

鉄道構造物の免震化に関する軌道構造との動的相互作用

岩田秀治¹・村田清満²・家村浩和³・大塚隆人⁴

¹正会員 ジェイアール東海コンサルタンツ(株)土木設計部：J R東海より出向中（〒460-0008 名古屋市中区栄2-5-1）

²正会員 工博（財）鉄道総合技術研究所 鋼・複合構造 研究室長（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）

³フェロー 工博 京都大学教授 大学院工学研究科土木システム工学専攻（〒606-8501 京都市左京区吉田本町）

⁴学生会員 京都大学 大学院工学研究科土木システム工学専攻 修士課程（ 同上 ）

1. はじめに

平成7年1月17日に発生した阪神・淡路大震災における鉄道構造物などの被害を教訓として、都市直下型地震動に対応した新しい耐震設計基準が、平成10年12月に「鉄道構造物等設計標準（耐震設計）」¹⁾（以下、耐震標準）として旧運輸省から通達され、これにより、鉄道構造物の耐震設計に関する考え方が体系化された。

この新しい耐震設計は、表層地盤の性状を、より現実に近い形で考慮するとともに、構造物の変形性能・粘りを重視し、構造物の安全性については、その耐震性能を照査する新しい形の設計法となっている。

鉄道橋では、従来から構造系にゴム支承・ダンパーなど免震効果のあるものを使用してきたが、現在まで基準規定類には明確に「免震設計」という記述がなく、地震の揺れに「耐える」設計から揺れを「免れる」設計思想は、今回の耐震標準の解説に初めて記述された。その耐震標準の通達を受けて、今後、具体的な形で明確に取り入れていくための研究が、急務となっている。

しかし、鉄道橋では、列車走行安定性の確保のため、常時および1地震動時において構造物での変位制限があることや、また、従来の固定・可動の橋梁構造ではあまり問題にならなかった地震時の軌道構造の拘束力が、柔らかく橋桁などを支持する免震構造に与える影響など、地震時の軌道-構造系の相互動的作用の評価に関して、阪神・淡路大震災後、建築構造物・道路橋等で採用されている免震設計と比較して、解決しなくてはならない鉄道固有の問題がいくつかあると言える^{1), 2), 3)}。

以下、鉄道橋の免震構造化に関し、地震時の軌道構造の拘束力と構造系の相互作用メカニズムの検証を行うべく、鉄道免震構造上にバラスト軌道を布設した試験模型

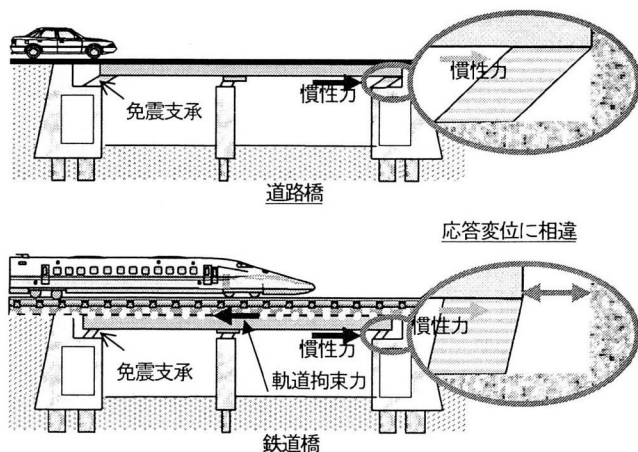
体による振動台実験などについて報告する。

2. 鉄道橋への免震構造化の取り組み

鉄道橋では、国鉄時代からゴム支承が現在のような硫化ゴム板と鋼板を接着させる形式になった頃より、ゴム支承の利点に着目し各種試験を行い、早くは1961年に東北本線鬼怒川PC連続橋梁などの大規模橋梁にも採用しているが、今回、鋼鉄道橋へのゴム支承の適用の拡大を図るとともに、「地震時の水平力分散設計」と「免震設計」と区別し、当面、以下に示すような基本的に水平力分散設計を主体とした考え方で設計を行うこととしている。

