

トンネル曲線部の三次元地震応答解析

3D Earthquake Response Analysis for Curved Tunnel

山田岳峰¹・大保直人²・市村強³・山木洋平⁴・伊丹洋人⁵

Takemine Yamada, Naoto Ohbo, Tsuyoshi Ichimura, Yohei Yamaki and Hirohito Itami

¹正会員 工修 鹿島技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)

E-mail: takemine@kajima.com

²正会員 工博 鹿島技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)

³正会員 博(工) 東京工業大学助教授 大学院理工学研究科土木工学専攻
(〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1)

⁴学生会員 東京工業大学 大学院理工学研究科土木工学専攻 (〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1)

⁵正会員 工修 鹿島技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)

Recently, there is a great demand for a development of super-deep underground urban space in Tokyo Metropolitan area. However the seismic response of a complicated structure, such as connection part of vertical shaft and tunnel, junction of a highway tunnel, ramp way, and bent part of tunnel is not clear so far. Moreover, the seismic design procedure of complicated parts of underground infrastructure has not been established. In this paper, the results of a large-scale three-dimensional dynamic analysis for tunnel with the bent part is introduced and new seismic design concept for large scale complicated tunnel structure is described considering 3D effect of tunnel's seismic performance.

Key Words : 3-dimensional effect, Curved tunnel, Excitation direction, New seismic design concept

1. はじめに

最近、大規模で複雑な構造を有する地下構造物の建設が盛んである。例えば、都市域でトンネル方式により整備が進められている環状高速道路トンネルは、大断面で、平面線形・縦断線形が変化し三次元的な広がりをもつ広域大規模構造物であり、さらにトンネル分岐合流部や、ランプトンネル、曲線トンネル、地下インターチェンジなどの複雑な構造を有している。このような広域で大規模な複雑地下構造物の地震応答は、三次元的な構造形状の影響だけでなく、地盤構造や地震入力に関連した三次元的な地盤応答の影響も受けると考えられ、その応答性状は地点毎に異なることが予想される。そこで、著者らは、耐震設計の第一段階で、トンネル一般部を対象とした通常の耐震設計検討とともに、トンネル構造と地盤応答の三次元性の影響を考慮できる広域モデルを用いて全体系の検討を実施し耐震性が懸念される箇所を抽出した後、第二段階で当該懸念箇所について詳細設計を行う設計法に関する研究を現在実施

している。その際、詳細設計では、トンネル分岐合流部のように複雑な地震応答が推定される構造物の場合には、複雑な構造形状をモデル化した大規模三次元地震応答解析^{1), 2)}を実施し、設計照査に活用することを念頭においている。

本報文では、複雑地下構造物の一例として曲線トンネルを取り上げ、三次元地震応答解析を実施し、入力地震波の方向が曲線トンネルの応答に与える影響について確認する。また、現在検討を進めている全体系検討から耐震懸案個所の詳細検討に至る設計法の概要を紹介する。

2. 大規模三次元解析例(曲線トンネルの場合)

(1) 解析モデル

解析モデルを図-1に、解析条件を表-1に示す。

解析対象は、曲率半径40mのRC造(ヤング率 3.0×10^7 kN/m², ポアソン比0.15)の急曲線トンネル(外径8.8m, 厚さ0.4m, トンネル土被り15.5m)が互いに

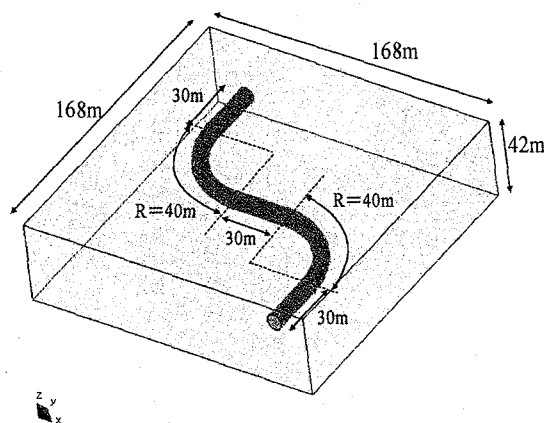


図-1 解析モデル(NFEM 領域)

