

脚柱とフーチング間に座屈拘束ダンパーを設置した
既存RC柱の正負交番載荷実験と耐震性能評価

萩原 健一¹・櫻井 有哉²・塩田 啓介³・熊崎 達郎⁴・秋山 充良⁵

¹正会員 J F Eシビル株式会社（〒111-0051 東京都台東区蔵前 2-17-4）

²正会員 修(工) J F Eシビル株式会社（〒111-0051 東京都台東区蔵前 2-17-4）

³正会員 修(工) J F Eシビル株式会社（〒111-0051 東京都台東区蔵前 2-17-4）

⁴学生会員 早稲田大学大学院（〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1）

⁵正会員 博(工) 早稲田大学教授 創造理工学部社会環境工学科（〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1）

1. はじめに

座屈拘束ダンパー（以下、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型ダンパーであり、建築物の制振デバイスとして多用されてきたが、橋梁の分野においても制震を目的としてトラスやアーチ橋のブレース材^{1), 2)}や上部工と橋脚間³⁾に取付けた事例がある。図-1に示すように、このダンパーをRC橋脚の脚柱とフーチング間に設置すると、地震時に柱基部の塑性ヒンジを中心に橋脚が変形するときにダンパーに伸縮が生じ、地震エネルギーを効率よく吸収し、橋脚の耐震性能を向上できると考えられる。本稿では、実施した模型RC橋脚の正負交番載荷実験の結果（荷重-変位関係やエネルギー吸収能に及ぼすダンパーの影響）を紹介するとともに、橋脚挙動の再現解析、およびダンパーの特性を活用した耐震補強設計法（案）について報告する。

2. 実験概要

供試体は図-2に示す1/5縮尺の単柱型RC橋脚とし、脚柱は高さ1360mm、断面は幅500mm、高さ400mmである。供試体は表-1に示す4種類である。供試体Aは、参考文献⁴⁾にある、昭和39年鋼道路橋設計示方書を満足するように設計されたRC柱がせん断補強され、曲げ破

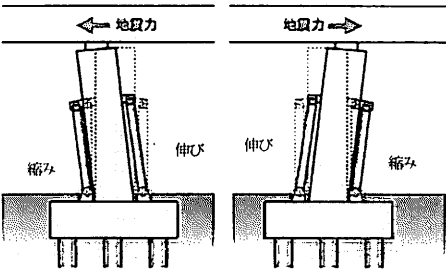


図-1 橋脚の変形とダンパーの伸縮

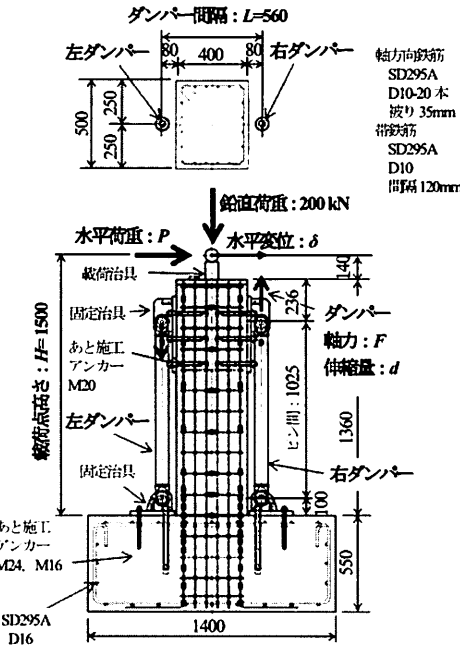


図-2 供試体 (A-D1、A-D2)

