

鉄道高架橋の変位制限対策による地震時走行性向上に関する研究

Improvement of running safety at earthquake on railway viaducts retrofitted with braces

吉田幸司*, 前田昌克**, 阿知波秀彦**, 松浦章夫***, 岩田秀治*, 関 雅樹*
Koji Yoshida, Masakatsu Maeda, Hidehiko Achiha, Akio Matsuura, Shuji Iwata, Masaki Seki

*博(工) 東海旅客鉄道 技術開発部 (〒485-0801 愛知県小牧市大山 1545-33)

**工修 東海旅客鉄道 技術開発部 (同 上)

***工博 芝浦工業大学名誉教授

In the seismic retrofitting of the existing railway viaduct, not only the improvement of the strength and the ductility but also the improvement in safety of trains running on viaducts was necessary. In this research, to confirm the effect of limiting the response displacement of a viaduct by the brace reinforcement, the shaking table test using a one-fifth scaled specimen of the viaduct was executed. And a series of dynamic interaction analysis between the trains and the structures was conducted to investigate the effect of the brace reinforcement on running safety of the trains in the event of an earthquake. As a result, it was shown that the bridges reinforced with braces better running safety than those without, due to the seismic wave was controlled by the brace reinforcement.

Key Words: railway viaduct, displacement control, shaking table test, seismic retrofitting

キーワード: 鉄道高架橋, 変位制限, 振動台実験, 耐震補強

1. はじめに

兵庫県南部地震以降, 既存鉄道高架橋のせん断耐力や変形性能の向上を目的とした耐震補強を実施してきた。一方, 2004年10月23日に発生した新潟県中越地震での事象に鑑み, リスクミニマイズに向けて, 列車走行性の向上も視野に入れた構造物の強化も必要であると考えられる。列車走行性の向上に関する地震対策の大前提は, 構造物を崩壊させない耐震補強の推進である。これに加え, 地震時の構造物の変位を制限することが列車走行性の向上には有効である。2006年制定の変位制限標準¹⁾には, 少なくともL1レベルの地震動に対して列車走行安全性を確保するための変位制限等が規定されている。また, 「地震時の走行性には構造物の横方向の振動変位および構造物境界における不同変位が影響する」とあり, これらを抑制することが肝要である。

これまで著者らは, 構造物の横方向の振動変位を制限する対策として, 既存高架橋の耐震補強工法の一つとして実用化した図-1に示すX型鋼製ダンパー・ブレース補強 (以下, 「ブレース補強」)^{2),3),4)}に着目し, 地震時の高架橋の橋軸直角方向の振動変位の抑制効果について検

討してきた⁵⁾。また, 構造物境界の不同変位 (水平目違い) の抑制対策 (以下, 「目違い防止工」) として, 旧国鉄にて東海地震対策の一環として検討された図-2に示すPC鋼棒による連結拘束⁶⁾に着目し, 検討してきた⁷⁾。

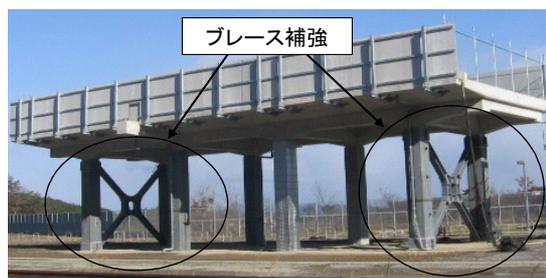


図-1 ブレース補強した高架橋

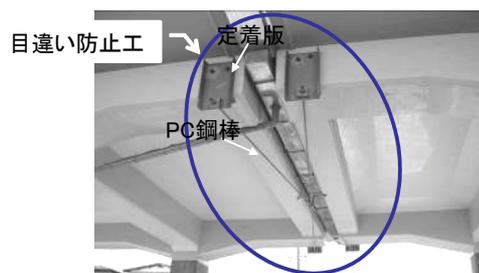


図-2 目違い防止工の概要

本研究では、高架橋の変位制限対策について、鉄道高架橋の縮小試験体を用いた振動台実験により、その変位制限効果等について検討する。

また、近年では数値解析シミュレーションによる地震時の車両走行性に関する研究についても種々取り組まれている^{例え(8),(9),(10)}。そこで、振動台実験による検討に加え、連続する高架橋区間での列車と構造物の動的相互作用解析¹¹⁾を実施し、変位制限対策の地震時列車走行性への効果について検討する。

2. 変位制限対策の概要

2.1 振動変位対策（ブレース補強）の概要

ブレース補強は、鉄道RCラーメン高架橋の橋軸直角方向の振動変位を抑制するために、両端の直角方向ラーメンに図-1に示すように設置する。ブレース補強は、X型のブレース（H断面）とブレース中央部に位置するせん断降伏パネルを有するダンパー部からなる。

ブレース補強の諸元としては、ダンパー部の負担力を高架橋本体の降伏耐力の2倍程度とし、想定地震に対して損傷レベル2以上に応答を抑えるように補強設計している。補強設計では、ブレースをトラス要素でモデル化し、RCフレーム部は耐震標準¹²⁾による。

2.2 不同変位対策（目違い防止工）の概要

目違い防止工は、隣接高架橋間の不同変位（水平目違い）を抑制するために、図-2に示すようにPC鋼棒で隣接する高架橋端部をX字状に連結する対策である。

目違い防止工（PC鋼棒）の諸元としては、旧国鉄での検討による仕様⁶⁾を参考に、兵庫県南部地震以降の大規模地震を踏まえPC鋼棒への最大作用力を500kN程度と想定して、耐力的に3.5倍程度となる鋼棒径 $\phi 32\text{mm}$ 、降伏荷重 $F_{py}=745\text{kN}$ 、引張荷重 $F_{pu}=857\text{kN}$ 以上と設定⁷⁾した。

3. 振動台実験による検討

3.1 振動台実験の概要

高架橋の変位制限対策の効果等を確認するため、標準的な鉄道高架橋を模擬した縮小試験体を用い、図-3に示す振動台実験を表-1に示す変位制限対策の組み合わせ、入力地震動をパラメータとして実施した。

(1) 試験体

RC架構およびブレースの概要を図-4に、目違い防止工の配置概要を図-5にそれぞれ示す。また、使用材料の性質を表-2に、相似則一覧を表-3にそれぞれ示す。試験体は標準的な鉄道高架橋（鉄筋コンクリート1層2柱式ラーメン高架橋）を模擬し、架構寸法1/5、柱断面1/4縮尺として、せん断余裕度を実際の高架橋と等価となる

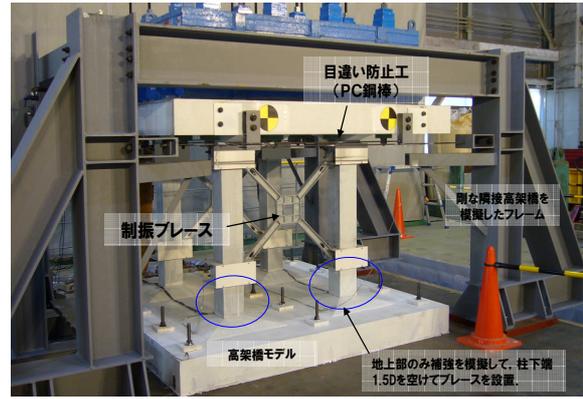


図-3 振動台実験の概要

表-1 振動台実験一覧

No.	Case	変位制限対策	入力地震動	最大応答変位 [mm]	
				正側	負側
1	NM-L2	無対策	L2specII	133.0	-31.1
2	DB-L2	ブレース	L2specII	5.3	-5.1
3	ALL-L2	ブレース+目違い工	L2specII	3.6	-3.3
4	NM-To	無対策	想定東海波	169.3	-133.5
5	DB-To	ブレース	想定東海波	6.5	-8.0
6	ALL-To	ブレース+目違い工	想定東海波	3.8	-4.0

