

鉄道地下駅の3次元シェル要素解析による 側壁開口時挙動の評価

EVALUATION OF BEHAVIOR OF WALL OPENING OF A RAILWAY OPENCUT TUNNEL BY 3D FEM ANALYSIS

坂田 智基^{1*}・室谷 耕輔^{1*}・仲山 貴司²・西山 和宜²

Tomoki SAKATA^{1*}, Kosuke MUROYA^{1*}, Takashi NAKAYAMA²,
Kazuki NISHIYAMA²

In this study, we examined behavior of opening at the side wall of existent railway opencut tunnel with 3D FEM analysis. At first, in case of non-opening at the side wall, and then, in case of opening at the side wall, examining about 3D behavior, influence of the opening span and existence of reinforcement beam, the change of 3D behavior was evaluated.

As the result, upper-slab behavior of opening at the side wall was revealed that was similar to behavior by which a side wall rigidity was held, in spite of existence of reinforcement beam. Further, it revealed upper-slab behavior of opening at the side wall was similar to 2-directional slab. Therefore, we evaluated upper-slab behavior of opening at the side wall, by the comparison with approximate theory of 2-directional slab.

Key Words : *Underground station, Railway opencut tunnel, 3D FEM analysis, Opening side wall, Reinforcement beam and 2-directional slab*

1. はじめに

近年，鉄道地下駅では混雑緩和や機能向上等を目的とした地下空間拡張の需要があり，既設躯体の一部を開口するなどの部分的な開口・拡幅工事が増加している¹⁾。

例えば，既設開削トンネルの側壁に開口を設置する場合，構造物全体系の荷重バランスが変化し，特に開口部周辺の発生断面力に変化が生じるため，開口による荷重再配分後の挙動を把握することが重要となる。

実務設計では，開口部を補強する梁や柱（開口補強桁）の設置を前提として，一般的な開削トンネルの設計^{2) 3)}と同様に，トンネル横断方向を主断面（主鉄筋方向）とする2次元フレーム解析により検討を行うことが多い。その際，開口部に仮想梁（開口スパンに応じて側壁の剛性低減を考慮した梁）を設置したモデルに対して，その上下端の支持条件をピン結合とするなどによる解析モデル上の工夫を踏まえて構造安全性を確保してきた。

また，側壁開口時の実際の挙動に着目すると，開削ト

ンネルは縦断方向にほぼ一様の線状構造であり，開口部の部分的な剛性低下によりトンネル全体では3次元的な挙動の変化を示すと考えられる。

しかし，実務設計で用いられる2次元フレーム解析では，経験的に構造物の安全性は確保できているものの，開口補強桁と既設躯体の一体的な挙動やトンネル横断方向，縦断方向の3次元的な挙動を十分に評価できていないのが現状である。

以上より，本研究では既設開削トンネルの側壁開口時の挙動について，3次元FEM解析によるシミュレーションにより，開口の有無，開口スパンの大小および開口補強桁の有無による影響について検討する。

また，実務設計では個別に3次元FEM解析を実施することはモデル作成等が煩雑であり，かつ多大な解析時間を要することから，より簡便な評価方法が望まれる。そこで，開口部の上床版に着目して，3次元FEM解析と2方向スラブ理論で算定される設計結果を比較し，その挙動について評価する。

キーワード：地下駅，開削トンネル，3次元シェル要素解析，側壁開口，開口補強桁，2方向スラブ

¹正会員 中央復建コンサルタンツ株式会社 Tokyo Office, Railway Planning and Design Department (E-mail:sakata_t@cfk.co.jp)

²正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所 Structures Technology Division, Foundation & Geotechnical Engineering

2. 3次元FEM解析モデル及び検討ケース

(1) 対象モデル

図-1に解析に用いる構造物モデルを示す。鉄道地下駅を想定した2層2径間の開削トンネルであり、上・下層階にそれぞれRC柱、CFT柱を有する中柱構造である。開口は上層階の側壁部に設置し、開口補強桁の有無を考慮して検討する。土被りは3.4m、支持地盤のN値は4程度の粘性土である。表-1に部材諸元と物性値を示す。

図-2に荷重モデルを示す。作用荷重は荷重係数を1.0とした現行設計基準²⁾での使用限界状態を想定し、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の変動荷重（T-25）を考慮する。

(2) 解析モデル

図-3に3次元FEM解析モデルを示す。解析モデルの延長は境界条件の影響が及ばない105mとし、解析モデル両端の境界条件は鉛直ローラーとする。部材モデルについて、上床版、中床版、下床版および縦桁はシェル要素、柱はビーム要素とする。なお、側壁開口はシェル要素を控除することで考慮する。また、本研究では開口後の挙動の変化を把握することが目的であるため、部材は線形モデルとする。各要素と柱の結合条件について、RC柱は剛結合、CFT柱はピン結合でモデル化する。剛域設定について、3次元FEM解析のシェル要素にそのような剛域設定をすると、トンネル縦断方向の変形を拘束することが懸念されるため、各位置の部材高について、ハンチ部ではハンチ端までのシェル要素の幅、中柱位置では縦桁高、側壁位置ではハンチを含む側壁前面までの厚さとして設定する。

