

トンネル全体系の耐震性評価法に関する検討

山田 岳峰¹・市村 強²・大保 直人³・堀 宗朗⁴・伊丹 洋人⁵・鈴木 孝⁶

¹鹿島技術研究所上席研究員 土質・地盤環境グループ (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)

E-mail: takemine@kajima.com

²東京工業大学准教授 大学院理工学研究科 (〒152-0033 東京都目黒区大岡山2-12-1)

E-mail: ichimura@cv.titech.ac.jp

³鹿島技術研究所上席研究員 都市防災・風環境グループ (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)

E-mail: ohbo@kajima.com

⁴東京大学教授 地震研究所 (〒113-0032 文京区弥生1-1-1)

E-mail: hori@eri.u-tokyo.ac.jp

⁵鹿島技術研究所研究員 土質・地盤環境グループ (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)

E-mail: itamihi@kajima.com

⁶東京工業大学 大学院理工学研究科 (〒152-0033 東京都目黒区大岡山2-12-1)

E-mail: suzuki@e-society.cv.titech.ac.jp

都市域における地下空間の高度利用に伴い、道路・鉄道などの大規模社会基盤施設が地下に整備されつつある。このような大規模かつ複雑な社会基盤施設の複雑な地震時挙動を評価するため、建設地点のサイト特性を考慮したサイトスペシフィックな解析検討の実施が耐震設計において望まれる。本報告では、サイトスペシフィックな地震動を得るための基礎的解析を行い、1) トンネル全体系の耐震性を検討し耐震性懸案箇所を抽出・評価し、2) 抽出箇所について複雑なトンネル構造をモデル化した詳細検討を繰り返すことにより、トンネル全線で耐震安全性を合理的に満足させる耐震性評価法について報告する。

Key Words : *Underground structure, Site specific analysis, Large-scale FE analysis*

1. はじめに

平成 13 年 4 月に施行された「大深度地下の公共的使用に関する特別措置法」¹⁾を契機として、大深度地下の有効活用がすすめられ、大都市圏において高速道路や鉄道を大深度地下に構築する計画が具体化されつつある。これらの大規模かつ複雑な社会基盤構造物の構築において、最新の施工技術の開発のみならず、設計段階における耐震性及び災害時機能確保の評価が重要となっている。このような大規模かつ複雑な社会基盤施設の複雑な地震時挙動を評価するため、建設地点のサイト特性を考慮したサイトスペシフィックな解析検討の実施が、耐震設計において望まれる。

そこで、本報告では、地震動のサイトスペシフィックな特性を調べるための基礎的解析を行い、1) トンネル全体系の耐震性を検討し耐震性懸案箇所を抽出・評価し、2) 抽出箇所について複雑なトンネル構造をモデル化した詳細検討を繰り返すことにより、トンネル全線で耐震安全性を合理的に満足させる耐震性評価法について

報告する。2章で当該手法の概要を述べ、3章で耐震性懸案箇所の詳細検討として、曲線トンネル並びにランプトンネルの地震時挙動を紹介する。

2. トンネル全体系の耐震性評価法の基本概念と解析技術

トンネル全体系の耐震性評価法の考え方を図-1 に示す。基本概念は、サイトスペシフィックな解析を行い、検討対象トンネル全線を含む全体系モデルの検討で耐震性が懸念される部位を抽出・評価し(以降、全体検討と称す)、その後、当該部位の耐震安全性を詳細に評価する(以降、部分検討と称す)二段階の評価を実施し、トンネル全線の耐震安全性が確保されるまで、トンネルの線形や構造を見直ししながら、全体検討から部分検討までを繰り返す手法である。その際、GIS や CAD 等で管理された地盤や構造物の情報を、メディエーターを介して解析入力データに自動変換し解析モデルの構築や見直し、

