

分合流部を有する大型道路トンネルの 三次元地震応答と設計指標を用いた検討

長田 光正¹・市村 強²・堀 宗朗³・並川 賢治⁴・土橋 浩⁵・
山田 岳峰⁶・小原 隆志⁷・滝本 邦彦⁸

¹首都高速道路株式会社技術部技術推進グループ課長代理
(〒100-8930 東京都千代田区霞が関1-4-1)

E-mail:m.osada135@shutoko.jp

²東京大学地震研究所准教授 (〒113-0032 東京都文京区弥生1-1-1)

E-mail:ichimura@eri.u-tokyo.ac.jp

³東京大学地震研究所教授 (〒113-0032 東京都文京区弥生1-1-1)

E-mail:hori@eri.u-tokyo.ac.jp

⁴首都高速道路株式会社技術部技術推進グループ課長 (〒100-8930 東京都千代田区霞が関1-4-1)

E-mail:k.namikawa610@shutoko.jp

⁵首都高速道路株式会社神奈川建設局建設部長 (〒221-0013 神奈川県横浜市神奈川区新子安1-2-4)

E-mail:h.dobashi118@shutoko.jp

⁶鹿島建設株式会社技術研究所上席研究員 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2の19の1)

E-mail:takemine@kajima.com

⁷鹿島建設株式会社技術研究所研究員 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2の19の1)

E-mail:obarat@kajima.com

⁸鹿島建設株式会社土木管理本部グループ長 (〒107-8348 東京都港区赤坂6-5-11)

E-mail:takimoto@kajima.com

分合流部を有する山手トンネルのランプトンネルを対象に、部材の健全性が検証できる精度でトンネルの構造形状を再現した解析モデルを構築し、三次元地震応答解析を実施した。そして、トンネル全体系の挙動を考慮しながら、分合流部の地震時挙動を、変位、応力、断面力といった設計量で評価した。その結果、ノーズ付近では、トンネル構造断面が変化することに伴い局所的な応力変化はあるものの二次元的な挙動が卓越すること、一方で、本線トンネルとランプトンネルの接合構造区間で断面力が複雑に変化することがわかった。複雑な構造を有する大型トンネルでは、トンネル全体系を対象とした三次元地震応答解析を行うことで耐震安全性が懸念される箇所を漏れなく抽出できる。さらに設計量で三次元解析結果を評価することにより、設計に反映することができる。

Key Words : *underground structure, ramp tunnel, three-dimensional FEM, seismic response analysis, large-scale numerical computation*

1. まえがき

道路トンネルの分合流部は硬質な均質地盤に建設されてきたため、複雑な地震応答が支配的にならないとして、トンネルの二次元横断面を検討対象とした耐震設計が行われてきた。しかし、地上にアクセスするランプトンネルは縦断的に変化するため、分合流部の拡幅構造は同一断面ではな

く、三次元的に複雑となる。また、地盤からトンネルに作用する地震力も深度によって異なる。その結果、横断面だけの評価では捉えることが難しい、三次元的な地震時挙動が顕著になることが懸念されている。

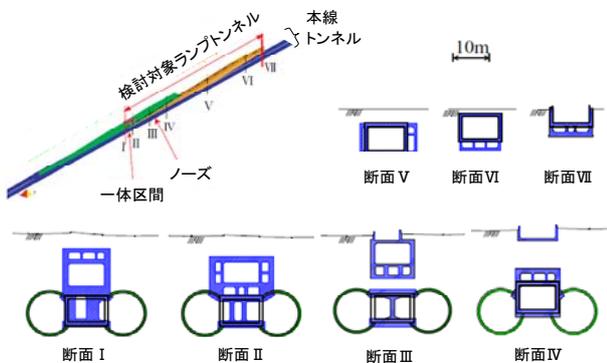
筆者らは、首都高速山手トンネルのランプトンネルを対象に、様々な大規模三次元地震応答解析を実施し、ランプトンネルの特徴的な地震時挙動

を明らかにしてきた(例えば1), 2), 3)。これらの検討では、トンネル全体系の構造のうち特徴的な主要構造を簡易にモデル化した数値解析モデルを用いていた。しかし、現行設計に資するためには、部材の健全性が検証できる精度で、実際の構造をより詳細にモデル化した数値解析モデルを用いる必要がある。また、耐震安全上注目される箇所を合理的に抽出し、三次元的な変位や応力による時系列評価だけでなく、現行設計で利用されている断面力での評価が望まれる⁴⁾。