表-1 供試体の諸元

供試体 記号	脚柱 断面 幅 × 高さ (mm)	軸方向鉄筋				帯鉄筋				コンクリート		ダンパー		
		径-本数	軸鉄筋 面積比 (%)	降伏強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	径-間隔	帯鉄筋 面積比 (%)	降伏強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	圧縮強度 実験当日 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	記号	軸力材長 (mm)	降伏軸力 F _y (kN)
A	500 × 400	D10-20本	0.71	351	183	D10-120mm	0.24	351	183	28.8	22.4	-	-	-
A-D1	500 × 400	D10-20本	0.71	351	183	D10-120mm	0.24	351	183	28.7	22.5	D1	700	118
A-D2	500 × 400	D10-20本	0.71	358	193	D10-120mm	0.24	358	193	33.9	23.1	D2	350	128
B	500 × 400	D16-20本	1.99	351	196	D13-120mm	0.42	361	194	33.3	23.5	-	-	-

鉄筋の材質は全てSD295A

ダンパーのピン間長: 1024mm

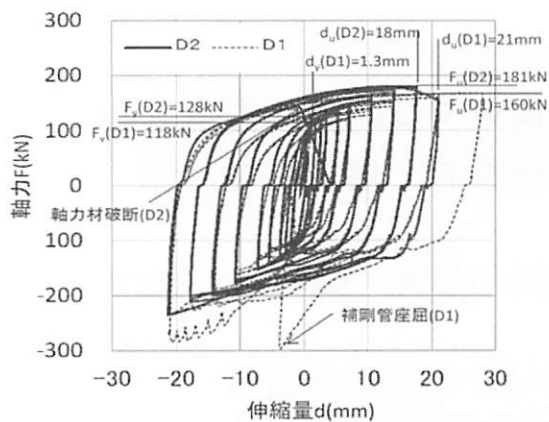


図-3 ダンパーの単体試験による履歴曲線

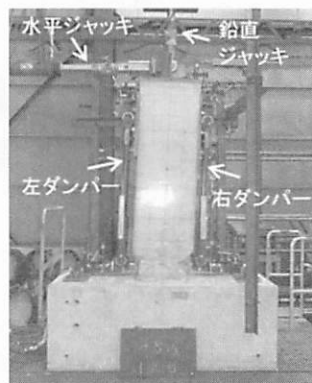


写真-1 載荷状況 (A-D1)

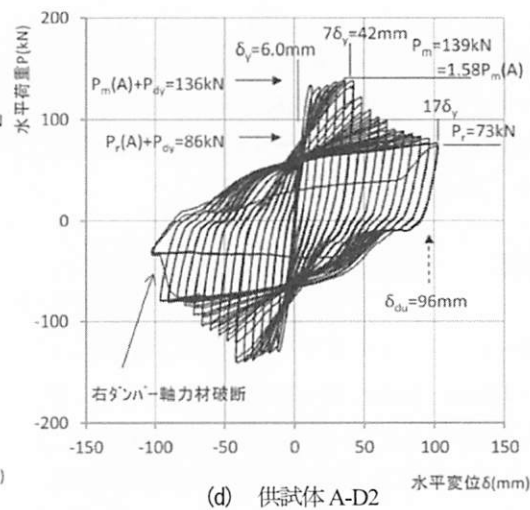
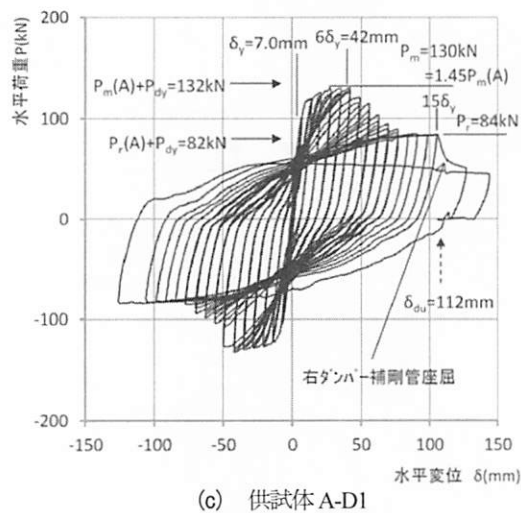
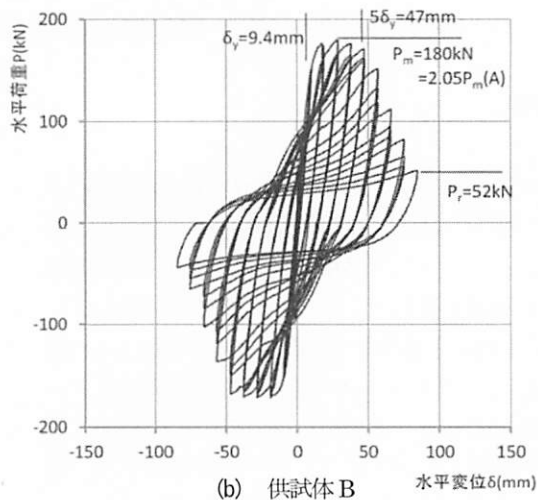
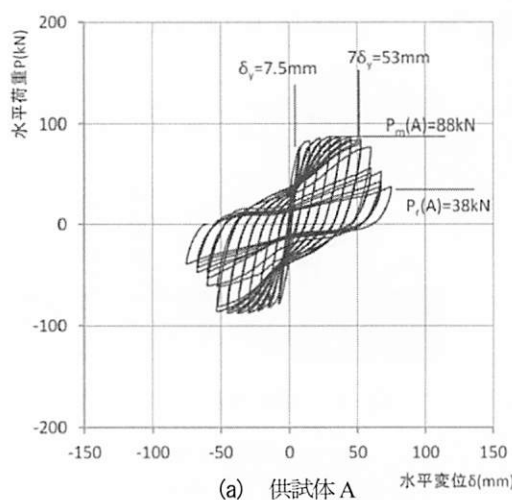