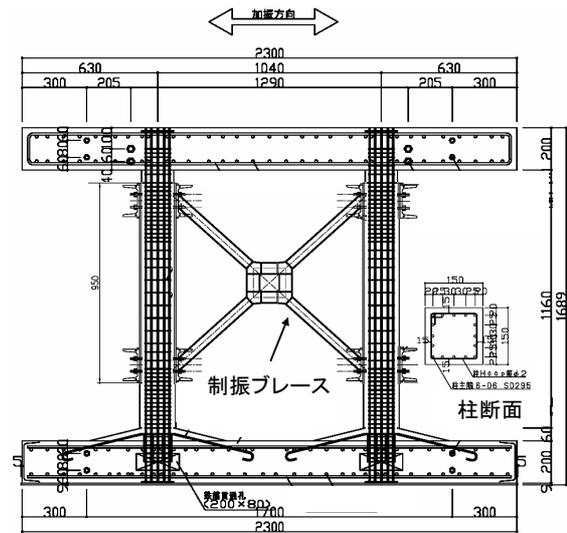


図-4 試験体概要図（RC 架構，ブレース）

ようモデル化して作成した。柱主筋の鉄筋比は $p_s=2.25\%$ 、せん断補強筋比は $p_w=0.07\sim 0.21\%$ 、せん断余裕度は1.31である。なお、変位制限対策を施さない無対策の試験体（NM-L2，NM-To）は、著者らの既往の実験結果³⁾を比較として用いた。

ブレース補強は、前述のように高架橋本体の2倍程度の降伏耐力を有するよう設計し、橋軸直角方向断面に2基（1対）設置した。なお、耐震補強された既存高架橋を想定し、柱部材には鋼板巻き補強（鋼板厚 $t=1.2\text{mm}$ ）し、その上からブレースを設置した。また、実施工を踏

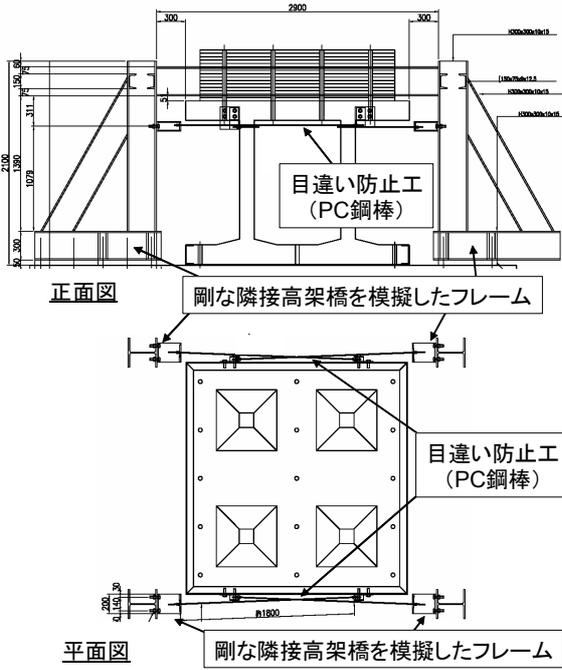


図-5 試験体概要図 (目違い防止工配置)

まえ地上部でのブレース設置を意識し、土被り分 $1.5D$ (D :柱幅)柱下端を空けた。

なお、実高架橋は1ブロック8柱であるが、試験体は線路方向(橋軸方向)に $1/2$ とした4柱にモデル化した。これは、振動台試験装置の能力、入力地震動、極力縮尺の大きい試験体による性能評価を実施すること等を考慮しモデル化した。また、基礎の影響(含む、地盤変位)は考慮せず、上部工(高架橋本体)の振動変位による変位増幅(応答)に着目してモデル化した。また、ブレース補強にあたっては、実橋での補強方法を想定し、ダンパー・ブレースの耐力を $1/2$ としてモデル化した。

目違い防止工は、実高架橋の補強仕様(PC鋼棒: $\phi 32\text{mm}$ B種1号)におけるPC鋼棒の伸び剛性と試験体のPC鋼棒の伸び剛性とが整合するようにモデル化し、 $\phi 9.2\text{mm}$ B種1号のPC鋼棒とした。なお、隣接高架橋との不同変位を強制的に発生させ、目違い防止工に対して厳しい条件となるよう、剛な隣接高架橋を模擬したフレームを試験体の前後に配置し、目違い防止工を取り付けた。

(2) 加振・計測方法

入力地震動は、内陸活断層型地震として鉄道設計波のL2specII¹²⁾と、大規模海洋型地震として長周期成分によりパワーを持つ中央防災会議の想定東海波¹³⁾を用い、相似則にしたがって、高架橋降伏震度と地震波加速度振幅の比、高架橋固有周期と地震波の周波数特性の比が整合するように、加速度と時間軸を調整した入力地震動で橋軸直角方向へ加振した。具体的には、固有周期に式(1)の T_m/T を乗じて時間軸調整を、降伏震度に式(2)の a_m/a を乗じて加速度振幅調整をそれぞれ実施した。

表-2 使用材料一覧

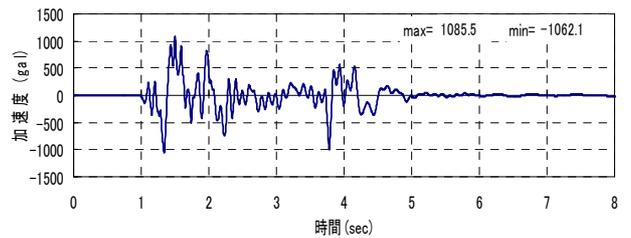
鋼材使用部位	寸法	材質	降伏強度 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	ヤング係数 ($10^5\text{N}/\text{mm}^2$)
柱鉄筋	主筋	D6	SD295	368	536
	帯筋	$\phi 2$	規格外	189*	285
柱鋼板巻き補強	t1.2	規格外	230*	347	1.98
ダンパーパネル材	t3.2	SS400	287*	453	2.07
目違い防止工	$\phi 9.2$	B種1号	1157*	1208	2.06

*:0.2%オフセットひずみにより降伏強度を算出。

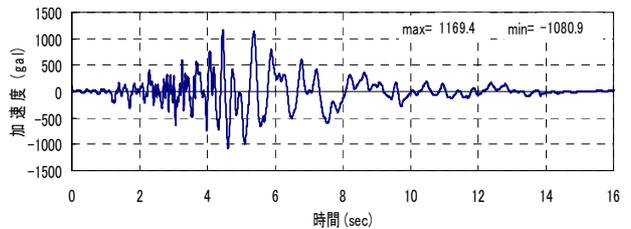
コンクリート	圧縮強度 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	ヤング係数 ($10^4\text{N}/\text{mm}^2$)
24-18-13N	31.6	2.39	2.42

表-3 相似則

物理量	相似比	物理量	相似比
長さ	$1/\lambda$	剛性	$1/\lambda$
ひずみ	1	固有周期	$1/\sqrt{\beta\lambda}$
応力度	1		
加速度	β	速度	$\sqrt{\beta/\lambda}$
質量	$1/(\beta\lambda^2)$		
力	$1/\lambda^2$	$(\lambda=5, \beta=1.55)$	



