

◆ 耐震・危機管理技術特集 ◆

地下構造物の免震構造と免震設計法

運上茂樹* 星隈順一** 長屋和宏***

1. はじめに

トンネルや管路などの地下構造物は、一般に地盤の変形や変状に伴って構造物本体に変形が生じる。このため、一般に地震動を受けてさらに振動が増幅する地上構造物に比較して地震の影響を受けにくい構造物ということができる。一方では、軟弱な地盤中や地盤条件が急変する箇所、さらに、異なる振動特性を有する複数の地下構造物を近接あるいは一体的に建設するなど、耐震設計上の条件が厳しいところにおいても地下構造物の建設が必要とされる場合も増えてきている。

平成7年1月の兵庫県南部地震における地下構造物の被害は、建築物や橋などの地上構造物に比較すると全体としては軽微であったが、神戸高速鉄道大開駅の被害のように中柱のせん断破壊に伴って上床板が崩落するという甚大な被害が生じたものも見られた。また、下水道施設などの地下埋設構造物では、多くの目地ずれや管体のひびわれ、立坑とトンネルの接合部の損傷、継手間の過度な変位による漏水などの被害が報告されている^{1),2)}。

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社は、平成7年度から3カ年間に、地盤と地下構造物との間に周辺地盤よりもせん断弾性係数の小さい免震層を設置し、これによって地盤変形から地下構造物を絶縁する免震構造技術の開発を共同で行った^{注1)}。共同研究の最終成果として、「地下構造物の免震設計法マニュアル(案)(以下、マニュアル(案)という)」をとりまとめた⁴⁾。本文では、開発した地下構造物の免震構造と免震設計法を報告する。

2. 地下構造物の免震構造

2.1 免震構造の原理

地下構造物には地震時に地盤との相互作用により変形や断面力が生じることから、地盤条件の変化部や構造条件の変化部など、地盤や構造物間の振動特

性の違いにより地下構造物に変形や断面力が集中するような箇所において一般に被害が生じやすい。

通常の地上構造物のように地震力に抵抗できるように鉄筋量を増やしたり断面を大きくしたりすると、逆に変形に対する追随性が小さくなり、耐震性を向上させる上では必ずしも有利とはならない。地盤の変形によりその耐震性を支配される地下構造物の場合には、伝達される地盤変形の影響を低減させることが重要となる。

地下構造物に作用する地盤変形の影響を低減させる1つの方法としては、地下構造物自体の剛性を小さくして地震時の地盤の変形に追随しやすくする方法がある。可撓セグメントや可撓性継手ならびに弾性ワッシャーを用いたリング継手を採用した地下構造物はその代表例である。

本文で扱う地下構造物に対する免震構造は、構造物の剛性は変化させずに構造物に伝わる地盤変形自体を直接的に低減させようという発想である。図-1に示すように地下構造物の外周に周辺地盤よりもせん断弾性係数の小さい免震層を設置することにより、ここで地盤のせん断変形を吸収し、地震時に地盤の変形が地下構造物に直接伝わらないようにしようというものである。

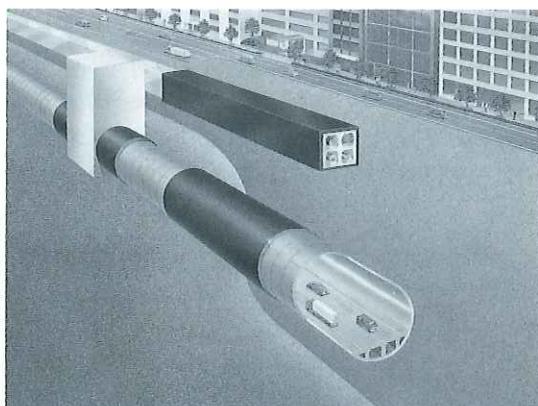


図-1 免震地下構造

注1) (株)奥村組、飛鳥建設(株)、(株)熊谷組、前田建設工業(株)、(株)鴻池組、佐藤工業(株)、川崎重工業(株)、(株)小松製作所、東亜道路工業(株)、旭電化工業(株)、信越化学工業(株)、住友ゴム工業(株)、東海ゴム工業(株)、日本工営(株)、日本シビックコンサルタント(株)、日本技術開発(株)、(株)オリエンタルコンサルタンツ(株)

