

トンネルランプ構造部の地震応答特性と耐震対策工

Seismic Response Behavior of Ramp Structure in the Tunnel and its Countermeasure

山田岳峰*, 市村強**, 大保直人***, 佐茂翁洋****, 池田清宏*****, 堀宗明*****

Takemine YAMADA, Tsuyoshi ICHIMURA, Naoto OHBO, Takahiro SAMO, Kiyohiro IKEDA and Munco HORI

*正会員 鹿島技術研究所地盤グループ (〒182-0036 調布市飛田給2-19-1)

**正会員 博士(工学) 助手 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉06)

***正会員 工学博士 鹿島技術研究所都市防災・風環境グループ (〒182-0036 調布市飛田給2-19-1)

****学生会員 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉06)

*****正会員 Ph.D. 教授 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉06)

*****正会員 Ph.D. 教授 東京大学地震研究所 (〒113-0032 文京区弥生1-1-1)

The Hanshin-Awaji Earthquake of January 17, 1995 incurred severe, unexpected damage to underground infrastructures, which had been believed to be relatively safe from earthquake effects, compared to structures above ground. Recently, there is a great demand for the development of super-deep underground urban space in Tokyo Metropolitan area. However a seismic response behavior hitherto is not known to the full extent for complex structures, such as the connection part of vertical shaft and tunnel, the junction of a highway tunnel, and the ramp way. Moreover, the seismic design procedure of complicated parts of underground infrastructures is not well established. In this paper, the seismic response behavior of a ramp way tunnel, characterized by stress concentration, is investigated on the basis of the results of large-scale three-dimensional dynamic analyses. An example of its seismic countermeasures is introduced and its performance is monitored.

Key Words: large-scale problem, three-dimensional analysis, dynamic FE analysis, ramp tunnel

キーワード: 大規模問題, 3次元解析, 動的FEM解析, ランプトンネル

1. はじめに

従来, 立坑取合い部, 地層構造変化部といったトンネル特殊構造部では耐震性が懸念され一部研究が実施されてきたが^{1)~3)}, トンネルの耐震検討については相対的に注目度が低かった. しかしながら, 兵庫県南部地震における地下鉄駅舎の崩壊を機に, トンネル設計業務全般において, 耐震設計が常時設計と並び重要な検討課題に位置付けられている. 一方, 高速・長距離・特殊断面・曲線施工が可能となる施工機械の開発や施工管理技術の向上により, 道路, 地下鉄, 電力, 上下水道といった多方面の分野において複雑地下構造物の建設にシールドトンネル工法の適用が盛んである. また, 最近では, 都市再生プロジェクトの一環として, 交通渋滞の緩和と交通ネットワークの構築を目指し, 都市圏環状道路網をトンネル方式で整備する多くの重要プロジェクトが推進されつつある. これらのプロジェクトでは, 地上との出入路として, ランプ構造部が必要とされる. 当該構造部の概念図と構造模式図を図-1, 2 に

示す. これらに示されるように, 道路トンネルランプ構造部は, 本線トンネル, ランプトンネル並びにカルバート等

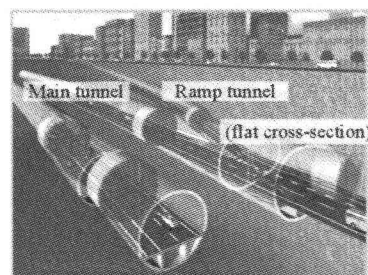


図-1 道路トンネルランプ構造概念図

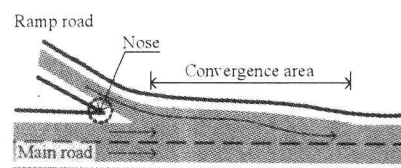


図-2 道路トンネルランプ構造模式図

の開削区間、及び分岐・合流部で構成され、複雑な三次元構造をなす。さらに、分岐・合流部は、断面力が集中しやすい扁平大断面構造となることから、高度な耐震検討が求められる。従って、トンネルランプ構造部の建設には、最先端のトンネル施工技術とともに、レベル2地震動にも対応できるトンネルの設計・施工技術を整備しておくことが重要である。

そこで、本論文では、実プロジェクトで予想され、複雑な三次元構造を呈する道路トンネルランプ構造部並びに周辺地盤を四面体有限要素で細かくモデル化し、当該モデルのトンネル～地盤連成系大規模三次元動的FEM解析を実施し分析することで、トンネルランプ構造部の地震応答特性を把握する。さらに、ランプトンネルの耐震対策工について基礎検討を行う。

