

異高型トンネルの耐震評価手法の検討

瀬戸 岳史¹・小西 真治²・津野 究³・前川 宏一⁴

¹正会員 東京地下鉄（株） 鉄道本部 工務部（〒110-8614 東京都台東区東上野 3-19-6）

E-mail: t.seto.c7x@tokyometro.jp

²正会員 東京地下鉄（株） 鉄道本部 工務部（〒110-8614 東京都台東区東上野 3-19-6）

E-mail: s.konishi.r4r@tokyometro.jp

³正会員 （公財）鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部（〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38）

E-mail: tsuno.kiwamu.00@trrt.or.jp

⁴フェロー会員 横浜国立大学 （〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5）

E-mail: Maekawa-koichi-m@ynu.ac.jp

一般的な開削トンネルの耐震性能照査は、応答変位法によるフレーム解析で行われている。異高型複断面では、中柱ではなく中壁構造であるため有利であるとされたが、上記手法では大きな破壊が生ずる結果となり、解析の妥当性について検証が必要になった。

そこで、フレーム解析と二次元 FEM 解析を用いて耐震性能評価を行った結果、フレーム解析では躯体が大きく損傷したが、FEM 解析では過大な損傷はみられず、トンネルの耐震性能を精緻に評価できる可能性が浮上した。しかし、実現象との整合性に疑問が残ったため、模型トンネルによる載荷実験を実施し、FEM 解析で再現計算を行うことで解析手法の妥当性を評価した。合わせて、異高型複断面では中壁に大きな曲げモーメントとせん断力が発生するとともに、載荷方向によって変形モードが異なることを把握した。

Key Words: model test, subway, multi-section tunnel, seismic performance, 3D finite element method

1. はじめに

地下鉄の多くは道路下に建設される。駅間トンネルを開削工法で施工する場合、その多くは1層2径間の複線箱型構造となる。しかし、狭隘な道路下等の区間では、上下型の2層1径間として複線断面を確保する必要がある。東京地下鉄においても図-1に示すようなトンネルがある。ここで1層2径間から2層1径間への遷移区間では、上床版や下床版の高さが異なる断面（以下、「異高型複断面」という）構造となっている。

鉄道構造物等設計標準・同解説耐震設計¹⁾（以下、「耐震標準」という）では、一般的な箱型トンネルを対象とした動的解析法や応答変位法等が示されており、実務ではこれらの方法で横断方向の耐震性の検討が行われている。一方、異高型複断面トンネルについては、高速道路の類似断面構造において一部検討が行われている²⁾ことを除き、横断方向の耐震性を具体的に検討する方法は確立されていないのが現状である。したがって、地下鉄の異高型複断面トンネルの横断方向の耐震性を検討す

るうえで、地震時の動的作用や地盤変位に伴うトンネル変形挙動と発生断面力を把握することが重要となる。

以上を踏まえ、本研究では、異高型複断面トンネルの耐震性能評価手法の確立にあたり、初めに設計標準に準拠したフレームモデルと二次元 FEM モデルを用いた応答変位法の結果を比較し、異高型トンネルの破壊形態が大きく異なることを確認した。部材の損傷を安全側に設定しているフレーム解析では、一部部材に過大な損傷を与える結果となり、構造物全体系での破壊形態にも影響を及ぼす可能性がある。一方、地震時における部材の挙動や部材厚などを精密にモデル化可能な FEM 解析は、フレーム解析に比べより現実に近い損傷分布を再現できる見込みがある。

この点を明確にするために、模型トンネルを作製し、静的載荷実験を実施することで、トンネル及び地盤に変位が作用した際の断面力を把握した。

最後に、二次元 FEM 解析を用いて、載荷実験を模した再現解析を行い、実験結果と比較することで解析の妥当性の評価を行った。

以上より、異高型複断面トンネルの耐震評価手法の検討および確立に必要な知見を得ることができた。

2. 実構造物への適用

(1) フレーム解析による耐震検討

a) 解析方法

本検討は、骨組みモデルによる静的非線形解析（JRSNAP ver5.0-L06）を用いて行い、地震時検討は応答変位法によるものとした。対象断面は左右非対称形状であることから、両方向から载荷を実施した。