本論文では、実際のランプトンネルを対象に、トンネル構造を部材の健全性が検証できる精度で構造形状を再現した数値解析モデルを構築する。次いで、当該モデルを対象に三次元地震応答解析を行い、ランプトンネル全体系の地震時挙動を把握する。最後に、新しい接合構造を有する分合流部～接合構造区間を対象に、変位、応力の他に、断面力評価を用いて、接合構造を有するトンネルの地震時挙動を評価する。

2. 解析方法

解析対象とした山手トンネルのランプトンネル構造を図-1に、周辺の地層構造を図-2に示す。ランプトンネルは、2本の本線シールドトンネルの間にRC造で建設される分合流部、ランプトンネル、擁壁部からなる。トンネル軸方向に沿って横断面



※: 太線は本研究における地震応答解析の数値解析モデルを投影した様子

図-1 山手トンネルランプトンネルの構造図

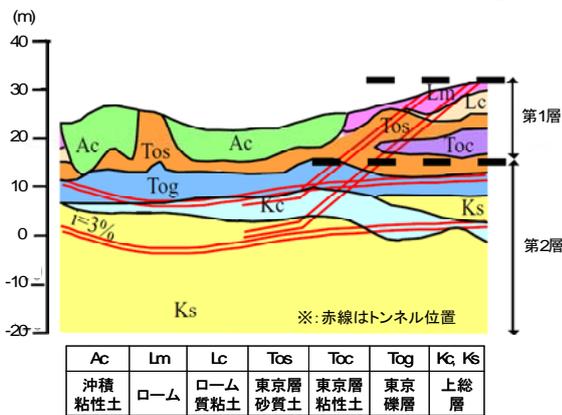
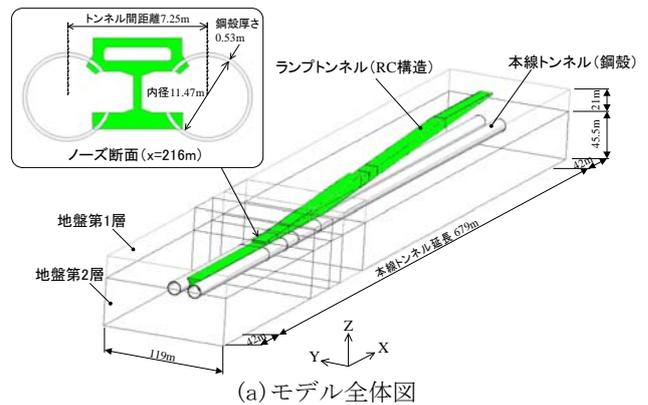


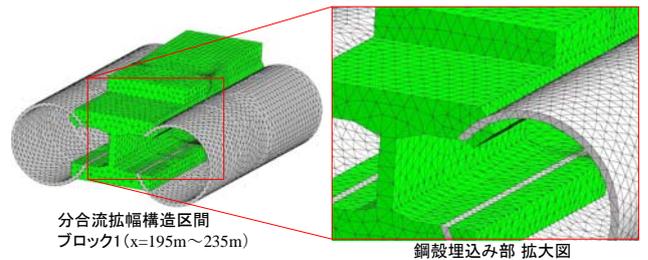
図-2 ランプトンネル周辺地盤の地層構造

が変化し複雑な構造を有する。解析では、ランプトンネルとその周辺地盤を、フルスケールでモデル化した。特に構造が複雑となる分合流部周辺の構造をできる限り再現してモデル化した(図-3参照)。分合流部付近の接合構造は、図-4に示すように、鋼殻とRCの異種構造が接合する箇所で、鋼殻の主桁をRC構造に埋め込む新しい構造形式である。数値解析モデルでは、鋼殻をRC躯体内部まで延長することで、埋め込み部の接合構造をモデル化している。地盤は、弾性波速度を参考に、東京礫層を境に、軟質な表層の第1層(せん断波速度 $V_s=190\text{m/s}$)と、その下位の硬質な第2層($V_s=490\text{m/s}$)からなる2層水平成層地盤としてモデル化する。

