

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橋脚の動的解析による耐震性能評価

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 JFE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） JFE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） JFE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 創造理工学研究科建設工学専攻（〒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、建築分野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)}や上部構造と橋脚間³⁾などに使用されている。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。

著者らは、参考文献4)において、模型RC橋脚供試体の正負交番載荷実験を行い、ダンパーを設置した橋脚は、保有水平耐力がダンパーの抵抗モーメント分増加することや、ダンパー補強後の橋脚のエネルギー吸収量は、既存橋脚のそれにダンパーのエネルギー吸収量を加算したものになることなどを明らかにした。また、既存RC橋脚の塑性ヒンジ部に軸方向鉄筋の大きなはらみ出しが生じた後も、ダンパーの効果により安定した履歴曲線が維持され、変形能を向上できることが分かり、その解析モデルや設計方法について検討している。

本稿では、実験の再現解析を行い、ダンパーで補強した橋脚の解析モデルを明らかにする。また、既存RC橋脚にダンパーを設置して補強した場合の設計フローを示すとともに、実構造の橋脚をモデルとした動的解析を行い、ダンパー補強による耐震性能向上効果を検討する。

2. ダンパーによるRC橋脚補強の概念

既存RC橋脚の脚柱とフーチング間にダンパーを設置した場合の補強効果の概念を図-2に示す。図には、地震

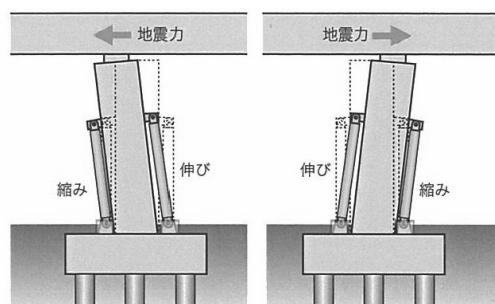


図-1 橋脚の変形とダンパーの伸縮

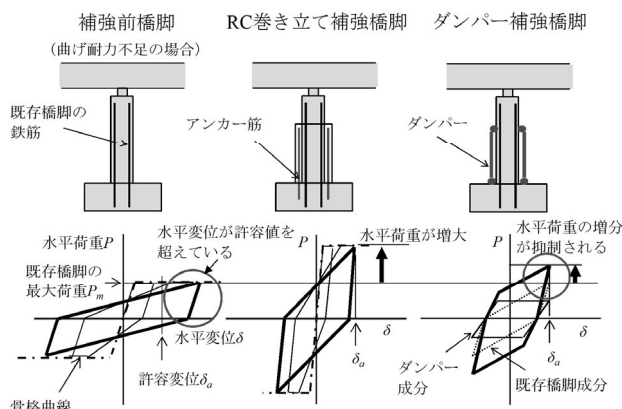


図-2 補強前後の橋脚頭部の水平荷重と
水平変位関係の概念図

力に対して、曲げ耐力が不足している補強前の橋脚、これをRC巻き立てによって補強した橋脚およびダンパーによって補強した橋脚について、橋脚頭部の水平荷重 P と水平変位 δ の履歴曲線の違いを概念的に示している。それぞれの履歴曲線の太い実線は、 δ が最大のときの1サイクルのループを表しており、吸収エネルギーが同一であることを想定して、曲線で囲まれる面積を等しく描い

表-1 再現解析の対象とした供試体の諸元

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	面積比 (%)	降伏強度 (N/mm ²)	ヤング率 (N/mm ²)	径-間隔	面積比 (%)	降伏強度 (N/mm ²)	ヤング率 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング率 (N/mm ²)	軸力材長 (mm)	降伏軸力 (kN)
A	500×400	D10-20本	0.71	351	183	D10-120mm	0.24	351	183	28.8	22.4	-	-
A-D2	500×400	D10-20本	0.71	358	193	D10-120mm	0.24	358	193	33.9	23.1	350	128