(a) L2specII



(b) 想定東海波

図-6 入力地震動

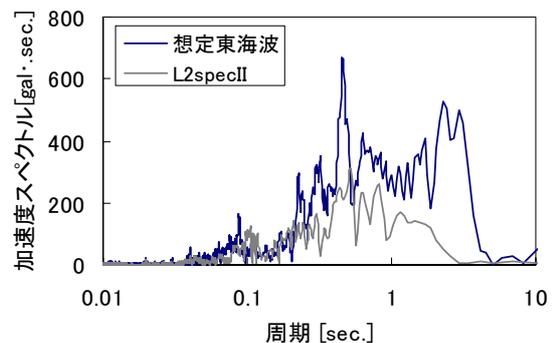


図-7 加速度フーリエスペクトルの比較

$$\frac{T_m}{T} = \sqrt{\frac{M_m}{G_m}} / \sqrt{\frac{M}{G}} \quad (1)$$

ここで、 T ：固有周期、 M ：重量、 G ：降伏時割線勾配（サフィックス m ：モデルを示す）。

$$\frac{a_m}{a} = \frac{Kh_m}{Kh} = \frac{P_{ym}}{M_m} / \frac{P_y}{M} \quad (2)$$

ここで、 a ：加速度、 Kh ：震度、 P_y ：降伏荷重、 M ：質量（サフィックス m ：モデルを示す）。

式(1)および式(2)の値はそれぞれ $T_m/T=0.36$ 、 $a_m/a=1.55$ である。入力調整した加速度波形を図-6に示す。また、2つの波形の加速度フーリエスペクトルの比較を図-7示す。

計測は加速度計による応答加速度、レーザ変位計等による応答変位、柱部材の鉄筋（主鉄筋、帯鉄筋）、ダンパー・ブレースや目違い防止工（PC鋼棒）の鋼材ひずみを計測した。

また、変位制限の目標レベルとして、変位制限標準¹⁾によるL1地震に対する構造物の応答に伴う軌道面の不同変位の限界値を参考に、表-4に示すバラスト軌道の270km/h走行における限界目違い量を設定した。

図-8にレール変形と不同変位（目違い）の概念図を示す。高架橋に不同変位（目違い）が生じた場合、バラスト軌道では、ある区間長にて不同変位に伴うレール変形（角折れ θ ）が発生すると考えられる。本研究では、バラスト軌道による実物大の水平目違い試験¹⁴⁾を参考に、レール変位（角折れ θ ）が生じる間長を4.8mと想定し、表-4に示す270km/h走行での角折れ限界値 θ_L となる場合の不同変位（目違い）を限界目違い量として23.4mmと設定した。

3.2 振動台実験結果と考察

振動台実験の結果として、表-1に各Caseの最大応答変位を示す。また、変位制限対策の効果を比較するため、入力地震動別に比較検討する。

No.1~3のL2specII加振について、加振時の荷重変位関係を図-9に、応答変位波形を図-10にそれぞれ示す。また、No.4~6の想定東海波加振について、荷重変位関係を図-11に、応答変位波形を図-12にそれぞれ示す。

はじめに、L2specIIについて変位制限対策の効果を比較する（図-9、図-10）。無対策（No.1）の場合では、地震動により柱部材が降伏、柱上下端に塑性ヒンジ区間が形成され、さらに大きく塑性変形する曲げ損傷の挙動を呈した。また、高架橋の倒壊には到らないが残留変形は約70mm生じた（図-10(a)無補強を参照）。最大応答変位は133mm（部材角1/9程度）であった（図-9(a)無補強を参照）。

表-4 構造物の応答に伴う軌道面の不同変位の限界値（文献1に加筆）

方向	列車速度 [km/h]	角折れ θ_L ($\cdot 1/1000$)	バラスト軌道における角折れ限界値となる想定目違い量**
水平	260	5.0	24.0mm
	270	4.875*	23.4mm
	300	4.5	21.6mm

* 270km/hの角折れ θ_L 限界値は線形補完により算出

** バラスト軌道によるレール変形（角折れ）の区間長4.8mで算出

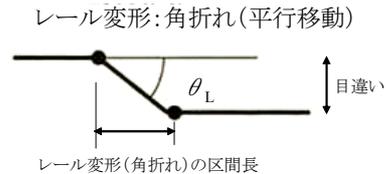


図-8 レール変形—不同変位（目違い）概念図

一方、変位制限対策（No.2,3）の場合では、加振による損傷はなく、ほぼ弾性応答の挙動を呈した。最大応答変位は、ブレース補強のみ（No.2）が、5.3mm（部材角1/220程度）、ブレース補強+目違い防止工（No.3）が3.6mm（部材角1/320程度）である（図-9(b)を参照）。残留変形もほぼ0mmである（図-10(b)無補強以外を参照）。図-9(a)より、無対策と比べて、変位制限対策の荷重変位曲線は立っており、補強による構造物の高剛性化が確認できる。また、変位拡大図（図-9(b)、図-10(b)）より、ブレース補強+目違い防止工の方が、より変位抑制効果が高いことが確認できる。

想定東海波に対してもL2specIIと同様に変位制限対策の効果を確認した（図-11、図-12）。無対策（No.4）の場合は、柱部材が降伏し、大きく塑性変形する曲げ損傷となり、倒壊には到らないが残留変形は約90mm生じた（図-12(a)無補強を参照）。また、変位制限対策（No.5,6）の場合では、ほぼ弾性応答の挙動を呈した。最大応答変位は、無対策（No.4）が、169.3mm（部材角1/7程度）、ブレース補強のみ（No.5）が、8.0mm（部材角1/150程度）、ブレース補強+目違い防止工（No.6）が、4.0mm（部材角1/290程度）である（図-11(a)(b)を参照）。残留変形もほぼ0mmである（図-12(b)無補強以外を参照）。

今回の試験体は、縮尺1/5程度のため、表-3の相似則に従い、実験計測変位を5倍して、実大高架橋での応答変位を推定する。標準的な高架橋に、二つの変位制限対策を実施することで、応答変位はL2specIIに対して約18mm、想定東海波に対して約20mm~抑制されたこととなる。これは、想定した限界目違い量23.4mmを満足し、変位制限対策の十分な変位抑制効果を確認した。

次に、全水平力に対するブレースの負担分、目違い防止工の負担分について考察する。加振による「全水平力」、

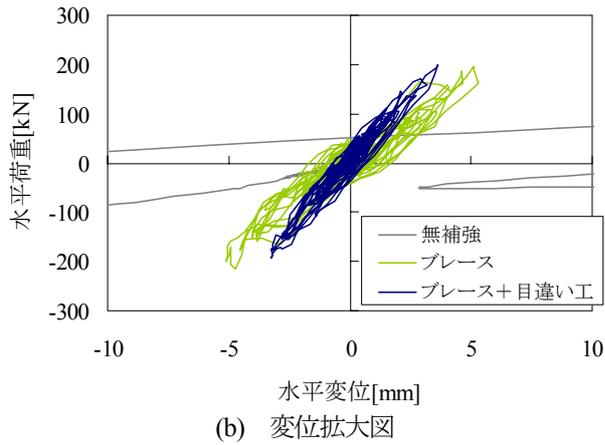
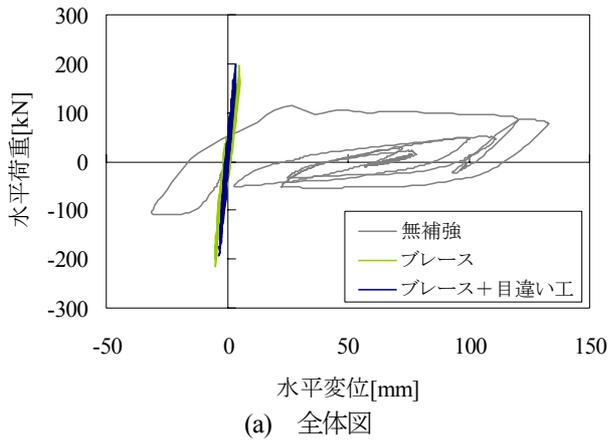


図-9 荷重変位関係の比較 (L2specII 加振)

