

論文 鋼製座屈拘束ダンパー付き単柱式 RC 柱の正負交番載荷実験

須田 郁慧*1・萩原 健一*2・塩田 啓介*3・秋山 充良*4

要旨：単柱式 RC 柱を対象として、建築分野で使用されてきた鋼製座屈拘束ダンパーによる地震時保有耐力と塑性変形能の改善を目的とした耐震補強法を提案した。特徴は、柱軸と平行にダンパーを設置し、ダンパーが曲げ、そして既存 RC 柱がせん断に抵抗することで耐震性能を改善する。正負交番載荷実験により、塑性ヒンジ部を中心とした柱の変形によるダンパーの伸縮で地震エネルギーを効率良く吸収し、提案構造は既存 RC 柱の荷重-変位関係を大きく改善できること、一方で、ダンパーの設置により既存 RC 柱に作用するせん断力が増加し、そのせん断耐力の大きさによっては耐震性能の改善効果が小さくなること、などを確認した。

キーワード：RC 柱、鋼製座屈拘束ダンパー、耐震補強、正負交番載荷実験、水平荷重-水平変位関係

1. はじめに

1995 年の兵庫県南部地震以降に進められてきた耐震補強により、既存鉄筋コンクリート (RC) 構造物の耐震性能は改善され、特に、せん断破壊や軸方向鉄筋段落し位置で損傷する可能性のある RC 柱は着実に減少している。例えば、道路橋では、平成 17 年から平成 19 年にかけて「緊急輸送道路の橋梁耐震補強 3 箇年プログラム」が実施され、大地震時に落橋等の甚大な被害を受ける可能性のある橋梁を対象とした耐震補強が行われている²⁾。鉄道橋では、既存 RC 柱が持つ曲げせん断耐力比を目安として、この値が小さいせん断破壊型の RC 柱から優先的に耐震補強が施されている^{3,4)}。2011 年東北地方太平洋沖地震では、鋼板巻き立てなどによる耐震補強が施された RC 柱はほぼ無損傷であったことが報告されており、取り組みの成果を確認できる⁵⁾。

一方で、耐震補強未着手の RC 構造物の中には、部材靱性が十分に確保されていないものもあり、2011 年東北地方太平洋沖地震により、例えば、東北新幹線 RC ラーメン高架橋の柱の一部が大きく損傷している⁴⁾。これまでは、特に耐震性が低いとされる 1980 年以前の橋梁を主な対象にして、軸方向鉄筋段落し部を有するものやせん断破壊型の RC 柱を優先的に耐震補強してきた。今後は、曲げ破壊型、あるいは曲げせん断破壊型であるとして補強が見送られた既存 RC 柱、あるいは、段落し部やせん断補強のみが行われた RC 柱の更なる耐震性能の改善が必要である。これらの柱は、脆性的な破壊の可能性は小さいものの、現行基準で耐震設計される場合に比べて地震時保有耐力が小さく、地震後の速やかな機能回復の性能を確保するための補強対策が必要である。この問題に対して、例えば、張ら²⁾は、軸方向鉄筋段落し部の

耐震補強済みの RC 柱を対象として、2 段階目の耐震補強として、炭素繊維シートと鋼板を併用した RC 柱の耐震補強工法を提案している。本研究でも同様に、曲げ破壊型、あるいは曲げせん断破壊型の破壊モードでありながら、地震時保有耐力と靱性が不足する既存 RC 柱を対象とした耐震補強法を提案する。

提案する鋼製座屈拘束ダンパー (以下、ダンパー) を用いた単柱式 RC 柱の耐震補強のイメージを図-1 に示す。使用するダンパーは、補剛材によって軸力材の座屈を防止した履歴エネルギー吸収型ダンパーであり、建築物の制震デバイスとして多用されてきた。トラスやアーチ橋のブレース材^{6,7)}など、橋梁の制震を目的に応用された事例もある。図-1 に示すように、このダンパーを既存 RC 柱の脚柱とフーチング間に設置すると、柱基部の塑性ヒンジを中心とした柱の曲げ変形によりダンパーに伸縮が生じ、地震エネルギーが効率よく吸収され、荷重-変位関係を改善できると期待される。

