

地下構造物に適用するアスファルト系 免震材の特性

竹内幹雄¹・亀田 茂²・三澤孝史³・大角恒雄⁴・佐久間和弘⁵・佐藤誠一⁶・栗田 明⁷

¹正会員 株式会社奥村組 技術開発部 次長 (〒108-8381 東京都港区芝 5-6-1)

²正会員 株式会社奥村組 技術研究所 土木研究室 主任研究員 (〒300-2612 つくば市大字大砂 387)

³正会員 株式会社奥村組 技術研究所 機電研究室 主任研究員 (〒300-2612 つくば市大字大砂 387)

⁴正会員 工博 日本工営株式会社 中央研究所 開発研究部 課長 (〒300-1259 茨城県稲敷郡基崎町稲荷原 2304)

⁵正会員 日本工営株式会社 地盤構造部 技師 (〒102-8539 東京都千代田区麹町 5-4)

⁶正会員 日本工営株式会社 中央研究所 開発研究部 技師 (〒300-1259 茨城県稲敷郡基崎町稲荷原 2304)

⁷正会員 東亜道路工業株式会社 技術研究所 主任研究員 (〒232-0033 横浜市区南区中村町 5-318)

地下構造物において地震時に発生する断面力を低減させる方法の一つに構造物と地盤との境界部に低剛性で、高いせん断変形性能を有する免震層を設置し、地震時の地盤ひずみを吸収する方法がある。筆者らはこのような地下構造物の免震設計に適用する免震材料として開発を行ったアスファルト系免震材の材料特性を試験等で把握した。また、免震効果を数値解析で検討し、免震層と地盤の剛性比のみならず構造物と周辺地盤の剛性比も免震効果に大きな影響を及ぼすことなどを明らかにした。実施工に適用する場合を考慮して、現場実証実験を行い、その施工性についての知見も得た。

Key Words: asphalt emulsion, isolation, numerical simulation, underground structure, field test

1. はじめに

1995年1月の兵庫県南部地震では一般に地震に対して安全であるといわれてきた地下構造物にも多大な被害が生じた。これらの特徴は次のようである¹⁾²⁾。

- ①地盤のせん断変形によって断面方向のモーメントが最大となる部分に軸方向ひび割れが発生しやすい。
- ②支柱となる中柱のせん断破壊がない限りトンネルは崩壊しにくい。
- ③トンネル軸方向の動きによる影響は施工継手部、曲線部などに現れやすい。
- ④地盤が良好(大阪層群粘性土)であってもトンネルに被害が発生している。

シミュレーション等によると軸方向の被害が大きく出てよいはずであるが、横断面の被害が大きかったことがこの地震の一つの特徴でもある。

さて、地盤がせん断変形をするとトンネルの剛性によって直土圧が変化し、トンネルが地盤より硬ければ変形を増大させる側に作用し、軟らかければ変形を縮小させる側に作用する³⁾。

一方、周囲せん断力はトンネルの剛性に余り影響を受けないことがわかっている⁴⁾。

このようなことから、トンネルの耐震性の向上を図る手段として

- ①トンネルの剛性を低下させるとともにじん性を向上させる手法
(理想的には地盤剛性よりも低く、変形しても崩壊しないトンネル)
- ②トンネルをソフトコーティングし、周囲せん断力をカットするとともに直土圧の増大を防ぐ方法

などが考えられる。

筆者らは②の方法による免震工法の開発を官民共同研究の中で行ってきた⁵⁾。

開発された材料⁶⁾は安価ではあるが、ひずみに依存する特性があり、これが免震効果にどのような影響を与えるかを把握しておく必要がある。

本文は、この材料の特性とその免震効果および施工性について取りまとめたものである。

2. アスファルト系免震材の基本性質と特徴

(1) 配合

アスファルト系免震材の基本配合を表-2.1に示す。アスファルト系免震材は、基本材料に特殊ノニオン系アスファルト乳剤、硬化材として早強ポルトランドセメントを混合したもの(A液)に、高吸水性ポリマー(B液)を混合して得られる複合材料である。この複合材料の混合過程は、まずアスファルト乳剤と早強ポルトランドセメントなどの硬化材を混合攪拌し、硬化材を完全に分散させる。次に高吸水性ポリマーを添加してさらに混合を行う。すると5~30秒でゲル化し、以後はセメントの水和反応により硬化する。また、高吸水性ポリマーの添加量を変化させることにより、ゲルタイムを任意に設定できる。

(2) 使用材料

a) アスファルト乳剤

アスファルト乳剤は、原油精製時の最終段階で重油を減圧蒸留して得られるストレートアスファルトを特殊乳化剤と安定剤などを含む水溶液中に粒子径が数ミクロンとなるように乳化分散させた水中油滴型エマルジョンである。本アスファルト系免震材に使用するアスファルト乳剤は、セメント、フィラーおよび各種混和材などと均一混合が可能であるノニオンタイプを使用している。

b) 硬化材

硬化材には水硬性の材料を使用する。本アスファルト系免震材には、硬化特性を考慮し、一般市販品の早強ポルトランドセメントを使用する。しかし、適用箇所の諸条件に合わせ、普通ポルトランドセメント、超早強ポルトランドセメント、中庸熟ポルトランドセメント、高炉セメント、シリカセメントさらにフライアッシュセメントなど使用することが可能である。

c) 高吸水性ポリマー

アスファルト系免震材に使用する高吸水性ポリマーは、油中に数ミクロンの球状高吸水性ポリマー粒子が分散した油中水滴型のエマルジョンである。水の中に分散させると、油と吸水性ポリマー粒子は相転換を起し、水中に分散し速やかに水を吸収する。

高吸水性ポリマーは、アスファルト乳剤中の水を吸水し、増粘(ゲル化)させる目的で使用する。

(3) 性質と特徴

a) マトリックス構造

アスファルト系免震材の硬化物において、アスファルトとセメントの骨格構造がどのような状態であるか、内部の構造を確認するため、アスファルト系免震材をソックスレー抽出法により、アスファルトの抽出を実施した。

表-2.1 アスファルト系免震材の基本配合

	A液		B液
	アスファルト乳剤	早強ポルトランドセメント	高吸水性ポリマー
重量比	100	15	3

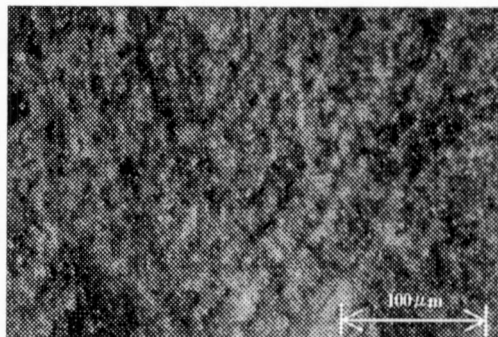


写真-1 アスファルト抽出前の表面拡大写真

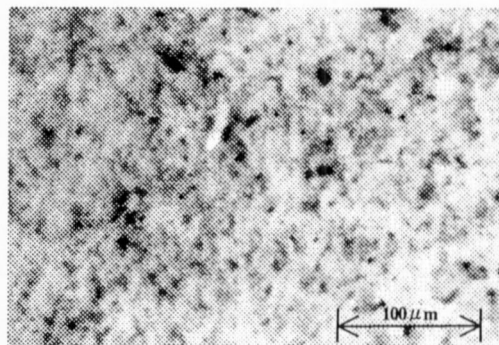


写真-2 アスファルト抽出後の表面拡大写真

写真-1、写真-2は、それぞれアスファルト抽出前、抽出後の表面状態を拡大したものである。供試体の内部まで完全にアスファルトを抽出したところ、セメントの骨格構造がポーラスな状態で残留しており、アスファルトならびにセメントの骨格構造は、互いに絡み合い連続層を形成していた様子がわかる。

