

# 大地震を想定した開削トンネルの免震効果

江寄順一<sup>1</sup>・服部正博<sup>2</sup>・伊東守<sup>3</sup>・清水全生<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 佐藤工業株式会社 中央技術研究所 土木研究部 (〒103東京都中央区日本橋本町四丁目12-20)

<sup>2</sup>佐藤工業株式会社 中央技術研究所 土木研究部 (〒103東京都中央区日本橋本町四丁目12-20)

<sup>3</sup>正会員 佐藤工業株式会社 中央技術研究所 土木研究部 (〒103東京都中央区日本橋本町四丁目12-20)

<sup>4</sup>正会員 佐藤工業株式会社 技術本部 土木技術部 (〒103東京都中央区日本橋本町四丁目12-20)

本論文では、大地震を想定した開削トンネルの免震効果を把握することを目的に、免震材のせん断弾性係数をパラメトリックに変えた2次元動的FEM解析を実施し、免震材のせん断弾性係数とトンネルの地震時増分断面力の低減比の関係について検討した。解析モデルは、兵庫県南部地震において地下構造物として被害が大きかった大開駅の周辺地盤と2連ボックスカルバート形式の開削トンネルを対象とした。入力地震動には兵庫県南部地震で得られた実測波を用いた。この結果、トンネル全外周に地震時に低下したせん断弾性係数の4%程度のせん断弾性係数を持つ厚さ10cmの免震材を配置すれば、地震時に増加する曲げモーメントとせん断力は70%程度に低下することが明らかになった。

**Key Words** : *Open-cut tunnel, Numerical simulation, isolation method, Strong earthquake*

## 1. 検討概要

地下構造物は、一般に地震時に生じる地盤変位に追従して挙動する特徴があり、断面剛性を高めるほど、地震時断面力は大きくなるが、かならずしも、断面剛性を高めることが耐震安全性上有効な手段とは限らない場合がある。こうした場合における地下構造物の免震技術としては、いくつかの研究が報告されており、このひとつとして地震時の地盤変形を地下構造物に伝える方法がある。この方法は、地下構造物の周囲に柔軟なゴム系材料を配置することにより、過大な変位を地下構造物本体に生じさせることなく、地震時の断面力を低減させるものである。本報告は、開削トンネルにこの免震技術を適用し、トンネル横断方向における免震効果を検討したものであり、建設省土木研究所を中心に組み込まれている共同研究の成果の一部である。

本報告では、平成7年1月17日に発生した兵庫県南部地震の被害を踏まえた都市直下型地震等の大地震クラスに対する開削トンネルの横断方向の免震効果を検討する。具体的には、兵庫県南部地震で得られた観測波を用い、免震材のせん断弾性係数をパラメトリックに変えた動的FEM解析を実施し、免震材のせん断弾性係数と構造物の地震時増分断面力の低減率の関係を明らかにする。

## 2. 解析方法

入力地震動として水平動と上下動を同時に入力し、地盤の非線形性を等価線形化法により考慮した複素応答解析手法に基づいた「Super FLUSH」による動的FEM解析を行う。

せん断弾性係数と動ポアソン比はせん断ひずみに依存するのに対し、体積弾性定数はせん断ひずみに依存しないことが指摘されている。等価線形化法を用いた複素応答解析法は動ポアソン比を一定として解く手法が一般的であるため、体積弾性定数がせん断ひずみに依存する特徴がある。このことから、入力地震動の水平動と上下動を考慮した解析では、地盤の地震時応答の増幅に影響を与える地盤物性値のうちせん断弾性係数や体積弾性定数等の非線形性の評価が課題となる。そこで、まず水平動のみを入力し、地盤の非線形性を等価線形化法で考慮した動的FEM解析を実施し、得られた収束せん断弾性係数を地層ごとに平均する。次にこの平均収束せん断弾性係数を線形材料として扱い、動ポアソン比を算出したうえで、水平動と上下動を同時に入力した動的FEM解析を実施する。

