

立坑接合部における免震シールドトンネルの地震応答解析

Seismic Analyses of an Isolated Shield-driven Tunnel
at a Junction with a Vertical Shaft丸山 雅淑¹⁾, 岡田 一郎²⁾, 鈴木 猛康³⁾Masayoshi MARUYAMA¹⁾, Ichiro OKADA²⁾ and Takeyasu SUZUKI³⁾

- 1) 日本シビックコンサルタント (株) 首都圏事業部技術部 次長
Assistant Director, Technical Division, Nippon Civic Engineering Consultant Co., Ltd.
- 2) 日本シビックコンサルタント (株) 首都圏事業部技術部 課長
Manager, Technical Division, Nippon Civic Engineering Consultant Co., Ltd.
- 3) (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.

要約

トンネルの免震とは、トンネル外周に形成させた薄い免震層により、地盤ひずみの伝達を遮断するとともにトンネルに発生するひずみの平滑化を図り、地震時にトンネルに発生する断面力の低減を図る方法である。立坑接合部におけるシールドトンネルの免震は、立坑近傍の地盤ひずみ集中や立坑のロッキング等によってシールドトンネルに発生する局所的な断面力集中を低減する目的で実施されるものであり、その構造は立坑近傍のトンネル～地盤間のみならず立坑躯体壁面とセグメント間にまで及んで免震層を配置するものである。すなわち、立坑が及ぼす地震の影響を低減させる効果を期待している。本論文では、立坑接合部のシールドトンネルに免震構造を採用した場合の耐震解析を3次元静的有限要素法により実施し、その解析結果より免震のメカニズムと効果に関して考察した結果を報告するものである。

SUMMARY

The seismic isolation structure of tunnels is the system in which the transmission of ground strain to a tunnel body is cut off and the smoothing of tunnel strain distribution is attained, by applying a thin isolation layer covering a tunnel. The seismic isolation of a shield-driven tunnel at a junction with a vertical shaft is adopted, in order to reduce the local concentration of tunnel sectional force generated by the concentration of ground strain near a vertical shaft and rocking vibration of a vertical shaft itself. In the seismic isolation structure, the isolation layer is placed not only between a tunnel and its peripheral ground but between a tunnel and a shaft body. Thus, the effect of a vertical shaft on the tunnel deformation is largely reduced by the isolation. This paper presents seismic analyses using three-dimensional finite element method, focusing on cases where the seismic isolation structure is applied to a shield-driven tunnel at a junction with a vertical shaft. Then, the mechanism and isolation effects are discussed based on the results of analyses.

1. はじめに

立坑は、地盤条件およびトンネルの土被りやトンネルの用途に応じて要求される性能や施工方法も異なっており多種多様な構造形式を有している。また、立坑本体を取り巻く仮設構造も多種多様であり、仮設構造の影響を耐震設計上考慮すべきものと無視できるものがある。立坑接合部でトンネルに発生する局所的な断面力集中は、このような種々の仮設構造や基礎構造を含めた立坑全体および周辺地盤の地震時挙動によって生じる。立坑接合

部におけるトンネルの免震構造は、トンネルに発生する局所的な断面力集中を低減する目的で実施するものであり¹⁾、その構造は立坑近傍のトンネルと地盤間のみならず立坑躯体壁面とトンネル壁面の間にまで及んで免震層を配置するものである。すなわち、立坑がトンネルに及ぼす地震の影響を低減させる効果を期待している。

本稿では、立坑接合部のシールドトンネルに免震構造を適用した場合の耐震解析を、3次元静的有限要素法を用いて実施し、解析結果より、立坑接合部におけるトン

ネルの免震構造について、免震のメカニズムと効果を考察した結果を報告する。

2. 立坑接合部における免震構造

シールドトンネルの場合、通常立坑坑口コンクリートとセグメントとを一体化させているが、免震構造とするためには、両者の絶縁が必要となってくる。このため、立坑坑口の構造は、シールドトンネルと立坑との相対変位吸収と止水性を兼ね備えた構造とする必要がある。また、発進側と到達側の立坑では施工面から立坑接合部の構造が異なることがある。すなわち、到達側ではシールドマシンの鋼外殻を残置することが多いため、発進側のようにテールボイド間に免震材を注入するのではなく、残置された鋼外殻と場所打ち覆工コンクリートとの間に免震材を設置するか、あるいは発泡スチロール等で変位を絶縁する等の構造形成が必要となる。

