

免震シールドトンネルの縦断方向の地震応答解析
Earthquake Response Analyses of Isolated Shield-driven Tunnels
in the Longitudinal Direction

鈴木 猛康¹⁾、 粕田 金一²⁾、 勝川 藤太³⁾
Takeyasu SUZUKI¹⁾, Kin'ichi KASUDA²⁾ and Touta KATSUKAWA³⁾

- 1) (株)熊谷組 技術研究所土木耐震研究グループ 課長 工博
Manager, Earthq. Eng. Res. Group, Tech. Res. & Develop. Inst., Kumagai Gumi Co., Ltd., Dr. Eng.
- 2) (株)熊谷組 技術研究所地下技術グループ 副長 工修
Deputy Manager, Soil and Foundation Group, Tech. Res. & Develop. Inst., Kumagai Gumi Co., Ltd. M.Eng.
- 3) (株)熊谷組 技術研究所土木耐震研究グループ 研究員 工修
Research Engineer, Earthq. Eng. Res. Group, Tech. Res. & Develop. Inst., Kumagai Gumi Co., Ltd., M. Eng.

要約

地盤条件急変部では地震時に地盤ひずみが集中し、そのトンネルへの伝達によってトンネル縦断方向に大きな断面力が発生する。このような箇所への局所的な免震構造の適用が、非常に効果的であることがわかっている。トンネル縦断方向の免震設計では、地震応答解析に基づいて算定した地震時地盤変位を、梁バネモデルのバネ端へ入力し、梁の応答よりトンネルの応答を算定することを基本としている。そこで本論文では、この解析手法を用いて護岸ケーソン下を通過するシールドトンネルを対象として地震応答解析を実施し、地盤急変部のシールドトンネルに対する免震効果を確認した。

SUMMARY

It is known that the seismic isolation is very effective when it is applied to the section where geological condition abruptly changes, because the ground strain concentration is occurred at such a section. In the seismic design of isolated tunnels in the longitudinal direction, it is fundamental that a seismic behavior of a tunnel is analyzed using beam-spring model with an input of ground displacement, which was analyzed using earthquake response analyses. Thus, earthquake response analyses on a shield-driven tunnel crossing underneath a caisson-type quaywall were conducted. As a result, seismic isolation effects were clearly demonstrated.

1. はじめに

トンネルの免震構造とは、トンネル外周に軟かな免震層を形成させることにより、地盤ひずみのトンネルへの伝達を遮断するとともに、トンネルひずみを分散させることで、構造物に発生する地震時断面力を大幅に低減させる構造である。筆者らは、これまでに地下構造物の免震構造に関して、数値解析および振動実験の実施によって免震効果を検証するとともに、有効な免震材や施工法の開発を行ってきた^{2)~5)}。

トンネル縦断方向に発生する断面力低減を目的とする場合、硬軟地盤境界等の地盤条件急変部、トンネル立坑

接合部等の構造条件急変部のように、地盤ひずみが局所的に集中する箇所への免震構造の適用が効果的であることがわかっている。トンネル縦断方向の免震設計では、地震応答解析に基づいて算定した地震時地盤変位を、梁バネモデルのバネ端へ入力し、梁の応答よりトンネルの応答を静的に解析することを基本としている⁶⁾。本論文では、この解析手法を地盤条件急変部のトンネルの1つである護岸ケーソン下を通過するシールドトンネルに適用し、免震構造適用の有無によるトンネル断面力の比較を行っている。表層地盤の地震応答解析に対して、トンネルの縦断方向の地震応答解析でもっとも一般的な多質点系モ

