

研究討論会・阪神大震災とコンクリート構造物 の耐震設計

丸山 久一*

Kyuichi Maruyama

はじめに

本年1月に発生した兵庫県南部地震により、各種の構造物が大きな被害を受けた。道路構造物や鉄道構造物等の土木構造物もその例に漏れず、しかも、コンクリート造の橋脚等の崩壊は社会的に大きな反響をもたらした。被害の甚大さに鑑み、コンクリート委員会では直ちに阪神大震災調査研究特別委員会を発足させ、委員会の総力を結集して、コンクリート構造物の被害状況の調査、被害の分析、耐震性能の検討および耐震設計法の見直しに着手した。

研究討論会の開始に際し、岡村 甫座長（東京大学）より、この8ヵ月間の活動の経緯が報告され、平成8年3月を目標としてコンクリート標準示方書耐震設計編を刊行すべく準備をしている旨の説明がなされた。さらに、本研究討論会を開催することは、これまでの活動の中間報告を行い、今後の活動への助言を得る上で有意義であると述べ、本日の話題提供者の紹介を行った。

話題提供

藤井 学（京都大学）：被災例

初めにスライドを用いてコンクリート構造物の被害例を紹介し、その後、OHPにより被害の全体を統計的に示した。被害例として、まず、西宮大橋の橋脚を取り上げ、コンクリートの打継目でずれが生じていることを示し、施工計画の不備も被災の原因となりうることに言及した。また、壁

式橋脚では、せん断補強鉄筋が十分に配置されていないため、軸方向鉄筋が橋軸方向に座屈し、コンクリートが大きくせん断破壊している状況を示した。引き続き、以下のような被害例を示した。新幹線の2層ラーメン橋脚では、柱がせん断破壊して崩落し、2層が1層になった。武庫川橋梁の橋脚や阪神高速道の高架橋の橋脚では、軸方向鉄筋の段落とし部でコンクリートが剥落し、鉄筋が座屈（いわゆる提灯座屈）していた。ピルツ形式の橋梁では、軸方向鉄筋の段落とし部が起点となったと思われる橋脚のせん断破壊により、全体構造が横倒しになって崩壊した。破壊後だけを見ると、せん断補強鉄筋量が十分でなく、またその定着も不十分で、ばらけている状況が認められた。地下構造においても、地下鉄上沢駅や大開駅ではコンクリート中柱が崩壊していた。主として、土かぶり厚の比較的小さい場合（3~5m）にこのような崩壊が生じていた。

次に、全体的な被害の状況として、PC建設業協会がまとめたところによると、PC上部構造は被害が少なく、鋼桁の被害例が多かった。橋脚についての統計として、阪神高速神戸線についての結果では、コンクリート橋脚869の損傷度分布を見ると、非常に大きな損傷（As）を受けたものが7%、大きな損傷（A）を受けたものは10%、中程度の損傷（B）は12%、軽微な損傷（C）が22%、無被害（D）は49%であった。破壊モード別の分類では、橋脚下部の曲げ破壊が44%と最も多く、次いで、中間部の曲げせん断破壊13%、下部曲げせん断破壊9%、下部せん断破壊3%、その他31%であった。

* 正会員 Ph. D. 長岡技術科学大学教授 工学部建設系

橋脚の形態としては、単柱が610と多く、ラーメン構造120、特殊構造85、その他54であるが、ラーメン構造には無被害のものが多く、大きな被害は特殊構造に集中していた。また、橋脚の中間部曲げせん断破壊や下部せん断破壊モードは、被害例は必ずしも多くないが、甚大な被害をもたらす結果となっている。特に後者の破壊モードは、橋脚高さ(a)と橋脚断面の有効高さ(d)の比(a/d)が3未満の場合に多く見られた。また、アルカリ骨材反応による影響も心配されたが、特に、アルカリ骨材反応が被害を大きくしたという因果関係は認められなかった。

池田尚治(横浜国立大学)：耐震設計法の変遷
これまでの大地震と構造物の被害との関連等を、代表的な例について説明し、土木学会のコンクリート標準示方書(以下、示方書という)での規定の変遷を解説した。さらに、今回の地震波を用いた仮動的実験結果についても概説した。

