

シールドトンネルの軸ひずみ伝達率に関する 応答変位法と F E M 解析の比較

鈴木 猛康¹

¹山梨大学大学院医学工学総合研究部
(〒400-8511 山梨県甲府市武田4-3-11)
E-mail:takeyasu@yamanashi.ac.jp

地下構造物の縦断方向の耐震設計に用いられている応答変位法は、簡便かつ合理的であるため、多くの耐震設計指針に採用されている。しかし、応答変位法は、線状地下構造物を梁と仮定しているため、断面の大きな地下構造物の寸法効果を再現することはできない。そこで、線状地下構造物に対する応答変位法の適用性を検討するため、本論文では、比較的外径の大きな共同溝、上下水道、大口径道路トンネルという3タイプのトンネルを対象とし、トンネルの軸方向地震時挙動に関する応答変位法とFEM解析の比較を行っている。軸ひずみ伝達率を指標として、両者の解析結果を比較し、応答変位法の適用性について、定量的な評価を行っている。

Key Words : Seismic displacement method, shield-driven tunnel, finite element analysis, axial strain, seismic design

1. はじめに

地下構造物の長手方向の耐震設計では、弾性床上の梁理論に基づいた応答変位法が採用されてきた。本手法は簡便かつ実用性に優れているものの、構造物の剛性効果は考慮できても寸法効果は考慮できないという欠点を有している。したがって、構造物の大型化が著しい現状では、その構造条件、地盤条件、ならびに地震動の波長等の荷重条件下における応答変位法の適用性について、検討が必要である。また、同様な検討は、耐震設計における応答変位法を用いた線状地下構造物の簡易的な耐震検討のみならず、梁ばねモデルを用いた線状地下構造物の地震応答解析でも必要と言える。

そこで本研究では、応答変位法の適用性を具体的かつ定量的に示すことを目的として、外径の異なる比較的大型の3種類のシールドトンネルを対象とし、地盤からトンネルへの軸ひずみ伝達率に着目して軸対称 FEM モデル（解析コード EASIT^{1) 2)}）を用いた数値解析（数値解）と応答変位法、すなわち弾性床上の梁に基づいた解析解の比較を行う^{3), 4), 5)}。図-1 に本研究のフローを示す。本論文では、まず数値解析と解析解の比較検討結果についてまとめ、軸ひずみ伝達率を指標として応答変位法の適用性に関する基本的傾向を示す。次に、解析ケースを追加した上で、応答変位法と軸対称 FEM 解析による軸ひず

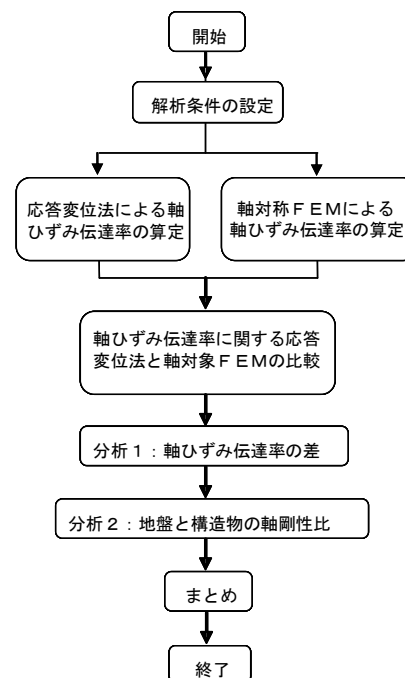


図-1 本研究のフロー

み伝達率の差ならびに地盤に対する構造物の等価剛性比を指標として、応答変位法の適用性について具体的かつ定量的な評価を行った結果を報告する。

2. 応答変位法の適用性に関する基本的傾向

(1) 解析条件

本研究の検討対象としては、比較的大型かつ代表的なシールドトンネルを選定する必要がある。そのため、表-1 に示すように、材質、外径の異なる鋼製セグメントの上水道トンネル、RCセグメントの共同溝トンネル、ならびにRCセグメントの大断面道路トンネルの3種類のシールドトンネルを対象構造物として選定した。トンネルの土被りは、1.5～2D（D：外径）程度とした。図-2 に共同溝トンネル、図-3 に大断面道路トンネルの断面ならびに設置条件を示す。なお、上水道トンネルは外径 2.75m、厚み 125mm、土被り 5.5m とした。