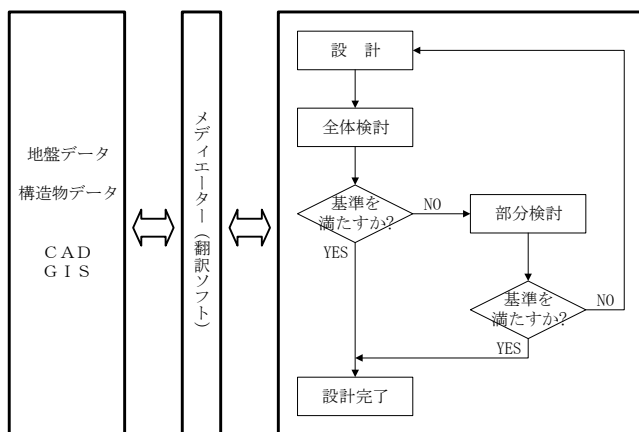


図-1 トンネル全体系の耐震性評価法

さらには解析結果の評価に役立てることにより、効率的で実用的な評価が可能となる。

同評価法の解析技術の組み合わせを、表-1 に示す。評価ケース 1 は、全体検討・部分検討とも三次元動的 FEM 解析を利用するもので、大規模問題の取り扱いに優れる階層型解析²⁾ (図-2 参照) の利用が有望である。評価ケース 2 とケース 3 では、全体検討として、従来、トンネル長手方向の設計検討に用いられているトンネル・地盤系を梁・地盤ばね系でモデル化する三次元応答変位法による解析を実施する。その際、三次元応答変位法の入力に用いる地盤応答は、建設地点のサイト特性を考慮した三次元地盤モデルの地震応答解析結果(解析方法は、三次元動的 FEM 解析、或いは擬似三次元地震応答解析³⁾)を用いる。

一例として、擬似三次元地震応答解析結果の検討例を示す。解析対象は、沖積層で形成される埋没谷の広域三次元地盤モデル (図-3(a)) である。ここで、三次元地盤モデルは、文献収集した194本のボーリングデータから、三次元地質構造を解析した後、軟弱地盤と硬質地盤の二層地盤構造としてモデル化した。地盤定数 (解析定数) を表-2に示す。作成された三次元地盤モデルから、構造物情報としてトンネル位置情報とともに、メディエーターを介して、解析に必要な入力データを自動生成している。解析モデル底面に、最大振幅100gal、中心周波数1.5HzのRicker波を入力し、解析を実施した。解析結果 (地表面の応答変位最大値分布) を図-3(b)に示す。図-3(b)から、沖積層の堆積構造に対応し応答変位最大値が変化している傾向が同え、地盤応答が三次元的な地盤構造の影響を受けている様子が確認できる。地震時地盤応答の評価法として、擬似三次元解析法を活用できれば、三次元応答変位法による耐震性懸案個所の抽出は、より効率的な検討が可能となる。

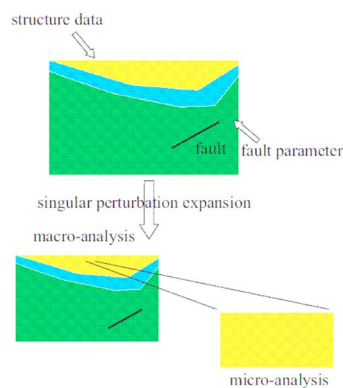
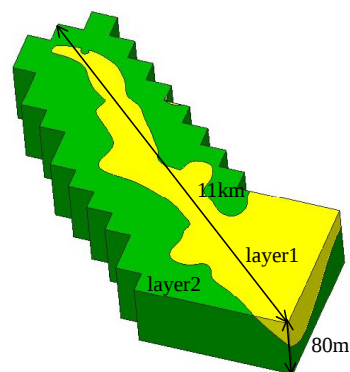


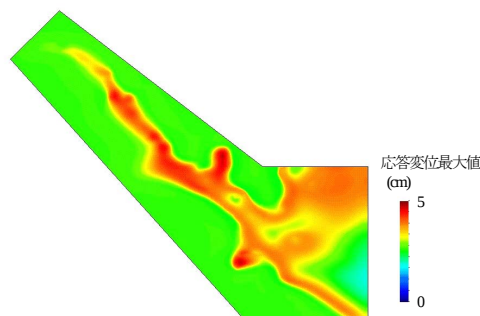
図-2 階層型解析の基本フロー²⁾

表-1 解析技術の組み合わせ

評価 ケース	全体検討	部分検討
1	三次元動的 FEM 解析 (階層型解析)	
2	地盤応答: 三次元動的 FEM 解析 構造物応答: 三次元応答変位法	三次元動的 FEM 解析
3	地盤応答: 擬似三次元解析 構造物応答: 三次元応答変位法	三次元動的 FEM 解析



(a) 解析モデル



(b) 解析結果

図-3 擬似三次元地震応答解析

表-2 擬似三次元解析の解析定数

	ρ (kg/m ³)	V_p (m/s)	V_s (m/s)	h
layer1	1500	497	150	0.1
layer2	2000	1492	450	0.1

