

補修・補強効果の長期持続性・耐久性に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 21～平 24

担当チーム：橋梁構造研究グループ

研究担当者：星隈順一，塚淳一，張広鋒

【要旨】

近年、老朽化した橋梁に対して補修・補強対策が実施されてきているが、適切な補修・補強工法の選定の観点より、補修・補強効果の長期持続性の評価研究を行うことが不可欠である。また、平成 7 年兵庫県南部地震以降、道路橋の耐震補強についても施策的に進められており、その補強効果の長期持続性の検証も重要となっている。本研究では、道路橋に対する補修・補強事例や耐震補強事例のフォローアップ調査結果に基づき、補修・補強効果の長期持続性および対策方法の整理を行う。平成 23 年度は、平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震において、耐震補強されていた橋梁の被害状況の調査・分析を行い、近年に実施してきた耐震補強の補強効果を定性的に検討した。

キーワード：補修，補強，長期持続性，耐久性，耐震性能

1. はじめに

供用開始から 50 年を経過する橋梁が今後加速度的に増加することから、橋梁の老朽化に対して適切に維持管理していくことが重要であり、また、そのために有効かつ適切な補修・補強工法を適用していくことが必要である。しかし、これまでに実施されてきた補修・補強工法において、その後の劣化・耐久性に関しては十分なデータが取られておらず、適切な補修・補強工法の選定という観点からも補修・補強効果の長期持続性の評価を行うことが不可欠である。また、平成 7 年兵庫県南部地震以降、道路橋の耐震補強についても施策的に進められており、その補強効果の長期持続性の検証も重要となっている。本研究は、道路橋に対する補修・補強事例や耐震補強事例のフォローアップ調査結果に基づき、補修・補強効果の長期持続性および対策方法の整理を行うものである。

2011 年 3 月 11 日に、三陸沖を震源とするモーメントマグニチュード 9.0 の平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震が発生した。今回の地震では、地震による揺れだけでなく、地震後に大規模な津波が発生し、これにより道路橋に大きな被害が生じた^{例えば 1)～5)}。今回の地震は、1995 年兵庫県南部地震以降の地震の中でも最も大きいクラスの地震であり、耐震補強効果の長期持続性を検討する観点より、近年に実施され始めた道路橋の耐震補強の補強効果を検証しておくことが重

要である。

平成 23 年度は、道路橋に対して実施されてきた耐震補強の補強効果を検証することを目的として、平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震において地震動の影響を受けたと考えられる橋梁の被害状況の調査・分析を行った上、その耐震補強の補強効果を定性的に検討した。

2. 平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震の特徴および橋梁被害のマクロ分析

平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震では、様々な機関によって多くの地点の加速度記録が観測された。各地点の地震動の特性は、震源からの距離や地盤条件に応じて様々な記録が観測されているが、橋のような構造物への影響が大きくなる 1.0 秒前後の周期帯での加速度応答スペクトルに着目すると、兵庫県南部地震において観測された加速度応答スペクトルと同等もしくはそれよりも低い値であった。また、今回の地震は、地震動の継続時間が過去の強震記録と比較しても長いという特徴が見られた。

構造物メンテナンス研究センターでは、岩手県、宮城県および福島県各県内の直轄国道 11 路線にある道路橋（ただし、福島第一原子力発電所から半径 20km 範囲にある道路橋は除く）の地震後の緊急点検結果を

