

道路橋の耐震補修補強における性能評価手法に関する研究（2）

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 31～令 3

担当チーム：寒地構造チーム

研究担当者：葛西聡、安中新太郎、秋本光雄、
松田伸吾、佐藤京、寺澤貴裕

【要旨】

地震により損傷した RC 橋脚の残存性能及び補修補強後の耐震性能を評価する手法は確立されていないのが現状である。そこで、現行の耐震性能に満たない RC 橋脚模型試験体に対して正負交番載荷により限界状態 2 に相当する損傷を与えた後、ひび割れ注入およびアラミド繊維シートによる補修を施し、再び、正負交番載荷を行い補修後の耐震性能の評価を行った。その結果、限界状態 2 に相当する損傷であれば、補修により耐震性能が確保できることを確認した。また、損傷が生じた RC 橋脚について、履歴吸収エネルギーを指標とした残存性能を評価した結果、本研究に用いた RC 橋脚模型の正負交番載荷試験において、限界状態 2 に至る直前の残存性能は 50% 程度確保できていることが分かった。

キーワード：残存性能、被災後復旧、履歴吸収エネルギー、アラミド繊維シート、じん性補強

1. はじめに

道路橋震災対策便覧（震災復旧編）¹⁾では、既往の実験結果などから、外観による損傷分類とその時の被災度、残留強度および残留変形性能が被災度判定表として整理されている。また、震災復旧実施例を参考に被災度毎の復旧工法が示されている。これによると、RC 橋脚基部に損傷が生じている場合で、損傷が水平ひび割れやかぶりコンクリートの剥離程度の被災度の場合、RC や鋼板、連続繊維による巻立てが復旧工法の選択肢となる。しかしながら、地震により損傷した RC 橋脚の残存性能及び補修補強後の耐震性能を評価する手法は確立されていないのが現状である。一方、現行の耐震性能²⁾を満たしていない RC 橋脚のうち、曲げ破壊型で地震時保有水平耐力の照査を満たしておらず、巻立てによるじん性補強が必要となる RC 橋脚が地震により被災し、その復旧として、予定した耐震補強である巻立てが施された場合、損傷の程度によっては復旧後に耐震性能を満たす場合があると考えられる。

以上の背景を踏まえ、地震により損傷した現行の耐震性能に満たない RC 橋脚を復旧させることを想定し、RC 橋脚模型試験体に対して正負交番載荷により限界状態 2 に相当する損傷を与え、その後にひび割れ注入およびアラミド繊維シートによる巻立てを施し、再び、正負交番載荷試験を行い補修後の耐震性能を評価した。また、損傷した RC 橋脚の残存性能の評価方法について、履歴吸収エネルギーを指標とする方法について検

討を行った。

2. 試験概要

2.1 試験体

試験体は、昭和55年改訂の道路橋示方書を適用して設計された連続橋の固定橋脚を想定して製作した柱部が正方形断面のRC橋脚縮小模型である。試験体の配筋は、国総研資料第700号³⁾に基づき、平成14年改訂の道路橋示方書（以降、H14道示）⁴⁾の地震時保有水平耐力法により、曲げ破壊型で水平耐力の照査を満たさない

表-1 試験体の地震時保有水平耐力照査結果

| 項目 | 試験体 | R 試験体 | AF 試験体 |
|---------------------------|-----|-----------------------|-----------------------|
| 終局水平耐力 P_u (kN) | | 198.27 | 218.40 |
| せん断耐力 P_{s0} (kN) | | 299.71 | 299.71 |
| せん断耐力 P_s (kN) | | 271.72 | 271.72 |
| 破壊形態 | | 曲げ破壊 | 曲げ破壊 |
| 地震時保有水平耐力 P_a (kN) | | 198.27 | 218.40 |
| $k_{hc}W$ (kN) | | 363.06 | 191.73 |
| 水平耐力判定 | | $k_{hc}W > P_a$ NG | $k_{hc}W < P_a$ OK |
| 残留変位 δ_R (mm) | | 16.87 | 15.43 |
| 許容残留変位 δ_{Ra} (mm) | | 21.05 | 21.05 |
| 残留変位判定 | | OK | OK |

