近年発生した地震（芸予地震～新潟県中越地震）によるコンクリート構造物の被害と地震被害軽減に向けた研究活動の紹介

東北大学　正会員　　秋山充良

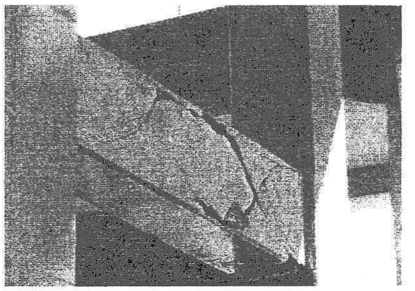
1.　はじめに

兵庫県南部地震以降も，2001年の芸予地震，2003年の三陸南地震と十勝沖地震，さらには2004年の新潟県中越地震により，コンクリート構造物に被害が生じている．本稿では，これらコンクリート構造物の被害に共通する特徴を示すとともに，被害分析の概要を述べる[1),2)]．参考文献1),2)では，被害の原因が詳細に検討され，各種の耐震性能照査法を用いた解析的検討に基づき，今後のコンクリート構造物の地震被害を軽減するための提案が示されている．一方で，兵庫県南部地震以降，土木構造物には，修復性への配慮や利用者の安全性確保など，従来よりも高い耐震性能の確保が求められてきている．本稿では，地震被害軽減に向けたハード面からの取り組みとして，既存構造物に比べ飛躍的に耐震性能を高めた構造部材の開発研究についても紹介する．

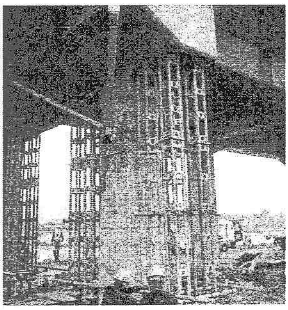
2.　近年発生した地震（芸予地震～新潟県中越地震）によるコンクリート構造物の被害の特徴

1995年の兵庫県南部地震による土木構造物の甚大な被害を踏まえ，各耐震設計規準類は大きく改訂されている．例えば，道路橋示方書・同解説 耐震設計編[3)]では，マグニチュード7級の内陸直下で発生する地震による地震動に対しても所要の耐震性能を確保することを目的とし，(i)設計地震力の見直し，(ii)基礎，支承部，落橋防止システムなどの構造部材への地震時保有水平耐力法による耐震設計の導入，(iii)免震設計法の導入，(iv)RC橋脚のせん断耐力式や変形性能評価法の見直し，等々の改訂がなされている．これらにより，旧基準で設計された構造物に比べ，現行規準で設計された構造物の耐震性能は大きく向上していると思われ，前記した兵庫県南部地震以降の一連の地震でも甚大な損傷が生じた例は報告されていない．

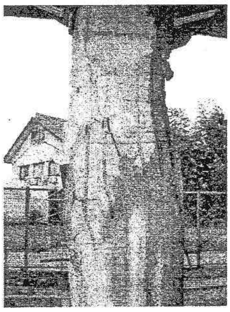
一方，例えば，三陸南地震や新潟県中越地震による東北新幹線，上越新幹線ラーメン高架橋などの損傷は，