地盤ばねは、現行設計基準¹⁾に基づき、式(1)～(2)により算定した鉛直ばねとせん断ばねを下床版下面に設置する。なお、地盤反力係数算定時の有効面積は、対象となる節点を含む四方のシェル要素の1/4ずつの総和とする。

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

ここに、 K_v ：鉛直方向の地盤反力係数（=2,270kN/m²）

α ：補正係数（=1.0）

E_0 ：地盤の変形係数（=11,200kN/m²）

B_v ：下床版の換算幅（=17.05m）

f_{rk} ：地盤抵抗係数（=1.0）

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

ここに、 K_s ：せん断の地盤反力係数（=760kN/m²）

λ ：換算係数（=1/3）

(3) 検討ケース

表-2に検討ケースを示す。検討ケースは、開口なしのCase0に対して、開口高（H=3.8m）と開口スパンLの比が1/2倍～4倍（1.9m～15.2m）となる6ケースとする。

開口補強桁の諸元は、別途2次元フレーム解析で得られた開口部反力より設計した矩形断面を設定する。

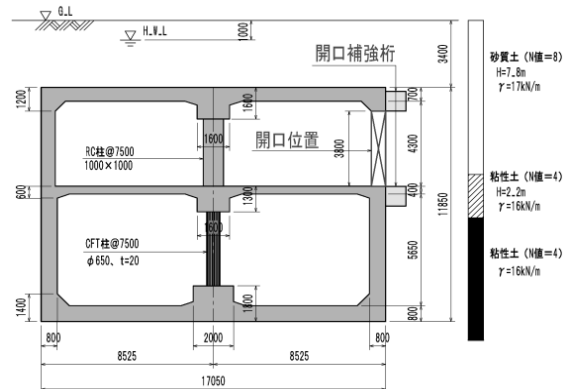


図-1 2層2径間開削トンネルモデル

表-1 部材諸元と物性値

	コンクリート		鉄筋	鋼管柱
	RC部材	CFT部材		
設計基準強度、材質	24N/mm ²	30N/mm ²	SD345	SM490
ヤング係数(kN/mm ²)	25	28	200	200
単位体積重量(kN/m ³)	24.5	24.5	77	77

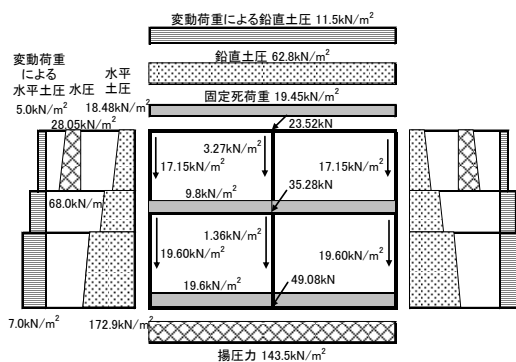


図-2 荷重モデル

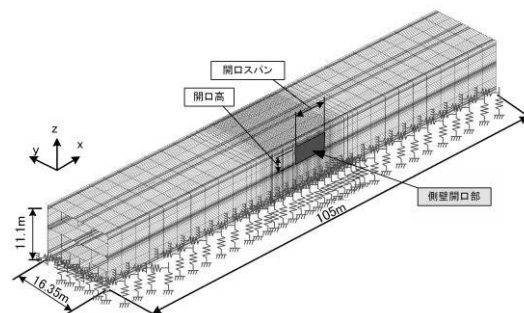


図-3 3次元FEM解析モデル（上図は開口補強桁なし）

表-2 検討ケース

ケース	開口高 h(m)	開口スパン L(m)	L/h	開口補強桁諸元 B×H(m)
Case0	開口なし			
Case1	3.800	1.9	0.5	0.6×0.6
Case2		2.533	0.67	0.7×0.7
Case3		3.167	0.83	0.8×0.8
Case4		3.8	1	0.9×0.9
Case5		7.6	2	1.5×1.5
Case6		15.2	4	2.4×2.4

3. 開口補強桁なしの場合の断面力分布

(1) トンネル全体挙動の把握

図-4に開口補強桁を設置しない場合のトンネル横断方向の曲げモーメント分布図を示す。ここでは、Case0（開口なし）に対して、断面力の変化が大きいCase4～6（ $L=3.8\sim 15.2\text{m}$ ）の断面力図を示す。側壁開口により、上床版の開口位置（図-4の口部）では上側引張の曲げモーメントが減少し、Case5, 6（ $L=7.6\text{m}, 15.2\text{m}$ ）では下側引張に移行するとともにスパン中央位置では下側引張の曲げモーメントが増加する。また、中柱位置の曲げモーメント分布についても、開口スパンに比例して上側引張の曲げモーメントが増加する傾向がみられる。

