

超大断面扁平山岳トンネルへの 応答震度法の適用性に関する研究

坂 哲¹・大嶋義隆²・西村和夫³・岩楯徹広³

¹正会員 工修 前田建設工業（株）土木設計部（〒179-8903 東京都練馬区高松 5 丁目 8 番 J. CITY）

²正会員 工博 前田建設工業（株）土木設計部（同上）

³正会員 工博 東京都立大学 大学院 工学研究科（〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1 丁目 1 番）

山岳トンネルは一般に岩盤中に建設され、原地盤が元来保有している地盤耐力を利用して構築されることから、地盤条件がある程度良ければ耐震検討は不要であると言われてきた。ところが、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何らかの被害を受けた。一方、近年、交通量の増大と建設の経済性・合理性を考慮して、超大断面の扁平トンネルが基幹路線として建設されており、その耐震性能を検討、評価することは重要である¹⁾。このような状況を背景に、筆者たちは超大断面扁平山岳トンネル横断面を対象とした耐震設計法の研究を行ってきた。本論文では、応答震度法に用いる簡便な地震時荷重の算定方法を提案するとともに、動的解析結果との比較による妥当性検証結果について報告する。

Key Words : Mountain Tunnel, Ground Response Acceleration Method, Seismic Design

1. 研究の概要

山岳トンネルの特徴として、地表、地層傾斜が存在し土被りが変化すること、地層の剛性の変化が大きいこと、トンネルの横断形状が上下非対称でかつ曲率が異なること、などが挙げられる。そのため、これまで成層地盤中の地中構造物の耐震設計に適用されてきた応答震度法の荷重設定法を、そのまま山岳トンネルの耐震設計に用いることは適当ではないと考えられる。そこで、これらの事項を勘案し、筆者たちは超大断面扁平山岳トンネル横断面を対象とした耐震設計法に関する研究を行ってきた。本論文では、応答震度法に用いる地震時荷重について検討し、簡便な地震時荷重算定方法を提案するとともに、動的解析結果との比較による妥当性検証結果について報告する。

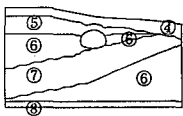
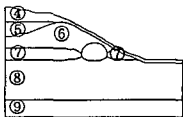
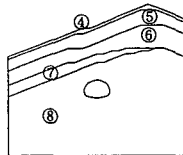
2. 応答震度法を用いた簡便な設計方法の提案

(1) 設計条件

a) 検討対象断面

検討断面は、前述した山岳トンネルの特徴を踏ま

表 1 地盤物性値

ケース	解析対象断面および層番号	G (kN/m ²)	V _s (m/s)	v	h	
1		④	208000	290	0.35	0.08
		⑤	208000	290		0.03
		⑥	1160000	690		
		⑦	3140000	1150		
		⑧	3200000	1150		
		2		④	103000	230
⑤	2860000			1150	0.03	
⑥	295000			320		
⑦	972000			580		
⑧	7100000			1560		
⑨	24900000			2920		
3		④	75000	200	0.35	0.08
		⑤	753000	520		0.03
		⑥	2490000	980		
		⑦	2490000	980		
		⑧	10300000	1990		

えて、表 1 に示す 3 ケースを設定した²⁾。ケース 1、2 は山岳トンネルの坑口部によく見られる例であり、ケース 3 は坑口部をかなり過ぎた位置に見られる例である。

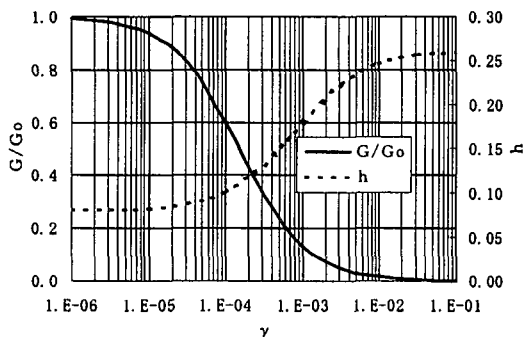


図1 G/G_0 - γ 、 h - γ 関係

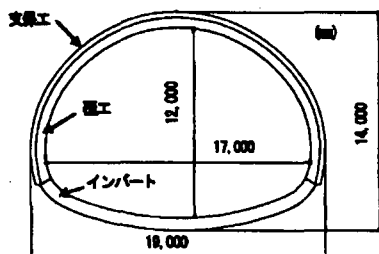


図2 トンネルの横断面図

表2 覆工およびインバートの物性値

部材名	単位	覆工	インバート
単位体積重量	kN/m ³	23.5	23.5
ヤング係数	kN/mm ²	24	24
ポアソン比	—	0.2	0.2
減衰定数	—	0.05	0.05

