

開削トンネルを対象とした 側壁開口部のモデル化に関する一検討

牛田 貴士¹・仲山 貴司²・津野 究²・焼田 真司²

¹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:ushida@rtri.or.jp

²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)

近年、都市圏の鉄道では、増線や通路拡幅のために、開削トンネルの地下駅を拡幅する事例が増加している。このような事例では側壁の開口幅が大きくなる傾向があり、既設躯体の断面力分布に影響を及ぼす可能性が考えられる。そこで本研究では、開口幅が大きいときの側壁開口部のモデル化手法について検討した。まず、既往のモデル化手法の開口幅が大きいケースの適用性を検討するとともに、開口部中央の変位に着目した新たなモデル化手法を提案した。つぎに、土槽載荷実験から、側壁開口した断面の発生断面力の特徴を把握した。最後に、提案した側壁開口部のモデル化手法を用いた二次元フレーム解析結果と実験結果を比較して、提案法の適用性を示した。

Key Words : cut-and-cover tunnel, renewal, opening, frame analysis, loading test

1. はじめに

近年、都市圏の鉄道では、利便性向上のための増線や通路拡幅等に伴う開削トンネルの地下駅拡幅の事例^{1,2)}が増加している(図-1を参照)。その際、既設躯体を開口して新設躯体と接続する方法が採用されるが、バリアフリー化等に伴う小規模な拡幅工事と比較して、側壁開口幅が大きくなる傾向がある。

開削トンネルの構造安全性に関する検討は、一般に、二次元フレーム解析で検討されており、側壁開口部は剛性を低減した梁でモデル化して検討される事例が多い。しかし、側壁開口幅が大きくなると、開口部付近に三次元的な挙動が生じると考えられる。

そこで本研究では、大規模な側壁開口部のモデル化手法について検討した。まず、開口幅が小さい事例で用いられた実績がある既往のモデル化手法の大規模な開口への適用性を検討するとともに、開口部付近における三次元的な挙動を表現できるモデル化手法を提案した。つぎに、側壁に開口部を有する模型の土槽載荷実験を行い、その挙動を把握した。最後に、提案した側壁開口部のモデル化手法を用いた二次元フレーム解析により、実験結果のシミュレーション解析を行って、提案法の適用性について検討した。



図-1 地下駅拡幅工事のイメージ

2. 側壁開口部のモデル化手法の検討

(1) 概要

開削トンネルの側壁開口を二次元フレーム解析で検討する場合、開口部は剛性を低減した梁(以下、仮想梁という)でモデル化する事例が多い。既往のモデル化手法(以下、既往法という)では、開口部の平均的な挙動に着目して、仮想梁の剛性低減率 α_1 を次式で算定する。

$$\alpha_1 = (L - L_x) / L \quad (1)$$

ここに、 α_1 : 剛性低減率、 L_x : 開口幅、 L : 中柱間隔

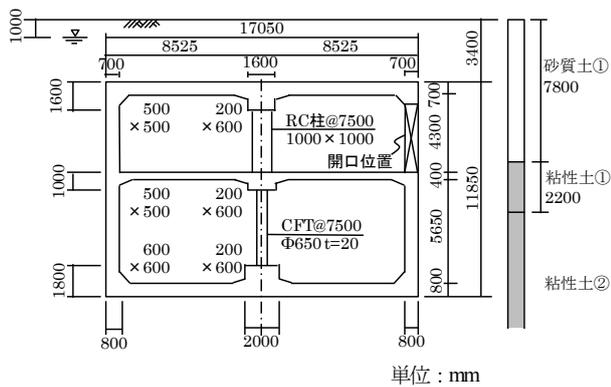


図-2 検討対象トンネルの断面

表-1 部材の物性値

	ヤング係数 [kN/mm ²]	ポアソン 比	単位体積重量 [kN/m ³]
コンクリート	25	0.2	24.5
鋼材 (鋼管)	200	0.3	77.0

表-2 地盤の物性値

	N値	静止土圧 係数	単位体積重量 [kN/m ³]
砂質土①	8	0.5	17.0*
粘性土①	4	0.6	16.0
粘性土②	4	0.7	16.0

*地下水位以下では水中単位体積重量を用いる。

そこで、既往法による二次元フレーム解析と三次元FEMの算出値を比較して、既往法の開口幅が大きいケースへの適用性を検討するとともに、開口部付近における三次元挙動を表現できるモデル化手法について検討した。

