

滑り系応答方向転換型免震基礎に関する検討

羅 休¹・川西智浩²

¹(財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 主任研究員 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)
E-mail: luo@rtri.or.jp

²(財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 副主任研究員 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)
E-mail: kawa@rtri.or.jp

鉄道構造物を経済的に建設するために、免震基礎の採用が考えられる。しかしながら免震基礎は、構造物への地震時慣性力を低減することができるが、その反面、エネルギー吸収により構造物の応答変位が大きくなり、列車走行安全性の確保が困難となる場合がある。そこで本研究では、経済性を損なうことなく大地震時における列車走行安全性を確保するために、従来の免震設計概念に捉われないことと、免震効果と列車走行安全性の両者を満足させる滑り系応答方向転換型免震基礎を提案した。また、静的と動的な模型実験、および幾何学的非線形性を考慮できる3次元数値解析を実施し、提案した新しい免震基礎の効果と走行安全性の改善を確認した。

Key Words: seismic-isolation foundation, Running safety of railway vehicle, Response direction converted, Seismic design

1. はじめに

兵庫県南部地震以後改訂された鉄道構造物の耐震設計標準¹⁾により、特に構造物の基礎杭については、大地震時の終局耐力および変形性能を確保するため、以前に比べて鉄筋量や杭径が増大する結果となっている。これを解決する方法として、免震基礎の採用が考えられる。しかしながら免震基礎は、構造物への慣性力を低減することができるが、その反面、エネルギー吸収により構造物の応答変位が大きくなり、列車走行安全性の確保が困難となる場合がある。

そこで本研究では、経済性を損なうことなく、大地震時における構造物の免震効果と走行安全性の両者を満足させる免震基礎を提案するために、従来の免震概念に捉われないことと、各種のデバイスを考案・試作し、静的と動的な模型実験による比較検討を実施した。その結果、杭頭軸力を切断した滑り系の応答方向転換型免震デバイスは、他の杭頭軸力を持つデバイスより免震効果と走行安全性が優れていることが分かり、それを提案した。また、実橋脚を対象に幾何学的非線形性を考慮できる3次元数値計算を行い、提案した免震基礎の大地震時の免震効果と列車走行安全性の改善効果を確認した。

2. 模型実験による検討

(1)滑り系応答方向転換型免震基礎の提案

近年の地震時列車走行安全性に関する研究結果²⁾を踏まえると、地震による鉄道構造物の線路直角方向の水平絶対変位は、列車走行安全性に及ぼす影響が支配的であることが示されている。このため、鉄道構造物の変位制限標準³⁾に定められている地震時の走行安全性の照査は、線路直角方向の水平変位による軌道面の角折れ・目違い、および振動変位に着目している^{4), 5), 6)}。したがって、この線路直角方向の水平変位を如何に押さえることは、鉄道構造物に適用する免震基礎の開発において、重要な意味を持っている。

本研究では、図-1に示すような滑り系の応答方向転換型デバイスから構成される免震基礎を提案した。この新しいデバイスは、群杭基礎のフーチングに設置して、線路直角方向に対し角度 θ を持つガイド溝と滑り球により、地震時の線路直角方向の応答変位を走行安全性に影響の小さい線路方向へ転換するとともに、すり鉢状の下方受台によって、地震後に上部構造物の自重により滑り球が元に戻ることで、残留変位を小さくすることが特徴である。

また、この図に示している地震動の方向は、列車走行安全にとって一番不利な線路直角方向を例とし

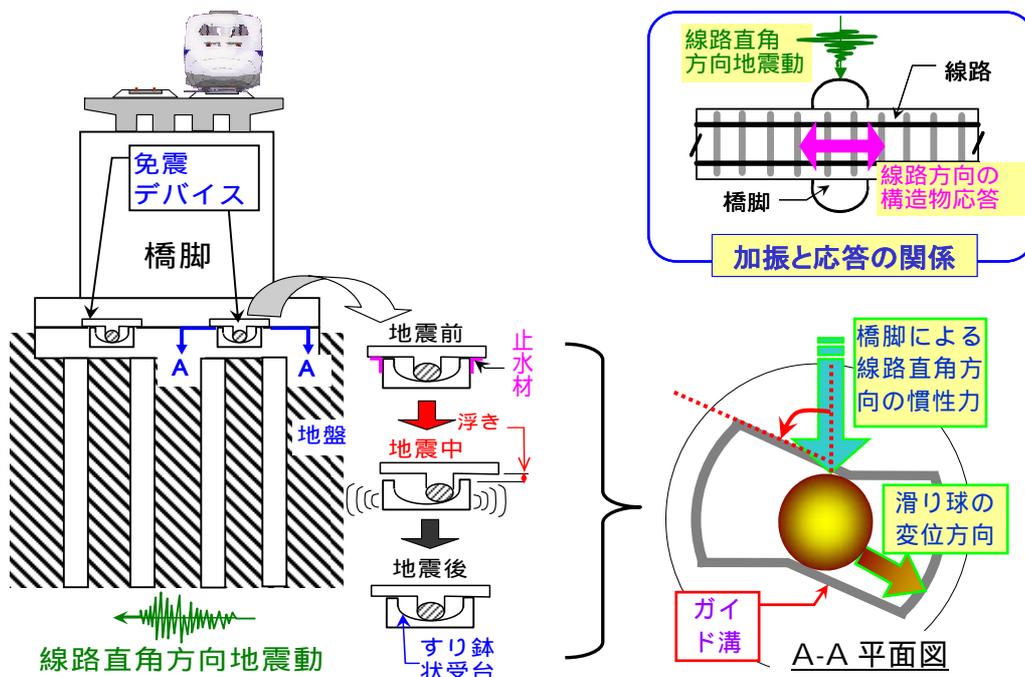


図-1 滑り系の応答方向転換型デバイスから構成される免震基礎

ているため、その転換角度は となっている。実際の地震動の入力はあらゆる方向からであり、線路と直交する方向よりも、斜めに交差する場合が多い。その際に、線路方向への転換がさらに起こりやすく、列車走行安全性の改善効果が大きくなると考えられる。