図-4 水平荷重と載荷点水平変位

壊型になった状態を想定している。また供試体 B は、平成 8 年道路橋示方書を満足する RC 橋脚を模して設計したものである。A-D1 および A-D2 は、径 22mm の SS400 棒鋼を軸力材としたダンパー D1 および D2 にて曲げ補強しており、軸力材の長さがそれぞれ 700mm および 350mm である。D1 は、ダンパーの終局伸縮量を十分確保したも

の、D2 は、伸縮の初期剛性を大きくし、かつ、軸力材と補剛材の間隙を少なくして塑性域を広くしたものである。ダンパーは、橋脚にあと施工アンカーで固定した冶具にピン接合した。あと施工アンカーの設計は、参考文献⁵⁾に従った。図-3 にダンパー単体の試験による軸力 F と伸縮量 d の履歴曲線を示す。

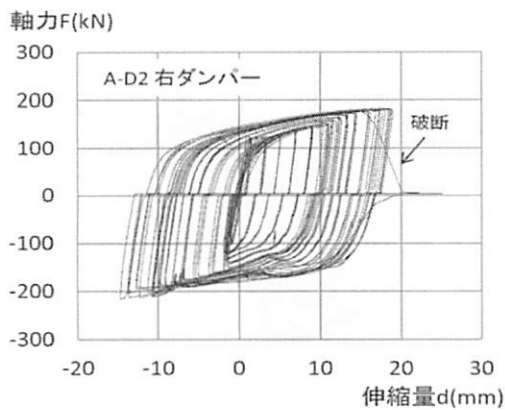


図-5 供試体 A-D2 の右ダンパーの挙動

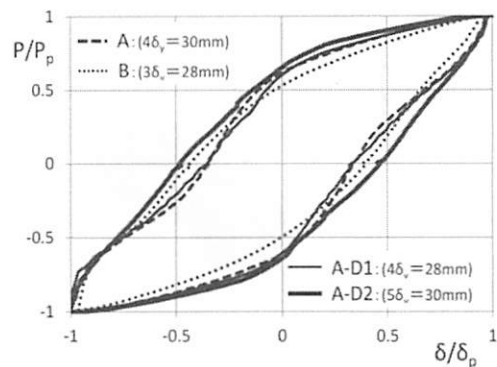


図-6 履歴曲線の比較

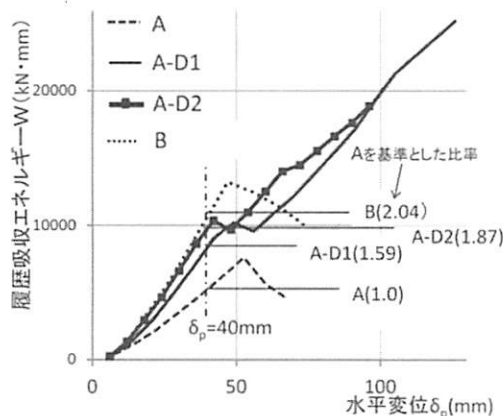


図-7 吸収エネルギーの比較

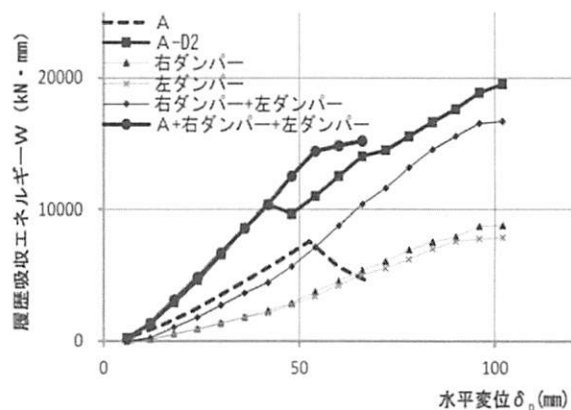
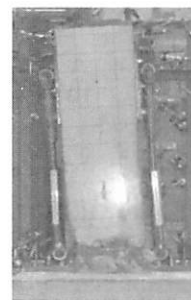


図-8 橋脚とダンパーの吸収エネルギー

載荷は、写真-1 に示すように、橋脚頭部に設置した治具を介してジャッキにて鉛直および水平方向に加力した。載荷点高さは $H=1500\text{mm}$ である。鉛直荷重は 200kN の一定（圧縮応力 1MPa に相当）とし、水平方向には基部の引張鉄筋が降伏したときの載荷点の水平変位を δ_y として、その整数倍ごとに3サイクルの正負交番載荷とした。

