

# 既設開削トンネルの側壁開口による 断面力変化に関する評価

津野 究\* 仲山 貴司\*\*

Evaluation of Change in Sectional Force Caused by an Opening at Side Walls of an Existent Open-cut Tunnel

Kiwamu TSUNO Takashi NAKAYAMA

In the renewal of railway stations, there are some cases where a part of existent side walls is opened in order to connect the newly constructed structures or to create a space. This paper investigates the influence of opening at side walls on the members of existent cut-and-cover tunnels by means of the 3D FEM. The calculation results obtained by the 3D FEM were compared with those by the 2D frame analysis provided that there is no opening at side walls. The influence of the opening was investigated based on the 3D FEM. The calculation results revealed the change of sectional force near the opening and the influence of the opening width on the values of sectional force. The effect of reinforcing beams in the longitudinal direction was also discussed in this paper.

キーワード：開削トンネル，リニューアル，側壁開口，三次元解析，フレーム解析

## 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。この場合、側壁の一部が撤去されることより、開口部分の壁が撤去前に担っていた断面力が、開口周辺の部材に移行して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の正確な把握が重要となる。この検討は、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解析モデルの工夫を行ったうえで、一般的な開削トンネルの設計法と同様に、二次元フレーム解析を用いて行われてきた。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という課題があった。

そこで本研究では、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<sup>1)</sup>。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構造計算との比較を行った。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検討した。さらに、開口補強梁の効果についても検討した。

\* 構造物技術研究部 トンネル研究室

\*\* 構造物技術研究部 基礎・土構造研究室

## 2. 三次元解析手法に関する検討

### 2.1 解析対象

図 1 に示す 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。部材の材料物性値を表 1 に、地盤物性値を表 2 に示す。

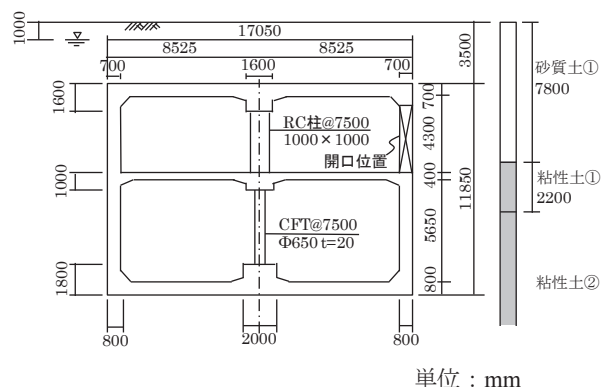


図 1 解析対象

表 1 部材の材料物性値

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

特集：構造物技術

表2 地盤物性値

	N 値	静止土圧係数	単位体積重量 [kN/m <sup>3</sup> ]
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。

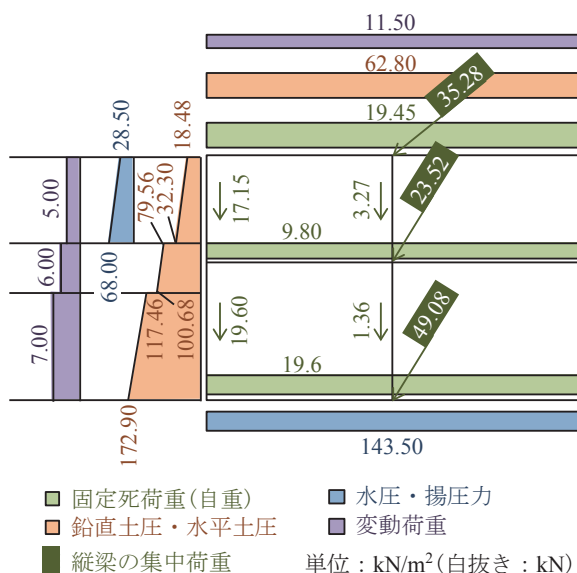


図2 作用荷重

作用荷重を図2に示す。側圧については、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<sup>2)</sup>。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。

2.2 解析概要

2.2.1 三次元 FEM 解析

解析モデルを図3に示す。上床版、下床版、中床版および縦桁等の構造部材はシェル要素、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。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。