1906年のサンフランシスコ地震による被災は、構造工学において耐震設計法を産み出す契機となった。1923年の関東地震では、鉄骨鉄筋コンクリート造の優れた耐震性能が立証された。1964年の新潟地震では、砂地盤の液状化現象が新たに注目され、大きな地盤変動に伴う落橋が問題となった。1968年の十勝沖地震では、建築構造に大きな被害が生じて、柱のせん断破壊の防止方法が検討課題となった。1978年の宮城県沖地震では土木構造、特に、鉄道構造に大きな被害が生じ、示方書の改訂(昭和55年版)のきっかけとなった。そして、1995年の兵庫県南部地震により、コンクリート橋脚等、土木構造物が著しい被害を生じたことから、改めて、示方書の見直し作業を行っているところである。

示方書における最初の耐震設計では、地震による影響を静的荷重に置き換え、水平震度0.2、鉛直震度0.1を採用するとともに、地震時の許容応力度の割増しを1.5、温度の影響を含める時の割増しを1.65としたものであった。昭和53年(1978)の宮城県沖地震後の検討で、せん断補強鉄筋量の最少量として0.15%を導入し、許容せん断応力度を低減するとともに、モーメントシフ

トの考え方(軸方向鉄筋の途中定着に関するもの)を導入した。さらに、昭和61年(1986)には、示方書の設計体系が全面的に限界状態設計法に移行するに際し、耐震設計を1つの章として独立させるとともに、地震後の供用性能、想定地震、地震の影響、構造細目について明記し、せん断補強鉄筋についても詳細な規定を設けた。また、解説で、地震後の供用性能と被災のレベルを関連づけるという概念を初めて記述した。

道路橋示方書(平成2年版の耐震設計編)では、鉄筋コンクリート橋脚については、塑性変形能力を考慮して1gの保有水平耐力を有するように規定している。また、今回の復旧仕様によれば、今回の規模の地震についても余裕をもって耐えられるものとなっている。

標準的な鉄筋コンクリート柱について、今回の地震で得られた神戸海洋気象台の地震波による仮動的載荷実験を行った。その結果、主として曲げ破壊が先行して、大きな損傷は生じなかった。もちろん、構造物の応答特性にもよるが、神戸海洋気象台の波は入力加速度が大きいとはいっても、それをういたからといって、すべての構造物が崩壊するわけではないことを改めて確認しておく必要がある。

町田篤彦(埼玉大学)：特別委員会の活動

土木学会コンクリート委員会では、今回の地震後直ちに、阪神大震災調査研究特別委員会を設置し、①コンクリート構造物の被災とその原因等の調査研究、②報告書の作成、および③耐震設計編の作成を目指して活動を開始した。現時点までの活動の概要を以下のように報告した。

まず、入力としての地震動の特性を調べると、土木学会誌(Vol.80, No.10, 1995年9月号)にも報告されているが、応答スペクトルは、周期が1秒までは2000gal程度を示している。これと現行の耐震設計基準と比べると、地震の応答加速度としては非常に大きく、想定以上のものとなっている。これらの事実、被災の状況および耐震設計の現状等を十分考慮して、今後の耐震設計のフレームワークを定めた。

想定すべき地震動としては、構造物の耐用期間

中に数回発生するレベル（中規模地震）と、まれにしか発生しないレベル（大規模地震）の2段階を考慮することとする。これに対して、構造物が保有すべき耐震性能として、3つの限界状態を検討の対象とする。すなわち、中規模地震に対しては、①無補修で低抗する、大規模地震に対しては、地震後でも②補強を必要としない、あるいは、地震を受けても③崩壊は生じない。

地震応答解析方法としては、時刻歴応答解析、地震応答スペクトルによる方法および応答変位法のいずれかをを用いるものとする。前2者については、限界状態の①については線形解析あるいは線形応答スペクトルによってよいが、限界状態②、③については非線形解析あるいは非線形応答スペクトルを用いるか、線形応答スペクトルとエネルギー一定則を用いるものとする。また、構造物の耐震性能の照査としては、限界状態①については、応力度、変位・変形でよいが、限界状態②、③については、破壊モード、部材の耐力・変形性能とし、破壊については曲げ破壊先行型かせん断破壊先行型かをチェックする。さらに、地中構造では、地震後の残留変位等も検討の対象とする。

設計で想定する性能を確保するために、耐震構造細目が重要となり、特に、せん断補強鉄筋について、最少量、配筋すべき部位、配筋法および定着法等を検討している。

最後に、現在、既存のコンクリート構造物について、耐震補強等が精力的に実施されているが、それに対する緊急提言を取りまとめた。これまでの被害状況等を詳細に検討し、また、既往の研究成果を十分に検討した結果、崩壊を免れた構造、いわゆる耐震性能に優れた構造・部材は、いずれも、保有曲げ耐力（正確には、曲げ降伏耐力時のせん断力）に比べ、保有せん断耐力がかなり大きいと結論づけられる。したがって、耐震補強計画を行う場合、上記の比率の小さいものから優先的に行うことを提言する。

