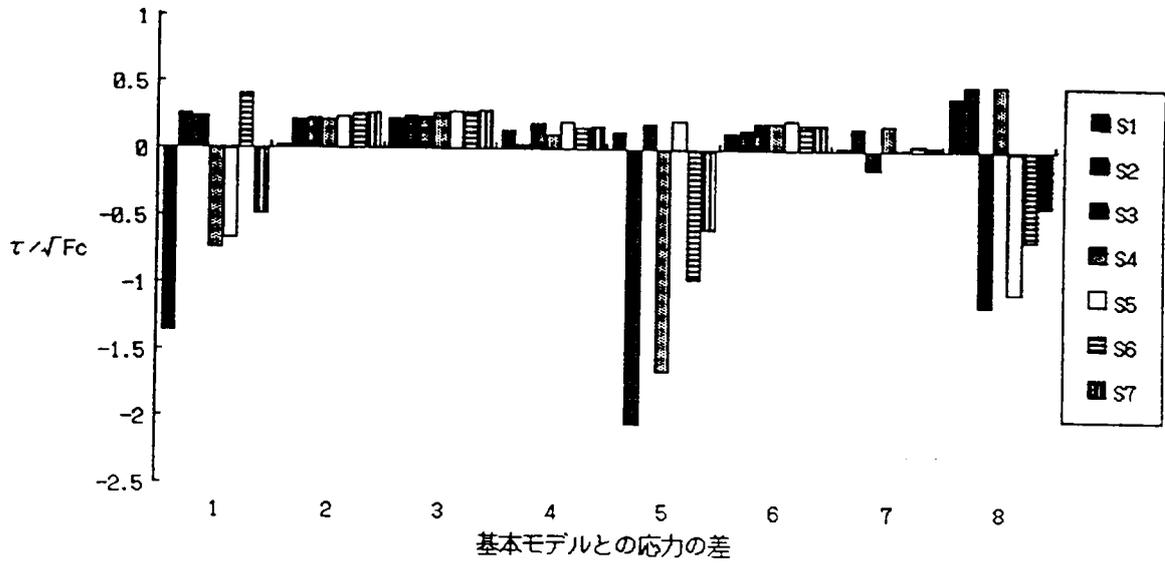


図-5.3 基本モデルとSタイプの応力の差異

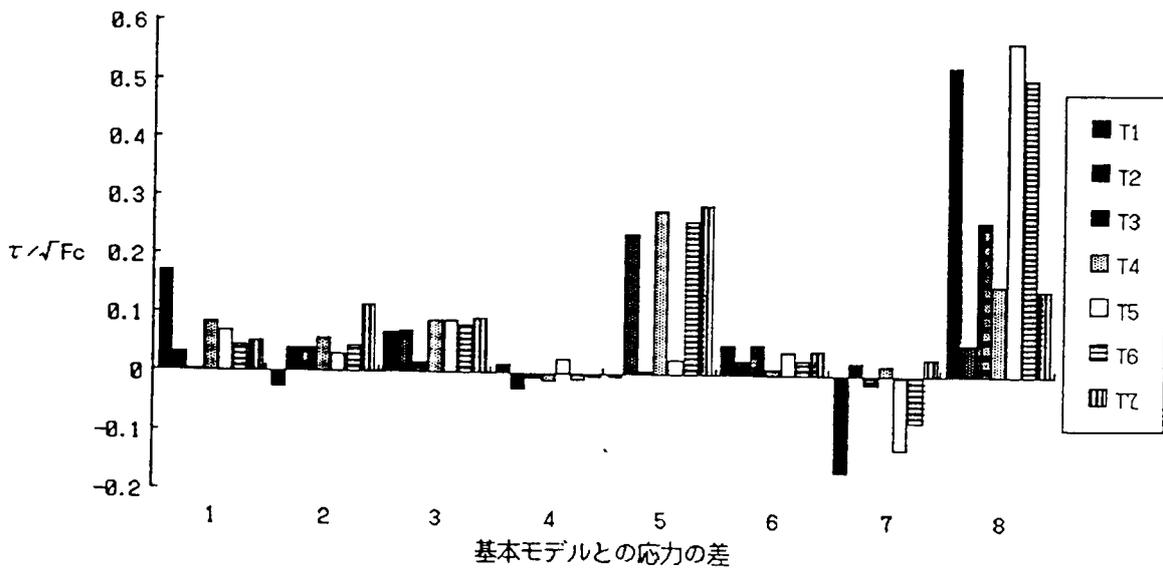


図-5.4 基本モデルとTタイプの応力の差異

第3節 連層耐震壁のみ存在する場合の負担せん断応力度の推定

本節では、連層壁のみ存在する場合について、連層壁の負担せん断応力度に影響を及ぼす要因を分析し、それらを入力信号とする事により、ニューラルネットワークを構成した。また、連層壁のみ存在する学習・検証用の建物モデルを作成し、学習モデルに対して学習を行い、検証モデルによってその推定精度を検証した。このシステム化により、経験の少ない設計者でも連層壁の個々位置での負担せん断応力度を精度良く推定し、壁の負担せん断耐力の合理的な推定が可能となり、品質の高い構造設計を行うことができると思われる。

1. 連層壁の負担せん断応力度に影響を及ぼす要因

本論では、構造計画初期段階での浮き上がり降伏系を示す連層壁の負担せん断応力度を対象としている。すなわち、保有水平耐力の算定はもちろん、部材断面すら求められていない段階を対象としている。そのような状況で利用できる情報は、建物形状、部材配置といった、意匠図より読み取ることができる簡単な情報だけである。設計者は図面をみただけで過去の経験や工学的センスによって瞬間的に負担せん断応力度の推定を行っている。設計者が瞬間的に判断の基礎としている因子を明確にし、それらをニューラルネットワークの入力パラメータとする事によって設計者が持っている負担せん断応力度推定のためのノウハウをシステム化することができると思われる。

浮き上がり降伏系を示す連層壁の負担せん断応力度を決定づけている最も支配的な要因は、下記の4項目である。

① 壁のプロポーション（壁高さ／壁長さ）

壁のプロポーション（壁高さ／壁長さ）が大きいほど、浮き上がりは生じ易い。浮き上がりが早期に発生すれば、その分連層壁の負担せん断耐力は少なくなる。

② 対象層の連層壁内での位置

対象層の連層壁内での位置によっても、連層壁の負担せん断耐力は大きく変わってくる。最上層および最下層では、逆せん断力となる場合もある。

通常、浮き上がり降伏系を示す連層壁の負担せん断耐力の高さ方向の分布は、中間層が最も大きく、上層および下層にいくに従って小さくなっている。

③ 壁の配置位置

壁の浮き上がりに抵抗する要素としては、壁が負担する長期軸力、および境界梁の曲げ戻しが考えられる。長期軸力が大きければ、浮き上がりの発生は遅れ、その分せん断耐力の負担を大きくすることができる。また、境界梁の曲げ戻し効果によっても連層壁のせん断耐力の負担を大きくする事が出来る。これら、長期軸力や境界梁の効果は、連層壁が建物のどの位置にあるか（すなわち、外周フレームにあるのか、内部フレームにあるのか、また、同じフレ-

ムでも、境界梁の本数が1本か2本か)によって大きく影響される。

④ 壁とフレームとの存在率

連層壁の負担せん断応力度は、連層壁だけで決まるものではなくフレームとの相互関係(剛性・耐力)で決まってくる。従って、連層壁が対象層の中にどの程度存在しているか、という点も重要なポイントになると思われる。

以上の考察をベースとして、著者の設計経験をもとに入力パラメータとして、下記のパラメータを採用することにした。

- 1)連層壁のプロポーション(壁高さ/壁長さ)
- 2)当該方向対象層の連層壁の存在率
- 3)連層壁の存在位置に対するフラッグ1(境界梁の本数)
- 4)連層壁の存在位置に対するフラッグ2(外周フレーム、内部フレーム)
- 5)連層壁の中での対象層の位置

それぞれの入力パラメータは、数値化を行った。

数値化の手法を次ぎに述べる。

2. 入力・教師信号のモデル化

1) 連層壁のプロポーション（壁高さ／壁長さ）に関するパラメータ (IN1)

連層壁の壁高さHとし、壁長さをBとする。パラメータの値が H/B=8.0の時1.0、H/B=2.0の時、-1.0となるように、下式により規準化を行う。

$$IN1 = (H/B - 5.0) / 3.0 \quad (5.2)$$

2) 連層壁の存在率に関するパラメータ (IN2)

連層壁の存在率は、当該方向対象層の全スパン数(S)に対して、連層壁の存在するスパン数(Wrs)の比 Wrs/Sで求められる。パラメータの値が、0.05の時-1.0、0.15の時1.0となるように下式により規準化を行う。

$$IN2 = (Wrs/S - 0.10) / 0.05 \quad (5.3)$$

3) 連層壁の存在位置に対するフラッグ1に関するパラメータ (IN3)

下式のように規準化を行う。

$$IN3 = \begin{cases} 1.0 & : \text{境界梁 2 本の場合} \\ -1.0 & : \text{境界梁 1 本の場合} \end{cases} \quad (5.4)$$

4) 連層壁の存在位置に対するフラッグ2に関するパラメータ (IN4)

下式のように規準化を行う。

$$IN4 = \begin{cases} 1.0 & : \text{内部フレームの場合} \\ -1.0 & : \text{外部フレームの場合} \end{cases} \quad (5.5)$$

5) 連層壁の中での対象層の位置に関するパラメータ (IN5)

連層壁の層数をNzとし、対象層を jz（上層より）とする。パラメータの値が、対象層が最上層の時-1.0、最下層の時1.0となるように、下式により規準化を行う。

$$IN5 = 1.0 - 2.0 * (Nz - jz) / (Nz - 1) \quad (5.6)$$

6) 教師信号 (OUT)

教師信号は、連層壁の負担せん断応力度比(rw)を採用するが、ニューラルネットワークに使用しているシグモイド関数の性質上、出力は [0.1, 0.9] の範囲に限定した方がよい。従って、負担せん断応力度の最大値(1.25)、最小値(-1.0)を求め、ほぼ 0.9 から 0.1 と範囲に納まるように下式により規準化を行う。

$$rw = Qw * 1000 / tw / B / \sqrt{Fc}$$

$$OUT = (rw - 0.1) * 0.35 + 0.5 \quad (5.7)$$

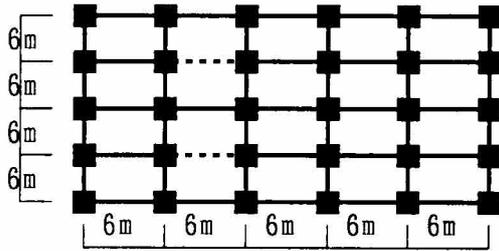
Qw : 連層壁の負担せん断耐力(tf) tw : 連層壁厚さ (cm)

B : 連層壁長さ (cm)

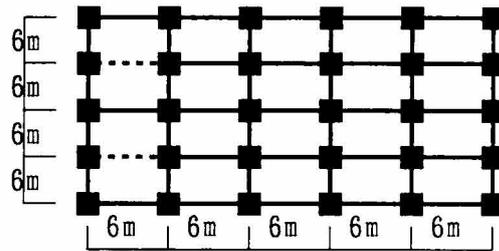
Fc : コンクリートの圧縮に対する材料強度 (kgf/cm²)

3. 学習・検証用データ

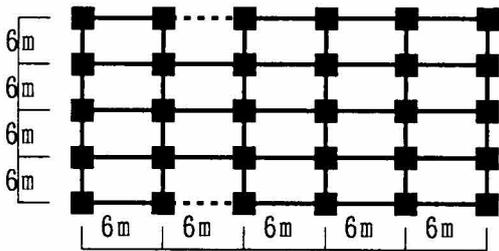
学習・検証用データとして、実際に設計された物件の使用は物件数が少なく適当ではないため、本節では、連層壁の負担せん断応力推定用のモデルを作成した。基本モデル図を図-5.5に示す。モデルは、連層壁の存在位置を変えたもの4種類、スパン数（存在率）を変えたもの3種類、層数（プロポーション）を変えたもの3種類の計36ケース作成した。表-5.1に一覧表を示す。



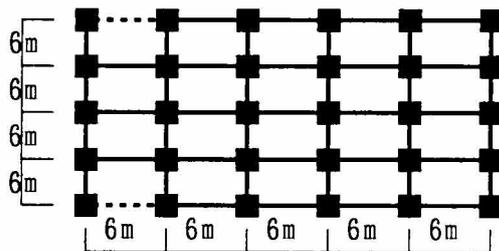
(a)内部フレーム、境界梁 2本



(b)内部フレーム、境界梁 1本

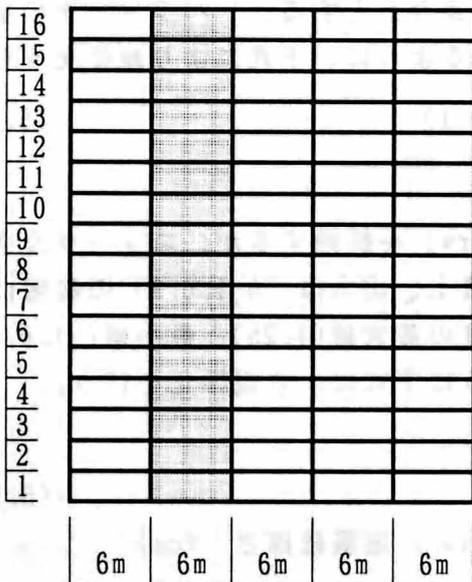


(c)外部フレーム、境界梁 2本

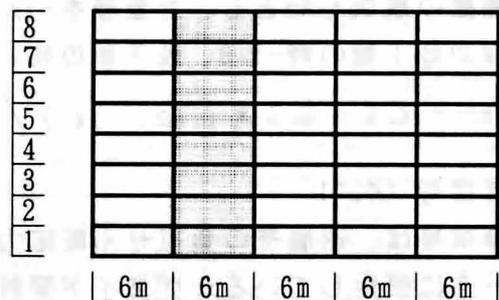


(d)外部フレーム、境界梁 1本

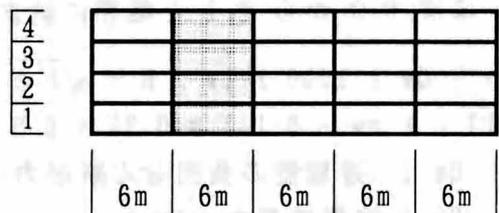
※破線は、耐震壁位置を示す。



(e)プロポーション 8.0



(f)プロポーション 4.0



(g)プロポーション 2.0

図-5.5 基本モデル図 (X方向 5スパンの場合)

表-5.1 学習・検証モデル一覧

X方向スパン		L (10スパン)				M (5スパン)				S (3スパン)			
壁配置タイプ		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
層数	16層	●	●	●	●	●	○	○	○	●	●	●	●
	8層	○	●	○	○	●	●	●	●	○	○	○	●
	4層	●	●	●	●	○	○	○	○	●	●	●	●

壁配置タイプ 1 : 内部フレーム、境界梁2本
 2 : 内部フレーム、境界梁1本
 3 : 外部フレーム、境界梁2本
 4 : 外部フレーム、境界梁1本

表中、●印は学習用として使用した物件、○印は検証用として使用した物件（外挿性検証）を示す。当初は、L161-4, S161-4, M81-4, L41-4, S41-4のみを学習用としていたが、学習の結果、M161-4, L81-4, S81-4に大きな誤差がみられたので、M161, L82, S83を学習用として追加を行った。

学習用物件については、全層を学習させるのではなく、高さ方向の応力度分布を見ながら下記のように学習層を選択した。学習しなかった層については、検証用（内挿性検証）として使用した。

16層のモデル

学習層（再現性検証） 1, 3, 5, 8, 11, 15, 16層
 それ以外（内挿性検証） 2, 4, 6, 7, 9, 10, 12, 13, 14層

8層モデル

学習層（再現性検証） 1, 3, 5, 7, 8層
 それ以外（内挿性検証） 2, 4, 6層

4層モデル

学習層（再現性検証） 1, 2, 3, 4層

16層、8層について全層を学習対象としなかったのは、個々の層の応力にとらわれなくて、全体の応力度分布の傾向を学習させるためである。

表-5.2に2.項で述べた入力データと教師信号とのモデル化の数値一覧を示す。

尚、物件番号は、下記の通りとする。

(例) $\frac{L}{16} \frac{1}{1}$: ① X方向スパン数を示す。 L : 10スパン
 ① ② ③ M : 5スパン
 S : 3スパン

- ② 建物層数
- ③ 壁配置タイプ

第5章 耐震壁せん断応力度の推定

物件	入力パラメータ					応力 度比	教師 信号
	IN1	IN2	IN3	IN4	IN5		
M	1.0	0.0	1.0	1.0	0.0	0.76	0.73
M	1.1	0.0	1.1	1.1	0.0	0.72	0.72
M	1.2	0.0	1.2	1.2	0.0	0.73	0.73
M	1.3	0.0	1.3	1.3	0.0	0.74	0.75
M	1.4	0.0	1.4	1.4	0.0	0.75	0.74
M	1.5	0.0	1.5	1.5	0.0	0.76	0.75
M	1.6	0.0	1.6	1.6	0.0	0.77	0.76
M	1.7	0.0	1.7	1.7	0.0	0.78	0.77
M	1.8	0.0	1.8	1.8	0.0	0.79	0.78
M	1.9	0.0	1.9	1.9	0.0	0.80	0.79
M	2.0	0.0	2.0	2.0	0.0	0.81	0.80
M	2.1	0.0	2.1	2.1	0.0	0.82	0.81
M	2.2	0.0	2.2	2.2	0.0	0.83	0.82
M	2.3	0.0	2.3	2.3	0.0	0.84	0.83
M	2.4	0.0	2.4	2.4	0.0	0.85	0.84
M	2.5	0.0	2.5	2.5	0.0	0.86	0.85
M	2.6	0.0	2.6	2.6	0.0	0.87	0.86
M	2.7	0.0	2.7	2.7	0.0	0.88	0.87
M	2.8	0.0	2.8	2.8	0.0	0.89	0.88
M	2.9	0.0	2.9	2.9	0.0	0.90	0.89
M	3.0	0.0	3.0	3.0	0.0	0.91	0.90
M	3.1	0.0	3.1	3.1	0.0	0.92	0.91
M	3.2	0.0	3.2	3.2	0.0	0.93	0.92
M	3.3	0.0	3.3	3.3	0.0	0.94	0.93
M	3.4	0.0	3.4	3.4	0.0	0.95	0.94
M	3.5	0.0	3.5	3.5	0.0	0.96	0.95
M	3.6	0.0	3.6	3.6	0.0	0.97	0.96
M	3.7	0.0	3.7	3.7	0.0	0.98	0.97
M	3.8	0.0	3.8	3.8	0.0	0.99	0.98
M	3.9	0.0	3.9	3.9	0.0	1.00	0.99
M	4.0	0.0	4.0	4.0	0.0	1.01	1.00
M	4.1	0.0	4.1	4.1	0.0	1.02	1.01
M	4.2	0.0	4.2	4.2	0.0	1.03	1.02
M	4.3	0.0	4.3	4.3	0.0	1.04	1.03
M	4.4	0.0	4.4	4.4	0.0	1.05	1.04
M	4.5	0.0	4.5	4.5	0.0	1.06	1.05
M	4.6	0.0	4.6	4.6	0.0	1.07	1.06
M	4.7	0.0	4.7	4.7	0.0	1.08	1.07
M	4.8	0.0	4.8	4.8	0.0	1.09	1.08
M	4.9	0.0	4.9	4.9	0.0	1.10	1.09
M	5.0	0.0	5.0	5.0	0.0	1.11	1.10
M	5.1	0.0	5.1	5.1	0.0	1.12	1.11
M	5.2	0.0	5.2	5.2	0.0	1.13	1.12
M	5.3	0.0	5.3	5.3	0.0	1.14	1.13
M	5.4	0.0	5.4	5.4	0.0	1.15	1.14
M	5.5	0.0	5.5	5.5	0.0	1.16	1.15
M	5.6	0.0	5.6	5.6	0.0	1.17	1.16
M	5.7	0.0	5.7	5.7	0.0	1.18	1.17
M	5.8	0.0	5.8	5.8	0.0	1.19	1.18
M	5.9	0.0	5.9	5.9	0.0	1.20	1.19
M	6.0	0.0	6.0	6.0	0.0	1.21	1.20
M	6.1	0.0	6.1	6.1	0.0	1.22	1.21
M	6.2	0.0	6.2	6.2	0.0	1.23	1.22
M	6.3	0.0	6.3	6.3	0.0	1.24	1.23
M	6.4	0.0	6.4	6.4	0.0	1.25	1.24
M	6.5	0.0	6.5	6.5	0.0	1.26	1.25
M	6.6	0.0	6.6	6.6	0.0	1.27	1.26
M	6.7	0.0	6.7	6.7	0.0	1.28	1.27
M	6.8	0.0	6.8	6.8	0.0	1.29	1.28
M	6.9	0.0	6.9	6.9	0.0	1.30	1.29
M	7.0	0.0	7.0	7.0	0.0	1.31	1.30
M	7.1	0.0	7.1	7.1	0.0	1.32	1.31
M	7.2	0.0	7.2	7.2	0.0	1.33	1.32
M	7.3	0.0	7.3	7.3	0.0	1.34	1.33
M	7.4	0.0	7.4	7.4	0.0	1.35	1.34
M	7.5	0.0	7.5	7.5	0.0	1.36	1.35
M	7.6	0.0	7.6	7.6	0.0	1.37	1.36
M	7.7	0.0	7.7	7.7	0.0	1.38	1.37
M	7.8	0.0	7.8	7.8	0.0	1.39	1.38
M	7.9	0.0	7.9	7.9	0.0	1.40	1.39
M	8.0	0.0	8.0	8.0	0.0	1.41	1.40
M	8.1	0.0	8.1	8.1	0.0	1.42	1.41
M	8.2	0.0	8.2	8.2	0.0	1.43	1.42
M	8.3	0.0	8.3	8.3	0.0	1.44	1.43
M	8.4	0.0	8.4	8.4	0.0	1.45	1.44
M	8.5	0.0	8.5	8.5	0.0	1.46	1.45
M	8.6	0.0	8.6	8.6	0.0	1.47	1.46
M	8.7	0.0	8.7	8.7	0.0	1.48	1.47
M	8.8	0.0	8.8	8.8	0.0	1.49	1.48
M	8.9	0.0	8.9	8.9	0.0	1.50	1.49
M	9.0	0.0	9.0	9.0	0.0	1.51	1.50
M	9.1	0.0	9.1	9.1	0.0	1.52	1.51
M	9.2	0.0	9.2	9.2	0.0	1.53	1.52
M	9.3	0.0	9.3	9.3	0.0	1.54	1.53
M	9.4	0.0	9.4	9.4	0.0	1.55	1.54
M	9.5	0.0	9.5	9.5	0.0	1.56	1.55
M	9.6	0.0	9.6	9.6	0.0	1.57	1.56
M	9.7	0.0	9.7	9.7	0.0	1.58	1.57
M	9.8	0.0	9.8	9.8	0.0	1.59	1.58
M	9.9	0.0	9.9	9.9	0.0	1.60	1.59
M	10.0	0.0	10.0	10.0	0.0	1.61	1.60
M	10.1	0.0	10.1	10.1	0.0	1.62	1.61
M	10.2	0.0	10.2	10.2	0.0	1.63	1.62
M	10.3	0.0	10.3	10.3	0.0	1.64	1.63
M	10.4	0.0	10.4	10.4	0.0	1.65	1.64
M	10.5	0.0	10.5	10.5	0.0	1.66	1.65
M	10.6	0.0	10.6	10.6	0.0	1.67	1.66
M	10.7	0.0	10.7	10.7	0.0	1.68	1.67
M	10.8	0.0	10.8	10.8	0.0	1.69	1.68
M	10.9	0.0	10.9	10.9	0.0	1.70	1.69
M	11.0	0.0	11.0	11.0	0.0	1.71	1.70
M	11.1	0.0	11.1	11.1	0.0	1.72	1.71
M	11.2	0.0	11.2	11.2	0.0	1.73	1.72
M	11.3	0.0	11.3	11.3	0.0	1.74	1.73
M	11.4	0.0	11.4	11.4	0.0	1.75	1.74
M	11.5	0.0	11.5	11.5	0.0	1.76	1.75
M	11.6	0.0	11.6	11.6	0.0	1.77	1.76
M	11.7	0.0	11.7	11.7	0.0	1.78	1.77
M	11.8	0.0	11.8	11.8	0.0	1.79	1.78
M	11.9	0.0	11.9	11.9	0.0	1.80	1.79
M	12.0	0.0	12.0	12.0	0.0	1.81	1.80
M	12.1	0.0	12.1	12.1	0.0	1.82	1.81
M	12.2	0.0	12.2	12.2	0.0	1.83	1.82
M	12.3	0.0	12.3	12.3	0.0	1.84	1.83
M	12.4	0.0	12.4	12.4	0.0	1.85	1.84
M	12.5	0.0	12.5	12.5	0.0	1.86	1.85
M	12.6	0.0	12.6	12.6	0.0	1.87	1.86
M	12.7	0.0	12.7	12.7	0.0	1.88	1.87
M	12.8	0.0	12.8	12.8	0.0	1.89	1.88
M	12.9	0.0	12.9	12.9	0.0	1.90	1.89
M	13.0	0.0	13.0	13.0	0.0	1.91	1.90
M	13.1	0.0	13.1	13.1	0.0	1.92	1.91
M	13.2	0.0	13.2	13.2	0.0	1.93	1.92
M	13.3	0.0	13.3	13.3	0.0	1.94	1.93
M	13.4	0.0	13.4	13.4	0.0	1.95	1.94
M	13.5	0.0	13.5	13.5	0.0	1.96	1.95
M	13.6	0.0	13.6	13.6	0.0	1.97	1.96
M	13.7	0.0	13.7	13.7	0.0	1.98	1.97
M	13.8	0.0	13.8	13.8	0.0	1.99	1.98
M	13.9	0.0	13.9	13.9	0.0	2.00	1.99
M	14.0	0.0	14.0	14.0	0.0	2.01	2.00
M	14.1	0.0	14.1	14.1	0.0	2.02	2.01
M	14.2	0.0	14.2	14.2	0.0	2.03	2.02
M	14.3	0.0	14.3	14.3	0.0	2.04	2.03
M	14.4	0.0	14.4	14.4	0.0	2.05	2.04
M	14.5	0.0	14.5	14.5	0.0	2.06	2.05
M	14.6	0.0	14.6	14.6	0.0	2.07	2.06
M	14.7	0.0	14.7	14.7	0.0	2.08	2.07
M	14.8	0.0	14.8	14.8	0.0	2.09	2.08
M	14.9	0.0	14.9	14.9	0.0	2.10	2.09
M	15.0	0.0	15.0	15.0	0.0	2.11	2.10
M	15.1	0.0	15.1	15.1	0.0	2.12	2.11
M	15.2	0.0	15.2	15.2	0.0	2.13	2.12
M	15.3	0.0	15.3	15.3	0.0	2.14	2.13
M	15.4	0.0	15.4	15.4	0.0	2.15	2.14
M	15.5	0.0	15.5	15.5	0.0	2.16	2.15
M	15.6	0.0	15.6	15.6	0.0	2.17	2.16
M	15.7	0.0	15.7	15.7	0.0	2.18	2.17
M	15.8	0.0	15.8	15.8	0.0	2.19	2.18
M	15.9	0.0	15.9	15.9	0.0	2.20	2.19
M	16.0	0.0	16.0	16.0	0.0	2.21	2.20
M	16.1	0.0	16.1	16.1	0.0	2.22	2.21
M	16.2	0.0	16.2	16.2	0.0	2.23	2.22
M	16.3	0.0	16.3	16.3	0.0	2.24	2.23
M	16.4	0.0	16.4	16.4	0.0	2.25	2.24
M	16.5	0.0	16.5	16.5	0.0	2.26	2.25
M	16.6	0.0	16.6	16.6	0.0	2.27	2.26
M	16.7	0.0	16.7	16.7	0.0	2.28	2.27
M	16.8	0.0	16.8	16.8	0.0	2.29	2.28
M	16.9	0.0	16.9	16.9	0.0	2.30	2.29
M	17.0	0.0	17.0	17.0	0.0	2.31	2.30
M	17.1	0.0	17.1	17.1	0.0	2.32	2.31
M	17.2	0.0	17.2	17.2	0.0	2.33	2.32
M	17.3	0.0	17.3	17.3	0.0	2.34	2.33
M	17.4	0.0	17.4	17.4	0.0	2.35	2.34
M	17.5	0.0	17.5	17.5	0.0	2.36	2.35
M	17.6	0.0	17.6	17.6	0.0	2.37	2.36
M	17.7	0.0	17.7	17.7	0.0	2.38	2.37
M	17.8	0.0	17.8	17.8	0.0	2.39	2.38
M	17.9	0.0	17.9	17.9	0.0	2.40	2.39
M	18.0	0.0	18.0	18.0	0.0	2.41	2.40
M	18.1	0.0	18.1	18.1	0.0	2.42	2.41
M	18.2	0.0	18.2	18.2	0.0	2.43	2.42
M	18.3	0.0	18.3	18.3	0.0	2.44	2.43
M	18.4	0.0	18.4	18.4	0.0	2.45	2.44
M	18.5	0.0	1				

第5章 耐震壁せん断応力度の推定

物件		入力パラメータ					応力 度比	教師 信号
		IN1	IN2	IN3	IN4	IN5		
L41	4	-1.00	-1.00	1.00	1.00	-1.00	0.65	0.69
L42	1	-1.00	-1.00	-1.00	1.00	-1.00	-0.64	0.24
L42	2	-1.00	-1.00	-1.00	1.00	-1.00	0.67	0.70
L42	3	-1.00	-1.00	-1.00	1.00	-1.00	0.67	0.33
L42	4	-1.00	-1.00	-1.00	1.00	-1.00	0.15	0.87
L43	1	-1.00	-1.00	-1.00	1.00	-1.00	-0.06	0.44
L43	2	-1.00	-1.00	-1.00	1.00	-1.00	-0.48	0.30
L43	3	-1.00	-1.00	-1.00	1.00	-1.00	-0.87	0.77
L43	4	-1.00	-1.00	-1.00	1.00	-1.00	0.19	0.88
L44	1	-1.00	-1.00	-1.00	1.00	-1.00	-0.48	0.63
L44	2	-1.00	-1.00	-1.00	1.00	-1.00	-0.68	0.33
L44	3	-1.00	-1.00	-1.00	1.00	-1.00	-0.68	0.88
L44	4	-1.00	-1.00	-1.00	1.00	-1.00	-0.06	0.44
M41	1	-1.00	0.00	1.00	1.00	-1.00	-0.11	0.45
M41	2	-1.00	0.00	1.00	1.00	-1.00	-0.75	0.77
M41	3	-1.00	0.00	1.00	1.00	-1.00	-0.16	0.87
M41	4	-1.00	0.00	1.00	1.00	-1.00	-0.55	0.77
M42	1	-1.00	0.00	-1.00	1.00	-1.00	-0.26	0.38
M42	2	-1.00	0.00	-1.00	1.00	-1.00	-0.49	0.44
M42	3	-1.00	0.00	-1.00	1.00	-1.00	0.81	0.75
M42	4	-1.00	0.00	-1.00	1.00	-1.00	-0.10	0.44
M43	1	-1.00	0.00	1.00	1.00	-1.00	-0.66	0.70
M43	2	-1.00	0.00	1.00	1.00	-1.00	0.00	0.88
M43	3	-1.00	0.00	1.00	1.00	-1.00	-0.44	0.33
M43	4	-1.00	0.00	1.00	1.00	-1.00	-0.74	0.44
M44	1	-1.00	0.00	-1.00	1.00	-1.00	-0.46	0.63
M44	2	-1.00	0.00	-1.00	1.00	-1.00	-0.74	0.74
M44	3	-1.00	0.00	-1.00	1.00	-1.00	-0.55	0.51
M44	4	-1.00	0.00	-1.00	1.00	-1.00	-0.00	0.45
S41	1	-1.00	1.40	1.00	1.00	-1.00	-0.62	0.88
S41	2	-1.00	1.40	1.00	1.00	-1.00	-0.99	0.00
S41	3	-1.00	1.40	1.00	1.00	-1.00	-0.00	0.88
S41	4	-1.00	1.40	1.00	1.00	-1.00	-0.69	0.77
S42	1	-1.00	1.40	-1.00	1.00	-1.00	-0.00	0.44
S42	2	-1.00	1.40	-1.00	1.00	-1.00	-0.44	0.63
S42	3	-1.00	1.40	-1.00	1.00	-1.00	-0.66	0.70
S42	4	-1.00	1.40	-1.00	1.00	-1.00	-0.72	0.51
S43	1	-1.00	1.40	1.00	1.00	-1.00	-0.55	0.49
S43	2	-1.00	1.40	1.00	1.00	-1.00	-0.99	0.77
S43	3	-1.00	1.40	1.00	1.00	-1.00	-0.33	0.63
S43	4	-1.00	1.40	1.00	1.00	-1.00	-0.44	0.33
S44	1	-1.00	1.40	-1.00	1.00	-1.00	-0.11	0.45
S44	2	-1.00	1.40	-1.00	1.00	-1.00	-0.75	0.77
S44	3	-1.00	1.40	-1.00	1.00	-1.00	-0.16	0.87
S44	4	-1.00	1.40	-1.00	1.00	-1.00	-0.55	0.77

4. ニューラルネットワークの構成に関する検討

階層型のニューラルネットワークの場合、中間層数と中間ユニット数の組み合わせで無数のネットワークが考えられるが、これらの組み合わせに関する系統的な手法は存在せず、試行錯誤的に決めなければならない。

本章では、中間層は1層、中間ユニット数は、入力パラメータの2.5倍の12として図-5.6に示す階層型ニューラルネットワークを採用する。

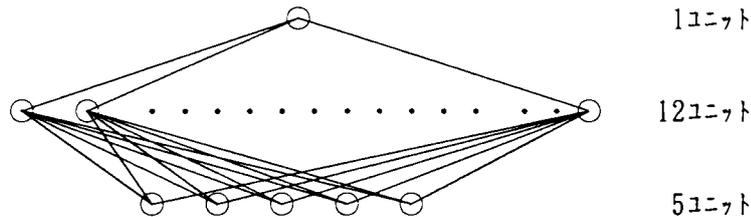


図-5.6 ニューラルネットワークの構成

5. 学習方法

学習は、学習データをそれぞれ図-5.6に示す階層型ニューラルネットワークに、5個の入力値と1個の教師信号とを1セットにして学習させた。

学習に使用したプログラムは、文献³⁾に掲載されているバックプロパゲーションアルゴリズムプログラムをベースに一部修正して使用した。重みの修正法は評価関数Eとして全学習データにわたって教師信号と出力値の2乗誤差の総和をとる一括修正法と、一組の学習データに対して評価関数Eを求め重み更新を行い各学習データに対するEがすべて十分小さくなるまで繰り返す逐次修正法があるが、本論では非線形問題において学習効率がよい⁴⁾とされている逐次修正法を使用した。

学習のスピードを決定する重み更新係数³⁾ η 、 α は、大きな値を採用すると学習回数は少なくすむが、あまり大きな値をとると収束しない場合もある。

本節では、 $\eta=0.10$, $\alpha=0.95$ とした。また打ち切り誤差は、最初0.001とした。学習回数は、23275回であった。

6. 推定結果と実際値との比較

ニューラルネットワークの出力結果(OUT)は、負担せん断応力度比を[0.1, 0.9]の範囲に規準化したものであるから、式(5.7)より下式によって、ニューラルネットワークの結果を負担せん断応力度比に変換する。

$$r_w = (OUT - 0.5) / 0.35 + 0.1 \quad (5.8)$$

ニューラルネットワークによって推定した負担せん断応力度比と実際保有水平耐力の算定結果求めた負担せん断応力度比とを比較した表を表-5.3に示す。

また、再現性、内挿性、外挿性それぞれについて推定値と実際値とを比較した図を図-5.7に示す。

図中横軸は、実際の負担せん断応力度比、縦軸は推定した負担せん断応力度比を示す。●印は学習データ(再現性)に対応し、○印は内挿性検証、▲印は外挿性検証に対応している。

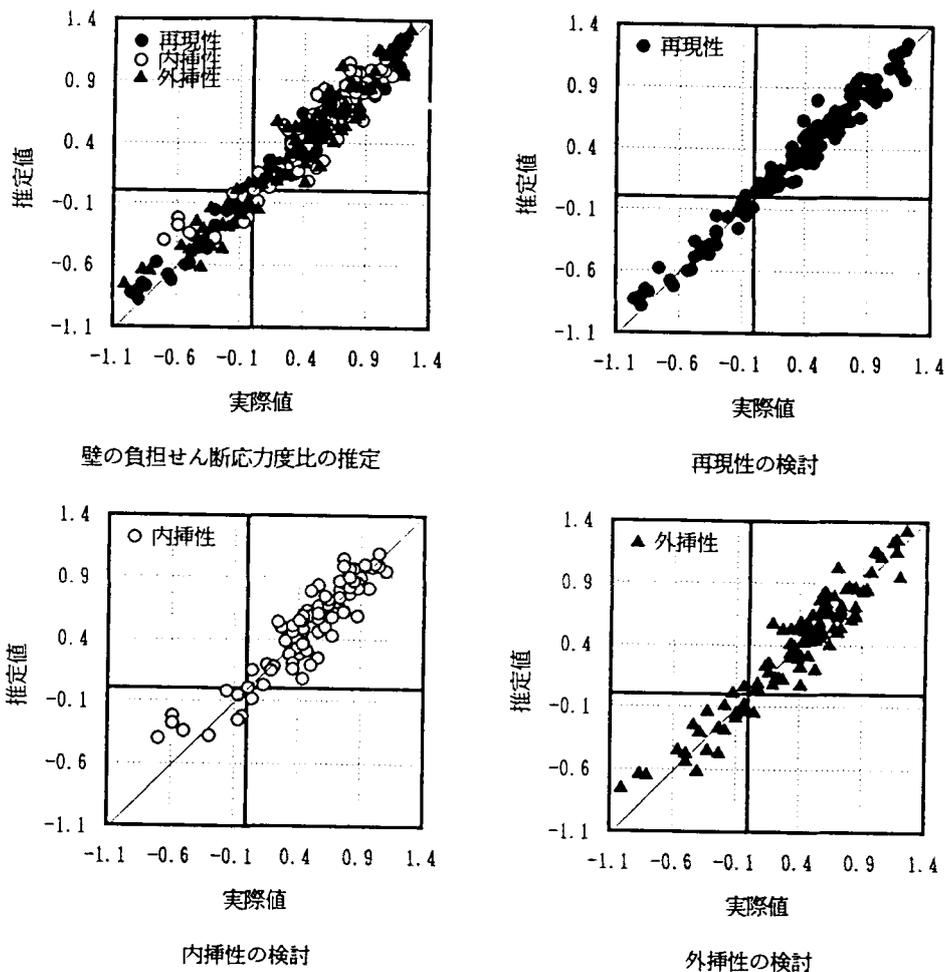


図-5.7 推定値と実際値との関係

第5章 耐震壁せん断応力度の推定

物件	NO	実際値	推定値	推定誤差
S1111	1	-0.11	-0.19	-0.08
S1111	2	0.40	0.29	-0.11
S1111	3	0.55	0.50	-0.05
S1111	4	0.88	0.50	-0.38
S1111	5	0.94	0.71	-0.23
S1111	6	1.17	0.85	-0.32
S1111	7	1.44	0.99	-0.45
S1111	8	1.88	0.63	-1.25
S1112	1	-0.22	-0.27	-0.05
S1122	2	0.00	0.09	0.09
S1122	3	0.23	0.23	0.00
S1122	4	0.42	0.33	-0.09
S1122	5	0.45	0.42	-0.03
S1122	6	0.72	0.57	-0.15
S1122	7	0.77	0.65	-0.12
S1122	8	1.18	0.92	-0.26
S1123	1	0.13	0.13	0.00
S1123	2	0.34	0.30	-0.04
S1123	3	0.64	0.40	-0.24
S1123	4	0.66	0.54	-0.12
S1123	5	0.72	0.72	0.00
S1123	6	0.93	0.84	-0.09
S1123	7	0.95	0.84	-0.11
S1123	8	1.54	0.43	-1.11
S1124	1	0.00	0.00	0.00
S1124	2	0.00	0.08	0.08
S1124	3	0.00	0.05	0.05
S1124	4	0.34	0.16	-0.18
S1124	5	0.40	0.16	-0.24
S1124	6	0.42	0.55	0.13
S1124	7	0.67	0.55	-0.12
S1124	8	0.61	0.68	0.07

