

3次元シェル要素解析による鉄道開削トンネル 開口時挙動に関する一考察

坂田 智基¹・松下 恵梨¹・室谷 耕輔²・仲山 貴司³・牛田 貴士³

¹正会員 中央復建コンサルタンツ(株) 大阪本社鉄道系部門地下鉄G (〒533-0033 大阪市東淀川区東中島4-11-10)

E-mail:sakata_t@cfk.co.jp

²正会員 中央復建コンサルタンツ(株) 東京本社鉄道系部門地下鉄G (〒102-0083 東京都千代田区麹町2-10-13)

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二丁目8-38)

本検討では、鉄道開削トンネルを対象として、側壁開口時の挙動について3次元シェル要素解析(3次元FEM解析)による検討を行った。まず、側壁開口を設置しない場合で、実務設計で用いられている2次元フレーム解析による結果との比較をして、3次元FEM解析の妥当性を確認した。その次に、側壁開口を設置する場合での開口スパンや開口補強桁の有無が挙動に与える影響について検討し、開口による断面力の3次元的变化について評価した。その結果、3次元FEM解析では開口補強桁の有無にかかわらず開口部の側壁剛性が保持される挙動を示すことがわかった。さらに、開口側上床版が2方向スラブ的な挙動を示すことが確認されたため、その挙動に着目して、2方向スラブ近似解法との断面力の比較をしてその挙動について評価した。

Key Words : 3D FEM analysis, Railway opencut tunnel, 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。

例えば、既設開削トンネルの側壁を開口する場合、構造物全体系の荷重バランスが変化し、特に開口部周辺で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。

実務設計においては、開口部周辺を補強する梁や柱(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^{1),2)}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、その上端と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。

さらに、側壁開口時には開口補強桁の設置が前提となることが多いが、開口部の上床版はトンネル横断方向だけでなく、縦断方向の挙動の変化が生じ、2方向スラブ的な挙動が生じると推測され、比較的開口スパンが小さい範囲では開口補強桁がない場合でも構造安全性を確保できる可能性も考えられる。

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解析を用いて開口スパンをパラメータとした検討により評価する。

まずは、開口なしの場合で3次元FEM解析と2次元フレーム解析による設計結果の比較を行い、解析の妥当性について検証し、開口の有無、開口スパンの大きさおよび開口補強桁の有無による影響について比較する。

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。

2. 開削トンネルの3次元FEM解析

(1) 解析概要

一般的な開削トンネルモデルを対象として、3次元FEM解析を行い、実務設計で用いられている2次元フレーム解析の設計結果と比較する。

(2) 構造モデル

図-1に解析に用いる構造物モデルを示す。対象は2層2径間の開削トンネル（鉄道地下駅を想定）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。

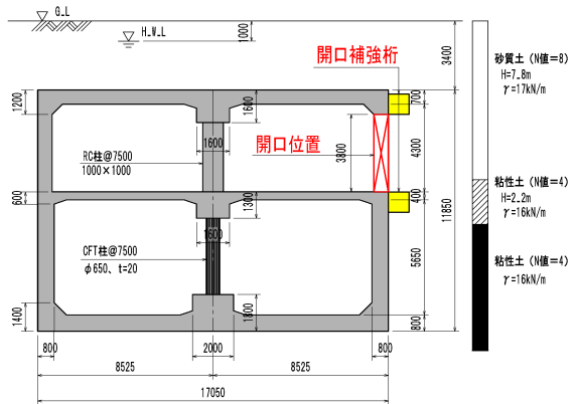


図-1 解析に用いる構造物モデル

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¹⁾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、水压、揚圧力および地表面の変動荷重（T-25）による土圧を考慮する。

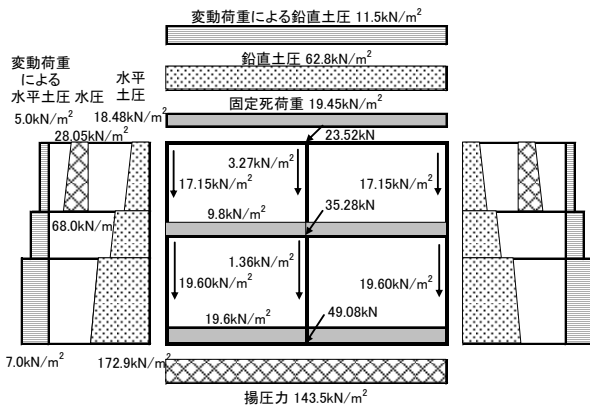


図-2 荷重モデル

(3) 解析モデル

a) 3次元FEM解析

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とする。上床版、中床版、下床版および縦桁はシェル要素、RC柱、CFT柱はビーム要素でモデル化する。なお、側壁開口はシェル要素を控除することで考慮した（開口を開けた状態で荷重を考慮）。また、開口による挙動の変化の把握を目的とすることから、部材は線形モデルとした。各要素と中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。また、解析モデル両端の境界条件は鉛直ローラーとする。剛域設定について、2次元フレーム解析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定するが、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、縦断方向の変形を拘束することが懸念される。そこで、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。

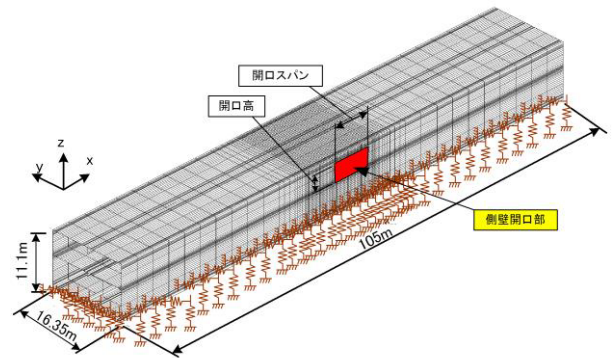


図-3 3次元FEM解析モデル（上図は開口補強桁なし）

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。

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

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）

b) 2次元フレーム解析

図-4に2次元フレーム解析モデルを示す。2次元フレーム解析ではすべての部材をビーム要素でモデル化する。各ビーム要素と中柱の結合条件は3次元FEM解析と同様（RC柱は剛結合、CFT柱はピン結合）とする。

剛域設定について、断面二次モーメントが無限大となるような剛域を設定する。地盤ばねは、3次元FEM解析と同様に現行設計基準¹⁾に基づき算定される鉛直ばねとせん断ばねを下床版下面に設置する。

