

円形断面を有する免震地下構造物の免震効果とメカニズムに関する解析的検討

村井和彦¹・星隈順一²・運上茂樹³

¹正会員 工修 建設省土木研究所耐震研究室交流研究員(〒305 茨城県つくば市大字旭1番地)

²正会員 工修 建設省土木研究所耐震研究室研究員(〒305 茨城県つくば市大字旭1番地)

³正会員 工博 建設省土木研究所耐震研究室室長(〒305 茨城県つくば市大字旭1番地)

せん断弾性係数の小さな免震材料を構造物周囲に設置する地下構造物の免震工法では、地下構造物に発生する地震時増分断面力の低減効果は、周辺地盤と免震材料のせん断弾性係数の比に大きく影響を受け、このせん断弾性係数比が一般に1/100以下ならば有意な免震効果が得られることが主に静的な解析により明らかにされている。本文は、動的な免震効果や免震メカニズムを検討することを目的に、円形断面を有する免震地下構造物の横断方向を対象に、免震層のせん断弾性係数やポアソン比をパラメータとした2次元動的有限要素法解析を行い、免震層の物性値が免震効果に及ぼす影響を明らかにするとともに、免震構造のメカニズムについて考察する。

Key Words : Isolated Underground Structures, Circular Tunnel Section, Shear Modulus Ratio, Poisson Ratio, Mechanism of Isolating

1. はじめに

地中構造物は一般に、地震時に生じる地盤変形に追随して変形を受ける特徴があり、耐震性向上の目的で構造物の剛性を高めれば、地震時の増分断面力も大きくなってしまいうため合理的ではない。これに対して、地盤と地中構造物本体との間に弾性係数の小さい免震層を介在させれば、地盤の変形がここで吸収され、免震層がない場合と比較して地震時増分断面力の低減が期待できる。このような免震工法は、地中構造物の耐震性向上に対する有効な方法の1つであると考えられる。

免震工法に関するこれまでの研究成果¹⁾では、周辺地盤と免震材のせん断弾性係数の比(以下せん断弾性係数比(G_m/G_g))と称する)が地下構造物の地震時増分断面力の低減効果(以下免震効果と称する)に大きな影響を与えることが、主に静的な解析により明らかにされている。また、このせん断弾性係数比が一般に1/100以下ならば有意な免震効果が得られることも明らかにされている。本文は、動的な免震効果や免震メカニズムを検討することを目的に、円形断面を有する免震地下構造物の横断方向について、免震層のせん断弾性係数やポア

ソン比をパラメータとした2次元動的有限要素法解析を行い、免震層の物性値が免震効果に及ぼす影響を明らかにするとともに、免震構造のメカニズムについて考察する。

2. 解析条件

解析は、円形断面を有する地下構造物を対象に、振動数領域における複素応答法に基づく2次元動的有限要素法により行った。モデル化においては、構造物は梁要素、地盤及び免震層は平面ひずみ要素とし、境界条件は、底面は粘性境界、側方はエネルギー伝達境界をそれぞれ用いた。表層地盤は均質な一層地盤とし、 N 値が3の沖積粘土層を想定した。また、地盤の非線形性は考慮せず、せん断剛性は地盤のせん断ひずみレベルによる補正係数0.8を考慮した上で、一定値を用いた。構造物は、厚さ22.5cmのコンクリートセグメントを想定し、諸元を設定した。入力地震動としては、平成2年道路橋示方書・同解説V耐震設計編に示されている震度法に用いるI種地盤用標準波形を用い、これを底面粘性境界下端に入力した。解析において対象としたパラメータは、免震層のせん断弾性係数比、およびポアソン比であ

