

エネルギー吸収型桁連結装置としての鋼製ペローズの 橋軸直角方向のエネルギー吸収性能

田中 賢太郎¹・頭井 洋²・北田 俊行³・松村 政秀⁴

¹工修 大阪市立大学大学院 工学研究科 都市系専攻 後期博士課程（〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138）

²工博 摂南大学 工学部 都市環境システム工学科 教授（〒572-8508 寝屋川市池田中町 17-8）

³工博 大阪市立大学大学院 工学研究科 都市系専攻 教授（〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138）

⁴博士（工学） 大阪市立大学大学院 工学研究科 都市系専攻 助手（〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138）

1. はじめに

道路橋示方書・同解説（V 耐震設計編）¹⁾では、水平 2 方向の地震動による上部構造の慣性力が同時に最大値をとる可能性は低いと考えられている。したがって、現在の耐震設計では、地震動を橋軸方向と橋軸直角方向のそれぞれを独立に耐震設計が行われている。

しかし、兵庫県南部地震においては、橋軸方向、橋軸直角方向の慣性力が同時に作用したために大きな被害が生じた例が見られる。鋼 I 桁橋の主桁支点部や桁端部が橋軸直角方向に変形した事例があり、連結板の接合部のピンやボルトが破断した事例も見られた²⁾。

従来のケーブル型落橋防止構造は、橋軸直角方向に対しては、ほぼ無抵抗であり、連結板を設置している場合でも、橋軸直角方向に力が作用すると連結板の性能を失ってしまう可能性があり、さらに、桁の破損につながる可能性がある。これらのことを受け、最近の研究では、橋軸方向に加え橋軸直角方向を考慮した 2 方向地震動下における高架橋^{3) 4)}や橋脚の応答挙動に関する研究⁵⁾が行われている。

本文では、著者らが、これまで検討してきたエネルギー吸収型桁連結装置としての鋼製ペローズの橋軸方向に関する適用^{6) ~9)}に加え橋軸直角方向にもエネルギー吸収を期待する場合について検討する。まず、両端が剛性の高い橋台に挟まれ、免震支承に支持された連続桁を対象を限定して、水平 2 方向地震入力時に、橋軸方向および橋軸直角方向に生じる桁と橋台間の相対変位の大きさを、非線形時刻歴応答解析を行い明らかにする。そして、ペローズ単体

の模型載荷実験により橋軸直角方向の荷重変位履歴特性を確認し、数値解析との比較も行う。

2. 非線形時刻歴応答解析による橋軸直角方向の応答挙動

2.1 対象とした解析モデル

図 1 に解析対象モデルを示す。上部構造は主桁間隔 2.7m の 4 本主桁、3 径間連続 I 桁橋で各径間長はすべて 39m とした。表 1 に、上部構造の主要条件を示す。両端は剛性の高い橋台で挟まれているとし、2 本の橋脚高さはともに 11m とした。上部構造・支承および橋脚の橋軸方向・橋軸直角方向の応答挙動に着目して非線形時刻歴応答解析を行う。上部構造を分布質量系のはりモデルで表す。構造物と地盤との連成が応答挙動に及ぼす影響は無視し、橋脚下端は固定端としている。地震入力は、位相差を無視した同一地震入力とし、橋軸方向・橋軸直角方向の 2 方向同時に地震入力する。

図 1 において、Ub1 は、3 径間連続 I 桁橋の上部構造を、P1, P2 は、鉄筋コンクリート橋脚を、A1, A2 は橋台、S1 ~ S4 は、免震支承を、それぞれ示している。表 2 および表 3 には、解析に用いた橋脚および免震支承の条件を示す。橋脚は、震度法により設計された

表1 上部構造の諸元

項目	単位	値
主桁本数	本	4
幅員	m	9.0
鋼桁総重量 (1 径間当り)	kN	870
上部構造重量 (1 径間当り)	kN	4,250

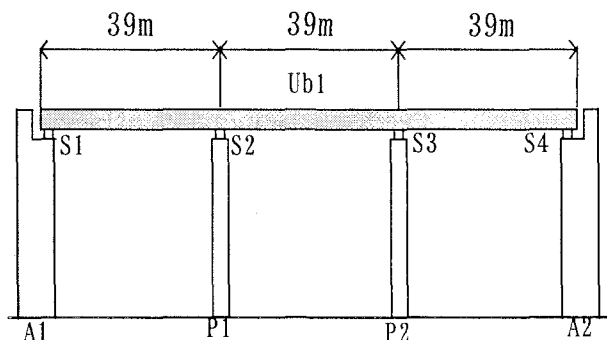


図1 解析モデル (3 径間連続 I 桁橋)