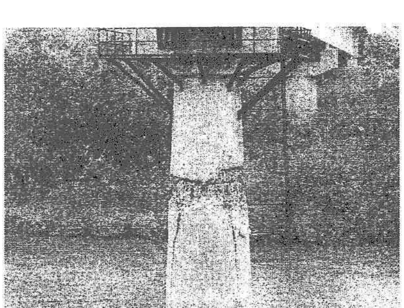
写真－1　芸予地震で被災した RC2層ラーメン高架橋中層はりのせん断損傷



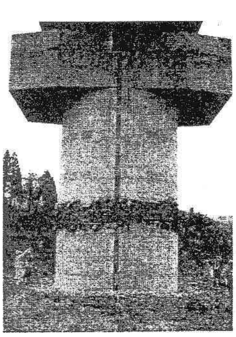
写真－2　三陸南地震で被災したRC 1層ラーメン高架橋柱のせん断損傷



写真－3　新潟県中越地震で被災したRC 1層ラーメン高架橋柱のせん断損傷



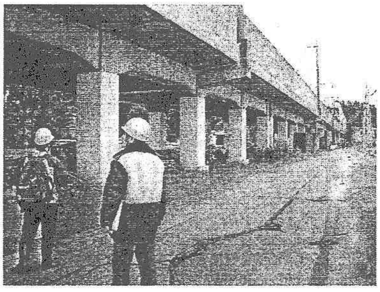
写真－4　十勝沖地震で被災したRC 橋脚段落し位置の損傷



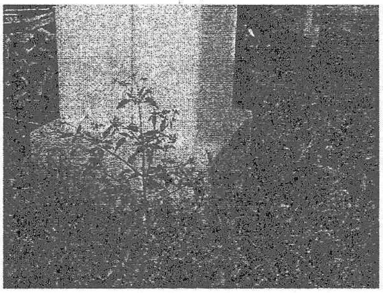
写真－5　新潟県中越地震被災したRC 橋脚段落し位置の損傷

兵庫県南部地震後に行われた緊急耐震補強対策(関東運輸局：平成7年8月)の対象線区から外れた地域にある構造で生じており，これらは竣工後，耐震補強工事が行われていない．代表的な被害形態としては，せん断補強鉄筋量の不足によるせん断損傷，および軸方向鉄筋の段落し位置での曲げ損傷などである．せん断損傷したラーメン高架橋の被害状況の一例を**写真－1～3** に示し，段落し位置で損傷した単柱式RC橋脚の被害状況の一例を**写真－4～5**に示す．

繰返し生じているこれらの被害を防ぐには，例えば，前記した緊急耐震補強対策に続く補強計画を確実に実施していくほかない．**写真－6** は，緊急耐震補強対策の際，断層直上にあり，また，せん断破壊先行の破壊モードであるとの判断から，新潟県中越地震の発生前に鋼板巻き立てによる耐震補強が施されていた高架橋である．これらの高架橋では，新潟県中越地震の際にも全く被害は観察されておらず，耐震補強の効果が確認された例である[4]．



(a) 耐震補強された高架橋近景



(b) 鋼板巻き立て補強の状態

写真－6　鋼板巻き立てによる耐震補強の一例

3. 近年発生した地震(芸予地震～新潟県中越地震)によるコンクリート構造物の被害分析

兵庫県南部地震によるコンクリート構造物の被害分析を行った土木学会コンクリート委員会阪神淡路大震災被害分析小委員会の報告[5]をはじめ，参考文献1), 2)では，様々な構造解析手法により被害分析を行い，被害の原因を詳細に検討し，さらには解析手法の検証とコンクリート構造物の耐震性能評価法の合理化へ向けた提案がなされている．ここでは，参考文献1), 2)で行われた被害分析の一例を紹介する．

(1) 被害分析に用いられる構造解析手法

被害分析に用いられる構造解析手法には，構成部材を線材要素によってモデル化する骨組み解析手法(非線形性は，Takedaモデルなどの部材モデルや，構成材料の一軸の平均化応力－ひずみ関係に基づいて履歴復元力特性を表現するファイバーモデルで考慮)と，面的あるいは立体的な要素を用いてモデル化する有限要素解析手法がある．これらの手法に加えて，近年では剛体－バネモデルと呼ばれる解析手法も用いられている．剛体－バネモデルは，離散型の解析手法の一つであり，ひび割れのような材料の不連続現象を直接的に表現できる．

