

構造物の改良による地震時の車両走行安全性向上

鉄道力学研究部 構造力学
主任研究員 曾我部 正道

1. はじめに

鉄道構造物の設計標準では、L1地震動（構造物の設計耐用期間内に数回程度発生する規模の地震）を尺度とした指標に基づき立地条件や構造物の重要度、経済性等を考慮しながら、地震時の走行安全性に有利な構造形式を選択することにより、脱線に至る確率をできる限り低減することを設計の基本的な考え方としている。

本稿では、構造物の改良による高架橋及び橋りょう上での地震時の車両走行安全性向上手法について事例とその効果について紹介する。

2. 地震時車両走行安全性と構造物の設計

図1に地震時に生じる構造物の変位の概念図を示す。車両の走行安全性に及ぼす影響が大きい線路直角方向の変位は、横方向の振動変位と、異なる振動特性を持つ構造物間に生じる応答変位の相対的な差である不同変位に大別される。

図2に設計における構造物横方向振動変位の照査の概念図を示す。各構造物上において車両が受ける横揺れの大きさに関する応答値は、構造物の固有周期により定まる。これを車両の脱線限界値と比較することにより、構造物上での列車走行性を評価することができる。図から横方向の振動変位の照査結果は、構造物の固有周期及び地盤条件に依存していることが分かる。

図3に不同変位の概念図を示す。構造物境界部の不同変位の照査は、振動特性や地盤変位から求まる応答値を、車両の最高速度毎に定められた限界値と比較することにより行なわれる。

図2に示したように振動変位の観点から構造物の車両走行安全性を改良していくためには、比較的高さが低い構造物については、短周期化、すなわち剛性を付与する手法が有効であると推察される。一方、高さの高い構造物については、長周期化、すなわち免震支承などの利用により剛性を落とす手法が有効であると考えられる。ただし後者は、構造物の変位を増大させるため、図3に示した不同変位が大きくなる懸念され、こうした観点からの対処が必要となる。

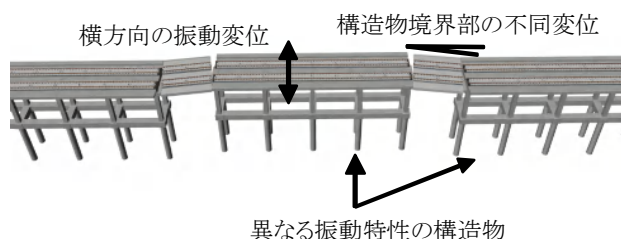


図1 地震時に生じる構造物の変位の概念図

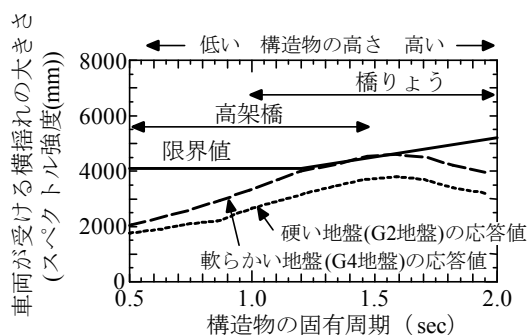


図2 横方向の振動変位の照査の概念図

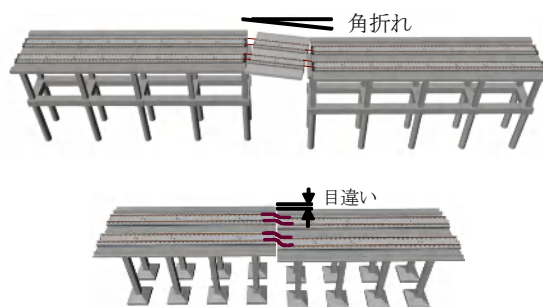
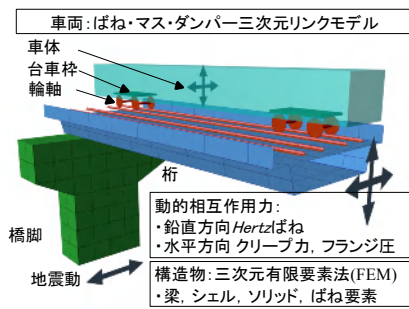
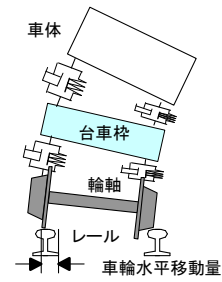


