

2604 ダンパーブレースとシートパイル基礎を用いた 鉄道高架橋の耐震性能向上策に関する検討

正 [土] ○徳永 宗正 (鉄道総研) 正 [土] 田中 浩一 (大林組)
正 [土] 渡辺 勉 (鉄道総研) 正 [土] 谷村 幸裕 (鉄道総研)
正 [土] 神田 政幸 (鉄道総研) 正 [土] 曾我部正道 (鉄道総研)

Seismic retrofitting methods of Railway Viaduct with Damper-brace and Sheet-pile Foundation

Munemasa TOKUNAGA, Railway Technical Research Institute, 2-8-38, Hikari-cho, Kokubunji-shi, Tokyo

Kouichi TANAKA, Obayashi Co.

Tsutomu WATANABE, Yukihiro TANIMURA, Masayuki KOUDA, Masamichi SOGABE, Railway Technical Research Institute

Previous study said that reducing displacement response of railway viaduct is quiet effective to secure train-running safety during seismicity. In this paper, we evaluated seismic upgrading effects of damper-brace and sheet-pile foundation on railway viaduct by conducting pushover analyses and dynamic analyses for 3 types analysis model; model A non-retrofitted, model B retrofitted by Y-brace and model C retrofitted by upside-down Y-brace. The results indicate that the model C retrofitted by upside-down Y-brace gives the best effects of seismic upgrading for railway viaduct and train-running safety during seismicity, considering the displacement response and displace resultant of railway viaduct.

Keywords: Damper-brace, Sheet-pile Foundation, Seismic retrofitting methods, Railway Viaduct

1. はじめに

既設鉄道 RC ラーメン高架橋の耐震性及び地震時列車走行性向上策の一つとして、RC 架構内に鋼製ダンパーブレースを設置する補強手法が提案されている。ダンパーブレース工法は、高剛性のブレースにより地震時の列車走行性に係る変位¹⁾を抑制し、高減衰性を有するダンパーにより大規模地震時の高架橋の耐震性能を確保する手法である^{2),3)}。

しかしながら、ダンパーブレース補強により高架橋全体系の降伏点が増加すると、地震時において基礎が負担する水平力が増加し、場合によっては全体系が基礎降伏先行に移行することも考えられる。また地盤が軟弱な場合には、高架橋天端水平変位に占める基礎の水平変位や回転に起因する変位の割合が増加するため、高剛性のブレースを用いても全体系としての剛性向上が図れない場合がある。

地震時に列車を安全に走行させるためには、構造物境界に生じる不同変位を抑制することが重要となる。連続する鉄道構造物群の配置を俯瞰すると、沼沢地や河川など、局所的に地盤が軟らかくなる箇所が散見され、このような箇所では、何らかの効率的な補強手法により構造物間の剛性の均一化を図ることが重要となる。

以上のような背景から、本研究では、高い支持力特性を保有するシートパイル基礎^{4),5)}をダンパーブレースと併用し、局所的な弱点箇所を補強する方法について検討を行った。本研究の目的は以下の通りである。

- (1) ダンパーブレースとシートパイル基礎を用いた補強工法について、その基礎的な性状や全体系としての降伏メカニズムを静的非線形解析により確認する。
- (2) ダンパーブレースとシートパイル基礎を用いた補強工法について、その効果を動的非線形解析により確認する。

2. 解析手法

2.1 解析対象構造物

図-1 に本検討で対象とした RC ラーメン高架橋を示す。対象高架橋は実橋を参考に設計したものであり、径間数は 4 径間、スパン長は 10m、高架橋高さは 8.4m とした。杭長は 21m であり基礎の水平剛性が比較的低い構造形式となっている。

図-2 に高架橋に適用したシートパイル基礎の配置図を示す。シートパイル基礎には、既設高架橋の基礎と剛結する方式と、独立した基礎を新たに構築する方式がある。本研究では、独立して基礎を構築する方式について検討した。