このため、アスファルト系免震材は、セメントの骨格構造が外力などにより破壊されても、アスファルトの持つ粘弾性特性を損なうことがないと考えられる。

b) アスファルト系免震材の一般物性

アスファルト系免震材が硬化した後の諸物性を表-2.2に示す。材料分離度の結果より、アスファルト成分の浮き上がりやブリーディングそしてセメントの沈降がなく均一な状態で硬化していることが確認できる。透水試験は、大深度のシールドトンネルでアスファルト系免震材を使用した場合を想定して、水頭圧を0.1~0.4MPaに設

表-2.2 アスファルト系免震材の諸物性

項目	測定方法	測定値	備考
比重		1.114	
圧縮弾性係数 (MPa)	一軸圧縮試験	0.64~1.35	ひずみ速度:100mm/min ε:0.012~0.1 temp:15°C
ポアソン比	三軸圧縮試験	0.4	供試体:φ50mm×100mm, 非排水, ひずみ速度:1mm/min
材料分離度 (%)	単位体積重量法	0.0	鉄道用 CA モルタル試験法
透水係数 (cm/sec)	加圧式アウトプット試験法	$2.4 \times 10^{-9} \sim 8.8 \times 10^{-10}$	水頭圧:0.1~0.4MPa

表-2.3 浸漬24ヶ月後の性状変化

薬品名	外観	質量変化率 (%)	一軸圧縮強度比 (10%ひずみ時)	pH
酢酸 10%aq	変化無し	-0.5	1.00	2.2~2.3
硫酸ナトリウム 10%aq	"	0.2	0.99	7.0~7.2
水酸化ナトリウム 10%aq	"	0.4	0.99	13.8
海水	"	-0.1	1.00	7.1~7.2
水道水	"	0.2	1.00	7.0~7.2

定して行った。その結果、透水係数は 1.0×10^9 cm/sec 前後の値であり、アスファルト系免震材が高い止水性を有していることを確認した。また、水頭圧が高くなるにつれて透水係数も小さな値となり不透水性が高くなる傾向を示した。

c) 耐化学薬品性試験 (耐酸性, 耐アルカリ性, 耐海水)

本試験では、浸漬した供試体の外観変化の確認、質量変化の測定、そして一軸圧縮試験 (ひずみ速度 1mm/min, 試験温度 15°C) による一軸圧縮強度の測定を行い、水道水に浸漬した供試体と比較し、耐化学薬品性の評価を行った。なお、試料水溶液は濃度の変化を考慮して 28 日ごとに交換した。

表-2.3 に浸漬試験を開始してから 24 ヶ月後の性状を示す。24 ヶ月間の浸漬では、外観や質量変化の大きな変化は観察されなかった。また、一軸圧縮強度についても水道水に浸漬したものと比較して、各化学薬品の水溶液に浸漬したものはほとんど差が見られない。このためアスファルト系免震材は化学薬品の影響を受けにくいことが確認された。アスファルト系免震材は、鉄道のスラブ軌道などに使用されているセメント・アスファルト複合材⁹⁾と比較してアスファルトリッチな配合になっており、アスファルトのマトリックスがセメントの骨格構造を被覆しているため、セメントの骨格構造が直接、酸、アル

カリおよび海水と接触していない。このため大きな性状変化を起こしていないと考えられる。

(4) アスファルト系免震材の動的特性

a) せん断弾性係数、減衰定数のひずみ依存特性

アスファルト系免震材の動的特性を把握するため、くり返し中空ねじりせん断試験を実施した。試験条件を表-2.4、せん断弾性係数および減衰定数のひずみ依存特性を図-2.1 に示す⁹⁾。

この結果より、アスファルト系免震材は、加わるせん断ひずみによりせん断弾性係数が低下する材料非線形性を有していることが分かる。せん断弾性係数の低下は、骨格を形成するセメント構造がひずみの増加に伴い破壊されたものと推測できる。また、せん断ひずみの小さい領域 ($1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-3}$) では、せん断弾性係数および減衰定数に拘束圧依存性も認められ、拘束圧が大きいほどせん断弾性係数は大きく、減衰定数は小さくなっている。

図-2.2 および図-2.3 に載荷速度に関する考察として、くり返し周波数を 1Hz, 2Hz とした場合のせん断弾性係数および減衰定数のひずみ依存特性を示す。この結果より、載荷速度は減衰定数にはあまり影響がないもののせん断弾性係数は載荷速度 2Hz の方が大きい結果となっている。

表-2.4 くり返し中空ねじりせん断試験

項目	諸元等
供試体寸法	外径φ100mm, 内径φ60mm 高さ80mm
試験拘束圧	0.05, 0.15, 0.34 MPa
圧密排水条件	等方圧密非排水試験
制御方法	応力制御
繰り返し载荷回数	11回
繰り返し周波数	1.0 Hz, 2.0 Hz
計測ひずみ範囲	10 ⁻⁴ ~ 10 ⁻¹
水温	20°C ± 5°C

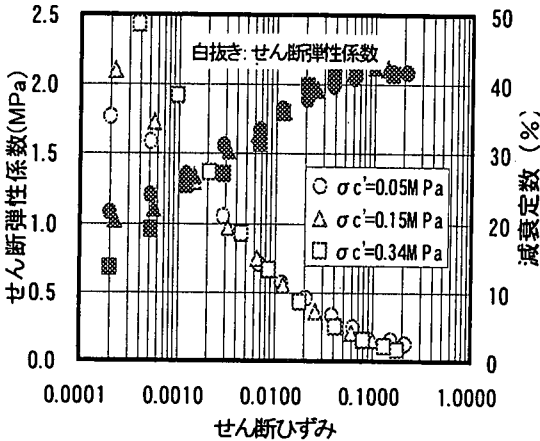


図-2.1 アスファルト系免震材のひずみ依存特性

アスファルト材料が有している粘弾性の影響が現れているものと考えられる。

b) 载荷-除荷-再载荷過程におけるせん断弾性係数の推移

図-2.2 は、一度、せん断ひずみ 2×10^{-1} レベルまでのせん断試験を行い、その供試体で直ちに再度試験を実施した場合(再载荷)のせん断弾性係数および減衰定数のひずみ依存特性を示している。この結果より、1回目のせん断ひずみ 2×10^{-1} レベルまでの载荷によって、骨格を形成するセメント構造が破壊されて、再载荷時ではアスファルト材料のせん断剛性(せん断弾性係数 0.2 MPa 程度)が支配的になったものと考えられる。

c) 免震設計に用いるアスファルト系免震材の動的変形特性

アスファルト系免震材がひずみおよび拘束圧に依存することより、免震設計計算においては任意の拘束圧下におけるせん断弾性係数および減衰定数のひずみ依存特性を把握する必要がある。そこで本検討では、動的変形試験結果で得られたせん断弾性係数および減衰定数のひずみ依存曲線を双曲線近似することにより、任意の拘束圧

