

# 研究討論会・既設 RC 建造物の耐震診断・補強

上田 多門\*

Tamon UEDA

## はじめに

阪神・淡路大震災以来既設 RC 建造物の耐震診断・補強が大量にかつ、急ピッチに行われている。一方、これまでの耐震診断・補強を見てみると必ずしも共通のコンセプトがあるわけではなく、場合ごとに検討を加え対処してきたといっても過言ではないであろう。

このような背景の中で、土木学会コンクリート委員会でも、耐震診断・補強のあるべき姿をいち早く提示すべく研究活動を鋭意続行中であるが、あわせて、土木学会年次大会において研究討論会を持ち、ややもすれば機会の少ない情報交換の場を提供し、耐震診断・補強技術の将来へ向けての方向を探ることについて討議した。

## 座長・角田與史雄（北海道大学）の趣旨説明の概要

我が国における最近の主な地震の中で RC 土木建造物の耐震設計に大きな教訓を与えたのは、1978 年の宮城県沖地震と 1995 年の兵庫県南部地震である。宮城県沖地震では、コンクリート建造物のせん断破壊を始めとした構造部材の損傷、兵庫県南部地震ではせん断破壊などに起因した多くの建造物の崩壊が生じた。これらの 2 つの地震被害の経験を通し、新設建造物の耐震設計とともに、既設建造物の耐震診断・補強の重要性、必要性が強く認識されるようになった。本研究討論会での話題提供、および忌憚のない討論を通じ、耐震診断・補強のこれからの方向を具体的に示されることが期待されるが、たとえそれがかなわずとも、問題点の明示など有益な情報交換となり得よう。なお、討論会に先立ちあらかじめお断りするが、今回の対象は被災していない既設建造物で、被災した建造物は含まれない。

## 話題提供の概要

町田篤彦（埼玉大学）：「耐震診断・補強の基本的考え方」

阪神大震災を契機として、建造物の耐震補強工事が急

がれている。これは安全とされてきた我が国の建造物でも甚大な被害が生ずる可能性があることが明瞭に示されたことによっていると考えられる。耐震補強にあたっては、これをどのように進めるかの考え方を確立することが第一に必要であり、土木学会では、地震直後からこの問題に取り組んできた。ここでは、土木学会コンクリート委員会で進められている調査研究活動である、阪神大震災調査研究特別委員会、耐震研究小委員会、補強設計小委員会活動のうち、阪神大震災調査研究特別委員会の現在までの成果をもととし、その概要を述べる。

耐震補強にあたっては、まず補強が必要であるかどうかを判断する耐震診断が必要である。診断は判定能力の高い診断法と適切な判定基準を兼ね備えていなければならない。補強が必要であると判断された場合、建造物ごとの補強の優先度を明示し、耐震性能をどのレベルまで引き上げるか補強の目標を設定して、これを達成できる補強法の選択を行う。補強法の選択にあたっては、引き上げられる耐震性能の評価、つまり補強の評価を適切に行う手法が用意されているかどうか、補強後の建造物の耐久性および景観、補強工事の施工性、維持管理の難易度などを考慮に入れる必要がある。

前述の阪神大震災調査研究特別委員会では、コンクリート標準示方書耐震設計編の制定のほか、急激に重要性を増したコンクリート建造物の耐震診断・補強に関しても調査研究を進め、その成果を「既設コンクリート建造物の耐震診断と耐震補強（試案）」として公表した。以下にその概要を紹介する。耐震診断法は、準拠規程、構造形式、地盤条件などに基づき、短時間で行う一次診断と、設計図書、材料特性などの詳細な調査を行った後に、耐震設計編に準拠して耐震性能の照査を行う二次診断とに分けられる。一次診断では、「補強の必要がない」、「二次診断の必要がある」、「補強の必要がある」の 3 つの場合があり、補強の必要性の有無は二次診断による結果と一致する必要がある。なお、補強の必要性の判定基準となる必要な耐震性能は、新設建造物と同じである必要はない。補強の優先度は、建造物の重要性、診断によって判明した保有耐震性能、建造物が存在してい

\* 正会員 工博 北海道大学助教授 工学部土木工学科

る地域の地震の切迫度を考慮して決定する。補強によって目指す耐震性能は新設構造物と同等とし、実験あるいは信頼性の高い構造解析によって確認する。

佐伯光昭（日本技術開発）：「耐震診断補強の実施計画の考え方」

今後に予想される高福祉・高負担の社会における厳しい財政状況を踏まえて、耐震診断と補強事業の合理的な実践にはコストパフォーマンスを考えた最適な耐震診断と補強実施計画の策定が必要である。確保する耐震性能の水準の設定には補強のコストとの関係と当該地域の地震発生可能性の切迫度を公開し、住民の判断も参考にすべきであろう。

