

鉄道盛土の軌道変形対策を目的とした耐震補強工法の検討

東海旅客鉄道(株) 正会員 永尾 拓洋
 東海旅客鉄道(株) 正会員 関 雅樹
 (株)大林組 正会員 佐藤 清

1 はじめに

2004年10月23日に発生した新潟県中越地震では、鉄道盛土においても多くの被災事例¹⁾が確認された。被災箇所の一部には盛土本体の変状は僅かであったが、バラストの流出・沈下に伴いロングレールを支持するマクラギが露出することで、レールに蓄積された軸力によりレール座屈が発生した箇所も存在した。そこで、鉄道盛土の軌道変形対策を目的とした簡易な耐震補強工法として、耐震バラスト流出防止工の効果を大型振動台実験により検証したので報告する。

2 実験概要

耐震バラスト流出防止工は図1のような形状を有する鉄筋コンクリートブロックである。この耐震バラスト流出防止工は、バラスト側のブロック床板下端に突起を有していることを大きな特徴としており、この突起が水平荷重に対する大きな抵抗要因となることが過去実験²⁾により確認されている。突起が無い場合と比較して、最大荷重で抵抗力が約3倍程度増加する。

今回、鉄道盛土の軌道変形対策として、耐震バラスト流出防止工の効果を大型振動台実験により検証した。実験に使用した三次元振動台の諸元は表1の通りである。実験における主な評価項目は、加振後のバラスト軌道の変状、耐震バラスト流出防止工とバラスト(マクラギ)の振動特性と残留変形、加振前後の道床バラスト横抵抗力である。

実験モデルは、図2に示す高さ6.0m、天端幅10.8m、のり面勾配1:1.5の一般的な盛土の一部をモデル化したものである。盛土材料には鉄道の設計標準³⁾に示される土質区分Ⅱのうち、一般の砂・砂礫に相当する土質区分Ⅱ(表層部： $\gamma=17\text{kN/m}^2$ ， $\phi=35^\circ$ ， $c=3\text{kN/m}^2$ ， $f_c<30\%$)である茨城県岩瀬町産山砂を用いている。バラストには実際に使用されている碎石を用いており、敷設においても現役の軌道工がタイタンパヤランマによって、所定の道床バラスト横抵抗力が確保されるように締めを行っている。同様に60kgレール、PCマクラギ、締結装置についても実物を使用している。バラスト流出防止工については、最も試験条件が厳しいバラスト高さ800mmとなる市販の

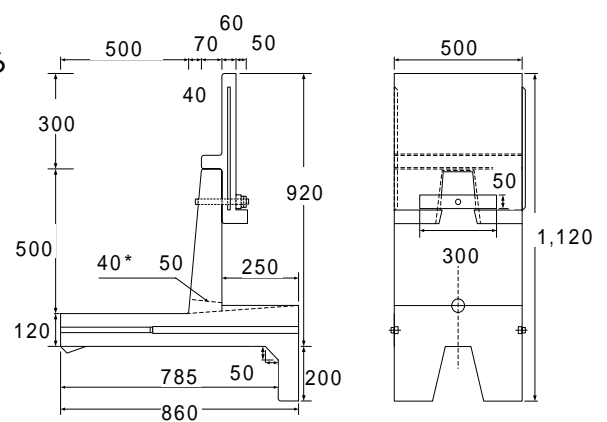


図1 耐震バラスト流出防止工

表1 三次元振動台の諸元

最大積載質量	50ton		
テーブル寸法	5m×5m		
定格	X方向	Y方向	Z方向
最大変位 (cm)	±60	±30	±20
最大速度 (cm/s)	200	130	100
最大加速度 (G)	3	2	1
加振周波数 (Hz)	DC ~ 50		