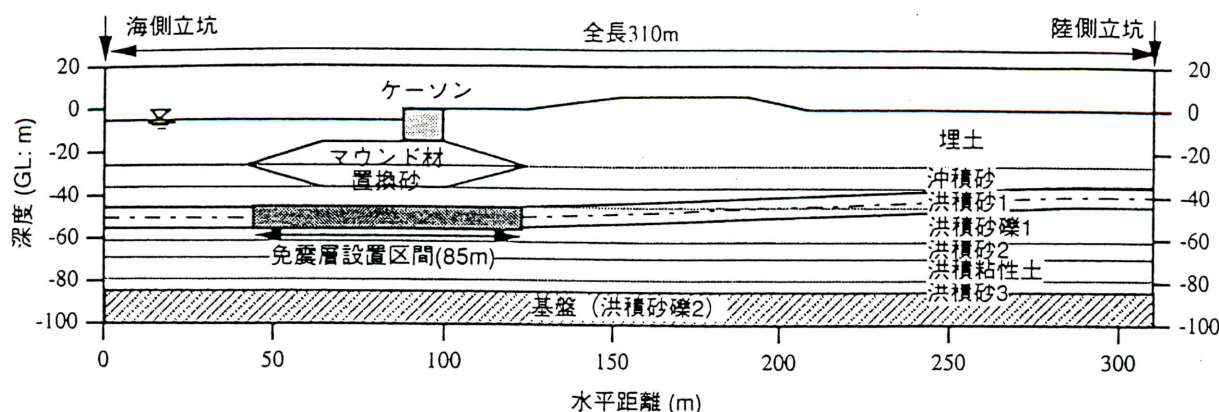


図-1 解析対象とした地盤とトンネルの模式図
Fig.1 Schematic Diagram to represent Ground and Structure Condition

デルを採用した。本論文ではまず、表層地盤の地震応答解析について述べる。次に、免震構造を適用したトンネルと、免震構造を適用しない従来型のトンネルの2ケースについて、梁バネモデルを用いて行った地震応答解析の結果を示し、両者の比較より免震効果について考察を加える。地震応答解析の入力地震動としては2種類の地震動を用い、地震動のタイプによる免震効果の相違についても考察する。

2. 解析対象地盤およびトンネル

(1) 地盤条件

図-1に示すように、ケーソン護岸を境として陸側では表層厚が85m、海側では59mであり、海側に対して陸側では表層に埋土がある以外、表層地盤構造は陸側と海側でほぼ同じ水平成層構造である。表-1に各層の物性値を示す。解析上の基盤は、GL.-85mの深度に設定したS波速度500m/secの洪積砂礫層とした。トンネルが通過する区間における表層厚は、ケーソンの設置された護岸部を境として変化するため、護岸の両側で振動特性が急変するとともに、護岸ケーソン部についてもその両側の地盤と振動特性が異なるため、護岸ケーソン直下では地盤ひずみの局所的な集中が想定された。

(2) トンネルの構造条件

解析の対象とするトンネルは、海上と陸上の立坑間を結ぶ図-1に示す総延長310mの海底シールドトンネルである。シールドトンネルは外径9.5m、セグメント厚35cmのダクトイルセグメント製である。

トンネルは底版をそれぞれ深度約60mとする海側立坑と深度約45mとする陸側立坑を連絡しており、図-1に示すように護岸下より陸側立坑にかけてやや急な縦断勾配を有する。立坑が比較的硬質の地盤上に構築されており、また立坑とトンネルとの接合部には可撓セグメントを設置することを考慮し、立坑の地震時変位応答は立坑底面の地盤の応答で置換えることとし、立坑自体の地震時応答は解析しないこととした。したがって、トンネルのモデル化は両端に可撓セグメントのバネを有する梁バネとした。

表-1 地盤物性値
Table 1 Soil properties of each layer

地盤種別	層厚 (m)	単位体積 重量 γ (tf/m ³)	S波速度 V_s (m/sec)	ポアソン比 ν
埋土	26	1.8	180	0.492
沖積砂	10	1.8	210	0.491
洪積砂1	9	1.9	280	0.484
洪積砂礫1	16	2.0	450	0.475
洪積砂2	8	1.9	300	0.481
洪積粘性土	10	1.8	300	0.482
洪積砂3	6	1.9	350	0.476
基盤(洪積砂礫2)	—	2.2	500	0.470
ケーソン	15	2.1	—	0.167
基礎碎石	11	2.0	300	0.488
置換砂	10	1.8	200	0.492