k_{hc} ：レベル 2 地震動の設計水平震度、W：等価重量

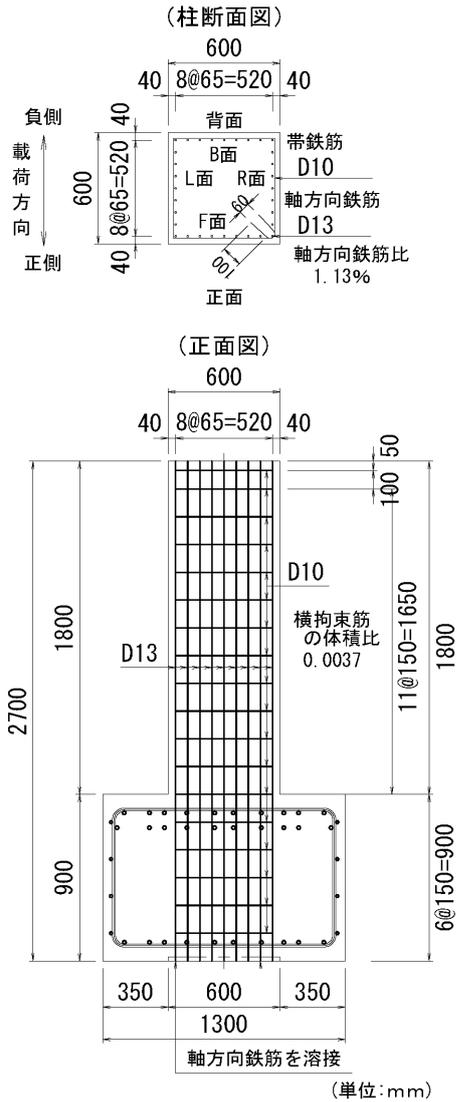


図-1 試験体配筋図

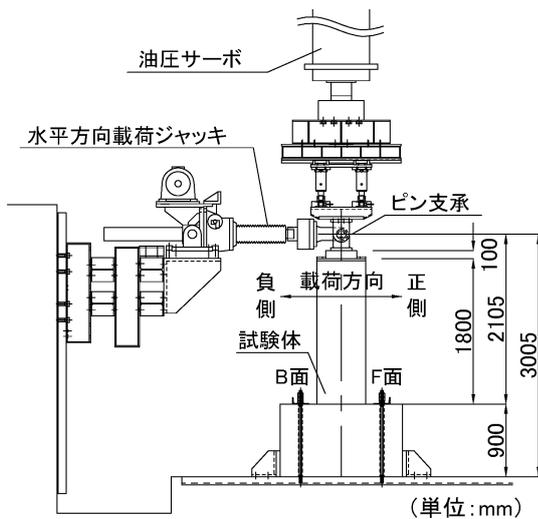


図-2 荷重装置および試験体の設置状況

ように試設計を行った。形状寸法は、試験装置の能力を考慮して縮尺を1/4とした。表-1には、試験体の地震時保有水平耐力の照査結果を、図-1には、柱断面、柱正面に対する試験体の配筋図をそれぞれ示している。試験体は、同じ配筋条件、配合条件のものを2体同時に製作した。うち1体は、限界状態3に相当する水平変位までの荷重を行い、現行の耐震性能を満たしていない状態での変形性能の確認を行う試験体（以下、R試験体）、もう1体は、正負交番荷重により地震による被災を想定した損傷を与えた後、復旧工事を想定した補修として、ひび割れ注入およびアラミド繊維シートにより巻立てを施し、再び、正負交番荷重を行い、補修後の耐震性能の評価を行う試験体（以下、AF試験体）とした。なお、補修後の耐震性能は、文献3)および「既設道路橋の耐震補強に関する参考資料」⁵⁾に基づきH14道示の地震時保有水平耐力法により評価した。

写真-1には補修を施した後のAF試験体を示している。AF試験体に巻立てたアラミド繊維シートは、文献6)を参考に高強度型のアラミド2繊維を用いた。シート量は、「アラミド繊維シートによる鉄筋コンクリート橋脚の補強工法設計・施工要領(案)」(以降、要領(案))⁷⁾におけるシートの拘束効果を考慮したコンクリートの応力-ひずみ関係を用いて、H14道示の地震時保有水平耐力法により、水平耐力および残留変位の基準を満たすように設計した。シートの目付量は350g/m²、層数は1層である。シートを巻立てた範囲は、H14道示に示されている塑性化を考慮する領域を参考に、塑性