提案したデバイスのモデルを試作した。下盤にある下方受台と線路直角方向の加振に対する角度を持つガイド溝の写真を図-2に、上盤可動部分を図-3に示す。上盤は、蓋の役割もあるが、蓋の裏側に図-4に示す4点の滑り球を取り付けている。ガイド溝の幅は、4点の滑り球がスムーズに可動するように、滑り球の直径 20.5mm に対して 0.75mm のクリアランスをとり 22mm とした。

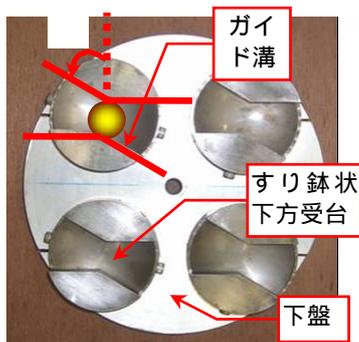


図-2 下盤と受台(杭頭側)

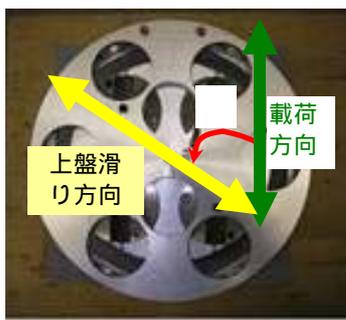


図-3 上盤可動部分(橋脚側)

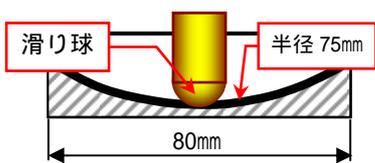


図-4 すり鉢状下方受台断面

(2) 静的水平交番载荷実験

a) 実験概要

転換角度の影響を調べるために、図-5に示す模型基礎を用いた静的水平交番载荷実験を実施した。今回の模型で、上盤可動部分にいくつかの穴を開けているのは、デバイスの可動状況を確認するためと、剛接合の模型との重量を統一するためである。また、比較検討のため、杭頭剛接合と免震デバイス接合の模型を作成し、水平荷重に対する橋脚の変位、傾き、杭軸力および曲げモーメントを測定した。実構造物寸法の 1/50 スケールとし、真鍮製の中空管(20mm、肉厚 1mm)で作られた模型杭の長さは 510mm とした。

橋脚は高さ 200mm × 幅 140mm、载荷点の高さは地表面から 150mm とした。なお、地盤相対密度は 60% の条件とした。免震デバイスの荷重方向に対する転換角度は 15°、30°、45° および 60° とし、剛接合とあわせて 5 ケースの静的繰返し载荷を行った。

b) 実験結果

図-6に载荷位置

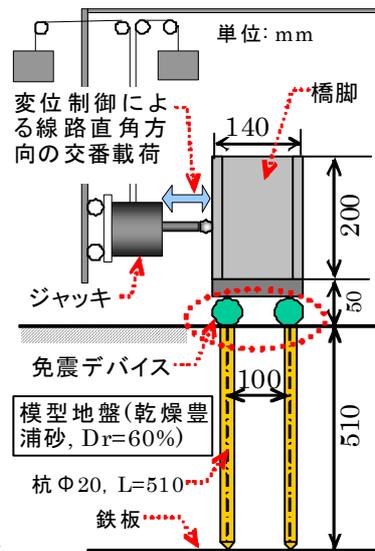


図-5 模型基礎と载荷装置

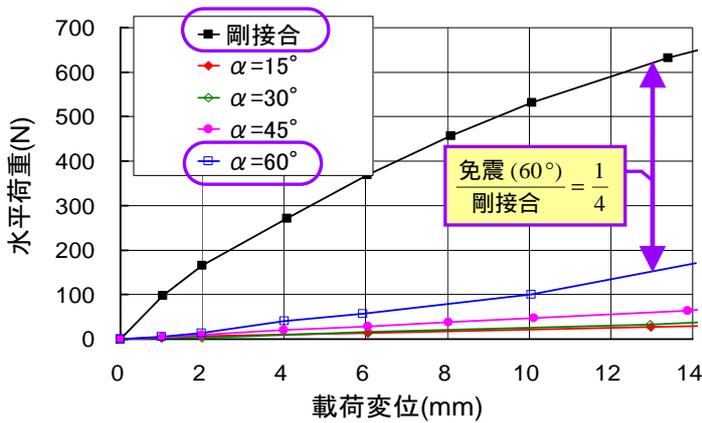


図-6 橋脚載荷点の荷重-変位関係

の荷重-変位関係，図-7に杭モーメントの深さ方向分布を示す．これらの結果は，载荷水平変位が約±13mm時の実験値である．これは，デバイスの転換角度が60°時の载荷方向の水平変位の限界が約13mmであるためである．他の剛接合またはデバイスの転換角度が45°以下の場合には，载荷点の最大水平変位を±20mmまで载荷したが，=60°のケースと比較するために，±13mm時の値で整理したものである．

载荷位置の荷重-変位関係について，図-6から転換角が小さくなると水平荷重が小さくなっている．免震デバイスの中で，最も大きい60°時の剛性は，従来型の杭頭剛接合の場合の約1/4程度で，また，杭体最大モーメントは，約1/5程度となった．

(3) 振動台実験

a) 実験概要

実験は，鋼製フレームの土槽を載せた振動台を用いて実施した．振動実験の目的は，変位方向の転換に対して，静的繰り返し载荷実験で考慮できなかった慣性力による影響を検討することである．なお，静的実験の結果から，線路方向への変位転換効果の最も大きいケース(=60°)を選定した．