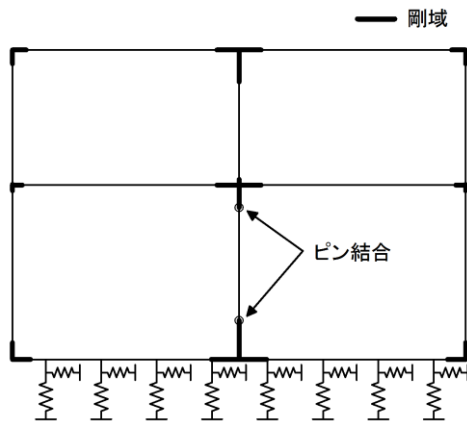


図-4 2次元フレーム解析モデル

(4) 解析結果

図-5に3次元解析結果での上床版の曲げモーメント（横断方向）のコンター図を示す。コンター図より、中柱位置で上側引張、上床版スパン中央位置で下側引張の曲げモーメントが大きくなり、2次元フレーム解析で得られる断面力分布に近い挙動を示すことがわかる。

また、図-6に示す3次元FEM解析と2次元フレーム解析における横断方向の断面力比較図（曲げモーメント図、せん断力図）より、3次元FEM解析では、中柱の有無により断面力に若干の差はみられるが、構造物全体としては2次元フレーム解析と近似する挙動を示す結果となる。

さらに、図-7に示すように各位置での2次元フレーム解析に対する3次元FEM解析の曲げモーメント比率より、全体的には1割程度、比較的大きい箇所（上層階側壁の径間部（図中8, 21）、下層階側壁の支承前面（図中9, 20））で3～4割程度の差はみられるが、断面力の発生傾向は一致することがわかる。ここで、前述の断面力差が大きい箇所は、発生曲げモーメント自体が小さく、比率としては大きな値となるが絶対値としての差は小さい。

以上より、側壁開口を設置しないケースにおいて、3次元FEM解析と2次元フレーム解析の比較により、解析の妥当性を確認できる。

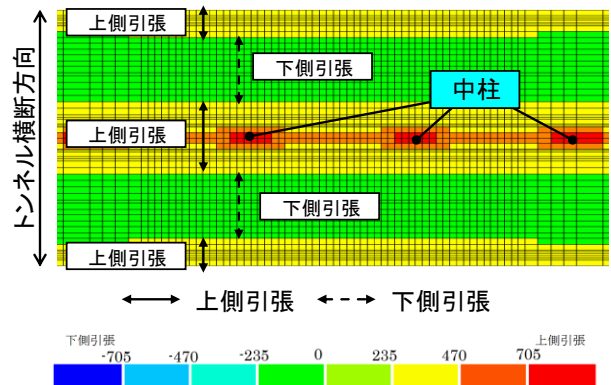
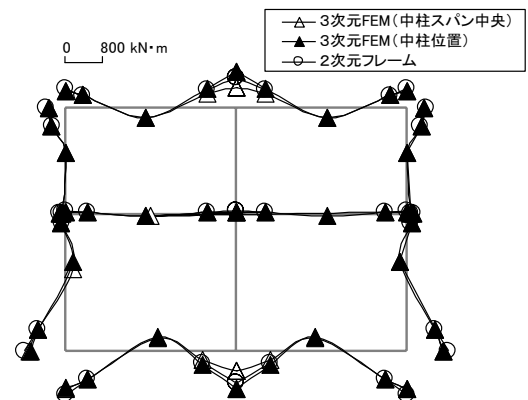
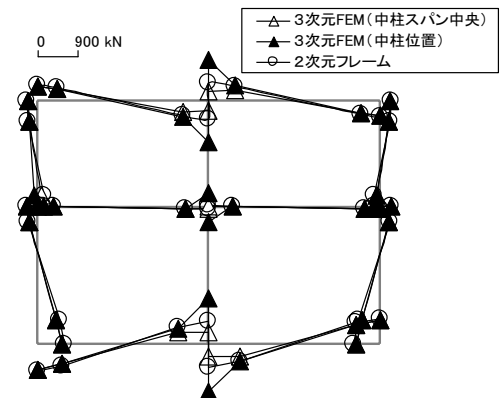


図-5 上床版の曲げモーメント（横断方向）のコンター図（側壁開口なし）



(a) 曲げモーメント



(b) せん断

図-6 横断方向の断面力比較図

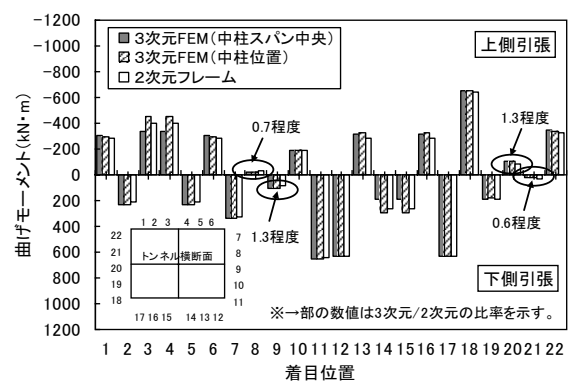


図-7 各位置での曲げモーメント比較

3. 側壁開口時の影響検討（開口補強桁なし）

(1) 検討概要

開削トンネル側壁開口時の挙動について、3次元FEM解析により検討し、2次元フレーム解析結果と比較する。

本章では、開口による既設躯体への影響を把握するため、開口補強桁を設置しないケースについて検討する。

(2) 側壁開口のモデル化

図-8に示すように、側壁開口は上層階の中柱スパン中央位置と開口スパン中心が一致する位置に設置する。

また、図-9に示すように、側壁開口のモデル化について、3次元FEM解析では開口部側壁のシェル要素を削除することにより考慮するのに対し、2次元フレーム解析では開口部側壁の剛性を低減した仮想梁を考慮する。その際、解析上の配慮として、開口部上下端には開口前の作用土圧に相当するつり合い反力を考慮する。なお、仮想梁の剛性は、式(3)により算定する。

$$EI' = \alpha EI \quad (3)$$

ここに、 EI' ：仮想梁の剛性

α ：剛性低減率

EI ：側壁（開口なし）の剛性

剛性低減率は α について、設計基準等に明確な記載はなく、中柱位置やその間隔より開口部の平均的な剛性を設定する方法を用いることが多い。そこで、本検討でも同様に、式(4)により算定した剛性低減率 α を用いる。

