

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 30 日現在

機関番号：34428

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23760433

研究課題名（和文）エネルギー吸収型桁連結装置を適用した橋脚基礎の耐震補強および設計法の開発

研究課題名（英文）Seismic strengthening of the Pier foundation and Development of Design Method Using the Energy Absorption Connector devices.

研究代表者

田中 賢太郎（TANAKA KENTARO）

摂南大学・理工学部・都市環境工学科・講師

研究者番号：50529724

研究成果の概要（和文）：本研究では、履歴エネルギー吸収による制震効果を期待した桁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を変化させた 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 地震動を入力した非線形時刻歴応答解析により、桁間にレベル 1 地震動用とレベル 2 地震動用の鋼製ベローズを設置することにより、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。

研究成果の概要（英文）：In this paper, the steel bellows as one of the energy absorption connector devices is examined for piers and pier foundations by means of non-linear time-history analyses. The effectiveness of the steel bellows on seismic force reduction is verified using a three-span girder bridge model supported on lead rubber bearings. By using level 1 and level 2 the steel bellows for level 1 and level 2 earthquakes, it can be expected that the steel bellows becomes as one of seismic control devices of substructure.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：エネルギー吸収型桁連結装置、橋脚基礎、非線形時刻歴応答解析、地震力低減

1. 研究開始当初の背景

兵庫県南部地震の際、都市高架橋、特に橋脚の被害が甚大だったことを受け、それ以降、既設橋梁においても橋脚の耐震補強が幅広く実施された。これに伴い、上部構造の重量が増大し橋脚基礎構造の耐震補強も付随的に必要となることが多い。

橋脚基礎の耐震補強においては、橋脚基部の鋼板巻き立て工法や新たな基礎杭を追加することで橋脚基礎の水平力および鉛直力を増強させる方法が用いられる。しかしながら、新たな杭を追加する方法では多大なコストの発生が懸念される。一方、橋梁に入力さ

れる地震エネルギーを橋梁のどの部位で効率よくエネルギー吸収を行うかは非常に重要になっている。

これまでに、支承や下部構造で地震エネルギー吸収を行うよりも、桁間緩衝装置を用いて桁間でエネルギー吸収を行う方が、経済性、および機能性に優れていることや上部構造変位の増大や桁間衝突は桁連結装置により軽減できることを明らかにしてきた。それらの知見を参考にし、橋脚基礎の耐震設計法として応用する検討を行った。本研究では、桁間にエネルギー吸収装置を設置した橋梁システムとすることで、エネルギー吸収装置で

地震時エネルギーを吸収し、橋脚基礎構造に伝達される水平地震力の低減を図る構造形式を検討するものである。

2. 研究の目的

本研究の目的は、震度法レベルの地震力で設計された橋脚や橋脚基礎を有する既設橋の耐震補強法として、レベル2地震動に対し有効な鋼製ペローズに加え、レベル1地震動にも有効な鋼製ペローズを組み合わせた場合の水平地震力の低減効果を検討する。鋼製ペローズの設置スペースが矮小な際に、レベル2地震用の鋼製ペローズを単独で用いる場合に比べ小型化でき設置スペースの制限についても解決できる可能性も期待できる。

鋼製ペローズの諸元は設計式により求め、橋梁全体系解析モデルを用いて、レベル1用鋼製ペローズとレベル2用鋼製ペ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、鋼製ペローズによる下部構造の水平地震力の低減効果を検討する。

3. 研究の方法

有限要素法解析プログラムを用いて、レベル2地震動に対してエネルギー吸収性能を十分に発揮できる諸元を検討する。およびレベル1地震動に対しても十分なエネルギー吸収性能が発揮できるエネルギー吸収型桁連結装置の諸元を検討する。なお、エネルギー吸収型桁連結装置としては、鋼製ペローズを用いる。鋼製ペローズは、鋼板を半円筒状に曲げ加工を施した板2枚を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装置である。また、鋼製ペローズの諸元を簡単に求めるために既存の設計式の適用性についても検討した。

つぎに、図-1に示す橋梁全体系モデルを作成し、非線形時刻歴応答解析により、エネルギー吸収型桁連結装置を設置しなかった場合と設置した場合について、橋脚に作用する地震力にどのような変化があるかエネルギー吸収型桁連結装置の設置効果を考察する。

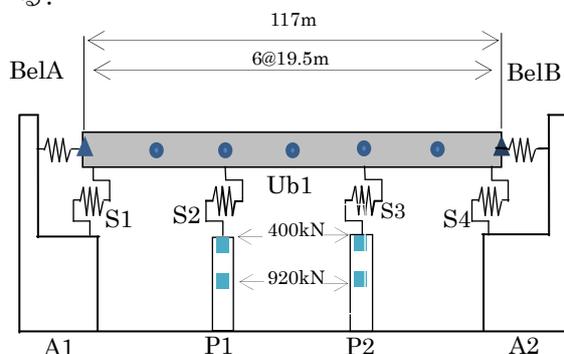


図-1 橋梁全体系対象モデル

(3 径間連続鋼 I 桁橋)