本研究では、ダンパーの新しい活用法として、曲げ、あるいは曲げせん断破壊型の単柱式 RC 柱の耐震補強へ

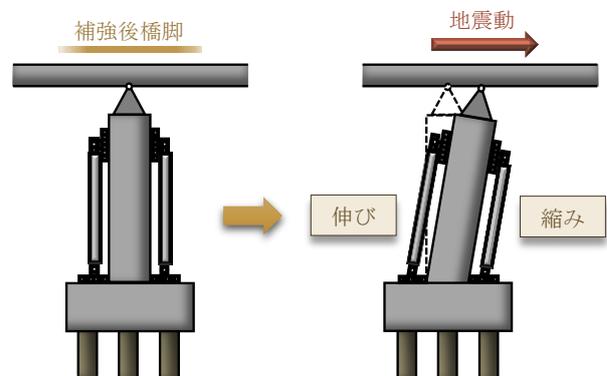


図-1 地震時の単柱式橋脚の変形とダンパー伸縮

*1 早稲田大学 創造理工学部社会環境工学科 (学生会員)

*2 JFE シビル株式会社 社会基盤事業部

*3 JFE シビル株式会社 技術部

*4 早稲田大学 創造理工学部社会環境工学科教授 博(工) (正会員)

表-1 供試体諸元と使用材料の特性

| 供試体記号 | 脚柱 | | 軸方向鉄筋 | | 帯鉄筋 | | コンクリート | ダンパー | | |
|-------|-----------------------|---------|---------|---------------------------|-----------|---------------------------|---------------------------|------|-----------|-----------|
| | 断面 (mm ²) | 高さ (mm) | 径-本数 | 降伏強度 (N/mm ²) | 径-間隔 | 降伏強度 (N/mm ²) | 圧縮強度 (N/mm ²) | 記号 | 軸力材長 (mm) | 降伏軸力 (kN) |
| A | 500×400 | 1500 | D10-20本 | 351 | D10-120mm | 351 | 28.8 | - | - | - |
| A-D1 | 500×400 | 1500 | D10-20本 | 351 | D10-120mm | 351 | 28.7 | D1 | 700 | 118 |
| A-D2 | 500×400 | 1500 | D10-20本 | 358 | D10-120mm | 358 | 33.9 | D2 | 350 | 128 |
| B | 500×400 | 1500 | D10-20本 | 359 | D6-300mm | 350 | 31.4 | - | - | - |
| B-D2 | 500×400 | 1500 | D10-20本 | 359 | D6-300mm | 350 | 33.6 | D2 | 350 | 128 |
| C | 500×400 | 1500 | D16-20本 | 351 | D13-120mm | 361 | 33.3 | - | - | - |

の適用を試み、その正負交番載荷実験により荷重-変位関係の改善度合いなどを確認するものである。

2. 実験概要

2.1 実験供試体

本実験に用いる供試体の寸法は全て同じであり、RC柱断面は 500 mm×400 mm、柱高さは 1500 mm である。道路橋で用いられる単柱式 RC 橋脚の 1/5 スケールを想定している。供試体諸元の一覧を表-1 に示す。なお、表中のコンクリート圧縮強度は、供試体と同じ条件で気中養生した 3 本のテストピースより得られた平均値である。鉄筋材質は全て SD295 である。供試体 A-D2 を例として、配筋と実験時の載荷状況を図-2 に示す。

供試体 A は、参考文献 8) にある、昭和 39 年鋼道路橋示方書を満足するように設計された RC 橋脚がせん断補強され、破壊モードが曲げ破壊型になったものを想定している（曲げせん断耐力比：2.3）。この供試体 A にダンパーを取り付けたものが供試体 A-D1 と A-D2 である。

本研究では、2 種類のダンパー（D1 と D2）を用いており、軸力材の長さが 700mm でダンパーの終局伸縮量を十分に確保したものがダンパーD1、軸力材の長さが 350mm で伸縮の初期剛性を大きくし、軸力材と補剛材の間隔を小さくして塑性域を大きくしたものがダンパーD2 である。軸力材径はともに 22mm である。ダンパー単体に正負交番の軸力を与えたときに得られる軸力-伸縮量関係を図-3 に示す。紡錘型の履歴特性を示しており、ダンパーの優れたエネルギー吸収力を確認できる。軸力材の長さが短いダンパーD2 では、意図した通りに伸縮量が小さい段階で発現される軸力は大きくなっているが、一方で、ひずみの局所化が D1 に比べて生じ易く、早期に破断が生じる。また、ダンパーを構成する部品間には遊びが含まれるため、軸力の符号が反転するときに伸縮量に遊びの大きさが付加される。