これまで特定の構造物に対する耐震診断では、一次、二次の二段階で行われてきている場合が多い。二次診断では、RC 構造物特有の問題として材料特性を調べることが必要となる。コンクリート、鉄筋の強度や剛性、材質の劣化による強度や剛性に及ぼす影響を試験により確認する。設計図書が不明の場合は、配筋状態を推定もしくは確認するための調査や、はつり工事が必要となる。

耐震診断については、その目的からしてできるだけ早く補強が必要な構造物の数、工法および全体工費を把握することが重要である。したがって、構造物が含まれる施設全体に統一的な手法を適用し、担当技術者による個人差が生じないように留意すべきである。ある機能を有するシステムに含まれる多くの既存構造物の補強実施計画を立案するには、個々の構造物の保有している耐震性能と地震防災上の重要度とを考える必要がある。補強は保有している耐震性能が低く、重要度の高いものから優先的に行うことが効果的であることは自明であろう。地震防災上の重要度の評価要因として、機能が喪失・低下したことによる社会的影響、被災した場合の影響度、震後に果たすべき機能や役割などが考えられている。

今後の課題としては、データベースの整備と不足している情報の把握、維持管理部門の専門スタッフを養成するための人事制度の確立、耐震診断や補強対策の実施に必要な費用負担および安全性の向上に関する情報公開を含めた社会的な合意形成があげられる。

大内 一（大林組）：耐震補強技術の現状

橋脚などの柱部材を対象にした代表的な補強工法としては、RC 巻立て工法、鋼板巻立て工法、炭素繊維巻立て工法がある。一般的にはせん断耐力と変形性能に着目した補強が行われる場合が多い。鋼板巻立ての場合は、エポキシ樹脂あるいは無収縮モルタルを充填し鋼板の拘束力を伝えるようにしている。RC 巻立ての場合は帯筋の増設が行われる。炭素繊維巻立ての場合、炭素繊維

シートをエポキシ樹脂により貼り付けるか、エポキシ樹脂で固めた炭素繊維ストランドを巻き付けるかとする。壁式橋脚のような面状の部材に対しては、補強用の鋼板や帯筋だけではコンクリートを拘束する効果が小さいため、壁内を貫通させた PC 鋼棒や鉄筋を用い、幅全体に拘束力を伝達させるのが一般的である。

変形性能の向上だけでは抵抗できない場合、変形性能の向上とともに曲げ耐力の増加を期待する補強工法をとる。この場合、鋼板もしくは炭素繊維シートをアンカーを通して基礎に定着し、併せて、基礎の補強を行う必要がある。主筋段落とし部の補強では、せん断破壊の防止とともに、曲げ耐力の補強も行い、柱端部に塑性ヒンジを形成させるのが原則であろう。RC 巻立ての場合は主筋増設、鋼板巻立ての場合は鋼板のコンクリートとの一体化、炭素繊維巻立ての場合は縦方向にシートを貼り付ける。

鋼板巻立ておよび炭素繊維巻立ての場合、補強後のせん断強度評価は、実験結果に基づき、鋼板および炭素繊維を帯鉄筋換算し、鋼板では降伏強度を用い、炭素繊維では低減した強度を用いて通常の RC のせん断強度式を用いる。しかし、鋼板の場合、鋼板の部材軸方向の寄与分を無視していることになり、炭素繊維の場合、シートの部分剥離後のせん断力負担割合の変化を無視していることになる。このように補強評価法と現実とは必ずしも整合していない。

韌性率を計算する上で必要な降伏剛性を補強設計段階で定める合理的な算定式がない。しかしそれ以前に、そもそも韌性率を用いたエネルギー一定則に基づいた設計でよいのかという疑問が存在する。本当に必要なのは終局変位までの塑性エネルギー吸収性状であり、構造物の崩壊を考えるのであれば、終局変位の定義そのものも考え直す必要がある。塑性エネルギー吸収量を大きくするためには、塑性ヒンジ長を大きくすることが肝要であり、主筋の座屈長を長くすることは有効な方法である。長い座屈長は主筋の破断を防ぐことにもなる。