このように、免震構造では、継手等の変形によって地盤変形に追随する構造と違って、地下構造物本体に過度な変位を生じさせないようにすることが可能となる。また、一般に線状地下構造物で耐震設計上重要となる軸方向のみならず横断方向の地盤の変形に対しても有効に機能する。さらに、構造上防水・止水性が問題となる地下構造物の場合には、防水・止水性を有する免震材を設置することにより、耐震性の向上とともに、防水効果も同時に得ることも可能になる利点を有している。

2.2 免震材料とその施工法

地下構造物に適用可能な免震材としては、免震効果を発揮できる性能を有するとともに、地下構造物の施工法であるシールド工法や開削工法に応じて免震層を形成し、裏込め材としての機能も満足させる必要がある。

共同研究では、必要な性能を満足する免震材として、シールド工法に対しては、アスファルト系、ウレタン系、シリコーン系免震材の3種類を、開削工法に対しては液状ゴム系、固体ゴム系免震材の2種類、合計5種類の免震材を開発した。せん断弾性係数などの力学的特性はもちろんのこと、耐久性、止水性、クリープ特性、さらに施工性に対して重要な硬さ特性などの材料試験を行った。地下構造物の免震設計では、免震材の動的変形特性が重要であり、免震材の力学的特性をもとに免震層の厚さや長さの設計、さらに、免震地下構造物の耐震設計を行うことになる。

図-2は、開発された免震材の施工法を示したものである。シールド工法においては、通常のテールボイドへの裏込め材と同様の施工方法であり、テールボイドに坑内から免震材を注入充填することによりトンネルと周辺地盤の間に免震層を形成させせるものである。免震材のシールドマシーン切羽側への流入を防止し、確実にテールボイドに充填するために、シールドマシーンのテールから切羽への免震材の逆流防止に配慮する程度であり、免震構造としての特別な装置は必要とされない。また、開削工法の場合には、必要な施工空間を確保した上で免震層を形成させながらトンネルを構築していく施工法となる。

3. 免震設計法の提案

マニュアル(案)では、免震層を有する地下構造

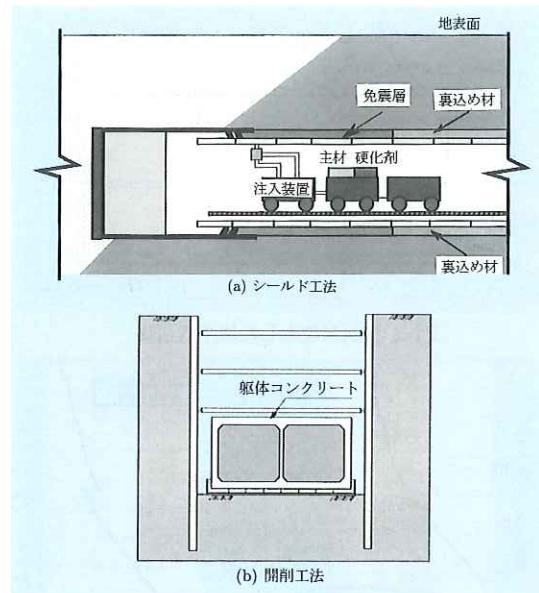


図-2 免震トンネルの施工法の概要

物の横断方向、縦断方向及び立坑接合部に対する免震設計法を提案している。以下にそれぞれの免震設計法の概要を示す。

3.1 横断方法の免震設計

横断方向に対する免震設計では、地盤慣性力を外力とした有限要素解析によるものとした。従来は、地震時に地盤に生じる変位、変形を地下構造物に地盤バネを介して静的に作用させる応答変位法が地下構造物に対する主な耐震計算法であるが、応答変位法では地盤の相互作用バネの設定が解析結果に影響を及ぼすためこれを適切に設定する必要がある。有限要素モデルを用いると地盤と免震材全体を有限要素でモデル化するため、応答変位法で不可欠な地盤バネの設定が不要であり、免震材の材料特性をバネに変換する必要がなくなることから、設計計算における免震材の取扱いが簡便となる他、耐震計算法としての精度も向上する。マニュアル(案)では、地盤の慣性力を有限要素モデルに作用させて耐震計算を行うことから「地盤慣性力法」と呼んでいる。

