

## 大規模地震時における 有道床軌道の耐震性評価



熊倉 孝雄\*



石井 秀明\*\*



小西 俊之\*\*\*

大規模地震が発生した場合、現場点検で外観上に異常が認められなくても有道床軌道における道床の緩みが懸念されるため、ロングレールのふく進検査や道床横抵抗力の測定作業が必要となり、運転再開の判断まで多大な労力と時間を必要としている。そこで本研究では、有道床軌道における耐震性能を定量的に評価することを目的として、振動台試験装置に実物大軌道を敷設し、振動加速度、加振周波数を変化させて加振による道床バラストの挙動の観察や道床横抵抗力の測定を行った。その結果、道床バラストが崩れる振動加速度は600gal、道床横抵抗力が低下する振動加速度は750gal程度であり、いずれも1Hzから10Hzの範囲では周波数の依存性が低いことがわかり、大規模地震時における運転取扱いルールに反映できることを確認した。

●キーワード：大規模地震、道床横抵抗力、振動加速度、振動台試験装置

### 1. はじめに

夏期に大規模地震が発生した場合、現場点検で外観上異常が認められなくても有道床軌道における道床の緩みにより、場合によってはレール張出し事故の発生が懸念される。

そのため、地震発生後にはロングレールのふく進検査や道床横抵抗力の測定作業が必要となり、運転再開の判断まで多大な労力と時間を必要としている。

これまで、地震動による道床横抵抗力の減少に対する耐震性評価は既往の研究<sup>1) 2) 3)</sup>で行われているが、実物大軌道での検証・評価は行われていなかった。

そこで、振動台試験装置に実物大有道床軌道を敷設し、最大加速度、加振周波数を変化させて、加振による道床形状の観測と道床横抵抗力の測定を行い、振動性情を定量化することができた。本稿では実物大有道床軌道の加振試験の概要と、この結果を踏まえた有道床軌道の耐震性の評価と運転取扱いルールへの適用について報告する。

### 2. 代表的な地震動と試験条件

近年発生した大規模地震の最大加速度と卓越周波数を表1に示す。地震動の最大加速度は600galから1,500gal程度であり、卓越する周波数は1Hzから10Hzの範囲内である。図1に一例として兵庫県南部地震と新潟中越地震の経過履歴を示すが、大規模地震の一般的な地震継続時間は概ね5秒から10秒である。

以上の大規模地震の最大加速度、卓越周波数、地震継続時間などを踏まえて、本試験における試験条件は表2のとおり最大加速度は400gal~900gal、加振周波数は1Hz~10Hz、振動継続時間は前後のテーパ時間を含めて10秒とした。

表1 代表的な大規模地震の最大加速度と卓越周波数

地震名称	発生年	記録情報	最大加速度 (gal)	卓越周波数 (Hz)
釧路沖地震	1993年	釧路海洋気象台	814.9	2.0~3.8
兵庫県南部地震	1995年	神戸海洋気象台記録NS成分	817.8	4.8
兵庫県南部地震	1995年	神戸海洋気象台記録EW成分	765.8	1.2~3.0
三陸南地震	2003年	牡鹿 (K-net)	1103.5	3.0~4.2
新潟中越地震	2004年	小千谷 NS 成分	1147.4	1.4
新潟中越地震	2004年	小千谷 EW 成分	1307.9	1.5
岩手県沿岸北部地震	2008年	玉山 NS 成分	1019.2	4.2
岩手県沿岸北部地震	2008年	玉山 EW 成分	683.8	5.0
岩手宮城内陸地震	2008年	一関西 NS 成分	1143.2	6~9
岩手宮城内陸地震	2008年	一関西 EW 成分	1432.6	7.2~9.5