### 3. 地盤及び構造物のモデル化

構造物は、高さ 5.85m、幅 11.4m の二連ボックスカルバートを対象とした。一方、地盤モデルとしては神戸高速鉄道・大開駅の周辺地盤を用いた。この地盤条件を選定した理由は、兵庫県南部地震による大開駅の被害<sup>1) 2)</sup> から、この周辺地盤が兵庫県南部地震による地震動を受けた場合、その地震時応答の増幅が大きくなると推定されるためである。

解析モデルを図-1に示す。

解析モデルは、幅 76.3m、深さ 44.195m のフルモデルとし、地盤および免震材は平面ひずみ要素でモデル化し、構造物ははり要素にモデル化した。境界条件は側方粘性境界および底面粘性境界とした。

地盤の物性値を表-1に、地盤の動的変形特性を図-2に示す<sup>1) 2)</sup>。

各層の自然地盤の動的変形特性は安田・山口によ

り平均粒径  $D_{50}$  と平均有効拘束圧との関係に基づき算定する。また、埋戻土については、原位置より採取した不攪乱試料を用いた中空ねじりせん断試験より求めた。

### 4. 免震材の諸元

免震材は3種類のせん断弾性係数  $G_m$  を有する等方均質体を用いる。免震材のせん断弾性係数  $G_m = 49.6 \text{tf/m}^2$  は埋戻土の初期せん断弾性係数  $G_{go} = 4960 \text{tf/m}^2$  の 0.01 に相当する値であり、 $G_m = 21.6 \text{tf/m}^2$  は建設省共同研究での開発指標値の免震材のせん断弾性係数である。 $G_m = 5.3 \text{tf/m}^2$  は上述した水平動のみを入力した動的 FEM 解析により得られた埋戻土の収束せん断弾性係数の平均値  $G_{ge} = 530 \text{tf/m}^2$  の 0.01 に相当する値である。

免震材の諸元を表-2に示す。

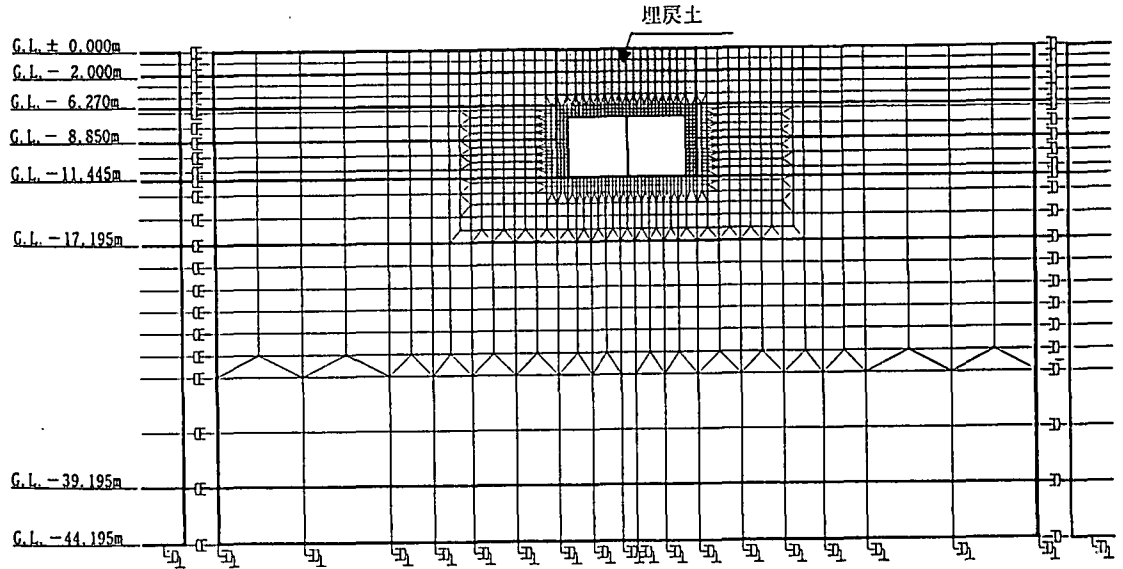


図-1 解析モデル

表-1 地盤の物性値

	単位体積重量 $\gamma_d$ ( $\text{tf/m}^3$ )	せん断波速度 $V_s$ (m/s)	動ポアソン比 $\nu_d$
埋戻土	1.9	100~160	0.427~0.496
G.L. ±0.000m ~-2.000m	1.9	140	0.333
G.L. -2.000m ~-6.270m	1.9	140	0.488
G.L. -6.270m ~-8.850m	1.9	170	0.493
G.L. -8.850m ~-11.445m	1.9	190	0.494
G.L. -11.445m ~-17.195m	1.9	240	0.490
G.L. -17.195m ~-39.195m	2.0	330	0.487
G.L. -39.195m ~	2.1	500	0.470