解析には文献2)と同じ動弾性解析手法を用いる(解析手法の詳細は文献2)参照)。弾性解析で、地震時の地盤の非線形応答を再現できるように次の工夫を行う。地盤は、SHAKEの等価剛性を用い、レイリー減衰はSHAKEで収束した減衰定数を参考に、後述する目標振動数内で最も誤差が小さくなるようレイリー減衰の係数を決定する。これにより、弾性解析で地盤の非線形応答を疑似的に再現でき



(a) モデル全体図



(b) メッシュ図

図-3 数値解析モデル

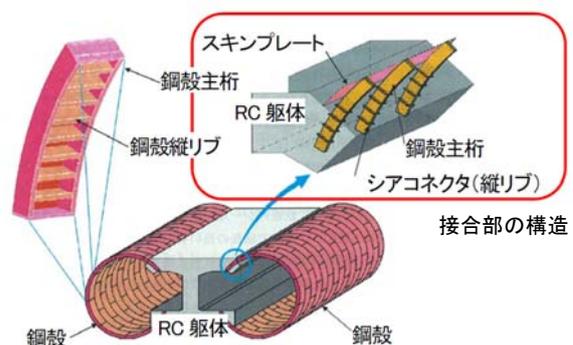


図-4 接合構造形式

る。トンネルのRC構造部分はコンクリートの設計強度40 N/mm²(40 MN/m²)に見合う弾性係数を設定する。鋼製セグメントからなる本線トンネルの鋼殻は、セグメント桁高 0.53 mを有する中実モデルとして、横断面内の曲げ剛性が一致し、さらにトンネル軸方向単位延長当たりの質量が一致するように解析定数を決定する。最終的に決定された解析定数を表-1に示す。

本論文では、首都高速道路の耐震設計で利用されるレベル2地震動のうち「T2E-B-3」地震波(図-5参照)を入力波として用いる。当該地震波を入力すると、自由地盤の固有振動数は1次が0.7 Hz、2次が2.2 Hzとなる。この点を考慮し、周波数成分で3.0 Hzまでの精度を保証した数値解析を行う。本論文では、要素は、地盤、トンネルとも四面体2次要素を用いる。地盤は、目標周波数を保証できる寸法で要素分割し、トンネルはトンネル厚さ方向に1要素を配置するように分割する。最終的な節点数、要素数の総数は、2,456,212節点、1,673,489要素である。なお、要素分割の際には、極端に扁平な要素や微小な要素が発生しないように配慮している。

地震波の入力方向は、トンネル軸直角方向とする。解析モデル底面に「T2E-B-3」地震波を、トンネル軸直角方向に入力する。入力地震波は、等価線形化法を用いて既往設計で想定している耐震設計上の基盤面に入力した地震動をモデル底面に引き戻したものを使う。基盤面は、本線トンネル下面より5 m下がった面である。解析ステップ数は、時間ステップ0.01 sで4096ステップである。

3. 解析結果

計算環境として、intel Xeon5680 (6コア, 3.33 GHz, キャッシュメモリ12MB)を二個、12枚の4GBのメモリ(DDR3-1333 ECC)を搭載した計算機を1ノードのみ用いた。入力地震動40.95 sを時間ステップ0.01 sで計算する場合、ステップ数は4096、計算時間は約4日である。PCクラスタなどの高度な計算機環境を用いずとも、実務設計で使用できる計算時間を達成している。

全時刻で応力最大値と応力最大値が発生するステップを抽出すると、トンネル応答が最大となる一時点として1777ステップが抽出される。そこで、1777ステップのトンネル応答を図-6、図-7に示す。ランプトンネルは、地盤応答に追従して、地震動入力方向にトンネルが変形し、発生応力は横断面内の主にせん断変形に起因した応力の他にトンネル軸方向の曲げやねじり、回転に伴う応力が付加される。軟質な第1層内のトンネル、特に地層境界付近でトンネルに発生する応力が增大する。第1層で大きく変形したランプトンネルの応答は、地層境界に近接する第2層の浅い部分に位置するトンネル応答にわずかながら伝達する。これらの特

表-1 解析定数

	質量 ρ (kg/m ³)	せん断波速度 V_s (m/s)	ポアソン比 ν	減衰定数 $h(-)$
地盤第1層	1500	60	0.45	0.25
地盤第2層	2000	400	0.45	0.04
本線トンネル	609	3372	0.3	-
ランプトンネル	2500	2299	0.15	-

