

2011年東北地方太平洋沖地震による 第1中曽根高架橋の被害

高橋良和¹・後藤浩之²

¹正会員 工博 京都大学准教授 防災研究所（〒611-0011 宇治市五ヶ庄）

²正会員 工博 京都大学助教 防災研究所（〒611-0011 宇治市五ヶ庄）

1. はじめに

2011年3月11日午後2時46分、三陸沖を震源とするマグニチュード9の地震が発生した。著者らは、3月13日から16日にかけて宮城県、岩手県に入り、東北新幹線等構造物の振動による被害調査を行った。また3月29日から4月3日まで、土木学会地震工学委員会被害調査団（団長：川島一彦東京工業大学教授）として、主に津波被害域における構造被害調査を行うとともに、引き続き東北新幹線の被害調査も行った。

東北地方太平洋沖地震の被害域は広範囲にわたり、特に津波による被害が甚大であった。一方で、地震動の強さに比べ、振動による構造被害は多くはない印象がある。これは兵庫県南部地震以降、精力的に耐震補強および耐震設計法の改良が進められ、その効果が発揮されたものと考えられる。東北新幹線高架橋においても、耐震補強済の柱には致命的な被害は発生しなかった。一方で、耐震補強されていなかった構造物に数多くの被害が報告されているのも事実である。本論文は、本地震の振動による代表的な被害として、東北新幹線第1中曽根高架橋を取り上げ、その損傷メカニズムについて検討することを目的としている。

2. 東北新幹線と過去の地震被害

東北新幹線は1982年に開業し、2011年現在、東京～新青森間を結んでいる。建設当時の設計基準は、「全国新幹線網建造物設計標準（東北、上越、成田用）1972(S47.6)」であり、耐震設計基準について

は、「建造物設計標準 鉄筋コンクリート構造物および無筋コンクリート構造物、プレストレストコンクリート鉄道橋 1970(S45.3)」が適用されていた¹⁾。

1978年2月20日に発生した宮城県沖地震により、建設途上であった東北新幹線は被害を受けた。支承の被害が中心であるが、ラーメン高架橋の柱、中層はりのひび割れなどが確認された³⁾。2003年5月26日に発生した三陸南地震により、東北新幹線は水沢江刺-盛岡間の高架橋柱にせん断破壊を含む大きな損傷が発生した^{3,4)}。その後、2004年の新潟県中越地震で上越新幹線高架橋にも大きな被害が発生したこともあり、2004年より5カ年計画にて、新幹線高架柱の耐震補強計画が実施された。東北新幹線高架橋の51,100本の柱のうち、せん断破壊先行型と判定された12,500本が補強の対象となり、2007年までに工事が完了している。引き続き、2009年より第2期の耐震補強計画が始まり、曲げ破壊先行型の耐震補強が進められている。

3. 調査対象高架橋

第1中曽根高架橋は、東京より約456km地点の北上-新花巻間に位置する全長約350mの高架橋であり、1978年に建設された（図-1）。本高架橋は、写真-1に示すように、両端にゲルバー桁を有する一層ラーメン高架橋であり、長さ35mの4径間ラーメン（R1～R3）と長さ25mの3径間ラーメン（R4～R9）の9つのラーメン構造とそれをつなぐゲルバー桁から構成されている。東北新幹線の設計は、山陽新幹線を基本としているが、東北地方では雪荷重を考慮している。また設計震度は0.2である¹⁾。高架橋周