地盤ばねについては、既存の設計方法<sup>2)</sup>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

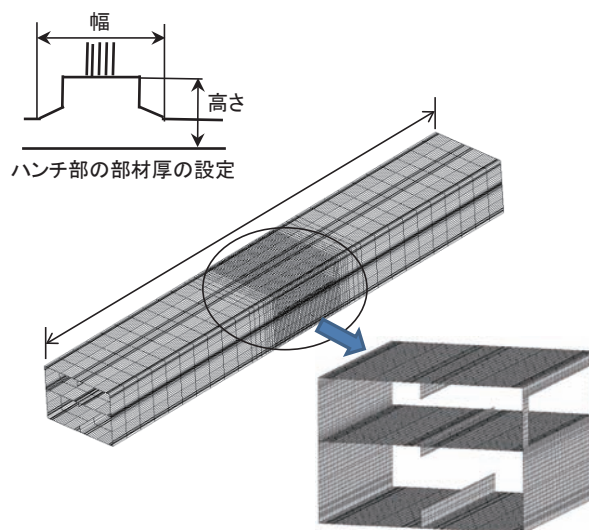
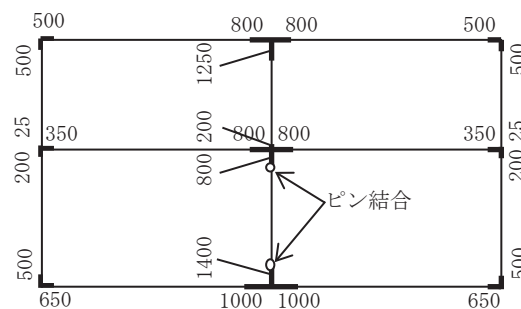


図3 三次元解析で用いたモデル



単位：mm

図4 剛域の設定

した。なお、補正係数 $\alpha$ は永久荷重に対しては1.0とし、換算係数 $\lambda$ を1/3と設定している。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。

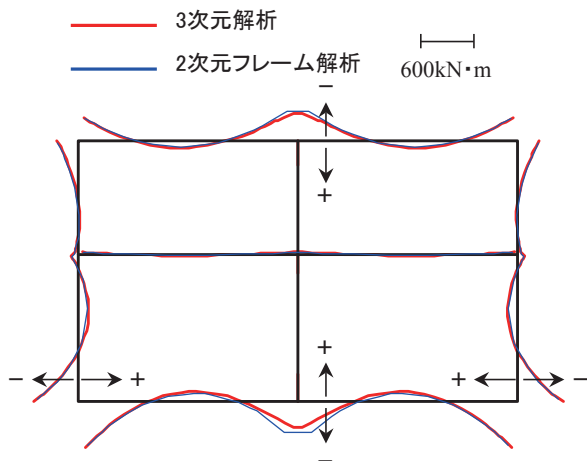
2.2.2 二次元フレーム解析

図3の断面について、二次元フレーム解析を行った。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<sup>2)</sup>にしたがって設定した。地盤ばねは、三次元FEM解析と同様に設定した。なお、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4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ている。

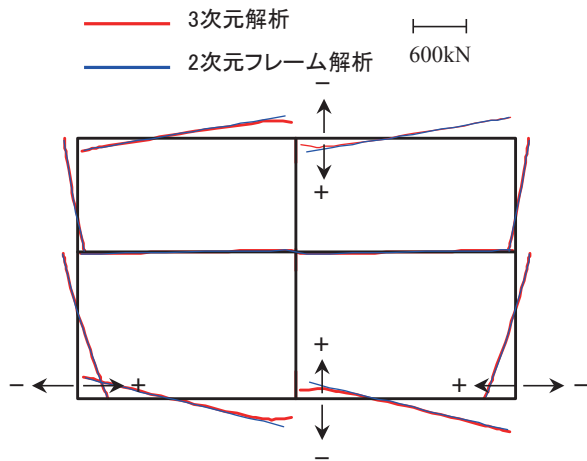
2.3 解析結果

三次元FEM解析および二次元フレーム解析で得られた単位幅あたりのモーメント図およびせん断力図を比較して図5に示す。

ここで、三次元FEM解析の断面力は、図6に示す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で評価している。これより、曲げモーメントおよび