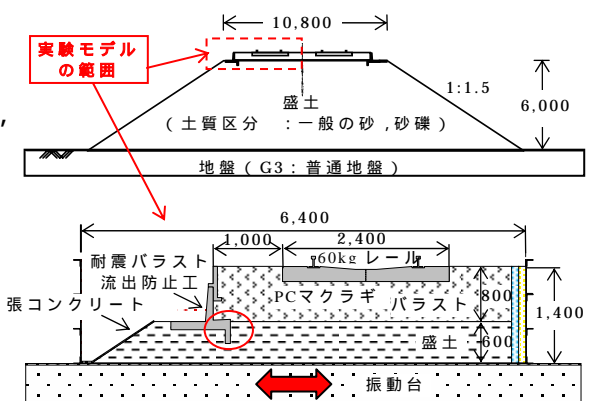
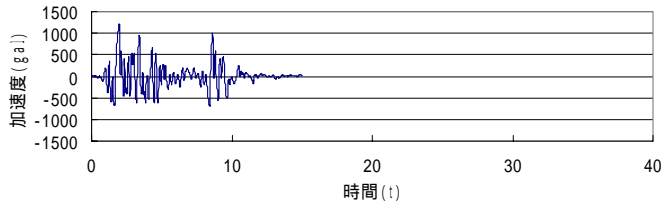


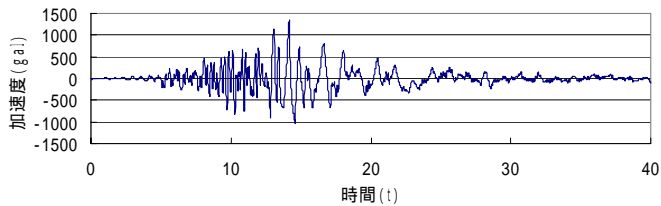
図2 実験モデル

表 2 実験ケース

ケース	入力波形		バラスト肩の充填
	地震動	最大加速度	
CASE1	L2 地震動()	1220gal	有
CASE2	L3 地震動	1340gal	有
CASE3	L3 地震動	1340gal	無



a) L2 地震動 (スペクトル)



b) L3 地震動 (仮称)

図 3 入力地震動

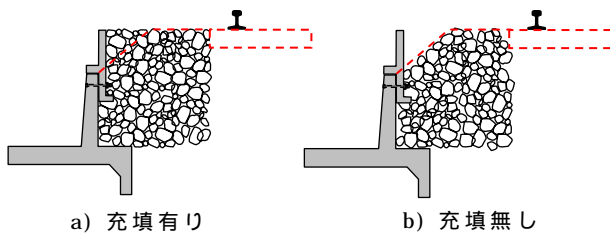


図 4 バラスト肩の充填の有無

NNT-500 型に H-500 型を組み合わせた構造を採用している。実験ケースを表 2 に示す。

入力地震動には鉄道の設計標準³⁾で兵庫県南部地震レベルに相当する L2 地震動()と、一般的に加振時間が長くかつ長周期が卓越する地震動を盛土が弱点とすることから、その特徴を模擬した L2 地震動()を超えるレベルである L3 地震動(仮称)を用いることとした。入力地震動を図 3 に示す。なお、各試験ケースにおける入力波には、普通地盤に相当する G3 地盤の地表面地震動を盛土の FEM モデルに入力することによって算出された、盛土天端での応答加速度波形を用いている。CASE1, 2 と CASE3 の違いは図 4 に示すバラスト肩の充填の有無である。計測項目は大きく分けて計器を用いた加速度、変位、耐震バラスト流出防止工にかかる土圧の他、加振前後に計測する道床バラスト横抵抗力の 4 種類である。計器配置を図 5、計測項目を表 3 に示す。

3 実験結果

(1) バラスト軌道の変状

今回の実験では、大きな入力地震動であったにもかかわらず、耐震バラスト流出防止工が転倒することは無く、滑動についても僅かであった。そのためバラスト流出防止工が無い既往の研究⁴⁾で観察された加振後の著しいバラスト軌道の変状は、CASE1, 2 ではほとんど見られなかった。加振中に表層部のバラストが若干流動化する傾向があり、加振後には僅かにマクラギ端部に透きが生じたものの、心配されるような大きな軌道変状は生じていない。CASE3 については、バラスト肩の充填が無い場合、バラスト肩の崩落とそれに伴う加振中の表層部のバラス

