

8. 耐震設計法について

8. 耐震設計法

8.1 耐震設計基準の変遷

我国の耐震設計基準は、地震災害の歴史と共に変遷を遂げてきている。

すなわち、大正12年の関東地震、新潟地震（昭和39年）、十勝沖地震（昭和43年）、宮城沖地震（昭和53年）等がきっかけとなって、基準の見直しが行われてきた。

土木構造物の耐震設計基準は、当該関係機関によって定められており、基本的には現在も震度法による場合が多い。この方法は、質量に加速度を乗じて求められる地震時慣性力を構造物に作用させて安全性の照査を行うもので、設計水平震度は概ね0.10～0.30程度、鉛直震度は設計水平震度の2分の1であった。このうち、鉛直震度は、設計に与える影響が一般に小さいと考えられていたこと、強震観測の結果から水平加速度の最大値と鉛直加速度の最大値が同時刻に発生する機会は少ないこと、鉛直加速度は水平加速度の半分以下の場合が多いこと、及び設計計算が煩雑となることなどの理由から、昭和46年に刊行された「道路橋耐震設計指針」以来考慮しなくなった。

また、この指針では、新たに修正震度法という考え方を提示している。修正震度法は、構造物固有の周期に対する加速度応答倍率を求め、これを震度法で用いられていた地盤震度に乗じて設計震度とするものであり、地震動や構造物の動的な特性を考慮した設計法として、高橋脚または長径間の道路橋の耐震設計に用いられている。

昭和53年には、建設省から土木構造物全般にわたる耐震設計の手法・条件を統一的にまとめた「新耐震設計法（案）」が刊行された。これには、構造物に時刻歴地震波を入力してその応答（振動モードや断面力等）を計算する動的解析の考え方も盛り込まれた。また、部材のねばり強さを表す指標としてじん性率というものも提示された。この基準以降の道路や鉄道の耐震設計では、例えば帯鉄筋量等の柱のじん性、曲げ耐力とせん断耐力との関係などの耐震的配慮がなされるようになった。この基準は構造物の耐震性能を判断する場合の一つの境目と言えよう。その後、平成2年の「道路橋示方書」より地震時保有水平力の照査が行われるようになり、現在に至っている。

8.1.1 道路橋

わが国の道路橋の耐震設計の基準化の端緒は、1923年（大正12年）の関東地震を契機に、内務省土木局から「橋台・橋脚の耐震化の方法」として震度法を適用するよう通達されたものである。具体的には、1926年（大正15年）同局が「道路構造に関する細則案 第2章橋梁」で、設計震度を規定したものである。水平震度は、地震の頻度と地盤条件などから0.10～0.30とし、鉛直震度は水平震度の1/2であった。

昭和14年には0.10～0.40、昭和31年には0.10～0.35と水平震度は見直されたが、昭和39年に発生した新潟地震では、地盤によって液状化が生じた場合には、地震影響として慣性力を考慮するだけでは耐震設計としては不十分であることが認識された。

1960年代半ばから高速道路の本格的な建設が始まると共に、工事の機械化により大規模な橋梁も建設されるようになった。このような橋梁に対する合理的な設計法を確定することや新潟地震の貴重な経験に基づく落橋防止装置の必要性などが改めて指摘されるようになり、1971年（昭和46年）には、わが国の道路橋の耐震設計規定として初めて「道路橋耐震設計指針」が制定された。この中では、高橋脚や長径間の橋に対しては、上部工の構造を考慮して橋脚の固有応答を求め、その応答により水平震度を変化させる修正震度法を新たに規定した。また液状化の判定方法や落橋防止装置他の構造細目が示された。

昭和53年には、建設省から土木構造物全般にわたる耐震設計の手法・条件を 統一的にまとめた「新耐震設計法（案）」が刊行された。また、部材のねばり強さを表す指標としてじん性率というものも提示された。同年6月宮城沖地震が発生したが、被害が橋脚躯体のラーメン隅角部や主鉄筋段落し部、支承部などに現れた。これは基礎の耐震性能が向上し、300 gal を超える地震であったにも係わらず基礎の沈下傾斜といった残留変形が現れなかった反面であると言えよう。

その後、1980年（昭和55年）に鋼橋とコンクリート橋が一本化され、道路橋示方書の改訂が行われた。この中で、鉄筋コンクリートの許容せん断応力度の低減と主鉄筋段落し部の位置に関する新たな規定やRC橋脚の地震時変形性能の照査方法などが定められた。