物件	NO	実際値	推定値	推定誤差
L411	1	-0.43	-0.47	-0.04
L411	2	0.97	0.97	0.00
L411	3	1.22	1.11	-0.11
L411	4	1.65	1.66	0.01
L422	1	-0.84	-0.77	0.07
L422	2	0.67	0.59	-0.08
L422	3	1.15	1.00	-0.15
L422	4	1.66	1.66	0.00
L433	1	-0.48	-0.44	0.04
L433	2	0.88	0.88	0.00
L433	3	1.19	1.11	-0.08
L433	4	1.44	1.44	0.00
L444	1	-0.68	-0.66	0.02
L444	2	0.66	0.66	0.00
L444	3	1.06	1.06	0.00
L444	4	1.11	1.11	0.00
M411	1	0.33	0.33	0.00
M411	2	0.75	0.75	0.00
M411	3	1.16	1.16	0.00
M411	4	1.55	1.55	0.00
M422	1	-0.28	-0.28	0.00
M422	2	0.44	0.44	0.00
M422	3	0.88	0.88	0.00
M422	4	1.11	1.11	0.00
M433	1	0.06	0.06	0.00
M433	2	0.11	0.11	0.00
M433	3	0.68	0.68	0.00
M433	4	0.99	0.99	0.00
M444	1	0.44	0.44	0.00
M444	2	0.33	0.33	0.00
M444	3	0.44	0.44	0.00
M444	4	0.44	0.44	0.00
S411	1	-0.00	-0.00	0.00
S411	2	0.00	0.00	0.00
S411	3	0.99	0.99	0.00
S411	4	0.00	0.00	0.00
S422	1	-0.00	-0.00	0.00
S422	2	0.00	0.00	0.00
S422	3	0.44	0.44	0.00
S422	4	0.77	0.77	0.00
S433	1	0.00	0.00	0.00
S433	2	0.00	0.00	0.00
S433	3	0.55	0.55	0.00
S433	4	0.66	0.66	0.00
S444	1	-0.11	-0.11	0.00
S444	2	0.33	0.33	0.00
S444	3	0.77	0.77	0.00
S444	4	0.00	0.00	0.00

表-5.4 推定誤差の統計量

	再現性	内挿性	外挿性	全体
最大値	0.30	0.36	0.38	0.37
最小値	-0.21	-0.36	-0.35	-0.35
平均値	-0.01	0.02	0.00	0.00
標準偏差	0.09	0.14	0.14	0.12

7. 考察

以上の結果より、以下の考察を得た。

- 1) 本手法により、浮き上がり降伏系を示す連層壁の負担せん断応力度（連層壁のみ存在する場合：基本せん断応力度）の推定は、推定誤差の標準偏差を0.12で抑えることができた。これは、推定誤差が正規分布に従うと仮定すると、ほぼ70%の物件が推定誤差 ± 0.12 以内で推定する事が出来ることを意味し、構造計画段階では、十分に有効である。
- 2) 意匠計画図から読み取れる5個の簡単な入力パラメータ（①：連層壁のプロポーション、②：連層壁の存在率、③：連層壁に取り付く境界梁の本数、④：連層壁が存在するフレームの位置（外周、内部フレーム）、⑤：連層壁の中での対象層の位置）を使うことによって、構造計画段階での連層壁の基本せん断応力度は、ほぼ推定可能である。
- 3) 連層壁に対して、高さ方向の応力度分布を考慮すれば、全層学習させなくても応力度が大きく変化する層（最上層、最下層、及び中間層の数層）を学習層にすることにより、その他の層についても十分に推定可能である。

第4節 独立壁・取り付き壁と混在する場合の連層耐震壁の負担せん断応力度の推定⁵⁾

第3節では、連層壁のみ存在する場合についての連層壁の負担せん断応力度（基本せん断応力度）の推定を行った。本節では、独立壁・取り付き壁が混在する場合の連層壁の負担せん断応力度（補正せん断応力度）を推定する。

1. 連層壁の負担せん断応力度に影響を及ぼす要因

取り付き壁、独立壁が混在する場合の連層壁のせん断応力度に影響を与える要因として、第3節で述べた連層壁の基本せん断応力度に影響を与える要因の他に、取り付き壁、独立壁と推定対象としている連層壁との配置関係が重要である。

従って、著者の設計経験を基に入力パラメータとして下記のパラメータを採用した。

1) 連層壁形状に関するパラメータ (IN1)

$$IN1 = H/B \cdot 0.2 \quad (5.9)$$

H: 壁高さ, B: 壁幅

2) 対象としている層位置に関するパラメータ (IN2)

$$IN2 = iz / Nz \quad (5.10)$$

iz: 対象としている壁の下階から数えた層位置

Nz: 連層壁の総層数

3) 対象層に対して、上層にある取り付き壁の影響係数に関するパラメータ (IN3)

$$IN3 = 0.45 \cdot \cos(\pi \cdot jtu / Nz) + 0.5 \quad (5.11)$$

jtu: 対象層に対して、上層にある取り付き壁の相対層位置

4) 対象層に対して、同じ層にある取り付き壁の影響係数に関するパラメータ (IN4)

$$IN4 = 0.5 \cdot ntw \quad (5.12)$$

ntw: 対象層に存在する取り付き壁の枚数

5) 対象層に対して、下層にある取り付き壁の影響係数に関するパラメータ (IN5)

$$IN5 = 0.45 \cdot \cos(\pi \cdot jtl / Nz + \pi) + 0.5 \quad (5.13)$$

jtl: 対象層に対して、下層にある取り付き壁の相対層位置

6) 対象層に対して、上層にある独立壁の影響係数に関するパラメータ (IN6)

$$IN6 = 0.45 \cdot \cos(\pi \cdot jsu / Nz) + 0.5 \quad (5.14)$$

jsu: 対象層に対して、上層にある独立壁の相対層位置

7) 対象層に対して、同じ層にある独立壁の影響係数に関するパラメータ (IN7)

$$IN7 = 0.5 \cdot nsw \quad (5.15)$$

nsw: 対象層に存在する独立壁の枚数

8) 対象層に対して、下層にある独立壁の影響係数に関するパラメータ (IN8)

$$IN8 = 0.45 \cdot \cos(\pi \cdot jsl / Nz + \pi) + 0.5 \quad (5.16)$$

jsl:対象層に対して、下層にある独立壁の相対層位置

3)、5)、6)、8)に対する影響係数は、0.05から0.95の範囲で設定し、第2節の分析結果を参考に対象層に対して独立壁・取り付け壁の位置が建物層数の1/2の時に0.5となり、その近傍層では直線関係をもち、その位置より離れるに従って非線形性を持つようにシグモイド関数を模したcos関数で表現した。3)、5)、6)、8)式を、cos関数で与えた事と0.45、0.5を用いたのは以上の理由による。

また、対象層での壁枚数の影響については、壁が1枚の時に0.5を与え、壁枚数の影響については線形関係とした。また、3)-8)では壁がない層に対しても同じ扱いをするために影響係数の下限値である0.05を与えることにした。また、上層、下層に複数枚壁がある場合には、それぞれの値を加算して使用する。

図-5.8に壁の配置情報のモデル化と具体的な入力例を示す。

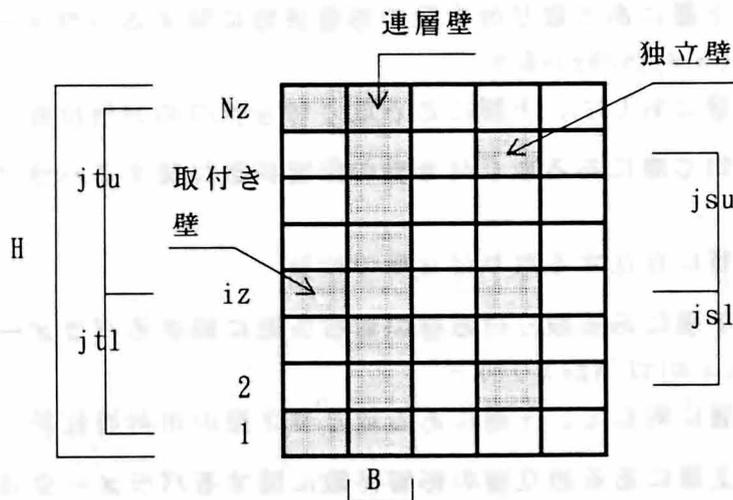
9) 教師信号 (OUT)

教師信号は、独立壁、取り付け壁が組み合わされた場合の連層壁の補正せん断応力度とするがニューラルネットワークの性質上 [0, 1] の範囲に規準化しなければならない。壁の補正せん断応力度は、本例では $-3.5 < \Delta \tau / \sqrt{F_c} < 3$ の範囲に入っているため、下式を用いて [0, 1] の範囲に入るように規準化を行った。

$$i) (\Delta \tau / \sqrt{F_c} + 3.5) / 6.5 \quad (5.17)$$

$\Delta \tau$:壁補正せん断応力度 (kgf/cm²)

F_c :コンクリート材料強度 (kgf/cm²)



$Nz=8, iz=4, H/B=4$ とした時の入力値例

1) 0.8 2) 0.5

3) 0.5 4) 0.5 5) 0.33 6) 0.67 7) 0.5 8) 0.18

図-5.8 壁のモデル化

2. 階層型ニューラルネットワークの構成

階層型ニューラルネットワークの場合、中間層数と中間ユニット数を組み合わせることにより無数のネットワークが考えられるが、これらの組み合わせに関する系統的な手法は無く、試行錯誤的に決めなければならない。

本研究では、数種類の組み合わせに対して事前学習を行い、学習精度及び収束性が比較的良かった図-5.9に示す中間層2層、中間ユニット数25のネットワークを採用した。

出力層は、1ユニットとして、独立壁、取り付き壁が組み合わせられたときの連層壁の補正せん断応力度を出力する。

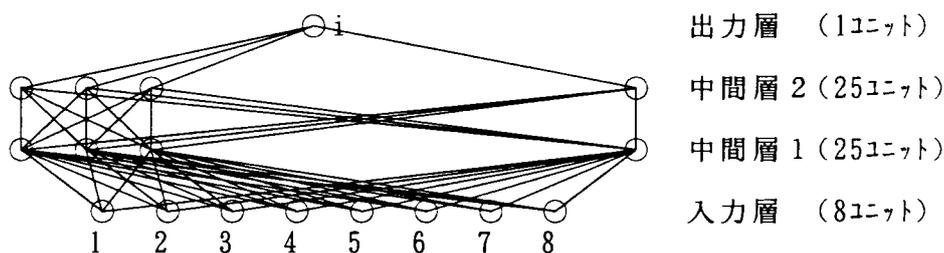


図-5.9 ニューラルネットワークの構成

3. 学習用基本壁配置と学習方法

基本建物モデルとして、図-5.10に示す8層5スパン、浮き上がり崩壊系を示す連層壁を持つ建物を考える。

学習用基本壁配置としては図-5.11に示す、独立壁配置4タイプ、取り付き壁配置4タイプ、独立壁と取り付き壁が混在する1タイプ、それぞれに対して壁形状のパラメータ H/B (H :壁高, B :壁幅)が2,3,4の3タイプの計27タイプを考える。

ただし、 $B-C$ 間のスパン長は、 $H/B=2$ の時12m、 $H/B=3$ では、8mとした。

図-5.10、図-5.11に示す壁配置モデルに対して、(株)フジタ保有の構造設計システム「BUILSYS-V3」を使用して、荷重増分法による保有水平耐力の解析を行った。解析して得られた壁のせん断応力度(τ)と、基本モデルでの連層壁のせん断応力度(τ_0)との差を取った補正せん断応力度を出力とし、それぞれの壁の配置情報を入力として各層共通で図-5.9に示す同一のニューラルネットワークに与えて学習させた。

学習データは、壁配置27タイプ及び層数8の計216ケースを与えた。学習には文献⁶⁾の添付ソフトをWS上で用い、設定したニューラルネットワークの各ユニット間の結合強さと各ユニットのしきい値を学習させた。学習は、誤差逆伝搬法を使用し、既報の分析結果をもとにどの層に関しても同一のニューラルネットワークを用いるものとした。

学習に要した計算回数は、28,333回、打ち切り誤差は0.05とした。

第5章 耐震壁せん断応力度の推定

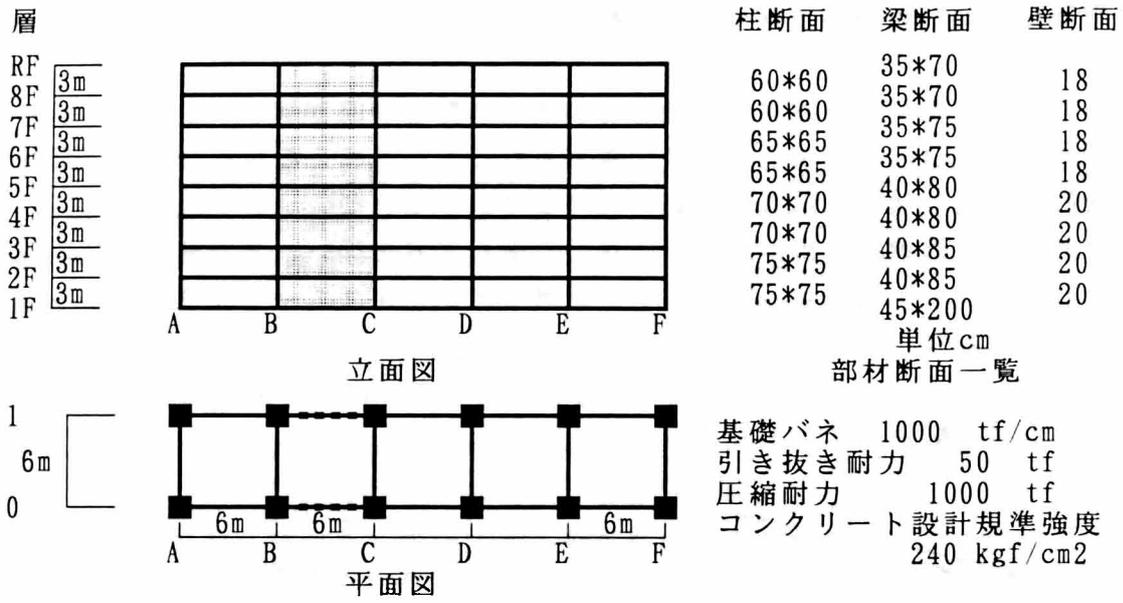


図-5.10 基本建物モデル

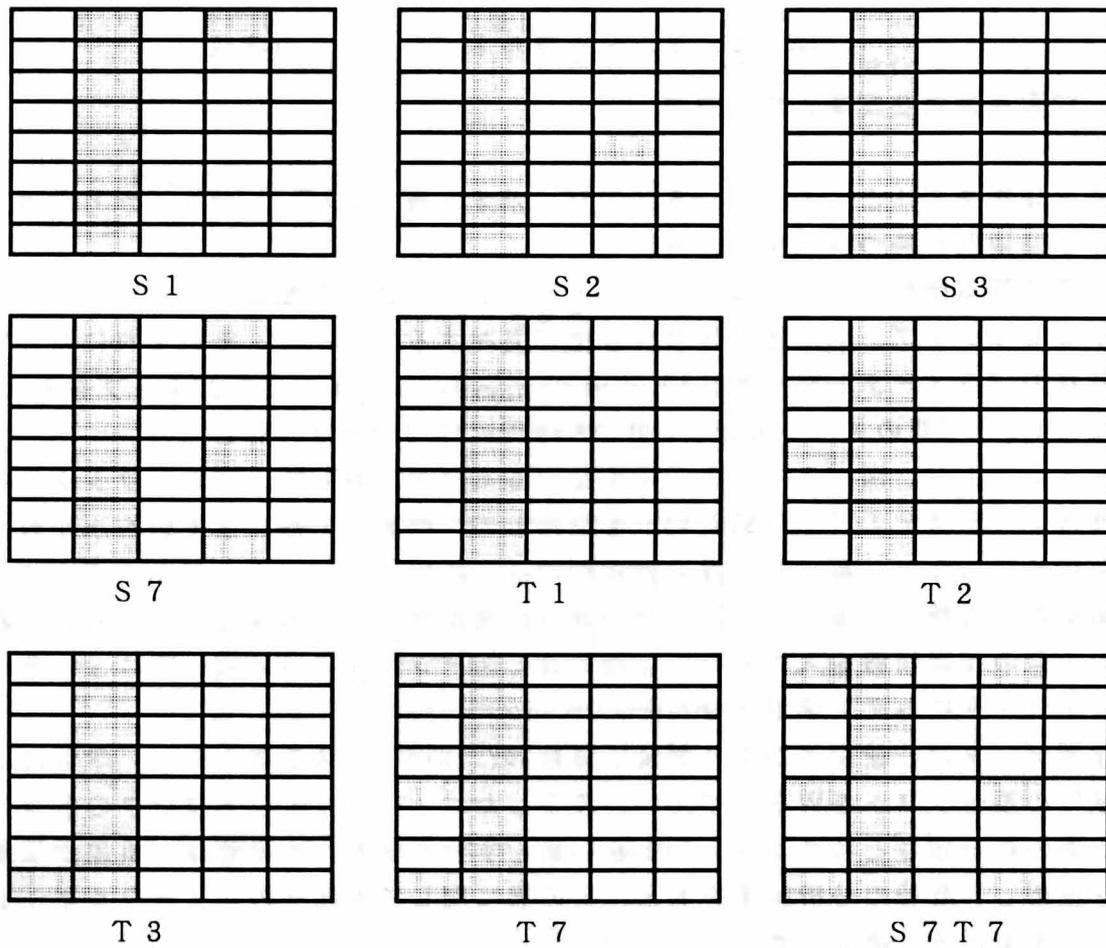


図-5.11 学習用壁配置モデル

4. 検証方法

ニューラルネットワークによる推定精度の検証は、下記の3ケースについて行った。

- 1)再現性：学習させたモデルに対する検証
- 2)内挿性：学習に使用した壁配置を組み合わせたモデルに対する検証
- 3)外挿性：学習に使用した壁配置とは全く異なる壁配置を持つモデルに対する検証

それぞれの検証用モデルに対して、荷重増分法による保有水平耐力解析を行い、その解析結果とニューラルネットワークによる推定結果とを比較する。尚、検証には3.項で得られたニューラルネットワークの結合強さとしきい値を用い、別途作成したプログラムを用いて推定値の計算を行う。

5. 内挿性検証用壁配置モデル

内挿性検証用の壁配置の一部を図-5.12に示す。

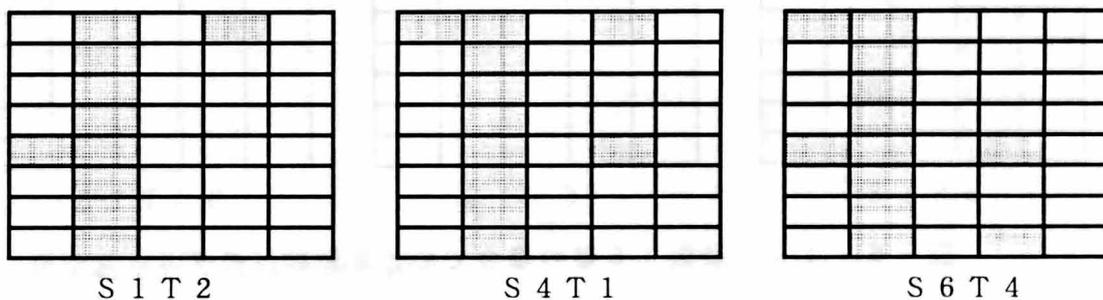


図-5.12 内挿性検証モデル

6. 外挿性検証用壁配置モデル

外挿性の検証は下記の4ケースに対して行った。

- 1) 基本建物モデルと同一層数、同一スパン数の建物に対する外挿性の検証
(図-5.13)
- 2) 建物層数を16層 ($H/B = 8$) とした建物に対する外挿性の検証
(図-5.14)
- 3) 層数は同じであるがスパン数を10スパンとした建物に対する外挿性の検証
(図-5.15)
- 4) 10スパンで、独立壁が同一層に複数枚とした建物に対する外挿性の検証
(図-5.16)

それぞれの壁配置を下図に示す。

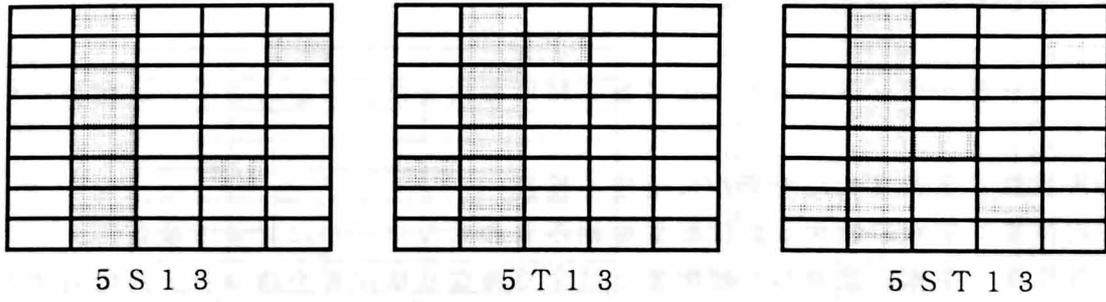


図-5. 13 基本建物範囲内での外挿性検証モデル

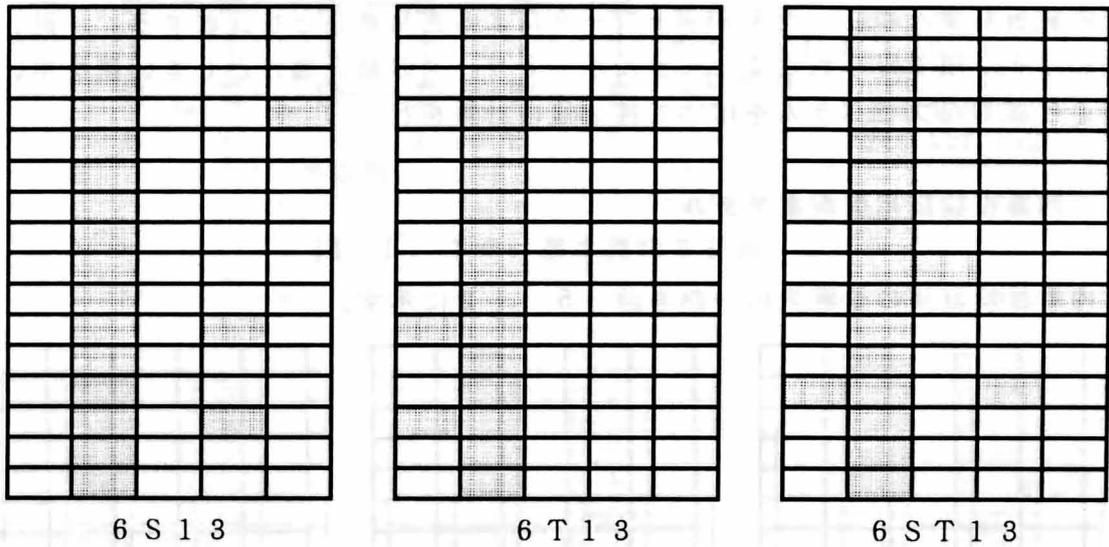
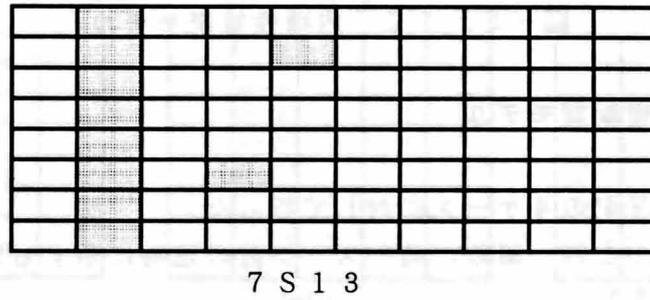
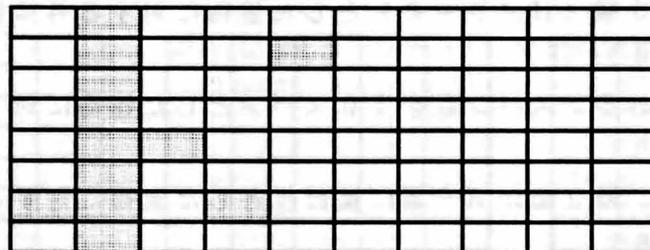


図-5. 14 層数16層の場合での外挿性検証モデル



7 S 1 3



7 S T 1 3

図-5. 15 スパン数を10スパンとした場合の外挿性検証モデル

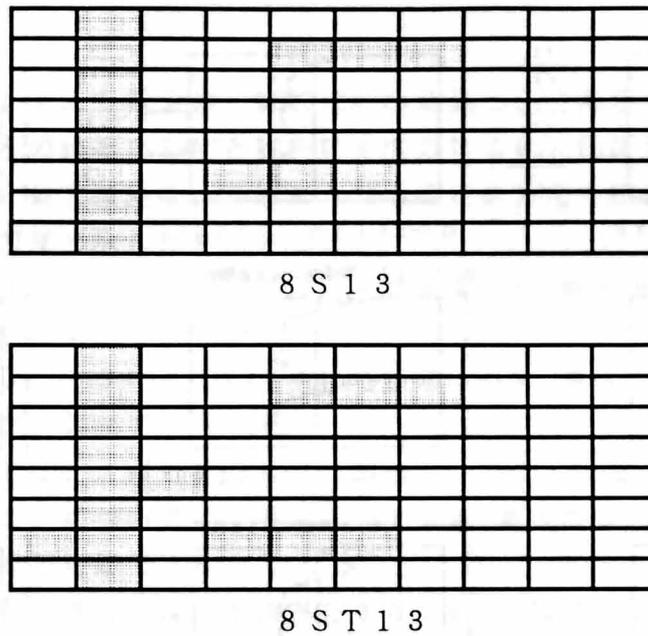


図-5. 16 スパン数を10スパン、独立壁を3枚とした場合の外挿性検証モデル

7. 推定結果と実際値との比較

それぞれの検証モデルに対して推定した補正せん断応力度に連層壁の基本せん断応力度を加算して求めた負担せん断応力度と実際に解析を行って求めた負担せん断応力度との比較図を図-5. 17~22に示す。 図中、縦軸は連層壁の高さ方向の層位置、横軸が連層壁の負担せん断応力度を示す。 点線(τ_0)が基本せん断応力度、実線(τ)が解析結果、破線($\tau_0 + \Delta \tau$)が推定した結果を示している。

第5章 耐震壁せん断応力度の推定

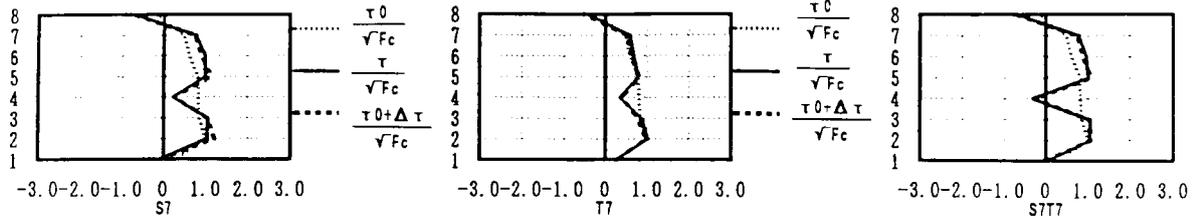


図-5.17 再現性に対する検討

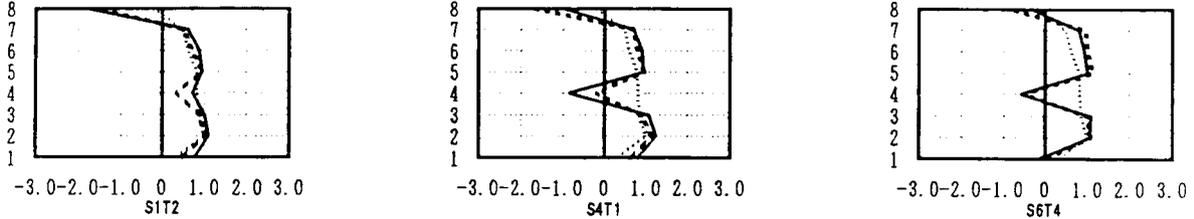


図-5.18 内挿性に対する検討

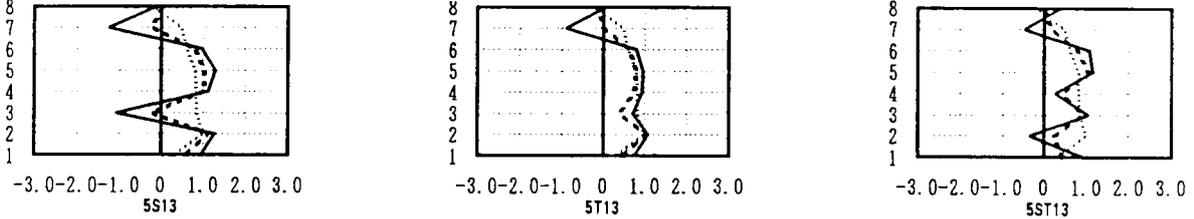


図-5.19 外挿性に対する検討 (基本モデル)

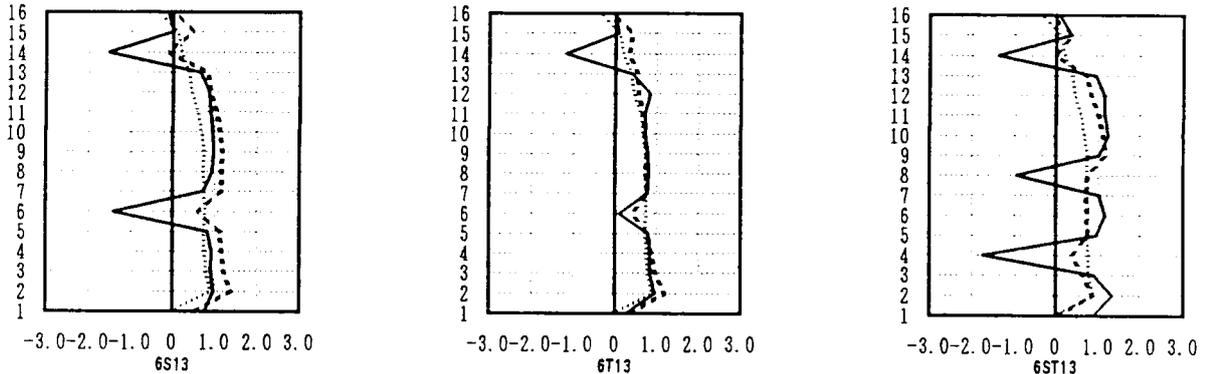


図-5.20 外挿性に対する検討 (層数16層モデル)

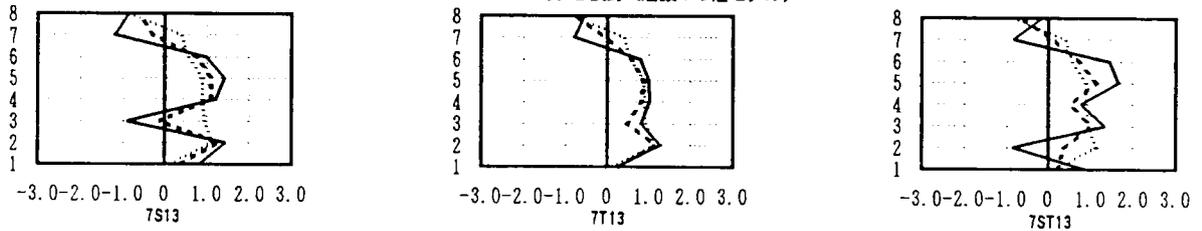


図-5.21 外挿性に対する検討 (10スパンモデル)

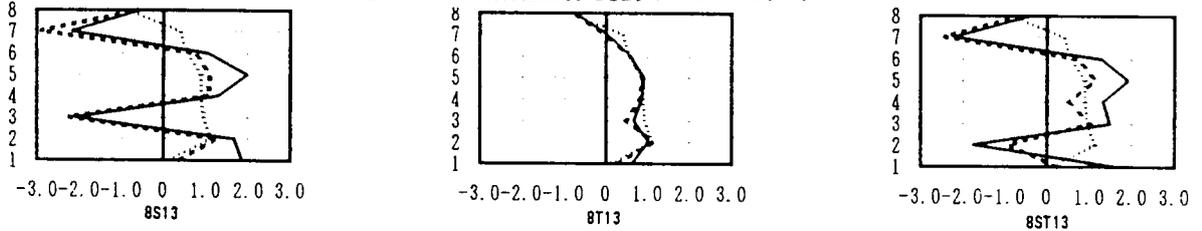


図-5.22 外挿性に対する検討 (10スパン独立壁3スパンモデル)

..... 基本連層壁応力度 $\tau_0/\sqrt{F_c}$
 ————— 解析により求めた連層壁応力度 $\tau/\sqrt{F_c}$
 - - - - - 推定された連層壁応力度 $(\tau_0 + \Delta\tau)/\sqrt{F_c}$

8. 考察

図-5. 17～22より推定値と解析値との差異について考察する。平均誤差としては、各層ごとの推定応力度と解析応力度の差を最大解析応力度で除したものの平均値を採り、最大誤差は、各層における推定応力度と解析応力度の差の最大値を最大解析応力度で除したものとした。

- 1) 再現性(図-5. 17)については、平均誤差5%、最大誤差16%であり非常に精度の良い推定が可能である。
- 2) 内挿性(図-5. 18)についても平均誤差15%、最大誤差57%であり十分な精度で推定が可能である。
- 3) 外挿性については、スパン数の変化(図-5. 21)や独立壁の枚数の変化(図-5. 22)については、平均誤差29%、最大誤差85%であり、ほぼ十分な精度で推定可能である。
- 4) 壁の $H/B = 8$ の場合には、最大誤差131%と一部に誤差が大きい所もあるが、平均誤差は34%であり、初期の構造計画段階としては、満足できる範囲で推定可能である。
- 5) $H/B = 8$ のモデルで多少誤差が大きいのは、今回学習に使用したデータの H/B が2、3、4の3種類であり、 $H/B = 8$ は学習範囲外であったためと思われる。従って、学習データとしては、想定されるデータの範囲をカバーするような幅広い範囲のモデルを使用した方がよい精度を得られると思われる。
- 6) 補正せん断応力度の高さ方向の分布形状も解析結果の分布形状と非常に良く一致している。

第5節 独立壁・取り付き壁と連層壁が混在する場合の独立壁・取り付き壁負担せん断応力度の推定 770)

本節では、第4節を発展させ、独立壁・取り付き壁の負担せん断応力度を連層壁の補正せん断応力度と共に同時に推定を行う。

1. ニューラルネットワークの構成

入力パラメータは、第4節と同じ8個のパラメータ（式(5.9)～(5.16)）を使用する。

出力は、連層壁の補正せん断応力度（ $\Delta \tau_w$ ）、取り付き壁の補正せん断応力度（ $\Delta \tau_t$ ）、独立壁の補正せん断応力度（ $\Delta \tau_s$ ）の3ユニットとし、出力値を[0,1]の範囲に納めるために下式でモデル化する。

$$\Delta \tau_w = \{ (\tau_w - \tau_0) + 3.5 \} / 13 \quad (5.18)$$

$$\Delta \tau_t = \{ (\tau_w - \tau_0 + \tau_t) + 3.5 \} / 13 \quad (5.19)$$

$$\Delta \tau_s = \{ (\tau_w - \tau_0 + \tau_s) + 3.5 \} / 13 \quad (5.20)$$

τ_w : 連層壁のせん断応力度（ $\tau / \sqrt{F_c}$ ）

τ_0 : 連層壁の基本せん断応力度（ $\tau / \sqrt{F_c}$ ）

τ_t : 取り付き壁のせん断応力度（ $\tau / \sqrt{F_c}$ ）

τ_s : 独立壁のせん断応力度（ $\tau / \sqrt{F_c}$ ）

F_c : コンクリートの設計規準強度（ Kgf/cm^2 ）

ニューラルネットワークは、図-5.23に示すように、入力層8ユニット、中間層2層各25ユニット、出力層3ユニットを持つ階層型のニューラルネットワークを構成した。

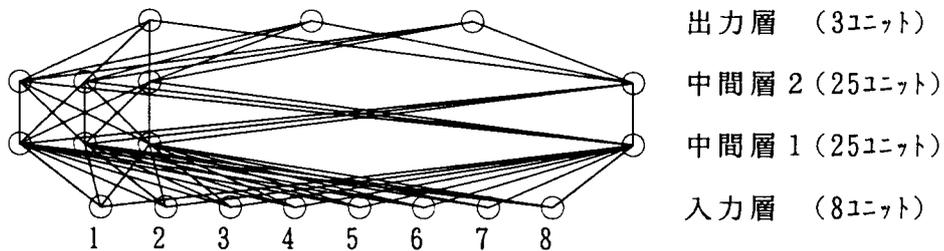


図-5.23 ニューラルネットワークの構成

2. 学習用基本壁配置と学習方法

第4節と同様に、基本建物モデルとしては、図-5. 10に示す8層5スパン、浮き上がり崩壊系を示す連層壁を持つ建物を考える。

学習用基本壁配置としては図-5. 11に示す、独立壁配置4タイプ、取り付け壁配置4タイプ、独立壁と取り付け壁が混在する1タイプ、それぞれに対して壁形状のパラメータ H/B (H :壁高, B :壁幅)が2, 3, 4の3タイプの計27タイプを考える(CASE 1)。ただし、 $B-C$ 間のスパン長は、 $H/B=2$ の時12m、 $H/B=3$ では、8mとした。

また本節では、図-5. 24に示す、更に複雑な4通りの横連層壁を学習データに加え(CASE 2)、教師信号の違いによる推定値への影響も調べた。

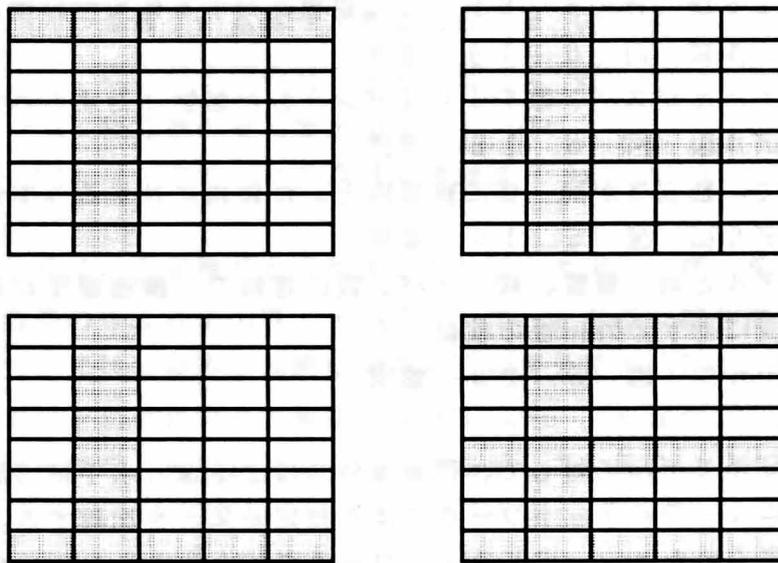


図-5. 24 新たに加えた教師信号の壁配置

図-5. 10、5. 11、5. 24に示す壁配置モデルに対して、(株)フジタ保有の構造設計システム「BUILSYS-V3」を使用して、荷重増分法による保有水平耐力の解析を行った。学習は、解析して得られた壁のせん断応力度(τ)と基本モデルでの連層壁のせん断応力度(τ_0)より式(5.18)~(5.20)を用いて求めた各壁の補正せん断応力度を出力とし、またそれぞれの壁の配置情報を入力として、図-5. 23に示すニューラルネットワークに学習させた。