写真-1 補修を施した後のAF試験体

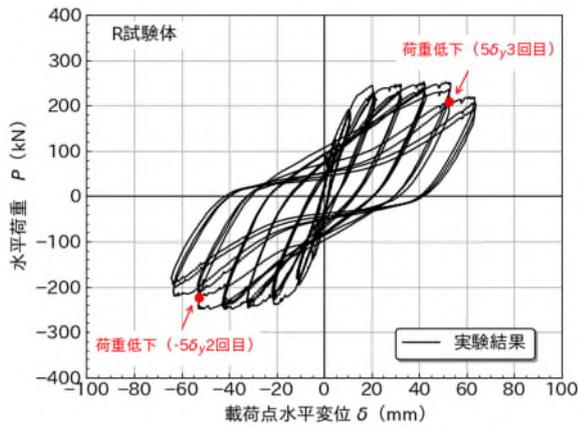


図-3 水平荷重—載荷点水平変位関係 (R 試験体)

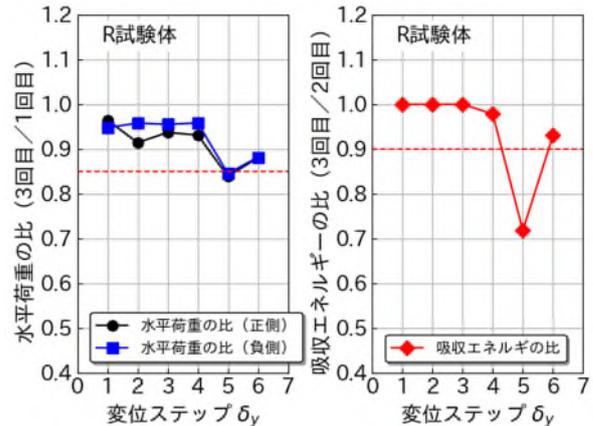


図-4 変形性能評価結果 (R 試験体)

ヒンジ長の4倍程度となる柱基部から高さ1,200mmまでとし、柱周方向に巻立てた。

2.2 正負交番荷重方法

図-2には、載荷装置および試験体の設置状況を示している。試験体はフーチングを床に固定し、柱天端に設置したピン支承の中心部（柱基部から2,105mm、せん断スパン比3.8）に水平ジャッキを用いて、交番荷重を載荷した。上部工重量相当の鉛直荷重は、360kN（応力換算で1.0N/mm²）であり、柱天端に設置したピン支承を介して載荷し、正負交番荷重中は一定に保つように制御した。

正負交番荷重は変位制御に基づいて行った。まず最初に柱基部の軸方向鉄筋ひずみが材料試験から得られた降伏ひずみの50%に達する水平変位を1サイクル載荷して柱基部のコンクリートにひび割れを導入した。次いで、柱基部の軸方向鉄筋ひずみが降伏ひずみに達した時点の水平変位を基準変位 δ_y とし、その δ_y の正負の整数倍に変位振幅を段階的に増し（ $\pm 1\delta_y$ 、 $\pm 2\delta_y$ 、…）、正負の同一変位を1サイクル、その繰り返し回数3回を1変位ステップとした正負交番荷重を実施した。R試験体の δ_y は10.5mmであり、AF試験体についても同じ基準変位とした。

AF試験体は、前述したとおり、地震による被災を想定した損傷を与えた後、補修を施し、再び載荷を行い補修後の耐震性能の評価を行う試験体である。そのため、柱基部に損傷を与えるための正負交番荷重（以降、載荷1回目）後に、ひび割れ注入およびアラミド繊維シートによる巻立てを施し、再び、 $1\delta_y$ からの正負交番荷重（以降、載荷2回目）を実施した。なお、後述するR基準試験体の残存性能評価の結果より、AF試験体の載荷1回目は、変位ステップ $3\delta_y$ までとした。

2.3 計測方法

本試験の計測項目は、載荷点の水平変位 δ と載荷荷重 P 、軸方向鉄筋、帯鉄筋のひずみである。計測したデータは、データ収録器を用いてサンプリング周波数を10Hzとして収録した。

3. 試験結果および考察

3.1 R試験体の耐震性能

図-3には、R試験体の正負交番載荷試験における水



(a) $4\delta_y$, F面



(b) $4\delta_y$, B面



(c) $5\delta_y$, F面



(d) $5\delta_y$, B面

写真-2 柱基部の損傷状況 (R 試験体)