(a) 曲げモーメント



(b) セン断力

図5 横断方向断面力図

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 6 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。

つぎに、図 7 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 8 に示す。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。

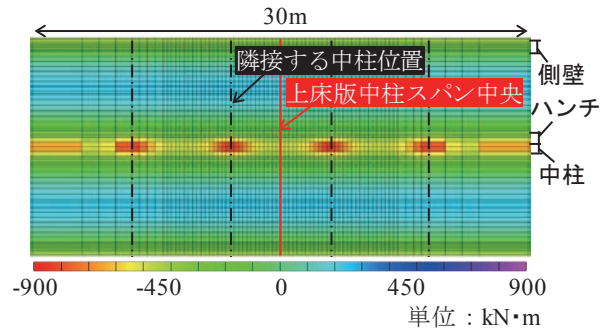


図6 横断方向曲げモーメントのコンター図  
(上床版)

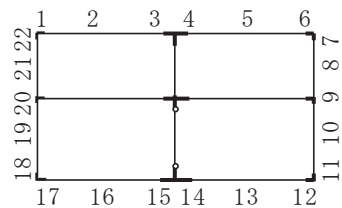


図7 曲げモーメントの比較位置

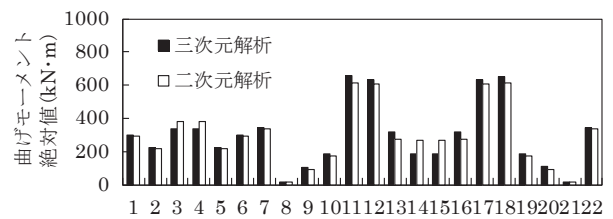


図8 横断方向曲げモーメントの比較

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、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。

### 3. 側壁開口による影響検討

#### 3.1 開口幅の影響

##### 3.1.1 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、図 3 のモデルを用いて三次元 FEM による検討を行った。ここでは、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。解析ケースを表 3 に示す。なお、開口幅  $L_x$  は、図 9 のように定義している。

##### 3.1.2 解析結果

開口の有無による横断方向曲げモーメントの比較を図 10 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 7 の位置 4 およびスパン

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	15.200	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

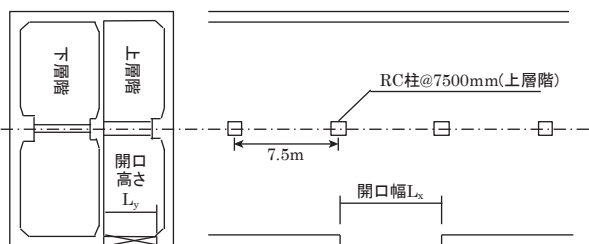


図9 開口の諸元

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11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12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ると推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。

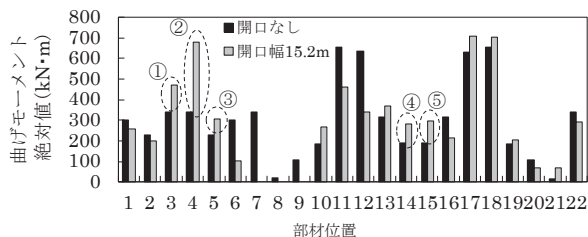
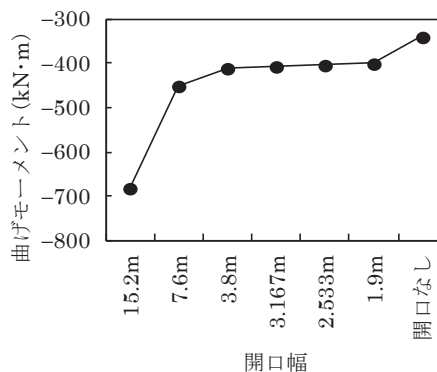
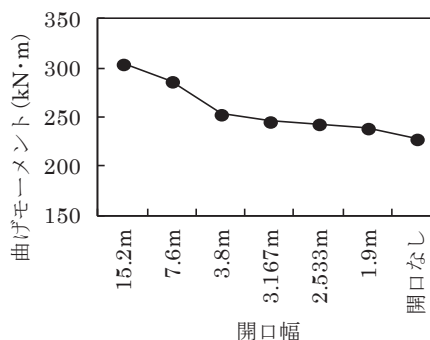