近接するモデルであり、参考文献^{1),2)}で用いた解析手法に準じた解析を行う。同解析では、複雑な構造がある領域 (NFEM領域) とほぼ均質な領域 (VFEM領域) に分けることにより効率的な解析を行っている。即ち、曲線トンネルを含む周辺地盤の領域をNFEM領域とし、非構造の四面体二次要素 (最大節点間隔2.1m) で離散化した。NFEM領域の外側に位置し側面・底面を含む周囲の地盤領域はVFEM領域とし、構造格子の一次のアイソパラメトリック要素 (ボクセル要素、一辺2.1m) で離散化している。入力地震波は、地表面での応答が100gal、中心周波数1.6HzとなるRicker波を設定し、SHAKEを用いて基盤位置GL-46.2mでの引き戻し波 (時間刻み0.01秒、解析ステップ1024、図-2参照) を作成し、入力波とする。側面境界は半無限吸収境界を、基盤面に吸収境界を適用し、当該入力波を基盤にx方向並びにy方向に入力した線形三次元地震応答解析をそれぞれ実施する。なお、線形解析であるので、x方向並びにy方向の結果を重ね合わせることによって、任意の入射方向での応答を得ることができる。ここでは、入射方向で変位振幅が同じになるように重ね合わせ、入射方向の影響を検討した。

(2) 解析結果

解析結果を図-3に示す。同図は、変位応答が最大となる2.5秒におけるトンネル応答を整理したもので、地震波の入力方向を、x方向からy方向に向かい入射角度を $\theta=0\sim90$ 度 (ここでx方向は $\theta=0$ 度、y方向は90度) の範囲で22.5度刻みで変化させた結果である。

解析結果から、トンネルの応答変位、トンネルに発生する応力 (von Mises応力) は、トンネル構造形状 (直線・曲線) と入力波入射角の関係で変化することが分かる。応答変位は、直線トンネルに入力波が当該トンネル横断方向に入射した場合に最大となるが、曲線部での応答変位は直線トンネルに比べ

表-1 解析条件

	P波速度 Vs (m/sec)	S波速度 Vp (m/sec)	単量 ρ (kg/m ³)	減衰定数 α (-)	地盤厚さ (m)
地盤 No.1	497	150	1500	0.141	42.0
地盤 No.2	1492	450	2000	0.141	4.2
トンネル	3584	2230	2500	0.141	—

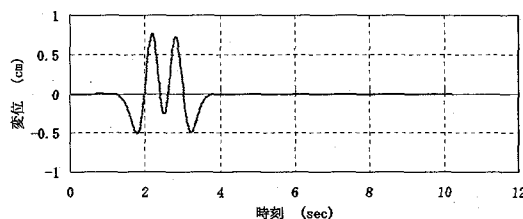


図-2 入力地震波

総じて小さくなる (トンネル上下間相対変位も同様)。例えば、 $\theta=45$ 度入射では応答変位が、トンネル構造に係わらず概ね一樣になるが、変位量は、直線トンネルにトンネル横断方向に入力波を入射した場合の解析結果に比べて小さくなる。一方、応力最大値は、解析ケースに係わらずほぼ同じ値を示す。同様に、最大応力発生個所もトンネル横断方向と入射方向が一致するトンネル断面で応力が大きくなる傾向を示す。ただし、図-4に示されるように、断面内の応力分布の傾向は、直線部と曲線部で異なり、直線部ではトンネル内側で応力が大きくなるのに対して、曲線部では当該解析ケースではトンネル中心の左断面ではトンネル外側で右断面ではトンネル内側で応力が大きくなる。この原因として、曲線部では、トンネル縦断方向の影響としてトンネル軸方向に曲げを受けることが挙げられる。例えば、 $\theta=45$ 度のケースでは、トンネルの応答変位が場所によらず概ね同様にも係わらず、トンネル発生応力は曲線部の方が明らかに大きくなっており、縦断方向の影響と考えられる。

以上、今回の曲線トンネルの例では、von Mises応力の最大値は、結果的に各ケースで大差はないが、直線部に比べ、曲線部では応答変位が小さく、断面内の応力分布も異なっていることから、直線部と曲線部では応力の発生メカニズムが異なること、曲線部ではトンネル縦断方向の挙動 (トンネル軸方向の曲げ) が影響していることが確認できた。トンネル横断と縦断のどちらの挙動が卓越するかは、トンネル径と地震波の入射方向、さらには地盤の挙動によって変化すると予想される。したがって、トンネルの耐震設計を合理化するためには三次元的な挙動を理解することが重要である。

