

沈埋トンネル縦断方向の耐震設計における 相互作用の評価方法に関する一考察

橘義規¹・大塚久哲²・古川愛子³・矢野恵美子⁴

¹(株)オリエンタルコンサルタンツ 東京事業本部
(〒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 工学研究院建設デザイン部門
(〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)
E-mail:otsuka@doc.kyushu-u.ac.jp

³九州大学大学院助手 工学研究院建設デザイン部門(同上)
E-mail:furukawa@doc.kyushu-u.ac.jp

⁴九州大学大学院工学府建設システム工学専攻(同上)
E-mail:e-yano@doc.kyushu-u.ac.jp

線状地中構造物縦断方向の耐震設計においては地盤と構造物の相互作用の評価が重要であることから、筆者らはこれまで、自由地盤から算出した地盤変位を用い、地盤ばねにより構造物と地盤の相互作用を考慮する応答変位法について考察を行ってきた。複雑な地盤構造の場合や、立坑および継手を有する場合には、このような応答変位法による結果と構造物の実挙動との間に依然として差が生じる危惧がある。本研究では、これまでと同様の沈埋トンネルを対象に、構造物と地盤の相互作用を直接考慮した3次元FEMモデルによる解析を行い、応答変位法の結果との比較を行うとともに、構造物や継手のモデル化に関して考察を行う。

Key Words : Immersed tunnels, ground displacement evaluation, 3-D FEM analysis, seismic displacement method,

1. はじめに

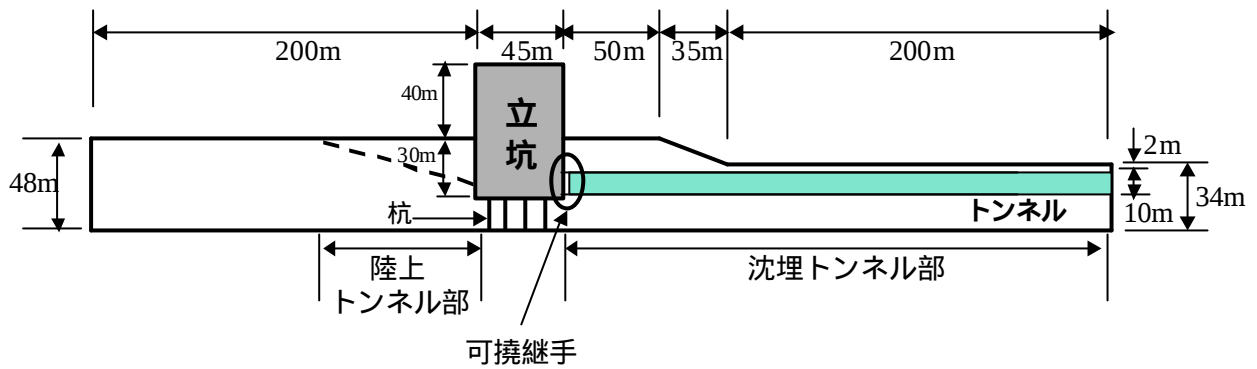
地中構造物は周囲を地盤に囲まれているため、地震時には周囲の地盤変形に追随するように運動する。したがって、地中構造物縦断方向の耐震設計は動的解析によって求めた地盤の変位分布をトンネルに作用させる応答変位法を用いることが一般的である¹⁾。地中構造物縦断方向の耐震設計では、地盤変位の評価方法が1つの重要な課題となる。

実際の地中構造物は、地震時において構造物と地盤間に相互作用が生じており、現行の応答変位法では自由地盤モデルから地盤変位を算出し、構造物と地盤の相互作用は地盤ばねにより考慮されているのみである。

したがって、複雑な地盤構造の場合、立坑や継手を有する場合は応答変位法による解析結果と構造物の実挙動との間に大きな差が生じる可能性もある。

筆者ら²⁾は、応答変位法に用いる地盤変位について、立坑と地盤の一体解析を行った結果を用いることの有効性を示した。また、西岡・運上³⁾は、地盤ひずみの伝達率についてFEMモデルとはりばねモデルとで検討を行っている。しかし、地盤・トンネル・立坑の相互作用を一体解析により検討した例は少ない。

本研究では、沈埋トンネル縦断方向の耐震設計において地盤と構造物の相互作用をどの程度まで厳密に考慮すべきかを検討するために、地盤とトンネルと立坑の連成系をモデル化した3次元FEMによる動的解析と、