(2) 開口による影響及び範囲

a) トンネル横断方向

図-5にトンネル横断方向の上床版の曲げモーメント分布コンター図を示す。Case1（ $L=1.9\text{m}$ ）では、比較的開口スパンが小さいため、開口後もトンネルの3次元効果によりCase0（開口なし）と同様の断面力を維持できている。Case2～4（ $L=2.533\sim 3.8\text{m}$ ）では、開口による荷重再配分の影響により上床版スパン中央位置で下側引張が増加するが、中柱位置では大きな変化はみられない。

しかし、Case5, 6（ $L=7.6, 15.2\text{m}$ ）となると、上床版スパン中央位置で下側引張が増加するとともに、中柱位置でも大きな断面力の変化がみられる。また、開口の影響範囲は、開口端から約 45° で分布しており、開口スパンが大きくなるほどその範囲は大きくなる。

b) トンネル縦断方向

図-5にトンネル縦断方向の上床版の曲げモーメント分布コンター図を示す。横断方向と同様に、開口スパンに比例して曲げモーメントの変化が大きくなり、特に中柱スパン中央でその傾向が大きい。ここで、開口部に着目すると、開口スパンが大きくなるにつれて、開口端部を固定端とする両端固定梁の挙動が顕著になる。特に、Case5, 6（ $L=7.6, 15.2\text{m}$ ）ではその傾向が大きく、Case6（ $L=15.2\text{m}$ ）ではその影響範囲が上床版スパン中央付近まで及ぶことがわかる。

4. 開口補強桁ありの場合の断面力分布

(1) トンネル全体挙動の把握

図-6に開口補強桁を設置する場合のトンネル横断方向の曲げモーメント分布図を示す。ここでは、3. (1)の開口補強桁なしの場合と同様のCase4～6（ $L=3.8\sim 15.2\text{m}$ ）の断面力図を示す。

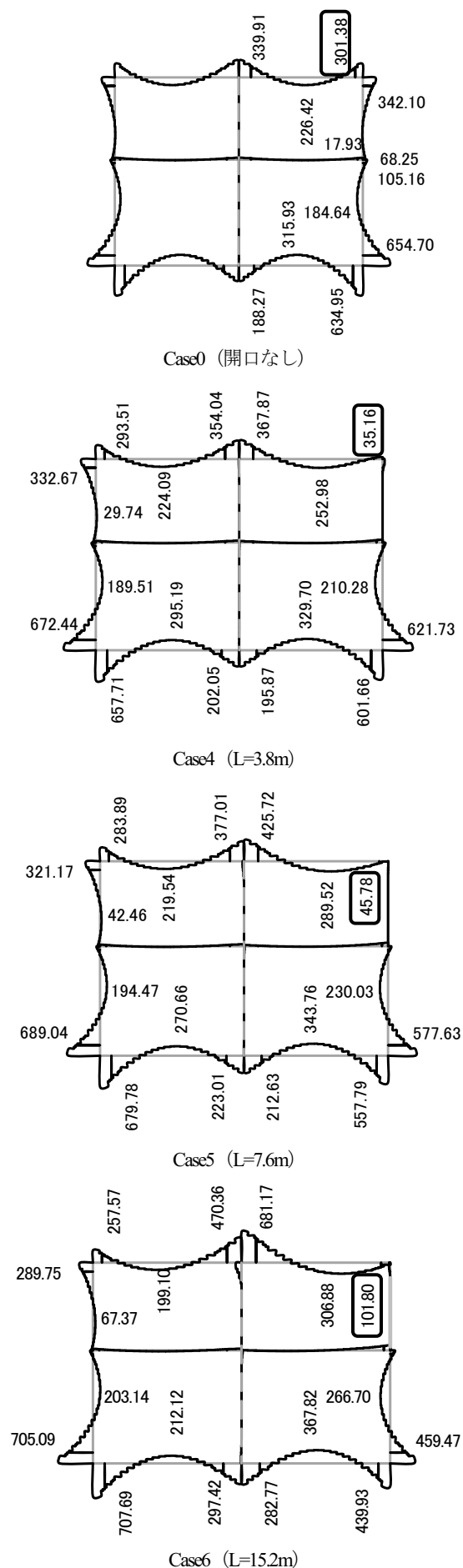
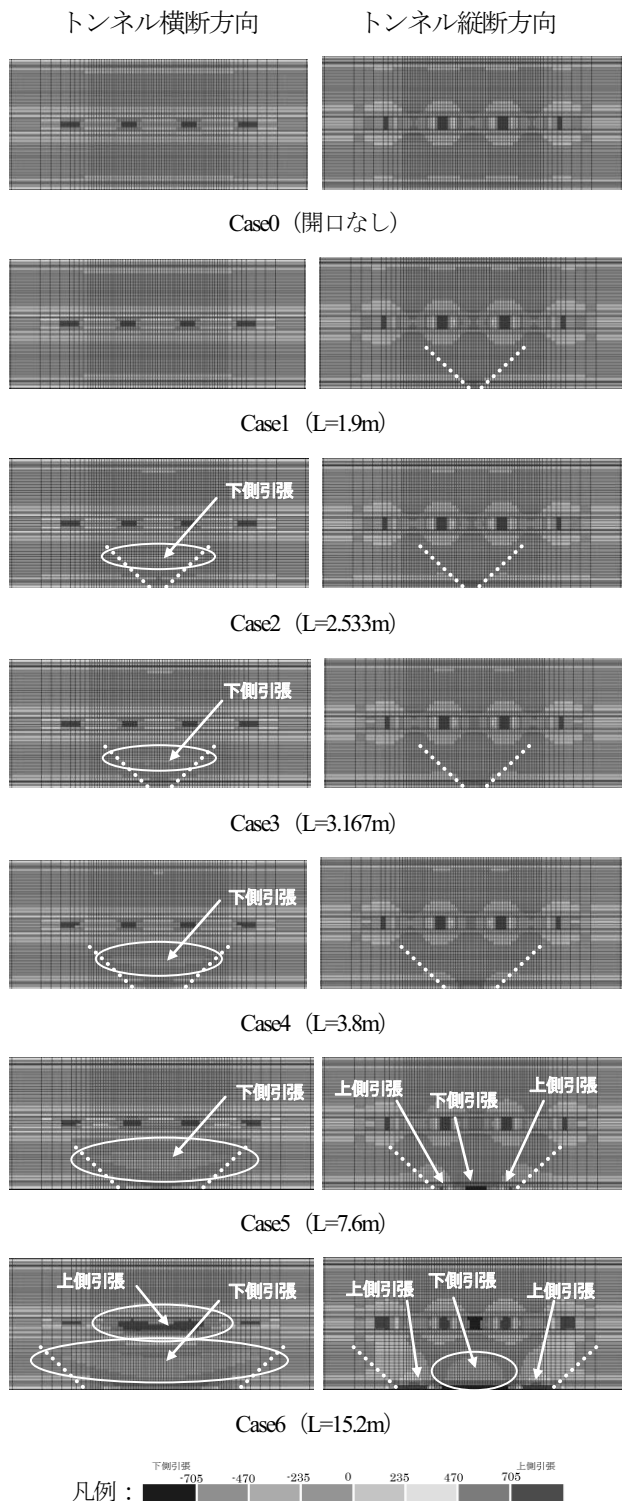


