

エネルギー吸収型連結装置を用いた橋梁下部構造への地震力低減効果に関する研究

田中 賢太郎¹・北原 武嗣²・松村 政秀³・頭井 洋⁴

¹摂南大学理工学部都市環境工学科講師
(〒572-8508 大阪府寝屋川市池田中町17-8)

E-mail:tanaka@civ.setsunan.ac.jp

²関東学院大学社会環境システム工学科教授 (〒236-8501 神奈川県横浜市金沢区六浦東1-50-1)

E-mail:kitahara@kanto-gakuin.ac.jp

³大阪市立大学大学院工学研究科講師 (〒558-8585 大阪府大阪市住吉区杉本3-3-138)

E-mail:m_matsu@civil.eng.osaka-cu.ac.jp

⁴摂南大学理工学部都市環境工学科教授 (〒572-8508 大阪府寝屋川市池田中町17-8)

E-mail:zui@civ.setsunan.ac.jp

本研究では、既設橋梁下部構造の耐震補強を目的として、履歴エネルギー吸収型の制震効果を期待した連結装置として鋼製ベローズを用いた地震時水平力の低減効果を検討した。ここでは、期待するエネルギー吸収特性の違う 2 種類の鋼製ベローズを比較対象とし、これらの組合せが水平地震力の低減効果に与える影響について数値解析により検討した。レベル 1 地震動およびレベル 2 地震動を入力とした非線形時刻歴応答解析により、桁間に鋼製ベローズを設置することで橋梁下部構造の水平地震力を低減することが可能であることを示した。

Key Words : *Steel Bellows, Energy Absorption Connector Devices, Pier Foundation, Non-linear Time-History Analysis*

1. はじめに

平成7年に発生した兵庫県南部地震において、橋梁下部構造に甚大な被害が生じた。特に橋脚の被害が大きく、上部構造の落下につながりかねない隣接する桁同士の衝突や橋脚、基礎等の下部構造の被害が生じた¹⁾。これらのことを受け、耐震性能の低い橋梁では耐震補強が行われた。補強方法としては、主に免震支承が用いられ、高架橋の長周期化と減衰効果の増大により、耐震性能の向上が図られている。さらに、下部構造の耐震補強方法^{2)・3)}や杭基礎の特性^{4)~7)}などが研究されてきている。しかしながら、一般的に基礎構造の耐震補強はコストがかかり、工法的にも実施困難な場合が多い。そこで、基礎を直接耐震補強するのではなく、比較的補強が容易な上部構造に対策を行うことにより、橋梁下部構造に伝わる水平地震力を低減できれば、経済的な基礎構造の耐震補強となりうると考えられる。

一方、著者らはこれまでに、都市高架橋を対象にエネルギー吸収型桁連結装置として、鋼製ベローズを用いる検討を行っている。鋼製ベローズは、これまで、レベル2地震動に対しエネルギー吸収装置として有効であることが示してきている^{8)・9)}。しか

し、レベル1地震動に対しての有効性については、これまで検討されていない。

既設橋脚の基礎設計では、震度法レベルで基本設計がなされている。レベル 1 地震動にも、エネルギー吸収性能を有する制震装置を用いることにより、比較的補強が容易な地面より上部での耐震補強をすることができれば、経済的優位に橋脚基礎へ伝わる地震力低減効果が期待できる。

そこで本研究では、履歴エネルギー吸収型の制震装置として桁間に鋼製ベローズを設置することにより、橋梁下部構造の水平地震力を低減する手法を検討することとした。この際、レベル 1 地震動に対してエネルギー吸収性能を発揮する鋼製ベローズ、およびレベル 2 地震動に対し性能を発揮する鋼製ベローズの 2 種類を用いるものとした。鋼製ベローズの諸元は設計式⁹⁾により求め、橋梁全体系解析モデルを用いて、レベル 1 用鋼製ベローズとレベル 2 用鋼製ベローズとを併用した数ケースの組み合わせについて非線形時刻歴応答解析を実施し、鋼製ベローズによる下部構造の水平地震力の低減効果を検討した。