地盤モデル奥行き：構造物側壁から境界まで200m，立坑奥行き：45m

図-1 地盤変位算出用解析モデル

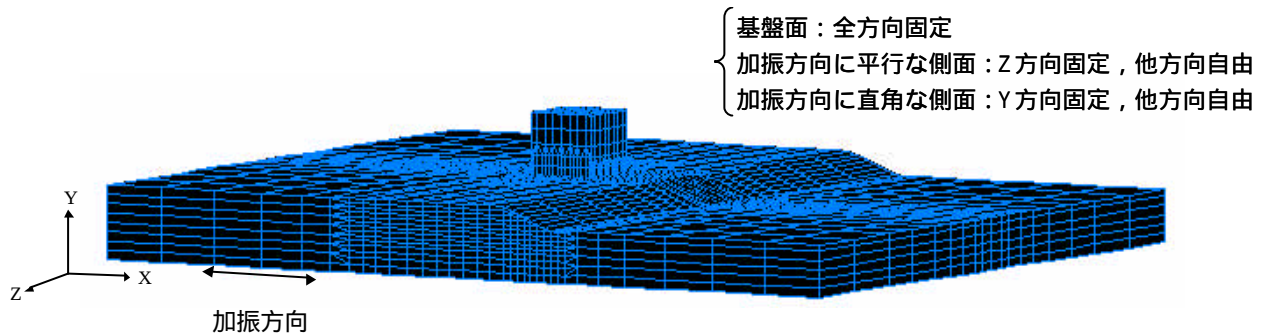


図-2 3次元FEMモデル全体図

はりばねモデルによる応答変位法による解析を行い、構造物と地盤の相互作用の評価手法について考察する。さらに、はりばねモデルにおける継手ばね定数の算出方法の違いがトンネルの応答に及ぼす影響を確認し、設計上の留意点を示す。

2. 解析手法

(1) 対象構造物

a) FEM モデル

本研究で対象としている構造物は図-1に示すように、不整形地盤内に配置されている立坑とトンネルである。杭はある場合とない場合の2ケースを考えている。この解析モデルに対し、表層地盤と立坑をソリッド要素で、沈埋トンネルをシェル要素で一体的にモデル化した3次元FEMモデルにより解析した。図-2に実際の解析で用いたFEMモデルの一例を示す。トンネルの沈埋函は立坑に近接した函体を解析対象とすることとし、想定トンネルの形状に近づけるために図-3に示すような1層4室の中空断面とした。継手は、立坑取付部に設置し、トンネル同様シェル要素でモデル化した。本研究で採用している可撓継手は、沈埋トンネルで一般的に用いられているPC-ゴムガスケット継手としている。そこで、継手部の幅はゴムガスケットの圧縮時の高さである10cmとした。立坑は曲げ剛性が等価な充実断面としてモデル化した。杭先端は基盤面である。表層地盤の奥行きは、境界部の影響が構造物の挙

表-1 解析モデル諸元

トンネル	函体	$E=3.19 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$, $\nu=0.16$ $A=148 \text{ m}^2$, $I=2,260 \text{ m}^4$
	継手	$E=3.8 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$, $\nu=0.49$
地盤	地盤定数	$\gamma_t=17 \text{ kN/m}^3$, $V_s=50 \text{ m/s}$
立坑躯体	躯体地上部	$\gamma=3.8 \text{ kN/m}^3$, $E=5.4 \times 10^5 \text{ kN/m}^2$
	躯体地中部	$\gamma=11 \text{ kN/m}^3$, $E=1.7 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$
	杭	$F=1500 \text{ mm} \times 225 \text{ 本}$, $l=18 \text{ m}$ $E=2.6 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$

