

大規模数値解析を活用した大型トンネル 耐震設計における構造目地の影響検討

山田 岳峰¹・市村 強²・堀 宗朗³・土橋 浩⁴・大保 直人⁵

¹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 1 9 の 1)

E-mail:takemine@kajima.com

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

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

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

構造目地を設置した大型ランプトンネルの耐震性向上効果を大規模三次元地震応答解析により検討する。大型トンネルの場合、複雑な構造形式を持つ部分の地震応答には、二次元応答の重ね合わせとそれ以外の応答の付加という三次元性があるため、構造目地の個数と位置について合理的な設計検討をする際には、三次元地震応答解析が必須である。解析結果から、応答が集中する地層境界付近のランプトンネルに構造目地を設置することで、応力や断面力の低減に有効であることが分かった。本論文で示した三次元地震応答解析を実施することで、地震動入力方向による構造目地の耐震性向上の効果を定量的に検討可能であることが示された。

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

1. まえがき

RC構造の開削トンネルでは、コンクリートのひび割れ誘発目地を設置する他、トンネル構造変化部などにスリップバー方式の構造目地¹⁾を設置し、耐震性向上を図ることがある²⁾。構造目地は、可とう性継手構造ほどの変形性能は有していないものの、トンネル断面に作用する軸力やせん断力を低減できる可能性を有している。大型の開削トンネルの場合、継手構造よりも、このような構造目地を設置するほうが施工上は簡単である。

継手構造や構造目地による耐震性向上の効果は、実務では簡易な数値解析で評価される。具体的には、トンネルとその周辺地盤を梁と地盤バネで模した質点系モデルを構築し、これに継手構造や構造目地を梁のヒンジとして付加し、二次元地震応答解析を実施する。そして、解析結果における、継手構造や構造目地による断面力低下をもって耐震性向上とし

ている²⁾。この「ヒンジが付加された梁」というモデルを用いた二次元地震応答解析結果の精度は、単純な構造形式のトンネルでは十分実務に耐えうる。しかし、複雑な構造形式を持つ大型トンネルに対しては、モデルが単純すぎるため、精度に不安が残る。

継手構造や構造目地の非線形性も考慮した簡便な三次元解析モデルを構築し、非線形有限要素法を使った三次元地震応答解析で応答を計算した研究例³⁾がある。しかし、本論文で対象とするような詳細な三次元解析モデルを用いて非線形の三次元地震応答解析を行うことは計算コストが莫大となることは否めない。継手構造や構造目地の材料や形状、設置箇所や設置個数の選定など様々な条件を考慮した検討が必要となる実務では、一ケースの計算コストが莫大となることは軽視できない。そのため、本論文では、関連研究⁴⁾と同様に、疑似非線形解析により、詳細な三次元解析モデルを用いた三次元地震応答解析を行う。