(鉄筋は全てSD295A)

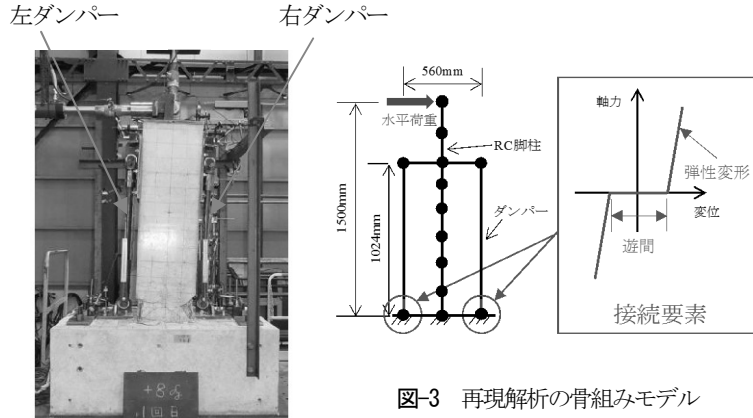


図-3 再現解析の骨組みモデル

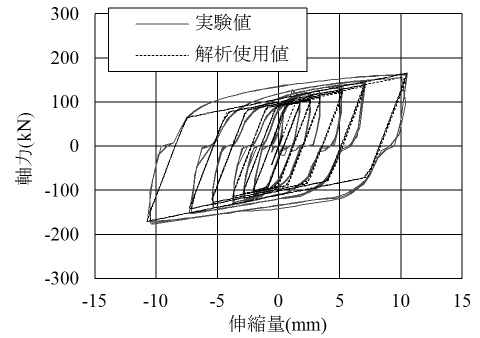
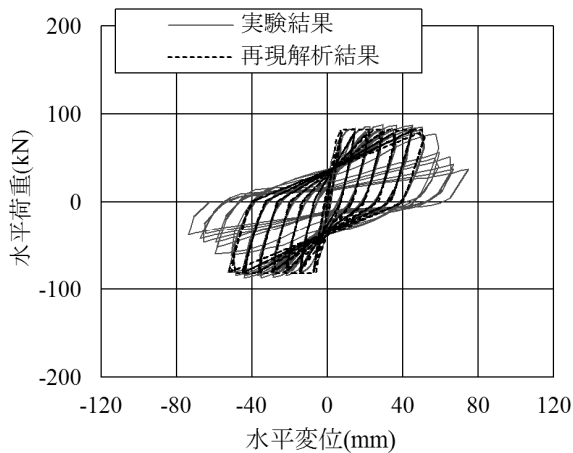
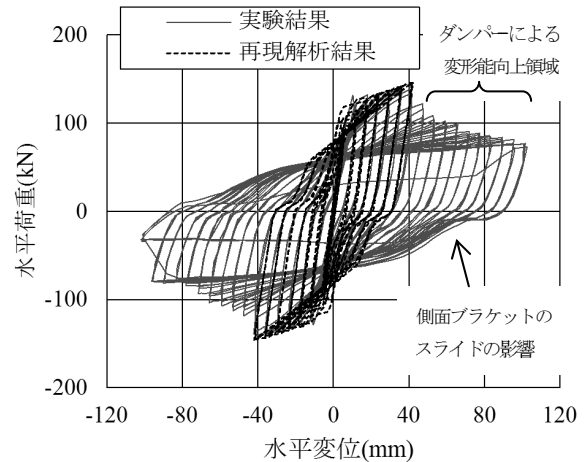


図-4 ダンパーの履歴曲線モデル

写真-1 実験状況
(供試体 A-D2)



(a) 供試体 A ダンパー無し



(b) 供試体 A-D2 ダンパー有り

図-5 橋脚頭部の水平荷重と水平変位関係についての再現解析値と実験値の比較

ている。

補強前橋脚の場合、許容水平変位 δ_a に対して、地震応答変位が超過していることを示している。これに対して、RC 巻き立て補強橋脚の場合は、橋脚の保有水平耐力が増大することにより応答変位が減少し、水平変位は許容値 δ_a 以内に収まるようになる。