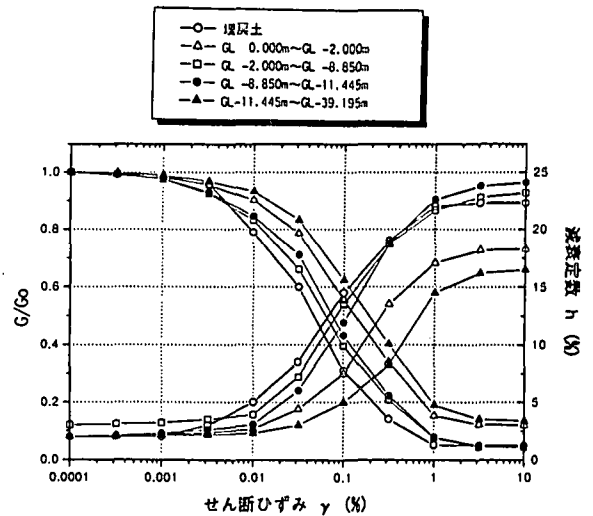


図-2 各層の動的変形特性<sup>2)</sup>

表-2 免震材の諸元

配 置	全周面配置
材 料 特 性	等方均質体
厚  さ  t (cm)	10.0
単 位 体 積 重 量 $\gamma_m$ (tf/m <sup>3</sup> )	1.0
ポアソン比 $\nu_m$	0.3
せん断弾性係数 $G_m$ (tf/m <sup>2</sup> )	5.3
	21.6
	49.6
減衰定数 h (%)	3.0

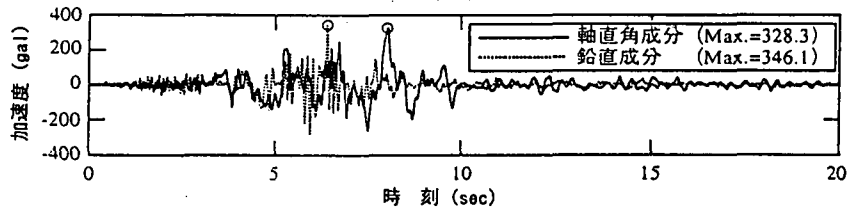


図-3 入力地震動<sup>2)</sup>

## 5. 入力地震動

神戸大学（関西地震観測研究協議会）で観測された記録<sup>3)</sup>を基線補正し、大開駅横断面方向に変換した成分を用いる<sup>2)</sup>。この入力波の波動特性として水平動をS波、上下動をP波と見なし、この水平・鉛直地震動をモデル下方より同時に入力する。入力地震動を図-3に示す。

## 6. 解析ケース

免震材のせん断弾性係数を変えたパラメトリックスタディの解析ケースを表-3に示す。なお case-4 は免震材を配置しない場合である。

表中のせん断弾性係数比は埋戻土の初期せん断弾性係数  $G_g$  (= 4960tf/m<sup>2</sup>) または平均収束せん断弾性係数  $G_{ge}$  (= 530tf/m<sup>2</sup>) を基準とし、各ケースのせん断弾性係数との比として算出した値である。

表-3 解析ケース

検 討 ケ ー ス	免震材のせん断 弾性係数 $G_m$ (tf/m <sup>2</sup> )	せん断弾性係数比		備 考
		$G_m/G_{g0}$	$G_m/G_{ge}$	
case-1	5.3	0.0010	0.010	免震材あり
case-2	21.6	0.0044	0.041	
case-3	49.6	0.01	0.094	
case-4	—	—	1.0	免震材なし

