

# 開削トンネルにおける 中柱のモデル化に関する一検討

柳川 一心<sup>1</sup>・牛田 貴士<sup>2</sup>・仲山 貴司<sup>3</sup>・焼田 真司<sup>4</sup>

<sup>1</sup>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: yanagawa.kazushi.20@rtri.or.jp

<sup>2</sup>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.takashi.33@rtri.or.jp

<sup>3</sup>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.takashi.61@rtri.or.jp

<sup>4</sup>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.shinji.86@rtri.or.jp

近年，鉄道の地下駅や駅間部では，各階層の使用目的やその利便性，メンテナンス等の観点から，中柱の本数を少なくすることが求められているが，そのような場合，中柱の配置間隔を大きくする必要がある．中柱の配置間隔を大きくすると，中柱を含む横断面（以下，柱列部）と中柱を含まない横断面（以下，柱間部）の横断方向曲げモーメント（以下，曲げモーメント）の発生形態の違いがより顕著になることが想定される．そこで本研究では，三次元シェル要素を用いた開削トンネルの三次元解析により，柱列部と柱間部の曲げモーメントの発生形態を把握し，さらに，開削トンネルの設計で実績のある中柱のモデル化手法を用いた二次元フレーム解析結果と三次元解析結果を比較することで，二次元フレーム解析の適用性について検討を実施した．

**Key Words :** cut-and-cover tunnel , center pillar , modeling method , frame analysis , 3D FEM analysis

## 1. はじめに

近年，鉄道の地下駅や駅間部では，各階層の使用目的やその利便性，メンテナンス等の観点から，中柱の本数を少なくすることが求められているが，そのような場合，中柱の配置間隔を大きくする必要がある．中柱の配置間隔を大きくすると中柱を含む横断面（以下，柱列部）と中柱を含まない横断面（以下，柱間部）（図-1を参照）の横断方向曲げモーメント（以下，曲げモーメント）の発生形態の違いがより顕著になることが想定される．

一般に，開削トンネルの設計は，トンネル部材を梁，周辺地盤をばねとし，中柱を含むトンネル横断面をモデル化した「二次元フレーム解析」によって行われている．この解析手法は，基本的に平面ひずみ状態を前提としており，応力状態が縦断方向に変化するような構造物に適用することは厳密な意味で適切とはいえない．したがって開削トンネルの設計では，縦桁（図-1を参照）の曲げ