一方、ダンパーを既存橋脚に設置して補強した場合には、既存橋脚のエネルギー吸収能に設置したダンパーのエネルギー吸収能が付加される。図に示すダンパー補強橋脚の履歴曲線では、既存橋脚の成分を点線、設置したダンパーの成分を細い実線で示し、両者を加算して求まる補強後の橋脚の挙動を太い実線で表している。点線で表す既存橋脚成分の履歴曲線の形状は、RC 柱の特性を示し、補強前橋脚の履歴曲線を水平変位方向に縮小した形

状となる。これに対して、細い実線で表すダンパー成分の履歴曲線は、概ね水平変位方向に沿った平行四辺形の形状であり、RC 柱の履歴曲線形状に比べて、荷重方向の増加を抑制した状態でエネルギー吸収効果を得ることができる。したがって、太い実線で表したダンパー補強橋脚の履歴曲線の形状は、RC 巻き立て補強橋脚のそれに比べて、水平変位方向の膨らみが大きく、荷重の増加量を低減できる。

このような性状により、ダンパーによる補強は保有水平耐力の増加を抑え、補強後の基礎の荷重増加を抑制して、橋脚の耐震補強に伴う基礎の補強を軽減できるメリットがある。また、設置するダンパーの降伏軸力を適切に選定することにより、必要とされる保有水平耐力の増分を調整できる利点もある。

3. 実験結果の再現解析

再現解析の対象とした正負交番載荷実験の供試体は、参考文献4)における供試体A(ダンパー無し)およびA-D2(ダンパー有り)であり、その諸元を表-1に示す。図-3は再現解析の骨組みモデルである。RC脚柱の非線形性は、曲げモーメントー曲率関係によりモデル化し、履歴特性はTakedaモデル、骨格曲線は参考文献5)の平成14年道路橋示方書(以下、H14道示)に従った。ダンパーは線形ばね要素とし、図-4に示すように、等方硬化と移動硬化を考慮したバイリニア型履歴モデル⁹⁾とした。また、図-3に示すように、ダンパーのピン接合部の遊間および取付け金具の弾性変形を考慮した接続要素を導入した。解析ソフトは土木・建築向け汎用3次元動解析プログラム「TDAPⅢ」を使用した。

図-5(a)および(b)は、橋脚頭部の水平荷重と水平変位の関係について再現解析値と実験値を比較したものである。解析値は、水平荷重が最大となるまでの範囲で、実験結果を良好に再現しており、本計算モデルを用いた動的解析による耐震性能照査は可能と判断できる。

なお、図-5(b)の実験値をみると、水平荷重がピークを過ぎた後もダンパーが支持力を維持し、安定した履歴曲線を描いており、変形能が大きく改善されていることがわかる。また、同図中の矢印の部分に水平変位のスライドが見られる。これは、ダンパー取付けブラケットを脚柱側面に固定するために使用した、あと施工アンカーの外周のコンクリートが支圧によって損傷し、ブラケットが鉛直方向に滑る現象が現れた影響による。本実験のあと施工アンカーは、参考文献7)によって設計しており、設計荷重は、ダンパー降伏軸力を1.5倍に割り増した値⁹⁾を用いている。ダンパーが制震機能を十分発揮するためには、取付け部は繰り返し荷重に対しての安全性を確保する必要がある。

4. 既存RC橋脚をダンパーで補強する場合の設計フロー

既存橋脚をダンパーで補強する場合の設計フローを図-6のように提案する。既存橋脚の地震による破壊形態を判定し、曲げ破壊型である場合にダンパー補強を検討する。まず、補強による橋脚の保有水平耐力の増分を設定し、これをダンパーの抵抗モーメントに換算してダンパーの降伏軸力を仮定する。このとき、橋脚の保有水平耐力の増分を見込んだ基礎の荷重が、基礎の保有水平耐力以下に収まることなどを考慮して選定する⁴⁾。