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

$$(3L - L_x) / 3L \quad (L \geq L_x)$$

ここに、 α ：剛性低減率

L ：中柱間隔

L_x ：開口スパン

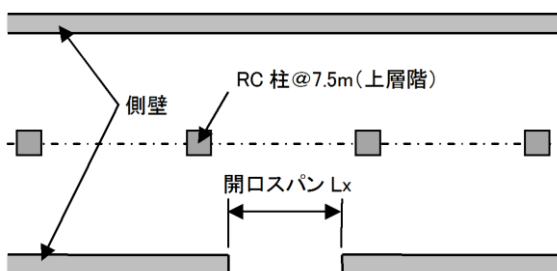


図-8 側壁開口のモデル化

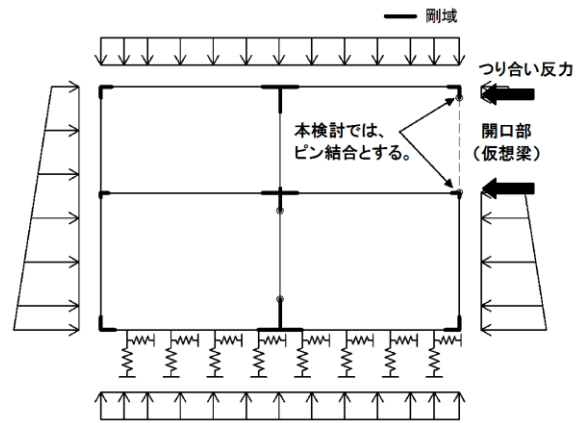


図-9 2次元フレーム解析モデル

(3) 解析ケース

表-2に解析ケース（開口補強桁なし）を示す。解析ケースは、開口高（ $H=3.8\text{m}$ ）に対して、開口スパン L_x が1/6倍～4倍（ $0.633\text{m} \sim 15.2\text{m}$ ）となる8ケースとする。

表-2 解析ケース（開口補強桁なし）

ケース	開口高 $H(\text{m})$	開口スパン $L_x(\text{m})$	L_x/H	
Case1	3.8	0.633	0.17	(1/6)
Case2		1.267	0.33	(1/3)
Case3		1.900	0.50	(1/2)
Case4		2.533	0.67	(2/3)
Case5		3.167	0.83	(5/6)
Case6		3.800	1.00	
Case7		7.600	2.00	
Case8		15.200	4.00	

(4) 解析結果

a) 開口スパンの影響（横断方向）

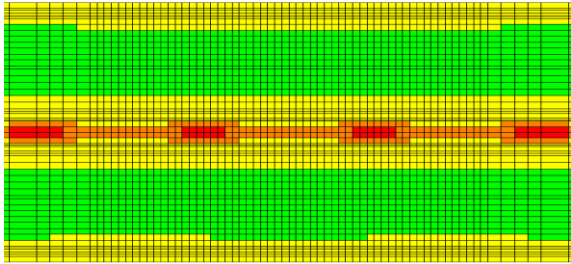
図-10に各開口スパンでの上床版の曲げモーメント（横断方向）のコンター図を示す。

側壁開口により、上床版の開口位置では上側引張の曲げモーメントが減少するとともに、上床版（横断方向）の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傾向がみられる。その平面的な影響範囲は、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。

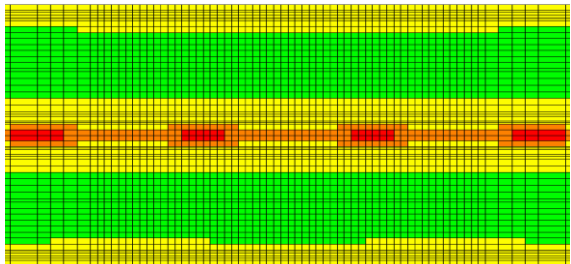
また、中柱位置の曲げモーメント分布について、Case1～6（ $L_x=0.633\text{m} \sim 3.8\text{m}$ ）では開口なしの場合とほとんど分布状況は変わらないが、Case7, 8（ $L_x=7.6\text{m}, 15.2\text{m}$ ）では上側引張の曲げモーメントが増加する。

以上より、側壁開口により開口側の上床版の支持条件が固定から自由に移行するため、そのスパン中央付近には下側引張、中柱付近には上側引張の曲げモーメントの増加が生じたものと考えられ、開口スパンが大きくなるにつれてその傾向が大きくなることわかる。

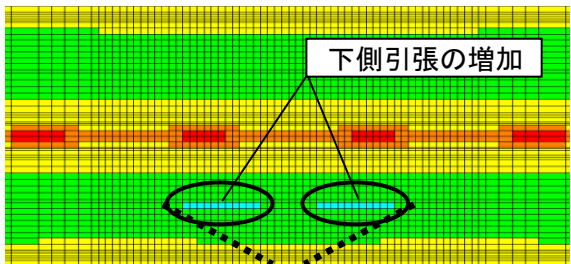
開口なし



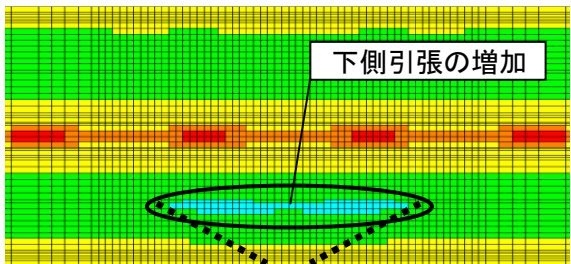
Case1(Lx=0.633m)



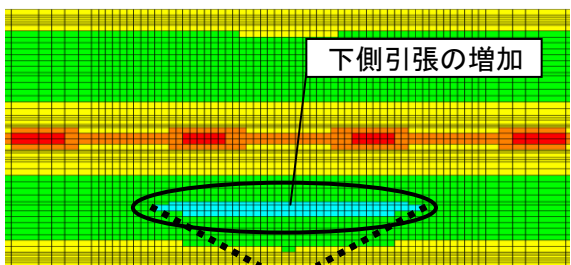
Case2(Lx=1.267m)



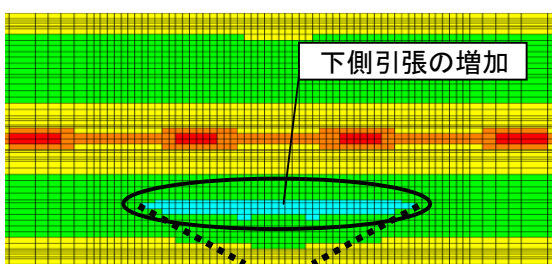
Case3(Lx=1.9m)