(3) 免震層 免震層としてはシリコン系免震材⁴⁾の採用を想定しており、免震層厚を $t = 10\text{cm}$ として、せん断弾性係数 $G = 3.0\text{ kgf/cm}^2$ 、ポアソン比 $\nu = 0.48$ の物性を与えた。免震区間については、免震区間長をパラメータとしたパラメトリックスタディーの結果に基づき、護岸ケーソン下の置換砂の全域の下方を通過する総延長85mの区間とした。

3. 入力地震動

入力地震動としてはL2地震動を対象とし、道路橋の耐震設計用標準波のI種地盤の地震動の中から、タイプI地震動としては開北橋橋軸直交成分、タイプII地震動としては神戸海洋気象台NS成分で代表させ、これら2波を地震応答解析に用いて、地震動のタイプによる免震効果の相違を検討することにした。各入力地震動の加速度時刻歴および加速度応答スペクトルをそれぞれ図-2(a)、(b)、図-3(a)、(b)に示す。

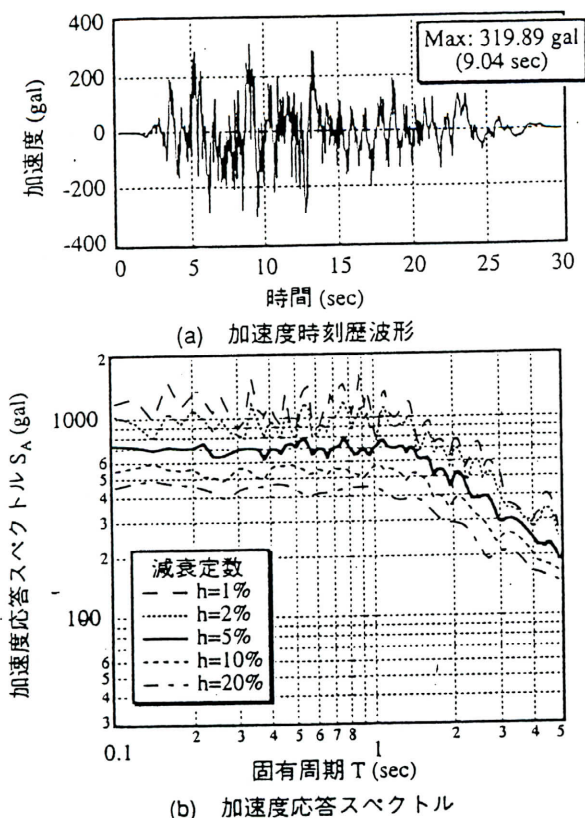


図-2 TYPE-I 種地盤 開北橋橋軸直角成分
Fig.2 Kaihoku-bashi tran. (Type I, Soil Type I)

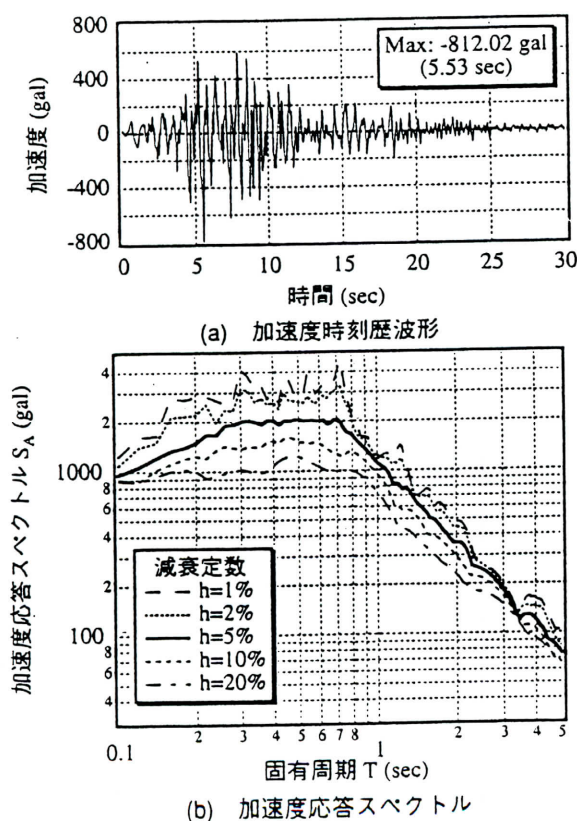


図-3 TYPE-II 種地盤 神戸海洋気象台NS成分
Fig.3 JMA-Kobe NS (Type II, Soil Type I)