質疑応答に入る前に、会場からの話題提供として、石橋氏および前川氏から若干の報告がなされた。

石橋忠良（JR 東日本）

JRのコンクリート構造物に関する被害としては、山陽新幹線の落橋等が目立ったが、全体的には在来線により大きな被害が集中して生じていた。そのなかで、JR 東海道線の六甲道駅付近で、ラーメン高架橋の79橋を調査した。設計図書を基本として橋脚の曲げ耐力およびせん断耐力を推定し、破壊状況と比較した。その結果、曲げ耐力に比べ、せん断耐力に余裕の少ないものほど、せん断破壊による非常に大きな損傷（As）を生じていることが明らかになった。

前川宏一（東京大学）

これまで開発してきた非線形有限要素解析プログラムを用いて、地下構造物の解析を行った。対象としたのは、地下鉄の上沢駅の構内で、コンクリート構造物と周辺地盤の相互作用も考慮した解析を行った。その結果、実際の破壊状況を解析でほぼ再現できることがわかり、このことから逆に、軸力や上下動の影響が小さくても、中柱の変形能力が乏しい場合には、あのような崩壊を招くことが推測できる。

討論の概要

(1) 仮動的実験で用いた供試体において、設計水平震度として0.17としたのは、小さ過ぎたのではないか。（家村浩和）

・供試体は十分せん断補強されていたので、靱性に富む曲げ破壊となったと予想されるが、固有周期が微妙に異なると、壊滅的な破壊になる可能性もある。

(2) 被害状況を見ると、鉄筋の圧接継手での破断が目につく。これについての報告がほとんどなされておらず、既存のコンクリート構造物でも、数多くの圧接継手が使用されている現状から考えると、きちんとした対応を示しておくべきではないか。（田辺忠顕）

・圧接部で破断した鉄筋でも、降伏強度までは達していたようである。圧接部の動的強度の試験結果を待たないと、いちがいに施工不良であったと結論できない。圧接の良否については、超音波試験法により全数検査も可能となっている。圧接部は、いずれにしても、連続した鉄筋よりは弱点

になるので、信頼度等を考慮した設計をする必要がある。

(3) 時刻歴応答解析に用いる入力地震波としては、どのようなものを使用すればよいのか。(小野絃一)

・基本的には、構造物の建設地点で起こりうる地震波を推定して用いる。

(4) コンクリートの打継目や接合部等の施工状態と耐震性能との関係はどのように検討しているのか。また、設計に取り入れる可能性はあるのか。(辻 幸和)

・施工に関する技術の進歩により、これまで弱点とされている箇所の改善がかなりなされてきているが、耐震性能に及ぼす施工の影響については、これまで定量的な研究がほとんどなされていない。ただし、JR等では、弱点になりやすい箇所の耐力を低減する等の対処をしている。

(5) 被災した例について見ると、施工性の容易さから、段落とし、圧接、打継ぎ等がほとんど同一箇所で行われており、欠陥が出来やすくなっていたようである。圧接については、きちんとしたデータを呈示するとともに、施工性も設計で考慮すべきである(長滝重義)

・軸方向鉄筋の段落としては、現行の示方書に従って行えば、クリティカルにならない。

(6) 地震外力は計り知れない。したがって、設計思想として、破壊箇所を誘導するような概念があってもよい。(渡辺 明)

・土木構造物では、必ずしも容易ではないが、ゴム支承はこれに相当するかもしれない。また、免震構造もその考えに近い。

おわりに

本討論会の最後として、岡村座長から以下のような総括がなされた。これまでの調査研究活動により、今回の被災においても、従来の鉄筋コンクリート構造の基礎知識を覆す事実は見つかっていない。したがって、今後も、十分耐震的なコンクリート構造物を建造することは可能である。ただ、より詳細な挙動に関する研究や、補強方法等の開発は今後も行ってゆく必要がある。

本討論会は、現在、コンクリート委員会が総力をあげて取り組んでいるテーマの中間報告的意味もあって、多くの学会員の興味を呼び、400人を越す参加者があった。活発な質疑応答が行われ、予定の時間では短いと感じた人も多かった。