

## 大規模三次元 F E M 解析による地下複雑構造物の地震時挙動

Seismic Response of Underground Complicated Structure by 3D FEM Analysis

山田岳峰\*・市村強\*\*・大保直人\*\*\*・佐茂隆洋\*\*\*\*・池田清宏†・堀宗朗‡

Takemine YAMADA, Tsuyoshi ICHIMURA, Naoto OHBO, Takahiro SAMO, Kiyohiro IKEDA  
and Muneo 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 PhD. 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 PhD. 教授 東京大学地震研究所 (〒113-0032 文京区弥生 1-1-1)

There is a recent and increasing demand for a development of super-deep underground urban space in Tokyo Metropolitan area. However a seismic response behavior of a complicated structure, such as connection part of vertical shaft and tunnel, junction of a highway tunnel and ramp way is not clear so far. Moreover, the seismic design procedure of complicate parts of underground infrastructure is not established. In this paper, the results of large-scale three-dimensional dynamic analyses for curve-tunnel and ramp way tunnel are described. Stress concentration was found to take place at following places, around curve-part, a junction between ramp way and main way tunnels and so on. Moreover spatial difference of arrival times of seismic wave at tunnel-ground system was found to be influential on the response of tunnel.

**Key Words :** large-scale problem, three-dimensional analysis, dynamic FE analysis, tunnel junction, curve-tunnel

## 1. はじめに

トンネルの耐震安全性評価では、トンネル構造や地盤条件が単純な場合には、応答変位法による耐震計算法が用いられる。一方、設計諸基準に示されるようにトンネル構造の変化部や地盤条件急変部等の特殊部では、動的解析法等を用いて別途それらの影響を考慮した検討が必要である。例えば、立坑とトンネル取合い部や、地盤条件が変化する個所では、それらの影響を勘案した設計手法が提案されている<sup>1),2)</sup>。しかしながら、トンネル曲線部や、複数のトンネルが合流あるいは分岐するトンネルでは、その影響を考慮することの必要性が以前から認識されてきたが<sup>3)</sup>、問題が非常に複雑なことから、地震時応答特性が解明されておらず、耐震設計法が整備されていない現状にある。

近年、大都市圏で進められている環状高速道路網の整備では、トンネル方式で道路を建設する計画が具体化されつつあり、地下高速道路本線と地上間の出入路として、ジャンクションやランプを有するトンネルの建設技術が必要と考えられる。当該トンネルは、通常、曲線構造を有するとともに、トンネルの分岐・合流部は構造急変部であり、また、トンネルが地下から地上に連絡する際には地層構成が変化する可能性もある。さらに、トンネルの大深度化とともに、これらの複雑な

トンネル構造が大規模となることも予想される。したがって、このようなトンネルの建設の際には、空間的に広がりがある当該大規模特殊トンネル構造全体系の地震時挙動を見極めた上で、個々のトンネル特殊部の耐震設計を行うなど、合理的な耐震設計思想の確立が、効率的な社会資本整備の観点からも望まれる。

そこで、本研究は、曲線部や分岐・合流部を有する大規模特殊トンネル構造全体系の耐震性能を明らかにすることを目的としている。本論文では、研究の端緒として、曲線トンネル及びそれを内包する比較的広がりのある地盤を四面体有限要素で細かくモデル化したトンネル～地盤連成系を対象に大規模三次元動的 F E M 解析を実施し、トンネル線形や位相差入力の影響といった基本的な視点から曲線トンネルの地震時挙動を把握した。さらに、トンネル分岐・合流部について、実務への展開の観点から、より実際に近い道路トンネルランプを対象に、兵庫県南部地震観測波を入力し、トンネル分岐・合流部の地震時挙動について確認した。

## 2. 曲線トンネルの地震時挙動

## 2.1 解析方法

現在、複雑な構造物の動的挙動や、入力地震動の位相差等の三次元的な効果を必要十分な精度で確認するため、大規模演算可能で、構造物及び周辺地盤を CAD

† Dedicated to the memory of Prof. Michihiro KITAHARA

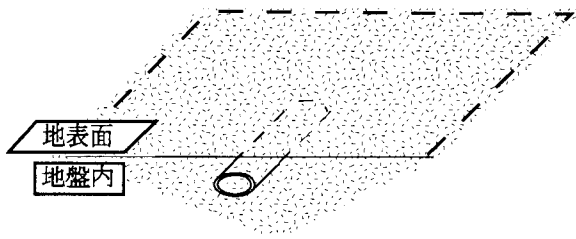


図-1 解析対象概念図

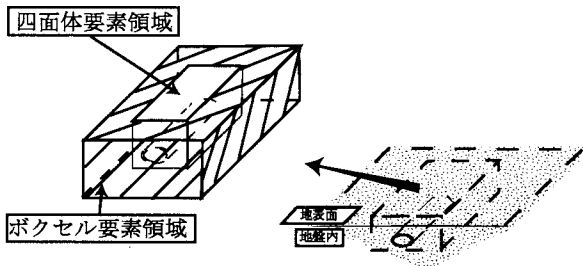


図-2 三次元動的解析モデル

表-1 数値検証用モデルの物性

	地層 1	地層 2
$C_1$ (m/sec)	200	1000
$C_2$ (m/sec)	100	600
密度 (kg/m <sup>3</sup> )	2000	2500
$\alpha$	0.008	0.032

