

はじめに

震災文庫 11 - 41

1995年1月17日午前5時46分、淡路島北端深さ14kmを震源とするマグニチュード7.2の兵庫県南部地震は淡路島北部から阪神地方にかけて戦後史上最大の被害をもたらした。特に神戸市を中心とする大都市圏での被害は、死者5,400名以上、負傷者約3万5千名、全半壊家屋約16万戸で、各種インフラ施設の被害を含めると損害総額10兆円に達するといわれる。先進国を襲った自然災害のうち、歴史上最大級の被害といわれるアメリカ合衆国のミシシippi-川氾濫や、昨年のノースリッジ地震の1~2兆円をはるかに凌ぐものであり、都市化を極めた大都市圏直下型ゆえの甚大被害といえる。

損害額の約半分は家屋の倒壊と主に新耐震設計法が導入される以前に建設された低中層建物など建築物の倒壊によるところが大きい。一方近代都市を支える高速道路や鉄道施設、港湾施設そしてライフラインなどインフラストラクチャーも多大な被害を被っており、直接損害額のみならずその機能が寸断されたことによる被害も甚大であった。

周知のように現在復興に向け急速に準備が進められている。防災対策についてはこれらの地域にとどまるものではなく、首都圏を中心とする国全土に波及していくことが考えられる。耐震スペックの見直し、耐震性強化策の検討など関係省庁、事業所で現在早急な対応が図られつつある。

大林組技術研究所は建築物の耐震はもとより、これらのインフラストラクチャーを対象とした上部、基礎、地中、土構造などに関する広範な耐震技術に関する研究開発を行い、ノウハウを蓄積してきた。技術研究所開設30年を迎える本年、折しも今回の大震災を迎える事になり、更なる課題を大自然から迫られることになった。本資料は各種事業所が早急な復旧はもとより、防災対策を実施される上で、また安全性の高い施設の建設を進められる上で、御参考にしていただくことを願い作成したものである。土木技術分野のうち限られた範囲ではあるが、今回の被害や問題点を概説し、現保有技術の一端を紹介させていただく。加えて今後解決すべき課題技術について現状の所見を述べさせていただく。地震防災の再整備に向け、国土創成の末端に繋がる我々の一技術を今後とも役立てて頂ければ幸いである。



00095043958

地震動

概要

今回の都市直下型地震では、震源近傍の一部の地域で、地表面水平最大加速度で600-850gal、鉛直最大加速度300-550galという一般的構造物の耐震設計基準の想定を上まわる地震動が観測された。岩盤上においても約300galという大きな水平最大加速度が観測されている。

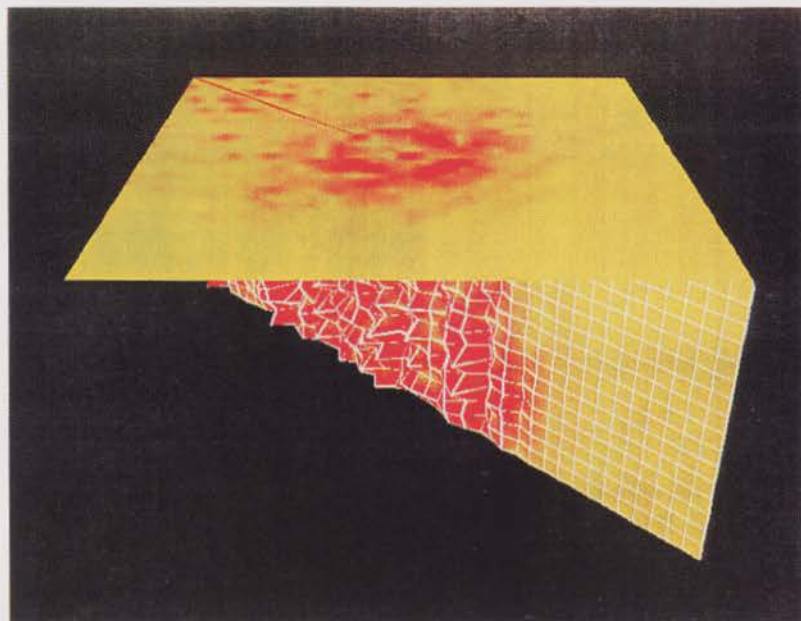
地震による被害は、活動したと推定される南西から北東に向かう断層線に沿った細長いベルト状地域に集中している。この地域は、六甲山系から発達した扇状地の縁端部に一致しており、特に被害の著しかった震度Ⅶの区域もこの地域に含まれている。地震被害調査によればこのベルト状地域内においても被害程度には局地的なばらつきがあることが指摘されている。この地域よりやや海側にある沖積地盤や埋立地では、地盤の非線形化や液状化等により観測された水平最大加速度は300-400gal程度と相対的に小さいものの、地盤の破壊により港湾施設等が甚大な被害を被っている。以上のような被害程度の地域的なばらつきは、従来より指摘されている表層地盤の硬軟に帰因する地震動増幅特性の相異によるものだけではなく、おぼれ谷、急傾斜地等の不整形地盤によるもの、活断層の破壊の方向性による地震動の地域的なばらつきによるもの、液状化や斜面崩壊にみられる地盤の破壊によるもの等多数の要因の複合的影響を受けたことが考えられる。