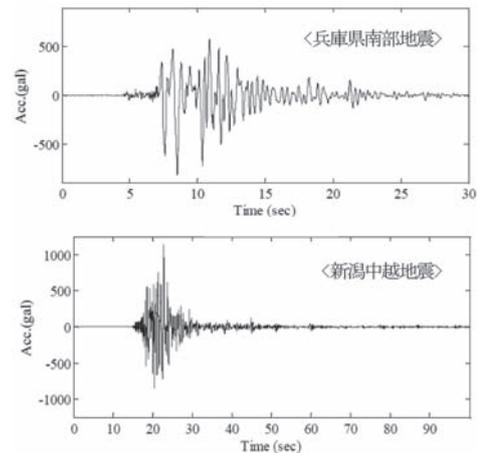


図1 大規模地震の経過履歴

表2 試験条件

入力波	周波数	設定最大加速度	仕様
	Hz	gal	
正弦波	1	400~900	時間固定 (主要8s) (前後 1s のテーパ)
正弦波	2	400~900	
正弦波	5	400~900	
正弦波	10	400~900	
地震波	—	606	兵庫県南部地震鷹取 NS100%
	—	1314	中越地震小千谷 EW100%

## 3. 試験装置と試験方法

### 3.1 試験装置

加振装置には大規模地震と同等の条件が再現できる振動台試験装置（図2）を使用した。振動台性能は可能変位量±60mm、最大加速度3G、最大加振周波数は50Hzである。

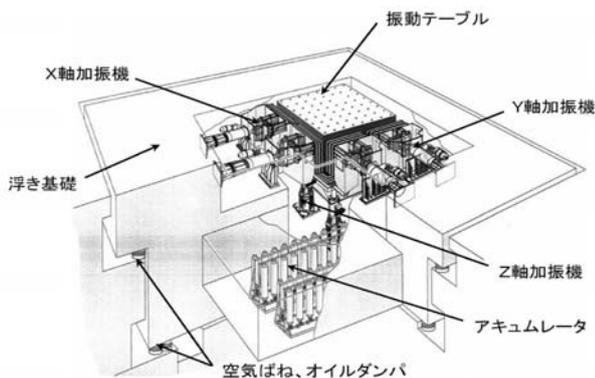


図2 振動台試験装置（資料提供：株大林組）

試験体の軌道延長は4.5mとし、転圧した路盤上に道床厚200mmの発生バラストを敷設し、PC3号まくらぎを8本設置した（表3）。なお、供試体にレールは敷設せず、50Nレールに相当する重量を各まくらぎに付加した。道床はランマにより、路盤は振動プレートにより十分に締め固めた。

測定計器は図4のとおり、まくらぎと道床、路盤にレーザー変位計（LH、LV）4台、接触型変位計（DH、DV）12台、荷重計（LD）6台、加速度計（AH）8台、ひずみゲージ（ST）6枚を使用した。

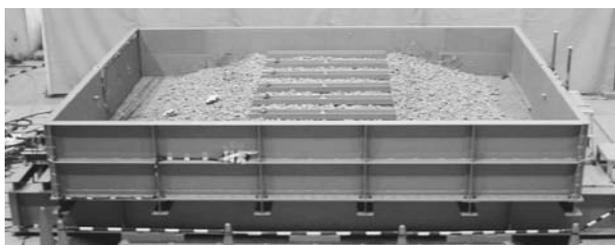


図3 振動台試験装置と試験体

表3 試験体の材料寸法

部材	項目	内容
路盤	粒径	砕石5号（粒径13～20mm）
	密度	1.656t/m <sup>3</sup>
道床	粒径	発生バラスト（粒径20～60mm）
	密度	1.668t/m <sup>3</sup>
まくらぎ	種類	PC3号
	本数	8本
レール	種類	使用せず（まくらぎに50N相当の重量付加）