1990年（平成2年）の改訂では、

- ①慣性力を振動単位毎に計算し、連続橋の耐震計算法の充実を図った。
- ②RC橋脚の地震時変形性能の規定を地震時保有水平耐力による照査法に改めた。
- ③従来明確な規定のなかった動的解析について、用いる地震入力波を設定すると共に、動的解析モデルや安全性の照査法の規定を設けた。

この中で、「橋の耐震設計は、地震に対する道路交通の安全性の確保を目的とし、比較的生じる可能性の高い中規模程度の地震に対しては構造物としての橋の健全性が損なわれず、大正12年の関東地震のような稀に起こる大きな地震に対しても落橋などが生じないことを目標として行う」という一文が加わった。

8.1.2 港湾施設

わが国の港湾施設の耐震設計に関する規定は1950年（昭和25年）に刊行された「港湾工事設計示方要覧」が初めてである。その中で地震時土圧は松尾の式とし、参考に物部の式を示すとともに、設計水平震度は、地盤の良否、構造物の重要性、地理的状況で0.05～0.30を採用している。ついで、1959年（昭和34年）には「港湾工事設計要覧」が刊行され、「港湾構造物設計基準 1967年（昭和42年）」では設計水平震度＝地域別震度×地盤種別係数×重要度係数と定義された。

1979年（昭和54年）には上記基準が全面的に改正され「港湾の施設の技術上の基準・同解説」として刊行された。また、1989年（平成元年）には、最新の内容に集大成され現在に至っている。

港湾構造物の耐震設計は、震度法、応答変位法、動的解析法のいずれかによるか、またはこれらを組み合わせて行う。また、水中の土圧の計算には見掛けの震度を使用する。

基準で使われている設計震度は、多数の建設実績や過去の被災経験をふまえた工学的判断に基づいて定められており、地盤の最大加速度とは一致していない。

野田、北島、福田らの文献によると次式が推定される。

$$\begin{aligned}k_H &= \alpha / g & \alpha \leq 200 \text{ gal} \\k_H &= 1/3 \cdot (\alpha / g)^{1/3} & \alpha > 200 \text{ gal}\end{aligned}$$

8.1.3 鉄道構造物

鉄道構造物の耐震設計規定については道路橋に比べ歴史は古い。

耐震設計の最初の規定は大正8年に定められた。その後多くの改訂が行われ現在に至っている。国鉄の基準は昭和6年に「鉄筋コンクリート標準示方書」（土木学会）が制定されて以来、概ねこの基準に準拠していた（ $k_H = 0.20$ で $k_V = 0.10$ ）。

昭和30年の「国鉄建造物設計標準」（土木学会編）では地域別係数が導入され、 $k_H = 0.15 \sim 0.30$ 、必要により $k_V = 1/2 k_H$ であった。昭和45年の改訂では、地域別・地盤（深さ）別・線区別他係数により求めるようになり、 $k_H = 0.10 \sim 0.30$ で必要により $k_V = 1/2 k_H$ であった。

宮城沖地震の教訓をふまえ、昭和54年には初めて「耐震設計指針（案）」が出された。ここでは、線区別係数が廃止され、列車速度別許容変位量が設定された。また、修正震度法を導入し、構造物の固有周期が0.3秒未満は震度法で、0.3秒以上は構造物の応答特性に応じた補正係数をかけて、 $k_H = 0.12 \sim 0.25$ で、必要により $k_V = 1/2 k_H$ であった。さらに、耐震に関する構造細目で柱の帯鉄筋比は0.2%以上使用する規定が示された。また、基礎の設計に、地震時の地盤変位を考慮する応答変位法が導入された。道路橋と同様にこの基準がひとつの境目となっている。

その後、上部工では限界状態設計法が研究され、平成3年に成文化された。

8.1.4 線状地中構造物

従来、地中構造物は地震に対してはかなり安全であるといわれ、耐震設計はほとんど実施されていなかったのが実状である。しかしながら、1960年代後半からの沈埋トンネル計画に伴い、耐震設計の必要性が問われるようになった。特に、米国サンフランシスコのBART沈埋トンネル計画で応答変位法が提案され、線状地中構造物の耐震設計法に関する検討方法の第一歩となった。応答変位法は、トンネル軸方向の地震時地盤変位を正弦波と仮定し、この変位をトンネルと地盤との相互作用を表す地盤ばねを介してトンネルを評価した弾性床上の梁に入力することでトンネルの応答を算出する方法である。