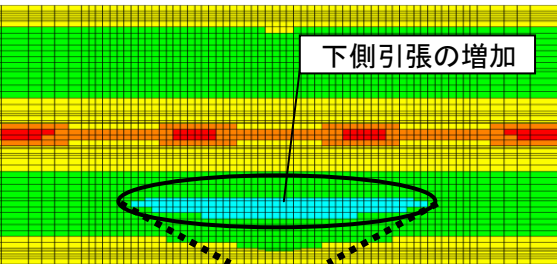
Case4(Lx=2.533m)



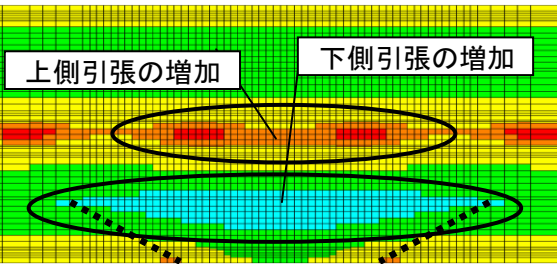
Case5(Lx=3.167m)



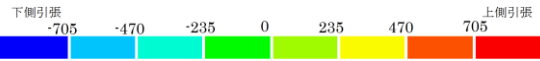
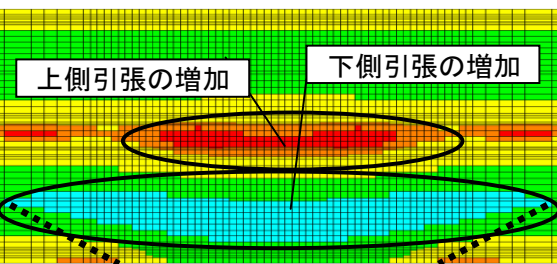
Case6(Lx=3.8m)



Case7(Lx=7.6m)



Case8(Lx=15.2m)

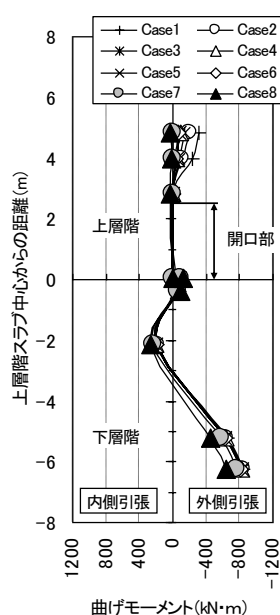
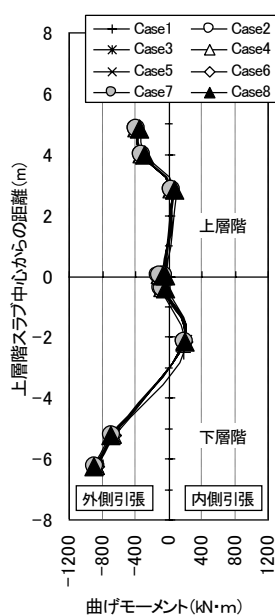
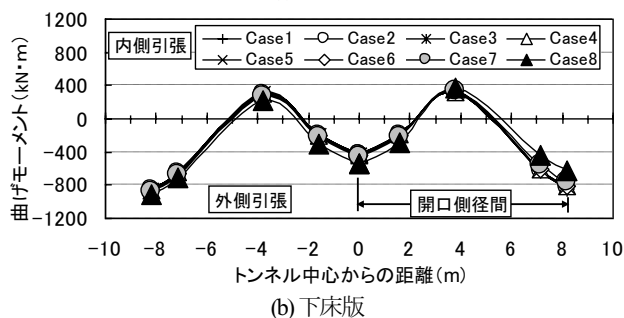
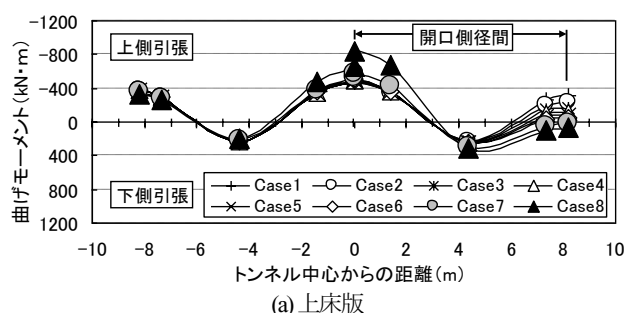


ここに、矢印は開口スパン、破線は開口側上床版断面力の変化が生じる範囲（約45°）を示す。

図-10 上床版の曲げモーメント（横断方向）のコンター図

図-11に各開口スパンにおける横断方向の曲げモーメント分布（中柱スパン中央位置）を示す。開口を設置する場合でも、部分的には差はみられるが、断面力の発生方向の傾向は一致しており、トンネル中心に対して開口を設置しない側（図-11のうち、(a), (b)のトンネル中心からの距離がマイナス値となる部分と(c)）での断面力の差は小さいことがわかる。

一方、開口側（図-11のうち、(a), (b)のトンネル中心からの距離がプラス値となる部分と(d)）に着目すると、上床版と側壁では開口スパンが大きくなるにつれて、曲げモーメントが上側（外側）引張から下側引張（内側）に移行する。下床版では、内側引張の曲げモーメントは減少するが、水平土圧等による発生曲げモーメント自体が小さいことから、外側引張に移行するには至らない。



(c) 側壁（無開口側） (d) 側壁（開口側）
図-11 横断方向の断面力分布（中柱スパン中央位置）

図-12に開口部の上床版隅角部における曲げモーメント比較図を示す。2次元フレーム解析では仮想梁（上端と下端はピン結合）を設置することで側壁部の軸剛性が小さくなり、上床版端部ではほぼ一定値の下側引張の曲げモーメントが生じる結果となる。

3次元FEM解析の中柱スパン中央においては、Case1～6 ($L_x=0.633\text{m}\sim 3.8\text{m}$) で上床版に上側引張の曲げモーメントが生じるのに対し、開口スパンがそれ以上になるCase7, 8 ($L_x=7.6\text{m}, 15.2\text{m}$) では下側引張の曲げモーメントが生じている。曲げモーメントの大きさは、開口スパンに応じて変化する傾向がみられ、Case8 ($L_x=15.2\text{m}$) では、2次元フレーム解析の結果に近づく結果となる。