供試体 B は、供試体 A と同じ昭和 39 年鋼道路橋示方

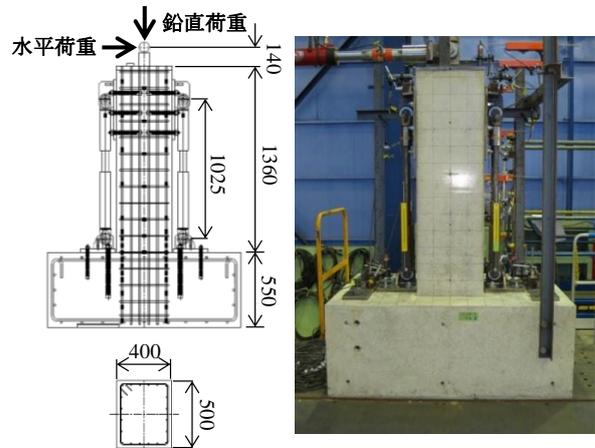


図-2 供試体 A-D2 の諸元と載荷状況（単位：mm）

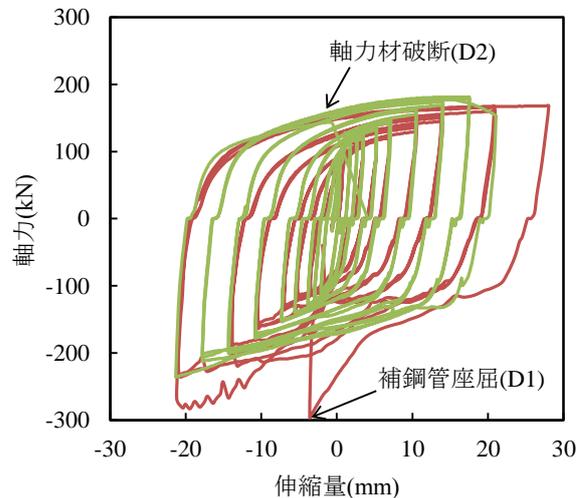


図-3 軸力-伸縮量関係（ダンパー単体試験）

書を満足する RC 柱であるが、表-1 に示されるように、せん断補強鉄筋量を少なくし、曲げせん断破壊型の破壊モードとなるようにした（曲げせん断耐力比：1.2）。供試体 B にダンパーD2 を設置したものが供試体 B-D2 である。

ダンパー付きの 3 つの供試体（供試体 A-D1、A-D2、および B-D2）は、脚柱およびフーチングにあと施工アンカーで固定した治具を用いてダンパーをピン接合してい

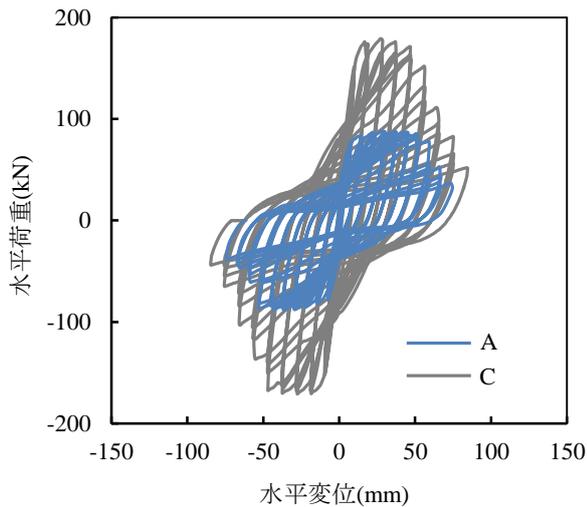


図-4 水平荷重－水平変位関係（供試体 A,C）

る。あと施工アンカーの設計は、参考文献 9)に従った。なお、後述する正負交番荷重実験において、ダンパーと橋脚、あるいはフーチングとの接合部は、荷重の最終段階まではほぼ無損傷にあったことを確認している。

供試体 C は、現行基準に従った RC 柱の耐震性能を確認するための供試体であり、参考文献 8)を参考に軸方向鉄筋量と帯鉄筋量を決めている（曲げせん断耐力比:2.5）。

2.2 荷重方法

正負交番荷重実験には、汎用構造物試験機（鋼製の大型フレーム）を使用した。図-2 に示すように、橋脚頭部に設置した治具（長さ 140 mm）を介して、鉛直力および水平力をジャッキにより加力した。荷重点高さは 1500 mm、鉛直荷重は一定の 200 kN を与えている（RC 柱の圧縮応力で 1 MPa に相当）。