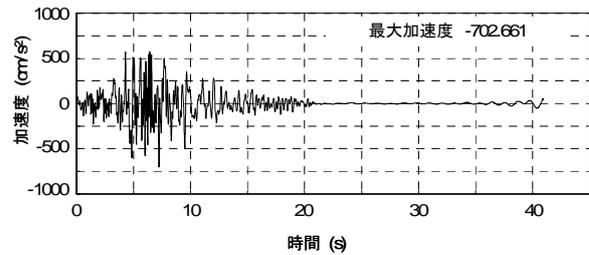


図-5 設計地震動「T2E-B-3」

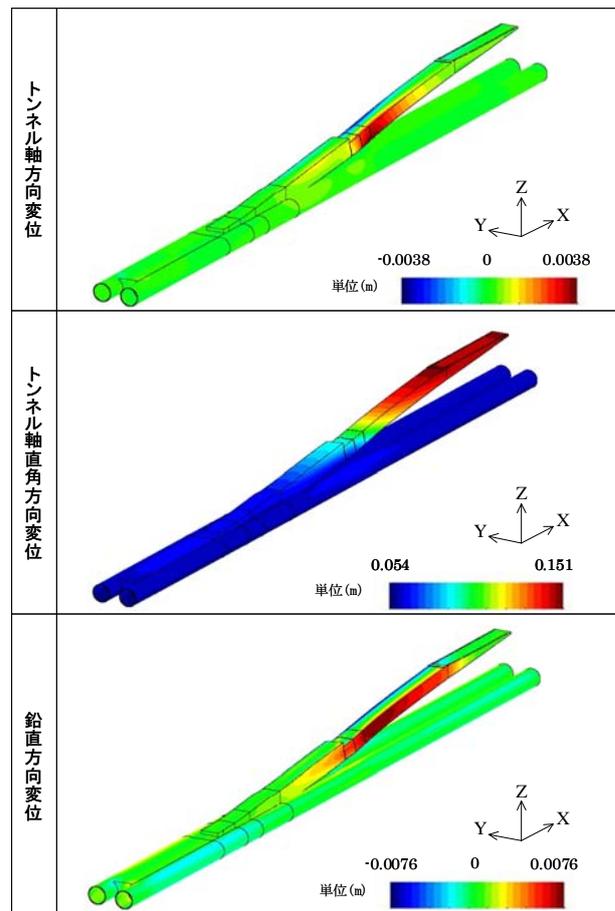


図-6 変位分布 (トンネル応答最大時)

徴は既往研究(例えば1), 2), 3)と同様である。この他に、忠実にモデル化したトンネル構造変化部で局所的に応力が変化することがわかる。

図-8では、全時刻にわたり抽出した直応力の最大値を、それぞれRC構造部分、鋼殻部分について分布図として整理している。地盤構造が変化する地層境界付近やトンネル構造変化部での応力の変化がより鮮明に確認できる。また、各断面での最大値が発生する時間ステップを表示することも可能である。これらの表示は、膨大なデータ量となる三次元地震応答解析結果から、耐震設計で検討する箇所（例えば、耐震安全性が懸念される箇所）や時間ステップを絞り込む際に有益である。

図-8から、接合構造を有する第2層内のトンネル区間の応答の特徴として、トンネル構造の変化点となるノーズ付近で局所的に応力が増大すること、及び本線トンネルとランプトンネルの接合構造区間で応力の変化が著しいことがわかる。接合構造を有する区間の耐震安全性は、構造的に複雑なことから、本線トンネルの安全性に直結すること、さらに新しい接合構造を有していることから、特に重要である。そこで、接合構造を有する第2層のトンネル応答に着目する。

ノーズを含む分合流拡幅構造区間（ $x=195\text{m} \sim 235\text{m}$ 、以降、ブロック1）、並びに本線トンネルとランプトンネルの接合構造区間（ $x=260\text{m} \sim 310\text{m}$ 、以降、ブロック2）の鉛直応力の分布を図-9に示

す。トンネル軸直角方向に地震波が入力する場合、ブロック1では、トンネル縦断方向の応力の変化が小さく、横断面における二次元的な挙動が支配的である。一方、ブロック2は、トンネル軸方向に沿って応答が変化する。主な要因としてトンネル深度が変化するため地盤からトンネルへの作用力が異なることが考えられる。その他に、埋め込み部やトンネル断面の構造変化、さらに地層境界に近接する箇所ではトンネル軸方向の挙動を受けることから、三次元的な応答を示すと考えられる。