図-1にシールドトンネルの場合の立坑接合部における免震構造の適用例を示す。

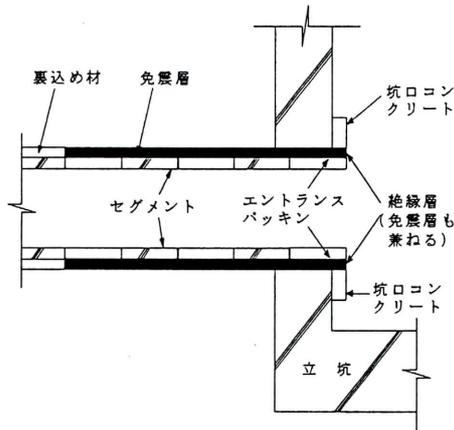


図-1 立坑接合部における免震構造事例

3. 3次元静的有限要素法による耐震解析

(1) モデル化と解析条件

解析対象とした構造概要を図-2に示す。表層地盤は軟質地盤（沖積層）と硬質地盤（洪積層）で構成される成層地盤とし、シールドトンネルと立坑の床付け深度は軟質地盤中に設定した。また、立坑躯体構築時の仮設構造として連続地中壁を想定し、連続地中壁は躯体構築後も残置されるものとした。免震層の配置は、立坑壁面および連続地中壁面とセグメント間を含めたシールドトンネル外周面である。

3次元有限要素モデルは、トンネル頂点と底点を通る鉛直面での対称性を利用した1/2モデルとし、モデル全体ならびに立坑接合部のメッシュ分割は図-3に示すとおりとした。なお、端部境界で自由地盤の変位とほぼ一致するだけ十分な解析領域を確保した結果、モデルの規模は、立坑からシールドトンネル軸方向に深さの約4倍、軸直角方向に約3倍となった。解析モデルにおける表層地盤、立坑、地中連続壁および免震層は均質等方弾

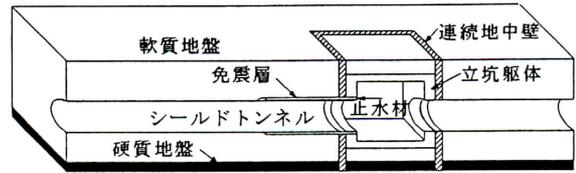


図-2 解析対象とした構造概要

表-1 各構造要素の物性値

		G (tf/m ²)	E (tf/m ²)	γ (tf/m ³)	Vs (m/s)	ν
表層地盤	軟質	1600	4700	1.70	96	0.49
	硬質	6218	18500	1.80	184	0.49
トンネル	軸性	84000	196000	2.50	-	0.167
	剛性 曲げ	200000	467000	2.50	-	0.167
免震層 (t=10cm)		30	89	1.30	-	0.48
立坑部	躯体	1070000	2500000	2.50	-	0.167
	連壁	1070000	2500000	2.50	-	0.167