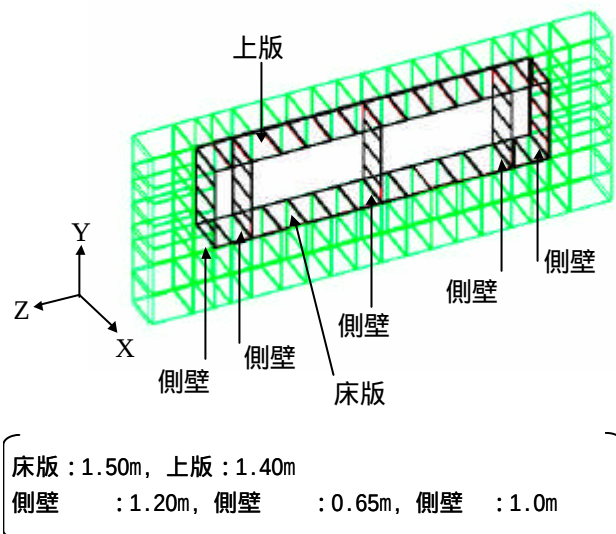


図-3 解析モデル抽出図

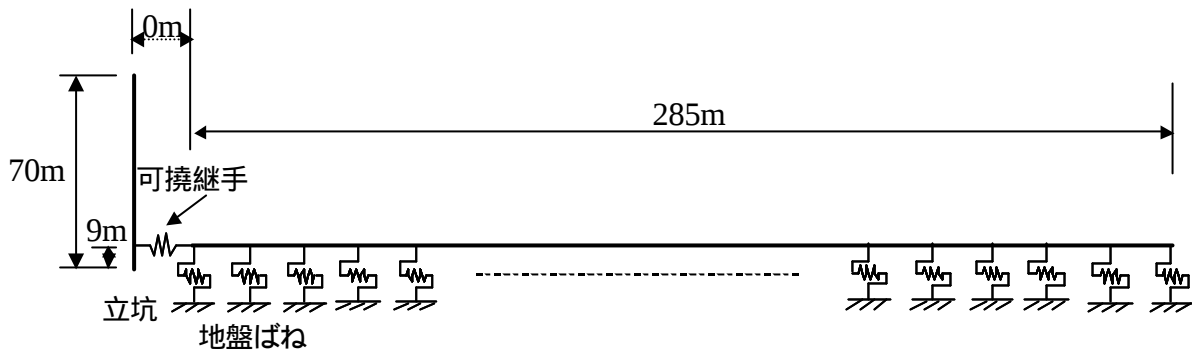


図-4 立坑・トンネルのはりばねモデル

動に影響を及ぼさないように、地盤の深い方の層厚(=48m)の約4倍である200mとした。地盤は弾性とし、モデル下端は固定、側方境界面については図-2に示すような境界条件である。表-1に解析モデルの諸元を示す。本研究では、トンネル、地盤、立坑共に非線形特性を考慮していない。これは本研究が、立坑のみでなくトンネルも含めた相互作用の検討を主目的とした基礎的研究であるため、簡略的に線形解析とした。また、せん断波速度を50, 100, 150m/sとした場合の地盤応答解析結果を比較すると、 $v_s=50\text{m/s}$ の場合に立坑と地盤の相互作用の影響が最も大きく評価されたため、地盤定数を一様に50m/sとしている。

b) はりばねモデル

図-1に示したモデルと対応するように、立坑と沈埋トンネルからなる弾性床はりモデルを図-4のように作成し応答変位法による比較解析を行う。解析モデルではトンネル軸方向の自由度のみを有する2次元モデルで、地盤ばねはトンネル軸方向に設置する。立坑取付部にはトンネル軸方向にばねを有する長さ0の可撓継手を設置する。解析モデルにおける各要素の物性値を表-2に示す。地盤ばね定数は、トンネルと地盤からなる単位奥行きを有するFEMモデルを作成し、静的強制変位と地盤反力の関係より算定した。継手ばねの軸方向ばね定数については、本研究では2通りの方法で算出した値(継手ばね定数1, 継手ばね定数2)を用いる。継手ばね定数1は、はりばねモデルの継手ばね定数をFEMモデルの継手剛性に単純に一致させた値である。具体的には以下の式から求めた。

$$K_j = \frac{E_j A}{\Delta l} \quad (1)$$

ここに、 K_j : 継手ばね定数(kN/m), E_j : 継手部のヤング係数($=3.8 \times 10^3 \text{kN/m}^2$), A : 継手全体の断面積($=148\text{m}^2$), Δl : 継手の長さ($=0.1\text{m}$)である。継手ばね定数2について、図-5に継手部付近の各解析モデルのイメージ図を示す。同図に記した番号, , は、構造物に外力が加わった時にモデルに作用する力であり、

表-2 はりばねモデルにおける物性値

地盤ばね定数	$3.9 \times 10^4 \text{ kN/m/m}$
継手ばね定数 1	$5.6 \times 10^6 \text{ kN/m}$
継手ばね定数 2	$3.5 \times 10^7 \text{ kN/m}$

(トンネル断面定数は表-1と等しい)

