

小土被りトンネルにおける耐震対策工に関する基礎的研究

Basic Studies on earthquake-proof Countermeasures of Shallow Mountain Tunnels

宮林秀次¹・高橋源太郎²・深沢成年³・小島芳之⁴・朝倉俊弘⁵
Hidetsugu Miyabayashi, Gentaro Takahashi, Naritoshi Fukazawa,
Yoshiyuki Kojima and Toshihiro Asakura

¹フェロー会員 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 鉄道建設本部 計画部長
(〒231-8315 神奈川県横浜市中区本町六丁目50-1)

²正会員 工修 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 鉄道建設本部 設計技術部 設計技術第二課課員
(〒231-8315 神奈川県横浜市中区本町六丁目50-1)

E-mail: gen.takahashi@jrtt.go.jp

³正会員 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 鉄道建設本部 設計技術部 設計技術第二課長
(〒231-8315 神奈川県横浜市中区本町六丁目50-1)

⁴正会員 工博 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 トンネル研究室主任研究員
(〒185-8540 東京都国分寺市光町二丁目8-38)

⁵正会員 工博 京都大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻教授
(〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂)

It is generally said that mountain tunnels are little damaged by earthquakes. However, recent case studies of the damage of mountain tunnels caused by earthquakes also show that they are likely to be damaged when 1) the scale of earthquake is large, 2) there are earthquake faults near the tunnel or 3) there are special conditions.

We paid attention to shallow tunnel among damage patterns. In an actual tunnel, the buffer material, one of the earthquake-proof countermeasures is executed on trial to evaluate its performance of the execution. The effects of the earthquake-proof countermeasures are confirmed by measuring the behavior of lining concrete during earthquake.

Key Words : shallow mountain tunnel, earthquake-proof countermeasure, lining

1. はじめに

一般に山岳トンネルは、耐震性に富む構造物とされている。しかし、①地震規模が大きい、②地震断層面からの距離が近い、③特殊条件（不良地山、地震断層の存在）が介在するなどの条件下では甚大な被害を受ける場合もあることが吉川ら¹⁾の研究により示されている。

近年の地震被害をみると、1995年兵庫県南部地震では、被災地内の100本を超える山岳トンネルのうち20本余りのトンネルが被害を受けており²⁾、また、2004年新潟県中越地震では、被災地内の138本の山岳

トンネルのうち49本のトンネルで被害を受けている³⁾。これらの震災により被災したトンネルの多くは、覆工コンクリート表面のひび割れなどの軽微なものであるが、なかには覆工コンクリート片の崩落などの大規模な補修・補強工を必要とした事例もみられ、社会的・経済的に大きな影響を与えることとなる。このような背景のなか、山岳トンネル構造物の耐震性能評価・耐震性能の向上を図る技術の開発が急務となっている。

一方、山岳トンネル覆工の地震被害パターンは、これまでの研究で①坑口部、小土被り部、②不良地山区間、③断層のずれの3つのパターンに大別される

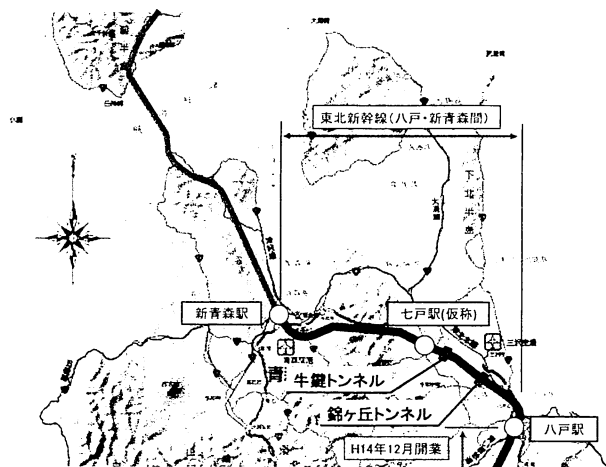


図-1 現場位置図

ことが示されている。また、これらの3つのパターンについて数値シミュレーションや模型実験により被害発生メカニズムについて考察されている²⁾。

このような背景のなか、朝倉⁴⁾はこれらの被害パターンのうち小土被りトンネルに着目し、トンネルの地震時における挙動を解明することを目的として、実トンネルにおいて計測を行った結果をとりまとめて考察を加えている。

