

大規模三次元数値解析による ランプトンネルの地震時挙動評価

山田 岳峰¹・土橋 浩²・堀 宗朗³・市村 強⁴・大保 直人⁵

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

E-mail: takemine@kajima.com

²正会員 首都高速道路株式会社 神奈川建設局 (〒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

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

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

⁴正会員 東京大学 准教授 地震研究所 (〒113-0032 東京都文京区弥生1-1-1)

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

⁵正会員 財団法人地震予知総合研究振興会 (〒101-0064 東京都千代田区猿樂町 1-5-18)

E-mail: ohbo@8f.adept.or.jp

筆者らは、大規模三次元数値解析技術を用いて、首都高速中央環状新宿線山手トンネルの実際のランプトンネルを対象に様々な地震応答解析を実施してきた。

本報告では、ランプトンネルの特徴的な地震時挙動を、既往の解析事例を踏まえて、説明する。三次元数値解析によって、トンネルの複雑な応答を、設計量を用いて定量的に評価できる。例えば、地層境界付近の出入口トンネルで三次元的な応答が集中すること、構造目地を模した剛性低下部をトンネルに配置することでトンネルの発生応力を低減できることなどを明らかにする。次に、三次元数値解析の利点と課題を整理し、ランプトンネルをはじめとした大型トンネルの耐震設計への三次元数値解析の適用性について考察する。最後に、トンネル全体系の地震時挙動を考慮した大型トンネルの耐震設計法を紹介する。

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

1. まえがき

「大深度地下の公共的使用に関する特別措置法」(平成13年4月)¹⁾により、高速道路や鉄道を大深度地下に構築する計画が具体化されつつある。実際、首都圏三環状道路網整備の一環として、首都高速中央環状新宿線(以下、山手トンネルという)や品川線の整備が山手通り直下の深度20~40mにおいて大断面トンネル方式で進められている。長年にわたって各地で建設された地下鉄に比べ、大深度に置かれた大断面を持つ大型トンネルは、建設の実績が乏しい。高速道路トンネルは、重要度の高い公共構造物で、地震時に被災すると、その社会的損失が大きい。十分な安全性を確保しつつ、合理的な構造物を設計することが望まれている。

地下高速道路の整備では、地上へのアクセスとして分合流部を有するランプトンネルが必要となる。大型で複雑な構造となる分合流部を有するランプトンネルは、

地震時に、トンネル横断方向のせん断変形に加えて、トンネル軸方向の挙動や、構造変化部の局所的な挙動など、トンネル~地盤相互作用により、三次元的に複雑な挙動を示す。この挙動は、トンネルの横断面を対象とした二次元解析や、トンネル~地盤系を簡易な質点系モデルに置き換えた応答変位法などの既往設計法に基づく検討では十分に評価できない。三次元挙動を考慮した耐震設計あるいは耐震設計照査が望まれる。

そこで、筆者らは、仮想的なランプトンネルを対象とした検討^{2)~4)}を経て、大規模三次元数値解析技術を開発し、山手トンネルの実際のランプトンネルを対象にこれまでに様々な地震応答解析を実施してきた^{5)~15)}。本報告では、これまでの解析事例を踏まえ、ランプトンネルの特徴的な地震時挙動を具体的に説明する。次に、大型トンネルの耐震設計への三次元数値解析の適用性に関して考察し、最後に、現在の研究構想を紹介する。

2. ランプトンネルの地震時挙動

(1) 地震応答解析の概要

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、周辺の地盤構造を図-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、出入口トンネル、擁壁部からなる。トンネル軸方向に沿って横断面が変化し複雑な構造を有する。トンネルは、最大幅35m程度、最大高さ25m程度の大断面を有する大型かつ延長方向にも長大なトンネルである。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、図-3に示すように簡易化してモデル化する。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層と、その下位の硬質な第2層からなる2層水平成層地盤としてモデル化する。

解析は動弾性解析を行う。弾性解析で、地震時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、レイリー減衰を調整して地表面の最大変位がSHAKE解析結果とほぼ一致するようにその解析定数を設定する。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/mm^2 (40 MN/m^2)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。

