

立坑取付部のトンネル耐震設計に用いる 地盤変位の評価法に関する研究

橘 義規¹・大塚 久哲²・吉村 茂³

¹株式会社オリエンタルコンサルタンツ 総合マネジメント事業部
(〒213-0011 神奈川県川崎市高津区久本3-5-7)

E-mail: tachibana@oriconsul.co.jp

²九州大学大学院教授 (〒812-8581 福岡県福岡市東区箱崎6-10-1)

E-mail: otsuka@doc.kyushu-u.ac.jp

³福岡県 田川土木事務所 (〒825-0002 福岡県田川市伊田4543-1)

沈埋トンネルやシールドトンネルでは、立坑接合部の耐震性確保が問題となることが多い。一般に、耐震設計で考慮する地盤変位は、立坑の影響を考慮せずに地盤のみのモデルで算定している。しかし、地盤が軟弱な場合や立坑規模が大きい場合、立坑底面が良好な地盤や基礎に支持されているような場合は、立坑を考慮した場合としない場合で算出される地盤変位に大きな差が生じることが予想される。本論文では、以上の点に着目し、立坑が地盤変位の評価結果に及ぼす影響を、立坑の規模、基礎の条件、および地盤条件をパラメータにし、3次元FEM解析により検討した結果を報告する。

Key Words : tunnel, longitudinal seismic design, dynamic interaction, 3-D dynamic FEM analysis, seismic deformation method

1. はじめに

トンネルは大きな内空を有することから見かけの単位重量が小さく、また、周囲を地盤でとり囲まれていることから、慣性力による自己振動は生じにくく、地震時挙動は周囲地盤の変位に支配される。このような地震時挙動を踏まえ、トンネルに対しては応答変位法と呼ばれる地盤変位分布を考慮した設計が行われている。

一般に行われているトンネル長手方向の応答変位法では、構造物を考慮しない地盤のみの解析により得られた地盤変位を弾性床上梁でモデル化したトンネルに与え解析を行っている¹⁾。このことは、地盤変位としては対象構造物の影響のない遠方地盤のものを考慮し、構造物と近傍地盤の剛性差による相互作用は地盤ばねで考慮していると整理できる。

ところで、沈埋トンネルやシールドトンネルの長手方向の耐震設計では、しばしば立坑とトンネルの接合部の耐震性が問題となる²⁾。立坑取付部では、トンネルと地盤だけでなく立坑と地盤にも相互作用が存在するが、ごくまれな場合を除けば、設計で考慮する地盤変位は地盤のみの解析により算定されている。前述のようにトンネルと地盤の相互作用の影

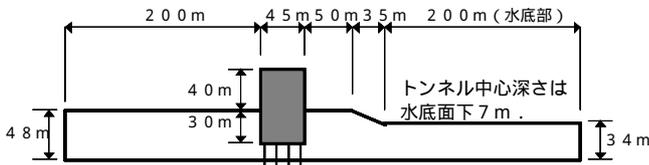
響は地盤ばねで考慮される。しかしながら、立坑近傍のトンネルには立坑と地盤の相互作用の影響を受けた地盤変位が作用するものの、現在一般的に用いられている手法ではこの影響は考慮されていないことになる。特に、地盤が非常に軟弱な場合や立坑規模が大きい場合、立坑底面が良好な地盤や基礎に支持されているような場合は、立坑が周辺地盤の変形を拘束し、立坑を考慮しないで算出される地盤変位を設計に用いると過大となる可能性がある。

本稿では以上を踏まえ、立坑取付部のトンネル耐震設計で考慮すべき地盤変位を検討する目的で行った3次元モデルによる動的解析結果を報告する。

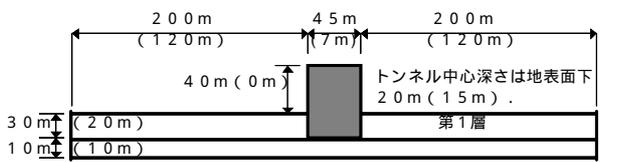
2. 検討ケースと検討条件

解析の対象としたのは、沈埋トンネルとシールドトンネルの立坑取付部である。解析モデルを図-2.1、図-2.2に示す。シールドトンネルでは14m級の大断面トンネルと4m級の中小断面トンネルの2ケースを考慮した。沈埋トンネルモデルの地盤は陸上部と水底部を有し、その境界(護岸に相当)が地盤条件の変化部となっているため、立坑の影響に加え、地盤条件の変化によりトンネル長手方向のひずみが