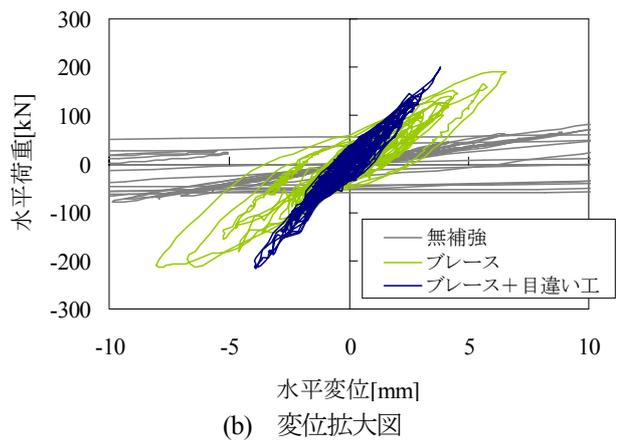
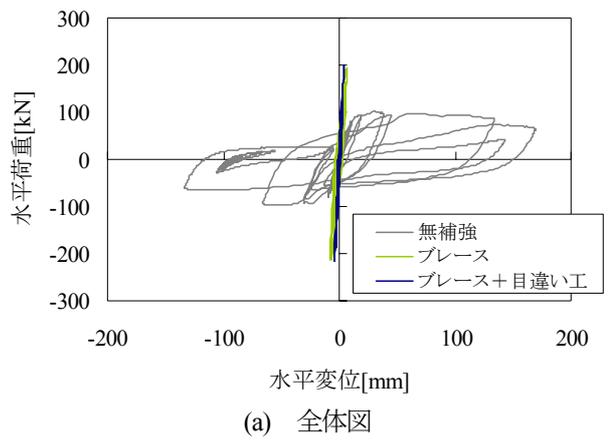


図-11 荷重変位関係の比較 (想定東海波加振)

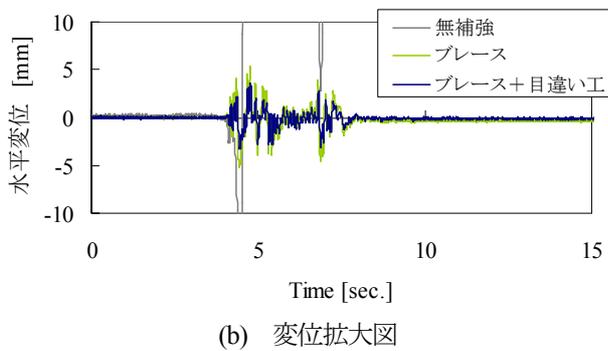
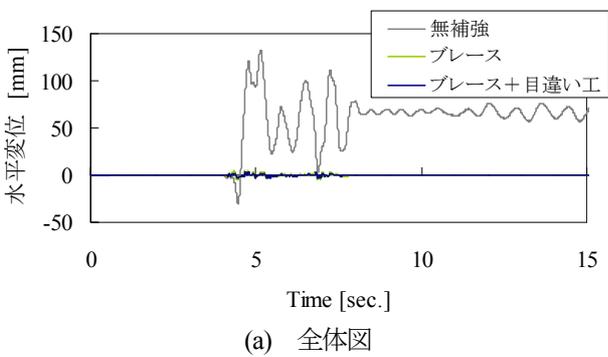


図-10 応答変位波形の比較 (L2specII 加振)

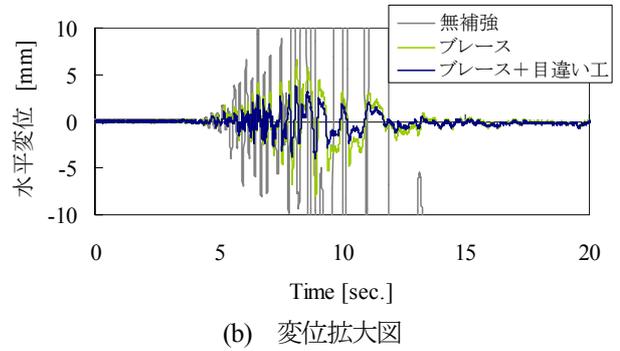
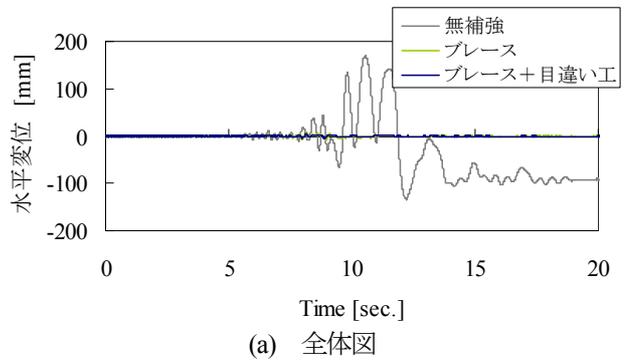


図-12 応答変位波形の比較 (想定東海波加振)

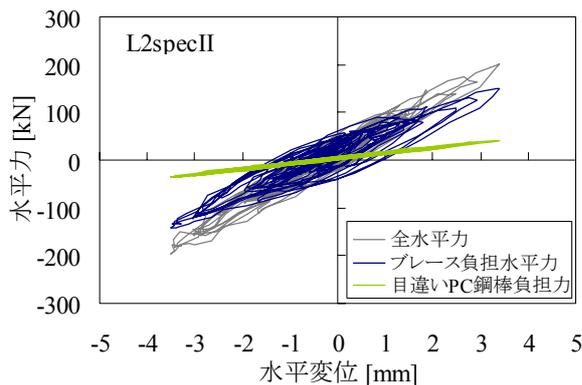


図-13 全水平力と各対策工の負担水平力の比較 (L2specII, No.3: ALL-L2)

表-5 全水平力と各対策工の負担水平力の最大値 (L2specII, No.3: ALL-L2)

	ブレース	目違い	RC架構	全水平力
正側	150kN 74%	41kN 20%	11kN 5%	203kN 100%
負側	-141kN 72%	-35kN 18%	-21kN 11%	-197kN 100%
平均	146kN 73%	38kN 19%	16kN 8%	200kN 100%

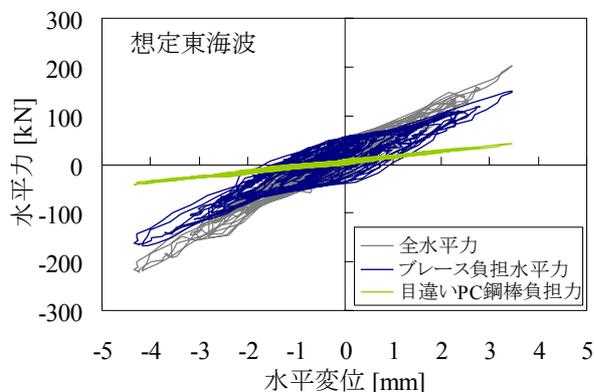


図-14 全水平力と各対策工の負担水平力の比較 (想定東海並, No.6: ALL-To)

表-6 全水平力と各対策工の負担水平力の最大値 (想定東海並, No.6: ALL-To)

	ブレース	目違い	RC架構	全水平力
正側	152kN 75%	43kN 21%	8kN 4%	203kN 100%
負側	-166kN 75%	-41kN 19%	-13kN 6%	-220kN 100%
平均	159kN 75%	42kN 20%	11kN 5%	212kN 100%

「ブレース負担分水平力」と「目違い防止工負担分水平力」に対する「水平変位」との関係について、ブレース補強+目違い防止工を設置した条件で比較検討する。

L2specIIの加振結果として、No.3の結果を図-13に、想定東海波の加振結果として、No.6の結果を図-14にそれぞれ示す。また、ブレース、目違い防止工、RC架構負担水平力の最大値と、各対策工の負担分の全水平力に対する割合を、No.3の結果については表-5に、No.6の結果については表-6にそれぞれ示す。