このようにして仮定したダンパーを、既存RC橋脚に設置して補強した場合について、3.に示した再現解析

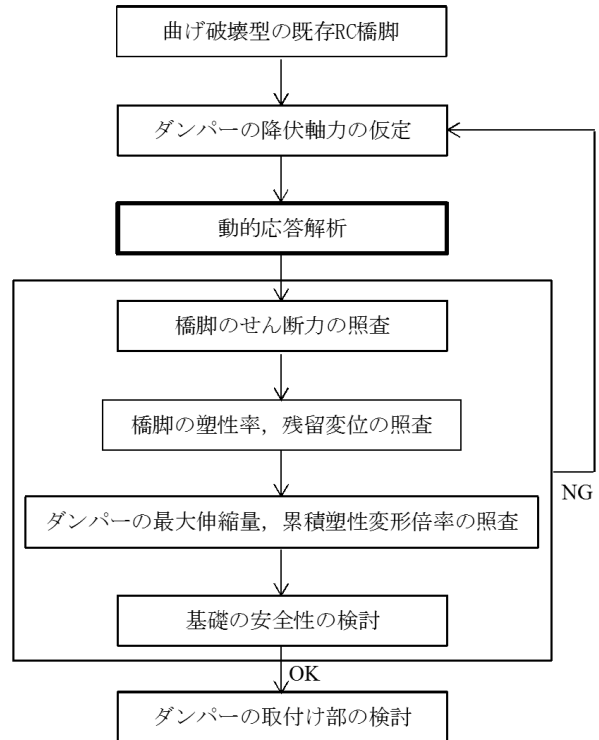


図-6 ダンパーによる橋脚補強の設計フロー案

で作成した計算モデルを用いて動的解析を行う。その結果に基づき、橋脚の耐震性能、ダンパーの性能および基礎の安全性について照査する。

既存橋脚をダンパーで補強した場合に、橋脚の保有水平耐力の増加に伴って、橋脚に作用するせん断力が補強前に比べて大きくなる。これを考慮して、補強後の橋脚のせん断力に対する安全性を照査する。

橋脚の変形能については、H14道示⁵⁾に従って、既存橋脚の塑性率および残留変位が許容値以内にあるか照査する。3.の実験結果で示した通り、橋脚が大きく曲げ変形した後も、ダンパーが支持力を維持し、変形能を大きく改善していることから、塑性率の照査は十分安全側にあると考えられる。

ダンパーについては、最大伸縮量および累積塑性変形倍率がダンパーの性能から決まる許容値以内にあるか照査する。

また、ダンパー補強によって、橋脚の保有水平耐力が増加し、基礎に作用する荷重が増加するため、これに対する基礎の安全性や補強を検討する。

上述の計算を繰り返して、設置するダンパーの仕様を決定する。その後、決定したダンパーの降伏軸力に対して、ダンパーの歪硬化などによる強度増分を考慮した割増しの設計荷重を定め、それに対して安全であるよう、ダンパーの取付け部材やアンカー等の設計を行う。