2. エネルギー吸収型桁連結装置（鋼製ペローズ）の概要

図-1(a), (b)には、鋼製ペローズの断面と立体図を示す。都市高架橋の桁端部に設置する鋼製ペローズは、厚さ 10mm~20mm 程度の鋼板を半円筒状に曲げ加工を施したもので、円筒部の直径は 160mm~400mm 程度で 2 枚 1 組にし、桁端部と桁端部とを高力ボルトによる摩擦接合により連結する構造である。円筒部の半径を R 、接合部小円の半径を r 、直線高さを b 、板厚を t としている。隣接する上部構造と上部構造との相対変位が鋼製ペローズの変位となる。文献 8), 9) では、鋼製ペローズ単体の力学的特性に関する研究が実施されており、耐荷性能が明らかにされている。

図-2 に、プレートガーター橋の断面図を示す。鋼製ペローズは、図-2 の桁の腹板部分に摩擦接合により設置する。

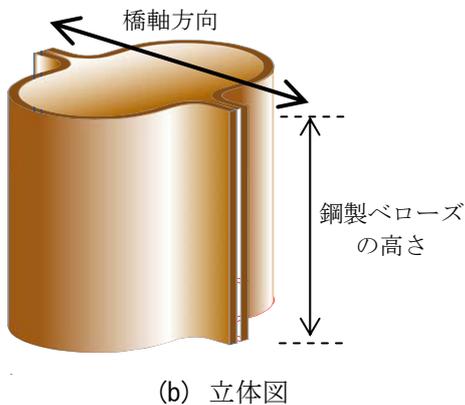
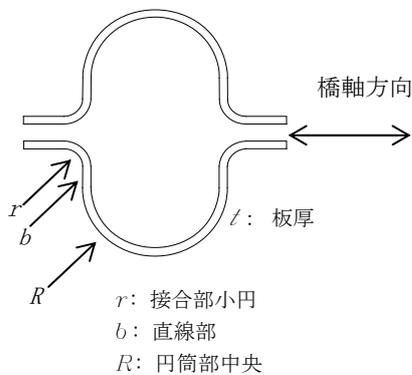


図-1 鋼製ペローズの概要

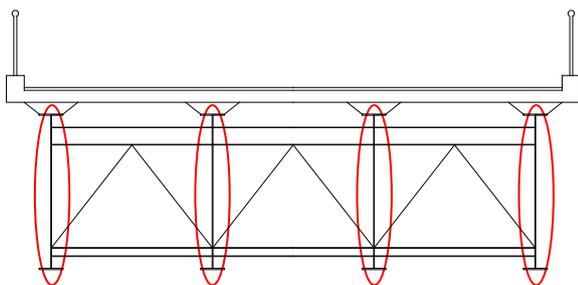


図-2 鋼製ペローズの設置箇所

3. 橋梁全体系解析モデルを用いた非線形時刻歴応答解析

3.1 橋梁全体系解析モデル

図-3 に、非線形時刻歴応答解析に用いたはり・ばね-質点系で表した全長 117m の橋梁全体系解析モデル (3 径間連続鋼 I 桁橋) を示す。記号 Ub1 は 3 径間連続鋼 I 桁橋の上部構造を、P1, P2 は鉄筋コンクリート橋脚、A1, A2 は橋台、S1~S4 は免震支承ばねを示している。BelA, BelB は鋼製ペローズばねを表している。上部構造は弾性はり要素、橋脚は非線形二次元はり要素、支承はばね要素でモデル化した。計算プログラムに、T-DAP III を用いて非線形時刻歴応答解析を実施する。

鋼製ペローズについても、ばね要素としてモデル化する。基礎地盤は II 種地盤とする。

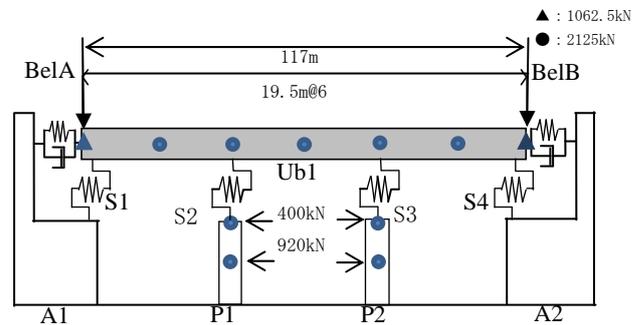


図-3 橋梁全体系対象モデル

(1) 上部構造 (Ub1)

上部構造 (Ub1) は 4 本主桁で主桁間隔 2.7m、全長 117 m の 3 径間の連続鋼 I 桁橋で、径間長はすべて 39m とした。上部構造の軸方向の伸縮や曲げ変形が橋軸方向の地震応答挙動に及ぼす影響は小さいと考え、上部構造は剛性の大きな分布質量系のはりとした。上部構造の諸元を、表-1 に示す。