また，同じ加振条件で従来型の杭頭剛接合と比較するために，図-8のように1つの模型地盤に2つの模型基礎を設置した．計測は，各群杭基礎(2×2)の対角方向の2本の杭に対して，モーメントと軸力の測定を行った．また，橋脚の天端，下段およびフーチングにおいて，水平加振方向と加振面外方向に沿って加速度計と変位計を設置した．なお，免震デバイスの滑り球がすり鉢状の下方受台で振動することによって発生する鉛直方向の挙動を把握するために，橋脚天端に4点の鉛直方向の変位計を設置した．

加振波は，模型の共振特性を考慮して20Hz～5Hzの正弦波とし，振幅は200gal～1000galとした．加振の順番は高い周波数から低い周波数へ，各タイプの正弦波10波ずつで加振した．

b) 実験結果および考察

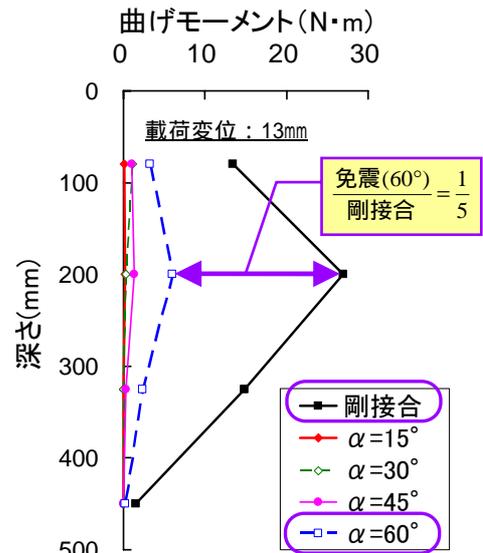


図-7 杭モーメントの深さ方向分布

振動台加振実験の結果分析は，橋脚の慣性力の最も大きい，加振周波数10Hzで振幅800galのケースについて行う．図-9(左)に示すように，剛接合の橋脚天端の加振方向応答加速度約2100gal(両振幅の平均値)に対して，免震デバイス接合の場合は1600gal弱で，約2～3割小さくなった．逆に，図-9(右)の加振直角方向において，デバイス接合の応答加速度の振幅は，剛接合の場合よりも数倍大きい．これは，加振方向の応答の一部がデバイスによって加振直角方向へ転換されたためと考えられる．なお，デバイス接合の加振直角方向の加速度波形に高周波数成分が卓越した原因の一つは，デバイスの上盤が運動する際の滑り球とガイド溝間の衝撃によるものと考えられる．

橋脚天端における加振方向(線路直角方向)の応

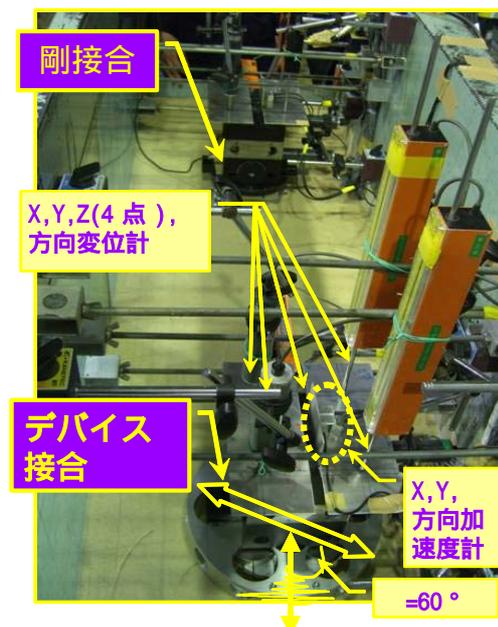


図-8 杭モーメントの深さ方向分布

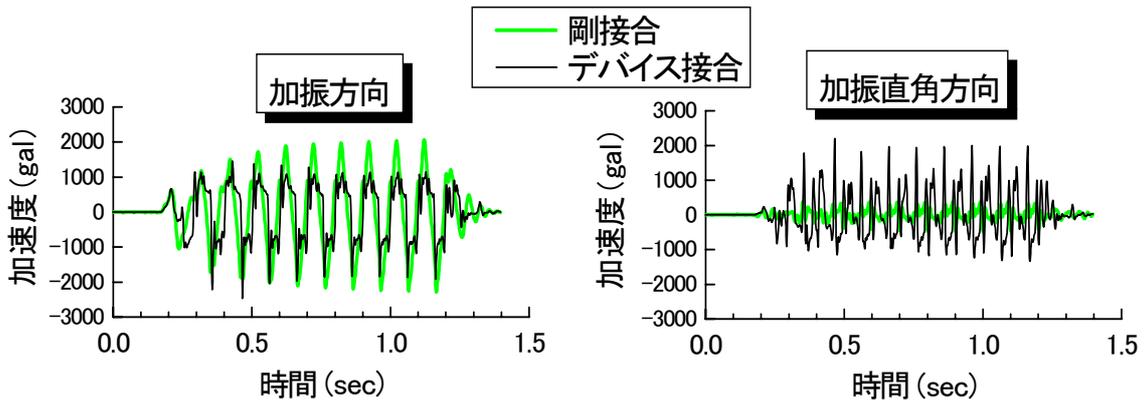


図-9 橋脚載荷点の荷重-変位関係(左：加振方向，右：加振直角方向)

答変位を図-10に，図-9（左）の応答加速度から算出した加振方向の絶対変位を図-11に示す．いずれもデバイス接合の場合は，剛接合の場合より変位振幅が2～3割小さくなっており，列車走行性の改善効果があることが示唆される．なお，これらの変位波形の基準線のずれは，加振の際に二つの模型基礎の振動が土槽両端の壁に拘束され，土槽の中央へ若干傾いた状態による影響である．