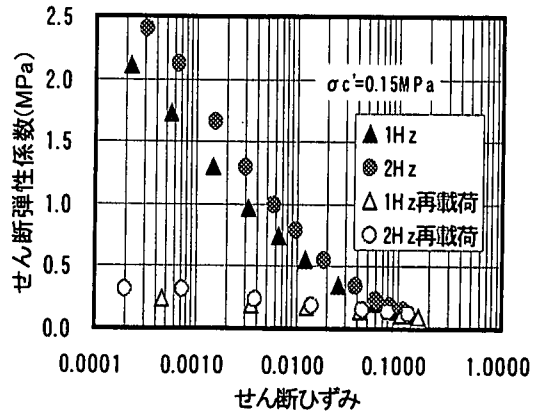


図-2.2 载荷-除荷-再载荷過程におけるせん断弾性係数

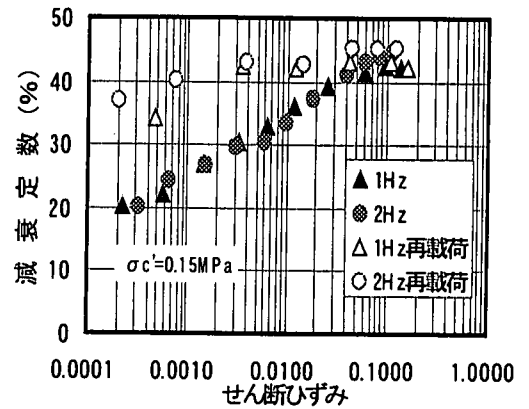


図-2.3 载荷-除荷-再载荷過程における減衰定数

下に対応できるように以下のように定式化した。定式化したせん断弾性係数および減衰定数のひずみ依存特性と動的変形試験によるひずみ依存特性との比較を図-2.4、図-2.5に示す。

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{(300\gamma + 1)} + \frac{a}{G_0} \quad (1)$$

$$h = 42 \left(1 - \frac{1}{300\gamma + 1} \right) \quad (2)$$

$$G_0 = 22 \left(\frac{\sigma'}{\sigma_0} \right)^{1/5} \cdot \left(\frac{f'}{f_0} \right)^{1/5} \quad (3)$$

- ここに、 σ_0 : 基準拘束圧(0.098MPa)
- f_0 : 基準繰返し载荷周波数(1.0Hz)
- a : 補正定数(0.098MPa)
- σ' : 任意の拘束圧
- f' : 繰返し载荷周波数

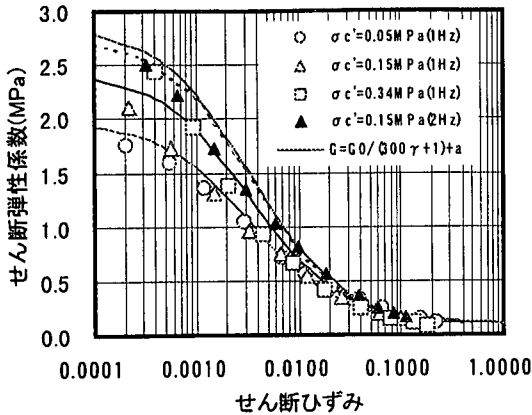


図-2.4 ひずみ依存曲線の定式化 (せん断弾性係数)

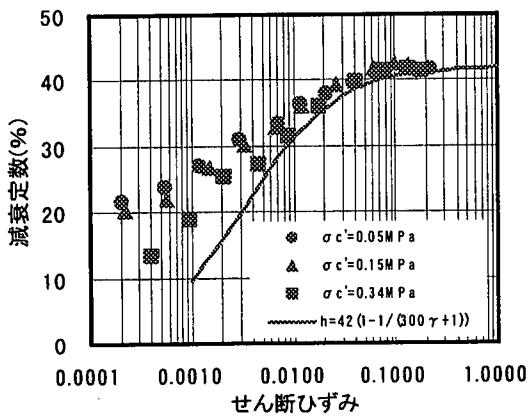


図-2.5 ひずみ依存曲線の定式化 (減衰定数)

3. 数値解析による免震効果の確認

ひずみ依存性を有するアスファルト系免震材の免震効果を確認することを目的に、有限要素法解析を用いた数値解析により試算を行った。検討対象の地下構造物は、シールドトンネルおよびボックスカルバートの2種類とした。

解析は、地下構造物の横断面方向を対象とした2次元有限要素法による動的解析(解析コード: Super-FLUSH)と、トンネル縦断方向を対象とした3次元有限要素法による静的解析^{5)・9)}(解析コード: TDAP III)を行った。なお、トンネル縦断方向については、シールドトンネルのみを対象として行った。

計算条件として、横断方向を対象とした解析については、①地下構造物の断面寸法の大小 ②入力レベル(レベル1地震動およびレベル2地震動)に着目した。

トンネル縦断方向については、免震層の設置区間に着目した。

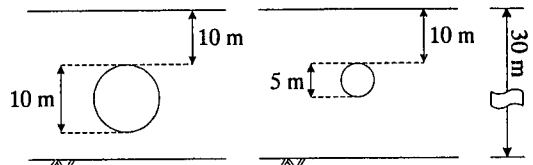


図-3.1 解析モデル (トンネル径 10m,5m)

表-3.1 解析ケース

ケース No.	断面寸法	入力レベル	免震層の有無
1	小	レベル1	なし
2	小	レベル1	あり
3	小	レベル2	なし
4	小	レベル2	あり
5	大	レベル1	なし
6	大	レベル1	あり
7	大	レベル2	なし
8	大	レベル2	あり

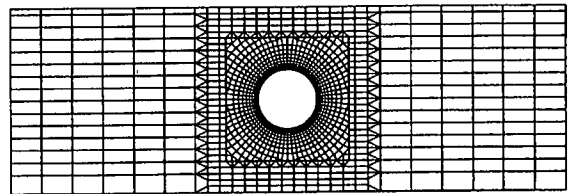


図-3.2 要素分割図 (トンネル径 10m)

(1) シールドトンネル横断方向の解析例

a) 解析条件

解析対象はトンネル外径 5m および 10m のシールドトンネルとした。解析モデルは、表層の厚さを 30m、土被りを 10m とした。免震層は厚さ 10cm とし、シールドトンネル全周に設置した。解析モデルを図-3.1 に示す。また、解析ケースは、トンネル径の大小、入力レベルの大小および免震層の有無に着目し計 8 ケースとした。解析ケースを表-3.1 に示す。

要素分割図を図-3.2 に示す。地盤および免震層は平面ひずみ要素で、トンネル覆工部ははり要素でモデル化した。境界条件として側面はエネルギー伝達境界、底面は粘性境界とした。

トンネル覆工部の断面性能および物性を表-3.2、表-3.3 に示し、地盤および免震層の物性を表-3.4 に示す。また、地盤および免震材の非線形については等価線形手法により、ひずみ依存性を考慮した。地盤のひずみ依存曲線については建設省土木研究所資料⁹⁾より沖積砂質土のひずみ依存曲線を用い(図-3.3)、免震材については図-2.4、図-2.5 を用いた。