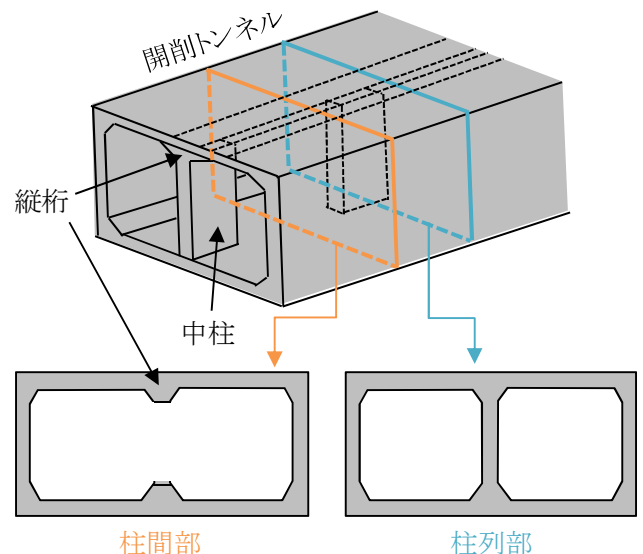


図-1 柱列部と柱間部

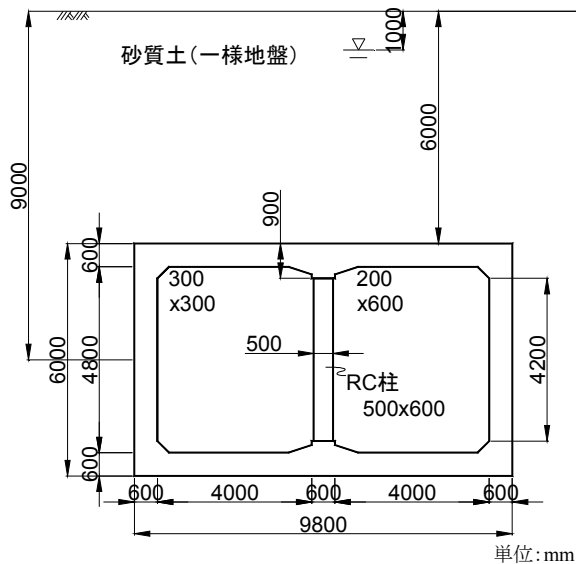


図-2 検討対象トンネルの断面（1層2径間）

表-1 部材の物性値

|        | ヤング係数<br>[kN/mm <sup>2</sup> ] | ポアソン<br>比 | 単位体積重量<br>[kN/m <sup>3</sup> ] |
|--------|--------------------------------|-----------|--------------------------------|
| コンクリート | 25                             | 0.2       | 24.5                           |

表-2 地盤の物性値

|     | N値 | 静止土圧<br>係数 | 単位体積重量<br>[kN/m <sup>3</sup> ] |
|-----|----|------------|--------------------------------|
| 砂質土 | 15 | 0.5        | 16.0*                          |

※地下水位以下では水中単位体積重量を用いる。

剛性（以下、縦桁剛性）を適切に評価することにより、ある程度の平面ひずみ状態を再現できることが可能であるという考え方に基づいて「二次元フレーム解析」が適用されているものの、その妥当性について詳細に検討した事例はほとんどないのが実情である。開削標準<sup>1)</sup>および既往文献<sup>2,3)</sup>では、中柱を有する1層2径間の開削トンネルを詳細にモデル化した三次元ソリッド解析を行い、柱列部および柱間部の曲げモーメントの発生形態について検討を実施しており、中柱の配置間隔の影響は、中柱および縦桁近傍においてのみ卓越し、側壁近傍では非常に小さいという知見を得ている。さらに、三次元ソリッド解析結果と二次元フレーム解析結果の差異を1割程度とする（＝三次元的挙動を少なくする）には、縦桁剛性を16倍程度とする必要があり、これを実構造物に反映させるためには、縦桁の形状寸法を相似的に増加させるとすれば、縦桁の形状寸法を2倍程度にする必要があるということがわかっている。

本研究では、三次元ソリッド要素よりも比較的容易に取り扱うことができる三次元シェル要素を用いて、開削トンネルにおける中柱のモデル化手法について検討を行った。まず、三次元シェル要素で開削トンネルをモデル

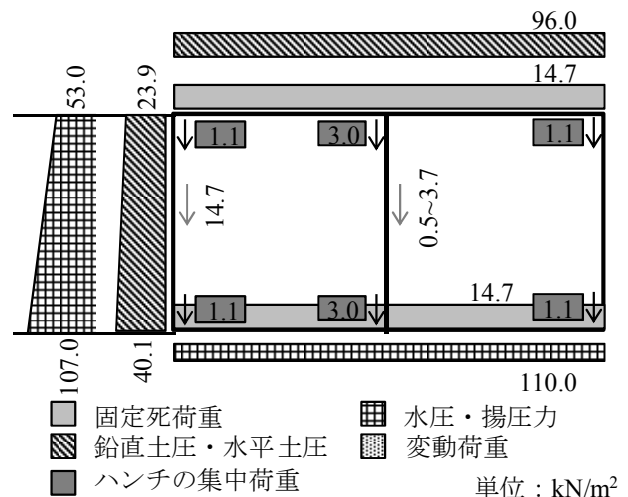


図-3 作用荷重

化して三次元解析を実施し、柱列部と柱間部の曲げモーメントの発生形態を把握した。さらに、一般に、開削トンネルの設計で実績のある中柱のモデル化手法を用いた二次元フレーム解析結果と三次元解析結果を比較し、二次元フレーム解析の適用性について検討を実施した。

## 2. 中柱のモデル化手法の検討

### (1) 概要

一般に、開削トンネルの設計は、トンネル部材を梁、周辺地盤をばねとし、中柱を含むトンネル横断面をモデル化した二次元フレーム解析によって行われている。特に中柱のモデル化については、中柱の配置間隔と断面形状に応じて剛性を低減した梁（以下、仮想梁）でモデル化する事例が多い。このような既往のモデル化手法（以下、既往法）では、中柱の平均的な挙動に着目して仮想梁の剛性低減率 $\alpha_1$ を次式で算定する。