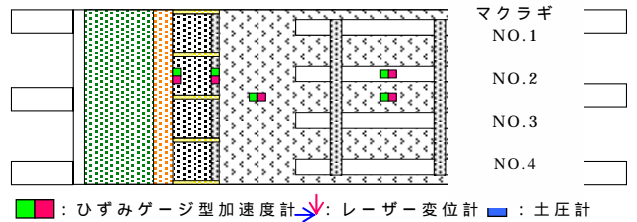
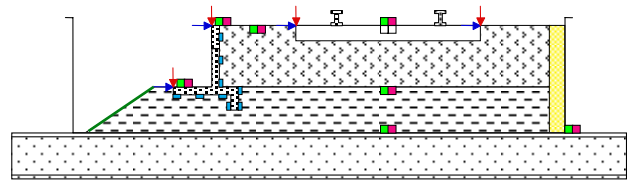


図 5 計器配置

表 3 計測項目

計測項目	設置場所	数量
加速度 (水平、上下)	コンテナー底面	2
	盛土天端	2
	バラスト天端	2
	マクラギ	2
	バラスト流出防止工床板	2
	バラスト流出防止工天端	2
	(計)	12
変位 (水平、上下)	マクラギ端部(左)	2
	マクラギ端部(右)	2
	バラスト流出防止工床板	2
	バラスト流出防止工天端	2
	(計)	8
土圧	バラスト流出防止工床板	3
	バラスト流出防止工側壁	3
	バラスト流出防止工突起部	3
	(計)	9

トの流動化が観察されたが，耐震バラスト流出防止工の嵩上げ部のおかげで，マクラギ端部が露出するまで変状することは無かった（写真1）．模型中央付近のマクラギ NO.2 位置における加振前後のバラストの変形状態の差を図6に示す．

（2）振動特性と残留変形

耐震バラスト流出防止工とバラスト（マクラギ）の振動特性と残留変位（水平方向）を図7に示す．図より軌道変形と密接に関連するマクラギの残留変位はCASE1よりCASE2の方が大きく，また，バラスト肩を充填しないCASE3では更に残留変位が大きくなることが分かった．CASE1では耐震バラスト流出防止工とマクラギがほぼ同様の動きをしているのに対し，CASE2，3では波形の後半あたりから動きに差が生じている．その傾向はCASE3で特に顕著に表れていることから，耐震バラスト流出防止工とバラスト肩の間をバラストで充填することが，軌道変形対策の効果を発揮する上で特に重要である．