本報告は、同様に小土被りトンネルに着目し、朝倉らの研究⁴⁾により得られた計測結果を参考として

山岳トンネルの耐震対策について検討し、耐震対策工の選択肢の1つである緩衝材(EPS材)⁵⁾について、現在建設中の東北新幹線(八戸・新青森間)の錦ヶ丘トンネル(図-1)において施工性確認のための事前施工(以下、事前施工)を行った。そのうえで、施工性と緩衝材を含めた耐震対策工の効果に対する評価について、その結果をとりまとめて考察を加えたものである。

2. 錦ヶ丘トンネルの概要と地質状況

錦ヶ丘トンネルは、東北新幹線（八戸・新青森間）の八戸駅から北西に約15kmに位置する延長約1,300mのトンネルである。全延長にわたり土被りが0～20m程度の小土被りトンネルである。

図-2に錦ヶ丘トンネルの地質縦断面図（計測断面付近を抜粋）を示す。地質は、第四紀更新世の高館火山灰層（ローム層）、高館段丘砂層を主体とする。トンネル基面下には野辺地層の粘性土層、砂層が広く分布している。高館火山灰層（ta）は、全体に茶褐色を呈する粘度質火山灰であり、含水比が大きく、全体に浮石が混じる。高館段丘砂質土（ts）は、全体にゆるい砂質土であり、所々で薄く粘性土を挟む。