3. 実験結果

図-4(a)～(d)に、各供試体の載荷点における水平荷重 P と水平変位 δ の履歴曲線を示す。ダンパーで補強した供試体 A-D1 および A-D2 は、A に比べて最大荷重が 1.45 倍および 1.58 倍に増加している。図-2 に示した載荷点高さ H およびダンパー間隔 L を用いて、ダンパー降伏軸力 F_y による抵抗モーメントを載荷点水平荷重に $P_{dy}=L/H \cdot F_y$ の式で換算し、これを A の最大荷重 $P_m(A)$ に加算した値は、A-D1 および A-D2 の最大荷重 P_m に良く一致している。また、A は $7\delta_y$ で終局状態になっているが、A-D1 および A-D2 は、水平荷重が低下した後も $15\delta_y \sim 17\delta_y$ まで安定した履歴曲線を維持している。図-3 に示したダンパーの終局伸縮量 d_u から載荷点変位を $\delta_{du}=2H/L \cdot d_u$ で換算した値は、A-D1 および A-D2 の終局変位に概ね近い。



(a) 供試体 A-D2



(b) 供試体 B

写真-2 橋脚の損傷状態

供試体 B は、A に比べて最大荷重が 2.05 倍に増加しているが、終局変位は $5\delta_y$ であり、変位靱性率で比較した変形能は A と同程度である。

図-5 は、供試体 A-D2 に取り付けた右ダンパーの履歴曲線である。単体で行った試験と同様の履歴特性であり、エネルギー吸収能を有していることが確認される。

図-6 は、各供試体について最大変位が 30mm 付近の 1 サイクル目の履歴曲線をピーク時の荷重 P_p と変位 δ_p で正規化して比較したものである。A-D2 の面積は他に比べて大きく、エネルギー吸収能が高いと言える。