図10 開口の有無による曲げモーメントの比較



(a) 中柱位置（部材位置4）



(b) スパン中央（部材位置5）

図11 開口幅を変えた場合の曲げモーメントの比較

### 3.2 開口補強梁の効果に関する検討

#### 3.2.1 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。補強のための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、3.1項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、開口の外周部に補強梁を設置することによる断面力等への影響について検討した。

補強梁は、開口の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とした。

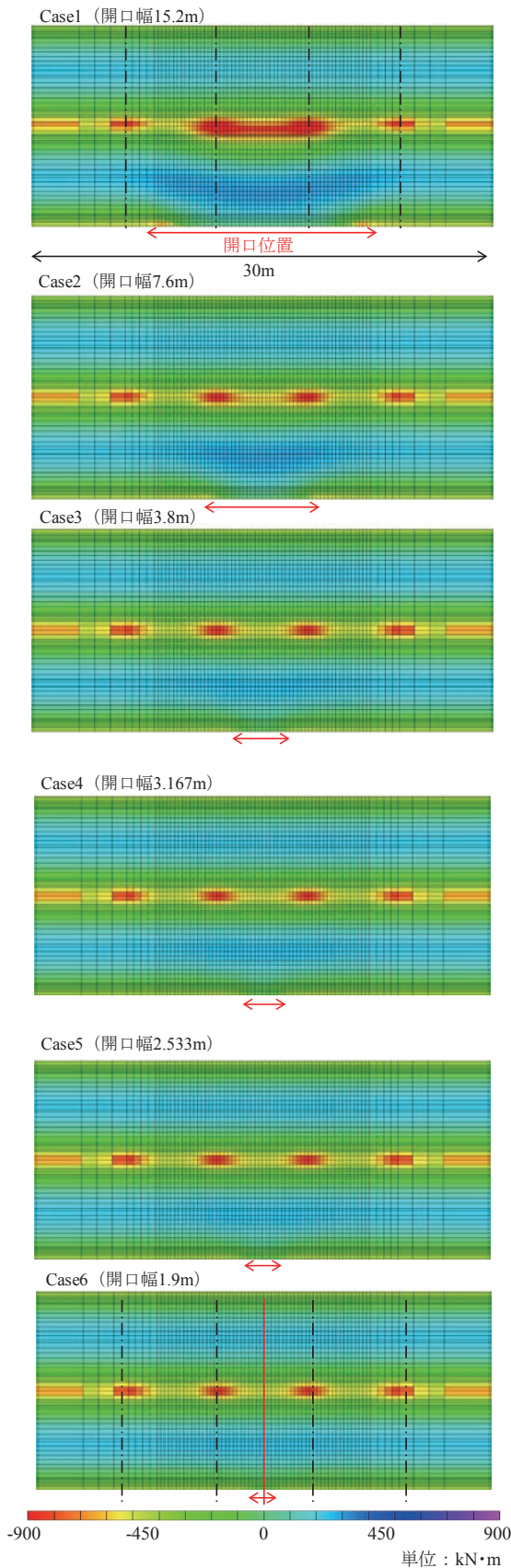


図 12 開口幅を変えた場合の横断方向曲げモーメントのコンター図の比較（上床版）

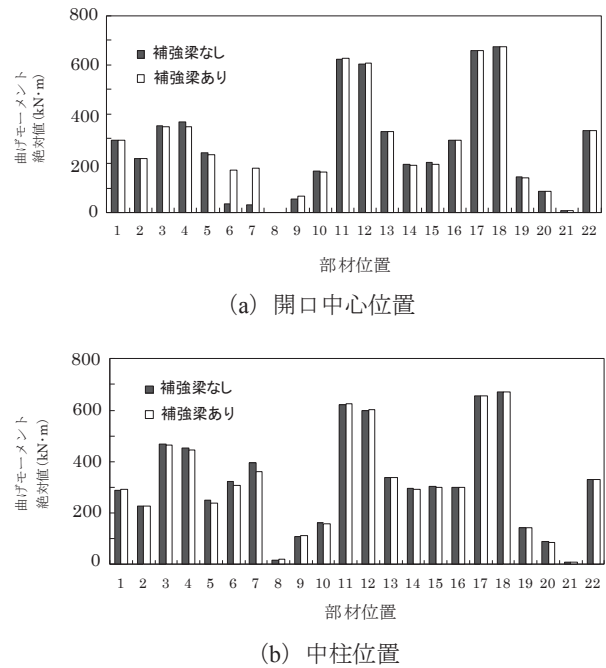


図 13 補強梁の有無による横断方向曲げモーメントの比較

### 3.2.2 解析結果

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図 7 の位置における曲げモーメントを図 13 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。

つぎに、上床版の横断方向の曲げモーメントの分布を図 14 (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斜め方向に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 14 (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、補強梁を設けることにより、開口した