ここで、ブレース負担水平力はブレースの軸ひずみより軸力を算定し、その水平成分を示した。また、目違い防止工の負担水平力は、目違いPC鋼棒の軸ひずみより軸力を算定し、水平成分を示した。RC架構の負担分は、全水平力からブレース負担分と目違い防止工負担分を除いた値を表記した。

No.3, No.6のいずれにおいても、ブレースの負担力は全水平力の75%程度を占めており、目違い防止工が20%程度を負担していることが分かる。地震動によらず全水平力のほとんどをブレースが負担する構造である。

また、図-13, 図-14を詳細に見ると、水平力と変位の関係において、全水平力に見られる紡錘形の履歴特性は、負担割合の大きいブレース負担水平力の紡錘形の履歴特性に依存した形状である。換言すれば、ダンパー・ブレース以外の目違い防止工やRC架構は、ほぼ線形に近い挙動をしていると考えられる。これに対し、ダンパー・ブレースについては、紡錘形の履歴特性を示すことから、X型中央に配したダンパー部のせん断変形(せん断降伏)する構造が機能していることを示している。

4. 列車と構造物の動的相互作用解析による検討

本章では、松浦の研究¹⁰⁾を基本に開発した列車と構造物の動的相互作用解析¹¹⁾により、変位制限対策による地震時の列車走行性への効果を検討する。

4.1 解析手法の概要

(1) 解析モデル

車両モデルは、松浦¹⁰⁾、前田ら¹¹⁾による図-15に示す車両の力学モデルとした。車体・台車枠・輪軸を剛体質点と仮定し、これらをばね・ダッシュポットで結合し構成する1両47自由度モデルである。車両の長手方向をx軸に、左右(y)、上下(z)、ローリング(ϕ)、ピッチング(θ)、ヨーイング(ψ)を定める。また、車両長25m、軸重110kNとなる新幹線車両を仮定しモデル化、列車速度はV=270km/hである。また、列車の走行位置は片線側の走行である(図-16中の列車走行方向の矢印参照)。

標準的なRCラーメン高架橋を基本として、高架橋高さ等が変化する連続20ブロック(R1, R2, R3, ..., R20)

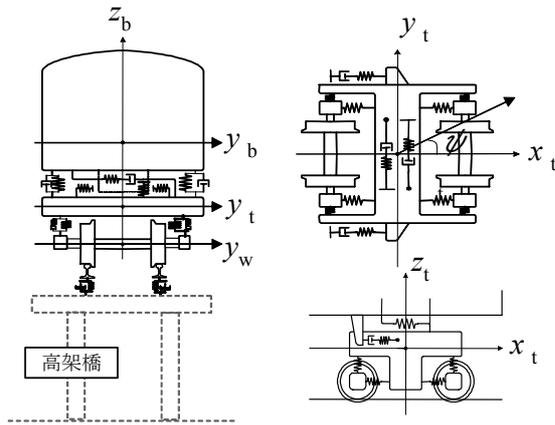


図-15 車両モデル

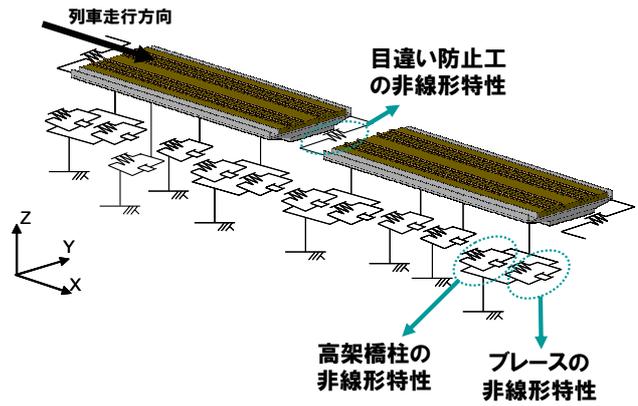


図-16 構造物モデル

の高架橋区間（区間延長約500m）を想定してモデル化した。構造物モデルの概念図を図-16に示す。構造物は有限要素でモデル化し、柱は柱列ごとに水平方向の非線形ばね要素にモデル化し、スラブ・梁は剛な要素にモデル化した。

柱の非線形ばねは、静的非線形解析結果を反映したトリリニアで設定し、履歴則は標準トリリニアとした。ここで、静的非線形解析のモデルは、高架橋の高さ等に応じて、図-17に示すような橋軸直角方向の平面モデルにて、各部材は耐震標準¹²⁾およびコンクリート標準¹⁵⁾に従いモデル化し、地盤ばねは、耐震標準¹²⁾および基礎標準¹⁶⁾に従い、図-18に示す地盤抵抗特性の杭先端鉛直、杭周面鉛直、杭水平の非線形ばねにモデル化した。なお、地盤抵抗の上限値に考慮する地盤抵抗係数は $\alpha_f=1.0$ とした。設定した高架橋の等価固有周期は0.52~0.81 sec.、降伏震度は0.38~0.52である。

変位制限対策工については、ブレース補強は、高架橋各ブロックの直角方向2断面に設置（図-1参照）することとし、静的非線形解析の結果を反映させた水平非線形ばね要素にモデル化し、端部列の柱の非線形ばね要素と並列して配置した。

図-19にブレース補強前後の高架橋のモデル化の概念図を示す。ここに、 P_y' , $\delta y'$: ブレース補強後の降伏荷重とその変位, P_m' , $\delta m'$: ブレース補強後の最大荷重とその変位, K_y' : ブレース補強後の初期剛性を表し, P_y , δy : 無体策（ブレース補強前）の降伏荷重とその変位, P_m , δm : 無体策の最大荷重とその変位, K_y : 無対策の初期剛性を表す。無対策に対し、ブレース補強後は、荷重や初期剛性が向上する。本研究の連続20ブロックの高架橋では、降伏荷重の比率 $P_y'/P_y=1.56\sim 2.17$ 、初期剛性の比率 $K_y'/K_y=2.15\sim 2.57$ にそれぞれ向上したモデルとしている。なお、ブレース補強前後ともに、モード減衰定数は全モードに対して5%とした。

また、目違い防止工は、目違いが発生した場合に引張

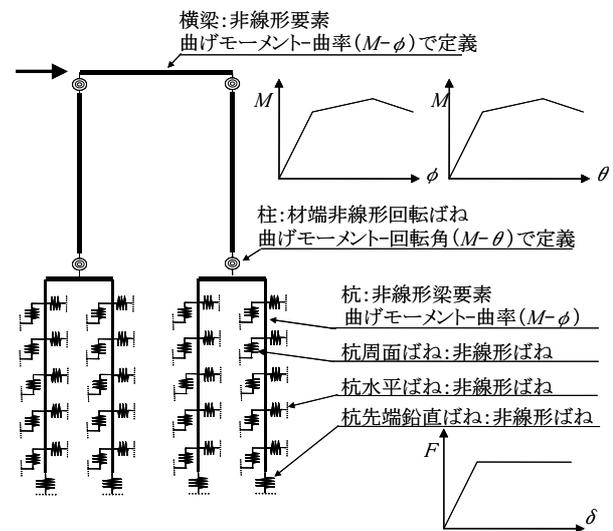
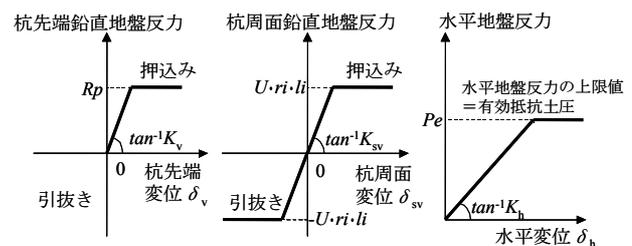