図-4 曲げモーメント分布図（開口補強桁なし）



※図中の破線は開口端から45°の線を示す。

図-5 上床版の曲げモーメント分布図
(開口補強桁なし)

上床版の開口位置(図-6の口部)において、開口補強桁なしの場合には上側引張の曲げモーメントが減少して下側引張(上床版の支点条件が固定から自由)に移行したが、開口補強桁の設置によりCase0(開口なし)と同様の断面力分布を維持できている。

また、各ケースで断面力に差がみられるのは、今回設

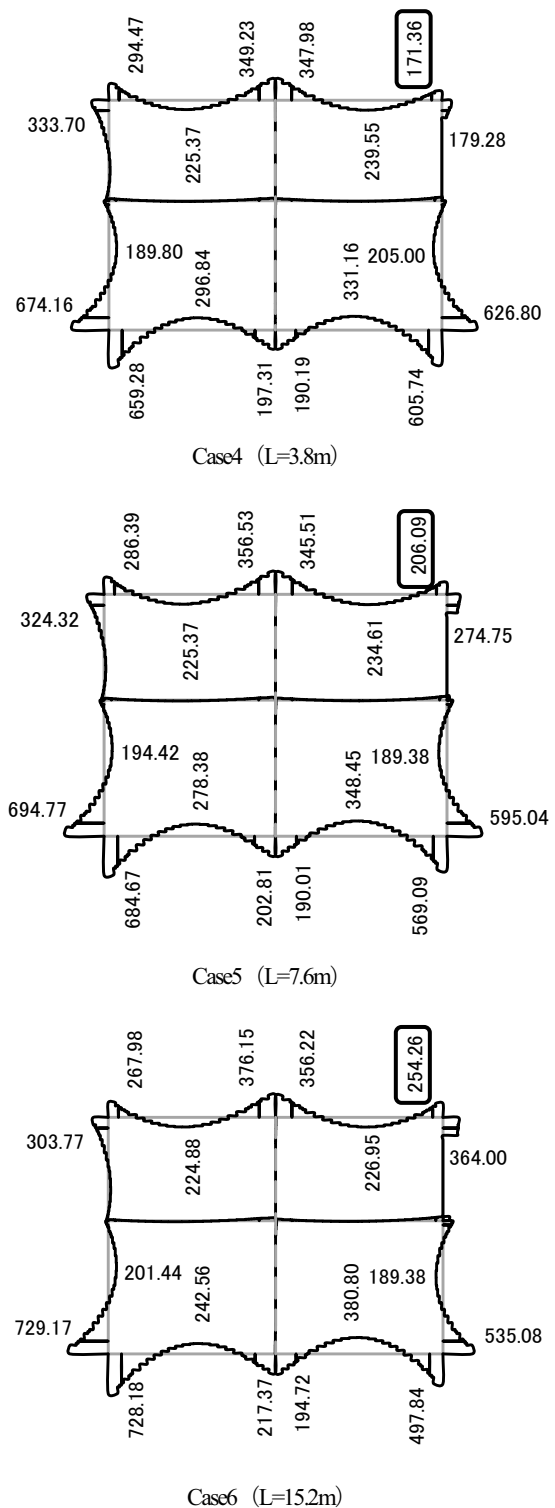


図-6 曲げモーメント分布図(開口補強桁あり)

置した開口補強桁の剛性の違いによるものであり、適切な開口補強桁を設置すれば、開口前と同等の断面力にすることができると考えられる。

(2) 開口による影響及び範囲

a) トンネル横断方向

図-7にトンネル横断方向の上床版の曲げモーメント分布コンター図を示す。Case1 (L=1.9m) では、開口補強

桁を設置することで、開口後もCase0（開口なし）と同様の断面力を維持できている。Case2～5（ $L=2.533\sim 7.6\text{m}$ ）では、開口による荷重再配分の影響により上床版スパン中央位置で下側引張が増加するが、その程度はCase0（開口なし）よりも小さい。ここで、Case6（ $L=15.2\text{m}$ ）で上床版スパン中央位置の下側引張が増加していないのは、今回設置した開口補強桁の剛性により、開口部の剛度を維持できたためと考える。