発生する。一方、シールドトンネルモデルは陸上部の水平成層地盤を想定しており、立坑の影響のみでトンネル長手方向の地盤ひずみが発生するモデルとしている。一般に道路トンネルでは、施工時に利用した立坑を地上まで立ち上げ、完成後は管理や運用設備の収納スペースとして活用することから、沈埋トンネルおよび大断面シールドトンネルは地上部を有する形式とした。



地盤モデル奥行きは445m、立坑は幅と同じ。
図-2.1 沈埋トンネル立坑モデル



地盤および立坑モデルの奥行きは幅と同じ。
()内の寸法は中小規模断面の場合の値。
図-2.2 シールドトンネル立坑モデル

表-2.1 沈埋トンネル立坑ケース

立坑条件	立坑無し (地盤のみ)	立坑有り 杭有り	立坑有り 杭無し
地盤定数	$t = 17\text{kN/m}^3, 18\text{kN/m}^3, 19\text{kN/m}^3$		
	$V_s = 50\text{m/s}, 100\text{m/s}, 150\text{m/s}$		

注) 立坑躯体条件 (単位体積重量 および弾性係数 E)
 躯体地上部 = 3.8kN/m^3 , $E = 5.4 \times 10^5 \text{ kN/m}^2$
 躯体地中部 = 11kN/m^3 , $E = 1.7 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$
 杭 1500 × 225 本

表-2.2 シールドトンネル立坑ケース

地盤定数	第1層	t	17kN/m ³	18kN/m ³	19kN/m ³
		V_s	50m/s	100m/s	150m/s
支持層	支持層	t	第1層と同じ		20kN/m ³
		V_s	(軟弱層支持)		200m/s

注) 立坑条件: 大断面シールド: 沈埋トンネルと同じ
 中小規模断面: 躯体 = 14kN/m^3 $E = 1.9 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$

解析ケースを各々表-2.1, 表-2.2 に示す。沈埋トンネルでは立坑をモデルに含む場合と含まない場合、さらには立坑が杭基礎で支持されている場合とされていない場合を地盤定数もパラメータにして比較する。シールドトンネルでは、立坑規模と立坑底面地盤が軟弱な場合と硬質な場合を組み合わせ、地盤定数もパラメータにして比較する。解析モデルは3次元ソリッド要素で作成し、入力地震動は、道路橋示方書 編・参考資料の種地盤タイプの地震動例 [- 1]³⁾を用いた。加振方向はトンネル軸方向である。

3. 沈埋トンネルモデルの解析結果

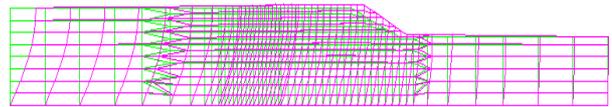
(1) 立坑および近傍地盤の地震時挙動

表層地盤のせん断波速度が 50m/s と 100m/s の場合を例として、各モデルの固有値を表-3.1 に示す。同表には厚い方の表層厚を用いて 1/4 波長則により算定した結果も併せて示す。固有周期は、杭のない立坑有りのケースでは地盤のみとほとんど変わらず、杭の存在により 10%程度短くなった。また、図-3.1 にはせん断波速度が 50m/s の振動モード図を示すが、杭の存在により立坑のロッキング振動が抑えられている。

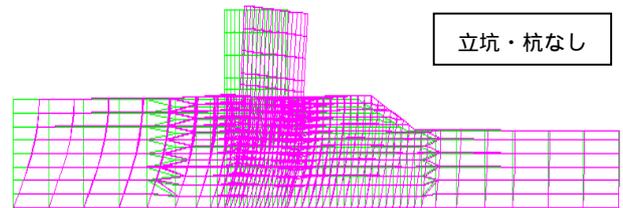
表-3.1 沈埋トンネルモデルの一次の固有周期

	$V_s=50\text{m/s}$	$V_s=100\text{m/s}$
地盤のみ	3.72s	1.86s
立坑・杭なし	3.68s	1.84s
立坑・杭有り	3.41s	1.73s
1/4 波長則	3.84s	1.92s

地盤のみ



立坑・杭なし



立坑・杭あり

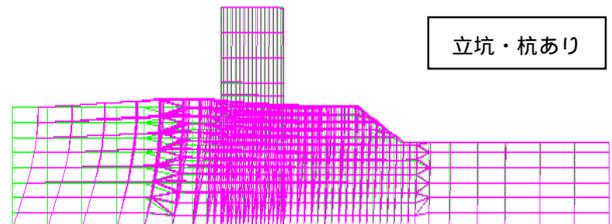


図-3.1 沈埋トンネルモデルの振動モード ($V_s=50\text{m/s}$)