RC 巻立て工法の施工上の問題として、作業空間、重機が必要であること、後施工アンカー、貫通工による鉄筋損傷があげられる。鋼板巻立て工法の場合、やはり作業空間、重機が必要なこと、鋼板パーツをそのつど製作し現場溶接する煩雑性、耐久性などがあげられる。そして炭素繊維巻立て工法の場合、面取りや表面仕上げなどの作業の必要性、表面保護工、耐火仕上げ工などの必要性があげられよう。

官民が連帯し、過去のものを含め進行中の各補強工法が早い時期に公開され、議論され、それぞれに長所を生かした最適解を認め合い、できる限り早い時期に補強設計・工法に関するガイドラインを整備することが肝要で

あろう。

小川篤生（日本道路公団）：「道路における耐震補強の考え方」

道路橋の耐震設計の基本として、橋梁全体系として兵庫県南部地震レベルの地震動に対して余裕を持って耐えられる構造を目指すこととしている。この基本に基づくと、現在耐震補強が必要な道路橋の橋脚は8000にのぼるが、重要路線、複道形式の路線、昭和55年以前の基準で設計された橋梁を優先している。耐震補強の実施方針として、RC橋脚躯体の補強により靱性の向上や耐力の増加を図ること、落橋防止構造を強化すること、ゴム支承や免震支承に取り替えること、全体構造系として耐震性向上を図ることの4項目をあげているが、現在緊急対策として最初の2項目が主に実施されている。

RC橋脚の補強の考え方として、地震時保有水平耐力を向上させるのではなく靱性を向上させることにより、基礎への影響を小さくすることが望ましい。しかし、靱性だけに頼ると残留変位が大きくなる（変形角で1/100以上）場合があるので、基礎が支持できる範囲内で耐力の向上も図ることも重要である。

補強工法としては、RC巻立て工法、鋼板巻立て工法、炭素繊維巻立て工法がある。RC巻立て工法は維持管理の面で有利であり、鋼板巻立て工法は施工空間に制限がある場合に適用され、炭素繊維巻立て工法は段落とし部の補強に用いられてきたが、今後は鋼板巻立て工法と同様に靱性向上のための補強に用いられよう。

道路公団においては、中空断面橋脚の載荷実験により横拘束筋の量や形状と耐震性能の関係を確認し、炭素繊維巻立て工法による補強載荷実験により段落とし部の補強の実用化と靱性向上の確認を行い、壁式橋脚の補強載荷実験により中間貫通鋼材やアラミドロッドによる横拘束筋の追加による補強効果の確認などを行っている。また落橋防止装置に用いる緩衝材の実験によりエネルギー吸収効果についての基礎的な検討も行い実用化を図る予定である。

石橋忠良（東日本旅客鉄道）：「鉄道構造物の耐震診断、耐震補強」

阪神・淡路大震災により鉄道構造物にも多くの被害が生じた。その理由として、地震力が設計時の想定より大きかったこと、当時の設計思想に大地震に対して降伏以降の変形性能を大きくして対処するという考えがなく、さらに都合の悪いことに、当時の設計標準ではコンクリートのせん断耐力を過大に評価していたため、せん断破壊が曲げ破壊に先行し、曲げ降伏以降の変形性能はそもそも期待できないことがあげられる。宮城県沖地震の

教訓を取り入れた昭和58年の設計標準以前に建造された構造物は上記のように耐震性能に劣るものが多く存在し、緊急に補強を行ってゆくこととなった。既設構造物の評価は、設計図を調べ、柱部材について曲げ耐力とせん断耐力を計算し、せん断耐力の曲げ耐力に対する比の小さいものから補強を行っていく。

耐震診断においては、靱性率を算定し、耐震性能を評価する。高架橋の柱の場合、せん断耐力と曲げ耐力の比が2以上あれば十分な靱性率を有している。耐震補強を行う場合、せん断耐力を増し、せん断耐力と曲げ耐力の比を大きくすることにより靱性率として10以上を確保するのが一般的である。RC巻立てによる補強の場合、新設構造物と同じ帯鉄筋の式を用いて靱性率を算定できる。この場合、フレア溶接の方がフック定着より靱性率の確保が容易である。鋼板巻立てによる補強の場合、既設の構造物の靱性率に鋼板による靱性率の増加分を加え靱性率を計算する。このほか、PC鋼材、炭素繊維、アラミド繊維による補強でも同様の効果が得られる。