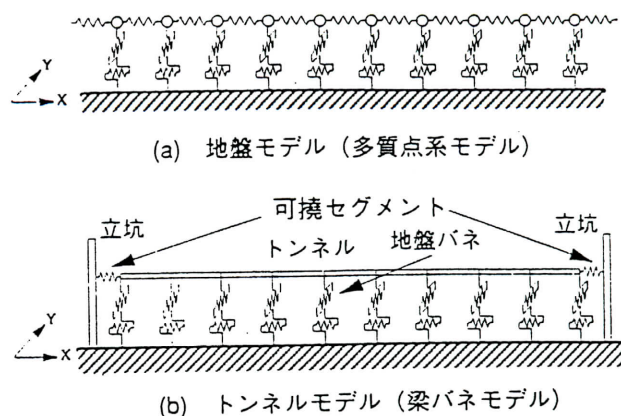


図-4 解析に用いた数値解析モデル
Fig.4 Schematic Diagram for numerical models

4. 解析方法

まず最初に、陸側立坑位置において、それぞれタイプIおよびタイプII地震動を入力として1次元等価線形化地震応答解析を実施し、表層地盤の各土層におけるせん断弾性係数の収束物性値を算定した。次に、表層地盤をトンネル縦断方向に免震区間で3m、その他の区間で約4mごとに土柱列として離散化し、図-4(a)に示す多質点系モデルによる地震応答解析を実施し、トンネルスプリングライン位置(深さ)の地盤のトンネル軸方向、軸直角方向の変位応答を求めた。なお、タイプI、タイプII地震動で表層地盤の物性値が異なるので、それぞれの地震動に対応する上記の地盤のせん断弾性係数の収束値を用いて2種類の地盤モデルを作成している。なお、地盤の減衰定数は一律20%とした。なお多質点系モデルによる解析では、土柱の基本せん断振動モードから3次のせん断振動モードまでを取扱うこととし、3つの振動系でおのおのの実施した時刻歴応答解析の結果の重ね合わせを行った。最後に、図-4(b)に示すようにトンネルと地盤をそれぞれ梁と相互作用バネとした梁バネモデルによってモデル化し、トンネル位置の地盤の地震時応答変位の時刻歴を入力としてシールドトンネルの地震応答を静的に解析した。シールドトンネルは、梁の軸剛性として引張時はセグメントの等価引張剛性、圧縮時はセグメント軸剛性とした非線形梁としてモデル化した。解析に用いたトンネルの引張剛性は $(EA)_T = 1.26 \times 10^5 \text{ tf}$ 、圧縮剛性は $(EA)_C = 2.02 \times 10^7 \text{ tf}$ 、曲げ剛性は $EI = 3.91 \times 10^6 \text{ tf} \cdot \text{m}^2$ である。トンネルモデルの両端には、立坑とトンネルとの接合部に可撓セグメントを適用することを想定して、トンネルの剛性に比べて十分小さなバネを配置した。なおバネの端部には、前述の立坑の変位応答を強制的に与えた。

5. 解析結果

(1) 地盤の地震応答解析結果

図-5は、基本せん断モード系の地盤に関するトンネル軸方向の1次から3次の振動モードを示したものである。これより、1次モードの有効質量比は0.967であり、このモードが支配的であることが分かる。

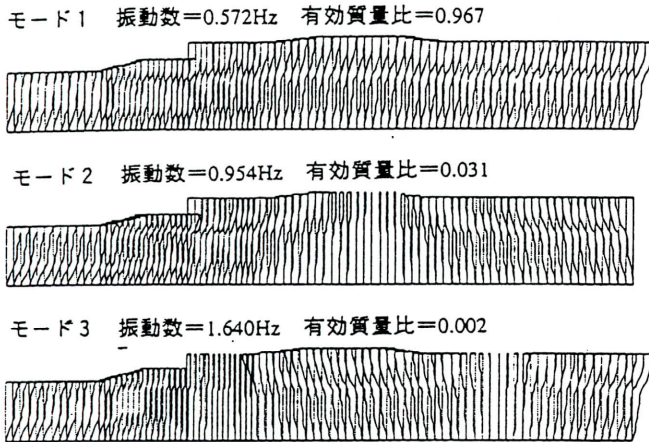


図-5 軸方向の全体系モデルのモード図
(各土柱はせん断1次モード)