また、地盤応答解析として、入力地震動を I2 地震動 specⅡを用い一次元モデルにより地盤応答変位を算出した。この時、初期せん断弾性係数は N 値からの推定値とし、 $G-\gamma$ 曲線、 $h-\gamma$ 曲線は土木研究所の資料³⁾によることとした。

b) 解析ケース

異高型複断面を有する区間より、代表断面を選定し、

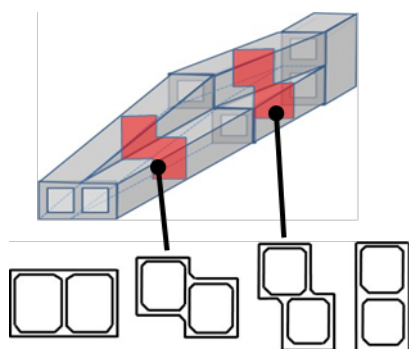


図-1 異高型トンネルの例

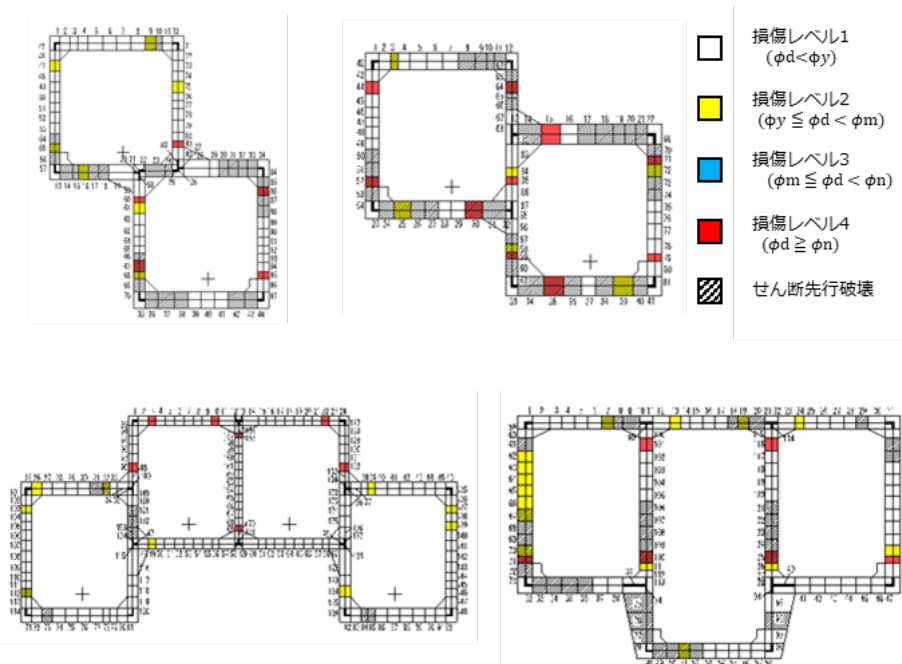


図-2 フレーム解析による耐震性能照査結果（例）

解析を行った。

ここで、要求性能として、許容する外周部材の曲げ損傷レベルは 2、中柱等の内部部材は曲げ損傷レベル 3 とし、せん断損傷レベルは無損傷を示すレベル 1 とした。同時に破壊形態の照査も行い、曲げ先行かせん断先行かを確認した。

c) 解析結果

図-2 に解析結果の一例を示す。網掛け部分であるせん断破壊先行箇所が多くみられ、赤色損傷レベルⅣ（曲げ破壊先行）となる箇所も、隅角部を中心に散見される結果となった。

これより、異高型複断面を有するトンネルの耐震照査を応答変位法により実施した場合、耐震性能を満足しないことが分かった。

(2) 二次元静的 FEM 解析による耐震検討

a) 解析方法

地盤との相互作用を考慮するため、静的非線形応答変位法を用いて解析を行った。解析には三次元熱力学練成解析応答モデル「DuCOM-COM3」⁴⁾を用いた。

b) 解析ケース

断面は、2-(1)のフレーム解析と同様の断面で行った。载荷順序として、常時状態の再現後、モデル上下端間で平均 3.0%のせん断変形を右、左の順で与えた後、元の位置に戻した。