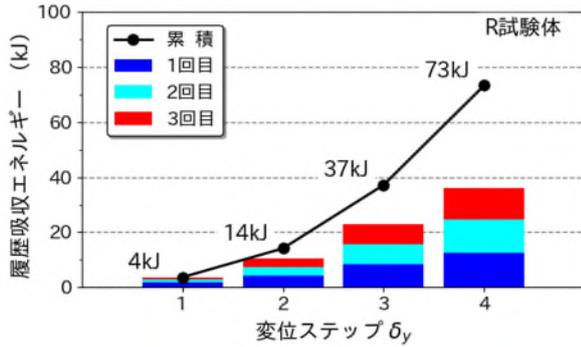


図-5 履歴吸収エネルギー (R 試験体)

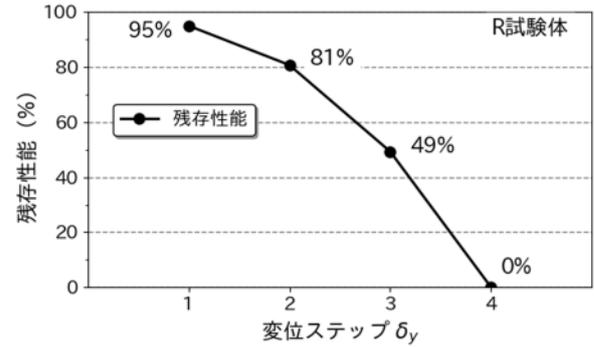


図-6 履歴吸収エネルギーによる残存性能評価 (R 試験体)

平荷重-載荷点水平変位の関係を示している。本試験体の場合は、変位ステップ $5\delta_y$ の負側載荷 2 回目、正側載荷 3 回目で水平荷重が前の載荷ステップの水平荷重よりも 1 割程度低下した。そのため、この載荷ステップを荷重低下が始まった点と評価した。

写真-2 には、R 試験体の変位ステップ $4\delta_y$ の載荷終了後 (写真 a, b) および水平荷重が低下した $5\delta_y$ の載荷終了後 (写真 c, d) の試験体柱基部の F 面、B 面の損傷状況を示している。なお、F 面、B 面は、図-1 および図-2 に示したように載荷方向に直交する面である。写真に示しているように、変位ステップ $5\delta_y$ において、変位ステップ $4\delta_y$ では発生していなかった柱基部コンクリートの剥離や剥落が正面側、背面では高さ 400mm 程度の高さまで発生した。つまり、前述した変位ステップ $5\delta_y$ の載荷における水平荷重の低下は、この基部コンクリートの剥離や剥落により、圧縮抵抗断面が減少した事に起因すると考えられる。

図-4 には、R 試験体の変形性能の評価結果を示している。変形性能を評価する変位は、星隈ら²⁾の手法、石崎らの手法⁸⁾を基に、限界状態 2 は繰返し回数 3 回の正負交番載荷のうち 1 回目載荷の水平荷重に対する 3 回目載荷の水平荷重の比率 (以下、水平荷重比) が 0.85 程度を下回らず、かつ、2 回目載荷の吸収エネルギーに対する 3 回目載荷の吸収エネルギーの比率 (以下、吸収エネルギー比) が 0.90 程度以内となる状態とし、これら 2 つの評価指標を満たす最大の変位ステップとした。また、限界状態 3 に相当する水平変位は、正負交番載荷の水平荷重-水平変位関係において水平荷重が地震時水平耐力を保持している状態とし、着目する変位ステップの 1 つ後の変位ステップにおいて水平荷重の低下が顕著になった場合は、この着目する変位ステップを限界状態 3 とし、この場合の限界状態 2

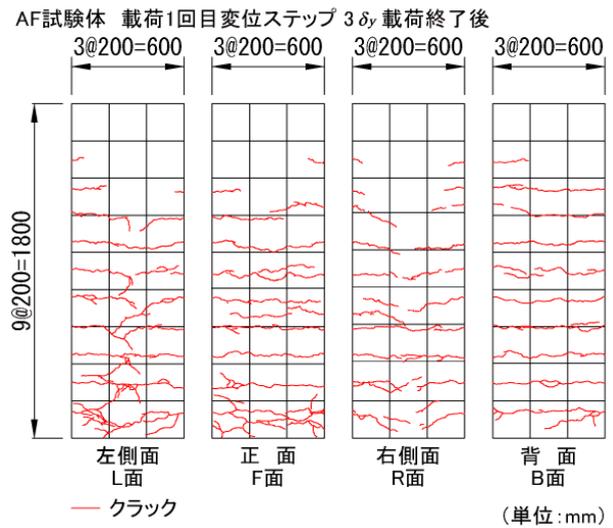


図-7 柱部の損傷状況 (AF 試験体載荷 1 回目終了後)

