既設開削トンネル側壁の開口に関する 構造解析手法の検討

仲山 貴司¹・津野 究²・牛田 貴士³・焼田 真司⁴・室谷 耕輔⁵

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: nakayama@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)

E-mail: tsuno@rtri.or.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: ushida@rtri.or.jp

⁴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: yakita@rtri.or.jp

⁵正会員 中央復建コンサルタンツ株式会社 (〒102-0083 東京都千代田区麹町2-10-13)

E-mail: muroya_k@cfk.co.jp

既設の開削トンネルの側壁に開口を設ける場合を対象に、三次元FEMを用いた検討を行った。まず、開口が無い場合について三次元FEMと二次元フレーム解析による従来の設計計算との比較を行い、三次元FEMが設計計算と整合していることを確認した。つぎに、側壁に開口を設けた場合を対象に三次元FEMによる解析を行い、開口を設けることによる三次元的な応力の変化や開口の幅が及ぼす影響について把握するとともに、開口補強梁を設けた場合の効果を把握した。最後には、実務の設計計算における簡便な検討手法を提案するため、三次元FEMの解析結果を表現できる二次元フレーム解析や二方向スラブの理論を用いた方法を構築した。

Key Words : cut-and-cover tunnel, opening, 3D FEM, frame analysis, reinforcement

1. はじめに

近年、鉄道地下駅のリニューアルや出入口の増設、線路増設などによって、既設の開削トンネルの側壁の一部を撤去して開口を設ける事例が増えている^{1)~5)}。この場合、側壁の一部が撤去されることより、開口部分がこれまで担っていた断面力が開口周辺の部材に移行して断面力が変化することが想定されることから、設計ではこの再配分される断面力増加を正確に把握することが重要となる。ここで、開口に伴う断面力の変化によって構造安全性が確保できない場合は、例えば、開口部に柱を設けたり、開口部分の外周に補強のための梁を敷設するなどの対策が行われる。これまで、既設の開削トンネルの側壁の開口に対する構造安全性の検討は、一般的な開削トンネルの設計法と同様に、二次元平面ひずみを仮定し、二次元フレーム解析を用いて行われてきた。ここで、開口は線路方向に限定した範囲で設けられることから、二次元フレーム解析による構造計算を行うためには、開口

する部材の剛性を低下させるとともに開口の上端と下端に相当する箇所ピンを設けるなど、開口部分の影響を解析モデルの工夫で考慮する手法が取られてきた。しかし、側壁の一部を撤去して開口を設けた場合、応力やひずみの変化は三次元的な分布を示すと想定されるが、現在の手法では、これが十分考慮されていないのが現状である。

実施工において開削トンネルの側壁を開口することによる三次元的な応力やひずみの変化を計測で捉えることは困難な面もあり、このような三次元的な挙動を把握するためには、三次元FEMによる手法が有効であると考えられる。これに対して、大規模な開口を設ける現場を対象に、三次元FEMにより検討した例が^{6,7)}がある。これらの例では、実現象と整合が取れ三次元FEMの有用性が確認できるが、開口幅の違いによる影響や補強のために開口部外周に設けられる梁の影響については、十分な知見が蓄積されていないのが現状である。この他、開削トンネルを対象とした三次元FEMを用いた検討例としては、

中柱の挙動について検討した例⁹⁾や、特殊な構造の開削トンネルの構造安全性を検討した例¹⁰⁾がある。これらの検討では、三次元解析を行うことにより、二次元解析では得られない知見が得られているが、トンネル縦断方向のモデル化の範囲が限定されている。また、開削トンネルを対象とした三次元FEMについては、温度応力解析により温度ひび割れの影響について検討した事例¹¹⁾もあるが、二次元フレーム解析のように確立した手法に至っていないと考えられる。