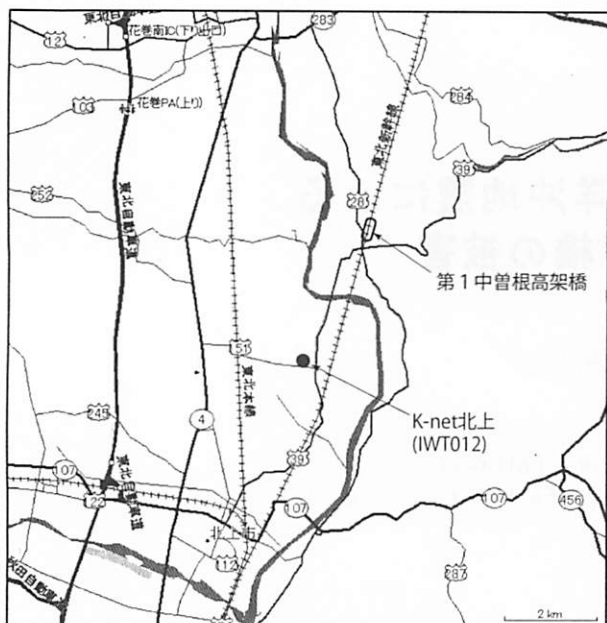


図-1 第1中曽根高架橋の位置

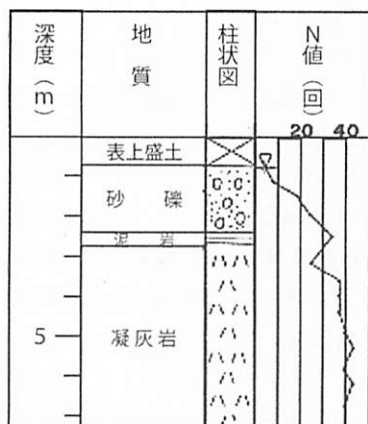


図-2 第1中曽根高架橋位置の柱状図 (2) を基に作成)

辺のボーリング柱状図²⁾を図-2に示すが、支持層は地表面から1.3m位置にあり、本高架橋は直接基礎で支持されている。

柱には耐震補強された形跡はなく、本高架橋は2004年から実施されていた耐震補強計画の対象外であった。

4. 被害の概要

図-2に高架橋を構成するラーメン構造の各柱の被害状況を示すとともに、それぞれの被害状況を写真-2～6に示す。

主な被害は、ラーメン構造の端部柱に集中しており、中間柱においては、R7を除き、大きな損傷は確認されなかった。

R1からR3の端部柱上部において、かぶりコンクリートが剥落するとともに、コアコンクリートが玉石状になるほど破砕した。コアコンクリートが破砕しているため、明確なひび割れ面が確認できないものの、R2-5などをみると、柱上部から斜め方向の損傷が確認できるため、これら柱はせん断破壊したものと考えられる。

また、R7の端部柱の4本において、軸方向鉄筋が提灯状に座屈し、軸力支持能力を喪失するほどの甚大な被害を受けた。その結果、鉛直方向に約20センチ程度沈下した。写真-6にR7の全体写真を示す。本高架橋は地中梁を有しているため、力学的には両端固定の柱となる。これに水平方向の変形が生じると、