また、全ケースにおいて中柱位置では大きな変化はみられないことから、開口補強桁の設置により荷重再配分の影響を小さくできていることがわかる。また、開口の影響範囲は、開口端から約 45° で分布しており、開口補強桁なしの場合と同様である。以上より、適切な開口補強桁を設置すれば、開口スパンにかかわらずCase0（開口なし）と同程度の断面力を維持できることがわかる（ただし、開口スパンが大きくなると開口補強桁の高い部材剛性や多くの鉄筋量が必要とされる）。

b) トンネル縦断方向

図-7にトンネル縦断方向の上床版の曲げモーメント分布コンター図を示す。開口補強桁を設置することで、開口後もCase0（開口なし）と同様の断面力を維持できている。また、開口部においても断面力の変化が小さく、開口補強桁の設置効果によるものと考えられる。

5. 側壁開口時の上床版の挙動について

前章までに検討した結果について、上床版の挙動（断面力）の変化に着目し、ここで総括する。図-8に上床版の各位置における曲げモーメント値の比較図を示す。

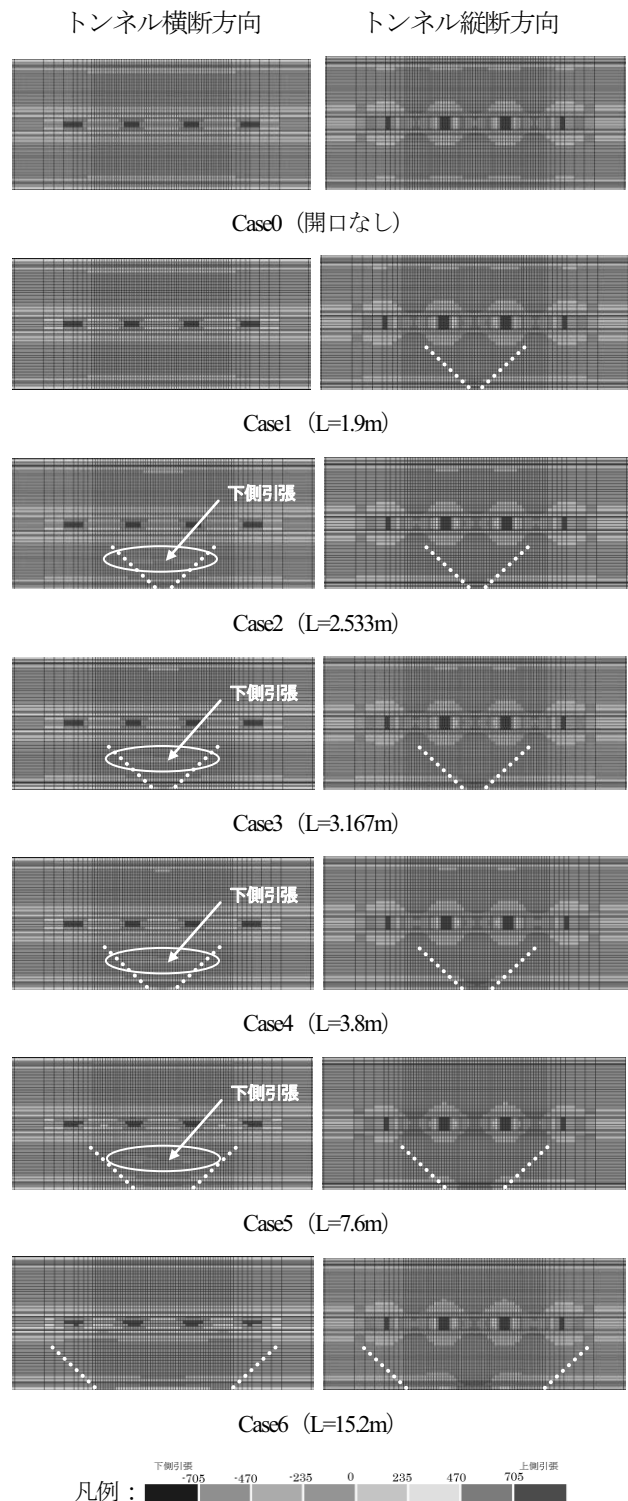
開口補強桁ありの場合、開口スパンによる影響が小さく、開口なしと同様の断面力を維持している。これは、補強桁設置により開口部の剛性が維持され、荷重再配分の程度が小さいためと考える。