今回の地震で観測された最大加速度の値は、既存の距離減衰式から推定される値とほぼ一致しており、将来再びM7クラスの直下型地震が今回と同様浅い所に発生した場合にも、今回と同程度の地震動が来襲するという可能性が高く、その備えが必要である。また、種々の要因からなる地震動の増幅特性の解明を進めていくことが肝要である。



関西地震観測研究協議会、J R、気象庁、他の本震観測データにもとづき、補間・コンター解析プログラムを使用して作成した。ただし、震央付近のデータがないため震央付近を水平600galと仮定した。また、六甲山脈西北部ならびに淡路島はデータが少ないためJoyner & Booreの距離減衰式で、一部のデータを推定した。地盤種別による加速度の補正は行っていないが、コンターラインの一部を地盤種別と適合するよう微調整している。

断層地震動予測プログラムによる予測例



サイト地震動予測

点震源地震動予測プログラム

断層地震動予測プログラム

活断層 - 歴史地震による地震危険度解析システム

地震応答解析

軸対称回転体動的相互作用解析プログラム

3次元有効応力液状化解析プログラム

2次元非線形地震応答解析プログラム

2次元滑動 - 浮上り地震応答解析プログラム

不整形地盤地震応答解析プログラム

今後の課題技術

地震動評価技術

今回の地震では、地震発生直後の状況把握の遅れが、2次災害を含む被害を増大させた一因でもあろう。これは、被害を前提とした地震の観測・監視システムが十分でなかったことにも帰因している。

この点から、従来、点または局所的アレ-の形で展開している地震観測を統合し、特に基盤における観測を拡充することにより、地震発生の早期検知、被害の把握と緊急対応等に役立つ地震動モニタリング-被害想定システムの整備を計る必要がある。このシステムでは、常時においては地震動特性を解明する時の貴重な基礎資料となる地震観測データを蓄積し、地震後には構造物の被害・無被害の原因を究明するための入力地震動として有効に利用できる。

地震動は、断層から発生し上部マントルや地殻等の伝播経路をへて最終的に構造物が建設される表層地盤に到る。この間、断層から発生した波動は様々に変形し各地点で異なる揺れを生じさせる。このように複雑な地震動特性を解明するためには、活断層、伝播経路、表層地盤のそれぞれについて綿密な観測と分析にもとづく地震動評価技術を整備する必要がある。特に活断層については、活断層の破壊メカニズム、潜在的活断層による地震危険度評価、トレンチ調査等による活動時期の特定等の研究が望まれる。伝播経路、表層地盤については、不整形地盤の地震時挙動や地盤の非線形性、液状化等に関する研究が課題としてあげられる。重要構造物については、構造物の粘り強さを動力学的手法により評価して、地震時安全性評価の精度向上を計る必要がある。そのためには、歴史地震、活断層、地震動、被害事例、地盤物性等のデータベースを整備し、より信頼性の高い地盤物性と地震動を入力として地盤や構造物の挙動を忠実に再現する数値解析手法を再整備し、地震応答解析により構造物や地盤の挙動を綿密に照査する必要がある。

(問い合わせ先: 技術研究所土木第5研究室 江尻譲嗣 TEL 0424-95-0955)