4. 研究成果

(1) 有限要素法解析結果

レベル1用鋼製ペローズは、レベル1地震動で降伏するようにし、レベル2用鋼製ペローズは、レベル2地震動で降伏するように構造諸元を設定した。用いたレベル1用鋼製ペローズの寸法を表-1に、レベル2用鋼製ペローズの寸法を表-2に示す。図-2および図-3に、FEM解析により求めた荷重-変位関係(点線)とその荷重-変位関係より同定したレベル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。圧縮側特性と引張側特性との剛性の違いを考慮して、鋼製ペローズの骨格曲線を設定した。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決まるが、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。

表-1 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

表-2 レベル2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
150	50	50	19

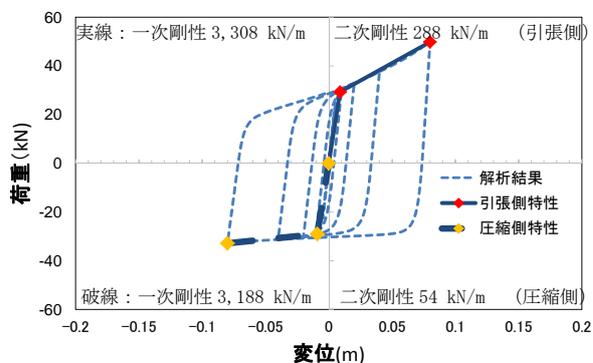


図-2 レベル1用鋼製ペローズの

履歴特性と骨格曲線

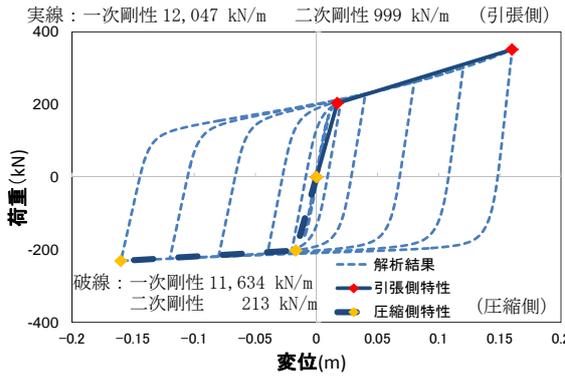


図-3 レベル2用鋼製ベロースの履歴特性と骨格曲線

(2) 鋼製ベロースの設置効果の検討

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。これまで、レベル2地震動に対し鋼製ベロースを用いた非線形時刻歴応答解析による検討を実施して、強地震下におけるエネルギー吸収性能、制震効果などを明らかにしてきた。降伏強度が異なる2種のベロースを用い、レベル1地震動の日向灘沖地震およびレベル2タイプIIJR鷹取駅構内で観測された地震波を用いて検討した。

表-3に解析ケースを示す。 $\Sigma P_y / W$ は、鋼製ベロースの降伏耐力と上部構造総重量との比を表す。 ΣP_y は、設置した鋼製ベロースの降伏耐力の合計を示し、 W は上部構造総重量を示す。なお、鋼製ベロースの降伏耐力の値は、引張側の値を用いている。ただし、圧縮側および引張側の降伏耐力の値はどちらも大差はない。

表-3 解析ケース

ケース名	組み合わせ	$\Sigma P_y / W$
ケース1	鋼製ベロースなし	—
ケース2	レベル1用鋼製ベロースのみ	0.05
ケース3	レベル2用鋼製ベロースのみ	0.13
ケース4	レベル1+レベル2用鋼製ベロース併用	0.19
ケース5	レベル1用鋼製ベロース×2設置	0.10
ケース6	レベル2用鋼製ベロース×2設置	0.26
ケース7	落橋防止装置設置	—

基本ケースとしてケース1は、鋼製ベロースなし、ケース2は、レベル1地震動に有効な表-4に示した高さ130mmの鋼製ベロースを10組用い、ケース3は、レベル2地震動に有効な表-5に示した高さ400mmの鋼製ベロースを4組用いている。ケース4は、レベル1用鋼製ベロースとレベル2用鋼製ベロースとを併用(レベル1用鋼製ベロースの高さ130mmを10組、レベル2鋼製ベロースの高さ400mmを4組)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では、レベル1用鋼製ベロースをケース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。ケース6は、レベル2用鋼製ベロースをケース3の2倍用いて、レベル2地震動時の上部構造応答変位をより低減した場合について検討する。設置場所は、すべてのケースで図-1に示したBelA, BelBの位置へ設置し、レベル2用鋼製ベロースは主桁ウェブ部分に、レベル1用鋼製ベロースは、主桁ウェブ部分あるいは、伸縮継手の真下の床版スペース内に取り付けることを想定している。このとき、鋼製ベロースの配置方法は上部構造の重心位置から左右対称となるように、4本の主桁ウェブ部分すべてにレベル1用およびレベル2用鋼製ベロースを設置する。なお、鋼製ベロースの設置数は、両端の橋台にそれぞれ設置する組数を示している。