c) 解析モデル

モデル概要図を図-3 に示す。RC 構造物を再現したメッシュ周辺に地盤要素をモデル化し、その外側に弾性要素を配置した。

ここで、土被りは実際の地下鉄を想定し 3.0m とし、RC 構造物下の地盤要素は 1.05m とした。また、配力筋の鉄筋比として均一に 0.5% を設定し、そのほかの鉄筋は要素内に均等に配置した。

d) 解析結果

図-4 に解析結果の一例を示す。一部断面の中壁部においては 3500 μ を超えるひずみと大きな変形が発生しており、せん断破壊の兆候が見られた。この傾向は、1 層 2 径間から 2 層 1 径間へ推移する区間内における、左右径間が上下に移動する断面（図-4 上段右）において特に顕著であった。しかし、その他の断面では载荷後も断面形状を維持していることから、曲げ破壊であると推測

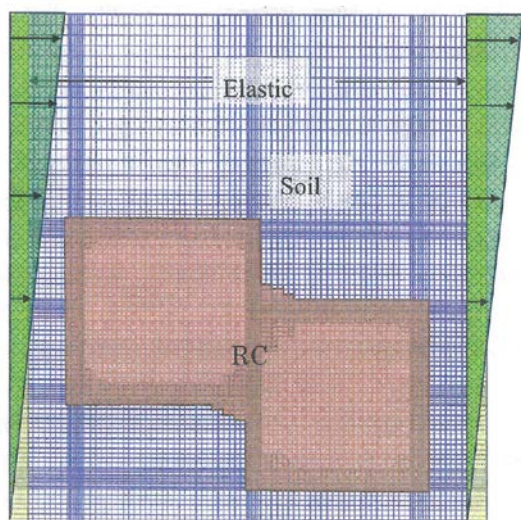


図-3 解析モデル概要図（例）

される。

中壁部にせん断破壊が集中した理由としては、強制変位を入力したとき、通常の箱型トンネルは上床版や下床版に圧縮力がかかるのに対して、異高型トンネルは上床版や下床版が中壁を押してしまい、力が集中したためと推察される。

(3) 比較

フレーム解析と二次元静的 FEM 解析を比較すると、部材の隅角部や中壁部において一部破壊形態が異なる箇所があることが判明した。

フレーム解析では上下床版や一部側壁にせん断破壊せん断破壊を伴う損傷が発生する可能性が示された。しかし、二次元 FEM 解析では床版と接続する中壁に損傷が集中する結果となった。

異高型複断面では中壁が存在するため床版が大きく破壊するとは考えられず、FEM モデルを用いた解析の方が耐震性能を正確に評価でき、かつ要求性能を満足する断面が増加する可能性が示唆された。

しかし、二次元静的 FEM 解析において、実トンネルにおける地震時挙動を再現できているかについては疑問が残った。そこで、後述する模型トンネルを用いた静的载荷実験と FEM モデルを用いた再現解析を行うことで、解析手法の妥当性を評価することとした。