学習には文献⁶⁾の添付ソフトをWS上で使い、設定したニューラルネットワークの各ユニット間の結合強さと各ユニットのしきい値を学習させた。学習は、誤差逆伝搬法を使用し、既報の分析結果をもとにどの層に関しても同一のニューラルネットワークを用いるものとした。

学習に要した計算回数は、打ち切り誤差0.05に対して、CASE 1の場合56,342回、CASE 2の場合176,114回であった。

3. 検証方法

ニューラルネットワークによる推定精度の検証は、下記の3ケースに付いて行った。

- 1)再現性：学習させたモデルに対する検証
- 2)内挿性：学習に使用した壁配置を組み合わせたモデルに対する検証
(壁配置モデル図：図-5.12 参照)
- 3)外挿性：学習に使用した壁配置とは全く異なる壁配置を持つモデルに対する検証

外挿性の検証は、下記の5ケースに対して行った。

- イ)基本建物モデルと同一層数、同一スパン数の建物に対する外挿性の検証
(壁配置モデル図：図-5.13 参照)
- ロ)建物層数を16層 ($H/B = 8$)とした建物に対する外挿性の検証
(壁配置モデル図：図-5.14 参照)
- ハ)層数は同じであるがスパン数を10スパンとした建物に対する外挿性の検証
(壁配置モデル図：図-5.15 参照)
- ニ)10スパンで、独立壁が同一層に複数枚とした建物に対する外挿性の検証
(壁配置モデル図：図-5.16 参照)
- ホ)基本建物モデルと同一層数、同一スパン数の建物で、横連層壁が数層に亘る複雑な壁配置に対する外挿性の検証
(壁配置モデル図：図-5.25 参照)

それぞれの検証用モデルに対して、荷重増分法による保有水平耐力解析を行い、その解析結果とニューラルネットワークによる推定結果とを比較する。尚、検証には2.項で得られたニューラルネットワークの結合強さとしきい値を用い、別途作成したプログラムを用いて推定値の計算を行う。

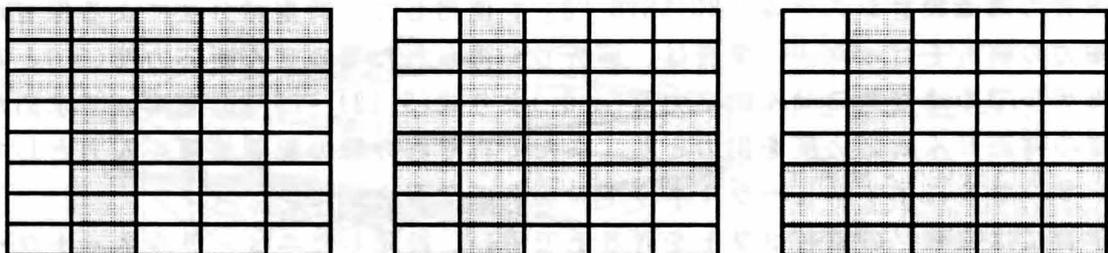


図-5.25 基本建物範囲内での外挿性検証モデル

4. 推定結果と実際値との比較

それぞれの検証モデルに対して各壁の推定した補正せん断応力度 ($\Delta \tau_w$ 、 $\Delta \tau_t$ 、 $\Delta \tau_s$) と連層壁の基本せん断応力度から、式(5.18)~(5.20)を逆変換してそれぞれの壁の負担せん断応力度を推定する。

$$(\tau_w - \tau_0) = TT \quad \text{とおけば} \quad (5.21)$$

$$TT = \Delta \tau_w * 13 - 3.5 \quad (5.22)$$

$$\tau_t = (13 * \Delta \tau_t - 3.5) - TT \quad (5.23)$$

$$\tau_s = (13 * \Delta \tau_s - 3.5) - TT \quad (5.24)$$

$$\tau_w = TT + \tau_0 \quad (5.25)$$

τ_w : 連層壁のせん断応力度 ($\tau / \sqrt{F_c}$)

τ_0 : 連層壁の基本せん断応力度 ($\tau / \sqrt{F_c}$)

τ_t : 取り付き壁のせん断応力度 ($\tau / \sqrt{F_c}$)

τ_s : 独立壁のせん断応力度 ($\tau / \sqrt{F_c}$)

F_c : コンクリートの設計規準強度 (Kgf/cm^2)

図-5.26に、推定結果と実際値とを比較した図(一例)を示す。

横軸は、各壁のせん断応力度 ($\tau / \sqrt{F_c}$) で、縦軸は、層位置を示す。

連層壁については、基本せん断応力度からの差分応力(TT)を、取り付き壁、独立壁についてはそれぞれのせん断応力度 ($\tau / \sqrt{F_c}$) を示す。

実線は解析結果、破線は推定した結果を示している。

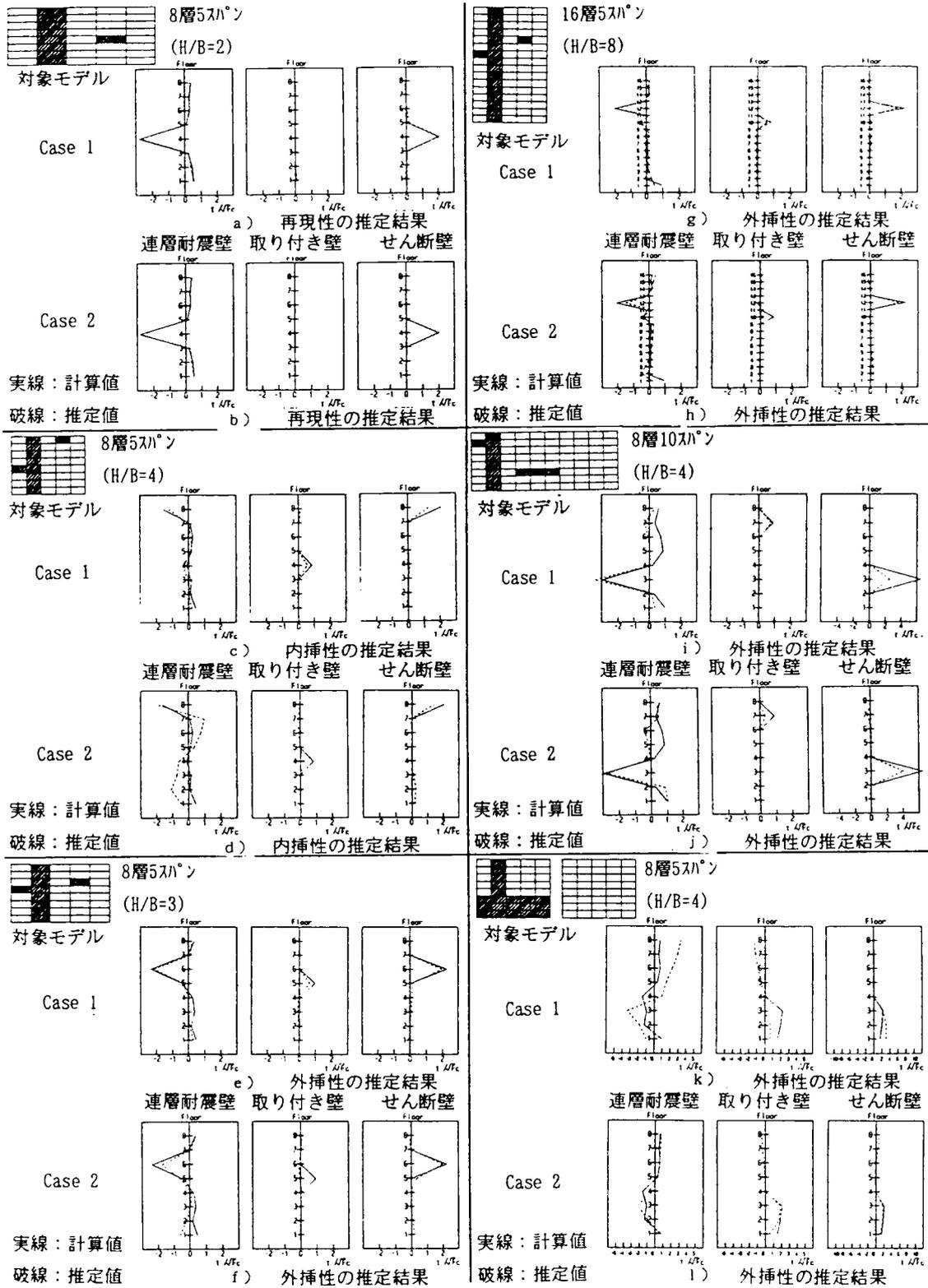


図 - 5. 26 推定結果と実際値との比較図⁸⁾

5. 考察

- 1) 再現性については、CASE 1, CASE 2のいずれにおいても、連層壁、取り付き壁、独立壁のせん断応力度を非常に精度良く推定することが可能である。(図-5.26 a),b) 参照)
- 2) 内挿性については、再現性ほど解析結果と推定結果とは一致してはいないが、連層壁・取り付き壁・独立壁のせん断応力度を全般的に精度良く推定可能である。ただし、教師信号として内挿性検証対象モデルとはかなり異なった壁配置を追加したCASE 2の場合には、連層壁の補正せん断応力度において誤差が大きく出ている。(図-5.26 c),d) 参照)
- 3) 教師信号と同じ8層5スパンモデルの外挿性の検証は、内挿性における推定と同程度の精度で、CASE 1, CASE 2共に推定可能である。(図-5.26 e),f) 参照)
- 4) 16層5スパンモデルの外挿性の検証は、内挿性における推定と同程度の精度で、CASE 1, CASE 2共に推定可能である。(図-5.26 g),h) 参照)
- 5) 8層10スパンモデルの外挿性の検証は、内挿性における推定と同程度の精度で、CASE 1, CASE 2共に推定可能であるが、独立壁についてはCASE 2の方が精度が良かった。これは、CASE 1に対しては、横連層壁は学習データに含まれていないが、CASE 2の教師信号には横連層の壁が含まれているためと思われる。(図-5.26 i),j) 参照)
- 6) 8層5スパンで横連層壁が複数層に亘ってある場合については、CASE 1の様に横連層壁の学習データを持たない場合には、推定精度が悪いが、CASE 2では、学習データを持っているために内挿性における推定と同程度に推定可能である。(図-5.26 k),l) 参照)
- 7) CASE 1とCASE 2を比べると、CASE 2の方が学習に対する収束性が遅い。これは、CASE 2で追加した学習データ(横連層壁)がそれまでの学習データと構造的に異なっていたためと考えられる。
- 8) 学習データの決定は、構造的予測対象や教師信号として用いるデータの特性を考慮して決める必要がある。構造的に似通ったデータと異なったデータを学習・検証させた場合、構造的に似通った場合の方が推定精度が良く、学習に要する計算回数も少なくなる。

第6節 結語

本章では、耐震壁の負担せん断応力度に関する知識獲得の手法とそのシステム化について論じた。第2節では、耐震壁の負担せん断応力度と耐震壁の形状、配置との関係を分析した。第3節では、連層壁のみ存在する場合の連層壁のせん断応力度の推定に関して、第4、5節では、連層壁と、独立壁、取り付き壁が混在する場合の連層壁、独立壁、取り付き壁のせん断応力度の推定に関して論じた。

いづれも、意匠計画図より読み取れる、簡単な情報を入力パラメータとした。出力及び教師信号は、新たに作成したモデルに対して、荷重増分法による保有水平耐力の算定を行い、その時の耐震壁の負担せん断応力度比とした。

以下に、本章で得られた結論を述べる。

- 1) 連層壁の負担せん断応力度は、連層壁のみ存在するときの連層壁の基本せん断応力度と、独立壁・取り付き壁が混在する事により派生する補正せん断応力度との代数和として与えることができる。

従って、基本せん断応力度と補正せん断応力度とを別個に考慮することができる。

- 2) 連層壁の基本せん断応力度（連層壁のみ存在する場合）については、下記の5個の簡単な入力パラメータで知識獲得を行うことができ、構造計画段階で使用するには十分な精度で推定可能である。

- 1)連層壁のプロポーション（壁高さ／壁長さ）
- 2)当該方向対象層の連層壁の存在率
- 3)連層壁の存在位置に対するフラッグ1（境界梁の本数）
- 4)連層壁の存在位置に対するフラッグ2（外周フレーム、内部フレーム）
- 5)連層壁の中での対象層の位置

- 3) 耐震壁の補正せん断応力度（連層壁と独立壁、取り付き壁が混在する場合）については、下記の8個の簡単な入力パラメータで知識獲得を行うことができ、構造計画段階で使用するには十分な精度で推定可能である。

- 1)連層壁形状
- 2)対象としている層位置
- 3)対象層より上層にある取り付き壁の影響係数
- 4)対象層にある取り付き壁の影響係数
- 5)対象層より下層にある取り付き壁の影響係数
- 6)対象層より上層にある独立壁の影響係数
- 7)対象層にある独立壁の影響係数
- 8)対象層より下層にある独立壁の影響係数

- 4) 学習データ・検証データの中に構造的に異質なものが含まれていると、推定精度・学習の収束性ともに悪くなる。従って、構造的に異質なものが含まれないような分類（入力パラメータの選択）が必要である。
- 5) 内挿性と外挿性との推定精度を比較すると、外挿性の方が推定精度は悪い。学習データの選定に関しては、外挿性となる範囲をできるだけ少なくなるように、想定されるデータの範囲をカバーするような幅広い範囲のモデルを選択するのが望ましい。
- 6) 本システムは構造計画の部材断面検討フェーズで耐震壁の負担せん断応力度を推定する非常に有効なツールになると思われる。
- 7) 連層壁の応力度の推定に関して、本論では、浮き上がり崩壊系を示す壁配置のみとした。今後は、さらに実用化をめざすために、下記の項目について検討を行う予定である。
 - 1)より複雑な壁配置への対応
 - 2)曲げ崩壊系を示す連層壁への拡張

尚、ニューラルネットワークの特性を活かすならば、連層壁架構としての崩壊モードそのものの推定に応用してゆく事も興味深い課題と思われる。

【参考文献】

- 1) B C J - 電 1 7 4 : ビルディングレター 91.4増刊号
- 2) 堤和敏、松林隆道、片岡裕美、薦野和彦：構造計画時における壁応力度の推定に関する研究 その1 概要と分析手法、日本建築学会大会学術講演梗概集 A、1992年8月、pp. 1577-1578.
- 3) 八名和夫・鈴木義武：ニューロ情報処理技術 基礎と応用」海文堂 P41-P48
- 4) 矢川元基編：計算力学と C A E シリーズ 1 2、ニューラルネットワーク、培風館、1992.
- 5) 堤和敏、谷明勲、河村廣、松林隆道、片岡裕美：ニューラルネットワークを利用した構造計画段階での連層壁応力度推定システムの研究、日本建築学会構造系論文集、NO. 456、1994年2月号、pp. 81-86.
- 6) Rumelhart, D. E., Hilton, G. E. and Williams, R. J., "Learning Representations by Back-Propagation Errors," Nature, 323-9, Oct. 1986, pp. 533-536.
- 7) 堤和敏、松林隆道、片岡裕美、河村廣、谷明勲、山田貴彦：ニューラルネットワークによる壁応力度の推定に関する研究 その1 概要、日本建築学会大会学術講演梗概集 A、1993年9月、pp. 1575-1576.
- 8) 山田貴彦、河村廣、谷明勲：ニューラルネットワークによる壁応力度の推定に関する研究 その2 推定結果、日本建築学会大会 学術講演梗概集 A、1993年9月、pp. 1577-1578.

第 6 章

部材断面推定のシステム化と検証

第 1 節 緒 言	- 121 -
第 2 節 構造部材断面推定のシステム化	- 121 -
1. 部材断面の推定フロー	- 121 -
2. 各推定ステップに必要な情報・知識の詳細	- 125 -
3. システムの構成	- 143 -
第 3 節 設計例 1 : S R C 造 1 4 層事務所ビルによる検証	- 147 -
1. 検証モデル	- 147 -
2. 推定結果	- 148 -
3. 推定結果に基づく断面に対する保有水平耐力	- 153 -
4. 推定値と実際値との比較・考察	- 154 -
第 4 節 設計例 2 : R C 造 5 層店舗ビルによる検証	- 157 -
1. 検証モデル	- 157 -
2. 推定結果	- 158 -
3. 推定結果に基づく断面に対する保有水平耐力	- 161 -
4. 推定値と実際値との比較・考察	- 162 -
第 5 節 結語	- 164 -
【参考文献】	- 165 -

第1節 緒言

本章では、前章までに獲得したニューラルネットワークによる「経験的非明示知識」を用い、アルゴリズムが明解な「経験的明示知識」・「一般的知識」との統合化を行い、意匠図より読みとる事が出来る簡単なデータを利用するだけで構造計画段階における「構造部材断面の推定」が可能であることを実証する。そのために、「部材断面推定システム」を構築し、検証モデルに対してシステムの妥当性を検証する。

「経験的明示知識」は、「経験的知識」を言葉で表現できるものであり、曖昧性が含まれている場合も多い。従って、ファジィ理論を用いたほうがより設計者の感覚に近いものになると思われるが、ファジィ的な扱いは、今後の検討課題として、本論ではクリスプ的な扱いをする。

第2節で、システム化手順と必要な入力データ、及びシステム構成を述べる。

第3節では、SRC造14階事務所ビルを例にとり検証と考察を行う。

第4節では、RC造5階店舗ビルを例にとり検証と考察を行う。

第5節では、本システムについての結論を述べる。

第2節 構造部材断面推定のシステム化

本論文は、「設計ノウハウ」のシステム化への第1歩として、構造計画段階における「部材断面推定法」を対象として、構造設計者が持っている「ノウハウ」の獲得を行い、システム化をめざしている。本節では、「経験的非明示知識」を利用した「部材断面推定法」の概要を示し、システム化への具体的な対応を論じる。

1. 部材断面の推定フロー

本論では、建物としての目標耐力を必要保有水平耐力とし、偏心が無く、変形はあまり問題とならない中低層のRC/SRC構造物を対象とする。

部材断面推定法の一般的な方法は、第1章3節で述べたが、本節では、「経験的非明示知識」を利用した「部材断面推定法」を提案する。

① 平均建物重量の推定（「経験的非明示知識」）

構造種別、建物規模等により平均建物重量をニューラルネットワークにより推定する。

② 建物重量等の算定

推定された平均建物重量を、各階の床面積および柱1本当当たりの荷重負担床面積に乗じて、各階の建物重量、柱長期軸力、基礎設計用長期軸力を算定する。

ここで、各階の床面積および柱1本当当たりの荷重負担床面積は、図面より誰でも読み取れる情報である。

③ 構造特性係数 D_s 値（初期値）の推定（「経験的非明示知識」）

構造種別、建物規模、壁配置等により D_s 値（初期値）をニューラルネットワークにより推定する。

④ 必要保有水平耐力の算定

②で求めた各階の建物重量より、 A_i 分布に従い地震力によって各階に生じる水平力を求める。次に、③で求めた構造特性係数 D_s 値より、必要保有水平耐力を算定する。ここで、 A_i 分布、地震力によって各階に生じる水平力、 D_s 値が設定された後での必要保有水平耐力の算定法については、政令や、建設省告示で示されており「一般的知識」である。

⑤ 壁せん断応力度の推定（「経験的非明示知識」）

建物規模、壁配置等により壁のせん断応力度をニューラルネットワークにより推定する。

⑥ 壁せん断耐力分担割合の算定、 D_s 値・必要保有水平耐力の補正

⑤で求めたせん断応力度に、壁長さ、壁厚を乗じて、壁の負担せん断耐力を求める。求めた壁の負担せん断耐力を④で求めた必要保有水平耐力で除して壁のせん断耐力分担割合を求める。 D_s 値と、壁のせん断耐力分担割合の間には、明示的な関係（一般的知識）¹⁾があるために、ニューラルネットワークで推定した値をそのまま使うと、矛盾する場合もある。従って、本論では、③のニューラルネットワークで求めた D_s 値は、壁のせん断耐力分担割合を求めるための初期値と位置づけ、柱群種別は F_A として部材断面を推定する事を前提に、壁のせん断耐力分担割合より、 D_s 値を補正し、必要保有水平耐力の補正を行う。必要保有水平耐力を補正すると、壁のせん断耐力分担割合も変化し、 D_s 値も変化するが、 D_s 値の補正は、1回のみとした。

壁長さは、図面より読み取れる情報であり、壁厚は、建物層数等より決める事が出来る「経験的明示知識」である。

⑦ 柱必要せん断耐力の推定

⑥で求めた必要保有水平耐力から壁の負担すべきせん断耐力を引いた残りを柱の負担せん断耐力とする。この柱負担せん断耐力を耐力壁の付帯柱ではない柱の本数で除して、柱の一本当たりの必要負担せん断耐力を求める。

耐力壁付帯柱でない柱本数は、図面から誰でも読み取れる情報である。

⑧ 節点必要曲げ耐力の算定

⑦で求めた柱必要せん断耐力から、柱の反曲点位置を仮定し、柱の必要曲げ耐力、節点必要曲げ耐力、梁のせん断耐力を求める。

ここで、柱の反曲点位置が仮定出来れば、柱の必要曲げ耐力、梁の必要曲げ耐力、梁のせん断耐力は、力学的関係から誰でも求められる「一般的知識」¹⁾である。一方、柱の反曲点位置は、厳密には、柱・梁の剛性や配置位置によって異なるが、計画段階で使用する際には、経験的に中間層 0.5 最上層 0.4、最下層 0.60程度でよい。「経験的明示知識」である。

⑨ 梁断面の推定

⑧で求めた節点必要曲げ耐力より、梁部材の目標性能（引張り鉄筋比、せん断応力度等）を満足するように梁断面を推定する。また、推定した断面での実際の梁の曲げ耐力を算定する。

目標性能と曲げ耐力との関係式は、実験式として与えられていて「一般的知識」¹⁾である。目標性能については、例えば引張り鉄筋比1.0%以下、せん断応力度 $0.15F_c$ 以下（ F_c :コンクリート材料強度）というように「経験的明示知識」として与える事が出来る。

⑩ 柱必要耐力の算定

⑨で推定された梁断面に対する曲げ耐力に対して、梁降伏系を保証するために梁曲げ耐力に割増し係数を乗じて、必要な柱耐力の算定を行う。

ここで、梁降伏系を保証するための割り増し係数は、1.3~2.0程度の値が示されていて^{2) 3)}「経験的明示知識」である。

⑪ 柱断面の推定

⑩で求めた柱必要耐力に対して目標性能（引張り鉄筋比、軸応力度、せん断応力度等）を満足するように柱断面を推定する。

目標性能と耐力との関係式は、実験式として与えられていて「一般的知識」である¹⁾。目標性能については、例えば引張り鉄筋比0.8%以下、長期軸応力度 $0.2F_c$ 以下、せん断応力度 $0.1F_c$ 以下というように「経験的明示知識」として与える事が出来る。

⑫ 壁の断面推定

⑥で求めた壁の必要せん断耐力・壁厚を満足するように、壁せん断補強筋を求める。壁せん断耐力と壁せん断補強筋との関係は、実験式として与えられている「一般的知識」¹⁾である。

⑬ 基礎設計用長期軸力を満足するような場所打ち杭の杭径と基礎断面を推定する。

本論では、場所打ち杭基礎を対象とする。

敷地地盤のボーリング柱状図より、杭支持位置とN値を設定し、杭の単位面

積当たりの許容支持力を算定する。②で求めた、基礎設計用長期軸力を杭の単位面積当たりの許容支持力で除し、必要な杭断面積を求め、杭径を算定する。算定した杭径にたいして基礎の断面を設定する。

ここで、ボーリング柱状図より、杭支持位置とN値を設定する知識は、「経験的明示知識」である。また、N値と杭径および許容支持力との関係は、実験式で与えられていて「一般的知識」である。

図-6.1にシステムフロー図を示す。

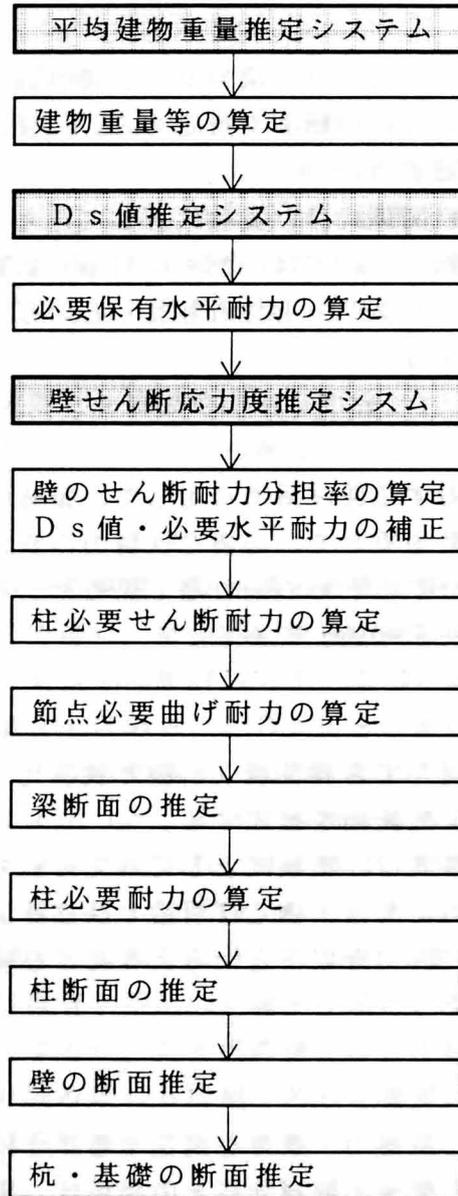


図-6.1 システムフロー図（図中網掛け部はニューラルネットワークを示す）

2. 各推定ステップに必要な情報・知識の詳細

各ステップ毎に、システム化を行う上で必要な「情報」・「知識」の詳細を以下に示す。

① 平均建物重量の推定（「経験的非明示知識」）

構造種別、建物規模等により平均建物重量をニューラルネットワークにより推定する。 第3章参照。 図-6.2にフロー図を示す。

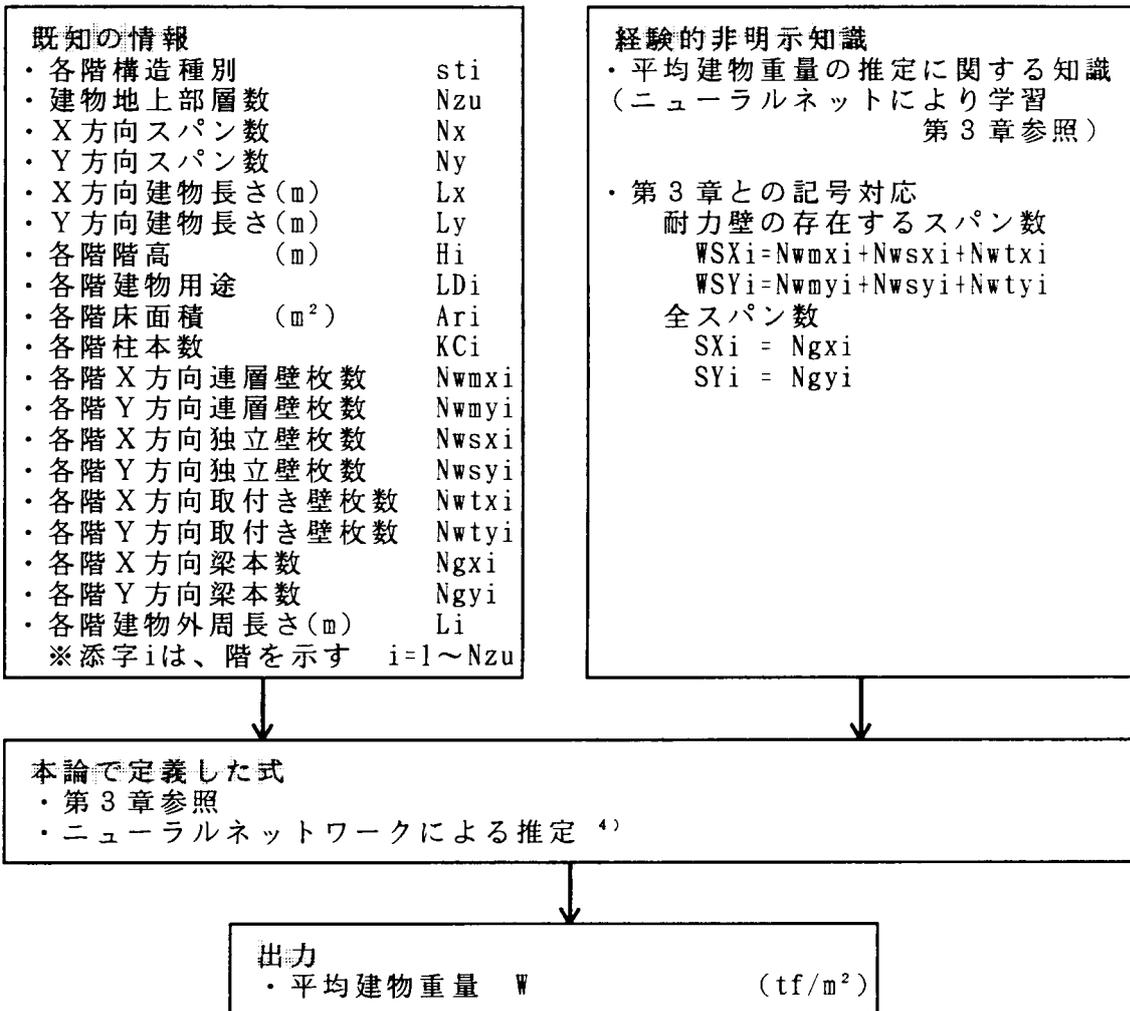


図-6.2 平均建物重量推定フロー図

② 建物重量等の算定

推定された平均建物重量を、各階の床面積および柱1本当たりの荷重負担床面積に乗じて、各階の建物重量、柱長期軸力、基礎設計用長期軸力を算定する。 図-6.3にフロー図を示す。

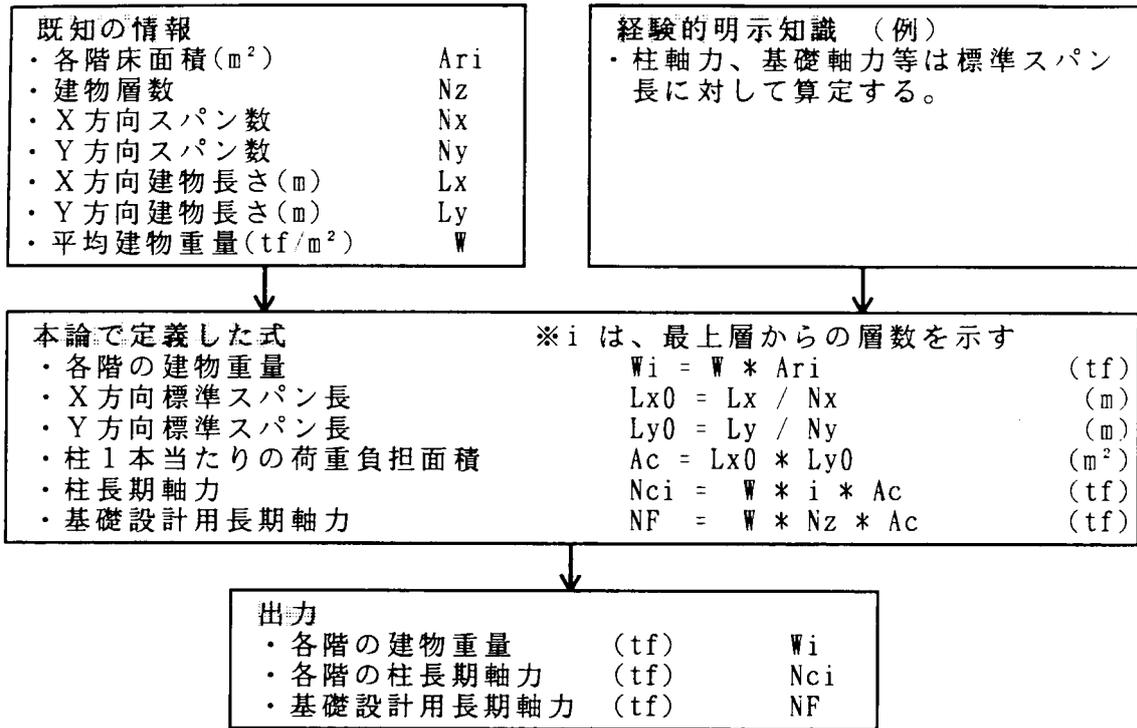


図-6.3 建物重量等の算定フロー図

③ 構造特性係数 D s 値 (初期値) の推定 (「経験的非明示知識」)

構造種別、建物規模、壁配置等により D s 値 (初期値) をニューラルネットワークにより推定する。 図-6.4 にフロー図を示す。

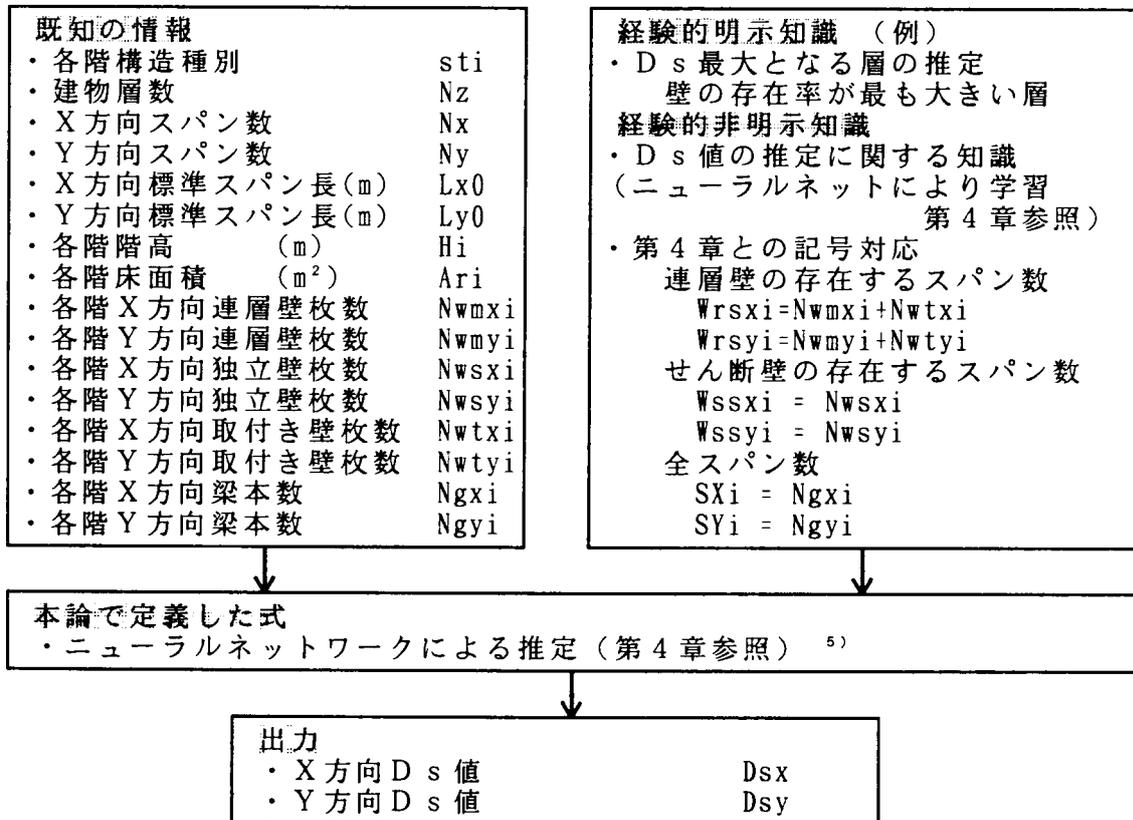


図-6.4 D s 値の推定フロー図

④ 必要保有水平耐力の算定

②で求めた各階の建物重量より、 A_i 分布に従い地震力によって各階に生じる水平力を求める。次に、③で求めた構造特性係数 D_s より、必要保有水平耐力を算定する。図-6.5にフロー図を示す。