表-2 数値検証用モデルの離散化の設定

	FEM	VFEM
要素	200	1000
節点	100	600
平均要素サイズ (m)	1.0	1.0

データより直接三次元的にモデル化し構造物の地震時応答を評価し、設計・施工に必要な情報を抽出することを目的としたプラットフォームの開発を行っている<sup>4)</sup>。

数値計算の対象は、図-1のような半無限地盤中に構造物が含まれている系である。基本的な三次元応答特性を確認することを主眼に、現段階では微小変形弾性体を仮定している。

減衰として Rayleigh 減衰を考え、支配方程式は次式を用いている。

$$\partial_i(c_{ijkl}\partial_l u_k(\mathbf{x}, t)) = \rho \ddot{u}_j(\mathbf{x}, t) + \rho \alpha \dot{u}_j(\mathbf{x}, t) \quad (1)$$

ここで、 $c_{ijkl}$ ,  $\partial_i$ ,  $\rho$ ,  $\alpha$ ,  $(\cdot)$  は、それぞれ弾性テンソ

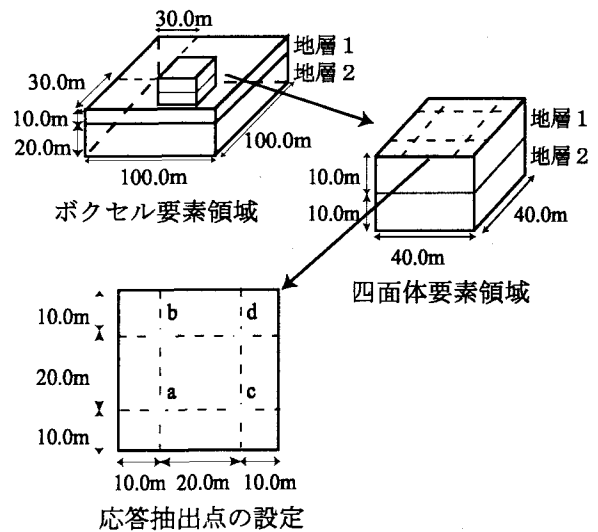


図-3 数値検証用モデル

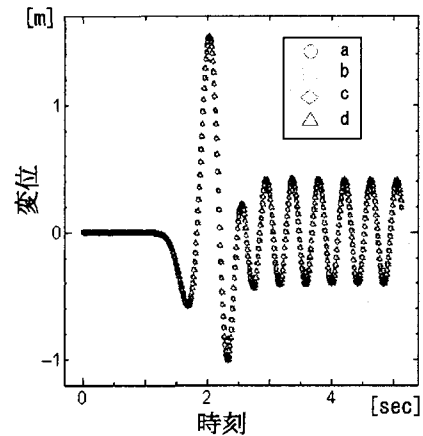


図-4 a~d の応答時刻歴波形

ル、 $i$  方向変位に関する微分、密度、減衰定数、時間微分を表している。汎用性及び今後の拡張が容易なことから空間方向の離散化には有限要素法を用いた。なお、対象となる問題に応じて陽解法が有利になる場合、陰解法が有利になる場合があるため、時間積分に中心差分法を適用し陽的に解析を行う方法と、時間積分にニューマーク  $\beta$  法 ( $\beta = 1/4$ ,  $\delta = 1/2$ ) を適用し陰的に解析を行う方法を開発している。

本解析では、図-1の系から構造物周辺域のみの有限領域を取り出し、その周囲に半無限吸収境界条件を適用する。図-2のように構造物等の複雑な部位を四節点四面体要素で離散化し、その周囲の単純な構造は均一な要素で離散化を行うボクセル有限要素法 (VFEM)<sup>5)</sup> により離散化する。離散化した式の解法として、Element-by-Element 法<sup>6)</sup> による剛性行列の評価を行うことにより、通常の FEM に比べて計算コストの軽減を図っている。また、並列計算への拡張や各種特殊要素の取り込みなどが容易な点の特徴として挙げられる。