図-17 静的非線形解析モデルの概念図



(a) 杭先端の鉛直地盤抵抗特性 (b) 杭周面の鉛直地盤抵抗特性 (c) 杭の水平地盤抵抗特性

図-18 地盤のモデル化（杭基礎）

となる側のPC鋼棒のみを抵抗材として、図-20に示すバイリニアの水平非線形ばね要素を各高架橋ブロック間に設定した。なお、レール等の軌きょう剛性が、目違い等の抑制へ影響することが考えられるが、安全側に判断し、本解析モデルでは考慮しなかった。ただし、後述するレール変形の緩衝区間の設定において、軌きょう剛性を含めたバラスト軌道の試験結果¹⁴⁾を参考としており、間接的には考慮している。

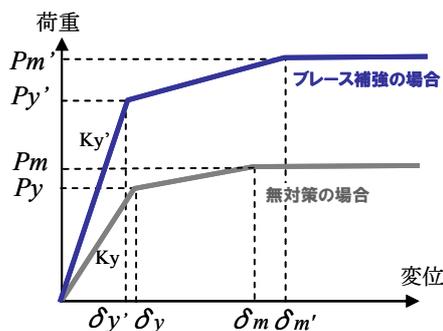
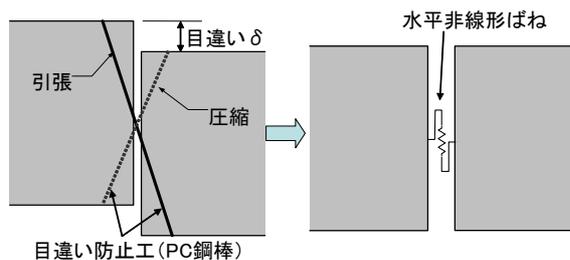
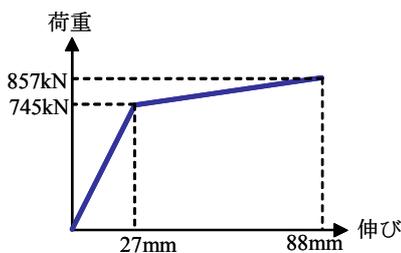


図-19 ブレース補強前後の高架橋のモデル化



(a)目違い防止工のモデル化の考え方



(b)目違い防止工の水平非線形ばね
図-20 目違い防止工のモデル化の概要

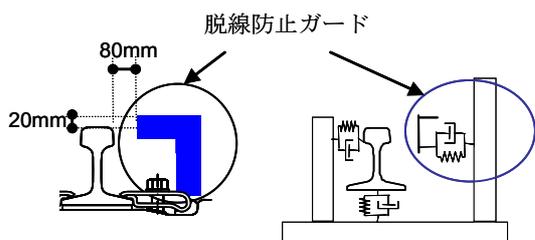


図-21 脱線防止ガードおよび同モデルの概念図

解析においては、これら二つの高架橋変位制限対策に加え、図-21に示すレール横にガード材を配置して脱線防止を図る脱線防止ガード対策工¹⁷⁾も組合せとして考慮した。脱線防止ガードは、レールからの離れ80mm、高さ20mm、水平方向の横剛性10kN/mmとして設定した。

(2) 車輪とレール間の力学モデル

車輪とレール間の力学モデルについては、車輪およびレールの断面形状をモデル化し、Hertzの弾性理論による接触力、Kakerの線形理論およびLévi-Chartetの飽和則を適用¹⁷⁾したクリープ力を用いて、車輪とレール間の相互作用

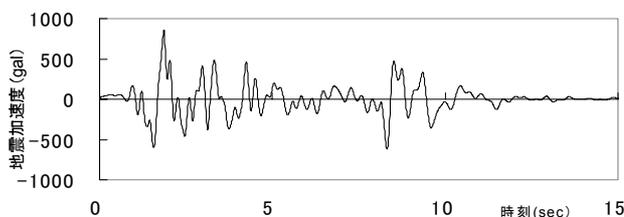


図-22 解析入力地震動 (L2specIIG3地盤)

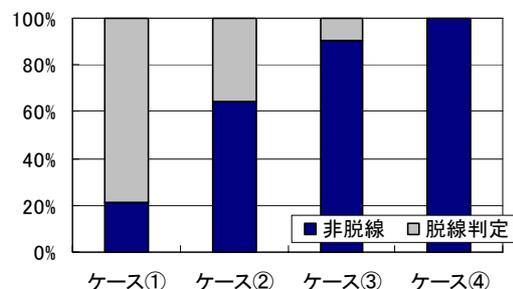


図-23 列車と構造物の動的相互作用解析結果 (L2specIIG3地盤)

用力を算出する¹¹⁾。

(3) 入力地震動と解析条件

入力地震動は、図-22に示すL2specII (G3地盤)⁷⁾とした。また、列車は270km/h (75m/sec.)で高架橋連続20ブロック (約500m)上を走行し、6sec.程度高架橋上にあることとなる。一方、地震動は15sec.程度のため、地震動の主要な波形部分と高架橋上を走行する列車とのタイミングを考慮し、7.5m (0.1sec)ごとに列車のスタート位置を変えて、各ケース170パターン¹⁾の解析を実施した。なお、変位制限標準¹⁾に準拠し、車輪とレールの水平相対変位が70mmを超えた時点で脱線と判定した。また、高架橋ブロック境界に生じる構造物間の目違いや角折れといった不同変位に対するバラスト軌道の緩衝効果を適切に考慮する必要がある。そのため、バラスト軌道による実物大の水平目違い試験¹⁴⁾を参考に、片側2.4m (=4.8m÷2)の区間長の緩和曲線をHermite補の3次多項式により設定した。

解析ケースは、対策工の組み合わせをパラメータとして、「①無対策」、「②脱線防止ガードのみ設置」、「③さらに目違い防止工を設置」、「④ブレース補強を付加して変位制限対策等を全て設置」の4つの構造物モデルのケースにて、解析を実施し、対策工による列車走行性への効果を比較検討した。

4.2 解析結果と考察

列車と構造物の動的相互作用解析結果として、図-23に、各ケースにおける脱線判定の割合を示す。ケース①無対策では、170回中の約80%で解析上の脱線判定となった。約20%の非脱線は、地震動の主要な部分が高架橋上

を走行するタイミングと一致しなかった場合であった。

一方、④変位制限対策等を全て設置したケースでは、170回の全てにおいて列車走行性が担保される結果となった。なお、②脱線防止ガードのみ設置では、解析上脱線判定となる場合が約35%あり、高架橋上を走行する列車と地震動の主要動とタイミングが一致するなど、構造物の横方向の振動変位が大きく、かつ構造物境界での不同変位（目違い）が大きい場合には、構造物の変位制限対策の組み合わせが必要であると考えられる。

その一例として、地震動の最初の主要な部分にて高架橋上を走行し、地震動入力から2.9sec.で車両の第2軸が脱線判定となった回のケース②の解析結果を図-24に示す。また、図-24は、(a)高架橋天端の水平応答変位（絶対変位）、(b)脱線判定時（2.9sec.付近）に走行していた高架橋R11-R12間の目違い量、(c)輪重、(d)横圧、(e)車輪とレールの水平相対変位、(f)車輪上昇量について、脱線時刻付近（1.0～3.0sec.間）の各値を図示した。なお、各図の縦軸の符号は、(a)水平応答変位は列車進行方向左側を正（図-16のY軸方向）、(b)目違い量はR12に対しR11が列車進行方向左側にずれる場合を正、(c)輪重は車輪がレールを押す側を正（図-16のZ軸方向と符号が逆）、(d)横圧も車輪がレールを押す側を正、(e)車輪とレールの水平相対変位は軌間の外側への変位を正（左右の車輪で符号は逆方向）、(f)車輪上昇量は上昇側を正（図-16のZ軸方向を正）である。