最外縁の軸方向鉄筋ひずみが材料試験結果から求められた降伏ひずみに達したときの水平変位を降伏変位 δ_y とし、以降は、降伏変位の整数倍毎に 3 サイクルずつの変位制御で交番荷重した。ダンパーの両端はピン結合となっているため、RC 柱の頭部が正負交番の水平荷重を受けるのに伴い、ダンパーには軸方向力のみが作用する。

3. 実験結果

3.1 損傷状況と荷重－変位関係

図-4 に、供試体 A と C の水平荷重－水平変位関係を示す。以降に示す水平変位は、全て荷重荷重点位置で得られたものである。供試体 A は、曲げ損傷の進展とともに、柱基部の塑性ヒンジ部のかぶりコンクリートに曲げとせん断によるひび割れが表れ、 $7\delta_y$ 以降には、かぶりコンクリートの剥離・剥落と軸方向鉄筋のはらみ出しが確認され、その後の荷重に伴い水平荷重が低下した。供試体 C も、最大水平荷重は供試体 A の 2.05 倍となったが、損傷進展の過程は供試体 A と同様であった。なお、変位靱性率で比較した変形能は、供試体 A と C で同等であ

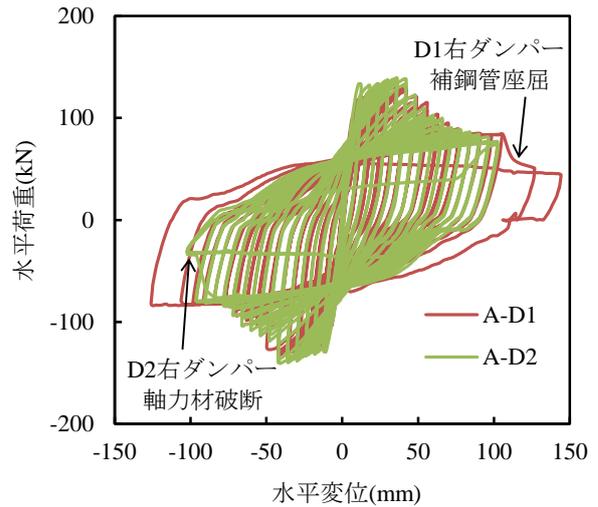


図-5 水平荷重－水平変位関係（供試体 A-D1,A-D2）

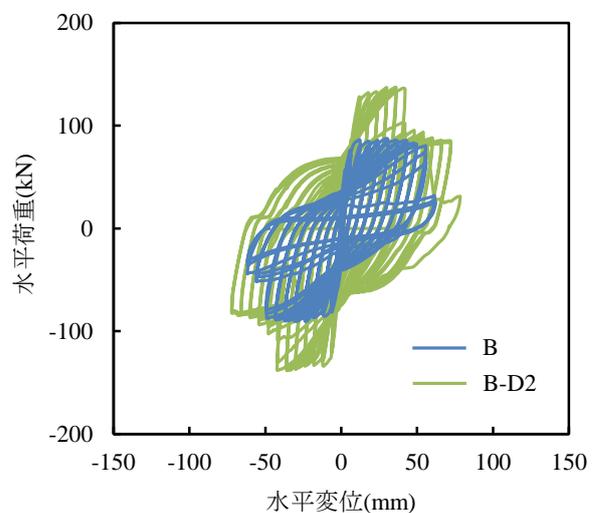


図-6 水平荷重－水平変位関係（供試体 B,B-D2）

り、両供試体の破壊モードは曲げ破壊である。

ダンパー付きの供試体 A-D1 と A-D2 の水平荷重－水平変位関係を図-5 に示す。供試体 A に比べて、ダンパー付き供試体は塑性ヒンジ区間が短くなり、かぶりコンクリートの剥落範囲が小さかった。これは、後述する解析結果に示されるように、曲げモーメント分布の勾配が供試体 A と異なるためと思われる。

供試体 A, A-D1, および A-D2 の最大水平荷重は、それぞれ 88kN, 130kN および 139kN である。RC 柱が曲げを受けると、ダンパーが曲げ圧縮と引張に抵抗するため、ダンパー付き RC 柱は、それが無い場合に比べて水平荷重が大きくなる。2 本のダンパーの間隔 L とダンパー降伏軸力 F_y から計算される抵抗モーメントを荷重点水平荷重に換算 ($P_{\phi} = (L \times F_y) / H$, H は荷重点高さ) し、供試体 A の最大荷重 P_{am} (88kN) に加算した値 ($P_{am} + P_{\phi}$) は、供試体 A-D1 と A-D2 でそれぞれ 132kN と 136kN となることから、想定通りの耐荷機構になっていると思われる。