表2 橋脚の諸元

	鉄筋コンクリート橋脚
高さ	11m
降伏耐力	1,230kN
降伏変位	0.06m
終局荷重	1,610kN
終局変位	0.205m

表3 鉛プラグ入りゴム支承の諸元

	中間橋脚上 ($Q_d/W_R=0.1$)	橋台上 ($Q_d/W_R=0.1$)
高さ	0.15m	0.15m
降伏荷重 (降伏耐力)	425kN (500kN)	212.5kN (250kN)
降伏変位	0.028m	0.028m
一次剛性	18,000kN/m	9,000kN/m
二次剛性	2,770kN/m	1,390kN/m

単柱式鉄筋コンクリート橋脚とし、高さを11mとした。橋脚はバイリニア型履歴特性の非線形ばねと集中質量でモデル化する。免震支承は固定支承とした場合の固有周期の2倍程度なるように諸元を決定した。履歴特性は、橋脚と同様に、バイリニア型履歴特性で表す。橋軸直角方向の橋脚条件および支承条件は簡単のため、橋軸方向と同条件とした。桁の橋軸方向と橋軸直角方向の変形を考慮できる非線形時刻歴応答解析プログラムを、技術計算ソフトウェアのMATLABを用いて作成し、応答解析はすべてこの解

析プログラムを用いてを行った。

2.2 数値解析

鋼 I 桁橋の桁端部はレベル2地震時では橋軸直角方向に固定されず自由に変形すると仮定し、どの程度の橋軸直角方向変位が生じるかを検討する。両端の橋台は十分に剛性は大きいとし、水平2方向地震入力時に、橋軸方向および橋軸直角方向に生じる桁と橋台間の相対変位の大きさを非線形応答計算により求める。入力地震波は、兵庫県南部地震のJR鷹取駅で観測された地震波を用いる。N-S波を橋軸方向

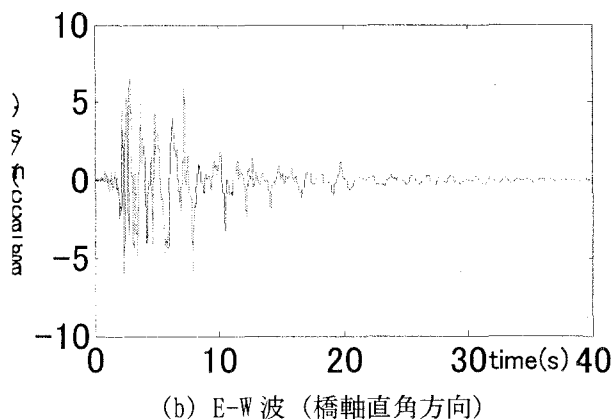
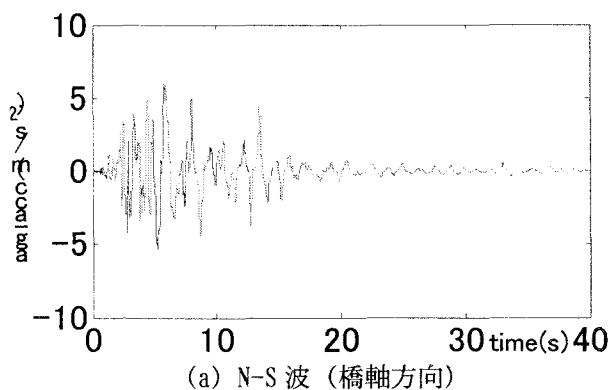