は着目する 1 つ前の変位ステップとした。図より、R 試験体の場合は、変位ステップ $4\delta_y$ までは水平荷重比、吸収エネルギー比の 2 つの評価指標を満たしているが、変位ステップ $5\delta_y$ で水平荷重比、吸収エネルギー比ともに限界状態 2 の評価指標を下回ることが確認できる。これらの結果より、本試験体の限界状態 2 を変位ステップ $4\delta_y$ 、限界状態 3 を変位ステップ $5\delta_y$ とした。

3.2 R 試験体の残存性能評価

試験体の損傷度とその時の残存性能について、履歴吸収エネルギーを評価指標とする方法について検討を行った。文献 9) では、限界状態 2 をエネルギー吸収が安定して期待できる限界として定義している。これを基に、ここでは限界状態 2 に相当する変位ステップにおける履歴吸収エネルギーの累積値に対する各変位ステップの履歴吸収エネルギーの累積値の割合から残存性能を評価することとした。

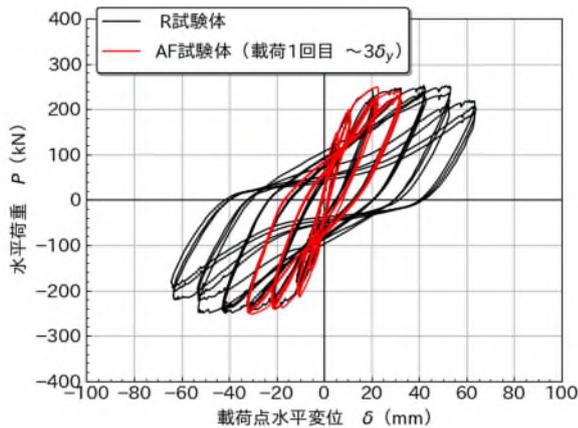


図-8 水平荷重—載荷点水平変位関係
(AF 試験体載荷 1 回目と R 試験体の比較)

図-5には、R 試験体の限界状態 2 に相当する変位ステップ ($4\delta_y$) までの載荷 1 サイクル毎の履歴吸収エネルギーおよびその累積値を示している。履歴吸収エネルギーは、載荷履歴 1 サイクル毎に水平荷重—水平変位関係の履歴ループの面積として算出した。R 試験体の限界状態 2 に相当する変位ステップ $4\delta_y$ までの履歴吸収エネルギーの累積値は 73kJ であった。

図-6には、履歴吸収エネルギーを指標にした R 試験体の各変位ステップにおける残存性能を示している。ここでは、限界状態 2 に相当する変位ステップ $4\delta_y$ における履歴吸収エネルギーの累積値を、その試験体が保有し得る最大の性能と定義して残存性能の評価を行った。図より、限界状態 2 に相当する 1 つ前の変位ステップ ($3\delta_y$) においては、全履歴吸収エネルギーの 49% の履歴吸収エネルギーを有していることから、この時の残存性能を 49% と評価した。

3.3 AF 試験体の耐震性能評価

AF 試験体の載荷 1 回目は、前述した R 試験体の残存性能評価結果を基に、 $3\delta_y$ までの載荷とした。

図-7には、載荷 1 回目終了後の AF 試験体の柱部の損傷状況を示している。図中の各 L、F、R、B 面は図-1 および図-2 に示したとおりであり、F 面と B 面は載荷方向に直交する面である。F 面および B 面の水平ひび割れは、柱基部からの高さ 1.4m 程度まで入っていることが確認できる。また、F 面においては、柱基部の水平ひび割れを繋ぐ斜めひび割れも確認できる。また、L 面には柱奥行方向の中央に水平ひび割れ間を繋ぐ斜めひび割れも確認できる。これらの結果より、本試験体の 1 回目の載荷による被災度は、文献 1) に示されている被災度判定表から「C: 小被害」程度である。

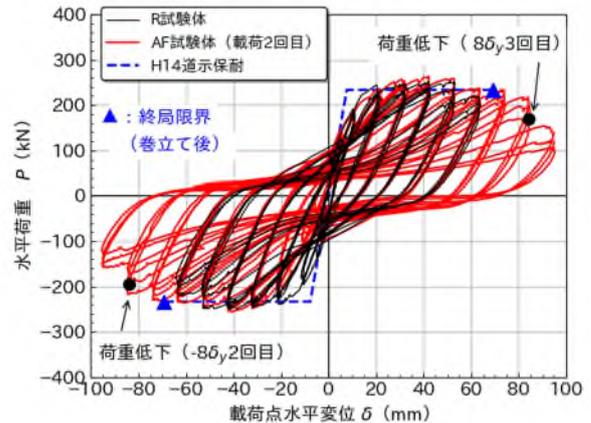


図-9 水平荷重—載荷点水平変位関係
(AF 試験体載荷 2 回目と R 試験体の比較)