(2) 免震支承 (S1~S4) および橋脚 (P1, P2)

支承は、免震支承 (鉛プラグ入り積層ゴム支承) を用いる。支承の設計条件は、免震支承の降伏荷重が上部構造の反力の約 10%、支承の高さが 0.15m、有効せん断ひずみが 250%以内となるように、諸元を決定した。バイリニア型履歴特性を有する非線形ばねでモデル化している。免震支承、諸元を、表-2 に示す。

橋脚は、高さ 11m の単柱式鉄筋コンクリート橋脚とし、道路橋示方書・耐震設計編¹⁰⁾に従い、震度法により設計水平震度 0.3 で設計した。既設の高架橋への耐震補強にも適用可能かを検討することも想定したので、震度法に基づき設計した橋脚を用いた。図-4 に、ひび割れ、降伏、終局時の鉄筋コンクリート橋脚の骨格曲線 ($M-\phi$ 関係) を示す。橋脚の材料非線形モデルには武田型モデルを使用した。

表-1 上部構造の諸元

主桁本数	4本
幅員	9.0m
1径間当たりの重量	4,250kN

表-2 免震支承の諸元

項目	値
支承高さ	0.15m
降伏荷重	425kN
降伏変位	0.028m
一次剛性	18000kN/m
二次剛性	2770kN/m

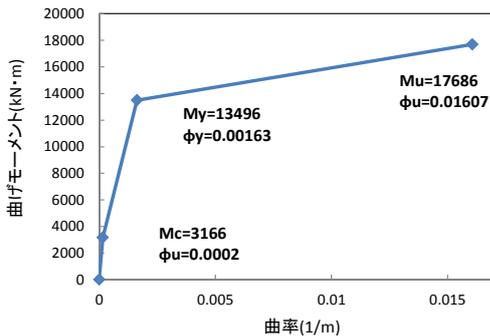


図-4 橋脚の骨格曲線

(3) 鋼製ペローズの履歴特性

鋼製ペローズの構造諸元は、レベル1地震動およびレベル2タイプII地震動のそれぞれについて、エネルギー吸収性能が発揮できるように寸法を決める。今回は、既発表の設計式⁹⁾により、必要寸法を決定しFEM解析により骨格曲線を仮定することとした。レベル1用鋼製ペローズは、レベル1地震動で降伏し塑性変形するように降伏耐力および降伏変位を設定し、レベル2用鋼製ペローズは、レベル1地震動では弾性範囲内とし、レベル2地震動で降伏し塑性変形するように構造諸元を設定した。なお、設計式より求めた鋼製ペローズの構造諸元を、レベル1地震波およびレベル2地震波を用いた非線形時刻歴応答解析により調整した。本研究で用いたレベル1用鋼製ペローズの寸法を表-3に、レベル2用鋼製ペローズの寸法を表-4に示す。

汎用有限要素法構造解析ソフトDIANA9.3を用いて弾塑性解析で鋼製ペローズの履歴特性を確認した。図-5、6には、四角形8節点要素を用いた平面ひずみ要素のレベル1用鋼製ペローズおよびレベル2用鋼製ペローズそれぞれの解析モデル図を示す。材料特性は、バイリニア型とし、2次剛性は初期剛性の1/100と仮定し、材料非線形と幾何学的非線形の両方を考慮してFEM解析を行う。メッシュ分割数は、板厚方向に8分割とし、板厚方向と橋軸方向との割合は1:1.5でモデル化を行う。図-5、6のように解析モデルの境界条件は片側の端部を完全固定にし、もう片側の端部は橋軸方向のみ自由として橋軸方向以外は拘束し強制変位を与えた。