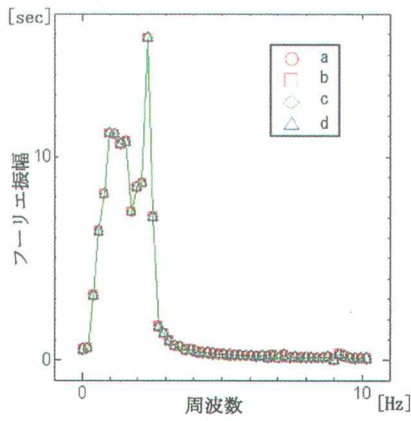


図-5 a~d のフーリエスペクトル

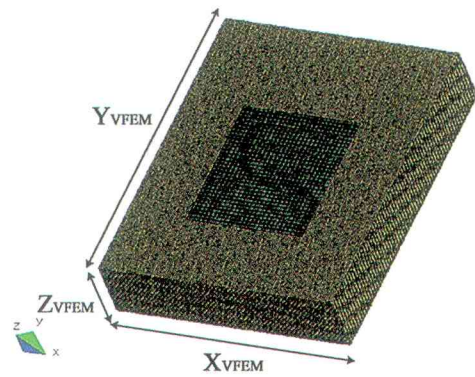


図-7 曲線トンネル解析モデル

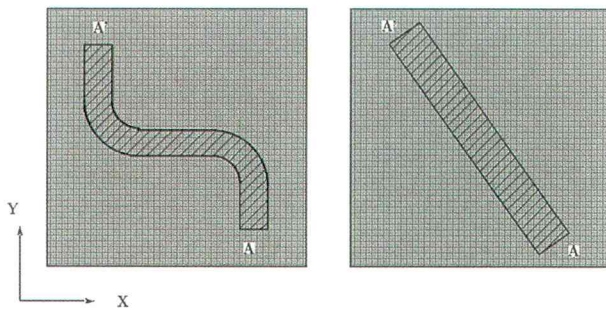


図-6 曲線トンネルモデルイメージ

表-3 曲線トンネルモデルの物性

	地盤	トンネル
$C_1$ (m/sec)	617	3373
$C_2$ (m/sec)	296	2127
density(kg/m <sup>3</sup> )	1735	2500
$\alpha$	0.02	0.001

本解析手法を用いて半無限水平成層地盤における側方境界の半無限吸収境界条件の成立性を確認するため、図-3 に示す半無限水平成層構造の動的応答解析を行った。以降、陰解法による検証例を示す。

物性は、表-1 を用いた（表中、 $C_1$  及び  $C_2$  はそれぞれ P 波及び S 波の速度。以降同様）。解析対象周波数として 10Hz までの精度を保證する設定で離散化を行い、その結果、表-2 に示す要素数、節点数、平均メッシュサイズとなった。

解析モデル下端より X 方向変位振幅を有する中心周波数 1Hz の Ricker wavelet 波を鉛直入射し、5.12 秒間の動的応答解析を行った。図-3 に示す a~d の 4 点での 10Hz 以上の成分を取り除いた応答時刻歴波形を図-4 に、また当該波形のフーリエスペクトルを図-5 に示す。これらの結果は、良好に一致することが分かる。したがって、精度的に期待される範囲内で、半無限吸収境

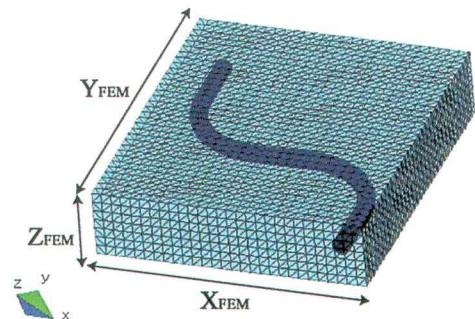


図-8 曲線トンネル FEM 領域全体図

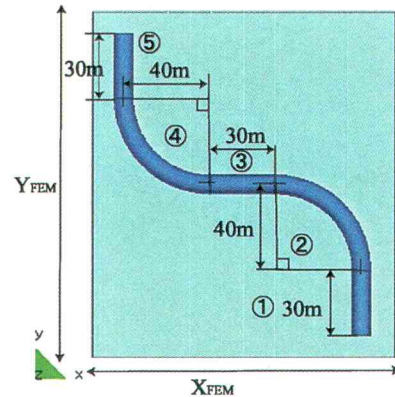


図-9 曲線トンネルモデル FEM 領域 XY 図

界条件が機能し、半無限水平成層構造の動的応答解析ができていと判断できる。なお、陽解法についても同様の検討を行い良好な結果を得ている。

## 2.2 解析モデル

本解析では、図-6 のように、A、A' の 2 地点を結ぶ曲線構造をもつトンネル（外径 8.8m、厚さ 0.4m、トンネル被り 15.5m）と、比較のため、2 地点を直線で結んだ直線トンネル（トンネル断面諸元は曲線トンネルと同様）を解析対象とした。ここで、曲線トンネルは、トンネルの曲がりによる地震応答への影響を確実に確認するため、曲率半径が 40m の急曲線トンネルとした。地盤は東京周辺の地盤を、トンネルは設計基準