- ① ゴム支承とダンパー式ストッパーによる水平力分散設計
- ② 積層ゴム支承（RB）のせん断変形による水平力分散設計
- ③ 鉛プラグ入り積層ゴム支承（LRB）・高減衰積層ゴム支承（HDR）等の免震支承による水平力分散設計
 - ・ 長周期化と減衰性能による地震時の水平力の低減は行わない。当面、支承の免震性能は設計上の余裕代として考える
- ④ 免震支承等を用いる免震設計
 - ・ 免震設計の採用を制限はしないが、減衰定数など材料特性に対する信頼性の確認等、特別な検討を行うこととする

また、鋼鉄道橋では、「鉄道構造物等設計標準・同解説（鋼・合成構造物）平成4年10月」³⁾において、一般にゴム支承の適用はスパン30m以下のプレートガーダーおよび合成桁を原則としていた。ここでいうゴム支承



図一 鉄道免震構造の軌道の影響

とは、重層ゴム支承（フレッシュパット）で一体成型型でなくゴム層が3層までの層厚48mm以下のものを示す。

しかし、今後、積層ゴム支承や、鉛プラグ入り積層ゴム支承・高減衰積層ゴム支承など免震支承の利用に対し、十分な支圧強度およびせん断強度を持った一体成型型のゴム支承を用い、列車走行安定性・乗り心地、たわみ限度値等の制限、滑り・回転等の安定した品質と耐久性を有する支承材料及び、保守作業を考慮した設備を含む細目などを満たせば、その鋼鉄道橋への適用を拡大して良いこととしている^{8)～14)}。

3. 軌道-構造系の動的相互作用の振動台実験

(1) 実験目的など

本格的な鉄道橋の免震構造化には、①常時・L1地震時における列車走行安定性を、合理的に如何に確保するかと、②軌道-構造系の動的相互作用の影響の解明が必要である。特に、軌道構造の動的挙動は、その拘束力により地震時の構造物の振動数や応答変位に影響を及ぼし、正確な耐震性能の評価を左右させるものである(図-1)。

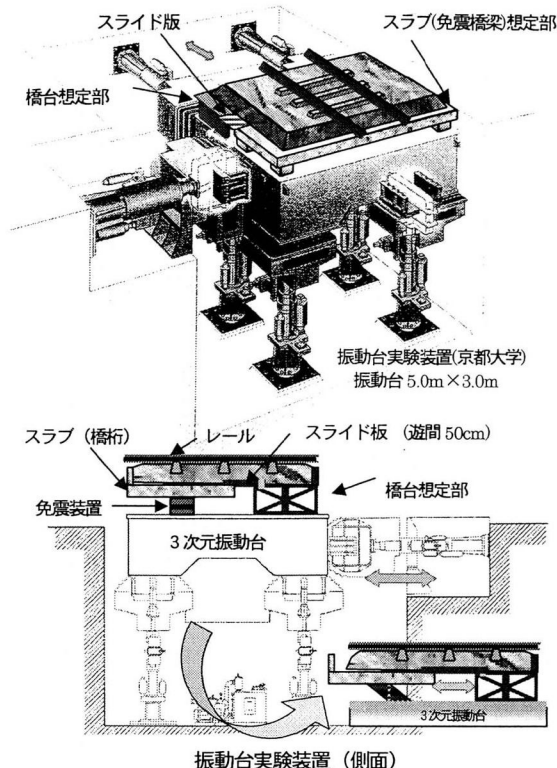
そこで今回、軌道構造の拘束力と免震構造物の相互作用のメカニズムの検証を目的とし実験を行うこととなった。しかし、そのメカニズムは、速度依存性、摩擦依存性などの関連が大きいため、静的な載荷実験では検証しきれないことも多い。そのため、今回、地震動等を直接入力できる振動台実験装置を用いた実験を行った。