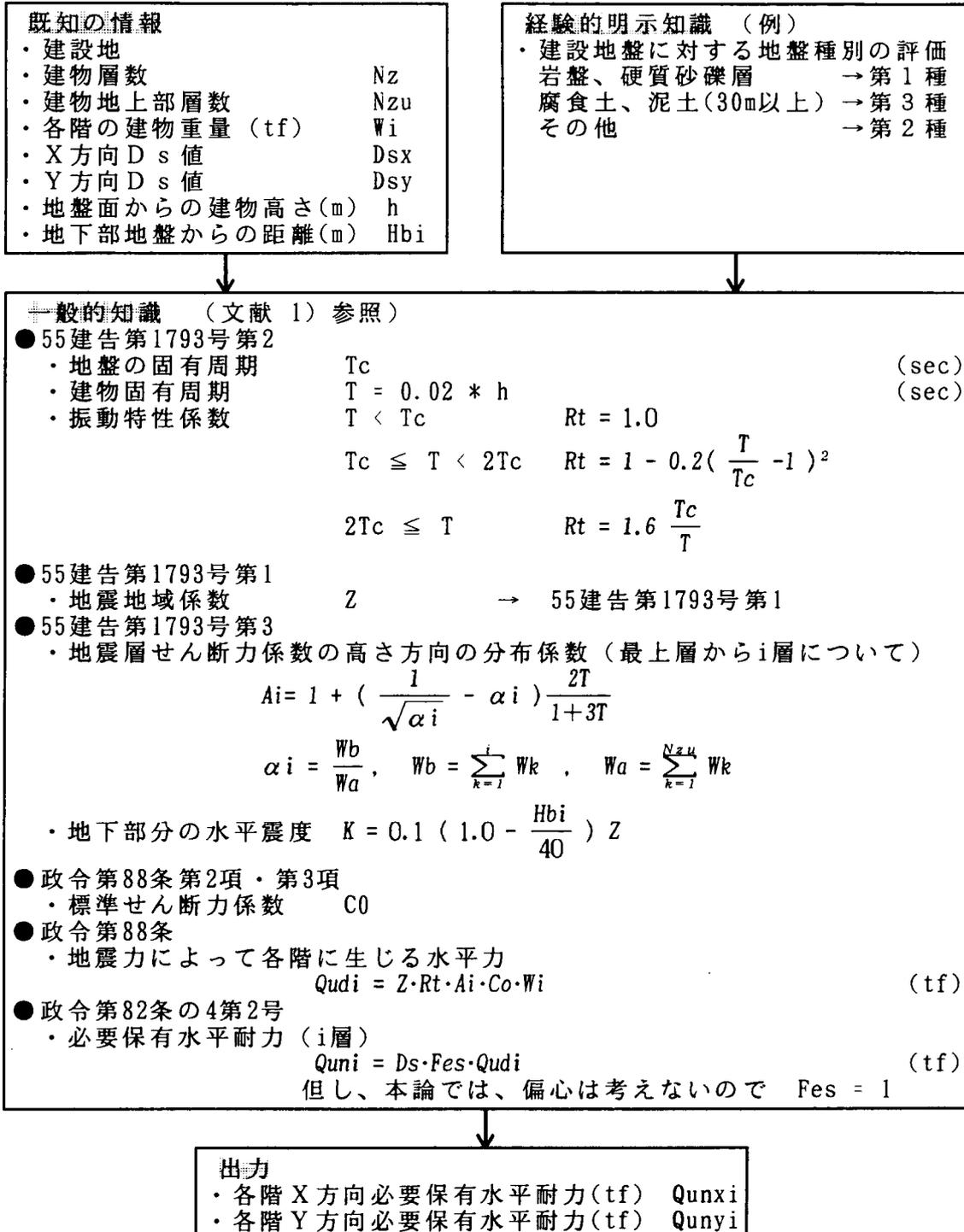


図-6.5 必要保有水平耐力の算定フロー図

⑤ 壁せん断応力度の推定（「経験的非明示知識」）

建物規模、壁配置等により壁のせん断応力度をニューラルネットワークにより推定する。 図-6.6、6.7にフロー図を示す。

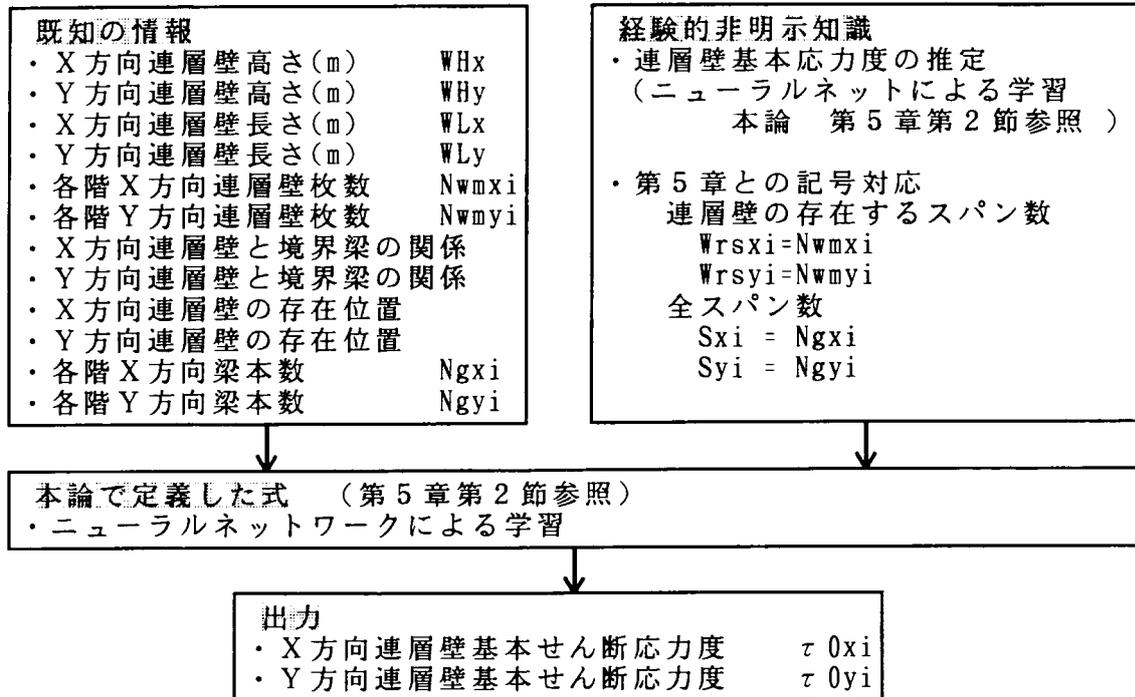


図-6.6 連層壁基本せん断応力度の推定フロー図

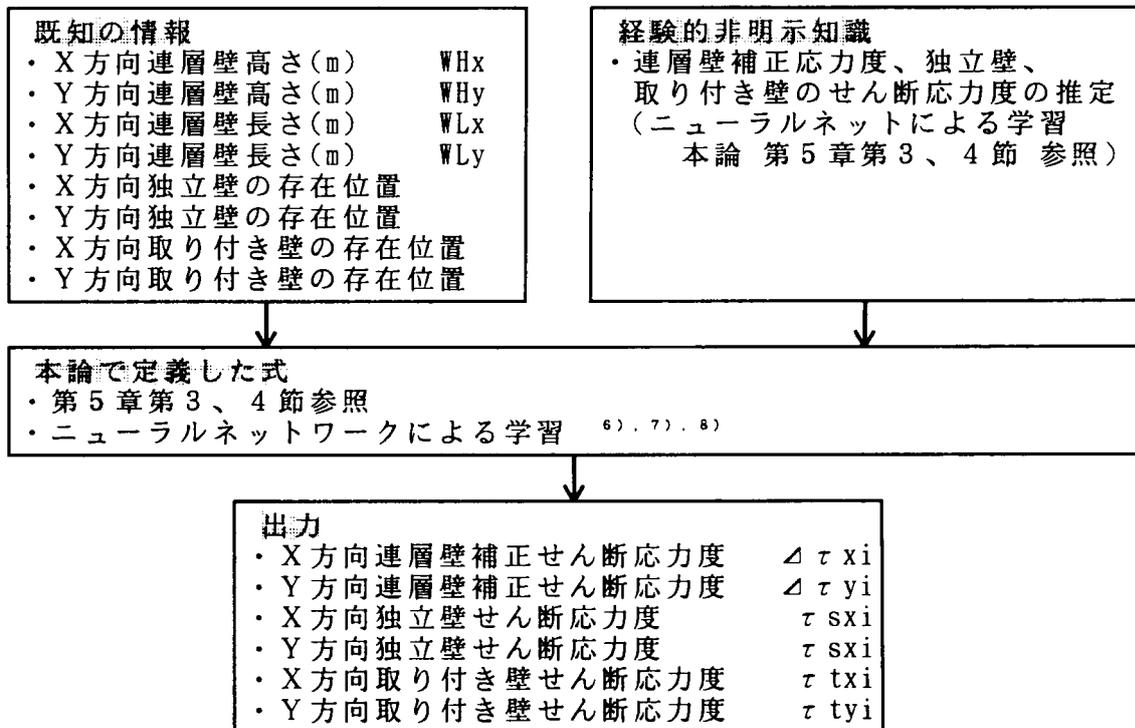


図-6.7 連層壁補正せん断応力度の推定フロー図

⑥ 壁せん断耐力分担割合の算定、Ds値・必要保有水平耐力の補正

⑤で求めたせん断応力度に、壁長さ、壁厚を乗じて、壁の負担せん断耐力を求める。求めた壁の負担せん断耐力を④で求めた必要保有水平耐力で除して壁のせん断耐力分担割合を求める。Ds値と、壁のせん断耐力分担割合の間には、明示的な関係（一般的知識）¹⁾があるために、ニューラルネットワークで推定した値をそのまま使うと、矛盾する場合もある。従って、本論では、③のニューラルネットワークで求めたDs値は、壁のせん断耐力分担割合を求めるための初期値と位置づけ、柱群種別はFAとして部材断面を推定する事を前提に、壁のせん断耐力分担割合より、Ds値を補正し、必要保有水平耐力の補正を行う。

Ds値の補正は、1回のみとした。図-6.8にフロー図を示す。

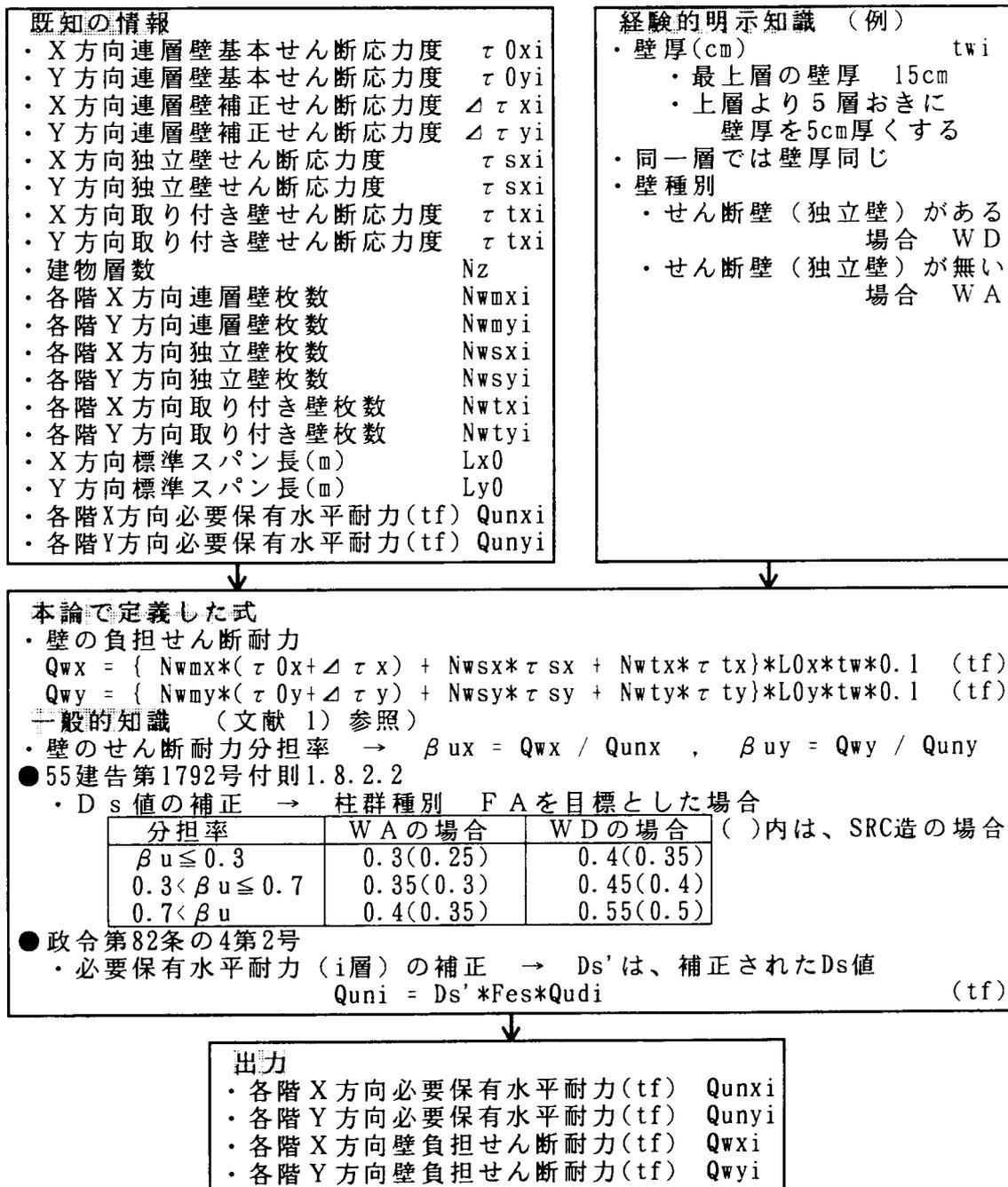


図-6.8 壁せん断耐力の算定フロー図

⑦ 柱必要せん断耐力の推定

⑥で求めた必要保有水平耐力から壁の負担すべきせん断耐力を引いた残りを柱の負担せん断耐力とする。この柱負担せん断耐力を耐力壁の付帯柱ではない柱の本数で除して、柱の一本当たりの必要負担せん断耐力を求める。

図-6.9にフロー図を示す。

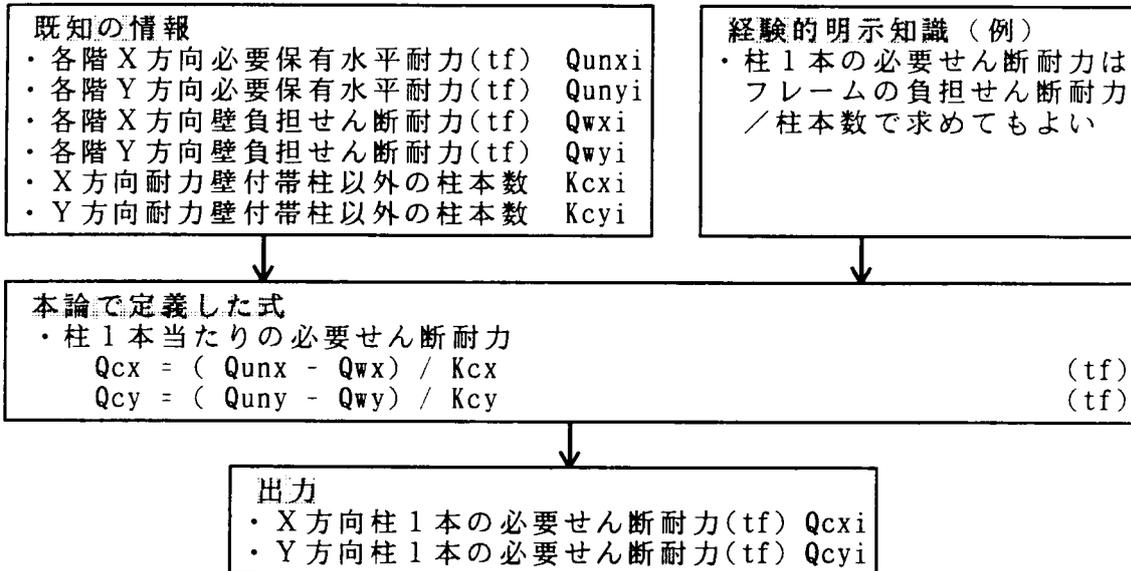


図-6.9 柱必要せん断耐力の算定フロー図

⑧ 節点必要曲げ耐力の算定

⑦で求めた柱必要せん断耐力から、柱の反曲点位置を仮定し、柱の必要曲げ耐力、節点必要曲げ耐力、梁のせん断耐力を求める。図-6.10にフロー図を示す。

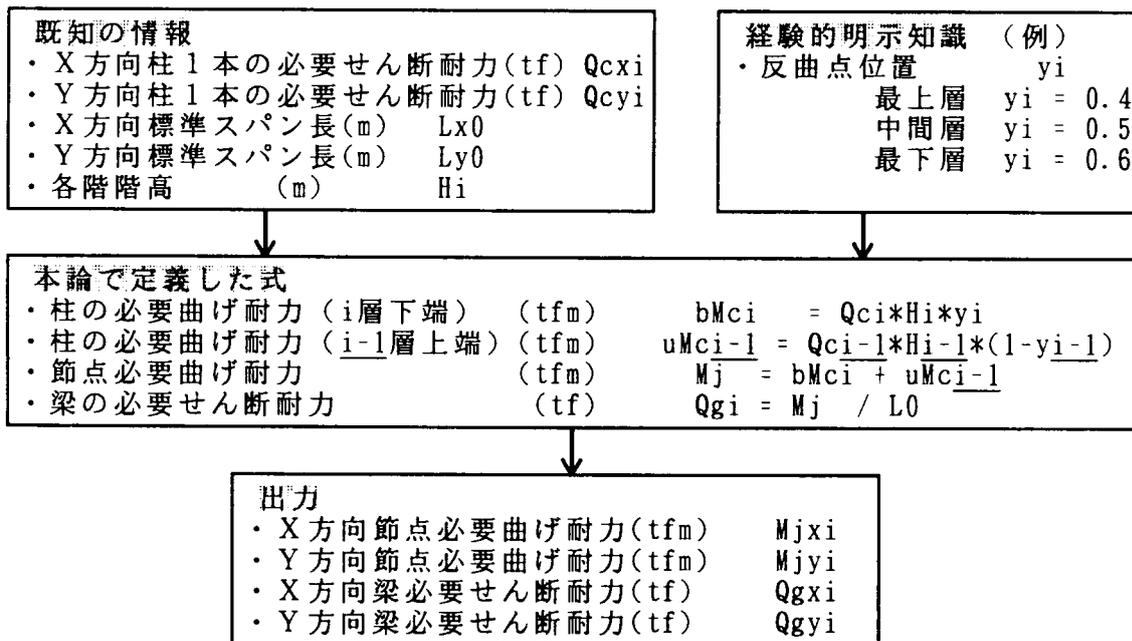


図-6.10 節点必要曲げ耐力の算定フロー図

⑨ 梁断面の推定

節点必要曲げ耐力より、梁部材の目標性能を満足するように梁断面を推定する。
また、推定した断面での実際の梁の曲げ耐力を算定する。

〈RC梁の場合〉

<p>既知の情報</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ X方向節点必要曲げ耐力 Mjxi (tfm) ・ Y方向節点必要曲げ耐力 Mjyi (tfm) ・ X方向梁必要せん断耐力 Qgxi (tf) ・ Y方向梁必要せん断耐力 Qgyi (tf) ・ X方向標準スパン長(m) Lx0 ・ Y方向標準スパン長(m) Ly0 	<p>経験的明示知識 (例)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 目標引張り鉄筋比 pt ≤ 1.2% ・ 梁成と梁幅の比 c1 ≒ 0.5 ・ 鉄筋有効成/梁成 c2 ≒ 0.9 ・ せん断応力度 τ ≤ 0.15Fc ・ 主筋鉄筋径・断面積(at0:cm²) D25 ・ 主筋種別 SD345 ・ スターラップ径 D13 ・ スターラップ種別 SD295 ・ スターラップのピッチ 100 ≤ pit ≤ 250 ・ スラブ筋(atsb) 6-D13, 4-D10 ・ スラブ筋による耐力増大率 rsb ≒ 1.2 ・ フェイス耐力/節点耐力 cfg ≒ 0.9 ・ 下主筋本数/上主筋本数 rub ≒ 0.75 ・ 最小主筋本数 3-D25 ・ 梁成の制限 D ≥ 50cm ・ 断面は5cm単位に切り上げる。
---	--

<p>一般的知識</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 引張鉄筋比と曲げ耐力との関係 (文献 1): p. 230) $pt = \frac{at}{b \cdot D}$ $Mu = 0.9 at \cdot \sigma_y \cdot d \times 10^{-5} \quad (\text{tfm})$ <p>Mu: 必要曲げ耐力(tfm) , pt:引張鉄筋比 at:引張鉄筋断面積(cm²) , σy:引張鉄筋材料強度(kgf/cm²) d: 引張鉄筋有効成(cm) D: 梁成 (cm) , b:梁幅 (cm)</p> ・ せん断応力度とせん断力との関係 $\tau = \frac{Qu \times 10^3}{b \cdot D} \quad (\text{kgf/cm}^2)$ <p>Qu:終局せん断力(tf) , Fc:コンクリート材料強度 (kgf/cm²)</p> ・ せん断補強筋比とせん断耐力との関係 (文献 1): p. 231) $Qu = \left\{ \frac{0.068pt^{0.23}(Fc+180)}{Mu/(Q \cdot d) + 0.12} + 2.7\sqrt{pw \cdot \sigma_{wy}} \right\} b \cdot j \times 10^{-3} \quad (\text{tf})$ <p>pw = atw / b / pit , atw:せん断補強筋断面積(2-D13:cm²) j: 曲げ材の応力中心間距離(cm) j = 0.875 * d σwy:せん断補強筋の材料強度 (kgf/cm²)</p> <p>本論で定義した式</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 梁幅、引張鉄筋有効成と梁成との関係 $b = c1 * D$ $d = c2 * D$ ・ スラブ筋を考慮した上主筋、下主筋の全目標引張鉄筋比は $pt' = (rsb + rub) * pt$ ・ 梁フェイス必要曲げ耐力に対して全目標引張鉄筋比を満足させる断面 $D1 = (Mj \cdot 10^5 \cdot cfg / (0.9 * pt' * \sigma_y * c1 * c2))^{1/3}$ $D2 = (Qg \cdot 10^3 / c1 / \tau)^{1/2}$ $D = \text{MAX}(D1, D2) \quad \rightarrow \quad 5\text{cm単位に切り上げる。例 } 82 \rightarrow 85 \quad (\text{cm})$ $b = c1 * D \quad \rightarrow \quad 5\text{cm単位に切り上げる。例 } 41 \rightarrow 45 \quad (\text{cm})$ $d = c2 * D$ <p>(次頁に続く)</p>

(前頁より続く)

- ・スラブ筋による耐力増加分
 $msb = 0.9 * atsb * 3.3 * d * 0.01$
- ・主筋本数の算定
 $atu = (Mj * cfg - msb) * 10^5 / (1 + rub) / (0.9 * \sigma_y * c2 * D)$ (cm²)
 $atb = atu * rub$ (cm²)
 $ntu = atu / at0 \rightarrow$ 切り上げて整数にする。最小3本
 $ntb = atb / at0 \rightarrow$ 切り上げて整数にする。最小3本
- ・梁の実際の耐力
 上端 $uMg = 0.9 * ntu * at0 * \sigma_y * c2 * D * 10^{-5} + msb$ (tfm)
 下端 $bMg = 0.9 * ntb * at0 * \sigma_y * c2 * D * 10^{-5}$ (tfm)
- ・梁のせん断耐力 $Qg = (uMg + bMg) / L0$ (tf)
- ・スターラップの算定
 $pw = \{ [Qg * 10^3 / b / 0.875 / d - 0.068 * pt^{0.28} * (Fc + 180) / (0.5 * L0 / d + 0.12)] / 2.7 \}^2 / \sigma_{wy}$
 $pit = atw / b / pw * 10 \rightarrow$ 25mm 単位に整数化。最大 250mm (mm)

↓

出力	
・梁成 (cm)	Di
・梁幅 (cm)	bi
・上主筋	ntui- D25
・下主筋	ntbi- D25
・スターラップ°	2 - D13 @ pit
・梁の実際曲げ耐力 (上端) (tfm)	uMgi
・梁の実際曲げ耐力 (下端) (tfm)	bMgi
・梁のせん断耐力 (tf)	Qgi

図 - 6. 11 RC造梁断面の推定フロー図

〈SRC梁の場合〉

鉄筋本数を指定し、鉄骨曲げ分担率を設定する事により、RC部が負担すべき曲げ耐力がもとめられる。指定した鉄筋本数でRC部の曲げ耐力を満足するように梁成を決める。求めた梁成にたいして、S部の必要耐力を満足するようにフランジ厚、ウェブ厚を算定する。

既知の情報	
・ X方向節点必要曲げ耐力	Mjxi (tfm)
・ Y方向節点必要曲げ耐力	Mjyi (tfm)
・ X方向梁必要せん断耐力	Qgxi (tf)
・ Y方向梁必要せん断耐力	Qgyi (tf)
・ X方向標準スパン長(m)	Lx0
・ Y方向標準スパン長(m)	Ly0

(次頁に続く)

経験的明示知識 (例)	
・ 上主筋 (atui)	
最上階から数えて7階未満の階まで	2-D25
最上階から数えて7階以上の階	4-D25
・ 下主筋 (atbi)	2-D25
・ フランジ幅(bfi)	
最上階から数えて15階未満の階(cm)	20
最上階から数えて15階以上の階(cm)	25
・ 梁幅(bi:cm)	bfi + 25
・ 鉄骨最大曲げ分担率	rs = 0.75
・ 鉄筋有効成/梁成	c2 ≒ 0.9
・ 主筋種別	SD345
・ スターラップ径	D13
・ スターラップ種別	SD295
・ スターラップのピッチ	100 ≤ pit ≤ 250
・ スラブ筋(atsb:cm ²)	6-D13, 4-D10
・ 鉄骨材料種別	SM490
・ 鉄骨のコンクリートかぶり厚(cm)	12.5
・ 最小フランジ厚	12mm

(次頁に続く)

(前頁より続く)	(前頁より続く) ・最小ウェブ厚 ・梁成の制限 ・断面は5cm単位に切り上げる。
----------	---

6mm
D ≥ 50cm

一般的知識

- 引張鉄筋と曲げ耐力(rMu)との関係

$$rMu = 0.9 at \cdot \sigma y \cdot d \times 10^{-5} \quad (\text{tfm})$$
 at : 引張鉄筋断面積 (cm²) , σy : 引張鉄筋材料強度 (kgf/cm²)
 d : 引張鉄筋有効成 (cm)
- フランジ厚と曲げ耐力(sMu)との関係

$$sMu = bf \cdot tf \cdot s \sigma y \cdot (sD - tf) \times 10^{-5} \quad (\text{tfm})$$
 sD : 鉄骨成 = D - 25 (cm) , $s \sigma y$: 鉄骨材料強度 (kgf/cm²)
 tf : フランジ厚 (cm) , bf : フランジ幅 (cm)
- RC部のせん断耐力 (文献 9) : p. 26

$$rQu = \text{MIN}\{rQbu, \text{MIN}(rQu1, rQu2)\} \quad (\text{tf})$$

$$rQbu = \frac{\sum rMu}{L0} \quad (\text{tf})$$

$$rQu1 = b \cdot j (0.5Fs \cdot \alpha + 0.5pw \cdot \sigma wy) \times 10^{-3} \quad (\text{tf})$$

$$Fs = \text{MIN}(0.15Fc, 22.5 + 0.045Fc)$$

$$\alpha = \frac{4}{M/(Q \cdot d) + 1} \quad \text{但し } 1 \leq \alpha \leq 2$$

$$rQu2 = b \cdot j (Fs \frac{b'}{b} + pw \cdot \sigma wy) \times 10^{-3} \quad (\text{tf})$$
 rQu : RC部終局せん断力 (tf) , Fc : コンクリート材料強度 (kgf/cm²)
 pw = atw / b / pit , atw : せん断補強筋断面積 (2-D13 cm²)
 pit : せん断補強筋ピッチ (cm) , b : 梁幅 (cm)
 j : 曲げ材の応力中心間距離 $j = 0.875 \cdot d$ (cm)
 σwy : せん断補強筋の材料強度 (kgf/cm²)
 b' : 鉄骨フランジ位置のコンクリート有効幅 $b' = b - bf$
- S部のせん断耐力

$$sQu = \text{MIN}(sQu1, sQu2) \quad (\text{tf})$$

$$sQu1 = sAw \frac{s \sigma y \times 10^{-3}}{\sqrt{3}} \quad (\text{tf})$$

$$sQu2 = \frac{2sMu}{L0} \quad (\text{tf})$$
 wt : ウェブ厚 (cm) $sAw = wt \cdot sD \cdot 0.85 \quad (\text{cm}^2)$

本論で定義した式

- RC部、S部の曲げ耐力

$$rMu = (1 - rs) \cdot Mu, \quad sMu = rs \cdot Mu$$
 Mu : 必要曲げ耐力 (tfm)
 rMu : RC部必要曲げ耐力 (tfm) , sMu : S部必要曲げ耐力 (tfm)
- RC部必要耐力を上下鉄筋(スラブ筋)で満足させる断面の設定

$$rMu = (1 - rs) \cdot Mj \cdot cfg \quad (\text{tfm})$$

$$at = atu + atb + atsb \cdot 3300 / \sigma y$$

$$D = rMu \cdot 10^5 / (0.9 \cdot at \cdot \sigma y \cdot c2) \quad (\text{cm})$$
 → 5cm単位に切り上げる。例 82 → 85(cm)
- 梁RC部の実際の耐力
 上端 $urMg = 0.9 \cdot (atu \cdot \sigma y + atsb \cdot 3300) \cdot c2 \cdot D \cdot 10^{-5} \quad (\text{tfm})$
 下端 $brMg = 0.9 \cdot atb \cdot \sigma y \cdot c2 \cdot D \cdot 10^{-5} \quad (\text{tfm})$
- 梁S部のフランジ厚を求める。

$$sMu = Mj \cdot cfg \cdot rs \cdot 0.5 \quad (\text{tfm})$$

$$c = sMu \cdot 100000. / bf / s \sigma y$$

$$sD = D - 25 \quad (\text{cm})$$

(次頁に続く)

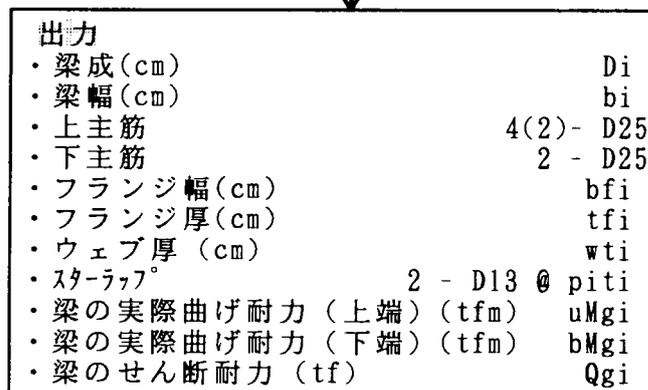
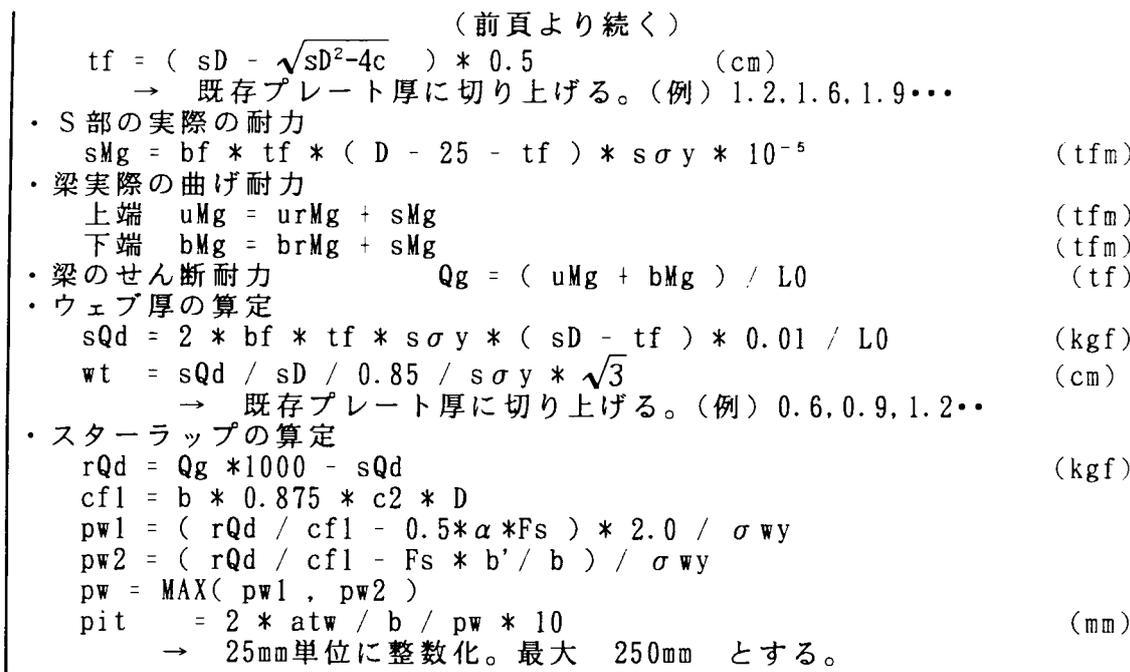
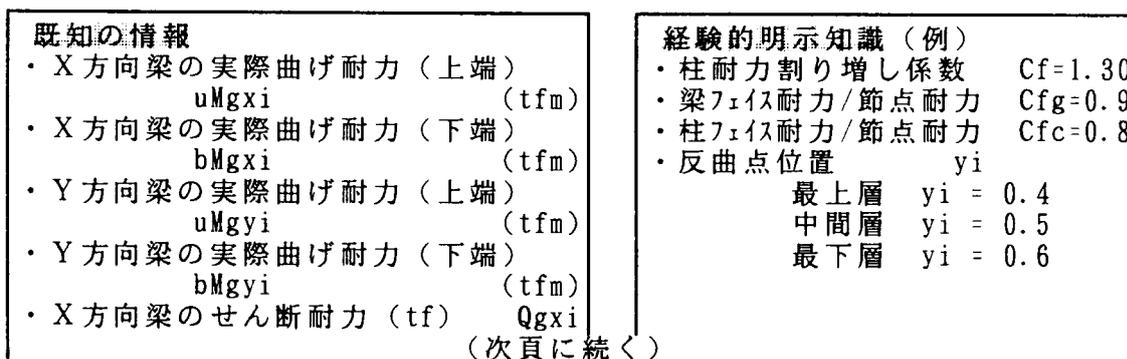


図-6. 12 SRC造梁の断面推定フロー図

⑩ 柱必要耐力の算定

⑨で推定された梁断面に対する曲げ耐力に対して、梁降伏系を保証するために梁曲げ耐力に割増し係数を乗じて、必要な柱耐力の算定を行う。

柱は、中柱と外周柱について検討する。 図-6. 13にフロー図を示す。



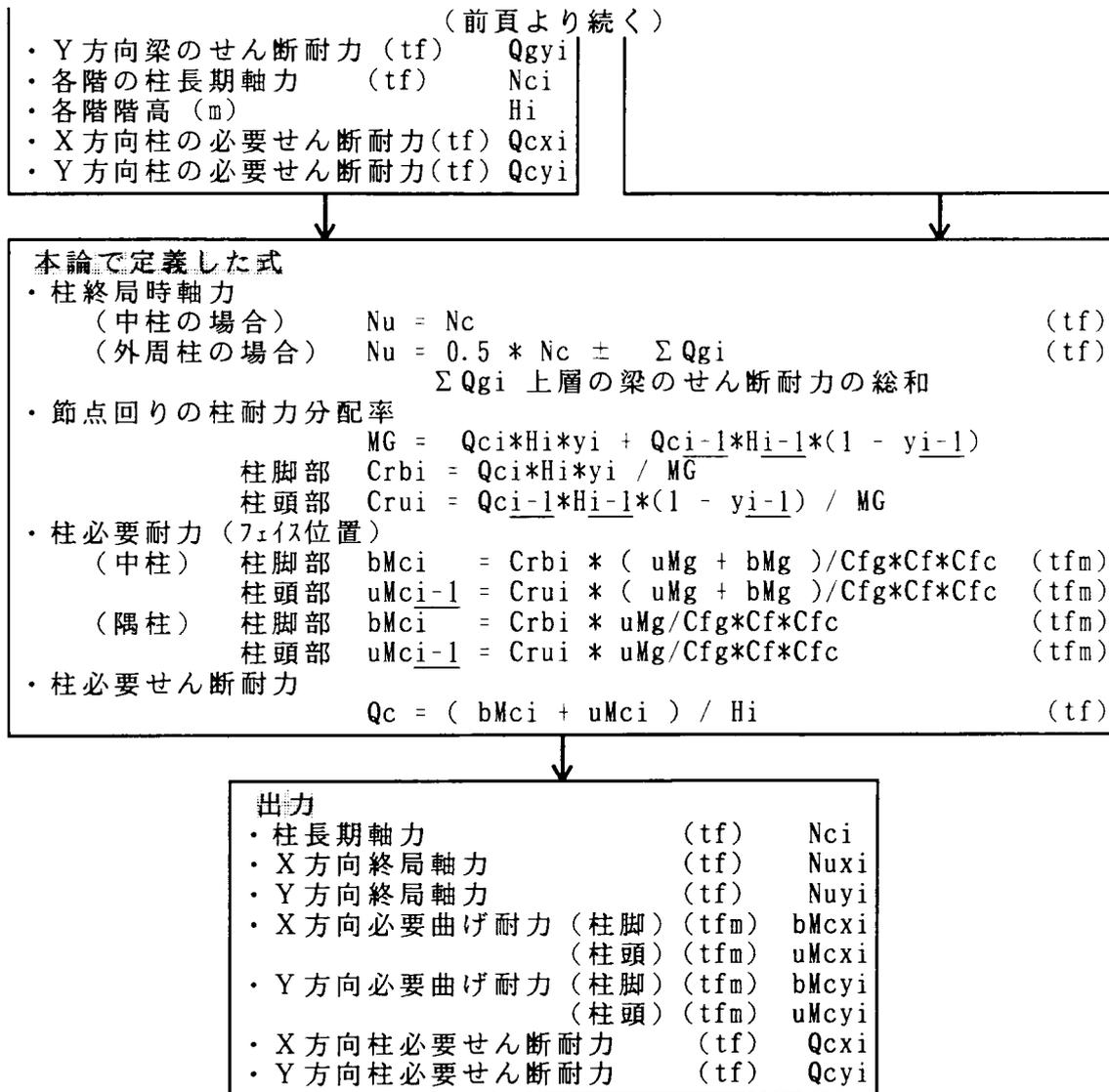


図-6.13 柱必要耐力算定フロー図

⑪ 柱断面の推定

⑩で求めた柱必要耐力に対して目標性能を満足するように柱断面を推定する。
 図-6.14にRC柱、図-6.15にSRC柱の断面推定フロー図を示す。

〈RC柱の場合〉



(前頁より続く)

- ・ X方向必要せん断力(tf) Q_{cxi}
- ・ Y方向必要せん断力(tf) Q_{cyi}
- ・ 各階階高 (m) H_i

- ・ 耐力不足の場合の断面修正法
不足耐力の3/4を鉄筋のみでとれるように断面修正
- ・ 主筋種別 SD345
- ・ フープ種別 SD295
- ・ フープのピッチ $50 \leq pit \leq 100$
- ・ 柱成の制限値 $D \geq 45cm$
- ・ 断面は5cm単位に切り上げる。

一般的知識 (文献1:p.231,p.233)

- ・ 断面寸法、引張り鉄筋断面積、軸力(N)、曲げモーメント(M)との関係

$$N_{max} = (b \cdot D \cdot F_c + 2at \cdot \sigma_y) \times 10^{-3} \quad (tf)$$

$$n1 = 0.4F_c \cdot b \cdot D \times 10^{-3}, \quad at = pt \cdot b \cdot D$$

$N \geq n1$ の場合

$$M = (0.8at \cdot \sigma_y \cdot D + 0.12b \cdot D^2 \cdot F_c) \frac{N_{max} - N}{N_{max} - n1} \times 10^{-5} \quad (tfm)$$

$n1 > N > 0$ の場合

$$M = 0.8at \cdot \sigma_y \cdot D \times 10^{-5} + 0.5N \cdot D \left(1 - 0.4 \frac{N}{n1}\right) \times 10^{-2} \quad (tfm)$$

$N \leq 0$ の場合

$$M = 0.8at \cdot \sigma_y \cdot D \times 10^{-5} + 0.4N \cdot D \times 10^{-2} \quad (tfm)$$

pt:引張り鉄筋比 σ_y :鉄筋引張強度(終局) (kg/cm²)

Fc:コンクリート材料強度 (kg/cm²)

b:柱幅 X方向加力の場合 Dy Y方向加力の場合 Dx (cm)

D:柱成 X方向加力の場合 Dx Y方向加力の場合 Dy (cm)

- ・ フープ断面積とせん断力との関係

$$Q_u = \text{MIN}(Q_{u1}, Q_{u2}) \quad (tf)$$

$$Q_{u1} = bQ_u + 0.1\sigma_o \cdot b \cdot j \times 10^{-3} \quad (tf)$$

$$Q_{u2} = (0.9 + \sigma_o/250)bQ_u \quad (tf)$$

$$bQ_u = \left\{ \frac{0.068pt^{0.23}(Fc+180)}{Mu/(Q \cdot d) + 0.12} + 2.7\sqrt{pw \cdot \sigma_{wy}} \right\} b \cdot j \times 10^{-3} \quad (tf)$$

pw = atw / b / pit

pw:せん断補強筋比, atw:せん断補強筋断面積 (cm²)

d:コンクリート圧縮縁より鉄筋重心までの距離 (cm)

j = 0.875 * d, pit:せん断補強筋ピッチ (cm)

Fc:コンクリート材料強度 (kg/cm²)

σ_{wy} :鉄筋せん断強度(終局) (kg/cm²)

σ_o :平均軸応力度 = N/b/D (kg/cm²)