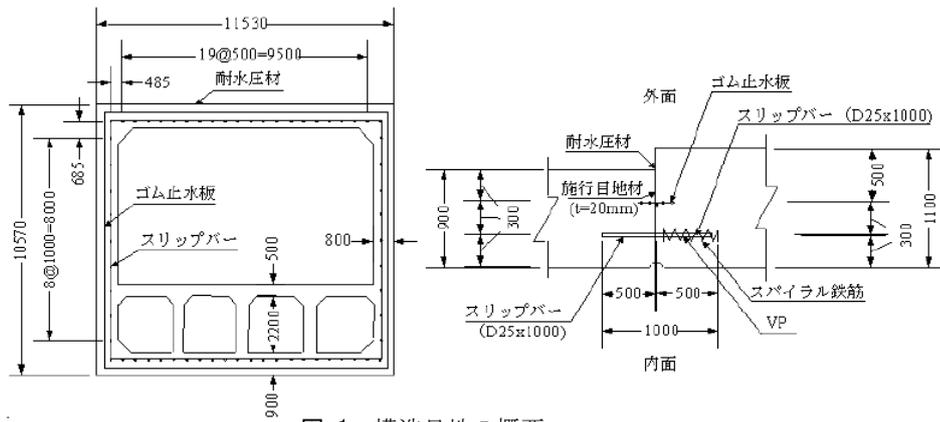


図-1 構造目地の概要

筆者らの研究により、センターランプ式トンネルでは、レベル2地震動を入力した三次元地震応答解析によって、地層境界付近のランプトンネルの応答が設計的に考慮すべきレベルまで増大するという結果が得られた⁴⁾。この結果から、耐震性向上を目的として構造目地を設置する場合、設置箇所は地層境界付近であることが示唆される。そのため、本論文では、地層境界付近に構造目地を設置した場合の耐震性向上の評価を行う。構造目地の効果の検証に大規模数値解析手法が適用できることを示すとともに、大型トンネルの耐震対策工としての構造目地の有効性と課題を考察する。

2. 解析方法

実際の構造目地は、図-1に示すように、目地材（厚さ20 mm、瀝青繊維系）と加硫ゴム製の止水板から構成される。目地材はトンネル断面の全周に設置される。トンネル軸方向にはスリッパ（25 mm×1,000 mm）が設置され、構造目地で分離されたトンネルを連結される。目地材の材料特性は既知であるが、断面全周に設置され、スリッパで連結された構造目地の変形特性は明確には分かっていない。

本論文では、関連研究⁴⁾となる首都高速中央環状線山手トンネルのランプトンネルを対象としたレベル2地震時の三次元地震応答解析について、ランプトンネルに、構造目地が設置された場合を想定する。解析モデル及び解析手法は、関連研究⁴⁾と同一である（図-2参照）。構造目地の設置位置は、二層平行成層の地層境界直近位置の、地層境界からトンネル下面が0.5 m離れた位置である（図-3参照）。構造目地は、ランプトンネルの途中にトンネル延長方向に0.5 m幅の剛性低下部を設置することでモデル化する。実際の目地材は0.02 m幅であるが、剛性低下の度合いが同じになるように、剛性低下部の剛性を決める。すなわち、表-1に示す目地材の弾性係数の基準値の50/2倍となることを目安とすると、目地材に対応したランプトンネルの剛性低下部の弾性係数は、元の剛性の1/100となる。