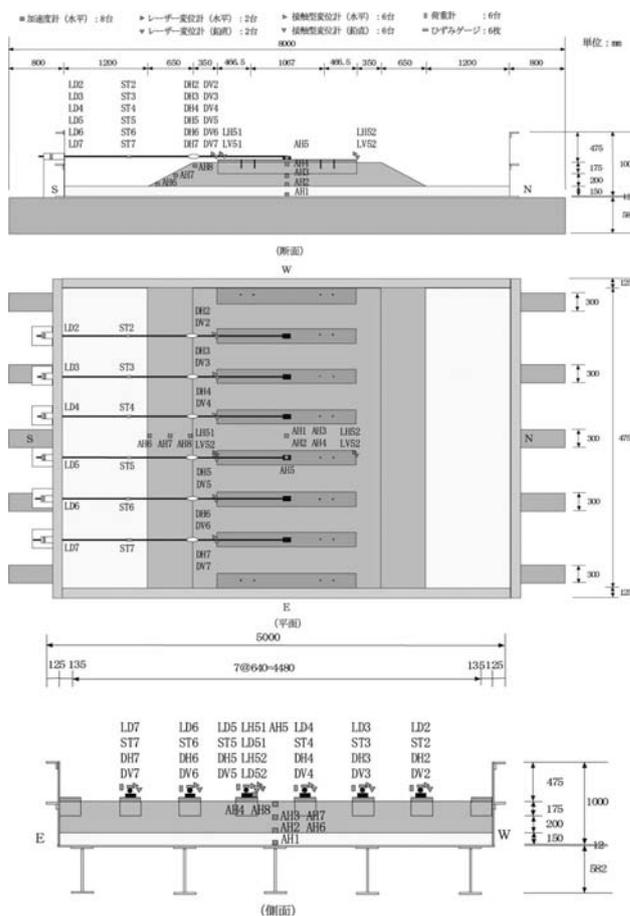


図4 試験体と測定計器

### 3.2 試験方法

各試験条件で設定した最大加速度と周波数を組み合わせた正弦波を時間固定で10秒間加振し、まくらぎや道床の応答加速度、変位量の測定、道床形状の観測を行った。

加振前後には隣接しないまくらぎを3本選定し、それぞれのまくらぎに軌道横方向へ水平荷重を載荷して横変位を測定した。この時、横変位量が2mmに達した時の荷重の最低値を道床横抵抗力とした。

## 4. 試験の結果

### 4.1 道床法面の加速度と道床形状の観測結果

図5、図6に周波数を1Hzおよび10Hzとした場合の500galと600galの道床法面における応答加速度を示す。最大加速度が500galでは入力加速度に対して道床の応答加速度は同様な波形となったが、600gal以上では道床法面の応答加速度は入力加速度と異なる波形となった。なお、2Hz、5Hzの周波数においても同様な結果となった。

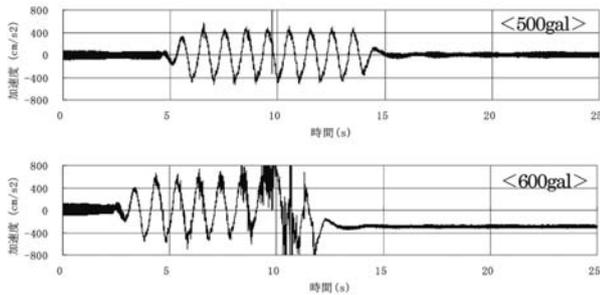


図5 道床法面の加速度 (1Hz-500gal-600gal)

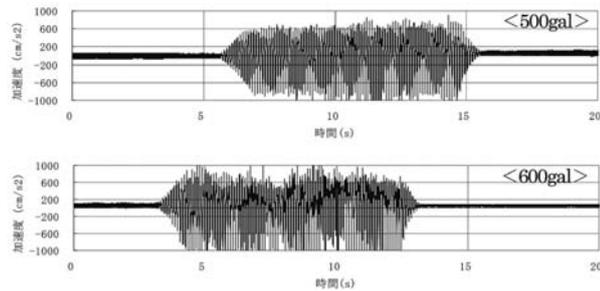


図6 道床法面の加速度 (10Hz-500gal-600gal)