図-12に，杭の最大モーメント波形を示す．この図から，デバイス接合のモーメントは剛接合の1/2以下であることが分かる．

振動台実験の結果，提案した滑り系の応答方向転換型免震デバイスは，従来型の杭頭剛接合の場合と比べて，顕著な免震効果と走行安全性の改善が見られた．その理由は，提案した免震デバイスによって上部工慣性力による水平せん断力が大きく低減したためであると考えられる．また，この提案デバイスのもう一つのメリットは加振後の残留変位が小さいことにある．

3．模型実験に対する数値シミュレーション

(1)解析概要

滑り系応答方向転換型免震デバイスの静的と動的載荷実験に対して，幾何学的非線形性を考慮できる3次元数値シミュレーション解析を実施した．応答方向転換角 $=60^\circ$ の免震基礎を用いた構造全体の解析モデル図を図-13に，デバイス上盤（橋脚側）の平面図を図-14に示す．く体および杭は，梁要素でモデル化し，線形弾性体とした．

免震デバイスの応答方向を転換する機能は，載荷方向と 60° で交差する面外方向のばね（例えば，図-14の51番ばね部材）により表現する．これらのばね定数の設定は，免震デバイスだけの静的交番載荷実験の計測データに基づいて行なった．その一例として， $=60^\circ$ 時のデバイスだけの載荷実験と解析

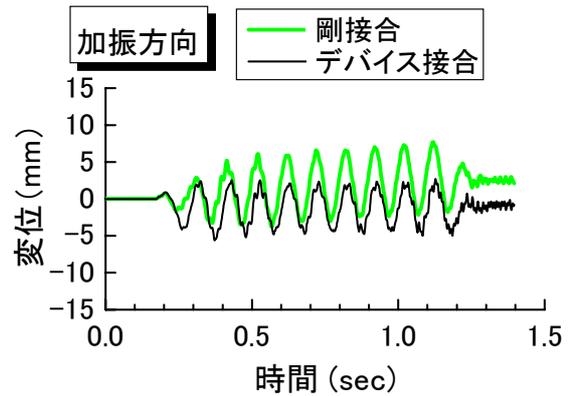


図-10 橋脚天端の加振方向応答変位

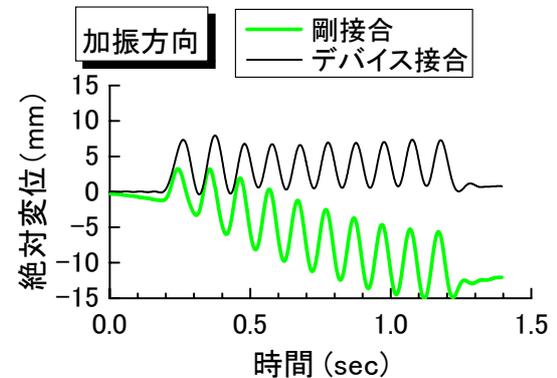


図-11 橋脚天端の加振方向絶対変位

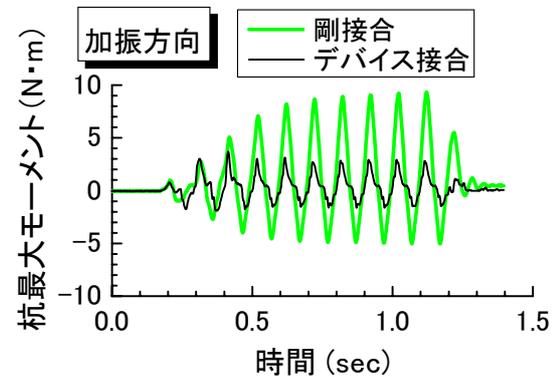


図-12 杭の最大モーメント(GL.-200mm)

結果を図-15に示す。この図から、実験値が解析値と良く一致していることが分る。

地盤支持条件はばね要素でモデル化し、その非線形特性は双曲線モデルあるいはバイリニアモデルを用いて表現した。地盤ばねは、地盤の拘束圧依存性を

を考慮しつつ、剛性および上限値は、杭頭剛接合での模型橋脚の正負交番荷重実験から得られた荷重変位関係を表現できるように設定した。具体的な設定法は次のとおりである。

杭前面の水平ばねには、双曲線モデルを用いた。初期剛性は、地盤の拘束圧依存性を考慮するために、参考文献7), 8)の方法を用いて設定した。上限値は、設計標準¹⁾を参考にして受働土圧のk倍として設定することとし、補正係数kは杭頭剛接合での模型橋脚の正負交番荷重実験の結果と整合するように、 $k=4$ と設定した。

杭周面の鉛直ばねにも双曲線モデルを用いた。初期剛性は地盤の変形係数の倍と仮定し、かつ地盤の変形係数は拘束圧の平方根に比例するものと仮定した。補正係数の値は杭径に依存すると考えられるが、その値は、杭頭剛接合での模型橋脚の実験結果に基づいて定めた。上限値は、別途実施している鉛直貫入試験の結果に基づき設定した。

