# レベル2地震動に対する大規模地中構造物の耐震検討

-MMST工法による大断面トンネルの耐震検討-

# 渡辺 和明\*1·服部 佳文\*2·廣末 龍文\*2·坂下 克之\*3

Keywords: underground structure, level-2 input motion, FEM seismic deformation method, seismic deformation method 地中構造物, レベル2地震動, FEM系応答変位法, 応答変位法

# 1. はじめに

兵庫県南部地震では、橋梁のような地上構造物だけで なく、開削トンネルのような地中構造物においても多く の被害が発生した。特に開削工法で施工された地下鉄大 開駅の駅舎部の被災は、支柱のせん断破壊に起因する駅 舎全体の崩壊という過去の大地震では見られなかった衝 撃的な被災であった。その後、土木学会は、被害調査や 被災原因の分析を行い、計3度にわたり土木構造物の耐 震設計法に関する提言<sup>1)2)</sup>を行ってきた。またこのよ うな提言を受けて、地中構造物の耐震設計基準・指針は、 レベル2地震動を含む2段階設計地震動、性能規定型設 計法の導入等、耐震規定の内容が大きく見直された。

一方で、都市機能や土地利用の高度化に伴い、従来に 比べて複雑な地盤条件下に、大規模な横断面を有する地 中構造物の建設が計画されつつある。MMST 工法を用 いた首都高速川崎縦貫線の大規模トンネルの建設計画も そのうちの一つである。この MMST 工法トンネルは、 構造物としての重要度が高く、また特殊工法を適用して 構築される大断面を有するトンネルであることより、特 にレベル2地震動に対する耐震性能の照査が重要な検討 項目となった。本稿では、MMST 工法を適用した大規 模トンネルについて、その構造的特徴を考慮した横断方 向および縦断方向の耐震計算を実施し、その耐震性能に ついて詳細な検討を実施したので報告する。

# 2. 検討条件

#### 2.1 MMST 工法の概要

MMST 工法(Multi-Micro Shield Tunneling Method)とは、

\*1 技術センター土木技術研究所土木構工法研究室

\*2 土木本部土木設計部

\*3 (独)防災科学技術研究所

複数の小断面シールドマシンによってそれぞれ単体トン ネルを構築し、それらの単体トンネル同士を接続し外殻 部の躯体を構築したのち、内部土砂を掘削して大断面の トンネルを完成させる工法<sup>3)</sup>である。トンネル構造は、 図-1 に示すように、鋼・コンクリート合成構造(一般部) と RC 構造(接続部)の複合構造というトンネル構造形式 の特徴を有している。



①一般部(鋼・コンクリート合成構造)②接続部(RC構造)
③主桁 ④中柱 ⑤縦リブ(シアコネクタ-)⑥接続部鉄筋
⑦継手部鉄筋 ⑧せん断補強筋(一部省略)

## 2.2 検討対象としたトンネル

本トンネルは、首都高速川崎縦貫線の大師ジャンクションより殿町立坑までの約 540m 区間に MMST 工法を 用いて構築される。その線形は、図-2 に示すように大 師から殿町へ向け緩やかに上り勾配となっている。周辺

図-1 MMST トンネルの構造概要図 Structural Features

地盤の地層構成は、ほぼ成層に近いが、トンネル深度の 変化に伴いトンネル軸線に沿って断面内の鉛直方向の層 構成が変化する。特に Dc1 層の上下方で剛性の変化が 大きく、この層境界とトンネル下端が検討断面3と4の 中間付近(図-2 参照)で交わる。なお耐震上の設計基盤面 は、上総層の固結シルト層(Ksm)の上面とする。

#### 2.3 入力地震動

耐震検討に用いるレベル 2 入力地震動は、「首都高速 道路トンネル構造物設計要領(開削工法 耐震設計編)」 <sup>4)</sup> に準拠した入力波形を使用する。ここでレベル 2 地 震動としては、プレート境界型の大規模地震を想定した タイプ I および内陸直下型地震を想定したタイプ II の 2 種類とする。入力地震動波形は、過去の代表的な観測記 録を図-3 に示す速度応答スペクトル<sup>4)</sup> に適合するよう に振幅調整したもので、タイプ I およびタイプ II ともそ れぞれ3波、計6波規定されている。なおこれらは、全 て耐震設計上の基盤面の境界波(E+F 波)として規定され ている。