構造目地に付随して設置されるスリッパは、

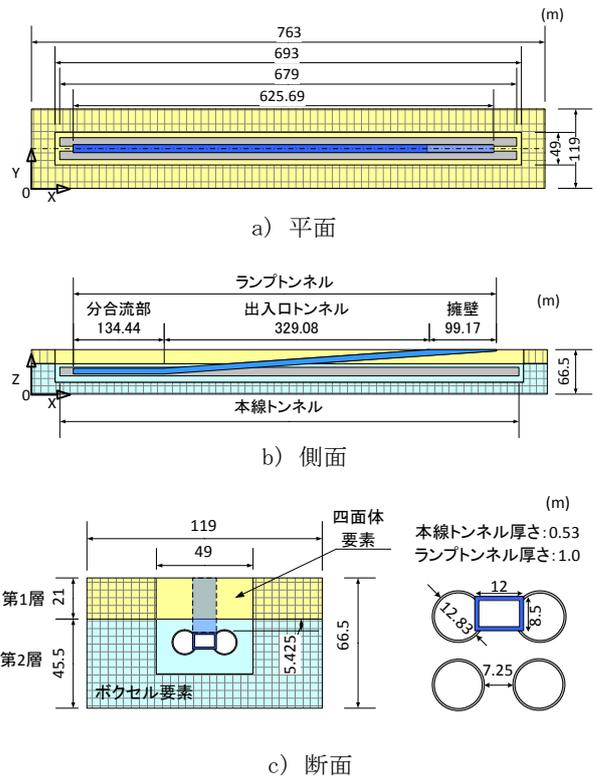


図-2 三次元数値解析モデル

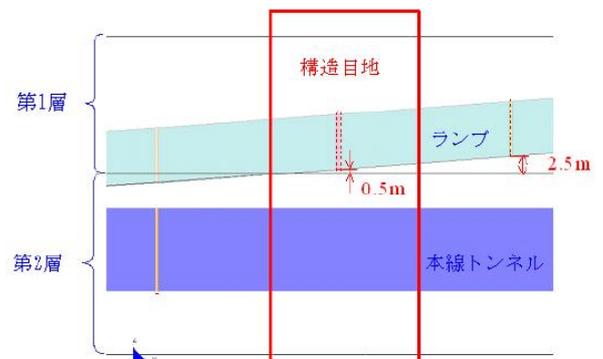


図-3 構造目地の設置位置

片側埋込み部には瀝青が塗布されている。これは、トンネル軸方向の引張りにはほとんど抵抗しないよ

表-1 目地のモデル化

項目	単位	値	備考
コンクリートの弾性係数	N/mm ²	30000	
目地板(瀝青繊維系)の弾性係数	N/mm ²	4~20	幅:0.02m
ランプトンネルに0.5m幅の剛性低下部を設置する場合のコンクリート弾性係数の剛性低下率	-	1/60~1/300 → 1/100	

うにするためである。このスリップバーの効果も、構造目地と同様に、剛性低下部としてモデル化する。スリップバーの場合、引張りに抵抗しないことから、ここでは目地材の剛性低下率をさらに1/100にして、剛性低下部の剛性は元の剛性の1/10,000とする。

以上、構造目地を構成する目地材とスリップバーのモデルとして剛性低下部を加える。ただし、剛性低下部の剛性を剛性低下率を乗じて変更する。元のランプトンネルの剛性と剛性低下部の剛性の比を剛性低下率とする。

剛性低下率は、1（構造目地無し）、1/100（目地材）、1/10,000（スリップバー）の3種類である。なお、圧縮では目地材、引張りではスリップバーが働くため、圧縮と引張りで剛性低下部の剛性を変えなければならない。すなわち剛性低下率は圧縮であれば1/100、引張りであれば1/10,000としなければならない。しかし、この非線形解析は、計算コストが大きいため、本論文では行わない。代わりに剛性低下率を1/100と1/10,000に固定した2つの線形解析を行い、圧縮の場合は1/100の剛性低下率の解析モデルの解析結果、引張りの場合は1/10,000の剛性低下率の解析モデルの解析結果を使って、構造目地設置による耐震性の向上を評価する。

入力する地震動は、関連研究⁴⁾と同様に設計用レベル2地震動のうち「T2E-B-3」地震波である（図-4参照）。解析定数を表-2に示す。剛性低下部が加わったが、トンネル並びにトンネル周辺地盤は、関連研究と同様、四面体二次要素で要素分割する。地盤は、地盤応答の1次モードを対象として3 Hz まで解析精度を保證するように寸法3.5 mで要素分割する。トンネルの要素分割寸法は1.0 mとする。結果的に、矩形断面ランプトンネル（12 m × 8.5 m）の床版・側壁（厚さ1 m）は、厚さ方向に中点付き2次要素で1分割される。地震動の入力方向は、軸方向と軸直角方向の2種類である。時刻0.01 secで主要動部分の10.23 secの地震応答を動弾性解析で計算する。

3. 解析結果

(1) 地震波軸方向入力時のトンネル挙動

地表面の応答が最大となる時刻に着目し、ランプトンネルの地震応答の計算結果を整理する。水平方向の変位応答の内、軸方向成分 u_x を図-5に、軸方向応力 σ_{xx} の分布図を図-6に示す。なお、図-6d)は、

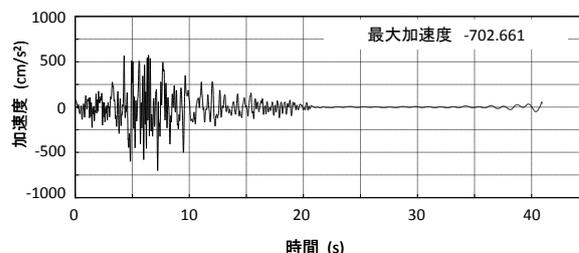


図-4 設計地震動「T2E-B-3」

表-2 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 α (1/s)	備考		
地盤第1層	1500	60	0.45	2.0			
地盤第2層	2000	400	0.45	2.0			
本線トンネル	609	3372	0.3	2.0	鋼製セグメントから換算		
ランプトンネル	2500	2299	0.15	2.0	剛性低下無し		
剛性低下部		2299				1/100	
		229.9					1/10000
		22.99					