図-5 に示されるように、ダンパー付き RC 柱は優れ



図-7 RC柱基部の損傷状況（供試体 A-D2）

た塑性変形能を發揮しており、供試体 A-D1 と A-D2 は、 $15\delta_y \sim 17\delta_y$ まで安定した履歴特性を維持している。既存 RC 柱の塑性ヒンジ部は、供試体 A と同じく $7\delta_y$ を過ぎると曲げで大きく損傷し、軸方向鉄筋のはらみ出しが大きくなり、その後鉄筋破断が生じる。このように RC 柱の水平荷重の負担能力は徐々に喪失していくが、ダンパーの支えを受けることで、塑性ヒンジ部のコアコンクリートは軸力とせん断力を負担し続け、ダンパーは水平荷重に抵抗できている。結果として、大きな水平変位を受け、RC 柱が曲げで損傷したとしても、ダンパー付き RC 柱は安定した履歴特性を維持できている。本実験により、ダンパーを脚柱とフーチング間に設置することで既存 RC 柱の耐震性能を大きく改善できることが確認された。なお、図-3 の場合と同じく、軸力材の長さが短いダンパーを用いた供試体 A-D2 では、軸力材の破断が生じ、ダンパー-D1 を用いた場合よりも若干ながら早期に機能を失った。

帯鉄筋量を減らした供試体 B と、ダンパーを取り付けた供試体 B-D2 から得られた水平荷重-水平変位関係を図-6 に示す。供試体 B は柱基部の軸方向鉄筋が降伏した後、供試体 A に比べて斜めひび割れが顕著に進展し、 $9\delta_y$ の 3 サイクル目から $10\delta_y$ にかけて水平荷重が大きく低下した。塑性ヒンジ部の斜めひび割れの状況、およびその水平荷重の急激な低下から、曲げ降伏後のせん断破壊と判定した。ただし、変位靱性率で比較すると、供試体 A よりも供試体 B の方が大きくなっている。供試体 B と B-D2 の最大水平荷重はそれぞれ 88kN と 138kN であり、供試体 A と A-D1・A-D2 の場合と同様に、ダンパーが負担する抵抗モーメント ($L \times F_y$) に相当する水平荷重 P_{ϕ} だけダンパー付き供試体 B-D2 の水平荷重は大きくなっている。ただし、図-6 に示されるように、供試体 A-D1 や A-D2 と異なり、供試体 B-D2 はダンパー設置による塑性変形能の大幅な改善が見られなかった。供試体 B-D2 では、水平変位 60mm を過ぎると、曲げによる塑性ヒンジの回転挙動が見られなくなり、塑性ヒンジ部のコンクリートがせん断により完全に分離することで終局に至



図-8 RC柱基部の損傷状況（供試体 B-D2）

った。分離の際には、鈍い破壊音を伴っている。載荷終了時の供試体 A-D2 と B-D2 の塑性ヒンジ部の損傷状況をそれぞれ図-7 と図-8 に示す。ダンパーを設置すると、後述の解析結果にも示されるように、水平荷重の増加に伴い、RC 柱部に作用するせん断力は増加する。このため、せん断耐力が十分でない曲げせん断破壊型の RC 柱では、耐震補強の効果が小さくなる。既存 RC 柱が有する曲げせん断耐力比と、ダンパー設置により得られる補強効果の定量化は、今後、さらに検討する必要がある。

3.2 エネルギー吸収

図-9 は、曲げ破壊型である供試体 A, A-D1, A-D2, および C の各載荷ステップの 1 サイクル目の履歴吸収エネルギーの推移を示している。供試体 A-D1 と A-D2 の履歴吸収エネルギーは供試体 A のそれに比べて大幅に増加しており、供試体 C に近い値となる。ダンパー付き RC 柱は高いエネルギー吸収能を有することが確認される。

次に、供試体 A-D2 に設置したダンパー 2 基の履歴吸収エネルギーを供試体 A のそれに加算し、供試体 A-D2 の履歴吸収エネルギーと比較したものを図-10 に示す。供試体 A にダンパーの履歴吸収エネルギーを加算したものと供試体 A-D2 のそれはよく一致している。既存 RC 柱のエネルギー吸収量にダンパー分を加算することで、耐震補強後のエネルギー吸収量は推定可能と思われる。