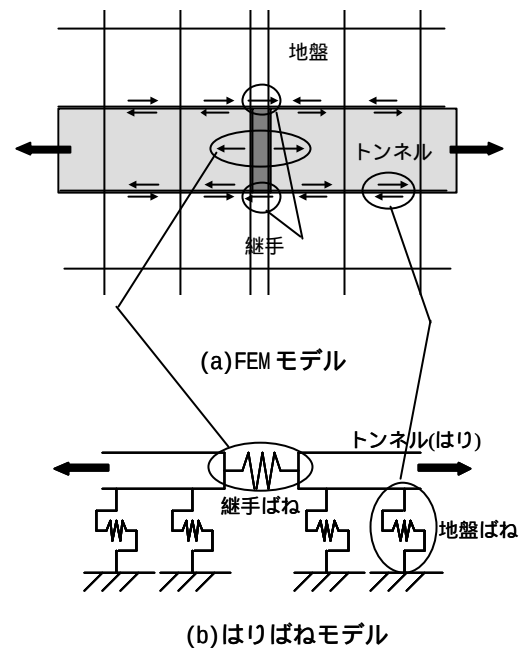


図-5 継手付近イメージ図

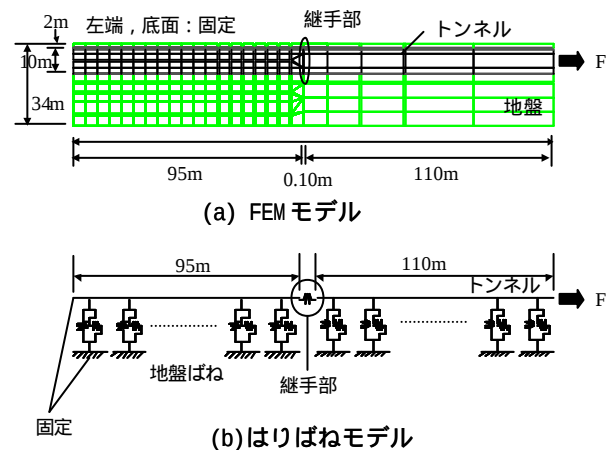


図-6 継手ばね定数算出用解析モデル

表 -3 解析ケース

	FEMモデル	はりばねモデル
立坑の支持条件	杭なし	
	杭あり	
継手剛性	$E=3.8 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$	継手ばね定数 1
		継手ばね定数 2

具体的には、

構造物と地盤の相互作用力

継手に作用する力

継手部における構造物と地盤の相互作用力

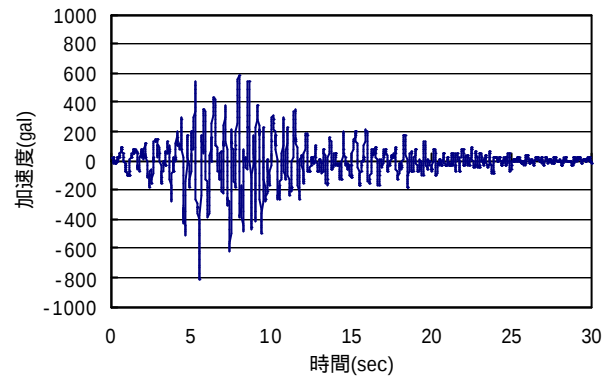
が考えられる。FEM モデル(図 -5(a))では から の全てが考慮されているが、はりばねモデル(図 -5(b))では が考慮されていない。そこで、図 -6(a)(b)のようなモデルの左端と底面を固定とした簡易な解析モデルを作成し、各モデルの右端に強制荷重 F を与えたとき、はりばねモデルの継手変形量がFEMモデルの継手変形量に一致するように継手ばね定数を決定した。すなわち、継手ばね定数2 は、より現実に即した値といえる。

(2)解析条件

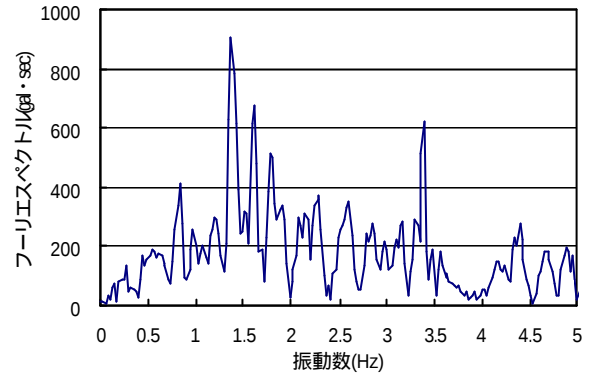
FEM モデルとはりばねモデルにおける解析ケースを表 -3に示す。立坑が杭基礎で支持されている場合とされていない場合を、継手の継手剛性をパラメータにして比較する。ここで、地震時のせん断波速度が $V_s=50\text{m/s}$ 程度に低減するような軟弱地盤では、立坑は杭で支持されるのが一般的と考えられるが、前述のように相互作用の影響が最も大きいケースとして選定した。