(2) 振動台実験装置

本実験は、京都大学防災研究所内にある大規模強震応答実験装置（振動台実験装置）を用いて、実験を行った(図-2)。

実験装置の諸元は、以下のとおりである。なお、各値は振動台テーブルの上載荷重が15t時のものである。

- ・ 振動台テーブル（3次元6自由度）5.0m×3.0m



図二 鉄道免震の軌道の動的相互作用実験

- ・ 最大変位 x方向: $\pm 300\text{mm}$, y方向: $\pm 250\text{mm}$, z方向: $\pm 200\text{mm}$
- ・ 入力最大加速度 x, y, z方向: 1.0G
- ・ 加振周波数 20Hz まで

(3) 試験体

試験体は、免震鉄道橋の橋桁端部をモデル化し、橋台部と免震部を模し、軌道の拘束力は、橋台部と免震橋部分の相対変位に影響を与えるようにしている(図-3)。

a) 橋台部

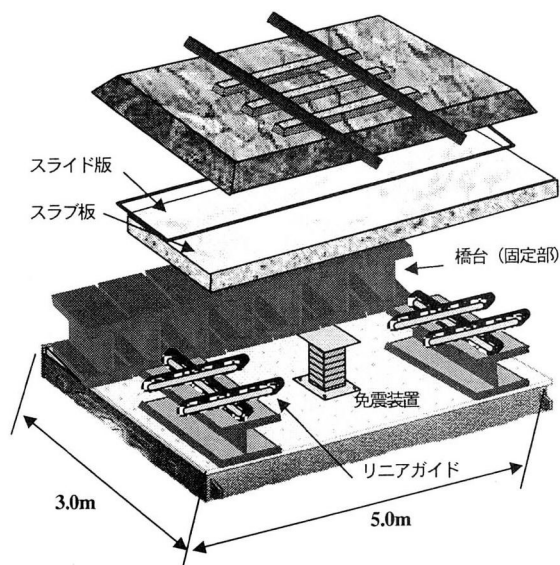
橋台部は、長さ1.0m×幅5.0m×高さ0.55mの鋼製で、振動台テーブルと同じ挙動をするよう高い剛性を持つ設計としている。

b) 免震部

免震部は、1.5m×5.0m×0.20mのRCスラブ板（コンクリート呼び強度: 50N/mm^2 ）を免震支承1箇所とリニアガイド2箇所で支持する構造である。通常であれば、免震支承で4点支持とするところであるが、本試験体で軌道の拘束力を考慮しない場合での固有周期2.0秒を確保するためのものである。

また、橋台部との遊間は50.0cmを設けており、その箇所には鋼製スライド板（ $t=9\text{mm}$ ）により変位に追随している。

免震支承は、 $\square 180\text{mm} \times 180\text{mm}$ 、高さ290.7mm、ゴム厚6mm×30層、内部鋼板2.3mm×29枚の鉛プラグ入り積層ゴム支承（LRB：鉛プラグ $\phi 40$ 、せん断弾



図一 3 試験体

性係数： $G = 4 \text{ kgf/cm}^2$ ）と、同寸法の積層ゴム支承（RB）を用いた。なお、各々の等価水平剛性は同値（ 7.6 tf/m ）としてあり、減衰有り（等価減衰定数 20.4%）と減衰無しの実験ケースを想定したものである。

c) 軌道構造

軌道構造は、最も施工延長の多いバラスト軌道を採用し、実物大モデルと 1/2 縮小モデルとで実験を行った。

実物大の軌道モデルは、東海道新幹線のバラスト軌道と同じものを用い（60 レール軌道）、1/2 縮小軌道モデルは、実物大モデルを 1/2 縮小したものである（15kg レール軌道）。