以上を踏まえて、本研究では、既設の開削トンネルの側壁に開口を設ける場合について、三次元FEMによる検討を行った。まず、標準的な鉄道開削トンネルに設計土水圧を作用させた場合について三次元FEMによる解析を行い、二次元フレーム解析による設計計算の結果と比較することにより、三次元FEMによる方法と既往の方法との整合性について確認した。つぎに、側壁に開口を設けた場合を対象に三次元FEMによる解析を行い、開口を設けることによる三次元的な応力の変化や開口の幅が及ぼす影響について把握した。同時に、補強のために開口上部に梁を設けた場合の効果についても検討した。一方、三次元FEMによる解析はメッシュの生成が煩雑であり、かつ多大な解析時間を要することから、実務においてはより簡便な検討手法が望まれる。そこで、三次元FEMの解析結果を表現できる二次元フレーム解析や二方向スラブの理論を用いた方法を構築した。

2. 三次元解析手法に関する検討

(1) 解析対象

図-1に示すような2000年代に建設された鉄道駅の開削トンネルを対象として解析を行った。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、コンコースに相当する上層階は鉄筋コンクリート柱による中柱構造であり、ホーム階に相当する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。土被りは3.4mであり、構築はN値8程度の砂質土およびN値4程度の粘性土地盤に位置している。上床版、中床版、下床版、側壁（上層階、下層階）、鉄筋コンクリート柱および鋼管柱の物性を表-1に示す。また、地盤物性値を表-2に示す。

作用荷重については、固定死荷重（自重）、鉛直土圧、水平土圧、水圧・揚圧力および地表面上の変動荷重による土圧を考慮し、荷重係数を1.0として既存の設計方法¹²⁾にしたがって図-2のように作用させた。側壁については、砂質土では水平土圧と水圧を分離して計算し、粘性土では水平土圧と水圧を分離せずに計算した¹²⁾。なお、変動荷重による土圧の算定にあたっては、路面活荷重として

T-25荷重を用いた。

(2) 解析概要

a) 三次元FEM解析

解析モデルを図-3に示す。上床版、下床版、中床版お

図-1 解析対象

表-1 部材の諸元および物性値

	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

※地下水位以下は、水中単位体積重量を用いる。

図-2 作用荷重

図-3 三次元解析で用いたモデル

よび縦桁等の構造部材をシェル要素，中柱の鉄筋コンクリート柱および鋼管柱は梁要素でモデル化した．トンネル延長方向に105mの範囲をモデル化し，モデルの総節点数は25,842，総要素数は25,248である．本研究では開口幅を変えて検討を行うことから，中柱間隔の3倍の範囲で端部の影響を受けないように解析範囲を広域に設定した．下床版および中床版と鋼管柱は，ピンで結合した．また，構築モデルの両端の境界条件は自由端とした．

部材間の接合部については，一般的な二次元フレーム解析による開削トンネルの設計では，断面二次モーメントが無限大となるような剛域を設ける^{13), 14)}が，三次元解析で剛域を設けて曲げ剛性を無限大にすると，縦断方向の変形を拘束することが懸念される．そこで，ハンチ部においては，ハンチ端までのシェル要素に，中柱位置では縦梁の高さ，側壁位置ではハンチを含む側壁前面の床版厚さを部材厚として入力した．なお，施工過程を考慮した場合，仮設部材のつり合い反力や支保反力も考慮する必要があるが，これらの条件は現場によって異なり，多岐に亘ることから，今回は施工過程を考慮せずに解析を行い，側壁開口による影響を把握した．

地盤ばねについては，既存の設計方法¹²⁾に準拠して，下床版下面の節点に鉛直方向とせん断方向のばねを設置した．ここで，地盤ばねは式(1)および式(2)で求めた地盤反力係数に有効面積を乗じて算出したが，有効面積は図-4のように当該節点を含むシェル要素（4つ）の面積の1/4ずつを総和して設定している．

$$K_v = f_{rk} \left(1.7 \alpha E_0 B_v^{-3/4} \right) \quad (1)$$

図-4 地盤ばね算出時の有効面積

図-5 二次元フレーム解析で用いたモデル

ただし，

K_v : 鉛直方向地盤反力係数

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

$$K_s = \lambda K_v \quad (2)$$

ただし，

K_s : せん断方向地盤反力係数

λ : 換算係数

ここで，既存の設計方法¹²⁾にしたがって，補正係数 α を永久荷重に対しては1.0とし，換算係数 λ を1/3と設定した．また，地盤の変形係数 E_0 は，下床位置のN値4の粘性土(2)について，三軸圧縮試験をもとに設定された設計用値 $E_0=11,200\text{kN/m}^2$ を用いている．