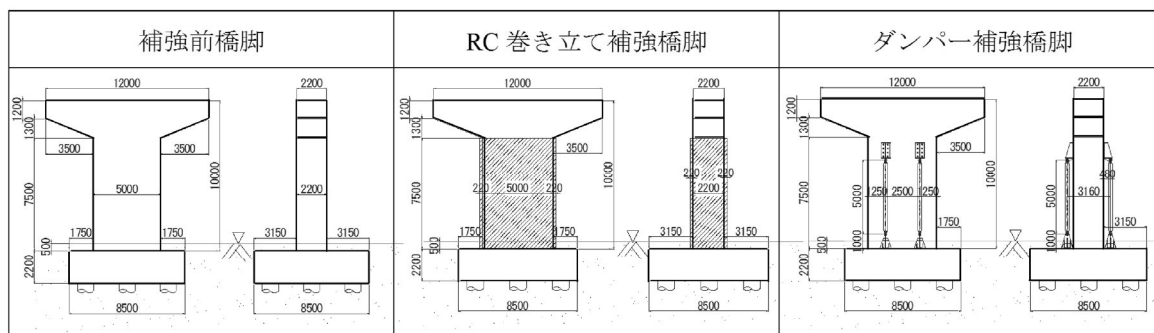


図-7 動的解析の対象とした橋脚の形状

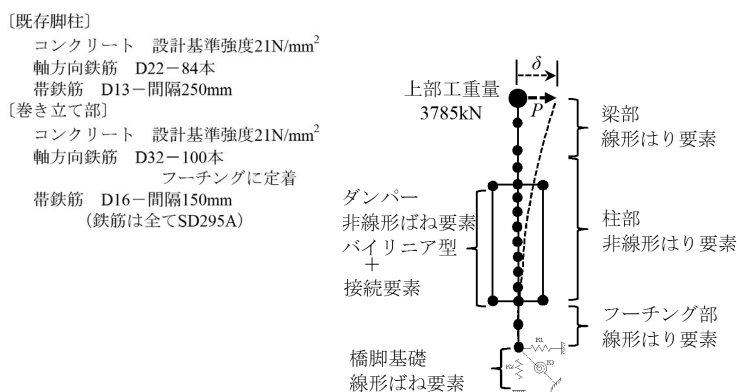


図-8 動的解析の骨組みモデル

表-2 既存橋脚の M - ϕ 骨格曲線の数値と許容値

	M ($\text{kN} \cdot \text{m}$)	ϕ ($1/\text{m}$)
ひびわれ限界	9802	0.0000954
初降伏限界	14819	0.000927
終局限界	15877	0.0230
耐震性能2許容値	-	0.0157

表-3 既存橋脚の P - δ 骨格曲線の数値と許容値

	P (kN)	δ (m)
初降伏限界	1482	0.018
降伏限界	1588	0.019
終局限界	1588	0.248
耐震性能2許容値	-	0.171

5. 実大橋脚モデルを対象とした動的解析

ここでは、実大橋脚モデルについて、4. に示した設計フローに基づく計算事例を示す。ダンパー補強による効果を明確にするため、補強前の橋脚、RC 巻き立て補強後の橋脚およびダンパー補強後の橋脚の3 ケースについての動的解析を行い、これらの計算結果を比較検討する。

(1) 実大橋脚の諸元と解析モデル

想定した橋梁は、支間長 33m、総幅員 12m の連続単純鋼 I 桁橋であり、上部構造重量は 3785kN で、解析対象の橋脚に固定支承にて支持されているものとした。

図-7 に解析の対象とした3 ケースの構造および寸法を示す。補強前の RC 橋脚は、参考文献 8) および 9) を参考にして、レベル 2 地震動に対する耐震性能を満たさない曲げ破壊型の仕様とした。RC 巻き立て補強の場合の巻き立て厚は一般的には 250mm を標準としているが、ここでは、最小かぶりや軸方向鉄筋と躯体の距離を考慮した 220mm とした。ダンパー補強橋脚では降伏軸力 1470kN の二重鋼管座屈拘束ダンパー⁶⁾を橋脚の前面・背面に2本ずつ設置した。基礎形式は杭基礎とし、外径 1200mm の場所打ち杭を9本配置した。