図-2 地質縦断図とトンネル縦断線形 Investigation Layouts and Geological Profiles

地質名	土層名	単位体積重量 ρ (kN/m3)	ポアソン比 ν	せん断波速度 Vs (m/sec)	初期せん断剛性 Go (MN/m2)	基準ひずみ γ r	最大減衰 hmax
埋土, 盛土	Ts	17.0	0.494	140	34	4.00E-02	0.25
有楽町層 相当層	As1	19.0	0.494	140	38	4.00E-02	0.25
	Ac1	18.5	0.494	140	37	3.00E-02	0.25
	Ac2	17.5	0.494	140	35	9.00E-02	0.30
	Ac4	16.0	0.493	180	53	2.50E-01	0.30
	As4	18.0	0.485	265	129	8.00E-02	0.30
七号地質 相当層	Dc1上	15.5	0.491	200	63	2.00E-01	0.30
	Dc1下	16.5	0.484	278	130	4.50E-01	0.30
	Ds1上	17.5	0.482	300	161	8.00E-02	0.30
	Ds1下	19.0	0.482	300	174	8.00E-02	0.30
立川層相当層	Dc2	17.0	0.482	300	156	1.40E-01	0.25
相模層群 相当層	Ds3	18.5	0.475	395	294	8.00E-02	0.30
	Dg3	19.5	0.475	395	310	8.00E-02	0.30
	Dc4	15.5	0.478	325	167	4.50E-01	0.35
	Ds4	18.0	0.471	390	279	8.00E-02	0.30
上総層群	Ksm	18.0	0.443	580	618	_	_

表-1 地盤物性値 Material Properties of Soil



図-3 設計速度応答スペクトル

Design Response Spectrum of Velocity

# 3. トンネル横断方向の耐震検討

#### 3.1 検討概要

図-4 にトンネル横断方向の耐震検討フローを示す。 本トンネルは、外形高さ約 22.5m×幅約 26.5m の大規模 な横断面を有することより硬軟の複雑な互層中に位置す る。そのため耐震検討では、特に周辺地盤の影響を適切 に評価する必要がある。本検討では、これまで地中ダク トや地下空洞の横断方向の耐震設計への適用実績のある 応答震度法を用いることとした。

耐震検討に先立ち、梁~ばねモデルを用いた常時荷重 (土圧等)に対する解析を行い、トンネル部材の常時断面 力を算定する。この常時断面力を初期値として、レベル 2 地震動に対する耐震検討を応答震度法によって実施す る。応答震度法に用いる地盤の地震時剛性および地震外 力は、地盤の1次元地震応答解析の結果より算定する。 なおトンネルのモデル化は、別途実施した構造実験結果 より外殻構造部材の力学特性を忠実に考慮する<sup>5)6)</sup>。

横断方向断面の安全性は、構造寸法や地層構成の変化 する代表的な5断面を選定し、それぞれについて曲率お よび層間変位角、部材せん断耐力について照査する。



図-4 横断方向の耐震検討フロー Procedure of Seismic Design for Cross Section

#### 3.2 地盤の地震応答解析

地震外力と地盤の地震時剛性を評価する目的で、地盤 のみの1次元地震応答解析を実施した。各検討断面とも 比較的軟弱な表層地盤を有するため、レベル2地震動の 作用時に強い非線形性が生じることが予想された。そこ で地盤の動的変形に伴う非線形特性を修正 Ramberg-Osgood モデル(以下、修正 R-O モデルと略す)でモデル 化して、逐次非線形解析法を適用することとした。

代表断面として断面 5(図-2 参照)について、タイプⅡ 振幅調整波(ポートアイランド GL-79m、N-S)の解析結果 を図-5 に示す。横断面中央付近の沖積粘性土の層境界 において、4%を越える大きなせん断ひずみが発生し、 これに伴いトンネル上下床版位置に相当する地盤間で、 最大 29.7cm の大きな相対変位が発生している。

## 3.3 トンネル横断方向の検討結果

応答震度法では、地盤を平面ひずみ要素、トンネルを 梁要素でモデル化する。トンネル横断方向の地震時挙動 は、波動伝播に伴い周辺地盤に生じるせん断ひずみに支 配されるため、上下床版に相対変位が生じるせん断変形 となる。そこで応答震度法に用いる地震外力は、地盤の 応答解析結果において、トンネル上下床版位置にあたる 地盤間の相対変位が最大となる同時刻の水平加速度分布 より評価した。なお地盤の地震時剛性は、各層での最大 せん断ひずみ発生時の剛性により設定した。