## 7. 解析結果および考察

動的FEM解析による解析結果およびその考察について以下に述べる。

### (1) 地盤の最大応答加速度および最大応答変位

地表面の水平および鉛直方向の最大応答加速度を図-4に示す。最大応答加速度の算出位置は開削トンネルの中央の直上の地表面をA点、側壁直上をB点、

トンネル遠方に向かってC点、D点、E点、F点としている。

地表面の水平方向の最大応答加速度は、免震材がないケースでは540gal～578galの範囲にある。免震材のせん断弾性係数  $G_m = 49.6$  tf/m<sup>2</sup> のケースでは534gal～607galの範囲、 $G_m = 21.6$  tf/m<sup>2</sup> のケースでは534gal～620galの範囲、 $G_m = 5.3$  tf/m<sup>2</sup> のケースでは530gal～624galの範囲にある。

地表面の鉛直方向の最大応答加速度は免震材がないケースでは475gal～527galの範囲にある。免震材のせん断弾性係数  $G_m = 49.6$  tf/m<sup>2</sup> のケースでは464gal～567galの範囲、 $G_m = 21.6$  tf/m<sup>2</sup> のケースでは435gal～508galの範囲、 $G_m = 5.3$  tf/m<sup>2</sup> のケースでは238gal～479galの範囲にある。地表面の最大応答加速度は、鉛直方向が部分的に400galを下回る場合もあるが、各ケースとも400gal以上の値となり、気象庁震度階の震度7に相当する。つまり、この解析結果が大地震における地盤の地震応答に相当することを意味している。地表面の水平および鉛直方向の最大応答変位を図-5に示す。最大応答変位の算出位置は最大応答加速度と同様である。

A点の水平方向の最大応答変位は、免震材がないケースでは8.91cm、免震材のせん断弾性係数  $G_m = 49.6$  tf/m<sup>2</sup> のケースでは9.57cm、 $G_m = 21.6$  tf/m<sup>2</sup> のケースでは10.03cm、 $G_m = 5.3$  tf/m<sup>2</sup> のケースでは10.42cmである。A点の鉛直方向の最大応答変位は、免震材がないケースでは0.21cm、免震材のせん断弾性係数  $G_m = 49.6$  tf/m<sup>2</sup> のケースでは0.40cm、 $G_m = 21.6$  tf/m<sup>2</sup> のケースでは0.68cm、 $G_m = 5.3$  tf/m<sup>2</sup> のケースでは1.68cmである。トンネル直上の最大応答変位は、免震材のせん断弾性係数の減少にともなって水平・鉛直方向とも増加する傾向がある。

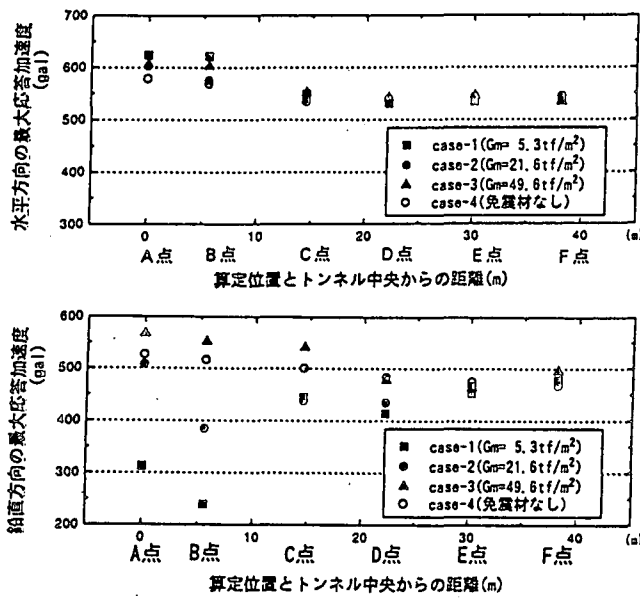
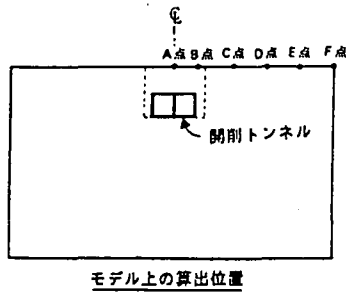