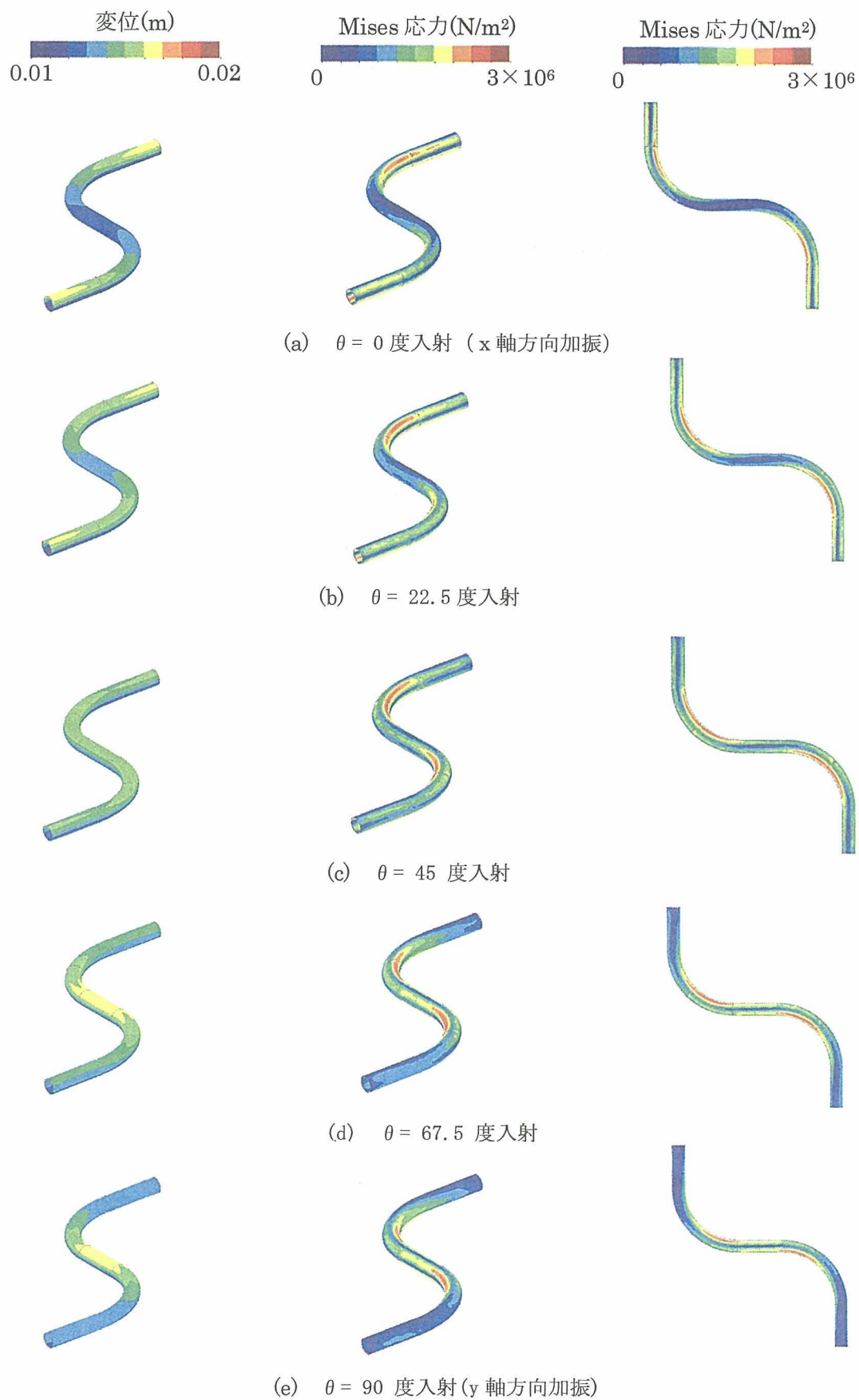


図-3 解析結果 (左から, 応答変位, Mises 応力, Mises 応力平面図)