図-7 は、各載荷ステップの 1 サイクル目のピーク変位 δ_p と履歴吸収エネルギー W の関係を示す。A-D1 および

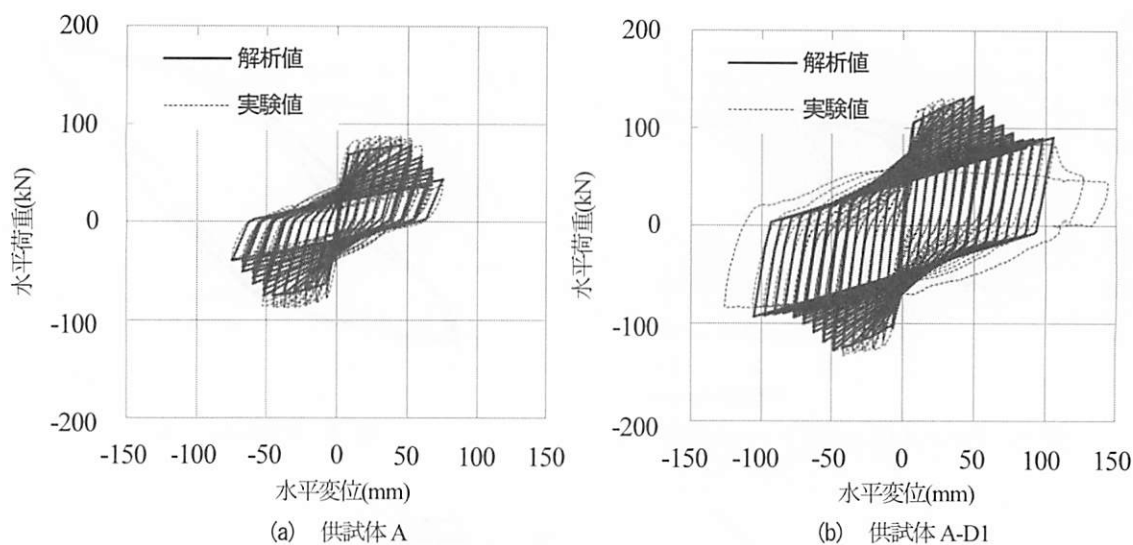


図-9 水平荷重-水平変位関係の解析結果

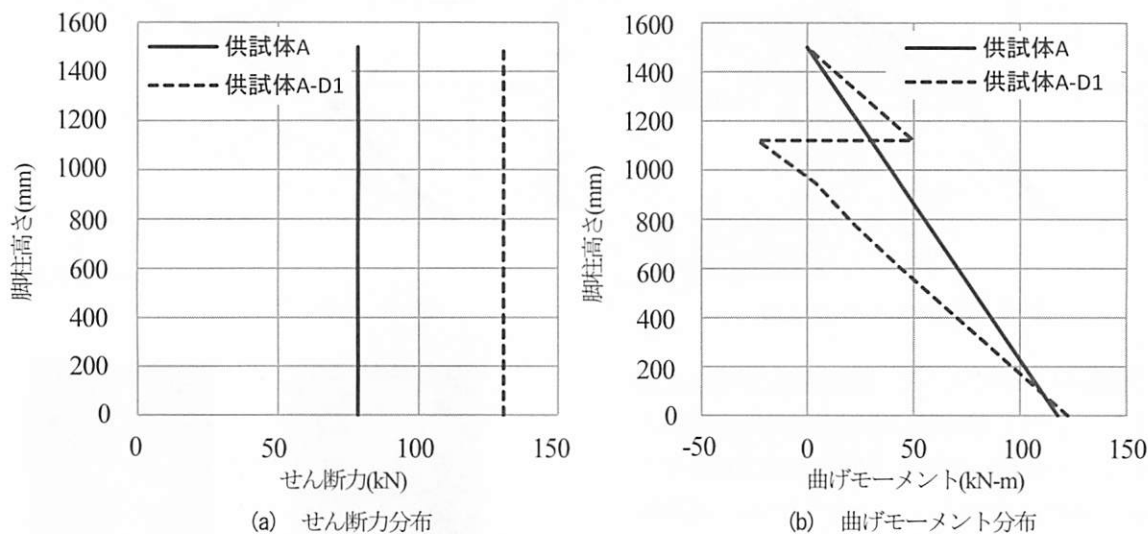


図-10 RC柱におけるせん断力分布・曲げモーメント分布

A-D2の W の値はAのそれに比べて大きく増加しており、ダンパーを設置することによって、脚柱のエネルギー吸収能を向上できることがわかる。各供試体について $\delta_p=40$ mmのときの W の値を読み取り、供試体Aの W 値に対する比率をみると、A-D2は1.87倍であり、A-D1の比率よりも大きくBのそれに近い。

図-8は、図-7に示した供試体AおよびA-D2の履歴吸収エネルギー W の曲線に加えて、A-D2に取り付けた右および左ダンパーの吸収エネルギー W をそれぞれ算出してプロットし、さらに、これを供試体Aの値に加算した曲線を比較したものである。左右のダンパーの吸収エネルギーはほぼ等しく、均等にエネルギー吸収がなされている。また、供試体Aの W に左右のダンパーのそれを合算した値は、ダンパー補強したA-D2の W の値とよく一致していることから、ダンパー補強した脚柱のエネルギー吸収能は、補強前のRC柱のエネルギー吸収能と設置

するダンパーのそれを合算して推定できると言える。