Fig.5 Major Modes of Shear Vibration

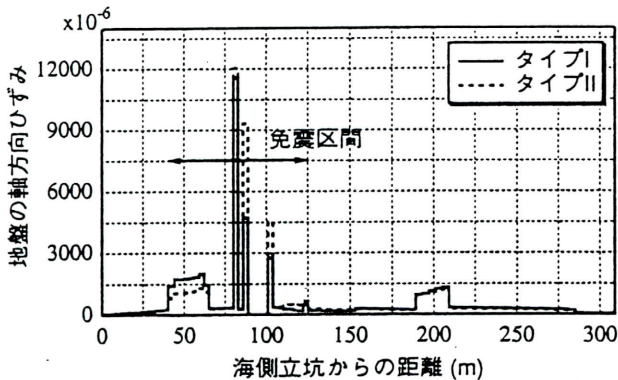


図-6 地盤の軸ひずみ
Fig.6 Ground Strain Distribution

図-6はトンネル軸方向のトンネル位置における地盤ひずみの最大値分布を、それぞれタイプI、タイプII地震動入力時を比較して示したものであり、表層厚が急変するケーソン護岸の前面および背面で、地盤ひずみが大きく集中していることが分かる。とくに護岸ケーソン前面直下においては、タイプI、タイプIIいずれの地震動入力時においても 12000×10^{-6} 近い地盤ひずみが発生している。また地震動のタイプによって、ケーソン護岸前面直下における地盤ひずみの分布形状が異なることがわかる。この結果より、免震構造を護岸ケーソンを中心としたある範囲に適用すれば良いことはわかるが、どの範囲に適用するのが費用対効果の点から効率的であるかは単純には

判断できない。そこで、免震区間長をパラメータとしたパラメトリックスタディを行った。免震区間長をそれぞれ12,24,36,60,85mとした5ケースについてセグメントに作用する応力及び変形量を比較した結果、免震区間長を85mとしたケースのみ許容値以下となったので、置換砂全域の下方まで85mに亘って免震構造を適用することとした。

(2) トンネルの応答解析

図-7は、表層地盤の最大軸ひずみ発生地点である護岸ケーソン前面の直下における、タイプI地震動入力時のトンネル軸ひずみの時刻歴応答波形を示したものである。免震構造を適用しないケース（免震無）では、解析時間のほぼ全域に亘って、引張側で 2000×10^{-6} を超える大ひずみが、引張側で何度も発生しているが、免震構造適用（免震有）によりトンネルひずみは大幅に低減され、最大値で約 700×10^{-6} 程度となった。

図-8は、タイプI地震動入力時のトンネル変位応答ならびにトンネル断面力の最大応答値に関する解析結果について、免震構造を適用した場合（免震有）と適用しない場合（免震無）で比較し、まとめたものである。図-8(a)、(b)に示すトンネル縦断方向のトンネル最大変位分布をみると、免震構造を適用したケーソン護岸下以外、免震有り、無しの両解析ケースで変位分布はほぼ重なっている。護岸ケーソンの下部では、免震構造を適用しないケースではトンネル変位の変化が急激であるのに対して、免震構造を適用したケースでは同位置のトンネル変位の変化がなだらかとなっており、トンネルひずみが分散されていることが明らかである。