図-4 地表面の最大応答加速度

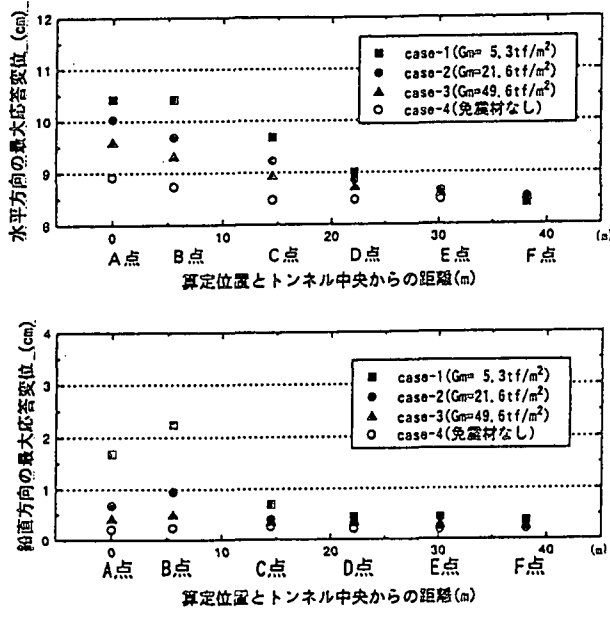


図-5 地表面の最大応答変位

(2) 地盤の最大応答せん断ひずみ

トンネル周辺地盤の最大応答せん断ひずみ  $\gamma_{max}$  を図-6に示す。なお、最大応答せん断ひずみは免震層に接する地盤要素の重心で発生した値である。トンネル下面より上方の地盤は埋戻土であり、下方はせん断波速度 240m/s の自然地盤である。

トンネルの下方地盤の最大応答せん断ひずみは 0.25 % 以下であり、各ケースの差異は顕著でない。一方、トンネル側方および上方の埋戻土では 1.0% または 2.0% を越える最大応答せん断ひずみが発生している。

トンネル側方の埋戻土の最大応答せん断ひずみは、免震材がないケースでは下端から上方に向かって増加する傾向があるが、免震材を配置したケースでは上端または下端から中央に向けて減少する傾向がある。上方の埋戻土の最大応答せん断ひずみは、免震材がないケースでは約 1.0% で一定した値と見なせるが、免震材を配置したケースでは左端または右端から中央に向けて減少する傾向がある。側方の埋戻土の上端・下端及び上方の埋戻土の左端・右端の最大応答せん断ひずみは、免震材のせん断弾性係数を減少させるほど、増加する傾向が見られる。

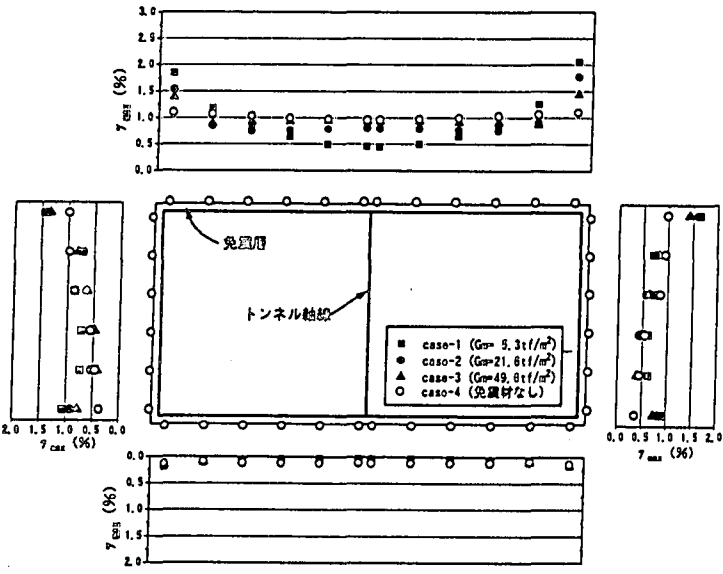


図-6 地盤の最大応答せん断ひずみ  $\gamma_{max}$

(3) 開削トンネルの最大応答加速度

開削トンネルの水平方向の最大応答加速度を表-4に示す。

側壁と中壁について上床版と下床版の接合部(節点)の最大応答加速度を見ると、側壁と中壁ではほぼ同等と見なすことができた。そのため、同表では中壁の上端・下端の接合部の値を構造物の上床版と下床版位置の代表的な最大応答加速度として示す。また、トンネルと地盤の最大応答加速度を比較するため、上床版と下床版位置に最も近い遠方地盤(水平成層地盤)の最大応答加速度を参考値として示している。