また、開口側支承前面について、開口補強桁なしの場合には開口スパン 7.6m 以上（Case5、6）で下側引張となるのに対し、開口補強桁ありの場合ではCase0（開口なし）と同程度の断面力を維持している。この断面力は開口補強桁剛性により影響を受けると考えるが、今回設定した開口補強桁諸元では大きな差はみられなかった。さらに、中柱側支承前面では、開口補強桁設置効果が大きく、開口補強桁なしの場合、曲げモーメントが $23\sim 91\%$ 大きくなる。

6. 2方向スラブ近似解法による上床版の評価

(1) 検討概要

3. より、開口補強桁なしの場合において、側壁開口時の開口側上床版は2方向スラブ的な挙動を示すことが確認できた。本章では、開口部上床版を2方向スラブと仮



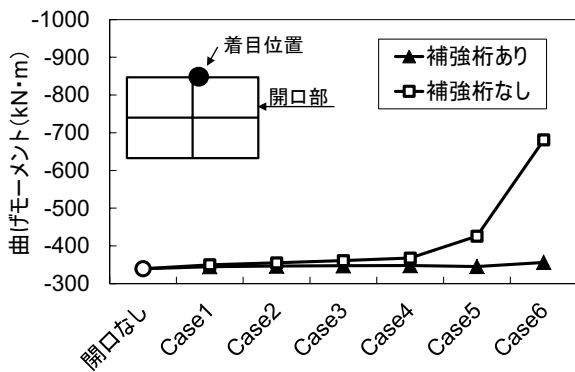
※図中の破線は開口端から 45° の線を示す。

図-7 上床版の曲げモーメント分布図
(開口補強桁あり)

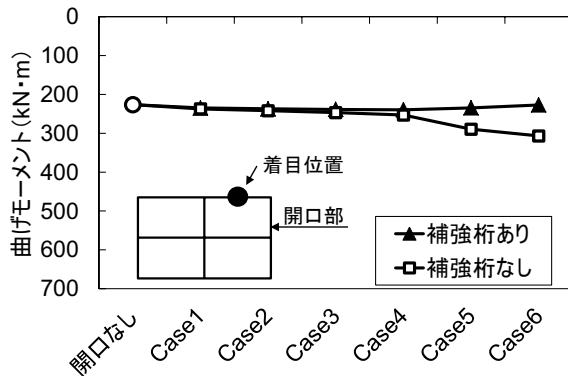
定した近似解法と3次元FEM解析結果の比較をして、その挙動について評価する。

(2) 検討方法

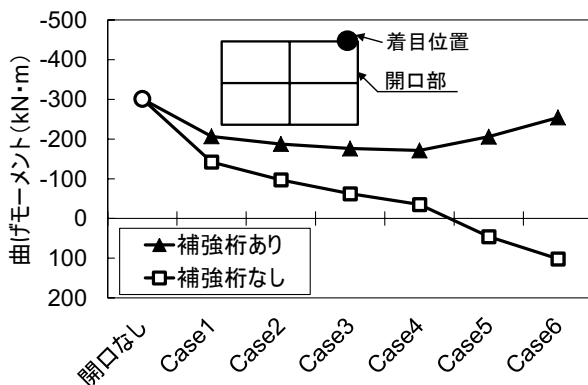
図-9に示すように、開口部上床版の各支持条件を1辺固定/2辺単純支持/1辺自由（以後、1辺固定とする）