一方、中柱位置に着目すると、Case1～7 ($L_x=0.633\text{m}\sim 7.6\text{m}$) では上床版に上側引張の曲げモーメントが生じているのに対し、開口スパンがそれ以上となるCase8 ($L_x=15.2\text{m}$) では、下側引張の曲げモーメントが生じている。曲げモーメントの大きさについて、中柱スパン中央では開口スパンに応じて変化するのに対して、Case1～6 ($L_x=0.633\text{m}\sim 3.8\text{m}$) では中柱位置の側壁部に開口が存在しないため、側壁剛性を有することになり曲げモーメントに変化が生じないものと考えられる。しかし、中柱位置の側壁部に開口が存在するCase8 ($L_x=15.2\text{m}$) の曲げモーメントは中柱スパン中央位置とほぼ同じとなる。

以上より、3次元FEM解析では、側壁開口により上床版開口側の支持条件は固定から自由に移行するが、トンネル方向に上床版が連続しているため、完全に自由に移行せず、ある程度の剛性を有することにより、曲げモーメントが生じるものと考えられる。

つまり、ピン結合した仮想梁を設置する2次元フレーム解析では、開口スパンによっては側壁開口時の挙動を過小評価する可能性があり、ピン結合としない支持条件の設定等、モデル化に工夫が必要であると考えられる。

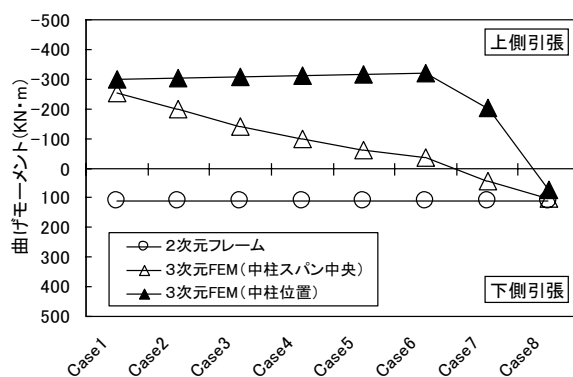
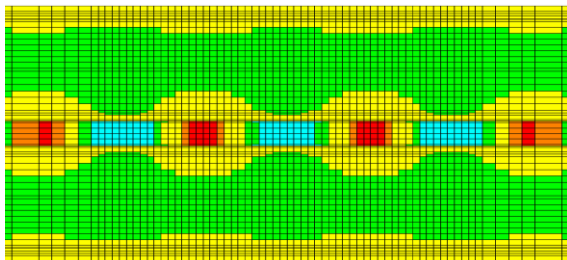


図-12 開口部の上床版隅角部における曲げモーメント比較図

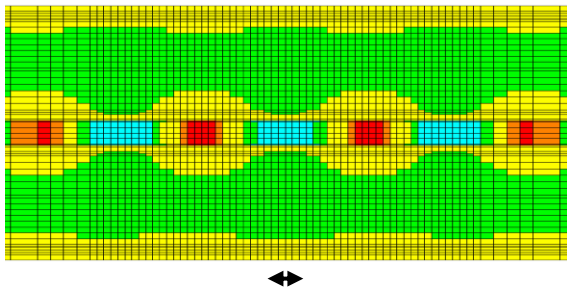
b) 開口スパンの影響（縦断方向）

図-13に上床版の曲げモーメント（縦断方向）のコンター図を示す。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、Case1（ $L_x=0.633\text{m}$ ）ではトンネル方向にほぼ一様分布となっているが、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に変化する。Case7, 8（ $L_x=7.6\text{m}, 15.2\text{m}$ ）ではその傾向が大きく、Case8（ $L_x=15.2\text{m}$ ）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。

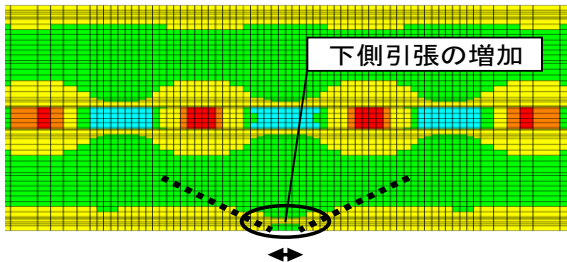
開口なし



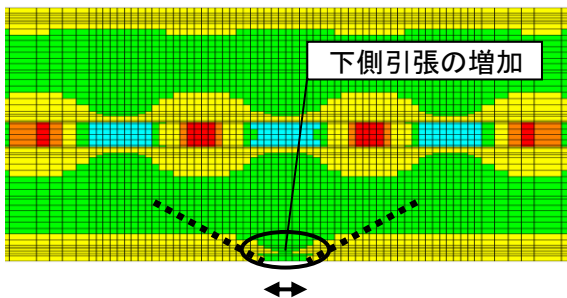
Case1($L_x=0.633\text{m}$)



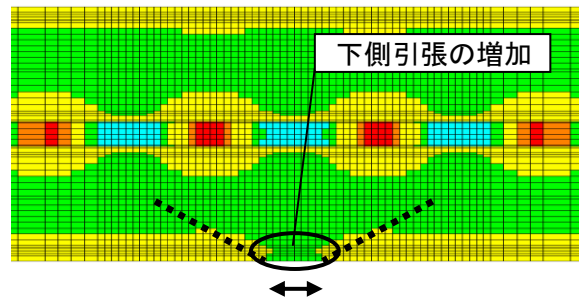
Case2($L_x=1.267\text{m}$)



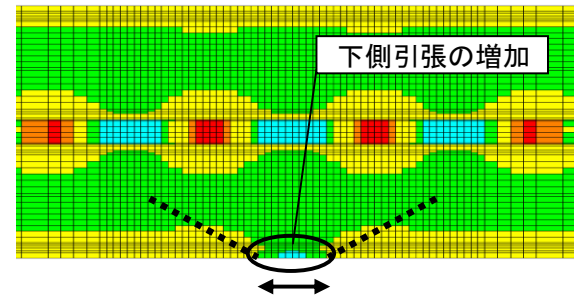
Case3($L_x=1.9\text{m}$)