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

ここに、 $\alpha_1$ ：剛性低減率、 $L$ ：中柱の配置間隔

そこで、既往法による二次元フレーム解析と三次元解析の曲げモーメントを比較して、既往法による二次元フレーム解析の適用性について検討することとした。

### (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、鉄道における標準的な構造を有する1層2径間の開削トンネルであり、鉄筋コンクリート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6.0 mとし、周辺地盤は、N値15程度を有する砂質土の一樣地盤とした。表-2に地盤の物性値を示す。

地盤反力係数 $K_0$ は、開削トンネル新設時の設計法<sup>1)</sup>に

したが、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、 $\alpha$ ：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、 $\lambda$ ：換算係数  
なお、補正係数 $\alpha$ は1.0、換算係数 $\lambda$ は1/3とした。

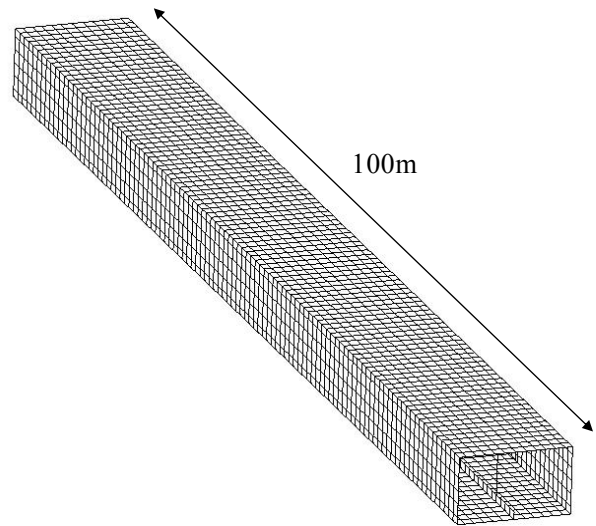
図-3に検討で考慮した作用荷重を示す。作用荷重は、永久作用のみとし、開削トンネル新設時の設計法<sup>1)</sup>にしたがって算定した。なお、荷重係数はすべての荷重に対して1.0とした。

### (3) 柱列部と柱間部の曲げモーメント発生形態の把握

柱列部と柱間部の曲げモーメントの発生形態や分布傾向を把握するため、検討対象トンネルを図-4に示すように三次元へモデル化して解析を実施した。中柱の配置間隔をパラメータとし、ここでは、中柱の配置間隔 $L=2.0\text{m}$ 、 $4.0\text{m}$ 、 $6.0\text{m}$ 、 $8.0\text{m}$ 、 $10.0\text{m}$ 、 $12.0\text{m}$ 、 $14.0\text{m}$ である7ケースについて解析を行った。三次元解析モデルの節点数は7,575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、中柱と縦桁の接合部は剛結合とした。なお、縦桁剛性については、一般に、中柱の配置間隔 $L$ が拡大すると縦桁剛性（形状寸法）も大きくなるが、本検討では、中柱の配置間隔 $L$ が柱列部および柱間部の曲げモーメントに与える影響を把握することを目的とするため、縦桁剛性を中柱の配置間隔 $L$ によらず一定とした。下床版には、鉛直、せん断の地盤ばねを配した。なお、縦断方向の解析領域は、中柱付近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FEMを用いた三次元解析の結果の一例として中柱の配置間隔 $L=8.0\text{m}$ のときの鉛直変位を示す。上床版に着目すると、柱列部は中柱が荷重を伝達するため、鉛直変位は小さいが、柱間部は柱列部と比べて鉛直変位が大きくなる傾向にある。これは、中柱の配置間隔が大きくなるにつれてより顕著となる。なお、同図より、解析モデルの端部では、境界条件の影響によって、解析モデルの中央付近に比べて大きな鉛直変位が発生している。しかし、この影響は、解析モデルの端部付近のみにとどまっており、それ以降は、一意的な鉛直変位を示していることがわかる。このことから、本検討における解析結果は、解析モデルの端部における境界条件の影響を受けていないといえる。

図-6に中柱の配置間隔 $L=8.0\text{m}$ における三次元解析から算出した柱列部と柱間部の曲げモーメント分布を示す。柱列部と柱間部の曲げモーメント分布を比較した結果、双方の発生形態のうち、最も違いが生じるのは、上床版