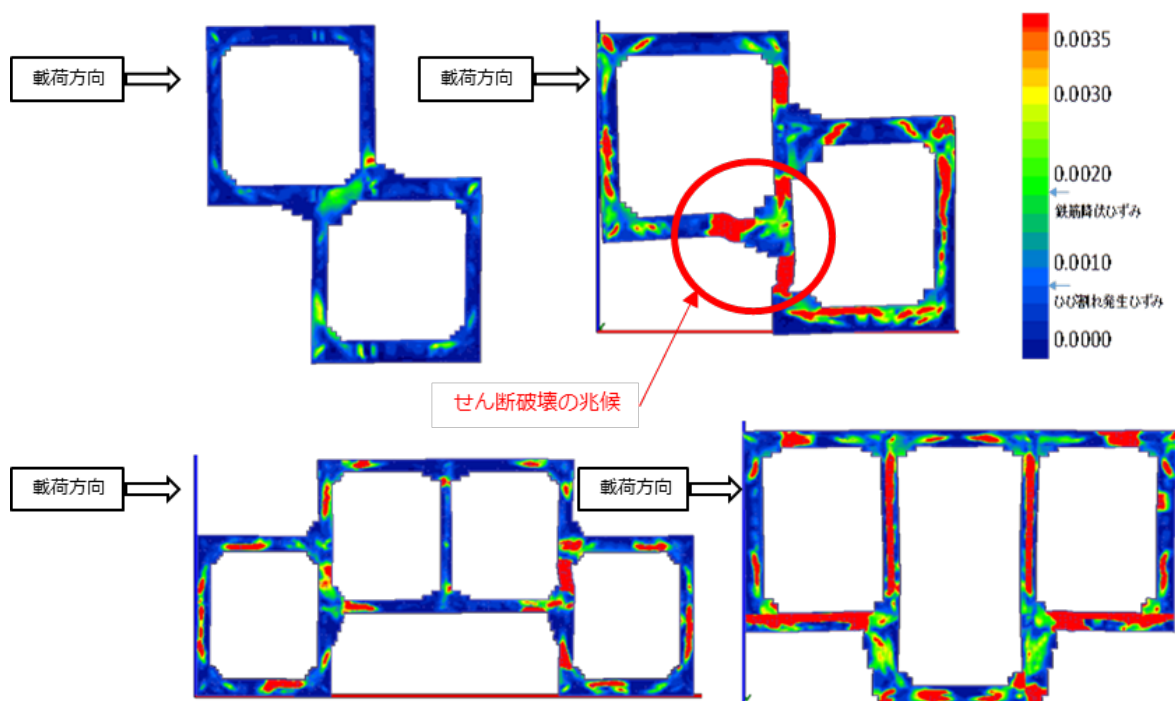


図-4 二次元 FEM 解析による耐震性能照査結果（例）

3. 静的載荷実験

(1) 実験概要

本実験は、鉄道総研が所有する「基礎の動静的載荷装置」⁵⁾を用いて、地盤変位を模擬した静的載荷実験を行った⁶⁾。図-5に本装置の概要図を示す。本装置は、No1～6の6つの油圧ジャッキを搭載しており、独立して制御することが可能である。また、土槽は12段のせん断フレームから構成されたせん断土槽となっており、各フレームがリニアガイドにより独立に移動するため、No4～6のジャッキを操作することにより、地盤にせん断変形を生じさせることが可能となっている。

a) 模型トンネル

図-6に示すような単線箱型断面及び異高型複断面を模したアクリル製の模型トンネルを作製した。異高型複断面は、2層1径間と1層2径間の中間の断面を選定した。アクリルの弾性係数値は 3443MN/m^2 である。模型トンネルの断面の縮尺は、実際の地下鉄トンネルの概ね1/12に対応している。

b) 模型地盤

作製した模型トンネルを模型地盤に配置した。対象としている異高型複断面トンネルは複数箇所あり、地盤条件はトンネルにより異なり、縦断方向にも変化するが、基本的な性能を把握することを目的とし、模型地盤については単純な条件を設定した。

c) 載荷方法

実験では、せん断土槽を強制変形させることにより、地盤変位の作用を模擬した。ここでは、No6ジャッキを固定し、No4およびNo5ジャッキの載荷変位量を21の割合で変位制御で載荷することで、トンネル底面より上方の地盤に一樣なせん断変形を発生させた。載荷方法は、多段階正負交番載荷方式を採用した。

(2) 実験結果

実験により得られたせん断力および曲げモーメント図を

図-7に示す。単線箱型断面では地盤のせん断ひずみ

量2.5%、異高型複断面では同様に2.0%の際の結果を示す。これにより、異高型複断面トンネルでは、載荷方向による応力分布の違いおよび特徴的な弱点箇所があることが判明した。