b) 二次元フレーム解析

二次元フレーム解析で用いたモデルを図-5に示す．

ここでは，上床版，下床版，中床版および縦桁等の構造部材を梁でモデル化した．中柱の剛性は，既存の設計方法にしたがって設定した¹²⁾．モデルの節点数は146である．

地盤ばねは，三次元FEM解析と同様に設定した．また，部材間の接合部については，既存の設計方法にしたがって，図-6のように断面二次モーメントが無限大となるような剛域を設けた^{13), 14)}．

図-6 剛域の範囲

(3) 解析結果

三次元FEM解析および二次元フレーム解析で得られたモーメント図およびせん断力図を比較して図-7に示す。ここで、三次元FEM解析の断面力は、上床版中柱スパン中央位置（図-8参照）とこれに隣接する中柱位置の平均値で評価している。これより、曲げモーメントおよびせん断力ともに、分布形状がおおむね一致していることが確認できる。つぎに、三次元FEM解析より得られた上床版の横断方向の曲げモーメントの分布を図-8に示す。ここでは、モデル中央を含んだ30mの範囲を図示している。これより、中柱位置に上側が引張となるモーメントが集中していることが確認できるものの、全体的に中柱位置および側壁位置で上側が引張に、スパン中央で下側が引張になるような分布となっており、二次元平面ひずみ条件に近いモーメント分布となっていることが確認できる。なお、図の中央部と端部で中柱近傍のモーメント分布が異なっているが、要素サイズの影響によるものである。

つぎに、図-9に示す位置について、三次元FEM解析および二次元フレーム解析で得られた曲げモーメントを比較して図-10に示す。ここで、位置1, 3, 4, 6, 7, 9, 11, 12, 14, 15, 17, 18, 20および22は、二次元フレーム解析で設定した剛域の端部に位置する。また、位置2, 5, 8, 10, 13, 16, 19および22は、部材のスパン中央に位置し、横断方向曲げモーメントが最大となる節点とした。下床版のハンチ端部（位置14, 15）では、二次元解析より得られたモーメントが三次元FEM解析の1.42倍となっているが、他の位置については0.83倍～1.12倍程度の差であり、剛域の設定方法の影響があることを考慮すると、おおむね対応した結果となっている。

以上のように、側壁に開口を設けない場合については、三次元FEM解析により得られた断面力は、一般的な設計で用いられている二次元フレーム解析の結果と整合が取れていることが確認できた。

(a) 曲げモーメント

(b) せん断力

図-7 横断方向断面力図

図-8 横断方向曲げモーメントのコンター図 (上床版)

図-9 曲げモーメントの比較位置

図-10 横断方向曲げモーメントの比較

表-3 検討ケース (開口幅)

	開口高さ L_y (m)	開口幅 L_x (m)	開口幅と高さの比 L_x/L_y
Case 1	3.800	15.2000	4.00
Case 2		7.600	2.00
Case 3		3.800	1.00
Case 4		3.167	0.83
Case 5		2.533	0.67
Case 6		1.900	0.50

図-11 開口の諸元

3. 側壁開口による影響検討

(1) 開口幅の影響

a) 検討概要

開削トンネルの側壁を開口することによる影響について、2.のモデルを用いて三次元FEMによる検討を行った。ここで、図-1のようにトンネル上層階に幅の異なる開口を設けた。解析では、開口がないモデルに荷重を作用させた後、開口部分の要素を削除することで、開口を表現している。また、開口により土圧が周辺に再配分されることも考えられるが、現象が複雑であることから、これを考慮せずに解析を行った。解析ケースを表-3に示す。なお、開口幅 L_x は、図-11のように定義している。開口幅は開口高さの0.5倍～4倍であり、Case1およびCase2については、中柱の間隔7.5mより大きい開口幅を設定している。