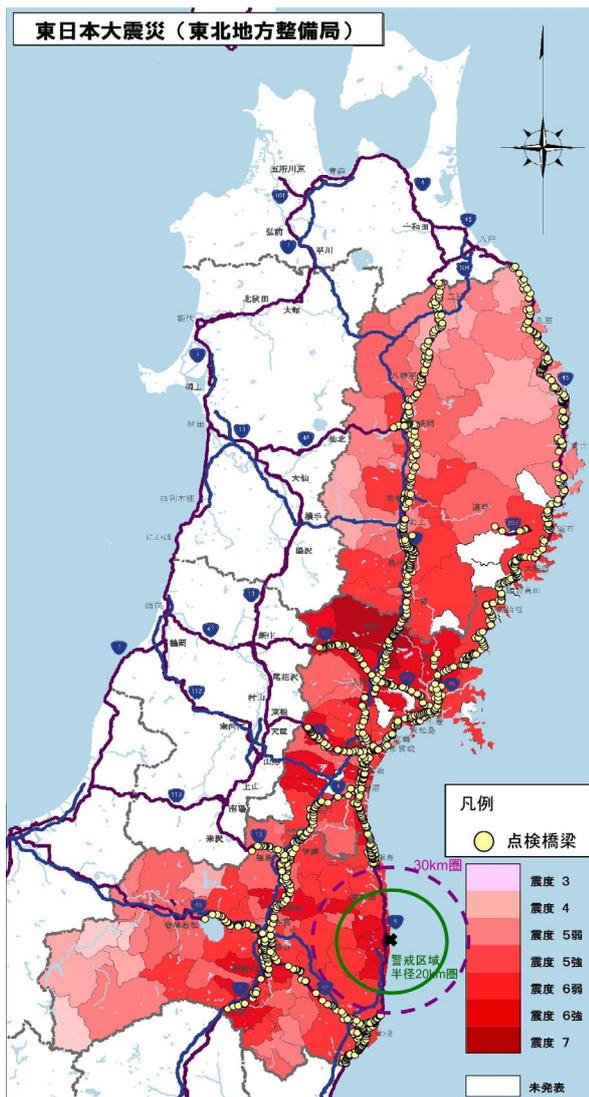


図-1 調査対象路線および橋梁の位置
(東北地方整備局より)

基に橋梁被害のマクロ分析を行った。図-1 にこれらの路線および橋梁の位置図を示す。図-2 にこれらの橋梁の被害状況を示す。ここで、損傷箇所は、1 橋に主な損傷 1 箇所を代表としたものである。これらの結果より、背面盛土の沈下による段差等の橋台背面の損傷は、全体の 45% を占め、支承部と伸縮装置部の損傷は、それぞれ全体の 10% と 8% を占めることが分かる。また、津波の影響を受けた橋は全体の 9% となり、その中、87% の橋は損傷が確認された。

本研究では、地震後に点検が実施された橋梁のうち、橋脚の補強や落橋防止対策等の耐震補強対策が実施されていた 443 橋を対象として、被害状況のマクロ分析を重点的に実施した。古い基準が適用されて設計された既設橋にも様々な形式の橋があるが、これらの橋は、