地盤の物性値は、軟弱地盤と軟質地盤の代表例としてそれぞれヤング率 $E=200\text{kN/m}^2$ 、 $E=600\text{kN/m}^2$ 、を、硬質地盤の代表例としてヤング率 $E=3000\text{kN/m}^2$ を設定したが、本研究においてはさらに地盤のヤング率をパラメータとした解析も行う。なお、地盤のポアソン比は $\nu=0.49$ で一定とした。

(2) 解析方法

耐震解析には軸対称 FEM モデルを用いたトンネルの耐震解析コード EASIT^{1),2)}を用いた。一様地盤中のトンネルを想定し、図-4 に示すようにトンネル長手方向に 1.5 波長分の地盤慣性力を静的に作用させ、セグメントの軸ひずみを算定した。ここで、波長は解析の目的に応じて数ケース設定することとした。得られたセグメント軸ひずみ ε_{seg} に対して、地盤モデルのみに同様な地盤慣性力を与えて得られるトンネル深さ位置の地盤軸ひずみ ε_{gr} を求め、(1)式で与えるこれらの比を EASIT を用いた数値解析によるひずみ伝達率 r_{num} （数値解）と定義することとした。一方、弾性床土の梁に基づく地盤からトンネルへの軸ひずみ伝達率 r_{bef} （解析解）は(2)式で与えられる。ここで L は波長であり、 λ は K_x を軸方向剛性係数、 EA をトンネルの軸剛性として(3)式で与えられる。

$$r_{\text{num}} = \varepsilon_{\text{seg}} / \varepsilon_{\text{gr}} \quad \dots (1)$$

$$r_{\text{ana}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{2\pi}{\lambda L} \right)^2} \quad \dots (2)$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{K_x}{EA}} \quad \dots (3)$$

3 種類のシールドトンネルに対して、地震時の圧縮変形時ならびに引張変形時における地盤からトンネルへの軸ひずみ伝達率（以後、軸ひずみ伝達率と呼ぶ）を検討する。応答変位法では引張変形時には EA を等価引張剛性で与えることになるので、EASIT でもとくにリング継手要素の分割は行わず、セグメントは等価引張剛性に相当するヤング率を有する要素としてモデル化した。なお、等価引張剛性