a) 中柱側支承前面



b) スパン中央



c) 開口側支承前面

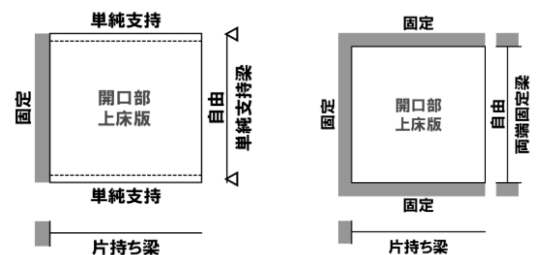
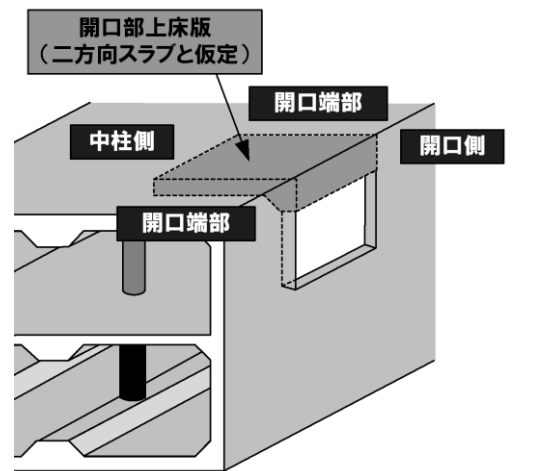
図-8 開口スパンの影響 (上床版)

と3辺固定／1辺自由（以後、3辺固定とする）と仮定した2ケースについて比較する。

近似解析法として、薄板理論式（以後、理論式とする）とGrashof-Rankine法（以後、ランキン式とする）により検討する。なお、作用荷重は上床版に作用する固定死荷重＋鉛直土圧＋地表面変動荷重（=93.5kN/m²）を考慮する。

(3) 検討ケース

表-3に検討ケースを示す。Case1～3（L=1.9～3.167m）は短辺Lxと長辺Lyの比が0.4以下であるため1方向スラブ、Case4～6（L=3.8m～15.2m）は0.4より大きいため2方向スラブとなる。



(a) 1 辺固定

(b) 3 辺固定

図-9 2方向スラブ近似解法の検討モデル

表-3 検討ケース (2方向スラブ近似解法)

ケース	開口スパン L(m)	短辺長 Lx(m)	長辺長 Ly(m)	Lx/Ly	備考
Case1	1.9	1.9	8.525	0.22	一方向スラブ (Lx/Ly ≤ 0.4)
Case2	2.533	2.533		0.30	
Case3	3.167	3.167		0.37	
Case4	3.8	3.8	15.2	0.45	二方向スラブ (Lx/Ly > 0.4)
Case5	7.6	7.6		0.89	
Case6	15.2	8.525		0.56	

(4) 検討結果

a) トンネル縦断方向の比較

図-10に各開口スパンにおける2方向スラブ近似解法による曲げモーメント（トンネル縦断方向）を示す。

開口端部について、3次元FEM解析では開口スパンに比例して曲げモーメントが大きくなる。近似解法の1辺固定ではトンネル縦断方向の支持条件が単純支持（ピン支持）となり、曲げモーメントがゼロとなるためその評価ができないのに対し、3辺固定では開口スパンにかかわらず理論式と3次元FEM解析がよく一致する傾向がみられる。

開口スパン中央部について、3次元FEM解析では開口端部と同様に開口スパンに比例して曲げモーメントが大きくなり、近似解法ではCase6（L=15.2m）を除いて、3辺固定よりも1辺固定の方が3次元FEM解析とよく一致している。ここで、Case6（L=15.2m）では、近似解法よりも3次元FEM解析の方が曲げモーメントが大きいため、過小評価する可能性があると考えられる。