杭先端の鉛直ばねには、バイリニアモデルを用いた。初期剛性は杭頭剛接合の実験結果に基づいて定めた。上限値は模型橋脚の鉛直貫入試験の結果に基づき設定した。

なお、動的解析に与える減衰は、一次振動モード

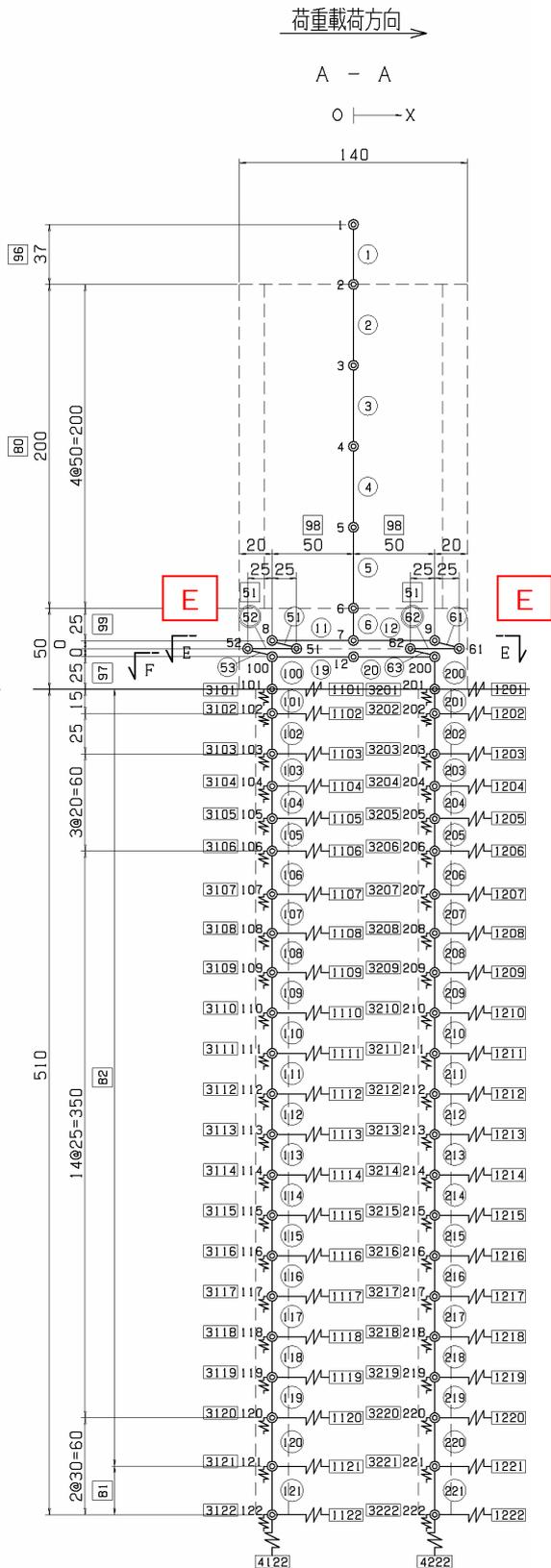


図-13 滑り系免震基礎構造解析モデル

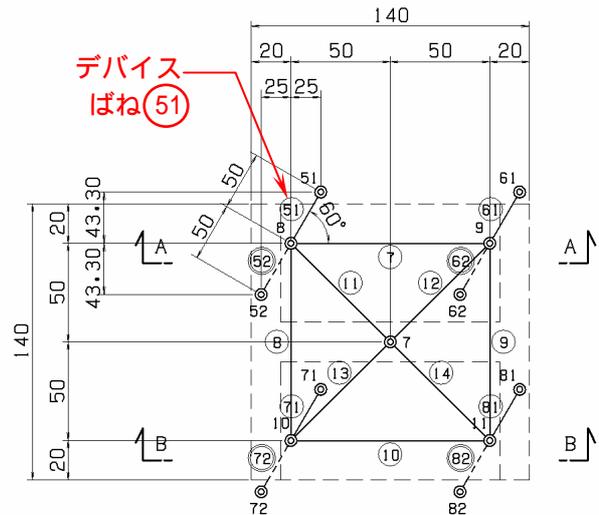


図-14 デバイス上盤の平面図(図-13のE-E断面)

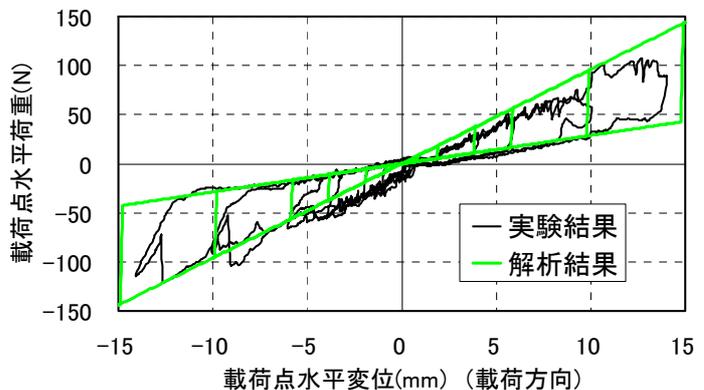


図-15 荷重点荷重 - 変位関係($\theta=60^\circ$)

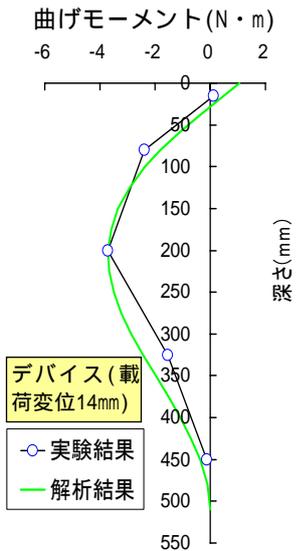


図-16 静的載荷実験と解析結果の比較(押込杭モーメント分布)

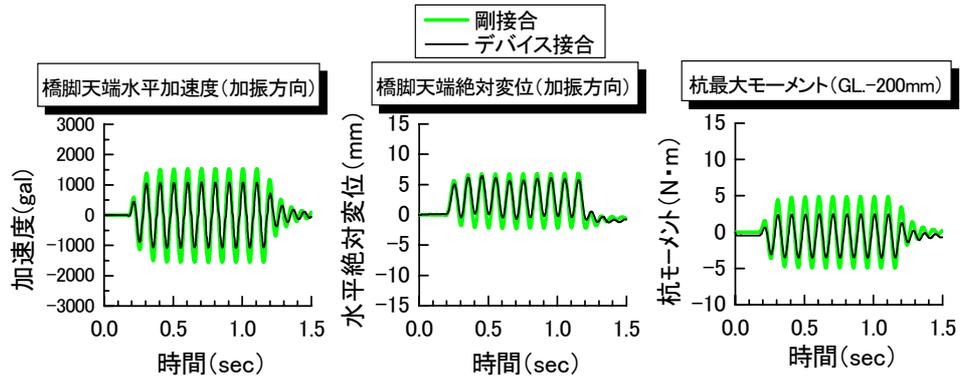


図-17 加振実験の解析結果(左:加速度,中:絶対変位,右:杭モーメント)