図 -1 に示す FEM モデルの解析は、Newmark の β 法 ($\beta = 1/4$) による直接積分法で行った。入力地震波は図 -7 に示すような標準地震波タイプ - 種地盤 (Type211)⁴⁾を用いた。このときの加振方向はトンネル軸方向のみである。

図 -4のはりばねモデルの解析は、応答変位法を採用している。トンネル部は慣性力の影響が小さいため、質量と減衰は考慮しない静的解析を行う。解析ステップは0.01秒刻みの3000ステップとし、地盤変位は軸方向に入力する。具体的には、図 -2のFEMモデルからトンネルを除いた、地盤と立坑からなる3次元FEMモデルの動的応答解析より、トンネル中心位置における地盤変位と立坑の応答変位を算出し、図 -4のはりばねモデルにそれぞれ入力した。ここで、従来の自由地盤から地盤変位を算出する応答変位法では、トンネル、立坑共に地盤変位を地盤ばねを介して入力している。



(a)加速度波形



(b)フーリエスペクトル

図 -7 入力地震波 (Type211)

しかし、本研究では、地震時の立坑の応答は地盤と立坑を一体化して解析しているため、地盤変位算出時に求まる。したがって、図 -4の立坑に対しては地盤ばねを介さずに直接、強制変位として立坑の応答変位を入力する。トンネルに対しては従来通り地盤ばねを介して地盤変位を入力する。

3. 解析結果

(1)FEM 解析

まず FEM モデルの解析結果から、地盤・立坑・杭・トンネルが互いに及ぼしあう影響について検討する。比較ケースとして、地盤・立坑(杭の有無)・トンネルの一体化モデル、地盤・立坑(杭の有無)の一体化モデル、地盤・トンネルの一体化モデル、地盤のみ、の6ケースを想定する。

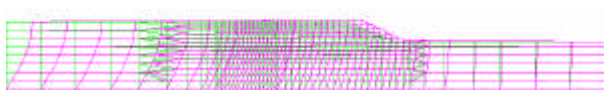
a)振動特性

表 -4 に各ケースの1次の固有周期を示す。

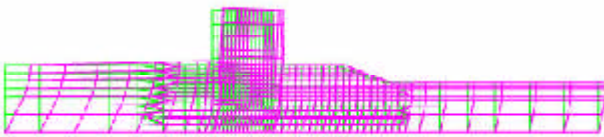
地盤とトンネルを一体モデル化した場合や地盤と杭支持されていない立坑を一体モデル化した場合の固有周期は地盤のみに近く、両モデルは地盤とほぼ同等の振動特性を持っていることがうかがえる。一方、トンネルと杭支持されていない立坑を地盤に対して一体にモデル化すると、地盤のみと比較して5%ほど短周期側

表 -4 1次の固有周期

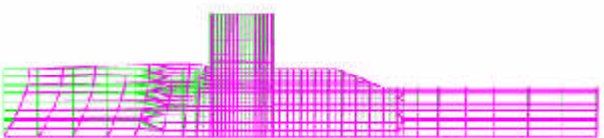
地盤+立坑+トンネル	杭あり	3.405 s
	杭なし	3.553 s
地盤+立坑	杭あり	3.411 s
	杭なし	3.682 s
地盤+トンネル		3.643 s
地盤のみ		3.724 s



(a)地盤のみ



(b)地盤+立坑(杭なし)+トンネル



(c)地盤+立坑(杭あり)+トンネル

図 -9 振動モード

に移行する。

地盤と杭支持された立坑を一体にモデル化した場合の固有周期は、地盤のみの場合と比較して約10%短くなる。また、「地盤+立坑(杭あり)」モデルと「地盤+立坑(杭あり)+トンネル」モデルの固有周期はほぼ等しい。以上より、立坑が杭支持された場合の地盤・立坑・トンネル一体化モデルの振動特性に対する杭の影響の大きさがうかがえる。

また、図-9に例として地盤モデルと地盤・立坑・トンネルの一体化モデルの振動モード図を示す。

b)立坑の応答

図-10に地盤・立坑の一体化モデルと地盤・立坑・トンネルの一体化モデルにおける立坑の最大変位を示し、トンネルの有無により立坑の応答がどの程度変化するかを検討する。

立坑とトンネルを一体にモデル化した場合のトンネル設置位置における立坑の挙動は、トンネルの剛性の影響を受けて立坑のみの場合と比べて大きく変形していることが図-10より確認できる。具体的には、立坑が杭支持されていない場合は約1.1倍、杭支持されている場合は約2倍大きく変形しており、立坑とトンネ