図7に1Hzの周波数における最大加速度500galから800galまでの加振後の道床形状を示す。

500galの場合には振動台とまくらぎ、道床は一体となって振動し、道床に崩れは発生しなかったが、600galでは道床肩と法面の表面バラストに数個程度の崩れが認められた。700gal、800galではまくらぎと道床の振動に顕著な位相差が生じ、道床肩と法面のバラストが大きく崩れた。なお、この事象は他の周波数においても同様な結果であった。

### 4.2 道床横抵抗力の測定結果

周波数1Hzにおけるマクラギ水平変位に対する水平載荷荷重の測定結果を図8に示す。最大加速度が大きくなるほど道床横抵抗力の低下がみられ、700galまでは顕著な低下はみられず、800galでは道床横抵抗力が15%程度低下した。



(周波数 1Hz、最大加速度 500gal)



(周波数 1Hz、最大加速度 600gal)



(周波数 1Hz、最大加速度 700gal)



(周波数 1Hz、最大加速度 800gal)

図7 加振後の道床形状 (1Hz-500gal~800gal)

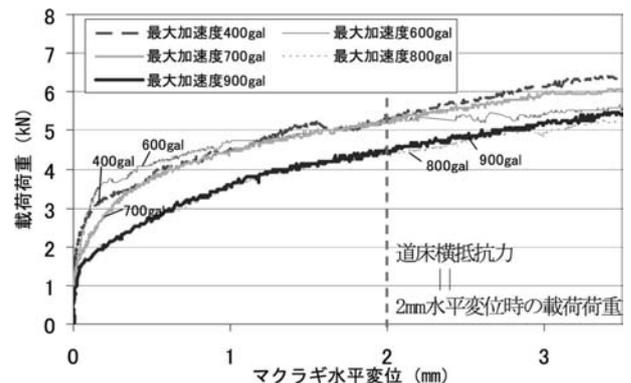


図8 道床横抵抗力の測定結果 (1Hzの一例)

周波数ごとの道床横抵抗力の測定結果を図9に示す。

周波数の違いによる道床横抵抗力の低下傾向に顕著な差はなく、750gal程度から急激に道床横抵抗力は低下した。なお、兵庫県南部地震と新潟中越地震の地震動による結果は正弦波の結果と相違なかった。