3.3 鉛直方向変位

図-11 は供試体 A, A-D1, A-D2, および C の水平変位の増加に対する鉛直変位の推移を示したものである。同様に、図-12 は、供試体 B と B-D2 の鉛直変位の推移を示している。交番載荷に伴い RC 柱の鉛直変位は大きくなるのに対して、軸方向鉄筋のはらみ出しが観察されると鉛直変位は減少に転じ、以降は、曲げの損傷の進展に伴って小さくなる。牧ら¹⁰⁾は、鉛直変位と RC 部材の損傷の関係について、詳細な解析的検討を行っている。図-11 や図-12 でも、ダンパーが設置されていない供試体では、塑性ヒンジ部の曲げや曲げせん断破壊により、鉛直変位が減少に転じ、終局に至っている。

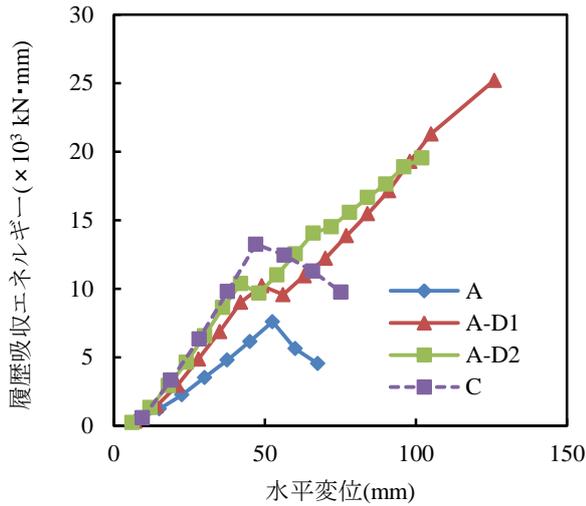


図-9 履歴吸収エネルギーの比較

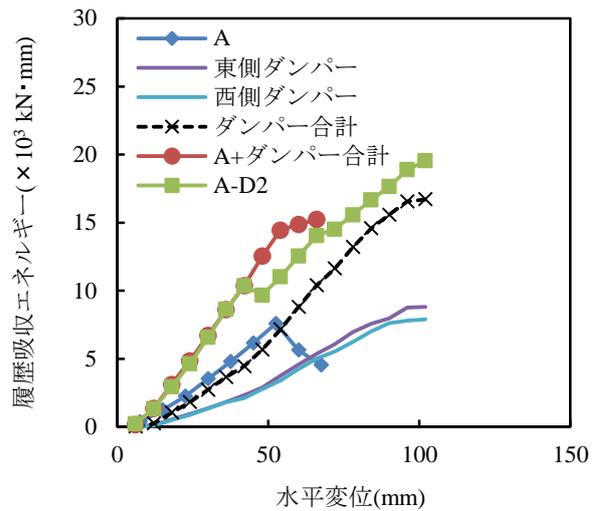


図-10 RC柱とダンパーの履歴吸収エネルギー

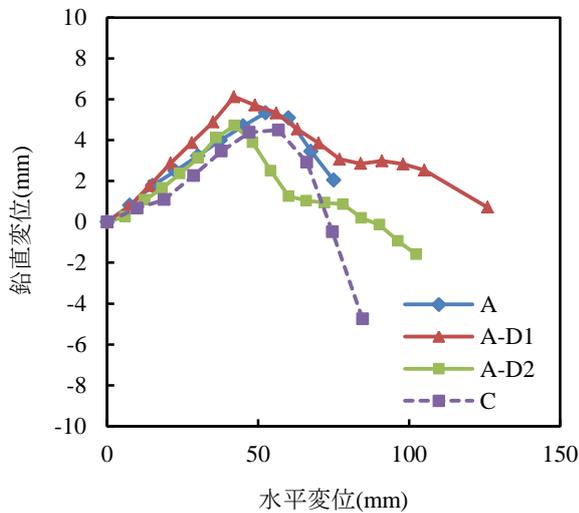


図-11 鉛直変位の推移 (曲げ破壊型)

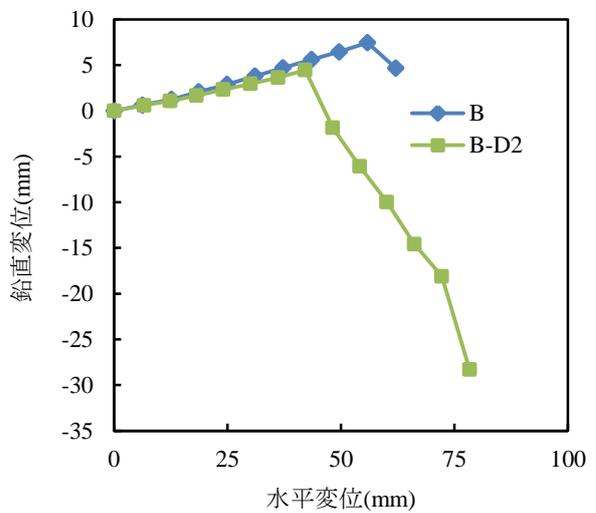


図-12 鉛直変位の推移 (曲げせん断破壊型)