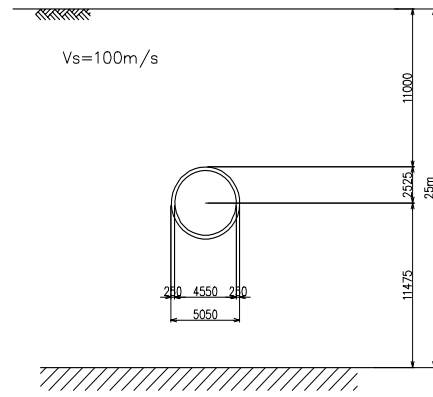


図-2 共同溝シールドトンネル

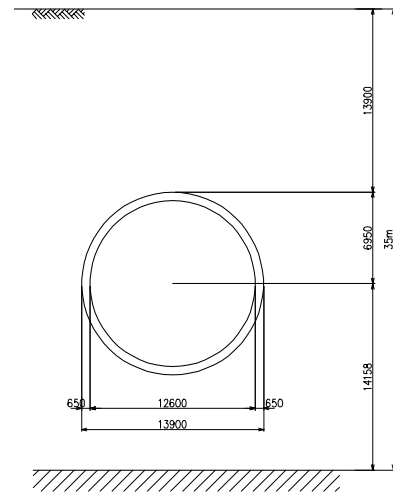


図-3 大断面道路シールドトンネル

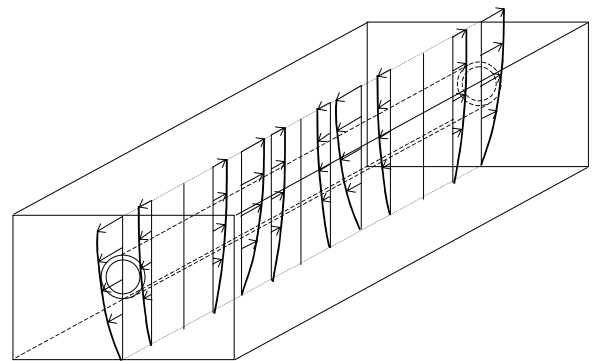


図-4 地盤慣性力の載荷方法

表-1 解析ケース 1

項目	種類	内容
地盤のヤング率	3	200(軟弱), 600,3000(硬質) (kN/m ²)
シールドトンネル	3	外径 2.75m の鋼製, 5.05, 13.9m の RC 製セグメント
トンネル剛性	2	圧縮剛性, 等価引張剛性
地盤変位の波長	8	50, 100, 300, 500, 1000, 3000, 5000, 10000m

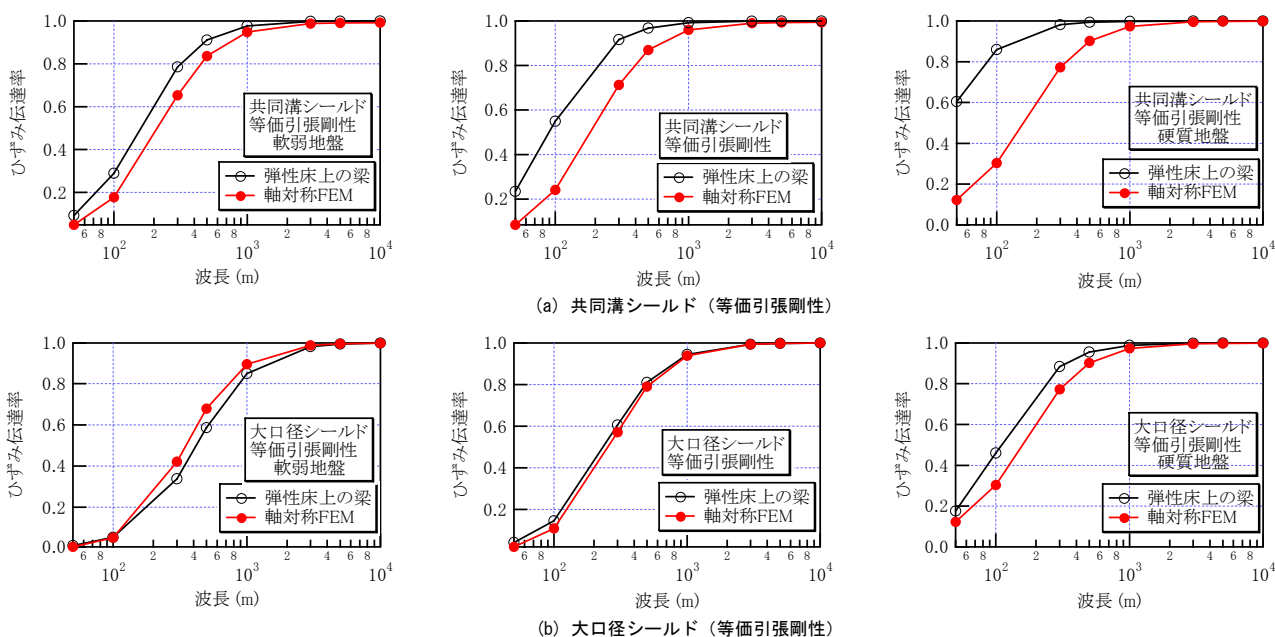


図-5 波長とひずみ伝達率の関係に関する解析解と数値解析 (EASIT) の比較 (その 1 : 等価引張剛性のケース)

