

超大断面山岳トンネルの地震時挙動 に関する解析的検討

西村和夫¹・岩楯徹広¹・三谷浩二²・海瀬忍²・西岡和也³・大嶋義隆⁴・青木茂男⁵

¹正会員 工博 東京都立大学大学院 工学研究科 土木工学専攻(〒192-0397 八王子市南大沢 1-1)

²正会員 日本道路公団試験研究所 トンネル研究室(〒194-8508 町田市忠生 1-4-4)

³正会員 鹿島建設株式会社 建設総事業本部 関東支店 土木部(〒163-1029 新宿区西新宿 3-7-1)

⁴正会員 前田建設工業株式会社 土木本部土木設計部(〒179-8903 練馬区高松 5-8 J.CITY)

⁵北斗理研株式会社 システム技術部(〒189-0026 東村山市多摩湖町 1-25-2)

現在、第2東名神高速道路に代表されるように、交通量の増大と建設の経済性・合理性を考慮して200m²を越える扁平な超大断面トンネルがNATMで多く建設されている。山岳トンネルは一般に原地盤である岩盤がもともと保有する耐力を利用して建設されることから、地盤条件がある程度良ければ耐震検討は不要といわれてきた。しかし、兵庫県南部地震では山岳トンネルもなんらかの被害を受けたこと、前述のこれらの超大断面トンネルの基幹路線としての重要度と形状が扁平であることを踏まえ、覆工の耐震性能を検討、評価することは重要である。本検討では、超大断面トンネル覆工の耐震性能を等価線形解析によって検討し、耐震設計に向けての問題点と課題の抽出を目的とする。

Key Words : seismic design, equivalent linear method, lining, large-cross-section tunnel, mountain tunnel

1. 研究の概要

山岳トンネルは一般に岩盤の中に建設され、原地盤がもともと保有している地盤耐力を利用して建設されることから、トンネルに作用する外力を全てトンネル覆工で支える必要が無く、常時土圧と地震時の地盤変位をトンネル躯体で全て支える開削トンネルとは異なる構造形式を有している。したがって、地盤の条件がある程度良ければ耐震性は高く、耐震検討は不要といわれてきた。

しかし、兵庫県南部地震では、この地域にある山岳トンネルのいくつかは、開削トンネルに比べて明らかに小さいものの、被害を受けた。

現在、第2東名・名神高速道路のトンネルは、交通量確保のための大断面化と、建設の経済性と合理性を考慮した断面の扁平化によって、200m²を越える超大断面扁平トンネルとなっている(図-1)。山岳トンネルは長い線状構造物で、土被りが大きくなることなどから、地下発電所などとは異なって一般には詳細な地質調査や解析は行われない。しかし、このような超大断面扁平ト

