

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

A study on evaluation of ground displacement and effect of piles, joints and ground property in seismic design for axial direction of immersed tunnels by seismic displacement method

橘義規*, 大塚久哲**, 宮森保紀***, 矢野恵美子****

Yoshinori Tachibana, Hisanori Otsuka, Yasunori Miyamori, Emiko Yano

* (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)

** 工博 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)

*** 博(工) 北見工業大学助教授 土木開発工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町165)

**** 九州大学大学院 工学府建設システム工学専攻 修士課程 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

A part of connection between the shaft and the tunnel often becomes an important subject as for seismic design of immersed tunnels. In the present seismic displacement method, ground displacement is usually calculated by using FEM model for ground without tunnel and shaft. Therefore it has been pointed out that response of the structure may be estimated exactly. From this point of view, authors analyzed immersed tunnel using more accurate seismic displacement obtained by a proposed analytical method, and investigated the rational method obtaining ground displacement in seismic design. Furthermore, effect of piles, joints and ground property for response of the tunnel are clarified.

Key Words: Immersed tunnels, seismic displacement method, ground displacement evaluation, effect of shaft

キーワード: 沈埋トンネル, 応答変位法, 地盤変位評価法, 立坑の影響

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自由地盤の変位分布をトンネルに与える応答変位法を用いることが一般的である¹⁾。

沈埋トンネルは沈埋函を海底に沈めて連結して建設されるトンネルである。道路トンネルの場合は換気用立坑が設置される。沈埋トンネルは軟弱地盤上に建設される例が多い。また、地震や温度変化、不等沈下により過大な断面力が生じないように、通常は函体間及び立坑とトンネルの接合部に変形可能な可撓継手を設置する。

また、沈埋トンネルの縦断方向の耐震設計では、トンネルと立坑の振動特性の違いに起因する両者の接合部分の耐震性がしばしば問題となる。現行の応答変位法による設計では構造物の無い地盤のみを考慮したFEMモデルや質点モデルにより地盤変位を評価することが多く、立坑と地盤の

相互作用を考慮した例は少ない。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した地盤変位を設計に用いると過大となる可能性がある。

地中構造物縦断方向に関する最近の研究を挙げれば、例えば、渡辺・立石²⁾は大断面を有する地中構造物の地震時挙動について、応答変位法と動的FEMモデルとの比較を行い、地盤と構造物の剛性差が大きい場合には精度的な問題があるが応答変位法が有効であることを示した。運上ら³⁾は、地盤・構造物間の軸ひずみ伝達特性に関する研究を行い、はりばねモデルで考えられている継手による軸ひずみ伝達の低減効果が地震時の実挙動を正確に反映していない可能性を示し、応答変位法の適用性は必ずしも満足いくものではないことを指摘している。清宮ら⁴⁾は、質点モデルを用いた動的応答解析による沈埋トンネルの応答が実際の構造物の地震時挙動を反映していることを示し、動的解析の有用性を明らかにしている。

また、立坑を有する地中構造物に関して、高橋ら⁵⁾は立坑取付部における新たな免震構造の提案を行い、真柴ら⁶⁾はシールドトンネルの剛性評価及び立坑取付部の評価が可能なる簡易モデル化手法の提案とその有効性を確認している。

しかしながら、構造物の応答に及ぼす立坑や杭の影響について、地盤変位の評価の観点から十分に議論されているとはいえない。

本研究ではまず、応答変位法による沈埋トンネル縦断方向の耐震設計における合理的な地盤変位の与え方の知見を得るため、以下の解析を実施した。すなわち、地盤のみ及び地盤と立坑からなる3次元FEM動的解析からそれぞれ地盤変位を求め、これらの変位を、可撓継手を有し立坑と沈埋トンネルからなる弾性床上的のはりモデルに入力し、トンネルの応答に関して両者を比較した。これにより、地盤変位の評価に立坑を考慮すべきことを論じた。次いで、立坑を考慮した地盤変位を用いた応答変位法により立坑が杭支持されている場合やそうでない場合、可撓継手と地盤の剛性を変えた場合のトンネルの解析を行い、杭の存在や継手・地盤の剛性の違いがトンネルの応答にどのような影響を与えるかを調べ、設計上留意すべき点についてまとめた。

2. 解析手法

2.1 対象構造物

本研究で対象としている構造物は図-1のような立坑と沈埋トンネルからなる弾性床はりモデルである。想定しているトンネル断面は、図-2に示すような縦10m、横39.9mの4室の箱型断面である。

①トンネル軸方向、鉛直方向、水平直角方向周りの自由度を有する鉛直方向2次元モデルとする。

②地盤ばねはトンネル軸方向と鉛直方向の2方向を設置する。

③節点はトンネルが29節点、立坑が16節点とし、継手部は二重節点としている。

④トンネルの沈埋函は立坑に近接した3函体を考慮することとし、函体間にはトンネル軸方向、鉛直方向、水平直角方向周りにバネを有する可撓継手を設置する。

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asket継手である。

解析モデルにおける各要素の物性値を表-1に示す。継手ばねの軸方向ばね定数については、簡略化のため引張方向ばね定数を圧縮方向と同じとしている。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、静的強制変形と地盤反力の関係より算定した。立坑はトンネルと比較すると十分に剛であると考えられるため、剛体とする。

2.2 解析条件

本研究では、構造物とその周辺地盤を弾性床上的のはりにモデル化し、各時刻の地盤の地震時変位を地盤ばねを介して構造物に静的に作用させる応答変位法を採用している。解析モデルには表-2のような4ケースの地盤変位を入力する。この時、従来の自由地盤から地盤変位を算出する応答

表-1 構造モデルにおける物性値

トンネル	ヤング係数	$E=3.19 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$
	断面定数	$A=148 \text{ m}^2, I=2,260 \text{ m}^4$
継手ばね	軸方向	$5.6 \times 10^6 \text{ kN/m}$
	鉛直方向	$5.4 \times 10^7 \text{ kN/m}$
	水平直角軸まわり	$2.4 \times 10^8 \text{ kN} \cdot \text{m/rad}$
地盤ばね	軸方向	$3.9 \times 10^4 \text{ kN/m/m}$
	鉛直方向	$4.9 \times 10^5 \text{ kN/m/m}$