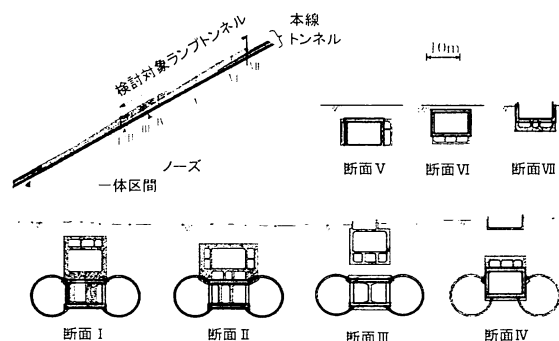
解析モデル底面に首都高速道路の設計地震動¹⁰⁾に相当する地震波を入力する。地震波の入力方向は、トンネル軸方向、軸直角方向の2種類とする。以上、解析方法の詳細は関連研究^{3,8)}を参照されたい。

(2) 特徴的な地震時挙動

これまでに、レベル1地震動並びにレベル2地震動が作用するときのトンネル挙動^{8) - 12)}、及び地層境界付近の出入口トンネルに構造目地を模した剛性低下部を配置したときのトンネル挙動^{13) - 15)}、それぞれについて地震時挙動を評価している。以降、これらの既往研究を踏まえ、ランプトンネルの特徴的な地震時挙動について説明する。

a) 地震動をトンネル軸方向に入力する場合

トンネル軸方向に地震力が作用すると、軟質な第1層で地盤変形が増大し、図-4の解析例に示すように、ランプトンネルがトンネル軸方向に圧縮または伸張し、出入口トンネルで軸方向の直応力となる σ_{xx} が増大する。増大箇所は、地層境界付近から第1層の中ほどの範囲の出入口トンネル、及び構造変化点付近の擁壁部である。 σ_{xx} の最大値はレベル1地震時に約 2 MN/m^2 、レベル2地震時に約 15 MN/m^2 である。これらの地震時増分応力は、



※: 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

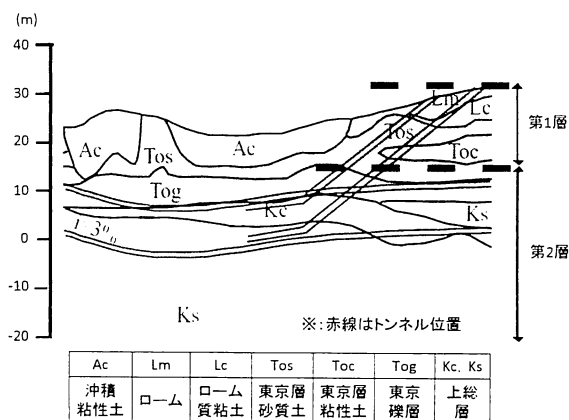


図-2 ランプトンネル周辺地盤の地層構造

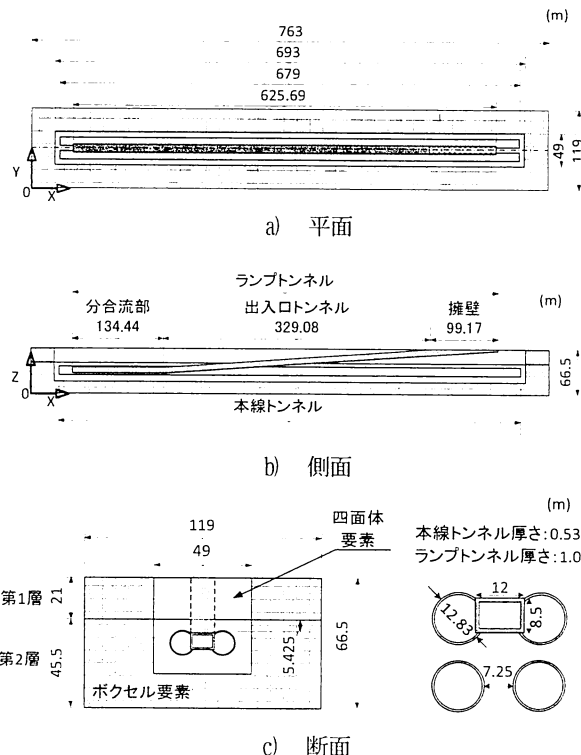


図-3 三次元数値解析モデル

RCのコンクリート圧縮強度の特性値 (30 MN/m^2)に対して、それぞれ7%, 50%に相当する。その他に地層境界付近のトンネル側壁内のせん断応力が増大する。これらの