(2) 検討条件

図-2に検討対象トンネルの断面を示す。当該トンネルは、一般的な鉄道駅の構造を有する2層2径間の開削トンネルであり、上層階は鉄筋コンクリート柱による中柱構造、下層階はコンクリートを充填した鋼管柱による中柱構造である。表-1に部材の物性値を示す。

土被りは3.4 mであり、周辺地盤は、N値8程度の砂質土およびN値4程度の粘性土である。表-2に地盤の物性値を示す。

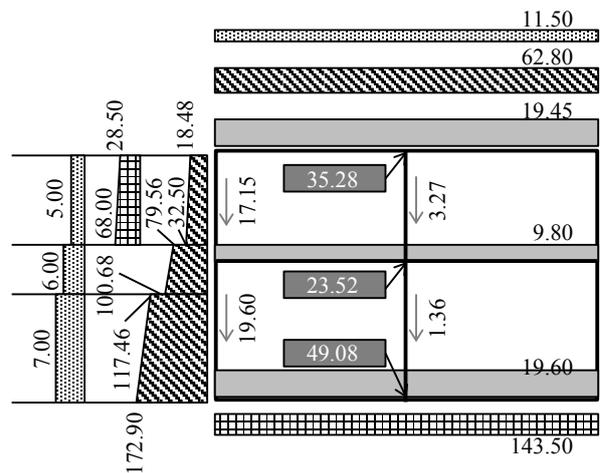
地盤反力係数 K_v は、開削トンネル新設時の設計法³⁾にしたがい、次式で算定した。

$$K_v = f_{rk} (1.7 \alpha E_0 B_v^{-3/4}) \quad (2)$$

ここに、 K_v :鉛直方向の地盤反力係数、 α :補正係数、 E_0 :地盤の変形係数、 B_v :下床版の幅、 f_{rk} :地盤抵抗係数

$$K_s = \lambda K_v \quad (3)$$

ここに、 K_s :せん断方向地盤反力係数、 λ :換算係数



■ 固定死荷重 ▨ 水圧・揚圧力
▨ 鉛直土圧・水平土圧 ▨ 変動荷重
■ 縦梁の集中荷重 単位: kN/m² (白抜き: kN)

図-3 作用荷重

なお、補正係数 α は1.0、換算係数 λ は1/3とした。

図-3に検討で考慮した作用荷重を示す。作用荷重は、開削トンネル新設時の設計法³⁾にしたがい算定して、変動荷重による土圧は、路面活荷重としてT-25荷重を考慮して算定した。なお、荷重係数はすべての荷重に対して1.0とした。

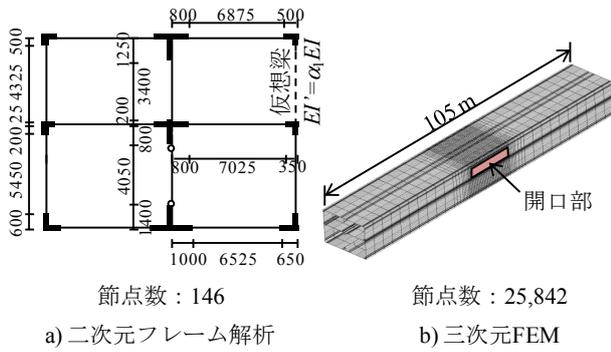
(3) 既往法の大規模な側壁開口への適用性の検討

検討対象トンネルで、既往法で仮想梁の剛性低減率 α を算定した二次元フレーム解析と三次元FEMの算出値を比較した。ここでは、開口高さに対する開口幅の比率が0.5~4.0の範囲で検討して、開口幅が1.9 m, 2.5 m, 3.2 m, 3.8 m, 7.6 m, 15.2 mである6ケースについて、解析を行った。