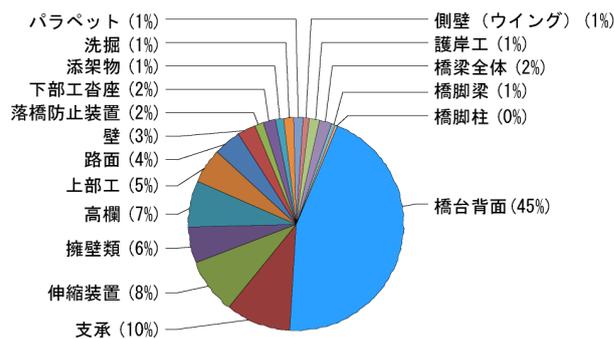


図-2 調査対象橋梁の被害状況

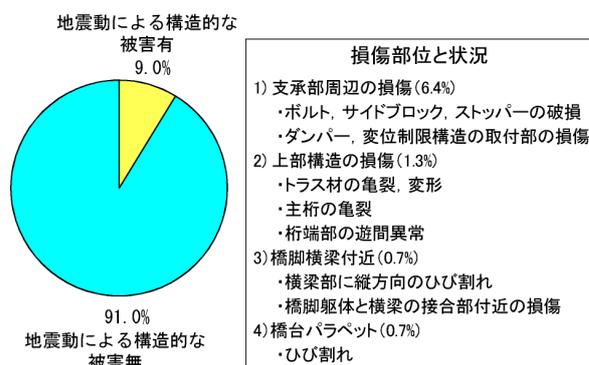


図-3 耐震補強が実施された橋の被害状況

過去の震災経験を踏まえ耐震対策の優先度が高いと判断された構造形式の橋であり、それぞれの橋の構造特性や耐震補強工事の施工条件等に応じて、橋脚の耐震補強、制震ダンパーによる減衰性の向上、変位制限構造等の取り付け等の耐震対策が実施されているものである。

図-3 は、マクロ分析結果を示すものである。ここで、本研究では、地震動に対して構造的な耐震補強対策が実施された橋についての分析を行うという主旨に鑑み、損傷を「構造的な被害」の有無の観点で整理した。すなわち、「構造的な被害」とは、橋の構造部材（上部構造、下部構造、支承部等の構造部分）に生じた地震動による損傷を指すものとし、橋台背面土の沈下、アスファルト路面や高欄、添架物の損傷、擁壁や護岸のずれ等の被害については「構造的な被害」には含めていない。また、津波により生じた構造的な被害についても、ここでは「構造的な被害」には含めていない。地震後に実施された点検の結果、耐震補強が実施されていた橋においては落橋や倒壊等の致命的な被害はなく、構造的な被害が生じた橋は全体の 9% であった。その 9% の橋における具体的な被害の発生状況としては、図



(a) 耐震補強されていなかった橋脚の損傷



(b) 耐震補強されていた橋脚の状況

図-4 RC 橋脚の耐震補強が橋の耐震性能の向上に与えた効果 (岩手県奥州市)

-3 に示すとおり、1) 支承部周辺の損傷 (6.4%)、2) 上部構造の損傷 (1.3%)、3) 橋脚横梁付近の損傷 (0.7%)、4) 橋台パラペットの損傷 (0.7%)、の4つの分類に大別することができた。

これらの分析結果より、これまでの震災で多く見られた橋脚躯体部の損傷は生じていない。これは、軸方向鉄筋の段落し部に対する耐震補強等がなされている効果が要因として考えられる。一方、支承部に対する機能を補強する対策として制震ダンパーや変位制限構造を設置した橋があるが、これらの装置の取り付け部に損傷が生じている例があった。また、数は非常に限定的ではあるが、前述したように、落橋防止構造の取り付け部付近の上部構造側の部材に損傷が生じたり、躯体部が耐震補強されたT型橋脚の横ばり付け根部で損傷が生じたりした橋もあった。橋脚等に対して耐震補強がなされた橋であっても、地震後の供用性を確保する上で重要な別の部位に損傷が生じた事例については、注視して検討が必要な損傷と言える。

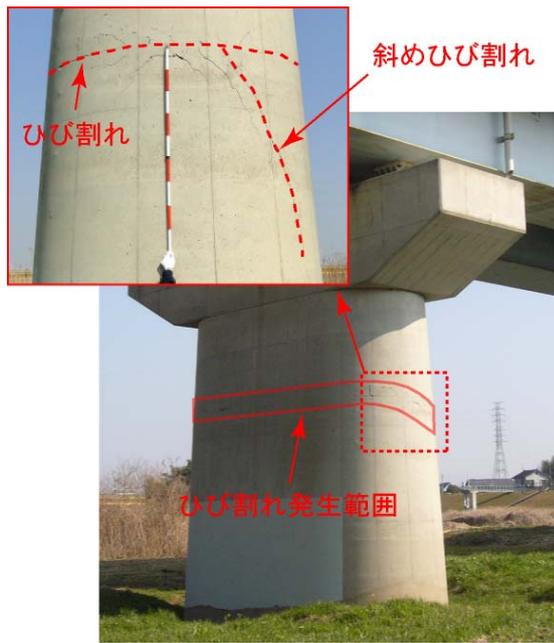
3. 耐震補強効果の検討

本研究では、耐震補強されていた橋と耐震補強されていなかった橋の被害状況を比較することによって、耐震補強効果の検証を行った。以下に、例として、橋梁位置が近く、構造形式も近い橋梁を対象とした検討結果を示す。