節点数：7,575

図-4 三次元解析モデル

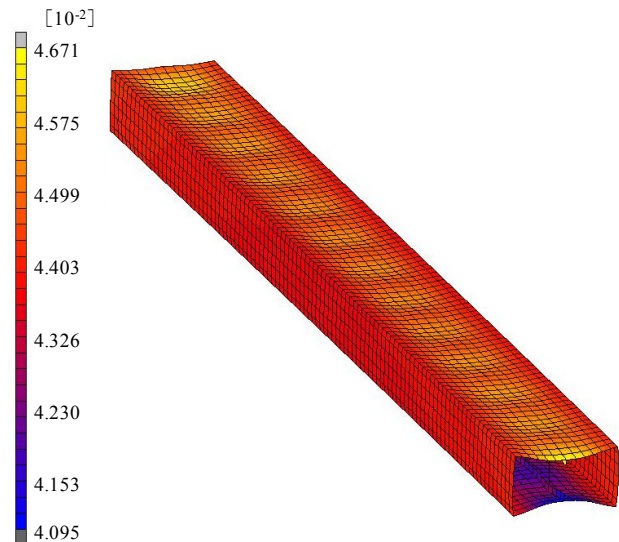


図-5 中柱の配置間隔 $L=8.0\text{m}$ のときの鉛直変位

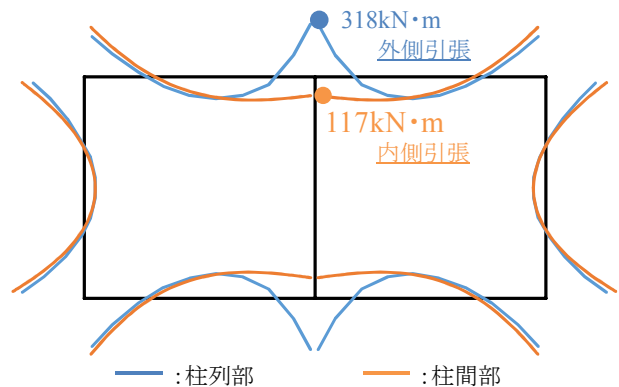


図-6 三次元解析による曲げモーメント  
(中柱の配置間隔 $L=8.0\text{m}$ )

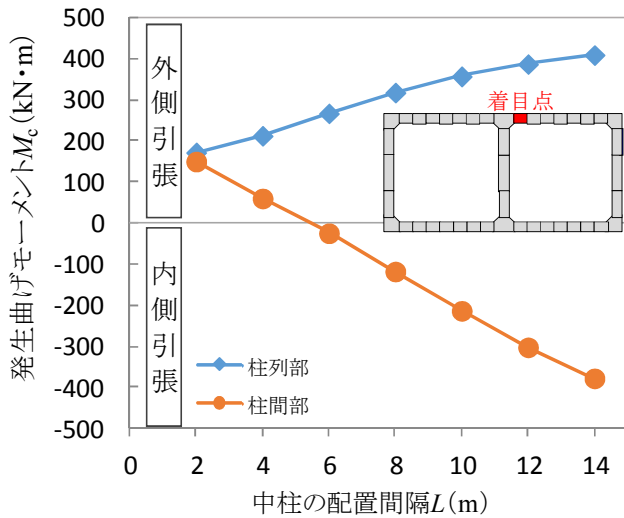


図-7 中柱付近における柱列部と柱間部の曲げモーメントの発生形態の遷移

および下床版の中柱付近であることがわかった。中柱の配置間隔 $L=8.0\text{m}$ とした場合では、柱列部の中柱付近の曲げモーメントは、外側引張となっているのに対し、柱間部では、スパン中央部の内側引張とほぼ同等の値になることがわかった。本研究で用いた解析モデルでは、中柱の配置間隔が大きい場合、柱間部における曲げモーメントの発生形態は、1層2径間から1層1径間のような分布傾向となることがわかった。一方、側壁について比較を行ったところ、中柱の配置間隔 $L$ の大小に関わらず、曲げモーメントの発生形態に大きな違いはみられなかった。これより、側壁においては、中柱の配置間隔 $L$ の影響は非常に小さいといえる。以上の傾向は、既往の三次元ソリッド要素を用いた解析<sup>1)2)3)</sup>で得られた知見と一致した。