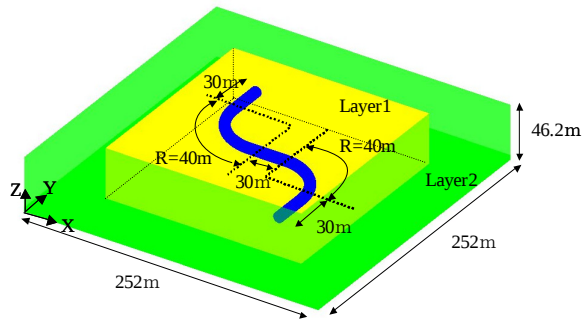


図-5 曲線トンネル解析モデル

表-3 曲線トンネルモデルの解析定数

	ρ (kg/m ³)	V_p (m/s)	V_s (m/s)	α (1/s)
layer1	1500	497	150	0.141
layer2	2000	1492	450	0.141
tunnel	2500	3584	2230	0.141

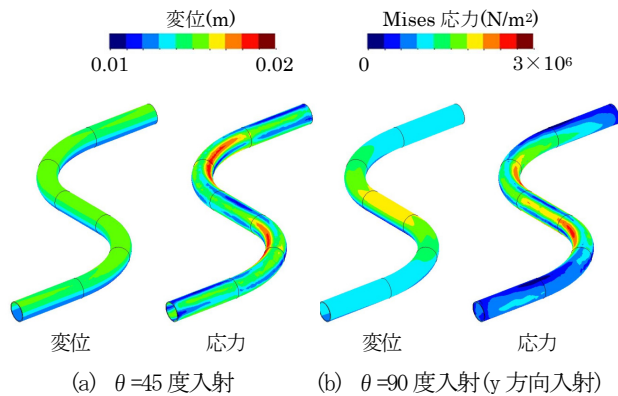


図-6 曲線トンネル解析結果

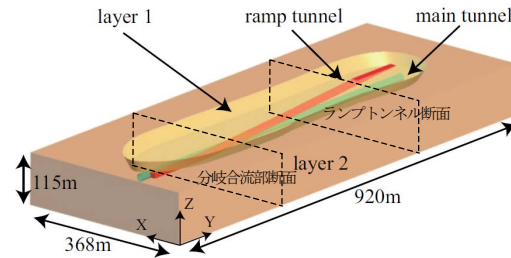
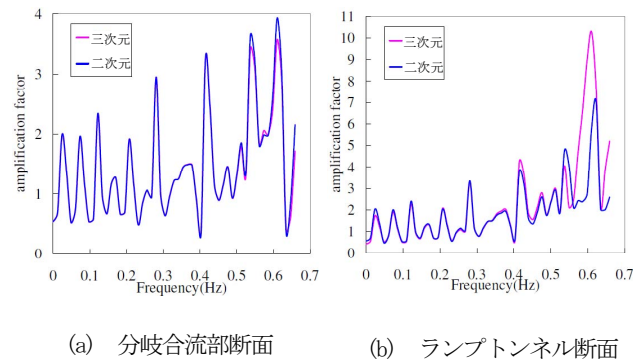


図-7 サイドランプ式トンネル解析モデル

表-4 サイドランプ式トンネルモデルの解析定数

	ρ (kg/m ³)	V_p (m/s)	V_s (m/s)	h
layer1	1500	165	50	0.05
layer2	1800	1000	450	0.02
tunnel	2500	3373	2127	0.02



(a) 分岐合流部断面

(b) ランプトンネル断面

図-8 サイドランプ式トンネル対象断面位置におけるトンネルの増幅率（トンネル変位/入力波変位）の比較

3. 大規模三次元動的FEM解析によるトンネル特殊構造部の地震時挙動

全体検討による耐震性懸案箇所抽出の後、部分検討として、耐震性懸案箇所の複雑なトンネル構造をモデル化した詳細検討を行う。以降、詳細検討例を紹介する。いずれも、大規模三次元動的FEM解析で、トンネル特殊構造部の特徴的な地震時挙動を確認したものである。

(1) 曲線トンネルの挙動

曲線トンネルを対象に、大規模三次元動的FEM解析を実施した。解析モデルを図-5に、解析定数を表-3に示す。解析対象は、曲率半径40mのRC構造の急曲線トンネル（外径8.8m、厚さ0.4m、トンネル土被り15.5m）である。入力地震波は、自由地盤の表面での応答が100gal、中心周波数1.6HzとなるRicker波を設定し、モデル底面への引き戻し波を入力波とした。モデルの側面境界は半無限