2.2 解析モデル

図-3 に高架橋の解析モデルの概念図を示す。本検討では線路直角方向に関して 2 次元解析を実施した。解析は、無補強モデル (A モデル)、Y 型モデル (B モデル) 及び逆 Y 型モデル (C モデル) について行った。

表-1、表-2 に解析で用いた鋼材の材料特性、コンクリートの材料特性をそれぞれ示す。

表-3 に地盤構成及び各層の地盤特性を示す。表層地盤の固有周期は 0.495(s) であり、G3 地盤 (普通地盤) と G4 地盤 (普通～軟弱地盤) を区分する閾値 0.5(s) に相当する。文献 6) に基づき、シートパイル及び杭の周辺地盤ばねはそれぞれ、非線形の先端鉛直ばね、鉛直せん断ばね、及び水平ばねを用いてモデル化した。シートパイル基礎フーチングは、非線形の鉛直方向地盤ばねのみで支持した。フーチング前面ばね、フーチング側面ばねは、フーチング/地中梁間の地盤の挙動が不明であるため、無視することとした。

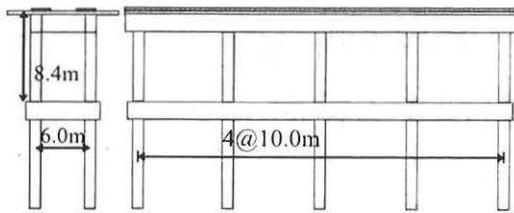


Fig.1 Railway concrete viaduct

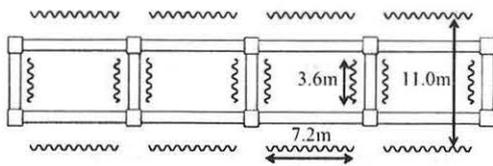


Fig.2 Location of sheet pile

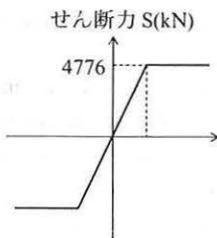


Fig.4 shear force – slip model at damper

Tab.1 Material property of steel

部位	仕様	規格	弾性係数 E(kN/mm ²)	降伏強度 σ _v (N/mm ²)
ブレース材	H-400-400-13-21	SS400	200	—
リンク材	ウェブ厚さ: t _w =32mm	SS400	200	235
シートパイル	FSP-V _t	SY295	200	295
上層梁	異形鉄筋	SD345	200	345
柱 地中梁 杭	異形鉄筋	SD390	200	390

Tab.4 Structural parameter of brace

ブレース形状	鋼材	断面積 _z	低減係数 a	入力値 Aa(mm ²)
Y型	H-400-400-13-21	21870	0.605	13231
逆Y型	H-400-400-13-21	21870	0.738	16147

Tab.5 Structural parameter of damper

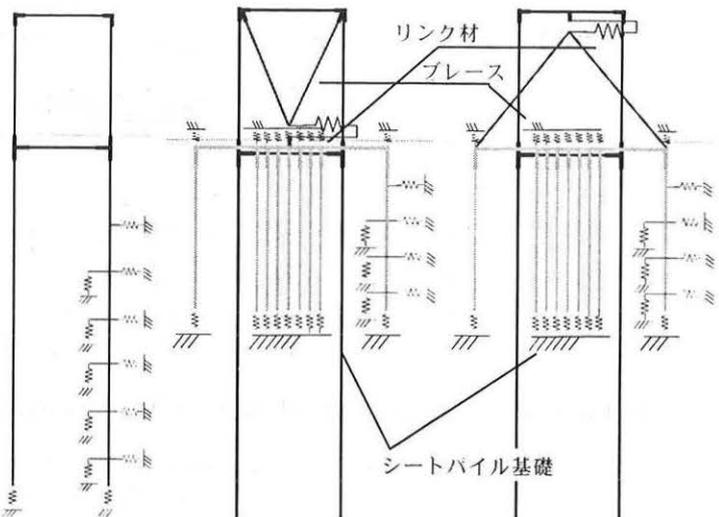
材質	弾性係数 E _s (kN/mm ²)	降伏強度 σ _v (N/mm ²)	せん断強 度	リンク材のウェブ形状 B(mm) H(mm) t _w (mm)
SS400	200	235	136	1100 1200 32