図-4 a)に検討対象トンネルの二次元フレーム構造を示す。節点数は146で、断面二次モーメントを無限大とする剛域を、既存の設計法⁴⁾によって設定した。このとき、既往法による剛性低減率 α は0.32~0.75の範囲となる。

図-4 b)に三次元FEMに用いた解析モデルを示す。節点数は25,842で、床版等の構造部材をシェル要素、中柱を梁要素でモデル化した。中柱と縦桁の接合部は、二次元フレーム解析と同様に、RC柱は剛結合、CFT柱はピン結合とした。また、下床版には、鉛直、せん断の地盤ばねを配した。その他の条件は、既報³⁾に準じて設定した。なお、縦断方向の解析領域は、開口部の挙動に端部の境界条件が影響しない範囲を設定した。

図-5に既往法を用いた二次元フレーム解析と三次元FEMによる算出値を示す。同図は、開口部を支持する上床版の横断方向の発生曲げモーメント M_c を比較したものである。三次元FEMによる算出値は、開口幅が大きくなるのに伴って、発生曲げモーメント M_c が増加するこ



STEP1: 両端固定梁で開口部中央の変位量を算定
 STEP2: 次式を満足する仮想梁の剛性を設定して二次元フレーム解析
 開口部中央の変位量=仮想梁の縮み量

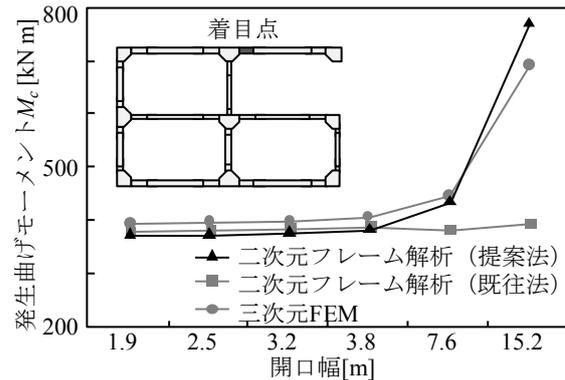
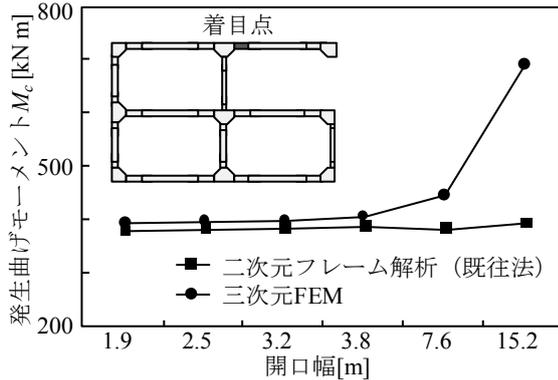
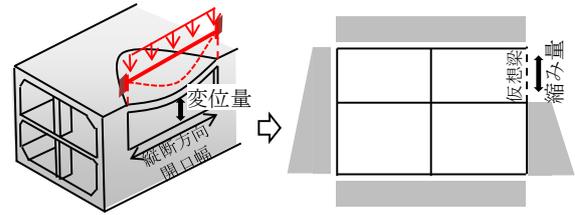


図5 既往法を用いた二次元フレーム解析と三次元FEMによる算出値

図7 提案法を用いた二次元フレーム解析による算出値

とが分かる。これは、縦断方向のたわみが生じることによる三次元的な挙動が影響したものと考えられる。既往法を用いた二次元フレーム解析による算出値は、開口幅が小さいときは、三次元FEMとよく一致している。一方、開口幅が大きくなると、三次元FEMでみられる発生曲げモーメント M_c の増加が表現できていないことが分かる。

