バラスト軌道を有する鉄道免震構造の動特性に関する振動台実験（その1）

京都大学大学院　学生員　○川村 崇成
京都大学工学研究科　フェロー　家村 浩和
鉄道総合技術研究所　正会員　池田 学

1. 概要

鉄道構造物の免震設計法を確立するためには、解決すべきいくつかの鉄道固有の問題が存在する。本研究では、その中から軌道-構造系の動的相互作用の影響に着目し、バラスト軌道を有する鉄道免震構造の動特性を把握するため、実大軌道を用いた免震構造の振動台実験を行った。ここでは、線路方向に着目し、実験結果から軌道構造各部の動的挙動を解明して、バラスト及び軌きょう（レール・マクラギ・締結装置）構造とその動的拘束力との関係を示した。

2. 実験供試体

実験供試体を**図1**に示す。本供試体はバラスト軌道を有する実大軌道において、実橋梁における橋台と免震橋梁との境界部分を模擬したものである。供試体は橋台部・免震橋梁部・スライド板・バラスト・軌きょう（レール・マクラギ・締結装置）・橋梁部の荷重を支持するリニアガイド及び免震支承からなる。スライド板は橋台部に固定され、免震橋梁部上を滑る構造となっている。免震支承にはLRBを用いた。また、レールの固定方法としては、レールを橋台部に固定した状態と、バネによって固定した状態での加振実験を行った。

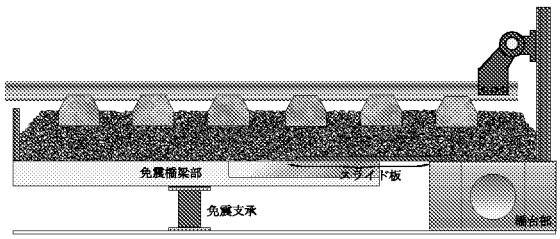

図1　実験供試体断面図

3. 実験ステップ及び入力地震動

本研究では、線路方向及び線路直角方向の加振実験を軌道構造を組上げながら行い、またマクラギの締結本数を変化させて各部位の挙動と応答への影響を検証した。また、入力地震動として、「鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計」[1]に記載の基盤地震動波形3種（L1地震動適合波・L2地震動スペクトルⅠ適合波・L2地震動スペクトルⅡ適合波）を用いた。各実験ステップを**表1**に示す。なお、本論文では線路方向についての実験結果についての検討を述べる。

表1　実験ステップ

実験ステップ	実験供試体	L1 max:137gal		L2-Ⅰ max:321.9gal		L2-Ⅱ max:749.6gal	
		L方向	C方向	L方向	C方向	L方向	C方向
予備実験	無上載	○	○	○	○	○	○
実験ステップ1	橋台部と免震橋梁部	○	○	○	○		
実験ステップ2	スライド板設置	○	○	○	○		
実験ステップ3	バラスト上載	○	○	○	○	○	○
実験ステップ4	軌きょう設置(マクラギ3本締結)	○		○	○	○	○
実験ステップ5	軌きょう設置(マクラギ4本締結)	○		○		○	○
実験ステップ6	軌きょう設置(マクラギ5本締結)	○		○		○	○
実験ステップ7	軌きょう設置(マクラギ6本締結)	○	○	○	○	○	○

4. 実験結果（線路方向）

加振時の様子を以下に示す。L1入力時では、バラスト上載により橋台部と免震橋梁部とが相対的に変形する挙動はなくなり、軌きょう上載後はほぼ一体となって動いた。L2-Ⅰ入力時では、実験ステップ4までは橋台部と免震橋梁部の間に相対変位が生じていたが、ステップ5以降では相対変位は生じず、ほぼ一体となって動いていた。また、L1・L2-Ⅰ入力時とも、バラストの崩れは少なかった。L2-Ⅱ入力時では、相対変位が大きく現れ、また軌道の端のバラストが激しく崩れた。次のページにL2-Ⅱ入力時の免震支承の相対変位について、実験ステップ3、4、7の比較（それぞれMax:188mm、144.8mm、54.4mm）を**図2**に示す。軌きょう上載及びマクラギ締結本数を増やすことにより、負の相対変位がなくなり、また全体の相対変位も小さくなっている。ただし、相対変位は橋台部と免震橋梁部とが離れる向きを正としている。

線路方向の挙動において、変位応答にはバラストや軌きょう構造の影響が大きく現れていた。また加速度応答には大きな影響はなかったが、実験ステップ4～7までわずかに応答が増加していた。

Key Words: バラスト軌道, 鉄道免震構造化, 軌道拘束力, 振動台実験
〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町 tel.(075)753-5088 fax.(075)753-5926