図-7、8に、FEM解析により求めた荷重-変位関係(点線)とその荷重-変位関係より求めたレベル1用およびレベル2用鋼製ペローズの骨格曲線(破線は圧縮側特性、および実線は引張側特性の一次剛性、二次剛性)を示す。縦軸に、荷重を、横軸には変位量を示す。設計式により鋼製ペローズの骨格曲線をほぼ仮定できるが今回は、圧縮側特性と引張側特性との若干の違いを考慮するために、FEM解析結果を参考に包絡線を描き、鋼製ペローズの骨格曲線を仮定した。図-9に示すように、鋼製ペローズの履歴特性は、バイリニア型の履歴特性を仮定し、一次剛性で除荷および載荷するパターンとした。レベル1用鋼製ペローズの圧縮側特性の一次剛性は3,188kN/m、二次剛性は54kN/mとなり、引張側特性の一次剛性は3,308kN/m、二次剛性は288kN/mとなった。レベル2用鋼製ペローズについては、圧縮側特性の一次剛性は11,634kN/m、二次剛性は213kN/mとなり、引張側特性の一次剛性は12,047kN/m、二次剛性は999kN/mとなった。圧縮側特性と引張側特性とが異なる理由は、圧縮側特性は、鋼製ペローズの曲げ剛性のみで抵抗するが、引張側特性は鋼製ペローズの曲げ剛性に加え、変形が大きくなるにつれてまっすぐな板の形状に近づき、伸び剛性の影響が大きくなるためである。

鋼製ペローズの高さ(必要耐力)は、非線形時刻歴応答解析を用いてパラメータ解析を実施し、1つ当たりのレベル1用鋼製ペローズは、130mm、レベル2用鋼製ペローズは、400mmと決めた。

表-3 レベル1用鋼製ペローズの寸法(mm)

円筒部半径R (板厚中心)	接合部小円 半径r (板厚中心)	直線 高さb	板厚 t
75	25	20	9

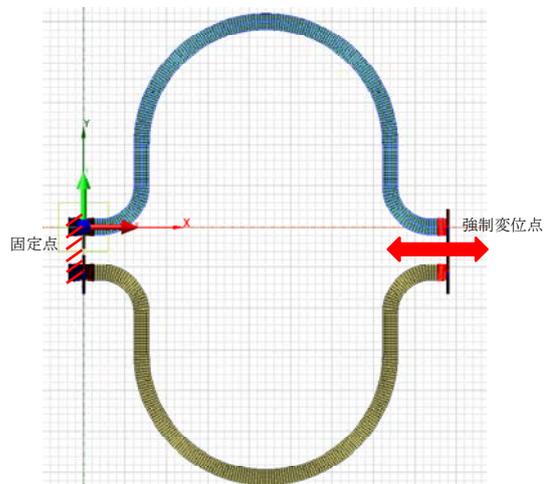


図-5 レベル1用鋼製ペローズのメッシュ分割

表-4 レベル2用鋼製ベローズの寸法(mm)