(4) 三次元挙動を表現できるモデル化手法の構築

三次元FEMでは、大規模な開口時に横断方向の発生曲げモーメント M_c の増加がみられたが、既往法ではこれを表現できなかった。そこで、本研究では開口部中央のたわみに着目して、仮想梁の剛性低減率 α_2 を算定する手法を提案した（以下、提案法という）。

図-6に提案法を用いた二次元フレーム解析の概念図を示す。提案法では、開口部を縦断方向に両端固定梁としてモデル化して、中央の変位量を算定する。そして、二次元フレーム解析では、仮想梁の縮み量が算出した変位量と一致するように剛性低減率を設定する。

本検討では、仮想梁の縮み量 δ を両端固定梁としてモデル化した開口部中央のたわみ量 δ_1 と側壁の縮み量 δ_2 の和として評価する。このとき、縮み量 δ は次式で表わされる。

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 \quad (4)$$

$$\delta = \frac{WL_y}{\alpha_2 EA} \quad (5)$$

$$\delta_1 + \delta_2 = \frac{wL_x^4}{384EI} + \frac{WL_y}{EA} \quad (6)$$

ここに、 α_2 : 剛性低減率、 w : 分布荷重、 W : 分布荷重を換算した軸力、 L_x : 開口幅、 L_y : 開口高さ、 E : 部材の弾性係数、 A : 側壁の断面積、 I : 梁の断面二次モーメント

両端固定梁の分布荷重 w は上床版の作用荷重を等分布荷重としてモデル化して、両端固定梁の寸法は剛域の寸法とした。このとき、剛性低減率 α_2 は0.00029～0.54の範囲となる。

図-7に提案法を用いた二次元フレーム解析による算出値を示す。これより、提案法で仮想梁の剛性を設定して二次元フレーム解析を行うことにより、開口幅が大きいケースの、上床版の発生曲げモーメント M_c の増加を表現できることが確認できる。