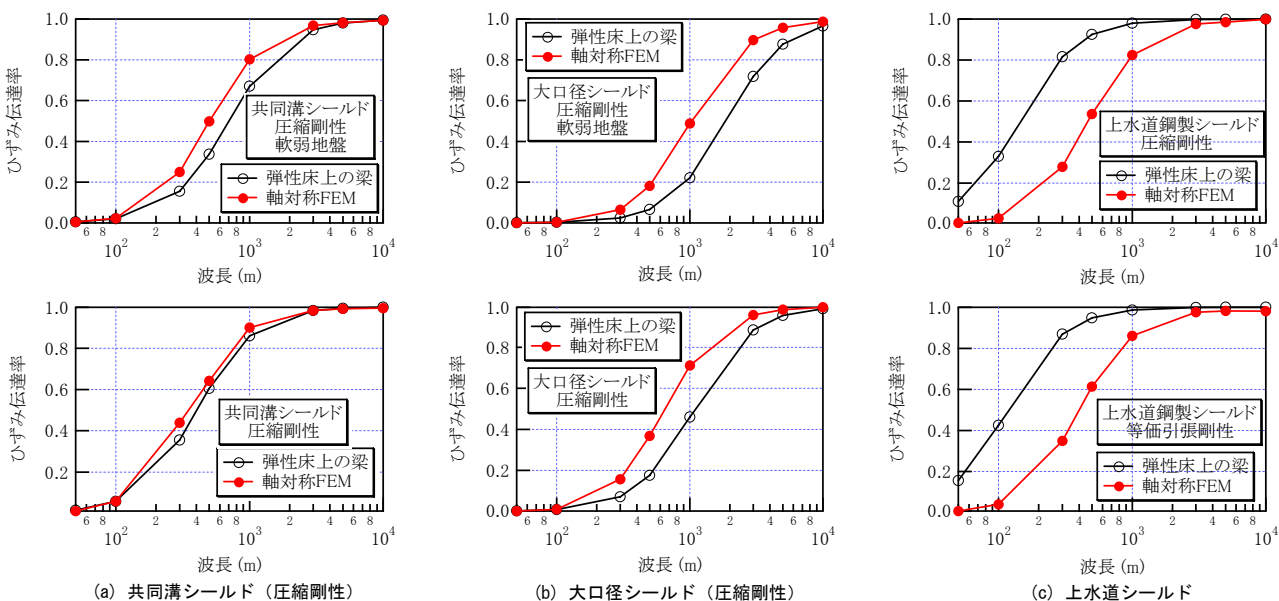


図-6 波長とひずみ伝達率の関係に関する解析解と数値解析 (EASIT) の比較 (その 2)

については、コンクリートセグメントの場合は圧縮剛性の 1/20 を、鋼製セグメントの場合は 1/2 を目安とするが、引張剛性をパラメータとする解析も行う。

(3) トンネル外径と材質の影響³⁾

表-1 に示す解析ケースについて、(1)式で与えるトンネル軸ひずみ伝達率に関する EASIT による数値解と(2)式で与える弾性床上の梁の解析解との比較を、図-5、図-6 にまとめた。地盤は軟弱、軟質、硬質の 3 種類、シールドトンネルは前述の 3 種類である。なお、軟質地盤のケースについては、とくに凡例では記述していない。共同溝トンネルを対象とし、等価引張剛性を想定してセグメントのヤング率をコンクリートの 1/20 に設定した図-5 上段のケースでは、すべての地盤ケースで数値解は解析解を下

回っており、その差は硬質地盤で、かつ波長が短いとき顕著であることがわかる。大口径道路トンネルでは両者の差はさほど顕著ではないが、傾向は共同溝と同様である。圧縮剛性を用いたケースでは、共同溝、大口径道路トンネルともに、地盤剛性の相違による軸ひずみ伝達率の差は顕著ではない(図-6)。また、上水道トンネル(鋼製)では解析解と数値解の相違が極めて顕著である。以上のように、地盤変位の波長の比較的短い範囲では、トンネル外径、トンネル剛性、ならびに地盤剛性により、応答変位法の解析解が数値解析の差が大きいことがわかった。