4. 二次元 FEM モデルによる再現解析

単線箱型および異高型複断面を対象とし、実験結果より得られた結果を、二次元静的 FEM 解析により再現計算を行った。

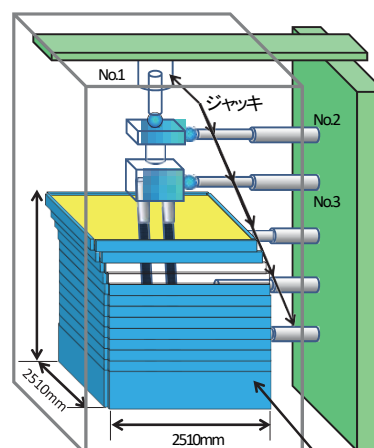


図-5 基礎の動静的載荷装置モデル図

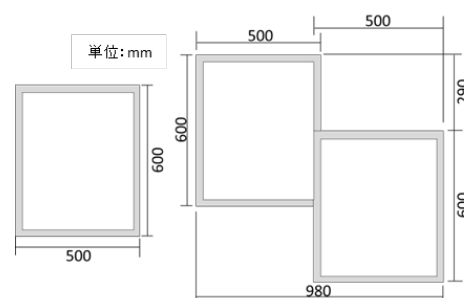


図-6 模型トンネル

(1) 二次元静的 FEM 解析

a) 解析方法

FEM 解析は「Soil Plus 2015 Build 1」を用いて行った。この際、解析モデルは実験に適用する模型トンネルと同等とし、アクリル板の板厚や剛性を設定して行った。地盤のモデルは、RO モデル（非線形モデル）にてモデル化を行った。

b) 解析ケース

単線箱型および異高型複断面を対象とし、静的載荷実験の再現解析を行った。それぞれ模型地盤作成後の常時状態を再現後、静的載荷実験と同等である、上下床版軸心間の相対変位を前者は2.5%、後者は2.0%与えた。

c) 解析モデル

解析は二次元静的 FEM 解析により実施することとし、解析モデルは実験に使用した模型トンネルと同様の寸法、板厚および剛性を設定した。図-8に解析モデルの概要図を示す。

ここで、模型トンネルおよび模型地盤を対象にモデル化を行うが、鉛直方向は模型地盤底面+600mm から+2900mm（地表面）までをモデル化の範囲とした。

また、地盤要素とアクリル要素（模型トンネル）との境界条件について、異高型複断面についてはジョイント要素でモデル化した。

d) 解析結果

解析により得られたせん断力図および曲げモーメント図を図-9に示す。

単線箱型断面では、曲げモーメントの値は実験結果と概ね整合が取れているが、せん断力の一部異なる箇所が見受けられた。

異高型複断面においては、左加震の場合は中壁に大きな断面力が発生し、右加震の場合は中壁下側壁に大きな断面力が発生する傾向にあり、実験結果と概ね一致する結果となった。