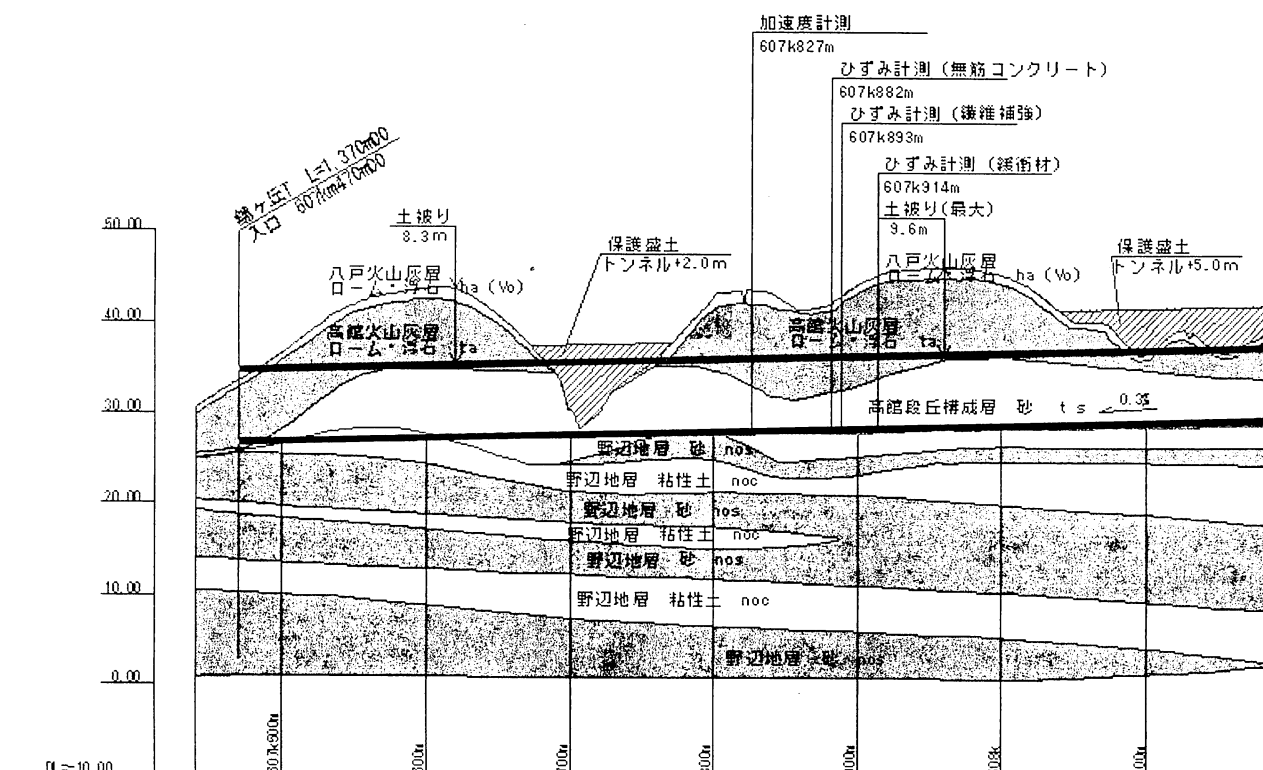


図-2 錦ヶ丘トンネル地質縦断図（起点方坑口部）

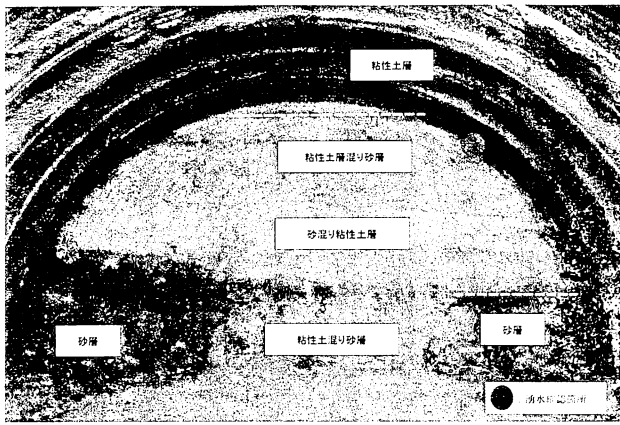


図-3 切羽観察記録写真（607km887m 付近）

粒径は不均一で礫や粘性土を伴う。また、野辺地層（nos, noc）は、未固結の砂質土、粘性土であり、全体として細砂とシルトの互層状を呈する。細砂は全般に締まっているが、土被りの小さい箇所ではN値50以下を示す。粘性土は含水比が小さく、N値は全般に20以下である。

計測断面付近の切羽観察記録写真を図-3に示す。切羽観察記録をみると、地層はほぼ水平に分布している。天端付近は、粘性土が分布し、肩部付近は砂混り粘性土層が分布している。切羽からは湧水、肌落ちが確認されている。

3. 耐震対策工の施工性の評価

(1) 耐震対策工の検討

本報告では、耐震対策工として覆工背面に軟質な緩衝材を挿入することによって地盤変位を覆工コンクリートに伝えない緩衝材挿入工の適用性について提案するものである。その効果の評価、厚さや弾性係数といった基本的な設計諸元については、応答変位法による検討を実施した。トンネル背面に緩衝材を設置する場合、既往の文献^{例えば6)}から緩衝材の変形係数は地山の変形係数の1/100程度の剛性であると考えられ、緩衝効果を得るために変形係数0.5MPa程度以下という柔軟性が求められる。そこで、図-4に示す緩衝材として使用できる可能性のある材料のなかから、安価かつ入手が容易であるということも考慮し、EPS材を緩衝材として使用することとした。また、地震時のトンネル変形挙動から設計厚さは50mmとし、覆工コンクリート打設時の液圧などを考慮し、供用時に塑性領域の変形係数で作用させるために単位重量0.30kN/m³のものをを用いることとした。