図3 不同変位の概念図



(a)動的相互作用解析プログラム DIASTARS の概念図



(b)脱線の評価指標

図 4 地震時列車走行性の評価手法

表1 解析対象高架橋の概要

項目	設定値
高架橋ブロック数	20
ブロック長さ	24~30m
高架橋高さ	5~8m, 0.5m間隔
等価固有周期	0.54~0.85秒
降伏震度	補強無し 0.38~0.52
	ブレース補強 0.94~1.07

表2 解析条件

解析条件	設定値
列車走行 走行位置	高架橋開始地点から, -400m, -200m, 0m, 200m, 400m, 600m, 800m, 1000m
入力 地震動	L2specIIの地表面応答波形 加速度振幅を調整

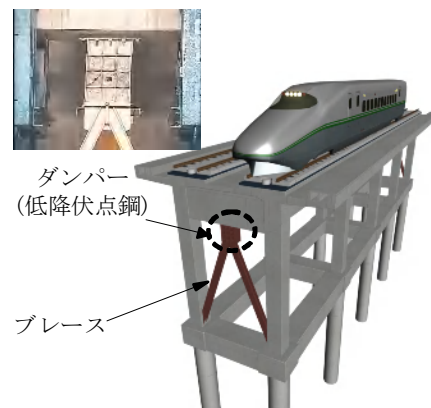


図 5 ダンパーブレース補強の概念図

3. 車両走行安全性の評価手法

図 4 に地震時列車走行性に関する評価手法を示す。評価には新幹線車両と鉄道構造物との動的相互作用解析プログラム DIASTARS II を用いた。DIASTARS II では、車両は、車体、台車枠、輪軸を三次元質点とし、これをばねとダンパーで結合しモデル化している。軌道および構造物は、有限要素により任意の構造形式をモデル化できる。車輪とレール間の動的相互作用力は、両者の幾何学的形状と相対変位から接触点および接触角を求め算出している。脱線の評価指標は車輪の水平移動量とした。これは車輪がレール上でフランジ高さを超えて上昇し、レール上方にある状態で、通常 70mm が限界値の目安となる。

4. 高架橋上の車両走行安全性の改良

表 1 に解析対象構造物の諸元を示す。張出型の RC ラーメン高架橋を想定し、高さに変化する連続 20 ブロック(R1-R20)を検討対象とし、走行安全性の改良を検討した。図 5 にダンパー・ブレース補強の概念図を示す。同補強形式は、ブレースによる高剛性化と低降伏点鋼を用いたダンパーの高い振動減衰性により、車両走行安全性と耐震性能の向上を図る工法である。表 2 に解析条件を示す。列車の走行安全性は走行位置により変化するため、8 両編成の列車モデルを 8 つの Sub Case に分けて検討した。地震動は L2spec II とし、モデル地盤条件から地表面波を算出して入力した。図 6 に解析モデルを示す。構造物は有限要素でモデル化し、スラブ・上層梁は剛な梁要素、柱は二次元フレームによる線路直角方向の静的非線形解析結果に基づきトリリニアの水平非線形ばねと回転ばねでモデル化した。