1要素当たり4つある四面体二次要素の積分点での σ_{xx} の値を全てプロットしている。入力が軸方向であるため、ランプトンネルも主に軸方向に変形する。レベル2地震動を入力したため、地層境界付近で変位や応力が集中することがわかる。

構造目地を設けない場合、すなわち解析モデルの剛性低下部の剛性低下率が1の場合、地層境界付近のランプトンネルの相対変位は小さい。具体的には、地層境界付近の長さ0.5 mでの区間では、軸方向の相対変位は0.1 cm以下である。一方、構造目地を設けた場合、すなわち、解析モデルの剛性低下部の剛性低下率を1/100ないし1/10,000とする場合、地層境界付近のランプトンネルの相対変位は大きい。0.5 mの長さの区間では、剛性低下率1/100で1.6 cm、剛性低下率1/10,000で9.0 cmとなっている。

剛性低下部を設置した結果、地層境界付近のランプトンネルの相対変位は増大する。この結果、軸方向の直応力 σ_{xx} は低下する。この応力成分のピーク値の最大値は、剛性低下部の剛性低下率が1、1/100、1/10,000の場合、概ね19 MN/m²、16 MN/m²、10 MN/m²である。

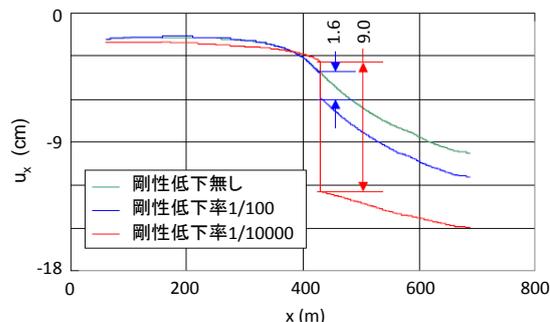


図-5 ランプトンネルに発生する地震波入力方向変位 u_x （地震波トンネル軸方向入力、最大応答時）

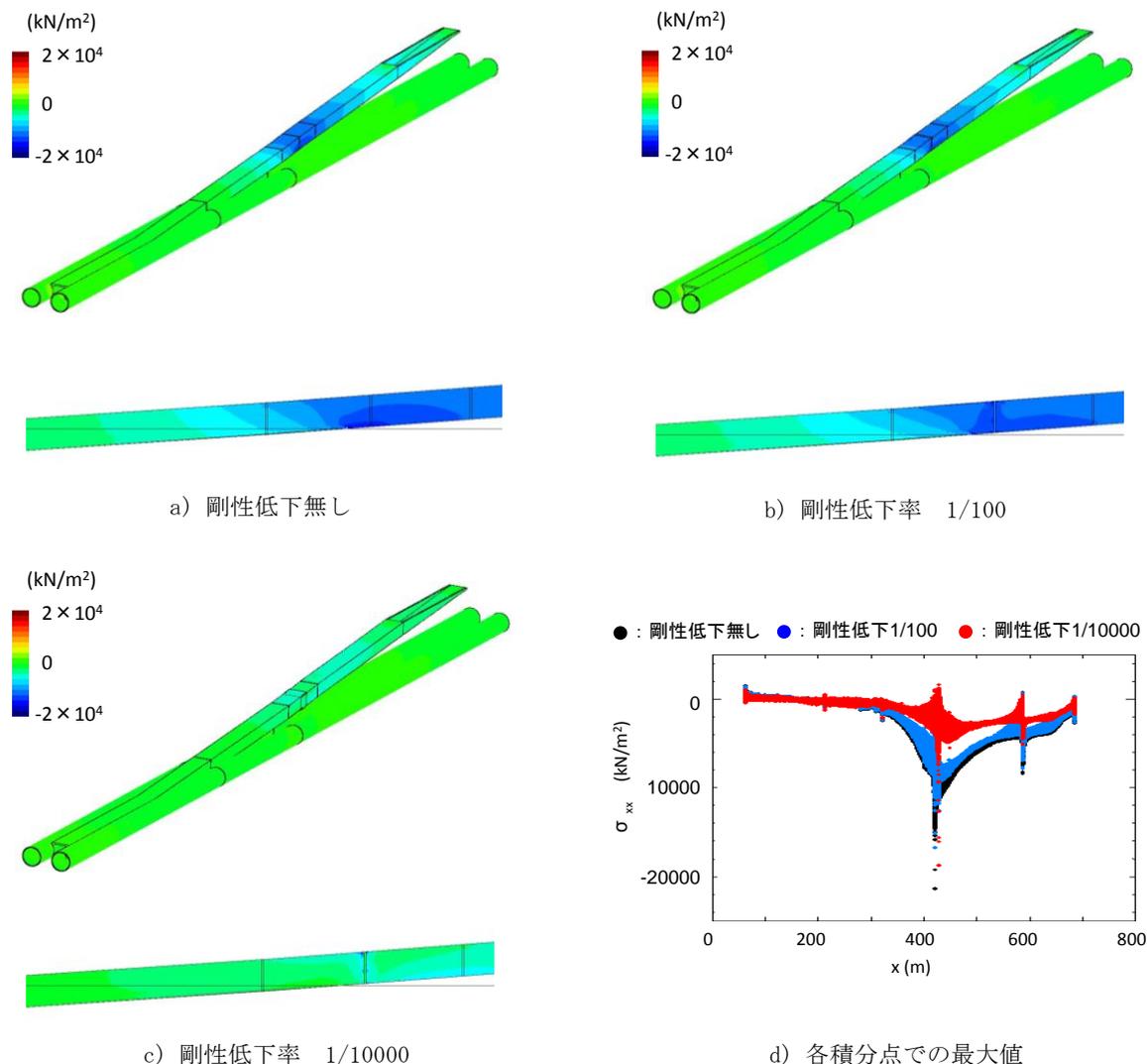


図-6 ランプトンネルに発生する σ_{xx} の分布
 (地震波トンネル軸方向入力, a) ~c): 変位応答最大時,
 上段:鳥瞰図, 下段:地層境界付近側面図, e): 全時間にわたる最大値)

(2) 地震波軸直角方向入力時のトンネル挙動

地震動がトンネル軸直角方向に入力するときの応答について、軸方向入力の時と同様に、水平方向の変位応答の内、軸直角方向成分 u_y を図-7に、軸方向応力 σ_{xx} の分布図を図-8に示す。