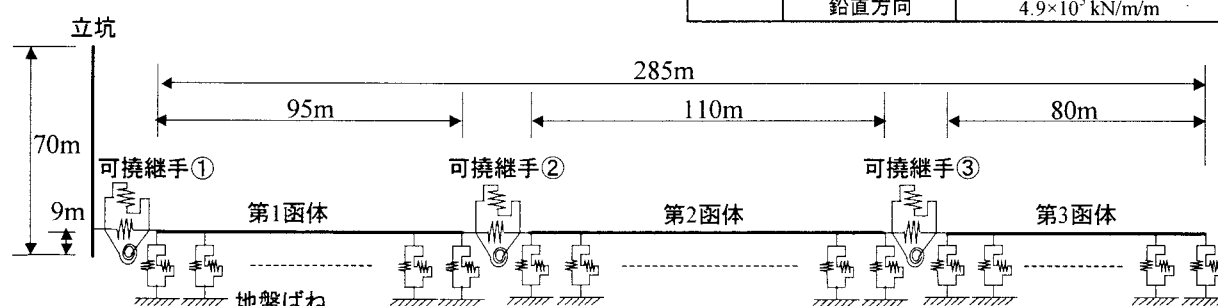


図-1 立坑・トンネルの構造モデル

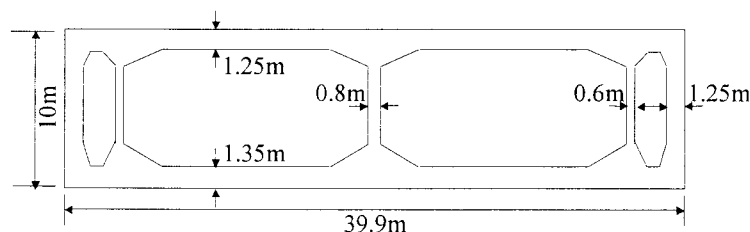


図-2 対象トンネル想定断面図

表-2 地盤変位の組み合わせ

	立坑に入力する強制変位		トンネルにばねを介して 入力する地盤変位
Case1	立坑あり・杭なしの解析結果	Case1-1	立坑なしの解析結果
		Case1-2	立坑あり・杭なしの解析結果
Case2	立坑あり・杭ありの解析結果	Case2-1	立坑なしの解析結果
		Case2-2	立坑あり・杭ありの解析結果

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。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-1の立坑に対しては強制変位として地盤ばねを介さずに直接、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。表-2に示すように、Case1とCase2では立坑における杭基礎の有無による差異を検討する。Case1-1とCase2-1は地盤のみで算定した地盤変位をトンネルに入力する現行の設計法の場合、Case1-2とCase2-2は立坑を考慮した地盤変位をトンネルに入力する場合である。これより立坑を考慮した地盤変位がトンネルの応答に与える影響を検討し、自由地盤で求めた地盤変位を入力する従来の方法と比較する。また、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っている。解析ステップは0.01秒刻みの3000ステップとし、変位の入力方向は軸方向と鉛直方向の同時入力である。

2.3 地盤変位解析

まず、図-3のような立坑と地盤からなる3次元FEMモデルに対して動的応答解析を行い、図-1のモデルに入力する

地盤変位を算定した⁷⁾。地盤の奥行きは、境界部の影響が立坑の挙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⁸⁾。杭先端は基盤面である。図-4に実際の解析で用いたFEMモデルの一例を示す。地盤は弾性とし、地盤の下端は固定、側方境界面については図-4に示すような境界条件とした。立坑は曲げ剛性が等価な充実断面としてモデル化した。表-3に立坑と地盤の諸元を示す。地盤定数を一様に $V_s=50\text{m/s}$ としているが、これは、本研究は立坑の有無が地盤変位に及ぼす影響を把握することを目的とした基礎的研究であるため、簡略的に地盤定数を一様にするものとし、さらに、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高く

表-3 地盤変位算出用解析モデル諸元

地盤定数		$\gamma_t=17\text{ kN/m}^3$, $V_s=50\text{ m/s}$
立坑 躯体 条件	躯体地上部	$\gamma=3.8\text{ kN/m}^3$, $E=5.4\times10^5\text{ kN/m}^2$
	躯体地中部	$\gamma=11\text{ kN/m}^3$, $E=1.7\times10^6\text{ kN/m}^2$
	杭	$\Phi=1500\text{mm}\times 225\text{ 本}$, $l=18\text{ m}$ $E=2.6\times10^7\text{ kN/m}^2$

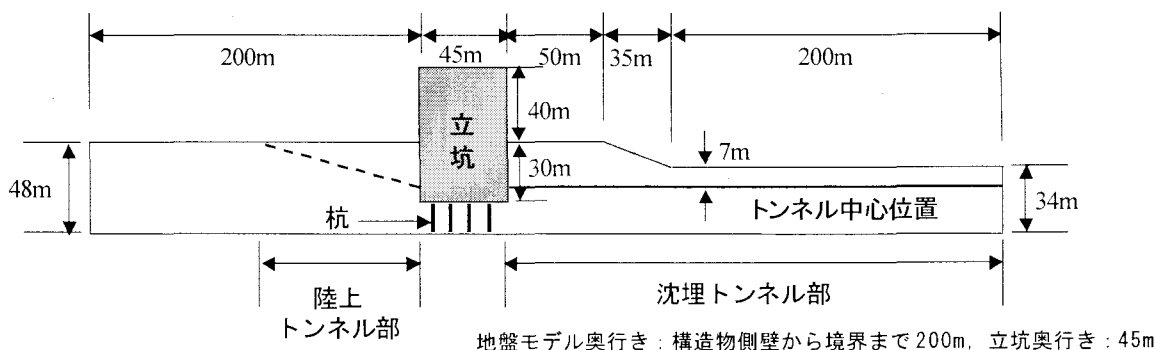


図-3 地盤変位算出用解析モデル

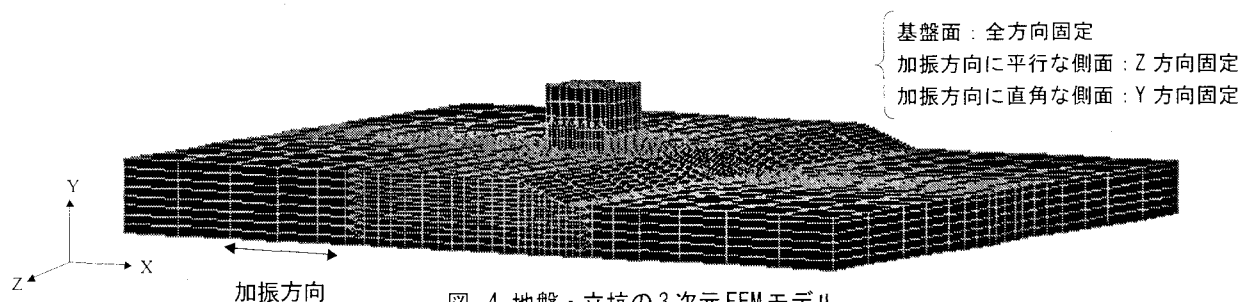
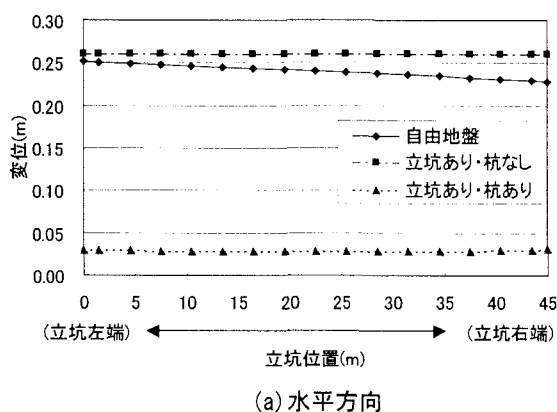
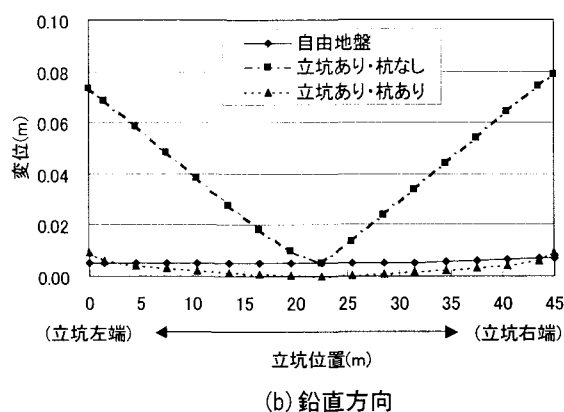