入力地震動は、レベル1 相当として道路橋示方書¹⁰⁾に示されている第 I 種地盤用入力地震動である修正開北橋

表-3.2 トンネル覆工部の断面性能

	セグメント厚 (m)	断面積 (m ² /m)	断面二次モーメント (m ⁴ /m)
小断面トンネル	0.225	0.225	0.0007594
大断面トンネル	0.45	0.45	0.006075

表-3.3 トンネル覆工部の物性値

弾性係数 (MPa)	単位体積重量 (kN/m ³)	ポアソン比	減衰定数 (%)
2.94×10 ⁴	25.97	0.2	5

表-3.4 地盤及び免震材の物性値

	N値	単位体積重量 (kN/m ³)	せん断波速度 (m/sec)	せん断弾性係数 (MPa)	ポアソン比
沖積砂質土	20	17.64	217	84.8	0.45
免震材	—	9.8	—	1.96	0.40

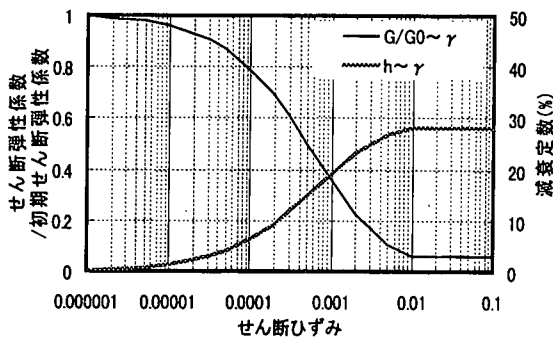


図-3.3 地盤のひずみ依存特性

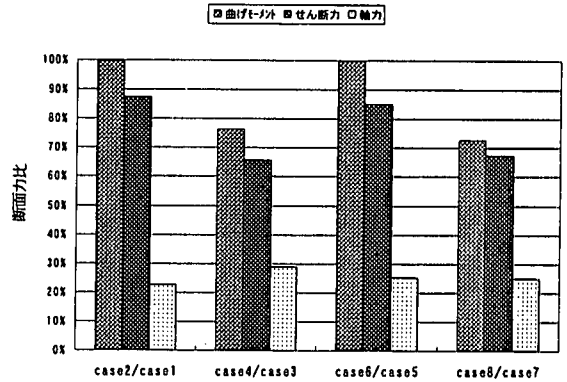


図-3.5 解析結果

解析を行い、トンネル覆工部に作用する地震時増分断面力を算出し、免震効果を比較検討した。

b) 解析結果

図-3.5に、各々の免震層なしのケースにおける最大地震時増分断面力に対する、免震層ありのケースにおける同時刻での地震時増分断面力比を示す。

解析結果より以下のことがわかる。

- ①大断面モデルのレベル2入力時に最も免震効果が発揮され、トンネル覆工の地震時増分断面力は免震なしの場合と比較して、曲げモーメント、せん断力において3割程度、軸力で7割程度低減される。
- ②入力レベルの違いによる免震効果は、大断面の軸力を除きレベル2の方が大きい。
- ③断面寸法の違いによる免震効果は、今回の解析条件では、大きな差異はみられない。

また、追加検討として、トンネルスプリングライン上に地層境界を仮定し、地表面側に軟弱地盤、基盤側に硬質地盤が存在する場合の解析も行った。本ケースにおいても、地層境界が存在しない場合の解析結果と同様の傾向を示した。

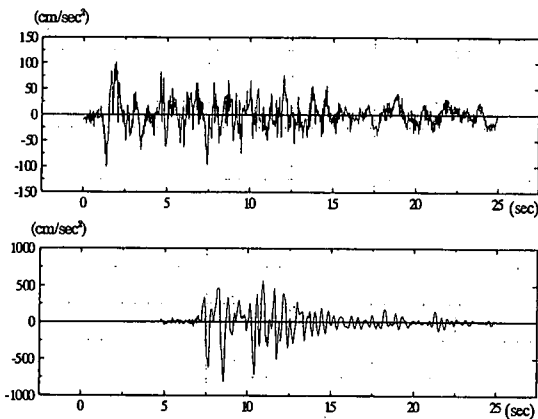
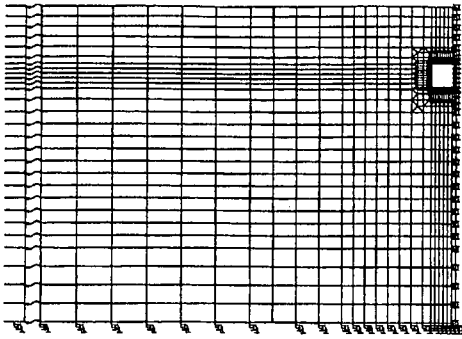


図-3.4 解析に用いた入力地震動時刻歴波形

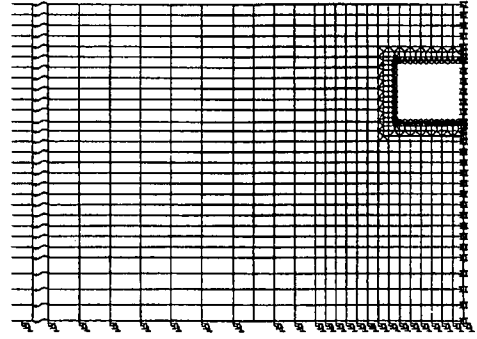
(上：レベル1,開北橋観測波,
下：レベル2,神戸海洋気象台観測波)

記録を入力とした。また、レベル2相当として兵庫県南部地震の神戸海洋気象台観測波 (NS 成分) を用いた。解析に用いた入力地震動の時刻歴波形を図-3.4に示す。

これらの解析条件に基づいた、2次元有限要素法動的



小断面モデル



大断面モデル

図-3.7 要素分割図

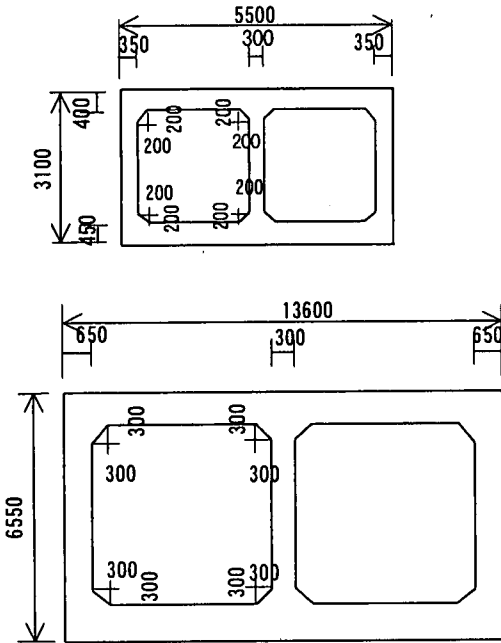


図-3.6 ボックスカルバートの断面寸法

表-3.5 解析ケース

ケース No.	断面寸法	入力レベル	免震層の有無
1	小	レベル1	なし
2	小	レベル1	あり
3	小	レベル2	なし
4	小	レベル2	あり
5	大	レベル1	なし
6	大	レベル1	あり
7	大	レベル2	なし
8	大	レベル2	あり