目地位置での u_y のずれは、剛性低下率1/100で1.9 cm、剛性低下率1/10,000で3.3 cmとなっている。軸方向の直応力 σ_{xx} のピーク値の最大値は、剛性低下分の剛性低下率が1, 1/100, 1/10,000の場合、概ね13 MN/m², 11 MN/m², 6 MN/m²である。

(3) 構造目地の効果

三次元地震応答解析により、構造目地を設置することによってランプトンネルの応力の低減が確認された。応力が低減される範囲は、剛性低下率1/100の場合、軸方向入力では解析モデルの $x=420$ m付近に限定されるが、軸直角方向入力では 380 m < x < 440 mの範囲であり、長さは約60 mである。剛性低下率1/10,000の場合、軸方向入力では $x=280$ m付近

から地表面に至る広い範囲において σ_{xx} が低減するが、軸直角方向入力では、剛性低下率1/100の場合と同様、 380 m < x < 440 mの約50 mの範囲である。

構造目地はトンネルに発生する応力低減には有効であるものの、シールドトンネルの重要機能である止水性を低減させる可能性がある。三次元地震応答解析を使って、地震時の構造目地部の止水性を評価する。止水板の引張り強さを25 MN/m², 9 mm厚さの止水板の使用を仮定する。ランプトンネルの単位断面積当りに換算した引張り強さは $\sigma_{xx}=0.225$ MN/m²となる。目地部に作用する応力は0.54 MN/m²であり、作用力は強度よりも大きい。また、止水版の伸び率の規格値は450 %以上に設定されている。剛性低下部の相対変位9 cmが構造目地の目開き量として2 cmの構造目地に集中すると仮定すると、構造目地の伸び率は450%となる。規格値の最低値と

