

# 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

前田建設工業（株） 正会員 坂 哲 大嶋 義隆  
 東京都立大学 正会員 西村 和夫 岩楯 敏広

## 1. はじめに

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ため、地盤条件がある程度良ければ耐震検討は不要であると考えられてきた。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、開削トンネルに比べて明らかに小さいものの何らかの被害を受けた。一方、近年、交通量確保のために経済的な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<sup>1)</sup>。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。

## 2. 応答震度法による設計手法の提案

(1) 設計条件 山岳トンネルは、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、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、などが特徴である。これらを踏まえ、本検討では図1に示す3ケースを検討断面として設定した<sup>2)</sup>。

トンネルは、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、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はり要素でモデル化した。また、支保工は仮設部材と考え、本検討では考慮していない。

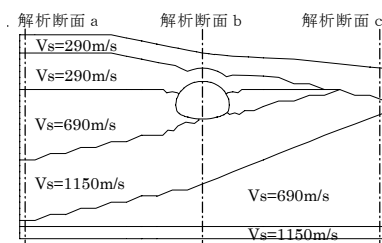
表層地盤（本検討では $V_s \leq 300\text{m/s}$ 程度と定義）については、非線形性の評価が解析結果に与える影響の把握を目的に、線形および非線形とした場合の両方について解析した。地盤の非線形性は等価線形化法により考慮した。

(2) 設計手法の提案 本報告では、応答震度法を用いた耐震設計法として、以下のような手法を提案する。

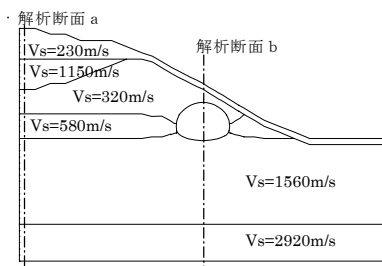
**step 1**；重複反射理論を用いた一次元地盤応答解析により、応答加速度を算定する。解析断面は、トンネル中心および地盤高さが最大、最小となる位置とする（図1；断面a～c）。このような傾斜地盤を対象とする場合、地震動による増幅がどの解析断面で最大となるのかを明らかにするために、層厚の異なる複数断面について解析を行うこととする。なお、地表面がトンネル中心より低い場合、その断面は省略する（図1；ケース2）。

**step 2**；応答震度法における入力条件（設計震度、地盤の収束剛性）を地盤応答解析結果より設定する。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うち最大となる値とする。地盤剛性は、各解析断面において得られた地層毎の収束剛性の平均値とする。

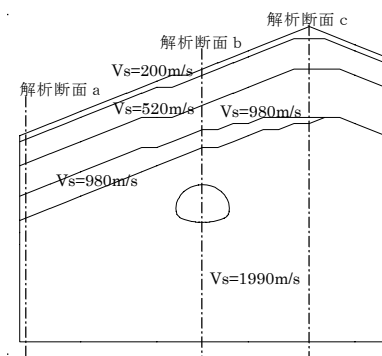
**step 3**；表層地盤に収束物性値を与えたFEMモデルに、設計震度を深度によらず一様に作用させ、トンネルの断面力を算定する。



(1). ケース 1



(2). ケース 2



(3). ケース 3

図1 解析の対象断面

**Key Words** 山岳トンネル、応答震度法、耐震設計

〒179-8903 東京都練馬区高松 5-8J.CITY 前田建設工業（株）土木設計部 TEL03-5372-4744 FAX03-5372-4768

### 3. 本提案手法の検証

(1) 検証方法 本耐震設計手法の妥当性は、本手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）を二次元FEM非線形動的解析結果と比較することにより検証する。

(2) 二次元FEM動的解析 動的解析には周波数領域での解析法を用いた。トンネルおよび周辺地盤は、前述した応答震度法と同様にモデル化した。入力地震波は、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2）。尚、本文の動的解析は、参考文献2）と類似であるが、底面を粘性境界とするとともに、表層地盤の非線形性を考慮している。

(3) 応答震度法 本応答震度法による解析モデルの一例としてケース1のモデル図を図3に示す。本手法は前述したとおり、一様な設計震度を作用させる簡便な方法であり、特に傾斜地盤を対象とする場合などに実務の簡略化を図ることができる。

(4) 妥当性の検証（解析結果の比較） トンネル上下端の最大相対変位および覆工断面力を表1に示す。地表および地層の傾斜の影響については、各ケースとも、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、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、表層地盤がトンネル断面に接している場合（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接していない場合（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、本検討で提案した設計荷重と地盤物性値の設定法を用いれば、応答震度法と動的解析の解析結果は、相対変位、断面力とも良く一致すると言える。

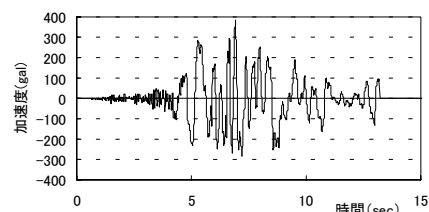


図2 入力地震波

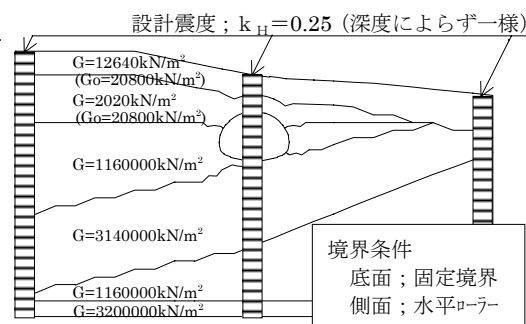


図3 本応答震度法のモデル図

表1 トンネルの相対変位および覆工断面力

|      |       | 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            |
| ケース1 | 動的解析  | 0.6          | 826            | -828             | 383           | -386           | 533            | -533           |
|      | 応答震度法 | 0.6<br>(0.3) | 864<br>(933)   | -864<br>(-933)   | 361<br>(1034) | -361<br>(-104) | 461<br>(116)   | -461<br>(-116) |
| ケース2 | 動的解析  | 0.8          | 2060           | -2050            | 180           | -180           | 231            | -231           |
|      | 応答震度法 | 0.7<br>(0.6) | 1810<br>(1810) | -1810<br>(-1810) | 191<br>(193)  | -190<br>(-193) | 239<br>(239)   | -239<br>(-239) |
| ケース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

### 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、一様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、動的解析との比較により検証した。

参考文献 1) 西村ほか：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) 大嶋ほか：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