写真1 CASE3の加振前後のバラスト肩の状態

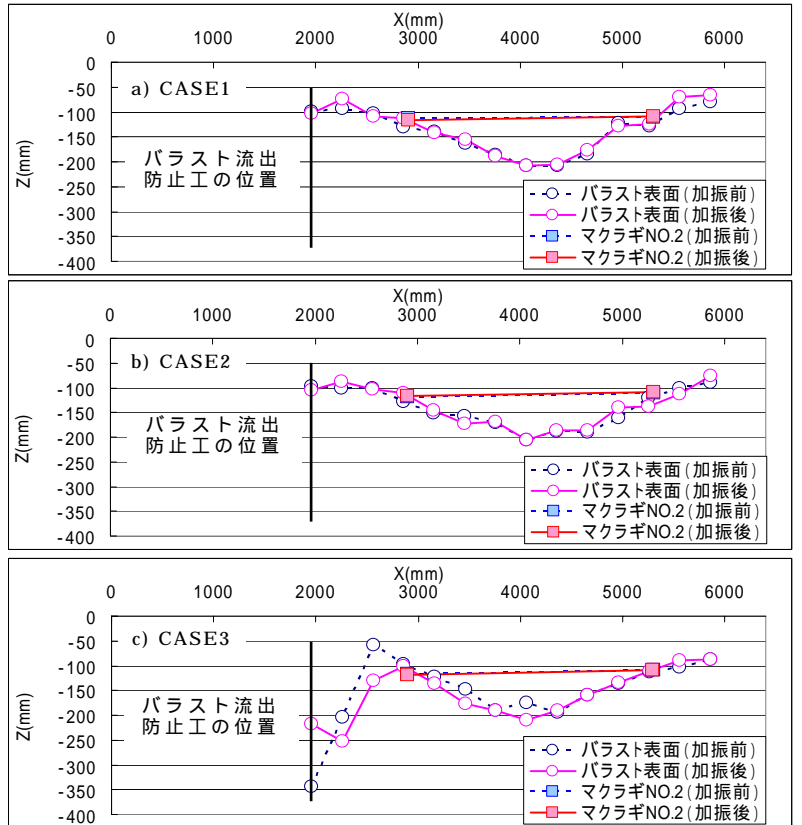


図6 加振前後のバラスト軌道の状態

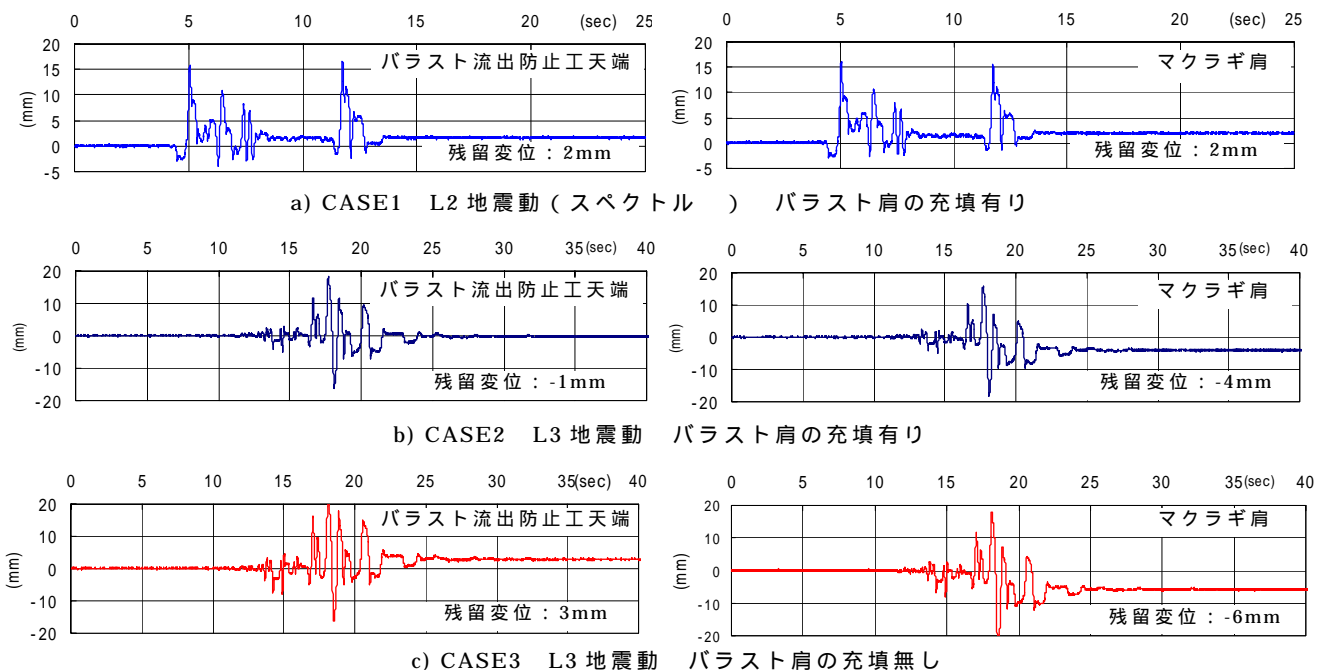


図7 耐震バラスト流出防止工と道床バラスト（マクラギ）の振動特性と残留変位



写真2 道床バラスト横抵抗力の測定状況

(3) 道床バラスト横抵抗力

主要線区の鉄道では走行安全性や乗心地の確保，軌道保守周期の延伸，騒音・振動抑制等の観点から，ロングレールが主に採用されている．1本の長さが200m以上のものをロングレールというが，一般には1本の長さが数キロオーダーのレールで敷設される場合が多い．ロングレールは酷暑期等のレール高温時に，致命的な大事故につながるレールの張出しが生じる危険性があることから，道床バラスト横抵抗力により管理がなされている．道床バラスト横抵抗力は，マクラギ1本の横移動量が2mmの時の圧力値で，マクラギ1本あたり1,100kgf以上と規定されている．今回，測定には実際に現場で用いられている道床抵抗測定器を使用し，模型中央付近のマクラギNO.2, 3の平均値により加振前後の道床横抵抗力を比較した(写真2)．

結果を表4に示すが，道床バラスト横抵抗力はCASE1よりCASE2の方が加振後に低下することが分かった．