次に、中柱付近における柱列部と柱間部の曲げモーメントの発生形態の遷移を把握するために、中柱の配置間隔 $L$ ごとに中柱付近における柱列部と柱間部の上床版における横断方向の発生曲げモーメント $M_c$ を整理したものを図-7に示す。なお、縦軸のうち、正の値は外側引張、負の値は内側引張の曲げモーメントを表している。中柱の配置間隔 $L=2.0\text{m}$ では、柱列部および柱間部の発生曲げモーメント $M_c$ は、ほとんど同値で外側引張となっているが、中柱の配置間隔 $L$ が大きくなるにつれて、柱列部の発生曲げモーメント $M_c$ は外側引張の方向に線形的に卓越し、柱間部の発生曲げモーメント $M_c$ は内側引張の方向に線形的に卓越する傾向となった。また、柱間部においては、中柱の配置間隔 $L=6.0\text{m}$ 付近で発生曲げモーメント $M_c$ が外側引張から内側引張に遷移していることがわかった。

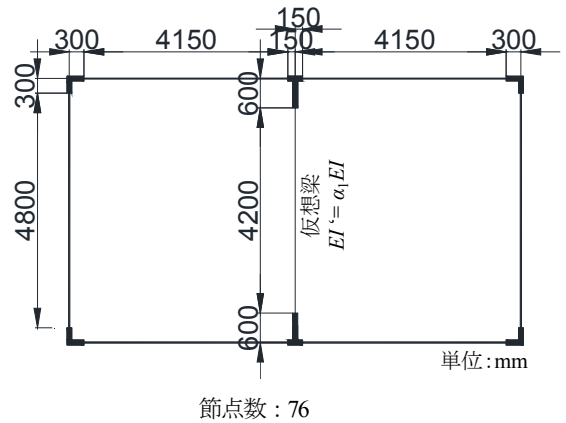


図-9 二次元解析モデル

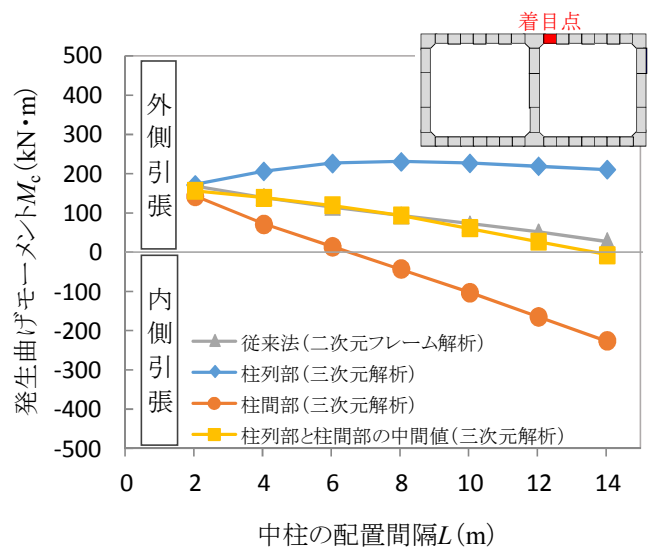


図-9 既往法を用いた二次元フレーム解析と三次元解析の比較

#### (4) 既往法による二次元フレーム解析と三次元解析の比較

中柱のモデル化について既往法による二次元フレーム解析結果と三次元解析結果を比較を行った。図-8 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76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<sup>4)</sup>によって設定した。なお、既存の設計法<sup>4)</sup>では、縦梁に該当する部材は剛域として設定されることになる。中柱の配置間隔 $L$ のパラメータは、上述した三次元解析と同様の7ケースとするが、このときの既往法による剛性低減率 $\alpha_1$ は、0.071~0.50の範囲となる。一方、三次元解析については、中柱の配置間隔 $L$ に応じて適切な縦桁の形状寸法を設定することとした。本検討では、既往の縦桁に関する設計法<sup>5)</sup>に基づき、次式によって縦桁の発生曲げモーメントを算定する。

$$M = \frac{1}{14} \omega l^2 \quad (3)$$



ここに、 $M$ ：縦桁のスパン中央に発生する内側引張の曲げモーメント、 $\omega$ ：単位長さあたりの荷重、 $l$ ：縦桁のスパン長（＝中柱の配置間隔 $L$ ）

なお、縦桁に作用する荷重 $\omega$ については、既往法による二次元フレーム解析の縦桁と中柱の接合部における軸力とした。縦桁の形状寸法については、上記の式の曲げモーメントを用い、開削トンネルの設計において部材の決定ケースとなることが多い耐久性の曲げひび割れの検討によって設定することとした。なお、曲げひび割れの検討に用いる $\sigma_{\text{ca}}=450 \times 10^6$ とした。