円筒部半径 R (板厚中心)	接合部小円 半径 r (板厚中心)	直線 高さ b	板厚 t
150	50	50	19

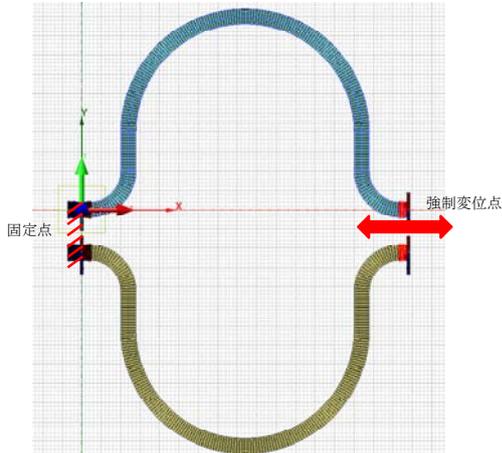


図-6 レベル2用鋼製ベローズのメッシュ分割

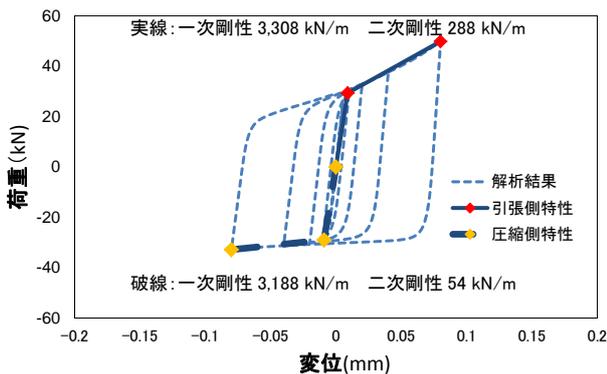


図-7 レベル1用鋼製ベローズの履歴特性と骨格曲線

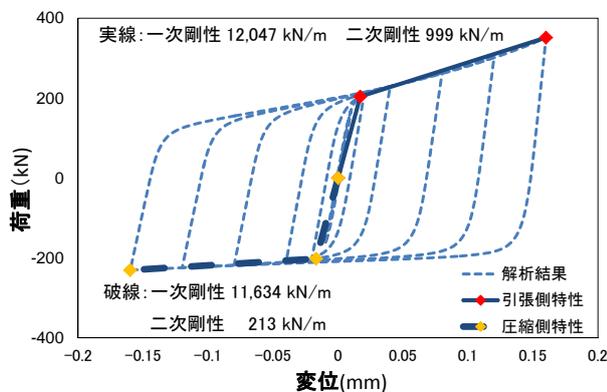


図-8 レベル2用鋼製ベローズの履歴特性と骨格曲線

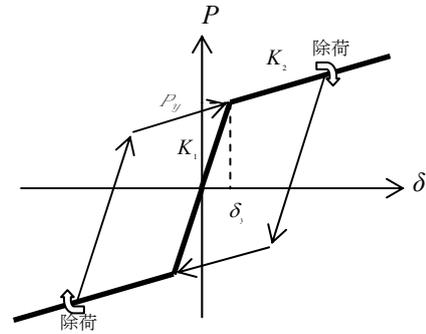


図-9 鋼製ベローズの履歴特性

(3) 入力地震波および解析ケース

図-10 は、レベル1地震動、II種地盤の比向灘沖地震において板島橋周辺地盤上で観測された最大加速度 118.31gal の地震波を示す。図-11 には、レベル2タイプII JR 鷹取駅構内で観測された最大加速度 686.83gal の地震波を示す。表-5 の解析ケースに示すように、基本ケースで鋼製ベローズなし(ケース1)、さらに、エネルギー吸収性能のない落橋防止装置(ケース7)と比較して、2種類の鋼製ベローズのエネルギー吸収性能と制震効果を検討する。

ケース2は、レベル1地震動に有効な鋼製ベローズを片方の桁端部に10組用い、ケース3は、レベル2地震動に有効な鋼製ベローズを片方の桁端部に4組用いた場合を示している。ケース4は、レベル1用鋼製ベローズとレベル2用鋼製ベローズとを併用して用い、どちらの地震動に対してもエネルギー吸収する場合を想定している。ケース5は、レベル1用鋼製ベローズをケース2の2倍用いて、レベル2地震動に対しても有効かどうかを検討するために設定した。ケース6は、レベル2用鋼製ベローズをケース3の2倍用いて、さらにレベル2地震動時の上部構造応答変位を低減した場合について検討する。

また、鋼製ベローズを設置しない場合(ケース1)については、両端の橋台は十分に剛性が大きいとし、橋軸方向について桁遊間は十分に大きく、桁と橋台との衝突現象は起きないものと仮定した。ケース7について、桁間連結ケーブルの作動および桁遊間はともに 0.15 m と仮定した。桁間連結ケーブルの剛性 ($k_t=544,500 \text{ kN/m}$) および桁間衝突ばね ($k_p=252,255 \text{ kN/m}$) の特性については、文献(11)、(12)を参考に算出した。図-12に、想定した落橋防止装置を示す。なお、エネルギー吸収性能のない落橋防止装置を想定している。

表-5 解析ケース

ケース	解析内容
ケース1	鋼製ベローズなし
ケース2	レベル1用鋼製ベローズのみ
ケース3	レベル2用鋼製ベローズのみ
ケース4	レベル1+レベル2用鋼製ベローズの併用
ケース5	レベル1用鋼製ベローズ×2設置
ケース6	レベル2用鋼製ベローズ×2設置
ケース7	落橋防止装置 設置