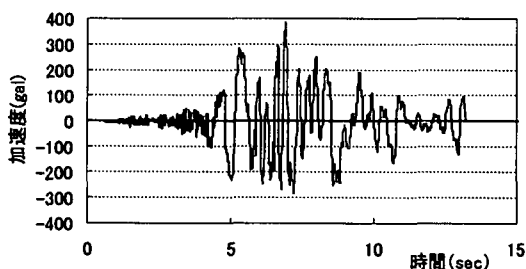


図3 入力地震動波形

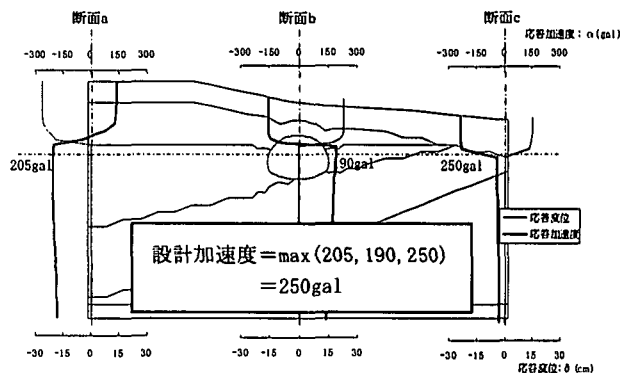
b) 地盤のモデル化

表層地盤については、非線形性の評価が解析結果に与える影響の把握を目的に、線形とした場合および非線形とした場合の両方について解析した。その際、地盤の非線形性は等価線形化法により考慮した。なお、本検討においては、 $V_s \leq 300\text{m/s}$ の地盤を表層地盤と定義した。

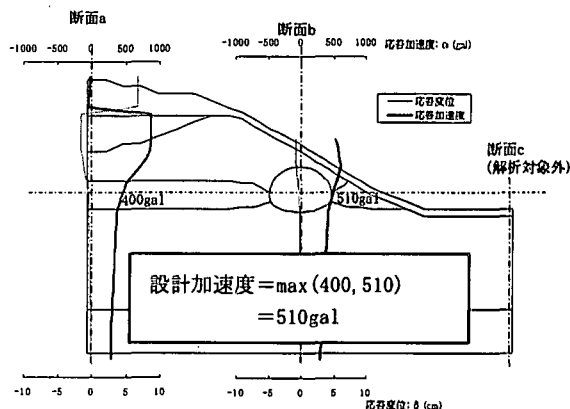
各ケースの解析に用いた地盤物性値を表1に示す。また、等価線形化法に用いる地盤のひずみ依存性 (G/G_0 - γ 関係、 h - γ 関係) は、文献3) より設定した (図1)。

c) トンネルのモデル化

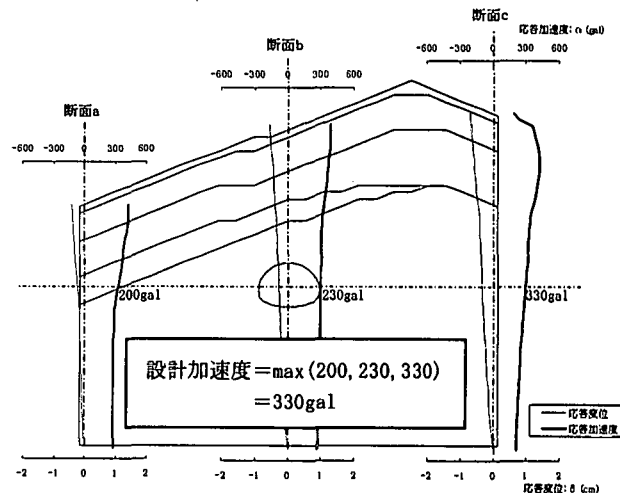
山岳トンネルは図2のように、覆工、インバートおよび支保工で構成されている。本検討においては、覆工は軸線に重ね合わせてはり要素でモデル化し、



(1). ケース 1



(2). ケース 2



(3). ケース 3

図4 一次元地盤応答解析結果

インバートは軸線の位置を覆工の軸線に合うようにずらして同じくはり要素でモデル化した。また、支保工については、解析上のモデル化が確立されていない、物性の評価が困難である、永久支保としての評価が不明確である、等の点を勘案し、本検討では仮設部材と考え考慮していない。解析に用いた覆工およびインバートの物性値を表2に示す。