図-3.2 に最大加速度コンター図を示す。立坑のごく近傍を除けば、地盤の応答加速度はどのケースもあまり変わらない。立坑の応答に関しては、図-3.3, 図-3.4 に示すように、地盤剛性の増加に伴い加速度は増加し、その傾向は杭がない場合の方が顕著である。また、立坑変位は地盤剛性の増加に伴い杭支持のケースは増加するが、杭が無い場合は減少する。地盤剛性が大きい方が地盤変位は小さくなることから、杭は周辺地盤の変位を拘束するのに対し、杭支持されていない立坑はトンネル同様、地盤の変位に従うように挙動していることがわかる。

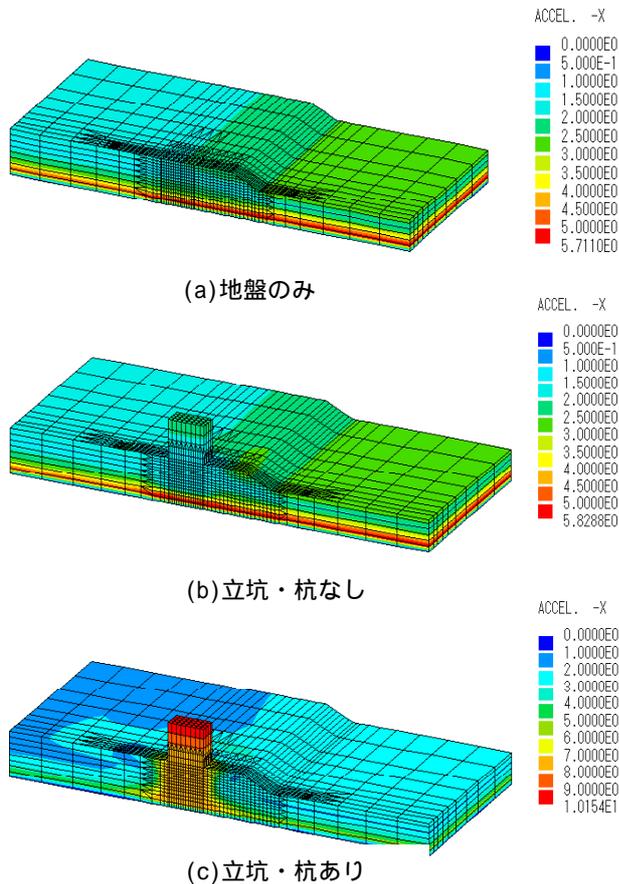


図-3.2 最大加速度コンター図

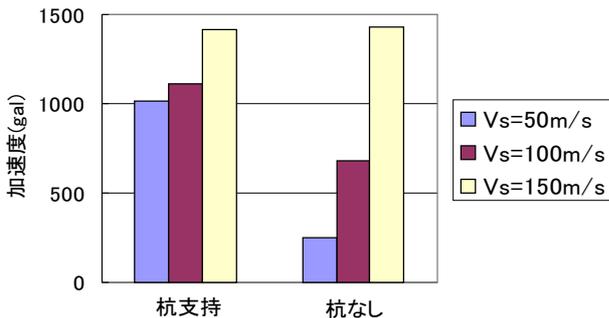


図-3.3 立坑頂部の最大応答加速度

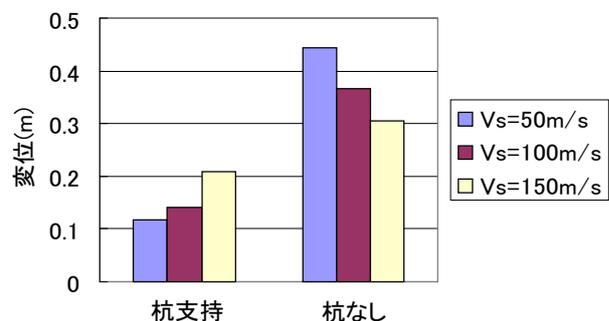


図-3.4 立坑頂部の最大応答変位

立坑とトンネルの接合位置の節点における応答加速度のフーリエスペクトルを図-3.5 に示す。杭なしでは地盤のみと一致し、杭支持の場合は入力波のスペクトルとほぼ一致することがわかる。このことから、杭がない場合の立坑は周辺地盤の挙動の影響を強く受けていることがわかる。