図-4 地盤・立坑の3次元FEMモデル



(a) 水平方向



(b) 鉛直方向

図-5 立坑の挙動に対する杭の影響

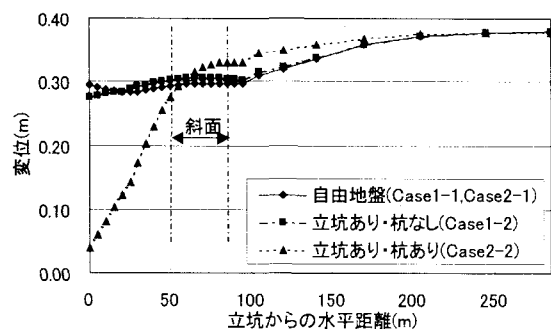
評価された⁷⁾ためである。解析はNewmarkの β 法($\beta=1/4$)による直接積分法で行った。入力地震波は標準地震波タイプII-I種地盤(Type211)⁹⁾を用いた。このときの加振方向はトンネル軸方向のみである。地盤変位は、自由地盤(立坑なし)、立坑あり・杭なし、立坑あり・杭ありの3ケースに対して構造物の水平方向変位と鉛直方向変位を算定した。ここで、地震時のせん断波速度が $V_s=50\text{m/s}$ 程度に低減するような軟弱地盤では、立坑は杭で支持されるのが一般的と考えられるが、前述のように相互作用の影響が最も大きくケースとして選定した。

初めに、図-5に示した立坑下端位置における立坑の水平及び鉛直方向の最大変位から、杭の存在により立坑の挙動がどの程度拘束されるかを検討する。同図より杭がない場

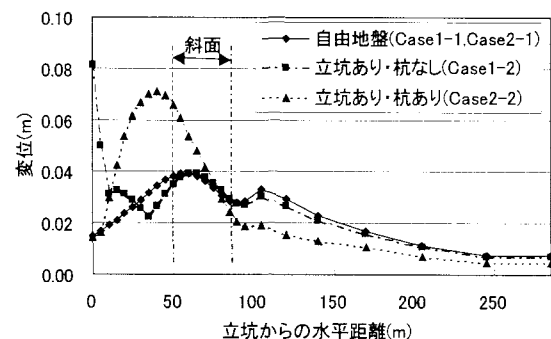
合の立坑の水平変位は地盤変位に追従しており、立坑がロッキング振動をすることで鉛直変位が生じていることが確認できる。杭がある場合は、水平変位、鉛直変位ともに小さくなり、立坑の変位は杭により大幅に低減されることがわかる。

次に、図-3において実線で示したトンネル中心深度における地盤変位の最大値分布を図-6に、地盤の最大軸ひずみを図-7に示す。ここに、横軸は立坑からの距離を示しており、0mが立坑とトンネルの接合部である。

図-6は(a)(b)共に、自由地盤と立坑あり・杭なしケースがほぼ同じ挙動をし、立坑あり・杭ありケースは他の2ケースと異なる傾向をとっている。例えば、図-6(a)のトンネル軸方向変位に関していえば、立坑との接合部では杭ありの水平変位が非常に小さく杭なしの場合の1/6程度となっている。つまり、立坑が杭で支持されていない場合は、立坑は地盤変形に追従し自由地盤とほぼ等しい変位分布になるが、立坑が杭で支持されている場合は、立坑が地盤変形に対して抵抗するため自由地盤と異なる変位分布になる。図-6(b)のトンネル鉛直方向変位に関しては、自由地盤の場合は、不整形地盤の影響を受ける斜面途中で最大値が生じているのに対し、立坑あり・杭なしの場合は、立坑のロッキングの影響を受けて立坑取付部において変位は最大となり、立坑・杭ありの場合は、杭支持された立坑が地盤の水



(a) トンネル軸方向



(b) トンネル鉛直方向

図-6 トンネル中心位置における地盤の最大変位

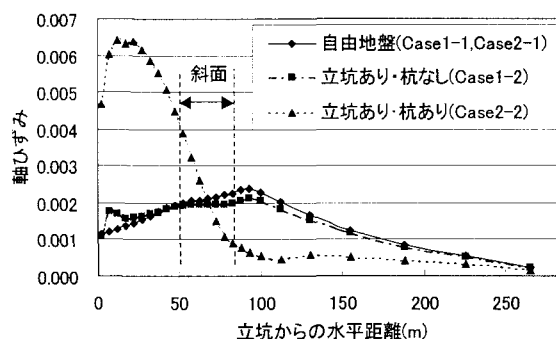


図-7 トンネル中心位置における地盤の最大軸ひずみ

平変位を拘束するため、斜面手前で大きな鉛直変位が発生する。

図-7の地盤の最大軸ひずみは図-6(a)と対応した結果になっている。自由地盤と立坑あり・杭なしの場合は不整形地盤の影響を受ける斜面先端で最大軸ひずみとなる。一方、立坑あり・杭ありの場合は、地盤条件の変化に起因する地盤変位の差よりも、杭による立坑および近傍地盤の水平変位拘束の影響が大きいため、地盤ひずみは立坑近傍で最大値をとり、立坑から離れると急に減少している。

3. 地盤変位評価法の比較

3.1 変位の比較

応答変位法の解析結果について、図-8にトンネル軸方向の最大応答変位を、図-9にトンネル鉛直方向の最大応答変位をそれぞれCase1とCase2にわけて示す。図-8(a)の縦軸は、変位分布をわかりやすくするために図-8(b)と異なるスケールとしている。横軸は立坑取付部からの水平距離である。

立坑が杭支持されていない場合について、図-8(a)に示すトンネル軸方向最大変位と図-9(a)に示すトンネル鉛直方向最大変位は共に、Case1-1とCase1-2ではほぼ等しい変位分布をしている。つまり、立坑が杭支持されていない場合は、立坑を考慮した地盤変位の影響は小さく、従来の入力方法

で安全側の評価ができるといえよう。

立坑が杭支持されている場合について、トンネル軸方向最大変位を図-8(b)より比較すると、Case2-1は、Case2-2に比べて2割程度大きく変形しており、従来の地盤変位をトンネルに入力すると、トンネルの応答変位は過大に算出される可能性がある。また、図-9(b)の鉛直方向最大変位に関しては、図-6(b)にあるように地盤変位を反映した応答分布となっている。Case2-1の最大応答変位はCase2-2の約1/2であり、従来の入力方法ではトンネルの変形量が過小評価される。したがって、立坑が杭支持されている場合には、トンネルに入力する地盤変位は立坑と杭の影響を考慮した地盤変位を用いる必要があると考えられる。