道床バラスト厚は、実物大軌道モデルで 25cm とし、1/2 縮小モデルは 12.5cm で、バラストの粒度分布も実物大の 1/2 を模した。

なお、振動台実験装置の制約上、全試験体総重量を 15.0 t 以下としている

(4) 実験方法

実験方法は、振動台テーブル上に試験体を組上げ、加力させるもので、図一 4 に示すように各部位の影響を把握するため、

① 予備実験

（無上載と試験体相当重量：15t 上載の 2 パターン）、

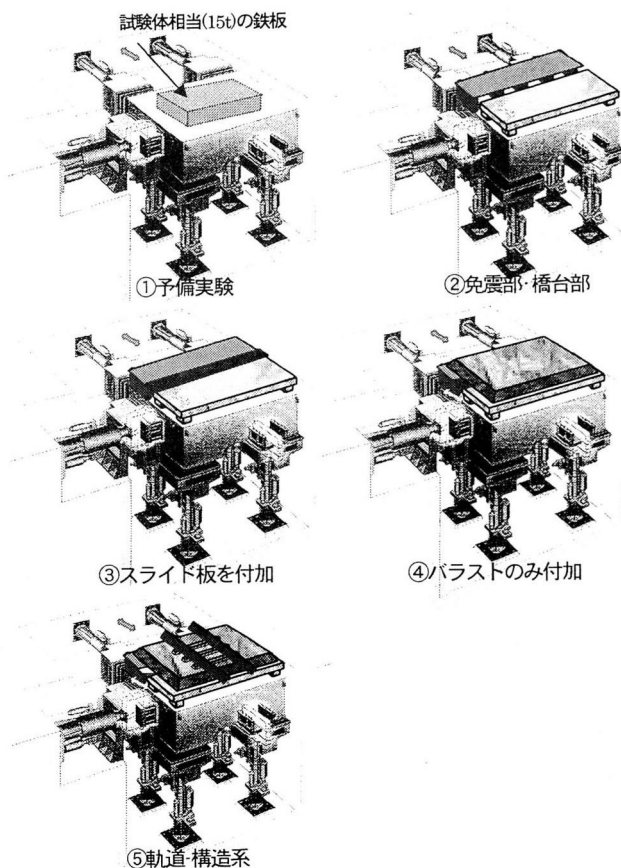
② 免震部・橋台部（スライド板無し）、

③ 免震部・橋台部（スライド板有り）、

④ バラスト・構造系（レール・マクラギ無し）、

⑤ 軌道・構造系（構造全体系）

と、順次試験体を組上げながら、軌道構造の有無、スライド板の影響などが把握できるように行った。



図一 4 各段階の実験方法

(5) 実験ケース

図一 4 に示した各段階で、次に示す項目を組合せ、実験を行った（写真一 1～6）。なお、実験は 207 ケース行っている。

a) 免震・非免震

非免震は免震支承をロックさせた状態で行っており、免震・非免震の相違を把握するため行った。

b) 減衰・非減衰

免震支承の鉛プラグ入り積層ゴム支承（LRB）の減衰有りを基本とするが、軌道の拘束力による摩擦減衰力の比較等のため、積層ゴム支承（RB）での非減衰状態でも行った。

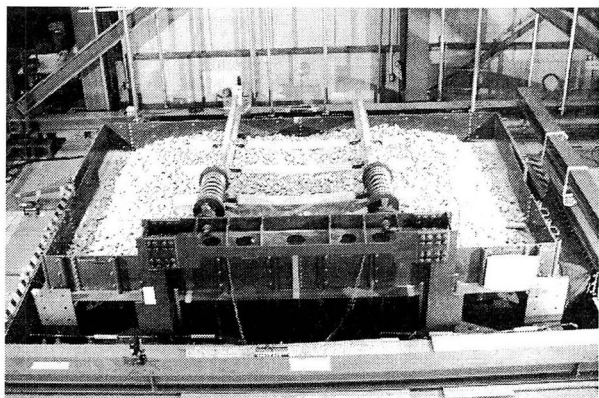
c) 軌道の固定方法

本実験装置では、延々と続くレールを直接的に模しできない。そのため、レールの固定方法を①フリー、②バネ固定（バネ 3 種類）、③固定の 5 パターン行った。

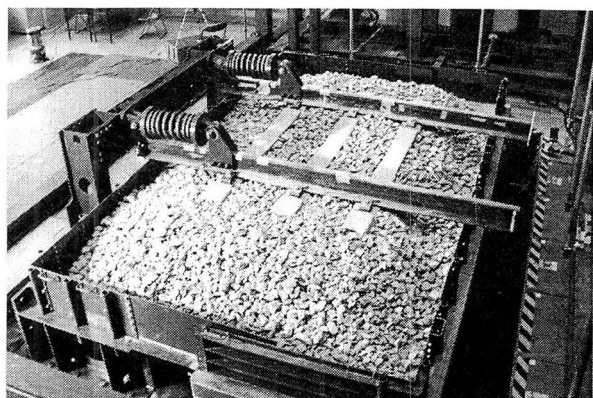
これらより、実際の軌道・構造系の相互作用としての拘束力を想定、また、解析上での境界条件の設定を考慮したものである。