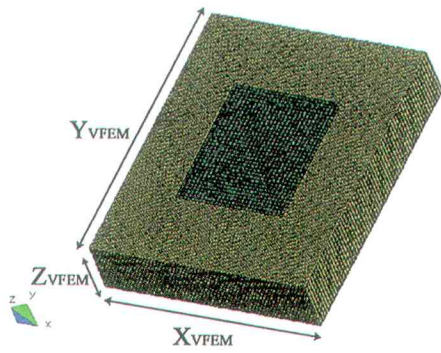


図-10 直線トンネル解析モデル

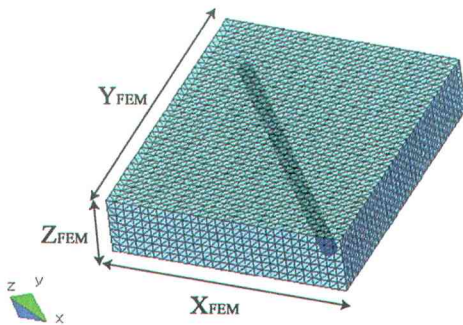


図-11 直線トンネル FEM 領域全体図

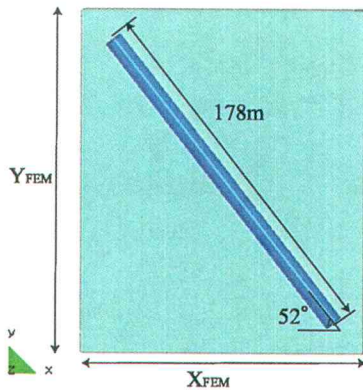


図-12 直線トンネルモデル FEM 領域 XY 図

強度  $24(N/mm^2)$  の普通コンクリートを想定し、表-3の物性を設定した。

曲線トンネル及び直線トンネルの解析モデルを図-7～9、表-4、5及び図-10～12、表-6、7に示す。これらの図表に示すようにモデル化に際しては、応力や変形といった解析結果を直接的に評価できることを念頭に、トンネルを含め四面体要素で詳細にモデル化しており、トンネルの解析では最大規模の解析モデルとなっている。入力波は、曲線トンネルの基本的な地震時挙動を確認するため、中心周波数  $1[Hz]$ 、中心時間  $1[sec]$  の Ricker wavelet 波を X 方向速度波としてモデル下端より一様に鉛直入射した。また、広域なトンネルの地震応答の確認においては、位相差のある場合の応答の

表-4 曲線トンネルモデル寸法

	FEM	VFEM
X(m)	140	280
Y(m)	160	320
Z(m)	35	70

表-5 曲線トンネルモデルの離散化の設定

	FEM	VFEM
要素	501510	43904
節点	96813	49716
平均要素サイズ (m)	6.0	5.0

表-6 直線トンネルモデル寸法

	FEM	VFEM
X(m)	140	280
Y(m)	170	350
Z(m)	35	70

表-7 直線トンネルモデルの離散化の設定

	FEM	VFEM
要素	418651	48216
節点	81062	53468
平均要素サイズ (m)	6.0	5.0

違いを検討する必要があると考えられるため、波の入力面を X 軸まわりに  $-5^\circ$  擬似的に傾けて、入力波の位相差を表現した解析も併せて実施した<sup>4)</sup>。

さらに、入力波を中心周波数  $2[Hz]$ 、中心時間  $1[sec]$  の Ricker wavelet 波とした場合の解析も実施している。なお、解析時間は 3 秒間とし、0.01 秒ごとに結果を出力させ、トンネル応答を分析している。

### 2.3 解析結果と考察

各ケースの最大 von Mises 応力の分布を図-13,15,17,19 及び図-14,16,18,20 に示す。なお、これらの図では、個々のケースを比較するため、可視化レジェンドは全ケース中の最大応力値を 1.0 として正規化している。

位相差無しの場合、曲線モデル図-13 と直線モデル図-14 の結果を比較すると、直線モデルは入力及び構造が同様でありトンネル応答変位の差がないことから、応力分布に偏りが無く、トンネルの線形に起因した応力集中は起きていないことが分かる。一方、曲線モデルは、②部位、④部位（記号は図-9 参照、以降同様）ともに応力集中が発生している。これは、②部位においては、地盤から X 方向の地盤変位の影響を受けやすい①部位