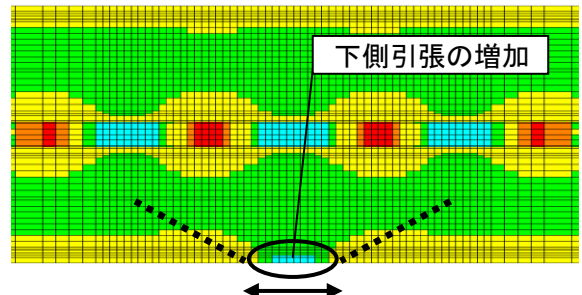
Case4($L_x=2.533\text{m}$)



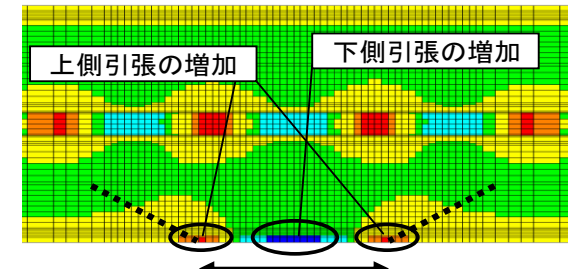
Case5($L_x=3.167\text{m}$)



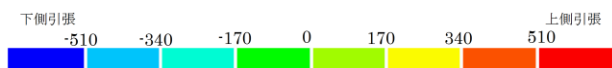
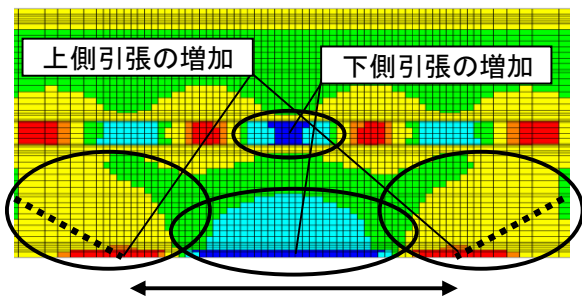
Case6($L_x=3.8\text{m}$)



Case7($L_x=7.6\text{m}$)



Case8($L_x=15.2\text{m}$)

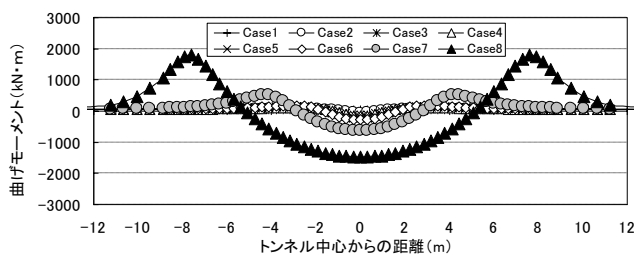


ここに、矢印は開口スパン、破線は開口側上床版断面力の変化が生じる範囲（約 45° ）を示す。

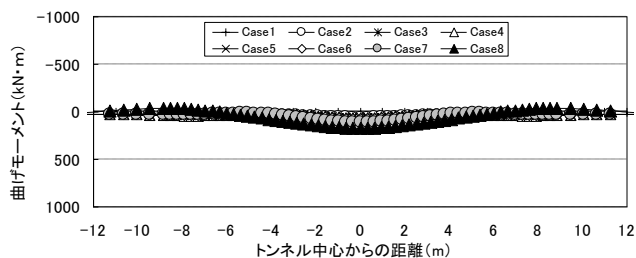
図-13 上床版の曲げモーメント（縦断方向）のコンター図

図-14に各開口スパンにおける縦断方向の曲げモーメント分布を示す。側壁位置 ($y=0\text{m}$) では、開口スパンが大きくなるにしたがい、開口端部で上側引張、開口スパン中央付近で下側引張の曲げモーメントが大きくなり、開口端部を固定端とする両端固定梁のような挙動を示すことがわかる。中柱位置 ($y=8.175\text{m}$) では、開口を設置しない場合でも中柱位置で上側引張、中柱スパン中央付近で下側引張の曲げモーメントが生じている（中柱を支点とする連続梁の挙動）が、開口スパンによる曲げモーメントに対する影響は側壁位置 ($y=0\text{m}$) よりも小さい結果となる。一方、上床版スパン中央位置 ($y=4.1\text{m}$) では開口による断面力の変化はみられるものの、その他の着目位置よりもその変化は小さい結果となる。

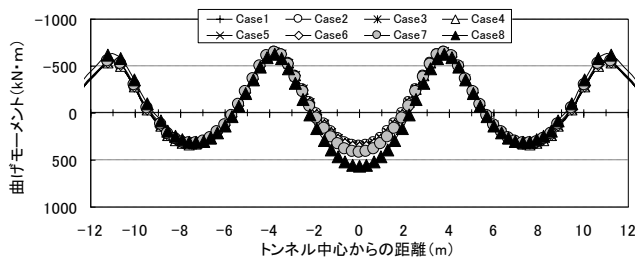
以上より、3次元FEM解析では、側壁開口により側壁位置 ($y=0\text{m}$) の曲げモーメント分布が開口端部を固定端とする両端固定梁の挙動に変化し、開口スパンに比例して曲げモーメントが大きくなる。また、中柱位置 ($y=8.175\text{m}$) や上床版スパン中央位置 ($y=4.1\text{m}$) でも開口による影響を受けるものの側壁位置 ($y=0\text{m}$) よりもその影響は小さいと考えられる。



(a) 側壁位置 ($y=0\text{m}$)



(b) 上床版スパン中央位置 ($y=4.1\text{m}$)



(c) 中柱位置 ($y=8.175\text{m}$)

図-14 縦断方向の曲げモーメント分布

4. 側壁開口時の影響検討（開口補強桁あり）

(1) 検討概要

3. の検討に対して、本章では側壁開口時に開口補強桁と既設躯体を一体モデルとした3次元FEM解析と、側壁開口による剛性低減を考慮した2次元フレーム解析を行い、その挙動について比較する。

(2) 開口補強桁のモデル化

図-15に開口補強桁を設置する3次元FEM解析モデルを示す。開口補強桁のモデル化については、側壁開口部を囲うロの字型の梁部材をビーム要素でモデル化し、シェル要素との結合条件は剛結合とする。