なお、レールバネ固定に用いたバネ定数は、バネ①：149.0kg/mm、バネ②：73.4kg/mm、バネ③：36.2kg/mm である。

バネ①は、バラスト軌道が健全な状態の道床縦抵抗

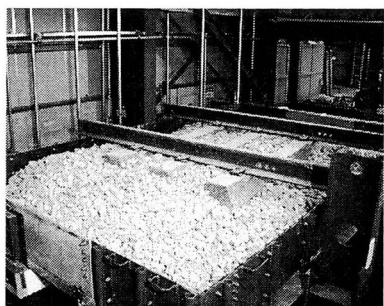


試験体正面から

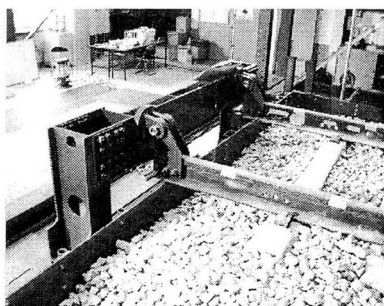


試験体側面から

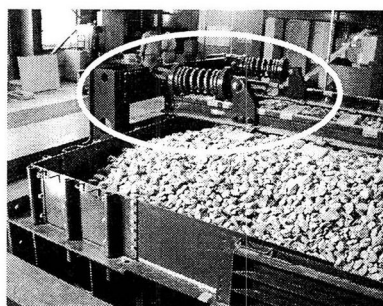
写真一 実験装置および試験体（実物大軌道上載，レールバネ固定時）



レールフリー

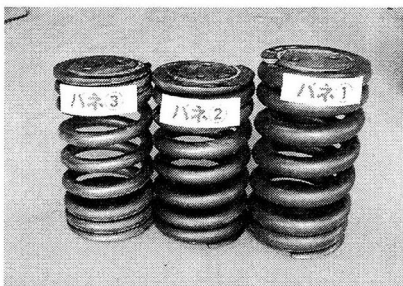


レール固定

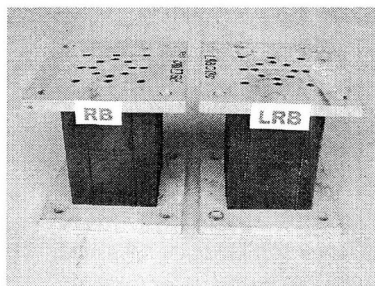


レールバネ固定

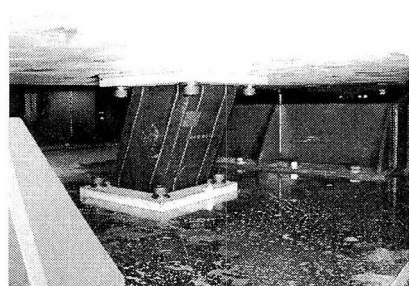
写真二 レール固定状況（実物大軌道上載時）



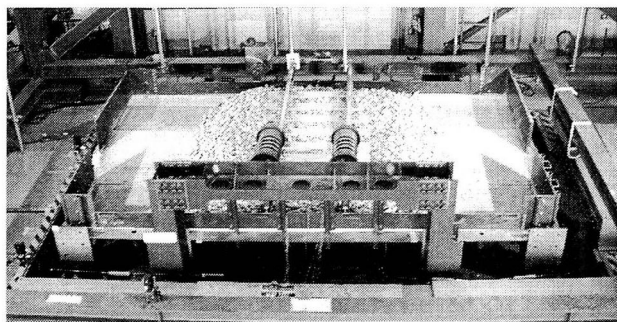
写真三 3種類のパネ