表-3.6 ボックスカルバートの断面性能

	部材	断面積 m ² /m	断面2次モーメント m ⁴ /m
小断面 トンネル	上床版	0.4	5.33×10 ³
	側壁	0.35	3.57×10 ³
	中壁	0.3	2.25×10 ³
	下床版	0.45	7.59×10 ³
大断面 トンネル	上床版	0.75	3.52×10 ²
	側壁	0.65	2.29×10 ²
	中壁	0.3	2.25×10 ³
	下床版	0.8	4.27×10 ²

表-3.7 ボックスカルバートの物性値

弾性係数 MPa	単位体積重量 kN/m ³	ポアソン比	減衰定数 %
2.31×10 ⁴	24.5	0.2	5

(2) ボックスカルバート横断方向の解析例

a) 解析条件

解析ケースを表-3.5に示す。

図-3.6にボックスカルバートの断面寸法¹²⁾を示す。解析対象は2連のボックスカルバートとした。解析モデルは、表層の厚さを30m、土被りを5mとした。免震層は厚さ10cmとし、ボックスカルバート外周部全てに配置した。

要素分割図を図-3.7に示す。モデルはハーフモデルとし、地盤および免震層は平面ひずみ要素で、ボックスカルバートは、梁要素でモデル化した。境界条件は、右側は水平ローラー、左側はエネルギー伝達境界、底面は粘性境界とした。

ボックスカルバートの断面性能および物性を表-3.6、表-3.7に示す。断面性能は、全断面有効として求めた。地盤および免震層の物性はシールドトンネルと同様に、表-3.4に示す物性を用い、地盤および免震層のひずみ依存性は等価線形手法により考慮した。なお、構造物の非線形性についても考慮すべきだが、ここでは免震効果に及ぼす要因を絞って検討を行ったため考慮していない。入力地震動は、シールドトンネルと同様である。

表-3.8 周辺地盤、免震層の収束剛性およびボックスカルバートの見かけのせん断弾性係数

ケース No.	解析モデル	周辺地盤の収束せん断弾性係数 MPa	免震層の収束せん断弾性係数 MPa	せん断弾性係数比 (免震層/周辺地盤)	ボックスカルバートの見かけのせん断弾性係数 MPa	せん断弾性係数比 (ボックスカルバート/周辺地盤)
4	小断面	38.79	0.17~0.42	0.0044~0.011	50.46	1.30
8	大断面	31.35	0.063~0.16	0.0020~0.0051	18.45	0.59

b) 解析結果

解析結果より側壁および中壁に着目した。図-3.8に、免震層なしのケースに対する、免震層ありのケースの最大地震時増分断面力の比を示す。

図より以下のことがわかる。

- ① 中壁については、小断面モデルのレベル2入力時が最も大きく低減しており、曲げモーメントで約65%、せん断力で約64%低減している。
- ② 側壁については、小断面モデルのレベル2入力時がせん断力を除いて最も大きく低減しており、曲げモーメントで約65%、せん断力で約60%、軸力で約77%低減している。
- ③ 入力地震動の入力レベルの違いによる免震効果は、側壁、中壁ともレベル1よりもレベル2の方が大きい。
- ④ 断面寸法の違いによる免震効果は、入力レベルによらず、中壁では、曲げモーメント、せん断力とも、小断面モデルの方が大きい。側壁では、曲げモーメント、軸力は小断面モデルの方が免震効果は大きいですが、せん断力については若干大断面モデルの方が大きくなっている。

既往の研究結果より周辺地盤と免震層の剛性比が小さいほど、免震効果が大きいことが明らかにされている³⁾。

表-3.8にレベル2入力時における周辺地盤と免震層の収束剛性を示す。ただし、表中の周辺地盤のせん断弾性係数の収束値は、ボックスカルバートの中心位置の深さに相当する自由地盤のせん断弾性係数を用いた。また、ボックスカルバート全体としての見かけのせん断弾性係数も併記している。ただし、ボックスカルバート全体としての見かけのせん断弾性係数は、梁要素によりモデル化したボックスカルバートの上床版に、せん断方向の分布荷重を作用させた骨組構造解析結果より求められる相対変位より算出した。

表-3.8より、剛性比(免震層のせん断弾性係数/周辺地盤のせん断弾性係数)は、大断面モデルの方が小断面モデルよりも小さくなっている。しかし、免震効果は前述したように、側壁のせん断力以外の断面力について、小断面モデルの方が大きい結果となっている。

この要因の一つとして、周辺地盤に対するボックスカルバートの剛性比の影響が考えられる。このことを明らかにするために小断面モデルを用い、追加計算を行った。

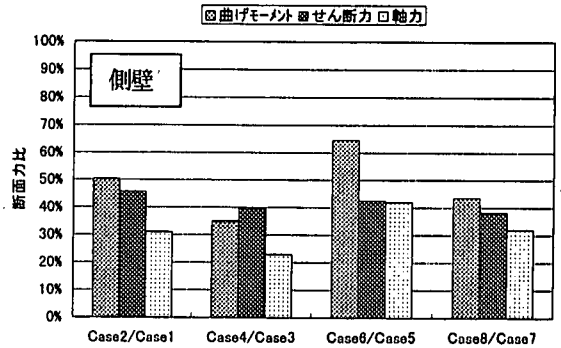
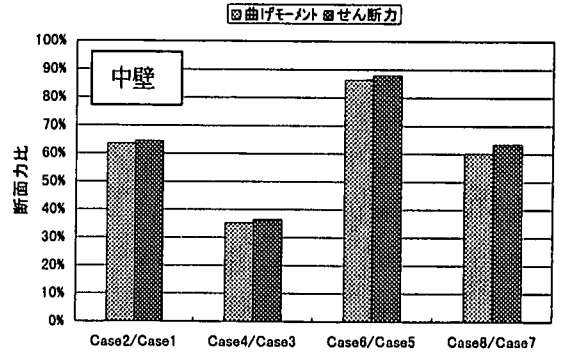


図-3.8 解析結果

解析ケースを表-3.9に示す。小断面モデルのボックスカルバート全体としての見かけのせん断弾性係数は、周辺地盤よりも大きく、1.3倍程度(表-3.8参照)である。これに対し、ボックスカルバート各部材の断面2次モーメントを0.3, 0.4, 0.5, 1.5倍とし、曲げ剛性をパラメトリックに変えることにより周辺地盤に対するボックスカルバートの剛性比を変化させ、各ケースごとに免震層ありと免震層なしについて解析した。

解析は、免震層と周辺地盤の剛性比が一定となるように線形計算とした。周辺地盤および免震層の物性(せん断弾性係数、減衰定数)は、前述の解析ケース4の収束物性を全要素一様に設定した。なお、入力地震動は、レベル2とした。

同様にシールドトンネルの場合についても、周辺地盤と免震層の剛性比(表-3.10参照)だけでなく、周辺地盤とトンネルの剛性比が免震効果に影響を与えることが考えられる。そこでトンネル部材の断面2次モーメントを0.5, 5, 10, 15倍し、曲げ剛性をパラメトリックに変化させて免震層ありの場合となしの場合についてボックスカル