(4) トンネルの剛性の影響⁴⁾

外径 5.05 m の共同溝クラスの RC セグメント製シールドトンネルを検討対象として、トンネル剛性が

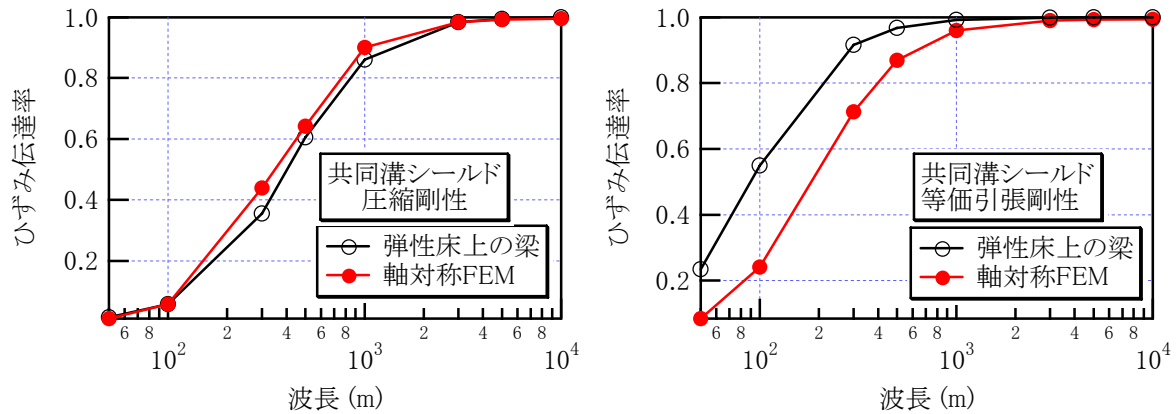


図-7 軸ひずみ伝達率と波長の関係

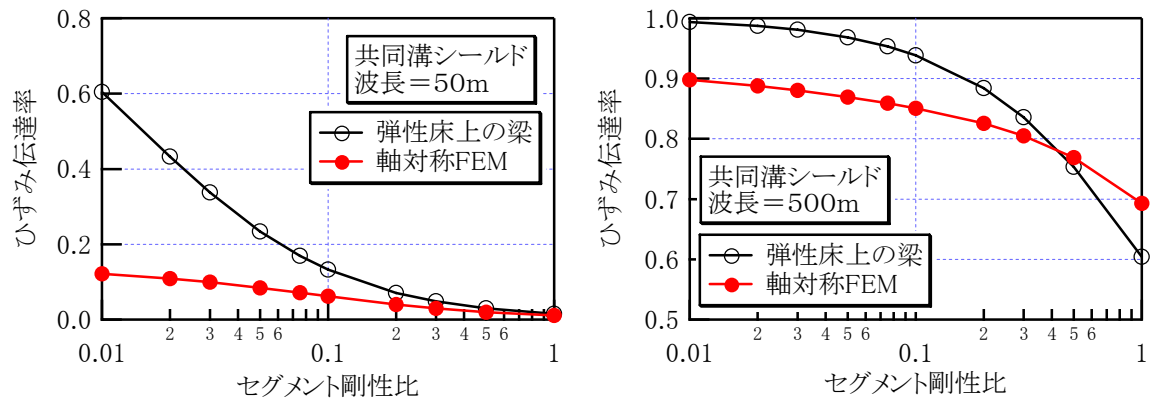


図-8 軸ひずみ伝達率とセグメント剛性の関係

軸ひずみ伝達率に与える影響について検討した。解析ケースを表-2 に示す。ここでは、セグメントのヤング率をコンクリートのヤング率の 1 倍～1/100 倍まで変化させ、10 種類の軸剛性のトンネルについて検討した。

図-7 は圧縮剛性としてセグメントにコンクリートのヤング率をセグメントに与えた解析ケースと、等価引張剛性を想定してセグメントにコンクリートの 1/20 のヤング率を与えたケースについて、トンネル軸ひずみ伝達率と波長の関係を示したものである。図より明らかなように、圧縮剛性のケースでは両者が比較的一致しているのに対して、等価引張剛性のケースでは波長 1000m 以下の範囲で数値解が解析解より小さい。