図2 計算に用いた JR 鷹取観測波

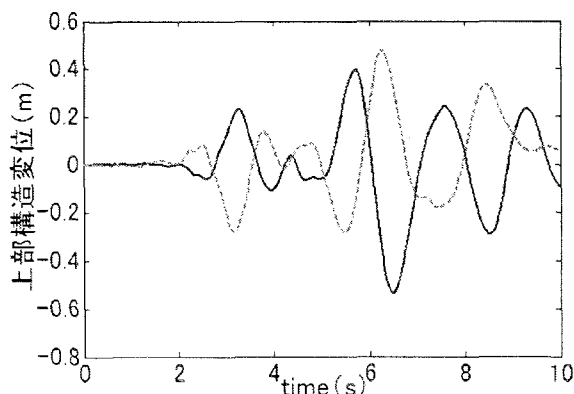


図3 桁端部上部構造変位
(実線：軸方向、点線：橋直方向)

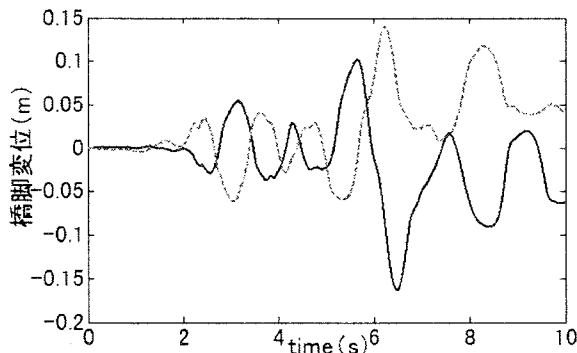


図4 中間橋脚変位
(実線：軸方向，点線：橋直方向)

に入力し，E-W波を橋軸直角方向に入力する．図2に地震波形を示す．図3と図4に応答解析結果を示す．加速度の大きい最初の10秒のみ計算した．図3には，桁端部の上部構造の応答変位を示す．実線が軸方向変位，点線が直角方向変位を表す．図3に示すように，橋軸直角方向に変位制限装置やエネルギー吸収装置がなければ，0.5m近くの変位が生じることがわかる．図4には，中間橋脚（P1）の応答変位を示す．図4に示すように，橋軸方向とほぼ等しい変位が橋軸直角方向にも生じている．これらの結果より，桁端部に橋軸直角方向の変位拘束がなければ，橋軸直角方向に大きな上部構造変位を生じることがわかる．

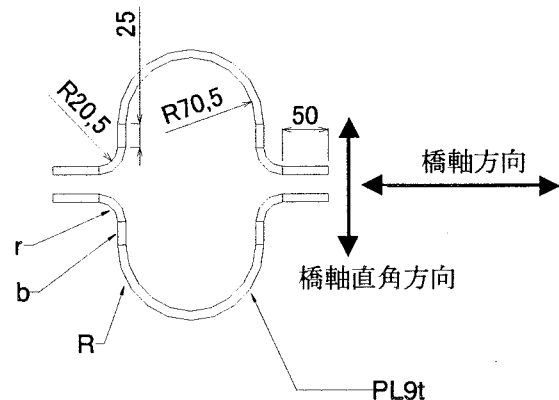
3. エネルギー吸収型桁連結装置としての鋼製ペローズの静的載荷実験

前章で示したように，変位制限装置がレベル2地震時に機能しないとすると橋軸直角方向に上部構造は大きく変位することがわかった．桁端部に鋼製ペローズを設置することにより橋軸方向変位は大きく低減できる．ここでは，これまで検討してきた橋軸方向に加えて，橋軸直角方向にも鋼製ペローズのエネルギー吸収が期待できるかペローズ単体実験と解析により検討する．弾塑性有限変位解析のプログラムとして，大阪市立大学とJIPテクノサイエンスにより開発された補剛板構造の耐荷力解析のためのプログラムUSSP（Ultimate Strength of Steel Plated Structure）¹⁰⁾を用いる．