上層梁、地中梁、柱、杭部材は、ファイバー要素でモデル化した。ダンパーブレース補強により全体系のロッキングが発生し、柱や杭に軸力変動が生じることが予想されたため、柱や杭は軸力変動の影響を考慮できるモデルとした。

表-4、表-5に解析で用いたブレース、リンク材（鋼製ダンパー）の断面諸元をそれぞれ示す。ブレースは弾性トラス要素とした。リンク材は、要素長さが100mmの非線形トラス要素でモデル化した。

図-4にリンク材のせん断力-すべり関係を示す。

表-6にシートパイルの断面諸元を示す。シートパイルは非線形梁要素を用いてモデル化した。また、シートパイル基礎のフーチングは、シートパイルに曲げ損傷を集中させるため、橋軸方向に7.2m、直角方向に1.5mのコ



(a) Model A non-retrofitted

(b) Model B retrofitted by Y-brace

(c) Model C retrofitted by upside-down Y-brace

Fig.3 Analysis models

Tab.2 Material property of concrete

部位	設計基準強度 f _{ck} (N/mm ²)	設計圧縮強度 f _{cd} (N/mm ²)	弾性係数 E _c (kN/mm ²)	設計引張強度 f _{td} (N/mm ²)
上層梁 柱 地中梁	24.0	18.5	27.5	1.47
杭	30.0	23.1	24.5	1.67

Tab.3 Material property of ground

層番号	土質分類	下端深度(m)	層厚(m)	N値	単位重量γ(kN/m ³)	内部摩擦角φ(度)	粘着力c(kN/m ²)	変形係数E _v (kN/m ²)	補正係数α
1	粘性土	2.00	2.00	1	15	0	6	35750	0.25
2	粘性土	4.54	2.54	2	15	0	12	35750	0.25
3	砂質土	10.31	5.77	12	18	30	0	217610	0.25
4	粘性土	18.11	7.80	6	15	0	60	117080	0.25
5	粘性土	21.41	3.30	8	15	0	80	182500	0.25
6	砂質土	23.00	1.59	48	19	37	0	914480	0.25

Tab.6 Cross section parameter of sheet pile

部位	断面積 A(cm ²)	断面2次 モーメント I(cm ⁴)	断面係数 Z(cm ³)	降伏強度 f _v (N/mm ²)	深さ D(m)	幅(橋軸) L(m)	幅(直角) L(m)
シートパイル	267.6	63000	3150	295	7.6	7.2	3.6

ンクリートと等価である全断面有効の弾性体のファイバー要素とした。

減衰定数については、構造物全体の減衰定数hが1.0%となるように、レイリー減衰で与えた。レイリー減衰パラメータのうち、質量マトリクスに関わる係数は履歴減衰が耐震挙動に対して支配的であることを考慮して、0とした。また、剛性マトリクスに関わる係数は文献7)を参考に、固有値解析より得られた1次振動数(f₁)とh=0.010をもとに、Aモデルは0.00183、Bモデルは0.00151、Cモデルは0.00148とした。

2.3 解析条件

解析は、静的解析(ブッシュオーバー解析)及び時刻歴動的解析を行った。載荷する死荷重は、固定死荷重と付加死荷重のみとした。

静的解析では、構造物天端での変位が300mmとなるまで計算を行い、構造系の損傷メカニズムを明らかにした。

時刻歴動的解析では、鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計)⁶⁾に示された2種類の地震動を用いた。