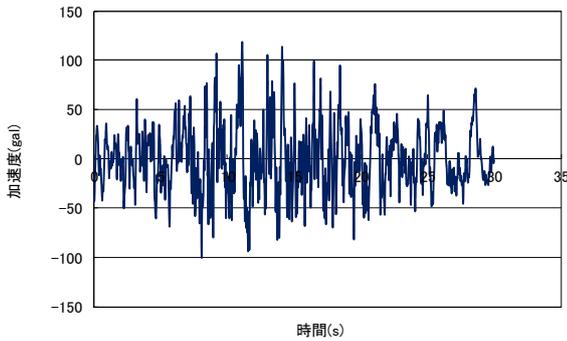


図-10 レベル1地震動

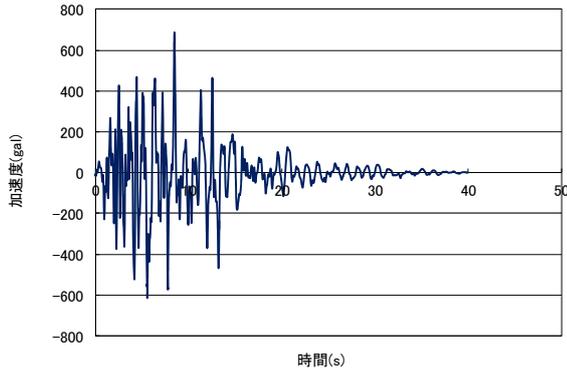


図-11 レベル2地震動

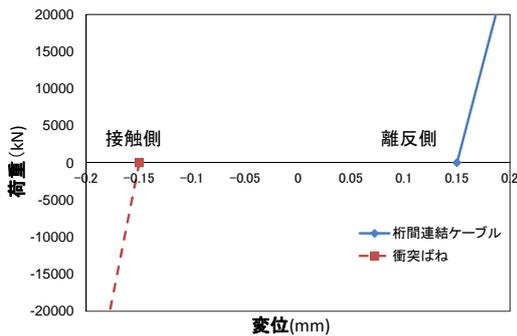


図-12 桁間連結ケーブルおよび桁間衝突ばね特性

3.2 非線形時刻歴応答解析による鋼製ペローズの設置効果の検討

橋梁全体系解析モデルを用いて非線形時刻歴応答解析を行う。

(1) レベル1地震動

レベル1地震動の応答解析結果を図-13に示す。横軸は橋脚、橋台上の支承、橋脚上の支承、橋台の設置条件を示している。縦軸は、支承、橋脚および橋台に生じる最大作用地震力を示している。レベル1地震動の場合では、ケース1と比較して、ケース3やケース6では、橋脚P1に作用する最大地震力が最大で約66%低下した。レベル2用鋼製ペローズはレベル1用鋼製ペローズに対して、鋼製ペローズは降伏せず剛性が大きいので上部構造変位を抑制したためである。ケース4の場合でも約61%の水平地

震力が低減できている。図-14のレベル1用鋼製ペローズの荷重-変位関係に示すように、レベル1用鋼製ペローズの塑性変形によるエネルギー吸収性能が発揮されたためである。また、図-15に示すようにレベル2用鋼製ペローズは弾性範囲内に収まっていることがわかる。さらに、図-16に示すように、レベル2用鋼製ペローズの制震効果によって上部構造の応答変位を抑制できたことも加わり、橋脚へ伝わる地震力の低減効果が向上したと考えられる。

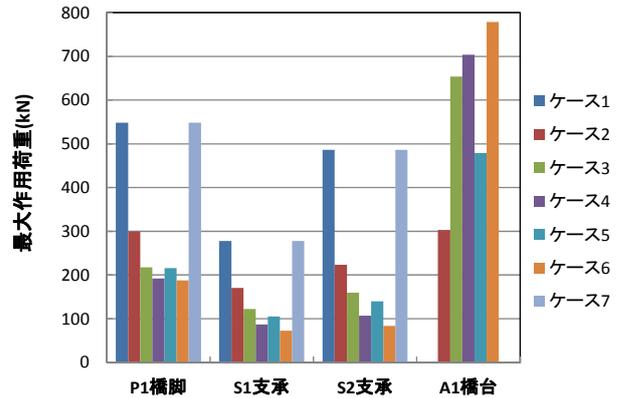


図-13 最大作用荷重(レベル1地震動)