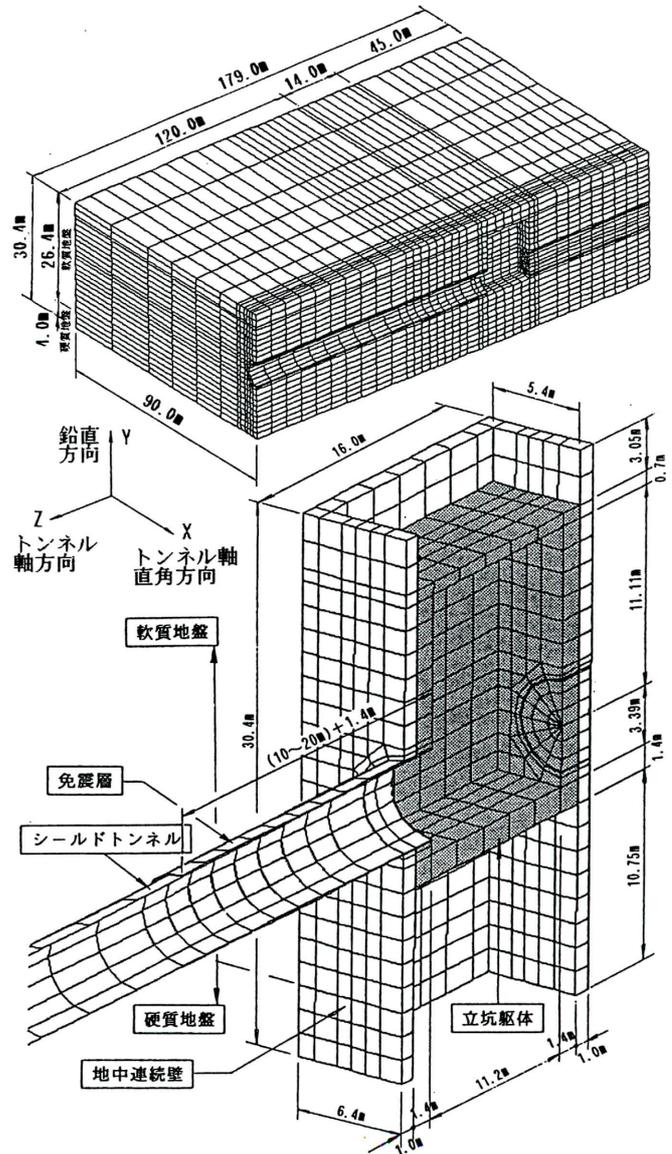


図-3 3次元静的有限要素法のメッシュ分割図

性体のソリッド要素で、シールドトンネルはシェル要素でモデル化し、物性値は表-1に示す値とした。免震層の物性は、ウレタン系あるいはシリコン系の免震材²⁾の採用を想定し、免震層厚は $t=10\text{cm}$ とした。

解析方法は、地震荷重として一様な水平震度 $0.6G$ を与えた際の地盤慣性力を解析モデル全節点に作用させる方法³⁾とし、地震荷重の作用方向は、トンネル軸方向および軸直角方向の2方向(図-3に示すZ軸、Y軸の正方向)とした。

(2) 解析ケース

解析は、シールドトンネルと立坑接合部の構造条件を表-2に示すよう設定して行うこととした。

ケース1は、免震構造を適用しない場合に、立坑接合部のセグメントに生じる局所的なひずみの伝達機構を明らかにする目的で実施する。ケース2は、立坑接合部での局所的なひずみの吸収を行う構造の代表例である可撓セグメントを採用したものであり、免震構造を適用する場合との免震効果の違いを調べる目的で設定している。なお、可撓セグメントの物性値は、周辺の軟質地盤と同程度の弾性係数 $E=4700\text{tf/m}^2$ とした。ケース3、4は、免震構造適用のケースであり、両ケースの解析結果の比較より、免震区間長による免震効果の違いを検討する。

4. 解析結果と考察

(1) トンネル軸方向に対する免震効果

地盤慣性力を軸方向に作用させた場合の解析結果より、トンネル頂部(クラウン)、トンネル側部(スプリングライン)、トンネル底部(インバート)における軸ひずみの分布図を図-4に、またトンネル側部の軸方向変位の分布図を図-5に示す。これらの結果に対する考察を以下に示す。

1) 免震構造を適用しないケース (CASE-1)

免震構造を適用しない場合、立坑接合部のセグメント

には局所的な引張りひずみの集中が生じ、その値は頂部でやや小さく、側部、底部と下方になるにつれて大きくなる傾向を示している。これは、立坑の回転(ロッキング)の影響による変形が、直接トンネルへと伝達され、その結果としてトンネルに鉛直方向の曲げ変形が生じたと理解できる。

2) 可撓セグメント適用のケース (CASE-2)

可撓セグメントは、連続地中壁に接続するセグメントに設置した。図-4に示すように設置箇所近傍においてセグメントひずみの低減が図られているが、ひずみが顕著に低減しているのは可撓セグメント近傍に限られている。図-5に示す変位分布図においても、可撓セグメント設置箇所で変位が増大し、以降遠方部の地盤変位に漸近していく分布形状となっていることから、可撓セグメント適用による地震時トンネル断面力の低減効果が得られるのは、近接するある範囲に限られることがわかる。

3) 免震構造適用のケース (CASE-3, CASE-4)