表-3.9 解析ケース

ケース No.	ボックスカルバートの断面2次モーメント	周辺地盤のせん断弾性係数 MPa	免震層のせん断弾性係数 MPa	せん断弾性係数比 (ボックスカルバート/周辺地盤)
A	表-3.8と同様	38.79	0.17	1.30
B	ケースAの0.3倍			0.40
C	ケースAの0.4倍			0.53
D	ケースAの0.5倍			0.66
E	ケースAの1.5倍			1.99

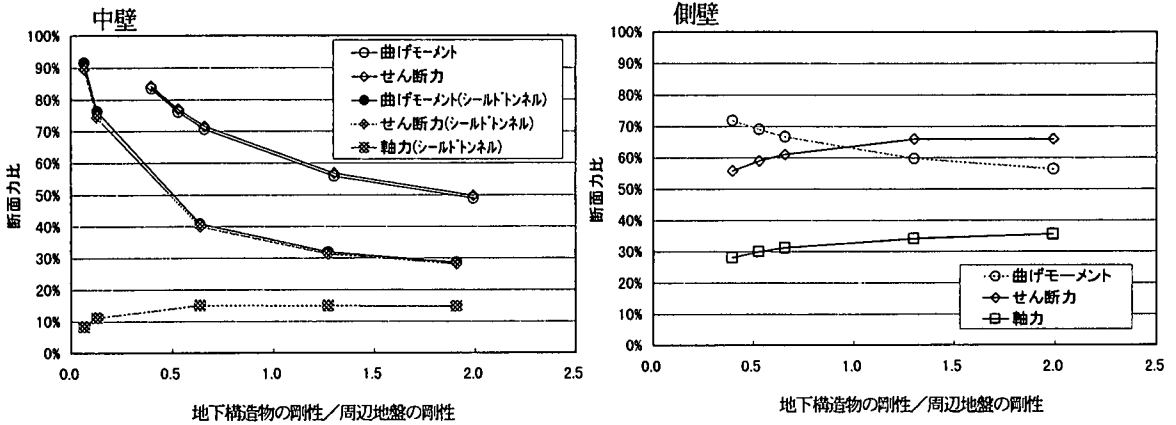


図-3.9 構造物と周辺地盤の剛性比と断面力比の関係

表-3.10 周辺地盤および免震層の収束剛性値 (シールドトンネル、レベル2入力時)

ケースNo.	解析ゲル	周辺地盤の収束せん断弾性係数 (MPa)	免震材の収束せん断弾性係数 (MPa)	せん断剛性比 (免震層/周辺地盤)
4	小	33.8	0.13	0.0038
8	大	28.6	0.06	0.0021

表-3.11 シールドトンネル覆工部の剛性比

ケースNo.	解析ゲル	トンネル覆工部の剛性 (kN・m ²)	トンネル覆工部の等価剛性 (kN・m ³)	剛性比
4	小	2.23×10 ⁴	1.76×10 ⁵	0.127
8	大	1.79×10 ⁵	1.19×10 ⁶	0.150

パートと同様の線形解析を行った。なお、免震層、地盤の物性値についてはボックスカルバートと同様、解析ケース4の収束値を用いた。

図-3.9に断面力比と周辺地盤に対するボックスカルバートおよびシールドトンネルの剛性比の関係を示す。断面力比は、各ケースにおける免震層なしの場合に対する免震層ありの場合の最大断面力比である。本解析条件下の解析結果では、同図より以下のことがわかる。

① 中壁については、周辺地盤に対するボックスカルバートの剛性比が大きくなると、曲げモーメント、

せん断力とも低減する。

- ② 側壁については、周辺地盤に対するボックスカルバートの剛性比が大きくなると、曲げモーメントは低減する。せん断力、軸力は、若干大きくなる。
- ③ シールドトンネルについては、中壁と同様、周辺地盤に対するトンネルの剛性比が大きくなると、曲げモーメント、せん断力とも低減し、軸力については若干増加することがわかる。

以上より、ボックスカルバートおよびシールドトンネルの周辺地盤に対する剛性比は、免震層と周辺地盤の剛

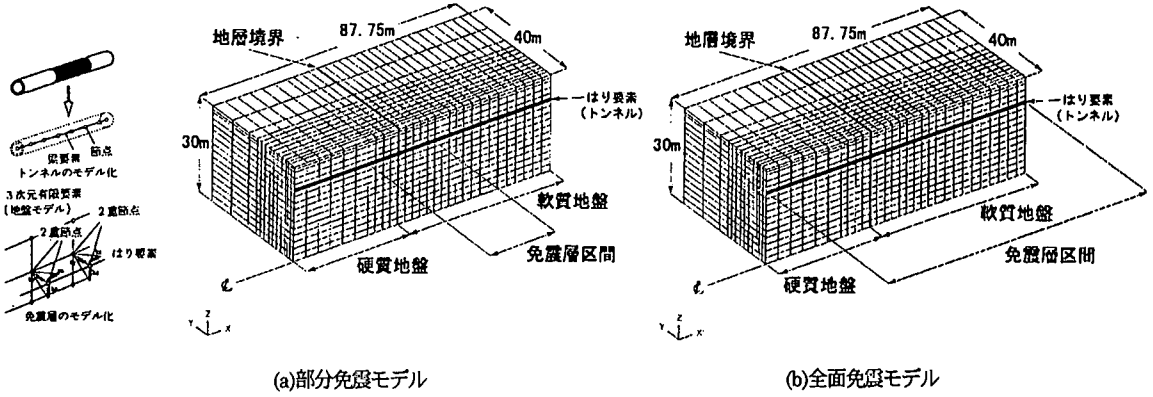


図-3.10 解析モデル

表-3.12 免震層の等価ばね定数

トンネル軸方向 (kN/m)	トンネル軸直角方向 (kN/m)
19.9	50.0

表-3.13 地盤物性値

	単位体積重量 (kN/m ³)	せん断弾性係数 (MPa)	ポアソン 比	減衰定数 (%)
硬質地盤	17.64	37.2	0.45	16.8
軟質地盤	15.68	15.7	0.49	10.9

性比の影響と同様に、免震効果に影響を与えることがわかる。

これより、ボックスカルバートの大断面モデルと小断面モデルの免震効果の差異について考察すると、大断面モデルの周辺地盤に対するボックスカルバートの剛性比は約60%程度(表-3.8参照)であり、小断面モデルの方が周辺地盤に対するボックスカルバートの剛性比は大きい。このため、中壁では図-3.9の結果と同様に、曲げモーメント、せん断力は小断面モデルの方が大きく低減したと考えられる。

側壁についても、曲げモーメント、せん断力は図-3.9と同様の傾向を示している。ただし、軸力については大きな差はないが異なる傾向を示している。これは、周辺地盤に対するボックスカルバートの剛性比、免震層と周辺地盤の剛性比、計算モデルの違い等の影響が免震効果に総合的に作用した結果と考える。

シールドトンネルについては、表3-11に示す通り、解析ケース4、8と線形解析結果とは曲げモーメント以外は若干異なる傾向を示している。これは側壁と同様に、計算モデルの違い等の影響が免震効果に総合的に作用した結果と考える。

(3) シールドトンネル縦断方向の解析例

a) 解析条件

解析対象はトンネル外径10mのシールドトンネルとし、免震層を設置しない場合(免震なし)地層境界付近のみ免震層を設置する場合(部分免震)、解析モデル全体にわたり免震層を設置する場合(全面免震)のそれぞれにつ