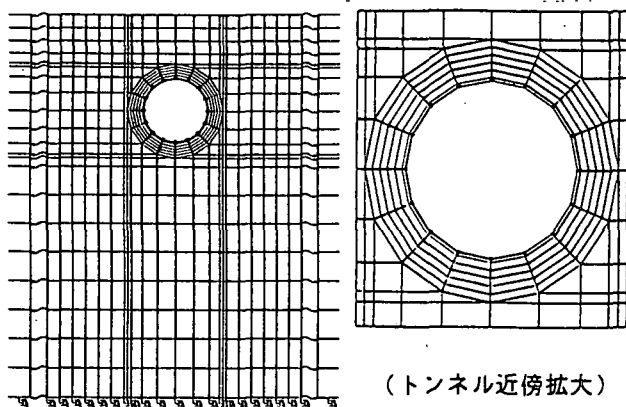


図-1 解析メッシュ

表-1 モデル化諸元

幅	深さ	トンネル外径	土被り厚	免震層厚
20m	30m	5.1m	5.0m	10cm

表-2 地盤物性値

項目	表層地盤	基盤層
せん断弾性係数 tf/m^2	2,160	18,370
単位体積重量 tf/m^3	1.6	2.0
せん断弾性波速度 m/s	115	300
ポアソン比	0.49	0.49
減衰定数	0.03	0.03

表-3 構造物物性値

弾性係数	単位体積重量	ポアソン比	減衰定数
2,600,000 t/m^2	2.5 t/m^3	0.167	0.03

表-4 免震層基本物性値

せん断弾性係数	単位体積重量	ポアソン比	減衰定数
21.6 t/m^2	1.0 t/m^3	0.3	0.03

る。解析メッシュ図を図-1に、モデル化の諸元並びに各要素の物性値を表-1～4に示す。

3. 解析結果

(1) 構造物の加速度応答特性

免震層のポアソン比を0.3とし、せん断弾性係数をパラメータにした入力地震動に対するトンネル天端の加速度伝達関数を、図-2に示す。同図より、せん断弾性係数比が1/10, 1/100の場合は、高振動数領域で若干の違いがあるものの、非免震の場合と応答特性に大きな違いは認められない。これに対して、1/1000の場合は、高次モードの卓越が認められ、構造物が独自に振動するモードが発生している。

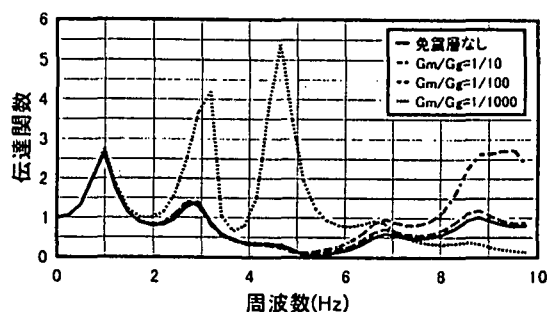


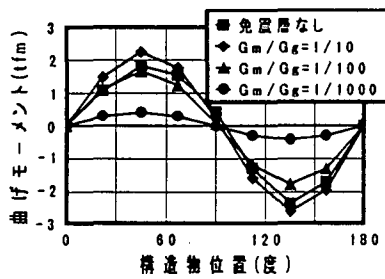
図-2 せん断弾性係数比が伝達関数に及ぼす影響
(ポアソン比0.3)

(2) 動的解析による免震効果の検討

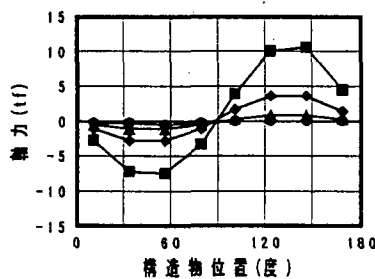
図-3は、免震層のポアソン比が0.3の場合について、構造物に発生する地震時増分曲げモーメント、軸力、せん断力の最大値発生時刻における分布を、せん断弾性係数比をパラメータにして示したものである。ここで、構造物の位置は、トンネル天端を始点に時計回りの角度で表現することとした。軸力については、せん断弾性係数比が1/10でも顕著な免震効果が認められ、非免震の場合と比較して最大値が35%程度まで低減されている。また、せん断弾性係数比をさらに小さくして1/100にした場合は最大値が10%まで、1/1000にした場合は3%まで、それぞれ低減されている。これに対して、曲げモーメント、せん断力については、せん断弾性係数比が1/10では両者とも非免震の場合と比較して最大値が75%程度までしか低減されていないが、1/1000まで小さくすると、17%程度まで低減され、顕著な免震効果が現れている。