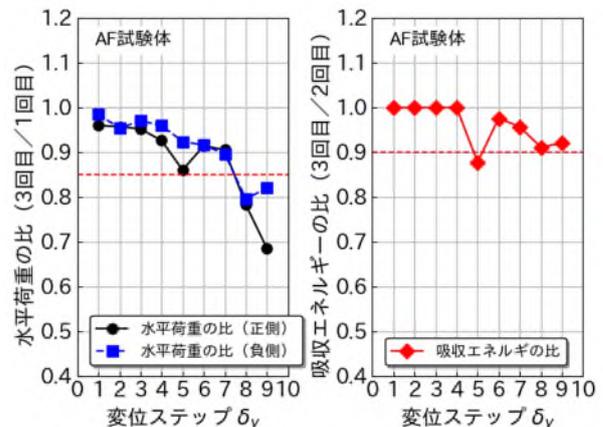


図-10 変形性能評価結果 (AF 試験体)

図-8には、AF 試験体の載荷 1 回目 (図中、黒線) および R 試験体 (図中、赤線) の正負交番載荷試験における水平荷重—載荷点水平変位の関係を示している。AF 試験体の載荷 1 回目の水平荷重—載荷点水平変位関係は、R 試験体のそれとほぼ同様の履歴であった。AF 試験体と R 試験体は同じ条件で製作していることから、R 試験体の性能と照らし合わせると、AF 試験体の載荷 1 回目終了時の残存性能は、50%程度であると推察される。

図-9には、AF 試験体の載荷 2 回目 (図中、赤線) および R 試験体 (図中、黒線) の正負交番載荷試験に水平荷重—載荷点水平変位の関係を示している。なお、図には、シートの拘束効果を考慮したコンクリートの応力—ひずみ関係⁷⁾を用いて、H14 道示の地震時保有水平耐力法により算出した水平荷重—水平変位関係の骨格曲線 (図中、青線) を併せて示している。AF 試験体の 2 回目の載荷では、変位ステップ $8\delta_y$ の負側載荷



(a) $7\delta_y$ F面

(b) $7\delta_y$ B面



(c) $8\delta_y$ F面

(d-1) $8\delta_y$ B面

写真-3 柱基部の損傷状況 (AF 試験体)

2 回目、正側載荷 3 回目で水平荷重が前の荷重ステップの水平荷重よりも 1 割程度低下した。AF 試験体の変形性能は、R 試験体と比較して向上しており、アラミド繊維シート巻立てによるじん性補強の効果を確認することができる。H14 道示による地震時保有水平耐力法により求めた終局変位 (図中、▲印) と比較しても、十分な変形性能を有していると言える。

図-10 には、AF 試験体の荷重 2 回目の変形性能の評価結果を示している。なお、本試験体はアラミド繊維シートで巻立てているが、前述した通常の RC 橋脚と同様の考え方で評価した。本試験体の場合は、変位ステップ $4\delta_y$ までは水平荷重比、吸収エネルギー比ともに評価基準を満たしている。変位ステップ $5\delta_y$ においては、水平荷重比は評価基準の 0.85 を上回っているが、吸収エネルギー比は 0.9 を若干下回ったことが確認できる。しかしながら、変位ステップ $6\delta_y$ 、 $7\delta_y$ では再び 2 つの評価基準を満たしている。変位ステップ $8\delta_y$ で水平荷重比が 0.8 を下回ったことから、本試験体の限界状態 2 に相当する変位ステップは $7\delta_y$ 、限界状態 3 に相当する変位ステップは $8\delta_y$ と評価した。

写真-3 には、AF 試験体の変位ステップ $7\delta_y$ の荷重終

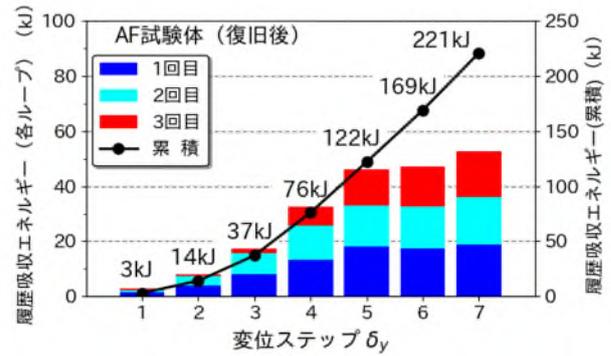


図-11 履歴吸収エネルギー (AF 試験体)