(a) 曲げモーメント

(b) せん断力

図-12 開口幅を変えた場合の横断方向断面力図の比較

図-13 開口の有無によるモーメントの比較

b) 解析結果

開口幅を変えた三次元FEM解析により得られた横断方向のモーメント図およびせん断力図を図-12に示す。ここで、上床版の側壁開口を設けた側のスパン中央および中柱位置で曲げモーメントの差異がみられる。つぎに、開口の有無によるモーメントの比較を図-13に示す。これより、図中の(1)～(5)で曲げモーメントが1.25倍以上に増加していた。そこで、上床版の中柱位置 (剛域端部) に相当する図-9の位置4およびスパン中央に相当する位置5について、開口幅とモーメントの関係を図-14のように整理した。これより、開口幅が大きくなるほど、上床版中柱位置 (剛域端部、部材位置4) では上側引張モーメントが、スパン中央付近 (部材位置5) では下側引張

モーメントが増加している傾向が確認できる。

つぎに、上床版の横断方向の曲げモーメントの分布を図-15に示す。ここでは、モデル中央を含んだ30mの範囲を図示している。側壁に開口を設けることにより、開口位置付近の上床版で上側引張モーメントが減少している傾向がみられる。また、上床版スパン中央付近では、下側引張モーメントが増加しており、開口幅が大きくなるほどその範囲が広がっており、開口幅が大きいケースではその範囲が開口位置から概ね45°で分布していることが確認できる。一方、中柱位置の曲げモーメントの分布については、Case2からCase6ではコンター図上では有意な差はみられないが、開口幅が大きいCase1（開口幅15.2m）では、中柱位置で上側引張モーメントの増加がみられる。これらは、開口部における上床版の支持条件が固定から自由に移行することにより、スパン中央付近には下側引張モーメントが、中柱付近では上側引張モーメントが増加したと考えられる。

以上のように、側壁に開口を設けることにより、上床版の支持条件が固定から自由に移行することによって想定される三次元的なモーメントの変化が開口部および上床版のスパン中央付近に見られ、さらに開口幅が中柱間隔より大きい15.2mの場合は中柱付近でも見られることが確認された。

(a) 中柱位置 (部材位置4)

(b) スパン中央 (部材位置5)

図-14 開口幅を変えた場合の曲げモーメントの比較

図-15 開口幅を変えた場合の横断方向曲げモーメントのコンター図の比較 (上床版)

(a) 開口中心位置

(b) 中柱位置

図-16 補強梁の有無による横断方向曲げモーメントの比較

(2) 開口補強梁の効果に関する検討

a) 検討概要

側壁の開口に対して、補強のために開口周囲に設けられる梁（以下「補強梁」と記載する）を設置する場合がある。中柱を設けずに側壁の開口を実施している事例のほとんどが、開口幅が4m以下であることから、(1)の解析ケースのうち、開口幅が3.8mのCase3について、補強梁を設置した場合としない場合の三次元FEM解析を行って、補強梁設置による断面力等への影響について検討した。

補強梁は、外周部に梁要素を配することにより模擬している。補強梁の諸元は、幅0.9m、高さ0.9mのとし、断面二次モーメントは 0.054675m^4 である。

b) 解析結果

図-9の示す部材位置での三次元FEM解析より得られた補強梁を設置した場合と無い場合の曲げモーメントを図-16に示す。図では、開口部の中央を通る輪切り面（開口中心位置）の結果と、中柱位置の結果を示している。これより、開口中心位置では、補強梁を設置することにより、開口した側壁と上床版との接合部付近（位置6および7）に曲げモーメントが生じ、上床版（位置4および5）で曲げモーメントが20kNm程度低減している。また、中柱位置では、開口した側壁と上床版との接合部付近（位置6および7）も含めて、開口を設けた側の上床版全体で曲げモーメントが低減していることが確認できる。