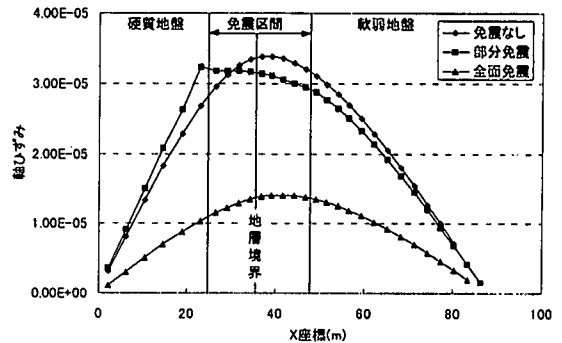


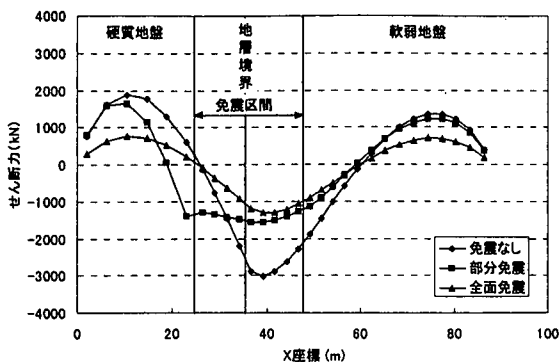
図-3.11 3次元静的解析結果 軸ひずみ分布(軸方向荷重)

表-3.14 3次元静的解析結果 軸ひずみ最大値・低減比

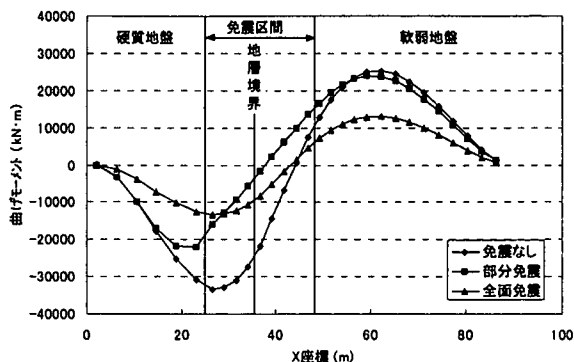
軸ひずみ	免震なし	部分免震	全面免震
最大値	3.38×10^5	3.24×10^6	1.41×10^6
低減比	-	95.9%	41.7%

いて解析を行った。

解析モデルは地下構造物の免震設計法マニュアル(案)⁷⁾より、地盤をソリッド要素、トンネルをはり要素、免震層をばね要素でモデル化した3次元FEM簡易モデル⁸⁾を用いモデル化を行った(図-3.10)。また、免震層の等価ばね定数は免震層のみで有限要素法解析を行い算出した。算出した免震層の等価ばね定数を表-3.12に示す。免震材、地盤の剛性および減衰についてはシールドトンネル横断方向の解析結果より収束値を用い、その他の物



(a) せん断力分布



(b) 曲げモーメント分布

図-3.12 3次元静的解析結果 (軸直角方向荷重)

表-3.15 3次元静的解析結果 断面力最大値・低減比

	せん断力 (kN)			曲げモーメント (kN·m)		
	免震なし	部分免震	全面免震	免震なし	部分免震	全面免震
最大値	3010	1560	1300	33300	23800	13400
低減比	-	51.8%	43.2%	-	71.5%	40.2%

表-3.16 応力度比較

	免震なし	部分免震	全面免震
軸応力度 MPa	0.99	0.95	0.43
曲げ応力度 MPa	2.16	1.54	0.87

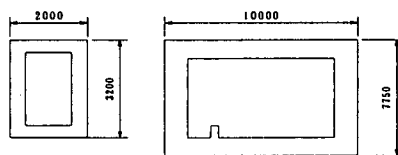


図-4.1 ボックスカルバート断面図

性値を表-3.13に示す。

以上のモデルにレベル2相当として静的水平震度 0.3 をモデル全体にわたって一様にトンネル軸方向および軸直角方向へ作用させ、3次元有限要素法静的解析を行った。

b) 解析結果

図-3.11 および表-3.14 にトンネル軸方向荷重の場合 (以下、軸方向荷重) の解析結果を、図-3.12(a), (b) および表-3.15 にトンネル軸直角方向荷重の場合 (以下、軸直角方向荷重) の解析結果を示す。軸方向荷重については、軸ひずみのトンネル軸方向分布図、最大値、免震層なしの場合と免震層が存在する場合との最大値の比 (断面力比) を示す。軸直角方向荷重については、せん断力、曲げモーメントのトンネル軸方向分布図、最大値、断面力比について示した。解析結果より以下のことがわかる。

- ① 荷重方向によらず、免震層設置区間において断面力は平滑化される。特に全面免震の場合、その効果は顕著である。
- ② 軸方向荷重時における軸ひずみの低減比は、部分免震で4%、全面免震で58%であり、軸直角方向荷重時における曲げモーメントの低減比は、部分免震では

28%、全面免震では60%となる。また、応力度の比較 (表-3.16) より、軸直角方向荷重時のトンネル断面発生応力が支配的となることがわかる。

4. 施工性

(1) 開削トンネルでの施工性

開削トンネルおよびシールドトンネルでの試験施工よりアスファルト系免震材の施工性について述べる。

開削トンネルにおける施工性はボックスカルバート目地部外防水試験施工結果より、シールドトンネルにおける施工性は免震材にて裏込注入を実施した結果より述べる。

a) 施工概要

図-4.1に示す2種類の断面を有するボックスカルバートの目地部外防水工として、アスファルト系免震材と同じ成分を有するアスファルト・セメント混合材を用いて10箇所施工した。



写真-3 施工完了状況

施工は現地にてアスファルト乳剤とセメントを混合攪拌した後、高吸水性ポリマーを混合したものを側壁部に設置した型枠内（幅200mm×厚さ30mm）に打設した。

b) 施工結果

施工時のハンドリング、型枠の脱型などの施工性については特に問題なかった。3日間の養生で脱型したが側部における変形等は認められなかった。写真-3に施工完了状況を示す。

また埋戻し後、目地部からの漏水がまったく認められないことからコンクリートとの付着性は非常に良好であることが窺える。

(2) シールドトンネルでの施工性

a) 施工概要

開発したアスファルト系免震材を用いてシールド工事現場で裏込注入と同様にグラウトホールより免震材の注入を行い、注入システムの施工性の検証と土水圧を受けた状況下での免震材充填性及び充填圧保持性の確認を行った。