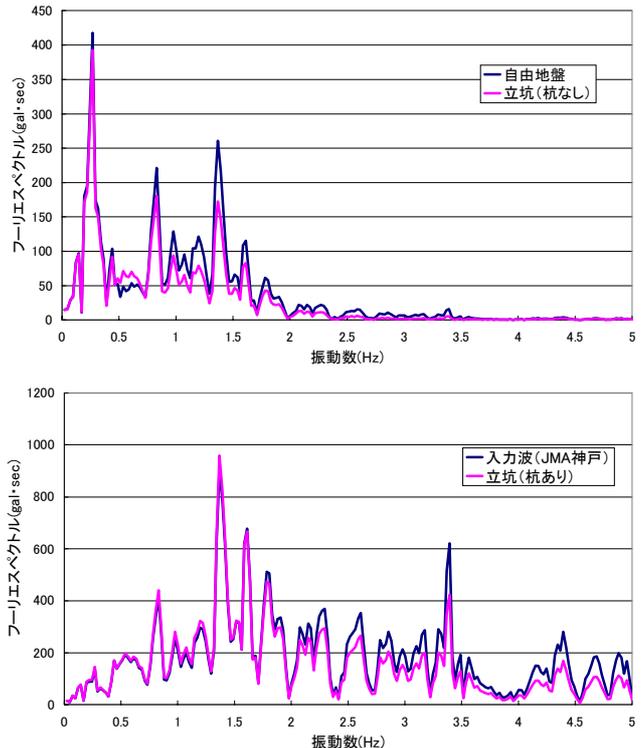


図-3.5 立坑・トンネル接合位置の加速度フーリエスペクトル

(2) 地盤ひずみ

トンネルの耐震設計ではトンネル軸線に沿った地盤ひずみがトンネルに作用することから、3次元FEMモデルを用いた動的解析結果のうち、トンネル位置での地盤ひずみを抽出して図化した。解析結果を図.3.6 に示す。

杭に支持されていない場合の地盤ひずみは、自由地盤（立坑を考慮しないモデル）とそれほど大きな差がなく、最大値は地盤変化部で発生している。一方、杭があるケースについてはその影響が大きく、立坑との接触面から少し離れた地点で地盤ひずみは最大となり、杭がない場合の概ね3～4倍となるが、立坑が陸上部の地盤変位を拘束するためか、地盤変化部のひずみは逆に1/2～1/4程度になっている。

立坑近傍において杭基礎がある方が地盤ひずみが大きくなるのは、杭がある方が立坑の水平変位に対する抵抗が大きいため、地盤よりも変位しにくいと思われる。このことは、地盤剛性が大きくなり相対的に杭基礎の剛性の影響が小さくなると、基礎の有無による地盤ひずみの差が小さくなることから伺える。

各ケースにおける最大ひずみ発生時刻を表-3.2 に、また、その時刻におけるトンネル敷設位置の変位分布を図-3.7 に示す。最大ひずみの発生時刻は、自由地盤と杭なし立坑の場合はほぼ同時刻となり、その時刻における変位分布も似通っている。一方で、杭支持の場合は他の2ケースと発生時刻、変位分布とも異なっており、(1)で述べた振動特性の違いが表れているものと思われる。

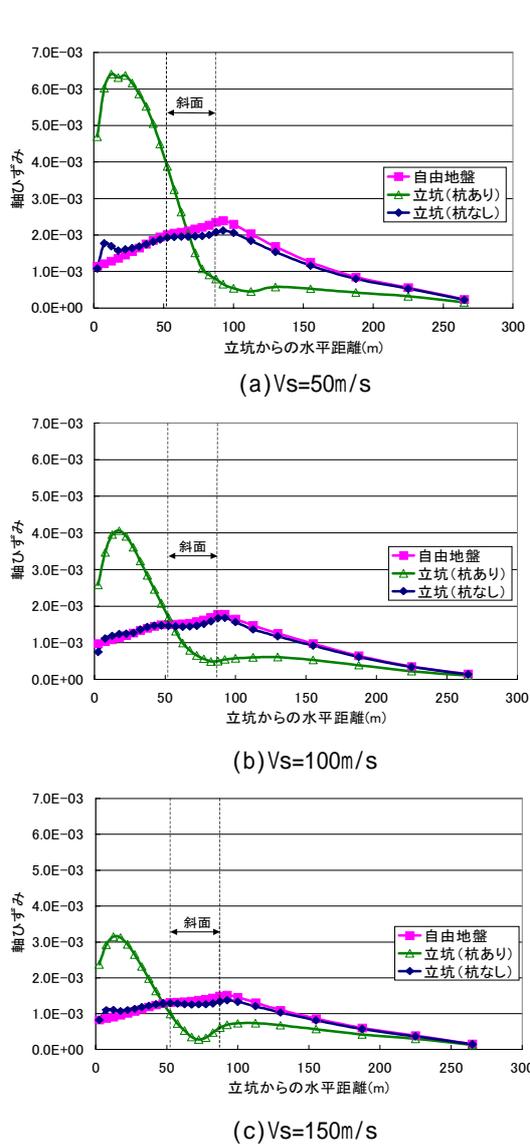


図-3.6 トンネル位置での地盤の最大直ひずみ分布

表-3.2 最大ひずみ発生時刻(秒)