脱線判定となるまでの過程を分析すると、2.0sec.付近の大きな高架橋の水平方向の応答変位（左右動）を受け（図-24(a)）、車輪フランジがレールに接し、右車輪の横圧が顕著に増大（図-24(d)）。その後、車輪軸がロックングを起し、左側の車輪上昇量が急激に増大していく（図-24(f)）。そして、左側車輪がレール頭頂面に着地した状態（図-24(f)の2.6sec.以降の車輪上昇（約28mm）したままの状態）のまま走行し、車両は高架橋R11とR12のブロック境界部へ入り、約25mmの目違い（図-24(b)の2.7sec.付近参照。これは、前述の270km/h走行でのバラスト軌道で想定した限界目違い量23.4mmを超える）により、今度はレール頭頂面にある左側車輪を支点に輪軸が逆方向にローリングする。これにより、右側車輪の上昇量が増大して、右側車輪フランジ部が乗り越え、左側へと車輪レールの相対変位が増加、70mmを超え脱線判定となる（図-24(e)）。

次に、目違い防止工の効果を見るため、図-24の場合と同一の列車走行位置となるケース③の結果を図-25に示す。図-25は、(a)輪重、(b)横圧、(c)車輪とレールの水平相対変位、(d)車輪上昇量をそれぞれ示す。なお、縦軸の符号は前述のとおりである。図-24との条件の差異は目違い防止工の有無である。

ケース②の場合と同じく2.0sec.付近の大きな左右動を

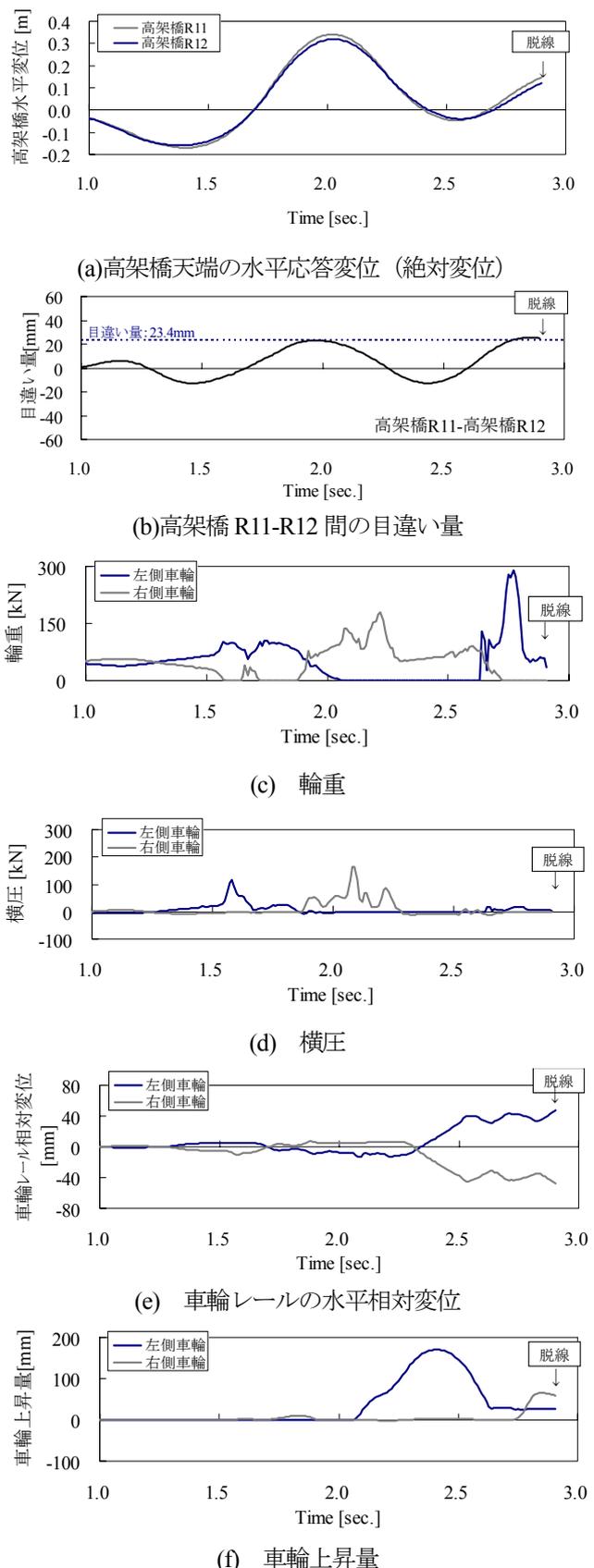
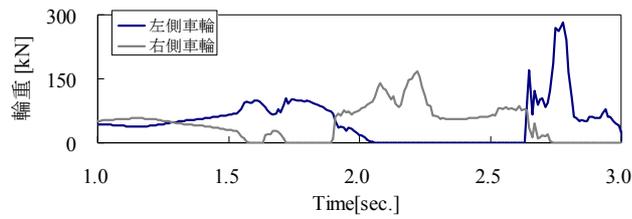
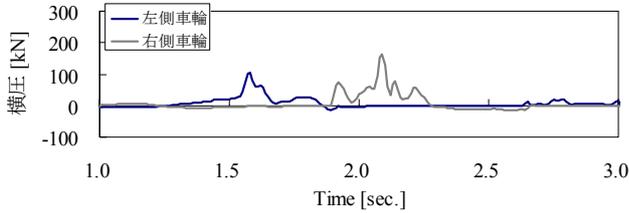


図-24 解析結果（ケース②の一例）

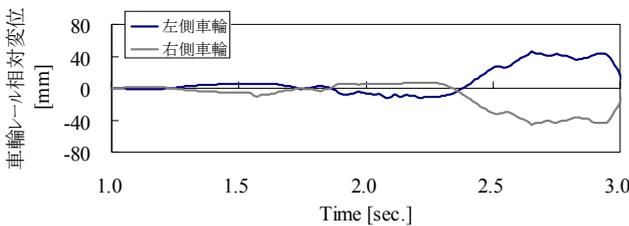
受け、左側車輪が上昇し、レール頭頂面に着地するが、車両は高架橋R11とR12のブロック境界部を通過しても、目違い防止工による不同変位（目違い）の抑制により脱



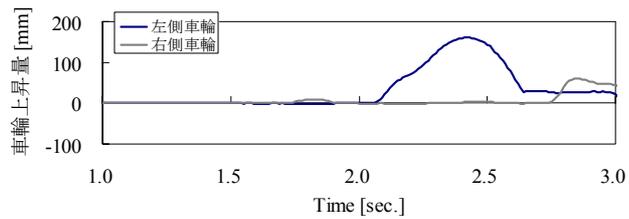
(a) 輪重



(b) 横圧



(c) 車輪レールの水平相対変位



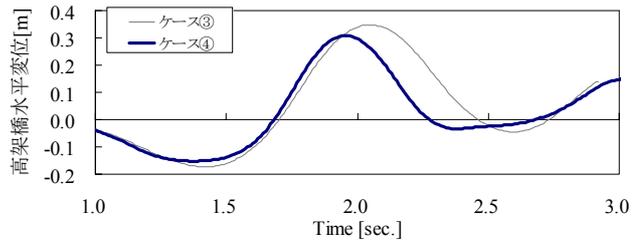
(d) 車輪上昇量

図-25 解析結果 (ケース③目違い防止工有の一例)