2. トンネルランプ構造部の地震応答特性

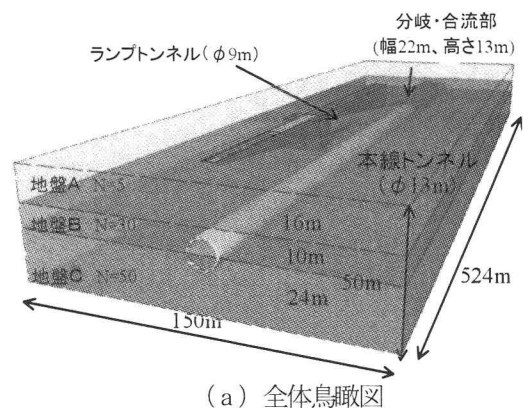
2.1 解析モデル

解析対象は、2車線の本線トンネル（ $\phi 13\text{m}$ 、水平配置）に1車線のランプトンネル（ $\phi 9\text{m}$ 、勾配9%）がサイドランプ方式で接続するトンネルランプ構造部である。モデル概要を図-3に示す。地盤は、速度構造が異なる3層の地層が堆積する水平成層地盤とし、トンネル寸法を勘案し解析対象領域は長さ524m、幅150m、深さ50mとした（トンネルランプ構造部とトンネル軸方向の側面境界の離間は、トンネル端部の影響（ここでは応力集中）が及ばない範囲として50m以上の離間を設定し、トンネル横断方向には、トンネルから5D（D:トンネル直径）以上の離間を設定している）。本線トンネルの土被りは20m、トンネルのライニング厚さはいずれのトンネルも0.75mである。ランプ線の地上部に近い部分には開削区間としてカルバート構造を配置した。

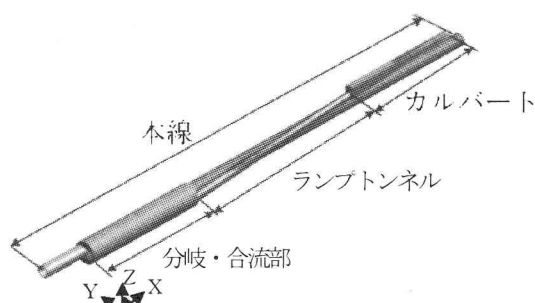
解析対象周波数を10Hzとして解析モデルのメッシュサイズを設定し、詳細な挙動評価を優先して、トンネル躯体から分岐・合流部に出現する中壁に至るまで四面体有限要素で精緻にモデル化した（図-4参照）。結果、要素は約170万個、節点は約31万点である。

2.2 解析方法

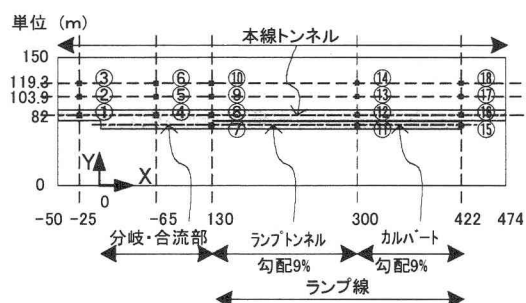
複雑なトンネルランプ構造部（分岐・合流部とその隣接箇所、ランプトンネル、カルバート）の三次元効果の把握を主眼としていることから、ここでは材料の塑性化、セグメント継手による材料の非線形性や異方性を考慮せず、トンネル及び地盤とも等方線形弾性体を仮定し、表-1に示す物性を設定した。境界条件として、側方境界は鉛直固定、水平自由とし、底面に固定境界を設定した上で、モデル底面に兵庫県南部地震の際にポートアイランドの地下で観測された地震波（GL-83m, NS成分）の補正波（図-5）を入力して、解析を実施した。ここで、解析コードは、主に構造系分野で実績のある「ADVENTURE cluster」を、地震



(a) 全体鳥瞰図



(b) トンネル構造鳥瞰図



備考) 図中、■と添字の丸数字は以降の結果整理に用いる深度方向(Z=0～50m)の測線番号で地盤の他、トンネル位置ではトンネルを含む。

(c) 平面図

図-3 解析対象モデル

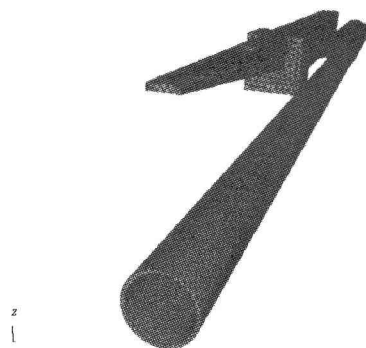


図-4 解析用メッシュ（トンネル部分）

表-1 解析に用いた定数

	S波速度 (m/s)	弾性係数 (MN/m ²)	ポアソン比	密度 (kg/m ³)	減衰定数 (%)
地盤A	180	174	0.49	1800	5
地盤B	350	720	0.47	2000	5
地盤C	400	934	0.46	2000	5
トンネル管体		34300	0.17	2600	3

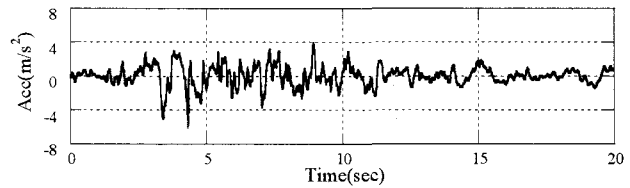


図-5 入力波形

応答解析が可能のように拡張したものであり、解析には、15 台のワークステーション (1CPU[Itanium2, 900MHz], 主メモリ 4GB) を用いている。時間積分にはニューマークβ法 ($\beta=1/4$, $\delta=1/2$) を適用した。時間間隔 0.01 秒, 2000 ステップの計算に、計算時間約 11 時間、合計使用メモリ 700MB を要した。