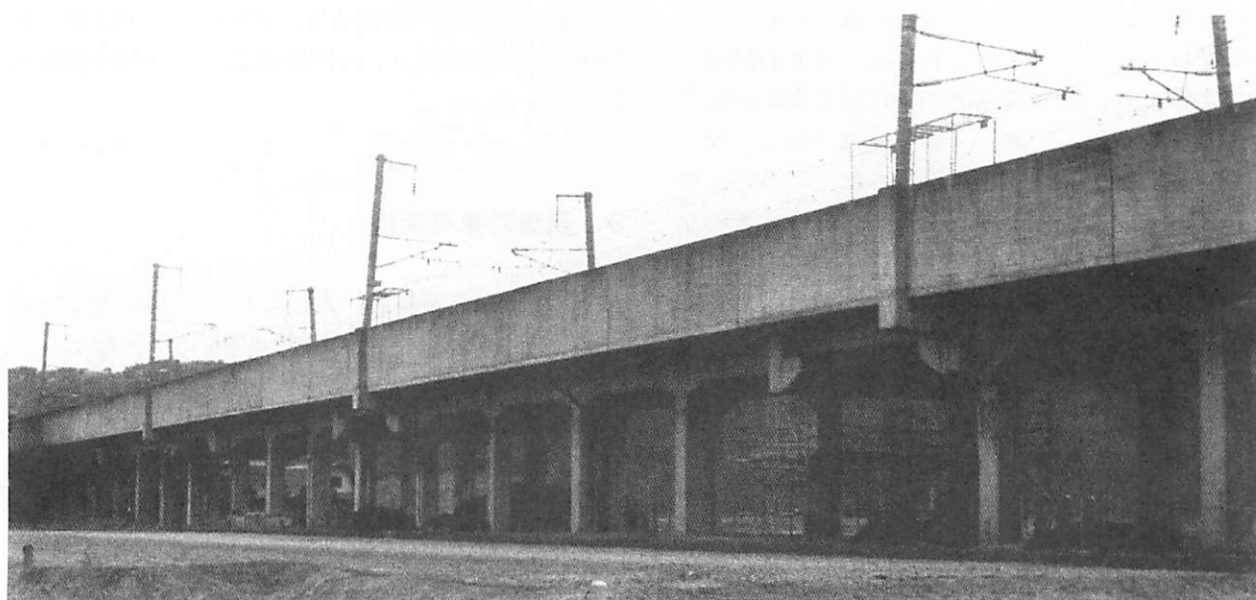


写真-1 第1中曽根高架橋の遠景

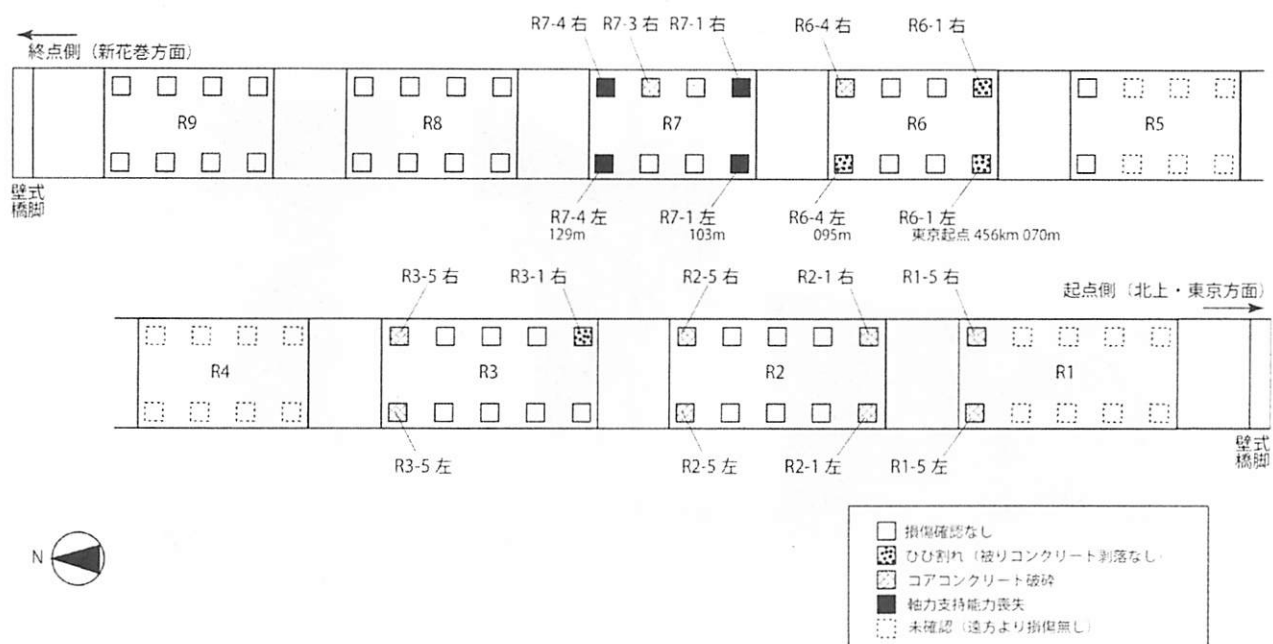


図-2 第1中曽根高架橋(R1~R9)の被害概要



写真-2 R1, 2 における端部柱の被害

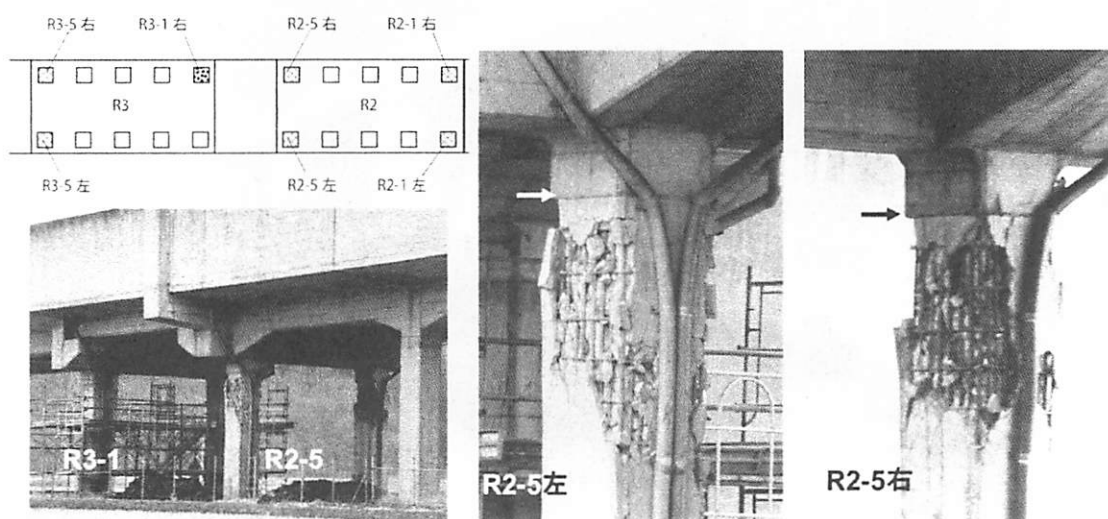