図-5に時刻歴動的解析に用いた海溝型のL2スペクト

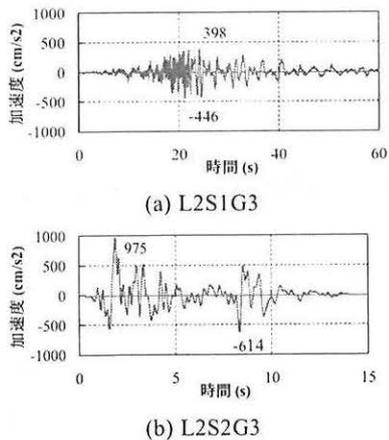


Fig.5 Design earthquake motions

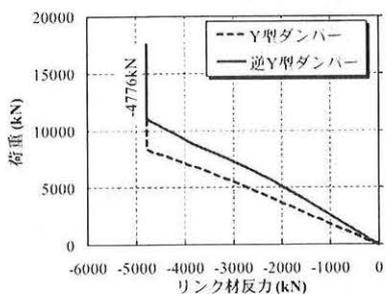


Fig.8 Yield force of damper

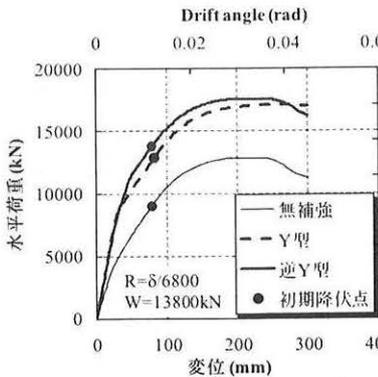


Fig.6 P- δ relationship at Deck

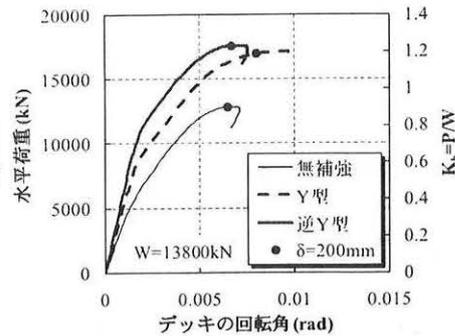
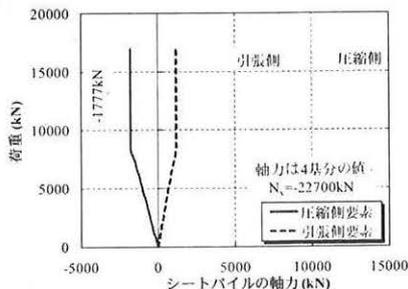
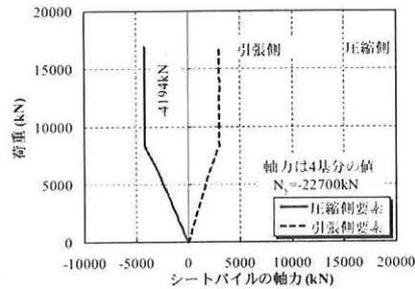


Fig.7 P- θ relationship at Deck



(a) Model B



(b) Model C

Fig.9 Axial force at the top of sheet pile

ル I G3 地盤用 (以下, L2S1G3 という), 内陸直下型の L2 スペクトル II G3 地盤用 (以下, L2S2G3 という) の地震動をそれぞれ示す。

解析ケースは, 図-1 に示した 3 種類のモデルに対して, 静的解析並びに 2 種類の時刻歴動的解析の, 計 9 ケースを実施した。

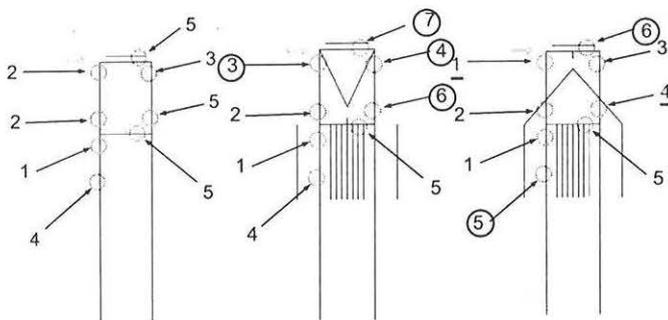
3. 解析結果

3.1 静的解析

図-6 にブッシュオーバー解析で得られた構造物天端の荷重-変位関係を示す。図より, A モデルと比較して, B モデル, C モデルは耐荷力が上昇しており, 同じ震度に対する応答変位も 50% 以上抑制できていることが分かる。事前の検討から, シートパイル基礎を併用しない場合の荷重-変位曲線は, 補強効果が十分に得られず A モデルとほぼ同等となることが得られているが, これと比較して, ダンパーブレースとシートパイル基礎の併用効果は大きいと言える。