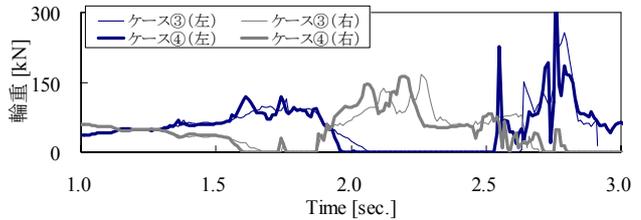
線判定には到らない。目違いを抑えることで列車走行性が担保されたことから、目違い防止工の有効性が確認できる。

一方、目違い防止工有のケース③においても脱線判定となる場合は約10%あった (図-23参照)。ここでは、脱線判定となった回の内、地震動入力から同じく2.9sec.で車両の第4軸が脱線判定となった回のケース③の解析結果を示す。また、この場合と同一の列車走行位置となる回のケース④ (変位制限対策を全て設置) の解析結果について、両者の比較を図-26に示す。図-26(a)高架橋天端の水平応答変位 (絶対変位) の比較, (b) 輪重, (c) 横圧, (d) 車輪とレールの水平相対変位, (e)車輪上昇量をそれぞれ示す。なお、縦軸の符号は前述のとおりである。

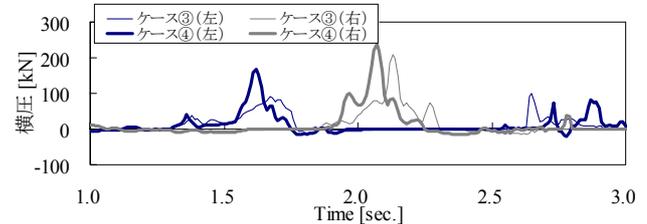
図-26(a)より、ブレース無のケース③での2.0sec.以降の大きな高架橋応答 (左右動) に対し、ブレース有のケース④では、水平応答変位が小さくなっており、ブレース補強による変位抑制効果が確認できる。さらに、応答



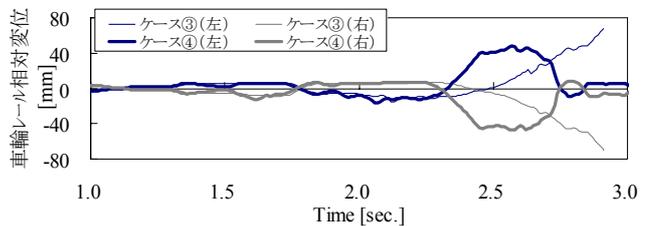
(a) 高架橋天端の水平応答変位 (絶対変位) の比較



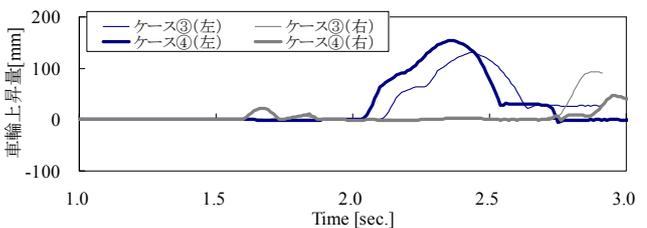
(b) 輪重の比較



(c)横圧の比較



(d) 車輪レールの水平相対変位の比較



(e)車輪上昇量の比較

図-26 解析結果 (ケース③, ④の比較)

変位波形のピークが異なり、ケース④の方が、周期が約0.2sec.ほど短くなっている。これはブレース補強により高架橋の高剛性化が図られたことを示している。このブレース補強による高架橋の応答変位抑制の効果と高剛性化により、脱線判定に到らず、列車走行性が担保されたと考える。

変位制限対策等の組合せ設置により、解析上の脱線判定となる場合を改善し、高架橋区間での列車走行性への有効性を確認した。また、列車走行性を向上させるためには、地震動による高架橋の応答変位（振動変位）、隣接高架橋間の目違い（不同変位）を抑制することが肝要であることを再確認し、そのための対策工として、提案する二つの高架橋の変位制限対策が有効な手段であることを確認した。

5. 結論

鉄道高架橋の変位制限対策に関する振動台実験ならびに列車と構造物の動的相互作用解析評価により、以下の知見を得た。

- (1) ダンパー・ブレース補強により、高架橋の剛性向上と横方向の振動変位の高い抑制効果が得られ、L2地震、想定東海波に対して、十分な構造性能となることを確認した。
- (2) 目違い防止工により、隣接高架橋間の不同変位（目違い）を抑制でき、さらに、ブレース補強との組み合わせで、想定する限界目違い量以下の応答に抑制でき、高架橋区間の列車走行性へ有効となることを確認した。
- (3) 提案した仕様の二つの変位制限対策の負担割合は、ブレース75%程度、目違い防止工20%程度である。
- (4) 連続する高架橋区間の数値解析シミュレーションにより、ブレース補強、目違い防止工の組み合わせにより、脱線防止ガードを有効に機能させ、列車走行性を担保することを確認した。
- (5) 列車走行性を向上させるためには、地震動による高架橋の応答変位（振動変位）、隣接高架橋間の目違い（不同変位）を抑制することが肝要であることを再確認し、そのための対策工として、提案する二つの高架橋の変位制限対策が有効な手段であることを確認した。

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（変位制限）、2006.2.
- 2) 吉田幸司、喜多直之、岡野素之、関雅樹：圧縮型鋼製ダンパー・ブレースによるRCラーメン高架橋の耐震補強工法、土木学会構造工学論文集 Vol.50A, pp.551-558, 2004.3.
- 3) Yoshida,K., Kita,N., Okano,M., Seki,M. : Shaking Table Tests on Seismic Performance of Railway Bridges with Compression Type Braces, *Proc. 1st Int. Conf. on Advances in Experimental Structural Engineering*, pp. 481-488, 2005.
- 4) 喜多直之、吉田幸司、岡野素之、関雅樹：鉄道RCラーメン高架橋を対象とした圧縮型鋼製ダンパー・ブレース工法の実用化、土木学会論文集 F, Vol.63, No.3, pp.277-286, 2007.7.
- 5) 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.
- 6) 石橋忠良、古谷時春：新幹線の橋脚・橋台の耐震補強－鋼板巻き補強・ストラット等－、基礎工, pp.94-105, 1992.2.
- 7) 吉田幸司、阿知波秀彦、関雅樹、曾我部正道：目違い防止対策等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.30, No.3, pp.919-924, 2008.
- 8) 涌井一、松本信之、松浦章夫、田辺誠：鉄道車両と線路構造物との連成応答解析法に関する研究、土木学会論文集, No.513/I-31, pp.129-138, 1995.
- 9) 松本信之、田辺誠、涌井一、曾我部正道：非線形応答を考慮した鉄道車両と構造物との連成応答解析法に関する研究、土木学会論文集 A, Vol.63, No.3, pp.533-551, 2007.7.
- 10) 松浦章夫：地震時における列車走行性解析に関する研究、鉄道力学論文集, No.9, pp.99-104, 2005.7.
- 11) 前田昌克、阿知波秀彦、松浦章夫：車両走行解析シミュレーションにおける車輪レール接触アルゴリズムの改善とその応用、鉄道力学論文集, No.13, pp.29-35, 2009.7.
- 12) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計）、1999.10.
- 13) 中央防災会議「東海地震に関する専門調査会」：中央防災会議 東海地震に関する専門調査会報告書、2002.12.11.
- 14) 佐藤吉彦、三浦重、高井秀之、長沢孝哉：高架橋の水平目違いおよび水平角折れに対する軌道の変形特性試験、鉄道技術研究所速報, No.A-85-61, 1985.3.
- 15) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物）、2004.4.
- 16) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（基礎構造物・抗土圧構造物）、1997.3.
- 17) 村松浩成、可知隆、三輪一弘、渡邊康人、船田智巳、生田周史：実台車を用いた加振試験による脱線防止ガードの設計仕様の検討、第16回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, pp.491-494, 2009.

(2009年9月24日受付)