地盤

被害の概要

埋め立て地盤には液状化が多発した。液状化によって埋め立て地盤は大きく沈下し、殆どの杭基礎構造物周辺には最大数10cmにも及ぶ段差が生じた。地中に埋設されたライフラインにも被害は及んでいる。港湾施設では沈下に加えて、液状化に伴う土圧の増大と側方流動によって岸壁部が大きく前面に迫り出し、クレーン施設その他にまで壊滅的な被害をもたらした。埋め立て材料として神戸層群の泥岩土砂が主体といわれる六甲アイランドより、まさ土が主体といわれるポ-トアイランドに大きな液状化被害（特に沈下）が発生している。いずれにしても、従来は液状化の可能性が低いと分類されてきた土まで液状化したのは、今回の地震力が従来にも増して大きかったためであろう。

なお、地盤改良されていた埋め立て地盤は周囲の未改良地盤より沈下が小さかったことや、比較的大きな地震力で設計されていた耐震岸壁は無被害であったことが報告されている。

仁川町や西岡本などの丘陵地では、大規模な地すべりも発生した。仁川町の地すべりは地下15~20mにある水を多く含んだ砂層の水圧が地震時に上昇し、砂層の強度が低下してすべりが生じたものといわれる。



現有対応技術

■ 液状化対策としての地盤改良技術

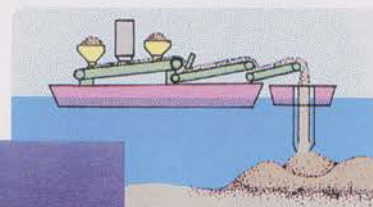
液状化対策として最も一般的な工法はサンドコンパクションパイル工法やグラベルドレーン工法であるが、当社ではそれらに加えて以下のような技術の研究開発に取り組んできた。

事前混合処理工法 (PREM 工法) : 埋立て土砂としてセメントなどの安定剤と分離防止材を事前に混合した処理土を用いることによって、安定した埋め立て地盤を造成する工法である。岸壁などの裏込材として用いた場合には土圧低減効果も大きい。大量・連続施工が可能な混合システムや、水質環境に配慮した土砂投下方式に特長がある。運輸省港湾技術研究所と民間5社との共同開発であり、これまで東京湾横断道路木更津人工島のボックスカルバ-ト下部埋立工事への適用実績がある。



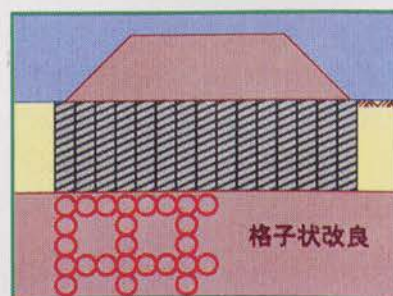
◆東京湾横断道路木更津人工島東工事

事前混合処理工法



耐震固化工法 (TOFT 工法) : 液状化地盤中にセメントなどを用いた深層混合処理工法による固化体を格子状に造成することによって、砂地盤のせん断変形を抑止し、過剰間隙水圧の発生を防止する工法である。騒音、振動が少ないため、市街地での施工や既設構造物近傍での施工が可能である。本工法は建設省土木研究所と民間4

耐震固化工法



社の共同開発であるが、深層混合処理工法としては当社独自のOVAL-DM工法やDJM工法を保有しており、その実績も多い。

■ 地盤物性の評価と非線形解析技術

土はひずみの大きさによって物性が大きく変化するうえ、地震時には液状化現象による破壊もありうる。このような物性を総合的に評価するため各種の試験装置をラインナップしている。また液状化を含む地震時の地盤挙動を詳細に予測するための非線形有効応力解析プログラム (EFFECT) も開発してきた。

■ 切土・盛土の安定対策技術

補強土工法:土中に鉄筋やジオテキスタイルといった引張強度の大きい材料を設置することによって、のり面の安定化を図る工法である。切土に対しては、多数の鉄筋を地山に打設し特殊パネルや吹き付けコンクリート等ののり面保護工と組み合わせるアースネイリング工法がある。これは地質状況や施工条件にフレキシブルに対応できるため、既設法面の補修を含めあらゆる現場条件に適用が可能である。

盛土に対しては、のり面保護工としての法枠とジオテキスタイルを組み合わせた独自のジオテキスタイル補強盛土工法の研究開発を行っている。

アースネイリング工法



今後の課題技術

液状化判定技術:今回の地震では、従来は液状化の可能性が低いと思われていた土まで液状化した。液状化の判定法は、現在いくつかの指針で規定されているが、今回の地震はそれらの規定震度より大きなものであった。今後、今回の被害の原因究明や基準の見直しといったことが進められていくであろうが、特に埋立て地盤を想定して、より広範囲な土（シルト～レキ）の液状化特性を解明していくことが重要である。また、地震力の大きさや上下動の影響についても研究を進めていく必要がある。