免震構造の適用により、トンネル各部に発生する軸ひずみは、接合部でのピークがカットされ全体的に平滑化された分布を示している。その効果を最大ひずみで表すと、免震構造を適用しない場合に対して、免震区間が 10m の場合で $48\sim 62\%$ 、免震区間が 20m の場合では $38\sim 55\%$ まで低減しており、顕著な免震効果が達成されている。また、免震構造を適用した場合には、トンネルの頂部から底部にわたって、ひずみのピーク位置とその絶対値および分布傾向に顕著な相違が見られず、トンネル各部位を通じて同様なひずみ分布となっていることがわかる。これは、前述の免震構造を適用しない従来の立坑接合部で生じるロッキングに起因するトンネルの曲げ変形を、トンネルと立坑間の免震層で吸収した結果といえる。免震構造区間の長さによる効果の違いについては、区間長を 10m から2倍の 20m としても約 $10\sim 20\%$ の低減効果にとどまっている。

(2) トンネル軸直角方向に対する免震効果

図-6は、地盤慣性力を軸直角方向に作用させた場合の解析結果より、スプリングライン位置における軸ひずみの分布図を示したものである。また、図-7は立坑接合部付近の軸直角方向変位を拡大表示したものである。

図-6より、スプリングライン位置における軸ひずみは、免震構造を適用しない場合には、接合部で引張りひずみが約 2000×10^{-6} のピーク値を示し、以降圧縮ひずみへと移行していく。これに対し、免震構造とした場合には、立坑との絶縁効果により接合部での曲げ変形を吸収し、変位に応じた滑らかなひずみ分布を示す結果となる。また、免震構造とした場合のピーク値は約 700×10^{-6} 程度であり、免震構造を適用しない場合の 35% まで低減している。図-7に示す立坑接合部付近での軸直角方向変位に着目すると、免震構造を適用しない場合、立坑や連続地中壁の境界部で急変する分布となるが、免震構造とした場合には、立坑の接合部から直線的な変位を示す結果となっており、局所的な曲げ変形が吸収されていることが明らかである。以上より、軸直角方向解析における免

表-2 解析ケース一覧表

解析ケースと接合部構造条件		概念図
CASE-1	接合部を剛結合とし、免震構造を適用しない。	
CASE-2	連壁に接続する箇所に可撓セグメントを適用。	
CASE-3	立坑壁面からの免震区間を 10m とした免震構造。	
CASE-4	立坑壁面からの免震区間を 20m とした免震構造。	

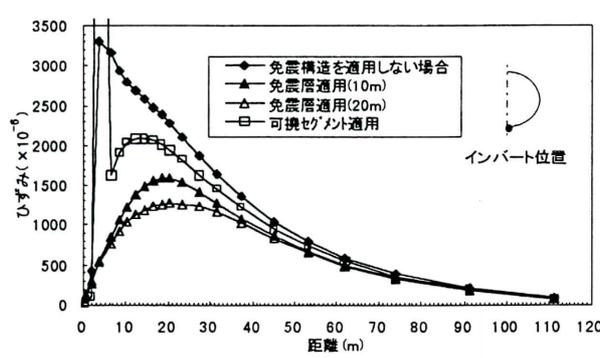
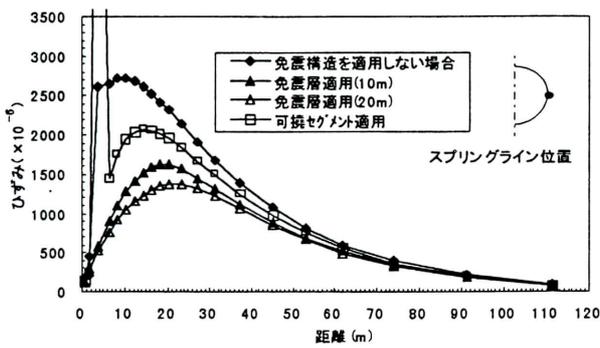
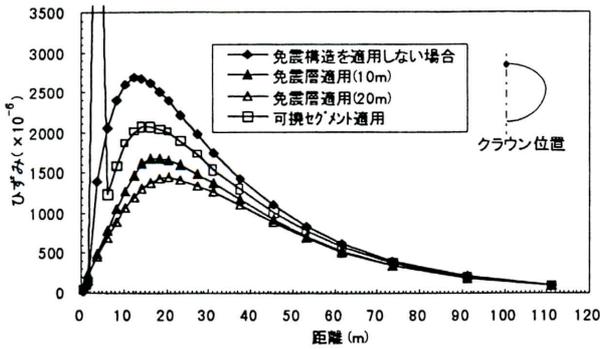