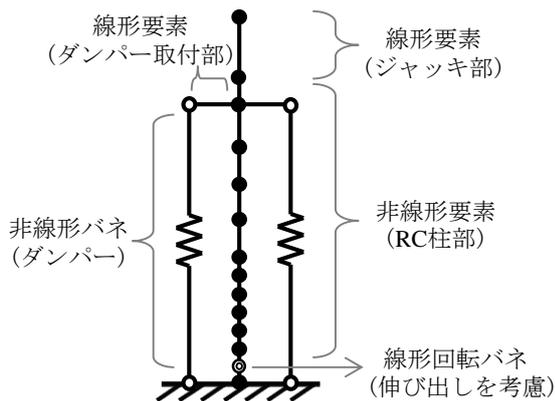


図-13 再現解析モデル (供試体 A-D1)

供試体 A-D1 と A-D2 では、鉛直変位が減少に転じた後も、その勾配はダンパー無しの供試体に比べて緩やかであり、徐々に鉛直変位は小さくなっている。一方、同じくダンパーが設置されている供試体 B-D2 は、供試体 A-D1 や A-D2 とは全く異なる挙動を示しており、水平変位の増加に伴い、柱が縮む方向に鉛直変位が単調に小さくなっている。供試体 A-D1 や A-D2 では、塑性ヒンジ

部は曲げによる回転挙動を示し、コアコンクリート中心部は軸力を負担できていたのに対して、供試体 B-D2 では、塑性ヒンジ部は正負交番の繰り返し载荷によりせん断損傷が進展し、軸方向に縮むことで最終的に 30mm ほど RC 柱が短くなったと思われる。提案する耐震補強工法では、せん断力を既存 RC 柱が負担する必要があり、塑性ヒンジ部が繰り返しの作用を受けてせん断耐力を失うと、ダンパーがその効果を発揮できなくなる。

4. 骨組モデルを用いた再現解析

図-13 に示す多質点系骨組モデルを用いて供試体 A と A-D1 の再現解析を行う。曲げ降伏後にせん断の影響により終局に至った供試体 B-D2 は、骨組モデルでその荷重-変位関係を再現できないことから、今後の課題とする。RC 橋脚の非線形性は、Takeda 型の曲げモーメント-曲率関係によりモデル化した。なお、ダンパーがより効果を発揮するのは、RC 柱が曲げにより損傷した後である。そこで、RC 柱のポストピーク挙動は、参考文献 11) に示される復元力特性でモデル化した。ダンパーの挙

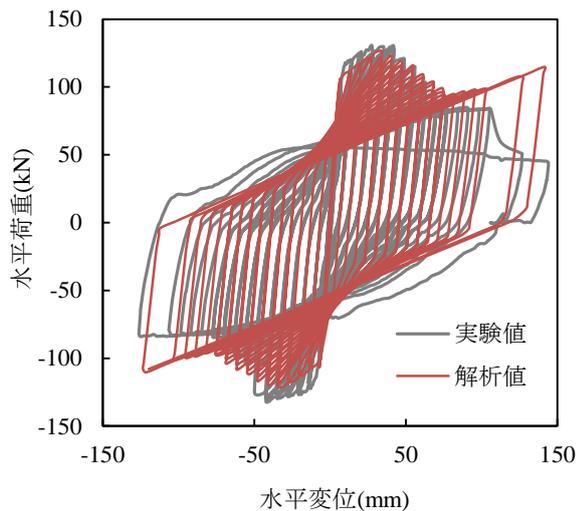


図-14 荷重-変位関係の比較 (供試体 A-D1)