現在の線状地中構造物に関する耐震基準は応答変位法が原則的に使われているが、地盤や構造物が複雑に変化するような場合には動的解析による照査をすすめているものも多い。

各施設別の耐震基準を列記すると以下のようになる。

- ①「石油パイプライン技術基準」1973年（昭和48年）
- ②「沈埋トンネル耐震設計指針（案）」1975年（昭和50年）
- ③「水道施設耐震工法指針・解説」1979年（昭和54年）
- ④「高圧ガス導管耐震設計指針」1982年（昭和57年）
- ⑤「中低圧ガス導管耐震設計指針」　　　　〃
- ⑥「共同溝耐震設計要領」1984年（昭和59年）

また、新潟地震で話題になった液状化による浮き上り問題は、このような構造物に特有のものであるが、その液状化の判定方法や浮き上りに対する安定の照査方法について具体的に示されているのは、「共同溝耐震設計要領」だけである。

8.1.5 ダム

ダムの耐震設計には、「河川管理施設等構造令施行規則 1976年（昭和51年）」に、ダムの種類、地域の区分に応じて、 $k_H = 0.12 \sim 0.24$ を水平震度とする震度法が用いられている。

1981年（昭和56年）には改訂され地域区分が、強・中・弱震帯の3つとなった。

動的解析法は導入されていないが、諸外国の趨勢や合理的かつ実際的な設計が求められている現状から震度法のみでは不十分であり、必要な場合には動的解析を安全確認のため適用している。

8.1.6 原子力発電所

原子力発電所の耐震設計では、「建築基準法」による静的震度を施設の重要度に応じて割り増す静的地震力と基準地震動S1とS2による動的地震力による評価とを行う。なお、S2には活断層による地震やM6.5クラスの直下型地震も想定している。

具体的には、原子力安全委員会が1981年（昭和56年）に定めた「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針について」と原子炉安全専門審査会が1978年（昭和53年）に

定めた「原子力発電所の地質、地盤に関する安全審査の手引」を基本に、詳細設計は、日本電気協会が1984年（昭和59年）に「原子力発電所耐震設計技術指針」（1987年（昭和62年）改訂）定めている方法に従って行う。

8.1.7 火力発電・変電・送配電施設

火力発電所については、「建築基準法」や「高圧ガス設備等耐震設計基準」を基に、日本電気協会が1983年（昭和58年）に「火力発電所の耐震設計指針」を定めている。変電施設については、同協会が1980年（昭和55年）に定めた「変電所等における電気設備の耐震対策指針」を用いて耐震設計を行っている。1978年（昭和53年）の宮城沖地震による仙台変電所の被害は変電機器の脆さ（碍子等の脆性材料）を露呈した。この教訓を生かして変電機器の特性を考慮した動的設計法が確立されている。

送配電施設は地震力によって決まることが少ないが、場合によっては「送電用支持物設計標準」により、建築基準法の震度を用いて検討する。超々高圧送電用鉄塔のような大型鉄塔では、電力会社が「UHV送電用鉄塔・基礎耐震設計指針・同解説」を社内基準として定め、動的解析により安全性の照査を行っている。

8.1.8 地下タンク

耐震設計で準拠すべき指針として、「地下貯油施設技術指針（土木学会）」1980年（昭和55年）、「LNG地下式貯槽土木設備設計指針（電気事業連絡会）」1977年（昭和52年）、「LNG地下式貯槽指針（通産省）」1981年（昭和56年）、がある。地下タンクの耐震設計には、震度法、応答変位法および動的応答解析法が用いられている。

8.1.9 地上貯槽

地上貯槽の耐震設計は、「危険物の規制に関する技術上の基準の細目を定める告示」（自治省告示119号 昭和58年）および「高圧ガス設備等耐震設計基準」（通産省告示515号 昭和56年）に準拠し、修正震度法を用いて以下の3項目について安全性を照査する。

- ①短周期地震動の影響
- ②やや長周期地震動に対する内容液のスロッシングの影響
- ③基礎および地盤の安全性