地盤慣性力の深さ方向の分布 $F(z)$ は、基盤で定義した加速度応答スペクトルに基づき次式により与える。

$$F(z) = \rho(z) \cdot A(z) \quad (1)$$

$$A(z) = \beta \cdot f(z) \cdot Sa(T) \quad (2)$$

ここで、 $F(z)$: 地盤慣性力、 z : 基盤からの深さ、

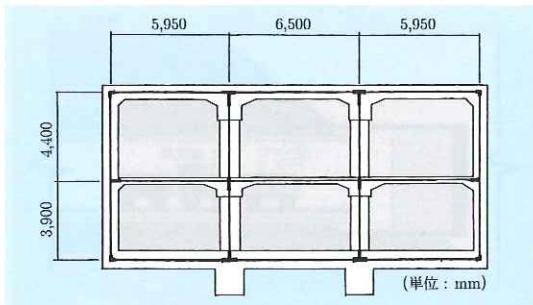


図-3 解析対象とした地下構造物

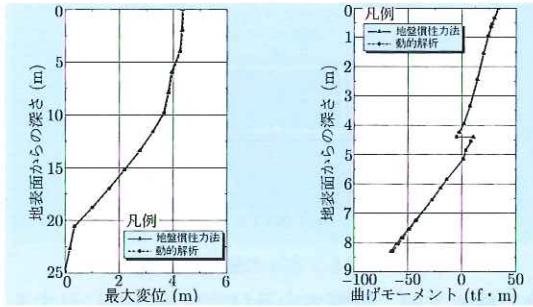


図-4 地盤慣性力法と動的解析法の比較

$\rho(z)$: 地盤またはトンネルの質量、 $A(z)$: 地盤加速度、 β : 刺激係数、 $f(z)$: モード関数、 $Sa(T)$: 基盤位置における加速度応答スペクトル、 T : 表層地盤固有周期、である。

図-4は、図-3に示す構造物を対象に地盤慣性力法と動的解析による結果を比較したものである。このように、地盤慣性力法と動的解析結果は、ほとんど一致することがわかる。

3.2 縦断方向の免震設計

縦断方向に対する免震設計法としては、地盤の動的解析により求めた縦断方向の地震時変位分布を外力とし、これを図-5に示すような梁バネモデルに作用させるものとした。地下構造物と地盤の相互作用を精度良く評価するためには、有限要素モデルの適用が望ましいが、縦断方向に対しては3次元的な問題となるため、これを設計実務で用いることは現状ではまだ難しい面もある。このため、縦断方向に対する耐震計算法としては、梁バネモデルを適用することとした。

梁バネモデルでは、前述のように免震層の相互作用バネの設定が重要となるが、マニュアル(案)ではトンネルの断面形状に応じて免震層の相互作用バネを理論的に設定している。バネの算定式の説明においては、免震層の外周面が固定という境界条件で、トンネル外周面を軸方向及び軸直角方

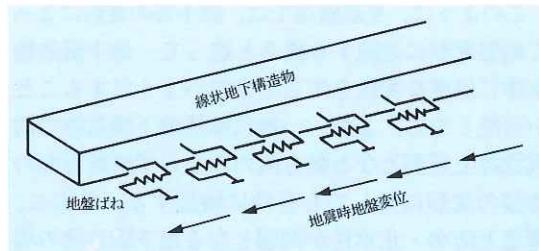


図-5 梁バネモデル

向に強制変形させた時の免震層の反力をもとに次式のように求めた。

(1) 円形断面

$$Kx = 2\pi G_m / \ln(R_m/R_t) \quad (3)$$

$$Ky = \frac{8\pi G_m (3 - 4\nu)(1 - \nu)}{(3 - 4\nu)^2 \ln(R_m/R_t) - \frac{\{(R_m/R_t)^2 - 1\}}{\{(R_m/R_t)^2 + 1\}}} \quad (4)$$

ここで、 Kx 、 Ky はそれぞれ単位長さ当たりのトンネル軸方向及び軸直角方向の相互作用バネ定数、 R_t はトンネル外径の $1/2$ 、 R_m は免震層の外径の $1/2$ である。 G_m 及び ν は、それぞれ免震層のせん断弾性係数とポアソン比である。

(2) 矩形断面

$$Kx = 2(B + H)G_m / t \quad (5)$$

$$Ky = 2(BG_m + \beta HE_m) \quad (6)$$

$$\beta = (1 - \nu) / (1 + \nu)(1 - 2\nu) \quad (7)$$

ここで、 E_m は免震材のヤング率、 t は免震層の厚さ、 B はトンネル幅、 H はトンネル高さである。

3.3 免震設計法の精度検討

図-7は、図-6に示すような地盤急変部にあるシールドトンネルを対象に縦方向の地震時の地盤変位分布を示したものである。また、図-8は、トンネルの軸方向ひずみの解析を行った結果を示したものである。提案する梁バネモデルを用いることによりほぼ3次元静的有限要素解析と同じ結果を得ることができることがわかる。