図-8(c)に示す最大引張力の最大値は、免震構造の適用によって約35%に大幅に低減されている。最大引張力はケーソン護岸前面直下（免震構造適用のケースでは免震区間の中央）で発生しているが、この位置における免震構造適用による引張力の低減は著しいが、免震区間の左半部ではほとんど引張力の低減は図られていない。これは、免震区間中央部に集中する引張力が左側へと分散された結果と理解できる。一方、図-8(d)に示す最大圧縮力については、免震構造適用により約17%まで大幅に低減されただけでなく、免震区間ではほぼフラットな分布となり、圧縮力が免震区間でほぼ均等に分散されていることがわかる。引張と圧縮では、トンネル軸剛性が約10倍異なるが、トンネルの剛性に対して免震層の剛性が小さいほど、免震効果が顕著となるのは、横断面方向の免震効果と同様である。図-8(e)、(f)の最大曲げモーメント、最大せん断力についても同様の傾向で、断面力低下率は10%以下に達しており、極めて大きな免震効果が発揮されたと言える。このように免震シールドトンネルでは、引張力の低減も大きいですが、圧縮力や曲げモーメント、せん断力の低減がとくに著しい。

図-9は、表層地盤の最大軸ひずみ発生地点である護岸ケーソン前面の直下における、タイプII地震動入力時のトンネル軸ひずみの時刻歴応答波形を示したものである。タイプII地震動では免震構造を適用しない場合、解析時間の前半に、引張側で 2000×10^{-6} を超えるひずみは何回か

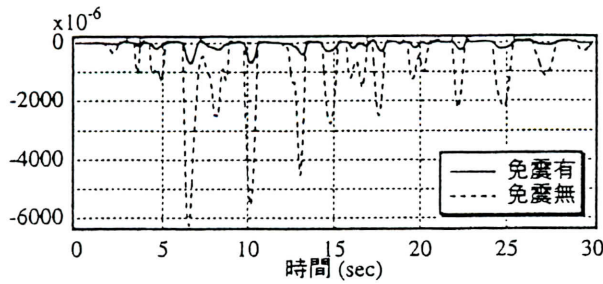


図-7 ケーソン下部における軸ひずみの時刻歴応答波形 (タイプI)
Fig.7 Time history of tunnel axial strain underneath a caisson (Type I)

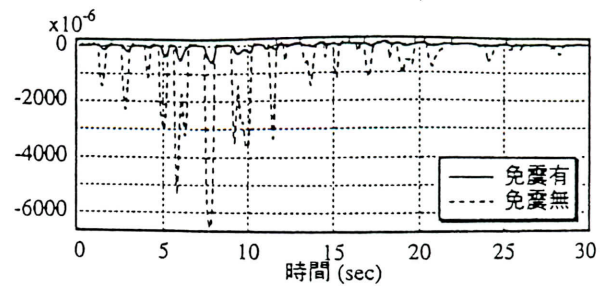


図-9 ケーソン下部における軸ひずみの時刻歴応答波形 (タイプII)
Fig.9 Time history of tunnel axial strain underneath a caisson (Type II)