写真-3 R2 における端部柱の被害

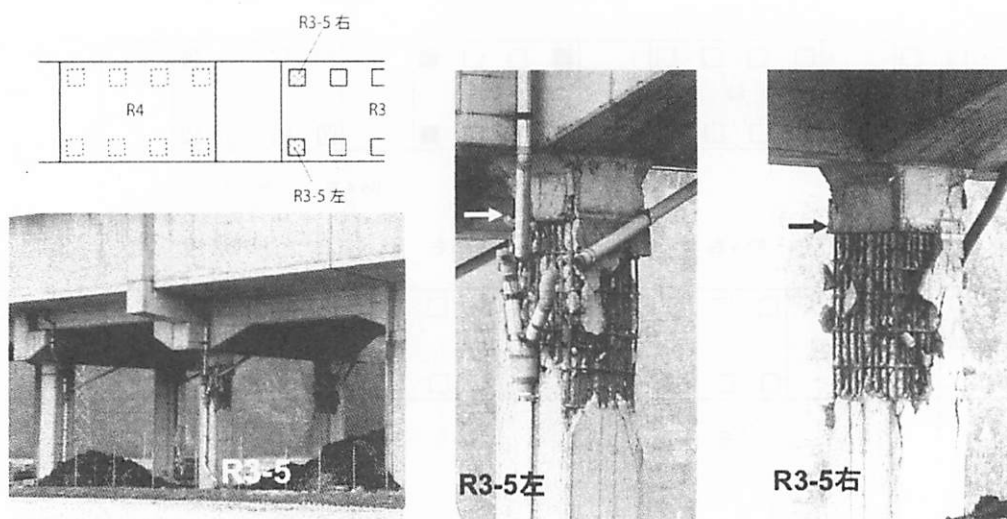


写真-4 R3における端部柱の被害

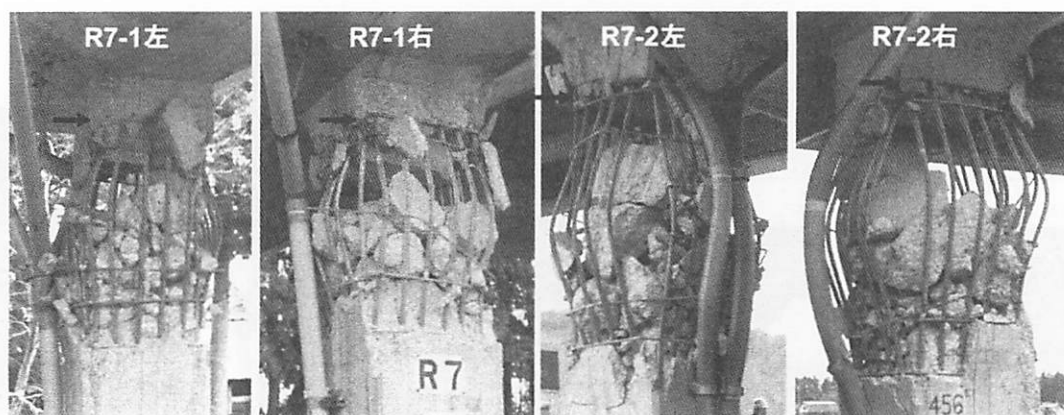


写真-5 R7における端部柱の被害

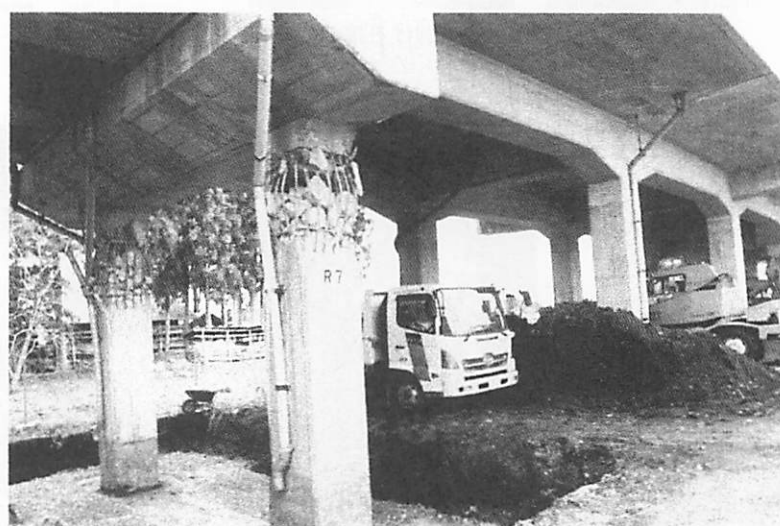