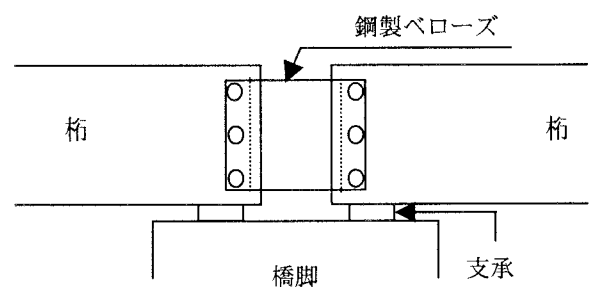
3.1 鋼製ペローズおよび実験の概要

図5には，エネルギー吸収型桁連結装置としての鋼製ペローズの断面図と設置状況を示す．鋼製ペローズは，厚さ2cm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20cm～60cm程度のも

のを2枚1組にし，桁端部で，桁と桁とを摩擦接合により連結する構造である．実験では，実際考えているサイズの2分の1モデルを用いた．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．奥行きを130mmとした．表4には，鋼製ペローズの寸法を示す．鋼材はSS400を用い，降伏点および応力ひずみ曲線は，本実験前に実施した引張材料試験により求めた．本供試体を制作する前の曲げ加工されていない鋼板より，引張試験用試験片を計3体を作製し引張試験を実施して，降伏点および応力ひずみ曲線を平均することにより求めた．曲げ加工により製作した実際の試験体の円筒部分では，加工硬化により降伏点は大きくなる．



(a) ペローズ断面図（単位：mm）



(b) 桁設置時の概略図

図5 鋼製ペローズの断面図と設置状況

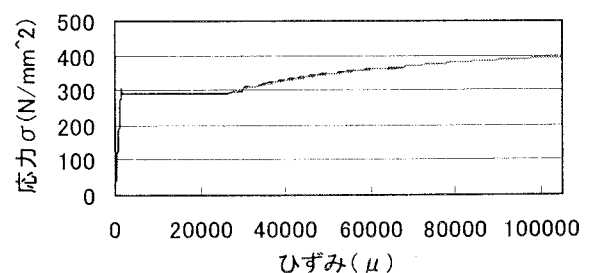


図6 供試体材料の応力ひずみ曲線

図6に、材料の引張試験結果を示す。降伏点として、3体の平均値で 295N/mm^2 が得られた。次章の解析では図6の応力ひずみ関係を用いる。

3.2 鋼製ベローズの静的載荷実験

写真1に載荷前の10tonアクチュエーターへの取り付け状況を示す。実験開始時にはアクチュエーターに無理な力が加わらないようにガイドを設置している。橋軸方向の圧縮側載荷時や、橋軸直角方向載荷時にガイドとガイドレール間に摩擦が生じないように二硫化モリブデン（グリス）を塗りつけている。繰り返し載荷は、橋軸方向および橋軸直角方向とも $\pm 5, \pm 10, \pm 20, \pm 40, \pm 80, \pm 120, +140$ （mm）で行った。橋軸方向載荷実験における引張125mmの変形形状を写真2に、圧縮100mmの変形形状を写真3

表 4 鋼製ベローズの寸法（mm）

	円筒部 半径 R	接合部小 円半径 r	直線 高さ b	板厚 t
供試体 寸法	75	25	25	9

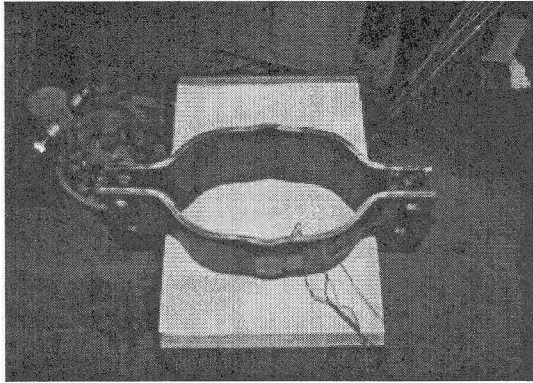
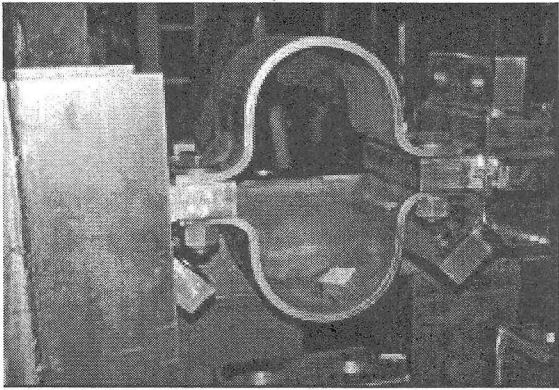