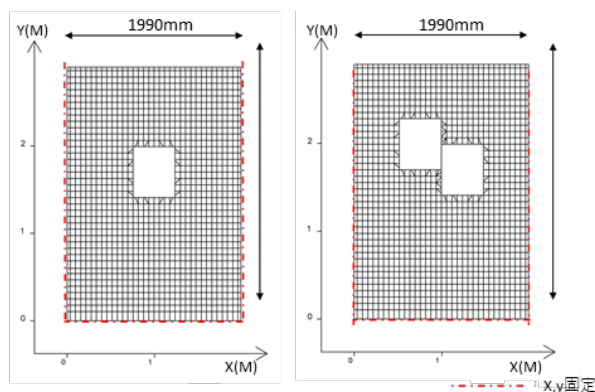


図-8 二次元 FEM モデル概要図

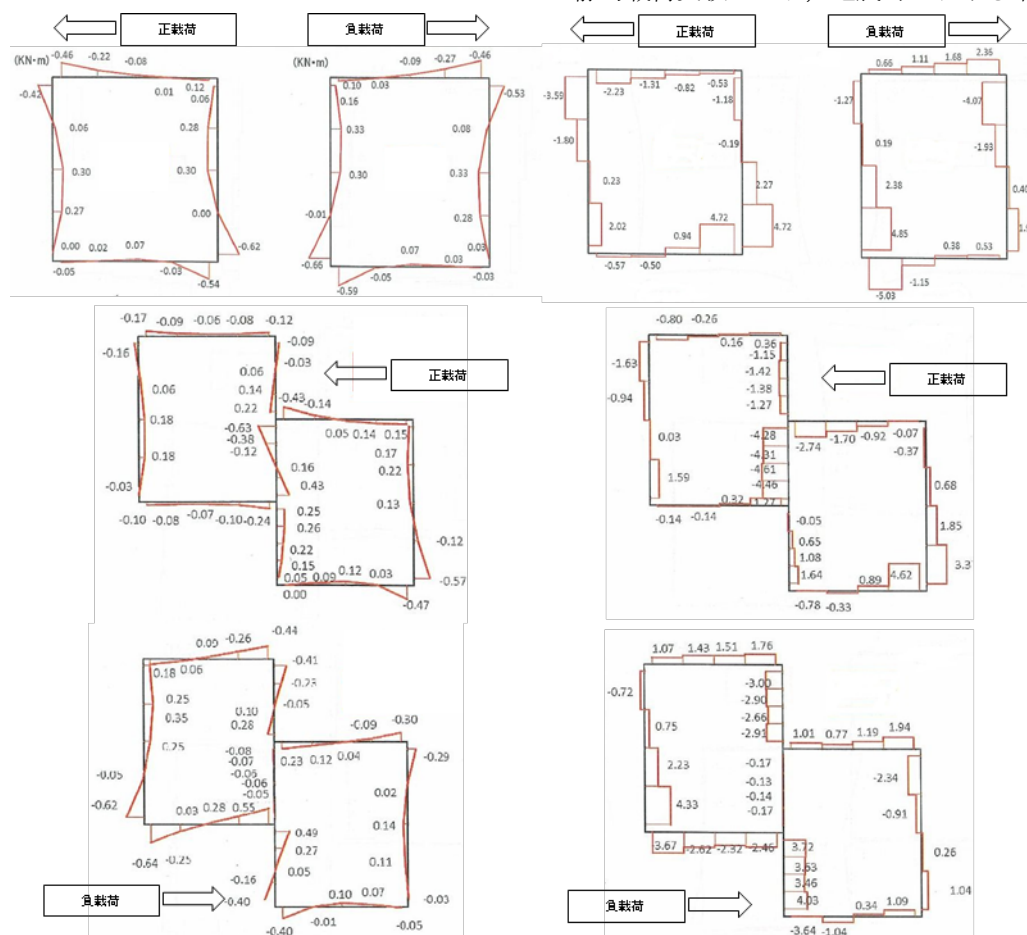


図-7 载荷実験による曲げモーメント図（左）、せん断力図（右）

しかし、解析による断面力が実験値に比べ小さいことから、地盤の非線形性およびジョイント要素の値について検討することが望ましいと考えられる。

5. 結論

本研究では、異高型複断面トンネルを対象に、既往の耐震性法照査手法であるフレーム解析と二次元静的 FEM 解析との比較を行い、両者の特徴を把握した。また、静的载荷実験結果と二次元静的 FEM 解析による再現解析の結果を比較・検討した。

本研究で得られた知見は以下の通りである。

- 異高型複断面トンネルの耐震性能検討において、地下鉄トンネルの耐震設計で一般的なフレーム解析では、床版等に過大な損傷が見られ、地震時の挙動をうまく再現できない可能性が示された。
- 二次元 FEM 静的解析による手法では躯体の損傷が減少する傾向にあること示唆された。そのため、異高型複断面を有するような特殊な構造に対しては、詳細な検討を行うことにより、耐震性能を精緻に評価できる可能性が示唆された。
- 静的载荷実験により、地震時における単線箱型断