解析の骨組みモデルを図-8 に示す。また、表-2 および表-3 に、既存橋脚の脚柱基部の曲げモーメント M と曲率

ϕ 、および、水平荷重 P と水平変位 δ の骨格曲線の値を示す。それぞれの表には、H14 道示⁵⁾によって算出した耐震性能 2 の許容値を併記した。RC 巻き立て補強橋脚の非線形性は、参考文献 10) に従い算出し、Takeda モデルとし、ダンパーはバイリニア型履歴モデルとした。減衰定数は Rayleigh 減衰とし、各構造要素の減衰定数は参考文献 5) に従った。入力地震波は、JR 西日本鷹取駅構内地震盤上-NS 成分 (レベル 2, タイプ II-1, II 種地盤) とした。

(2) 解析結果

図-9 (a) ~ (c) は、3 ケースについての橋脚頭部の水平荷重 P と水平変位 δ の関係である。補強前橋脚の水平変位の最大値は許容値を大きく上回っている。これに対して、RC 巻き立て補強橋脚の場合は、水平変位が大きく低減し、許容値以内に収まっている。しかし、巻き立てによって躯体の重量が増加し、剛性や降伏荷重も大きくなるため、橋脚に作用する水平荷重の最大値が補強前に比較して 2.3 倍に増加している。一方、ダンパー補強橋脚についてみると、橋脚頭部の最大水平変位は補強前のそれに比べて 63% 低減し、許容値以内に収まるよう改善されている。また、橋脚頭部の水平荷重最大値は補強前のそれに比べて 1.4 倍に増加しているが、RC 巻き立て補強の水平荷重の増加に比べて少ないことが分かる。

図-10 (a) ~ (c) は、橋脚のフーチング底面に作用する曲げモーメント M の時刻歴応答である。RC 巻き立て補強

表-4 橋脚の耐震性能照査結果

照査項目		既存橋脚			RC巻き立て補強橋脚			ダンパー補強橋脚		
		計算値	許容値	判定	計算値	許容値	判定	計算値	許容値	判定
脚柱のせん断力	せん断力(kN)	2571	4211	○	6546	7157	○	3589	4211	○
橋脚の変形性能	塑性率	23.9	9.0	×	2.2	3.2	○	8.9	9.0	○
	残留変位(mm)	260	100	×	22	100	○	89	100	○
ダンパーの性能	最大伸縮量(mm)	-	-	-	-	-	-	27	40	○
	累積塑性変形倍率	-	-	-	-	-	-	43	407	○
基礎の荷重	曲げモーメント(kN・m)	28571	49138	○	74285	51749	×	39428	49138	○