図-7 にブッシュオーバー解析で得られた構造物天端の荷重-回転角関係を示す。図より, C モデルは, B モデルより軌道面の平坦性を表す構造物天端の回転角の低減効果が高いことが分かる。また, A モデルと C モデルはデッキの回転角が上限値を示すのに対し, B モデルは上限値を示さず漸増傾向にある。

図-8 に作用荷重-リンク材反力関係を示す。Y 型構造の B モデルと逆 Y 型構造の C モデルを比較した場合, 同じリンク材であっても, Y 型の B モデルの方が作用荷重の低い段階でリンク材が降伏した。B モデルのリンク材が早く降伏した原因としては, リンク材の取り付け高さの違いが考えられる。即ち, C モデルのリンク材の反力は構造系内の高い位置に作用するため, ブレースとシー



(a) model A (b) model B (c) model C
Fig.10 Yield procedure of steel bar

トパイル基礎による回転剛性によって, リンク材降伏時の全体系の水平耐力が上昇したものと考えられる。

図-9 にシートパイル上端に作用する軸力を示す。図より, C モデルは B モデルと比較して大きな変動軸力が生じていることが分かる。C モデルのリンク材は構造系内の高い位置に配置されていることから, ブレースを介してロッキングモーメントが入力されていることを示している。

図-10 に主鉄筋の降伏の順序をそれぞれ示す。図中に示す数値は主鉄筋が引張降伏した順番, 丸付き数字は無補強よりも順位が遅くなった場合, 下線付き数字は無補強よりも順位が早まった場合を示す。図より, 各モデルにおいて初期に降伏に達する部材は杭頂部であるが, 補強を行うことでその後の崩壊に至る過程が変化していることが分かる。B モデルでは上部構造の塑性化進行が遅くなり, 逆に C モデルは下部構造の塑性化進行が遅くなるという特徴があると言える。

以上より、ダンパーブレースとシートパイル基礎を併用した耐震補強により、高架橋全体系としての耐震性能を向上できることが確認できた。また、列車走行性の観点から高架橋天端の応答変位、応答回転角を抑制するという目的に対しては、Cモデルが最も有効であることが分かった。

3.2 時刻歴動的解析

図-11、図-12に時刻歴動的解析によって得られた高架橋天端の変位波形を示す。両図より、Bモデル、Cモデルともに、Aモデルに比べて大きな変位抑制効果が得られていることが分かる。

図-13、図-14に時刻歴動的解析によって得られた高架橋天端の回転角波形を示す。両図より、Bモデル、Cモデルともに、Aモデルに比べて大きな回転角抑制効果が得られていることが分かる。

以上より、時刻歴動的解析においてもダンパーブレースとシートパイル基礎を併用した補強により、高架橋天端における応答変位、応答回転角を低減できることが確認できた。

4. まとめ

本論文では、杭長が20mとなるような基礎剛性の比較的低いラーメン高架橋について、ダンパーブレースとシートパイル基礎を併用した鉄道高架橋の補強方法を新たに提案した。本構造形式について得られた知見は以下の通りである。

- (1)静的解析の結果、基礎剛性の低い構造形式であっても、ダンパーブレースとシートパイル基礎を併用した耐震補強を施すことにより、耐荷力の向上と変位抑制が可能であることを示した。特に変位抑制効果に関しては同震度に対する応答変位を50%以上低減できることが分かった。
- (2)Y型ダンパーと逆Y型ダンパーを比較した場合、逆Y型ダンパーの方が変位抑制効果、回転抑制効果に優れていることが分かった。
- (3)時刻歴動的解析の結果、静的解析と同様に、基礎剛性の低い構造形式であっても、ダンパーブレースとシートパイル基礎を併用した耐震補強を施すことにより、耐荷力の向上と変位抑制が可能であることを示した。