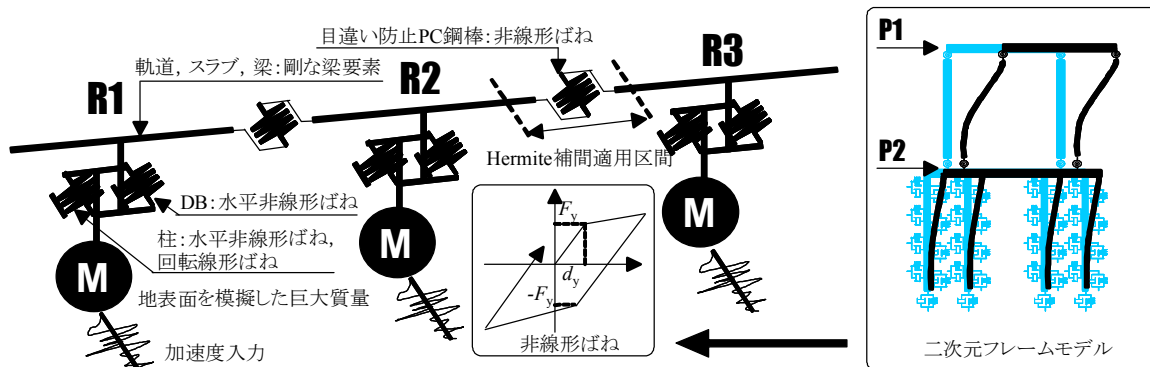
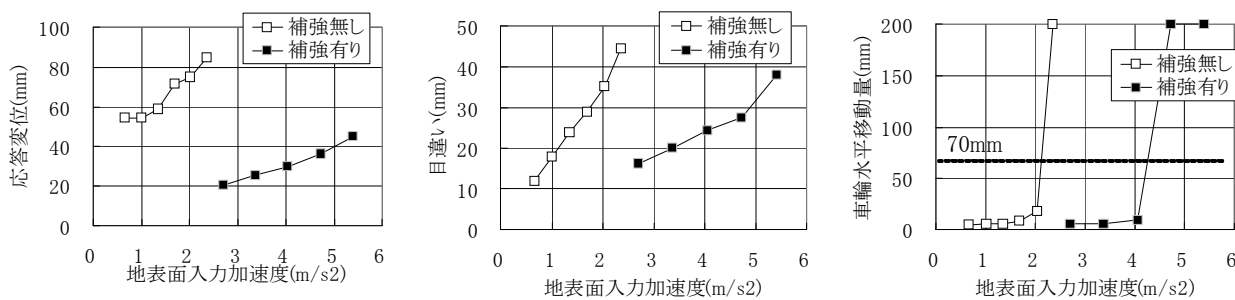


図6 構造物の解析モデル



a)最大応答変位

(b)最大目違い

(c)最大車輪水平移動量

図7 ダンパープレース補強が地震時の車両走行安全性に及ぼす影響

高架橋ブロック間には、PC鋼棒による目違い防止工を模擬した非線形ばねを設けるとともに、車輪が走行するレールの変形状を再現できるように、有限要素節点間に Hermite 補間を適用した。

図7に解析結果を示す。各図の値は、走行開始のタイミングを変えた8つのSub Caseでの高架橋及び車両の応答結果の内、最も厳しい値をプロットした。図から、ダンパープレース補強は応答変位、目違いを大幅に低減していること、これにより車輪の水平移動量が70mmとなる地表面入力加速度も倍増していることなどが分かる。

5. 橋りょう上の車両走行安全性の改良

図8に対象橋りょうの概要を示す。橋りょうの諸元は、近年建設されている新幹線橋りょうを参考に定めた。4径間連続合成桁(橋長320m, スパン長4@80m)で、高さ20mの橋脚を有する。表-3に解析条件を示す。Case1の基本ケースに加え、車両走行性を改良するための手法についても検討した。また本研究では、検討にランダム波であるL1地震動G4地盤(普通～軟弱地盤)を用いた。

図9に時刻歴波形の例を示す。図9(a)から、地表面入力加速度が最大となる10.5秒付近において橋梁中央部のP3橋脚位置でも最大変位が生じていることが分かる。図9(b), 図9(c)から、同時刻付近で車輪上昇量及び車体加速度も最大となっていることが分かる。車輪上昇量及び車体加速度が最大となっている時刻において、車両は橋梁中央付近を走行中であり、一方、桁端部を通過する際には顕著な応答はみられない。

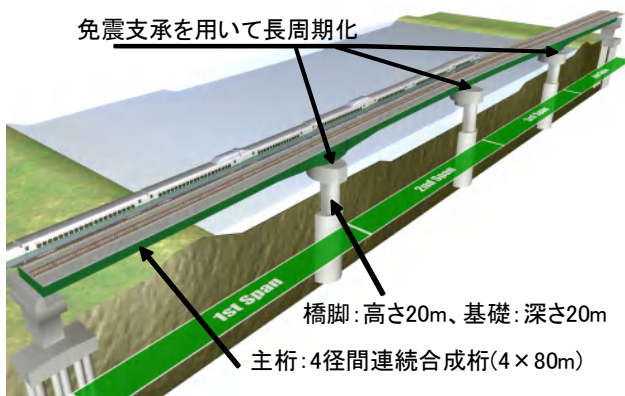


図8 解析対象橋りょうの概要

表3 解析条件

Case	内 容	(a)改良手法		(b)列車の走行開始位置	
		Sub Case ^{※2}	橋梁始点からの距離(m)		
Case 1	基本ケース ^{※1}	A	-175		
Case 2	P3 橋脚ばね剛性 2 倍	B	-375		
Case 3	P2~P4 橋脚ばね剛性 1.5 倍	C	-575		
Case 4	P2~P4 橋脚ばね剛性 2.0 倍	D	-775		
Case 5	P2~P4 橋脚直角方向 免震支承	E	-975		
Case 6	主桁水平剛性 2 倍	F	-1175		
		G	-1375		