写真2 橋軸（引張125mm）変形形状



(a) 橋軸方向

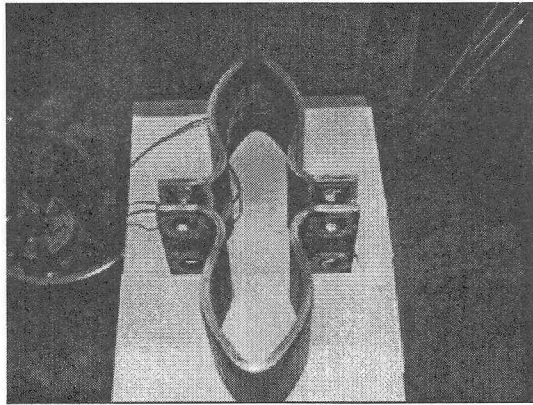
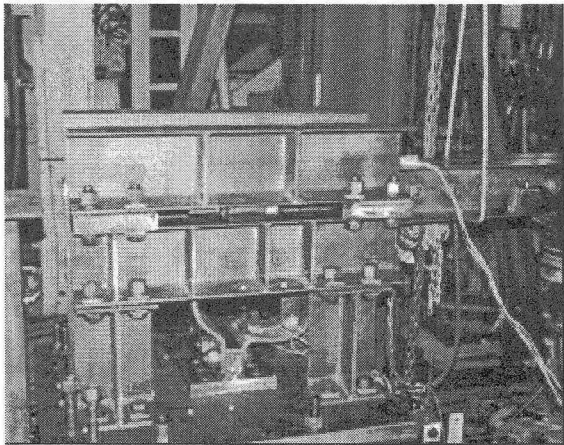


写真3 橋軸（圧縮100mm）変形形状



(b) 橋軸直角方向

写真1 試験装置への取り付け図（橋軸方向載荷）

に示す。写真4には橋軸直角方向載荷時90mmの変形形状を示す。

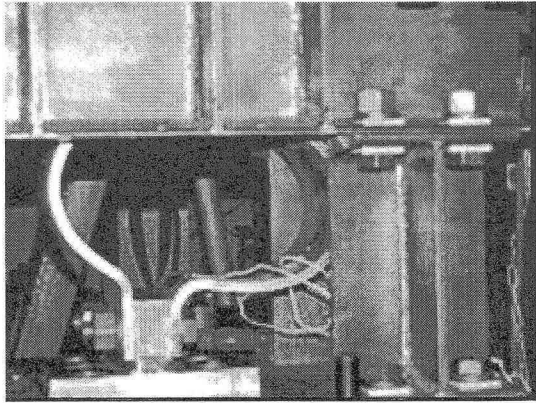


写真4 橋軸直角（90mm）変形形状

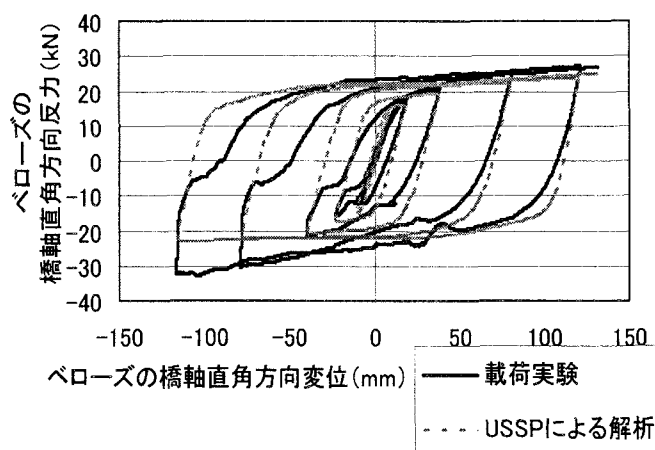


図7 荷重変位履歴曲線の解析値と実験値との比較
(橋軸直角方向)

図7に、橋軸直角方向の繰り返し荷重時における荷重変位履歴曲線を示す。実線が実験結果を示し、点線がUSSPによる解析結果を示している。引張側に関しては、ガイドとガイドレールとの面圧発生によるベローズ反力増加は見られなかった。