図-4 は、岩手県奥州市に架かる2橋の地震後の状況を比較して示したものである。図-4(a) に示す橋は9

径間連続 PC 桁橋 (設計年次: 昭和 47 年) で、地震時にはダンパーストッパーを通じて上部構造の慣性力が各下部構造へ伝達される構造となっている。本橋では、鉄筋コンクリート橋脚の段落し部に対する耐震補強は未実施であったが、今回の地震により、段落し部で軸方向鉄筋がはらみ出す程度の大きな損傷が生じた。このため、本橋は地震後に全面通行止めの措置がなされた。一方、図-4(b)は、図-4(a)の橋から直線距離でおよそ4kmの位置に架かる3連の3径間連続鋼桁橋(設計年次: 昭和 49 年)であるが、鉄筋コンクリート橋脚に対して RC 巻立て工法により耐震補強が実施されていた。この橋では、可動支承において桁が振動した形跡が痕跡として残されており、相応の振動が生じたものと想定されるが、固定支承部の橋脚を含め損傷は生じてなく、地震後も橋としての機能が維持できている。図-4の2橋の被災状況を比較すると、全径間数は同じでも、上部構造の条件が違うため、橋の振動特性は必ずしも同等とは言えないが、ほぼ同じ時期に設計され、また、比較的近い位置に立地していたという条件を鑑みると、耐震補強により橋の耐震性能には相応の差があったと推察することができ、図-4(b)の橋における鉄筋コンクリート橋脚の耐震補強は、橋の耐震性能の向上に貢献したものと考えられる。

また、図-5 は、茨城県水戸市を流れる河川に架かる隣接した2橋の地震後の状況を比較して示したものである。図-5(a)に示す橋は2連の3径間連続鋼箱桁橋で、下部構造は昭和 46 年道路橋耐震設計指針が適用されて設計されている。本橋では、鉄筋コンクリート橋脚に対する耐震補強等はされていなかったが、今回の地



(a) 耐震補強されていなかった橋脚の損傷



(b) 耐震補強されていた橋脚の状況

図-5 RC 橋脚の耐震補強が橋の耐震性能の向上に与えた効果 (茨城県水戸市)



図-6 亀田大橋の全景写真

震により、鉄筋コンクリート橋脚の軸方向鉄筋の段落し部において斜め方向のせん断ひびわれが生じる被害が生じた。外観からみた損傷としては、先の図-4(a)ほどまでには進展していないが、兵庫県南部地震で橋脚の倒壊に至った段落し部での破壊形態における初期の損傷状態であり、余震によりさらに損傷が進展した場合の状況を想定すれば決して軽視できない被害である。この橋では全面通行止めの措置がなされた。一方、図-5(b)は、図-5(a)の橋から約 400m 上流側にほぼ平行して架かる 3 径間連続鋼箱桁橋と 4 径間連続鋼箱桁橋から構成される橋における固定支承を有する鉄筋コンクリート橋脚の状況を示したものである。この橋脚では、

RC 巻立て工法により耐震補強がなされており、地震による損傷は生じていない。これらの 2 橋は、上部構造の幅員や橋脚の寸法等に違いはあるが、構造形式は概ね同様であり、振動特性も近似していると推測され、さらに、距離的にも非常に近接しており、橋が架かっている向きもほぼ同じであることから、両橋は同等の地震動の影響を受けたものと考えられる。そのような 2 橋を、地震後に橋としての機能の回復が速やかに行えたかどうかという耐震性能の観点から比較してみると、その違いは明白であり、橋脚に対して実施していた耐震補強が橋の耐震性能を向上させたことを示す一つの事例と言える。