に合わせた剛性比例型を用いた。部材の内部減衰定数について、く体および杭部材を1%、免震デバイスを1%、地盤ばねを10%に設定した。

(2)解析結果および考察

図-16に転換角 $\theta = 60^\circ$ の免震デバイスを用いる模型橋脚の静的水平交番載荷実験に対するシミュレーション結果を示す。この図から、杭モーメントの深さ方向分布についての解析結果は実験値とほぼ一致していることが分る。また、図-17に振動台実験のシミュレーション解析結果を示す。これらの図から、模型実験と同程度の免震効果および応答性状を解析で模擬できることが確認できた。

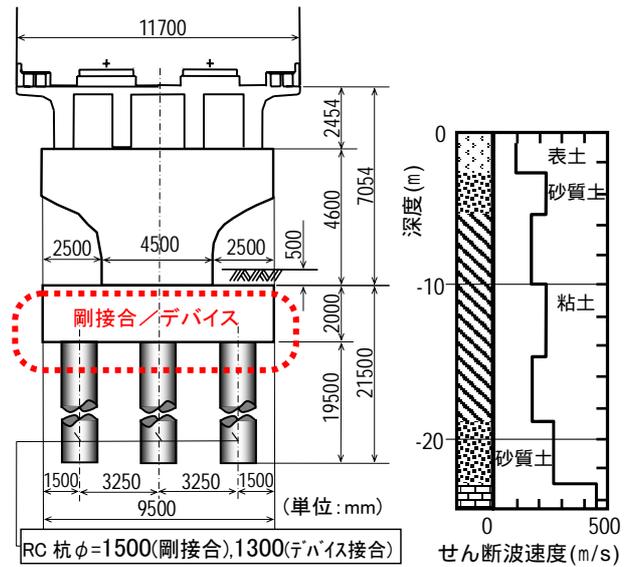


図-18 壁式橋脚構造図と地盤条件

表-1 杭頭断面詳細

杭頭接合	剛接合	デバイス接合
断面		
主鉄筋 (mm ²)	D32-24(@156) 19061	D29-20(@156) 12848
主鉄筋比(%)	1.08	0.97
帯鉄筋	D22-1組@125	D19-1組@125

4. 構造物の解析検討

(1)検討概要

a) 構造物条件

杭基礎を有する鉄道構造物の耐震設計においては多くの場合、杭頭接合部によって断面が決定し、地中部においても同じ杭径を用いるため、杭が大径化し、建設コストの増加の要因となっている。そこで、提案した免震デバイス ($\theta = 60^\circ$) の杭頭免震化による断面縮小効果および列車走行安全性の改善程度について検討を行った。具体的には、鉄道橋脚の設計例をモデルケースとして試設計により検討した。

検討対象構造物は、図-18に示す場所打ちRC杭基礎の壁式橋脚である。橋脚基礎の杭長は19.5mであり、地盤は主に砂質土と粘土から構成されている。この構造条件に対して、杭頭を免震デバイスとし、構造物の耐震性能および列車走行安全性を検討した。杭頭断面詳細を表-1に示す。これらの断面は、いずれも設計標準に定められた所要の耐震性能を満足す

るように最適設計した際の断面である。その結果、剛接合の1500mmに対して、デバイス接合は1300mmとなり、杭径を15%程度、鉄筋量を35%程度縮減することが可能となる。

b) 検討方法

本検討の概要を以下に示す。

対象構造物の上部工と基礎を一体でモデル化

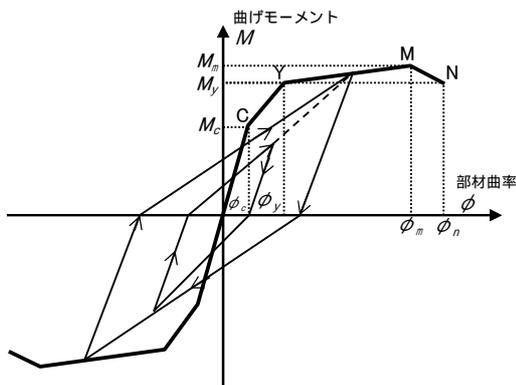


図-19 梁要素の非線形特性モデル

し、プッシュオーバー解析を行い、荷重-変位曲線を作成して構造物全体の耐震性能を調べる。

地震動は耐震標準のL1地震動とL2のスペクトルを用いて、動的解析を行い構造物の応答加速度や変位などを算定する。

プッシュオーバー解析の結果に基づき、動的解析による橋脚天端の応答変位を用いて、部材の損傷レベルや耐震性能を照査する。

動解による橋脚天端の応答加速度を用いて、列車走行安全性に係る変位(角折れとSI)を照査する。

杭頭剛接合は、2次元解析とし、く体と杭を梁要素とした。図-19に梁要素の非線形特性を示す。次に、滑り系免震デバイスを取り付けた構造物は、幾何学的非線形性を考慮できる3次元解析とし、図-13によりモデル化した。なお、橋脚天端の応答が線路直角方向から線路方向への転換する際に、線路方向のレールによる拘束が影響することが考えられるが、その影響を考慮するために、図-20に示すように橋台側に等価的な拘束ばねを設けた。

動的解析は、構造物と地盤の動的相互作用を精度良く評価するために、自由地盤系と構造物系を一体的にモデル化した時刻歴動的解析手法を用いた。自由地盤部は、地層を水平せん断ばね要素でモデル化した。非線形特性については、骨格曲線にR-Oモデル、履歴モデルにMasing則を用いた。ただし、計算の際に自由地盤部が構造物からの挙動の影響を受けないよう、構造物に対して十分な大きさの地盤の質量を持たせることとした。具体的には、自由地盤部の面積をフーチングの面積の100倍として入力した。