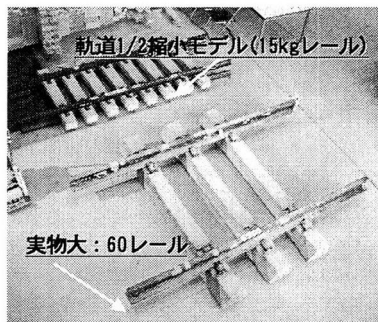
写真四 免震支承



写真五 免震支承の変形状況



写真六 軌道 1/2 縮小モデル



より算出し、バネ②・バネ③は、地震時のバラストの剛性低下を想定してバネ①のバネ定数を 1/2, 1/4 に低減したものである。

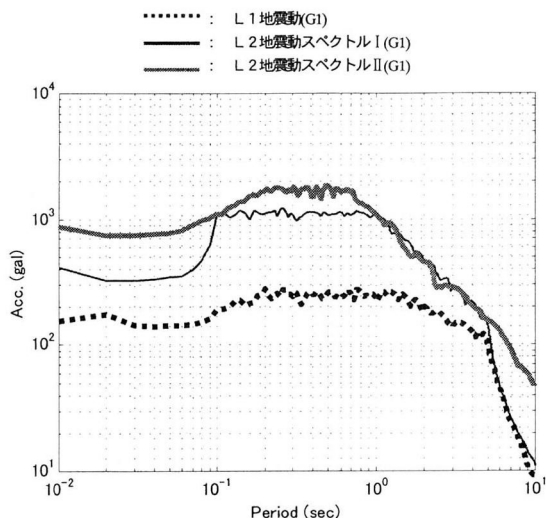
d) バラスト軌道スケール

軌道構造は、実物大と 1/2 縮小モデルを用い、境界条

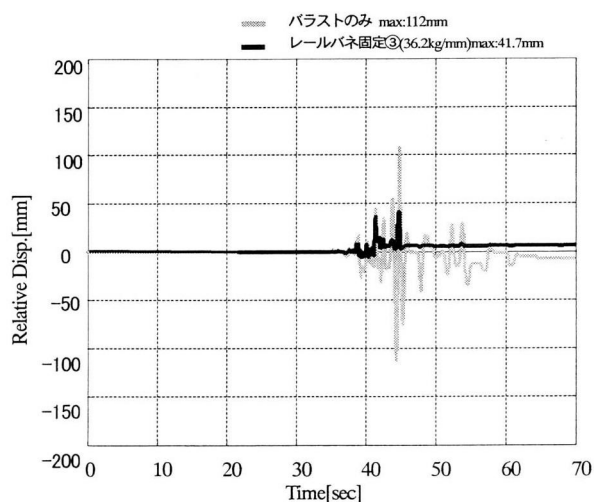
件設定、橋梁全体解析上の橋梁重量の相違による検証等を考慮したものである。

e) 加力ケース

加力ケースは、以下に示す地震波を用い、また、試験体の周波数特性を把握するため、Sweep Test (sin 波：



図一五 入力地震動の弾性応答加速度スペクトル



図一七 実験結果 (L 2-I : バラストのみーバネ固定③)

振幅一定、周波数変化) も行った。図一五は、L 1 地震動 (G 1), L 2 地震動スペクトル I (G 1), L 2 地震動スペクトル II の弾性加速度応答スペクトルを示す。