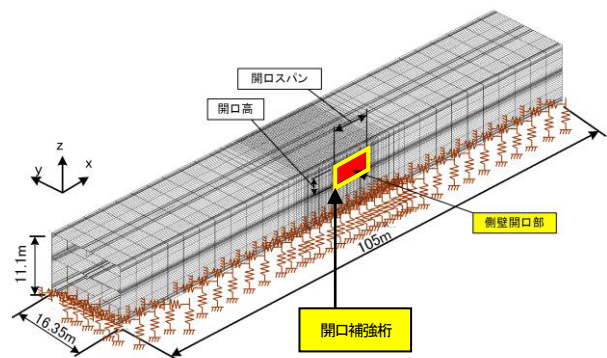


図-15 3次元FEM解析モデル（開口補強桁設置）

(3) 解析ケース

表-3に解析ケースを示す。開口高 H に対して開口スパン L_x が1, 2, 4倍 (3.8m, 7.6m, 15.2m) となる3ケース (Case6～8) について検討する。なお、開口補強桁の剛性は、実務設計で想定される桁のせん断応力を目安に設定した。開口時の実挙動に着目すると、トンネル方向のねじり挙動も課題となるが、今回は開口スパンによる影響を明確にするため、ねじりの影響は考慮しないものとした。

表-3 解析ケース（開口補強桁あり）

ケース	開口高 $H(\text{m})$	開口スパン $L_x(\text{m})$	L_x/H	補強桁剛性 $I(\text{m}^4)$	剛性低減係数 α
Case6	3.8	3.8	1	0.0547	0.493
Case7		7.6	2	0.4219	0.662
Case8		15.2	4	2.7648	0.324

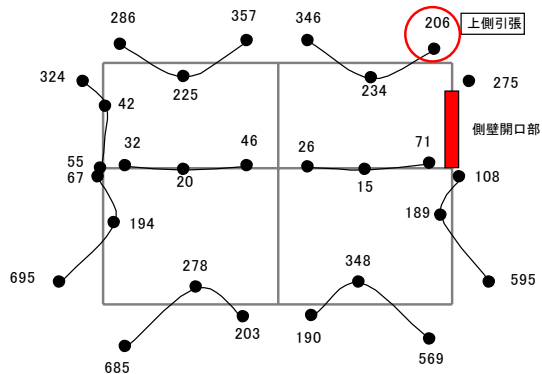
(4) 解析結果

a) 3次元FEM解析と2次元フレーム解析結果の比較

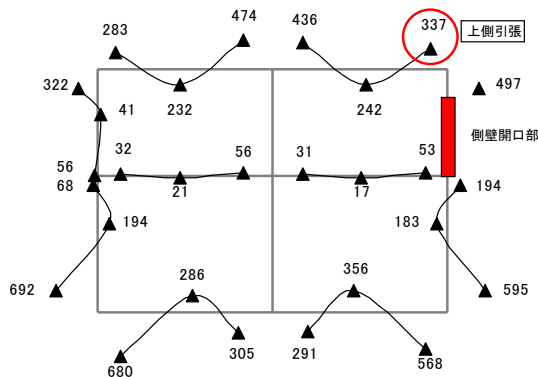
図-16に各解析手法による曲げモーメント図を示す。ここでは、開口スパンが中柱間隔 (7.5m) と同程度であるCase7 ($L_x=7.6\text{m}$) の結果について示す。

2次元フレーム解析では、側壁開口部をピン結合としている（前章に記載）ため、ピン挙動の影響により開口側の上床版隅角部では上側引張の曲げモーメントが生じ

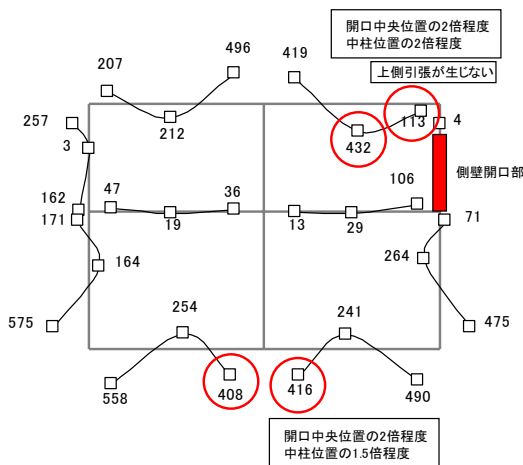
ないのに対し、3次元FEM解析では、同位置に大きな上側引張の曲げモーメントが生じており、側壁開口による影響として2次元フレーム解析でモデル化するようなピン挙動を示さないことがわかる。また、開口側の上床版径間部では下側引張の曲げモーメントが生じているが、ピン挙動を示す2次元フレーム解析に対して、ピン挙動を示さない3次元FEM解析ではその値は1/2程度となる。これは、開口補強桁の剛性により開口部の側壁剛性が保持され、剛挙動を示すためと考えられる。



(a) 3次元FEM解析 (開口中央位置)



(b) 3次元FEM解析 (中柱位置)



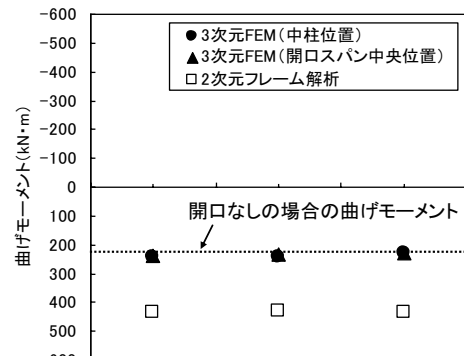
(c) 2次元フレーム解析

図-16 曲げモーメント図 (横断方向, Case7)

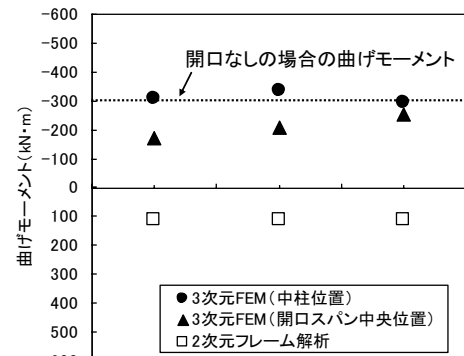
b) 開口スパンによる影響

図-17に各開口スパンにおける開口側上床版の曲げモーメント比較を示す。グラフには比較として、3次元FEM解析の開口なしの結果についても示す。

3次元FEM解析では、2次元フレーム解析に対して開口スパンにかかわらず開口部上床版径間部の曲げモーメント (下側引張) は小さいが、隅角部では上側引張の曲げモーメントが生じており、その値は開口なしとほぼ同程度である。これは、開口スパンに応じた開口補強桁を設置することで、側壁剛性が保持されたためと考えられる。



(a) 上床版径間部



(b) 上床版隅角部

図-17 開口側上床版の曲げモーメント比較

5. 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、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-18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) 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（ $=93.5\text{kN/m}^2$ ）を考慮する。