3. 側壁開口部の土槽載荷実験

(1) 概要

側壁に開口部を有する模型の土槽載荷実験を行い、その挙動を把握した。また、前節で提案したモデル化手法

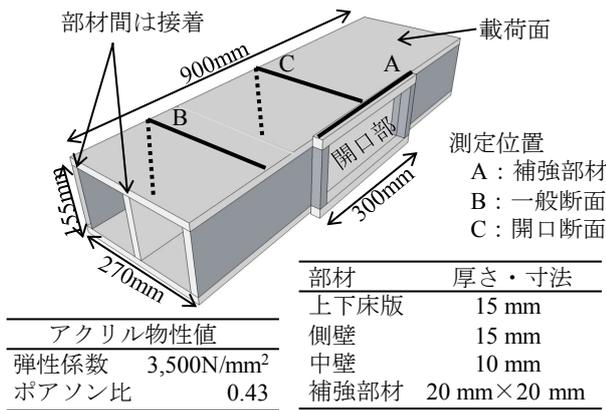


図-8 模型寸法および表面ひずみ測定位置

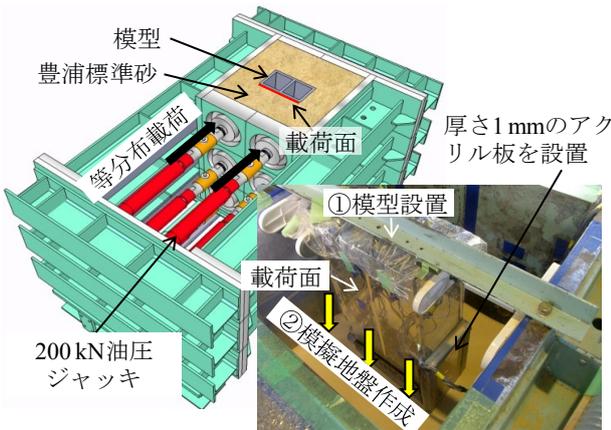


図-9 模型の設置状況

を用いた二次元フレーム解析と土槽载荷実験の結果を比較して、提案法の適用性について検討した。

(2) 実験方法

図-8に模型寸法および表面ひずみ測定位置を示す。模型寸法について、鉄道の開削トンネルの1/30を想定して作成しており、模型の開口幅320mmは、約10mに相当する。開口部の外周には、20mm×20mmの補強部材を配した。模型はアクリル製で、部材間には接着による処理を行った。表面ひずみ測定位置について、A、B、C断面の内空側表面（内縁）、模擬地盤側表面（外縁）に、測定用のひずみゲージを設置した。

図-9に模型の設置状況を示す。本実験では、上載圧を模擬した等分布载荷を行うために、模擬地盤を介して模型に载荷することが可能な载荷実験装置⁹⁾を用いた。模擬地盤は、豊浦標準砂を用いて空中落下法で作成し、相対密度は約80%であった。模型の開口部には、模擬地盤が内部に流入しないよう、厚さ1mmのアクリル板を設置した。

载荷は、200kN油圧ジャッキを用いて行い、300mm×300mmの载荷板を介して、等分布载荷となるようにした。また、载荷速度は、0.2mm/分とした。

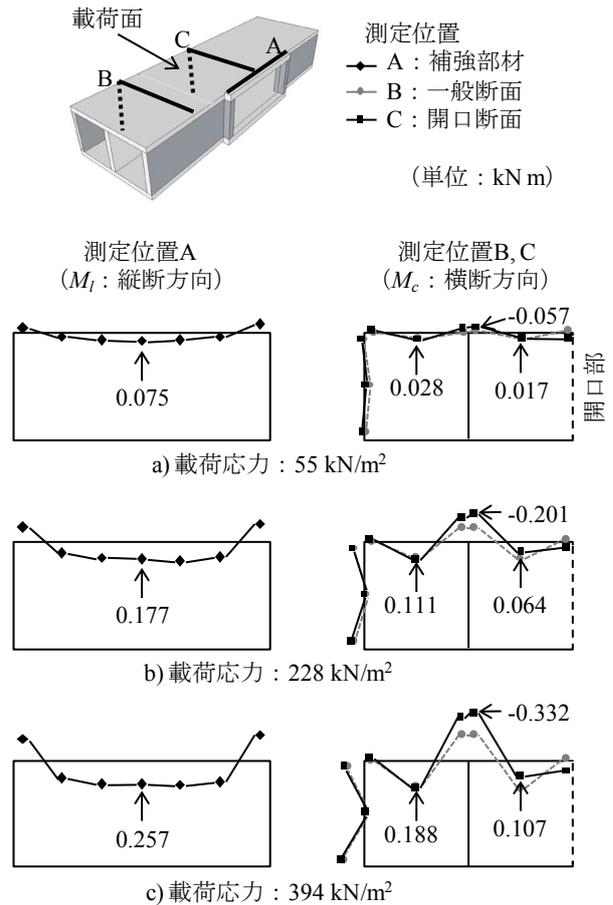


図-10 発生曲げモーメント M_c , M_l

载荷中の測定項目は、ジャッキの荷重および模型に発生する表面ひずみである。

(3) 実験結果

発生曲げモーメント M を、平面保持の仮定に基づいて、測定された表面ひずみから次式で算出した。

$$M = \frac{EI}{z_o} \varepsilon_o \quad (7)$$

ここに、 M ：発生曲げモーメント M_c または M_l 、 I ：部材の断面二次モーメント、 z_o ：表面ひずみから算定した中立軸から外縁までの距離、 ε_o ：外縁の表面ひずみ