図-9に既往法による二次元フレーム解析と三次元解析の算出値を示す。なお、縦軸のうち、正の値は外側引張、負の値は内側引張の曲げモーメントを表している。三次元解析から得られた柱列部および柱間部の発生曲げモーメント $M_c$ は、図-7と比較して双方とも発生曲げモーメント $M_c$ が小さくなっているが、中柱の配置間隔 $L$ に応じて適切な縦桁の形状寸法を設定した影響と考えられる。また、上記の影響は、柱列部の発生曲げモーメント $M_c$ で顕著に表れており、柱列部では中柱の配置間隔 $L$ が大きくなっても発生曲げモーメント $M_c$ はおおむね一定値を示す傾向となっている。一方、既往法による二次元フレーム解析から得られる発生曲げモーメント $M_c$ は、三次元解析から得られる柱列部と柱間部の中間値とほぼ一致する結果となった。これより、既往法による二次元フレーム解析は、中柱の平均的な挙動に着目しているといえる。

##### (5) 最大曲げモーメントに着目した比較

既往法による二次元フレーム解析と三次元解析を比較した結果、既往法による二次元フレーム解析から得られる値は、三次元解析から得られる柱列部と柱間部の中間値とほぼ一致する傾向にあることがわかった。ここでは、上床版を対象とし、既往法による二次元フレーム解析と三次元解析から得られる最大曲げモーメントに着目して比較することとした。図-10に中柱の配置間隔ごとに各解析から得られた最大曲げモーメントをまとめたものを示す。なお、縦軸のうち、正の値は外側引張、負の値は内側引張の曲げモーメントを表している。また、図-11には、図-10に示した最大曲げモーメントの発生位置を模式図で示している。

上床版外側に発生する最大曲げモーメントは、図-11に示すとおり、中柱の配置間隔 $L$ の大小に関わらず、二次元フレーム解析および三次元解析とも上床版の側壁側の端部で発生する結果となった。最大曲げモーメントの値に着目すると、三次元解析から得られる柱列部の曲げモーメントは、図-9で示した中柱付近と傾向と同様に、中柱の配置間隔 $L$ が大きくなっても曲げモーメントはおおむね一定値を示すこととなった。一方、柱間部におい

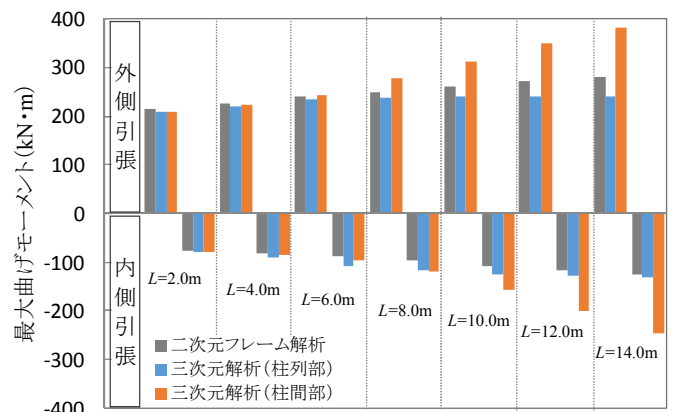


図-10 発生最大曲げモーメントの比較

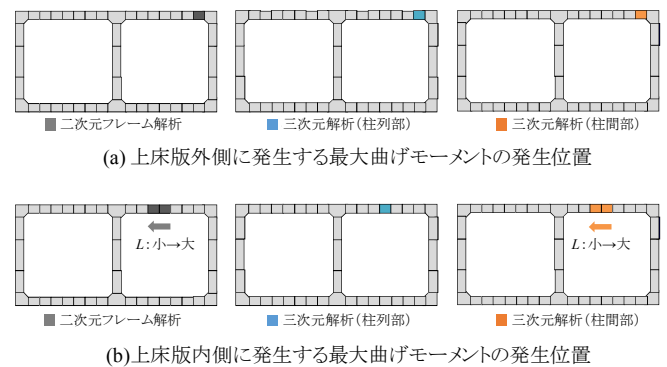


図-11 発生最大曲げモーメントの発生位置

ては、中柱の配置間隔 $L$ が大きくなるにつれて最大曲げモーメントが大きくなるが、この値は柱列部よりも大きい傾向にある。これは、中柱の配置間隔 $L$ が大きい場合、柱間部における曲げモーメントの発生形態が、1層2径間から1層1径間のような分布傾向になる影響によるものと考えられる。二次元フレーム解析と三次元解析を比較した結果、中柱の配置間隔 $L$ が小さいケースでは、二次元フレーム解析から得られる曲げモーメントが最も安全側となるが、中柱の配置間隔 $L$ が大きくなると三次元解析結果の方が大きくなる傾向にあることがわかった。