d) 入力地震動波形

入力地震動波形は、兵庫県南部地震における強震記録を工学的基盤に戻した解析波とした (図3)。

(2) 設計法の提案

本報告では、応答震度法を用いた耐震設計法として、以下のような方法を提案する。

a) step 1 ; 一次元地盤応答解析

重複反射理論を用いた一次元地盤応答解析により、地盤の応答加速度を算定する。

解析断面は、トンネル中心および地盤高さが最大、最小となる位置とする(図4; 断面a~c)。これは、地表面や地層が傾斜した地盤を対象とする場合、地震動による増幅がどの解析断面で最大となるのかを明らかにするために、層厚の異なる複数断面について解析を行うこととするものである。なお、地表面がトンネル中心より低い場合、その断面は解析対象外とする(図4; ケース2-断面c)。

b) step 2 ; 応答震度法入力条件の設定

応答震度法における入力条件(設計震度および地盤の収束剛性)を一次元地盤応答解析結果より設定する。解析により得られた、トンネル上下端相対変位最大時刻における、各ケースの応答加速度および応答変位の深度方向の分布を図4に示す。同図より、以下のことが確認できる。

ケース1; 表層地盤と下部層の境界面で応答加速度の値が正負反転しているが、その分布は境界面の上下でそれぞれほぼ一定である。また、応答変位分布を見ると、下部層においては地盤剛性が大きいいため、応答変位量は僅か0.3cm程度である。

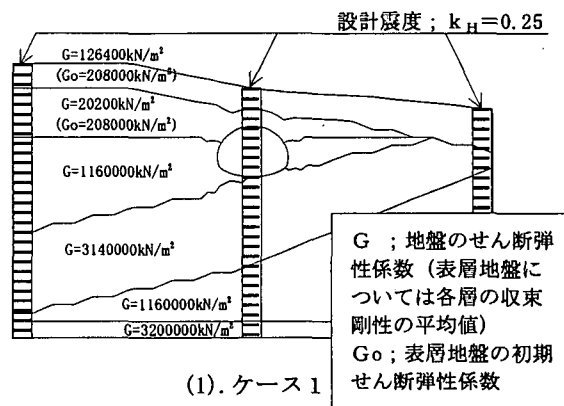
ケース2; 地表面付近では加速度の増幅が見られるが、トンネル以深では増幅は緩やかであり、その分布は断面aでは反転しているが断面bでは反転していない。また、下部層の応答変位は最大でも1.4cm程度である。

ケース3; 表層地盤は厚さ2m程度の薄い層が一層あるのみであり、全体的に地盤剛性が高いため、応答加速度の増幅は緩やかであり、下部層の応答変位は最大でも0.7cm程度である。

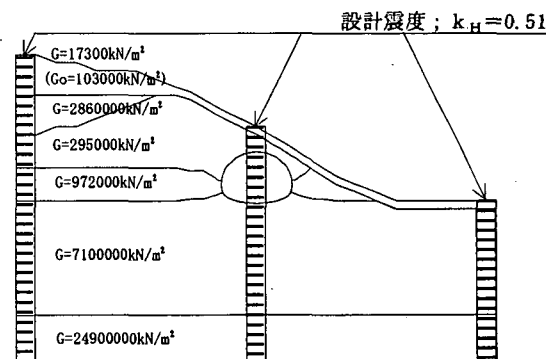
上記の結果を勘案し、応答震度法に用いる設計震度および地盤の収束剛性の設定方法は、以下に示すとおりとする。

設計震度は、各解析断面において算定されたトンネル上下端相対変位最大時刻における、トンネル中心深度の応答加速度の最大値を一樣に作用させるものとする。なお、応答加速度分布は、ケース1のように表層地盤と下部層で正負反転している場合もあるが、以下の理由で一樣な絶対値で評価する。

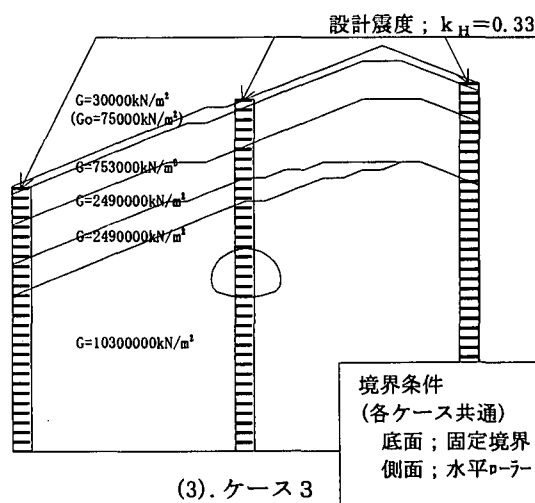
① トンネルの断面力に支配的な地盤応答変位を見ると、下部層の変位は表層地盤に比べて非常に小さいため、加速度分布を絶対値で評価してもトンネル上下端の相対変位にはほとんど影響を与えない。