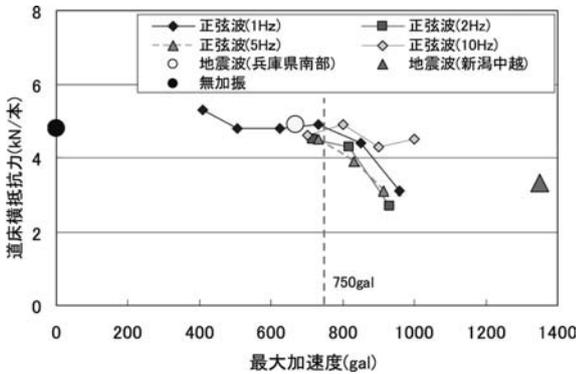


図9 周波数ごとの道床横抵抗力

### 4.3 道床の崩れと道床横抵抗力の低下の関係

各試験条件で測定した道床横抵抗力を加振前に測定した道床横抵抗力で除した道床横抵抗力比と最大加速度の関係を図10に示す。

道床肩や法面に崩れが発生する加速度は600gal程度であり、道床横抵抗力比が1を下回るのは750gal程度であった。

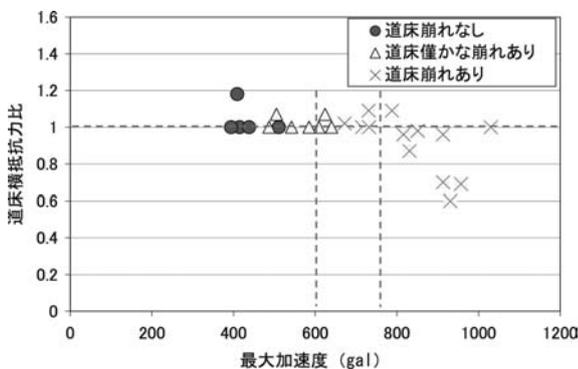


図10 道床横抵抗力比と最大加速度

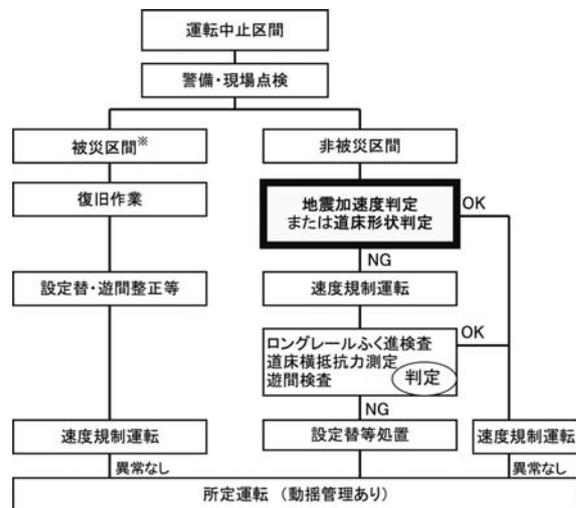
以上の結果から、道床形状および道床横抵抗力は周波数1Hzから10Hzの範囲では周波数による依存性が低く、一般的な大規模地震が発生した場合には600gal程度から道床肩や法面が崩れ、ある程度の道床崩れが進展した750gal程度で道床横抵抗力が低下することが確認された。

## 5. まとめ

- (1) 道床形状が崩れる振動加速度は周波数1Hz～10Hzの範囲では周波数に依存せず600gal程度である。
- (2) 道床横抵抗力は周波数1Hz～10Hzの範囲では周波数に依存せず750gal程度から低下する。

- (3) 道床横抵抗力の低下は道床肩や道床法面が崩れ始めた後に発生しており、道床形状に変化がなければ顕著に低下しないと考えられる。

現行の大規模地震時における運転取扱いルールでは、現場点検で異常が認められず、SI値（構造物の揺れの程度を表す指標）による判定で閾値以上となった場合には、そのすべての区間で道床横抵抗力などを測定する必要があった。そこで、図11のとおり本研究で定量化した地震加速度の閾値判定、または道床形状の判定により、必要な箇所でのみの測定を行えばよいこととなり、安全を確保したうえで効率的な運転取扱いを行うことが可能となった。



※ ここでの被災区間は大規模な砕石流れ等が発生して列車が通せない区間とする

図11 大規模地震時の運転取扱い案

## 6. おわりに

本試験により道床に影響を及ぼす最大加速度の閾値は定量化できたが、軌道上の応答加速度を既設地震計から推測するためには、震央からの距離減衰や高架橋・盛土などの土木構造物による増幅を検討する必要がある<sup>4)</sup>。また、道床形状の変化から判定する場合には正確な道床形状の把握が必要となる。これらの課題を踏まえつつ、本研究で得られた知見をもとに運転取扱いルールを策定している。

最後に本研究においてご協力、ご指導頂いた(株)東海総合技術研究所、(株)大林組にお礼を申し上げる。

### 参考文献

- 1) 関根悦夫、石川達也「地震時における有道床軌道の変形挙動」RTRI REPORT、2005.2
- 2) 平尾博樹、関根悦夫「模型バラスト軌道の振動台試験その2-道床抵抗力」土木学会第63回年次講演会、2008.9
- 3) 関根悦夫、石川達也「累積損傷理論による有道床軌道の耐震性能評価」RTRI REPORT、2006.4
- 4) 中村豊「常時微動計測に基づく鉄道盛土の地震動特性の推定」RTRI REPORT、1988.7