① レベル1地震動の検討結果

レベル1地震動の応答解析結果を説明する。縦軸は、支承、橋脚および橋台に作用する最大作用地震力で比較すると、レベル1地震動の場合のP1橋脚に作用する荷重で比較すると、ケース1の548kNと比較して、ケース3やケース6では、200kN程度となり最大で約66%低下した。ケース2やケース5では、P1橋脚に作用する最大地震力が300kN程度となり最大で約40%低下した。レベル2用鋼製ベロースのみのケース3, 6が、レベル1用鋼製ベロースのみのケース2, 5に比べ水平地震力の低減効果が若干大きくなっているのは、レベル2用鋼製ベロースは弾性範囲内にかつ剛性が大きいので上部構造の応答変位が抑制されたためである。レベル1用、レベル2用鋼製ベロースを併用したケース4の場合は水平地震力が約61%低減できている。ケース4は、レベル2用鋼製ベロースの強度により上部構造変位を抑制し、同時にレベル1用鋼製ベロースのエネルギー吸収効果により水平地震力低減をしていると考えられる。ケース2, 5は、レベル1地震のような発生頻度の高い地震に対してエネルギー吸収効果を発揮するが、地震により塑性変形したすべての鋼製ベロースを取り替えることが必

要になる。ケース 3, 6 は、レベル 1 地震動に対する優位性はあるが、つぎに検討したレベル 2 地震のような強地震に対してはエネルギー吸収効果を発揮し桁間衝突を緩和するが、橋台への作用力が大きく橋台の補強が必要になる可能性がある。

上部構造の応答変位については、ケース 7 では最大で 4.6cm に対し、ケース 4 で 1.1cm に低減されている。レベル 2 用鋼製ペローズの剛性によって上部構造の応答変位が抑制されたことも加わり、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。

② レベル 2 地震動の検討結果

レベル 2 地震動の応答解析結果を説明する。レベル 2 地震動の場合、P1 橋脚への水平地震力はケース 1 の 1619kN と比較してケース 6 では 873kN となり、レベル 2 用鋼製ペローズの剛性により、46%低減できた。A1 橋台への作用荷重は他のケース 2~5 に比べて大きく、橋台へ作用する荷重が大きくなる。ケース 7 の場合は、落橋防止構造の作動 (0.15 m) と桁遊間 (0.15 m) とを同じ条件に設定した。同時刻において A1 橋台で、落橋防止構造が作動し、A2 橋台で上部構造との桁衝突が起きる。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作用荷重は 41%軽減できた。一方、橋台への作用荷重は 1402kN となり他のケース 2, 3, 5 と比較しても増加量はあまり大きくない。この理由は、レベル 2 用鋼製ペローズの降伏耐力は大きく、レベル 1 用鋼製ペローズの降伏耐力は小さいので、それらを併用した場合は橋台へ伝わる地震力が減少したことが考えられる。橋台のパラペットで十分な耐力が期待できない場合や設計のときに応力が許容値に収まらない場合には、設置方法を考える必要がある。

図-4 に、A1 橋台側の主桁ウェブに設置したレベル 1 用およびレベル 2 用の両鋼製ペローズそれぞれの履歴曲線を示す。図-4 より、レベル 2 用鋼製ペローズ単独で使用した場合と比較して、レベル 1 用とレベル 2 用の鋼製ペローズとを併用したケースは、2 種類の鋼製ペローズのエネルギー吸収性能が発揮できている。

図-5 に、上部構造の応答変位結果を示す。レベル 2 地震動においては、上部構造応答変位の増大が予測され、桁間衝突や落橋防止構造が作動する可能性が考えられる。そのため、ここではケース 4 とケース 7 との場合を比較することとした。上部構造の応答変位は、ケース 7 では最大で 17.1cm に対し、ケース 4 では 8.4cm に低減し、応答変位を小さくできていることが確認できる。上部構造の応答変位が 17.1 cm (桁遊間 0.15m) となり、落橋防止ケーブルが作動および桁間衝突が発生

してから 2.1 cm 動いている。応答解析で衝突時の逸散減衰効果を見逃し、衝突現象を正確に再現するには時間刻みも粗かったことが考えられ、実際より衝突力を過大に評価している可能性があると考えられる。