本論で定義した式

- ・ 軸応力度とせん断応力度による断面形状(仮)の設定

$$D1 = (N_c \cdot 10^3 / \sigma_1)^{0.5}$$

$$D2 = (Q_c \cdot 10^3 / \tau)^{0.5}$$

$$D = \text{MAX}(D1, D2) \rightarrow 5cm \text{単位に切り上げる。} \quad (cm)$$

$$b = D$$

- ・ 目標性能(引張り鉄筋比)に対する仮断面の検討

$$n1 = 0.4 \cdot F_c \cdot b \cdot D \cdot 0.001 \quad (tf)$$

$$m1 = 0.8 \cdot pt \cdot b \cdot D \cdot \sigma_y \cdot D \cdot 0.00001 \quad (tfm)$$

$$\text{if } Nu > n1 \text{ then } mu = (m1 + 0.12 \cdot b \cdot D^2 \cdot F_c \cdot 10^{-5}) \cdot (N_{max} - Nu) / (N_{max} - n1)$$

$$\text{if } n1 \geq Nu > 0 \text{ then } mu = m1 + 0.5 \cdot Nu \cdot D \cdot (1 - Nu/n1 \cdot 0.4) \cdot 0.01$$

$$\text{if } 0 \geq Nu \text{ then } mu = m1 + 0.4 \cdot Nu \cdot D \cdot 0.01$$

$$Mc = \text{MAX}(uMc, bMc)$$

if $mu \geq Mc$ then 仮断面でOK else 仮断面修正

- ・ 仮断面の修正法

$$ms = Mc - mu \quad (tfm), \quad dj = D - 13 \text{ (cm)}$$

$$dD = ms \cdot 3/4 \cdot 100000. / 3 / pt / \sigma_y / D / dj$$

(次頁に続く)

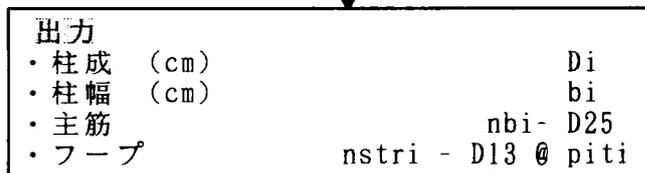
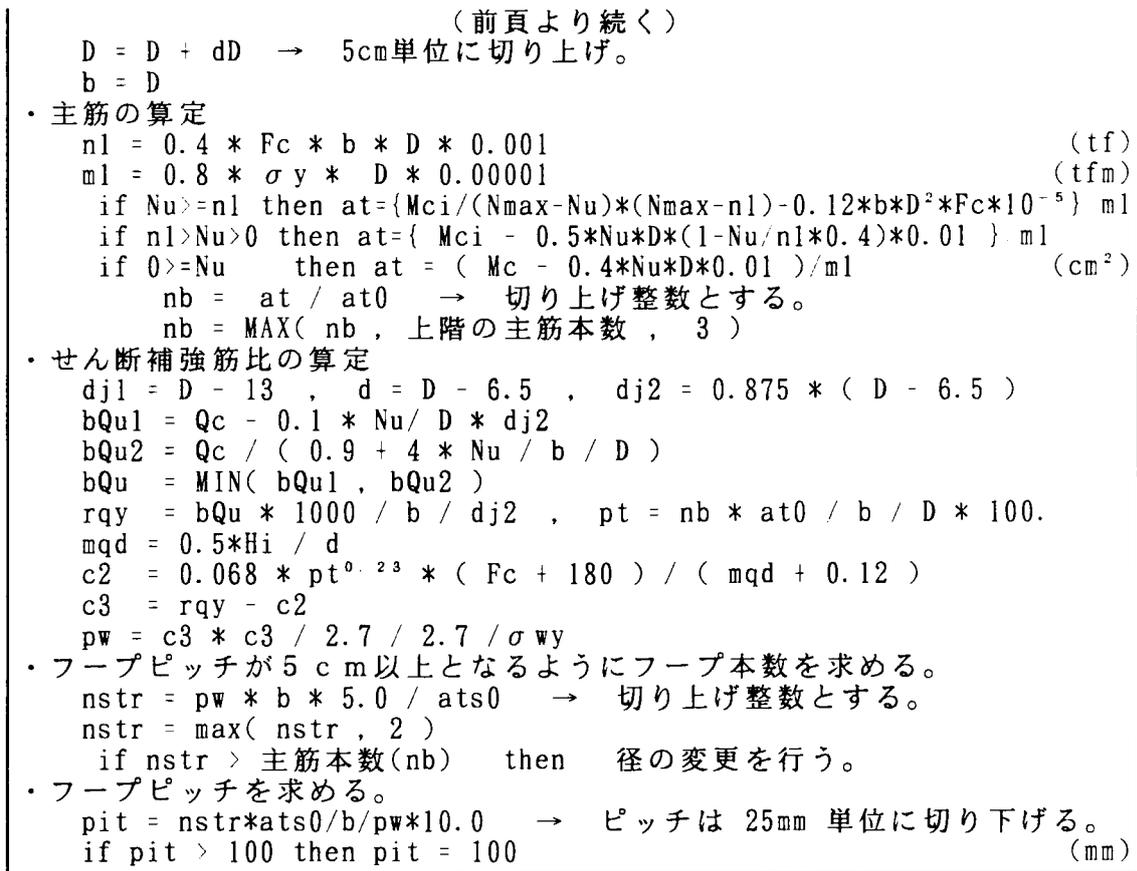
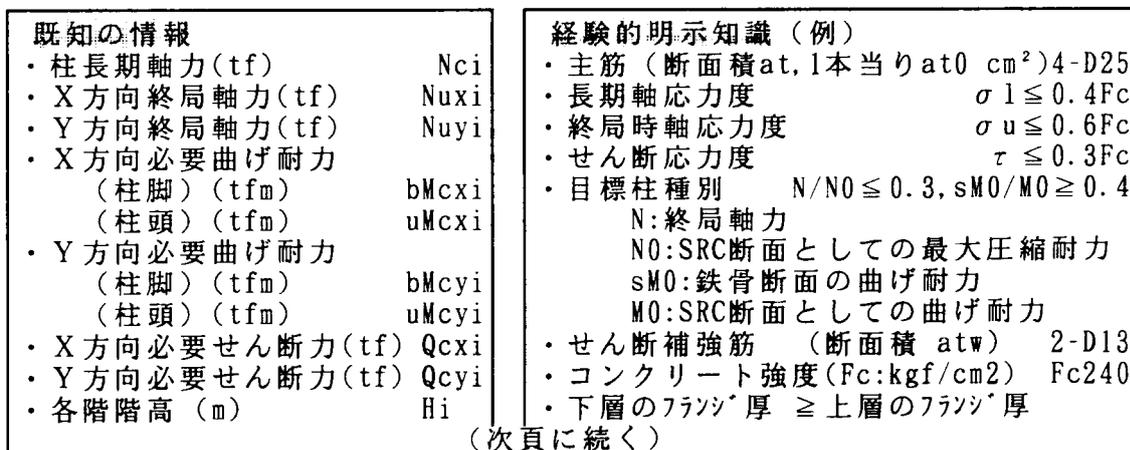


図-6.14 RC造柱の断面推定フロー図

【SRC柱の場合】

終局時軸力に対して、断面寸法を設定し、次に指定された鉄筋本数に対して、RC部の耐力を求め、残りをS部の耐力として、鉄骨断面を推定する。



(前頁より続く)

- ・下層のウェブ厚 \geq 上層のウェブ厚
- ・最小フランジ厚 12mm
- ・最小ウェブ厚 6mm
- ・圧縮フランジの鉄骨比 spc=0.01
- ・フープのピッチ $50 \leq pit \leq 100$
- ・X, Y方向フランジ幅(cm) bf
- ・最上階から数えて15階未満の階 20
- ・最上階から数えて15階以上の階 20
- ・鉄骨のかぶり厚さ(cm) 15
- ・主筋種別 SD345
- ・フープ種別 SD295
- ・鉄骨種別 SM490
- ・柱成の制限値 $D \geq 50$ cm
- ・断面は5cm単位に切り上げる。

一般的知識 (文献 9): p. 39, p. 26)

- ・断面寸法、引張り鉄筋断面積、軸力(N)、曲げモーメント(M)との関係
 $fc' = (0.85 - 2.5spc)Fc$ (kgf/cm²)

$rN \geq fc' \cdot b \cdot D \times 10^{-3}$ の場合
 $rMu = at \cdot \sigma y \cdot dm \times 10^{-5} - 0.5(rN - fc' \cdot b \cdot D \times 10^{-3}) dm \times 10^{-2}$ (tfm)

$fc' \cdot b \cdot D \times 10^{-3} > rN > 0$ の場合
 $rMu = at \cdot \sigma y \cdot dm \times 10^{-5} + 0.5rN \cdot D \cdot (1 - \frac{rN \times 1000}{fc' \cdot b \cdot D}) \times 10^{-2}$ (tfm)

$rN \leq 0$ の場合
 $rMu = at \cdot \sigma y \cdot dm \times 10^{-5} + 0.5rN \cdot dm \times 10^{-2}$ (tfm)

rN: RC部負担軸力(tf), Fc:コンクリート材料強度 (kgf/cm²)

at:引張り鉄筋断面積 σy :鉄筋引張り強度(終局) (kgf/cm²)

b:柱幅 (cm), D:柱成 (cm)

dm:鉄筋重心間距離 $dm = D - 13$ (cm)

- ・フープ断面積とせん断力との関係

$rQu = \text{MIN}\{rQbu, \text{MIN}(rQu1, rQu2)\}$ (tf)

$rQbu = \frac{\sum rMu}{Hi}$ (tf)

$rQu1 = b \cdot j (0.5Fs \cdot \alpha + 0.5pw \cdot \sigma wy) \times 10^{-3}$ (tf)

$Fs = \text{MIN}(0.15Fc, 22.5 + 0.045Fc)$

$\alpha = \frac{4}{M/(Q \cdot d) + 1}$ 但し $1 \leq \alpha \leq 2$

$rQu2 = b \cdot j (Fs \frac{b'}{b} + pw \cdot \sigma wy) \times 10^{-3}$ (tf)

rQu: RC部終局せん断力 (tf)

pw = atw / b / pit

atw:せん断補強筋断面積(cm²), pit:せん断補強筋ピッチ (cm)

j: 曲げ材の応力中心間距離 $j = 0.875 * d$ (cm)

d:コンクリート圧縮縁より鉄筋重心までの距離 $d = D - 6.5$ (cm)

σwy :せん断補強筋の材料強度 (kgf/cm²)

b': 鉄骨フランジ位置のコンクリート有効幅 $b' = b - bf$ (cm)

本論で定義した式

- ・S部の必要耐力とフランジ厚・ウェブ厚との関係

必要曲げ耐力 $sMd = \text{MAX}(0, M - rMu)$ (tfm)

必要せん断耐力 $sQd = Qc * sMd / M$

$tf = sN * 1000 / bf / s \sigma y * 0.5 + sMd * 100000 / (D - 30) / s \sigma y / bf$ (cm)

$sQu = \text{MIN}(sQu1, sQu2)$

$sQu1 = wt * sD * 0.85 * s \sigma y / \sqrt{3} * 0.001$ (tf)

$sQu2 = 2 * sMu / Hi * 100$ (tf)

(次頁に続く)

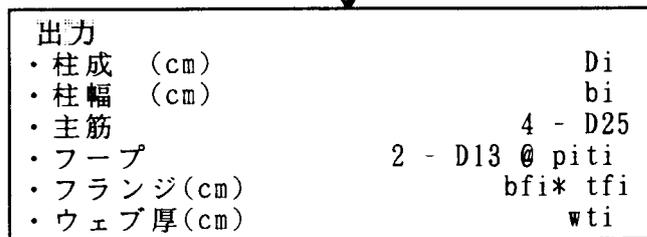
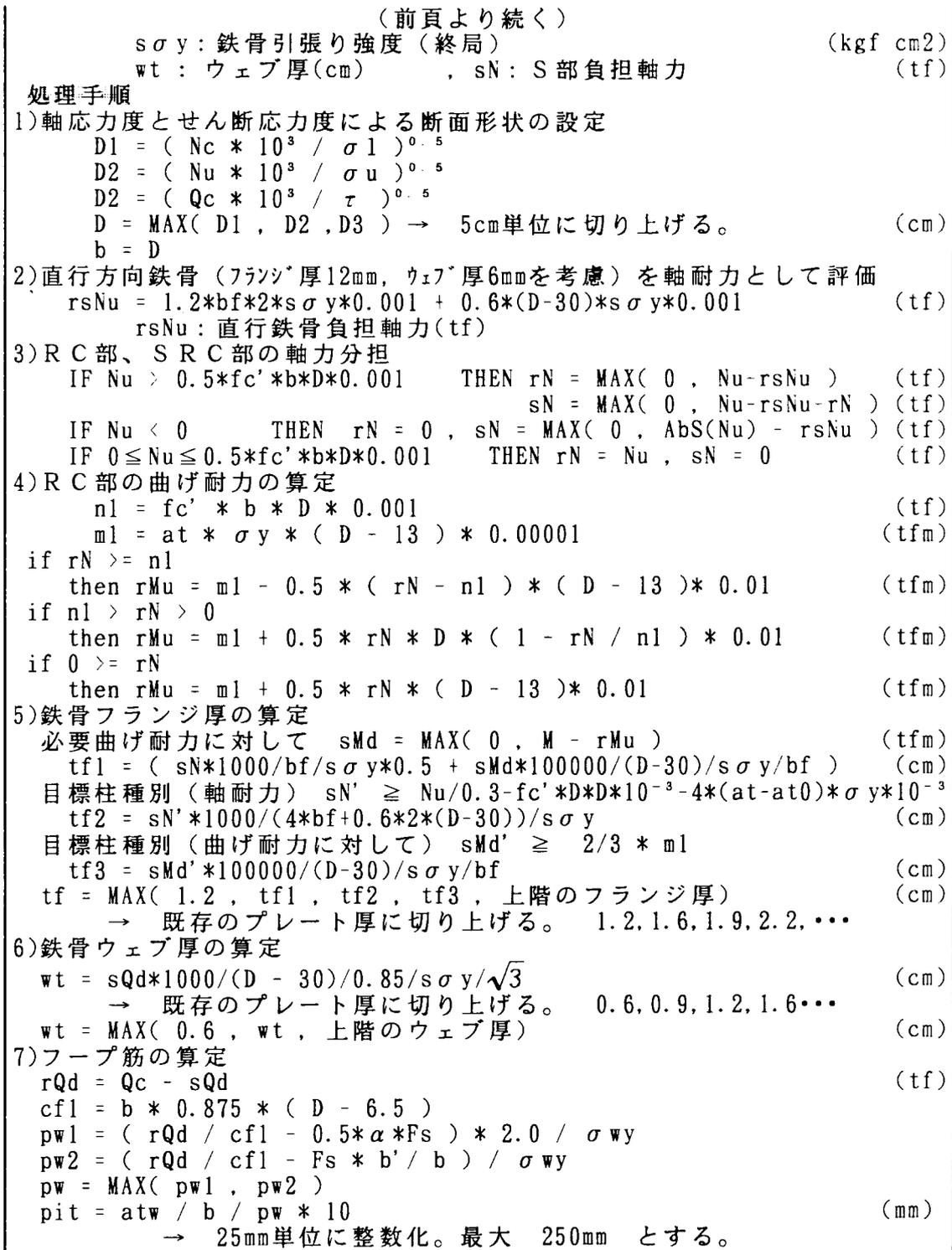
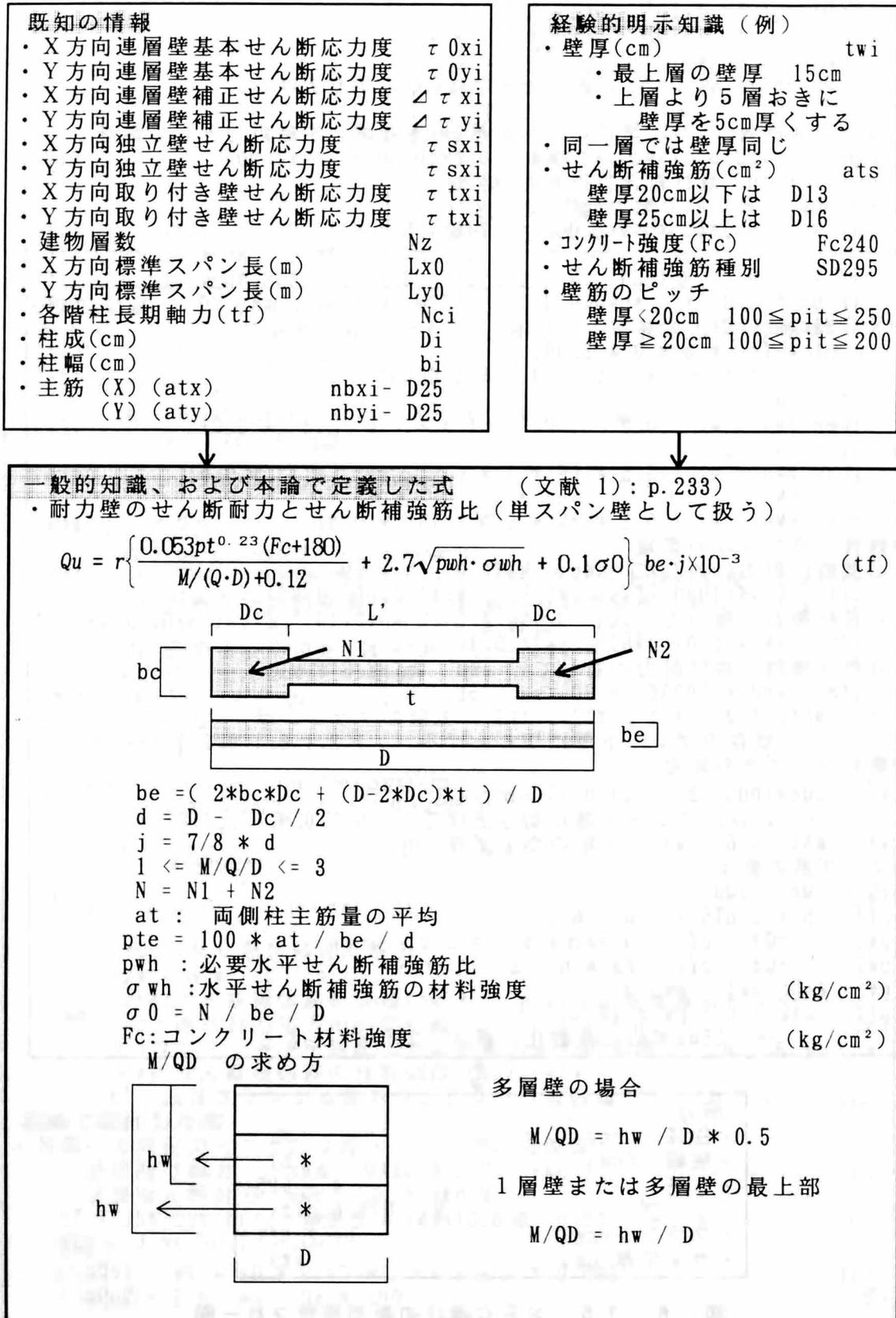
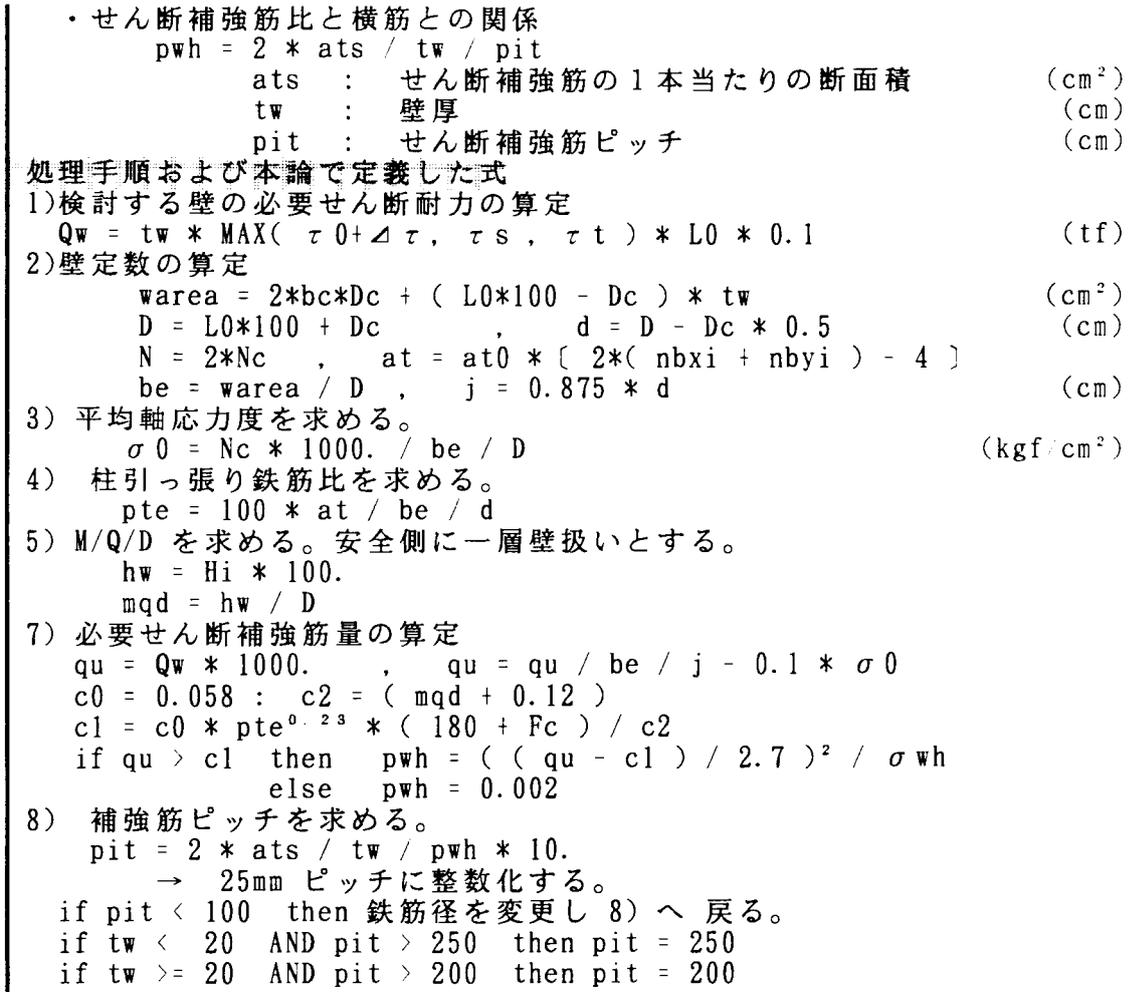


図-6.15 SRC造柱の断面推定フロー図

⑧. 壁の断面推定

壁の必要せん断耐力を満足するような壁断面を推定する。 図-6.16にフロー図を示す。





出力		
・壁厚	twi	(cm)
・横筋	D13 @ piti ダブル	(mm)
・縦筋	D13 @ piti ダブル	(mm)

図-6. 16 耐力壁の断面推定フロー図

⑨. 基礎（場所打ち杭基礎）の推定

基礎設計用長期軸力を満足するような場所打ち杭の杭径と基礎断面を推定する。
 図-6. 17にフロー図を示す。

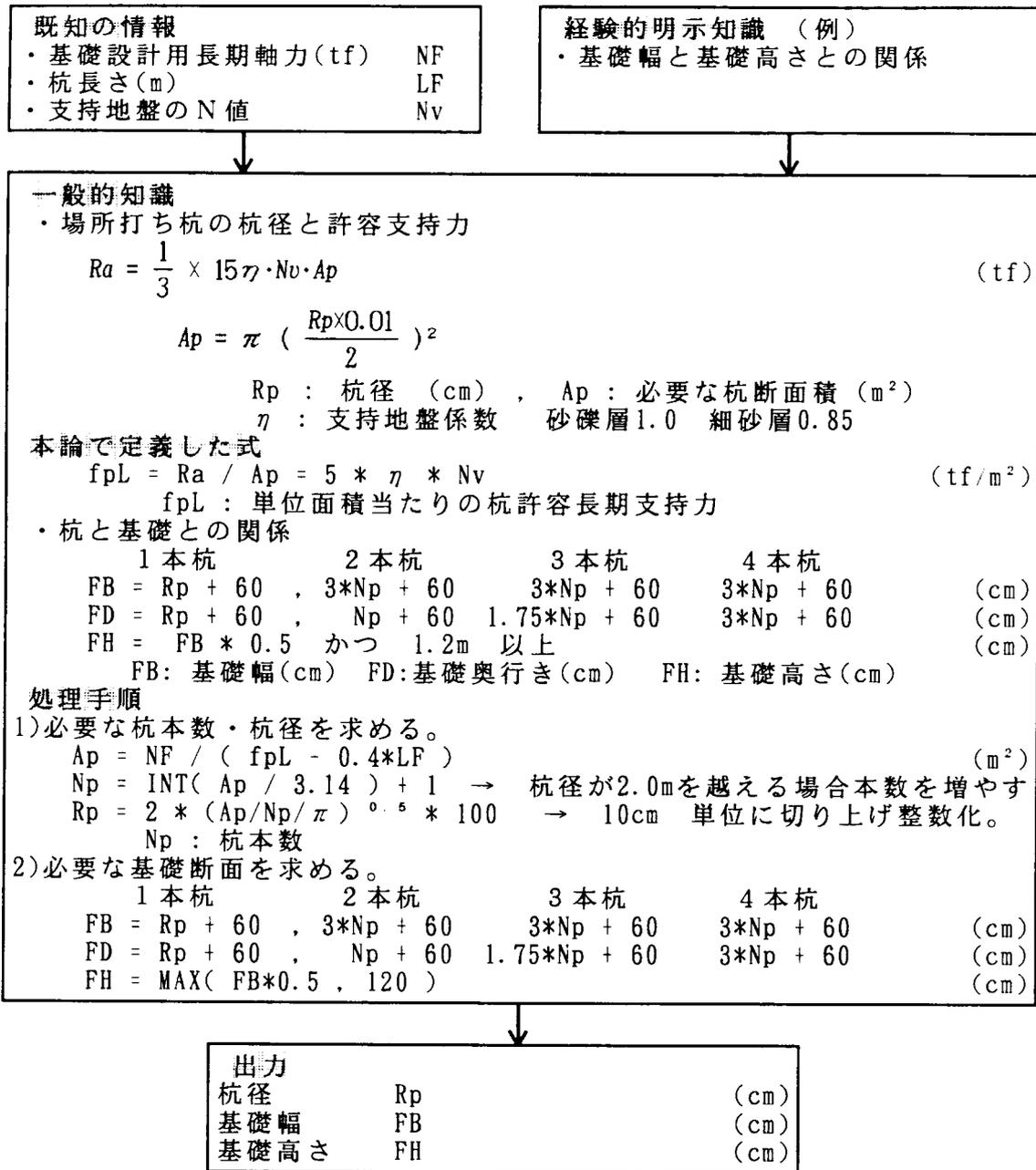


図-6. 17 基礎断面推定フロー図

3. システムの構成

本システムは、マイクロソフト社の表計算ソフト「Multiplan」¹⁰⁾をベースに開発を行った。本システムは、2つのプログラム「入力部」と「出力部」とに分かれている。「入力部」は、1)に示す30項目の建物形状に関するデータを入力する部分と、入力値に基づいて「経験的非明示知識」である平均建物重量・Ds値・耐震壁負担せん断応力度を推定する部分である。「出力部」は、「入力部」で求めた平均建物重量・Ds値・耐震壁負担せん断応力度を用いて、2.項の手順に従って、2)に示す「経験的明示知識」を利用しながら部材断面の推定を行う部分である。

「入力部」「出力部」と2つのプログラムに分割したのは、データをフロッピーに保存する際に1枚のフロッピーに納まらなかったためである。

ハードは、PC9801RA21で作成した。

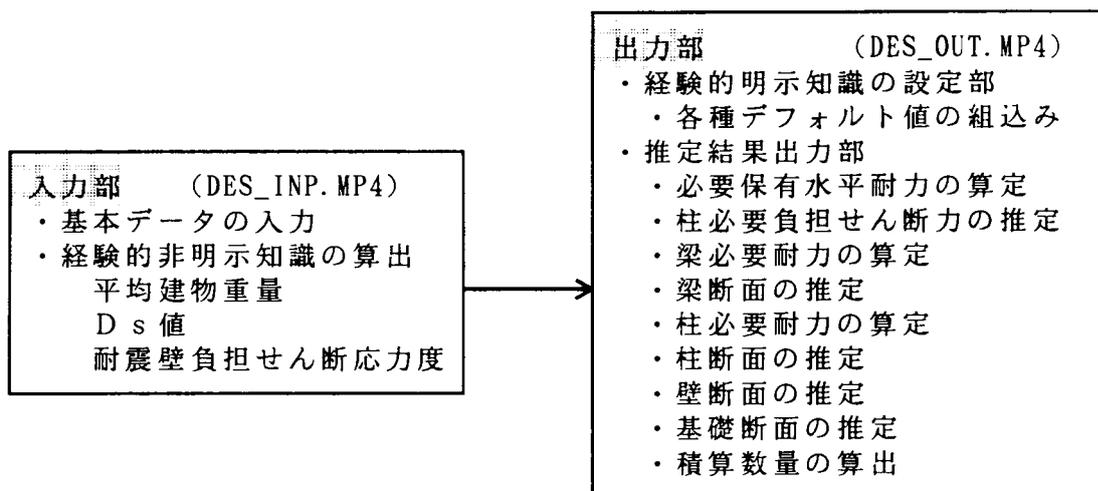


図-6.18 システム構成図

1) 入力項目

本システムで必要な入力項目は、下記の通りである。

1)建物層数	Nz
2)X方向スパン数	Nx
3)Y方向スパン数	Ny
4)X方向建物長さ (m)	Lx
5)Y方向建物長さ (m)	Ly
6)X方向連層壁の長さ (m)	WLx
7)Y方向連層壁の長さ (m)	WLy
8)X方向連層壁に対する境界梁の関係 (外端部か内部か)	Flgx1
9)Y方向連層壁に対する境界梁の関係 (外端部か内部か)	Flgy1
10)X方向連層壁の存在位置 (外フレームか内フレームか)	Flgx2
11)Y方向連層壁の存在位置 (外フレームか内フレームか)	Flgy2
12)地盤条件 (杭支持深さ、N値)	LF, Nv
13)各階構造種別	sti
14)各階階高 (m)	Hi
15)各階建物用途と仕上げ荷重	LDi
16)各階床面積 (m ²)	Ari
17)各階柱本数	KCi
18)各階X方向梁本数	Ngxi
19)各階Y方向梁本数	Ngyi
20)各階X方向連層壁枚数	Nwmxi
21)各階Y方向連層壁枚数	Nwmyi
22)各階X方向独立壁枚数	Nwsxi
23)各階Y方向独立壁枚数	Nwsyi
24)各階X方向耐力壁付帯柱以外の柱本数	Kcxi
25)各階Y方向耐力壁付帯柱以外の柱本数	Kcyi
26)各階建物外周長さ (m)	Li
27)各階X方向取り付き壁枚数	Nwtxi
28)各階Y方向取り付き壁枚数	Nwtyi
29)地上部層数	Nzu
30)地盤面からの建物高さ (m)	h

※添字 i は、階位置を示す。 i = 1 ~ Nz

12)の地盤条件を除き、必要な入力情報は、すべて意匠計画図より誰でも読みとる事が出来る簡単なものである。ニューラルネットワークを用いてベテラン設計者が持っている「経験的非明示知識」をシステム化する事により、経験の少ない設計者でも、部材断面の推定を行う事が可能となった。

2) 「経験的明示知識」

また、「経験的明示知識」を整理すると下記の通りである。

- 1) D_s が最大となる層の求め方
- 2) 柱軸力の求め方
- 3) 地盤種別の評価法
- 4) 壁厚（各階）
- 5) 壁種別の求め方
- 6) 柱必要せん断耐力の求め方
- 7) 柱反曲点位置係数（各階）
- 8) 梁幅／梁成の比（RC造の場合：各階）
- 9) 鉄筋有効成／梁成
- 10) 梁フェイス耐力／梁節点耐力
- 11) 梁目標引張り鉄筋比（RC造の場合：各階）
- 12) 梁目標せん断応力度（RC・SRC造の場合：各階）
- 13) 梁鉄骨目標曲げ分担率（SRC造の場合）
- 14) コンクリート種別・強度（各階）
- 15) 梁主筋種別・強度
- 16) 梁主筋径・断面積（RC造の場合：各階）
- 17) 梁下主筋本数／上主筋本数（RC造の場合：各階）
- 18) 梁最小主筋本数（RC造の場合）
- 19) 梁上主筋本数（SRC造の場合：各階）
- 20) 梁下主筋本数（SRC造の場合：各階）
- 21) 梁せん断補強筋径・断面積
- 22) せん断補強筋種別・強度
- 23) せん断補強筋ピッチの範囲
- 24) 梁鉄骨種別・強度
- 25) 梁鉄骨かぶり厚
- 26) 梁フランジ幅（SRC造の場合：各階）
- 27) 梁最小フランジ厚、ウェブ厚（SRC造の場合）
- 28) スラブ筋断面積及び耐力割増し率
- 29) 梁断面のまとめ方・梁成の制限値
- 30) 柱耐力割増し率（各階）
- 31) 柱フェイス耐力／節点耐力
- 32) 柱目標引張り鉄筋比（RC造の場合：各階）
- 33) 柱目標軸応力度（各階）
- 34) 柱目標せん断応力度（各階）
- 35) 柱主筋種別・強度
- 36) 柱主筋径・断面積
- 37) 柱せん断補強筋種別・強度
- 38) 柱せん断補強筋径・断面積
- 39) 柱最小主筋本数
- 40) 柱せん断補強筋ピッチの範囲

- 41)柱主筋本数（SRC造の場合：各階）
- 42)柱フランジ幅（SRC造の場合：各階）
- 43)柱フランジ厚・ウェブ厚の最小値（SRC造の場合）
- 44)柱圧縮フランジの鉄骨比（SRC造の場合）
- 45)柱鉄骨かぶり厚（SRC造の場合）
- 46)柱鉄骨種別・強度（SRC造の場合）
- 47)柱断面のまとめ方・柱成の制限値
- 48)壁補強筋種別・強度
- 49)壁補強筋径・断面積（各階）
- 50)壁補強筋ピッチの範囲
- 51)基礎幅と基礎高さとの関係

「経験的明示知識」については、著者の経験に基づいて、デフォルト値が設定されている。従って、特に入力する必要はないが、それぞれの設計者の経験や思想によって、デフォルト値を修正すれば、より個人の指向に合わせた細やかな断面推定を行う事が出来る。

3) 出力結果

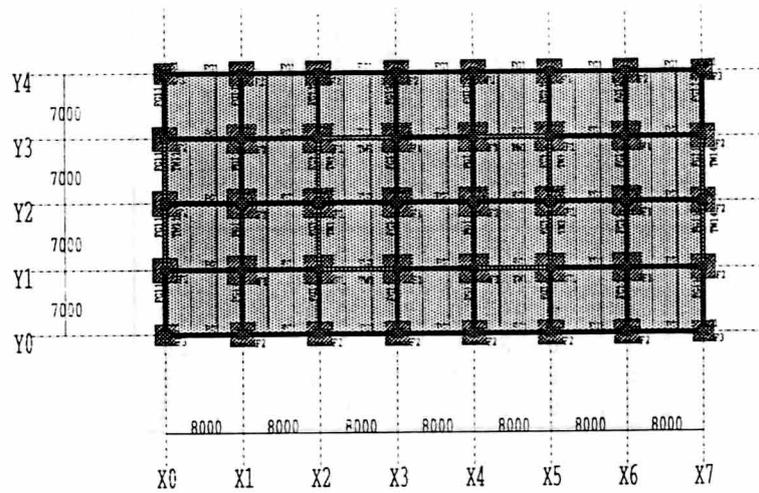
本システムは、下記の出力を行う事が出来る。

- 1)必要保有水平耐力
- 2)梁必要耐力
- 3)梁断面詳細
- 4)柱必要耐力
- 5)柱断面詳細
- 6)壁断面詳細
- 7)基礎断面詳細
- 8)積算数量

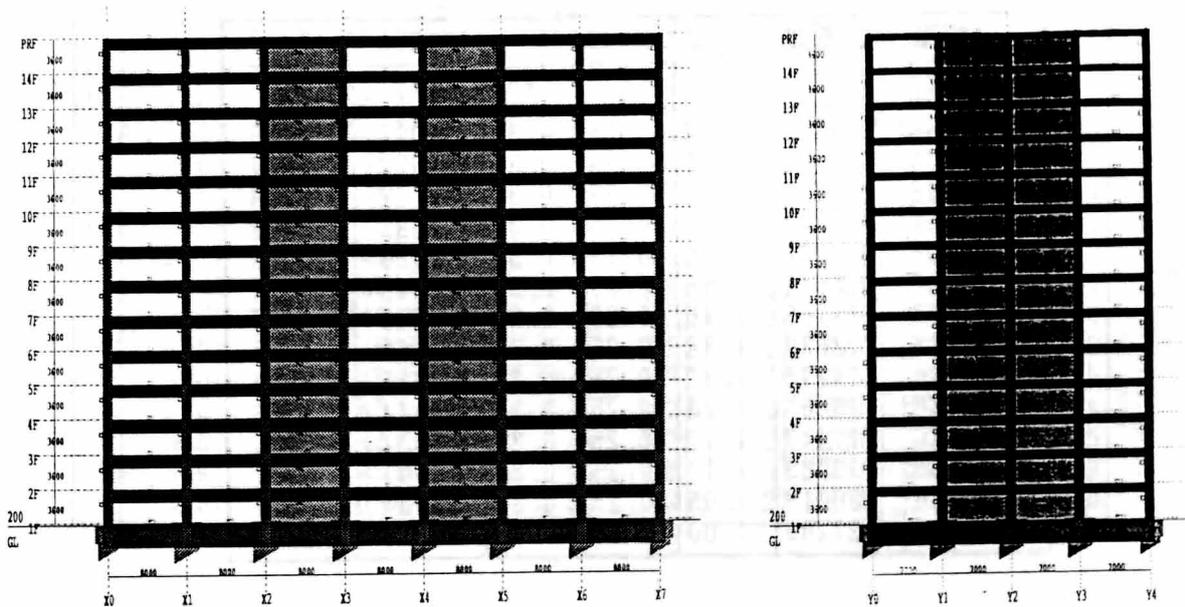
第3節 設計例1：SRC造14層事務所ビルによる検証

本節では、SRC造の建物モデルを作成し、本論で提案しているシステム（略解析）で、部材断面の推定を行い、推定された断面で再度保有水平耐力の算定（精解析）を行い、推定された断面が目標の性能を満足しているかどうかを検証することによって、本システムの妥当性を検証する。

1. 検証モデル（14層、X方向7スパン、Y方向4スパン、事務所ビル）



1階伏図



X方向軸組図（壁は、Y1, Y3通りののみ） Y方向軸組図（壁は、X2, X5通りののみ）

図-6.19 モデル図

2. 推定結果

本システムにより推定された結果を以下に示す。

- a) 平均建物重量 1.01 tf/m²
- b) D s 値 (X) 0.25 (Y) 0.30
- c) 壁性状

表 - 6. 1 壁性状推定結果一覧

	壁分担率		壁基本応力度	
	(X)	(Y)	(X)	(Y)
14	-0.28	-0.28	-0.39	-0.53
13	0.04	0.06	0.09	0.17
12	0.13	0.14	0.37	0.56
11	0.14	0.16	0.50	0.77
10	0.14	0.17	0.56	0.94
9	0.17	0.25	0.58	1.14
8	0.16	0.27	0.58	1.38
7	0.15	0.29	0.60	1.62
6	0.16	0.32	0.67	1.84
5	0.18	0.33	0.80	2.03
4	0.25	0.42	0.95	2.17
3	0.28	0.43	1.07	2.26
2	0.27	0.40	1.07	2.19
1	0.18	0.27	0.72	1.52

d) 必要保有水平耐力の推定

表 - 6. 2 必要保有水平耐力の推定結果一覧

層	重量 (tf)	Σ重量 (tf)	Ai	Ds		Qun (tf)	
				(X)	(Y)	(X)	(Y)
14	1586	1586	2.84	0.25	0.30	1022	1226
13	1586	3172	2.25	0.25	0.30	1622	1947
12	1586	4758	1.97	0.25	0.30	2132	2558
11	1586	6344	1.79	0.25	0.30	2582	3099
10	1586	7930	1.66	0.25	0.30	2986	3583
9	1586	9517	1.55	0.25	0.30	3348	4017
8	1586	11103	1.46	0.25	0.30	3673	4407
7	1586	12689	1.38	0.25	0.30	3963	4755
6	1586	14275	1.30	0.25	0.30	4219	5063
5	1586	15861	1.23	0.25	0.30	4444	5333
4	1586	17447	1.17	0.25	0.30	4637	5565
3	1586	19033	1.11	0.25	0.30	4801	5761
2	1586	20619	1.05	0.25	0.30	4934	5921
1	1586	22205	1.00	0.25	0.30	5038	6046

e) 必要柱せん断耐力・長期軸力・壁総せん断耐力の推定

表-6.3 必要柱せん断耐力・長期軸力・壁総せん断耐力の推定結果一覧

層	壁分担率		柱せん断力(tf)		長期軸力(tf)	壁せん断力(tf)	
	(X)	(Y)	(X)	(Y)		(X)	(Y)
14	-0.28	-0.28	41	46	57	-288	-348
13	0.04	0.06	49	54	113	68	114
12	0.13	0.14	58	65	170	274	363
11	0.14	0.16	69	76	227	374	501
10	0.14	0.17	80	87	283	416	612
9	0.17	0.25	87	89	340	570	990
8	0.16	0.27	97	95	397	572	1193
7	0.15	0.29	105	99	453	592	1403
6	0.16	0.32	111	102	510	664	1595
5	0.18	0.33	114	105	566	792	1758
4	0.25	0.42	108	94	623	1177	2358
3	0.28	0.43	109	97	680	1323	2452
2	0.27	0.40	113	104	736	1332	2378
1	0.18	0.27	130	129	793	892	1650

f) 梁必要耐力と断面の推定

表-6.4 梁必要耐力と断面の推定結果一覧 (X方向)

層	必要耐力		断面		主筋本数		スターループ°		鉄骨厚	
	Mj (tfm)	Qg (tf)	幅 (cm)	成 (cm)	上 (D25)	下 (D25)	本数 (D13)	ピッチ (mm)	フランジ (mm)	ウェブ (mm)
R	88	10	45	70	2	2	2	250	200*12	6
14	146	16	45	70	2	2	2	250	200*12	6
13	192	22	45	75	2	2	2	250	200*16	6
12	229	26	45	75	2	2	2	250	200*19	6
11	269	30	45	75	2	2	2	250	200*25	9
10	301	34	45	80	2	2	2	250	200*25	9
9	331	37	45	90	2	2	2	250	200*25	9
8	364	41	45	90	4	2	2	250	200*25	9
7	390	44	45	90	4	2	2	250	200*28	9
6	405	46	45	90	4	2	2	250	200*28	9
5	400	45	45	90	4	2	2	250	200*28	9
4	390	44	45	90	4	2	2	250	200*28	9
3	398	45	45	90	4	2	2	250	200*28	9
2	389	44	45	90	4	2	2	250	200*28	9
1	280	31	75	250	3	3	2	175	0	0

表-6.5 梁必要耐力と断面の推定結果一覧 (Y方向)

層	必要耐力		断面		主筋本数		スタ-ラ-フ°		鉄骨厚	
	Mj (tfm)	Qg (tf)	幅 (cm)	成 (cm)	上 (D25)	下 (D25)	本数 (D13)	ヒ-ツチ (mm)	フランジ	ウェブ
R	100	13	45	70	2	2	2	250	200*12	6
14	164	21	45	70	2	2	2	250	200*16	6
13	213	27	45	75	2	2	2	250	200*19	6
12	254	33	45	75	2	2	2	250	200*25	9
11	295	38	45	80	2	2	2	250	200*25	9
10	318	41	45	85	2	2	2	250	200*25	9
9	330	42	45	90	2	2	2	250	200*25	9
8	348	45	45	90	4	2	2	250	200*25	9
7	361	46	45	90	4	2	2	250	200*25	9
6	373	48	45	90	4	2	2	250	200*25	9
5	359	46	45	90	4	2	2	250	200*25	9
4	345	44	45	90	4	2	2	250	200*25	9
3	363	47	45	90	4	2	2	250	200*25	9
2	374	48	45	90	4	2	2	250	200*25	9
1	279	36	75	250	3	3	2	175	0	0

g) 柱必要耐力と断面の推定

表-6.6 中柱の必要耐力推定結果一覧

層	長期 軸力 (tf)	X方向			Y方向		
		曲げ (tfm)		せん 断力 (tf)	曲げ (tfm)		せん 断力 (tf)
		柱頭	柱脚		柱頭	柱脚	
14	57	71	70	49	80	82	56
13	113	92	95	65	96	105	70
12	170	113	114	79	126	129	89
11	227	136	137	95	153	153	106
10	283	159	160	111	175	173	121
9	340	173	172	120	177	177	123
8	397	192	190	133	188	185	130
7	453	206	207	144	193	195	135
6	510	219	219	152	201	201	140
5	566	225	225	156	207	206	143
4	623	213	212	148	185	186	129
3	680	214	215	149	192	191	133
2	736	223	198	146	205	182	134
1	793	228	224	157	226	223	156

表-6.7 中柱の断面推定結果一覧

層	断面 (cm)	主筋本数		フープ			フランジ厚		ウェブ厚	
		X (D25)	Y (D25)	X (D13)	Y (D13)	ピッチ (mm)	X (mm)	Y (mm)	X (mm)	Y (mm)
14	65	4	4	2	2	100	200*12	200*12	6	6
13	65	4	4	2	2	100	200*12	200*12	6	6
12	70	4	4	2	2	100	200*12	200*16	6	6
11	70	4	4	2	2	100	200*12	200*16	6	6
10	70	4	4	2	2	100	200*16	200*19	6	6
9	75	4	4	2	2	100	200*16	200*19	6	6
8	75	4	4	2	2	100	200*16	200*19	6	6
7	75	4	4	2	2	100	200*19	200*19	6	6
6	80	4	4	2	2	100	200*19	200*19	6	6
5	80	4	4	2	2	100	200*19	200*19	6	6
4	80	4	4	2	2	100	200*19	200*19	6	6
3	85	4	4	2	2	100	200*19	200*19	6	6
2	85	4	4	2	2	100	200*19	200*19	6	6
1	85	4	4	2	2	100	200*25	200*25	9	9

表-6.8 外周柱の必要耐力推定結果一覧

層	長期 軸力 (tf)	X方向					Y方向				
		終局軸力 tf		曲げ (tfm)		せん断力 (tf)	終局軸力 tf		曲げ (tfm)		せん断力 (tf)
		→	←	柱頭	柱脚		→	←	柱頭	柱脚	
14	14	9	48	35	35	24	9	48	40	41	28
13	28	18	95	46	47	32	17	96	48	53	35
12	42	23	147	57	57	40	19	151	63	65	44
11	57	23	204	68	68	47	16	211	76	76	53
10	71	17	266	79	80	55	7	277	87	87	60
9	85	8	332	86	86	60	-5	345	88	88	61
8	99	-5	402	96	95	66	-18	414	94	93	65
7	113	-22	475	103	104	72	-33	486	97	97	67
6	127	-42	552	109	109	76	-49	559	101	100	70
5	142	-64	631	112	112	78	-67	634	104	103	72
4	156	-86	709	107	106	74	-83	707	92	93	64
3	170	-106	785	107	108	74	-98	778	96	96	67
2	184	-127	863	111	99	73	-115	851	102	91	67
1	198	-147	940	114	112	78	-133	926	113	112	78

表-6.9 外周柱の断面推定結果一覧

層	断面 (cm)	主筋本数		フープ			フランジ厚		ウェブ厚	
		X (D25)	Y (D25)	X (D13)	Y (D13)	ピッチ (mm)	X (mm)	Y (mm)	X (mm)	Y (mm)
14	65	4	4	2	2	100	200*12	200*12	6	6
13	65	4	4	2	2	100	200*12	200*12	6	6
12	70	4	4	2	2	100	200*12	200*12	6	6
11	70	4	4	2	2	100	200*12	200*12	6	6
10	70	4	4	2	2	100	200*16	200*16	6	6
9	75	4	4	2	2	100	200*16	200*16	6	6
8	75	4	4	2	2	100	200*16	200*16	6	6
7	75	4	4	2	2	100	200*19	200*16	6	6
6	80	4	4	2	2	100	200*19	200*16	6	6
5	80	4	4	2	2	100	200*19	200*16	6	6
4	80	4	4	2	2	100	200*22	200*22	9	9
3	85	4	4	2	2	100	200*25	200*22	9	9
2	85	4	4	2	2	100	200*30	200*28	9	9
1	85	4	4	2	2	100	200*35	200*35	12	12

h) 壁の必要耐力と断面の推定

表-6.10 壁必要断面・鉄筋の推定結果一覧

層	X方向				Y方向			
	Qw (tf)	壁厚 (cm)	補強筋	ピッチ (mm)	Qw (tf)	壁厚 (cm)	補強筋	ピッチ (mm)
14	-72	15	2-D13	250	-87	15	2-D13	250
13	17	15	2-D13	250	28	15	2-D13	250
12	69	15	2-D13	250	91	15	2-D13	250
11	93	15	2-D13	250	125	15	2-D13	250
10	104	15	2-D13	250	153	15	2-D13	250
9	143	20	2-D13	200	247	20	2-D13	200
8	143	20	2-D13	200	298	20	2-D13	200
7	148	20	2-D13	200	351	20	2-D13	200
6	166	20	2-D13	200	399	20	2-D13	200
5	198	20	2-D13	200	440	20	2-D13	200
4	294	25	2-D16	200	590	25	2-D16	125
3	331	25	2-D16	200	613	25	2-D16	125
2	333	25	2-D16	200	595	25	2-D16	125
1	223	25	2-D16	200	412	25	2-D16	125

i) 基礎断面の推定

表-6.11 杭・基礎断面の推定結果一覧

位置	反力 (tf)	杭耐力 (tf/m ²)	杭 本数	杭径 (cm)	基礎幅 B (cm)	基礎幅 D (cm)	基礎高 (cm)	杭主筋
中通り	850	220	2	160	540	220	270	21 -D22
外周	425	220	1	160	220	220	120	21 -D22
隅	212	220	1	120	180	180	120	12 -D22

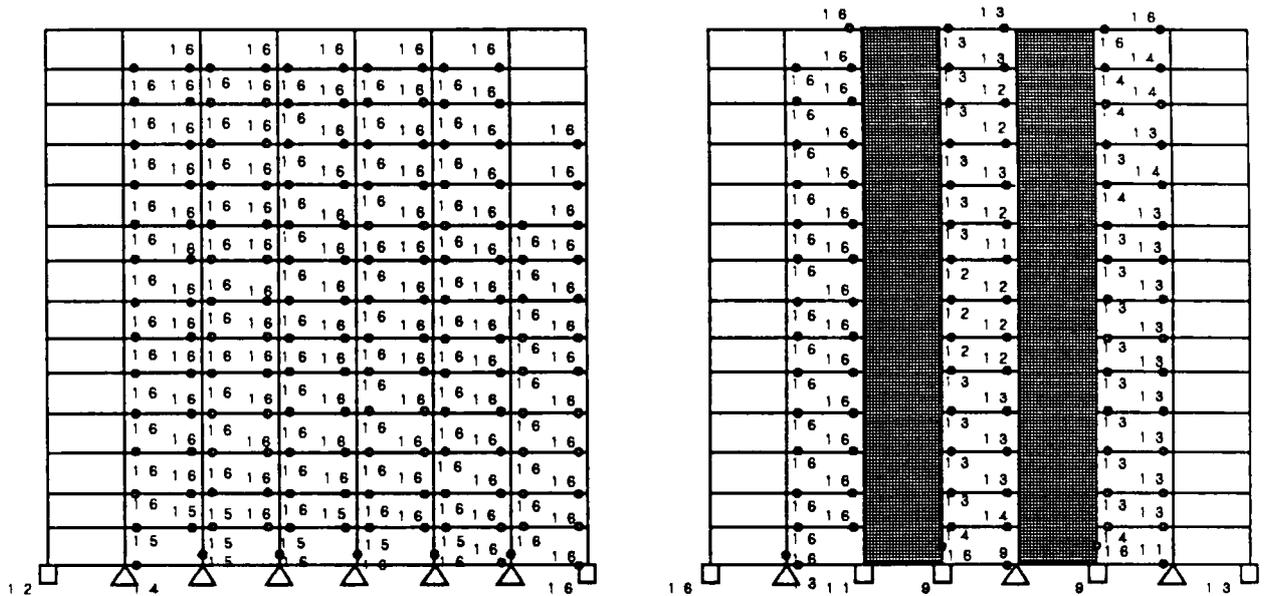
3. 推定結果に基づく断面に対する保有水平耐力

保有水平耐力は、(株)フジタの一貫構造設計プログラム「BUILSYS-V3」¹¹⁾を使用した。「BUILSYS-V3」の結果を以下に示す。

a) ヒンジ発生ステップ図

図中の数字は、荷重増分ステップを示し 15 が $D_s 0.3$ に相当する。

(X方向)



(Y方向)

凡例

- ヒンジ発生位置
- 基礎降伏位置

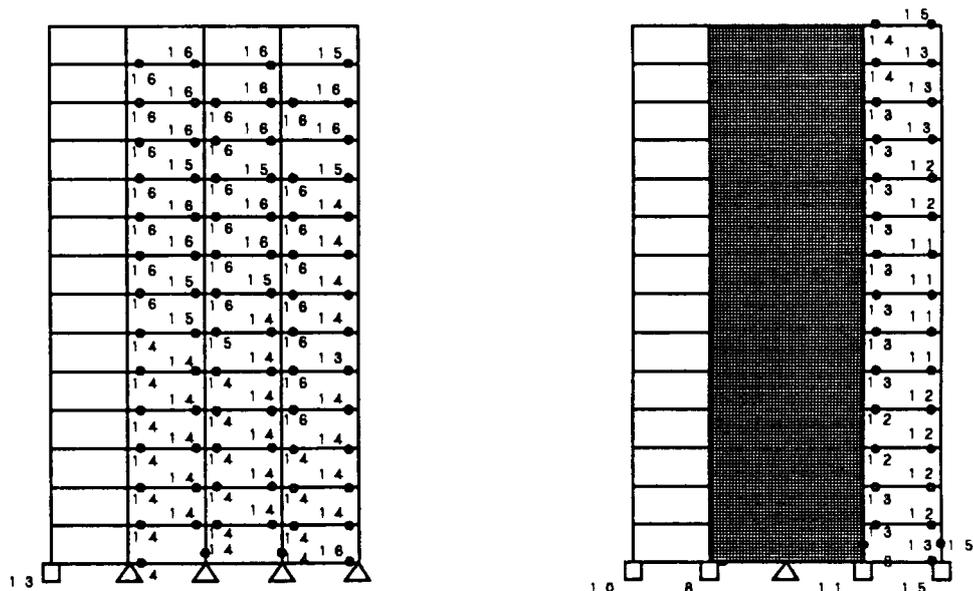


図-6. 20 ヒンジ発生ステップ図

b) 保有水平耐力の結果

表-6. 12 保有水平耐力算定結果一覧

層	重量 (tf)	Σ重量 (tf)	Ai	Ds(X)	Ds(Y)	Qun(X) (tf)	Qu(X) (tf)	Qun(Y) (tf)	Qu(Y) (tf)	判定	
										X	Y
14	1374	1374	2.99	0.30	0.30	1118	1236	1118	1129	OK	OK
13	1479	2853	2.34	0.30	0.30	1815	2008	1815	1833	OK	OK
12	1513	4367	2.04	0.30	0.30	2418	2677	2418	2443	OK	OK
11	1525	5892	1.85	0.30	0.30	2955	3272	2955	2985	OK	OK
10	1536	7429	1.70	0.30	0.30	3440	3809	3440	3475	OK	OK
9	1581	9009	1.59	0.30	0.30	3889	4307	3889	3929	OK	OK
8	1641	10650	1.49	0.30	0.30	4307	4770	4307	4352	OK	OK
7	1640	12290	1.40	0.30	0.30	4680	5183	4680	4728	OK	OK
6	1651	13941	1.32	0.30	0.30	5012	5551	5012	5063	OK	OK
5	1664	15605	1.25	0.30	0.30	5305	5260	5305	5359	OK	OK
4	1673	17278	1.18	0.30	0.30	5557	6155	5557	5614	OK	OK
3	1693	18971	1.12	0.30	0.30	5772	6393	5772	5831	OK	OK
2	1708	20679	1.06	0.30	0.30	5948	6588	5948	6008	OK	OK
1	1708	22386	1.00	0.30	0.30	6083	6737	6083	6144	OK	OK

4. 推定値と実際値との比較・考察

a) 建物重量について

表-6. 13 建物重量の比較

層	各階重量			Σ重量		
	推定値 (tf)	実際値 (tf)	推定/実際	推定値 (tf)	実際値 (tf)	推定/実際
14	1586	1374	1.15	1586	1374	1.15
13	1586	1479	1.07	3172	2853	1.11
12	1586	1513	1.05	4758	4367	1.09
11	1586	1525	1.04	6344	5892	1.08
10	1586	1536	1.03	7930	7429	1.07
9	1586	1581	1.00	9517	9009	1.06
8	1586	1641	0.97	11103	10650	1.04
7	1586	1640	0.97	12689	12290	1.03
6	1586	1651	0.96	14275	13941	1.02
5	1586	1664	0.95	15861	15605	1.02
4	1586	1673	0.95	17447	17278	1.01
3	1586	1693	0.94	19033	18971	1.00
2	1586	1708	0.93	20619	20679	1.00
1	1586	1708	0.93	22205	22386	0.99

本論では、平均建物重量として荷重を評価しているために、上階においては、多少過大評価（推定比 1.15）し、下層部では、過小評価（推定比 0.93）しているが、全体としてみれば、非常によい精度（推定比 0.99）で推定している。

b) 壁せん断応力度係数について

表-6.14 せん断応力度係数の比較

層	X方向			Y方向		
	推定値	実際値	推定/実際	推定値	実際値	推定/実際
14	-0.39	-0.25	1.56	-0.53	-0.13	4.07
13	0.09	1.04	0.09	0.17	1.08	0.16
12	0.37	1.30	0.28	0.56	1.06	0.53
11	0.50	1.71	0.29	0.77	1.29	0.60
10	0.56	2.06	0.27	0.94	1.63	0.58
9	0.58	1.71	0.34	1.14	1.40	0.81
8	0.58	1.70	0.34	1.38	1.58	0.87
7	0.60	2.07	0.29	1.62	1.93	0.84
6	0.67	2.20	0.30	1.84	2.18	0.84
5	0.80	2.38	0.34	2.03	2.46	0.83
4	0.95	2.20	0.43	2.17	2.26	0.96
3	1.07	2.28	0.47	2.26	2.37	0.95
2	1.07	2.56	0.42	2.19	2.62	0.84
1	0.72	1.70	0.42	1.52	1.47	1.03

Y方向壁については、上層を除いて、推定比 0.8 以上と、ほぼ十分な精度で推定できている。しかし、X方向壁については、推定比0.4~0.3と精度が悪い。

この原因は、本論では、同一フレームに連層壁が1枚しかない場合を対象として学習を行っていた事によると思われる。本例の場合、X方向では連層壁が1スパンにおいて2枚存在している。このような場合には、それぞれの連層壁が互いの壁の回転変形を拘束するように働くために、1枚だけ存在する場合に比べて負担せん断応力度が推定値以上に増大したものと思われる。一方、Y方向連層壁は、2枚あっても連続しているために一体として作用し、問題はない。

X方向のような連層壁のタイプも学習データに追加する事が必要である。

c) D s 値について

表-6.15 D s 値の比較

	推定値	実際値	推定/実際
X方向	0.25	0.30	0.83
Y方向	0.30	0.30	1.00

X方向で推定値と実際値とが異なっているのは、b)で述べた壁のせん断応力度の推定誤差がそのまま現れている。本例では、壁のせん断応力度を過小評価したために、壁のせん断力分担割合が30%以下となって、D s 値は、0.25となった。

壁のせん断応力度の学習データを改善する事によりD s 値の推定精度は、向上すると思われる。

d) 目標耐力と実際の耐力について

表-6.16 保有水平耐力の比較

層	X方向			Y方向		
	目標値 (tf)	実際値 (tf)	実際/目標	目標値 (tf)	実際値 (tf)	実際/目標
14	1022	1236	1.21	1226	1129	0.92
13	1622	2008	1.24	1947	1833	0.94
12	2132	2677	1.26	2558	2443	0.96
11	2582	3272	1.27	3099	2985	0.96
10	2986	3809	1.28	3583	3475	0.97
9	3348	4307	1.29	4017	3929	0.98
8	3673	4770	1.30	4407	4352	0.98
7	3963	5183	1.31	4755	4728	0.99
6	4219	5551	1.32	5063	5063	1.00
5	4444	5874	1.32	5333	5359	1.00
4	4637	6155	1.33	5565	5614	1.01
3	4801	6393	1.33	5761	5831	1.01
2	4934	6588	1.34	5921	6008	1.01
1	5038	6737	1.34	6046	6144	1.02

Y方向については、推定精度は非常によい。

X方向については、推定において連層壁の耐力を過小評価した分実際の耐力が高く出ているが、必要とされる耐力も増加するために、無駄な設計を行っている事にはなっていない。例えば、1階においては、必要とされる耐力は、3. a) より、6083 (tf) であり、実際の耐力/必要耐力 の比は $6737/6083=1.12$ であり、構造計画段階としては、十分な推定精度であると思われる。

e) 降伏系について (図-6.20 参照)

X, Y方向とも、壁は浮き上がり崩壊系を示し、フレームは梁降伏系を示している、想定した崩壊系を満足している。

f) 部材断面について (表-6.4, 5, 7, 9 参照)

全体的に保有水平耐力を満足し、梁降伏系となっていることから、構造計画段階で使用するには十分な精度で推定できていると思われる。

第4節 設計例2：RC造5層店舗ビルによる検証

1. 検証モデル

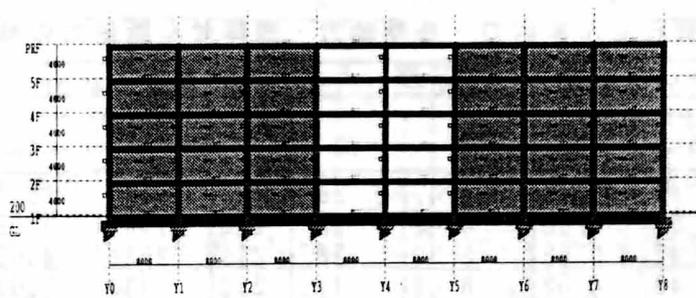
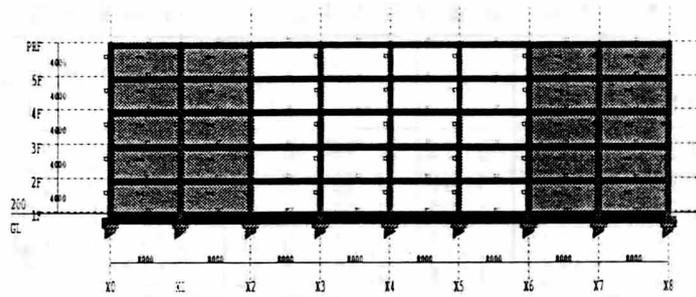
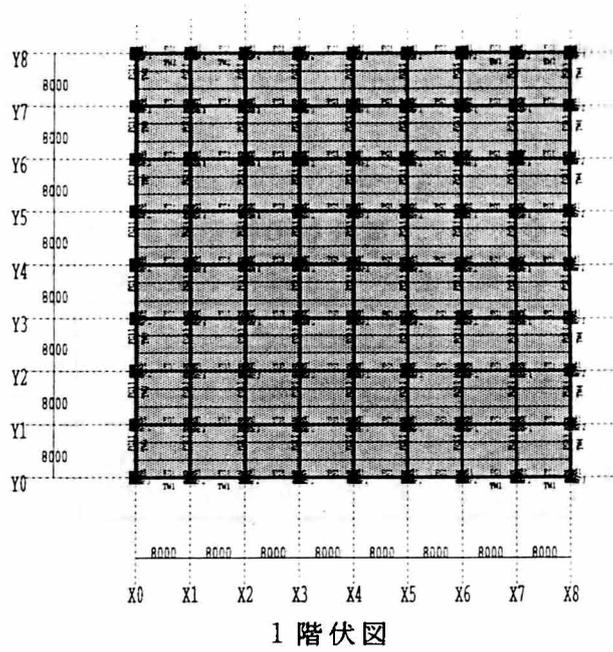


図-6.21 モデル図

2. 推定結果

- a) 平均建物重量 1.14 tf/m²
- b) D s 値 (X) 0.35 (Y) 0.40
- c) 壁性状

表-6.17 壁性状の推定結果一覧

	壁分担率		壁基本応力度	
	(X)	(Y)	(X)	(Y)
5	-0.15	0.43	-0.29	0.63
4	0.37	0.66	1.18	1.57
3	0.42	0.65	1.73	2.05
2	0.40	0.63	1.97	2.38
1	0.07	0.15	0.38	0.65

d) 保有水平耐力の推定

表-6.18 必要保有水平耐力の推定結果一覧

層	重量 (tf)	Σ重量 (tf)	Ai	Ds		Qun (tf)	
				(X)	(Y)	(X)	(Y)
5	4678	4678	1.74	0.35	0.40	2850	3257
4	4678	9356	1.43	0.35	0.40	4681	5350
3	4678	14034	1.25	0.35	0.40	6146	7024
2	4678	18712	1.12	0.35	0.40	7307	8351
1	4678	23391	1.00	0.35	0.40	8187	9356

e) 必要柱せん断耐力・長期軸力・壁総せん断耐力の推定

表-6.19 必要柱せん断耐力・長期軸力・壁総せん断耐力の推定結果一覧

層	壁分担率		柱せん断力(tf)		長期 軸力 (tf)	壁せん断力(tf)	
	(X)	(Y)	(X)	(Y)		(X)	(Y)
5	-0.15	0.43	4.47	29	73	-427	1398
4	0.37	0.66	4.43	28	146	1748	3508
3	0.42	0.65	5.52	38	219	2580	4569
2	0.40	0.63	6.63	47	292	2926	5302
1	0.07	0.15	11.10	122	365	564	1444

f) 梁必要耐力と断面の推定

表-6. 20 X方向梁必要耐力・断面の推定結果一覧

層	必要耐力		断面		主筋本数		スタ-ラフ°	
	Mj (tfm)	Qg (tf)	幅 (cm)	成 (cm)	上 (D25)	下 (D25)	本数 (D13)	ピ-ッチ (mm)
R	114	13	45	90	4	3	2	250
5	161	18	45	90	5	4	2	250
4	188	21	50	95	6	5	2	250
3	230	26	50	95	7	6	2	250
2	304	34	50	95	10	7	2	250
1	265	30	45	150	5	4	2	250

表-6. 21 Y方向梁必要耐力・断面の推定結果一覧

層	必要耐力		断面		主筋本数		スタ-ラフ°	
	Mj (tfm)	Qg (tf)	幅 (cm)	成 (cm)	上 (D25)	下 (D25)	本数 (D13)	ピ-ッチ (mm)
R	69	8	45	85	3	3	2	250
5	102	12	45	85	3	3	2	250
4	132	15	45	90	4	3	2	250
3	169	19	45	90	6	4	2	250
2	289	32	45	90	10	8	2	250
1	292	33	45	150	6	4	2	250

g) 柱必要耐力と断面の推定 (中柱)

表-6. 22 中柱の必要耐力

層	長期軸力 (tf)	X方向			Y方向		
		曲げ (tfm)		せん断力 (tf)	曲げ (tfm)		せん断力 (tf)
		柱頭	柱脚		柱頭	柱脚	
5	73	91	81	54	55	58	35
4	146	80	95	55	57	59	36
3	219	116	110	70	78	82	50
2	292	135	113	77	102	86	59
1	365	197	212	128	223	234	143

表-6. 23 隅柱の必要耐力

層	長期軸力 (tf)	X方向					Y方向				
		終局軸力 tf		曲げ (tfm)		せん断力 (tf)	終局軸力 tf		曲げ (tfm)		せん断力 (tf)
		→	←	柱頭	柱脚		→	←	柱頭	柱脚	
5	18	3	34	46	40	27	5	31	27	29	18
4	37	2	71	40	48	27	10	63	29	29	18
3	55	-4	114	58	55	35	13	97	39	41	25
2	73	-13	160	67	57	39	10	136	51	43	29
1	91	-30	213	98	106	64	-6	189	112	117	71

表-6. 24 中柱の断面推定結果一覧 表-6. 25 隅柱の断面推定結果一覧

層	断面 (cm)	主筋本数		フープ		
		X	Y	X	Y	ピッチ
		D25	D25	D13	D13	(mm)
5	75	6	3	2	2	100
4	75	6	3	2	2	100
3	80	6	4	2	2	100
2	80	6	4	2	2	100
1	80	9	10	2	3	50

層	断面 (cm)	主筋本数		フープ		
		X	Y	X	Y	ピッチ
		D25	D25	D13	D13	(mm)
5	75	3	3	2	2	100
4	75	4	3	2	2	100
3	80	5	3	2	2	100
2	80	6	3	2	2	100
1	80	9	9	2	2	50

h) 壁の必要耐力と断面の推定

表-6. 26 壁の必要耐力・断面の推定結果一覧

層	X方向				Y方向			
	Qw (tf)	壁厚 (cm)	補強筋	ピッチ (mm)	Qw (tf)	壁厚 (cm)	補強筋	ピッチ (mm)
5	-53	15	2-D13	200	117	15	2-D13	200
4	218	15	2-D13	200	292	15	2-D13	200
3	322	15	2-D13	200	381	15	2-D13	200
2	366	15	2-D13	200	442	15	2-D13	200
1	71	15	2-D13	200	120	15	2-D13	200

i) 基礎断面の推定

表-6. 27 杭・基礎の断面推定結果一覧

位置	反力 (tf)	杭耐力 (tf/m2)	杭径 (cm)	基礎幅 (cm)	基礎高 (cm)	杭主筋
中通り	439	230	160	220	120	21 -D22
外周	219	230	110	170	120	10 -D22
隅	110	230	80	140	120	6 -D22

3. 推定結果に基づく断面に対する保有水平耐力

保有水平耐力は、(株)フジタの一貫構造設計プログラム「BUILSYS-V3」¹¹⁾を使用した。「BUILSYS-V3」の結果を以下に示す。

a) 保有水平耐力の結果

表-6. 28 必要保有水平耐力の結果一覧

層	重量 (tf)	Σ重量 (tf)	Ai	Ds(X)	Ds(Y)	Qun(X) (tf)	Qu(X) (tf)	Qun(Y) (tf)	Qu(Y) (tf)	判定	
										X	Y
5	4348	4348	1.78	0.35	0.40	2712	2762	3100	3111	OK	OK
4	4687	9034	1.45	0.35	0.40	4583	4667	5238	5257	OK	OK
3	4815	13850	1.26	0.35	0.40	6114	6226	6987	7013	OK	OK
2	4843	18692	1.12	0.35	0.40	7326	7461	8372	8404	OK	OK
1	4843	23536	1.00	0.35	0.40	8238	8389	9414	9449	OK	OK

b) ヒンジ発生ステップ図

図中の数字は、荷重増分ステップを示し 15 が D s 0.3 に相当する。

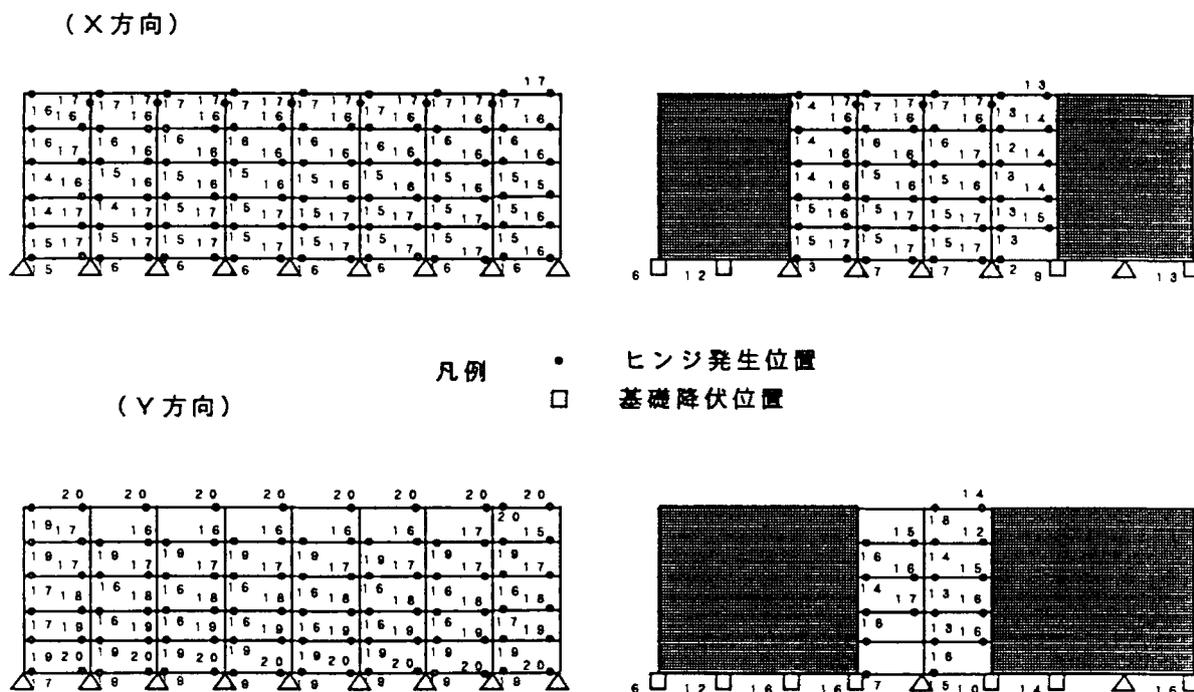


図-6. 22 ヒンジ発生ステップ図

4. 推定値と実際値との比較・考察

a) 建物重量について

表-6. 29 建物重量の比較

層	各階重量			Σ重量		
	推定値 (tf)	実際値 (tf)	推定/実際	推定値 (tf)	実際値 (tf)	推定/実際
5	4678	4348	1.08	4678	4348	1.08
4	4678	4687	1.00	9356	9034	1.04
3	4678	4815	0.97	14034	13850	1.01
2	4678	4843	0.97	18712	18692	1.00
1	4678	4843	0.97	23391	23536	0.99

本論では、平均建物重量として荷重を評価しているために、上階においては、荷重を多少過大評価（推定比 1.08）し、下層部では、過小評価（推定比 0.97）しているが、全体としてみれば、非常によい精度（推定比 0.99）で推定している。

b) 壁せん断応力度係数について

表-6. 30 壁せん断応力度係数の比較

層	X方向			Y方向		
	推定値 (tf)	実際値 (tf)	推定/実際	推定値 (tf)	実際値 (tf)	推定/実際
5	-0.29	-0.41	0.71	0.63	0.43	1.47
4	1.18	1.50	0.79	1.57	1.69	0.93
3	1.73	1.87	0.93	2.05	2.20	0.93
2	1.97	2.29	0.86	2.38	2.37	1.00
1	0.38	1.23	0.31	0.65	1.36	0.48

X, Y方向とも、最下層を除いては、非常によい推定精度である。最下層で誤差が大きい理由は、一般に最下層では浮き上がりが生じた後のせん断応力度の低下は大きい、本論での学習モデルは1スパンの連層壁であったために、本例のような複数スパンの連層壁に対しては浮き上がりが生じた後のせん断応力度の低下を過大に評価したためと思われる。

c) D s 値について

表 - 6. 3 1 D s 値の比較

	推定値	実際値	推定/実際
X方向	0.35	0.35	1.00
Y方向	0.40	0.40	1.00

X、Y方向とも推定通りであった。

d) 目標耐力と実際の耐力について

表 - 6. 3 2 必要保有水平耐力の比較

層	X方向			Y方向		
	目標値 (tf)	実際値 (tf)	実際/目標	目標値 (tf)	実際値 (tf)	実際/目標
5	2850	2762	0.97	3257	3111	0.96
4	4681	4667	1.00	5350	5257	0.98
3	6146	6226	1.01	7024	7013	1.00
2	7307	7461	1.02	8351	8404	1.01
1	8187	8389	1.02	9356	9449	1.01

X、Y方向とも、推定精度（推定比 0.96~1.02）は非常によい。

e) 降伏系について（図 - 6. 2 2 参照）

X、Y方向とも、壁は浮き上がり崩壊系を示し、フレームは梁降伏系を示している、想定した崩壊系を満足している。ただし、最下階の柱脚では柱降伏系を想定していたが、壁のせん断応力度を過小評価して柱断面を設計したために柱耐力に余裕がありすぎて、梁降伏となっている。

f) 部材断面について（表 - 6. 2 0, 2 1, 2 4, 2 5 参照）

b)項の理由により、1階柱の鉄筋本数が多すぎると思われるが、全体的には、保有水平耐力を満足し、梁降伏系となっていることから、構造計画段階で使用するには十分な精度で推定できていると思われる。

第5節 結 語

本章では、ニューラルネットワークを利用した「経験的非明示知識」と「一般的知識」・「経験的明示知識」との統合化を行い、意匠計画図より誰でも読みとる事が出来る簡単なデータを使用して構造部材断面推定を行うことが可能なシステムの構築を行った。また、検証モデルを作成し、本システムにより推定した断面を使用して保有水平耐力の解析を行い、本システムの妥当性の検証を行った。以下に、得られた結論を述べる。

- 1) 構造計画段階における構造部材断面推定に関する「設計ノウハウ」は、「一般的知識」、「経験的明示知識」、「経験的非明示知識」に分類することができる。
- 2) ニューラルネットワークにより獲得された「経験的非明示知識」は、第2章で述べたように、ネットワークの各ユニット間の「重み係数」を介して式(2.1)のように通常の手続き的アルゴリズムで表現されるために、「一般的知識」・「経験的明示知識」との統合化システムの構築が容易である。
- 3) また、本システムでは、「経験的非明示知識」は、ニューラルネットワークにより学習して得られた各ユニット間の「重み係数」のみを使用している。
したがって、「経験的非明示知識」の変更は、この「重み係数」を交換するだけでよく将来に亘っての「知識」の変更対応が容易である。また、建物用途(1例として)毎に学習を行い、それぞれの建物用途に対応する「知識(重み係数)」を保管しておき、対象とする建物用途毎に使用する「知識」の制御を行えば、より精度の高い推定を行うことができると思われる。
- 4) 「経験的明示知識」は、本来ファジィ的性格を持っている。本論では、構造計画段階を対象としているために、あまり厳密な精度は必要としていない。従って、クリスプ的な扱いを行ったが、ファジィ理論を用いればより設計者の感覚にそった部材断面の推定が可能と思われる。今後の課題である。
- 5) ニューラルネットワークにより獲得された「経験的非明示知識」をシステムに組み込む事により、構造設計の経験が少ない人でも、構造部材断面の推定を容易に精度良く行う事が出来るシステムの構築が可能である。
- 6) 学習データの選択が最も重要であり、推定精度に大きく影響を及ぼす。本論では、同一フレームに1枚の連層壁が存在する場合のみ学習データとして扱ったが、本例のように独立した複数枚の連層壁がお互いに影響し合うような壁についても、学習データとして考慮する必要がある。

【参考文献】

- 1) 日本建築センター：構造計算指針・同解説（1991年版）pp.87-112., pp. 230-234.
- 2) 滝沢春男・関弘義：梁崩壊型RC骨組みを実現する柱、梁耐力比、日本建築学会梗概集（関東）、pp.2203-2204、昭和59年10月
- 3) 久保哲夫・中瀬知幸：梁崩壊制御の靱性RC造建物の柱、梁耐力比に関する基礎的研究（その1、その2）、日本建築学会梗概集（北海道）、pp.695-698、昭和59年10月
- 4) 堤和敏、河村廣、谷明勲：ニューラルネットワークを利用した平均建物重量推定システムの研究、日本建築学会構造系論文集、NO.458、1994年4月号
- 5) 堤和敏、河村廣、谷明勲：ニューラルネットワークを用いた構造設計における「経験的非明示知識」の知識獲得に関する研究－構造特性係数 D_s 値の推定法を対象として－、構造工学シンポジウム論文集 1994年3月、pp.261-267.
- 6) 堤和敏、谷明勲、河村廣、松林隆道、片岡裕美：ニューラルネットワークを利用した構造計画段階での連層壁応力度推定システムの研究、日本建築学会構造系論文集、NO.456、1994年2月号、pp.81-86.
- 7) 堤和敏、松林隆道、片岡裕美、河村廣、谷明勲、山田貴彦：ニューラルネットワークによる壁応力度の推定に関する研究 その1 概要、日本建築学会大会学術講演梗概集A、1993年9月、pp.1575-1576.
- 8) 山田貴彦、河村廣、谷明勲：ニューラルネットワークによる壁応力度の推定に関する研究 その2 推定結果、日本建築学会大会学術講演梗概集A、1993年9月、pp.1577-1578.
- 9) 日本建築学会：鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、p.26, p.29
- 10) Multiplanは米国マイクロソフト社の登録商標。
- 11) BCJ - 電174:ビルディングレター 91.4増刊号

第 7 章 結 論

本論は、コンピュータによる「設計ノウハウ」の共有化、標準化の試みの第1歩として、構造計画段階での構造部材断面推定を対象とした「設計ノウハウ」のシステム化手法の提案・開発・検証を行った。

まず最初に、「設計ノウハウ」に関する知識は、各種規準・文献等を通して得られる「一般的知識」、長年の構造設計を通して自分で得た知識の中で「状況」と「知識」との間の因果関係を言葉で説明可能な「経験的明示知識」、説明が困難な「経験的非明示知識」に分類できることを提案した。「一般的知識」・「経験的明示知識」は既存のプログラム言語でシステム化することができるため、「経験的非明示知識」をいかに獲得し、システム化するかが「設計ノウハウ」のシステム化にとって重要である。本論では、この「経験的非明示知識」の獲得をニューラルネットワークを利用することによって行った。

次に、構造計画段階での構造部材断面推定における「知識」を分析し、「経験的非明示知識」として「平均建物重量の推定」、「構造特性係数 D_s 値の推定」、「耐震壁負担せん断応力度の推定」が重要である事を示し、これらの「経験的非明示知識」について実際に設計された物件の設計図書を利用して建物形状等との関係をニューラルネットワークで学習・検証を行いニューラルネットワークが「経験的非明示知識」の獲得に有効である事を示した。

さらに、ニューラルネットワークを利用した「経験的非明示知識」と通常のアプローチで処理できる「一般的知識」、「経験的明示知識」とを統合化した「部材断面推定システム」の提案・開発を行った。

最後に、検証モデルを作成し、本システムにより推定した断面を使用して保有水平耐力の検討を行い、目標とした保有水平耐力を満足しているかどうかの実証的検証を行い、本システムが構造計画段階における「部材断面推定」の有効なツールとなることを確認した。

この検証により以下のことが結論出来た。

- ①「設計ノウハウ」は、「一般的知識」、「経験的明示知識」、「経験的非明示知識」に分類することが出来る。
- ②ニューラルネットワークは、「経験的非明示知識」の獲得に有効である。
- ③「設計ノウハウ」に対するニューラルネットワークによる学習は、知識が既に盛り込まれている図面や計算書等を分析することによって行われるために、品質が高く、また幅広い範囲（形状・規模・用途等）の図面や計算書等の収集を行うことが重要である。
- ④ニューラルネットワークによる「経験的非明示知識」と通常のアプローチで処理できる「一般的知識」・「経験的明示知識」とを統合化することにより、構造設計の経験が少ない（「ノウハウ」を持っていない）設計者に対しても「構造部材断面」の精度良い推定を支援するシステム化が可能である。
- ⑤本論でのシステム化手法は、「構造部材断面推定」のみならず構造設計全般に亘る「ノウハウ」のシステム化へ発展させることができる。

上記に述べた本論での成果は、建築設計において次のような意義を有している。

- ⑥組織設計として、担当者の設計経験に因らず、設計品質を確保する事が出来る。

- ⑦ 専門的な構造知識を必要としていないため、意匠設計者でも利用する事が出来、計画の初期段階から構造部材断面を考慮した総合的な意匠計画を行う事が出来る。
- ⑧ 従来、建築設計において意匠・構造・設備と専門分化が進んでいたが、各専門分野の「ノウハウ」の獲得及びシステム化への道筋を開く事により、意匠・構造・設備を総合的に設計する統合化への道筋を拓くことができる。

本論文の内容は以下のように要約できる。

【第1章：序論】

第1章は序論で、本論文の位置づけ、目的、内容のあらましを述べた。

「設計ノウハウ」のシステム化の第1歩として、構造計画段階における部材断面の推定法に着目し、経験の少ない設計者でも精度の良い部材断面の推定を行えるようにするためには、「経験的非明示知識」の獲得が重要である事を示した。

また、部材断面推定における「経験的非明示知識」としては、「平均建物重量の推定」、「構造特性係数 D_s 値の推定」、「耐震壁負担せん断応力度の推定」が重要である事を示した。

【第2章：ニューラルネットワーク】

第2章は、「経験的非明示知識」の獲得として重要な役割を果たす、ニューラルネットワークの概要、基本原理を示し、また既存の統計処理である重回帰分析との違いについて考察を行った。

【第3章：平均建物重量の推定に関する研究】

第3章では、「経験的非明示知識」の1つである「平均建物重量の推定」に着目し、著者の設計経験と力学的な要因、及び誰もが入力できることを考慮して、①地上部の構造種別、②建物地上部層数、③地上部の主な用途、④柱1本当たりの荷重負担床面積、⑤耐力壁の存在率、⑥平面形状特性、の6個のパラメータを「平均建物重量の推定」に必要な入力パラメータとして提案した。これらのパラメータを利用してニューラルネットワークにより学習・検証を行い、構造計画段階で使用するには十分な精度（全データの70%を推定誤差15%以内に納める事が出来る）で推定する事が出来る事を示した。

【第4章：構造特性係数 D_s 値の推定に関する研究】

第4章では、「経験的非明示知識」の1つである「構造特性係数 D_s 値の推定」に着目し、著者の設計経験と力学的な要因、及び誰もが入力できることを考慮して、①地上部の構造種別、②建物地上部層数、③対象層の階高、④当該方向の平均スパン長、⑤連層壁の存在率、⑥せん断壁の存在率、の6個のパラメータを「構造特性係数 D_s 値の推定」に必要な入力パラメータとして提案した。これらのパラメータを利用してニューラルネットワークにより学習・検証を行い、構造計画段階で使用するには十分な精度（全データの70%を推定誤差7%以内に納める事が出来る）で推定する事が出来る事を示した。また、誰でも容易に学習データの選択を行う事が出来る機械的選択法を提案した。

【第5章：耐震壁負担せん断応力度の推定に関する研究】

第5章では、「経験的非明示知識」の1つである「耐震壁負担せん断応力度の推定」に着目した。連層壁の負担せん断応力度は、連層壁のみ存在する場合の連層壁の基本せん断応力度に、取り付け壁や独立壁が混在する事によって生じる補正せん断応力度の和で表されると仮定し、連層壁のみ存在する場合と、取り付け壁・独立壁とが混在する場合の2ケースに分けて考察を行った。

1) 連層壁のみ存在する場合（基本せん断応力度）

著者の設計経験と力学的な要因、及び誰もが入力できることを考慮して、①連層壁の形状、②連層壁の存在率、③連層壁と境界梁との関係、④連層壁の存在位置との関係、⑤対象層の位置、の5個のパラメータを「耐震壁の基本せん断応力度の推定」に必要な入力パラメータとして提案した。これらのパラメータを利用してニューラルネットワークにより学習・検証を行い、構造計画段階で使用するには十分な精度（全データの70%を推定誤差12%以内に納める事が出来る）で推定する事が出来る事を示した。

2) 取り付け壁・独立壁が混在する場合（補正せん断応力度）

著者の設計経験と力学的な要因、及び誰もが入力できることを考慮して、①連層壁の形状、②対象層の位置、③対象層に対して上層にある取り付け壁の影響係数、④対象層に対して同一層にある取り付け壁の影響係数、⑤対象層に対して下層にある取り付け壁の影響係数、⑥対象層に対して上層にある独立壁の影響係数、⑦対象層に対して同一層にある独立壁の影響係数、⑧対象層に対して下層にある独立壁の影響係数、の8個のパラメータを「連層壁の補正せん断応力度の推定」に必要な入力パラメータとして提案した。これらのパラメータを利用してニューラルネットワークにより学習・検証を行い、構造計画段階で使用するには十分な精度（全データの70%を平均推定誤差30%以内に納める事が出来る）で推定する事が出来る事を示した。

【第6章：部材断面推定のシステム化と検証】

第6章では、前章までに得られた「経験的非明示知識」の学習結果を利用して部材断面推定を行うためのシステム化手法の提案とシステムの構築を行った。

本システムでは、「経験的非明示知識」をニューラルネットワークで学習させる事により、誰でも意匠計画図より読み取れる30項目の情報を使用してシステムを構成する事が出来た。

次に、SRC造事務所ビル、RC造店舗ビルのモデルを作成し、本システムで推定した部材断面を使用して保有水平耐力の検証を行った。RC造モデルでは短辺・長辺の両方向とも、SRC造モデルの場合は短辺方向について非常に高い精度で部材断面の推定を行うことが出来た。SRC造モデルの長辺方向では、学習に考慮しなかった壁配置モデルが存在していたために、壁負担せん断応力度の推定では、多少推定値との誤差を生じたが、保有水平耐力は必要保有水平耐力を満足しており、構造計画段階での有効なツールとなり得る事を確認した。

添付資料

資料－1	設計物件一覧	- 171 -
資料－2	ニューラルネットワークの構成に関する考察	- 173 -
資料－3	記号一覧	- 193 -

資料 - 1 設計物件一覧

番号	構造種別	主用途	層数		スパン数		柱1本床面積	平面形状係数	平均重量	1階柱断面	2階梁断面		最大Ds	
			地上	地下	X	Y					X	Y	X	Y
1	S	事務所	4	0	3	3	34	0.7	1.25	50*50	20*70	20*70		
2	RC	住居	8	0	1	3	14	1.2	1.54	70*70	45*80	30*80	0.40	0.40
3	RC	店舗	4	0	11	9	51	0.3	1.24	75*75	45*85	45*85	0.30	0.30
4	RC+SRC	店舗	7	0	8	8	36	0.3	1.24	90*90	45*85	45*85		
5	RC	住居	11	0	8	2	26	0.5	1.18	90*90	65*70	50*70		
6	SRC	事務所	10	0	6	9	40	0.5	1.08	100*100	60*130	60*130		
7	SRC	事務所	10	1	3	6	28	0.7	1.42	95*95	55*100	55*100	0.40	0.30
8	RC+S	事務所	4	0	6	3	33	0.5	0.89	50*50	20*45	20*45		
9	RC	住居	13	0	2	4	15	0.9	1.36	100*80	50*120	35*60	0.40	0.45
10	S	住居	4	0	3	1	11	1.0	0.81	25*25	17*35	20*40	0.30	0.30
11	RC	住居	10	0	8	1	28	0.7	1.42	60*160	60*80	25*80	0.45	0.40
12	SRC	事務所	8	0	2	3	35	0.8	1.06	80*80	25*65	20*50	0.25	0.40
13	RC	事務所	9	0	6	3	24	0.6	1.33	85*85	45*80	65*90	0.55	
14	SRC	住居	8	0	12	3	33	0.5	1.36	80*80	45*170	45*170	0.40	
15	S	店舗	2	0	16	8	54	0.2	0.66	40*40	20*50	20*50	0.30	0.30
16	SRC	住居店舗	14	2	8	10	51	0.3	1.05	90*90	25*85	25*85		
17	SRC	事務所	8	1	2	1	16	1.7	2.20	85*85	55*85	55*85	0.35	
18	SRC+RC	店舗	4	0	6	7	40	0.5	1.87	85*85	55*125	55*125	0.45	0.45
19	RC	事務所	6	1	13	9	34	0.3	1.39	90*90	50*100	50*100	0.30	
20	SRC+S	事務所	10	1	6	9	27	0.9	1.32	90*90	60*130	60*130		
21	RC	店舗	4	0	18	11	54	0.2	1.11	85*85	45*120	45*120	0.50	0.50
22	RC	住居	14	1	3	4	15	1.0	2.09	110*110	70*90	70*90	0.45	0.35
23	S	事務所	14	2	7	7	29	0.8	1.25	65*65	30*90	35*90		
24	S	事務所	5	0	9	10	27	0.5	0.81	40*40	20*60	20*60		
25	S	店舗	8	2	8	4	26	0.6	0.97	55*55	25*65	25*65		

資料 - 1 設計物件一覧

番号	構造種別	主用途	層数		スパン数		柱1本 床面積	平面形 状係数	平均 重量	1階 柱断面	2階梁断面		D s	
			地上	地下	X	Y					X	Y	X	Y
26	RC	住居	7	0	6	1	33	0.47	0.97	70*70	45*70	30*70	0.30	0.40
27	S	事務所	9	0	2	1	6	2.28	0.84	40*40	20*60	25*60		
28	SRC	住居	12	1	10	1	31	0.67	1.09	85*85	50*90	50*90		
29	SRC	住居	12	0	5	1	41	0.45	1.04	90*90	55*80	40*65	0.25	0.35
30	RC	事務所	3	0	2	2	22	0.99	1.78	60*80	45*110	35*70	0.30	0.40
31	RC	事務所	4	0	3	4	23	0.60	1.08	70*70	40*65	40*65	0.35	0.50
32	S	事務所	9	0	3	5	26	0.72	1.22	60*60	30*120	30*90	0.35	0.30
33	SRC	店舗	3	0	13	16	49	0.13	1.04	70*70	20*60	20*60		
34	RC	事務所	5	0	3	4	26	0.52	1.64	65*65	45*75	45*75	0.55	
35	RC	住居	4	1	12	2	29	0.37	0.90	45*85	45*70	45*70	0.30	0.55

資料-2 ニューラルネットワークの構成に関する検討

1. 学習データ・検証データ	- 174 -
2. 重み更新係数について	- 178 -
3. 中間層数・ユニット数に関する検討	- 183 -
4. 打ち切り誤差に関する検討	- 188 -
5. 線形重回帰分析との比較	- 191 -
【参考文献】	- 192 -

ニューラルネットワークは、2章で述べたように人間の神経回路を模した工学的情報処理システムであり複数のユニットを組み合わせたネットワークにより構成されている。従って、何個のユニットを、どのように組み合わせるかは重要な問題である。又、学習は誤差逆伝搬法^{1) 2)}により、各ユニットの重みを更新することによって行われる。この重みを更新するパラメータ（重み更新係数）の設定も重要である。

本項では、より合理的なネットワークを構成するために、重み更新係数の設定に関する検討、ネットワークを構成する中間層数とユニット数の検討、さらに打ち切り誤差に関する検討を行う事にする。学習・検証用データとしては、3章で述べた平均建物重量の推定に関するデータを使用する。

1. 学習データ・検証データ

ニューラルネットワークに学習させる学習データは、学習用設計物件の中から選び、検証用設計物件は考慮しない。こうする事により、検証の一般性を保証する。

学習用設計物件について、3章2. で述べた入力データと教師信号、及び実際の平均建物重量値の一覧を表-A2.1に示す。

学習データは、学習用設計物件25例の中から、約半分の12例を選定した。

選定の規準は、構造種別がRC, S, SRCそれぞれ4例ずつとし、それぞれの構造種別の中で、平均建物重量が重い物件1例、軽い物件1例、中間的な物件2例を選び、各入力パラメータに対して、全体をカバーできるような物件を選定した。一方、検証用設計物件について、3章2. で述べた入力データ、及び実際の平均建物重量値の一覧を表-A2.2に示す。

図-A2.1 に学習用設計物件と選択した学習データ(ST12)および検証用データとの関係を示す。図中、○印が学習用設計物件であり、●印が選択した学習データ、◎印が検証用データである。横軸は、各パラメータに対する入力値、縦軸は、各物件の床面積当たりの平均建物重量である。

学習に使用したプログラムは、文献²⁾に掲載されているバックプロパゲーションアルゴリズムをベースに一部修正して作成した。ハードは、PC9801RA21を使用した。重みの修正法は逐次修正法²⁾を使用した。

本来は、一括修正法を使用するのが正式ではあろうが、パソコンを使用しているために、学習回数を少なくしたいという理由と、図-A2.1で示されるように、入力値と教師信号の間にある程度の相関関係があり、学習誤差は大きくならないだろうと言う推測の基に逐次修正法を採用した。

学習打ち切り誤差は0.0005とした。

表-A2.1 学習用物件に対する入力データ・教師信号および平均建物重量一覧

物件	入力データ						教師信号	平均建物重量 tf/m^2
	IN1	IN2	IN3	IN4	IN5	IN6		
1	0.2	0.4	0.51	0.67	0.01	0.70	0.38	1.25
2	1.0	0.8	0.34	0.25	1.29	1.27	0.52	1.54
3	1.0	0.4	0.72	0.98	0.01	0.34	0.37	1.24
4	1.1	0.7	0.45	0.73	0.29	0.39	0.37	1.24
5	1.0	1.1	0.26	0.57	1.00	0.47	0.34	1.18
6	1.2	1.0	0.54	0.76	0.01	0.58	0.31	1.12
7	1.2	1.0	0.58	0.55	0.01	0.62	0.44	1.38
8	0.6	0.4	0.40	0.66	0.01	0.47	0.20	0.89
9	1.0	1.3	0.25	0.32	0.98	0.93	0.43	1.36
10	0.2	0.4	0.40	0.22	0.01	1.02	0.16	0.81
11	1.0	1.0	0.42	0.57	1.00	0.67	0.46	1.42
12	1.2	0.8	0.29	0.70	0.62	0.76	0.28	1.06
13	1.0	0.9	0.26	0.49	0.44	0.62	0.41	1.32
14	1.2	0.8	0.30	0.65	0.86	0.53	0.43	1.36
15	0.2	0.1	0.60	1.03	0.01	0.28	0.08	0.66
16	1.2	1.4	0.37	0.95	0.24	0.40	0.28	1.05
17	1.2	0.8	0.39	0.31	0.88	1.69	0.85	2.20
18	1.1	0.4	0.84	0.72	0.01	0.55	0.69	1.87
19	1.0	0.6	0.28	0.65	0.01	0.35	0.45	1.39
20	0.7	1.1	0.56	0.53	0.01	0.95	0.42	1.34
21	1.0	0.4	0.61	1.08	0.23	0.17	0.31	1.11
22	1.0	1.4	0.33	0.29	0.04	1.06	0.80	2.09
23	0.2	1.4	0.35	0.52	0.03	0.76	0.38	1.25
24	0.2	0.5	0.71	0.51	0.01	0.55	0.16	0.81
25	0.2	0.8	0.44	0.50	0.01	0.64	0.24	0.97

表-A2.2 検証用物件に対する入力データおよび平均建物重量一覧

物件	入力データ						平均建物重量 tf/m ²
	IN1	IN2	IN3	IN4	IN5	IN6	
26	1.0	0.7	0.19	0.65	1.00	0.47	0.97
27	0.2	0.9	0.27	0.12	0.01	2.28	0.84
28	1.2	1.2	0.22	0.63	0.79	0.67	1.09
29	1.2	1.2	0.22	0.81	1.00	0.45	1.04
30	1.0	0.3	0.33	0.44	0.80	0.99	1.78
31	1.0	0.4	0.32	0.46	0.17	0.60	1.08
32	0.2	0.9	0.39	0.52	0.01	0.72	1.22
33	1.2	0.3	0.60	0.97	0.32	0.13	1.04
34	1.0	0.5	0.78	0.53	0.27	0.52	1.64
35	1.0	0.4	0.23	0.58	0.38	0.37	0.90

検証は、それぞれの学習ケースに対して、下記の3ケースを行った。

- ① 再現性の検証 : 学習データに対する検証
- ② 内挿性の検証 : 学習用設計物件の中で、学習に使用しなかった物件に対する検証
→ 学習データを選定する際にこれらのデータをも考慮していると言う意味で内挿に当たる。
- ③ 外挿性の検証 : 検証用物件に対する検証。
→ 学習データの選定にこれらのデータを考慮していないと言う意味で外挿に当たる。

また、検証の手順は下記の通りである。

- ① それぞれの検証モデルに対して求めた6個の入力データをニューラルネットワークに入力し、出力結果を求める。
- ② ニューラルネットワークの出力結果(OUT)は、建物平均重量を[0,1]の範囲に規準化したものであるから、3章の式(3.7)より下式によって、ニューラルネットワークの結果を建物平均重量に変換する。

$$AW = OUT * 2.0 + 0.5 \quad (A2.1)$$

- ③ ニューラルネットによって求めた建物平均重量と実際の建物平均重量とを比較する。

資料-2 ネットワークの構成検討

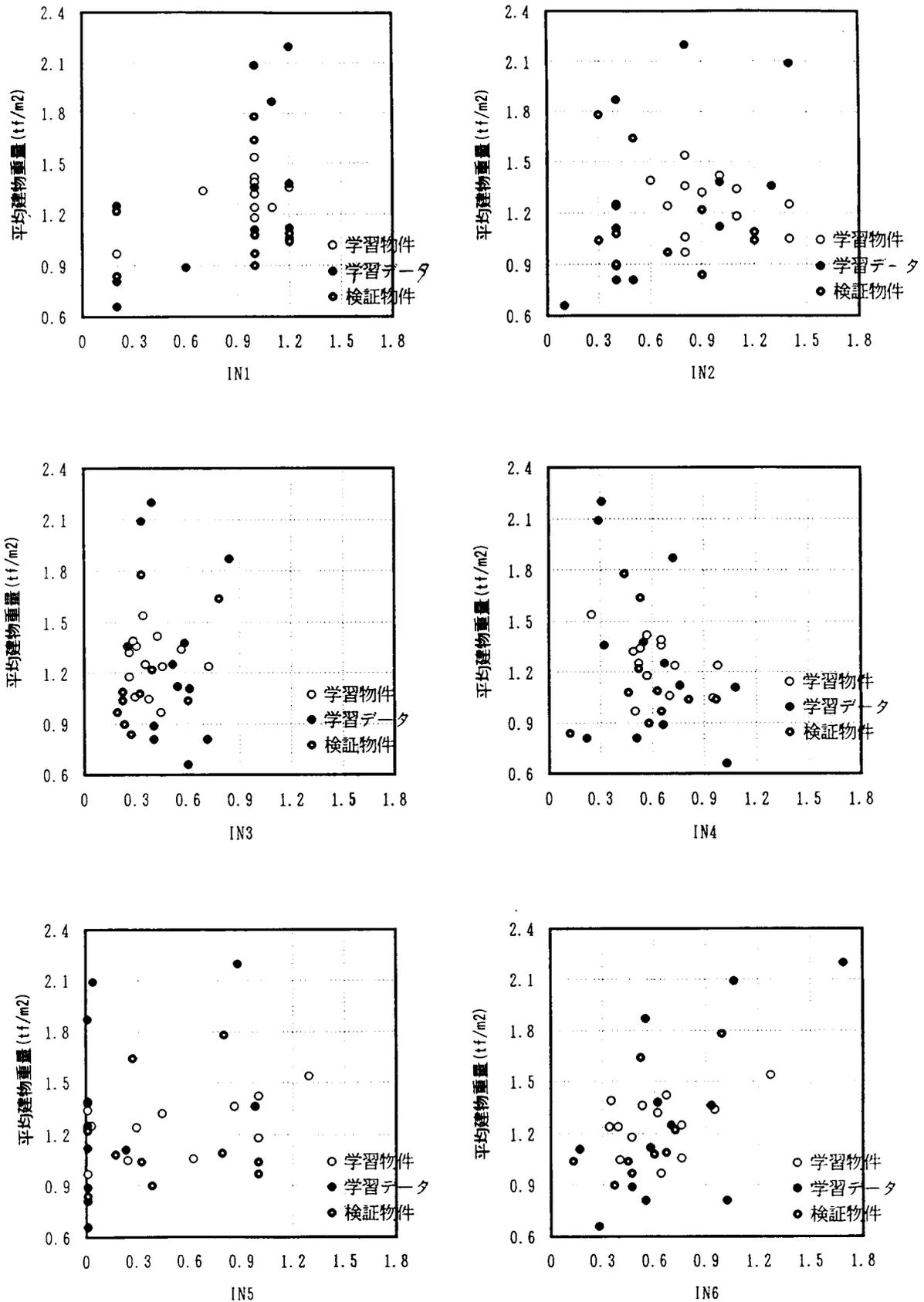


図-A2.1 学習データと学習物件・検証物件との関係

2. 重み更新係数に関する検討

本項では、ニューラルネットワークでの学習を行う上で重要な要素である重み更新係数の設定法について検討を行う。

(1) ニューラルネットワークの構成

ニューラルネットワークの構成は、3. 項で詳細に検討を行うが、ここでは、重み更新係数の検討が主目的であるので仮に、中間層2層、中間層でのユニット数18を使用した。

ニューラルネットワークの構成を下図に示す。

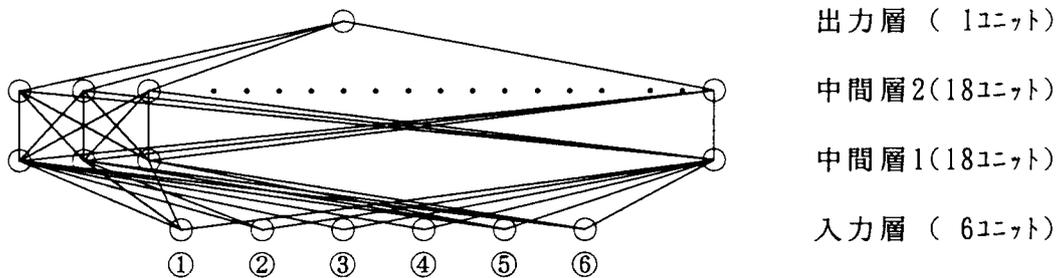


図-A2.2 ニューラルネットワークの構成

(2) 重み更新係数

ニューラルネットワークの学習方法は、誤差逆伝搬法¹⁾ (バックプロパゲーションアルゴリズム) を採用している。

このアルゴリズムは、期待出力とネットワークの実際の出力の2乗誤差の総和Eを定義し、Eを評価関数としてそれを暫時小さくするように重み係数を更新するアルゴリズムである。すなわち、ネットワークの重み係数は、下記の規則に従って更新する事が出来る。²⁾

$$w_{ij}^{(m)} [n+1] = w_{ij}^{(m)} [n] - \eta \frac{E}{w_{ij}^{(m)}} + \alpha (w_{ij}^{(m)} [n] - w_{ij}^{(m)} [n-1])$$

$w_{ij}^{(m)}$: 第m層の重み係数 ($i = 1, \dots, N_m, j = 1, \dots, N_{m-1}$)
 N_m : 第m層のユニット数
 N_{m-1} : 第m-1層のユニット数
 η, α : 重み更新係数 (収束速度を決める)
 n : 学習サイクルを表すパラメータ
 $E = 1/2 \sum (y_i^{(M)} - d_i)^2$ ($i = 1, \dots, N_M$)
 $y_i^{(M)}$: 第M層 (出力層) のi番目のネットワーク出力

di : 期待出力
 NM : 第M層（出力層）のユニット数

η, α は、収束速度を決めるパラメータであり、値を大きくすると収束速度は、早くなるがあまり大きくすると不安定となり、経験的に決める必要があると言われている。²⁾

本項では、 η は 0.95, 0.80, 0.50, 0.10 の4ケース、 α は 0.95, 0.50, 0.10 の3ケース計12ケースについてパラメータ解析を行う。

(3) 学習方法・学習回数

学習は、ST12の学習データをニューラルネットワークに学習させるが、その際、重み更新係数 η, α を(2)項で述べた12ケースの値について行った。

重み更新係数毎の学習回数を以下に示す。

表-A2.3 重み更新係数と学習回数

α	η			
	0.95	0.80	0.50	0.10
0.95	318	1533	210	954
0.50	1062	1143	1359	5113
0.10	1064	1088	1865	9193

(4) 推定結果

各重み更新係数に対する再現性・内挿性、外挿性それぞれに対する推定値と実際値との比の最大値、最小値、平均値、標準偏差を表に示す。

表-A2.4 再現性・内挿性に対する推定値/実際値の最大値

α	η			
	0.95	0.80	0.50	0.10
0.95	1.43	1.30	1.47	1.63
0.50	1.54	1.53	1.48	1.62
0.10	1.48	1.50	1.62	1.62

表-A2.5 再現性・内挿性に対する推定値/実際値の最小値

α	η			
	0.95	0.80	0.50	0.10
0.95	0.61	0.70	0.53	0.60
0.50	0.57	0.57	0.54	0.55
0.10	0.50	0.51	0.55	0.55

表-A2.6 再現性・内挿性に対する推定値/実際値の平均値

α	η			
	0.95	0.80	0.50	0.10
0.95	0.99	0.96	0.95	0.94
0.50	0.98	0.98	0.96	0.96
0.10	0.94	0.95	0.95	0.96

表-A2.7 再現性・内挿性に対する推定値/実際値の標準偏差

α	η			
	0.95	0.80	0.50	0.10
0.95	0.21	0.13	0.23	0.22
0.50	0.22	0.22	0.22	0.25
0.10	0.22	0.23	0.25	0.25

表-A2.8 外挿性に対する推定値/実際値の最大値

α	η			
	0.95	0.80	0.50	0.10
0.95	2.54	1.58	2.37	1.52
0.50	1.94	2.01	2.16	1.80
0.10	1.59	1.43	1.55	1.87

表-A2.9 外挿性に対する推定値/実際値の最小値

α	η			
	0.95	0.80	0.50	0.10
0.95	0.75	0.94	0.65	0.80
0.50	0.76	0.75	0.68	0.73
0.10	0.67	0.67	0.70	0.73

表-A2.10 外挿性に対する推定値/実際値の平均値

α	η			
	0.95	0.80	0.50	0.10
0.95	1.14	1.12	1.05	0.98
0.50	1.08	1.07	1.03	0.99
0.10	0.96	0.97	0.97	1.00

表-A2.11 外挿性に対する推定値/実際値の標準偏差

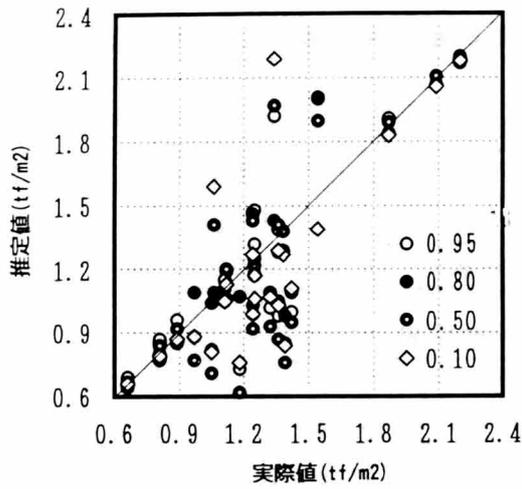
α	η			
	0.95	0.80	0.50	0.10
0.95	0.53	0.18	0.50	0.22
0.50	0.33	0.35	0.42	0.31
0.10	0.26	0.23	0.26	0.33

また、図-A2.3 に、再現性・内挿性、および外挿性に対する重み更新係数毎の、実際値と推定値との関係を示す。 図中 ○印は $\eta = 0.95$ 、●印は $\eta = 0.80$ 、◎印は $\eta = 0.50$ 、◇印は、 $\eta = 0.10$ を示している。

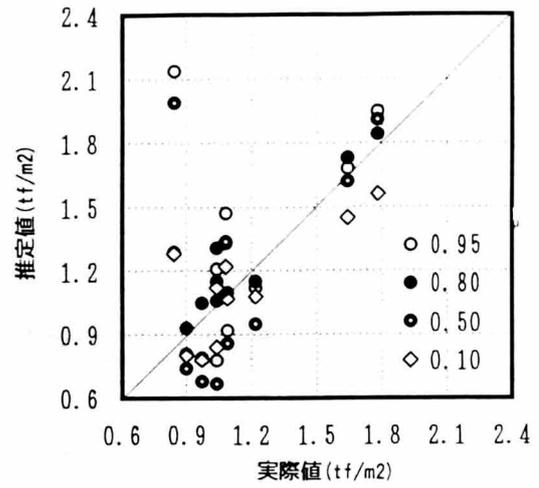
(5) 考察

- 1)本ネットワークにおいては、 $\eta = 0.8$ 、 $\alpha = 0.95$ の 때가、内挿性・外挿性とも最も精度がよい。
- 2)内挿性の標準偏差は、 $\eta \cdot \alpha$ が共に大きい値の場合には多少ばらつきがあるが、その他の場合には、ほぼ一定している。
これは、学習データがバランスよく選定されていたためと思われる。
- 3) η または α が小さい値の場合には、内挿性・外挿性とも $\eta \cdot \alpha$ の値によらず標準偏差はほぼ同程度になっており、精度は安定している。
また、内挿性に対する標準偏差と、外挿性に対する標準偏差の値も同程度であり、外挿性に対しても学習データの選定はバランスがよいと思われる。
- 4) η 、 α 共に大きい値の場合には、学習回数・精度ともばらつきが大きい。
特に外挿性に対する標準偏差は、0.53~0.18とばらつきが大きい。 また、内挿性で精度がよくても、外挿性に対しても精度がよいかどうかの保証はない。
- 5)今回は、検証用のデータが指定されていたので、 $\eta = 0.8$ 、 $\alpha = 0.95$ の 때가精度が最も良いと判断できたが、現実にはどんなデータがくるかわからないので、重み更新係数としては安定性が高い η が小さい値を採用した方がよいと思われる。本研究では、以降の重み更新係数は $\eta = 0.10$ 、 $\alpha = 0.95$ を採用する事にする。

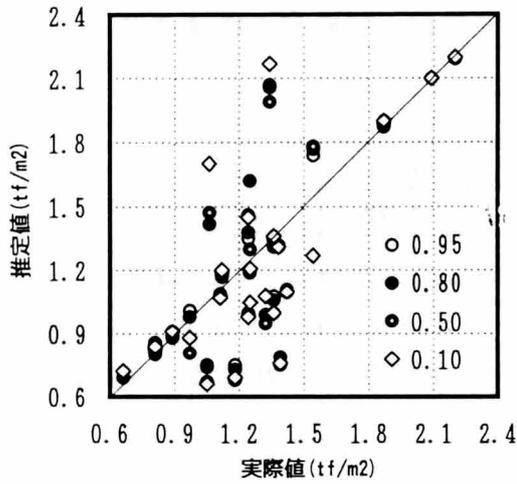
資料-2 ネットワークの構成検討



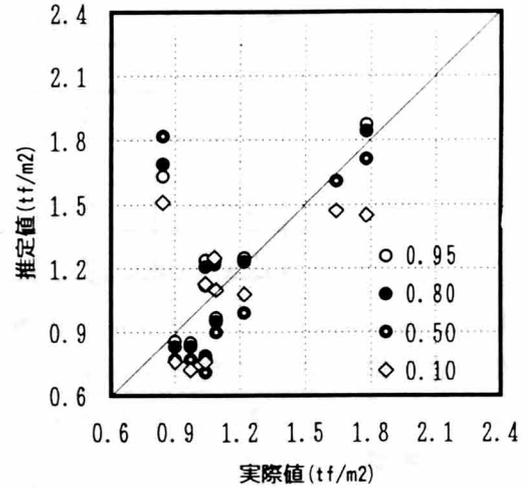
$\alpha=0.95$ 内挿性



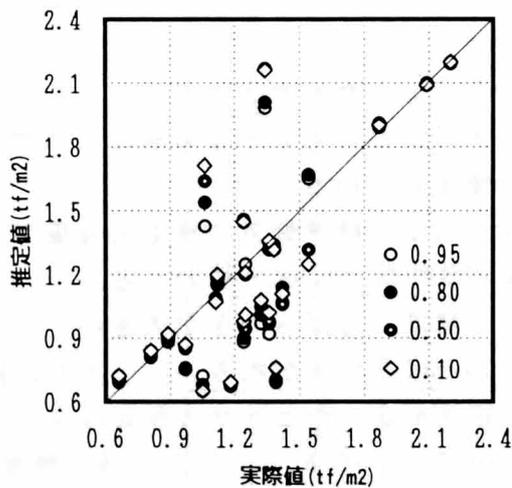
$\alpha=0.95$ 外挿性



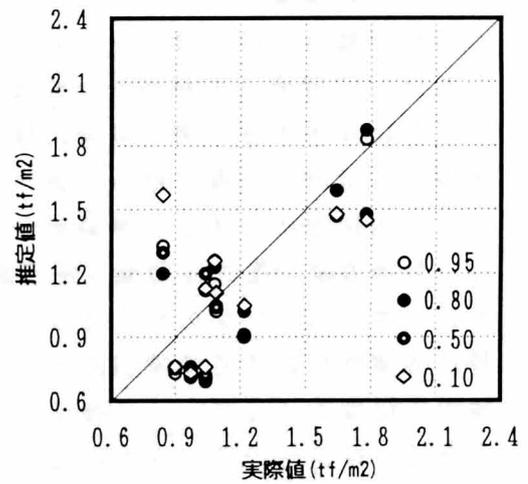
$\alpha=0.50$ 内挿性



$\alpha=0.50$ 外挿性



$\alpha=0.10$ 内挿性



$\alpha=0.10$ 外挿性

図-A2.3 重み更新係数に対する推定値/実値との比較

3. 中間層数・ユニット数に関する検討

ニューラルネットワークは、入力層、出力層と中間層から構成される。
本項では、中間層の層数及びユニット数について検討を行う。

(1) ニューラルネットワークの構成

入力層、出力層は、6ユニット及び1ユニットとするが、中間層の層数については、1層、2層、3層の3ケース、中間層のユニット数については、それぞれのケースについて入力ユニット数の2倍（12ユニット）、2.5倍（15ユニット）、3倍（18ユニット）、3.5倍（21ユニット）、4倍（24ユニット）の5ケース、計15ケースを考える。