図-10に载荷中の発生曲げモーメント M_c , M_l を示す。なお、図中の载荷応力は、ジャッキ荷重を载荷板の面積で除した値である。まず、縦断方向の発生曲げモーメント M_l について、補強部材（測定位置A）に、内縁に引張が生じていることから、縦断方向に上床版がたわむ三次元的な挙動が発生したと考えられる。横断方向の発生曲げモーメント M_c について、一般断面（測定位置B）では、側壁が上床版を支持するため、隅角部で外縁に引張が生じる曲げモーメントが発生していることが分かる。一方、開口断面（測定位置C）では、上床版を支持する側壁がないため、内縁に引張が生じる曲げモーメントが発生し

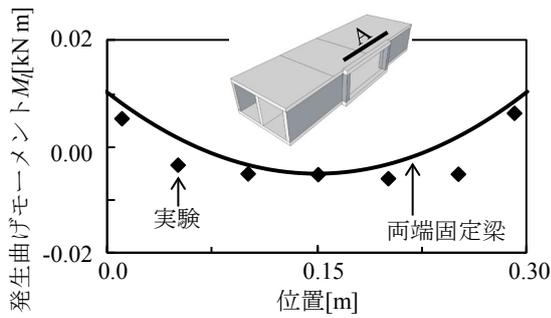


図-11 補強部材の発生曲げモーメント M_f

表-3 解析条件

項目	記号	値
開口幅	L_x	0.300 [m]
開口高さ	L_y	0.125 [m]
部材の弾性係数	E	3,500 [N/m ²]
部材の断面積	A	0.0004 [m ²]
梁の断面二次モーメント	I	1.333×10^{-8} [m ⁴]

ていることが分かる。

以上より、側壁開口部のモデル化においては、その付近の三次元的な挙動を表現できる手法が重要であると考えられる。

(4) 提案した側壁開口部のモデル化手法の検証

土槽載荷実験を対象に、提案法を用いた二次元フレーム解析によるシミュレーション解析を行った。載荷応力 394 kN/m^2 のときの条件で行い、実験値と比較した。

図-11に補強部材における発生曲げモーメント M_f の実験値と、開口位置中央で実験値と一致するように算出した両端固定梁の曲げモーメント分布を示す。なお、ここでは、補強部材を両端固定梁としてモデル化した。これらの分布はよく一致しており、開口部の縦断方向の挙動を両端固定梁でモデル化することは妥当であると考えられる。

土槽載荷実験では模擬地盤を介して載荷したため、模擬地盤の変形等の影響によって模型への作用荷重が、載荷応力より小さかったと考えられる。そこで、一般断面に実験で得られた発生曲げモーメント M_c が生じるときの作用荷重を、二次元フレーム解析で逆解析的に算出する。

図-12に一般断面における実験値と算出値の関係を示す。上床版に上載圧、側壁に静止土圧係数 K_0 として0.45を考慮した側圧を作用させて、下床版には鉛直方向地盤ばねを設置した。上載圧が載荷応力の70%のとき、算出値と実験値がよく整合したため、これを模型への作用荷重として開口断面の解析を行う。