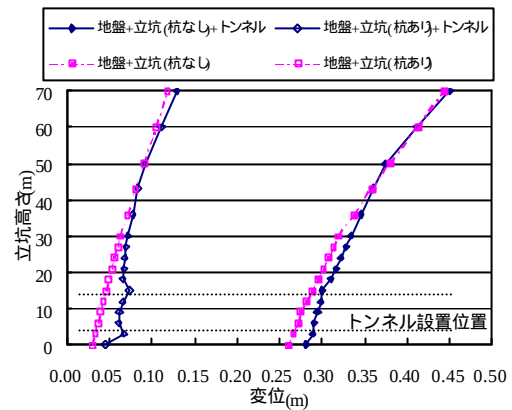
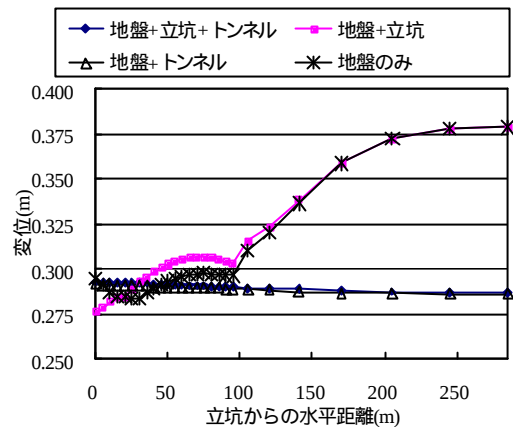
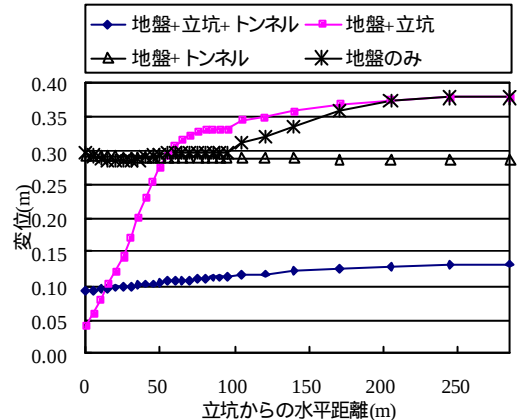


図 -10 立坑の最大変位



(a) 杭なし



(b) 杭あり

図 -11 トンネル軸方向最大変位

ルの相互作用の影響は立坑が杭支持されている場合に、特に大きいといえる。

c)トンネル中心位置の応答

図-11にトンネル中心位置における各ケースのトンネル軸方向最大変位を示す。地盤+立坑の一体化モデルと地盤のみのケースの場合はトンネル中心位置における地盤変位を示している。これより、立坑と地盤、トンネルと地盤の相互作用の影響について検討する。なお、(a)杭なしと(b)杭ありの場合で縦軸のスケールが

異なっている。

最初に、地盤のみと地盤とトンネルを一体にモデル化した場合を比較して、トンネルと地盤の相互作用がどの程度かを把握する。

「地盤のみ」と「地盤+トンネル」を比較すると、地盤の斜面先端(X=85m)以降で地盤変位がトンネル変位と比べて約30%大きくなり、地盤とトンネルの相互作用の影響は斜面先端以降で大きくなると考えられる。

次に、図-11(a)立坑が杭支持されない場合について検討する。地盤と立坑を一体にモデル化した場合の地盤の応答は、地盤のみの場合とほぼ等しく、地盤の応答に対して立坑の影響は無視できると考えられる。また、トンネルを同時にモデル化した場合(地盤+立坑+トンネル)の応答は立坑をモデル化していない場合(地盤+トンネル)の応答とほぼ等しくなる。したがって、立坑が杭支持されていない場合では、トンネルの応答に対しては、立坑よりもトンネルと地盤との相互作用の影響が大きいといえる。

図-11(b)立坑が杭支持された場合について見る。「地盤のみ」と「地盤+立坑」を比較すると、杭支持された立坑が周辺の地盤の挙動を拘束するため、特に立

坑近傍における両モデルの地盤は異なる挙動をしている。次いで、トンネルを同時にモデル化した場合(地盤+立坑+トンネル)のトンネルの応答は、トンネル剛性の影響により「地盤+立坑」の地盤変位が平滑化されている。以上より、立坑が杭支持された場合のトンネルの応答に対しては、立坑とトンネルの構造系と地盤の相互作用の影響が大きく、さらに杭の影響の大きさにも留意する必要がある。