(2) コンクリート構造物の被害分析の一例

ここでは，一例として，斉藤(山梨大学)が行った剛体－バネモデルによる被害再現解析の結果を**図－1**に示す．これは，芸予地震により被災した山陽新幹線RC2層ラーメン高架橋(**写真－1**)を対象としたものである．別途推定された解析対象構造物サイトでの地震動の作用に対し，中層はりに大きな斜めひび割れが発生し，スターラップが降伏する結果となっている．**写真－1** との比較から分かるように，解析は実際に生じた中層はりのひび割れ性状をとらえており，精度良く被害を再現できている．

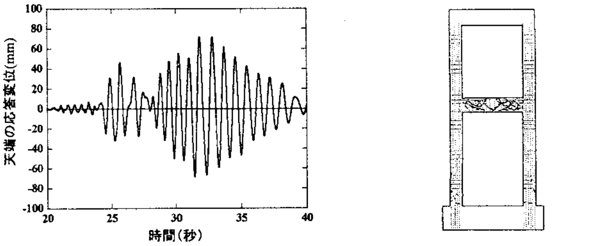
コンクリート構造物の地震時応答は，周辺地盤等の影響を強く受けるため，構造系全体を解析する必要があり，現行のコンクリート標準示方書 耐震性能照査編[6]でも，構造物と地盤の相互作用を直接考慮可能な連成解析の使用を推奨している．**図－2**は，牧(埼玉大)による高架橋，基礎，および周辺地盤を一体化した東北新幹線ラーメン高架橋のモデル化の一例である．相互作用モデルは，さらなる高度化の必要性が指摘されているものの，基礎と地盤の影響を考慮した被害再現解析は，橋脚下端固定とした解析よりも，構造物の被害に影響を与えるより多くの要因を考慮することが可能であり，精度の良い耐震性能照査が期待される．

一方，被害予測を行う際，材料強度や減衰定数の大きさの設定，また，せん断破壊の照査で用いるせん断耐力の算定などにはばらつきを伴うことは避けらない．そこで，これらばらつきを考慮することで，例えば，動的解析を行い，単にせん断耐力を上回るせん断力が作用する，作用しないとの議論ではなく，想定される

地震動強度に対して，せん断耐力を上回るせん断力が作用する可能性を確率的に評価する被害分析例もある．結果の一例を図－3 に示す．これは，フラジリティカーブと呼ばれ，横軸に着目する地震動強さ I を取り，縦軸は，その I の作用に対し構造物が想定した限界状態を超過する条件付確率を表したものである．

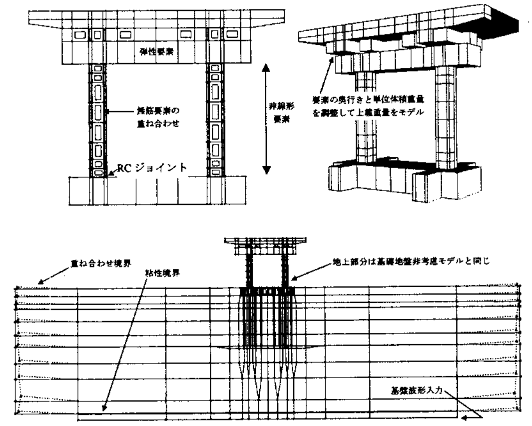
数値解析的に得られるフラジリティカーブは，概ね実際の被害の有無と対応した結果が得られることが報告されている．動的解析に関わる全てのパラメータを唯一に決定することが難しい現状では，単にただ一度の動的解析で作用と強度の比較を行うのではなく，各パラメータの平均値などを用いた動的解析で作用が強度を下回ると判定される場合でも，パラメータの変動の幅を考慮し，それが逆転する可能性を定量化した上で耐震安全性の大小を議論することの必要性が指摘されている．