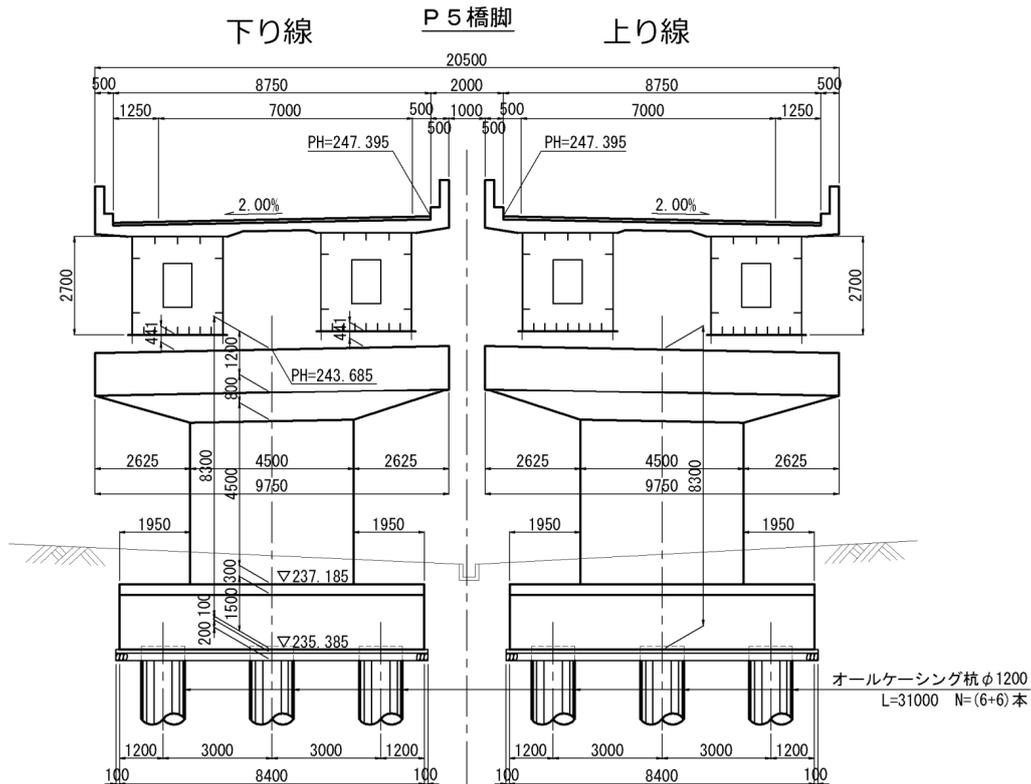


図-7 亀田大橋 P5 橋脚の図面

表-1 亀田大橋 P5 橋脚の諸元

| | 下り線 | 上り線 |
|--------|--|--------------------------------------|
| 上部構造 | 2径間連続鋼箱桁橋 | 2径間連続鋼箱桁橋 |
| 橋長 | 120.10m | 120.10m |
| 支間長 | 59.5m + 59.5m | 59.5m + 59.5m |
| 荷重 | TL-20 | B活荷重 |
| 支 承 | Fi xBP沓, MvBP沓 タイプ A | ゴム支承 タイプ A |
| 下部構造 | 梁出し式橋脚 | 梁出し式橋脚 |
| コンクリート | $\sigma_{ck}=210 \text{ kg/cm}^2$ | $\sigma_{ck}=21 \text{ N/mm}^2$ |
| 鉄筋 | 材質 SD30 | 材質 SD295 |
| 基礎形式 | 杭基礎 | 杭基礎 |
| 架設年度 | 1987年（昭和62年） | 1997年（平成9年） |
| 適用基準 | 昭和53年 道路橋示方書 コンクリート橋編 昭和55年 道路橋示方書 共通編・下部構造編 耐震設計編 | 平成6年 道路橋示方書 復旧仕様（平成7年）により修正設計 |
| 補強履歴 | 2006年（平成18年） R C 巻き立て補強 2009年（平成21年） 変位制限構造 落橋防止構造 | --- 2009年（平成21年） 変位制限構造 落橋防止構造 |