写真-2に実験終了時の損傷状態を示す。A-D2の塑性ヒンジ長はBよりも短いことが確認される。

4. 実験結果の再現解析

供試体Aと供試体A-D1を対象として、多質点骨組モデルを用いて実験結果の再現解析を試みた。RC橋脚の非線形性は、曲げモーメント-曲率関係によりモデル化した。履歴復元力特性には、Takedaモデルを使用している。なお、ダンパーによる補強効果が発揮されるのは、RC柱にかぶりコンクリートの剥離・剥落が発生し、軸方向鉄筋のはらみ出しや破断に伴う水平荷重の低下が生じる領域である。そこで、水平変位の大きさに関わらず除荷・再載荷の剛性はTakedaモデルに従うと仮定し、参考文献⁹⁾に示されるモデルで骨格曲線を定め、RC柱のポストビ

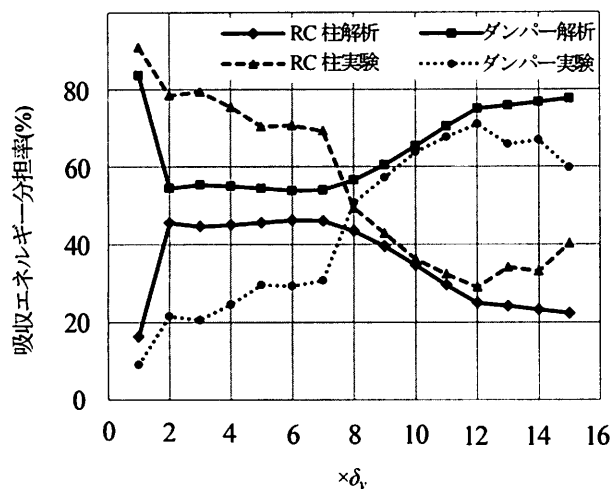


図-11 吸収エネルギー分担率

ーク挙動を再現した。ダンパーの挙動は、脚柱とフーチングに節点を設け、その間に生じる軸力について、バイリニアの復元力特性を与えた非線形ばねにてモデル化した。RC柱やダンパーの骨格曲線は、予め実施した材料試験結果に基づいている。図-9(a)と(b)に、供試体Aおよび供試体A-D1における水平荷重-水平変位関係の解析結果と実験結果の比較をそれぞれ示す。簡易な解析モデルであるが、図-9(a)と(b)に示されるように、ポストピークを含めた骨格曲線、および除荷や再載荷の剛性など、解析結果は実験結果を概ね再現している。