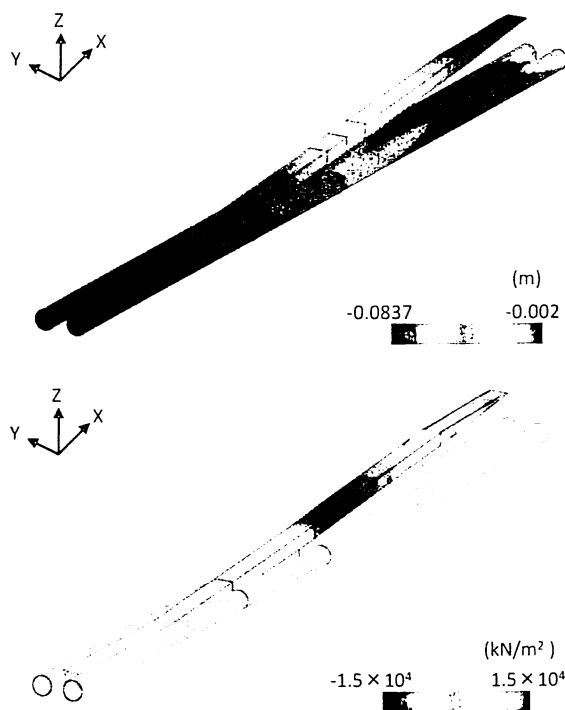


図4 トンネル応答（レベル2地震動 軸方向入力）
上段： u_x 下段： σ_{xx}

応力成分の増加は、トンネルの軸方向の断面力のうち、軸力並びにせん断力の増大につながる。

b) 地震動をトンネル軸直角方向に入力する場合

トンネルの応答例を図-5に示す。トンネル軸直角方向に地震力が作用すると、ランプトンネルには、主に、横断面のせん断変形、並びにトンネル軸直角方向に沿った変形が作用する。トンネルの応答は地層境界付近で集中し、レベル1地震動よりも、レベル2地震動の方が集中が激しくなる。図-6は、地層境界付近の横断面の応答を、同一断面の2次元地震応答解析結果と比較したものである。2次元解析と3次元解析は一致しないことがわかる。応答が集中する地層境界付近では、3次元挙動が卓越する。また、トンネル軸方向の変形モードは地震動のレベルや種類によって変化する^{11) 12)}。この事実は、ランプトンネルのように長大な大型トンネルでは、地震応答解析が必要なことを示唆している。

各応力成分の分布図を図-7に示す。主要成分は、直応力3成分と横断面内の面内せん断力である。入力方向の面外となる σ_{xx} も増大する。最大応力はレベル1地震時に約3.5MN/m²、レベル2地震時に約17 MN/m²である。これらは、RCのコンクリートの圧縮強度の特性値に対して12%、57%の地震時増分応力に相当する。

地層境界付近の横断面の断面力分布図を図-8に示す。地層境界を挟む横断面ではせん断が卓越し、地層境界を貫けた横断面では曲げモーメントが卓越する。図-9は、鉛直軸廻り曲げモーメントのトンネル軸方向分布図である。地層境界付近で曲げモーメントが増大する。

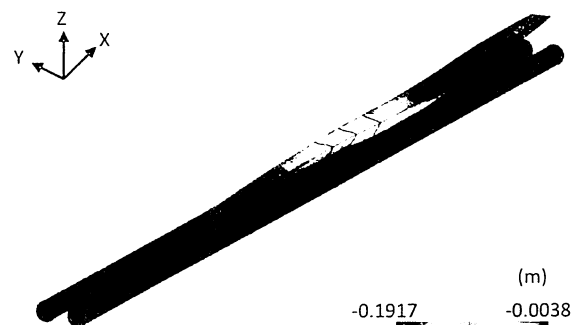


図-5 トンネル応答（レベル2地震動 軸直角方向入力） u_y

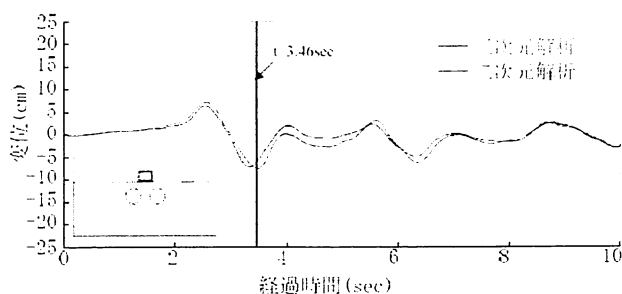


図-6 三次元解析と二次元解析の比較¹¹⁾
(比較位置：ランプトンネル躯体の隅角部応答変位)

c) 構造目地の耐震効果

応答が集中する地層境界付近にスリッパータイプの構造目地（目地幅0.02m）を配置する。解析では、RCのコンクリート弾性定数から剛性を低減させた剛性低下部を0.5m幅で配置することで、構造目地を模擬する。