図-8 は地盤変位の波長を、それぞれ 50m, 500m に固定した上で、トンネルの軸剛性を圧縮剛性の 1 倍～1/100 倍まで変化させて、ひずみの伝達率に関する解析解と数値解とを比較したものである。地盤変位の波長が 50m と短い地盤条件急変部や立坑接合部付近を想定したケースでは、セグメント剛性が小さいほど、ひずみの解析解と数値解の差が顕著である。また、地盤変位の波長が 500m のケースでは、セグメント剛性比 0.5 を境として、ひずみ伝達率に関する解析解と数値解の大小関係が逆転している。このように、共同溝クラスのシールドトンネルでは、

表-2 解析ケース 2

項目	種類	内容
地盤のヤング率	1	600 (kN/m ²)
シールドトンネル	1	外径 5.05m の RC 製セグメント
トンネル剛性	10	圧縮剛性に対して 1/1～1/100 の 10 種類
地盤変位の波長	2	50, 500m

弾性床上の梁に基づいて(2)式によって軸ひずみ伝達率を設計に適用したり、梁ばねモデルを用いた縦断方向の耐震解析に基づいてトンネルの耐震設計を行うと、トンネルの地震時軸ひずみを過大に評価することになる。

(5) 構造物と地盤の剛性比の影響⁵⁾

共同溝トンネルならびに大口径トンネルを検討対象として、構造物と同じ面積を有する地盤の軸剛性と構造物の軸剛性の比を等価剛性比と定義し、等価剛性比が約 1～300倍となるようにセグメントのヤング率を 5 種類変化させて、軸ひずみ伝達率の数値解と解析解の比較を行った。解析ケースを表-3 に示す。

ここでは、数値解の軸ひずみ伝達率 r_{num} に対する解析解の軸ひずみ伝達率 r_{bet} の比として (4) 式で与える r_{rm} を、ひずみ伝達率の比と定義する。