図-13に開口断面における実験値と算出値の関係を示す。なお、開口側の側圧は開口がないときの等分布荷重

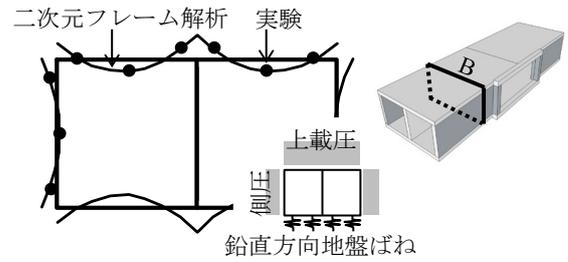


図-12 一般断面における実験値と算出値の関係

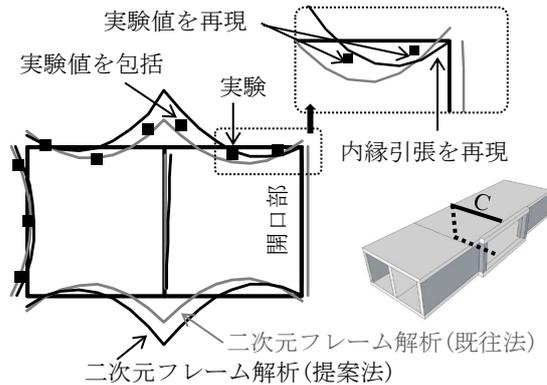


図-13 開口断面における実験値と算出値の関係

を集中荷重に換算して、上下床版に作用させた。剛性低減率について、提案法を用いて表-3の条件下で、式(4)~(6)により算出した値は0.003であり、既往法を用いて式(1)で算出した値は0.667である。算出値は、上床版と側壁の接続部で生じる内縁側引張の曲げモーメントの発生を再現していることが分かる。また、開口部付近の発生曲げモーメント M_c をよく再現しており、中柱側の隅角部では、実験値を包括していることが分かる。

以上より、土槽載荷実験のシミュレーション解析を通じて、提案した側壁開口部のモデル化手法の適用性を示すことができた。

4. 結論

本研究では、開削トンネルの大規模な側壁開口部のモデル化手法について検討して、以下の知見を得た。

- ・小規模な開口で用いられた実績がある開口部のモデル化手法は、開口幅が大きいときに発生する曲げモーメントの増加を追従できないことを確認した。
- ・三次元的な挙動に起因する曲げモーメントの増加を再現できる開口部のモデル化手法を構築した。これにより、二次元フレーム解析で、大規模な開口時の挙動を評価できるようになった。
- ・土槽載荷実験を行い、開口部の付近で三次元的な挙動が生じていることを確認した。

・土槽実験結果のシミュレーション解析を行い、提案したモデル化手法の適用性を示した。

作用荷重のモデル化手法について、亀の子荷重と等分布荷重の検討、側壁開口部に設置する補強部材について、その設計は、今後の課題としていきたい。

なお、本研究の一部は、平成 23, 24 年度国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて行われたものである。

謝辞：土槽載荷実験を実施するにあたって、株式会社 TESS の松本吉雄氏には多大なるご協力をいただいた。ここに深謝の意を表する。

参考文献

1) 鎌田雅己, 奥丈朗, 杉山俊彦, 田原幸夫, 鈴木勇, 蓮田常雄：東京駅丸の内駅舎保存・復原, SED, Vol.29, pp.150-155, 2007.

- 2) 鈴木章悦, 藤沼愛, 西川祐：東京メトロ有楽町線・副都心線 小竹向原～千川駅間連絡線設置計画, 地下空間シンポジウム論文・報告集, Vol.16, pp.73-80, 2011.
- 3) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（構造物編）開削トンネル, 2001.
- 4) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（構造物編）コンクリート構造物, 2004.
- 5) 松下恵梨, 室谷耕輔, 坂田智基, 仲山貴司, 牛田貴士, 津野究：3次元シェル要素解析による開削トンネル側壁開口時の挙動に対する一考察（その1）, 第67回土木学会年次学術講演会, III-087, pp.173-174, 2012.
- 6) 野城一栄, 小島芳之, 宮林秀次, 西藤潤, 朝倉俊弘, 竹村次朗：地質不良区間における新設山岳トンネル用地震対策工の適用性, 土木学会論文集 C, Vol.65, No.4, pp.1062-1080, 2009

(2013.9.2 受付)

A STUDY OF MODELLING FOR OPENING AT SIDE WALLS OF CUT AND COVER TUNNELS

Takashi USHIDA, Takashi NAKAYAMA, Kiwamu TSUNO, Shinji YAKITA

Recently, the renewal of underground station using the cut-and-cover method has been increasing in urban area. In addition the opening span at side walls is larger than before, then it has a potential impact on the sectional force distribution of established tunnel. In this study, opening at side walls is modeled in the case of large opening span. This case is considered by the new model focusing on the displacement at the center of opening at side walls. More over, the characteristic of sectional force at opening is found by the loading test. The result of two dimensional frame analysis using the proposed model approximately coincides with the test result, indicating that yhe proposed model is capable.