また、杭と自由地盤との相互作用は、各杭と自由地盤を水平ばね(相互作用ばね)によって接続することで表現した。相互作用ばねの非線形特性については、耐震設計標準¹⁾に定められているバイリニア型のモデルを用いた。ばねを設定する際の上限值について、水平方向ばねは正負で非対称なモデルとし、振動方向に対しては押し込み杭側と引き抜き杭側が交互に入れ替わることに対応できるようにした。その他、群杭効果に対する補正も考慮した。

なお、減衰については、一次振動モードに合わせ

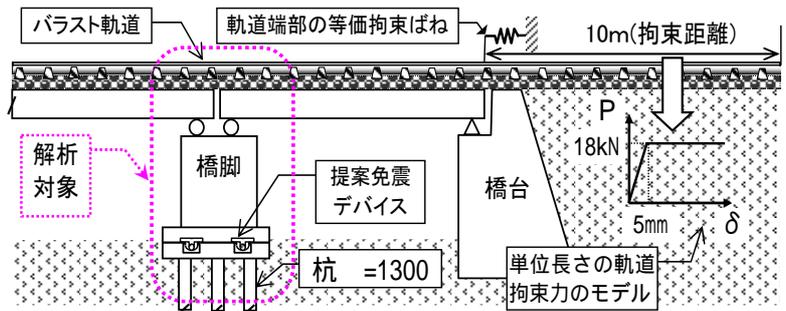


図-20 線路方向の軌道拘束の計算モデル図

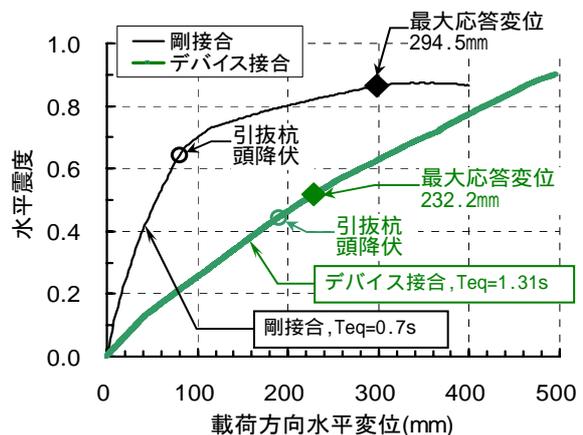


図-21 橋脚天端の荷重-変位関係(載荷方向)

た剛性比例型減衰を用い、部材の内部減衰定数は、く体および杭部材を3%、相互作用ばねを10%、自由地盤ばねを3%に設定した。

(2) 検討結果および考察

a) 耐震性能の照査

図-21に杭頭剛接合または免震デバイス接合を有する構造物のプッシュオーバー解析による橋脚天端の荷重-変位関係の比較を示す。両者とも引張杭頭先行降伏パターンで、降伏震度は剛接合に比べてデバイス接合の場合は3割程度低いものの、いずれもL1地震動に対する設計水平震度($K_h = 0.35$)(G3地盤)は上回っており、L1地震時における耐震性能を満足している。構造物の等価固有周期について、杭頭剛接合の等価固有周期 $T_{eq} = 0.7$ 秒に対して、デバイス接合では1.31秒となった。

図-21には、L2設計地震動スペクトルによる構造物の最大応答変位(剛接合294.5mm、デバイス接合232.2mm)もプロットした。この図から、デバイスの場合は応答方向転換機能によって、最大応答変位と水平震度の両方とも剛接合より大きく低減することが分る。杭体の照査結果を表-2に示す。この表から、引抜側杭頭部の損傷レベルは、杭径の小さいデバイス接合は剛接合と同じレベル2となった。なお、基礎の安定レベルについて、いずれも基礎の応答塑性率は5以下であり、レベル2を満足している。

b) 列車走行安全性に係わる変位の照査

列車走行安全性に係わる変位検討として、L1地震

表-2 L2地震(スペクトル) 応答時における杭の照査結果

杭頭接合	照査部位		応答値			制限値	安全率	損傷レベル
			軸力(kN)	曲げモーメント(kN・m)	曲率φd(1/m)	曲率φm, φcu(1/m)	φd/φm(φcu)	
剛接合(φ1500)	引張側	杭頭部	-6425	-574	-0.0286	-0.0466	0.614	2
		地中部	-6349	661	0.0156	0.0444	0.351	2
	押込側	杭頭部	12453	-5970	-0.0114	-0.0205	0.556	2
		地中部	11892	5819	0.0039	0.0182	0.214	1
デバイス接合(φ1300)	引張側	杭頭部	1447	-1052	-0.0066	-0.0201	0.327	2
		地中部	1910	823	0.0019	0.0184	0.105	1
	押込側	杭頭部	8381	-2142	-0.0023	-0.0192	0.117	1
		地中部	7692	1741	0.0011	0.0184	0.059	1