〔注記〕 (1)RC巻き立て補強橋脚の許容塑性率は、参考文献(10)に従って塑性ヒンジ長の補正係数を0.8として算定した。

(2)基礎の曲げモーメントはフーチング底面における値

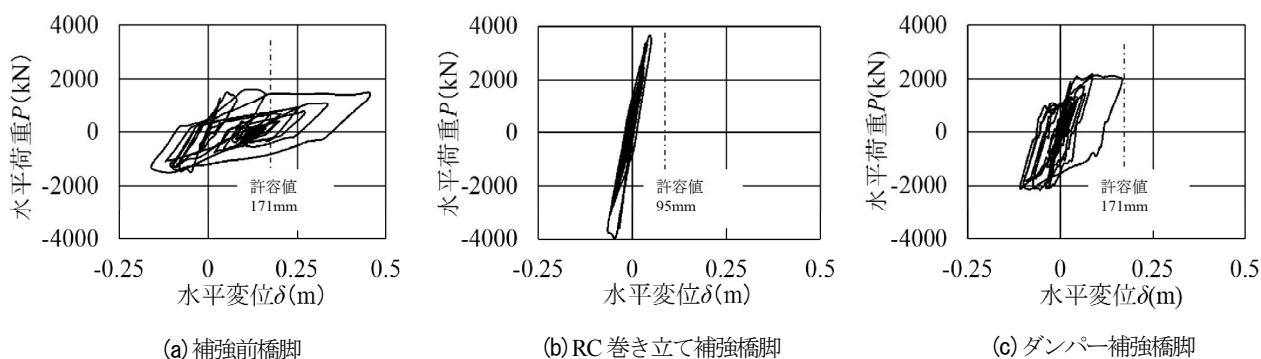


図-9 橋脚頭部の水平荷重 P と水平変位 δ の関係

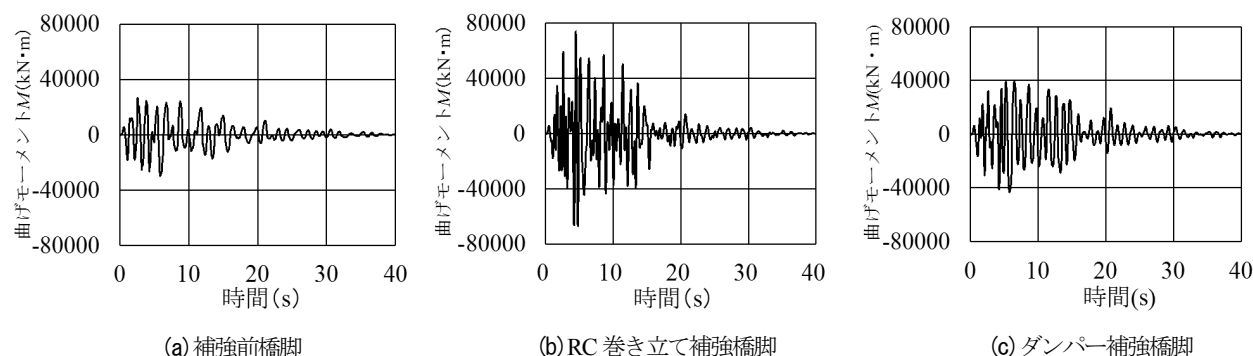


図-10 フーチング底面の曲げモーメント M の時刻歴応答

橋脚の場合の M の最大値は、補強前のそれに比べて 2.6 倍に増大している。これに対して、ダンパー補強橋脚の M の最大値は補強前のそれに比べて 1.4 倍であり、RC 巻き立て補強の場合に比べて小さい。このように、橋脚の補強による保有水平耐力の増加が、基礎に作用する荷重に影響することが分かる。

図-11 は、ダンパー補強橋脚の場合の、橋脚片面 2 本分のダンパーの軸力 F と伸縮量 d の関係である。ダンパーは弾塑性変形を繰り返し、紡錘型の履歴曲線を示しており、エネルギー吸収能を発揮していることが分かる。

図-9 に表す各ケースの応答特性は、図-2 における RC 巻き立て補強やダンパー補強による橋脚頭部の水平変位の低減や水平荷重の増加の概念とよく一致した傾向を示しており、ダンパーの高いエネルギー吸収能によって荷重を抑制しながら変形を低減できることが分かる。

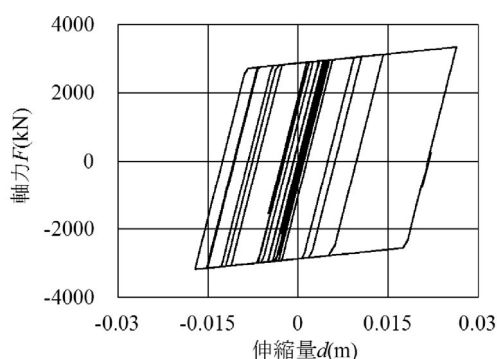


図-11 ダンパーの軸力 F と伸縮量 d の関係

(3) 橋脚およびダンパーの耐震性能の照査結果

表-4 は、解析データから得られた耐震性能の特性値と、それらについて、許容値に対する照査を行った結果をまとめたものである。

橋脚のせん断力は、ダンパー補強後の脚柱に作用するせん断力が既存脚柱の許容せん断力以内にあり、せん断

補強をしなくてもダンパー補強が適用可能と判断できる。

橋脚の塑性率および残留変位についてみると、補強前には両者とも許容値を超過していたが、補強後は RC 巻き立て補強橋脚およびダンパー補強橋脚とも許容値以内に収まっている。