写真-6 R7の全体写真

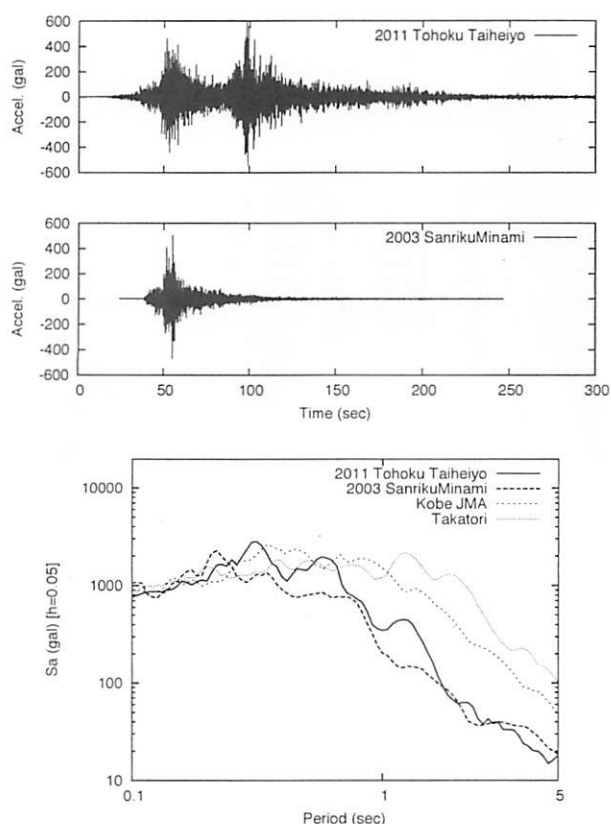


図-3 IWT012における観測記録(NS)と応答スペクトル

上下端において損傷が発生すると考えるのが一般であるが、写真-6に示すように、地中梁直上の柱下端には損傷が確認できない。R1～R7のいずれの柱においても、破壊は柱上部のみで発生している。