MMST 工法トンネルは、鋼・コンクリート合成構造 (一般部)と RC 構造(接続部)からなる複合構造である。 一般部と接続部は、それぞれの構造実験結果<sup>5)</sup>に基づ いて、曲げモーメントと曲率の関係(M-Φ特性)として曲 げ変形に伴う部材の非線形特性を設定した。また一般部 と接続部の境界である構造変化点は、両境界点の区間変 位より仮想ヒンジ長を設定し、曲げモーメントと回転角 の関係(M-θ特性)として設定<sup>6)</sup>した。

応答震度法の解析結果のうち、検討断面5のタイプII 振幅調整波に対する結果を図-6に示す。全体的にせん 断変形が支配的な変形モードとなり、特にAc2層下端 から地表面にかけて変位が増加する傾向となった。この 影響によりトンネル上下床版間で179mmの大きな相対 変位が発生しているが、層間変位角としては1/109で設 計基準値1/85以内に収まる結果となった。

側壁上下隅角部の接続部および構造変化点では、部分 的に降伏曲率を越える結果となったが、いずれも許容曲 率以内であった。また各部材に発生するせん断力もせん 断耐力以下であった。

以上の検討結果より、MMST 工法トンネルの横断方 向断面のレベル2 地震動に対する安全性が照査できた。

#### レベル2地震動に対する大規模地中構造物の耐震検討



図-6 応答震度法による解析結果(検討断面5)

Results of Ground Response Acceleration Method for Buried Structures (Section-5)

# 4. トンネル縦断方向の耐震検討

#### 4.1 検討手順

図-7 にトンネル縦断方向の耐震検討フローを示す。 トンネル縦断方向の地震時挙動は、トンネル軸線に沿っ た周辺地盤の変位分布の影響を強く受ける。そのため縦 断方向の耐震検討では、まず周辺地盤のみの地震応答解 析を実施し、トンネル軸線に沿った地盤各点での時々 刻々の変位応答を算出する。次に、トンネルを梁要素、 周辺地盤との相互作用をばね要素でモデル化した解析モ デル(梁〜ばねモデル)に、この変位応答を時々刻々作用 させ、トンネル縦断方向の構造断面や継手部の地震時応 答を算定し、それらを照査する。なおレベル2地震動に 対する縦断方向断面の安全性は、耐震上問題となる継手 部に着目し、鋼殻の端部主桁のリング間ボルトのひずみ 及び目開き量について照査する。



図-7 縦断方向の耐震検討フロー Procedure of Seismic Design for Longitudinal Section

#### 4.2 地盤の地震応答解析

本トンネルの縦断方向の耐震検討では、大規模な横断 面を有するため、地形や地層構成の変化に伴う水平面内 の地盤変形だけでなく、鉛直面内の変位分布の影響も考 慮する必要がある。そこで地盤の地震応答解析では、平 面ひずみ要素を用いた 2 次元 FEM モデルによるトンネ ル軸方向の面内加振、および3 次元ソリッド要素を用い た 3 次元 FEM モデルによるトンネル軸直角方向の面外 加振の 2 ケースを実施した。ただし 3 次元モデルは、2 次元モデルを単位奥行きだけ拡張したもので、面外方向 の並進の自由度のみを有する解析モデルである。なお耐 震設計上の基盤面およびレベル2入力地震動の時刻歴波 形とも、トンネル横断方向の場合と同じとした。

#### 4.3 トンネル縦断方向の検討結果

一般にトンネル縦断方向の解析に用いる入力変位は、 トンネル中央部軸線の変位分布で代表させることが多い。 しかし本検討では、大断面トンネルの構造的特徴を考慮 して、図-8 に示すような地盤ばね値に基づく重み付け による断面内の平均化を行い、縦断方向の解析に用いる 入力地盤変位を評価した。また梁〜ばねモデルの地盤ば ね値は、代表的な断面を選定し、各断面における静的 FEM 解析<sup>7)</sup>の結果より軸方向および軸直角方向のばね 値を算定した。なお各検討断面における地盤の剛性は、 地盤の地震応答解析の結果より、各要素の最大せん断ひ ずみ発生時の剛性を地震時剛性として設定した。