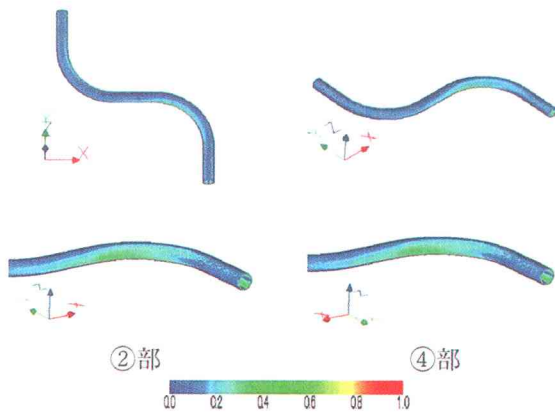


図-13 曲線トンネル解析結果（入射角 0° ,1Hz）

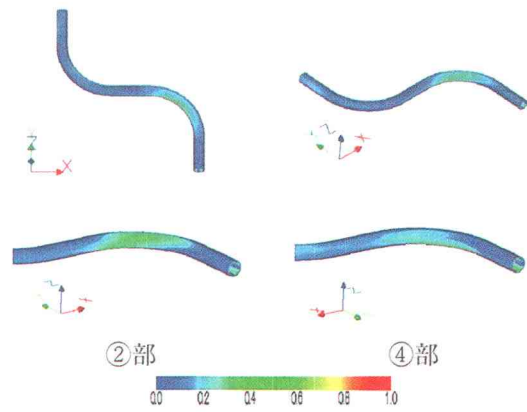


図-15 曲線トンネル解析結果（入射角-5° ,1Hz）

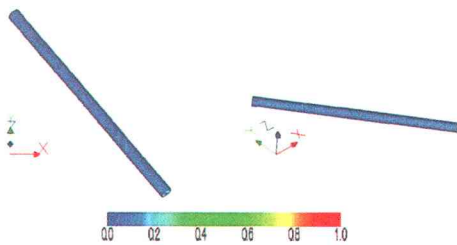


図-14 直線トンネル解析結果（入射角 0° ,1Hz）

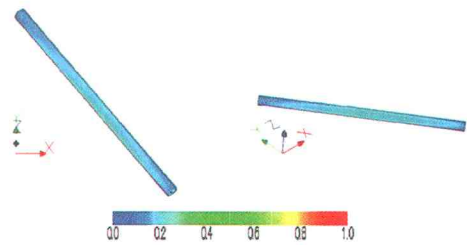


図-16 直線トンネル解析結果（入射角-5° ,1Hz）

と、それを受け難い③部位の境目に位置しているため、また、④部位においても同様に、⑤部位と③部位の境目に位置しているため、両者とも、隣接する二つの部位の応答の差を受け、応力集中が発生したと考えられる。次に、入力波に位相差の無い直線モデル図-14と位相差の有る直線モデル図-16の結果を比較する。両者ともに非対称的な応力集中は発生していないが、応力最大値は位相差有りの方が大きくなっている。その原因として、入力波に位相差がある場合には波の通過に伴って地盤の応答変位が局所的に集中する箇所が生じるため、位相差無しの時と比べて、最大応力値が大きくなったものと考えられる。なお、この応力集中は波の通過と共に伝播し、トンネル内を伝わるため、最大応力分布は一様になるものと考えられる。

次に、入力波に位相差の無い曲線モデル図-13と、位相差のある曲線モデル図-15の結果を比較する。どちらも応力集中が発生し、その部位は曲線部となっている。ただし、応力集中の範囲が異なっており、位相差の無いモデルに比べ、位相差のあるモデルにおいて②部位ではその範囲が拡大し、④部位ではその範囲が縮小している。これは、入力波に位相差のある直線モデルで起きたように、①部位でY方向に流れる動的な応力集中が発生し、地盤からの荷重を受けにくい③部位で止まることにより、①部位と③部位に挟まれた②部位はその変動の差を曲線部で吸収するために応力集中範囲が広がったものと考えられる。

最後に、それぞれのケースにおいて、入力波の中心周波数が1[Hz]のものとは2[Hz]のものを比較する。最

大応力値の分布はどのケースも1[Hz]と2[Hz]で大差はないが、最大値の変化の程度が、曲線モデルと直線モデルとで異なることが分かる。

直線モデルにおいて、2[Hz]の場合の最大応力値は、1[Hz]の場合のものに比べて2倍以上となっている。その原因として、入力されている波の周波数が高くなり、含まれている波の波長が短くなり、より地盤及び構造物に対して影響を及ぼすようになったためと考えられる。一方、曲線モデルにおいては、2[Hz]の場合の最大応力値は1[Hz]の場合のそれと比べて大きな変化は無く、今回の入力条件では入力波振動周波数の変化の影響が小さかったと考えられる。

以上より、曲線トンネルの地震応答に関して、精緻な三次元解析を実施することにより、I) 曲線部で応力が集中し、同一断面を有する直線トンネルより断面力が増大すること、II) 位相差入力の影響を受けること、及びIII) トンネル線形により、トンネル応答に及ぼす入力波周波数の影響が異なることが、確認できた。

### 3. トンネル分岐・合流部の地震時挙動

#### 3.1 解析方法

解析は、主に構造系分野で実績のある並列処理型三次元解析プログラム「ADVENTURE cluster」を、地震応答解析が可能なように拡張して、15台のワークステーション（1台当たり、1CPU[Itanium2 900MHz]、主メモリ 4GB）を用いて行った。時間積分にはニューマー

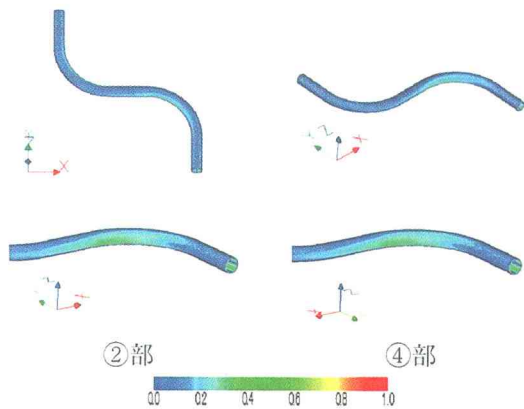


図-17 曲線トンネル解析結果（入射角 0°, 2Hz）

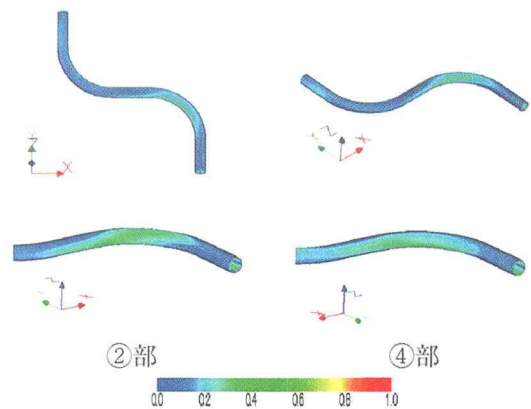


図-19 曲線トンネル解析結果（入射角-5°, 2Hz）

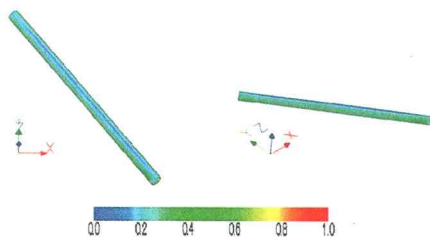


図-18 直線トンネル解析結果（入射角 0°, 2Hz）

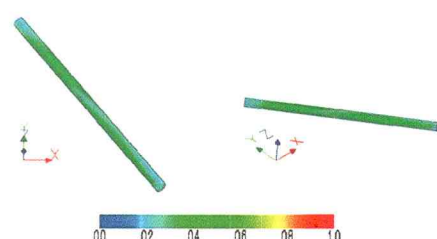


図-20 直線トンネル解析結果（入射角-5°, 2Hz）

ク $\beta$ 法 ( $\beta = 1/4, \delta = 1/2$ ) を適用した。なお以降の各解析に要した計算時間は約 11 時間、合計使用メモリは 700MB である。

### 3.2 解析モデル

解析対象は、2 車線の本線トンネルに 1 車線のランプトンネルをサイドランプ方式で接続するトンネルランプ部で、実際に想定される施工条件（本線及びランプ線の施工後に接合部を切り抜けて構築）をイメージして、以下に示す構造を設定した。

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。トンネルは、当該地盤内に土被り 20m、外径 13m の本線トンネルから地上部へのアクセスとして外径 9m のランプトンネルが接続される場合を想定した。モデルの概要を図-21 に示す。トンネルのライニング厚さはいずれも 0.75m とし、またランプトンネルの勾配は 9% とした。なお、ランプ線の地上部に近い部分には掘割構造を配置した。

解析上のモデルは、解析対象周波数を 10Hz としてメッシュサイズを設定し、詳細な挙動評価を優先して、トンネル鋼殻からトンネル分岐・合流部に出現する中壁に至るまで精緻にモデル化した。要素は約 170 万個、節点は約 31 万点である。なお、モデル化において、施工過程上必要と思われる補助工法を含めた構造毎に物性値を変更できるように要素グループを細分化しているが（図-21 の色表示を参照）、本解析では、3 層構造

の地盤内に掘割部を有するトンネル構造だけを設定した。物性を表-8 に示す。解析条件は、左右側方境界は鉛直固定、水平自由とし、底面は固定境界とした。解析は、同モデル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-22 参照、最大加速度 600gal）を解析モデル下面にトンネル軸方向と軸直角方向にそれぞれ入力するケースを実施した<sup>7),8)</sup>。