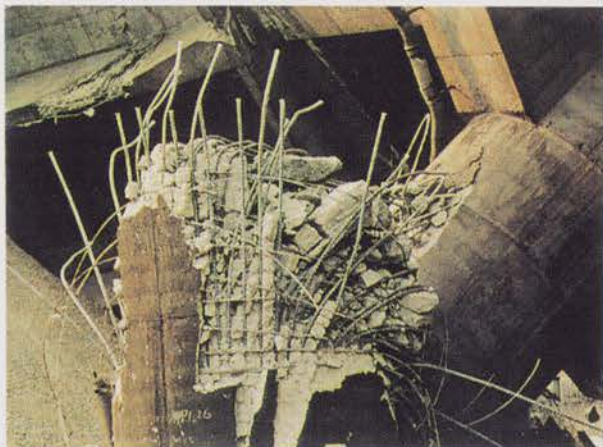
軟弱地盤上施設の被害度予測技術:港湾施設の被害はその直接被害のみではなく、機能障害による産業経済活動への波及という意味で特に影響が甚大である。港湾施設は勿論埋立て地にあるプラント諸施設の耐震安全性を検討するうえで、液状化による被害度の予測技術が重要になる。そのためには、地盤の調査・試験技術の向上や、液状化を考慮した土の構成則の体系化と水—構造物—土連成系の非線形動的解析技術のさらなる整備が必要である。このような被害度予測の定量化は、施設の重要度とコストに応じた耐震強化グレードの決定にも有用である。

地盤改良工法のシステム化:地盤改良は対象となる地盤の種類、施設の種類、重要度、環境条件などによって変わる。上述の被害度予測をもとに、これらの条件とコストを考慮して、改良範囲と最適工法を決定する必要がある。従って複数の工法を組み合わせたり新しい工法を開発することも含めて、統合的に地盤改良工法をシステム化することによって、最適な工法を選択出来るようにすることが望ましい。なおこれは、斜面や盛土の改良工法にもいえることである。

橋梁

被害の概要

道路橋は1柱式の鉄筋コンクリート橋脚が甚大な被害を被った。多くは主筋段落し位置での曲げ、あるいは曲げせん断破壊であった。せん断破壊を防止するための、またねばりを発揮するための帯筋が不足していたものもあり、設計荷重をはるかに超えた地震力を受けて破壊に至った。上部工の桁ずれは支承部のコンクリートが壊れたことによりもたらされたものがあったが、多くは下部橋脚のダメージの差によるものが多く見受けられた。また新設橋梁でも橋脚高が異なることにより応答に差が出、加えて地盤の側方流動により橋脚が押されたため落橋したものもあった。これら落橋したものや、桁ずれを起こした橋では桁連結装置のボルト破断しているものも多く見受けられた。なお鋼製橋脚でも座屈破壊したり、脆性破壊したものが少なからずあった。



鉄道橋はラーメン橋形式が一般に採用されているが、道路橋と同様に1960年代の設計が多く、橋脚のせん断破壊によるものが多くみられた。またそれは比較的剛性の高いアバット形式や2層式のものに被害が集中する傾向がみられた。

現有対応技術

CF耐震補強技術：CFRPの軽量でしなやか、高強度という長所に注目して、これまで耐震補強技術を開発してきた。段落しの補強、せん断補強など既存橋脚の弱点の補強を対象とした多くの加力実験とともに、耐火試験や、耐久性試験も行ない、設計施工マニュアルを作成して実用化段階にある。軽量であることから、橋脚の重量を増加することなく、且つ取扱いも簡単で大型の重機も必要としない、防錆上のメンテフリー-などの特長がある。