4. 高架橋近傍の地震記録

本高架橋から約3km南にK-NET北上(IWT012)観測点がある(図-1)。秦らの調査⁵⁾により、本高架橋地点とK-NET北上のサイト特性は異なる可能性は高いものの、最も近傍で得られた地震記録として、本高架橋に作用した地震動の参考として用いることとする。

K-NET北上で観測された今回の地震記録、2003年三陸南地震記録、および応答スペクトルを図-3に示す。今回の地震は、明瞭な2つのフェイズが確認できるとともに、3分以上振動が続いており、三陸南地震と最大加速度レベルは大きく異なるもの、継続時間ははるかに長い。最大加速度は約600galであり、宮城県の築館等で得られた記録と比較すると大きなものではない。また応答スペクトルを見ると、0.5秒以下は1995年兵庫県南部地震記録とほぼ同等であるが、1秒以上は小さい。

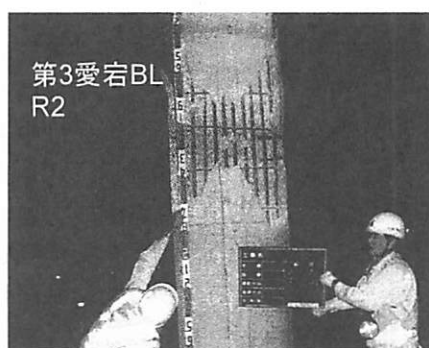
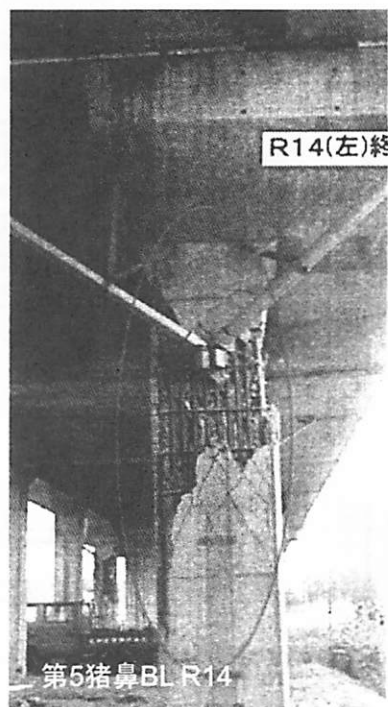