耐震対策工の施工性の評価については、事前施工

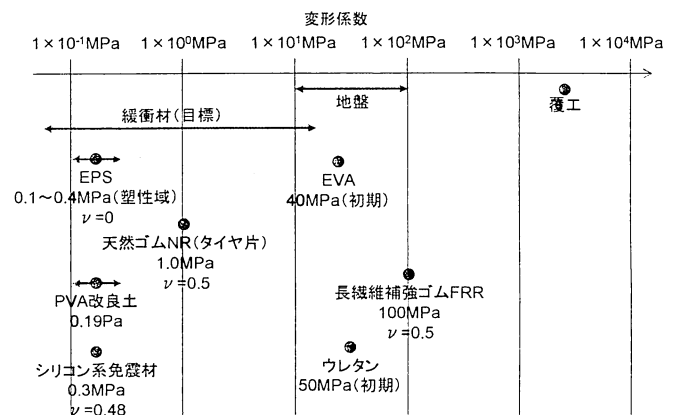


図-4 緩衝材の基本物性

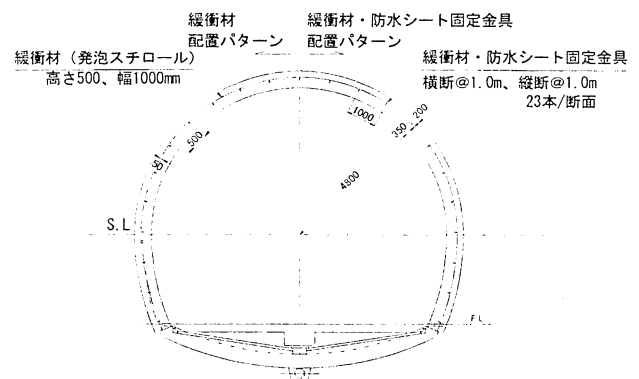


図-5 緩衝材設置断面図（事前施工）

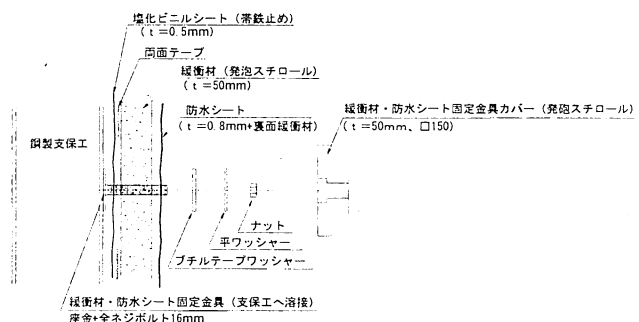


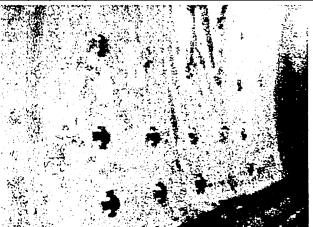
図-6 緩衝材設置詳細図（事前施工）

を行い、施工における問題点より諸元の修正を行うこととした。

(2) 耐震対策工の事前施工

事前施工における緩衝材の設置区間は5mとした。緩衝材は鋼製支保工表面に設置した塩化ビニルシートに両面テープにて接着させ、鋼製支保工に溶接した緩衝材・防水シート固定金具（径16mm）と表面カバー（発泡スチロール製）にて固定することとした。図-5および図-6は、事前施工区間の断面図ならびに

表-1 緩衝材設置事前施工

施工手順ならびに評価	施工状況写真
① 緩衝材・防水シート固定金具の取付け - 緩衝材・防水シート固定金具を溶接するためには事前に鋼製支保工に付着したコンクリートを取り除く必要がある。 - 金具の取付けは溶接作業となるため周辺（特に下部）の電線・シート類の養生が必要である。	
② 塩化ビニルシートの取付け 塩化ビニルシートは吹付けコンクリート面に帯鉄を使用して 20cm 程度のピッチで針止めを行った。	
③ 緩衝材（発泡スチロール）の取付け - 緩衝材は両面テープで塩化ビニルシートに接着させたが、長時間の接着は望めないため天端部分については剥がれ落ちる前の早い段階で防水シートで押さえ込む必要があった。 - 支保工間に凸部があると緩衝材設置時に割れてしまうため、事前調査を行い、はつり取る必要がある。	
④ 防水シートの設置 防水シートを設置する際、防水シート固定金具を通すため防水シートに穴開けを行うが、数が多いため各々で漏水が無いよう注意を要する。	
⑤ 表面カバーの取付け コンクリート打設時、緩衝材・防水シート固定金具カバーの固定が不十分だと外れてコンクリート表面に出てくる可能性があるため、ブチルテープを二重に張り固定した。	

設置詳細図であり、表-1は、事前施工の状況を示したものである。

緩衝材設置が1スパン（10.5m）当り6日間を要することが予想されるため、連続して緩衝材設置施工を行う場合、現状のサイクル（1週間に3スパン打設）を確保するためにはシート張り台車の増設を行った。

事前施工では、緩衝材・防水シート固定金具として径16mmのものを用了が、EPS材の緩衝効果が得られるように、できるかぎり径を小さくし剛性を低くするために試験施工では12mmのものに変更することとした。