3.2 断面力の比較

トンネルに発生する最大断面力について、図-10に最大軸力、図-11に鉛直方向の最大曲げモーメントを示す。

軸力、曲げモーメント共に入力地盤変位を反映した応答分布であり、立坑近傍の函体で応答が大きく立坑から遠ざかるにつれて小さくなる。

まず、立坑が杭支持されていないCase1の場合について、軸力、曲げモーメント共にCase1-1とCase1-2ではほぼ等しい分布をしている。図-10(a)の軸力は図-7に示した地盤ひずみを反映しているが、地盤ひずみの最大値はちょうどトンネルの継手位置にあるため、軸力分布はなだらかである。

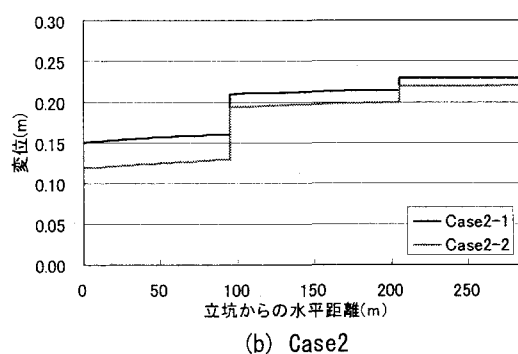
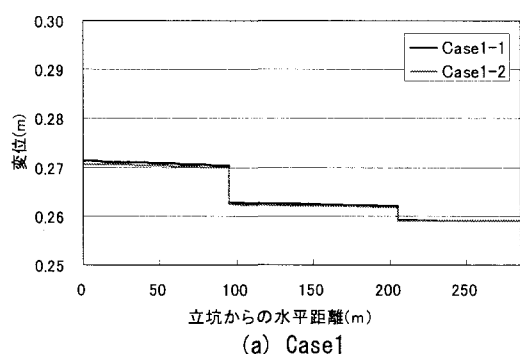


図-8 トンネル軸方向最大変位

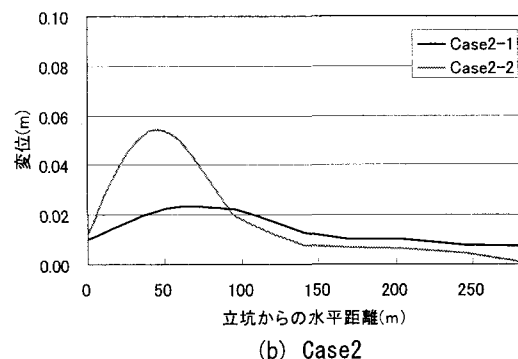
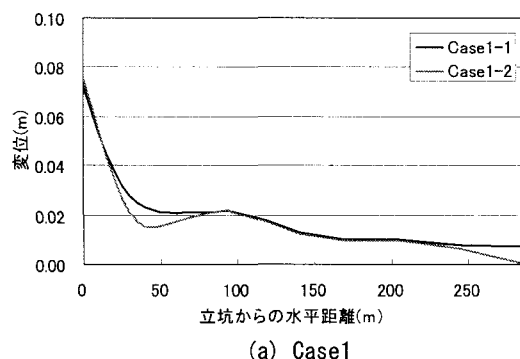


図-9 トンネル鉛直方向最大変位

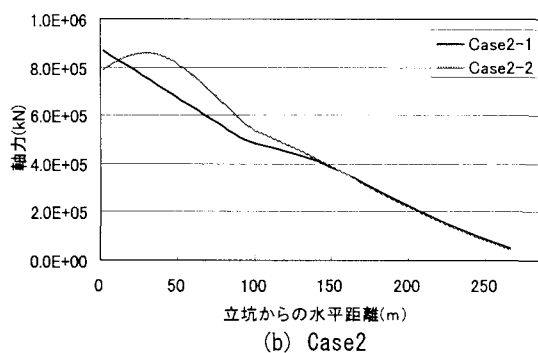
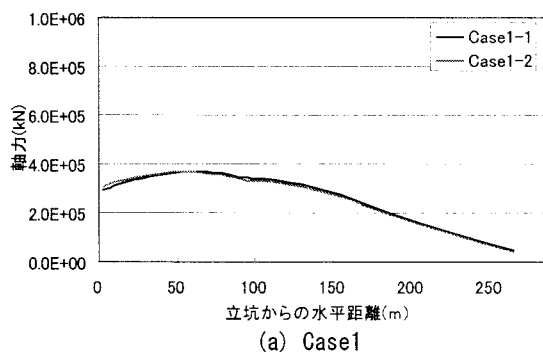


図-10 最大軸力

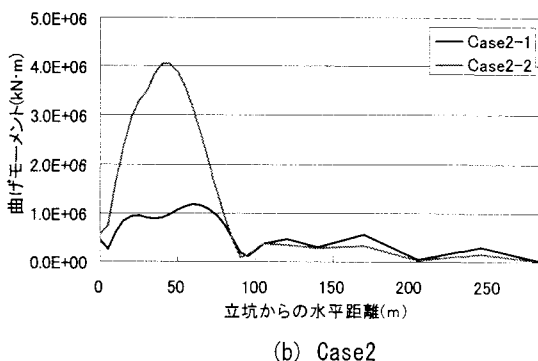
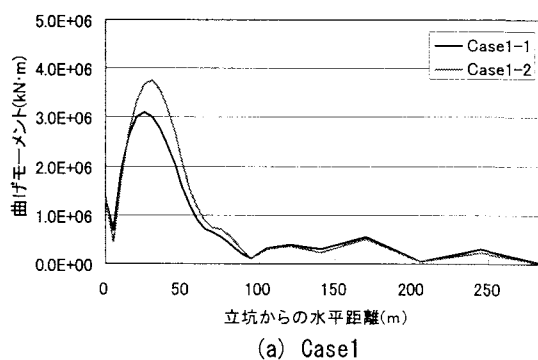


図-11 鉛直面内の最大曲げモーメント

図-11(a)の曲げモーメントについて、Case1-1の最大値はCase1-2の約0.8倍である。これは、杭基礎を有しない立坑のロッキング振動を受けて、鉛直方向の地盤変位が立坑を考慮しない場合と比べて大きく評価されるため、曲げモーメントの最大値が大きくなったものと考えられる。以上より、立坑が杭で支持されていない場合は、立坑を考慮しな

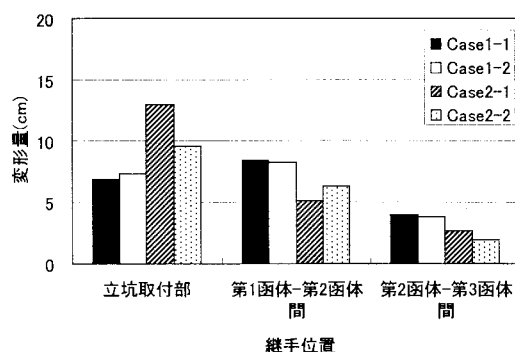


図-12 継手の最大伸び変形量

い従来の方法では曲げモーメントが過小評価されることが考えられる。

次に、立坑が杭支持されているCase2の場合について、図-10(b)によりCase2-1とCase2-2のトンネル全体の軸力分布を比較すると、図-7に示した地盤ひずみほど顕著な差は出ておらず、トンネルの剛性の高さが大きく寄与していると考えられる。つまり、トンネルに入力する地盤変位において立坑の有無が軸力に与える影響は小さいと考えられる。図-11(b)の曲げモーメントは、図-4(b)の入力変位の特徴が強く現れている。これは、立坑が杭で支持されて変形が拘束されるために、トンネルの応答は地盤変位の影響を大きく受けたと考えられる。具体的に最大値を比較すると、Case2-2はCase2-1の約3.5倍の大きさであり、実際の設計における必要鉄筋量は、鉄筋本数を同じとすると従来の入力方法の場合の約1.5倍の鉄筋径が必要となる。以上より、立坑が杭支持されている場合は、立坑を考慮した地盤変位を入力する必要がある。