図-4.5は、せん断弾性係数比を1/100, 1/1000とした場合の構造物に発生する地震時増分曲げモーメント、軸力、せん断力の最大値発生時刻における分布を、免震層のポアソン比をパラメータにしてそれぞれ示したものである。軸力については、免震層のポアソン比が免震効果に及ぼす影響は小さいのに対して、曲げモーメント、せん断力については、免震層のポアソン比が免震効果に及ぼす影響が認められ、せん断弾性係数比が1/10ではその影響はあまり大きくないが、1/1000では、ポアソン比0.49の場合は両者とも非免震の場合の最大値に対して80%程度の低減であるのに対して、0.3の場合は20%程度の低減になるなど、顕著な影響が認められる。

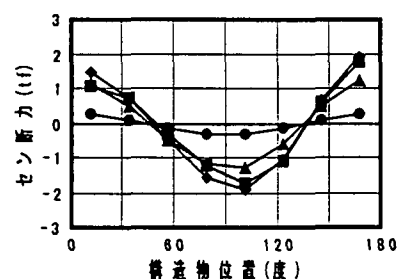
これらより、今回の解析条件では、軸力の免震効果は、せん断弾性係数比が1/10で顕著に現れ、免震層のポアソン比の影響は小さいのに対し、曲げモーメント、せん断力の免震効果は、せん断弾性係数比を1/1000まで小さくすると顕著に現れ、免震層のポアソン比の影響も大きいという結果が得られた。



(a) 曲げモーメント

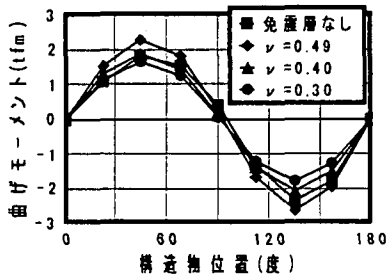


(b) 軸力

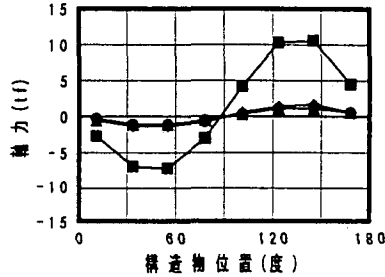


(c) セン断力

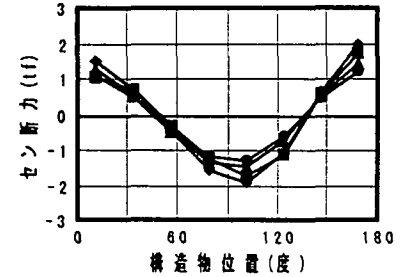
図-3 地震時増分断面力に及ぼすせん断弾性係数比の影響 (ポアソン比0.3)



(a) 曲げモーメント

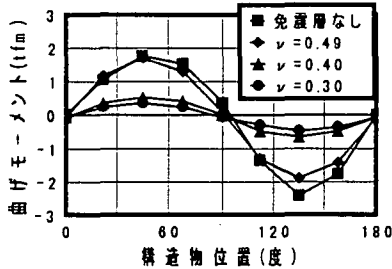


(b) 軸力

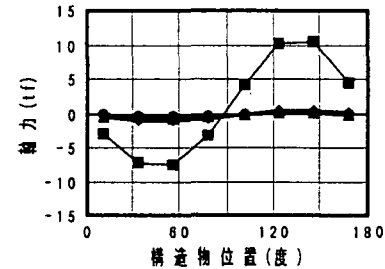


(c) セン断力

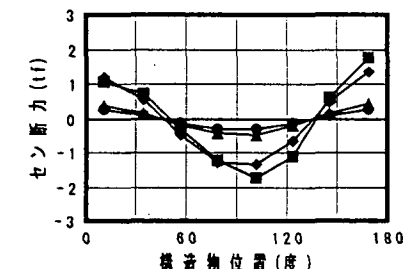
図-4 地震時増分断面力に及ぼすポアソン比の影響 (せん断弾性係数比1/100)