(a) 横断方向曲げモーメント

単位: kN/m²

(b) 縦断方向曲げモーメント

図-17 補強梁の有無による曲げモーメントのコンター図の比較（上床版、開口幅3.8m）

つぎに、上床版の横断方向の曲げモーメントの分布を図-17(a)に示す。これより、補強梁が無いケースについては、上床版中柱スパン中央付近において、下側引張モーメントが増加しており、その範囲は開口位置から概ね45°で分布していることが確認できる。一方、補強梁を設けることにより、スパン中央付近における下側引張モーメントの増加が殆ど確認できない結果となっている。上床版の縦断方向の曲げモーメントの分布を図-17(b)に示す。補強梁が無いケースについては、開口範囲の上床版に下側引張モーメントの増加が確認され、補強梁を設

けることにより、これが低減する傾向が確認できた。

以上のように、開口の影響が小さいケースで検討したため補強の効果が小さかったが、補強梁を設けることにより、開口した側壁と上床版との接合部付近のモーメントの変化を低減することができる可能性があることを確認した。

4. 簡便な方法を用いた側壁開口の影響検討

(1) 二次元フレーム解析を用いた横断方向挙動の検討

a) 検討概要

既設開削トンネルの側壁に部分的に開口を設ける場合、図-18 のように剛性を低下させた仮想梁を開口部に設置したうえで、二次元フレーム解析で横断方向の挙動が検討することが一般的であった。ここで、仮想梁の剛性は、次式で示すことができる。

$$\begin{aligned} EI' &= \alpha EI \\ EA' &= \alpha EA \end{aligned} \quad (3)$$

ただし、

EI : 部材梁の曲げ剛性
 EI' : 低減後の部材梁の曲げ剛性
 EA : 部材梁の軸剛性
 EA' : 低減後の部材梁の軸剛性
 α : 剛性低下率

剛性低下率 α の設定については、設計標準等で明確な方法が示されていないが、例えば、中柱の剛性¹²⁾の設定方法を準用し、中柱の位置や間隔のみを考慮して開口部付近の平均的な剛性を求める方法が取られてきた。

$$\alpha = (L - L_x) / L \quad (4)$$

ただし、

α : 剛性低下率
 L : 開口端外側直近の柱間隔 (図-19)
 L_x : 開口幅

本研究では、式(4)による従来から用いられている方法を方法 A とし、仮想梁の上下端をピン結合にする場合と剛結合にする場合の2通りを検討した。

しかし、側壁に幅の大きい開口を設けた場合、図-20 のように開口スパン中央に大きなたわみが発生する。このとき、方法 A では、これを開口幅で除して平均化しているため、開口部中央のモーメントを過小評価する可能性がある。

図-18 二次元フレーム解析における側壁開口のモデル化

図-19 柱間隔と開口幅の定義

図-20 開口スパン中央のたわみの模式図

図-21 開口部中央のたわみを考慮して仮想梁の剛性を設ける方法（方法B）

そこで、図-21 のように、開口部分の上床版を支える隅角部を両端固定の梁としてモデル化し、開口スパン中央のたわみ量は、両端固定梁中央のたわみ量と側壁の縮み量の合計であると仮定し、これが仮想梁の縮み量と一致する剛性低下率 α を求める方法（方法 B）を提案した。ここで、両端固定梁の断面二次モーメント I は、剛域の寸法とした。本研究で対象とした構造物では、幅 500mm×高さ 500mm となる。ここで、両端固定梁に作用する等分布荷重は、既往の梁スラブ構造物の設計方法に準拠して設定した¹⁴⁾。このようにモデル化すると、

剛性低減率 α を、式(5)~(7)より求めることができる。

$$\delta_1 + \delta_2 = \frac{wL_x^4}{384EI} + \frac{wL_y}{E} \quad (5)$$

$$\delta_3 = \frac{wL_y}{\alpha E} \quad (6)$$

$$\delta_1 + \delta_2 = \delta_3 \quad (7)$$

ただし、

α : 剛性低下率

w : 分布荷重

L_x : 開口幅

L_y : 開口高さ

E : 部材の剛性

I : 上床版を支える縦桁の断面二次モーメント

本研究では、方法 A および方法 B を用いて剛性低下率 α を計算したうえで二次元フレーム解析により曲げモーメントを求め、三次元 FEM 解析の結果と比較した。なお、方法 A および方法 B を用いて計算した剛性低下率 α は、開口幅 1.9m のケースでは、 7.47×10^1 および 5.39×10^1 となり、開口幅 15.2m のケースでは 3.24×10^1 および 2.85×10^4 となる。