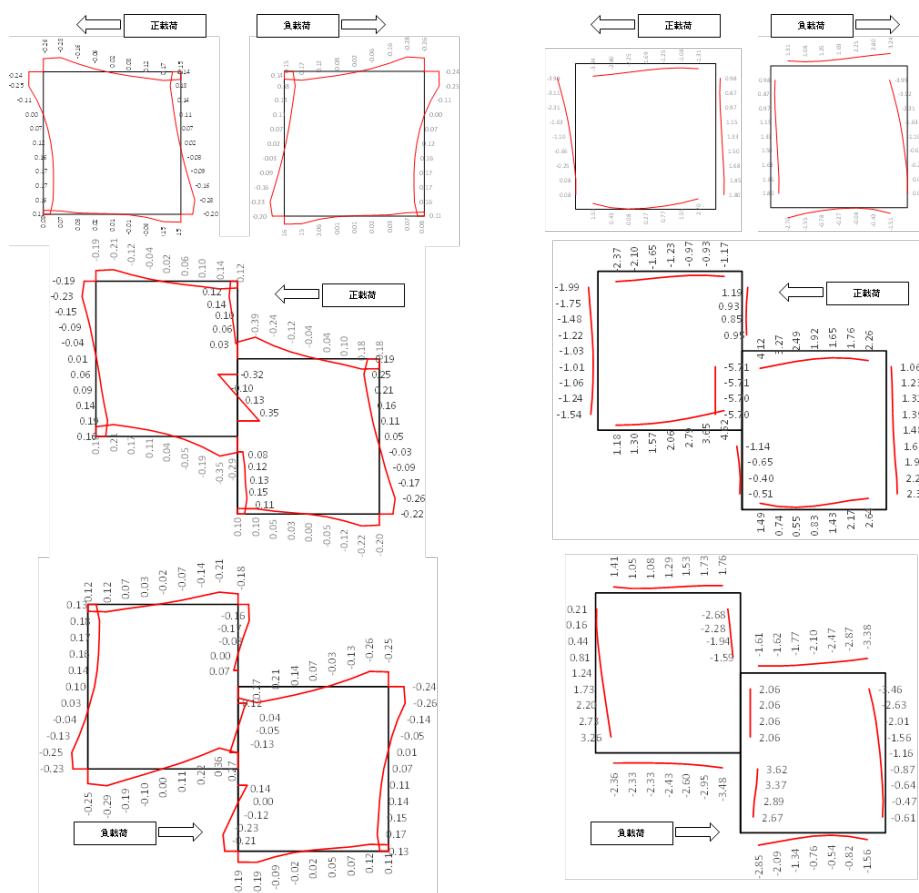


図-9 2次元FEM解析による曲げモーメント図（左），せん断力図（右）

面および異高型複断面トンネルの挙動を把握した。

- ・ 二次元 FEM モデルによる再現解析では，一部断面力の分布が異なっていたものの，全体的な傾向は再現できることを把握した。

以上の知見より，異高型複断面トンネルのような特殊な断面形状のトンネルにおける耐震検討において，FEMモデルの適用が有効であることが明らかとなった。

今後は，静的載荷実験のフレームモデルによる解析を行い，比較検討をするとともに，実構造物への適応も視野に入れて検討を進めたい。

謝辞：本論文の執筆にあたり，検討及び解析にご協力いただいたパシフィックコンサルタンツ株式会社の清水幸範氏，今川純一氏，メトロ開発株式会社の鈴木久尚氏，村松泰氏およびコムスエンジニアリングの土屋智史氏に深く感謝の意を示したい。

参考文献

- 1) 国土交通省監修，鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説，耐震設計，丸善，2012
- 2) 長田光正，市村強，堀宗朗，並川賢治，土橋浩，山田岳峰，小原隆志，滝本邦彦：分合流部を有する大型道路トンネルの三次元地震応答解析，土木学会論文集 A1，Vol.68，No.4，I-855-I-866，2012.
- 3) 土木研究所：地盤の地震時応答特性の数値解析法，土木研究所資料第1778号，1982.
- 4) Maekawa, K., Ishida, T. and Kishi, T.: Multiscale Modeling of Structural Concrete, Taylor & Francis, London, 2008.
- 5) 鉄道総合技術研究所：大型震動試験装置の概要，ニュースリリース，2008.
- 6) 津野究，鎌田和孝，佐名川太亮，小西真治，大塚努，今村俊毅，前川宏一：異高型複断面トンネルの横断方向地震時挙動に関する実験的検討，土木学会論文集 F1，Vol.72，No.3，pp.I-150-I-158，2016.

(2019. 8. 9 受付)

RESEARCH ON SEISMIC EVALUATION METHOD FOR UNEVEN MULTI-SECTION TUNNEL

Takeshi SETO, Shinji KONISHI, Kiwamu TSUNO and Koichi MAEKAWA

The seismic performance verification of general cut-and-cover tunnels are performed by frame analysis model using response displacement method. In the uneven multi-section tunnel, it is considered advantageous because there is an inner wall instead of the middle pillar of a double box tunnel. But the result showed that big destruction is occurred, and it was necessary to verify the validity of the analysis.

Therefore, we extracted the actual uneven multi-section tunnels and evaluated the seismic performance by the response displacement method using a general frame model and two-dimensional FEM model, and at the same time grasped the difference between them. However, since there was a doubt about the consistency with the actual phenomenon, the validity of the analysis method was evaluated by creating a model tunnel, carrying out a loading experiment, and performing a reproduction calculation with the FEM model. At the same time, we understood that results of experiment and FEM model analysis are similar. In addition, we found that a large bending moment and a shearing force were generated on the inner wall in uneven multi-section tunnels, and the deformation modes differed depending on the loading direction.