注：デバイス接合の曲率制限値は転換角度 に基づくベクトルの分解結果である。

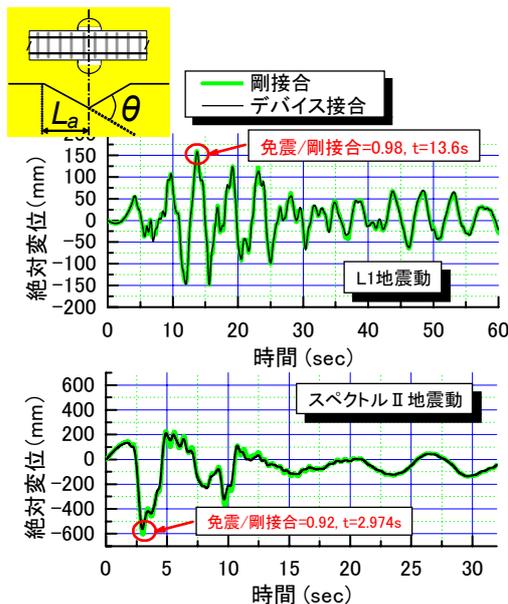


図-22 角折れ照査用の絶対変位の比較

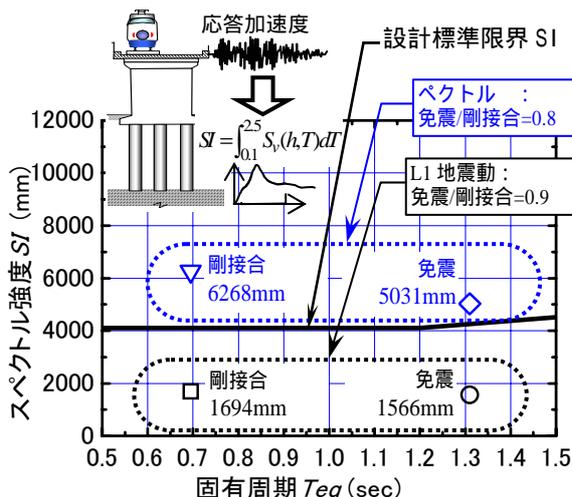


図-23 振動変位照査用のSIの比較

動とL2のスペクトルにおいて、剛接合と免震デバイス接合の場合の橋脚天端の応答加速度から算出した線路直角方向の絶対変位を図-22に、SI(スペクトル強度)を図-23に示す。図-22の角折れ照査用の絶対変位は、L1地震時における免震デバイスと剛接

合のピーク値はほぼ同じであるが、スペクトルの場合では、免震は剛接合より1割程度小さかった。

図-23のL1およびスペクトル地震動におけるSIは、免震デバイス接合の方が剛接合より1~2割程度小さくなった。なお、同図に変位制限標準エラー!参照元が見つかりません。に定められた限界SIも示しており、L1地震時ではいずれの杭頭接合とも制限値を満足していることが分かる。

5. おわりに

本研究は、免震基礎を鉄道分野に適用するために、免震効果と列車走行安全性の両者を満足させる滑り系応答方向転換型免震基礎を提案した。提案した免震基礎のモデルを試作し、静的および動的な模型実験を行い、免震と走行安全性の改善効果を確認した。また、数値計算により、模型実験や実橋脚を対象とした解析を実施し、提案デバイスの性能を把握した。その要点を以下まとめる。

免震デバイスの載荷方向に対する転換角度は15°、30°、45°および60°として、静的繰返し載荷実験を行い、と杭体モーメントおよび変位転換量の関係を調べた。その結果、免震と走行安全性の両面から、=60°が妥当であることが分った。

=60°の滑り系免震デバイスを用いて、振動台実験を行い、免震効果、走行安全性の改善および地震後残留変位など総合的な性能に優れていることを確かめた。

幾何学的非線形性を考慮できる3次元数値計算により、模型実験のシミュレーションと実橋脚を対象とした解析検討を実施した。その結果、提案した免震デバイスによる免震効果と走行安全性改善の効果を確認した。

今後、実用化に向けた課題として、実物大の提案デバイスの特性の把握、施工性、耐久性やコストなどを検討する必要がある。また、提案デバイスの桁

支承部への適用の可能性を検討したいと考えている。

謝辞：数値解析では，中央復建コンサルタンツ(株)の目野豊氏，今村年成氏，本晴彦氏のご協力を得ました．ここに，感謝の意を示します．

参考文献

- 1) 鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計)，(財)鉄道総合技術研究所，1999.10
- 2) 宮本岳史，石田弘明，松尾雅樹：地震時の鉄道車両の挙動解析(上下，左右に振動する軌道上の車両運動シミュレーション)，日本機械学会論文集(C編)，64巻626号，pp.236-243，1998.10
- 3) 鉄道構造物等設計標準・同解説(変位制限)，(財)鉄道総合技術研究所，2006.2
- 4) LUO Xiu：Study on Methodology for Running Safety Assessment of Trains in Seismic Design of Railway Structures, *Journal Soil Dynamics and Earthquake Engineering*; Vol.25, No.2, Elsevier Science Ltd., pp.79-91, Mar. 2005
- 5) 曾我部正道，宮本岳史，松橋宏治，涌井一，松本信之：地震時振動変位の影響を考慮した構造物不同変位の照査法，鉄道総研報告，Vol.20，No.5，pp.5-10，2006.5
- 6) 羅休，宮本岳史：地震時の構造物振動変位に対する列車走行性の照査法，鉄道総研報告，Vol.20，No.12，pp.19-24，2006.12
- 7) 神田政幸，竹村次郎，日下部治：砂地盤中の単杭の p-y 関係のモデル化，土木学会論文集，No.645/III-50，pp.191-207，2001
- 8) 室野剛隆，村上昌彦，畠中仁，棚村史郎：地盤変位を受ける単杭の p-y 関係に関する検討，第11回日本地震工学シンポジウム論文集，CD-ROM，2002

STUDY ON SEISMIC-ISOLATION FOUNDATIONS WITH ABILITY TO CONVERT RESPONSE DIRECTION BASED ON SLIDING ISOLATOR SYSTEM

Xiu LUO and Tomohiro KAWANISHI

Since seismic-isolation foundations generate relatively large displacements adversely affecting the running safety of train during earthquakes, it is an important task to assess this influence and to develop a new type isolation foundation that can secure the running safety of train. In this paper the authors have proposed a seismic-isolation foundation that can convert the response displacement in the lateral direction of track to the longitudinal direction that has less effect to the running safety of train. This new type isolation foundation is composed of FPS (Friction Pendulum System) slider, concave plate and guide ditch. To confirm the behaviors of the proposed isolation foundation, model experiments were conducted under statically and dynamically loading. Moreover, 3-D numerical simulation, which can take the geometrical nonlinearity into account, was applied to explain the situation of the model experiments and real structures installed the foundation. As a result, it is verified that the proposed foundation can keep both the effects of the seismic-isolation and the running safety of train.