## 図-8 入力地盤変位の評価方法 Evaluation Method of Input ground displacement

MMST 工法トンネルは、鋼・コンクリート合成構造 (一般部)と RC 構造(接続部)からなる複合構造である。 そこで複合構造の複雑な地震時挙動を3次元ファイバー モデルを用いて表す。本検討では、図-9 に示すように 梁要素の部材断面を分割し、部材ごとにコンクリート、 鋼材、鉄筋の断面積と構成モデルを与え、軸力と曲げの 影響を同時に考慮できる非線形モデルを用いた。なお鋼 殻部分における鋼材要素の構成モデルは、圧縮力に対し ては縦リブ鋼材が変形し、引張力に対しては縦リブ鋼材 とリング間ボルトが変形するとし、図-10 に示すような 縦リブ鋼材とリング間ボルトの力学特性を考慮して設定 した。

縦断方向の解析結果のうち、耐震検討において支配的 となる軸方向加振おいて、継手部の照査項目である鋼材 要素の引張ひずみ分布を図-11 に示す。タイプ I 波およ びタイプII 波の結果とも、トンネル底版部が剛性差の大 きい Dc1 層の層境界を通過する箇所において、最大引 張ひずみが発生した。これらの引張ひずみは、各鋼殻の リング間ボルトの降伏値を越えているが、破断ひずみに は至っていない。なおこの最大引張ひずみからリング間 に生じる目開き量を計算すると 1mm 程度以下となり、 止水シール材の水圧 0.6Mpa 下での即時止水試験の結果 と比較して、最大目開き発生時でも止水性が確保できる ことが明らかになった。









# 5. まとめ

MMST 工法を適用した大規模トンネルを対象に、レ ベル2地震動に対する横断方向および縦断方向の耐震検 討を実施した。検討結果を以下にまとめる。

1)トンネル横断方向の検討では、一般部、接続部、そ して構造変化点の各部位の非線形特性を、構造実験の結 果に基づいて設定し、応答震度法による耐震解析を実施 した。解析結果より、側壁の接続部の構造変化点の一部 で降伏曲率を超えるが、許容曲率以内であった。また層 間変形角も基準値 1/85 以下、部材に発生するせん断力 もせん断耐力以下となり、レベル2地震動作用時におい ても、十分な安全性を有することが確認できた。

2)トンネル縦断方向の検討では、鋼・コンクリート合成構造(一般部)と RC 構造(接続部)からなる複合構造というトンネル構造の特徴を考慮し、3 次元ファイバーモデルによるモデル化を行った。時刻歴応答変位法によるトンネル応答解析の結果より、継手部のリング間ボルトが部分的に引張降伏する結果となった。しかしその目開き量は、止水シール材の要素試験で明らかになっている止水を確保できる目開き量以下の値となり、十分な耐震安全性を有することが確認できた。

地中構造物は、今後さらに大規模化、複雑化する傾向 にある。大規模地中構造物の耐震設計においては、地盤 急変部や構造変化部等における複雑な地震時挙動の把握 が重要となる。今後は、このような複雑な地震時挙動を 3次元解析等により詳細に分析していく予定である。

#### 参考文献

- 1) 土木学会: 耐震基準等に関する提言集, 1996.
- 2) 土木学会:土木構造物の耐震設計法等に関する第3次提言 と解説,2001.
- 3) Tanaka,M. et al : Huge Underground Tunnel Constructed by Multi-Micro Shield Tunneling, Concrete Structures in the 21<sup>st</sup> Century, Proceeding of 1<sup>st</sup> fib Congress, vol.1, session3, 15-16, 2002.
- 4) 首都高速道路公団:トンネル構造設計要領(開削工法 耐震 設計編), 1999.6.
- 5) 三桶達夫, 趙唯堅, 加納宏一: MMST工法によるトンネ ル構造の部材実験, 大成建設技術センター報, No.36, 2003.
- 6) 森健太郎, 内海和仁, 安部吉生, 服部佳文: 複合構造を有 する大断面トンネルの設計手法の開発, トンネル工学研究 論文・報告集第12巻, pp.583-588, 2002.
- 7)日本道路協会: 駐車場設計·施工指針 同解説, 1992.
- 8)森健太郎,内海和仁,服部佳文,松葉保孝,坂下克之:複 合地盤を有する地中構造物の横断耐震検討,第57回土木学 会年次学術講演会講演概要第I部,2003.
- 9)廣末龍文,渡辺和明,森健太郎,内海和仁:MMST工法 による地中構造物の縦断耐震検討,第57回土木学会年次学 術講演会講演概要第I部,2003.