開削トンネルと遠方地盤の最大応答加速度の差は、

$G_m = 5.3 \text{tf/m}^2$  のケースの上床版を除いて、ほとんどない。

表-4 トンネルの最大応答加速度

解析ケース	免震材のせん断弾性係数 $G_m (\text{tf/m}^2)$	最大応答水平加速度 (gal)	
		上床版	下床版
case-1	5.3	563	354
case-2	21.6	402	363
case-3	49.6	408	362
case-4	免震材なし	405	367
共通	遠方地盤	400	372

#### (4)開削トンネルの地震時最大増分断面力

各ケースの開削トンネルの地震時最大増分断面力を図-7に示す。なお、この断面力は発生した時刻が必ずしも同一でないため、数値の符号は無視している。同図に基づいて以下に考察する。

曲げモーメントは、側壁、上床版、下床版の一部を除いた全般にわたって、免震材のせん断弾性係数

$G_m$ の減少にもなって低減する傾向がある。せん断力は、下床版の一部を除き、全般にわたって、免震材のせん断弾性係数 $G_m$ の減少にもなって低減する傾向がある。軸力は、 $G_m=49.6 \text{tf/m}^2$ のケースの上床版の一部を除き、全般にわたって免震材のせん断弾性係数 $G_m$ の減少にもなって低減する傾向がある。

#### (5)免震材による断面力低減効果

代表的な部材として側壁と中壁の地震時最大増分断面力を全ケースについて表-5、表-6に示す。低減率は、免震材がないケース(case-4)の断面力を基準とし、各ケースの断面力との比として算出している。

case-3は埋戻土の初期せん断弾性係数の0.01倍の剛性をもつ免震材を用いたケースである。このケースでは、曲げモーメントの低減率は側壁で0.83、中壁で0.88、せん断力の低減率は側壁で0.82、中壁で0.87、軸力の低減率は側壁で0.68、中壁で0.71である。このように、兵庫県南部地震クラスの大地震に対して曲げモーメントとせん断力の低減率