### 3.3 解析結果と考察

地下構造物の耐震設計では、地盤・トンネルの応答変位の深さ方向分布が重要となる。図-23 には、各入力方向の解析で得られた、ランプ部の断面位置での地盤（トンネル中心から 40m 離れた位置）、本線トンネル中心位置及びランプトンネル位置の変位最大・最小振幅の深さ方向分布を示す。

Y 方向（トンネル軸直角）入力では、3 断面の変位振幅は同じである。一方、X（トンネル軸）方向入力に対してトンネル下部（深度 -33m）までは地盤とトンネル位置での応答性状は同じである。しかし、トンネル部分（-20m ~ -33m）ではトンネルの応答が小さくなっている。さらにトンネル上部地盤部の変位振幅は周辺地盤の振幅より小さくなっている。また、ランプ部の応答も同じ傾向を示している。この結果は、トンネル軸方向に地震動が作用する場合にトンネル周囲に大きな荷重が作用した可能性を示唆している。

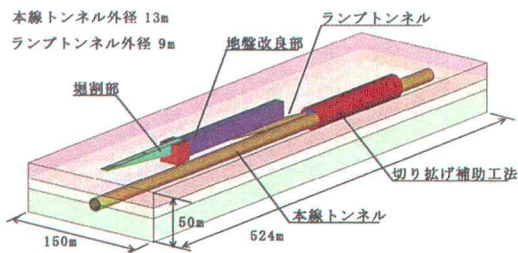


図-21 トンネル分岐・合流部解析対象モデルの概要

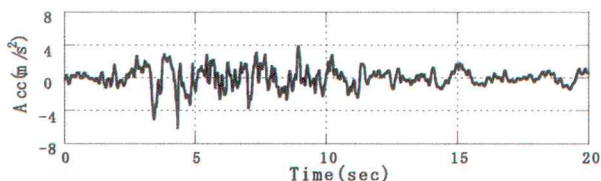


図-22 トンネル分岐・合流部モデルの入力波形

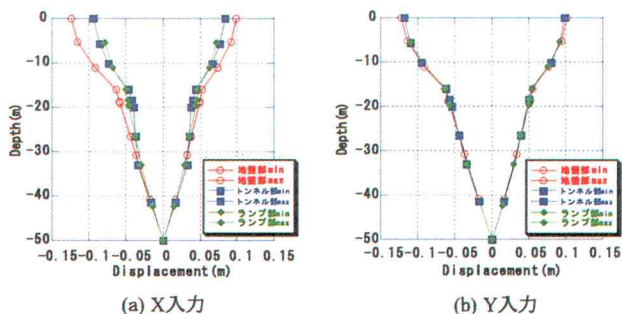


図-23 最大変位の深さ方向分布 (トンネル分岐・合流部モデル)

図-24 及び図-25 には、トンネルの変形に伴って構造体に発生する応力分布の一例として、X方向及びY方向入力に対して、3.6秒経過時点でのトンネルの変形とX方向応力の分布を示す。X方向入力では、ランプトンネル部に  $1\text{MN}/\text{m}^2$  を越える引張り応力が発生している。特に、ランプトンネルのA、B部分に集中している。

一方、Y方向入力では、本線とランプトンネルの接合部 (図中B)、ランプ線端部 (図中C)、及び掘削部 (図中A') で大きな応力が発生している。

両解析で得られた各応力の発生原因として、X方向、Y方向の各入力に対してトンネル設置深度の差すなわち地盤の応答変位の差によってランプトンネル部及び本線トンネルとランプトンネルとの接合部で特殊な断面力が発生するものと考えられる。また、トンネル構造が変化する個所で発生応力が大きくなるようである。

図-26 及び図-27 にはX方向及びY方向入力でトンネル軸方向及びトンネル軸直角方向に発生した最大応力の発生位置を示す。

X方向入力では、X方向応力の最大値が掘削部で、Y

表-8 トンネル分岐部・合流部モデルの物性

	S波速度 (m/s)	弾性係数 (MN/m <sup>2</sup> )	ポアソン比	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	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・掘削部		34300	0.17	2600	3