剛性低下部を設置すると、剛性低下部でトンネルに発生する変位を吸収し、剛性低下部周辺の出入口トンネルに発生する応力が減少する。レベル2地震動がトンネル軸方向に作用する場合の解析結果の一例を図-10に示す。剛性低下部（元剛性に対する剛性低下の割合を1/10000に低減）を設置すると、設置しない場合と比べて、出入口トンネルに発生する応力 σ_{xx} が広範囲にわたり半減することが分かる。このとき、剛性低下部には0.09mの軸変位が発生する。解析によって、剛性低下部の応力と変位が評価できる。したがって、解析結果を目地部の設計に資することができる。なお、応力低減効果は、軸直角方向入力の場合も確認されている¹⁵⁾。

3. 三次元数値解析の適用性に関する考察

トンネルをフルスケールでモデル化した三次元数値解析を実施することで、ランプトンネルのような大規模で複雑な構造を有する大型トンネルの地震時挙動を評価できることがわかった。三次元数値解析を行うことで耐震安全性が課題となる箇所を絞り込み、当該断面を対象に適切な設計を行うことができる。また、応力ベースの

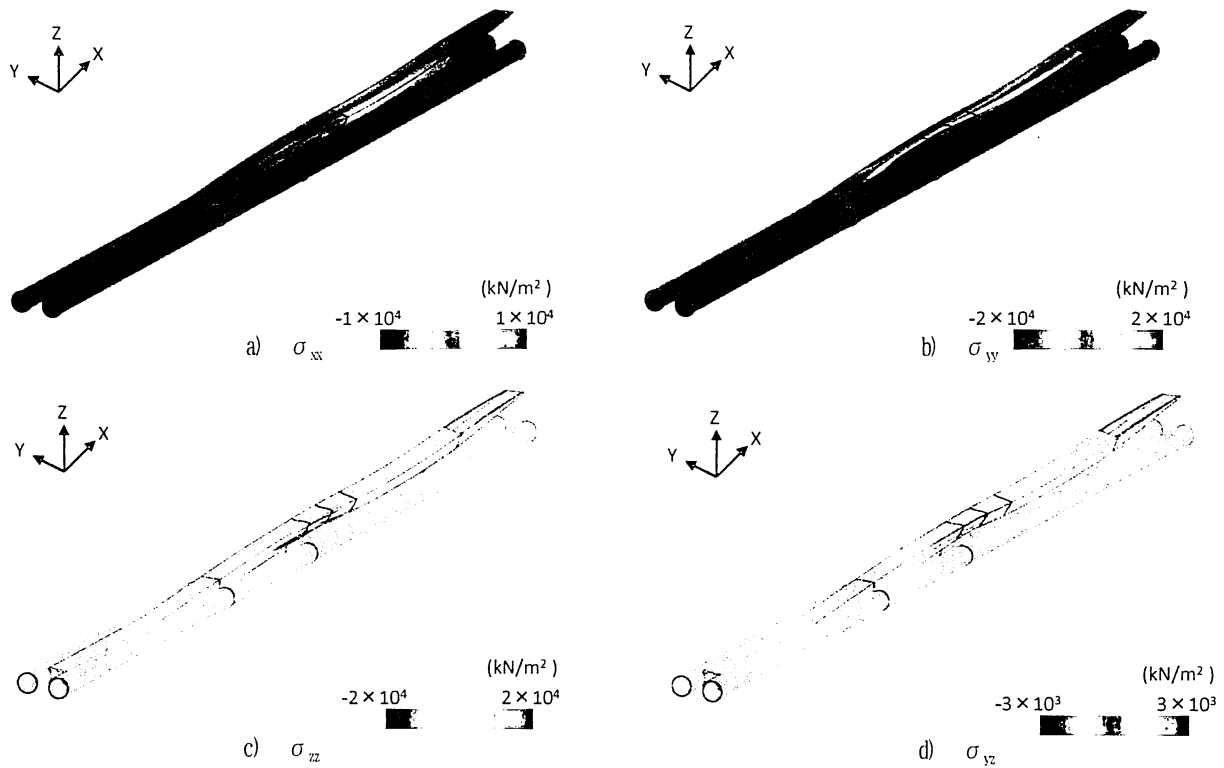
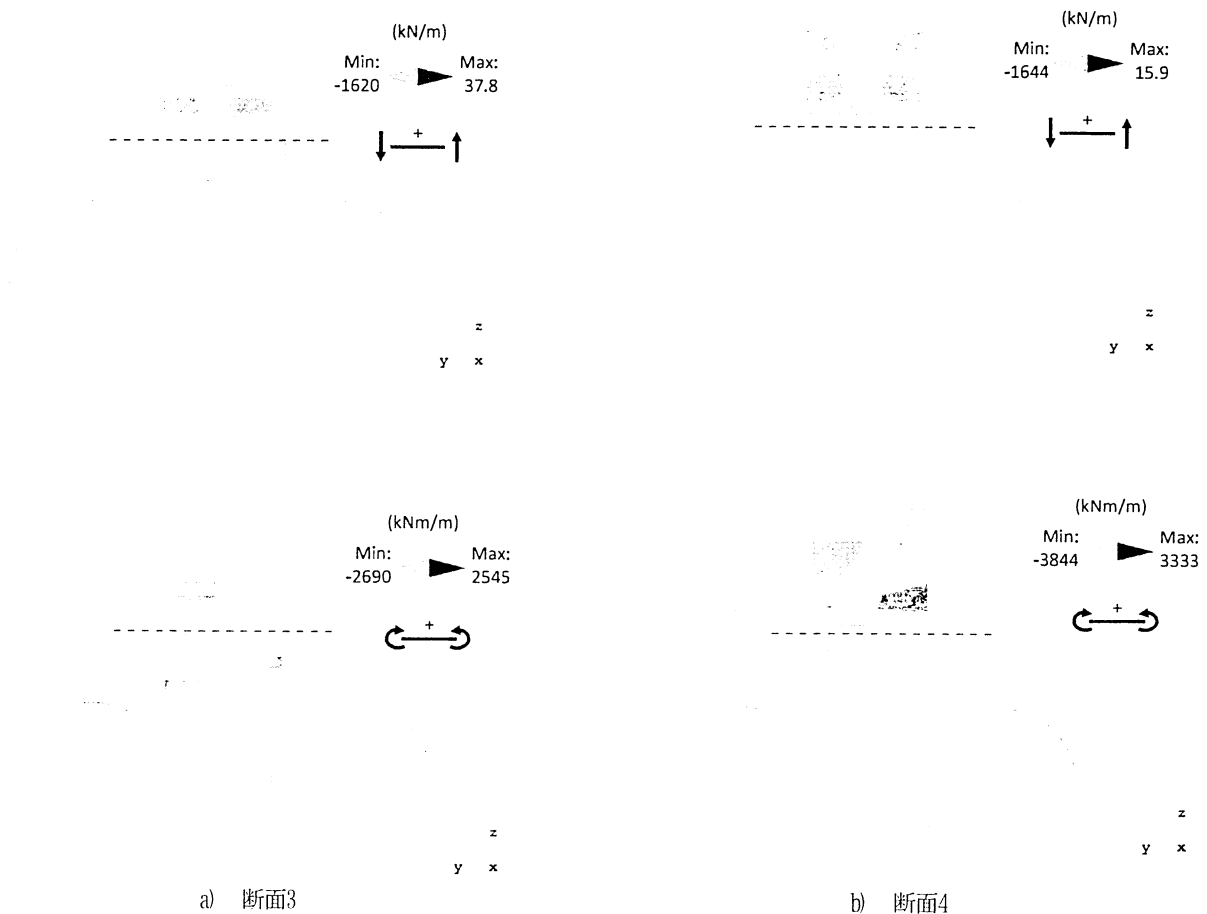