	自由地盤	杭なし立坑	杭支持立坑
Vs=50m/s	7.98	7.79	5.88
Vs=100m/s	8.59	8.67	7.61
Vs=150m/s	5.60	5.60	5.75

図-3.6 によれば、杭支持立坑の影響は立坑近傍の狭い範囲に限定されず、護岸部の地盤ひずみが小さくなるなど影響が広範囲に及んでいる。そこで、立坑が地盤全体の変位分布に及ぼす影響を把握するため、表-3.2 に示した杭支持立坑および杭なし立坑の最大ひずみ発生時刻における3ケースの地盤変位分布の比較をそれぞれ図-3.8、図-3.9 に示す。図-3.8 によれば、立坑から離れると地盤変位はどのケースも等しくなる傾向にあり、地盤全体が同一方向に変位するのを杭支持された立坑が拘束し大きなひずみが発生する原因となっている。一方、杭なし立坑モデルにおいて地盤不整形の影響が大きくなる時刻では、図-3.9 に示すように杭支持された立坑の影響が地盤全体の振動モードに現れ、地盤変位が全体的に小さくなっている。

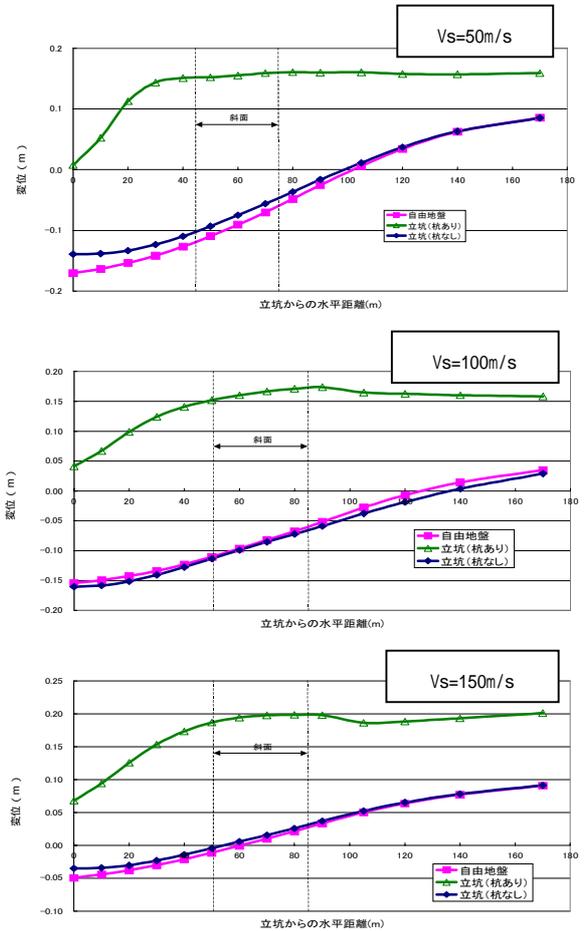


図-3.7 最大ひずみ発生時刻におけるトンネル位置で地盤変位分布

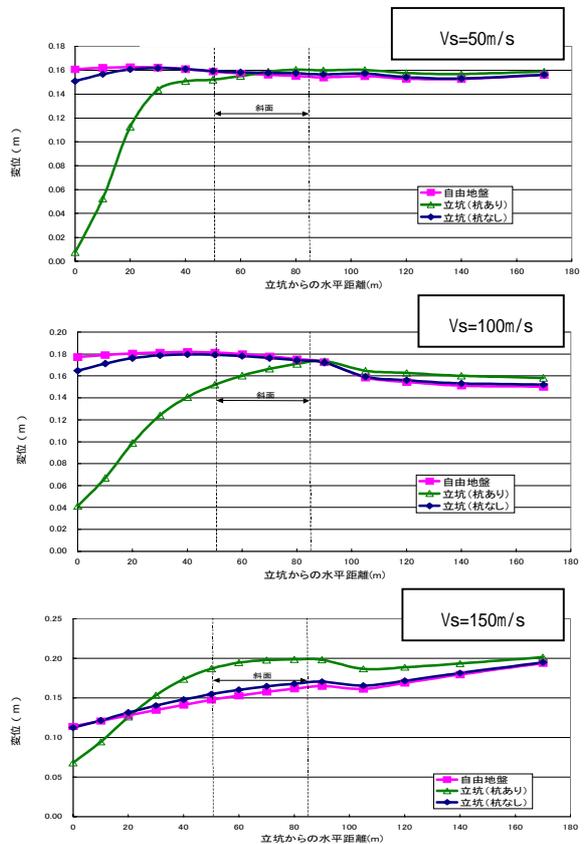


図-3.8 杭支持ケースの最大ひずみ発生時刻における変位分布の比較