b) 検討結果

図-22 に、開口幅 15.2m のケースについて、二次元フレーム解析（方法 A）と三次元 FEM 解析から得られた曲げモーメントを比較して示す。ここで、三次元 FEM 解析の曲げモーメントについては、上床版中柱スパン中央位置（図-8 参照）とこれに隣接する中柱位置の平均値で評価している。図中の(1)~(5)は、三次元 FEM 解析において幅 15.2m の開口を設けることにより、開口が無い場合と比べて 1.25 倍以上曲げモーメントが増加した位置を示している。これより、(1)（部材位置 3）では剛結合、(2)（部材位置 4）ではピン結合、剛結合ともに、三次元 FEM 解析で把握された開口による曲げモーメントの増加を表現できていない。また、ピン結合にした場合、(3)（部材位置 5）、(4)（部材位置 14）および(5)（部材位置 15）でも三次元 FEM 解析と比べて曲げモーメントが過大となっている。さらに、図中の※は、3 次元 FEM 解析で側壁開口による曲げモーメントの増加が見られない位置ではあるが、ピン結合の場合に三次元 FEM 解析との乖離が生じている。以上のように、開口幅が大きい場合、方法 A では側壁開口による上床版の曲げモーメントの増加を表現できていない。また、ピン結合とした場合は全体的に三次元解析との乖離が大きくなることが確認できた。このことから、方法 B では、仮想梁の上下端を剛結合（両端固定）としている。

図-22 横断方向曲げモーメントの比較（開口幅 15.2m, 方法 A）

図-23 横断方向曲げモーメントの比較（開口幅 15.2m, 方法 B）

図-24 開口幅と曲げモーメントの関係（(2), 部材位置 4）

つぎに、図-23 に、開口幅 15.2m のケースについて、二次元フレーム解析（方法 B）と三次元 FEM 解析の結果と比較して示す。方法 B を用いた場合、(1)（部材位置 3）は過大であるものの、(2)（部材位置 4）および(3)（部材位置 5）で三次元 FEM 解析の結果と整合が取れていることが確認でき、側壁開口による上床版の曲げモーメントの増加をある程度表現できている。なお、(4)（部材位置 14）および(5)（部材位置 15）では、三次元 FEM 解析との乖離が生じている。※1 および※2 は、三次元 FEM 解析で側壁開口による曲げモーメントの増加が見られなかった箇所であるが、三次元 FEM 解析の結果と乖離している。

図-24 に、(2) (部材位置 4) において、各手法で得られた開口幅と曲げモーメントの関係を整理して示す。これより、開口幅が大きくなると方法 A では三次元 FEM の結果と乖離するが、方法 B では開口に伴う曲げモーメントの増加が表現できており整合が取れていることが確認できる。図-25 に(3) (部材位置 5) における結果を示すが、開口幅にかかわらず方法 A のピン結合の結果が乖離している結果となっている。

以上の結果から、開口した側壁が直接支持していた上床版の中柱ハンチ部で曲げモーメントが増加することが三次元 FEM 解析により確認されたが、従来から用いられている開口部付近の平均的な剛性を求める方法 (方法 A) ではこれが表現できないことを把握した。一方、開口スパン中央のたわみを考慮した方法を提案することにより、この曲げモーメントの増加がある程度評価できることが確認できた。

側壁開口によって曲げモーメントが増加する上床版については本研究で提案した方法 B を用い、その他の部材については従来の方法を用いて、二つの手法を併用して検討することにより、二次元フレーム解析でも側壁開口の影響をある程度評価できる可能性があることを把握した。