上床版内側に発生する最大曲げモーメントは、図-11に示すとおり、上床版のスパン中央付近となることがわかった。ただし、二次元フレーム解析と柱間部の三次元解析においては、中柱の配置間隔 $L$ が大きくなるにつれて、最大曲げモーメントの発生位置がスパン中央付近から中柱付近へ移行することがわかった。最大曲げモーメントの値に着目すると、中柱の配置間隔 $L$ が大きくなるにつれて、柱間部の最大曲げモーメントの増加が顕著に表れることとなった。二次元フレーム解析と三次元解析を比較した結果、中柱の配置間隔が小さいケースでは、二次元フレーム解析結果は三次元解析結果とほぼ同等とみなすことができるが、中柱の配置間隔 $L$ が大きくなると双方の差が大きくなる結果となった。

以上の検討結果より、中柱の配置間隔が小さいケースでは、三次元解析から得られる最大曲げモーメントを既往法を用いた二次元フレーム解析で評価できると考えられる。

### 3. 結論

本研究では、三次元シェル要素を用いた開削トンネルの三次元解析により、柱列部と柱間部の曲げモーメントの発生形態を把握し、さらに、開削トンネルの設計で実績のある中柱のモデル化手法を用いた二次元フレーム解析結果と三次元解析結果を比較することで、二次元フレーム解析の適用性について検討を実施した。その結果、以下の知見を得た。

- ・中柱の配置間隔が大きくなるにつれて、柱列部と柱間部の中柱付近における曲げモーメントの発生形態が異なることを確認し、その傾向を把握した。また、その傾向は、既往の三次元ソリッド要素を用いた解析<sup>1)2)3)</sup>で得られた知見と一致することを確認した。
- ・既往法による二次元フレーム解析から得られる発生曲げモーメントは、三次元解析から得られる柱列部と柱間部の中間値と一致する結果を得た。これより、既往法による二次元フレーム解析は、中柱の平均的な挙動に着目しているといえることがわかった。

- ・中柱の配置間隔が小さいケースでは、三次元解析から得られる最大曲げモーメントを既往法を用いた二次元フレーム解析で評価できると考えられる。

今後は、断面形状の異なる開削トンネルを対象に同様検討を実施して発生断面力の傾向を把握することで、中柱の挙動に関する知見を深めていきたい。さらに、これらの知見をふまえて、中柱の配置間隔が大きい場合における中柱のモデル化手法の提案を行っていきたい。

### 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（構造物編）開削トンネル，2001.
- 2) 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 Vol.12, No.9, 1998
- 3) 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，第9回トンネル工学研究論文・報告集，1999
- 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) 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）設計計算例 開削トンネル（3層3径間），2002

(2014.9.15 受付)

## A STUDY OF MODELLING FOR CENTER PILLAR OF CUT AND COVER TUNNELS

Kazushi YANAGAWA, Takashi USHIDA, Takashi NAKAYAMA, Shinji YAKITA

Recently, the center pillar of cut-and-cover tunnels is demanded to reduce the number for convenience and maintenance in underground train stations. So, placement interval between the center pillars tends to be larger than the interval of the usual tunnels. There are two kinds of cut-and-cover tunnels, the section containing the center pillar and the section which does not contain the pillar. The difference of distribution of bending moment owing these sections is supposed to become clear as placement interval between the center pillars spreads. This research grasps the difference through three-dimensional Finite Element Method using 3-D shell element. Moreover, the distribution of bending moment calculated by 2-D frame analysis of general method of cut-and-cover tunnels design is compared with the distribution of 3-D FEM. As a result, it is thought that 2-D frame analysis can estimate the maximum bending moment obtained from 3-D analysis in the case where placement interval between the center pillars is small.