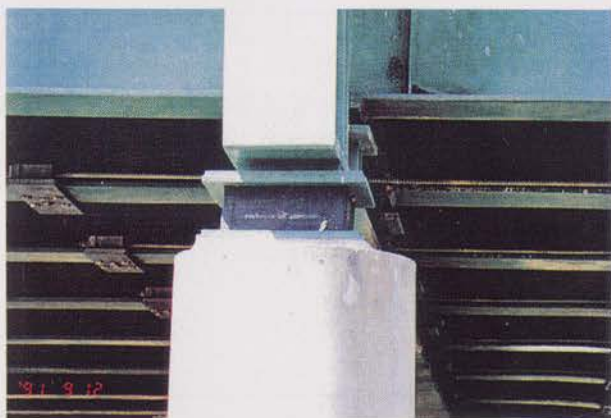
免震技術：上部工を水平方向に柔らかに支持し、エネルギー吸収性能もある積層ゴムを用いて、地震力を低減している。多径間連続免震橋の設計法や地震応答解析法も確立しており、これまで2橋の設計・施工実績がある。また大変位対策としてノックオフ橋台やダンパーによる制震技術も開発済みである。

非線形解析技術：構造物の強度やメカニズムを知るためのFEM解析技術や、応答をもとめる非線形動的応答解析プログラム、また地盤との動的相互作用をもとめる解析プログラムを開発してきた。これらは全て実験との比較を通しその適用性を検証してきた。

炭素繊維による巻付け補強



免震橋と免震装置



鋼管コンクリート複合柱：断面のコア部分に鋼管を、外側に主筋を配し、最外部に帯筋の替わりにPCストランドを連続的に巻付けた鋼管・コンクリート複合構造橋脚は、従来の鉄筋コンクリート橋脚に比し高い塑性変形能を有する。PCストランドが主筋の座屈や内部コンクリートの剥がれを防ぎ、且つ座屈しにくい鋼管が内部のコンクリートをまもる2段構えの高耐震性構造となっている。

鋼管コンクリート複合柱の水平加力実験



今後の課題技術

靱性設計対応技術

今後大地震に対する構造物の耐震性能確認の作業がより重要視されよう。そのためには強度と塑性変形能という構造物の耐震性能に関わる部分と、地震力という作用外力に関わる部分の評価技術が重要となる。強度については、独立柱のような静定構造の場合は容易であり、不静定構造の場合でもこれまで蓄積してきた非線形解析技術で評価が可能である。一方塑性変形能力については高い精度での予測がこれからの課題であり、構造細目と併せ評価技術を整備していくことが必要であろう。構造部材に作用する地震力の予測については、構造物の非線形応答解析技術がほぼ整備されている。一方設定地震については、解析技術の向上と歩調を合わせて、より実際の現象に近い設計地震動の考え方と評価法を再整備していく必要がある。

耐震補強技術

橋梁耐震補強の根幹をなすものは橋脚補強であり、次の4つの方法に大別出来る。1番目は段落し部での破壊や、せん断破壊を対象とした構造物弱点の強度付加技術である。2番目は橋脚の塑性変形能力を向上させる靱性能付加技術である。降伏ヒンジ領域を対象に外部からの拘束力を増加させるのが効果的であり、重量を増加させない簡便で経済的な方法が望まれる。3番目は構造全体の強度および剛性付加技術である。橋脚の場合は既存部分との一体化補強技術が重要である。またラ-メン高架橋などの架構全体の補強には、耐震壁やブレスの付加なども考えられる。4番目は既存耐震要素への入力を軽減するための、免震・制震技術である。大地震に対しては特に変形に対する配慮が重要となる。なお場合によっては、基礎および周辺地盤の耐震強化も必要となる場合があり、各種地盤改良技術の適用と整備などを併せて行う必要がある。以上これらハードに関するアイデアと実績は一部あるものの、全体バランスを考えた補強設計技術などソフトに関わる部分は十分整備出来ているとはいえない。

新耐震構造

大地震でも人命を損なわず、緊急車両の通行を供用することは橋梁施設に課せられた最低限の社会的使命である。経済性や都市部でのスペースを考えると、マッシブな橋脚の構築は非現実的であり、塑性変形能力で大きな地震力に抵抗できるようにするのが最適解であろう。且つ被害を受けても簡単に修復できるものが望ましい。そのためには変形能力に富み施工が容易で経済的な構造を開発する必要がある。

構造設計

大都市部道路橋などで一般に用いられるT型橋脚は、橋軸直角方向にはキャンチレバ-となり、柱の破壊が即橋の倒壊につながり易い。また張り出し部に分布した質量による回転慣性の影響も受けやすい。橋軸方向についても、柱上端をピンロ-ラ-形式とした橋梁の場合、1本の柱の破壊が落橋につながる可能性がある。これらを防止するには、地震外力を軽減するか、剛性のバランスに配慮したRedundancy（不静定次数）の高い構造物とすることが肝要である。すなわち橋軸方向には多径間連続化や免震化、橋軸直角方向には許容範囲内で多柱化を検討することが重要であろう。