ブロック2の鋼殻に発生する横断面内の曲げモーメントの変化を図-10に示す。接合構造区間の曲げモーメントはトンネル軸方向に沿って変化する。埋め込み部に隣接する鋼殻（以降、接合部）で曲げモーメントも変化する。接合部の断面力は、新しい接合形式である埋め込み部の外力となることから重要である。接合部で曲げモーメントが増大する $x=282.0\text{ m}$ の横断面の曲げモーメント分布を図-11に整理する。接合部付近で断面力が急激に増大することが確認される。三次元解析を行い、変位や応力の他に断面力で評価することにより、複雑な構造を有するトンネルの挙動を詳細に分析でき、設計に反映することができる。

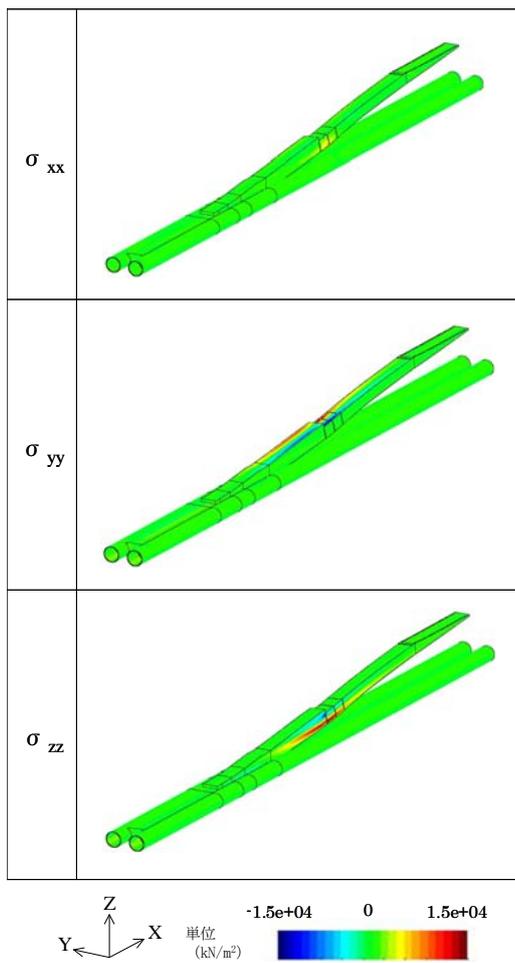


図-7 応力分布（トンネル応答最大時）

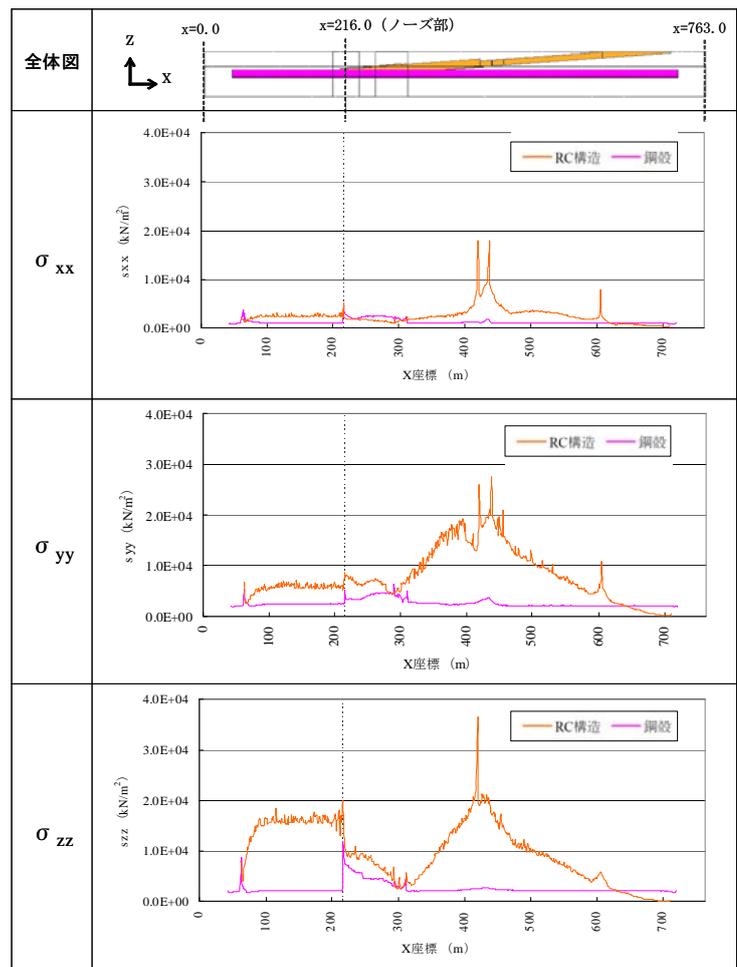


図-8 最大応力分布

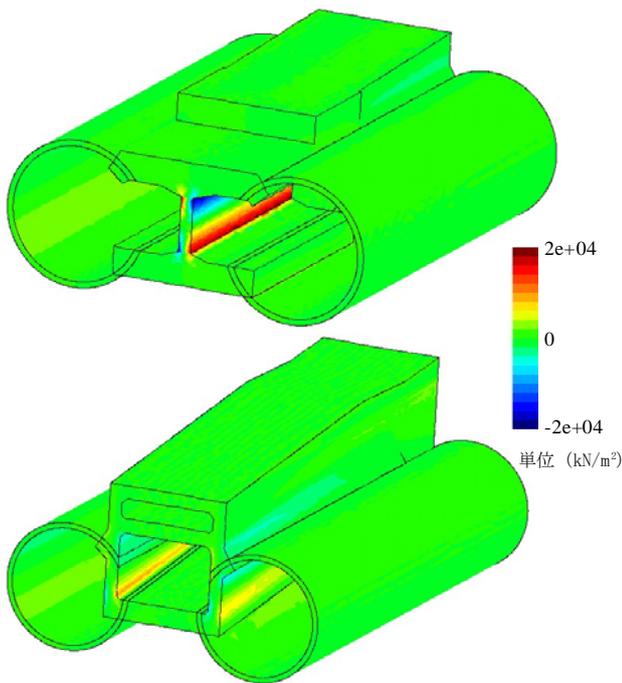