その他の施工性については、事前施工によって問題のないことを確認した。

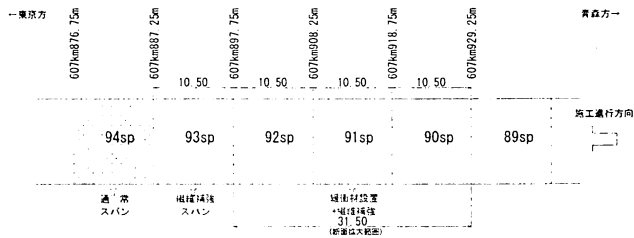


図-7 耐震対策工の試験施工区間

4. 耐震対策工の効果の確認

(1) 耐震対策工の試験施工

事前施工の結果を受け、2007年9月下旬から10月上旬にかけて、試験施工を実施した。本区間は耐震対

施工時点では対策工の効果が確認されていないため、緩衝材設置区間には補強繊維を混入した。補強繊維は、非鋼繊維を混入率0.5vol%で覆工コンクリートに混入したもので、地震時のはく落防止を期待したものである。

耐震対策工の性能の評価にあたっては、トンネルの地震時における挙動の解明を目的として、同新幹

牛鍵トンネルの計測結果⁴⁾から、縦断方向のひずみは横断方向に比べて微少であり、地震による影響も小さいものと推定される。このことから、縦断方向のひずみ計測は、縦断方向のひずみの発生を確認するために1箇所とした。具体的なひずみ計の設置箇所は、無対策箇所については、横断方向3箇所、縦断方向(天端)1箇所にて実施し、対策箇所(繊維補強、緩衝材設置)については、横断方向のみ3箇所とする。加速度計は、錦ヶ丘トンネル内の地震動の計測と覆

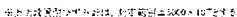
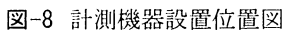


図-9 計測システム系統

工に設置するひずみ計のデータ取得とトリガーとしての目的で設置した。地震観測のトリガーは、1galとして設定した。

図-9にシステムブロック図を示す。

(3) 計測結果

錦ヶ丘トンネルにおける計測は、2007年12月13日から実施している。本報告では、2007年12月13日から2008年6月18日の期間における震度3以上（気象庁発表）の地震動の計測結果について整理を行った。

a) 加速度計測結果

表-2に計測期間中に震度3以上を記録したそれぞれの地震に対し、錦ヶ丘トンネル坑内で観測された地震動の最大加速度を示す。また、図-10に錦ヶ丘ト

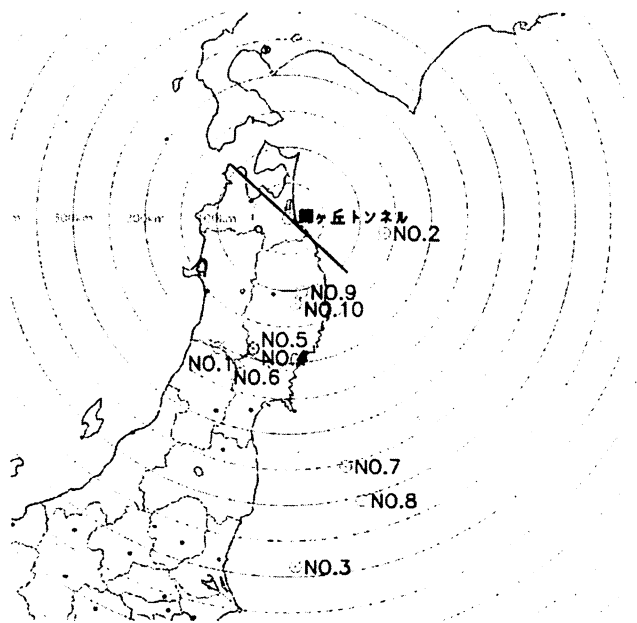
ンネルとそれぞれの地震の震央位置との関係を示す。この計測期間では、2008年6月14日に岩手・宮城内陸地震（マグニチュード7.2）が観測された他、2008年7月24日には岩手県沿岸北部（以下、岩手県沿岸北部地震）でマグニチュード6.8の地震が観測された。岩手・宮城内陸地震では、錦ヶ丘トンネルで最大12.1galの加速度が観測されており、加速度から推定した震度は2.8となった。

b) ひずみ計測結果

表-3に地震発生中の各計測断面における天端および両肩部の最大ひずみ計測結果を示す。また、図-11および図-12に、岩手・宮城内陸地震ならびに岩手県沿岸北部地震発生時における、錦ヶ丘トンネル坑内の各計測断面に設置したひずみの時刻歴波形を示す。観測された両肩部の最大ひずみを、対策工の有無、