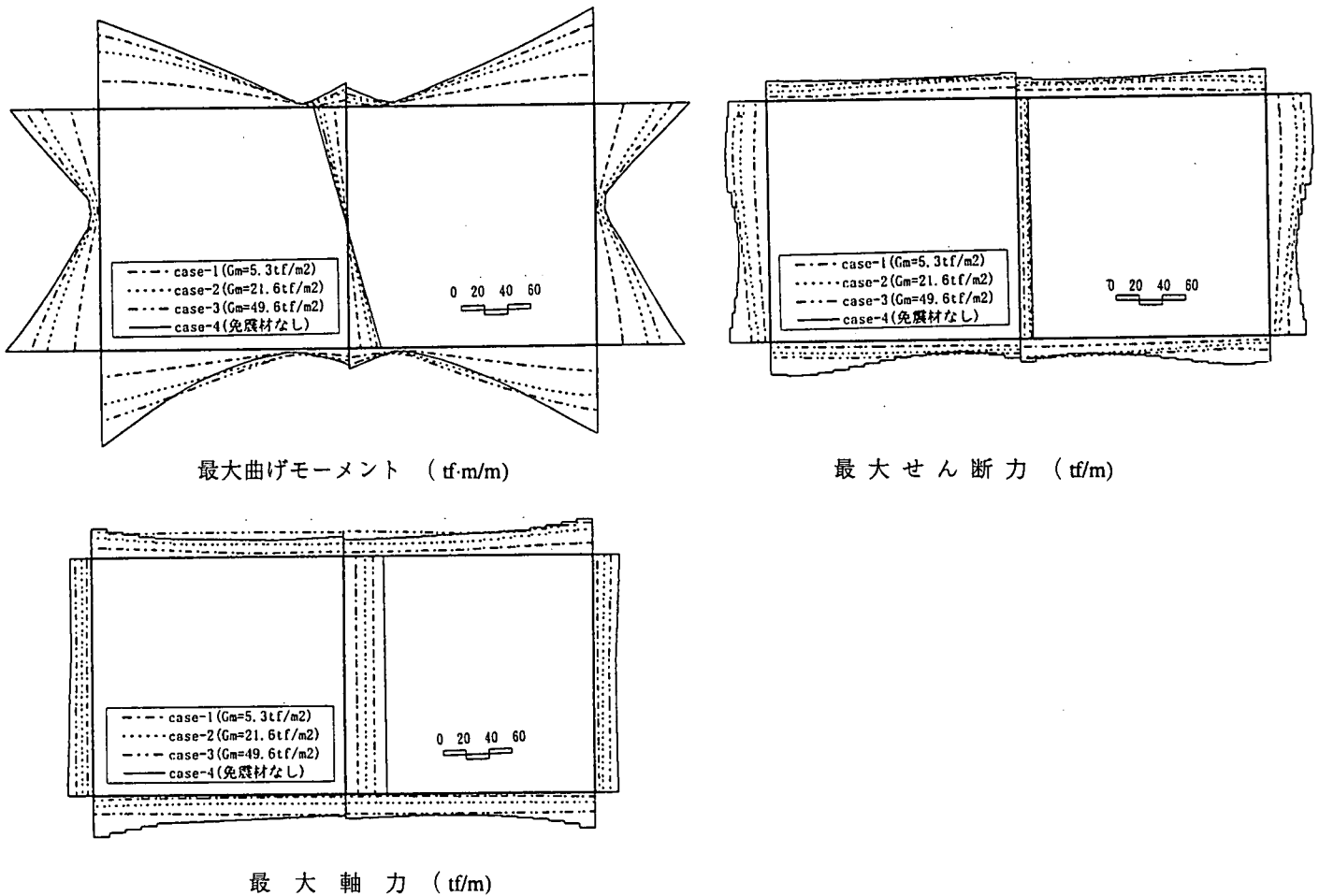


図-7 開削トンネルの地震時最大増分断面力

表-5 側壁の最大地震時増分断面力

解析 ケース	免震材の せん断弾性係数 Gm (tf/m <sup>2</sup> )	せん断弾性係数比		最大曲げモーメント		最大せん断力		最大軸力	
		Gm/Gg <sub>0</sub>	Gm/Gg <sub>e</sub>	Mmax (tf・m/m)	低減率	Qmax (tf/m)	低減率	Nmax (tf/m)	低減率
case-1	5.3	0.0010	0.010	25.7	0.31	12.2	0.31	4.6	0.20
case-2	21.6	0.0044	0.041	54.8	0.66	25.7	0.64	9.9	0.43
case-3	49.6	0.01	0.094	68.6	0.83	32.7	0.82	15.6	0.68
case-4	免震材なし	—	1.0	83.1	1.00	39.8	1.00	22.9	1.00

表-6 中壁の最大地震時増分断面力

解析 ケース	免震材の せん断弾性係数 Gm (tf/m <sup>2</sup> )	せん断弾性係数比		最大曲げモーメント		最大せん断力		最大軸力	
		Gm/Gg <sub>0</sub>	Gm/Gg <sub>e</sub>	Mmax (tf・m/m)	低減率	Qmax (tf/m)	低減率	Nmax (tf/m)	低減率
case-1	5.3	0.0010	0.010	10.5	0.37	4.2	0.37	10.6	0.30
case-2	21.6	0.0044	0.041	20.5	0.71	8.2	0.71	18.5	0.52
case-3	49.6	0.01	0.094	25.2	0.88	10.0	0.87	25.4	0.71
case-4	免震材なし	—	1.0	28.7	1.00	11.5	1.00	35.7	1.00