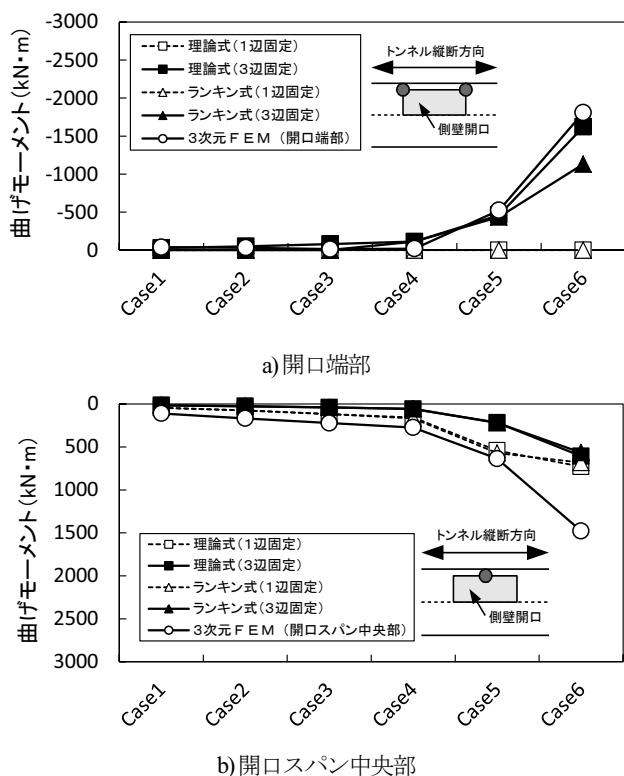


図-10 近似解法による曲げモーメント（トンネル縦断方向）

b) トンネル横断方向の比較

図-11に各開口スパンにおける2方向スラブ近似解法による曲げモーメントを示す。ここでは、開口が位置する横断面のうちトンネル縦断方向の中柱スパン中央位置における支承前面の断面力と比較する。Case1～4 ($L < 7.6\text{m}$) では3次元FEM解析のほうが大きく、近似解法の約2～8倍となっている。また、Case5 ($L = 7.6\text{m}$) では1辺固定に対して約1/2倍、3辺固定に対して約2～4倍となるが、Case6 ($L = 15.2\text{m}$) では3次元FEM解析の方が小さく、近似解法の約1/3～1/2倍となっている。

以上より、横断方向の近似解法による曲げモーメントは、3次元FEM解析結果に対してバラツキが大きくなるため、計算上の仮定条件を適切に設定する必要があると考えられる。

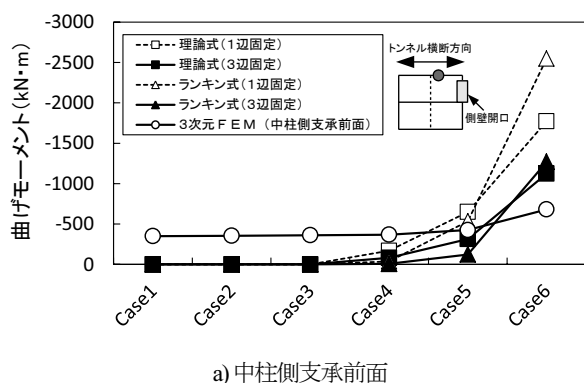


図-11 近似解法による曲げモーメント（トンネル横断方向）

7. まとめ

本研究では既設開削トンネルの側壁開口時の挙動について、3次元FEM解析によるシミュレーションを実施して、開口の有無、開口スパンの大小および開口補強桁の有無による影響について検討した。

さらに、開口時の実務設計において簡便な評価方法の確立が望まれることから、開口部の上床版に着目して、3次元FEM解析と2方向スラブ理論で算定される設計結果を比較し、その挙動について評価した。

以下に、本研究で得られた知見を示す。

- ① 3次元FEM解析で側壁開口の有無による曲げモーメントの変化を比較した結果、側壁開口ありの場合、トンネル横断方向では上床版の支持条件が固定から自由に移行する挙動、トンネル縦断方向では開口端部を固定端とする両端固定梁の挙動を示すことがわかった。
- ② 開口補強桁を設置しない場合、トンネル横断方向では開口スパンが大きくなるにつれて上床版開口側の支持条件が固定から自由に移行するが、上床版がトンネル縦断方向に連続しているため完全には移行せず上床版隅角部に上側引張の曲げモーメントが生じる。一方、トンネル縦断方向では開口スパンに比例して上床版の側壁部の曲げモーメントが増加することがわかった。
- また、実務設計で用いられる2次元フレーム解析では開口部にピン結合した仮想梁を設置することから、3次元FEM解析で得られた結果のように曲げモーメントを評価できないため、モデル化等での工夫が必要である。
- ③ ②に対して、開口補強桁を設置する場合、開口スパンにかかわらず開口側の上床版隅角部に開口なしの場合と同程度の上側引張の曲げモーメントが生じる。これは、開口補強桁剛性により側壁剛性が保持され、剛挙動を示すためであると考えられる。
- ④ さらに、側壁開口時の開口部上床版の最大曲げモーメントに着目すると、トンネル縦断方向では3次元FEM解析と2方向スラブ近似解法の結果が比較的一致する傾向にあるのに対し、トンネル横断方向ではバラツキが大きくなり、スラブの支持条件などの条件設定が大きく影響することがわかった。
- ⑤ 本検討では、側壁開口時の既設躯体の挙動について、開口スパンの影響に着目した検討を行った。設計手法として確立するためには、開口の設置時期や掘削等の施工条件、開口補強桁の設計方法、開口部のモデル化等の評価が課題になると考えられる。

参考文献

- 1) 仲山貴司, 焼田真司:地下駅をリニューアルする, RRR Vol.73 No.1 pp.20～23, 2016.1.
- 2) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 開削トンネル, 2001.
- 3) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物, 2004.