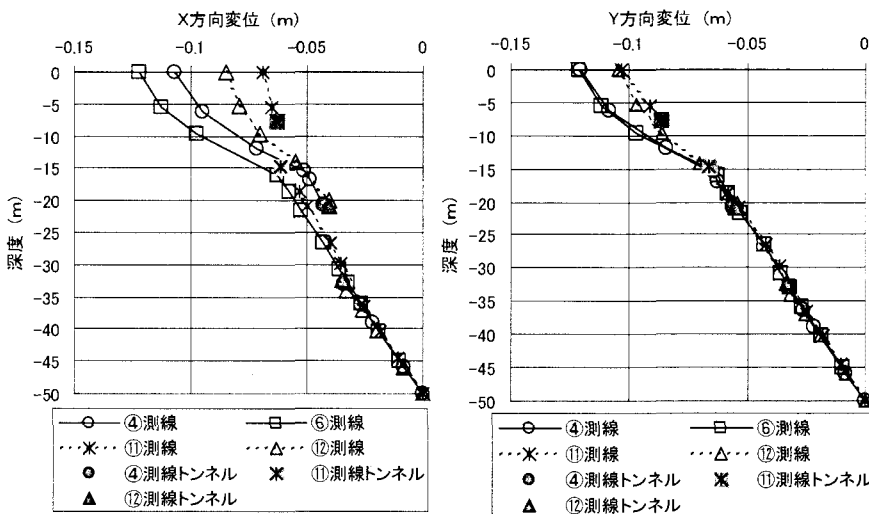
解析は、当該補正波を X 方向 (以降、トンネル軸方向) に入力する CASE1 と、Y 方向 (以降、トンネル軸直角方向) に入力する CASE2, 合計 2 ケースの解析を実施した⁴⁾。

2.3 解析結果と考察

(1) トンネル及び地盤の応答変位

本線トンネル④測線 (測線位置は図-3 参照), トンネル分岐・合流部⑪測線の層間変位 (: (トンネル内周の上端変位-下端変位) の絶対値) が最大となる時間は, CASE1, 2 ともに 7.47 秒である。従来, 単線トンネルでは層間変位最大時で設計検討を行うことが多いこと (最もシンプルな単線トンネルモデルでは層間変位と断面力が最大となる時間が一致するため) から、これに準じて当該時間での、トンネル及び周辺地盤測線位置での応答変位の深度分布を図-6 に示す (ここで、⑪測線は、カルバート構造に近接するランプトンネル部である。なお、解析対象が複雑な三次元構造であることから、①・④測線層間変位最大時が、すべての断面位置で断面力最大時と一致するものではないが、本解析では、7.47 秒付近及び 3.55 秒付近で応答が大

きくなり、断面力は 7.47 秒前後で絶対値最大を示す)。さらに、各測線位置での地表面変位の最大・最小値を表-2 に整理する。図-6 から、地盤の応答変位は、地盤 B, C でほぼ深度に比例し、最上層の地盤 A で応答変位が大きくなっていることが確認できる。このときの地盤 B の上面位置及び地表面の応答変位は、それぞれ約 6.5cm, 約 12.3cm となり、地盤のせん断ひずみは地盤 B, C で約 0.2%, 地盤 A で約 0.4% である。CASE1, 2 ともトンネルから離れた測線 (例えば、表-2 に示される③⑥⑩⑭⑮, ②⑤⑨⑬⑰) の地表面変位を確認するとほぼ同一変位が生じており、地盤が概ね均等に变形していることが分かる。本線トンネルの応答変位は、トンネル軸直角方向入力となる CASE2 では、地盤変位とほぼ一致するが、トンネル軸方向入力となる CASE1 では、トンネルの応答変位が地盤と比べ小さくなる。この差異は、軸直角方向変形と軸方向変形に対するそれぞれのトンネル剛性が、軸方向剛性>軸直角方向剛性となるためと考えられる。ここで、本線トンネル④測線並びに分岐・合流部⑪測線の層間変形率 (層間変位/層間距離×100) は、CASE1 で、0.049%, 0.074%, CASE2 で、0.160%, 0.203% となり、扁平大断面となる分岐・合流部で、層間変形率が大きくなる。次に、ランプトンネルの応答変位を確認する。ランプトンネルの変位は、地盤変位と比べ、CASE1, 2 とも小さく、本線トンネルに比べ地盤変位の応答差がより顕著になる。特に、カルバートと近接する⑪測線周辺では地表面変位が CASE1, 2 とも小さく



(a) CASE1(X 方向入力)

(b) CASE2(Y 方向入力)

図-6 トンネル層間変位最大時(t=7.47 秒)の変位分布

表-2 地表面変位の最大最小

凡例 測線位置

③	⑥	⑩	⑭	⑮
②	⑤	⑨	⑬	⑰
①	④	⑧	⑫	⑯

CASE1 X 方向地表面変位 最大値分布

0.100	0.100	0.099	0.100	0.099
0.097	0.096	0.096	0.094	0.096
0.093	0.091	0.090	0.077	0.085

CASE1 X 方向地表面変位 最小値分布

-0.123	-0.122	-0.122	-0.123	-0.124
-0.116	-0.116	-0.117	-0.114	-0.115
-0.109	-0.107	-0.106	-0.086	-0.095

CASE2 Y 方向地表面変位 最大値分布

0.102	0.103	0.102	0.098	0.102
0.102	0.103	0.101	0.095	0.102
0.102	0.103	0.101	0.089	0.100

CASE2 Y 方向地表面変位 最小値分布

-0.122	-0.122	-0.122	-0.120	-0.123
-0.121	-0.122	-0.121	-0.115	-0.123
-0.121	-0.122	-0.121	-0.105	-0.121

なる。このように、トンネルランプ構造部では、浅深部のランプトンネルやカルバート等の地下構造物が周辺地盤の地震応答特性に影響を及ぼすことも考えられる。軸方向入力となる CASE2 では、本線トンネルの影響と考えられる、本線トンネルを通る測線で地盤の応答変位が小さくなる傾向が出ており（例えば図-6 の④測線の応答変位を参照）、地下構造物の影響は、今回の解析では、トンネル軸方向入力の方が大きくなる。

(2) トンネルに発生する応力

変位と同様にトンネル層間変位最大時 ($t=7.47$ 秒) でのトンネルの変形～応力コンターを図-7, 9 に示す。また、応力の絶対値最大値の分布性状を図-8, 10 に示す。

トンネル軸方向入力となる CASE1 では、a) ランプトンネル並びにカルバートで X 方向直応力 σ_{xx} が大きくなること（最大 8MPa 程度）、及び b) Von Mises 応力が、全般にわたり分岐・合流部で、さらに中壁で大きくなること、及び c) トンネル構造変化部で応力が増大することが分かる。a) の現象は、前項に示したようにトンネル及びカルバートと周辺地盤の応答変位の差が大きくなっていることから、トンネル構造物と地盤の応答変位差に起因し地盤からランプトンネル及びカルバートへの作用力が変化することによるものである。今回の解析では σ_{xx} がランプトンネルとカルバートの接合部付近でピークを示すこと、また分岐・合流点への接近にともないランプトンネルの σ_{xx} が減少傾向を示すことから、地盤からランプトンネルへの作用力はランプトンネルの変形を抑える方向に作用していると推察される。なお、ランプトンネルの挙動の素因として、トンネル深度が徐々に変化することによるトンネルと地盤の応答変位の差に起因した影響と、さらに分岐・合流点でランプトンネルの端部が拘束されること、さらにはカルバートからの作用力の影響が挙げられる。b) は、地盤からトンネルへのせん断作用が、扁平大断面となる分岐・合流部で特に顕著になった結果、分岐・合流部でトンネル躯体のトンネル軸方向へのせん断力成分 τ_{xz} が大きくなったためと推察される。c) の現象に関連し、分岐・合流点で近傍での応力（ここでは σ_{xx} ）変化の範囲を図-8 で確認すると、分岐・合流部で約 50m 区間、ランプトンネル側の本線トンネルで約 150m 区間で少なからず影響が見受けられる。

軸直角方向入力 (CASE2) では、d) トンネル構造変化部（カルバート～ランプトンネル変化部、分岐・合流部端部の妻壁と同個所周辺の本線トンネル、ランプトンネルの躯体）で応力が局所的に大きく集中すること（Von Mises 応力で最大 25MPa 程度）が特徴的である。特に応力集中は、分岐・合流部の妻壁で顕著となり、妻壁から 20～30m 程度のトンネルで影響が見受けられる（図-10）。また、全般的に Von Mises 応力が大きくなる傾向が伺えるが、軸方向入力 (CASE1) の分岐・合流部のように長い区間が連続して顕著に大きくなる傾向は見受けられない。さらに中壁の応力は、その他の構造変化部と比べ、また軸方向入力

(CASE1) の結果と比べた場合、相対的に小さくなる。さらに、軸直角方向入力では、地層境界部付近で発生応力が変化する傾向が見受けられる（図-9 (a), (b) 参照）。

2.4 まとめ

以上、トンネルランプ構造部の基本的な地震応答特性を変位、発生応力の視点から整理・考察した。今回は三次元構造の影響を把握することを主眼に弾性定数を用いた線形解析を実施しているが、地盤に発生するひずみレベルは地盤 B, C で約 0.2% のせん断ひずみ、地盤 A で約 0.4% のせん断ひずみと大きなひずみが発生する。通常では、これらのせん断ひずみレベルでは、地盤は非線形挙動を示すことから、非線形性を考慮した変形係数を採用する等の対応が求められる。さらに、トンネルランプと地盤と応答変位差に起因したトンネル発生応力の評価には、トンネル～地盤間の境界処理に関する検討が必要である。また、境界に半無限吸収境界を用いていないため地盤の半無限性が適切に表現されていないこと、数値計算上一次要素を用いており発生応力の精度が鈍る傾向が懸念されること、大規模複雑構造物であるため本質的に大規模計算が必要とされその軽減が望まれる等の課題が残っている。

以下ではこれらの諸課題のうち、地盤の半無限性を表現するために半無限吸収境界を側方境界に適用し、計算量を軽減するために均質領域にボクセル有限要素法を適用した解析手法⁵⁾により、ランプトンネルの耐震対策工について、基礎検討を行う。時空間の離散化の精度は、2. と同様に設定している。

3. ランプトンネルの耐震対策工の検討

3.1 解析モデル

ここでは、カルバート・ランプトンネル部を対象に、ランプトンネルの耐震対策工について基礎的な検討を実施する。解析モデルは、対策が無い場合、地盤 A と地盤 B の地層境界部付近からランプトンネルとカルバートの接合個所付近まで断面力が増大することが確認できたことから、当該個所を対象に、図-3 のモデルのうちランプトンネルとカルバート部を抽出したものである（図-11, 12）。要素数は約 270 万個、節点数は約 230 万点である。対策は、図-13 に示すようにトンネル発進のための立坑並びに地層境界を含むランプトンネル直上の地盤範囲で、トンネルの応答変位の低減を意図した高強度固化を実施した場合（例えば、流動化処理工法、深層混合処理工法や高強度注入材を用いた薬液注入工法）と、地層境界で地盤の剛性変化を緩和し断面力の分散を図る改良（例えば、ポリマー材⁶⁾等を用いた改良工法）を実施した場合をイメージし、基礎検討として対策効果の違いを確実に把握するため、対策範囲の物性を、①コンクリート（表-1 トンネル躯体部の物性を参照）及び②地盤 A（この場合実質的な改良範囲は地盤 B のトンネル直上部 GL-31m～GL-16m の範囲）とす

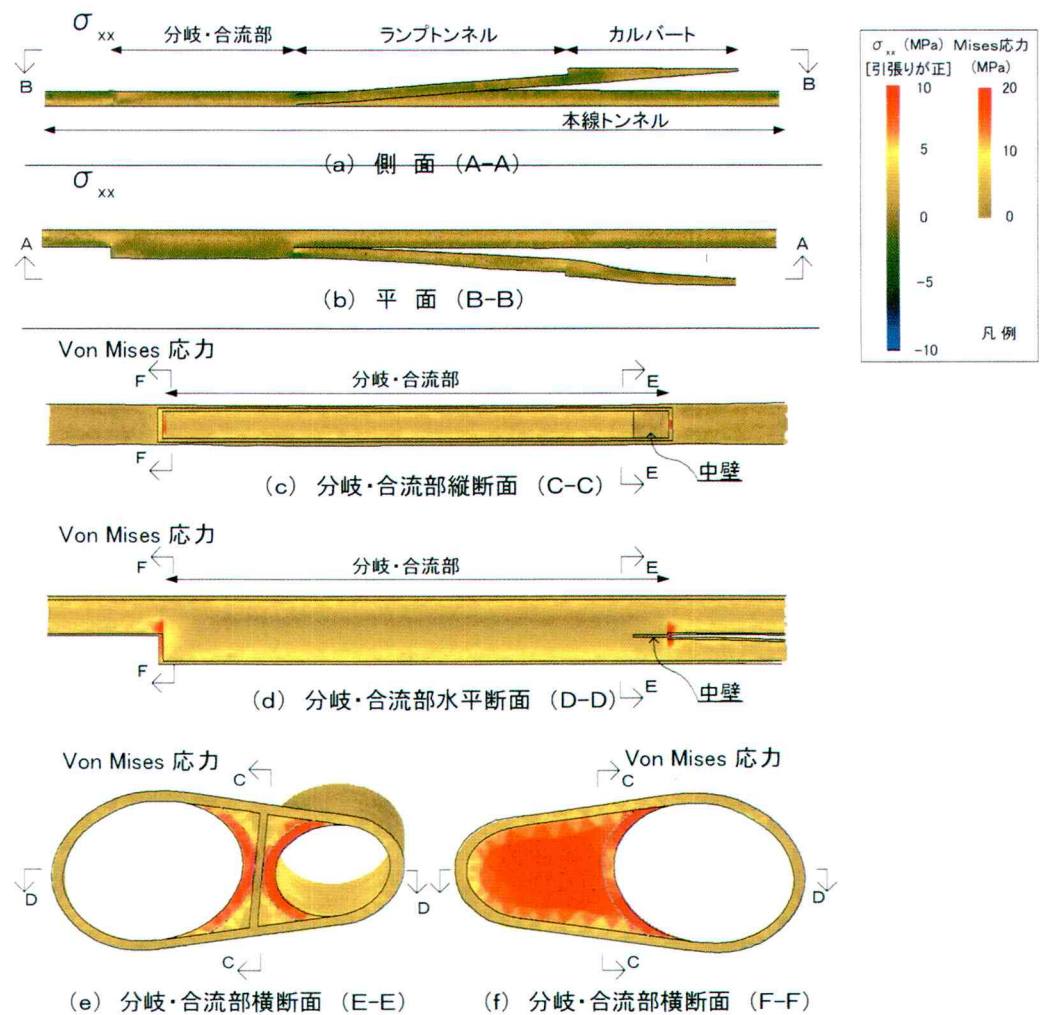


図-9 トンネル層間変位最大時($t=7.47$ 秒)の変形～応力コンターCASE2(Y 方向入力)

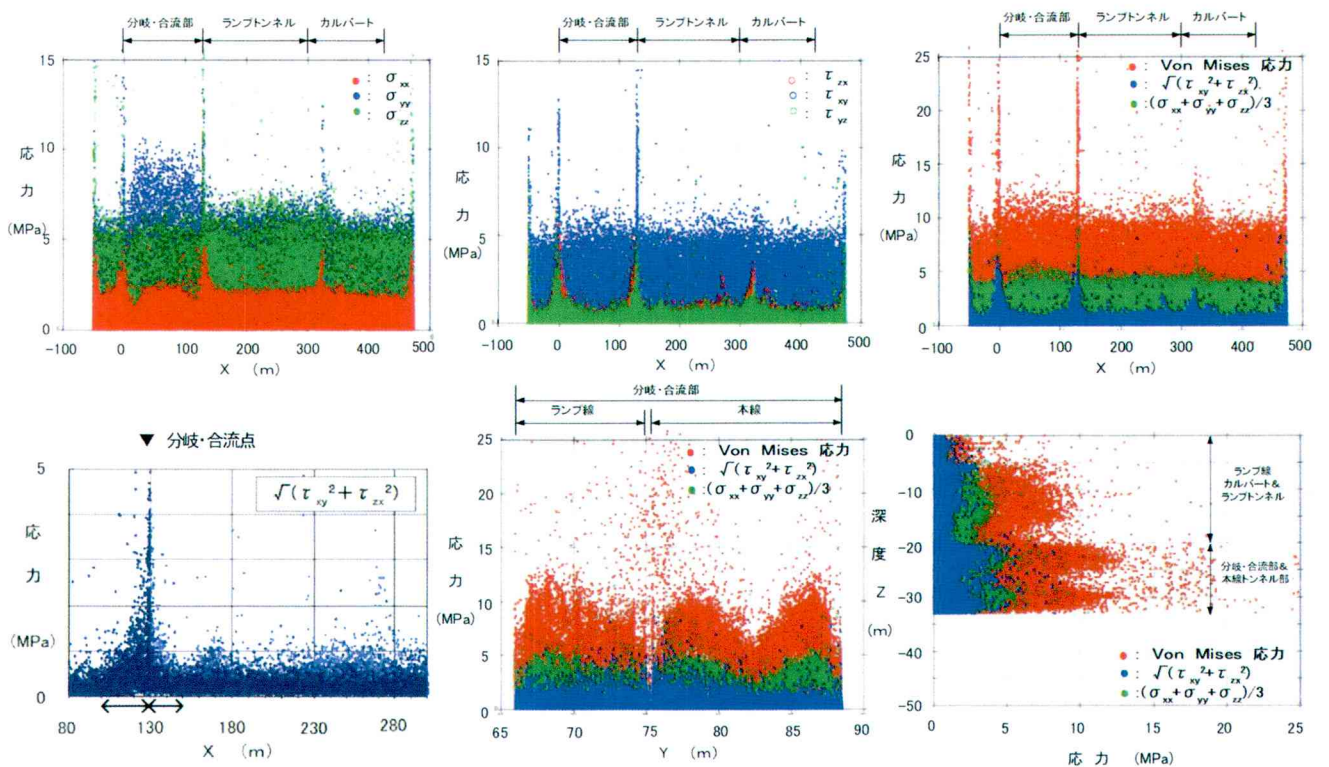


図-10 最大応力の絶対値の分布 (CASE2[Y 方向入力])

る二種類のモデルについて解析を実施する。入射波は、応答性状の確認が主眼であることから、中心周波数 1[Hz]、中心時間 1[sec]の Ricker wavelet 波を変位波としてモデル下端よりトンネル軸直角方向に平面波入力する。解析時間は 3 秒間である。

3.2 対策工の検討

比較のため実施した対策工のないケースを含め、解析結果を、各ケースの最大 von Mises 応力の分布として図-14～図-16 に示す。なお、可視化レジェンドは比較のために対策工無しの結果も含む全ケース中の最大応力値を 1.0 として正規化している。また、解析結果図中の格子は地層境界を示す。

対策工がコンクリート物性の結果（図-15）と、対策工の無い結果（図-16）を比較すると、対策工の無いモデルで発生していた、カルバート部とランプ部の接合部での応

力集中や、地盤境界部付近の応力発生はかなり軽減されており、対策工を施した領域では対策効果が現れている。しかしながら、対策工の近接領域や、カルバート上部に新たに応力が発生しており、これらの領域では、対策工の挙動が構造物本体に悪影響を及ぼしているようである。次に、対策工が固化系地盤改良の物性の結果（図-16）を見てみると、対策工を施した領域の発生応力は、コンクリート物性ほどではないが応力が軽減されていることが分かる。また、直接対策工を施していない、カルバート上部の応力も軽減されており、構造物の全体的な発生応力の低減を目的とするならば、望ましい結果と判断される。

以上から、構造物周辺地盤物性が急激に変化する場合、その影響による発生応力を、図-13 に示すような領域を改質する対策工によって低減する事が可能と考えられる。ただし、対策工を検討する場合には、それを設置したことによる周囲への影響についても十分考慮に入れなくてはならない。

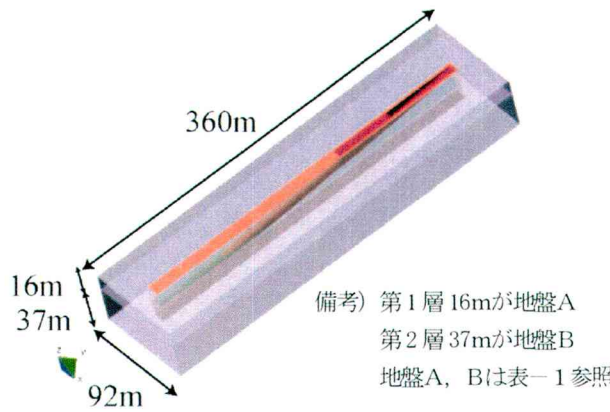
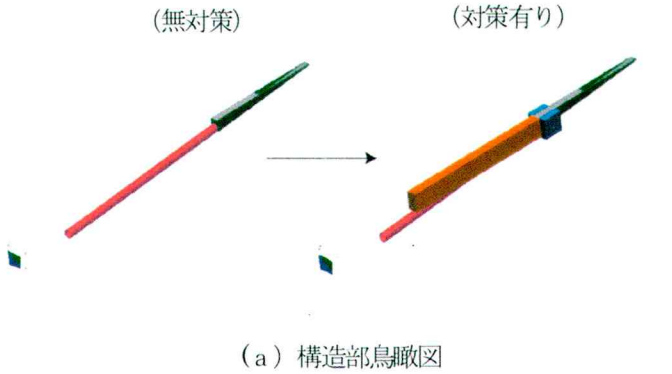


図-11 全体解析モデル (FEM+VFEM 領域)



(a) 構造部鳥瞰図

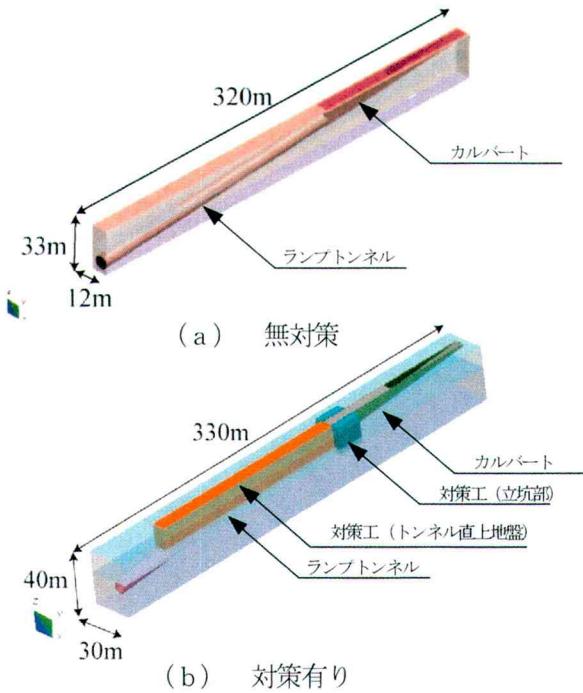
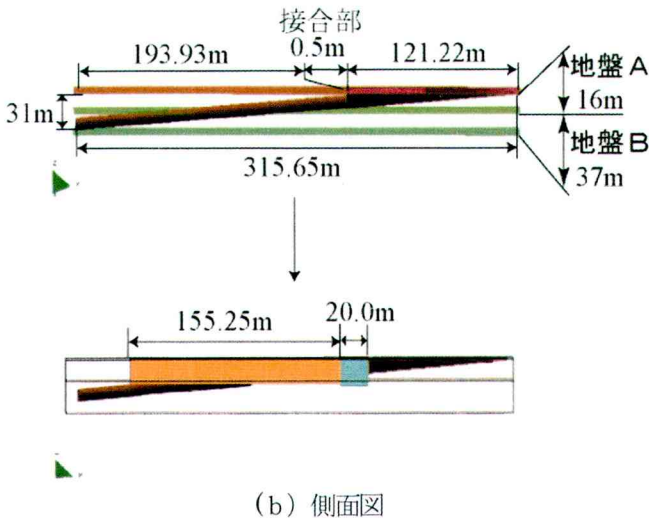


図-12 FEMモデル領域の詳細



(b) 側面図

図-13 対策工設置模式図

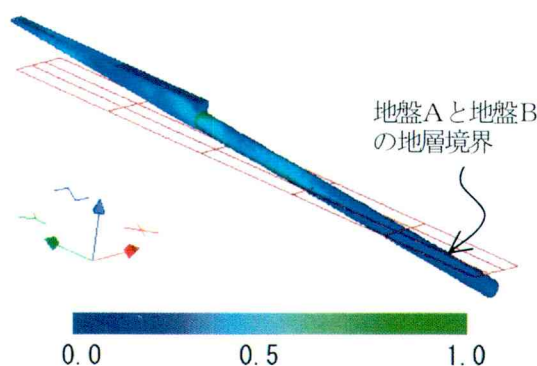


図-14 解析結果 — 対策工無し —

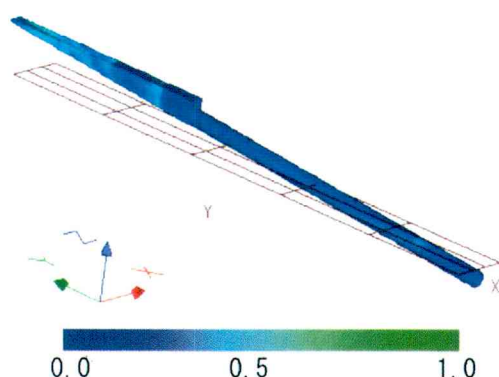


図-15 解析結果 — 対策工有り —
[対策範囲がコンクリート物性(表-1 参照)の場合]

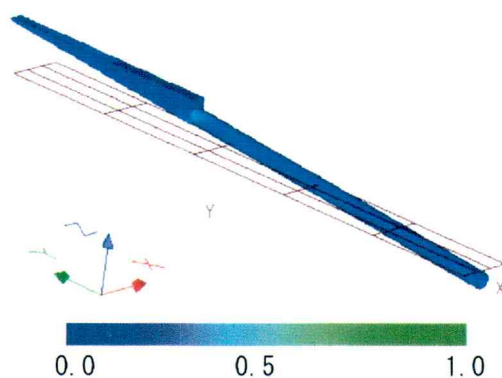


図-16 解析結果 — 対策工有り —
[対策範囲が地盤A物性(表-1 参照)の場合]

4. まとめ

本論文では、実プロジェクトで予想され、複雑な三次元構造となる道路トンネルランプを対象に、トンネル～地盤連成系大規模三次元動的FEM解析を行い、その結果を分析することでトンネルランプ構造部の地震応答特性を把握した。その結果、トンネル軸方向に地震入力を受ける場合、トンネルと地盤の応答変位差に起因し、ランプトンネル～カルバート区間で軸方向力が集中すること、及び中壁と分岐・合流部全般で Von Mises 応力が集中することを確認した。また、軸直角方向入力の場合には、構造変化部(カルバート～ランプトンネル変化部、分岐・合流部端部妻壁と当該箇所周辺の本線トンネル、ランプトンネルの躯体)で局所的に大きく応力集中することが分かった。

また、トンネルの大規模数値計算上の課題を整理した上で、地盤の半無限性を表現できる解析法を用いて、ランプトンネル～カルバート区間の耐震対策工について基礎検討を行い、周辺地盤を改良することで発生応力を軽減できることを確認した。

今後、二次要素の導入やトンネル～地盤間の境界処理機能を追加することで、発生応力の予測精度をさらに向上し、複雑な地下構造物の地震応答を定量化するとともに、三次元解析結果をトンネルの耐震設計に役立てていくことが重要と考えている。その上で、必要となる耐震対策工について検討していく予定である。

謝辞

並列演算による大規模解析に当たり、アライドエンジニアリング(株)秋葉博氏、同立花一彦氏にご協力いただきました。また、対策工の検討に関する三次元解析の実施に際し、東北大学博士前期課程の伊丹洋人氏、鹿島建設(株)ITソリューション部の沖見芳秀次長に有益なご助言をいただきました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 大保直人, 林和生, 上野健治, 鄭京哲: 大深度鉛直地下構造物の耐震設計用地震荷重, 鹿島技術研究所年報, pp.63-70, 1992.
- 2) 川島一彦他: 地盤条件変化部における共同溝の地震時軸力の計算法, 土木技術資料, Vol.30-9, pp.463-470, 1988
- 3) 川島一彦編著: 地下構造物の耐震設計, 鹿島出版会, 1994
- 4) Ohbo, N., Horikoshi, K., Yamada, T., Tachibana, K. and Akiba, H.: Dynamic Behavior of a Underground Motorway Junction due to Large Earthquake, 13th World Conference of Earthquake Engineering, 2004.
- 5) 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.
- 6) 館山, 矢口, 平山, 花森: ポリマー地盤改良に関する基礎的研究, 鉄道総研報告, Vol.16, No.3, 2002.3

(2004年9月17日受付)