なお、地震時の挙動が複雑な地下構造物に対する免震設計では、梁バネモデルの解析精度が低くなる場合もあり、そのような場合には詳細な解析法を用いることとし、マニュアル(案)では、軸対称有限要素(FEM)モデル及び3次元有限要素(FEM)簡易モデルを提案している。

軸対称有限要素モデルは、図-9(a)に示すようにトンネル構造を含む地盤を軸対称有限要素にモ

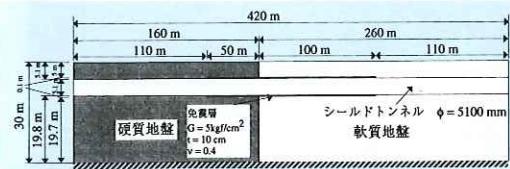


図-6 解析対象としたトンネルモデル

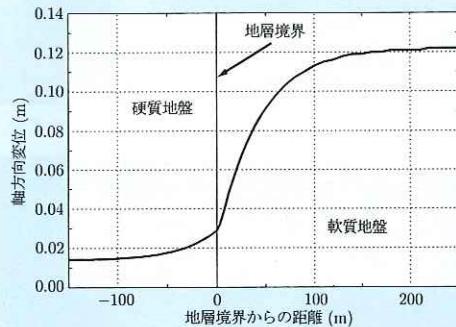


図-7 有限要素解析による地盤変位分布

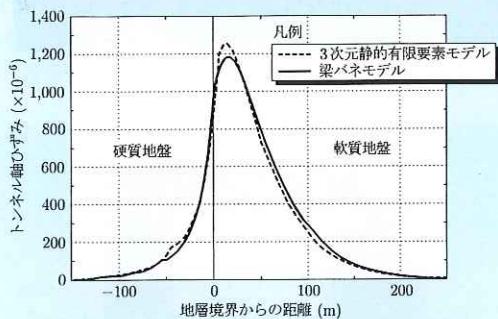


図-8 梁バネモデルと有限要素法との比較

モデル化する方法であり、軸対象にモデル化したこととを考慮して地盤慣性力を次式により与える。

$$A = a_0 \sin \left(\frac{\pi(R-r)}{2H} \right) \cdot \frac{2\pi}{\ln(R/r)} + \frac{4a_0(R-r_0) \cos(\pi h_c/2H)}{R-r_0 - r_0 \ln(R/r_0)} \quad (8)$$

ここで、 a_0 は地表面加速度である。

一方、3次元有限要素簡易モデルは、図-10に示すように地盤は3次元でモデル化するが、構造物及び免震層をはりバネでモデル化するというものであり、構造物部分のモデル化を簡略化したものである。