表-2 加速度計測結果

No.	名 称	地震発生日	地震発生時刻	マグニチュード	深さ (km)	震央距離 (km)	錦ヶ丘トンネルでの最大加速度 (Gal)			周辺の強震記録					
							X成分 (縦断方向)	Y成分 (横断方向)	Z成分 (鉛直方向)	K-net (Gal) (三沢)			K-net (Gal) (十和田)		
										NS	EW	UD	NS	EW	UD
No.1	秋田県沿岸南部	2008年4月17日	19:37:0	5.8	166	215.42	2.12	2.73	2.28	-	-	-	-	-	-
No.2	青森県東方沖	2008年4月29日	14:26:05	5.7	62	124.68	5.45	4.75	4.36	27.8	32.7	19.2	12.2	11.5	7.8
No.3	茨城県沖	2008年5月8日	1:45:19	7	51	489.19	2.98	4.60	2.19	3.0	3.7	2.1	4.2	4.0	1.8
No.4	岩手県内陸南部	2008年6月14日	8:43:45	7.2	8	185.29	12.08	10.99	8.58	25.6	24.6	10.1	14.9	12.9	5.4
No.5	岩手県内陸南部	2008年6月14日	8:46:35	4.5	14	176.61	2.98	3.08	0.80	-	-	-	-	-	-
No.6	宮城県北部	2008年6月14日	9:20:12	5.7	6	208.41	1.54	1.13	0.70	-	-	-	-	-	-
No.7	福島県沖	2008年7月19日	11:39:29	6.9	32	358.05	4.11	3.54	2.40	4.2	4.7	2.0	3.8	3.6	2.2
No.8	福島県沖	2008年7月21日	20:30:27	6.1	27	401.58	1.36	1.51	0.68	-	-	-	2.0	2.4	1.3
No.9	岩手県沿岸北部	2008年7月24日	0:26:20	6.8	108	103.75	36.59	47.06	37.67	296.4	231.9	115.9	127.8	110.5	46.0
No.10	岩手県沿岸北部	2008年7月24日	11:27:54	4.8	112	111.90	1.41	1.81	1.70	14.7	14.2	4.8	4.3	4.5	1.8



① : 震央位置
— : トンネル位置（直線は方向を示す）

図-10 錦ヶ丘トンネルと震央位置

表-3 最大ひずみ計測結果

No.	地震発生日	名称	震央距離 (km)	深さ	マグニ チュード	最大ひずみ (×10 ⁻⁶)									フーリエスペクトルによる 卓越周期 (sec)			
						No.1-1	No.1-2	No.1-3	No.1-4	No.2-1	No.2-2	No.2-3	No.3-1	No.3-2	No.3-3	X軸	Y軸	Z軸
No.1	2008年4月17日	秋田県沿岸南部	215	166km	M:5.8	0.569	0.821	0.934	0.328	0.738	0.994	1.560	2.214	0.573	0.403	0.38	0.52	0.21
No.2	2008年4月29日	青森県東方沖	125	62km	M:5.7	1.282	1.235	1.936	0.428	1.908	0.826	1.124	1.903	0.520	0.810	2.41	0.66	2.39
No.3	2008年5月8日	茨城県沖	489	51km	M:7.0	0.978	3.304	1.694	0.366	1.508	3.364	2.074	3.051	3.278	1.418	2.77	2.01	1.85
No.4	2008年6月14日	岩手県内陸南部	185	8km	M:7.2	6.405	8.304	6.145	0.472	4.279	8.992	5.080	5.046	9.324	5.375	3.68	3.72	3.60
No.5	2008年6月14日	岩手県内陸南部	177	14km	M:4.5	4.121	3.439	1.022	0.381	1.169	2.972	2.459	3.522	3.462	3.069	3.95	4.17	3.33
No.6	2008年6月14日	宮城県北部	208	6km	M:5.7	0.419	0.681	0.573	0.354	0.433	0.595	1.283	1.964	0.567	0.342	1.59	1.25	2.17
No.7	2008年7月19日	福島県沖	358	32km	M:6.9	1.102	1.437	2.088	0.374	1.290	1.580	1.695	2.347	2.141	0.801	3.95	3.06	1.27
No.8	2008年7月21日	福島県沖	402	27km	M:6.1	0.519	1.215	0.585	0.337	0.536	0.927	1.596	1.964	0.671	0.461	1.20	0.61	1.76
No.9	2008年7月24日	岩手県沿岸北部	104	108km	M:6.8	20.006	18.151	20.855	0.574	17.992	15.187	21.702	17.621	16.237	19.197	3.09	0.77	1.87
No.10	2008年7月24日	岩手県沿岸北部	112	112km	M:4.8	0.442	0.729	0.826	0.334	0.563	0.604	1.452	2.010	0.516	0.450	0.59	0.62	0.60