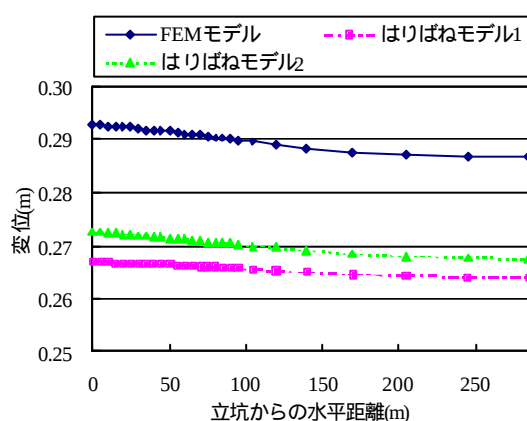
(2)FEMモデルとはりばねモデルの比較

次に、FEMモデルとはりばねモデルの解析結果を比較し、構造物と地盤の相互作用の評価方法の違いがトンネルの応答に及ぼす影響を検討する。

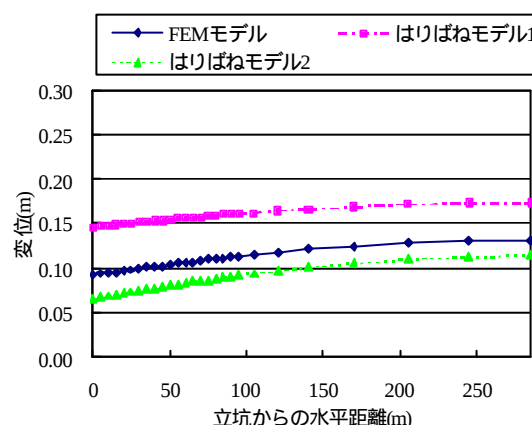
a)FEMモデルにおける構造物と地盤の相互作用の評価方法

FEMモデルの解析では立坑とトンネルからなる構造系と地盤の相互作用が直接考慮されている。

前節でも述べたが、立坑が杭支持されていない場合は、トンネルの応答に及ぼす立坑の影響は小さく、トンネルと地盤の相互作用の影響が大きい。一方、立坑が杭支持されている場合は杭の影響が大きく、立坑と

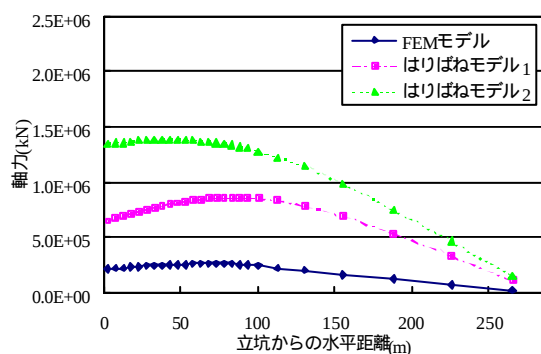


(a) 杭なし

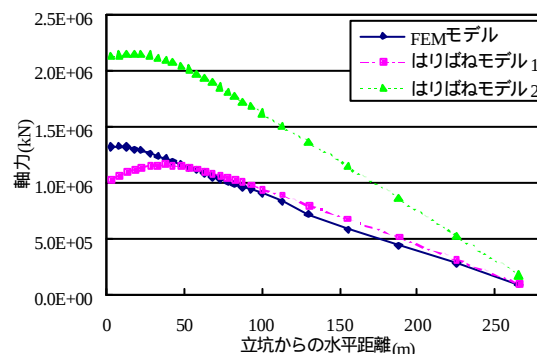


(b) 杭あり

図-12 トンネル軸方向最大変位比較



(a) 杭なし



(b) 杭あり

図-13 最大軸力比較(立坑取付部のみに継手設置)

トンネルの構造系と地盤の相互作用の影響が大きい。
b) はりばねモデルにおける構造物と地盤の相互作用の評価方法

はりばねモデルの解析では、図-10の「地盤+立坑」の値を図-4のはりばねモデルの立坑部に直接入力している。したがって、「地盤+立坑」とはりばねモデルの立坑の応答は等しい値を示しており、はりばねモデルでは立坑とトンネルの相互作用は直接的には評価されていない。また、トンネルと地盤の相互作用は地盤ばねにより評価されている。

c) 変位比較

図-12にFEMモデルと継手ばね定数を変化させたはりばねモデル1, 2(表-2参照)のトンネル軸方向最大変位を立坑の支持条件別に示す。なお、(a) 杭なしと(b) 杭ありの場合で縦軸のスケールが異なっている。

図-12(a)のトンネルの応答変位は、はりばねモデルの方がFEMモデルよりも若干危険側に評価されている。これは、杭支持されていない立坑がトンネルの応答に及ぼす影響は小さいため、FEMモデルとはりばねモデルにおけるトンネルの変形の違いはトンネルと地盤の相互作用の評価方法の違いによるものだと考えられる。