(2) 二方向スラブを仮定した縦断方向挙動の検討

a) 検討概要

(1)では、横断方向の曲げモーメントに着目したが、開口幅が大きくなった場合は開口部近傍の上床版の縦断方向の曲げモーメントが大きくなることも想定される。これに対して、既往の設計法では、図-26 のように開口幅を 1 辺、側壁から中柱までを 1 辺とするような二方向スラブを仮定して、これに上床版に作用する分布荷重を作用させて縦断方向の曲げモーメントを計算する方法が用いられている¹²⁾。そこで、設計事例のある「2 辺単純支持、1 辺固定、1 辺自由」(以下、「1 辺固定」とする)および「3 辺固定、1 辺自由」の支持条件の二方向スラブを仮定して縦断方向の曲げモーメントを計算し、

図-25 開口幅と曲げモーメントの関係 (3), 部材位置 5)

三次元 FEM 解析の結果と比較した。二方向スラブにおける曲げモーメントの算出にあたっては、スラブ周辺の支持状態に応じて薄板理論に基づいて解析する方法や、Grashof-Rankine 法などの近似解法を用いる方法がある¹⁴⁾が、ここでは薄板理論の理論解を用いて計算を行った。

b) 検討結果

側壁開口の端部と開口スパン中央の位置について、二次元スラブを仮定して計算した縦断方向の曲げモーメントと三次元 FEM 解析との結果を比較して図-27 に示す。図より、開口端部では 1 辺固定の方法ではモーメントがゼロ、3 辺固定の方法では三次元解析のほぼ 2 倍の値となる。3 辺固定の方法で乖離した原因は、開口端部を端部固定としているためと考えられる。三次元 FEM 解析と二方向スラブ (3 辺固定) から得られた開口端部の縦断方向の曲げモーメントは図-28 に示すような分布を描くため、3 辺固定の条件で算出した曲げモーメントの 1/2 の値と比較すると、両者がおおむね一致することが確認できた。

つぎに、開口スパン中央については、3 辺固定の方法を用いた場合、開口幅が大きくなるにつれて三次元 FEM 解析の結果と乖離している。一方、開口幅が大きい場合には、1 辺固定の方法で概ね整合が取れていることが確認できる。

以上より、検討対象とした構造物の諸元においては、開口部分が直接支持していた上床版を 2 方向スラブと仮定し、開口部スパン中央は 1 辺固定の方法で、開口端部

図-26 2 方向スラブの支持条件および寸法の定義

は3辺固定の方法の1/2として計算することにより、三次元FEM解析の結果と概ね整合が取れることが確認できた。

5. まとめ

既設の開削トンネルの側壁に開口を設ける場合を対象に、三次元FEMを用いた検討を行った。得られた成果は以下の通りである。

1) 側壁に開口を設けない場合については、三次元FEM解析により得られた断面力（上床版中柱スパン中央位置とこれに隣接する中柱位置の平均値）は、一般的な

(a) 開口端部

(b) 開口スパン中央

図-27 縦断方向の曲げモーメント

図-28 縦断方向の曲げモーメント

設計で用いられている二次元フレーム解析の結果と整合が取れていることが確認できた。

2) 側壁に開口を設けることにより、上床版の支持条件が固定から自由に移行することによって想定される三次元的なモーメントの変化が開口部および上床版のスパン中央付近に見られ、さらに開口幅が中柱間隔より大きい15.2mの場合は中柱付近でも見られることが確認された。

3) 開口幅が3.8mの場合について、補強梁を設けることにより、開口した側壁と上床版との接合部付近のモーメントの変化を低減することができる可能性があることを確認した。

4) 従来から用いられている開口部付近の平均的な剛性を求める方法では、開口幅が大きくなると開口した側壁が直接支持していた上床版の中柱ハンチ部での横断方向の曲げモーメントが増加を表現できないことを把握した。一方、新たに提案した開口スパン中央のたわみを考慮した方法を用いることにより、開口幅が大きい場合も横断方向の曲げモーメントの増加がある程度評価できるようになり、従来の方法と併用することにより、二次元フレーム解析を用いて側壁開口の影響がある程度評価できるようになった。