写真-7 2003年三陸南地震による高架橋の被害¹⁾

5. 破壊形態に関する考察

本高架橋の破壊形態に関し、2003年三陸南地震による被害との類似点・相違点に留意しつつ考察する。

写真-7に三陸南地震によりせん断破壊した東北新幹線高架橋柱を示す。これら破壊はいずれもラーメン構造の端部柱で発生しており、本高架橋の被害も

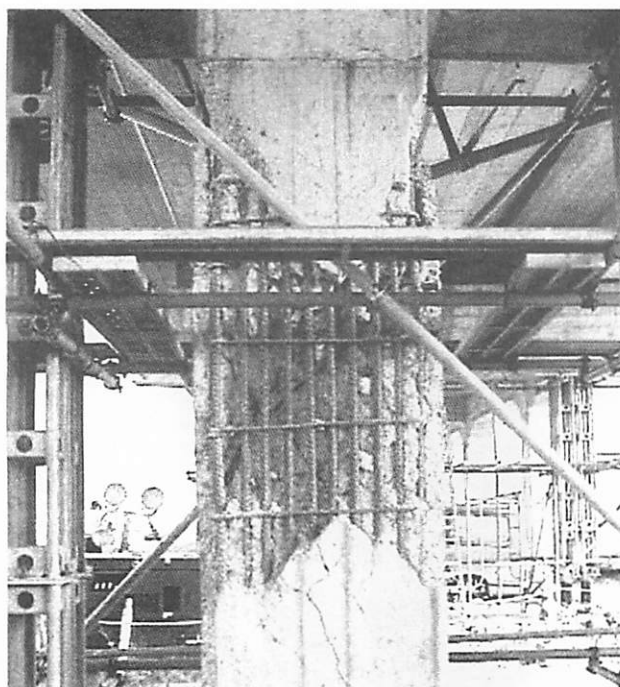


写真-8 三陸南地震による第3愛宕BLの損傷領域¹⁾

同様である。三陸南地震による被害調査報告において、ゲルバー桁を有する一層ラーメン高架橋は、その端部に桁受け部を設けるため、柱高さは中央柱に比べて短くなり、せん断破壊が端部柱に起きやすいことが指摘されている³⁾。今回も同様の影響があったと考えられるが、留意すべきは本高架橋はせん断破壊先行型柱と判定されていなかったにも関わらず、このような被害が発生したことである。

写真-7に示す第3愛宕高架橋や第2中野高架橋の損傷領域は、柱高さ方向に比較的長く、またX状に損傷領域が確認できるため、明確にせん断破壊であることが判断できる。一方、本高架橋の損傷は、柱上部に発生し、またその損傷領域は比較的短いことから、破壊に対して曲げモーメントが寄与していることは間違いない。ただ、コアコンクリートの損傷が柱頭から少し離れた位置で発生していること、また斜め方向の損傷も確認できることを考え合わせると、曲げとせん断が同時に作用する部材端部周辺で応力が厳しくなり、せん断破壊が発生したものと考えられる。

コアコンクリートの損傷に関し、三陸南地震による第3愛宕高架橋柱の損傷領域を拡大したものを写真-8に示す。この写真では、損傷領域を斜めに貫く明確なせん断ひび割れが確認できる。一方、本高架橋の損傷領域は、ひび割れ面が確認できないほどコンクリートが破碎されている点が大きく異なっている。この原因として、4章で示したように、今回の地震は継続時間が長く、またラーメン構造であるた



写真-9 R7柱破壊部の断面

めに端部柱がせん断破壊したとしても直ちに崩壊することがないために、斜めひび割れ発生後も正負に振動し、コンクリートが破碎したものと考えられる。

次に軸力支持能力が喪失したR7柱の損傷メカニズムを考察するため、写真-9に柱破壊部の拡大写真を示す。破壊部上側の断面は平面的であり、これより下部のコンクリートは滑落している。この位置は柱と桁の打ち継ぎ目であり、この箇所を起因とするひび割れが発生、破壊が進展したと見ることもできる。ただ、写真-2～5中の矢印は打ち継ぎ位置を示すが、必ずしもこの箇所が損傷しているものではない。したがって、本柱の破壊も打ち継ぎ目より下部でせん断ひび割れが発生し、コアコンクリートが破碎、その後せん断補強筋が外れることによりコンクリートが脱落、打ち継ぎ目で分離した、と考えるべきであろう。

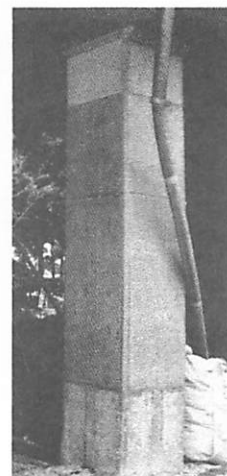
破壊形態を推定するに際しては、柱の曲げせん断耐力比により分類することが一般的である⁶⁾が、実際には曲げ破壊先行型とせん断破壊先行型を明確に区別できるわけではない。本高架橋はJRの基準ではせん断破壊先行型と判断されなかったものの、今回の地震によって、多くの柱においてせん断破壊が発生したこと、また写真-10に示すように、端部柱は桁とその上を走る新幹線重量を直接支持する重要な柱であることを考えると、より安全側の評価をすべきであり、破壊形式の判定に対する大きな課題を突きつけたと言える。