ンネルの基幹路線としての重要度と形状の扁平度を鑑み、これら超大断面の耐震性能を検討、評価することは重要である。

本研究では、上記の観点から、超大断面トンネルの覆工の耐震性能を動的解析によって検討、評価するための問題点と課題の抽出を目的とするものである。

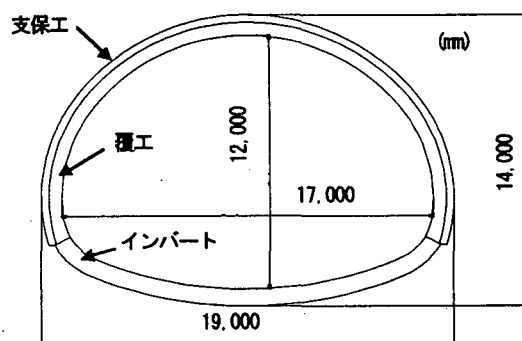
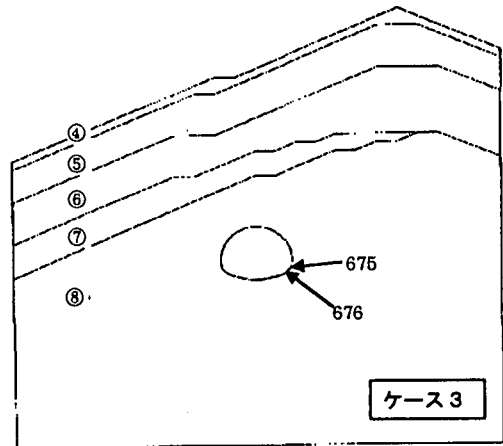
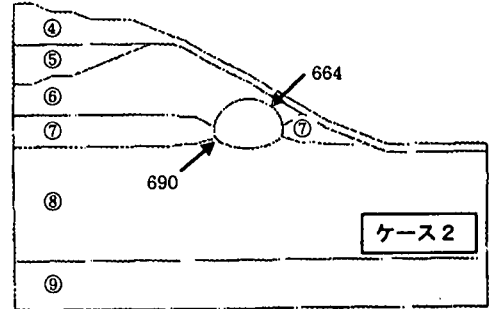
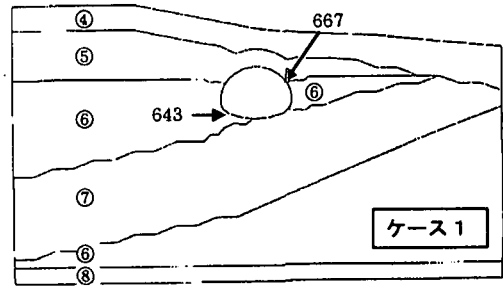


図-1 トンネル横断面の概略

表－1 選定断面の特徴

	断面の特徴
ケース 1	・土被りが0.9D程度。 ・地表部の傾斜が緩い。 ・地層が比較的急に傾斜している。 ・地層境界が S.L. 付近にあり、物性値が大きく変化している。
ケース 2	・土被りが0.5D程度。 ・地表部の傾斜が急。 ・地層はほぼ成層。 ・トンネル左上に一部固い地層が存在する。 ・地層境界が2つトンネルをまたいで存在する。
ケース 3	・土被りが3D以上。 ・地表部の傾斜は比較的急。 ・地層はトンネル左上部で傾斜しているが、トンネルより下ではほぼ成層。 ・全体的に地質は良好。



図－2 解析モデル

2. 動的応答解析

動的応答解析は、周波数領域における複素応答解析法によって行った。地盤の非線形性を等価線形でモデル化した。解析モデルの境界条件は、底部粘性境界、側部はエネルギー伝達境界とした。

2.1 解析モデルと諸物性値

1) 解析モデルと解析ケース

山岳トンネルは、支保工と覆工、インバートからなる（図－1）。支保工で掘削時の地山の安定を図り、変形が収束した時点で通常覆工が施工される。したがって、通常、覆工には常時の荷重は作用しない。そこで、トンネルのモデル化は、支保工を無視し、覆工とインバートを線形の梁要素で、地山はソリッド要素でモデル化し、地震時の増分断面力のみを求めた。なお、このモデルの覆工の厚さは60cm、インバートは80cmである。

山岳トンネルでは、都市部の開削トンネルやシールドトンネルと異なり、1) トンネル覆工の横断形状が上下非対称であり、かつ曲率が異なること、2) 地表・地層傾斜が存在し、横断方向にも縦断方向にも土被りが変化すること、3) 地質の剛性の変化が大きいこと、などが特徴としてあげられる。これらを踏まえ、本検討では、地質、地形的な山岳トンネルの特徴として、地表・地層の傾斜、地層剛性の変化、トンネルの土被りの変化を選択した。これらを組み合わせることで、実際の現場でも比較的多く見られる3つの解析ケースを設定した。

表－1に設定した解析ケースの特徴を、図－2に解析断面図を示す。図中の丸番号は地層区分である。

ケース1は土被りが1D程度と少ないが、地表傾斜は少なく、覆工の S.L. 付近を硬軟の差が大きい地層境

表－2 物性値

ケース	番号	線形性	G (tf/m ²)	ν	質量 (tf/m ³)	減衰定数
1	④	等価線形	7910	0.35	1.90	0.08
	⑤	等価線形	20800		2.44	0.08
	⑥	線形	116000		2.37	0.03
	⑦	線形	314000		2.33	0.03
	⑧	線形	320000		2.37	0.03
2	④	等価線形	10300	0.35	1.90	0.08
	⑤	線形	286000		2.12	0.03
	⑥	線形	29500		2.86	0.03
	⑦	線形	97200		2.86	0.03
	⑧	線形	710000		2.86	0.03
	⑨	線形	2490000		2.86	0.03
3	④	線形	7500	0.35	1.80	0.08
	⑤	線形	75300		2.73	0.03
	⑥	線形	249000		2.54	0.03
	⑦	線形	249000		2.52	0.03
	⑧	線形	1030000		2.55	0.03

が通過している事例である。なお、このケースでは地層物性は深さに応じて増加せず、一部逆転している。また、地層傾斜が覆工のS.L.付近を境に反転する。

ケース2は地表面が傾斜している偏荷重地形であり、土被りが地表傾斜に応じて右片側肩部で極端に少ないが、表層部を除いて地山物性はケース1よりも良い。

ケース3は地表・地層傾斜はあるが、土被りも十分にあり、地山物性も良いケースである。

ケース1やケース2は、山岳トンネルの坑口部にはよく見られる代表的例であり、一方、ケース3は坑口部をかなり過ぎた位置に見られる代表的一例である。

2) 地盤物性の設定

解析上の基盤としてVsが700m/secの地層を設定し、等価線形は300m/sec以下の地層に設定とした。3ケースの解析モデルに設定した地層物性を表-2に示す。また、等価線形で用いたG- γ 、h- γ 曲線は、電力中央研究所が行った風化軟岩に関するデータ(図-3、◆、▲)をもとに図-3のように設定した。なお、等価線形のGと減衰は、ひずみレベルが 1×10^{-6} の時の値である。

2.2 入力地震動波形

入力地震動は、兵庫県南部地震のときに地表面で観測した波形を、観測地点の地盤モデルで基盤まで引き戻し、その解析波形を2Eとして用いた。図-4にその波形を示す。なお、最大加速度は約383.3172gal、時間は16.388sec、データ数は4096である。

2.3 解析結果

結果の一例として覆工のいくつかの節点の断面力の時刻歴を図-6に、同じくM-N図として図-5に示す。

ケース1で軸力が最大となった節点(643)は、インバート部であり、軸力の大きさに比べ、せん断力、曲げモーメントは非常に小さい値となっていることが分かる。曲げモーメントが最大となった節点(667)は覆工右側の地層境に位置しており、いずれの断面力も比較的大きな値を示し、覆工の上下端の相対変位に追従した変化を見せている。

せん断力が最大となった節点は、覆工左側の地層に位置しており、位相(正負)は異なっているが、覆工右側の地層境(節点643)とほぼ同じような挙動を示した。

なお、覆工の上下端の相対変位は最大6.4mmである。また、地層の傾斜の影響

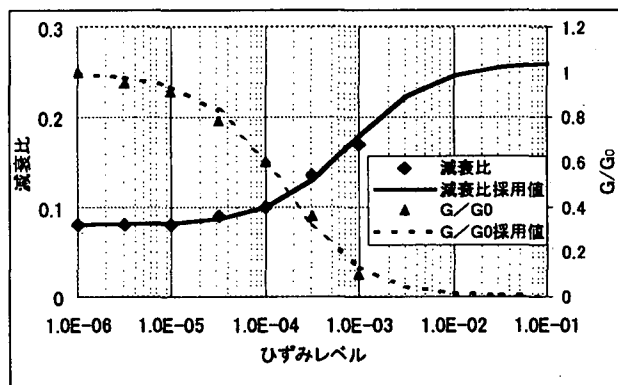


図-3 G- γ 、h- γ 曲線

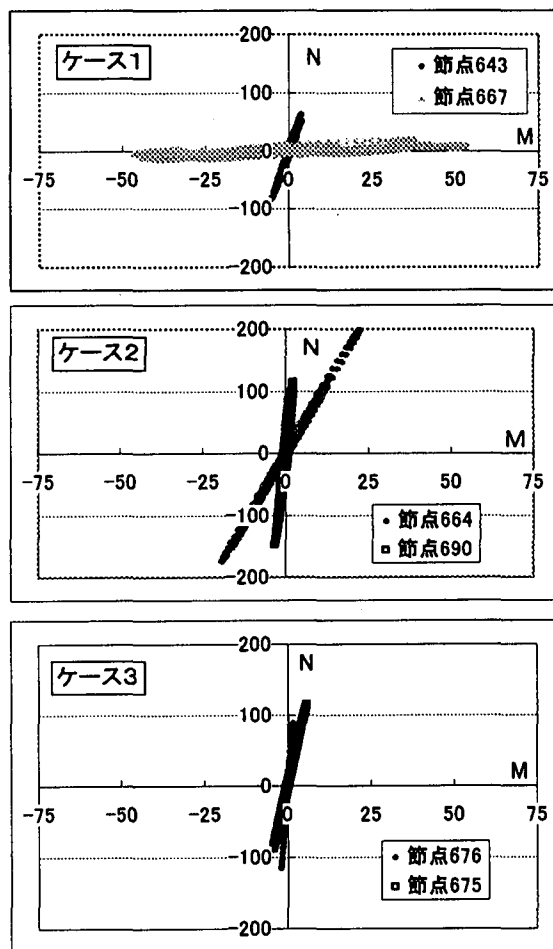


図-5 M-N図

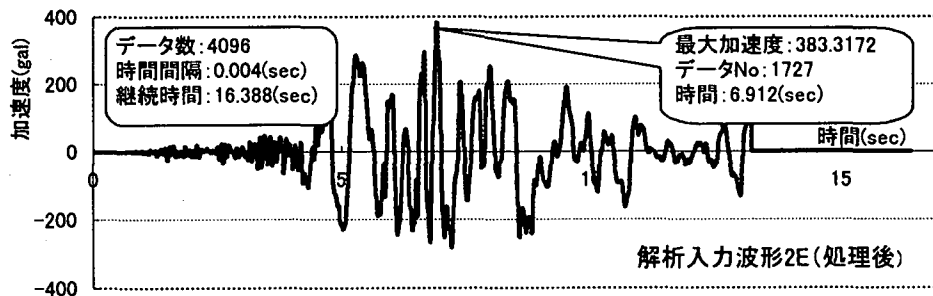


図-4 入力波形

響を受けて位相が覆工右、上部、左の順で変化している。

全体の傾向として、地層境の剛性差は、地層境に位置する覆工断面の曲げモーメントとせん断力に局所的に影響するが、覆工の軸力には大きな影響はない。また、インバート部は軸力が相対的に卓越する。

ケース2では、覆工のいずれの要素でも曲げモーメントやせん断力に比較して相対的に軸力の挙動が卓越しており、地表面での傾斜の影響が顕著に現れた。図-5、図-6に2つの節点(664, 690)の断面力を時系列で示した。曲げが相対的に大きく生じている節点664は土被りの浅い覆工右肩部に位置する。一方、軸力が曲げに対して比較的大きい節点690はインバート部左上部である。インバートでは曲げモーメントとせん断力が小さく、軸力が大きい。

また、覆工上部の変位が大きく、覆工上下端の相対変位は最大7.4mm、覆工左右の挙動は左側が大きい、ケース1と異なり、位相の差はほとんど見られなかった。

このケースでも地層剛性の差は、その境界に位置する覆工断面での曲げモーメントとせん断力に局所的に影響を及ぼすが、軸力に対する影響は少ない。

ケース3では、地層条件が良いことから、地層、地表傾斜、地層剛性の影響は見られなかった。反面、覆工の栗型形状の曲率変化に起因する影響が相対的に大きく現れ、覆工とインバート部の接続部で断面力が生じている。図示した節点はいずれもインバート部で、節点675は覆工とインバートの接続部、節点676はその一つとなりである。

変位については、覆工上下端の相対変位は最大1.1mmと小さく、位相の差はほとんど見られなかった。

このケースでも、インバート部は軸力が相対的に卓越し、全体に生じているが、曲げモーメント、せん断力は局所的で、接続部から離れるとすぐ減少する。

3. 動的解析のまとめ

超大断面扁平トンネル覆工の動的解析の結果、山岳トンネルにおいても覆工上下端の相対変位が最大となる時刻での断面力は、ほぼ、地震継続時間中の覆工の最大断面力と等しくなることが分かった。さらに、地層境がトンネルを横断する地盤条件では、曲げモーメントとせん断力が局所的に大きくなる。

特に相対剛性比が大きい2つの地層に対して等価線形解析を行う場合、地層境の弱層でひずみの増大に伴う極端な剛性の低下がみられ、地層境の要素が免震層のような働きをするため、地層の境より上の地盤において応答加速度が極端に低くなり、逆に変位が大きくなるという挙動を示す。なお、物性が大きく結果に影響するため、山岳トンネル坑口部のように地層の剛性比が大きく変わる地盤構造を持つ断面で耐震評価を行う場合には、その地層構造および地盤の動的物性を正確に把握、モデル化を行わなければならない。

前述の3モデル断面の動的解析の結果、単に土被りが少なければ耐震上不利になるわけではないことが明らかになった。大きな影響因子としては、土被りと基盤からの距離、地層境の位置とその地層剛性差、地表面の傾斜や地層傾斜と土被り、などの相互関係が重要であることが推定できた。

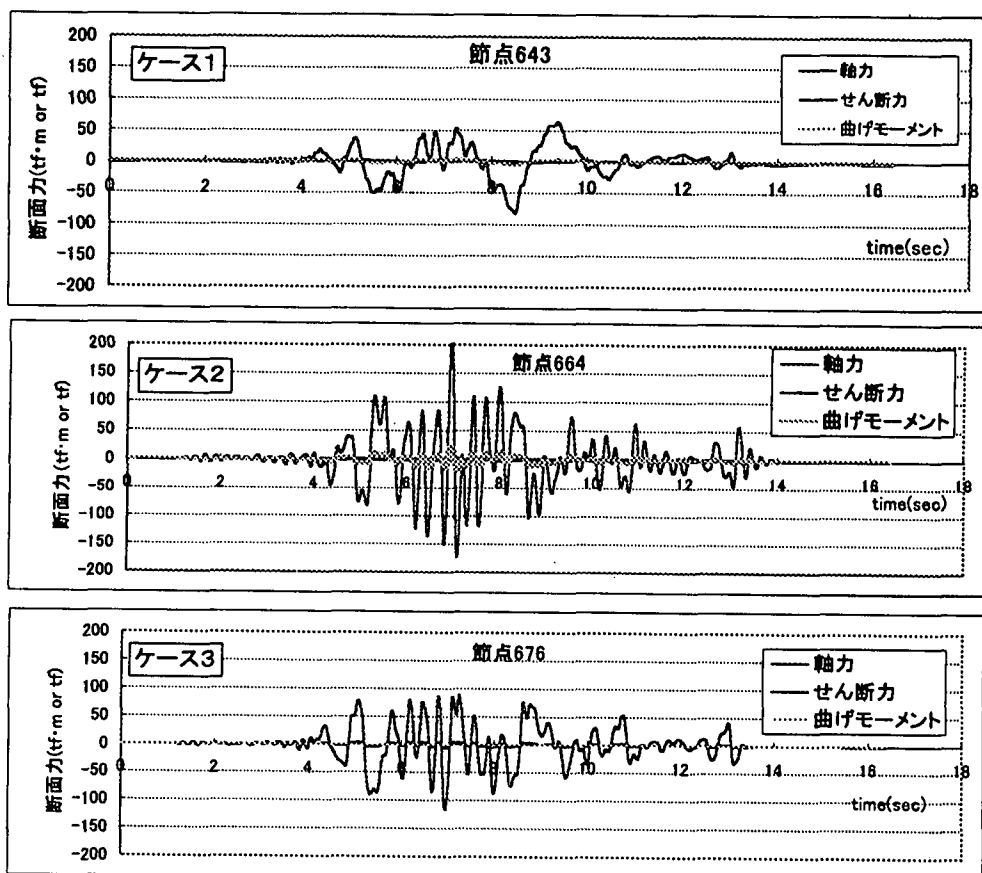


図-6 覆工断面力の変化