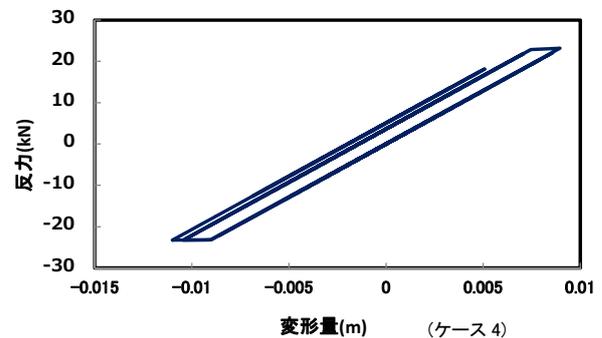


図-14 レベル1用鋼製ペローズの履歴曲線

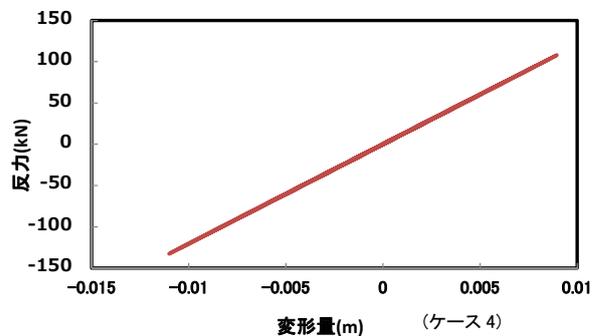


図-15 レベル2用鋼製ペローズの履歴曲線

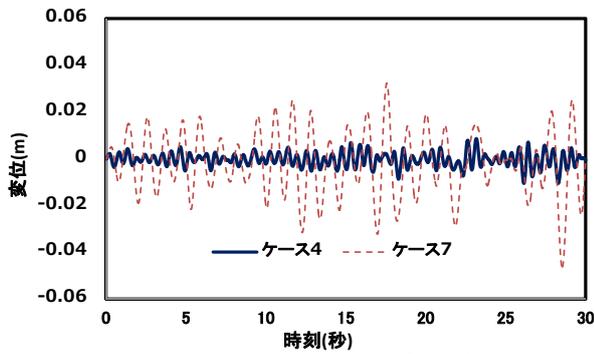


図-16 上部構造の応答変位結果

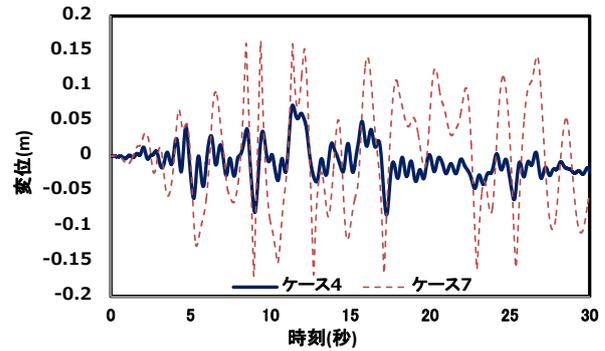


図-19 上部構造の応答変位結果

(2) レベル2地震動

レベル2地震動の応答解析結果を図-17に示す。レベル2地震動の場合、ケース1と比較してケース6では46%橋脚への作用荷重を低減できているが、橋台への作用荷重が大きいため、橋台の負荷が大きくなる。さらに、ケース7の場合は落橋防止構造の動作により橋台に大きな作用荷重が生じている。一方、ケース4の場合、鋼製ペローズのエネルギー吸収効果により橋脚への荷重を41%軽減でき、橋台への作用荷重の増加もあまり大きくない。図-18に示すように、レベル1用およびレベル2用の両鋼製ペローズのエネルギー吸収により、橋脚・橋台への地震力がともにバランスよく分散できている。また、図-19に示すように、上部構造の応答変位を小さくできていることが確認できる。

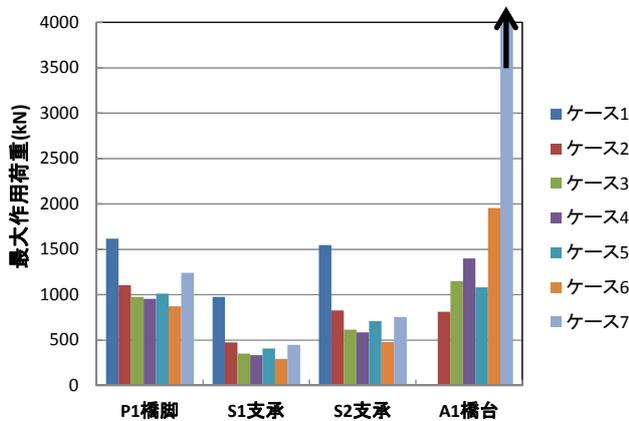


図-17 最大作用荷重(レベル2 Type II地震動)