写真-10 端部柱の損傷とゲルバー桁



a) 復旧方法1



b) 復旧方法2

6. 緊急復旧法と4月7日の余震による損傷

本高架橋では、新幹線運行再開に向け、R7のような大きな損傷に対しては、座屈した鉄筋を除去し、新しい鉄筋を溶接、帯鉄筋を配置してRC巻立により補強された（写真-11の復旧方法1）。その他損傷レベルに応じ、かぶりコンクリートをはつり、無収縮モルタルで断面修復したもの（復旧方法2）、ひび割れ部にアクリル樹脂を注入したもの（復旧方法3）などが施された。

緊急復旧工事が完了し、盛岡～一ノ関間の新幹線運行再開が発表された4月7日、マグニチュード7.4の余震が発生した。IWT012で得られた記録を図-4に示す。本震と継続時間は大きく異なるものの、応答スペクトルはほぼ同等の地震であり、この余震により、新たに多くの高架橋に被害は発生するとともに、本高架橋においても復旧方法1により修復された柱も再び損傷した（写真-12）。損傷は柱上部の曲げによるものと考えられるものの、帯鉄筋を配置してRC巻立された部分も損傷している。余震といえども破壊力のある地震が発生したことは、緊急復旧下での新幹線の運行再開の是非も含む問題提起と考えるべきであろう。

7. まとめ

本論文では、2011年東北地方太平洋沖地震における代表的な震動による被害として、東北新幹線第1中曽根高架橋の被害について考察した。ラーメン構造端部柱の上部において、コアコンクリートが破砕するほどの大きな被害が発生した。これは継続時間



c) 復旧方法3

写真-11 緊急復旧法

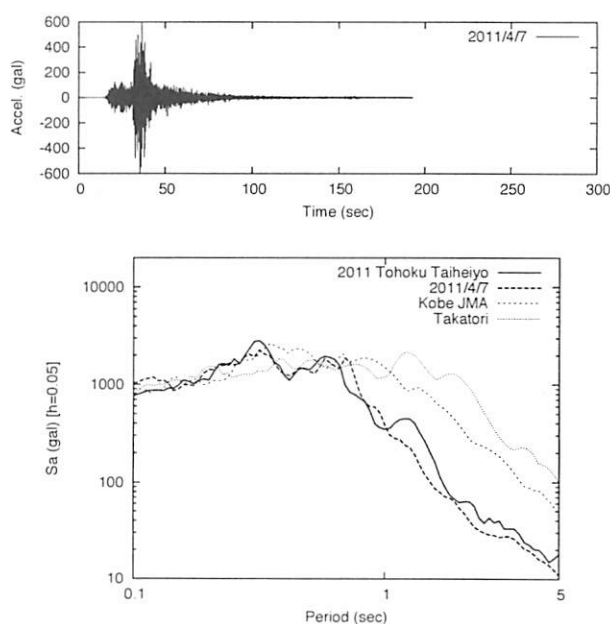


図-4 IWT012における4/7余震記録 (NS)



写真-12 4月7日の余震による損傷

の長い地震動により、せん断ひび割れが発生した柱が繰り返し振動され、破碎したものとする。端部柱は桁とその上を走る新幹線重量を直接支持する重要な柱であることを考えると、より安全側の評価をすべきであり、せん断破壊先行型の評価法の再検討などが不可欠であるとする。

謝辞：本研究では、（独）防災科学技術研究所K-NETによる地震観測記録を使用させていただきました。

た。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本国有鉄道盛岡工務局：東北新幹線工事誌 有壁・盛岡間，1982.
- 2) 日本国有鉄道盛岡工務局：東北新幹線（有壁・盛岡間）地質図，1981.
- 3) 土木学会：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 No.114，2004.
- 4) 土木学会：2003年、2004年に発生した地震によるコンクリート構造物の被害＜CD-ROM写真集＞，コンクリートライブラリー No.115，2004.
- 5) 秦吉弥・野津厚・中村晋・高橋良和・後藤浩之：拡張型サイト特性置換方法に基づく2011年東北地方太平洋沖地震による新幹線橋梁被災地点での地震動の推定，第14回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，2011.
- 6) 石橋忠良・池田靖忠・菅野貴浩・岡村甫：鉄筋コンクリート高架橋の地震被害程度と設計上の耐震性能に関する検討，土木学会論文集，No.563，pp. 95-103，1997.