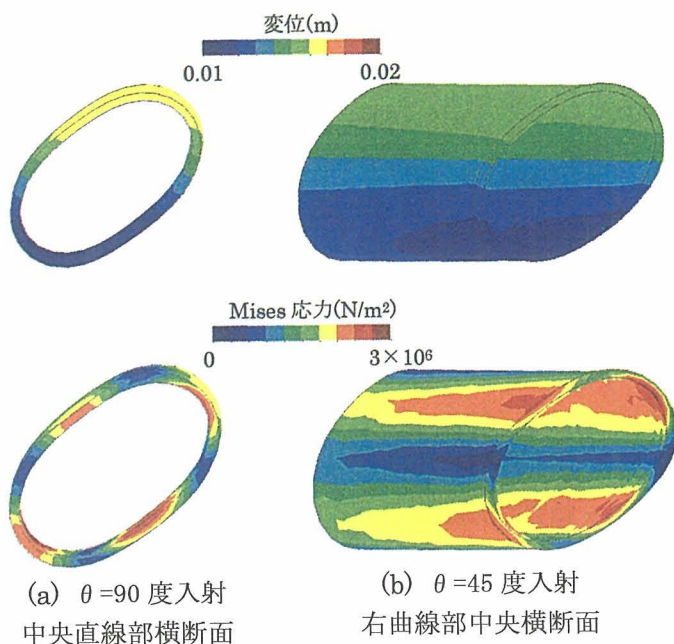


図-4 解析結果拡大図

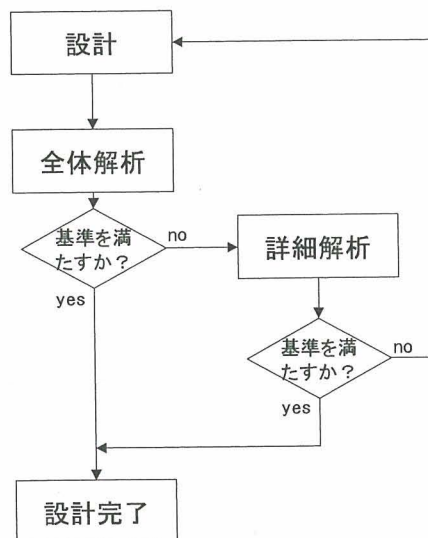


図-5 耐震設計フロー

3. 全体系検討から耐震性懸案個所の詳細検討

トンネルの地震応答は、三次元的な構造形状の影響だけでなく、地盤構造や地震入力に関連した三次元的な地盤応答の影響も受ける。例えば、前述したトンネル曲線部の検討では、トンネル縦横断の挙動は、トンネル径や地震波の入力方向の影響を受けることが予想され、さらに、曲線部は地震波の位相差入力の影響も大きいことが確認されている¹⁾。

そこで、著者らは現在、トンネルの三次元的な構造形状や地盤応答の影響を検討できる広域的な全体系モデルで、耐震設計上の懸案個所を確認し、その上で、懸案個所につき詳細検討する設計手順を検討している。

設計手順のフローを図-5に示す。手順の概要は次に示す通りである。まず、はじめに、広域の三次元地盤モデルからトンネル線形も考慮した全体系モデルを作成し、擬似三次元地震応答解析³⁾などからトンネル位置の三次元地盤応答を予測する。次に三次元応答変位法に当該地盤応答を入力した場合のトンネル応答を解析し、照査基準と照らして耐震設計上懸念される個所を抽出する。同懸案個所について詳細検討を行い、最終的に設計照査する。

その際、トンネル分岐合流部のように複雑な地震応答が推定される構造物の場合には、複雑な構造形状をモデル化した大規模三次元地震応答解析^{1), 2)}を実施し、設計照査に活用する。

4. あとがき

トンネル曲線部を例題に、複雑な構造を有す耐震性懸案個所の耐震検討法として今後活用が望まれる大規模三次元FEM地震応答解析法を用いた解析例を示した。さらに、大規模で複雑な構造を示すトンネルの耐震設計につき、広域から部分の詳細検討に至るトンネルの耐震設計の流れを紹介した。

謝辞：本研究にあたり、防災科学技術研究所川崎ラボラトリーの鈴木猛康博士、鹿島建設土木設計本部の沖見芳秀設計長、勝川藤太設計主査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) 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.
- 2) 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.
- 3) Takeyasu SUZUKI and Kunitaka UNAMI, The extended quasi-three-dimensional ground model for irregularly bounded surface ground, Proc. of JSCE, No.446/I-19, pp.33-43, April 1992