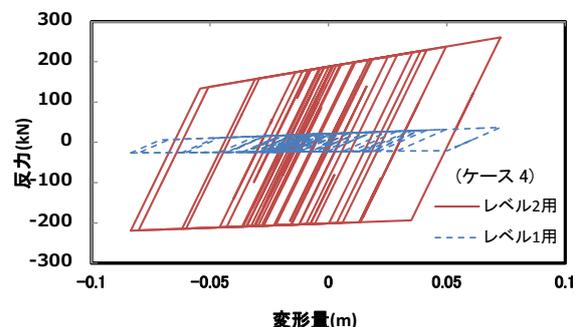


図-4 レベル 1 用およびレベル 2 用鋼製ペローズの履歴曲線 (レベル 2 地震動)

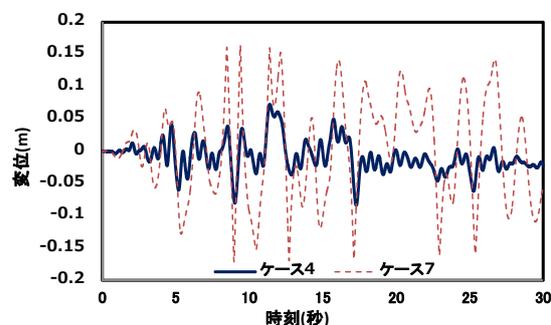


図-5 上部構造の応答変位結果 (レベル 2 地震動)

鋼製ペ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。以下にその要約を示す。

レベル 1 地震動に対して、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 用鋼製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。

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により、上部構造や橋台への負担を軽減でき、橋脚に作用する地震力をより低減できる。

鋼製ペローズを桁端部に設置することにより、基礎構造に対する直接的な耐震補強が不要にすることができ、下部構造の耐震性向上策の 1 つとして用いる可能性を示せた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

- ① 田中 賢太郎・北原 武嗣・松村 政秀・頭井 洋: エネルギー吸収型桁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, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), 査読有, Vol.68, No.4, pp.704-712, 2012.7.
- ② 平原 慎也・田中 賢太郎・頭井 洋・松村 政秀: 種々の鋼材を用いる鋼製ペローズの静的繰返し軸方向変位載荷実験, 第19回鋼構造年次論文報告集, 査読有, 日本鋼構造協会, 第19巻, pp.395-402, 2011.11.

[学会発表] (計7件)

- ① 倉持 伸伍・平島 知弥・田中 賢太郎・北原 武嗣・頭井 洋・松村 政秀・吉田 雅彦: 上部構造桁の温度伸縮の影響を受けるエネルギー吸収型桁連結装置の疲労寿命に関する検討, 土木学会第67回年次学術講演会講演概要集第I部, CD-ROM (I-418), 2012.
- ② 頭井 洋・大喜田 好美・平坂 昭人・田中 賢太郎: 橋桁用制震装置(鋼製ペローズ)の活荷重による疲労強度に関する検討, 土木学会第67回年次学術講演会講演概要集第I部, CD-ROM (I-421), 2012.
- ③ 平原 慎也・田中 賢太郎・頭井 洋・松村 政秀・山口 隆司: 種々の鋼材を用いた鋼製ペローズの動的繰返し軸方向変位載荷実験, 土木学会第67回年次学術講演会講演概要集第I部, CD-ROM (I-31), 2012.
- ④ 田中 賢太郎・北原 武嗣・松村 政秀・頭井 洋: 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, 土木学会, 第31回地震工学研究発表会講演論文集, CD-ROM (8 Pages), 2011.11.
- ⑤ 田中 賢太郎・北原 武嗣・佐藤 伸哉・松村 政秀・頭井 洋・吉田 雅彦: 下部構造への地震力を低減するエネルギー吸収装置の適用性に関する研究, 土木学会第66回年次学術講演会講演概要集第I部, CD-ROM (I-360), 2011.9.

- ⑥ 倉持 伸伍・田中 賢太郎・北原 武嗣・頭井 洋・松村 政秀・吉田 雅彦: エネルギー吸収型桁連結装置の低サイクル疲労寿命予測についての一考察, 土木学会第66回年次学術講演会講演概要集第I部, CD-ROM (I-368), 2011.9.

- ⑦ 平原 慎也・松村 政秀・頭井 洋・田中 賢太郎・山口 隆司: 軸方向および直角方向変位を載荷する鋼製ペローズの静的繰返し実験, 土木学会関西支部年次学術講演会概要集, CD-ROM (I-67), 2011.6.

[図書] (計0件)

なし

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

なし

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

○取得状況 (計0件)

なし

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

[その他]

ホームページ等

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中 賢太郎 (TANAKA KENTARO)

摂南大学・理工学部・都市環境工学科・講師

研究者番号: 50529724

(2) 研究分担者

なし

研究者番号:

(3) 連携研究者

なし

研究者番号: