

開削トンネルの縦断方向の 地震時挙動に関する一考察

小林 雅彦¹・山本 泰幹²・大竹 省吾³・井上 陽介⁴・梅林 福太郎⁵

¹正会員 首都高速道路株式会社 神奈川管理局 (〒221-0044 神奈川県横浜市神奈川区東神奈川1-3-4)
E-mail: m.kobayashi1361@shutoko.jp

²正会員 首都高速道路株式会社 神奈川管理局 (〒221-0044 神奈川県横浜市神奈川区東神奈川1-3-4)

³正会員 株式会社オリエンタルコンサルタンツ 国土基盤事業部
(〒151-0071 東京都渋谷区本町3-12-1)

⁴正会員 株式会社オリエンタルコンサルタンツ 国土基盤事業部
(〒151-0071 東京都渋谷区本町3-12-1)

⁵正会員 株式会社オリエンタルコンサルタンツ 国土基盤事業部
(〒151-0071 東京都渋谷区本町3-12-1)

首都高速道路（神奈川地区）の既設開削トンネルについては、1995年の兵庫県南部地震を踏まえたレベル2地震動に対するトンネル横断方向の耐震性能照査に引き続き、トンネル縦断方向に地盤変化部を有するトンネルに着目したトンネル縦断方向の耐震性能の検討を行った。この検討においては、河川と交差、近接し、トンネルの縦断、横断方向に地盤変化を有する谷地形の区間について、できる限り精度良く合理的な耐震性能照査を行うため、地盤モデルは3次元FEMモデルを採用した。本稿では、地盤応答について3次元モデルと2次元モデルの比較を行い、モデルの違いがトンネルの挙動に与える影響を報告する。

Key Words : existing cut and cover Tunnel, longitudinal seismic design, dynamic analysis by three dimensional finite element method

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震以後、耐震基準が見直され、それ以前に設計された首都高速道路の神奈川地区の既設開削トンネルにおいても、供用期間中に発生する確率は小さいが大きな強度を持つ地震動（以下、レベル2地震動と記す）に対する耐震性能の照査を行う必要が生じた。兵庫県南部地震では、トンネル横断方向の地盤変状によって開削トンネルの中壁、中柱がせん断破壊し、トンネルの断面が崩壊する被災が発生した。また、トンネルの縦断方向についても、通信用洞道において伸縮継手に損傷が生じ漏水が発生した事例¹⁾がある（図-1）。

このため、トンネル躯体断面の耐震性能を評価するためのトンネル横断方向の耐震照査²⁾に引き続き、トンネル縦断方向に地盤変化がある区間や立坑、換気所の取付位置等、地震時の挙動が複雑になると考えられる区間について、トンネル縦断方向に着目した耐震性能の照査を行った。

トンネル縦断方向の耐震性能の検討は、トンネル軸に沿って起伏のある硬質地盤通過するトンネルを新設する場合³⁾や、トンネルと立坑の接続部やランプ分岐部等の構造変化に着目し、部分的に3次元モデルを用いた検討

を新設トンネルの設計に反映させている事例がある⁴⁾⁵⁾。

供用下にある道路トンネルの耐震性能を照査する場合、できる限り精度良く合理的な耐震性能照査を行い、耐震補強が必要となる対象箇所を選定する必要がある。これは、照査結果に基づくトンネルの耐震補強工事を考えた場合、地上構造物と比較して施工が難しく、長期間にわたる通行規制は社会的影響が大きいことに配慮することが必要なためである。

本検討の対象とした開削トンネルは、昭和53年に供用



図-1 通信用洞道における伸縮継手の損傷状況¹⁾

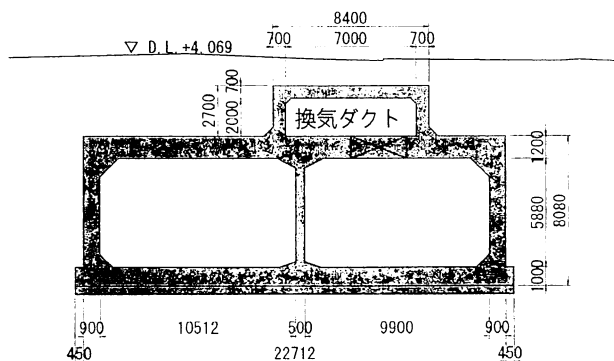
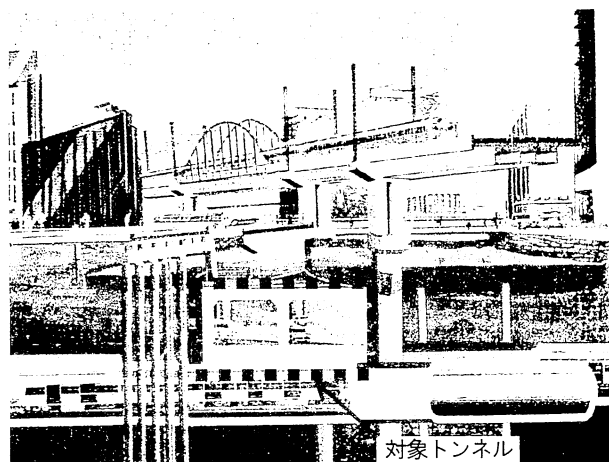
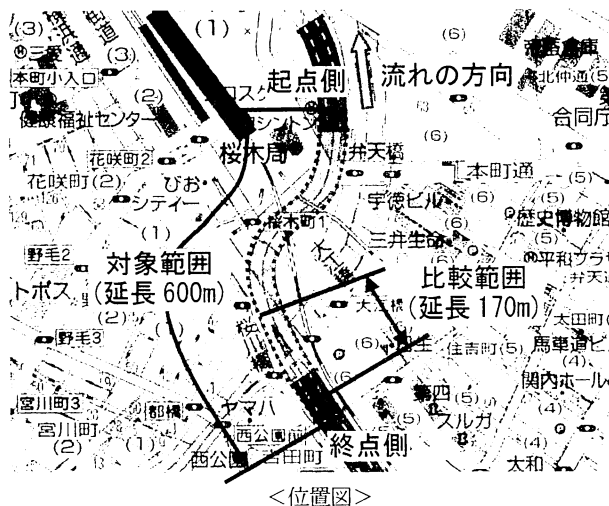
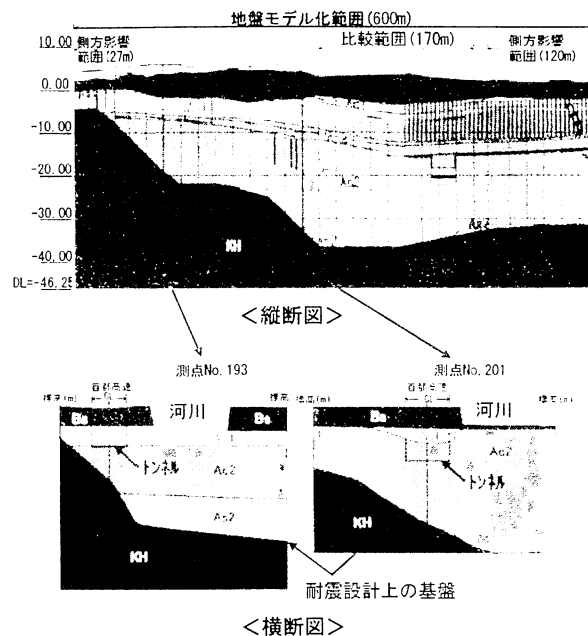


図-3 対象トンネル概要

開始されたトンネルであり、河川に並行する区間と河川下を交差する区間を併せ持ち、鉄道高架橋と地下鉄トンネルとも交差する（図-2）。また、検討対象のトンネルが通過する区間の地盤は、トンネル縦断方向の地盤変化に加え、トンネルの横断方向にも地盤変化を有する谷地形を形成しており（図-3）、トンネル横断方向の地盤の不整形性がトンネルの地震時挙動に影響を及ぼす可能性が考えられたことから、こうした地盤変化をできる限り精度良く再現できるよう地盤モデルに3次元FEMモデル



記号	Bs	As1	Ac1	Asg	Ac2	Ag2	As2	KH
Vs(m/s)	139	154	100	241	144	224	185	503

図-2 トンネル周辺の地質状況

ルを採用して解析を行うこととした。

本稿では、トンネル横断方向の地盤変化の影響を考慮するための地盤の3次元FEMモデルによる検討結果と、トンネル横断方向には水平成層として地盤変化の影響を考慮しない2次元FEMモデルの解析結果を比較し、横断方向の地盤の変化がトンネルの応答解析に与える影響を報告するものである。

なお、地盤の2次元FEMモデルは、隣接する谷地形を有しないトンネル区間の検討で用いるモデル化の区間を3次元FEMモデルと重複するようにモデル化（延長170m）を行い（図-2）、トンネルの応答解析結果を比較した。

2. 周辺地盤状況

トンネル周辺の地盤状況を図-3に示す。同図に示すように、対象地盤は、主にBs（盛土層）、As1層（沖積砂質土層）、Ac2層（沖積粘性土層）、KH層（土丹層）となっている。

既往の地質調査結果から、トンネル側方にトンネルを挟むように位置するAs1層は液状化の懸念があったこと、トンネル縦断方向に加え横断方向にも谷地形のように硬質地盤（KH層）が傾斜していることから、新たに5箇所のボーリング調査を行い、対象トンネル周辺の地盤変化の状況を確認した。その結果、トンネル下面よりも下にAs1層が位置する区間は無かったことから、As1層の液状化がトンネルに与える影響は小さいと考えられ、本

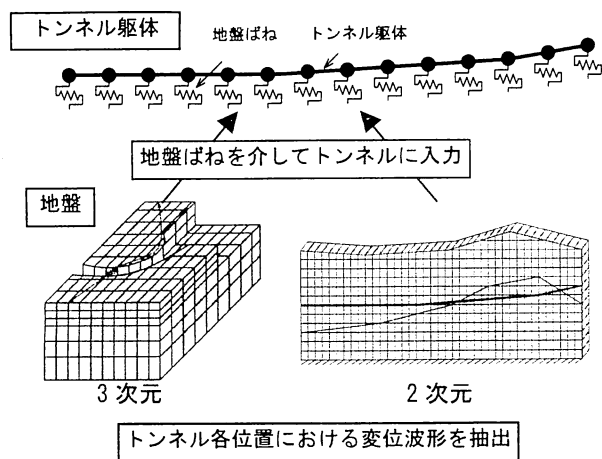


図-4 地盤とトンネルのモデル化

検討において液状化の影響は考慮しないこととした。

耐震設計上の基盤面は、せん断波速度 $V_s=503\text{m/s}$ を有する KH 層上面と設定した。図-3 を見ると、KH 層上面の地層境界がトンネル縦断方向および横断方向に変化していることが分かる。

3. 地盤とトンネルのモデル化

トンネル縦断方向の耐震検討は、一般に、地盤モデルを用いて地盤の応答解析を行い、これにより算定された地盤の応答をトンネルモデルに入力する応答変位法が用いられ、本稿でも同方法を用いて検討を実施した（図-4）。

(1) 地盤のモデル化

地盤モデルは、バネ・質点モデルや、2次元 FEM モデルが用いられることが多いが、トンネル縦断、横断の両方向の地盤の不整形性を有する谷地形の区間には3次元の非線形 FEM モデルを、横断方向に水平成層の区間には2次元の非線形 FEM モデルを用いて地盤の地震応答解析を行った。また、併せて3次元と2次元の地盤モデルの違いを検討するため、両モデルが重複する区間を設け、これらの比較を行うことによって、横断方向の地盤の不整形性がトンネルの応答解析に与える影響を評価した。

図-5 に地盤の3次元 FEM モデルの全体を、図-6 に地盤の3次元 FEM モデルにおける硬質地盤 (KH 層) のみを示す。地盤はソリッド要素でモデル化し、地盤の履歴特性は R-O モデルを用いた。節点数は 32 648、要素数は 29 927 とし、各地層のせん断波速度 V_s を考慮して層別に要素の大きさを決定した。境界条件は、側方は水平ローラー、底面は固定とし、側方境界の影響を取り除くため、縦断方向についてはトンネル躯体のモデル化範囲、横断方向についてはトンネル側壁から、基盤より上の表層地盤厚の3倍区間程度をモデル化⁷⁾した。

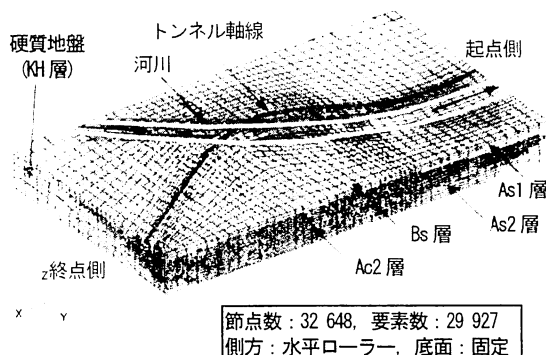


図-5 3次元 FEM モデル (全体図)

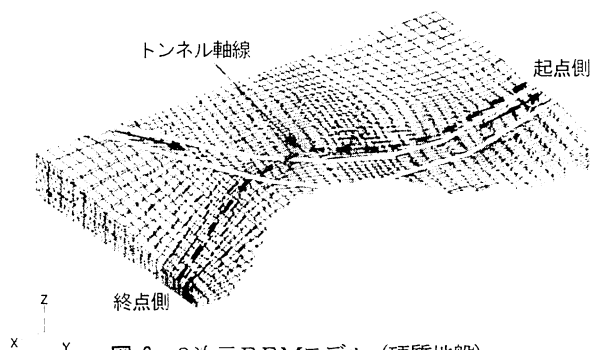


図-6 3次元 FEM モデル (硬質地盤)

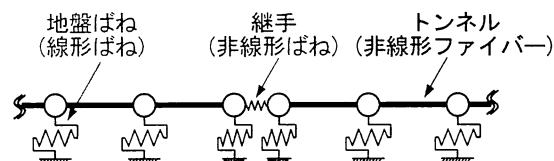


図-7 トンネルのモデル化 (概念図)

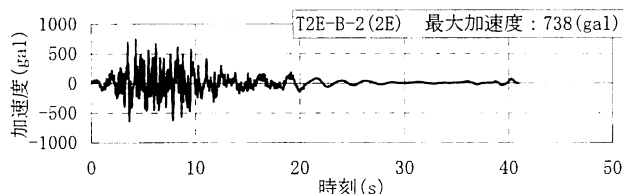


図-8 入力地震動 (T2E-B-2)

(2) トンネルのモデル化

トンネルの応答解析に用いたモデルはトンネル躯体を非線形ファイバー要素、継手を非線形ばね要素、トンネル地盤間ばねを線形ばね要素でモデル化した(図-7)。

一般的にトンネル縦断方向の耐震検討に用いるトンネルモデルは、トンネルを梁要素でモデル化するが、躯体の曲げに伴う伸びにより継手が開き難くなる効果を適切に評価するため、本報告ではトンネルを非線形ファイバー要素を用いてモデル化した。

なお、非線形ファイバー要素における、コンクリートおよび鉄筋の応力-ひずみ曲線は、「道路橋示方書 V 耐震設計編 平成14年3月」⁸⁾に従って設定した。

(3) 入力地震動

入力地震動はトンネル構造物設計要領⁹⁾に示されるレベル2地震動のうち、当該地盤の地表面変位が最も大きくなるT2E-B-2を選定し(図-8)、地震動の入力はトンネル軸方向(X方向)、トンネル軸直角方向(Y方向)への同時加振とした。

4. 地盤の地震応答解析

3次元FEMモデルによる地盤の地震応答解析結果として、図-9に最大変位分布を、図-10に最大せん断ひずみ分布を示す。図-9の最大変位分布より、基盤が浅く

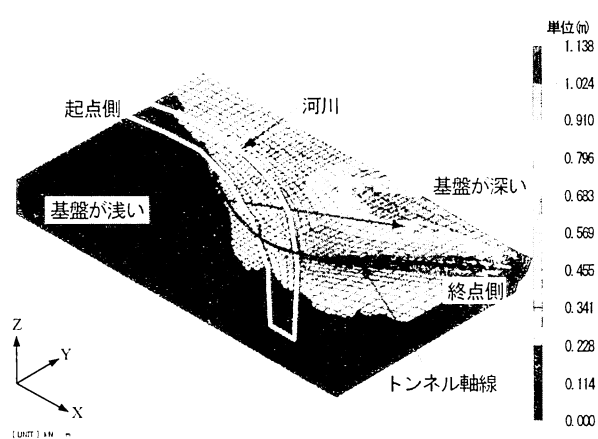


図-9 最大変位分布

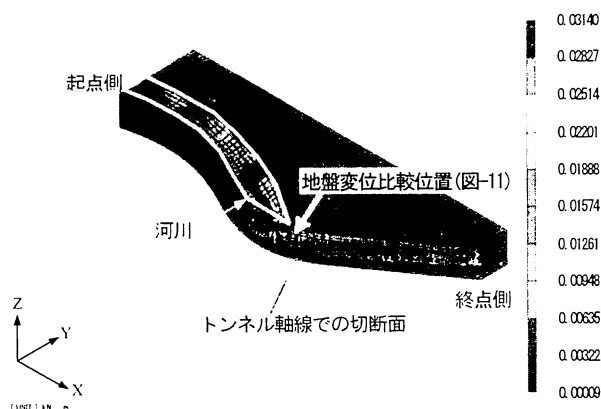


図-10 最大せん断ひずみ分布

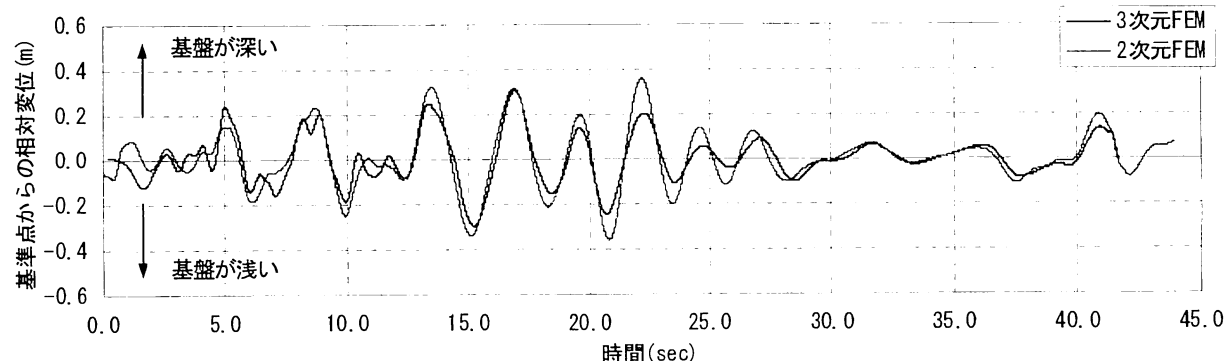


図-11 トンネル横断方向の地盤変位の比較

位置している側の変位が小さく、基盤面が深く位置している側の変位が大きくなっており、トンネル軸線位置で0.4m程度、最大で1.14m程度の変位が発生していることが分かる。また、図-10の最大せん断ひずみ分布より、トンネル軸線での切断面を見ると、沖積粘性土層(Ac2層)でおおよそ1%程度、最大で3%程度のせん断ひずみが発生していることが分かる。

また、図-11に地盤を3次元FEMでモデル化した場合と、2次元FEMでモデル化した場合の、トンネル横断方向の応答変位波形の比較を示す。同図に示すように、3次元FEMモデルの変位の最大値は2次元FEMモデルに比べ15%程度小さいことが分かった。2次元FEMでは横断方向を水平成層地盤として扱っているのに対し、3次元FEMでは横断方向の基盤の傾斜を考慮し、基盤が浅く変位の小さい部分の拘束によって、変位が小さくなったものと考えられる。

5. トンネルの応答解析

地盤の応答解析によって得られた地盤変位のトンネルモデルへの入力、トンネル軸方向と軸直角方向に同時作用させた。

図-13に継手部に発生する目開きの比較を示す。また、図-14にトンネル躯体に発生する圧縮応力、図-15にトンネル躯体に発生する引張ひずみの比較を示す。なお、これらの目開き量、圧縮応力、引張ひずみのトンネル断面としての計測位置は、トンネル縦断方向に長さのあるトンネルの曲げ変形を考えた時、トンネル躯体の最外縁となるいずれかの四隅でそれぞれの値が大きくなることから、それぞれが最大となる角部で算出された値を適用している。

図-13に示すように、継手部に発生する目開き量は、地盤モデルが3次元FEMの場合、2次元FEMモデルと比較して最大で20%程度小さくなった。また、図-14および図-15に示すように、トンネル躯体に発生する圧

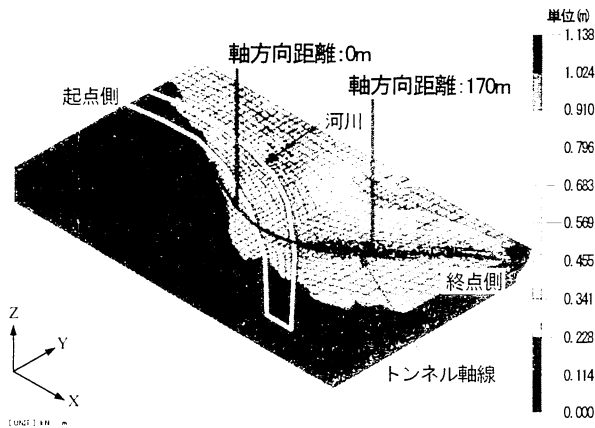


図-12 トンネルのモデル化範囲

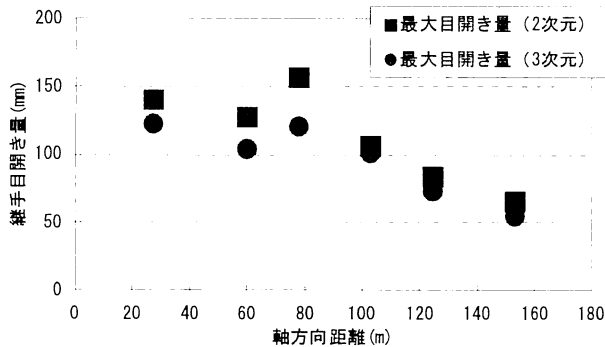


図-13 継手の目開きの比較

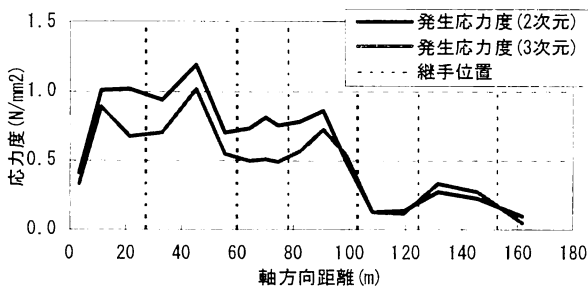


図-14 トンネル躯体に発生する圧縮応力の比較

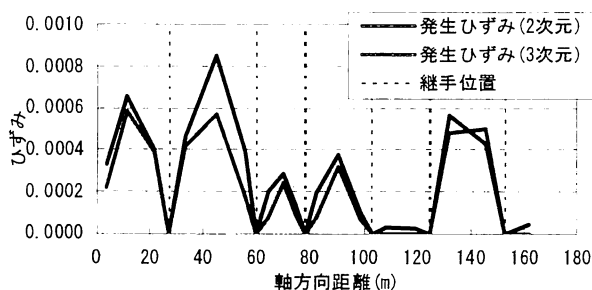


図-15 トンネル躯体に発生する引張ひずみの比較

縮応力および引張ひずみは、3次元FEMの場合、2次元FEMモデルと比較して圧縮応力が最大で15%程度、引張ひずみが最大で30%程度小さくなった。これは、先に示した地盤変位の比較から、3次元FEMモデルは横断方向の基盤の傾斜が反映され、基盤が浅く変位の小さい部分の拘束によって、変位が小さくなったためと考えられる。

6. まとめ

本稿では、トンネル縦断方向に加えてトンネル横断方向にも地盤の変化がある谷地形を通過する既設開削トンネルについて、地盤を3次元FEMでモデル化した場合と2次元FEMでモデル化した場合の地盤の地震応答解析結果およびトンネルの応答解析結果を比較した。以下に、得られた知見を整理する。

- ・ 地盤を3次元FEMでモデル化した場合と2次元FEMでモデル化した場合とを比較した結果、地盤の最大変位は3次元FEMモデルを用いた方が15%程度小さくなった。これは、3次元FEMでは、基盤が浅く変位の小さい区間の変形拘束の影響が反映されることによると考えられる。
- ・ 上記のそれぞれの地盤変位を用いてトンネルの応答解析を行った結果、継手の目開き量は15%程度、トンネル躯体に発生する圧縮応力は20%程度、引張ひずみは30%程度小さくなった。

圧縮応力と引張ひずみについて、上記の両モデルから得られる応答解析の結果とコンクリートの圧縮強度や鉄筋の降伏および破断ひずみを比較すると、トンネル躯体に発生する応答としては、いずれの応答値も躯体が損傷し、直ちにトンネルの安定性に問題が生じるような応答値とはなかった。

継手の目開き量は50～150mm程度の応答値となっており、本トンネルの建設時に設置された止水板の目開きへの追従性等を検討し、目開き量の大きい一部の継手部からの漏水の可能性があるため、継手部における止水対策の検討を行うこととした。

本検討では、トンネル縦断方向に加えてトンネル横断方向にも地盤の変化がある谷地形を通過する既設開削トンネルについて、地盤を3次元FEMでモデル化することによって、より精度の高い応答解析を行った。その結果、横断方向の地盤変化も反映されることにより、トンネルの応答値が2次元FEMモデルよりも小さくなり、補強箇所や補強量が限定される可能性を確認することができた。これにより、補強工事の施工中に必要となる交通規制を少なくすることができ、社会的影響の抑制に資するものと考えられる。

参考文献

- 1) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：阪神・淡路大震災調査報告書 土木建造物の被害 トンネル・地下構造物 土構造物 基礎構造物，1998.6
- 2) 山本泰幹，神木剛，山本一敏，水谷努，橋本知尚：既設開削トンネルにおける横断方向の耐震性能評価に関する一検討，トンネル工学報告集第18巻，pp.149-258，2008.11，

- 3) 中川誠志, 式田直考, 田中努, 大竹省吾: 起伏のある硬質地盤を通過するトンネルの地震時応答性状と耐震設計, No.516 土木学会論文集, 1995.6.
- 4) 津野和宏, 松崎久倫, 春日清志: 都市内シールドトンネルの立坑接合部耐震性基本検討, 第26回日本道路会議, 2005.10
- 5) 橋義規, 大塚久哲, 宮森保紀, 矢野恵美子: 応答変位法を用いた沈埋トンネル縦断方向の耐震設計における地盤変位の評価法および杭・継手・地盤剛性の影響に関する考察, 構造工学論文集, 2005.3.
- 6) 土橋浩, 落合英司, 市村強, 山田岳峰, 伊丹洋人, 大保直人, 森口敏美, 山本洋平, 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, 2007.7.
- 7) (社)日本道路協会: 駐車場設計・施工指針 同解説, pp.167, 1992.
- 8) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編, pp.154-173, 2002.3.
- 9) 首都高速道路株式会社: トンネル構造物設計要領(開削工法編), 2008.7.

A STUDY OF SEISMIC DISPLACEMENT OF CUT AND COVER TUNNEL IN LONGITUDINAL SECTION

Masahiko KOBAYASHI, Yasumiki YAMAMOTO, Shogo OTAKE,
Yousuke INOUE, Fukutaro UMEBAYASHI

While improving quakeproof performance by reinforcement of existing tunnels, it is imperative to carry out such procedures in a manner that minimizes disruption to society, such as closing of traffic lanes and tunnels. Therefore, we have applied the 'dynamic analysis' using the three dimensional finite element method for the ground model at the section of the road where the tunnel passes the ground which has both longitudinal and transverse transformation. In addition, we analyzed the same ground section using the two dimensional finite element methods. By comparison of both methods, we are able to analyze the precise seismic activity or reactivity of the cut and cover tunnel in the longitudinal section.