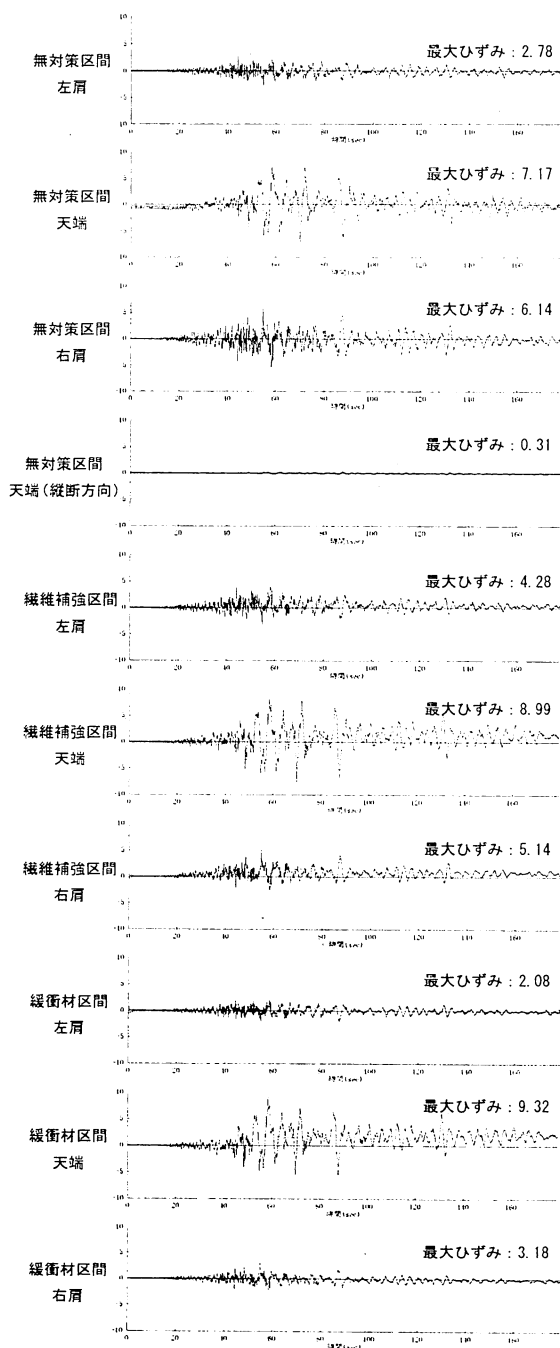


図-11 岩手・宮城内陸地震ひずみ計測結果

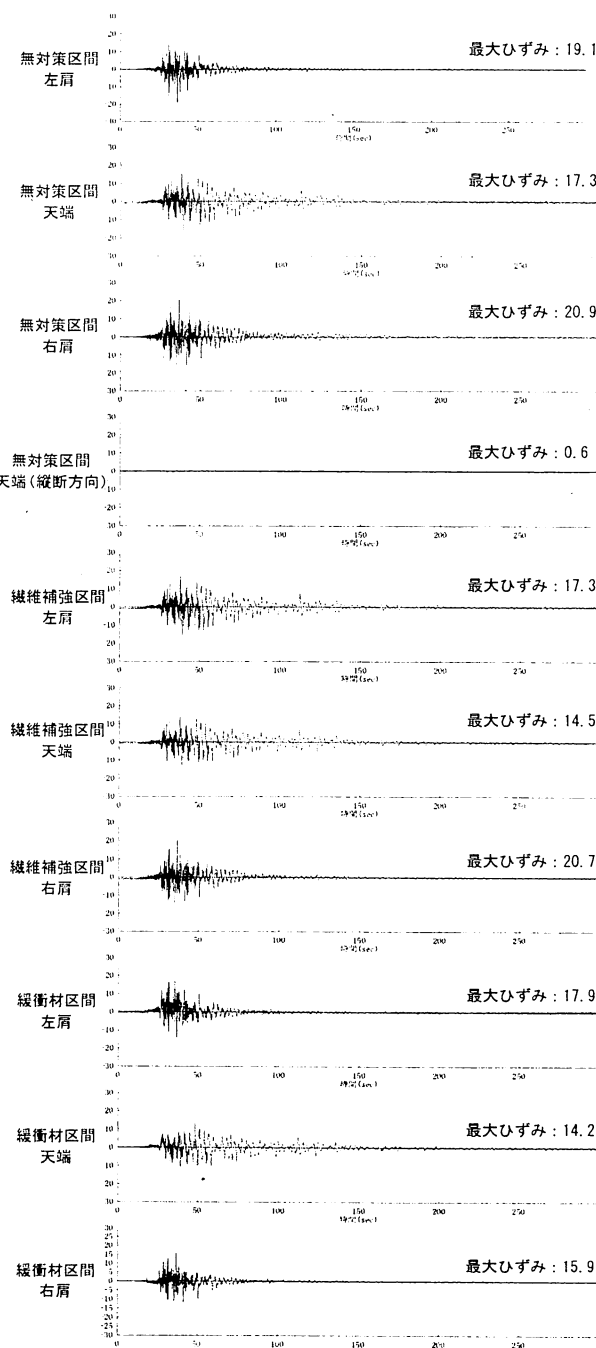


図-12 岩手県沿岸北部地震ひずみ計測結果

工法別にみると、例えば、岩手県沿岸北部地震では、無対策区間で約 20μ 、繊維補強区間で約 19μ 、および緩衝材区間で約 17μ となっており、無対策区間のものが相対的に大きくなる傾向がうかがえる。一方で、天端部の最大ひずみについては、例えば、岩手・宮城内陸地震では無対策区間で 7.17μ 、繊維補強区間で 8.99μ 、および緩衝材区間で 9.32μ となっており、耐震対策工の明確な効果を認めるには至っていない。

5. まとめ

東北新幹線錦ヶ丘トンネルで施工した緩衝材（EPS材）を使用した耐震対策工について、事前施工では緩衝材および防水シートの設置に手間を要したが、試験施工においては全般的に施工性に問題がないことを確認した。

さらに、無対策区間、繊維補強区間、緩衝材設置区間の3箇所の試験施工区間においてひずみ計測を実施し、対策効果の比較を行った。その結果、緩衝材を設置することにより覆工コンクリート肩部に発生するひずみが小さくなる傾向が確認された。しかし、覆工コンクリート天端部に発生するひずみについては、緩衝材設置の明確な効果を認めるには至っていない。さらに、緩衝材を設置する場合は、通常は無筋覆工コンクリートの場合と比較しトンネル断面の拡幅掘削や緩衝材の設置などを要するため、施工日数、工事費ともに増加することから、更なるデータの蓄積およびその分析や別途に実施している模