図-11及び図-12は、それぞれ、図-6に示した地盤モデルを対象に軸対称有限要素モデルと3次元有限要素簡易モデルによりトンネル軸方向ひずみ

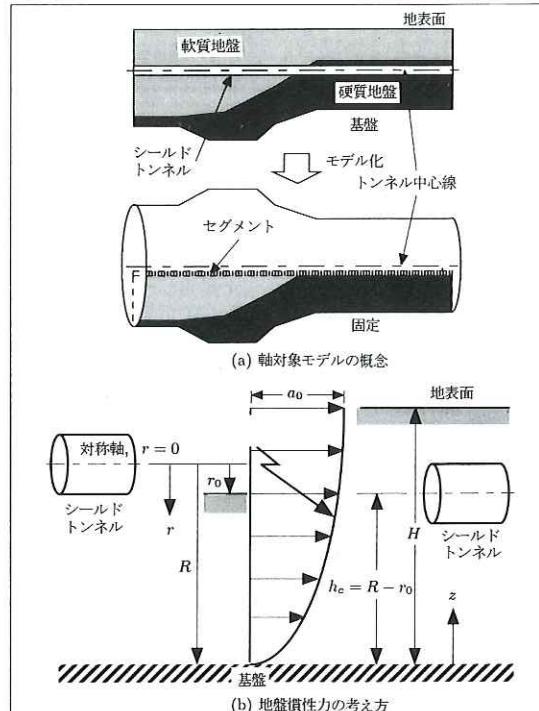


図-9 軸対象有限要素モデル

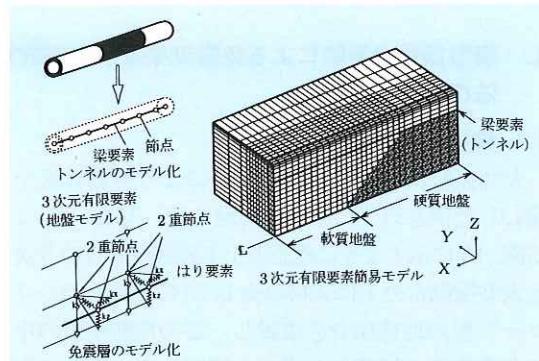


図-10 3次元有限要素簡易モデル

について解析した結果を示したものである。いずれの方法も3次元有限要素モデルによる解析結果をよく近似することがわかる。

3.4 立坑接合部の免震設計

立坑接合部に対する免震設計では、上記の軸対象有限要素モデルもしくは3次元有限要素簡易モデルによるものとした⁴⁾。立坑接合部のように立坑とトンネルが交差し構造が複雑となることから、一般に上記の梁バネモデルの解析精度が低くなる。このため、立坑接合部の免震設計では、マニュアル(案)では軸対象有限要素モデル及び3次元有限要素簡易モデルによるものとした。

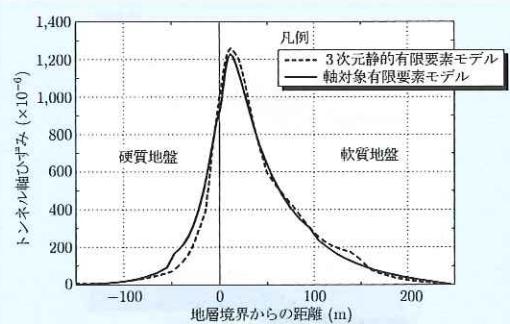


図-11 軸対称有限要素モデルと有限要素解析の比較

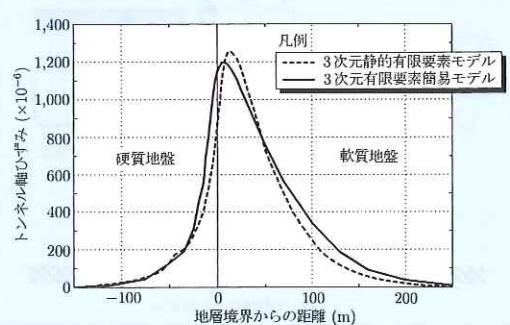


図-12 3次元有限要素簡易モデルと有限要素解析の比較

4. 模型振動台実験による免震効果及び免震設計法の検討

4.1 模型振動台実験

大型振動台を用いた模型実験により免震効果を検討した例を以下に示す。実験では、写真-1および図-13に示すように建設省土木研究所所有の3次元大型振動台の上に実物の約1/70に縮小したシリコーン製の地盤模型を設置し、この地盤模型の中に免震構造を採用した場合と採用しない場合の両方のトンネル模型を埋設している。

この実験はトンネルにひずみの集中しやすい地盤条件急変部を対象にしたものであり、地盤模型に硬質地盤と軟質地盤の境界部を設けている。この地盤条件の急変部をトンネルが通過する場合を想定し、地震時にトンネルに生じるひずみを計測して、免震構造の採用によりどの程度ひずみが小さくなるか、また、免震構造を有するトンネルに対して解析により実験結果を追跡可能かどうかを検討した。

写真-2は、構造条件の変化部として立坑とトンネルの接合部を対象とした模型を示したものである。実験では、立坑とトンネルを剛結した場合と立坑とトンネル間に免震構造を採用した場合の比較に