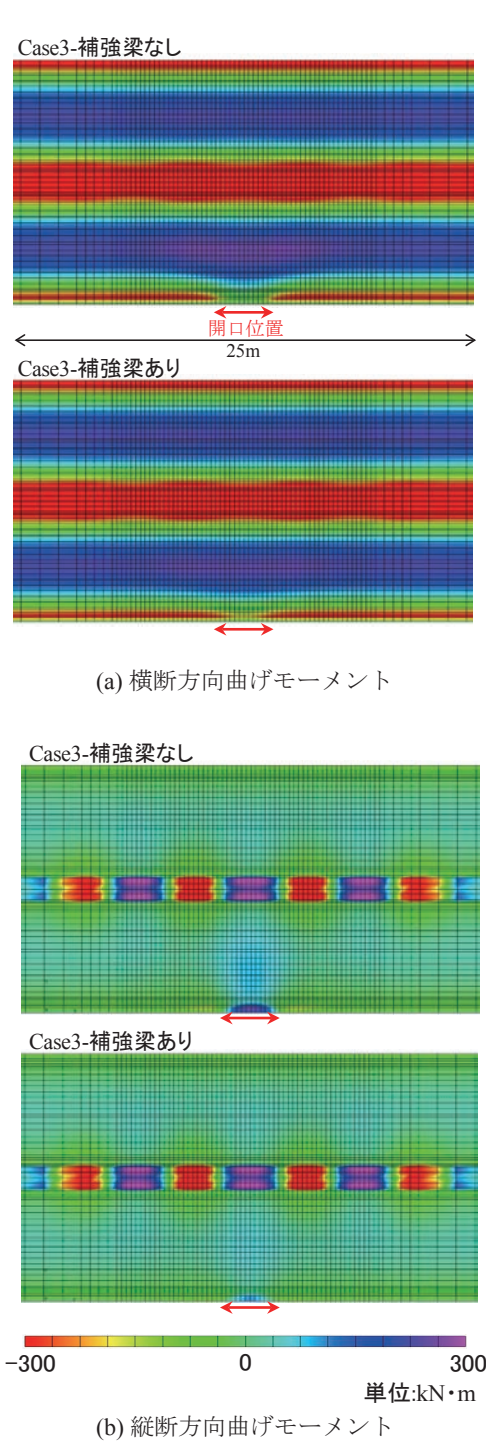


図 14 補強梁の有無による曲げモーメントのコンター図の比較（上床版，開口幅 3.8m）

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. 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を確認した。
- 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推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を確認した。
- 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。

なお、本研究の一部は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

#### 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。

#### 文 献

- 1) 仲山貴司，津野究，牛田貴士，焼田真司，室谷耕輔：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，土木学会論文集 F1，Vol.71，No.1，pp.29-40，2015
- 2) 国土交通省監修・鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説，開削トンネル，丸善，2001