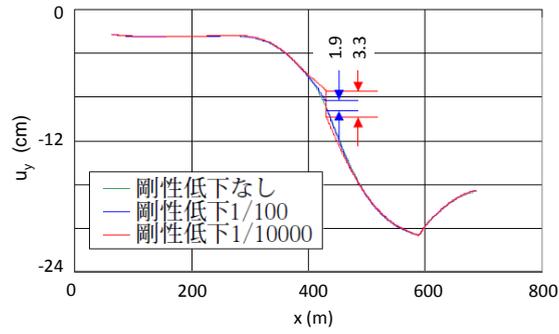


図-7 ランプトンネルに発生する地震波入力方向変位 u_y (地震波トンネル軸直角方向入力, 最大応答時)

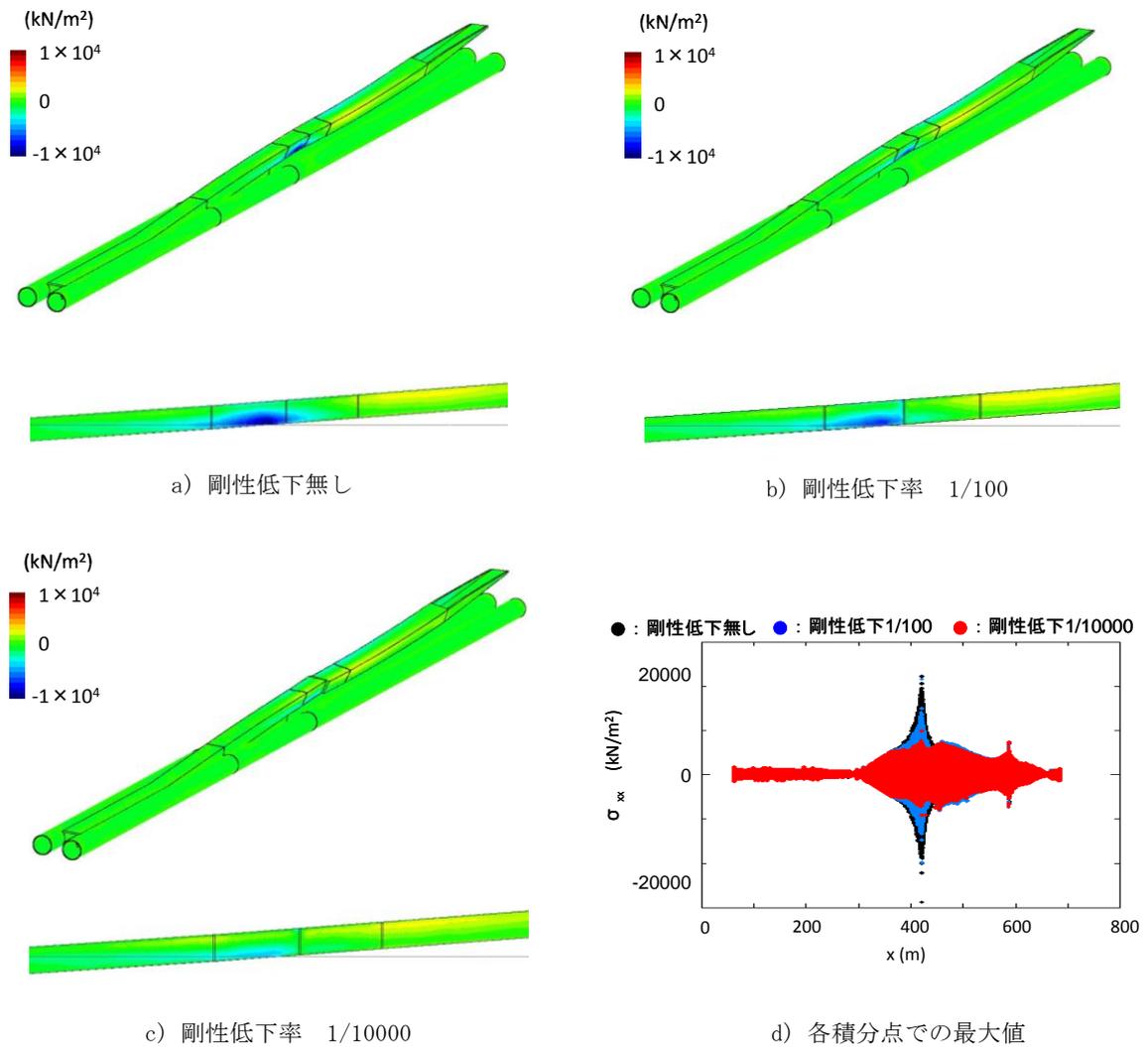


図-8 ランプトンネルに発生する σ_{xx} の分布
 (地震波トンネル軸直角方向入力, a) ~ c) : 変位応答最大時,
 上段: 鳥瞰図, 下段: 地層境界付近側面図, e) : 全時間にとわたる最大値)

同程度である。レベル2地震動に対しては、構造目地の止水性の損傷に注意する必要がある。

4. まとめ

ランプトンネルの構造目地の効果を検討する地震応答解析を実施した。目地部は剛性が低下した部分としてモデル化した。解析結果から、応答が集中する地層境界付近のランプトンネルに構造目地を設置することで、応力や断面力の低減に有効であることが示された。大規模で複雑なトンネルの応答は、入力地震動、地盤や構造物の三次元的な影響を受ける。本研究で示した三次元地震応答解析を実施することで、地震動入力方向による構造目地の耐震性向上の効果を定量的に検討することが可能である。例えば、斜め入射作用下で、設置する構造目地の個数、位置を変更したときの効果を評価することもできる。大型トンネルの場合、複雑な構造形式を持つ部分の地震応答には、二次元応答の重ね合わせとそれ以外の応答の付加という三次元性がある。したがって、構造目地の個数と位置について合理的な設計検討をする際には、三次元地震応答解析が必須であることが示唆される。なお、構造目地の効果をより正確に

評価するためには、弾塑性を考慮した非線形解析が必要である。

謝辞：本研究の実施並びに論文の取り纏めにあたり、首都高速道路の並川賢治氏、波津久毅彦氏に温かいご指導をいただいた。鹿島建設の伊丹洋人氏には解析を行う際に様々な支援を、また同森口敏美氏並びに沖見芳秀氏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。

参考文献

- 1) (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（開削工法編），1999.
- 2) 高橋邦博，木下琢雄：開削トンネル地震時における構造目地挙動検討，土木学会第59回年次学術講演会，pp.131-132，2004.
- 3) 清野純史，小野祐輔，藤井康男，藏重幹夫，浜田信彦，李圭太：半地下線状構造物が隣接する河川堤防の地震時挙動に及ぼす影響，土木学会地震工学論文集，pp.1-8，2003.
- 4) 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）。

EFFECT OF CONSTRUCTION JOINT ON EARTHQUAKE-RESISTANT DESIGN OF RAMP TUNNEL STRUCTURE BY MASSIVE NUMERICAL COMPUTATION

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

Large-scale three-dimensional seismic response analyses are carried out in order to examine the earthquake-resistant improvement effect of a ramp tunnel with construction joint. Analysis results show that the placement of construction joint at ramp tunnel structure near geological interface is effective in reduction of stress and section force, where the tunnel response concentrates. It is possible to examine quantitatively the effect of construction joint on earthquake-resistant improvement by carrying out three-dimensional earthquake response analysis shown in this research. In the case of a large tunnel, three-dimensional characteristics exist, which means the earthquake response of a portion with complicated structure consists of superposition of two-dimensional responses and the other additional response. Therefore, three-dimensional seismic response analysis is indispensable in rational seismic design examination about the number and the position of construction joint.