図-9 鉛直応力分布（上段：ブロック1，
下段：ブロック2，トンネル応答最大時）

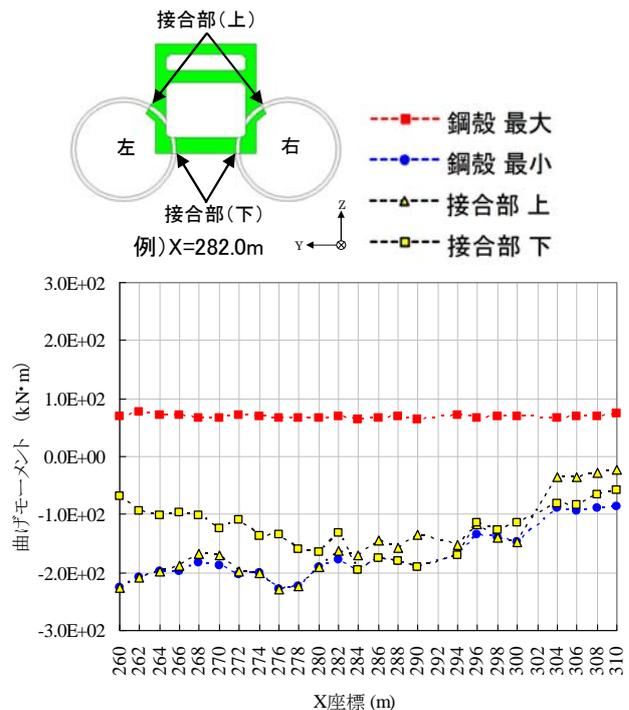


図-10 鋼殻に発生する曲げモーメント分布
(ブロック2，左鋼殻，トンネル応答最大時)

4. まとめ

分合流部を有する山手トンネルのランプトンネルを対象に、部材の健全性が検証できる精度でトンネルの構造形状を再現した解析モデルを構築し、三次元地震応答解析を実施した。そして、トンネル全体系の挙動を考慮しながら、分合流部の地震時挙動を、変位、応力、断面力といった設計量で評価した。その結果、ノーズ付近では、トンネル構造の変化に伴い局所的な応力変化はあるものの二次元的な挙動が卓越すること、一方で、本線トンネルとランプトンネルの接合構造区間で断面力が複雑に変化することがわかった。複雑な構造を有する大型トンネルでは、トンネル全体系を対象とした三次元地震応答解析を行うことで耐震安全性が懸念される箇所を漏れなく抽出できる。さらに設計量で三次元解析結果を評価することで、設計に反映することができる。