被害再現解析により，その有効性が検証されたこれらの手法を用いることにより，従来よりも，より高度で合理的な耐震設計が可能となる．例えば，図－1 のような 2 層ラーメン構造であれば，中層はりの破壊が高架橋全体の応答性状に与える影響が把握され，耐震設計時に，はりと柱に適切に損傷を分担させるために必要な部材間の耐力格差などが検討できる．また，図－2 に示されるような構造物，基礎，地盤を一体化した全体系モデルを使用すれば，精緻に構造物の応答予測が可能となるばかりでなく，基礎より上部に位置する構造物の耐震補強による耐力の上昇が基礎に与える影響を評価できるようになるなど，構造物全体系の耐震性を考慮した各部材設計のあり方などが検討できる．図－3 のような確率・統計的な耐震安全性評価手法は，東海・東南海地震に対する土木構造物の地震被害リスクの算定や，地震直後の都市内の被災状況をリアルタイムで把握するために活用されている．

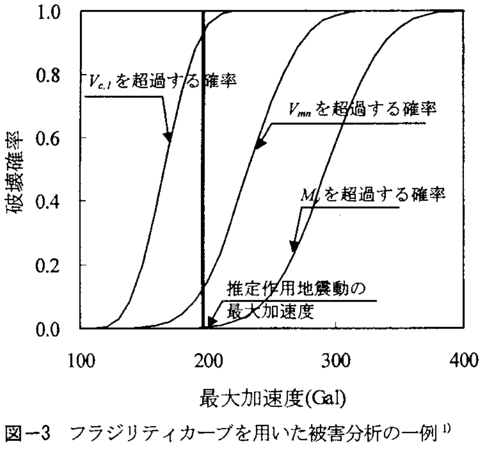


(a) 高架橋天端位置の時刻歴応答　(b) ひび割れ性状

図－1 斉藤(山梨大学)による剛体－バネモデルを用いた再現解析 [2)]



図－2 牧(埼玉大)による解析対象高架橋のモデル化の一例 [1)]
(上端：基礎地盤非考慮，下端：基礎地盤考慮)



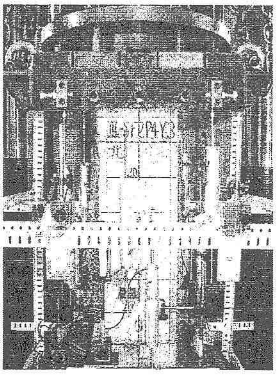
図－3 フラジリティカーブを用いた被害分析の一例 [1)]

4. 高性能耐震構造部材の開発

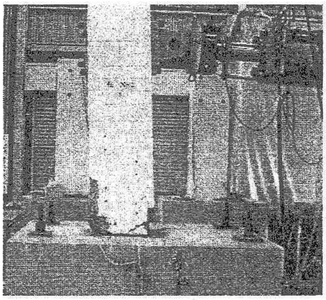
前記したように，兵庫県南部地震以降の各耐震設計規準類の改訂により，現在新設されている構造物は非常に高い耐震性能を有していることは間違いない．しかし，現行規準に対しても，幾つかの問題点が指摘されている．例えば，RC 橋脚の耐震設計では，部材降伏後の大きな塑性変形により地震エネルギーを吸収することを前提としているが，地震後の避難路や緊急物資の輸送路としての利用を考えると，修復性に配慮し，可能な限り地震時の塑性変形量は小さく抑えた設計が望ましいとの指摘がある．これは，上部構造を通行す

る利用者(車，鉄道)の安全性確保にもつながる．また，大きな塑性変形を部材に付与するため，現行規準で設計されるコンクリート構造物は，特に横拘束筋の配筋が非常に過密となり，施工性の悪さが指摘されている．