3.3 継手の変形量の比較

本研究において、立坑取付部と函体間に設置した可撓継手は、引張力が作用した時の継手の変形に起因する止水性確保が問題となる。そこで、図-12に継手の最大伸び変形量を示し、各解析ケースについて継手の変形量の比較を行う。図-12において、Case1-1とCase1-2の函体間の継手変形量はほぼ等しい。立坑取付部ではCase1-2のほうが若干変形量大きいですが、立坑が杭支持されていない場合は、地盤変位算出における立坑考慮の有無の影響は継手の変形量に対しては小さいと考えられる。Case2について、Case2-1とCase2-2を比較すると、立坑とトンネルの接合部では、前者は後者の約1.4倍と過大評価される。一方、第1函体と第2函体間の継手の変形量では前者は後者の約0.8倍と過小評価されている。Case2-1はトンネルに入力する地盤変位と立坑に入力する立坑変位が別々の解析から得られたものを入力しているため、図-6(a)に示すように立坑取付部(水平距離0m)における立坑変位と地盤変位の差が大きくなり、立坑取付部の継手変形量が過大に評価されたと考えられる。

表-4 パラメトリック解析のケース

	地盤定数	可撓継手	継手剛性比
基本モデル	$V_s=50\text{m/s}$, $\gamma_t=1.7\text{tf/m}^3$	立坑取付部+函体間	1
モデル1	$V_s=100\text{m/s}$, $\gamma_t=1.8\text{tf/m}^3$	-	-
モデル2	$V_s=150\text{m/s}$, $\gamma_t=1.9\text{tf/m}^3$	-	-
モデル3	-	立坑取付部のみ	-
モデル4	-	なし	-
モデル5	-	-	0.5
モデル6	-	-	2

(－：基本モデルと同じパラメータ)

また、函体間継手に関しては、Case2-2は、図-7に示すように、水平距離95mまでの第1函体に生じた非常に大きな地盤ひずみを第1函体と第2函体間の継手で吸収するため継手の変形量が大きくなるが、従来の入力方法では自由地盤のひずみが支配的となるため、立坑を考慮したCase2-2の場合と比較して変形量が過小評価されたと考えられる。このように、自由地盤で求めた地盤変位を入力する従来の方法では、立坑取付部では継手の伸び変形量を過大に評価し、函体間継手の伸び変形量を過小に評価する可能性があることがわかる。

4. 地盤剛性と可撓継手の影響

4.1 検討ケース

前章において、地盤変位の入力方法の違いがトンネルの応答に与える影響を検討した。その結果、沈埋トンネル縦断方向の耐震性検討に際しては、地盤と立坑の相互作用を考慮した、より正確な地盤変位を入力する必要があることがわかった。

以上を踏まえて、本章では、立坑を考慮したより正確な地盤変位を入力する方法(Case1-2、Case2-2)を用いて、①可撓継手の断面力低減効果の程度と、②可撓継手と地盤の剛性の違いが、トンネルの応答に与える影響の程度とについて検討するために、表-4に示す計6ケースの解析を行う。基本モデルは、前章で実施した解析モデルである。モデル1とモデル2は地盤剛性を、モデル3とモデル4は可撓継手の有無を、モデル5とモデル6は継手ばね定数をパラメータとしている。表中の－は、基本モデルと同じパラメータであることを示している。また、表-5と表-6に各解析ケースの諸元を示す。なお、表-5における基本モデルの地盤ばね定数は、FEMモデルを用いた静的強制変形と地盤反力の関

表-5 地盤剛性考慮時の地盤ばね定数

	地盤定数	地盤ばね定数	
		軸方向(kN/m/m)	鉛直方向(kN/m/m)
基本モデル	$V_s=50\text{m/s}$ $\gamma_t=1.7\text{tf/m}^3$	3.9×10^4	4.9×10^5
モデル1	$V_s=100\text{m/s}$ $\gamma_t=1.8\text{tf/m}^3$	1.7×10^5	2.1×10^6
モデル2	$V_s=150\text{m/s}$ $\gamma_t=1.9\text{tf/m}^3$	3.9×10^5	4.9×10^6

表-6 継手剛性考慮時の継手ばね定数

	継手剛性比	継手ばね定数		
		軸方向(kN/m/m)	鉛直方向(kN/m/m)	水平直角軸回り(kN・m/rad)
基本モデル	1	5.6×10^6	5.4×10^7	2.4×10^8
モデル5	0.5	2.8×10^6	2.7×10^7	1.2×10^8
モデル6	2	1.1×10^7	1.1×10^8	4.8×10^9

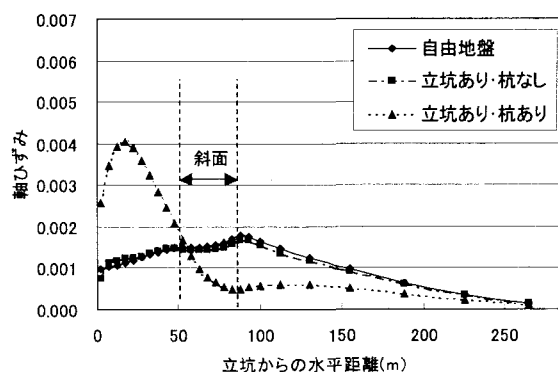
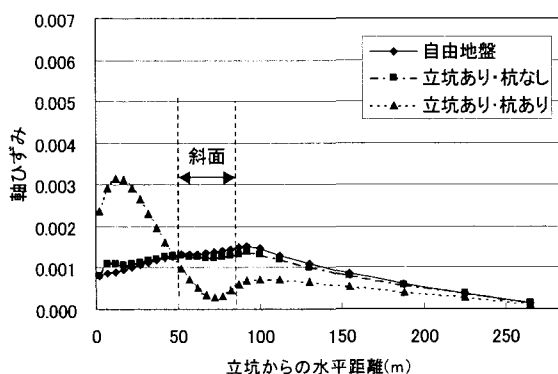
(a) モデル1 ($V_s=100\text{m/s}$)(b) モデル2 ($V_s=150\text{m/s}$)

図-13 トンネル中心位置における地盤の最大軸ひずみの比較

係より算定し、モデル1とモデル2は、地盤のせん断弾性係数に比例させて算定した。

4.2 地盤剛性の影響

(1) 地盤変位の比較

トンネルに入力する地盤変位が、地盤剛性の変化の影響をどの程度受けるのかを把握するために、図-13にモデル1($V_s=100\text{m/s}$)とモデル2($V_s=150\text{m/s}$)の場合のトンネル中心