図-7 主要応力成分の分布（レベル2地震動 軸直角方向入力）



a) 断面3

b) 断面4

図-8 地層境界付近の横断面の断面力分布図（レベル2地震動 軸直角方向入力）

上段：せん断力 下段：曲げモーメント 注）図中、破線は地層境界

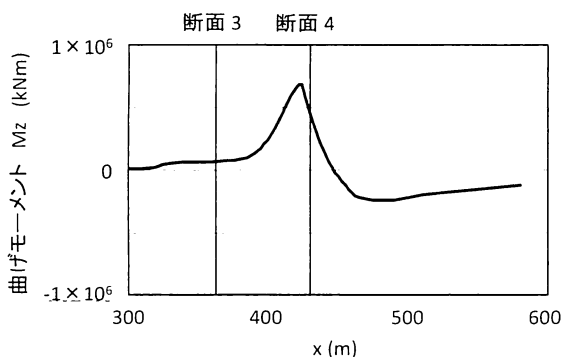


図-9 トンネル軸方向に沿った鉛直軸廻り曲げモーメントの分布（レベル2地震動 軸直角方向入力）

評価の他、解析結果から任意の横断面で変位や断面力を換算できるので、既往設計に準じた設計評価も可能である。さらに、三次元数値解析では、詳細構造をモデル化して様々な入力地震動について応答を評価できる。したがって、合理的な耐震設計が可能になる。

三次元数値解析を利用し、大型トンネルの設計検討を行う場合の主な技術課題として、

- ・大規模計算への対応、
- ・解析に要する計算時間の短縮、
- ・非線形解析の導入、

が挙げられる。実際のランプトンネルを精緻にモデル化するほど、解析モデルが大規模になり、計算時間を要することになる。実務では決められた期間内で設計検討を行うことが必要である。計算時間は短いほど良く、数百万自由度の大規模計算を数日以内で計算できる高速化が求められる。レベル2地震動では相応な応力が発生しており、耐震安全性が課題となる箇所では構造物の応答が非線形領域に至ることが予想される。このような箇所の評価を行う場合、当然ながら非線形解析の実施が望まれる。実際、RCや鋼構造を対象とした精緻な大規模三次元非線形数値解析技術は実務適用に近い水準にある^{17)・18)}。なお、非線形解析の実施は、評価精度の向上が期待できる一方で、計算時間の増大に繋がる可能性があるので注意が必要である。

これまでに考察した三次元数値解析の利点と課題を踏まえ、筆者らは、実設計に供し得るランプトンネルの解析モデルを対象に、より現実的な地震時挙動評価に関する研究に着手している^{19)・20)・21)}。階層型解析技術²²⁾を導入することで計算コストの低減を図る。トンネル全体系の地震時挙動を考慮した、当該研究の耐震安全性評価の考え方を図-11に示す^{19)・23)}。分合流部など複雑な構造を有する大型トンネルの場合、トンネル全体系を対象に個々の構造部位の耐震安全性を検討できるレベルまで精緻なモデル化を行うと、計算規模が膨大となり非効率である。そこで、最初に全体的な挙動を損なわない精度

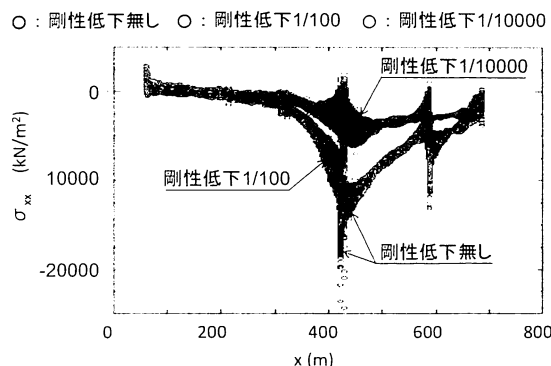


図-10 剛性低下部を配置したときのトンネルの応力分布¹⁵⁾

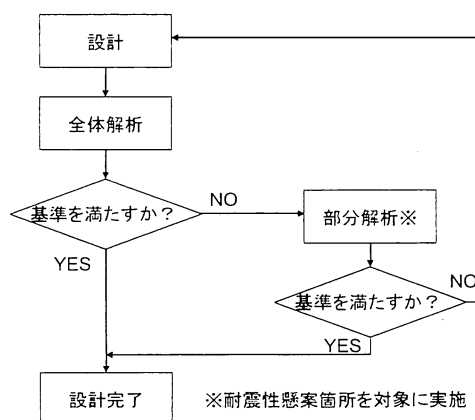


図-11 全体系応答を考慮した大型トンネルの耐震設計フロー^{19)・23)}

のモデルで全体解析を実施し、その結果から耐震安全性が課題となる箇所を抽出する。その後、当該箇所を対象に設計照査できる程度まで詳細にモデル化した部分解析を全体解析結果と整合するように行う。即ち、全体解析結果を部分解析の外力として負荷する。そうすることで、計算コストを抑えつつ、大型トンネルの耐震安全性を合理的に評価できる。部分解析は非線形解析として行うことも可能である。