また，バラスト肩を充填しないCASE3は最も道床バラスト横抵抗力が低下し，規定値を下回ることが分かった．

(4) 加速度応答

代表として，CASE2の加速度応答(水平方向)を図8に示す．この図から，盛土に入力された地震動は上部に伝わるにつれて，加速度が1740galと増幅される傾向にあるのに対し，バラストに伝わった段階で1580galに減衰されることが分かる．バラスト内にあるマクラギについても同様に減衰された1570galである．この結果はCASE1でもほぼ同様の結果となっており，バラストによる地震動に対する減衰効果が期待できることが判明した．なお，CASE3については加振中の表層部のバラストの流動化が大きく，バラスト上部の加速度計が飛んでしまったた

表4 加振前後の道床バラスト横抵抗力

試験ケース		道床バラスト横抵抗力 (kgf)		
		NO.2	NO.3	平均値
CASE1	加振前	1,550	1,550	1,550
	加振後	1,800	1,450	1,625
CASE2	加振前	1,550	1,600	1,575
	加振後	1,300	1,500	1,400
CASE3	加振前	1,400	1,450	1,425
	加振後	1,000	1,100	1,050

規定値：マクラギ1本あたり1,100kgf以上

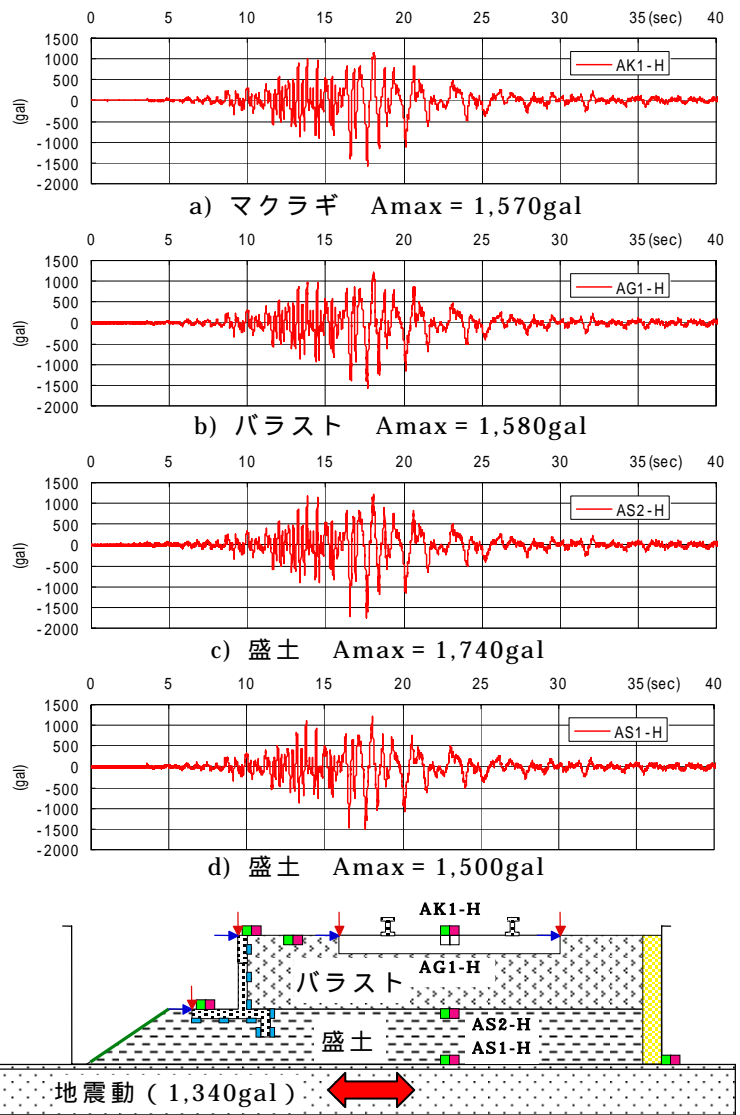
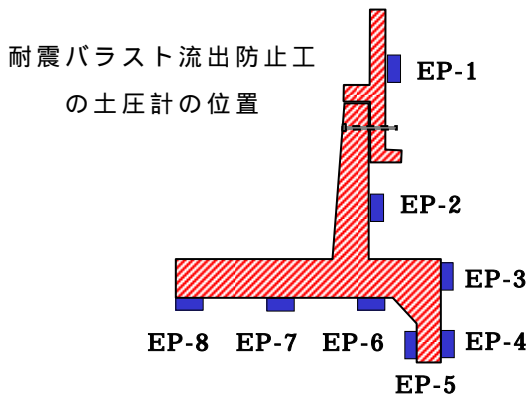