図7示すように実験値と解析値とは、ほぼ一致している。しかし、圧縮側は、実験値のほうが、かなり大きい反力が発生している。この原因として、グリスを塗っているが圧縮荷重では、ガイドとガイドレールとの間の面圧が大きくなり、ベローズの反力を上昇させたと考えられる。実験終了後、ガイドレールを点検すると、アクチュエーターの荷重方向に少し傷がついており、大きな面圧発生が発生していたことを確認した。

鋼製ベローズは、左右がほぼ対称構造なので、圧縮側に荷重した場合、ガイドとガイドレールとの間に面圧が発生していなければ、引張側と同等のベローズ反力になっていたと考えられる。解析値は引張側と圧縮側とで対称の荷重変位曲線が得られている。橋軸直角方向の反力は20kN～25kN程度である。別途、行った橋軸方向の反力は60kN程度であったので、橋軸直角方向の反力は、橋軸方向反力の3分の1～2分の1程度の反力になることがわかった。したがって、鋼製ベローズは橋軸直角方向に対しても、橋軸方向の3分の1～2分の1程度のエネルギー吸収性能を有していると考えられる。

4. 結論

本研究では、連続桁橋の橋軸直角方向に関する応答について検討した。3径間連続橋モデルを用いて、

水平2方向地震入力時に、橋軸方向および橋軸直角方向に生じる桁と橋台間の相対変位の大きさを非線形時刻歴応答解析により求め、橋軸直角方向にも橋軸方向と同程度の上部構造変位や橋脚変位が生じることを明らかにした。

ベローズ単体の模型荷重実験により橋軸直角方向の荷重変位履歴特性を確認し、数値解析との比較を行った。ベローズ単体の荷重実験とUSSPによる弾塑性有限変位解析より得られた荷重変位履歴曲線はほぼ一致した。鋼製ベローズは橋軸直角方向に対しても、橋軸方向と同様にエネルギー吸収装置として機能することが確認できた。この結果を用いて、応答解析により、エネルギー吸収による上部構造変位や橋脚変位の低減効果を明らかにしていく予定である。

謝辞：鋼製ベローズ単体の静的実験の実施にあたり、大阪市立大学 橋梁工学研究室の修士課程・4回生の皆さんにご協力を頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 社団法人 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V耐震設計編，(2002.3)
- 2) 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，土木構造物の被害・橋梁，土木学会他，(1996.12)
- 3) 工藤 忠・中島章典・斉木 功・大植 健：隣接径間の影響を考慮した高架橋の2方向地震動下における弾塑性地震応答性状，土木学会論文集，No.752/I-66，pp.267-276 (2004.1)
- 4) 阿部雅人・藤野陽三・吉田純司・朱 平・柳野和也：地震時における橋桁の衝突現象のモデル化と実験的検証，土木学会論文集，No.759/I-67，pp.181-197 (2004.4)
- 5) 早川涼二・川島一彦・渡邊学歩：水平2方向地震力を受ける単柱式RC橋脚の耐震性，土木学会論文集，No.759/I-67，pp.79-98 (2004.4)
- 6) 田中賢太郎・頭井 洋・北田俊行：エネルギー吸収型桁連結装置の都市高架橋への適用，鋼構造論文集，第10巻，第40号，pp.53-63 (2003.12)

- 7) 頭井 洋・中野将志・大谷 修・岡本安弘：単純鋼桁・橋脚系の鋼製ベローズを用いたエネルギー吸収型落橋防止構造の等価線形化法による設計法，鋼構造論文集，第 7 巻，第 31 号，pp.33-44 (2000.12)
- 8) 頭井 洋・濱野涼子・大谷 修・岡本安弘：エネルギー吸収型桁連結装置の鋼連続桁橋への適用，鋼構造論文集，第 8 巻，第 31 号，pp.107-117 (2001.9)
- 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，pp.77-86 (2002.6)
- 10) 小松定夫・北田俊行：補剛された圧縮板の弾塑性有限変位挙動の一解析手法，土木学会論文報告集，第 296 号，pp.1~12 (1980.4)