4. 亀田大橋の損傷メカニズムの分析

4.1 亀田大橋の概要と損傷状況

亀田大橋は、福島県郡山市の国道4号あさか野バイパスが国道49号を跨ぐ箇所にかかる橋長280m、幅員

9.75mの8径間のこ道橋（4径間連結PCポステンTげた橋+2径間連続鋼箱げた橋+2径間連結PCポステンTげた橋）である。図-6に亀田大橋の全景写真を示す。下り線は、1期線として1987年に竣工、上り線は、2期線として1997年に竣工した。下部構造は、



(a) 地震による損傷の状況



(b) 応急復旧後の状況

図-8 亀田大橋 P5 橋脚の損傷状況

躯体が逆T式橋台と壁式橋脚，基礎は杭基礎となっている。支承はゴム支承が用いられている。

図-7 に今回の地震で損傷が生じた P5 橋脚の図面を示す。下り線は，適用基準は，昭和 53 年道路橋示方書であり，下部構造の躯体は逆 T 式橋台と壁式橋脚，基礎は杭基礎となっている。支承は鋼製支承板支承である。2006 年および 2009 年に耐震補強が実施され，それぞれ RC 巻立てによる橋脚の補強，変位制限構造及び落橋防止構造が設置された。上り線の適用基準は，平成 6 年道路橋示方書であり，その後，兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様に基づき修正設計が行われている。2009 年に実施された耐震補強によって，変位制限構造，橋軸方向に制震デバイス（粘性ダンパー）が設置されている。表-1 に P5 橋脚の諸

元を示す。

平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震では，連続鋼箱桁橋の中間橋脚である P5 橋脚の上り線と下り線ともに損傷が生じたが，それ以外の橋脚と橋台では，明瞭な損傷が確認されなかった。図-8 に P5 橋脚の損傷状況写真を示す。下り線の P5 橋脚には，両側の張り出し部の付け根部に天端上面から下方に向かって縦方向の幅約 10 mm のひび割れが生じていた。これに伴って，支承部の沓座モルタルにもひび割れや割れが生じていた。この損傷の進展及び二次災害の防止のために，横梁部を支持する仮設支保工を設置し，はり部下端部と柱部の隙間はコンクリートで埋める処置がなされた。なお，変位制限構造には，損傷は確認されなかった。上り線の P5 橋脚は，4 つの変位制限構