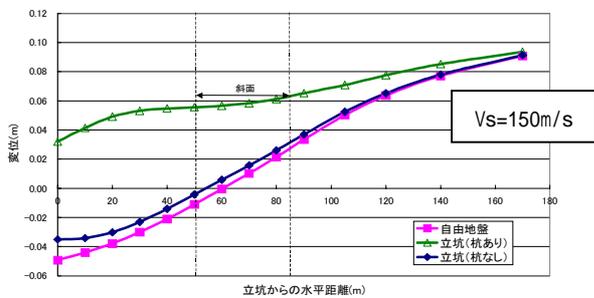
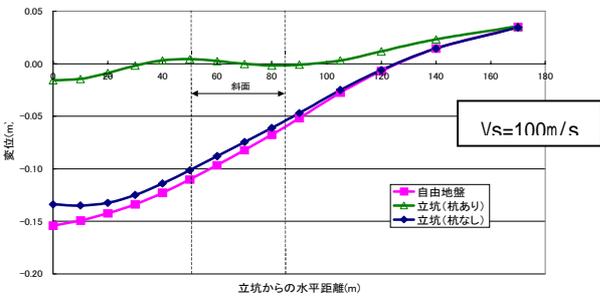
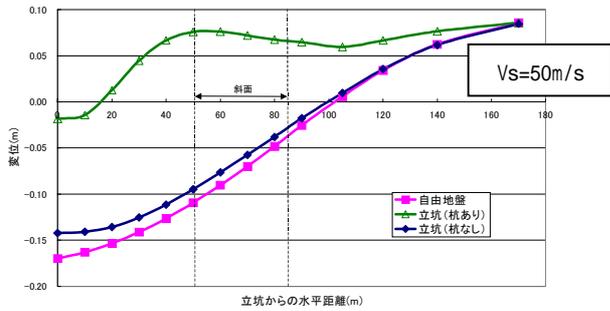


図-3.9 杭のないケースの最大ひずみ発生時刻における変位分布の比較

4. シールドトンネルモデルの解析結果

(1) 立坑が近傍地盤の振動特性に及ぼす影響

表層地盤のせん断波速度が 50m/s と 100m/s の場合を例として、大断面シールドトンネル立坑モデル（以下、大断面モデル）と中小断面シールドトンネル立坑モデル（以下、中小断面モデル）の固有値として、有効質量比が最大の次数のものを表-4.1, 4.2 に示す。また、図-4.1 に大断面モデルの振動モード図を示す。

表-4.1, 4.2 に併記する 1/4 波長則による地盤の固有周期との比較から、立坑が地盤の固有振動に与える影響はほとんどないことがわかる。

(2) 地盤ひずみ

図-4.2, 図-4.3 に、シールドトンネル敷設位置における地盤の最大直ひずみの分布を示す。同図より、表層地盤の物性値が同じであっても、硬質層に支持されている方が立坑が変位しにくいいため、立坑近傍の地盤ひずみは大きくなるということが分かる。また、立坑の規模が大きい方が支持層の違いの影響が立坑から遠方まで及ぶ傾向にある。