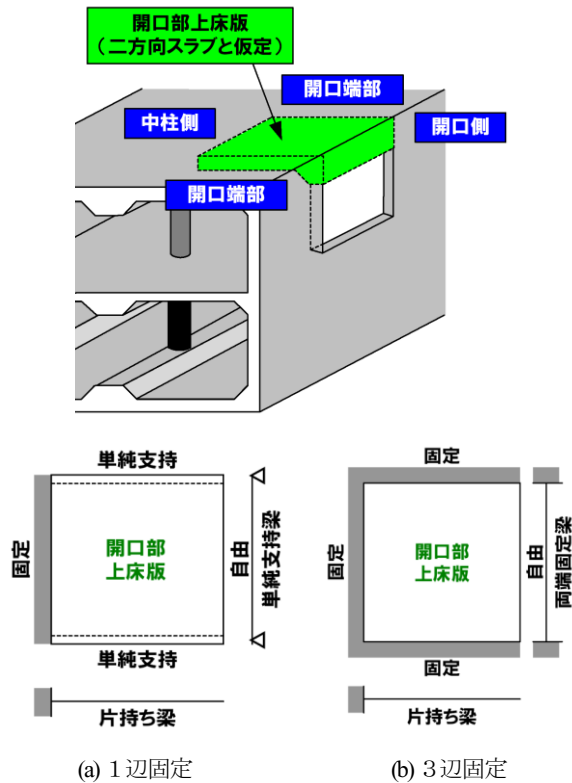


図-18 2方向スラブ近似解析の検討モデル

(3) 検討ケース

表-4に検討ケースを示す。Case1～4（ $L_x=0.633\text{m} \sim 2.533\text{m}$ ）は長辺と短辺の比が0.4以下であるため1方向スラブ，Case5～8（ $L_x=3.167\text{m} \sim 8.525\text{m}$ ）は0.4より大きいため2方向スラブとなる。

表-4 検討ケース（2方向スラブ近似解析）

ケース	L_x (m)	L_y (m)	L_y/L_x	短辺 /長辺	備考
Case1	0.633	8.525	13.47	0.07	1方向 スラブ (≤ 0.4)
Case2	1.267		6.73	0.15	
Case3	1.900		4.49	0.22	
Case4	2.533		3.37	0.30	
Case5	3.167	15.200	2.69	0.37	2方向 スラブ (> 0.4)
Case6	3.800		2.24	0.45	
Case7	7.600		1.12	0.89	
Case8	8.525		1.78	0.56	

※ L_y : 短辺スパン、 L_x : 長辺スパン

(4) 検討結果

a) トンネル縦断方向の比較

図-19に各開口スパンにおける2方向スラブ近似解析による曲げモーメントを示す。

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。近似解析の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、近似解析ではCase8（ $L_x=15.2\text{m}$ ）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、Case8（ $L_x=15.2\text{m}$ ）では、近似解析よりも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。

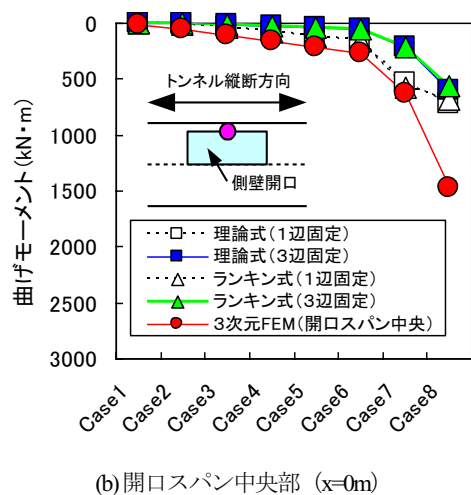
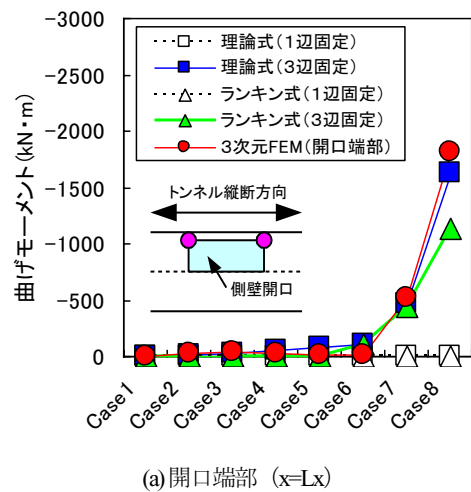


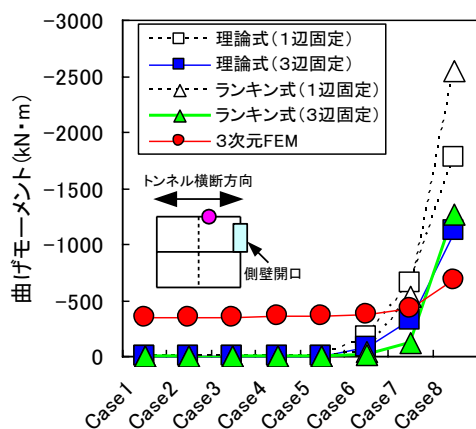
図-19 近似解析による曲げモーメント（縦断方向）

b) トンネル横断方向の比較

図-20に各開口スパンにおける2方向スラブ近似解析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位置の断面力で比較する。Case1～6（ $L_x < 7.6\text{m}$ ）では3次元FEM解析のほうが大きく、近似解析の約2～8倍となっている。また、Case7（ $L_x=7.6\text{m}$ ）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, Case8 (Lx=15.2m) 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。



(a) 中柱スパン中央 (支承前面)

図-20 近似解法による曲げモーメント (横断方向)

6. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 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, 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, 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, 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, 上床版がトンネル方向に連続しているため完全に自由には移行せ

ず上床版隅角部に上側引張の曲げモーメントが生じるのに対して, 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, 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, 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, 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。

謝辞: なお, 本研究の一部は, (公財) 鉄道総合技術研究所が平成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ったものである。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.

(2013.9.2 受付)

A STUDY ON BEHAVIOR OF OPENING AT THE SIDE WALL OF A RAILWAY OPENCUT TUNNEL BASED ON 3D FEM ANALYSIS

Tomoki SAKATA, Eri MATSUSHITA, Kosuke MUROYA, Takashi NAKAYAMA and Takashi USHIDA

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, we verified calculation of 3D FEM by the comparison with 2D frame analysis. 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.