4 あとがき

東京湾横断道路アクアトンネルでは、レベル2地震動を考慮した先進的な耐震設計が行われている²⁴⁾。しかしながら、その後、一部の検討²⁵⁾を除き、本邦におけるトンネルの耐震設計は、実務では、二次元の応答変位法あるいは応答震度法による域にあると思われる。大型トンネルの建設は、世界的規模で進められつつある^{26)・27)}。地震国では、今後、耐震設計でトンネル構造が決まるプロジェクトも増加することが予想される。将来の地震に備えて、良質な社会資本の効率的な整備が本邦における

喫緊の課題である。また、建設産業・建設市場のグローバル化に伴い建設技術の国際競争力の強化が求められている。複雑な構造を有する大型トンネルの耐震設計を行う場合、従来法による検討に加え、三次元数値解析を活用してトンネル設計を合理化する取り組みが必要である。

参考文献

- 1) 大深度地下の公共的使用に関する特別措置法，平成12年5月26日法律第87号（最終改定平成15年7月24日法律第125号），2000年。
- 2) Ohbo, N., Horikoshi, K., Yamada, T., Tachibana, K. and Akiba, H.: Dynamic Behavior of a Underground Motorway Junction due to Large Earthquake, *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, paper No.1215, 2004.
- 3) 山田岳峰，市村強，大保直人，佐茂隆洋，池田清宏，堀宗朗：大規模三次元FEM解析による地下複雑構造物の地震時挙動，応用力学論文集，Vol.7，pp.909-916，2004年。
- 4) 山田岳峰，市村強，大保直人，佐茂隆洋，池田清宏，堀宗朗：トンネルランプ構造部の地震応答特性と耐震対策工，構造工学論文集，Vol.51A，pp. 561-568，2005年。
- 5) 市村強，土橋浩，落合栄司，山田岳峰，伊丹洋人，大保直人，森口敏美，堀宗朗：センターランプ式トンネルを対象とした三次元地震時挙動の検討概要と解析手法の開発，第42回地盤工学研究発表会，pp.1615-1616，2007年。
- 6) 土橋浩，落合栄司，市村強，山田岳峰，伊丹洋人，大保直人，森口敏美，堀宗朗：センターランプ式トンネルを対象とした三次元地震応答解析のための解析領域の検討，第42回地盤工学研究発表会，pp.1617-1618，2007年。
- 7) 山田岳峰，土橋浩，落合栄司，市村強，伊丹洋人，大保直人，森口敏美，堀宗朗：センターランプ式トンネルを対象とした三次元地震時挙動の評価，第42回地盤工学研究発表会，pp.1619-1620，2007年。
- 8) 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年。
- 9) 波津久毅彦，土橋浩，大保直人，山田岳峰，伊丹洋人，森口敏美，市村強，山木洋平，堀宗朗：センターランプ式トンネルの三次元地震時挙動における三次元効果，第61回土木学会年次学術講演会，2007年。
- 10) 波津久毅彦，土橋浩，大保直人，森口敏美，山田岳峰，伊丹洋人，市村強，堀宗朗：センターランプ式トンネルを対象とした三次元地震時挙動の評価ー様々な入力地震動に対するトンネルの応答評価ー，第43回地盤工学研究発表会，2008年。
- 11) 波津久毅彦，土橋浩，大保直人，山田岳峰，伊丹洋人，森口敏美，市村強，堀宗朗：センターランプ式トンネルの三次元地震時挙動における三次元効果について（その2），第62回土木学会年次学術講演会，2008年。
- 12) Dobashi, H., Hatsuku, T., Ichimura, T., Hori, M., Yamada, T., Ohbo, N., Moriguchi, M. and 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.
- 13) 大保直人，山田岳峰，伊丹洋人，森口敏美，土橋浩，波津久毅彦，市村強，山木洋平，堀宗朗：センターランプ式トンネルの三次元地震時挙動における構造目地の耐震性能効果，土木学会第62回年次学術講演会，pp. 1075-1076，2007年。
- 14) 大保直人，土橋浩，波津久毅彦，森口敏美，山田岳峰，伊丹洋人，市村強，堀宗朗：センターランプ式トンネルの三次元地震時挙動における構造目地の耐震効果（その2），土木学会第63回年次学術講演概要集，2008年。
- 15) 山田岳峰，大保直人，伊丹洋人，森口敏美，堀宗朗，市村強，土橋浩：センターランプ式トンネル出入口部に設置する剛性低下部の耐震効果，土木学会第65回年次学術講演会，2010年。
- 16) (財)首都高速道路厚生会：首都高速道路トンネル構造物設計要領（耐震設計編），2003年。
- 17) 牧剛史，土屋智史，渡辺忠明，前川宏一：3次元非線形有限要素法を用いたRC杭基礎-地盤系の連成地震応答解析，土木学会論文集A，Vol.64，No.2，pp.192~207，2008年。
- 18) Hori, M., Oguni, K., Takahashi, Y., Maki, T., Okazawa, S. and Yamashita, T.: Application of PDS-FEM to seismic failure analysis of reinforced concrete bridge pier, *Proceedings of III ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*, COMPDYN 2011, Corfu, Greece, 26-28 May 2011.
- 19) 土橋浩，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，2010年。
- 20) Yamada, T., Hori, M., Ichimura, T., Dobashi, H., Terashima, Y., Ohbo, N. and Obara, T.: Three-dimensional seismic response analysis of underground ramp tunnel structure using massive numerical computation, *Proceedings of ITA-AITES 2011 World Tunnel Congress*, Helsinki, Finland, 20-26 May, 2011.
- 21) Dobashi, H., Terashima, Y., Hori, M., Ichimura, T., Ohbo, N., Yamada, T. and Obara, T.: Seismic performance analysis of underground ramp tunnel structure using 3-D massive numerical computation, *Proceedings of III ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*, COMPDYN 2011, Corfu, Greece, 26-28 May 2011.
- 22) Ichimura, T. and Hori, M.: Structural seismic response analysis based on multiscale approach of computing fault-structure system, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol.38, pp. 439-455, April 2009. DOI: 10.1002/eqe.861.
- 23) 山田岳峰，市村強，大保直人，堀宗朗，伊丹洋人，鈴木孝：トンネル全体系の耐震性評価法に関する検討，土木学会地震工学論文集，2007年。