(a) 曲げモーメント

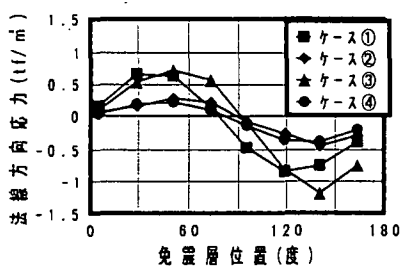


(b) 軸力

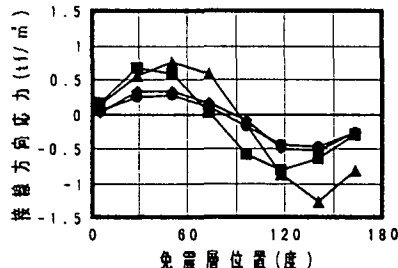


(c) セン断力

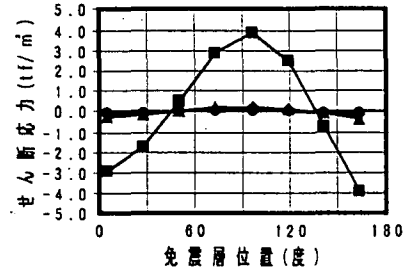
図-5 地震時増分断面力に及ぼすポアソン比の影響 (せん断弾性係数比1/1000)



(a) 法線方向応力



(b) 接線方向応力



(c) セン断応力

(ケース①: 免震層なし, ケース②: $G_m/G_g=1/100$ $\nu=0.3$, ケース③: $G_m/G_g=1/100$ $\nu=0.49$, ケース④: $G_m/G_g=1/1000$ $\nu=0.3$)

図-6 免震層位置の要素応力

4. 免震メカニズムの考察

ここでは、解析結果を用いて免震効果の生じるメカニズムについて考察する。図-6は、今回の解析結果のうち代表的なケースについて、免震層位置における最大断面力発生時刻の要素応力をトンネル法線方向、接線方向応力と、同方向に着目したせん断応力とに整理して、非免震の場合と比較して示したものである。法線方向応力、接線方向応力については、ポアソン比が0.49では非免震の場合と比べて低減はみられないが、ポアソン比が0.3では、せん断弾性

係数比によらず半分に以下に低減されていることがわかる。ポアソン比が小さい場合の応力の低減は、免震層が軸変形するクッション的な効果に起因するものであり、これが曲げモーメントとせん断力の低減と対応づけられる。一方、せん断応力は、各ケースとも非免震の場合と比較して大幅に低減しているが、これは、構造物の周面せん断力の低減、および構造物に発生する軸力の低減と対応づけられる。