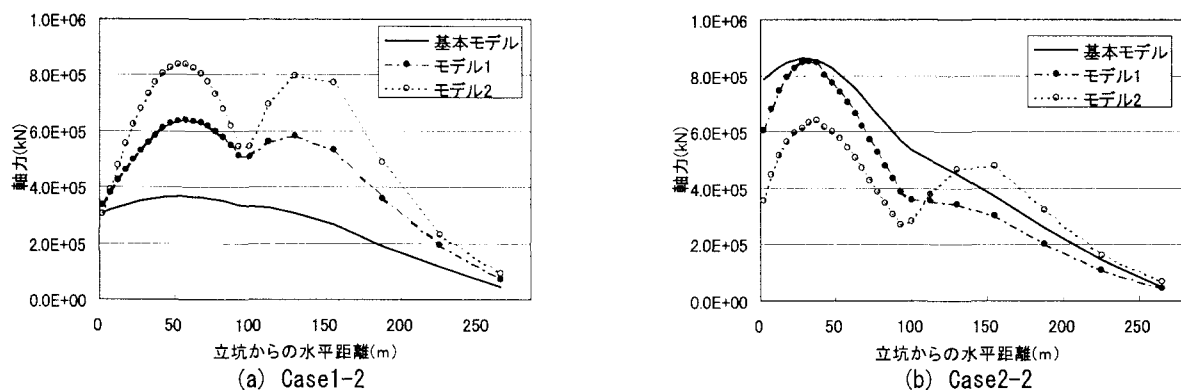


図-14 地盤剛性の変化に伴う最大軸力の推移

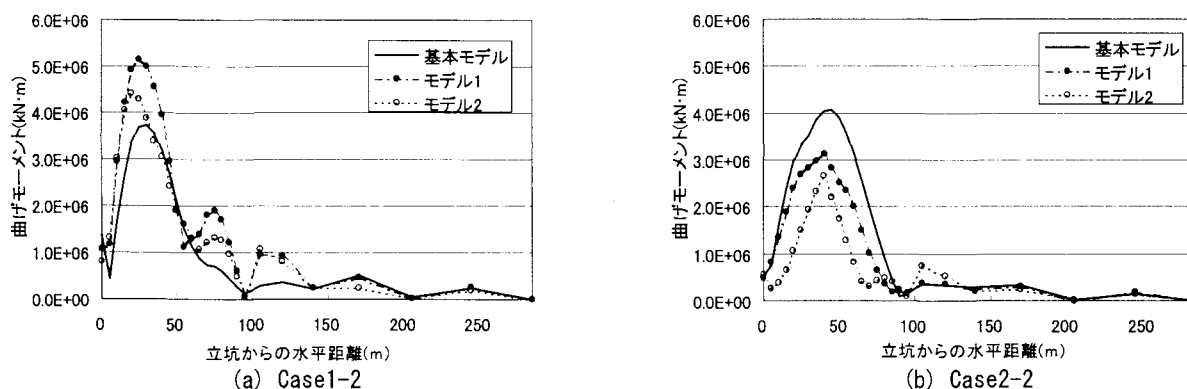


図-15 地盤剛性の変化に伴う鉛直面内の最大曲げモーメントの推移

位置における地盤の最大軸ひずみ分布を示し、図-7に示した基本モデルである $V_s=50\text{m/s}$ の場合の地盤の最大軸ひずみと比較する。

前述のとおり、杭支持されていない立坑は地盤の挙動に支配されるため、自由地盤と立坑あり・杭なしの場合の地盤ひずみは地盤剛性の増加と共に小さくなる。また、立坑が杭支持されている場合も、地盤剛性が大きくなるにつれ、地盤ひずみが小さくなっているが、この場合の軸ひずみの分布が他のケースと異なっている傾向は変わらない。

(2) トンネルの応答の比較

地盤剛性がトンネルの応答に及ぼす影響を検討するために、図-14に最大軸力分布を、図-15に鉛直方向の最大曲げモーメント分布をCase1-2とCase2-2にわけて示す。立坑が杭支持されていない場合(Case1-2)は、地盤剛性の増加に伴って地盤ひずみは小さくなるが、軸力(図-14(a))と曲げモーメント(図-15(a))は大きくなる傾向にある。このような応答は、地盤剛性が大きくなると地盤変位は減少するが、地盤ばね定数は増大し、トンネルに対する地盤変位の伝達率が大きくなるため、入力地盤変位とこれをトンネルに伝達する地盤ばね定数が相互に影響を及ぼし合った結果と考えられる。また、図には示していないが、従来の地盤変位評価法による結果も同様の傾向を示す。ただし、各地盤剛

性における曲げモーメントの最大値は、図-11(a)と同様に従来の入力方法では過小評価される。

一方、立坑が杭支持されている場合(Case2-2)は、地盤剛性が大きくなるにつれて、地盤ひずみと同様に軸力(図-14(b))と曲げモーメント(図-15(b))は小さくなり、トンネルに入力する地盤変位の影響を大きく受けている。また、図には示していないが、従来の地盤変位評価法では、軸力は地盤剛性が大きくなるにつれて過大評価されるが、曲げモーメントはいずれの地盤剛性においても過小評価される。

以上の比較から、トンネルの地震応答解析では、杭の存在によってトンネルの応答に対する地盤ばね定数の影響が異なることが知られた。また、従来の入力方法では、必ずしも安全側の評価ができるとは限らないこともわかった。

4.3 可撓継手の効果の検討

可撓継手の断面力低減効果の程度を把握するため、継手の有無と継手剛性に着目した最大軸力分布を図-16に、最大曲げモーメント分布を図-17に示す。

まず可撓継手の有無について考察する。基本モデルと立坑取付部のみ継手を有するモデル3を比較すると、図-16の軸力では後者は前者の約1.5倍、図-17の曲げモーメントではほぼ等しい大きさとなっている。一方、モデル3と全継手を剛結としたモデル4を比較すると、図-16の軸力で

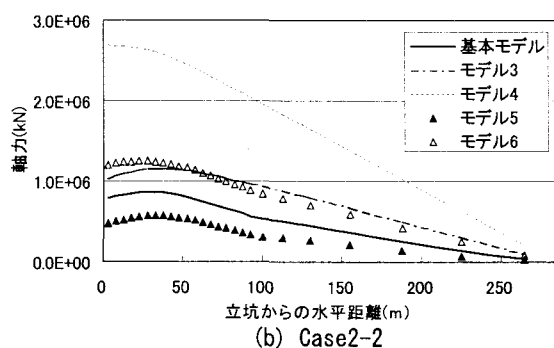
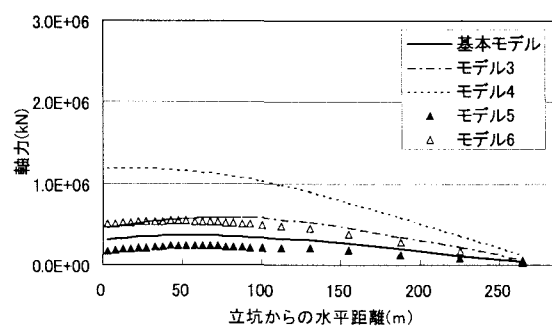