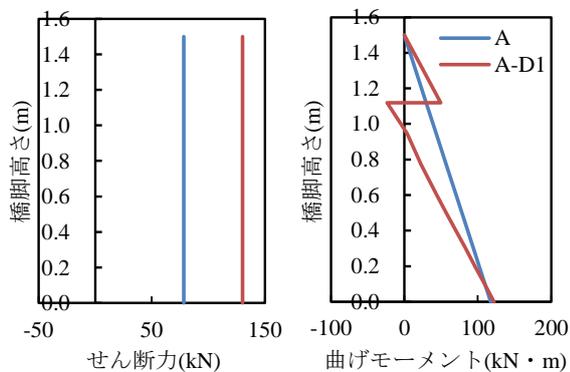


図-15 せん断力・曲げモーメント分布

動は、脚柱とフーチングに節点を設け、その間に生じる軸力と軸変位の関係をバイリニアの復元力特性を持つ非線形ばねでモデル化した。RC 柱やダンパーの骨格曲線は、表-1や図-3に示す材料試験結果を用いて定めた。

図-14に実験結果と解析結果の比較を示す。解析結果は、ダンパーがその機能を発揮している範囲では実験結果を概ね再現できており、本モデルにより提案構造の耐震性能評価は可能と思われる。ただし、水平変位が大きい範囲でダンパーの効果を過大に評価している点や、耐震補強設計時に、安全性と修復性の観点から、どの損傷状態までの応答を許容するのかについては、別途検討が必要である。図-15にはRC柱に作用する曲げモーメントとせん断力の計算結果を示す。ダンパー設置前後の曲げモーメント分布の変化と、RC柱部に作用するせん断力の増加が確認される。既存RC柱は、この増加するせん断力を負担できるほどのせん断耐力が必要である。

5. まとめ

既存単柱式RC柱の耐震補強として、鋼製座屈拘束ダンパーを脚柱とフーチング間に設置することを提案した。そして、ダンパー付きRC柱の正負交番載荷実験により、その荷重-変位関係や破壊性状を確認した。本研究により得られた結論を以下に示す。

- (1) 曲げ破壊型のRC柱を対象に鋼製座屈拘束ダンパーを設置した場合には、RC柱単体の水平荷重-水平変位関係に対し、最大水平荷重・塑性変形能ともに、大幅に増加することを確認した。
- (2) 曲げせん断破壊型のRC柱にダンパーを設置した場合には、最大水平荷重は同様に増加するものの、繰り返しのせん断力の影響を受け、塑性ヒンジ部が早期に曲げせん断破壊を呈するため、曲げ破壊型のRC柱を対象とした場合ほどの耐震補強効果を得られなかった。
- (3) 曲げ破壊型のRC柱を対象とする場合には、多質点系骨組モデルを用いた再現解析により実験結果を概ね再現できることを確認した。

参考文献

- 1) 土木学会地震工学委員会：東日本大震災による橋梁等の被害分析小委員会報告書，2015。
- 2) 張広鋒，星隈順一，塚淳一，運上茂樹：炭素繊維シートと鋼板を併用したRC橋脚の耐震補強工法とその効果，土木学会論文集A1，Vol. 67，No. 2，pp. 430-445，2011。
- 3) 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I，563/I-39，pp. 95-103，1997.4
- 4) Akiyama, M., Frangopol, D.M. and Mizuno, K.: Performance analysis of Tohoku-Shinkansen viaducts affected by the 2011 Great East Japan earthquake, Structure and Infrastructure Engineering, Vol. 10, No. 9, pp. 1228-1247, 2014.7
- 5) Akiyama, M. and Frangopol, D.M.: Lessons from the 2011 Great East Japan Earthquake: Emphasis on life-cycle structural performance, Proceedings of the Third International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, Vienna, Austria, 2012.
- 6) 宇佐美勉編著，(社)日本鋼構造協会：鋼橋の耐震・制震設計ガイドライン，技報堂出版，2006.9
- 7) 土木研究センター：わが国の免震橋事例集，2011.12
- 8) 塚淳一，川島一彦，武村浩志：試設計に基づく耐震技術基準の変遷に伴うRC橋脚の耐震性向上度の検討，構造工学論文集，Vol.43A，pp.833-842，1997.3
- 9) 技術書院：あと施工アンカー 設計と施工，1995.5
- 10) 牧剛史，齊藤成彦，土屋智史，渡邊忠朋，島弘：正負交番載荷を受けるRC骨組み構造物の非線形有限要素解析による損傷評価，土木学会論文集E2(材料・コンクリート構造)，Vol.69，No.1，pp.33-52，2013。
- 11) 梅村恒，境有紀，南忠夫，壁谷澤寿海：繰り返しによる耐力低下を考慮した鉄筋コンクリート部材の復元力特性のモデル化，コンクリート工学年次論文報告集，V-20，No.3，pp. 1015-1020，1998。