○ 鉄道用想定地震動 入力波¹⁾

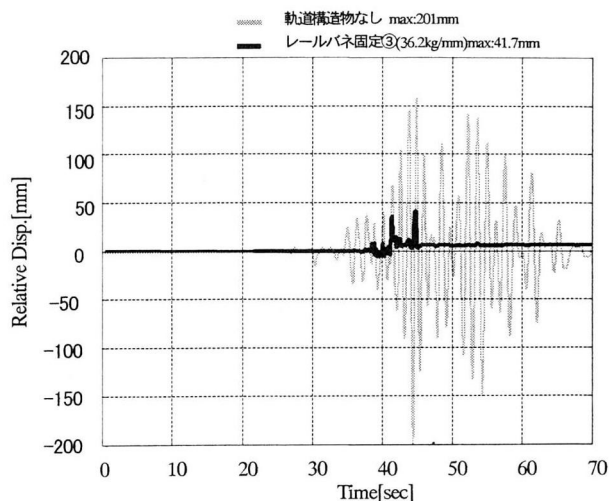
- ・ L 1 地震動 G 1 : 137.0gal, G 5 : 198.6gal
- ・ L 2 地震動 (スペクトル I)
 - G 1 : 322.0gal, G 4 : 458.1gal
- ・ L 2 地震動 (スペクトル II)
 - G 1 : 749.6gal, G 2 : 870.8gal

入力方向は、橋軸方向を主とし、橋軸直角方向、2 方向入力も行っている。

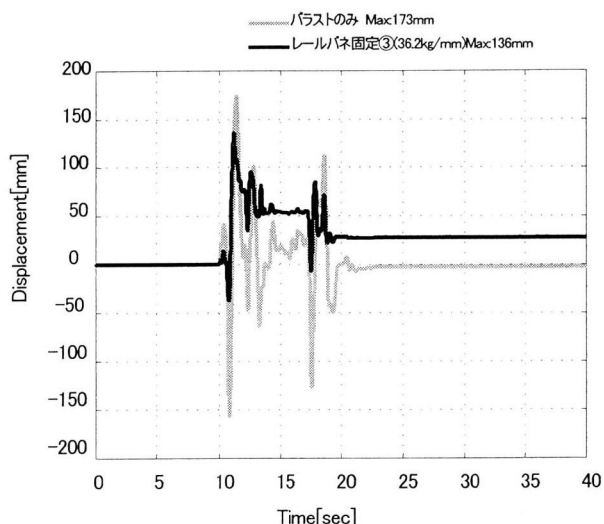
4. 実験結果

主な、実験結果を図一六、七、八に示す。

図一六は、L 2 地震動 (スペクトル I - G 1 : 322.0gal)



図一六 実験結果 (L 2-I : 軌道なしーバネ固定③)



図一八 実験結果 (L 2-II : バラストのみーバネ固定③)

入力時の軌道構造物無しのケースとレールバネ③固定のケースの橋台部と免震部との相対応答変位を示す。各々の応答変位の差が、軌道構造物の有無による影響を示している。

図一七は、L 2 地震動 (スペクトル I - G 1 : 322.0gal) 入力時のバラストのみ (レール・マクラギ無し) のケースとレールバネ③固定のケースの橋台部と免震部との相対応答変位を示す。各々の応答変位の差が軌道構造物の拘束効果を示している。

図一八は、L 2 地震動 (スペクトル II - G 1 : 749.6gal) 入力時のバラストのみ (レール・マクラギ無し) のケースとレールバネ③固定のケースの橋台部と免震部との相対応答変位を示す。各々の応答変位の差が軌道構造物の拘束効果を示している。また、本ケースは約 30mm 程度の残留変位が生じている。

5. あとがき

本振動台実験の結果から、非線形動的解析に用いる軌道－構造系の相互作用モデルの考案を行う予定である。

今回の報告は、振動台実験および実験結果の速報的なもので、解析結果も提示しておらず、今後、早急にデータの整理を終了させ、軌道－構造系の相互作用モデルの考案、そのモデルを用いた実橋梁の解析等を行いたい。