5) 開口部分が直接支持していた上床版の縦断方向の曲げモーメントは、二方向スラブを仮定し、開口部スパン中央は1辺固定の方法を用いることにより、概ね三次元FEM解析の結果と整合が取れることを確認した。

また、開口端部は、3辺固定の方法の1/2を計算することにより、整合が取れることを確認した。

なお、本研究の一部は、平成23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：本研究を進めるにあたり、新井泰氏、坂田智基氏、松下恵梨氏に多大なるご協力を頂いた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 中島宗博，古舘健一：混雑緩和のための地下駅大規模改良，営団地下鉄東西線東陽町駅，トンネルと地下，第34巻，第4号，pp.37-43, 2003.
- 2) 佐野正生，中村茂之，平山義貴，岩本史生：都営地下鉄・浅草線と大江戸線をつなぐ一汐留連絡線東新橋工区，トンネルと地下，第37巻，第1号，pp.29-39, 2006.
- 3) 柄澤 正芳：羽田空港国際線ターミナル駅建設工事—供用中の鉄道トンネルを拡張し地下新駅を構築，建設の施工企画，第733巻，pp.20-26, 2011.
- 4) 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，第16巻，pp.73-81, 2011.

- 5) 坂口淳一, 梶山雅史, 石田和彦: ホーム増設とコンコース一体により地下駅を大規模改良ー都営地下鉄大江戸線勝どき駅, トンネルと地下, 第 42 巻, 第 12 号, pp.45-51, 2011.
- 6) 三木克彦, 中村茂之, 平山義貴, 岩本史生: 大江戸線と浅草線を結ぶー都営大江戸線汐留連絡線東新橋工区, トンネルと地下, 第 33 巻, 第 11 号, pp.25-35, 2002.
- 7) 鈴木和広, 鈴木幸範, 水上博之: 大開口を有する鉄道地下駅の設計法に関する考察, 第 63 回土木学会年次学術講演会講演概要集 VI, pp.583-584, 2008.
- 8) 新井泰, 野城一栄, 村田修: 三次元解析による開削トンネル中柱の配置間隔に対する検討, 鉄道総研報告, 第 12 巻, 第 9 号, pp.27-32, 1998.
- 9) 西山誠治, 新井泰, 村田修: 三次元解析による開削トンネルの常時および地震時断面力と二次元解析の適用性に関する一考察, トンネル工学研究論文・報告集, 第 9 巻, pp.349-354, 1999.
- 10) 西村高明, 山本努, 松川俊介, 大石敬司, 杜世開, 新井泰: 現場調査結果に基づく三次元非線形 FEM を用いた鉄構框構造の安全性評価に関する研究, 土木学会論文集 F, Vol.65, No.1, pp.38-19, 2009.
- 11) 岩波基, 定藤誠一郎, 五十嵐祐貴: 大規模開削トンネル側壁における温度応力解析の結果評価に関する一考察, 土木学会論文集 F1, Vol.67, No.3, pp.I_117-I_126, 2011.
- 12) 国土交通省: 鉄道構造物等設計標準・同解説, 開削トンネル, 丸善, 2001.
- 13) 渡辺建: 箱形ラーメンの設計, オーム社, 1983.
- 14) 国土交通省: 鉄道構造物等設計標準・同解説, コンクリート構造物, 丸善, 2004.

(2012. 8. 29 受付)

INVESTIGATION OF OPENING AT SIDE WALL OF EXISTENT OPENCUT TUNNEL BASED ON NUMERICAL CALCULATION

Takashi NAKAYAMA, Kiwamu TSUNO, Takashi USHIDA, Shinji YAKITA
and Kosuke MUROYA

This paper investigates the influence of opening at side wall on the members of existent cut-and-cover tunnels by means of 3D FEM. The calculation results obtained by 3D FEM was compared with those by 2D frame analysis under the condition that there is no opening at side wall. The influence of opening was investigated based on 3D FEM. The calculation results revealed the change of sectional forces near the opening and the influence of opening width on the values of sectional force. The applicability of conventional methods with 2D frame analysis and 2-direction slab method was also investigated by comparing with the results of 3D FEM.