ダンパーの性能については、最大伸縮量および累積塑性変形倍率とも許容値以内にあり、適用したダンパーは変形能および低サイクル疲労に対して安全である。

基礎の荷重については、RC 巻き立て補強橋脚の場合、橋脚の保有水平耐力が大幅に増加したことに伴い、フーチング底面位置での基礎に作用する曲げモーメントが許容値（杭の降伏で決まる）を超えている。このため、基礎の補強を考慮する必要があると判断される。一方、ダンパー補強の場合は、基礎の曲げモーメントは増大しているが、既存基礎の許容値以内にあり、基礎の補強は不要と判断できる。

(4) ダンパーの取付け部の検討

今回検討したダンパーの仕様を基に、取付け部の設計を行った結果の事例を図-12 に示す。3. に示した実験供試体の取付け部の設計と同様に、参考文献 6) に従い、ダンパーの設計軸力を降伏軸力の 1.5 倍に設定している。脚柱側面の取付け部については、脚柱を貫通するボルトによってブラケットを固定している。また、ダンパーとフーチングの取付け部のあと施工アンカーは、参考文献 7) によって設計した。

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て RC 橋脚の耐震補強を行う場合について、模型 RC 橋脚の正負交番載荷実験の再現解析、動的解析を用いた設計フローの提案および実大橋脚モデルの動的解析による耐震性能の評価を行った。結果は、以下の通りである。

- (1) 模型実験の再現解析により、RC 脚柱の履歴特性を Takeda モデルとし、ダンパーを等方硬化や移動硬化を考慮したバイリニア型履歴モデルとした骨組み解析によって、ダンパーで補強した橋脚の挙動を表すことができることが分かった。
- (2) 既存 RC 橋脚をダンパーで耐震補強する場合に、再現解析で確認した骨組みモデルによる動的応答解析を利用して、橋脚の耐震性能やダンパーの適用性を照査する設計のフローを提案した。
- (3) 実大橋脚モデルについての動的解析を行い、耐震性能を満たさない既存橋脚をダンパーで補強することにより、塑性率や残留変位を許容値以内に収め、耐震性を向上できることを示した。
- (4) 既存橋脚をダンパーで補強したときの保有水平耐力

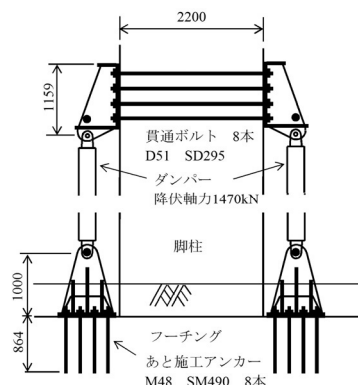


図-12 ダンパー取付け部の設計例

の増分は、RC 巻き立てによって補強したときのそれに比べて低減できる傾向があることが分かった。また、その効果によって、橋脚の補強に伴う基礎の荷重増加の影響を縮小でき、基礎の補強を回避したり削減できる場合があることを示した。

- (5) 既存橋脚にダンパーを取付け固定する部分について、ダンパーの歪硬化などによる荷重増分を見込んだ割増し荷重を設定して設計した事例を示した。

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.241-251、2006.9。
- 2) (財)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) 萩原健一、櫻井有哉、塩田啓介、熊崎達郎、秋山充良：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、第18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、pp.173-178、2015.7。
- 5) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編、2002、2012。
- 6) (社)日本免震構造協会：パッシブ制振構造設計・施工マニュアル第3版、pp.522-525。
- 7) (株)技術書院：あと施工アンカー設計と施工一、pp.82-93、1999.5。
- 8) (財)土木研究センター：橋の動的耐震設計法マニュアルー動的解析および耐震設計の基礎と応用一、2006.5。
- 9) 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、1997.3。
- 10) (社)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。