吸収境界を、底面に吸収境界を適用し、入力波を x 方向、y 方向それぞれに入力する 2 ケースの解析を実施した。線形解析であることから、両結果を重ね合わせることで、xy 面内で任意の入射方向に対してトンネル応答を評価できる。以降の結果では、入射波の入射方向変位振幅を同一にしている。解析結果⁴⁾を図-6に示す。同図は、応答変位が最大となる時点で、地震波の入射角度を $\theta=45$ 度並びに 90 度（y 方向入射）（ここで、角度 θ は、x 軸から y 軸に向かい半時計回りを正として定義した角度）とした時のトンネルの応答を、変位と Mises 応力について整理したものである。トンネルの応答変位は、入射方向、トンネル部位により異なる。 $\theta=45$ 度入射の場合、トンネルの応答変位は全線にわたり概ね一様となる。一方、y 方向入射の場合、部位によりトンネルの応答変位が変化し、入射方向とトンネル軸が直交する直線部の変位が、 $\theta=45$ 度入射の際の曲線部の変位より大きくなる事が分かる。 $\theta=45$ 度入射の曲線部と、y 方向入射の

直線部の発生応力を比較すると、直線部に比べ、曲線部の方が応答変位が小さくなるにも係わらず発生応力が大きくなる。以上から、曲線トンネルの地震時挙動は、トンネル横断面内の応答に加え、トンネル長手方向に曲げやせん断などの挙動が発生し、さらに地震波の入射方向にも依存し応答が変化する、複雑な挙動を示すことが分かる。

(2) サイドランプ式トンネルの挙動

トンネル長手方向に表層地盤を緩勾配かつ長距離にわたり横切るサイドランプ式道路トンネルを対象に大規模三次元動的FEM解析を実施した。検討モデルを図-7に示す。地盤は、軟弱な堆積盆地を有する硬軟二層地盤で、モデル底面に、トンネル軸直角方向にEl Centro波EW成分波を入力した。境界条件は曲線トンネルの解析例と同一である。解析定数を表-4に示す。さらに、分岐合流部並びにランプトンネルの対象断面に対し、別途、二次元解析を実施した。対象断面の応答を、三次元解析と二次元解析で比較した結果⁹⁾を図-8に示す。トンネルが硬質地盤に立地する分岐合流部は、三次元解析と二次元解析で応答が一致するのに対して、軟弱地盤に立地するランプトンネルでは、三次元解析と二次元解析で応答変位の増幅率が変化する。センターランプ式トンネルを対象とした検討でも、ランプトンネルで三次元応答と二次元応答が異なること⁹⁾が確認されている。トンネル長手方向に深度が変化するランプトンネルは、必然的にトンネル周辺地盤の応答も変化的なことから、構造的に、同一深度に位置する本線トンネルや分岐合流部より三次元的な影響を受けやすい特徴を有していることが分かる。

4. まとめ

トンネル全体系の耐震性評価法とともに、耐震性懸案個所の検討例として、曲線トンネル及びサイドランプ式

トンネルの大規模三次元動的FEM解析結果を紹介した。今後、地下構造物の耐震安全性を合理的に評価できる方法に関する研究として、トンネル全線に係わる全体検討で耐震性懸案個所を適切に抽出・評価できるシステムの開発を進めるとともに、耐震性懸案個所の三次元動的FEM解析結果を設計実務に反映するための事例研究を行う予定にしている。

謝辞： 擬似三次元地震応答解析の実施に当り、東京大学生産技術研究所の鈴木猛康博士、鹿島建設(株)土木設計本部の沖見芳秀氏、並びに勝川藤太氏に御世話になりました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 大深度地下の公共的使用に関する特別措置法、平成12年5月31日法律第91号
- 2) T. Ichimura, M. Hori, H. Kuwamoto, Earthquake Motion Simulation with Multi-Scale Finite Element Analysis on a Hybrid Grid, Bulletin of the Seismological Society of America (in press)
- 3) T. Suzuki, K. 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
- 4) 山田岳峰,大保直人,市村強,山木洋平,伊丹洋人: トンネル曲線部の三次元地震応答解析,第16回トンネル工学研究発表会,2006年.
- 5) 鈴木孝,大保直人,伊丹洋人,市村強,堀宗朗,山田岳峰: 地盤急変部を含む地下トンネルサイドランプ部の地震時応答解析,第42回地盤工学研究発表会,2007年
- 6) 土橋浩,波津久毅彦,大保直人,山田岳峰,伊丹洋人,森口敏美,市村強,山木洋平,堀宗朗: センターランプ式トンネルの三次元地震時挙動における三次元効果, 1-539, 土木学会第62回年次学術講演会,2007年

(2007.06.29 受付)

ON SEISMIC RESISTANCE EVALUATION FOR WHOLE TUNNEL SYSTEM

Large-scale infrastructure such as traffic tunnel systems are constructed in an underground space. Evaluation of seismic resistance is required for whole tunnel system, in order to realize rational and efficient design. Due to the scale of the system, site-specific strong ground motion should be used for the evaluation, and 3D analysis should be made for the seismic response of the system. In this report, advanced numerical analysis methods with large-scale computation are proposed for the site specific strong ground motion and 3D analysis of the system.