※ 各 Sub Case は入力地震動の規模 10 種類について検討

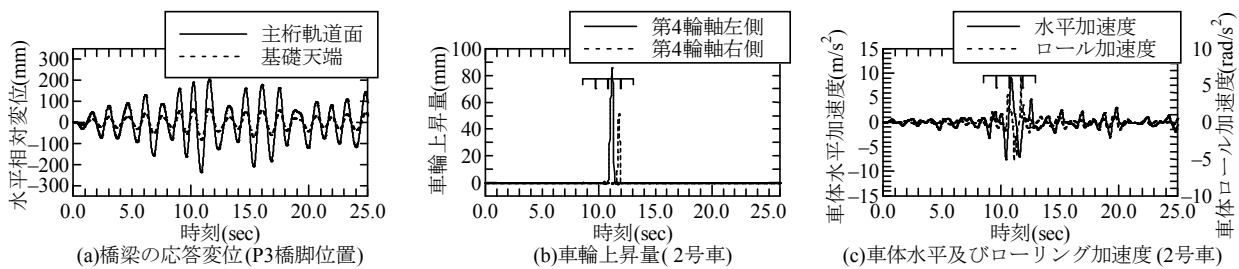


図9 時刻歴波形の例 (Case-1 基本ケース, Sub Case C 列車走行開始位置: : 橋梁始点から-600m, 地表面入力加速度 189gal)

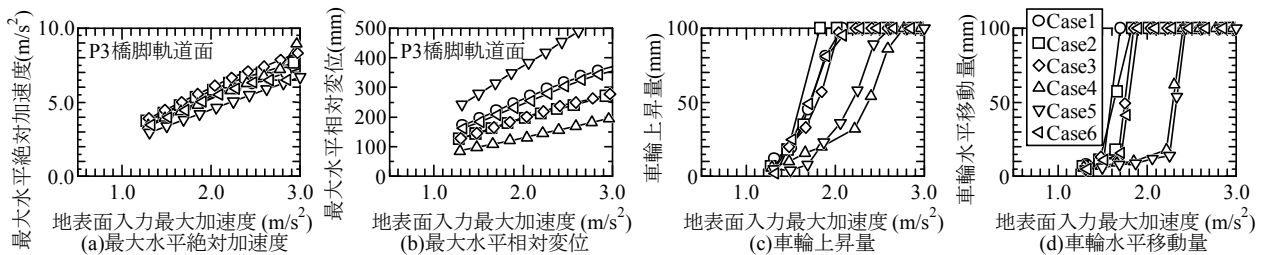


図10 各種改良手法が地震時の車両走行安全性に及ぼす影響

図10に各種改良手法が地震時の車両走行安全性に及ぼす影響を示す。各ケースの値は、全ての Sub Case を集約して最大値で示している。図から P2~P4 橋脚剛性 2.0 倍(Case 4)が効果的であることが分かるが、剛性を 2.0 倍とするためには、ケーソンの直径を 2.0 倍程度に増す必要があり、コスト増の要因となる。従って実務面では、主桁の軽量化や橋脚高さの低減等と併せた手法が必要となる。一方、P2~P4 橋脚直角方向免震支承(Case 5)も車両走行安全性が向上していることが分かる。免震支承を用いる手法については実績が少ないため、検討に用いる地震動や構造面等を含め様々な観点から更に慎重に検討を進める必要があるが、車両走行安全性の改良手法の一つとして期待される。

6. まとめ

高架橋及び橋梁の車両走行安全性を改良する手法について事例及び効果を紹介した。このような手法を、地震早期検知システムの利用による速やかな列車の減速や、脱線防止レール、軌道からの逸脱防止ガード等と組み合わせることにより、鉄道システム全体として効果的なリスク低減が可能になると考える。