図-16 継手の有無と継手剛性に着目した最大軸力の推移

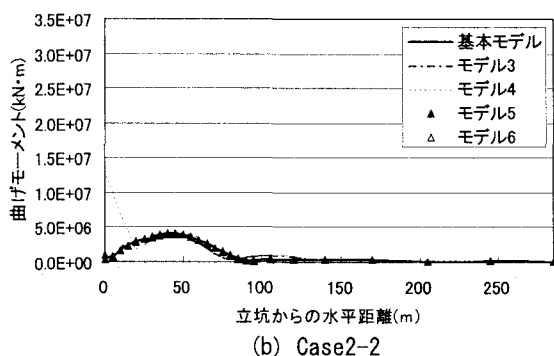
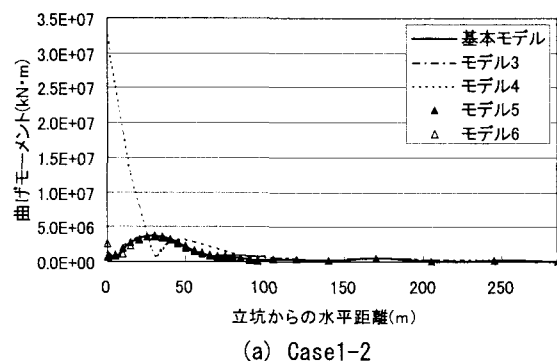


図-17 継手の有無と継手剛性に着目した鉛直面内の最大曲げモーメントの推移

は後者は前者の約2倍、図-17の曲げモーメントでは後者は前者の3～9倍の大きさとなる。これより、可撓継手によって断面力が低減され、特に立坑とトンネルの接合部での可撓継手の効果が非常に高いことがわかる。

次に、継手剛性について考察する。図-16の軸力では、継手の剛性の違いによる断面力低減効果の差異が顕著である。

表-7 地盤剛性に関する継手効果の検討ケース

	地盤定数	可撓継手	継手剛性比
基本モデル	$V_s=50\text{m/s}$, $\gamma t=1.7\text{tf/m}^3$	立坑取付部+函体間	1
モデル3		立坑取付部のみ	
モデル4		なし	
モデル1	$V_s=100\text{m/s}$, $\gamma t=1.8\text{tf/m}^3$	立坑取付部+函体間	
モデル7		立坑取付部のみ	
モデル8		なし	
モデル2	$V_s=150\text{m/s}$, $\gamma t=1.9\text{tf/m}^3$	立坑取付部+函体間	1
モデル9		立坑取付部のみ	
モデル10		なし	

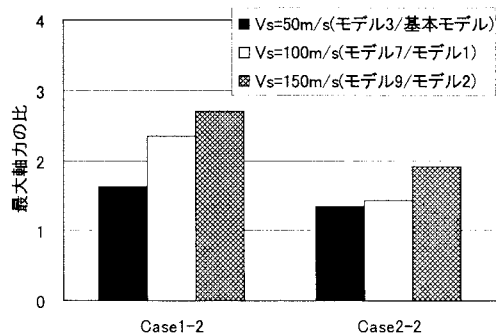
具体的に基本モデルとモデル5を比較すると、継手剛性が1/2減少すると軸力は立坑の支持条件に関係なく約1/3低減されている。また、継手剛性を大きくしたモデル6は、基本モデルに比し明らかに応答が大きくなっていることがわかる。一方、図-17の曲げモーメントについては、立坑のごく近傍において継手剛性が1/2減少すると曲げモーメントは1割程度低減されるが、それ以外の部分では継手剛性の違いがトンネルの曲げモーメントに及ぼす影響はほとんどないといえる。この傾向は、従来の地盤変位評価法の場合でも同様であるが、立坑取付部において入力方法の違いが現れ、立坑を考慮した場合と比べて過小評価される。

以上より、トンネル軸方向と鉛直方向で継手の断面力低減効果の程度に差異があることがわかる。これは、図-6(a)(b)に示すように地震時の地盤の挙動は、トンネル軸方向は全体的に大きく変形しているが、鉛直方向は立坑近傍で局地的な変形をするためと考えられる。

したがって、継手の有無とその設置位置や剛性に関しては、継手設置の目的にあった合理的な組合せを充分検討することが肝要である。

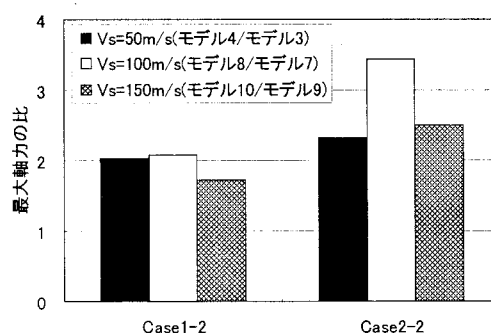
4.4 継手の効果に及ぼす地盤剛性の影響

前節では、基本的な可撓継手の効果を把握するために、地盤剛性を $V_s=50\text{m/s}$ に固定して検討を行った。ところで、図-14に示した地盤剛性を変化させた場合の最大軸力分布において、 $V_s=50\text{m/s}$ (基本モデル)の場合はトンネル全体でなだらかな応答をしているが、 $V_s=100\text{m/s}$ (モデル2)や $V_s=150\text{m/s}$ (モデル3)の場合には、第1函体と第2函体間の継手部(水平距離95m)近傍で明らかに軸力が低減していることが確認できる。 $V_s=50\text{m/s}$ は軟弱地盤であるため構造物の挙動に対して地盤の拘束が小さい。したがって地震時に構



(a) 函体間継手の効果の比較

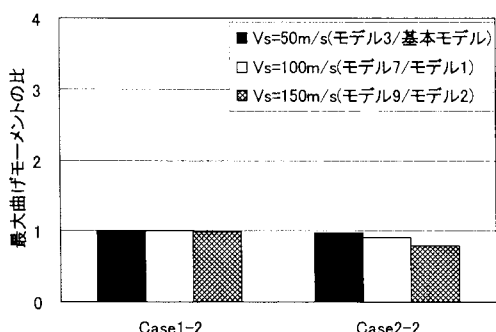
(=立坑取付部のみ継手あり / 立坑取付部と函体間に継手あり)



(b) 立坑取付部の継手の効果の比較

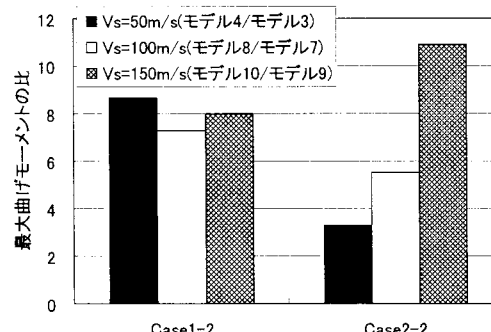
(=継手なし / 立坑取付部のみ継手あり)

図-18 軸力に対する継手効果の比較



(a) 函体間継手の効果の比較

(=立坑取付部のみ継手あり / 立坑取付部と函体間に継手あり)