次に立坑が杭支持されている場合について検討する。はりばねモデルでは、図-10のように立坑とトンネルの相互作用はFEMモデルよりも過小評価されており、立坑・トンネルの構造系と地盤の相互作用も直接評価されていない。したがって、はりばねモデルの応答はFEMモデルより過大、あるいは過小な応答になったと考えられる。

継手ばね定数の違いに着目して比較すると、継手部におけるトンネルと地盤の相互作用を考慮したはりばねモデル2の方が、はりばねモデル1と比べてFEMモデルにより近い挙動を示していることがわかる。

d) 断面力比較

図-13にFEMモデルとはりばねモデル1, 2の最大軸力を立坑の支持条件別に示す。

FEMモデルとはりばねモデルの応答に対しては、前述のように構造物と地盤の相互作用の評価方法の違いが大きく影響を及ぼしている。はりばねモデルのようにトンネルと地盤の相互作用を地盤ばねのみで評価すると、地盤ひずみが過剰に伝達され、トンネルに生じる断面力を安全側に評価し過ぎてしまう傾向がある。

トンネル全長における軸力の分布傾向を見ると、FEMモデルとはりばねモデル2の分布は似通っている。一方、はりばねモデル1の場合は、立坑取付部の継手により軸力が過剰に低減されるため、立坑近傍における軸力が小さく評価されている。

以上より、FEMモデルとはりばねモデルにおける構造物と地盤の相互作用の評価方法の違いが、トンネルの応答に及ぼす影響が大きいことがわかった。特にト

ンネルの断面力を評価する際には注意が必要である。したがって、立坑を含めた沈埋トンネル全体系の解析を行う際に、立坑から離れた部分では従来通りのはりばねモデルを用いた解析を行い、立坑近傍では地盤と立坑とトンネルの一体化モデルを用いたFEM解析を実施するなどして、立坑・トンネルで構成される構造系の影響を正しく評価する必要があると考えられる。また、継手部における構造物と地盤の相互作用を考慮せず、継手ばね定数を簡略に評価した場合は、立坑近傍における断面力を過小評価する可能性があることにも留意が必要である。

4. まとめ

本研究において得られた主な知見をまとめると以下のようである。

FEMモデルでは、立坑とトンネルからなる構造系と地盤の相互作用が直接評価されている。一方、はりばねモデルでは地盤とトンネルの相互作用は地盤ばねでのみ評価されており、立坑の影響も直接的には考慮されていない。このような構造物と地盤の相互作用の評価方法の違いがトンネルの応答に及ぼす影響は大きい。すなわち、立坑を含めた沈埋トンネル全体系の解析を行う際に、立坑から離れた部分では従来通りのはりばねモデルを用いた解析を行い、立坑近傍では地盤と立坑とトンネルの一体化モデルを用いたFEM解析を実施するなどして、立坑・トンネルで構成される構造系の影響を正しく評価する必要があると考えられる。

また、継手部における構造物と地盤の相互作用の考慮の有無は、トンネル全長の応答に大きく影響を及ぼすため、継手ばね定数の評価方法にも留意が必要である。

謝辞：本研究のFEMモデル化にあたり、北見工業大学の宮森助教授に多大なご助言をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：共同溝設計指針，1986.
- 2) 橋義規，大塚久哲，宮森保紀，矢野恵美子：応答変位法を用いた沈埋トンネル縦断方向の耐震設計における地盤変位の評価法および杭・継手・地盤剛性の影響に関する考察，構造工学論文集，Vol. 51A，pp. 549-559，2005. 3.
- 3) 西岡勉，運上茂樹：線状地中構造物における地震時の軸ひずみ伝達特性に関する研究，構造工学論文集，Vol. 49A，pp. 1199-1208，2003. 3.
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 耐震設計編，pp. 304-310，2002.

(2005. 3. 15 受付)

STUDY ON EVALUATION OF INTERACTION IN SEISMIC DESIGN FOR AXIAL DIRECTION OF IMMERSED TUNNELS

Yoshinori TACHIBANA, Hisanori OTSUKA, Aiko FURUKAWA, Emiko YANO

Evaluation method of interaction between structure and ground is an important subject in seismic design for long underground structures. Authors has been discussed the seismic displacement method in which input ground displacement is calculated by using free ground model. But, the method has the possibility to have difference between analyses and real behavior in the case where the ground is irregular or structures like shaft and joints are inserted in the tunnel. From this point of view, authors compared the results by the 3-D FEM analysis with those by the seismic displacement method, and investigated the modeling of structures and joints.