なお、シールド立坑の検討モデルは水平成層地盤であるため、立坑が無い場合、地盤は一様に変位し

表-4.1 大断面シールドトンネルモデルの一次の固有周期

	Vs=50m/s	Vs=100m/s
軟弱層支持 (1/4 波長則)	3.17s (3.20s)	1.59s (1.60s)
硬質層支持	2.41s	1.27s

表-4.2 中小断面シールドトンネルモデルの一次の固有周期

	Vs=50m/s	Vs=100m/s
軟弱層支持 (1/4 波長則)	2.40s (2.40s)	1.20s (1.20s)
硬質層支持	1.64s	1.12s

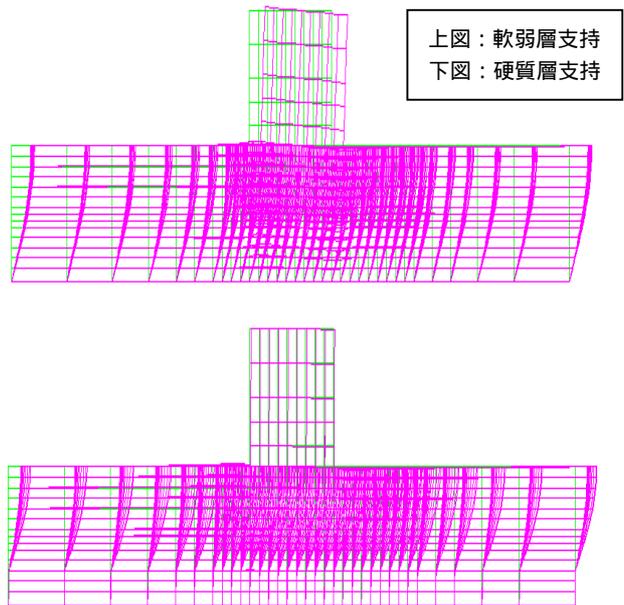


図-4.1 大断面シールドトンネルモデルの振動モード

ひずみは生じない。つまり、図-4.2, 図-4.3 に示す地盤ひずみが発生するのは、立坑と地盤の地震時挙動が異なることのみ起因している。この影響がトンネルの耐震性にどの程度影響を及ぼすのか、簡単に考察してみる。リング間継手の目開きに対するシール材の止水性能を 2 ~ 3 mm 程度とした場合、トンネルの許容ひずみは $2 \sim 3 \times 10^{-3}$ 程度と考えられる（セグメント幅 1000mm の場合）。よって、地盤が軟弱で立坑が比較的良好な地盤に床付けされているような場合は立坑近傍のトンネルの耐震性が問題になると考えられる。

5. 設計上の留意点

(1) 沈埋トンネル立坑モデル

立坑の有無および杭基礎の有無が、周辺地盤の応答に及ぼす影響を検討した。その結果、以下のことが分かった。

- 立坑が杭基礎により支持されている場合は、杭により立坑の変位が拘束されるため、地盤変位の算定

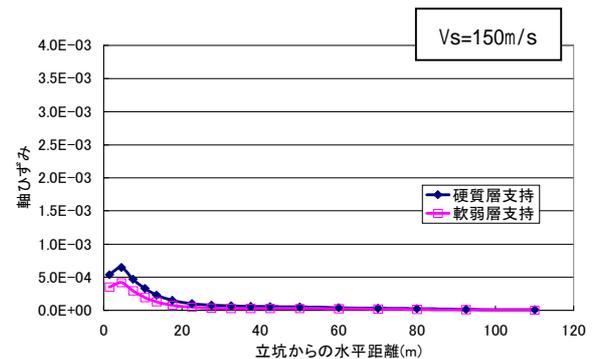
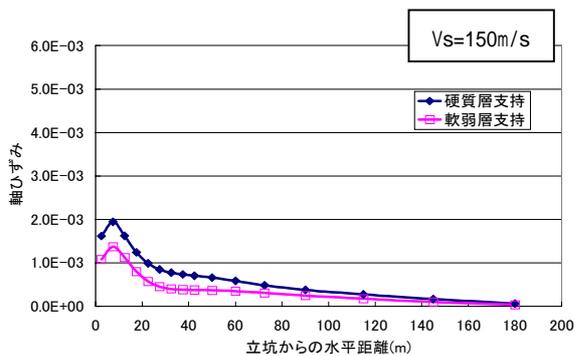
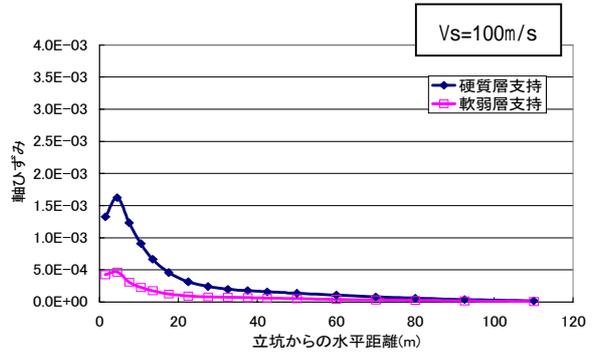
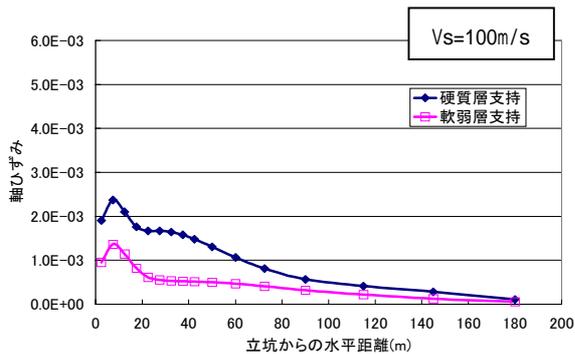
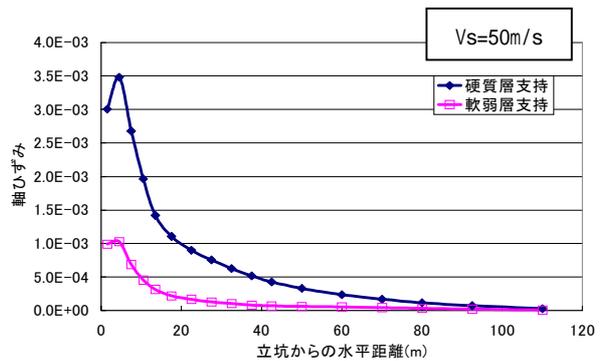
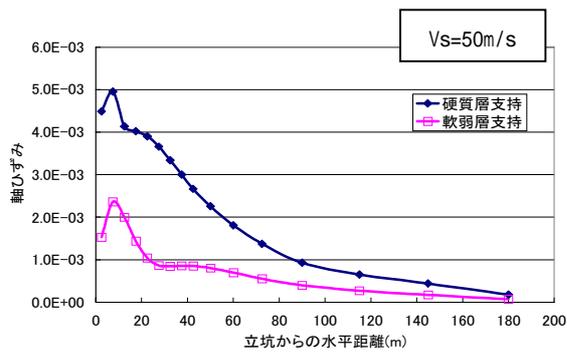