実施した現場概要は以下のとおりである。

工法：泥水加圧式シールド工法

寸法：掘削外径2,680mm, セグメント外径2,550mm
土被り：11m

シールド通過位置の地層：シルト層, N値0~3

地下水位：GL.-2m

b) 注入及び計測

注入システムとしては図-4.2に示す2液1系統式注入工法（1.5ショットタイプ）を用いた。免震材の注入は、セグメントがシールドマシンのテール部を抜けたと同時に注入を開始した。計測は、注入時のポンプ・注入口での吐出圧及びセグメントへの作用圧を測定した。セグメントの作用圧は土圧計をセグメントに組み込みその経時変化を測定した。土圧計(No.1, No.2)の配置と注入口位置を図-4.3に示す。

c) 注入量及び注入圧

実注入量はテールポイド量(0.53m³)の約150%(0.8m³)であった。

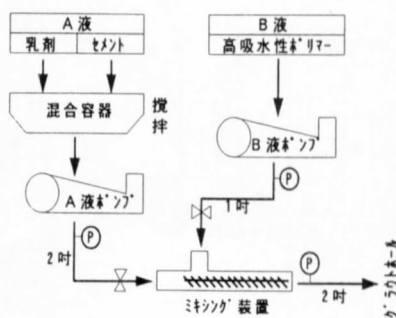


図-4.2 注入システム



図-4.3 注入口及び土圧計位置

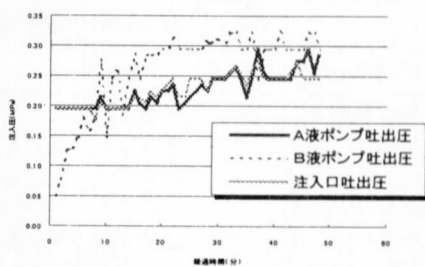


図-4.4 注入圧変化

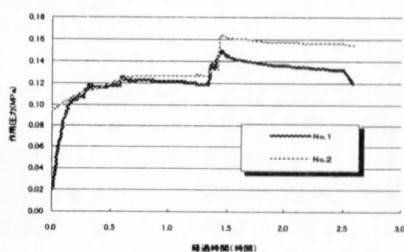


図-4.5 注入時の作用土圧

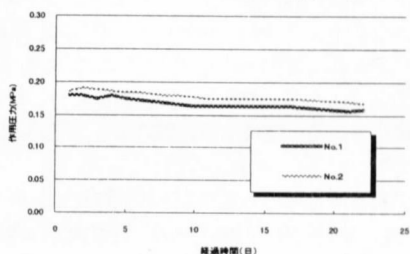


図-4.6 注入後の作用土圧

図-4.4に注入圧の経時変化を示す。ポンプの吐出圧とその変化は実現場における裏込注入と同程度であった。また、注入口での吐出圧も変化が少なく、注入開始時と終了時の差は0.05MPa程度であった。

d) 注入時充填圧及び経時変化

免震材注入における充填圧の変化を観察するためセグメントに作用する圧力の経時変化を計測した。

図-4.5は免震材の注入時における土圧計の経時変化である。注入を始めるとNo.1の土圧計はすぐにNo.2の土圧計と同程度の値になり、その後は徐々に上昇しながら両土圧計とも0.12MPa程度で一定値となった。土圧計に近い注入口2に注入口を替えるとNo.1, No.2の土圧計の値は急激に0.03MPa程度上昇した。

図-4.6は、免震材注入後3週間のセグメント作用圧の経時変化を示したものである。セグメントへの作用圧は徐々に減少しながら一定値に落ち着いており、セグメントから漏水も認められなかった。

5. まとめ

以上、地下構造物に適用するアスファルト系免震材の特徴と免震効果および施工性について述べた。

これらのことをまとめると以下の様である。

- 1) 免震材のせん断弾性係数はひずみ、拘束圧、載荷速度に依存する性質がある。
- 2) 免震材の減衰定数はひずみ、拘束圧に依存する性質がある。
- 3) シールドトンネル、ボックスカルバートとも断面方向の免震効果はレベル2で大きい。
- 4) トンネルの地盤に対する剛性比は免震効果に影響を及ぼす。
- 5) 部分免震より全面免震の方が免震効果が高い。
- 6) 開削トンネルでは通常の型枠を使用した施工が可能である。
- 7) シールドトンネルでは通常の裏込注入による施工が可能である。

謝辞：本研究は平成7年度から3カ年で建設省土木研究所と(財)土木研究センターならびに民間17社との共同研究「地下構造物の免震設計に適用する免震材の開発に関する研究」の一環として行われたものを基本とし、より詳細な試験、解析および実験を実施して検討を行ったものである。

貴重な助言を頂いた建設省土木研究所耐震研究室をはじめとする関係各位に甚深い謝意を表します。

参考文献

- 1) 竹内幹雄, 岩橋敏広, 佐佐千載: 兵庫県南部地震における都市トンネルの被害と特徴, 土木学会第1回免震・制震コロキウム講演論文集, pp. 163-170, 1996. 11.
- 2) 中村敏晴, 竹内幹雄他: 兵庫県南部地震による神戸市営地下鉄(駅間線路部)の被害と分析, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, pp. 377-382, 1998. 11.
- 3) 竹内幹雄, 井戸田芳昭, 高橋忠, 三澤孝史: シールドトンネルの断面内地震時応力低減効果に関する実験的研究, 土木学会論文集, No. 483/I-26, pp. 107-116, 1994. 1.
- 4) 竹内幹雄, 三澤孝史: 裏込材を利用したシールドトンネルの免震構造に関する基礎的研究, 第9回日本地震工学シンポジウム論文集, pp. 1837-1842, 1994.
- 5) 建設省土木研究所, (財)土木研究センター, 民間17社: 地下構造物の免震設計に適用する免震材の開発に関する共同研究報告書(その1), (その2), (その3), 土木研究所共同研究報告書第154号, 第192号, 第211号, 1996年11月, 1997年12月, 1998年9月.
- 6) 森吉昭博, 深井一郎, 竹内幹雄, 井戸田芳昭: 常温水中硬化型瀝青系新複合材料の開発と特性—地中構造物の防水材料として—, 土木学会論文集, No. 433/V-15, pp. 157-166, 1991. 8.
- 7) 樋口芳朗, 塩尻謙太郎, 中村利夫, 今村義和: セメント・コンクリート, No. 384, pp. 10-14, 1977. 6.
- 8) 大角恒雄: 免震トンネルにおける3次元応答震度法の一考察, 第25回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, 1-46, pp. 92-93, 1998. 3.
- 9) 岩崎敏男, 龍岡文夫, 高木義和: 地盤の動的変形特性に関する実験的研究(II), 土木研究所報告153号の2, 1980. 3.
- 10) (社)日本道路橋会: 道路橋示方書・同解説V耐震設計編 1990年2月.
- 11) 建設省土木研究所, (財)土木研究センター, 民間17社: 地下構造物の免震設計に適用する免震材の開発に関する共同研究報告書—地下構造物の免震設計マニュアル(案)—, 1998年9月.
- 12) (社)全日本建設技術協会: 土木構造物標準設計第1巻, 1986年2月.

(1999. 5. 17 受付)

THE CHARACTERISTICS OF ASPHALT-BASED MATERIAL FOR THE SEISMIC ISOLATION APPLIED TO THE UNDERGROUND STRUCTURE

Mikio TAKEUCHI, Shigeru KAMEDA, Takashi MISAWA, Tsuneo OOSUMI,
Kazuhiro SAKUMA, Seiichi SATOH and Akira KURITA

It is one of the methods in which the stress which arises in the earthquake is reduced to install the layer with low-rigidity and high shearing deformation performance around the underground structure.

The property of the developed asphalt-based seismic isolation was shown. And, It was proven that not only rigidity ratio of seismic isolation layer and ground but also that of structure and ground caused large effect by the numerical simulation.

The field test for actual operation was carried out, and a constructive knowledge was obtained.