図8 CASE2の加速度応答(水平方向)



め、正確な値を測定することができな
かった。

(5) 土圧計測

代表として、CASE1の土圧を図9
に示す。なお、EP-8の土圧計はCASE
1の測定初期からの不具合で計測が不
能であった。この図から、バラスト側
のブロック床板下端（EP-6）並びに突
起の内側（EP-5）の土圧計で大きな土
圧が生じていることが分かった。その
ため、耐震バラスト流出防止工の転倒
・滑動の防止、並びに軌道変形抑制に
は、敷設時にこの部分の盛土を仕様
によりしっかり締固めること、場合によ
ってはセメントミルク等により空隙充
填することが必要であると考えられる。

4 おわりに

今回、大型振動台実験により、耐震
バラスト流出防止工は軌道変形対策と
して、鉄道盛土の耐震性向上に十分
な効果を発揮することが確認できた。
なお、本実験により得られた主な知
見は以下のとおりである。

(1) 盛土の変形が僅かであれば、大きな

地震動であっても、耐震バラスト流出防止工は軌道変形対策として、鉄道盛土の耐震性向上に十分な効果を発揮する。特に耐震バラスト流出防止工とバラスト肩の間をバラストで充填することが、残留変形の抑制に対して重要である。

(2) 地震時の道床バラスト横抵抗力の確保に、耐震バラスト流出防止工が十分な効果を発揮する。同様に耐震バラスト流出防止工とバラスト肩の間をバラストで充填することが、道床バラスト横抵抗力を確保する上で重要である。

(3) バラストによる地震動に対する減衰効果が明らかとなった。バラスト軌道はスラブ軌道に対して耐震性に劣ると言う意見もあるが、減衰効果の点からは一概にそうとは言い切れない