が十分とはいえない。この原因としては次のことが考えられる。今回の解析結果では構造物周辺の埋戻土の平均収束せん断弾性係数は530tf/m<sup>2</sup>であり、初期せん断弾性係数4960tf/m<sup>2</sup>の約10分の1まで低下している。つまり、免震材のせん断弾性係数と埋戻土の平均収束せん断弾性係数の比(Gm/Gge)をみると0.094であり、実際には十分に小さくなっていないことによる。

case-2は21.6tf/cm<sup>2</sup>せん断弾性係数の免震材を用いたケースである。このケースでは、曲げモーメントの低減率は側壁で0.66、中壁で0.71、せん断力の低減率は側壁で0.64、中壁で0.71、軸力の低減率は側壁で0.43、中壁で0.52である。このケースの断面力低減率は兵庫県南部地震クラスの大地震に対しては十分な低減効果があると考えられる。

case-1は埋戻土の平均収束せん断弾性係数の0.01倍の剛性をもつ免震材を用いたケースである。このケースでは、曲げモーメントの低減率は側壁で0.31、中壁で0.37、せん断力の低減率は側壁で0.31、中壁で0.37、軸力の低減率は側壁で0.20、中壁で0.30である。これらから、トンネル周辺地盤の平均収束せん断弾性係数の0.01倍の剛性の免震材を用いれば、地震時増分断面力は相当低減できることがわかった。しかしながら、一般的に約5tf/m<sup>2</sup>程度以下のせん断弾性係数を有するゴム系材料は変形量やクリープが大きいと言われており、地盤沈下などの問題が懸念される。

## 8. まとめ

地震時に低下したせん断弾性係数、すなわち、21.6tf/m<sup>2</sup>程度のせん断弾性係数を持つ厚さ10cmの

免震材を構造物全外周に配置すれば、曲げモーメントの低減率を66%～71%、せん断力の低減率を64%～71%とすることができ、兵庫県南部地震クラスの大地震に対して地震時増分断面力を十分に低減できると考えられる。

また、大地震下では、トンネル周辺地盤のせん断ひずみの増加にともなって、せん断弾性係数がかなり低下することが予想されるため、免震材のせん断弾性係数を決定する際には、地盤の初期せん断弾性係数を基準とするだけでなく、地震時のせん断ひずみのレベルに応じた地盤のせん断弾性係数を考慮して設定することが重要である。

謝辞：本研究は、建設省土木研究所、(財)土木研究センターならびに民間17社との共同研究のうち、開削グループでの研究成果であり、この研究を進めるにあたり、貴重なご助言を頂いた(株)リエンタルコンカント、(株)鴻池組、前田建設工業(株)、東海ゴム(株)、住友ゴム(株)の開削グループメンバー各位に厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 廣戸敏夫, 梅原俊夫, 青木一二三: 神戸高速鉄道・大開駅の被害とその要因分析, 阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, PP.247-254,1996.
- 2) 矢的照夫, 梅原俊夫, 青木一二三: 兵庫県南部地震による神戸高速鉄道・大開駅の被害とその要因分析, 土木学会論文集, No.535/I-35,PP.303-320,1996.
- 3) 土岐憲三, 入倉孝次郎, 岩崎好規, 香川敬生: 平成7年度兵庫県南部地震による関西地震観測研究協議会の観測記録, 第30回土質工学研究発表会 Vol,PP.97-98,1996.

(1996.9.14受付)

# EVALUATION OF ISOLATION EFFECT ON OPENCUT TUNNEL UNDER STRONG EARTHQUAKE

Jun'ichi EZAKI, Masahiro HATTORI,  
Mamoru ITOH and Haruo SIMIZU

This paper, on purpose to evaluate isolation effect on the opencut tunnel under strong earthquake, is the result of research into the relationship between shear modulus of the isolation materials and reductional ratio of the section forces by 2-dimensional dynamic response analyses giving variety to the shear modulus as parameters.

The ground condition around the Daikai subway station which suffered sever damage due to the 1995 Hyogokennanbu earthquake and structural model of two story box culvert, are used in these analyses. Input motion is observed motion during this earthquake. In result of analyses, it is found to reduce bending moments and shear forces to about 70 percent of them by locating the isolation material of which shear modulus is about 4% of reduced shear modulus under the earthquake and thickness is 10 cm, around the structure.