図-10(a)と(b)に、供試体Aおよび供試体A-D1におけるせん断力分布および曲げモーメント分布の解析結果をそれぞれ示す。両図から、供試体A-D1のRC柱に作用するせん断力は、ダンパーの設置により、供試体Aに比べて大きくなること、および、曲げモーメント分布の概形が両者で異なること、などが確認できる。せん断力分布、および曲げモーメント分布からも、供試体A-D1の曲げ損傷は、ダンパーがない場合に比べて橋脚基部付近に集中することが示唆されており、実験結果と整合している。

一方、図-11に、RC柱とダンパーの吸収エネルギーについて、荷重荷重の進展に伴うその負担割合の変化について解析結果および実験結果の比較を示した。ここで、実験結果は、全体の水平荷重-水平変位関係に対して、ダンパーの軸荷重-軸変位関係から得られる吸収エネルギーを引いたものをRC柱の吸収エネルギーと仮定している。実際には、ダンパーおよびRC柱以外の箇所でも吸収されるエネルギーもあるため、ここに示すRC柱の吸収エネルギーは実際の値よりも大きくなっている点に注意が必要である。図-11に示されるように、解析結果は、水平変位の小さい段階で、ダンパーの吸収エネルギーを

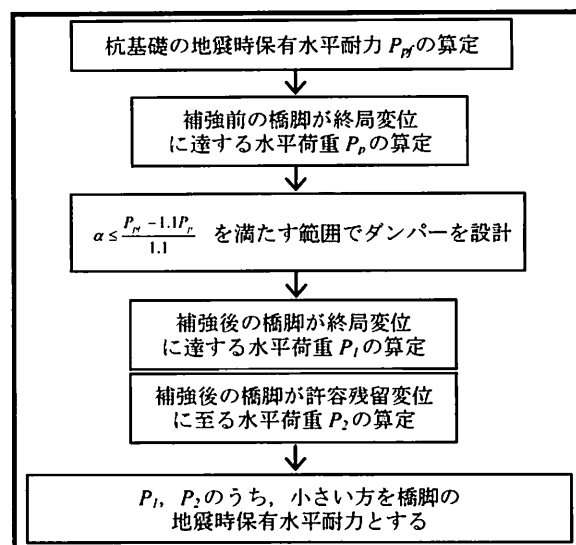


図-12 ダンパーの設計手順

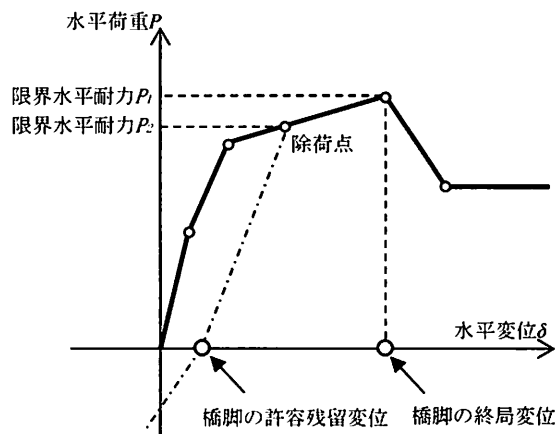


図-13 補強後の橋脚の限界状態の考え方

過大に評価している。これは、荷重初期の段階では、ダンパーは解析で想定したよりも小さい軸変位しか作用していないことによる。図-11より、水平変位が大きくなるにつれ、ダンパーとRC柱のそれぞれの吸収エネルギーを正しく評価できるようになるのが確認できる。水平変位が大きい段階で、ダンパーの効果を解析では過大に評価していることの見直しが必要である。