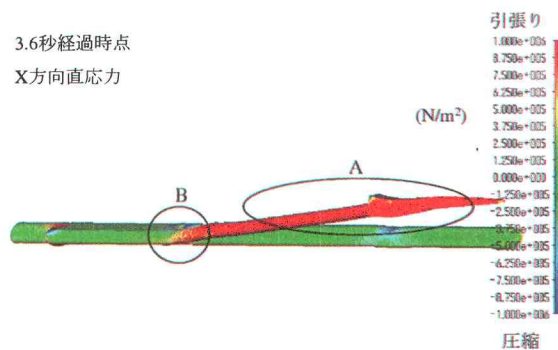


図-24 X方向入力時の応力発生状況

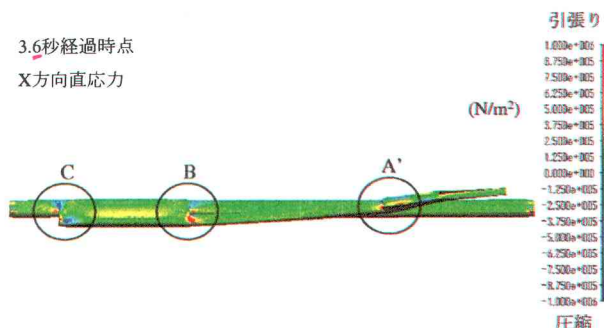


図-25 Y方向入力時の応力発生状況

方向入力に対するY方向応力の最大値はランプトンネル端部のトンネルを塞いでいる壁で、それぞれ発生している。

#### 4. まとめ

本論文では、大都市環状高速道路の建設の際想定される地下ジャンクションやランプトンネルの建設において必要と考えられる、複雑な大規模特殊トンネル構造全体系の地震時挙動の把握と合理的な耐震設計法の整備を目的に、その基礎検討として、大規模三次元FEM解析を駆使して、曲線トンネルとトンネル分岐・合流部の地震時挙動を解析的に確認した。その結果、曲線トンネルについては、Ⅰ) 曲線部で応力が集中し、同一断面を有する直線トンネルより断面力が増大すること、Ⅱ) 位相差入力の影響を受けること、及びⅢ) トンネル応答は入力波周波数の影響を受けることなど従来

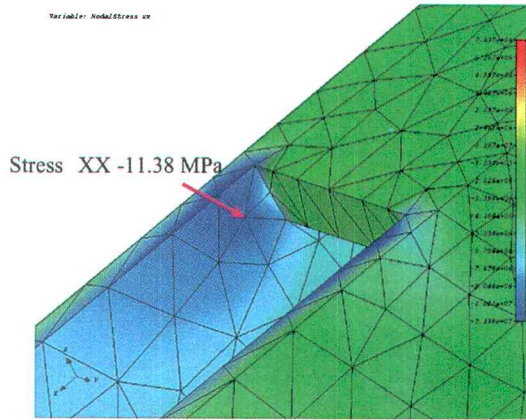


図-26 X方向応力の最大応力発生位置

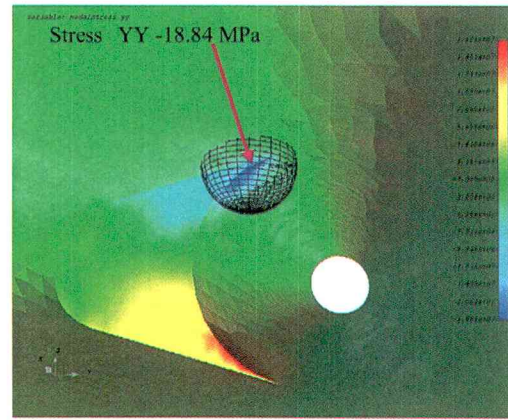


図-27 Y方向応力の最大応力発生位置

から指摘されている定性的な知見を FEM 解析で確認することができた。また、同様に、トンネル分岐・合流部の挙動として、Ⅰ) 入力方向によってトンネル周辺地盤の応答が異なること、Ⅱ) トンネル軸方向入力では、ランプトンネル勾配部で軸方向に大きな応力が発生すること、さらには、Ⅲ) トンネル軸直角方向の入力では、本線トンネルとランプトンネルの接合部近傍、ランプトンネル端部の壁部及び掘割部で発生応力が大きくなることを確認した。

以上、定性的な傾向を把握した。今後さらに分析を進め、各構造の耐震性を定量的に検討するとともに、大規模トンネル構造全体系の地震時挙動を見極めながら、複雑なトンネル構造の合理的な耐震設計法の検討に、大規模三次元 FEM 解析結果を役立てていく予定である。

#### 謝辞

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) 佐茂隆洋, 山田岳峰, 市村強, 大保直人, 伊丹洋人, 沖見芳秀, 池田清宏, 堀宗朗: 複雑地下構造系の動的応答に関する基礎検討, 第 59 回土木学会年次学術講演会, 2004. (投稿中)
- 5) Hollister, S.J. and Kikuchi, N.: Homogenization theory and digital imaging; a basis for studying the mechanics and design principles of bone tissue, Biotechnology and Bioengineering, 43(7), pp.586-596, 1994.
- 6) Wenget, J.M. and Hughes, T.J.R.: Solution algorithms for nonlinear transient heat conduction analysis employing element-by-element iterative strategies, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, pp.711-815, 1985.
- 7) 大保直人, 山田岳峰, 立花一彦, 秋葉博: 大規模三次元解析によるトンネルランプ部の地震時挙動, 第 59 回土木学会年次学術講演会, 2004. (投稿中)
- 8) 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. (投稿中)

(平成 16 年 4 月 16 日 受付)