（問い合わせ先：技術研究所構造第1研究室 大内一 TEL 0424-95-0995）

地下構造物

被害の概要

全体的には甚大な被害を受けた地下構造物は少なく、地上の建物や橋脚と比較して軽微な被害であった。そのなかで、鉄道のボックスカルバートの鉄筋コンクリート製(RC)中柱がこれまで経験したことのない被害を受けた。被害は数カ所の駅部に集中しており、線路部では比較的軽微であった。これらの駅舎は開削工法によって施工されており、上載土被りが比較的小さい。また被害を受けた箇所は六甲山からの沢筋にあたるといわれる。

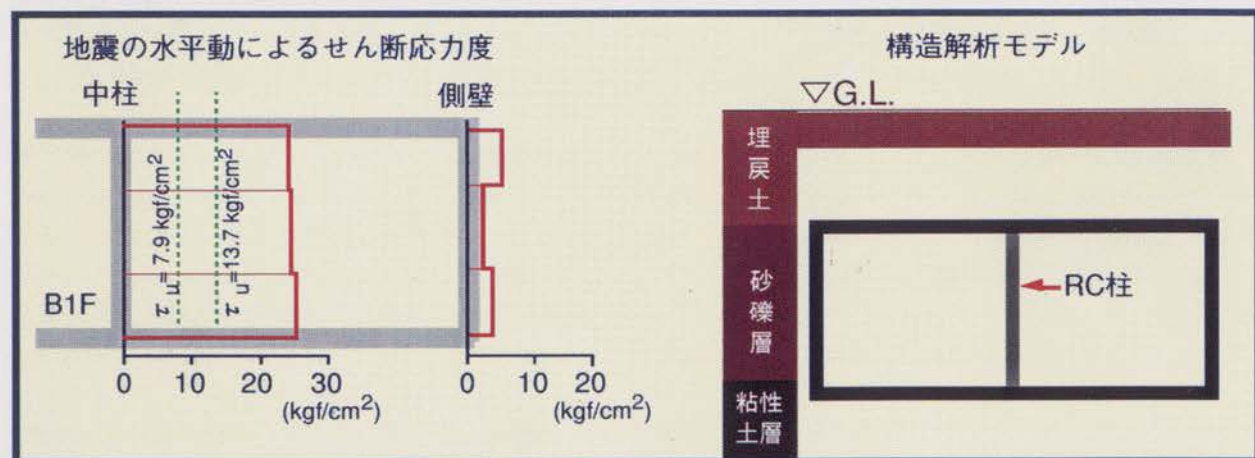
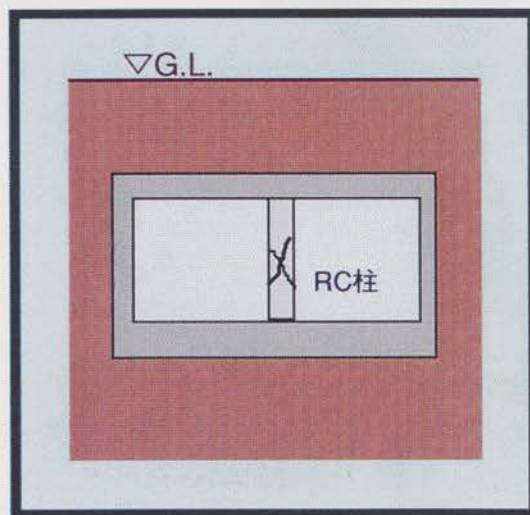
被害の最も大きなところでは、鉄筋コンクリート造の中柱が破壊したため上床スラブが大きく下がり、地表が大きく沈下して道路交通が遮断された箇所もあった。また、側壁下端の一部で内空方向へのはらみ出しも観察されたとの報告もある。



被害の検討

地下構造物に生じた被災のメカニズムを把握することを目的に、水平動および上下動を入力した等価線形地震応答解析を行い、その結果を軸力の変動を考慮した強度(下図 τ_u)と照らし合わせ、構造各部位の損傷を推定した。

地震による増加分だけで中柱には強度を超えるせん断応力度が発生しており、このため中柱に破壊が生じたと推定できる。また、中柱のせん断応力度は地震の水平動によって生じており、上下動による軸応力度は比較的小さい。すなわち今回発生した中柱の破壊には、上下動による軸力より水平動によるせん断力が大きく影響したと考えられる。