図-4.2 トンネル位置での地盤の最大直ひずみ分布 (大断面トンネル)

図-4.3 トンネル位置での地盤の最大直ひずみ分布 (中小断面トンネル)

においては立坑との相互作用の影響が無視できない。従って、応答変位法による設計に適用する地盤変位の算定では、立坑と地盤の連成解析を行う必要があると考えられる。

・立坑が杭基礎により支持されていない場合は、立坑は地盤の変形に追従するように運動し、周辺地盤のひずみは自由地盤の場合とほぼ同等の結果となる。従って、杭基礎で支持されていないような場合は、これまでどおりの立坑を考慮しない地盤のみのモデルで地盤変位を算定し、応答変位法による耐震設計を実施することが可能と考えられる。

・ただし、立坑が杭支持されていない場合でも底面が堅固な支持層に着底している場合は、シールドトンネルモデルの解析結果から、杭基礎と同じような効果があると推測される。よって、このような場合も立坑と地盤の連成解析を行う必要があると考えられる。

(2) シールドトンネル立坑モデル

立坑が硬質地盤に床付けされているケースとされていないケースについて比較を行い、立坑が周辺地盤の応答に及ぼす影響を検討した。

その結果、立坑が比較的良好な地盤に床付けされ、表層地盤が相対的に軟弱な場合は、立坑近傍のトンネルの耐震性確保に注意する必要があることが分かった。

6. 今後の課題

本研究の結果、立坑の支持条件により立坑近傍の地盤ひずみの評価値が地盤のみで解析した場合と大きく異なることがわかった。今後、これらの地盤ひずみに対するトンネルの応答解析を実施し、地盤ひずみの評価結果が、トンネルの応答に及ぼす影響を検討する予定である。

参考文献

- 1) 土木学会：開削トンネルの耐震設計，トンネルライブラリ第9号，pp.110-112，1998.
 - 2) 土木学会：土木構造物の耐震設計入門，pp.179-180，2001.
 - 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 耐震設計編，pp.304-310，2002.
 - 4) 大塚久哲監修：最新 地中・基礎構造物の耐震設計，九州大学出版会，2001
- (2003. 6. 6 受付)

EVALUATION OF GROUND DISPLACEMENT FOR SEISMIC DESIGN OF TUNNELS NEAR VERTICAL SHAFT

Yoshinori TACHIBANA , Hisanori OTSUKA and Shigeru YOSHIMURA

As for seismic design of immersed tunnel and shield tunnel, a part to connect with shaft often becomes a subject in design. Though the influence of ground displacement is taken into consideration as for the tunnel seismic design, ground displacement is calculated by using the model of the ground without shaft. But, the calculated value of the ground displacement is greatly different by calculating it in consideration of shaft, when the ground is soft, the scale of shaft is large and shaft is supported on hard layer or the foundation. From the above point of view, the influence of shaft in the evaluation of the ground displacement was examined by the three dimensions FEM analysis. Parameters are the scale of shaft and the its supporting conditions and the ground property.