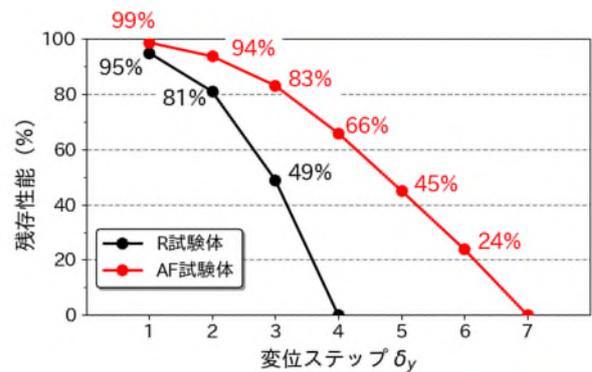


図-12 履歴吸収エネルギーによる残存性能評価 (R 試験体と AF 試験体)

了後 (写真 a, b) および水平荷重が低下した $8\delta_y$ の荷重終了後 (写真 c, d) の試験体柱基部の F 面、B 面の損傷状況を示している。F 面、B 面の定義は前述のとおりである。水平荷重が低下する前の変位ステップである $7\delta_y$ と低下した後の変位ステップである $8\delta_y$ 荷重終了後の試験体柱基部の状態を比較すると、変位ステップ $8\delta_y$ 荷重終了後の方がアラミド繊維シートの膨らみやシート下端部からの圧壊したコンクリート層の排出量が多いことが確認できる。このことから、変位ステップ $8\delta_y$ における水平荷重の低下は、試験体柱基部の圧壊の進行によるものと推察される。

図-11 には、AF 試験体の荷重 2 回目の限界状態 2 に相当する変位ステップ ($7\delta_y$) までの荷重 1 サイクル毎の履歴吸収エネルギーおよびその累積値を示している。荷重 1 回目で変位履歴を受けた変位ステップ $4\delta_y$ までの各変位ステップにおける履歴吸収エネルギーの累積値は R 試験体のそれとほぼ同じであり、補修を施した後の AF 試験体におけるエネルギー吸収性能は、損傷を受ける前とほぼ同程度であると言える。一方、荷重 1 回目で変位履歴を受けていない変位ステップ $5\delta_y$ 以降の各変位ステップにおける履歴吸収エネルギーは、

変位ステップ $5\delta_y$ 、 $6\delta_y$ 、 $7\delta_y$ のいずれにおいても 50kJ 程度であり、変位ステップ $1\delta_y$ から $4\delta_y$ で見られたような変位ステップの増加ともなう履歴吸収エネルギーの増加は小さいことが確認できる。AF 試験体の限界状態 2 に相当する変位ステップ $7\delta_y$ までの履歴吸収エネルギーの累積値は 221kJ であった。

図-12 には、履歴吸収エネルギーを指標にした AF 試験体の各変位ステップにおける残存性能を示している。ここでは、前述した R 試験体の場合と同様に、限界状態 2 に相当する変位ステップ $7\delta_y$ における履歴吸収エネルギーの累積値を、その試験体が保有し得る最大の性能と定義して残存性能の評価を行った。R 試験体では限界状態 2 に相当する変位ステップであった $4\delta_y$ における AF 試験体の残存性能は 66% と評価され、このことから補修による耐震性能の向上を確認することができる。一方で、R 試験体では、限界状態 2 に相当する 1 つ前の変位ステップにおける試験体の残存性能は約 50% であったが、AF 試験体のそれは 24% と小さく、R 試験体の半分程度の残存性能であった。

4. まとめ

本研究では、地震により損傷した現行の耐震性能に満たない RC 橋脚を復旧させることを想定し、RC 橋脚模型試験体に対して正負交番荷重を行い限界状態 2 に相当する損傷を与え、その後既存の補修工法であるひび割れ注入およびアラミド繊維シート巻立てを施し、再び、正負交番荷重を行い補修後の耐震性能の評価を行った。また、損傷した RC 橋脚の残存性能の評価方法について、履歴吸収エネルギーを指標とする方法について検討を行った。