① 1層モデル

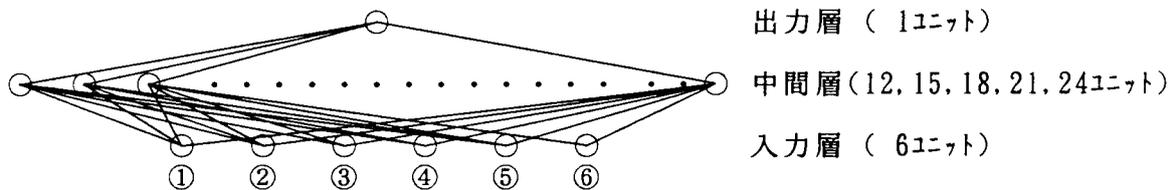


図-A2.4 ニューラルネットワークの構成

② 2層モデル

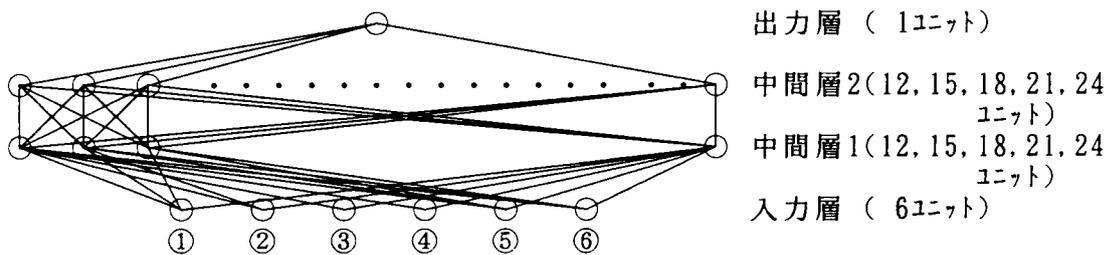


図-A2.5 ニューラルネットワークの構成

③ 3層モデル

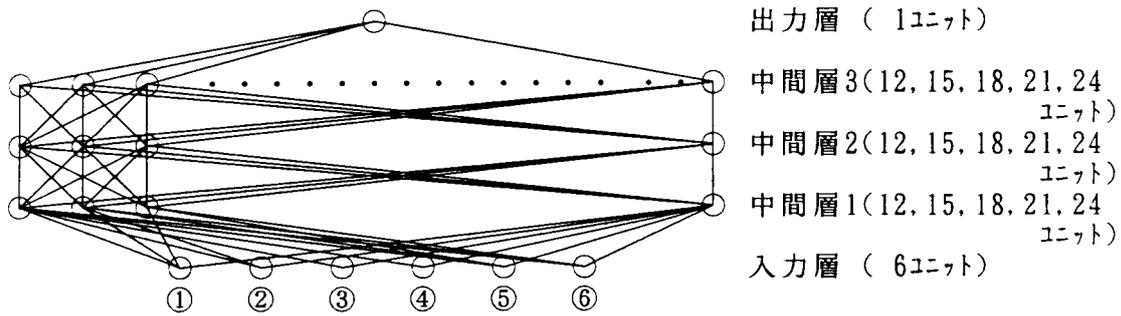


図-A2.6 ニューラルネットワークの構成

(2) 学習方法・学習回数

学習は、1. 項で選択した学習データ(ST12)をそれぞれ図-A2.4~図-A2.6に示す階層型ニューラルネットワークに、6個の入力値と1個の教師信号とを1セットにして学習させた。学習ケース毎の学習回数を以下に示す。

重み更新係数は2. 項で考察したように安定性のよい $\eta = 0.10$, $\alpha = 0.95$ を使用し、打ち切り誤差は0.0005とした。

表-A2.12 中間層数・中間層中のユニット数にたいする学習回数

中間層	中間層中のユニット数				
	1 2	1 5	1 8	2 1	2 4
層数 1	589	597	603	729	701
層数 2	649	845	954	480	496
層数 3	448	544	433	532	468

(3) 推定結果

各ニューラルネットワーク毎に推定した平均建物重量と実際の平均建物重量とを比較した表を表-A2.13, 表-A2.14に示す。

表-A2.13 中間層数・ユニット数に対する推定値/実際値の比較(内挿性)

層数	ユニット数	12	15	18	21	24
1	最大値	1.60	1.61	1.51	1.80	1.63
	最小値	0.50	0.55	0.52	0.55	0.54
	平均値	0.93	0.96	0.96	1.00	0.97
	標準偏差	0.26	0.24	0.21	0.25	0.24
2	最大値	1.56	1.64	1.63	1.66	1.65
	最小値	0.54	0.54	0.60	0.54	0.56
	平均値	0.92	0.94	0.94	0.98	1.00
	標準偏差	0.24	0.25	0.22	0.24	0.25
3	最大値	1.64	1.69	1.64	1.74	2.15
	最小値	0.55	0.55	0.56	0.59	0.65
	平均値	0.96	0.97	0.98	0.98	0.96
	標準偏差	0.24	0.26	0.23	0.25	0.29

表-A2.14 中間層数・ユニット数に対する推定値/実際値の比較(外挿性)

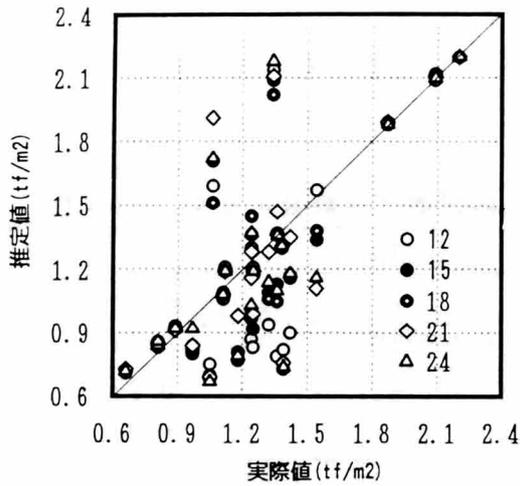
層数	ユニット数	12	15	18	21	24
1	最大値	1.34	1.32	2.02	1.69	2.09
	最小値	0.60	0.75	0.80	0.73	0.73
	平均値	0.91	1.00	1.04	1.15	1.06
	標準偏差	0.24	0.17	0.36	0.28	0.39
2	最大値	1.28	2.14	1.52	2.46	2.11
	最小値	0.68	0.59	0.80	0.64	0.83
	平均値	0.98	1.08	0.98	1.08	1.16
	標準偏差	0.20	0.42	0.22	0.51	0.37
3	最大値	1.30	1.91	1.76	1.32	2.74
	最小値	0.77	0.52	0.85	0.76	0.72
	平均値	1.02	1.04	1.03	1.05	1.11
	標準偏差	0.19	0.38	0.27	0.16	0.43

また図-A2.7に中間層の層数とユニット数の違いによる推定値と実際値とを比較した図を示す。

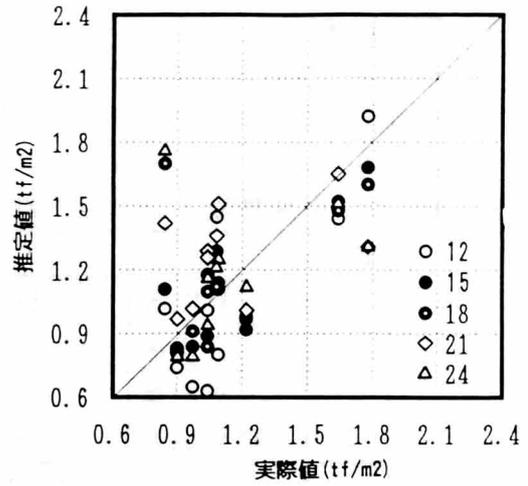
図中横軸は、実際の平均建物重量値、縦軸は推定した平均建物重量値を示す。

図中 ○印はユニット数=12、●印はユニット数=15、◎印はユニット数=18、◇印はユニット数=21、△印はユニット数=24を示している。

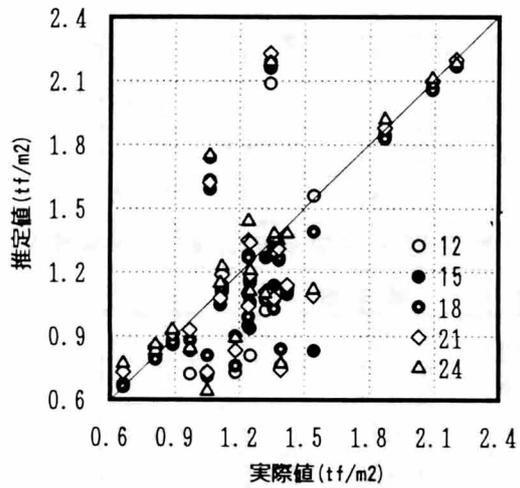
資料-2 ネットワークの構成検討



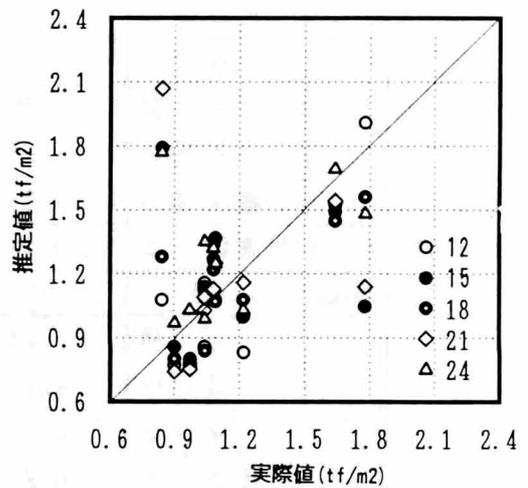
中間層1層 内挿性



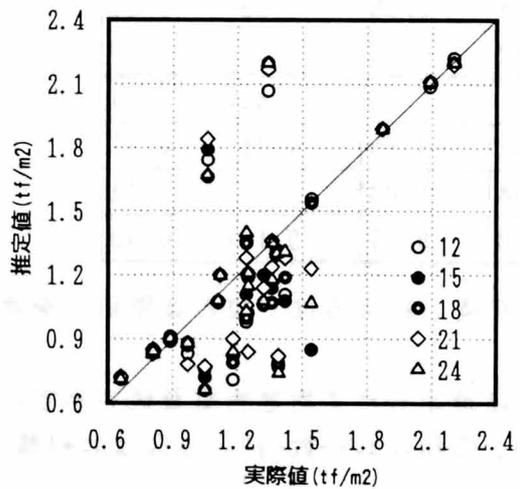
中間層1層 外挿性



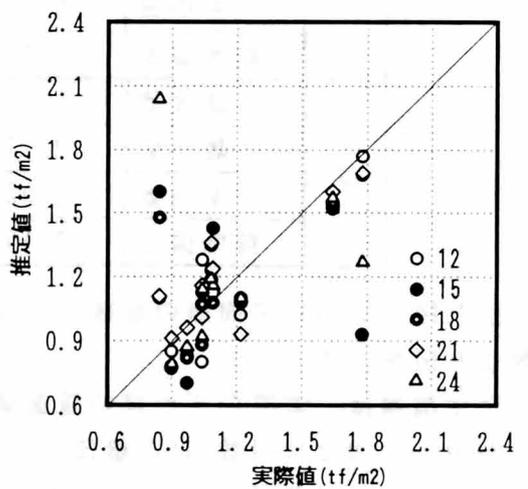
中間層2層 内挿性



中間層2層 外挿性



中間層3層 内挿性



中間層3層 外挿性

図-A2.7 中間層及びユニット数の違いによる推定値/実際値との比較

(4) 考察

外挿性に対して精度が良かった（標準偏差が小さい）順に内挿性の標準偏差、学習回数を比較してみると次のようになる。

表-A2.15 中間層数・ユニット数と精度及び学習回数

	中間層数	ユニット数	外挿性標準偏差	内挿性標準偏差	学習回数
1	3	21	0.16	0.25	532
2	1	15	0.17	0.24	597
3	3	12	0.19	0.24	448
4	2	12	0.20	0.24	649
5	2	18	0.22	0.22	954

- 1) 内挿性についての標準偏差は、0.21～0.29と各ネットワークともほぼ同程度であった。
- 2) 外挿性についての標準偏差は、0.16～0.51と各ネットワークでのばらつきが大きい。
- 3) 内挿性が良くても、外挿性に対する保証はない。
これは、外挿性に対する検証データが今回、10例と少ない事が考えられる。もっと多くのデータに対して検証を行えば、ばらつきは少なくなると思われる。
- 4) 同一層数で、ユニット数を増やしても精度が良くなるとは限らない。また同様に、同じユニット数で、層数を増やしても精度が良くなるとは限らない。
- 5) 今回の検討では、ニューラルネットワークの構成を決めるはっきりとした根拠は求められないが、図-A2.1で示されるように、入力情報と教師信号の間にある程度の線形関係が見いだされるような場合には複雑なネットワークは必要ないと思われる。

従って、本論では、線形関係がみられるようなデータ群に対する学習については、中間層数1層、中間層のユニット数は外挿性が最も良かった入力パラメータの2.5倍のユニット数でニューラルネットワークを構成する事にする。

4. 打ち切り誤差に関する検討

打ち切り誤差による学習精度を検討する。

(1) ニューラルネットワークの構成

3. の考察に基づき、中間層1層、中間ユニット数15の図-A2.4に示すニューラルネットワークを使用する。

(2) 学習データ

学習データは、1. 項で述べた12個の学習データ(ST12)を使用する。

(3) 学習方法・学習回数

学習は、(2)で選択した学習データを図-A2.4に示す階層型ニューラルネットワークに、6個の入力値と1個の教師信号とを1セットにして学習させた。

重み更新係数は2. 項で考察したように安定性のよい $\eta = 0.10$, $\alpha = 0.95$ を使用した。

打ち切り誤差は下記の5ケースを使用した。

- ① 0.01、② 0.005、③ 0.001、④ 0.0005、⑤ 0.0001

学習ケース毎の学習回数を以下に示す。

表-A2.16 層数・ユニット数にたいする学習回数

	打ち切り誤差				
	0.01	0.005	0.001	0.0005	0.0001
学習回数	172	264	458	597	945

(4) 推定結果

各打ち切り誤差毎に推定した平均建物重量と実際の平均建物重量とを比較した表を表-A2.17, 18に示す。

表-A2.17 打ち切り誤差に対する推定値/実際値の検討

	推定値	打ち切り誤差				
	実際値	0.01	0.005	0.001	0.0005	0.0001
内挿性	最大値	1.37	1.42	1.55	1.61	1.67
	最小値	0.65	0.60	0.55	0.55	0.53
	平均値	0.98	0.97	0.96	0.96	0.95
	標準偏差	0.19	0.21	0.23	0.24	0.25

表-A2.18 打ち切り誤差に対する推定値/実際値の検討

	推定値 / 実際値	打ち切り誤差				
		0.01	0.005	0.001	0.0005	0.0001
外 挿 性	最大値	2.15	1.62	1.30	1.32	1.39
	最小値	0.73	0.75	0.77	0.75	0.71
	平均値	1.07	0.99	0.98	1.00	1.01
	標準偏差	0.40	0.24	0.16	0.17	0.21

また図-A2.8に打ち切り誤差の違いによる推定値と実際値とを比較した図を示す。

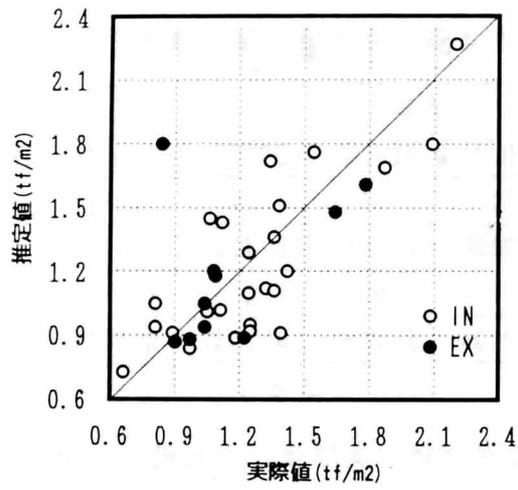
図中横軸は、実際の平均建物重量値、縦軸は推定した平均建物重量値を示す。

図中 ○印は内挿性、●印は外挿性を示している。

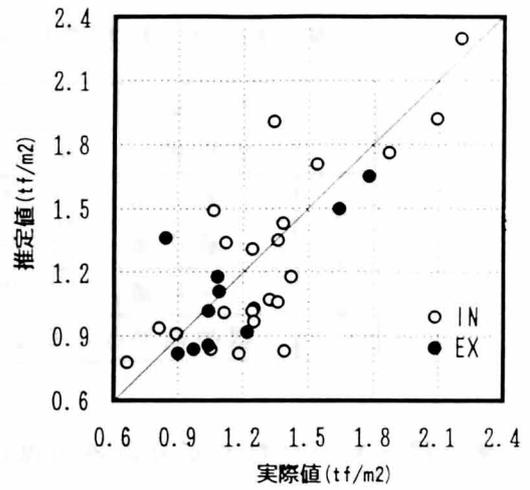
(5) 考察

- 1)内挿性については、打ち切り誤差0.01より小さくするほど精度は悪くなっている。
- 2)外挿性については、打ち切り誤差0.001までは、精度が良くなるが、それより打ち切り誤差を小さくすると精度はかえって悪くなる。
- 3)この現象は、過剰学習と言われ、誤差逆伝搬法に基づく階層型ニューラルネットワークの問題点となっている。
- 4)平均建物重量の推定に際して、打ち切り誤差は1),2)より実用上0.001で充分であると思われる。

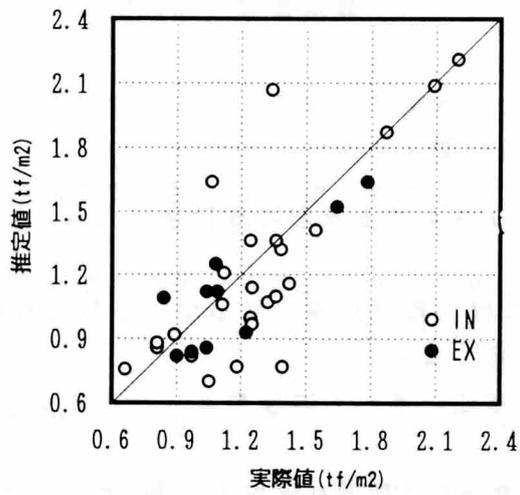
資料-2 ネットワークの構成検討



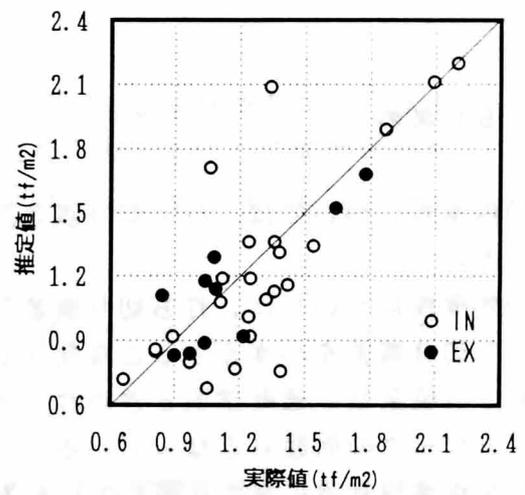
誤差 0.01



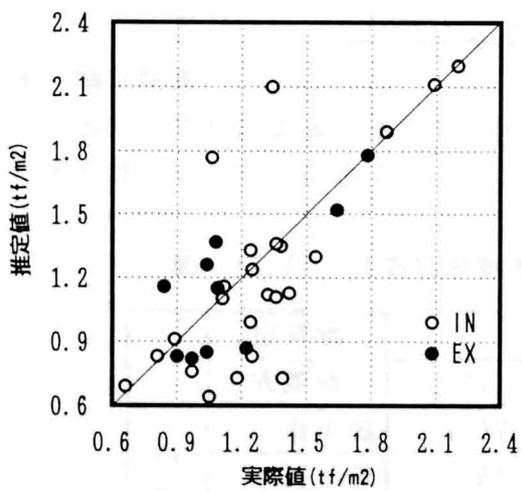
誤差 0.005



誤差 0.001



誤差 0.0005



誤差 0.0001

図-A2.8 打ち切り誤差に対する検討

5. 線形重回帰分析との比較

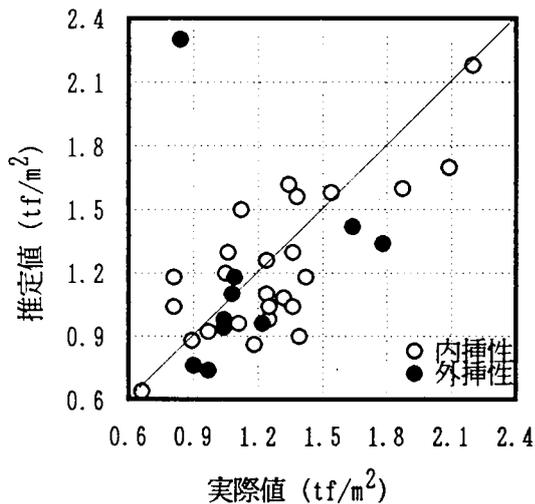
統計的予測手法として重回帰分析³⁾がある。線形重回帰分析では、入力パラメータ6個の場合、出力値は下式で表される。

$$A_w = a_0 + a_1 \cdot IN_1 + \dots + a_6 \cdot IN_6 \quad (A2.2)$$

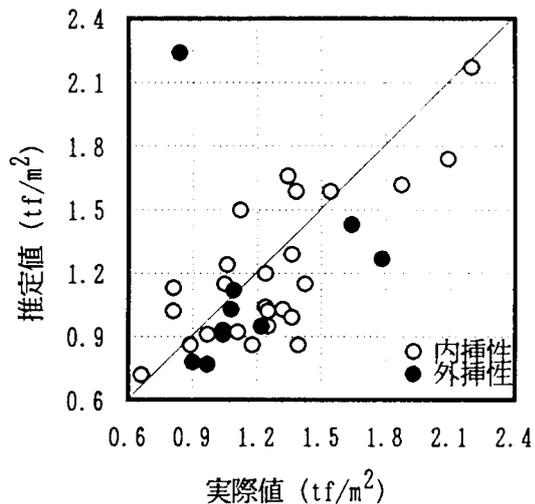
a_0, \dots, a_6 : 偏回帰係数

この式は(2.1)式から推測されるように、入出力関数を $F(x) = x$ とした場合の中間層が無いニューラルネットワークと等価である。図-A2.9に3章で述べた学習ケースST18にたいして、重回帰分析による推定値と実際値との関係、また、中間層が無いニューラルネットワークによる推定値と実際値との関係を示す。重回帰分析は、統合型表計算ソフトExcel⁴⁾を使用した。図-A2.9より重回帰分析と中間層の無いニューラルネットワークの結果は、ほぼ一致していることがわかる。

重回帰分析で精度をあげるためには、高度な数式を扱う非線形回帰分析を行うか、入力パラメータの見直しを行う必要がある。しかし、ニューラルネットワークでは、中間層の層数やユニット数を変えることによって精度をあげることができ、実用性が高い。



(a) 回帰分析による



(b) 中間層無しニューラルネットワーク

図-A2.9 重回帰分析と中間層の無いニューラルネットワークとの比較

【参考文献】

- 1) Rumelhart, D., Hinton, G. and Williams, R.; Learning representations by back-propagation errors, Nature 323, pp.533-536, 1986
- 2) 八名和夫、鈴木義武、“ニューロ情報処理技術”、海文堂
- 3) 奥野忠一・久米均・芳賀敏郎・吉澤正「多変量解析法」 日科技連
1973年2月 pp.25-157.
- 4) Excelは米国マイクロソフト社の登録商標。

資料 - 3 記号一覧

【第1章】

A_i	: 地震層せん断力係数の建築物の高さ方向の分布を表す係数
D_s	: 構造特性係数
E	: 教師信号と出力値の2乗誤差の総和
$f(x)$: 入出力関数
F_c	: コンクリートの圧縮に対する材料強度 (kgf/cm ²)
$R C$: 鉄筋コンクリート構造物
S	: 鉄骨構造物
$S R C$: 鉄骨鉄筋コンクリート構造物
w_{ij}	: ユニット i, j 間の重み係数
w_{0j}	: ユニット j のしきい値
$\Delta w_{ij}[n]$: n ステップにおける重み係数の修正量
η	: 学習速度を決める重み更新係数
α	: 学習速度を決める重み更新係数

【第2章】

a_i	: 偏回帰係数
A_w	: 出力値
$E[\alpha]$: ネットワークのある状態 α における評価関数
$F(x)$: ユニットの入出力特性
n	: 学習サイクルを表すパラメータ
mN	: m 層のユニットの数
w_i	: ユニットの重み係数
${}_m w_{ij}$: m 層の i 番目のユニットへの重み係数
$w_i[\alpha]$: 状態 α でのユニットの重み係数
w_0	: バイアス
x_i	: ユニットへの入力値、説明変数
$x_i[\alpha]$: 状態 α でのユニットへの入力値
${}_m x_i$: m 層の i 番目のユニットの入力の総和
y	: 出力値、目的関数
${}_m y_j$: m 層の j 番目のユニットの出力
η	: 学習速度を決める重み更新係数
α	: 学習速度を決める重み更新係数
θ	: ユニットでのしきい値

【第3章】

AC	: 地上部の柱1本当たりの負担面積	(m^2)
A_i	: i 層の床面積 (m^2)	$i=1 \sim N_{zu}$
AW	: 地上部の床面積当たりの平均建物重量	(tf/m^2)
f_i	: i 層の代表的な仕上げ荷重	(kgf/m^2)
H_i	: i 層の階高	(m)
IN1, ..., IN6	: 入力パラメータ	
LD	: 地上部の用途係数	(kgf/m^2)
LD_i	: i 層の用途係数	(kgf/m^2)
LP_i	: i 層の建物外周長さ	(m)
LS_i	: i 層の代表的な地震時積載荷重	(kgf/m^2)
N_{zu}	: 地上層の層数	
NC_i	: i 層の柱本数	
OUT	: 教師信号	
RP	: 地上部の平面形状特性	
RST	: 地上部構造種別係数	
RW	: 地上部の耐力壁の存在率	
st_i	: i 層の構造種別係数	$i=1 \sim N_{zu}$
ST6, ..., ST25	: 学習ケース名称	
SX_i	: i 層のX方向の全スパン数	
SY_i	: i 層のY方向の全スパン数	
WSX_i	: i 層のX方向の耐力壁が存在するスパン数	
WSY_i	: i 層のY方向の耐力壁が存在するスパン数	
W_i	: i 層の建物地震時層重量	(tf)
η	: 学習速度を決める重み更新係数	
α	: 学習速度を決める重み更新係数	
σ	: 標準偏差	

【第4章】

A_i	: i 層の床面積 (m^2)	$i=1 \sim N_{zu}$
a_1	: 地上部構造種別係数の全データ平均値 (=1.16)	
a_2	: 全データの層数の平均値	
a_3	: D_s が最大となる層の階高の全データの平均値	
a_4	: 当該方向の平均スパン長の平均値	
a_5	: 当該方向の連層壁の存在率の平均値	
a_6	: 当該方向のせん断壁の存在率の平均値	
B A ~ B C	: 筋かい材の種別	
D	: 柱のせい	(cm)
D_s	: 構造特性係数	

資料 - 3 記号一覧

E	: 教師信号と出力値の2乗誤差の総和	
Fc	: コンクリートの材料強度	(kgf/cm ²)
F	: 筋かい材の基準強度	(tf/cm ²)
F A ~ F D	: 柱群種別	
H	: D s が最大となる層の階高	
h0	: 柱のうちのり高さ	(cm)
IN1, .., IN6	: 入力パラメータ	
L	: 当該方向建物の長さ	(m)
sM0	: 鉄骨断面の曲げ耐力	(tfm)
M0	: SRC断面としての曲げ耐力(N=0)	(tfm)
N	: メカニズム時の軸方向荷重	(tf)
Ns	: 当該方向スパン数	
Nzu	: 地上層の層数	
N0	: SRC断面としての最大圧縮耐力	(tf)
OUT	: 教師信号	
pt	: 引っ張り鉄筋比	
S	: 当該方向対象層の全スパン数	
sti	: i層の構造種別係数	
ST13, .., ST33	: 学習ケース名称	
W A ~ W D	: 壁種別	
Wrs	: 当該方向対象層の連層壁の存在するスパン数	
Wss	: 当該方向対象層のせん断壁の存在するスパン数	
βu	: 耐力壁または、筋かい材のせん断力分担率	
$\sigma 0$: 崩壊メカニズム時の軸方向応力度	(kg/cm ²)
$\sigma 1$: 地上部構造種別係数の全データ標準偏差(=0.16)	
$\sigma 2$: 全データの層数の標準偏差	
$\sigma 3$: D s が最大となる層の階高の全データの標準偏差	
$\sigma 4$: 当該方向の平均スパン長の標準偏差	
$\sigma 5$: 当該方向の連層壁の存在率の標準偏差	
$\sigma 6$: 当該方向のせん断壁の存在率の標準偏差	
τu	: 崩壊メカニズム時の平均せん断応力度	(kgf/cm ²)
λe	: 筋かい材の有効細長比	
η	: 学習速度を決める重み更新係数	
α	: 学習速度を決める重み更新係数	

【第5章】

B	: 壁長さ	
Fc	: コンクリートの圧縮に対する材料強度	(kgf cm ²)
H	: 連層壁の壁高さ	
IN1, .., IN8	: 入力パラメータ	
iz	: 対象としている壁の下階から数えた層位置	
jsl	: 対象層に対して、下層にある独立壁の相対層位置	
jsu	: 対象層に対して、上層にある独立壁の相対層位置	
jtl	: 対象層に対して、下層にある取り付き壁の相対層位置	
jtu	: 対象層に対して、上層にある取り付き壁の相対層位置	
jz	: 対象層位置 (上層より)	
Lwi	: 個々の壁の長さ	(m)
ntw	: 対象層に取り付き壁が存在する壁枚数	
nsw	: 対象層に独立壁が存在する壁枚数	
Nz	: 連層壁の層数	
OUT	: 教師信号	
Qw	: 壁の必要せん断耐力 (tf)	
rw	: 連層壁の負担せん断応力度比	
S	: 当該方向対象層の全スパン数	
tw	: 耐力壁の壁厚	
Wrs	: 当該方向対象層の連層壁の存在するスパン数	
η	: 学習速度を決める重み更新係数	
α	: 学習速度を決める重み更新係数	
τ	: 耐震壁のせん断応力度	
τ_0	: 独立壁、取付き壁の無い連層壁のみの時の基本せん断応力度	
$\Delta \tau$: 独立壁・取付き壁の存在により派生する補正せん断応力度	
τ_s	: 独立壁のせん断応力度	(τ / \sqrt{Fc})
τ_t	: 取り付き壁のせん断応力度	(τ / \sqrt{Fc})
τ_w	: 連層壁のせん断応力度	(τ / \sqrt{Fc})
τ_{wi}	: 個々の壁の負担せん断応力度	
$\Delta \tau_s$: 独立壁の補正せん断応力度	(τ / \sqrt{Fc})
$\Delta \tau_t$: 取り付き壁の補正せん断応力度	(τ / \sqrt{Fc})
$\Delta \tau_w$: 連層壁の補正せん断応力度	(τ / \sqrt{Fc})

【第6章】

Ac	: 柱1本当たりの荷重負担面積	(m^2)
Ai	: 各階地震層せん断力係数の建築物の高さ方向の分布を表す係数	
Ari	: 各階床面積	(m^2)
at	: 引張り鉄筋断面積	(cm^2)
at0	: 主筋1本当たりの断面積	(cm^2)
atsb	: スラブ筋断面積 (両側スラブ筋 1m考慮)	(cm^2)
ats0	: せん断補強筋の1本当たりの断面積	(cm^2)
atw	: せん断補強筋断面積	(cm^2)
bi	: 各階の梁幅・柱幅 (X方向加力の場合Dy Y方向加力の場合Dx)	
bfi	: 各階の梁・柱フランジ幅	(cm)
b'i	: 各階の鉄骨フランジ位置のコンクリート有効幅 $b'i = bi - bfi$	
Cf	: 柱耐力割り増し係数 $Cf = 1.30$	
Cfc	: 柱フェイス耐力/節点耐力 $Cfc = 0.8$	
Cfg	: 梁のフェイス曲げ耐力/節点曲げ耐力	
C0	: 標準せん断力係数	
c1	: 梁成と梁幅の比	
c2	: 引張り鉄筋有効成と梁成との比	
d	: 引張り鉄筋有効成 $d = c2 * D$	(cm)
Di	: 各階の梁成・柱成 (X方向加力の場合Dx Y方向加力の場合Dy)	
djl	: 鉄筋重心間距離 $= (D - 13)$	(cm)
Dsx, Dsy	: X方向、Y方向のDs値	
sDi	: 各階の鉄骨成	(cm)
FB	: 基礎幅	(cm)
Fc	: コンクリートの材料強度	(kgf/cm^2)
FD	: 基礎奥行き	(cm)
Fes	: 形状係数	
FH	: 基礎高さ	(cm)
Flgx1, Flgy1	: X, Y方向の連層壁に対する境界梁の関係 (外端部か内部か)	
Flgx2, Flgy2	: X, Y方向連層壁の存在位置 (外フレームか内フレームか)	
fpL	: 単位面積当たりの杭許容長期支持力	(tf/m^2)
h	: 地盤面からの建物高さ	(m)
Hbi	: 地下部地盤からの距離	(m)
Hi	: 各階階高	(m)
j	: 曲げ材の応力中心間距離 $j = 0.875 * d$	(cm)
KCi	: 各階柱本数	
Kcxi, Kcyi	: 各階X方向、Y方向の耐力壁付きでない柱本数	
LDi	: 各階建物用途	
LF	: 杭長さ	(m)
Li	: 各階建物外周長さ	(m)

Lx	: X 方向建物長さ	(m)
Lx0	: X 方向標準スパン長	(m)
Ly	: Y 方向建物長さ	(m)
Ly0	: Y 方向標準スパン長	(m)
bM _{cxi} , bM _{cyi}	: 各階 X 方向、Y 方向の柱の必要曲げ耐力 (柱脚部)	(tfm)
uM _{cxi} , uM _{cyi}	: 各階 X 方向、Y 方向の柱の必要曲げ耐力 (柱頭部)	(tfm)
uM _{gi}	: 各階の梁の実際曲げ耐力 (上端)	(tfm)
bM _{gi}	: 各階の梁の実際曲げ耐力 (下端)	(tfm)
M _{jxi} , M _{jyi}	: 各階 X 方向、Y 方向の節点必要曲げ耐力	(tfm)
n _{bxi} , n _{b_{yi}}	: 各階柱 X, Y 方向主筋本数	
N _{ci}	: 各階の柱長期軸力	(tf)
N _F	: 基礎設計用長期軸力	(tf)
N _{gxi} , N _{gyi}	: 各階 X 方向、Y 方向の梁本数	
N _p	: 杭本数	
n _{strxi} , n _{stryi}	: 各階柱 X, Y 方向スターラップ本数	
n _{tui} , a _{tui}	: 各階の梁上主筋本数、上主筋断面積	
n _{tbi} , a _{tbi}	: 各階の梁下主筋本数、下主筋断面積	
N _{uxi} , N _{uyi}	: 各階 X 方向、Y 方向の終局軸力	(tf)
N _v	: 支持地盤の N 値	
N _{w_{xi}} , N _{w_{yi}}	: 各階 X 方向、Y 方向の連層壁枚数	
N _{w_{sxi}} , N _{w_{syi}}	: 各階 X 方向、Y 方向の独立壁枚数	
N _{w_{txi}} , N _{w_{tyi}}	: 各階 X 方向、Y 方向の取り付け断壁枚数	
N _x	: X 方向スパン数	
N _y	: Y 方向スパン数	
N _z	: 建物層数	
N _{zu}	: 建物地上部層数	
p _{iti}	: 各階のせん断補強筋ピッチ	(cm)
p _t	: 目標引張り鉄筋比	
p _w	: せん断補強筋比	
p _{wh}	: 壁の必要水平せん断補強筋比	
Q _{cxi} , Q _{c_{yi}}	: 各階 X 方向、Y 方向の柱 1 本の必要せん断耐力	(tf)
Q _{gxi} , Q _{g_{yi}}	: 各階 X 方向、Y 方向の梁必要せん断耐力	(tf)
Q _{udxi} , Q _{ud_{yi}}	: 各階 X 方向、Y 方向の地震力によって各階に生じる水平力	(tf)
Q _{unxi} , Q _{un_{yi}}	: 各階 X 方向、Y 方向の必要保有水平耐力	(tf)
Q _{wxi} , Q _{w_{yi}}	: 各階 X 方向、Y 方向の壁負担せん断耐力	(tf)
r _{Qui}	: 各階の R C 部終局せん断力	(tf)
R _a	: 杭耐力	(tf)
R _L	: 杭設計用長期軸力	(tf)
R _p	: 杭径	(cm)
r _s	: 鉄骨最大曲げ分担率	

資料 - 3 記号一覧

rsb	: スラブ筋を考慮した場合の引っ張り鉄筋比の増大率	
Rt	: 振動特性係数	
rub	: 梁下主筋の本数 / 上主筋の本数	
spc	: 圧縮フランジの鉄骨比	spc = 0.01
sti	: 各階構造種別	
T	: 建物固有周期	(sec)
Tc	: 地盤の固有周期	(sec)
tfi	: 各階のフランジ厚	(cm)
twi	: 各階壁厚	(cm)
W	: 平均建物重量	(tf m ²)
WHx, WHy	: X方向、Y方向の連層壁高さ	(m)
Wi	: 各階の建物重量	(tf)
WLx, WLy	: X方向、Y方向の連層壁長さ	(m)
wti	: 各階のウェブ厚	(cm)
yi	: 各階反曲点位置	
Z	: 地震地域係数	
τ	: 目標せん断応力度	(kgf/cm ²)
τ_{sxi}, τ_{syi}	: 各階X方向、Y方向の独立壁の負担せん断応力度	
τ_{txi}, τ_{tyi}	: 各階X方向、Y方向の取り付き壁の負担せん断応力度	
τ_{0xi}, τ_{0yi}	: 各階X方向、Y方向の連層壁基本せん断応力度	
$\Delta \tau_{xi}, \Delta \tau_{yi}$: 各階X方向、Y方向の連層壁補正せん断応力度	
σ_l	: 柱の目標軸応力度 (長期)	(kgf/cm ²)
σ_u	: 柱の目標軸応力度 (終局)	(kgf/cm ²)
σ_{wh}	: 壁の水平せん断補強筋の材料強度	(kgf/cm ²)
σ_{wy}	: せん断補強筋の材料強度	(kgf/cm ²)
σ_y	: 引張鉄筋材料強度	(kgf/cm ²)
$s\sigma_y$: 鉄骨材料強度	(kgf/cm ²)

【謝辞】

本研究をまとめるに当たり、多くの方々のご指導、御鞭撻をいただきました。

河村廣先生（神戸大学教授）には、新しい情報処理技術であるニューラルネットワークの御指導をいただき、本研究への直接的なヒントをいただきました。

また、研究を進めるに当たっては、投稿論文の内容から表現法まで懇切丁寧な御指導とあたたかい励ましをいただきました。本論文をまとめることができましたのも、ひとえに河村廣先生のおかげであり、感謝にたえません。

表俊一郎先生（元九州大学教授、元九州産業大学学長）、花井正実先生（元九州大学助教授、元広島大学教授、現近畿大学教授）、牧野稔先生（元九州大学教授、現東和大学教授）には、筆者が、九州大学学部生として研究室に配属以来、今日まで種々の機会に研究心を持つことの大事さを教えていただきました。民間企業に就職しながら、このような論文をまとめることができたのも、上記先生方のおかげであります。特に花井先生には、本論文をまとめるに当たっての御指導と励ましもいただきました。各先生方に心から感謝いたします。

松村和雄先生（九州大学助教授）、前田潤滋先生（九州大学助教授）には、筆者の九州大学での卒業論文と修士論文を直接指導して頂きました。筆者は、これらの論文により初めてコンピュータに接し、コンピュータの可能性に興味を抱きました。本論文での「コンピュータによる知識処理」のベースになっています。両先生の御指導がなければ、コンピュータとはかかわっていなかったかも知れません。心より感謝いたします。

谷明勲先生（神戸大学助教授）には、ニューラルネットワークについて直接的な御指導をいただきました。また、本論文をまとめるに当たって、様々な助言をいただきました。心より感謝いたします。

本論文の作成に当たり、辻文三先生（神戸大学教授）、金谷弘先生（神戸大学教授）、および北村泰寿先生（神戸大学教授）には、貴重な時間を割いていただき、本論文の内容に関する貴重な御指摘をいただきました。心から感謝いたします。

また、民間企業にいながら、このような研究が出来ましたのは株式会社フジタの多くの方々のあたたかい御理解と御指導のおかげです。入社以来多くのすばらしい上司の方々に恵まれました。五味晴人氏、鈴木孝明氏、関嘉男氏、四方正武氏、安藤欽也氏、松林隆道氏、南川吉孝氏に感謝いたします。また、本論文を書く許可をいただきました、森脇友紀氏、奥山正明氏に感謝いたします。

また、陰ながら御協力いただきました設計技術部の諸氏に感謝いたします。

1994年8月

堤 和敏