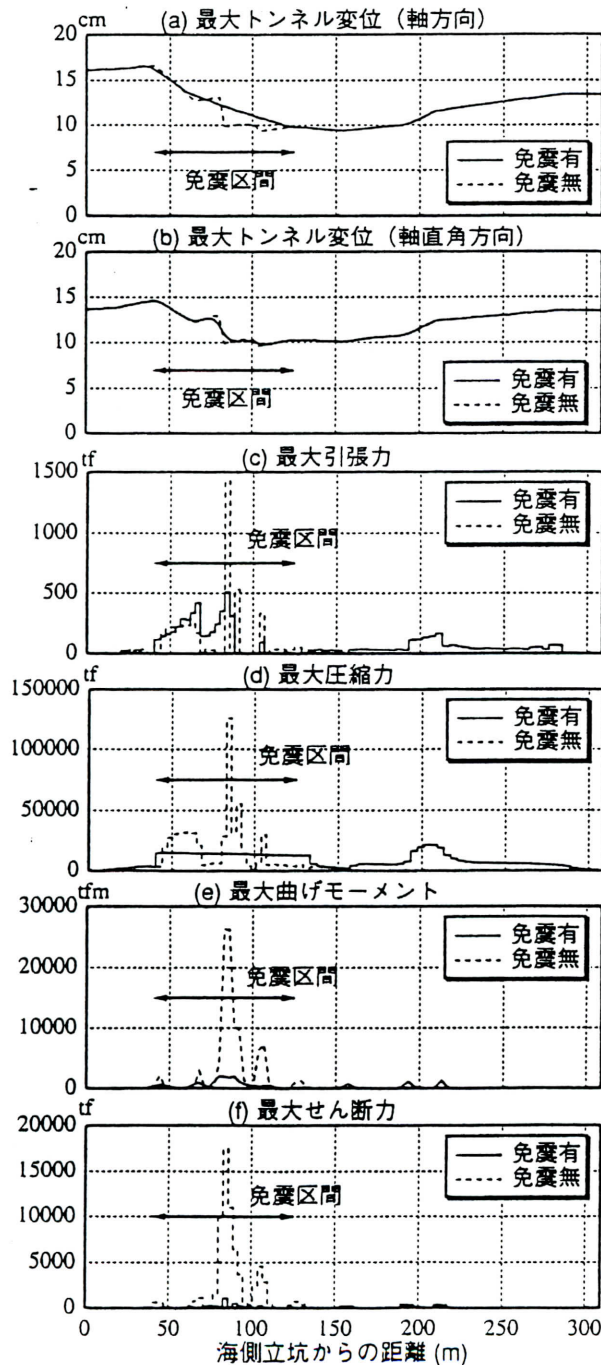


図-8 最大応答値 (タイプI)
Fig.8 Maximum response distributions (Type I)

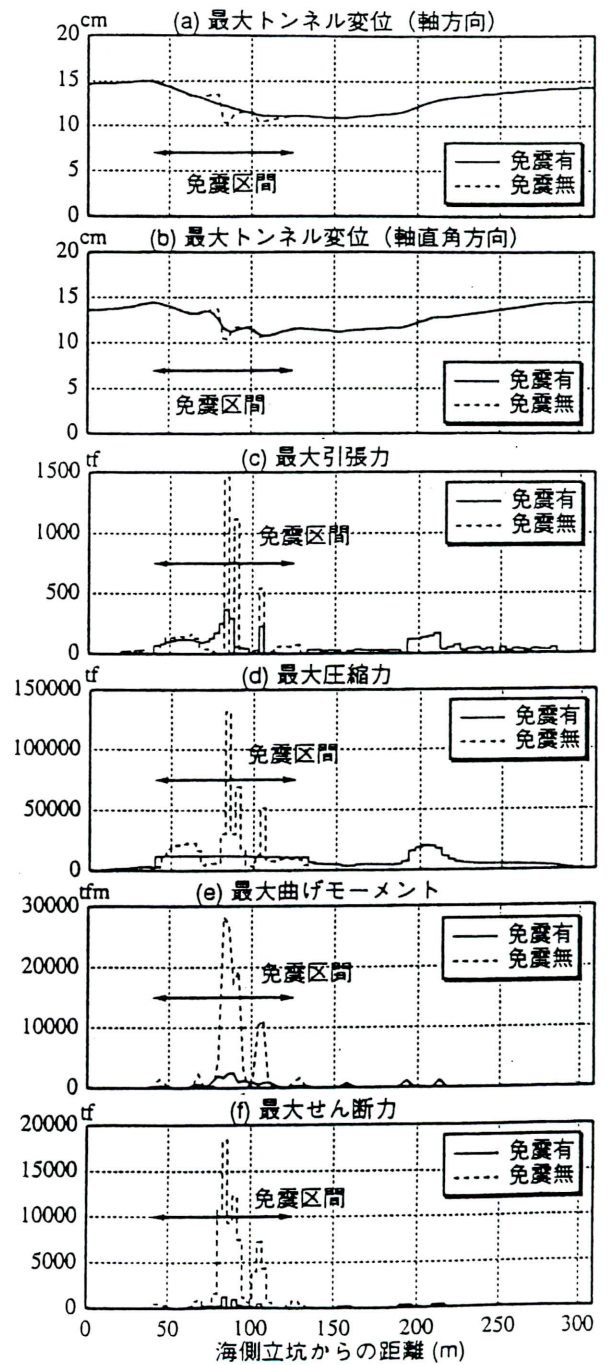


図-10 最大応答値 (タイプII)
Fig.10 Maximum response distributions (Type II)

の前半に、引張側で 2000×10^{-6} を超えるひずみは何回か発生しているが、免震構造適用により最大値でも 500×10^{-6} 以下に大幅に低減されており、入力地震動のタイプによらず、大きな免震効果が発揮されている。