その結果、現行の耐震性能に満たない RC 橋脚を想定して製作した模型試験体の正負交番荷重試験から、以下の知見を得た。

- 1) 検討に用いた試験体の仕様では、基部コンクリートの剥離や剥落により、圧縮抵抗断面が減少した事に起因すると考えられる水平荷重の低下が生じた。また、正負交番荷重の水平荷重、履歴吸収エネルギーを指標とした耐震性能評価により限界状態 2 と評価した 1 つ前の変位ステップにおける、履歴吸収エネルギーを指標とした残存性能は約 50% であることが分かった。

また、残存性能が 50% であると評価した試験体に、ひび割れ注入およびアラミド繊維シート巻立てによる補修を施し、再び、正負交番荷重を行った結果から以下の知見を得た。

- 1) 残存性能を約 50% と評価した限界状態 2 に相当する損傷であれば、アラミド繊維シート巻立てにより橋脚のじん性が向上し、RC 橋脚の耐震補強における照査基準^{3),5)}となる H14 道示の耐震性能が確保できることを確認した。
- 2) 柱基部の損傷を受ける前後の履歴吸収エネルギーの比較から、変位履歴を受けた範囲内の履歴吸収エネルギー性能は、損傷を受けた後でも損傷前のそれと同程度であることが分かった。
- 3) 一方、変位履歴を受けた以降の変位ステップにおける履歴吸収エネルギーは、変位ステップの増加ともなう履歴吸収エネルギーの増加は小さいことが分かった。
- 4) 正負交番荷重の水平荷重、履歴吸収エネルギーを指標とした耐震性能評価により限界状態 2 と評価した 1 つ前の変位ステップにおける、履歴吸収エネルギーを指標とした残存性能は約 25% であることが分かった。これは、補修を行う前の試験体のそれと比較して、半分程度の残存性能であった。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路震災対策便覧（震災復旧編）平成 18 年度改訂版、p.103、p.180、2007.3
- 2) 星隈順一、堺淳一、小森 暢行、坂柳 皓文：鉄筋コンクリート橋脚の地震時限界状態の評価手法に関する研究、土木研究所資料第 4262 号、2013.3
- 3) 玉越隆史、白戸真大、星隈順一、堺淳一：既設橋の耐震補強設計に関する技術資料、国土技術政策総合研究所資料第 700 号、土木研究所資料 4244 号、2012.11
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書（V 耐震設計編）・同解説、2002.3
- 5) 日本道路協会：既設道路橋の耐震補強に関する参考資料、1997.8
- 6) 東日本高速道路株式会社、中日本高速道路株式会社、西日本高速道路株式会社：設計要領第二集 橋梁保全編、P.8-53、2020.7
- 7) アラミド補強研究会：アラミド繊維シートによる鉄筋コンクリート橋脚の補強工法設計・施工要領（案）、2021.4
- 8) 石崎寛史、宮田秀太、澤田守、大住道生：巻立て補強された鉄筋コンクリート橋脚の限界状態に関する調査分析、第 22 回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演論文集、pp.115-122、2019.7
- 9) 日本道路協会：道路橋示方書（V 耐震設計編）・同解説、2017.11

Study about performance evaluation for seismic reinforcement and repairment of bridges (2)

Research Period: FY2019-2021

Research Team: Structure Research Team,
Cold-Region Construction
Engineering Research
Group

Author: KASAI Satoshi
YASUNAKA Shintaro
AKIMOTO Mitsuo
MATSUDA Shingo
SATO Takashi
TERASAWA Takahiro

Abstract: Currently, there is no established method for evaluating the residual performance of RC bridge piers damaged by an earthquake and their seismic performance after repairment. Therefore, we conducted cyclic loading tests on RC bridge pier specimens to verify their seismic performance after damage, injected cracks into the specimens and jacketing them with aramid fiber-reinforced plastic sheets, and then conducted cyclic loading tests again to verify their seismic performance after repair. As a result, it was confirmed that the current seismic performance can be secured by restoration if the damage is equivalent to the limit state 2. Furthermore, the residual performance of the damaged RC bridge piers was evaluated using historical energy as an index. The results showed that the cyclic loading test of the RC pier model used in this study, which did not meet the current seismic performance, ensured approximately 50% residual performance just prior to reaching limit state 2.

Keywords: residual performance, restored after the disaster, hysteretic energy, aramid fiber reinforced plastic sheet, toughness reinforcement