このような背景のもと，施工の合理化，省力化を図りつつ，構造物の地震時破壊リスクを劇的に低減できる高性能耐震構造部材の開発が進められている．**写真－7** は，圧縮強度 100N/mm^2 を超えたコンクリート，および降伏強度が 1000N/mm^2 以上の鉄筋を用いた超高耐力構造の実用化を目指した部材開発実験の様子である [7]．**写真－8** は，これまで主に建築分野で用いられてきたSRC構造を橋脚に応用し，施工の合理化と，高耐力かつ高靭性の部材開発を目的に実施された正負交番載荷実験の様子である [8]．このほかにも，地震時の列車走行性を確保するため，高架橋に鋼製ダンパー・ブレースの設置を検討している例もある [9]．これらの研究の共通の目的は，兵庫県南部地震クラスの地震動に対して，落橋など，構造物として致命的な被害が生じないのはもちろんのこと，地震時の利用者(車・鉄道)の安全性を確保し，さらに，地震直後に早期に修復可能な損傷に抑える構造を施工性や経済性に配慮して実現しようとしている点である．



写真－7 超高強度RC柱の一軸圧縮実験



写真－8 SRC柱の正負交番載荷実験

5. まとめ

コンクリート構造物の地震被害を軽減するためには，2 つの側面から研究を進める必要がある．一つは，計算機を活用し，地震時の構造物の挙動や限界状態を精緻に予測する耐震性能照査法を高度化し，設計の合理化を図り，さらには，例えば，構造系全体の耐震性を考慮した耐震補強設計など，それらを実際の耐震設計に応用する研究である．各耐震性能照査法は，兵庫県南部地震から近年発生した地震による被害分析や各種実験結果との比較検討を通じて，確実に精度の向上が図られている．一方で，過去の地震被害の教訓を経て，土木構造物には，単に致命的な損傷を防ぐのみならず，地震直後の使用を可能にする損傷にとどめ，また超低頻度な巨大地震の作用に対しても，地震中の利用者(車，鉄道)の安全性を確保できるような，様々な耐震性能の確保が要求されてきている．このような要求に応えるためには，従来の規準の枠を超え，新材料や新構造形式を活用した高性能耐震構造部材の開発研究を進める必要がある．これら両側面からの研究を継続することにより，将来に起こりうる巨大地震に対し，安全・安心な社会基盤施設の整備が可能になると思われる．

謝辞

本稿の一部には，土木学会コンクリート委員会「三陸南地震被害分析小委員会」および日本コンクリート工学協会「近年の地震被害におけるコンクリート構造物の耐震性能評価に関する研究委員会」の活動成果 [1),2)] を引用させて頂きました．関係委員の皆様に厚く御礼申し上げます．

参考文献

1)土木学会コンクリート委員会三陸南地震被害分析小委員会：2003 年に発生した地震によるコンクリート構造物の被害分析，コンクリートライブラリー114, 2004.　2)日本コンクリート工学協会：近年の被害地震におけるコンクリート構造物の耐震性能評価に関する研究委員会　報告書・論文集，2004.　3)日本道路協会：道路橋示方書・同解説　耐震設計編，1996.　4)睦好宏史，秋山充良，牧剛史：新潟県中越地震被害報告，コンクリート工学，Vol.43A, No.2, pp.3-10, 2005.　5)土木学会コンクリート委員会阪神淡路大震災被害分析小委員会：阪神淡路大震災の被害分析に基づくコンクリート構造物の耐震性能照査方法の検証－解析手法の適用と比較－，コンクリート技術シリーズ 49, 2002.　6)土木学会：コンクリート標準示方書 耐震性能照査編, 2002.　7)例えば秋山充良ほか：一軸圧縮を受ける高強度 RC 柱における横拘束筋の拘束効果と応力－ひずみ関係の定式化に関する実験的研究，土木学会論文集，No.753/V-62, pp.137--151, 2004.　8)例えば内藤英樹ほか：正負交番荷重を受ける SRC 柱の塑性曲率分布のモデル化および軸方向鉄筋の座屈に着目した靭性能評価，構造工学論文集 Vo.51A, 印刷中，2005.　9)岡野素之：RC 鉄道高架橋を対象とした鋼製ダンパー・ブレースの形式と設計法に関する研究，東北大学学位論文，2004.