図-10は、タイプII地震動入力時のトンネル変位応答ならびにトンネル断面力の最大応答値に関する解析結果について、免震構造を適用した場合（免震有）と適用しない場合（免震無）で比較し、まとめたものである。これらをタイプI地震動入力時の応答である図-8と比較すると、最大応答値の分布形状や免震効果について、図-9(c)の最大引張力を除けば、ほとんど同じと見なすことができる。最大引張力に関しては、明らかに図-8(c)に示した結果よりも断面力の低減が顕著であり、これはもともとケーソン護岸の前面直下に地盤ひずみがとくに集中するケースだったことが原因と考えられる。

以上の地震応答解析の結果より、タイプI、タイプIIいずれのタイプの地震動入力に対しても非常に大きな免震効果が発揮されるとともに、トンネル断面力のうち引張力に関しては、入力地震動による低減の程度が若干異なることが確認された。

5. まとめと今後の課題

本論文では、地盤条件急変部のトンネルの1つである護岸ケーソン下を通過するシールドトンネルの地震応答解析を実施し、免震構造適用の有無によるトンネルの地震時変位応答および発生断面力の比較を行った。その結果得られた知見を以下にまとめる。

- (1)地盤条件急変部において集中するトンネルひずみが免震区間で分散され、大幅なトンネルひずみの低減が得られることが検証された。
- (2)免震構造適用によるシールドトンネルの断面力低減は、引張力に関しても $1/3 \sim 1/4$ と大きい。圧縮力や曲げモーメント、せん断力に関してはさらに顕著である。
- (3)地震動のタイプによらず大きな免震効果が発揮されるが、引張力については地震動のタイプにより低減効果に若干の相違が認められた。

地下構造物の免震構造は、あくまでも局所的にトンネルと地盤とを絶縁する構造であるため、地盤条件急変部に適用する場合には、比較的長い免震区間長が必要とさ

れる。筆者らは、力学特性や変位性能、耐久性、施工性、止水性にすぐれた無害な免震材を開発しているが⁵⁾、さらなる免震材の低コスト化が必要と思われる。

また、本論文では、免震地下構造物の解析手法として梁バネモデルを採用した。このモデルにおける免震層のバネについては理論的に与えられているが、一般部の地盤バネ（相互作用バネ）の算定に関しては、不整形地盤構造で、地盤ひずみの波長が短い場合十分な検討を要する。

なお本研究は、建設省土木研究所、土木研究センターと民間17社による官民共同研究「地下構造物の免震設計に適用する免震材の開発」の一環として実施されたものである。土木研究所耐震研究室・運上室長をはじめ、活発な議論をいただいた共同研究関係各位に対して、深く謝意を表するものである。

参考文献

- 1) 鈴木、田村：シールドトンネルの免震構造とその免震効果の評価手法の提案、土木学会論文集、No.525/I-33, pp.275-285, 1995.
- 2) 粕田、鈴木、田中、小林：矩形断面トンネルの免震構造に関する模型振動実験、土木学会第1回免震制震コリキウム論文集、pp.109-116, 1996.
- 3) Suzuki, T.: Damages of Urban Tunnels due to the Southern Hyogo Earthquakes of January 17, 1995 and the Evaluation of Seismic Isolation Effect, Proc. 11WCEE, Acapulco, Mexico, 1996.
- 4) 鈴木、粕田、小林、池野、福田、田中：トンネル免震施工に用いるシリコン系免震材の動的物性、第32回地盤工学研究発表会、pp.2095-2096, 1997.
- 5) 小林、粕田、鈴木、岡本、池野、福田：シリコン系免震材によるシールドトンネルの免震施工について、第32回地盤工学研究発表会、pp.2093-2095, 1997.
- 6) 建設省土木研究所他：免震材を用いた地下構造物の免震設計マニュアル（案）、1998.
- 7) Suzuki, T. and Unami, K.: The Extended Quasi-three-Dimensional Ground Model for Irregularly Bounded Surface Ground, 土木学会論文集、No.446/I-19, pp.45-55, 1992.