(b) 立坑取付部の継手の効果の比較

(=継手なし / 立坑取付部のみ継手あり)

図-19 鉛直方向曲げモーメントに対する継手効果の比較

造物自体が大きく変形して、軸力は全体的に小さくなだらかな応答になったと考えられる。また、地盤剛性が大きくなるにつれて地盤の拘束が強くなるため発生断面力は大きくなるが、継手により断面力が低減されていることも確認できる。すなわち、地震時の断面力低減効果に対して可撓継手と地盤の両方が影響を及ぼしており、地盤が堅固になるにつれて継手の効果が大きくなると予想される。

以上より、地盤剛性の変化に対して継手の効果がどのような影響を受けるかを把握するために、表-7のような9ケースについて比較を行った。表中の基本モデルとモデル1からモデル4は表-4に対応している。入力地盤変位は立坑を考慮したCase1-2とCase2-2である。

図-18に軸力に対する継手効果の比較を、図-19に鉛直面内曲げモーメントに対する継手効果の比較を地盤剛性別に示す。各図の(a)は「立坑取付部のみ継手あり」ケースと「立坑取付部と函体間に継手あり」ケースの最大断面力の比により函体間継手の効果を比較しており、(b)は「継手なし」ケースと「立坑取付部のみ継手あり」ケースの比により立坑取付部の継手の効果を比較している。

まず、函体間継手について、図-18(a)と図-19(a)を比較すると、トンネルの軸力に関しては、地盤が堅固になるにつれて函体間継手の効果が大きくなることが確認できるが、

トンネルの鉛直面内曲げモーメントに関しては、地盤の剛性に関係なく函体間継手の効果は非常に小さい。これは、前節で述べたように鉛直方向に対するトンネルの変形は立坑近傍のみの局所的なものであり、その傾向は地盤剛性に関わらず同様であるためと考えられる。

次に、立坑取付部の継手について、図-18(b)と図-19(b)を比較すると、杭の有無により継手の効果の程度が異なることがわかる。立坑が杭支持されていない場合(Case1-2)は、地盤剛性が変化しても継手の効果はほぼ同じである。一方、立坑が杭支持されている場合(Case2-2)は、函体間継手と同様に地盤剛性の増加に伴い継手の効果が大きくなっている。ただし、図-18(b)の $V_s=100\text{m/s}$ の場合に最も継手の効果が現れており、前述の通り、軸力に対しては地盤剛性の影響は単純ではない。これに関しては、地盤剛性と地盤変形量、地盤ひずみの伝達率の関係が関与しており、より詳しいメカニズムの解明が必要であろう。

以上より、軸力に対する函体間継手と鉛直面内曲げモーメント(杭ありの場合のみ)に対する立坑取付部の継手効果は、地盤が堅固になるほど大きくなることが確認できた。しかし、鉛直面内の曲げモーメントに対する函体間継手と杭なしの場合の軸力及び曲げモーメントに対する立坑取付部の継手の効果には地盤の剛性の影響が小さい。すなわ

ち、トンネルの軸力と鉛直面内の曲げモーメントに対する継手の効果は、立坑の支持条件や地盤剛性と地盤ひずみの伝達率の関係によって差異が生じるため、可撓継手の合理的な組合せを考慮した設計が必要である。

5. 結論

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。

(1) 立坑が杭支持されていない場合は、立坑は地盤に追従して動くので、トンネルの水平挙動や継手変形量に対する地盤変位評価法の違いの影響は小さい。しかし、立坑のロッキング振動の影響で地盤の鉛直変位が生じるため、鉛直方向の応答に地盤変位評価法の違いが現れ、従来の入力方法では立坑を考慮した解析と比べてトンネルの発生断面力が過小に評価される。

一方、立坑が杭支持されている場合は、立坑自身があまり変位しないため、近傍の地盤の水平変位も小さくなる。このため、従来の入力方法ではトンネルの軸力、継手変形量が過大に評価される。鉛直方向の応答については、立坑の影響を受けて近傍地盤に鉛直方向の地盤変位が生じるためトンネルに大きな曲げが生じる。

このように、地盤変位の評価法の違いによりトンネルに生じる断面力は大きく異なるため、トンネルに対して地盤と構造物の相互作用を考慮したより正確な地盤変位を入力する必要がある。

(2) 地盤の剛性が大きくなるにつれて、立坑が杭支持されていない場合のトンネルの断面力は大きくなるが、杭支持されている場合は反対に小さくなる。さらに、入力地盤変位の大きさとこれをトンネルに伝達する地盤ばね定数の大きさが影響を及ぼし合い、地盤剛性の変化とトンネルに発生する各断面力の変化の傾向と度合いが異なることが知られた。

したがって、トンネルの応答に対しては、立坑が杭支持されているか否かによって地盤ばね定数の影響が異なることに留意して設計する必要がある。

(3) 立坑取付部と函体間に可撓継手を設けた場合に、トンネル軸方向の応答に対しては全ての可撓継手が断面力の低減効果を有し、さらに、継手の剛性の違いにより効果に差が生じた。一方、トンネル鉛直面内の曲げに対しては、立

坑取付部の可撓継手の効果は顕著であるが、函体間の継手の効果は非常に小さいこと、継手の剛性がトンネルの応答に及ぼす影響は立坑のごく近傍を除いてほとんど見られないことから、立坑取付部の継手の重要性が認識できた。また、地盤剛性の増加に伴い継手の効果は一般に大きくなるが、立坑の支持条件や地盤ばね定数の影響を受けて、その傾向は必ずしも一定のものではない。したがって、周辺地盤の状態に応じて特に立坑取付部の継手の効果を考慮に入れて、可撓継手の設置位置や剛性の組み合わせを決定することが肝要である。

なお、より厳密な解析手法として3次元FEMを用いて地盤、立坑、トンネルを同時にモデル化して非線形時刻歴応答解析を行うことが考えられるが、これについては今後の課題としたい。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：共同溝設計指針，1986.
- 2) 渡辺和明，立石章：大断面を有する地中構造物縦断方向の耐震計算法に関する研究，土木学会地震工学論文集，Vol. 27，2003.
- 3) 西岡勉，運上茂樹：線状地中構造物の地震時の軸ひずみ伝達特性に及ぼす継手の影響，土木学会地震工学論文集，Vol. 27，2003.
- 4) 清宮理，小泉勝彦，橘義規，塚田あゆみ：兵庫県南部地震における沈埋トンネルの動的挙動に関する考察，第24回地震工学研究発表会講演論文集，pp. 833-836，1997.
- 5) 高橋直樹，荒木茂，水野勇一，渡邊哲也，山内智晴：立坑とシールドトンネルの免震継手の開発，土木学会地震工学論文集，Vol. 27，2003.
- 6) 真柴浩，山本平，服部佳文，立石章：シールドトンネル縦断方向の耐震検討モデル化手法に関する一提案，第58回年次学術講演会講演概要集，pp. 367-368，2003.
- 7) 橘義規，大塚久哲，吉村茂：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，土木学会地震工学論文集，Vol. 27，2003.
- 8) (社)日本道路協会：駐車場設計・施工指針 同解説，1992.
- 9) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，pp. 304-310，2002.

(2004年9月17日 受付)