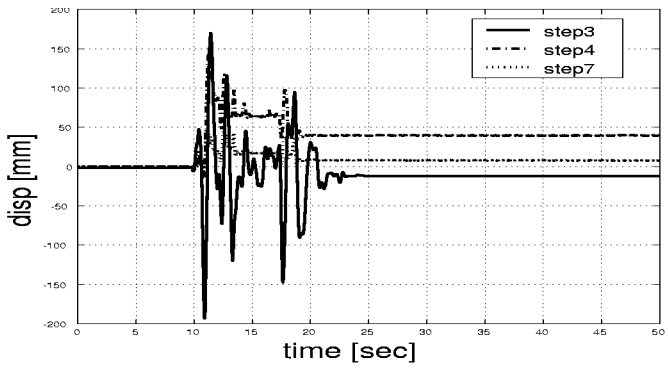

図２　L2-Ⅱ 線路方向の相対変位

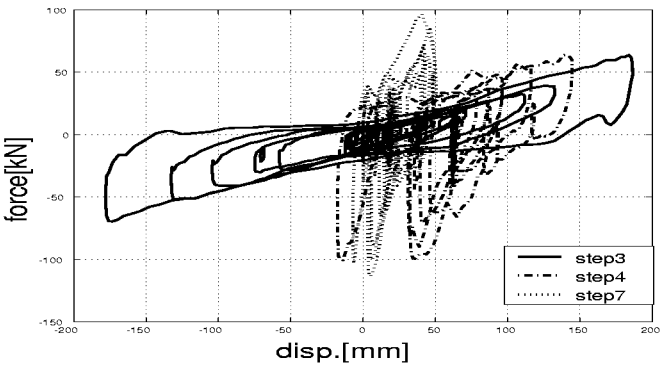

図３　L2-Ⅱ 線路方向の履歴曲線

5.　実験結果の解析と考察

地震波入力による振動台実験では、軌道の拘束力を直接計測することは困難である。そこで、実験での計測加速度から免震橋梁部に作用する力を算出し、比較を行った。まず、実験供試体を免震橋梁部の１質点系にモデル化すると、以下の運動方程式が成り立つと考えられる。ここで、比較しやすくするため、免震橋梁部上のレール・バラストは全体の3/5、マクラギは４本分、として免震橋梁部の質量に加えている。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + F(x) = -m\ddot{x}_g \qquad (1)$$

m ： 免震橋梁部の質量

c ： 減衰係数

$F(x)$ ： 免震橋梁部に作用する力

$x, \dot{x}, \ddot{x}$ ： 相対変位、相対速度、相対加速度

$\ddot{x}_g$ ： 入力加速度

表２　免震橋梁部質量

実験Step	バラスト	マクラギ	締結装置	レール	免震橋梁部質量
3	5472kg	-	-	-	8561.18kg
4	5472kg	1147.5kg	10.8kg	425.6kg	10145.08kg
7	5472kg	1147.5kg	10.8kg	425.6kg	10145.08kg

スライド板:144.5kg、鋼製スラブ版:2442kg、バラスト止め:502.68kg

式 (1) において、減衰係数 c は小さく $c\dot{x}$ の項の影響は微小なので、免震橋梁部の絶対加速度（応答加速度）を $\ddot{x}_a$ とすると、免震橋梁部に作用する力 $F(x)$ は以下の式で表される。

$$F(x) = -m(\ddot{x} + \ddot{x}_g) = -m\ddot{x}_a \qquad (2)$$

式 (2) を用いて算出した履歴曲線（L2-Ⅱ入力時）を**図３**に示す。図２および図３から、まず軌きょうを上載することにより負の相対変位がほとんど生じなくなり、加振後に残留変位が現れていることがわかる。また、マクラギの締結本数が増えるにつれて相対変位は小さくなり、同時に免震橋梁部に作用する力は大きくなっていることがわかる。

軌きょうを上載すると、バラスト内での摩擦力が大きくなることによりバラストの流動性が低下する。そして免震橋梁部が正の方向に動いた際にできた隙間をバラストが埋めることにより残留変位が現れると考えられる。また、特に負の方向の相対変位については、バラストやマクラギが免震橋梁部と橋台部の間でくさびのような働きをして大きな拘束力となった結果であると考えられる。

また、マクラギの締結本数を増やすと、免震橋梁部上のバラストにおいても軌きょう構造によって水平方向の拘束力が生じ、全体の拘束力はより大きくなる。さらにバラストの流動性が低下し、相対変位が減少していったものと考えられる。また、相対変位が小さくなる一方で免震橋梁部に作用する力は大きくなっていることについては、軌きょう構造による拘束力の増加によって橋台部と免震橋梁部とが固定化され、構造が非免震化されていったことによる、と考えられる。

6.　今後の課題

本論文では、鉄道構造の免震化に向けての振動台実験における線路方向の実験結果について述べた。この実験結果を踏まえて、鉄道免震構造に関するモデル化の精度を向上させ、鉄道構造の免震設計法を確立させていくことが、今後の課題である。

なお、本実験の実施に際してはJR東海岩田秀治氏に大変お世話になりました。ここに記して謝意を表する次第です。

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, 1999.10