(1). ケース 1



(2). ケース 2



(3). ケース 3

図5 本応答震度法のモデル図

② トンネル断面力に対する慣性力の影響は一般に小さいことから、加速度分布を絶対値で評価しても、断面力への影響はほとんどない。

設計震度 k_H は、図4中に示す設計加速度より次のように算定される。

- ・ ケース1; $k_H = 250/980 \approx 0.25$
- ・ ケース2; $k_H = 510/980 \approx 0.51$
- ・ ケース3; $k_H = 330/980 \approx 0.33$

また、表層地盤の収束剛性は次式により算定する。

$$G = (G_a + G_b + G_c) / 3$$

G ; 応答震度法に用いる地層毎の収束剛性
 G_a, G_b, G_c ; 断面a, b, cにおける地層毎の収束剛性の平均値

表3 トンネルの相対変位および覆工およびインバートの断面力

ケース	解析手法	相対 変位 (cm)	断面力					
			軸力 (kN)		せん断力 (kN)		曲げモーメント (kN・m)	
			最大値	最小値	最大値	最小値	最大値	最小値
1	動的解析	0.6	826	-828	383	-386	533	-533
	応答震度法	0.6 (0.3)	864 (933)	-864 (-933)	361 (1034)	-361 (-104)	461 (116)	-461 (-116)
2	動的解析	0.8	2060	-2050	180	-180	231	-231
	応答震度法	0.7 (0.6)	1810 (1810)	-1810 (-1810)	191 (193)	-190 (-193)	239 (239)	-239 (-239)
3	動的解析	0.1	1152	-1153	61	-60	57	-57
	応答震度法	0.1	1050	-1050	57	-57	53	-53

※ () 内は、表層地盤を線形（初期剛性）とした場合の解析結果

収束剛性は各地層内においてばらつきが生じる。そこで、本検討ではまず各解析断面において地層毎の平均値（G_a、G_b、G_c）を算定し、その値をもとに算定される全体の平均値（G）を応答震度法に用いる収束剛性とする。

c) step 3：応答震度法による解析

表層地盤に収束物性値を与えたFEMモデルに、b) で算定した設計震度を全体に一樣に作用させ、トンネルの断面力を算定し、安全性の照査を行う。本応答震度法による解析モデルを図5に示す。

3. 本提案法の検証

本耐震設計法の妥当性は、本提案法により得られた解析結果（トンネル上下端相対変位の最大値およびトンネルの発生断面力）を、等価線形化法により表層地盤の非線形性を考慮した二次元FEM動的解析の結果⁴⁾と比較することにより検証する。

トンネル上下端の最大相対変位ならびに覆工およびインバートの断面力を表3に示す。

全ケースとも、応答震度法の結果は動的解析結果を精度良く再現していることより、山岳トンネルが建設される地点の特徴である、地表および地層の傾斜が大きい断面を対象とする場合についても、本方法により評価可能であると言える。

また、表層地盤の非線形性については、表3に示すケース1、2の動的解析と応答震度法（等価線形解析および線形解析）の結果の比較により以下のことが言える。表層地盤がトンネル断面を横断している場合（ケース1）は地盤の剛性低下がトンネル断面力へ与える影響が顕著であり、非線形性を考慮する必要がある。一方、表層地盤がトンネル断面に近接していても横断していない場合（ケース2）は地盤の剛性低下がトンネル断面力へ与える影響はほと

んど見られないため、地盤の非線形性について特に留意する必要はないと考えられる。

以上より、本検討で提案した簡便な地震時荷重と地盤物性値の設定法を用いた応答震度法により、動的解析の解析結果と同等の結果を得ることが十分に可能であると思われる。

4. まとめ

地表面や地層境界が傾斜した複雑な地盤の中にある超大断面扁平山岳トンネルを対象とした耐震設計法として、一樣な設計震度を用いた簡便な応答震度法が適用可能であること、その際応答震度法に用いる地震時荷重および地盤剛性を一次元地盤応答解析により算定できることを、表1に示す3ケースについて、動的解析との比較により検証した。今後、他の条件を有するケースについても更に検討を進めて行きたい。

参考文献

- 1) 西村和夫・岩楯敏広・三谷浩二・海瀬忍・西岡和也・大嶋義隆・青木茂男：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、第25回地震工学研究発表会講演論文集、pp.489～492、1999.7
- 2) 大嶋義隆・松井幹雄・西村和夫・岩楯敏広：超大断面扁平山岳トンネルへの応答変位法の適用性に関する検討、第55回年次学術講演会、2000.9
- 3) 電力中央研究所総合報告 U-21；原子力発電所の風化軟岩立地に関する耐震安定性評価、1991.2
- 4) 坂哲・大嶋義隆・西村和夫・岩楯敏広：応答震度法による超大断面扁平山岳トンネルの耐震設計法に関する検討、第56回年次学術講演会、2001.9（投稿中）