現有対応技術

■ 補修

ニューロクリート工法（高流動コンクリート）：ニューロクリートは、それ自身の優れた流動性によって、鉄筋の小さな間隔を通り抜け、型枠の隅々まで行きわたり、狭い空隙にも充填することができる。このような優れた特性を用いて、地震によって被害を受けた部分を取り除き、十分な強度を有したコンクリートで充填することが可能となる。

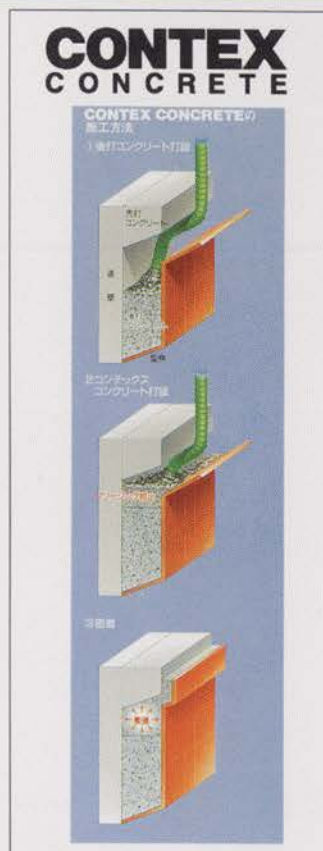
コンテックスコンクリート工法（Contex Concrete）：コンテックスコンクリートは、本来、逆打ち工法での打ち継ぎ目の一体化を目的に開発された。その特徴は、効果的な膨張性の発揮、優れた充填性、レイタンスの減少、強度の確保、分離防止などである。このような、特徴を生かし被害箇所への充填が良好に実施できる。

■ 耐震補強

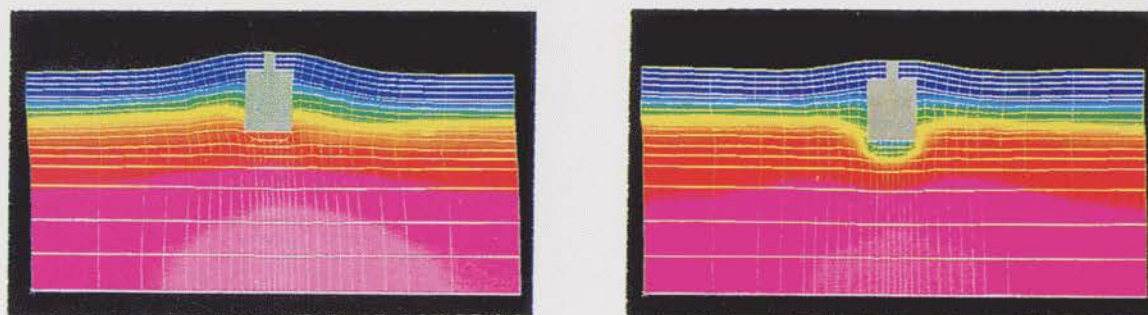
CF耐震補強技術：炭素繊維補強技術は、建築構造物・煙突・橋脚などに実績が豊富である。この補強工法の特徴は、鋼板補強と同等以上の補強効果が期待できること、耐久性に優れていること、補強による重量増加を招かないこと、そして重機材などを必要とせず手軽に施工できることである。地下構造物は機材搬入にスペースが限られ、又地下水と接する位置にあることが多く、これらの長所を利用することにより手軽な施工でメンテフリーが図れる。

■ 数値解析

非線形動的応答解析：地震時の構造物の応答特性と破壊挙動の予測には、コンクリートおよび地盤の非線形性の考慮が不可欠である。液状化を含めた地盤の非線形性やコンクリートの非線形性を良好に追従出来る種々のモデルが選択でき、地盤と構造物の応答が予測できる。



地中構造物の相互作用解析



今後の課題技術

地下構造物の中柱が被害を経験した例はない。地盤および構造物の非線形領域での挙動を精度よく予測できる相互作用解析技術をさらに充実させるとともに、簡便な手法を開発して既存施設の耐震性評価に供することが重要である。また耐震強化が必要な場合を想定し、適切な補強工法のハードソフトを一層整備することが必要である。

（問い合わせ先：東京本社震災復興技術部 松田隆 TEL 03-5689-9003）