型実験や数値解析の結果を踏まえ、耐震対策工の効果を総合的に評価することとしている。

なお、本研究は、鉄道・運輸機構の「運輸分野における基礎的研究推進制度」により、京都大学、鉄道総合技術研究所および鉄道・運輸機構が共同で実施している「山岳トンネルの地震被害メカニズムと耐震性向上に関する研究」の一部である。

謝辞：本研究の遂行にあたって地震時挙動の計測、データ分析にご協力頂いた(株)ダイヤコンサルタント重田佳幸氏、大場諭氏に深甚なる謝意を示すものである。

参考文献

- 1) 吉川恵也：鉄道トンネルの震災事例調査，鉄道技術研究報告，N0.1123，1979.9
- 2) 朝倉俊弘，志波由紀夫，松岡茂，大矢敏雄，野城一栄：山岳トンネルの地震被害とそのメカニズム，土木学会論文集，No.659/III-52，pp.27-38，2000.9
- 3) 土木学会トンネル工学委員会新潟県中越地震特別小委員会報告書，2005.6
- 4) 朝倉俊弘，小島芳之，野々村政一，宮林秀次，磯谷篤実：小土被りトンネルにおける地震時挙動に関する研究，トンネル工学報告集第17巻，pp209-213，2007.11
- 5) 野城一栄，橘直毅，小島芳之，野々村政一，朝倉俊弘：地震による変位を想定したトンネルの模型実験，トンネル工学報告集第17巻，pp195-202，2007.11
- 6) 館山勝，矢口直行，平山勇治，花盛一郎：ポリマーを用いた地盤改良工法の研究，鉄道総研報告，Vol.16，No.3，2002