現在行っている補強工事のほとんどが、変形性能向上のために鋼板巻立てしたものと、帯筋追加補強を併用したのになっている。既設柱と鋼板との間の充填材としては無収縮モルタルが多いが、ソイルセメントでも十分な耐震性能向上効果があることが明らかとなった。鋼板の継手としては現場溶接が多いが、品質管理の容易な継手として機械継手の開発も進めている。また、補強工事を容易にするために、補強される部材寸法によって鋼板の厚さを自動的に決めている。補強範囲は柱躯体全範囲としている。

## 討 論

(1) 丸山久一（長岡技術科学大学）：JRの耐震診断では、土木学会コンクリート委員会のように一次診断、二次診断というような方式は取らないのか。

石橋：原則としては、すべての構造物に対し図面を調べ、せん断耐力と曲げ耐力を計算する。

(2) 三浦 尚（東北大学）：補修<sup>1)</sup>の重要度の判断に、経済性からの優先度を入れるのは行政的判断の問題で、学問的な判断（補修目標を決める分類としての判断）ではないのではないか。最重要な路線の橋はすべて最重要の分類にすべきではないか。

佐伯：行政が既設構造物の補強の優先度を判断するための数値を示したものであると考えていただきたい。

(3) 小野紘一（京都大学）：地上構造物の補強が強調されているが、基礎構造物と併せて考えるべきではないのか。

石橋：鉄道構造物の場合、靱性に対する補強のみであるので、原則的には基礎への負担が大きくなる。ま

た、現実として基礎の被害はなかった。

小川：道路構造物では基礎構造物である杭を補強している例もある。また、基礎の負担を増さない工法として、免震、反力分散、橋の連続化などが考えられている。

佐伯：基礎に力が集中すると考えられる場合は、補強がすでに進められていると聞いている。

(4) 井料青海(東日本旅客鉄道)：耐震補強をする場合、現状では美観を意識しているのか。また、将来的にはどう考えているのか。

大内：都市部では通常事業者から、景観や耐久性に対する要請がある。

小川：見栄えは常に気にしているが現実はずんぐりむっくりとなってしまっている。逆に、補強したことを強調したいという考え方もあり、この場合は見栄えで強調する。

町田：補強を考えるときの一つのキーワードは景観である。

角田：補強が急がれているので、景観に配慮する余裕がないというのが現状ではないか。今後の課題の一つであろう。

(5) 小野 定(清水建設)：地下鉄中柱のように高い軸力を受ける柱部材を補強する場合、補強目的をどこに置いたらよいか。地震時の層間変位の最大値を絶対量で与え、軸耐力を確保しながらそれ以上の終局水平変位を持つことを確認すればよいか。

町田：補強目的は他の構造物と原則は同じである。ただし、補強工法は施工上の制約から限定される。

角田：地下鉄中柱ほど高い軸力を受ける構造物に対する研究は土木では少ない。

石橋：靱性率ではなく、終局時の絶対変形角を知ることが必要である。

(6) 中井裕司(住友建設)：塑性ヒンジ領域は大きくあるべきなのか。それとも小さくあるべきなのか。大きくすると主筋が座屈し、終局変位に早期に至るのでは

ないか。

大内：塑性ヒンジ長はできるだけ長い方がよいと考える。拘束を大きくし、座屈長を短くすると主筋の破断を招いてしまう。

町田：座屈長をコントロールすることが可能なのか。広い範囲にわたって塑性ヒンジを作ることが可能なのか。

大内：座屈防止上は、高強度であるが低剛性のもので巻いた方がよいという印象を持っている。

角田：座屈後の破断と靱性率との関係を定量化するために今後の研究に期待する。

石橋：構造物の靱性が鉄筋の低サイクル疲労破断による場合と、それ以外の場合とを分けて考えるべきである。

角田：多くの点が討論されたが、おのおの別個の問題なのでまとめることはしない。これらの点を各事業者が考慮され、今後の補強に活かしてもらいたい。最後に、話題提供者、討論に参加していただいた方々に感謝の意を表し討論会を終えたい。

## おわりに

必ずしも耐震診断・補強の将来の方向を具体的に示せたわけではないが、診断・補強を行う際の基本的な考え方の提示から、合理的な補強評価を行うための研究の必要性まで、多くの点が明らかにされたと思われる。大内氏も指摘されているように、耐震診断・補強に関するガイドラインが少しでも早く世の中に出現するのを切に望む次第である。

著者注：補修<sup>1)</sup>

補修、補強の語句の定義が人によって多少異なるが、ここで使われている補修は、この討論会で一般的に使われている補強と本質的には同じ意味であると考えられる。すなわち、討論会では力学的な性能を向上させることを広く補強としている。