写真-1 地盤条件急変部を対象にした模型振動台実験



写真-2 立坑とトンネル接合部を対象にした模型振動台実験

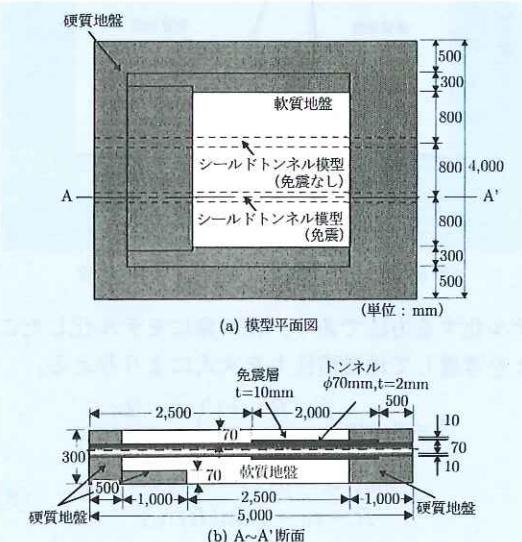


図-13 地盤条件急変部を対象にした地盤模型とトンネル模型

よりどの程度の免震効果が得られるかを検討した。図-14は、実験結果を示したものである。地盤条件変化部を対象とした場合には、地盤模型の卓越振動数である6.5Hzの正弦波でトンネル軸方向に加振した場合にトンネルに生じた最大軸方向ひずみ分布を示している。これによると、地盤条件

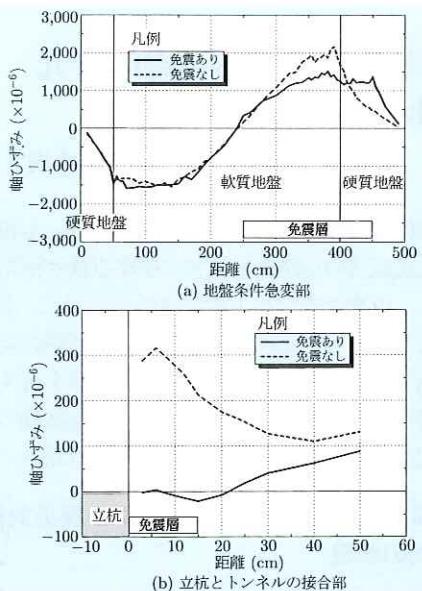


図-14 振動台実験による免震効果の検証(正弦波加振によるトンネル軸方向ひずみ分布)

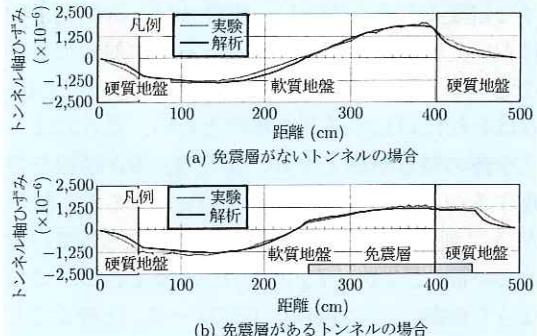


図-15 地盤条件急変部を対象にした実験結果と解析結果の比較

急変部において集中するトンネルの軸方向ひずみが免震構造を採用することにより約30%低減することがわかる。

さらに、立坑部とトンネルの接合部を対象とした場合については、トンネル軸方向に地盤模型の卓越振動数である8.5Hzの正弦波で加振した場合に

トンネルに生じた最大軸方向ひずみ分布を示している。接合部を剛結した場合には接合部には大きな軸方向ひずみが生じるが、免震構造を採用した場合には免震層で絶縁されることにより、トンネルにはほとんどひずみが生じていないことがわかる。

4.2 免震設計法の検討

図-15は、地盤条件急変部を対象とした実験結果を対象に、トンネル軸方向ひずみについて実験結果と上記3.に示した有限要素法を用いた静的解析結果を比較したものである。このように、精度よく実験結果を追跡できることがわかる。

5.まとめ

地盤と地下構造物を絶縁し、地震時の地盤変形の影響を低減する免震構造及び免震設計法を示した。地盤条件変化部や構造条件変化部など耐震上の条件が厳しい箇所においては、従来シールドトンネルに用いられてきた可撓セグメントよりも高い耐震性能を地下構造物に付与することが可能であるとともに、免震層を形成する区間を適切に設計すれば可撓セグメントよりも経済的になる可能性がある。

今後、試験的な施工を含めて、実構造物における有効性の実証が必要とされるが、耐震上厳しい条件下における地下構造物の耐震構造として有効であると期待される。

参考文献

- 建設省土木研究所：平成7年（1995年）兵庫県南部地震災害調査報告、第196号、平成8年3月
- 土木学会阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：土木構造物の被害、第2章トンネル・地下構造物、1997年5月
- 川島一彦編：地下構造物の耐震設計、鹿島出版会、1994年6月
- 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、

連上茂樹*



建設省土木研究所
耐震技術研究センター
耐震研究室長、工博
Dr. Shigeaki UNJOH

星隈順一**



同 耐震研究室研究員、工博
Dr. Jun-ichi HOSHIKUMA

長屋和宏***



同 耐震研究室研究員
Kazuhiro NAGAYA