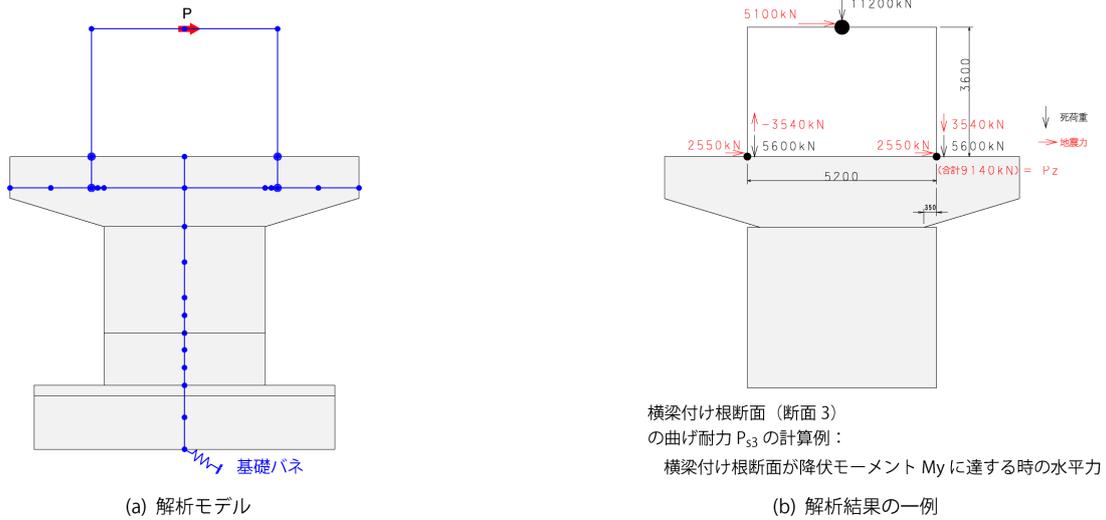


図-9 解析モデルおよび解析結果の一例

表-2 亀田大橋 P5 橋脚の断面耐力の比較

| 下り線, 補強前 | 下り線, 補強後 | 上り線 |
|---|---|---|
| | | |
| $P_{s1-1} = 6,440 \text{ kN}$ | $P_{s1-2} = 6,850 \text{ kN}$ | $P_{s1-3} = 8,450 \text{ kN}$ |
| $P_{s2-1} = 6,117 \text{ kN}$ | - | - |
| $P_{s3-1} = 5,100 \text{ kN}$ | $P_{s3-2} = 5,100 \text{ kN}$ | $P_{s3-3} = 10,100 \text{ kN}$ |
| $P_{s4-1} = 10,040 \text{ kN}$ | $P_{s4-2} = 10,040 \text{ kN}$ | $P_{s4-3} = 7,040 \text{ kN}$ |
| - | $P_{s5-2} = 11,110 \text{ kN}$ | $P_{s5-3} = 11,110 \text{ kN}$ |
| $P_{s3-1} < P_{s2-1} < P_{s1-1} < P_{s4-1}$ | $P_{s3-2} < P_{s1-2} < P_{s4-2} < P_{s5-2}$ | $P_{s4-3} < P_{s1-3} < P_{s3-3} < P_{s5-3}$ |
| | | |

$P_{s1-1}, P_{s1-2}, P_{s1-3}$: 橋脚基部断面が降伏に達した時の作用力 (断面1)
 P_{s2-1} : 軸方向鉄筋段落し部断面が降伏に達した時の作用力 (断面2)
 $P_{s3-1}, P_{s3-2}, P_{s3-3}$: 横梁付け根断面が降伏に達した時の作用力 (断面3)
 $P_{s4-1}, P_{s4-2}, P_{s4-3}$: 支承部サイドブロックが設計せん断耐力に達した時の作用力 (断面4)
 P_{s5-2}, P_{s5-3} : 変位制限構造が設計せん断耐力に達した時の作用力 (断面5)

造及び2つの支承部の両サイドのサイドブロックに損傷が生じていた。なお、張り出し部の付け根部では、下り線側の橋脚に生じたようなひび割れは生じていない。

一方、応急対策として、PC 鋼棒を用いて橋軸直角方向における横締めがなされた後、横梁の外側をコンクリートで巻き立てる対策が応急的に実施された。

4.2 損傷メカニズムの検討

本検討では、1) 耐震補強による下り線橋脚の弱点部の変化の把握、2) 下り線横ばり付け根のひび割れの発生メカニズムの解明、3) 上下線の損傷形態の違いの原因究明、を目的として、耐震上に弱点部となる可能性のある断面に対して、断面耐力の照査および比較検討を行った。照査では、表-2 に示すように、以下の断面およびその断面耐力を対象とした。

- ・断面 1：橋脚基部の曲げ耐力
- ・断面 2：軸方向鉄筋段落し部断面曲げ耐力
(下り線補強前のみ)
- ・断面 3：横ばり付け根断面の曲げ耐力
- ・断面 4：支承部サイドブロックのせん断耐力
- ・断面 5：変位制限構造のせん断耐力