5. 座屈拘束ダンパーを用いたRC橋脚の耐震補強設計に関する一考察

近年、橋脚の耐震補強を施した際に、橋脚の自重や曲げ耐力の増加に伴い杭基礎への負担が大きくなり、橋脚と杭基礎間に必要な耐力格差を確保できず、橋脚基部の塑性ヒンジ発生に先行して杭基礎が降伏することが懸念されている。そのため、実設計への適用に際しては、その補強効果を適切に評価し、橋脚と杭基礎に必要な耐力格差を把握しなければならない。本研究では、大地震を

受けた際に道路橋示方書耐震設計編⁷⁾が許容する損傷状態と、その状態を満足するために用いられるべきダンパーの設計法について基礎的な検討を行った。

ここでは、道路橋示方書⁷⁾が規定するレベル2地震動を受けた際に、3つの限界状態に達しないことを確認することにした。それは、レベル2地震動により生じるRC柱の応答変位が終局変位に達しない、地震後に残留する水平変位が限界値を超えない、そして、杭基礎の降伏を防ぐである。なお、ダンパーを設置したRC柱は、相当に塑性変形能力が改善されている。レベル2地震動を受けたときに許容する限界変位の設定は、今後、さらに詳細に検討していく必要がある。

このとき、ダンパーの設置により増加するRC橋脚の保有水平耐力により杭基礎の降伏が先行しないことを確認するため、式(1)を満足させる。

$$1.1(P_p + \alpha) \leq P_{pf} \quad (1)$$

ここで、 P_p はRC橋脚の地震時保有水平耐力、 P_{pf} は杭基礎の地震時保有水平耐力、 α はダンパー補強による地震時保有水平耐力の増加量(最大水平荷重の増加量)を表す。

図-12にダンパーの設計手順を示し、ダンパー補強後の水平荷重や水平変位の定め方の考えの一例を図-13に示した。

6. まとめ

本研究では、脚柱とフーチング間にダンパーを設置した場合の耐震性能改善効果を模型RC橋脚の正負交番載荷実験によって調べた。結果は次のとおりである。

- (1) ダンパー設置によって水平荷重、および変形能力が向上する。水平荷重増加量は、ダンパーの降伏軸力による抵抗モーメントを水平荷重に換算し算定できる。
- (2) 橋脚本体が終局に達した後も、ダンパーの効果により安定した履歴曲線が維持され橋脚の倒壊が抑止される。ダンパー補強橋脚の終局変位は、ダンパーの終局伸縮量を水平変位に換算し算定できる。
- (3) ダンパー軸力材の初期剛性や拘束度を適切に設定して塑性域を大きくすることにより、ダンパー補強した橋脚の履歴エネルギー吸収能力を向上できる。また、ダンパー補強した脚柱のエネルギー吸収能力は、補強前のRC柱のエネルギー吸収能力と設置するダンパーのそれを合算して推定できる。
- (4) 曲げ破壊型の既存RC橋脚にダンパーを設置した構造は、本稿で示した簡易モデルでもその水平荷重-水平変位関係を概ね再現できる。ただし、水平変位

の小さい段階で、ダンパーの効果を過大に評価する傾向があることからそのモデルの見直しが必要である。

- (5) 本稿で示した簡易モデルを用いた提案構造の耐震補強設計法について、その基本的な考えを示した。

参考文献

- 1) 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、pp. 243-251, 2006. 9.
- 2) 土木研究センター：わが国の免震橋事例集、pp. 118-121, 2011. 12.
- 3) 前野裕文・杉浦裕幸・八木孝行・永谷秀樹・神谷伸治：座屈拘束ブレースを用いた上部構造の耐震補強設計、土木学会第59回年次学術講演会、1-184, pp. 367-368, 2004. 9.
- 4) 堺淳一・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.
- 5) 技術書院：あと施工アンカー 設計と施工、pp. 82-93, 1999. 5
- 6) 梅村恒・境有紀・南忠夫・壁谷澤寿海：繰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、No. 3, V-20, pp. 1015-1020, 1998.
- 7) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編、2012.