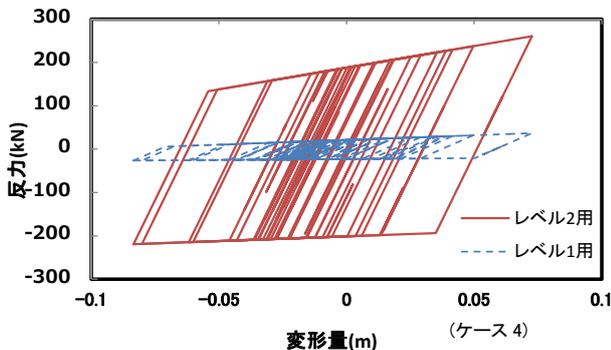


図-18 レベル1用およびレベル2用鋼製ペローズの履歴曲線

4. まとめ

本研究では、下部構造のローコストな制震装置として鋼製ペローズを、設置の簡易な上部工の桁端部に用いる手法を検討した。

1. レベル1地震動の場合、レベル1用鋼製ペローズのエネルギー吸収効果とレベル2用ペローズの弾性剛性により、橋脚へ作用する地震力を大きく低減できる。
2. レベル2地震動の場合も、レベル1用とレベル2用に設計した鋼製ペローズを併用することで、上部構造や橋台への負担を軽減でき、橋脚にかかる作用荷重を41%軽減できる。
3. 鋼製ペローズを桁端部に設置し、下部構造の制震装置として用いることができる可能性を示せた。

謝辞

本研究の一部は平成 23~24 年度科学研究費補助金・若手研究 (B) (研究代表者: 田中賢太郎, 課題番号: 23760433) の助成を受けた。ここに記して謝意を表します。また、解析実施に当たり、関東学院大学大学院生に協力を得た。記して、謝意を表する。

参考文献

- 1) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会: 阪神・淡路大震災調査報告, 土木建造物の被害・橋梁, 土木学会他, 1996.12.
- 2) 浦野和彦, 足立有史, 河邑眞: 地盤固化体を用いた杭基礎の耐震補強工法に関する3次元FEM解析, 構造工学論文集, Vol.56A, pp.1075-1087, 2010. 3.
- 3) 藤原寅士良, 谷口善則, 野澤伸一郎, 渡邊明之, 石橋忠良: 基礎スラブを用いた杭基礎の耐震補強効果に関する実験的研究, 土木学会論文集 A, Vol.65 No.2, pp.310-320, 2009.

- 4) 磯部公一, 木村 亮, 大塚 悟, 秋山耕士郎: 鋼管柱基礎の静的水平抵抗特性に関する三次元弾塑性有限要素解析, 構造工学論文集, Vol.56A, pp.1041-1053, 2010. 3.
- 5) 近藤政弘, 常田賢一, 西山誠治, 神田政幸: 地中梁水平地盤抵抗および鋼矢板囲い込み工を考慮した設計モデルの提案, 構造工学論文集, Vol.55A, pp.1096-1203, 2009. 3.
- 6) 富澤幸一, 西本 聡, 三浦清一: 複合地盤における杭基礎の力学挙動評価と耐震性能照査, 構造工学論文集, Vol.55A, pp.1182-1195, 2009. 3.
- 7) 橋本 至, 林川俊郎, 寿楽和也: 杭基礎の群杭効果における杭の並列および直列効果に関する解析的研究, 構造工学論文集, Vol.54A, pp.928-939, 2008. 3.
- 8) 田中 賢太郎, 頭井 洋, 北田 俊行, 松村 政秀: 橋軸直角方向の性能も考慮したエネルギー吸収型橋桁連結装置の制震効果について, 鋼構造論文集, 第12巻, 第48号, 日本鋼構造協会, pp.77-88, 2005.12.
- 9) 頭井 洋, 大谷 修, 岡本安弘: エネルギー吸収型桁連結装置としての鋼製ベローズの力学特性, 鋼構造論文集 第9巻, 第34号, 日本鋼構造協会, pp.77-86, 2002.6.
- 10) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, V耐震設計編, 2002.3.
- 11) 川島一彦: 動的解析における衝突のモデル化に関する一考察, 土木学会論文集, No.308, pp.123-126, 1981.4.
- 12) 梶田幸秀, 杉浦邦征, 渡邊英一: 緩衝型桁間連結ケーブルを用いた高架橋の地震時応答性状, 土木学会論文集, No.710, I-60, pp.297-310, 2002.7.

STUDY ON A SEISMIC FORCE REDUCTION METHOD OF THE BRIDGE PIER FOUNDATION USING ENERGY ABSORPTION CONNECTOR DEVICES.

Kentaro TANAKA, Takeshi KITAHARA, Masahide MATSUMURA and Hiroshi ZUI

In this paper, the energy absorption performance of the steel bellows as one of the energy absorption connector devices is examined for the pier foundation by means of non-linear time-history analyses. The effectiveness of the steel bellows on the seismic force reduction is verified using a three-span girder bridge model supported on lead rubber bearings.