軌道構造の影響を含めて、理想的な鉄道橋の免震構造化には、まだ解明しなくてはならない課題もあるが、今後、研究・検討を重ね、免震鉄道橋が本格的に採用できるよう、鉄道構造物の耐震性能の向上・高性能化に努めたい。

謝辞：本振動台実験を行う際し、多くの方々にご支援、ご協力を頂きました。ここに深く感謝の意を称します。

参考文献

- 1) 鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計），運輸省鉄道局監修，（財）鉄道総合技術研究所編，平成11年10月
- 2) 鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物），運輸省鉄道局監修，（財）鉄道総合技術研究所編，平成4年10月
- 3) 鉄道構造物等設計標準・同解説（鋼・合成構造物），運輸省鉄道局監修，（財）鉄道総合技術研究所編，平成4年10月
- 4) 橋田敏之，菊池一成ほか：コンクリート桁用ゴムシューの設計および試験，構造物設計資料，国鉄構造物設計事務所監修 No. 57 pp. 2～7 1979. 3
- 5) 市川篤司，武友憲重：鋼桁用ゴム支承の試験，構造物設計資料，国鉄構造物設計事務所監修 No. 75 pp. 24～27 1983. 9
- 6) 井口光雄，加地孝敏：鋼鉄道橋へのLRB支承の適用について，土木学会第45回年次学術講演会 I-292 pp. 614～615 1990. 9
- 7) 奥田 庸，佐藤哲也ほか：北総線，都計道3・4・20架道橋の設計と施工，橋梁と基礎24巻12号 pp. 13～22 1990. 12
- 8) 保坂鐵矢：免震支承と柔ジベルを用いた部分合成鉄道橋，土木技術48巻11号 pp. 43～51 1993. 11
- 9) 保坂鐵矢，鈴木明雄：鉄道橋で用いた免震・分散支承および特殊ゴム支承，土木学会第51回年次学術講演会 I-A288 pp. 576～577 1996. 9
- 10) 保坂鐵矢，中川俊隆ほか：鋼鉄道橋の折れ角を模したゴムシューの回転疲労試験，土木学会第51回年次学術講演会 I-A289 pp. 578～579 1996. 9
- 11) 保坂鐵矢，中川俊隆ほか：鋼鉄道橋の列車載荷を模したゴム支承の疲労試験，土木学会第52回年次学術講演会 I-A297 pp. 592～593 1997. 9
- 12) 光木 香，保坂鐵矢ほか：ゴム支承を用いた連続合成桁の高速車両走行性に関する研究，土木学会第52回年次学術講演会 I-B226 pp. 452～453 1997. 9
- 13) 保坂鐵矢，市川篤司ほか：鋼鉄道橋に使用するゴム支承の実験研究，第44回構造工学シンポジウム 構造工学論文集 vol. 44A pp. 1153～1162 1998. 3
- 14) 島川 徹，青木利昭，岩田秀治：2径間連続下路トラス鉄道橋におけるゴム支承を用いた水平力分散設計－JR飯田線久米川橋梁－，土木学会第53回年次学術講演会 I-A59 pp. 118～119 1998. 10
- 15) 永尾拓洋，岩田秀治，渡辺典男：水平力分散ゴム支承(LRB)を用いた鉄道橋(2径間連続H形鋼埋込桁)の設計について，土木学会第53回年次学術講演会 I-B152 pp. 304～305 1998. 10
- 16) 岩田秀治，市川篤司，保坂鐵矢：鉄道橋の免震構造化の取り組みと課題，土木学会 地震工学委員会 減震・免震・制震小委員会「橋梁と地下構造物の免震・制震」講習会，pp. 181～190 1999. 5
- 17) Shuji IWATA, Hirokazu IEMURA, Kazuhiko KAWASHIMA, Kiyomitsu MURATA, Seismic design and seismic isolation of railway structures in Japan, Second International Workshop on Mitigation of Seismic Effects on Transportation Structures, 2000.9