図-4 軸方向解析時のトンネル軸方向ひずみ分布

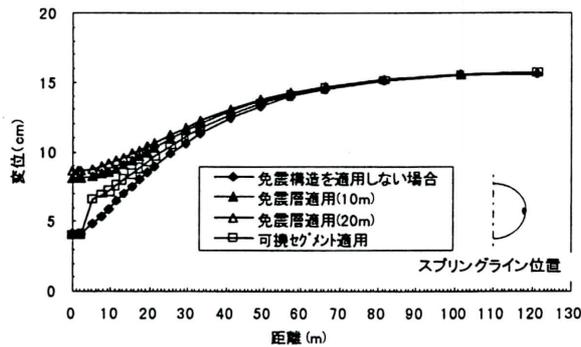


図-5 軸方向解析時のトンネル軸方向変位の分布

震構造の有効性は接合部に限定されるものの、免震構造としない場合に生じる引張ひずみのピークを大幅に低減している。

5. まとめ

3次元静的有限要素法により、シールドトンネルと立坑接合部に免震構造を適用した場合の免震効果とそのメ

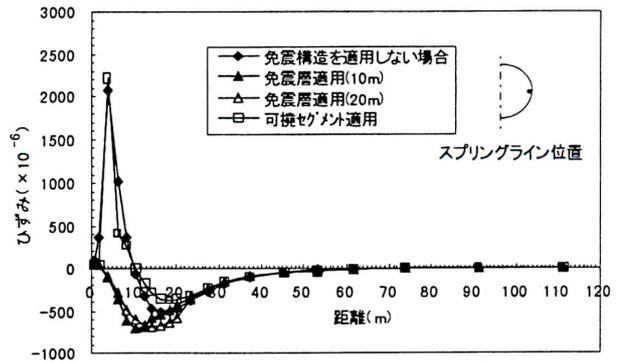


図-6 軸直角方向解析時のトンネル軸方向ひずみ分布

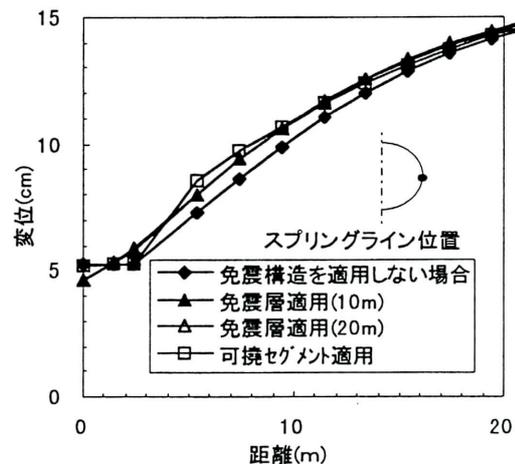


図-7 立坑接合部における軸直角方向変位分布

カニズムについて検討を行った。その結果得られた知見をまとめて以下に示す。

- (1)軸方向解析では免震構造の適用により、従来の立坑接合部で生じるひずみの局所的な集中や立坑のロッキングによる曲げ変形を吸収することができ、顕著な免震効果が得られることが確認できた。また、免震区間長が10mと20mでは、低減効果に顕著な相違は認められなかった。
- (2)一方、軸直角方向解析では免震構造の適用による免震効果が、立坑接合部に限定されるものの、ひずみの低減効果は大きく、接合部をヒンジとした状態に近いひずみ分布を示す結果を得た。

なお本研究は、建設省共同研究「地下構造物の免震設計に適用する免震材」の一環として行われたものである。

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)鈴木, 粕田, 小林, 福田, 池野: 都市トンネルの免震構造のためのシリコン系材料に関する実験的検討, 土木学会論文集, No. 534/VI-30, pp. 69-76, 1996.
- 3)建設省土木研究所: 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3), 1996~1998