図-9 に、解析モデルおよび照査結果の一例を示す。表-2 に各断面の耐力の比較を示す。ここで、これらの耐力は、上部構造重心位置に力を作用してプッシュオーバー解析を行い、対象断面に生じた断面力は降伏耐力やせん断耐力に達した時の作用力である。例えば、横ばり付け根断面（断面 3）の場合は、図-9 に示す载荷方法において、断面 3 を降伏させるために必要とする作用力 P である。この作用力 P は、従来の断面の曲げ耐力と異なっているものである。断面 1～断面 5 において作用力 P が最小となる断面は、その橋脚の最も弱点部となる。

表-2 より、下り線 P5 橋脚は、柱躯体部の RC 巻立て補強によって基部断面と軸方向鉄筋段落し部断面耐力が増加しているが、横ばりは補強対象部位ではないため、橋脚躯体部補強の前後とも、横ばり付け根の断面が最も弱い断面であることが分かる。一方、上り線 P5 橋脚は、支承部のサイドブロックが最も弱い部位となっている。なお、図-8 に示す損傷状況と比較してみると、これらの照査によって求めた最も弱点断面は、実際の損傷部位と一致していることが分かる。すなわち、下り線 P5 橋脚は、最も弱い断面である横梁付け根にひび割れが生じ、上り線 P5 橋脚は、最も弱い断

面である支承部サイドブロックが損傷し、変位制限構造にも損傷が生じた。

5. まとめ

平成 23 年度では、道路橋に対して実施されてきた耐震補強の補強効果を検証することを目的として、平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震において地震動の影響を受けたと考えられる橋梁の被害状況の調査・分析を行った。幾つかの橋梁に対する比較検討より、近年に実施してきた耐震補強が橋の耐震性能を向上させたことが確認された。しかしながら、落橋防止構造の取り付け部付近の上部構造側の部材に損傷が生じたり、躯体部が耐震補強された T 型橋脚の横ばり付け根部で損傷が生じたりした橋があった。これらの損傷は致命的な損傷ではないものの、補強後の構造における地震後の緊急点検では注意して点検する必要がある損傷である。

参考文献

- 1) 国土技術政策総合研究所，独立行政法人土木研究所：平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震，土木施設災害調査速報，国総研資料第 646 号・土研資料第 4202 号，2011 年 7 月
- 2) 星隈順一，玉越隆史：東北地方太平洋沖地震による道路橋の被災状況調査速報，橋梁と基礎，Vol.45，pp.32-35，2011 年 6 月
- 3) 星隈順一，張広鋒：東北地方太平洋沖地震における耐震補強がなされていた道路橋の概況について，日本地震工学会大会－2011 梗概集，pp.4-5，2011 年 11 月
- 4) 星隈順一，張広鋒，堺淳一：橋梁の耐震性の向上に向けて－東北地方太平洋沖地震における耐震補強された橋の挙動－，土木技術資料，Vol.54，No.1，pp.8-11，2012 年 1 月
- 5) Hoshikuma, J., Zhang, G.F. and Sakai, J.: Seismic Behavior of Retrofitted Bridges during the 2011 Great East Japan Earthquake, The International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake, March 3-4, 2012, Tokyo, Japan

EFFECT OF LONG-TERM PERSISTENCE AND DURABILITY ON EFFECTIVENESS OF REPAIR AND RETROFIT FOR HIGHWAY BRIDGES

Budgeted : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2009-2012

Research Team : Bridge and Structural Technology
Research Group

Author : HOSHIKUMA Jun-ichi, SAKAI Junichi and
ZHANG Guangfeng

Abstract :

In recently year, various kinds of technique have been applied on highway bridges for retrofitting the seismic performance of bridge or for repairing deteriorated members caused by alkali silica reaction (ASR), chloride attack or fatigue. This research is conducted with the purpose to study the long-term effect of the repair or retrofit technique for highway bridge. In the FY 2011, influences of The 2011 East Japan Great Earthquake on highway bridges that were retrofitted seismically before the earthquake were investigated and the retrofit effects were studied.

Key words : repair, retrofit, long-term persistence, durability, earthquake resistance