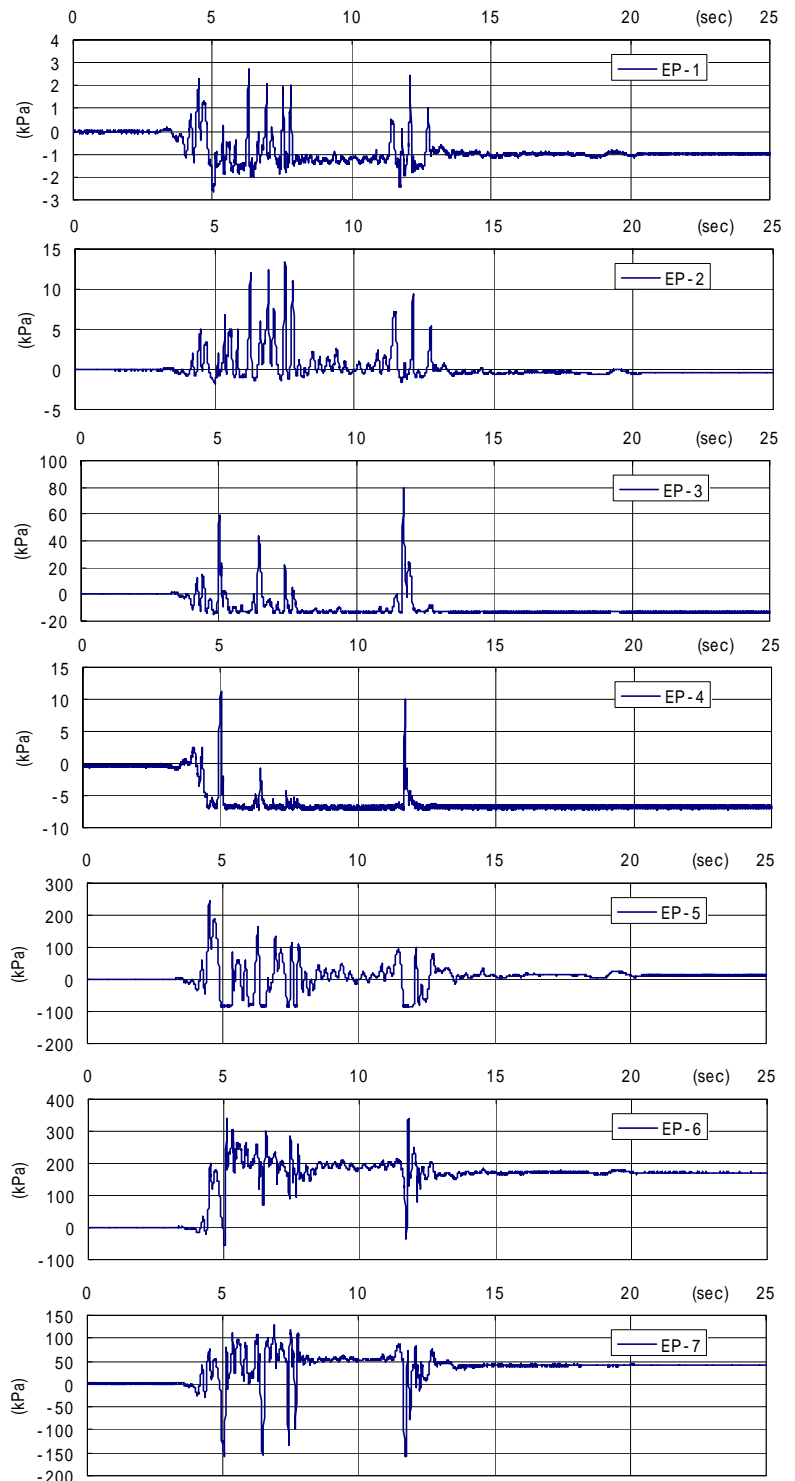


図9 CASE1の土圧計測

ことは明らかである。

- (4) 耐震バラスト流出防止工の転倒並びに滑動を防止し，軌道変形抑制の十分な効果を得るためには，敷設時にバラスト側のブロック床板下端並びに突起の内側部分の盛土をしっかりと締め固める必要がある．場合によってはセメントミルク等により空隙充填することも必要である．

参考文献

- (1) 例えば，谷口善則，相沢文也，矢嶋敬，新潟県中越地震による鉄道盛土の被害および復旧，第40回地盤工学研究発表会，pp.2135-2136，2005.7
- (2) 池上邦信，家田仁，花輪匠太郎，神野希嘉：バラスト止ブロックの性能試験とその設計について，鉄道線路，30-8，pp.461-466，1982.8.
- (3) 運輸省鉄道局，鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，1999.10.
- (4) 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，鉄道総研報告，Vol.19，No.2，2005.2.