図-7は周辺地盤の主応力図を示したものである。ここでは、構造物を取り除いた切り欠き地盤の主応力図も共に示した。免震層を設置することにより、

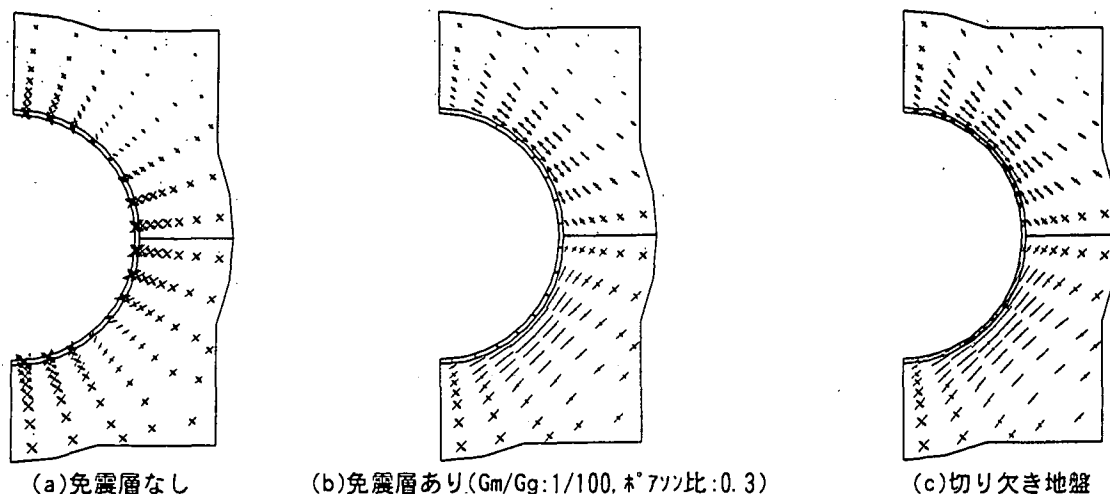


図-7 周辺地盤の主応力図

表-5 トンネル及び免震層の変形

Gm/Gg		免震層	1/100	1/100	1/1000
ν		なし	0.3	0.49	0.3
相対回転角		0.07	3.16	2.59	3.08
変形率(鉛直)		0.33%	0.26%	0.35%	0.28%
変形率(水平)		-0.47%	-0.11%	-0.31%	0.09%
免震層厚	45°	0%	-60%	-10%	-76%
変化率	135°	0%	93%	17%	200%

周辺地盤の主応力分布は切り欠き地盤の主応力分布に近づき、主応力方向が、円形トンネルの法線、接線方向に変化する傾向がある。

表-5は各ケースの最大相対変位発生時刻における地盤とトンネルの相対回転角、トンネルの鉛直方向及び水平方向のトンネル径の変化率、免震層厚の変化率を示したものである。相対回転角から、トンネルの変位は、非免震の場合は地盤に追随しているのに対して、免震の場合は地盤に追随せず、免震層が地盤の変位を吸収していることがわかる。また、トンネル径の変化率より、トンネルの変形は、せん断弾性係数比が1/100、免震層のポアソン比が0.49の場合は非免震の場合と大きな違いはないが、同じせん断弾性係数比でも免震層のポアソン比が0.3となると、変形が緩和され、1/1000の場合はほぼ円形を保持していることがわかる。免震層厚の変化は、ポアソン比が0.49の場合は顕著ではないが、0.3では顕著となり、これとは逆にトンネルの変形は緩和されるものと考えられる。

以上の考察より、円形断面を有する地下構造物の免震効果のメカニズムを整理する。一般に、地震時には地盤内に存在する構造物と周辺地盤との間には動的な相互作用が生じ、このうちトンネル構造物の場合は、地盤と構造物の剛性差に基づくキネマティックなものが支配的である。これを作用力として表

現すると、構造物と地盤は相互に拘束されており、両者の間には互いに接線方向に周面せん断力が作用していることとなる。しかし免震層を設置すると、地盤と構造物の拘束が遮断され、トンネルに作用する周面せん断力が低減されるとともに、周辺地盤の応力は切り欠き地盤の応力状態に近づく。その際、免震層は大きくせん断変形し、地盤の変形に追随したトンネル変形が緩和される。また、免震層のポアソン比が小さい場合は、免震層は軸方向にも変形し、クッション的な効果により法線及び接線方向の応力が低減されるとともに、やはり、地盤の変形に追随したトンネル変形は緩和される。このような2つの効果がトンネルの地震時増分断面力の低減、すなわち、免震効果となって顕在化すると考えられる。

5. おわりに

本文では、円形断面の地下構造物を対象に、免震効果を動的に把握するとともに、そのメカニズムについて考察を行った。今後は免震効果に影響を及ぼす要因について定量的に評価するとともに、免震構造を適用することが効果的な条件の検討、免震トンネルの設計法の確立等を行う予定である。

本文は、建設省土木研究所と(財)土木研究センターならびに民間会社17社との共同研究である「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」の平成8年度メカニズムワーキングにおける成果の一部であり、データ整理に多大な協力をいただいた日本技術開発(株)と貴重なご意見をいただいた関係各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所他：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),平成8年11月