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（変位制限）、丸善、2006。
- 2) 吉田幸司、関雅樹、曾我部正道：ブレース補強による鉄道高架橋の列車走行性に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.29、No.3、pp.907-912、2007。
- 3) 曾我部正道、谷村幸裕、室野剛隆、松橋宏治：既設新幹線高架橋の地震時変位抑制工法の性能評価、鉄道総研報告、Vol.23、No.2、pp.33-38、2009。
- 4) 樋口俊一、田中浩一、伊藤政人、平尾淳一、西岡英俊、神田政幸：シートパイル基礎の地震時挙動と耐震性に関する検討、土木学会地震工学論文集、Vol. 27 巻、pp.1-4、2003。
- 5) 西岡英俊、神田政幸、平尾淳一、東野光男、前田友章、藤田欽司、近藤政弘：水平2方向荷重を受ける正方形断面鋼製橋脚の耐震性能に関する実験的研究、土木学会論

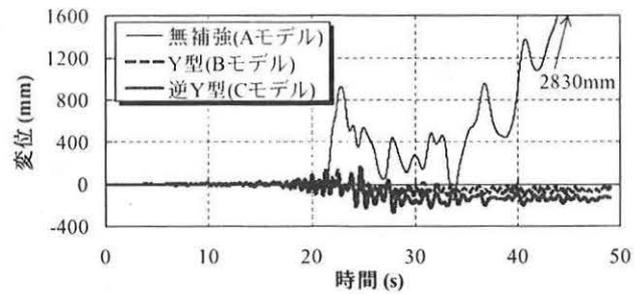


Fig.11 δ response at Deck (L2S1G3)

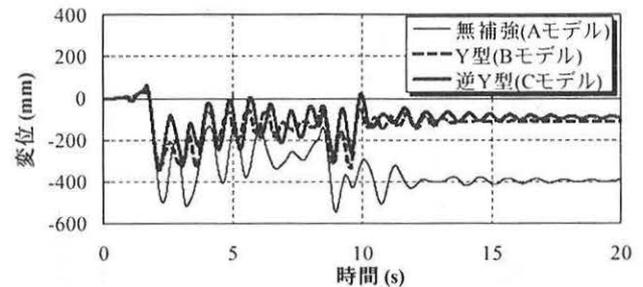


Fig.12 δ response at Deck (L2S2G3)

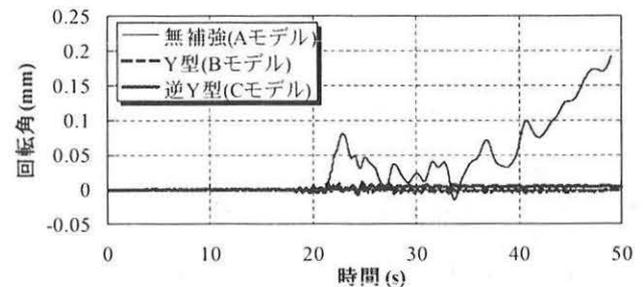


Fig.13 θ response at Deck (L2S1G3)

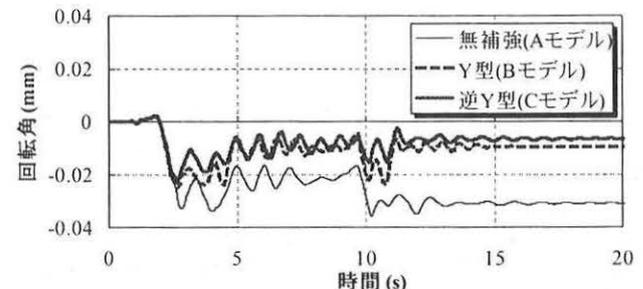


Fig.14 θ response at Deck (L2S2G3)

文集 A, Vol.63, No.4, pp.716-726, 2007.

- 6) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計）、丸善、1999。
- 7) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編、2002。