- 24) 例えば, 新村忠, 金井誠: アクアラインシールドトンネルの耐震設計・構造の概要, 基礎工, 第 30 巻, 12 号, pp.47-56, 2002 年.
- 25) 例えば, 小野祐輔, 清野純史, 浜田信彦, 李圭太, 玉井達毅: 堤防盛土に隣接する半地下 RC 道路トンネルの地震時挙動, 構造工学論文集, Vol.51A, pp.569-578, 2005 年.
- 26) 例えば, Belkaya, H., Ozmen, I., H. and Karamut, I.: The Marmaray project: Man-aging a large scale project with various stake holders, *Proceedings of the World Congress on Engineering* 2008 Vol II, London, U.K., 2008.
- 27) 例えば, Olsen, T., Tonnesen, M., Yue, C., Zhou, L., H. and Xiaoqi, X.: Selection of immersed tunnel type for Hong Kong - Zhuhai - Macao Fixed Link, *Proceedings of ITA-AITES 2011 World Tunnel Congress*, Helsinki, Finland, 20-26 May, 2011.

EVALUATION OF SEISMIC PERFORMANCE OF A LARGE-SCALE RAMP TUNNEL STRUCTURE BY MASSIVE NUMERICAL COMPUTATION

Takemine YAMADA, Hiroshi DOBASHI, Munee HORI, Tsuyoshi ICHIMURA
and Naoto OHBO

The authors have conducted various seismic response analyses using a large-scale 3D numerical analysis method on an actual ramp tunnel structure in the YAMATE tunnel. This report reviews the remarkable seismic performance of the ramp tunnel structure in reference to past research. Evaluation with design values is effective for explaining complex behaviors such as the 3D response of the exit/entrance tunnel around the ground interface and the effect of allocating a structural joint around the ground interface to reduce stress occurring in the tunnel. Then, the applicability of 3D analysis to the design of large tunnels is discussed. Finally the authors introduce a newly proposed seismic design flow chart with 3D analysis.