謝辞：本研究の実施にあたり、首都高速道路(株)の住吉英勝氏、津野和宏氏に温かいご指導をいただいた。また、鹿島建設(株)の沖見芳秀氏、多田幸夫氏、石井晃氏並びに地震予知総合研究振興会の大保直人氏（元 鹿島建設）には有益なコメントをいただいた。ここに記して感謝の意を表したい。

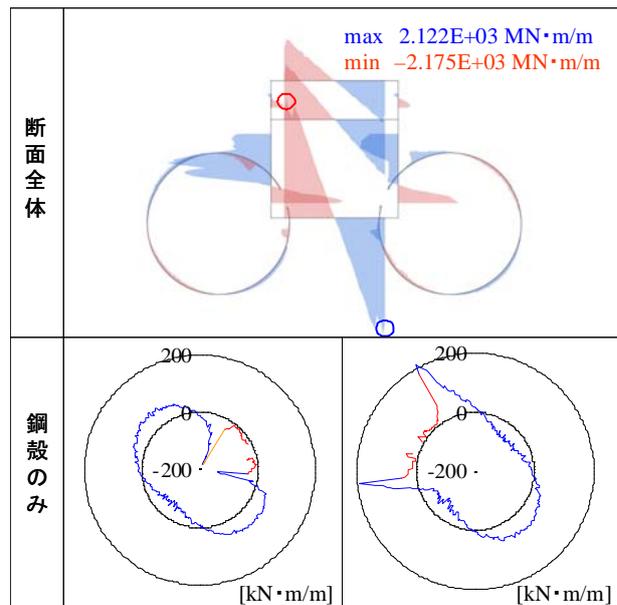


図-11 横断面内の曲げモーメント分布
(x=282.0m，トンネル応答最大時)

参考文献

- 1) 土橋浩, 市村強, 大保直人, 堀宗朗, 山田岳峰, 複雑な構造を持つ大型トンネルの地震応答に対する大規模三次元数値解析の必要性の検討, 土木学会論文集A, Vol.64, No.3, pp.639-652, 2008 .
- 2) Dobashi, H.,Hatsuku, T.,Ichimura, T.,Hori, M.,Yamada, T., Ohbo, N., Moriguchi, M. ,Itami, H.: Full 3D seismic response analysis of underground ramp tunnel structure using large-scale numerical computation, Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, 2008.
- 3) 山田岳峰, 市村強, 堀宗朗, 土橋浩, 大保直人: 大規模三次元数値解析を用いたランプトンネルのレベル2地震時挙動評価, 第31回地震工学研究発表会, 2011 (投稿中) .
- 4) 土橋浩, 寺島善宏, 堀宗朗, 市村強, 大保直人, 沖見芳秀, 山田岳峰, 小原隆志: 大型トンネルを対象とした3次元FEM地震応答解析の有限要素分割に関する基礎検討, 土木学会第65回年次学術講演会, pp.829-830, 2010.

3D SEISMIC RESPONSE OF LARGE ROAD TUNNEL WITH DIVERGENCE/ CONFLUENCE PART AND STUDY ON EVALUATION OF DESIGN QUANTITIES

Mitsumasa OSADA, Tsuyoshi ICHIMURA, Muneo HORI, Kenji Namikawa, Hiroshi DOBASHI, Takemine YAMADA, Takashi OBARA and Kunihiko TAKIMOTO

In this study, detailed 3D analysis model of ramp tunnel with divergence and confluence part in the Yamate tunnel is adopted in the 3D earthquake response analysis.

Earthquake response of divergence and confluence part is evaluated by design quantities such as displacement, stress and section force considering behavior of the whole tunnel. The results are obtained as follows:

- i) Two-dimensional behavior is distinguished around nose part in hard layer.
- ii) Section force greatly changes in the part where main tunnel and exit/entrance tunnel join.

In the case of large tunnel with complicated structure, anxious part about earthquake-resistant safety can be extracted by conducting 3D seismic response analysis for the whole tunnel system. A three-dimensional analysis can be contributed to the design by evaluating the analysis result by design quantities.