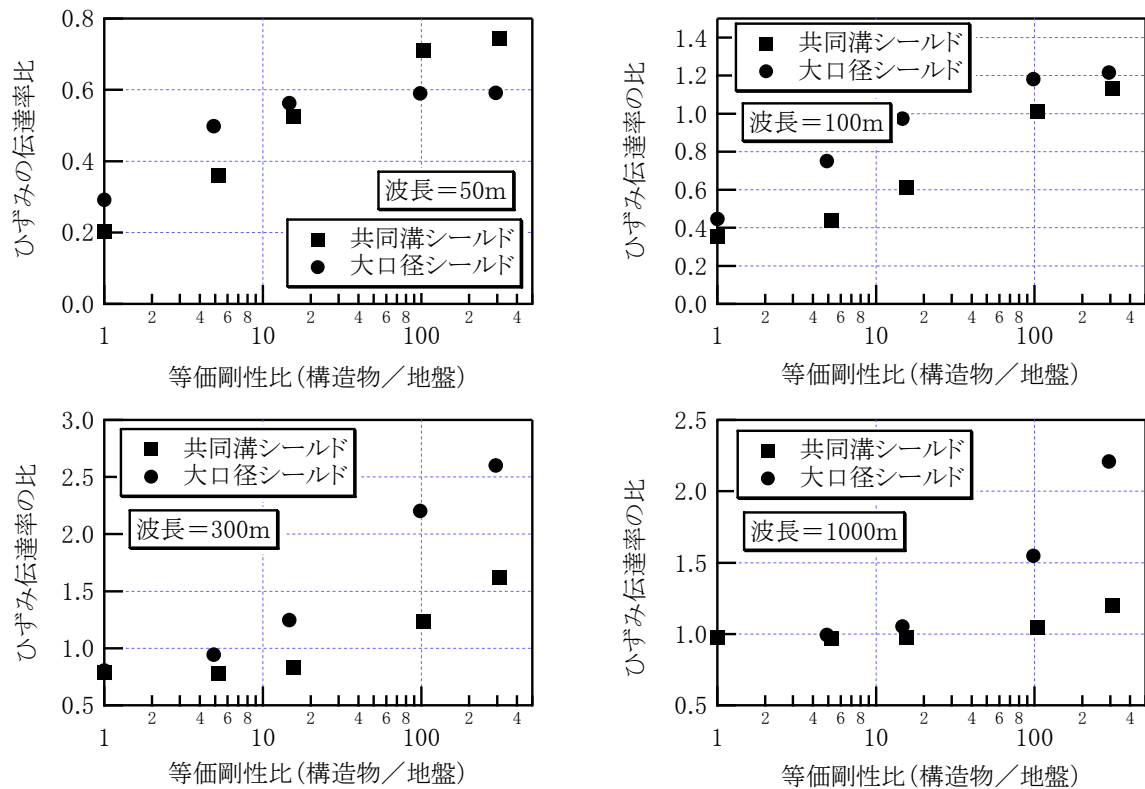


図-9 等価剛性比に対するひずみ伝達率の比に関する2種類のトンネルの比較

$$r_{trm} = r_{num} / r_{bef} \cdots (4)$$

図-9 はひずみ伝達率の比と等価剛性比の関係を、地盤ひずみの波長毎に整理して4つのグラフで示したものである。4つのグラフはすべて右肩上がりの傾向を示しており、等価剛性比が大きいほど、ひずみ伝達率の比は大きくなっている。すなわち、地盤に対してトンネルの軸剛性が大きいほど、あるいは地盤が軟らかいほど、応答変位法では過大なトンネル軸ひずみを算定する傾向があり、その傾向は地盤ひずみの波長が短いほど顕著である。ひずみ伝達率の比は1よりも小さくなるケースと大きくなるケースがあり、0.2～3の広い範囲に分布した。大口径トンネルにおけるひずみの伝達率は、ほとんどのケースで共同溝トンネルのひずみ伝達率の比よりも大きい。地盤ひずみの波長が短い50mのケースでは、等価剛性比が100以上で両者の関係が逆転している。波長がもっとも短い50mの解析ケースでは、ひずみの伝達率の比は等価剛性比とともに増加するものの、すべてのケースで1に達することなく、地盤条件急変部や立坑接合部等、地盤ひずみの波長が短いケースでは、応答変位法はトンネル軸ひずみを過大評価する傾向があることがわかった。一方、波長が1000mの解析ケースでは、等価剛性比20程度までは外径の異なる2種類のトンネルでひずみ伝達率の比はほぼ1.0であるが、等価剛性比が100を超えると、ひずみ伝達率の比は1を超え、この傾向は、大口径トンネルの方が共同溝トンネルよりも顕著であ

表-3 解析ケース3

項目	種類	内容
地盤のヤング率	3	200, 600, 3000 (kN/m ²)
シールドトンネル	2	外径 5.05, 13.9m の RC 製セグメント
トンネル剛性	5	同じ断面積の地盤に対する軸剛性比
地盤変位の波長	5	50, 100, 300, 500, 1000m

る。ただし、このように波長が長くなるケースでは、地盤ひずみが比較的小さいので、トンネルにとっては危険となるような条件ではない。

3. 応答変位法の適用性に関する分析

(1) 応答変位法の適用範囲に関する検討

以上のように、シールドトンネルの構造や地盤とトンネルの剛性比、ならびに地盤ひずみの波長によっては、応答変位法はトンネル軸ひずみの伝達率を過大に算定することが示唆された。そこで、本章では、応答変位法の耐震設計への適用性について、さらに解析結果を分析することを試みる。そのため、比較的口径の大きなシールドトンネルの地震時軸ひずみ算定に関する応答変位法の適用性を示す指標として、(5)式で与える(2)式と(1)式の軸ひずみ伝達率の差 r_{dif} を用いることとする。

$$r_{dif} = r_{bef} - r_{num} \cdots (5)$$

を超える領域を、応答変位法が軸ひずみを過大評価

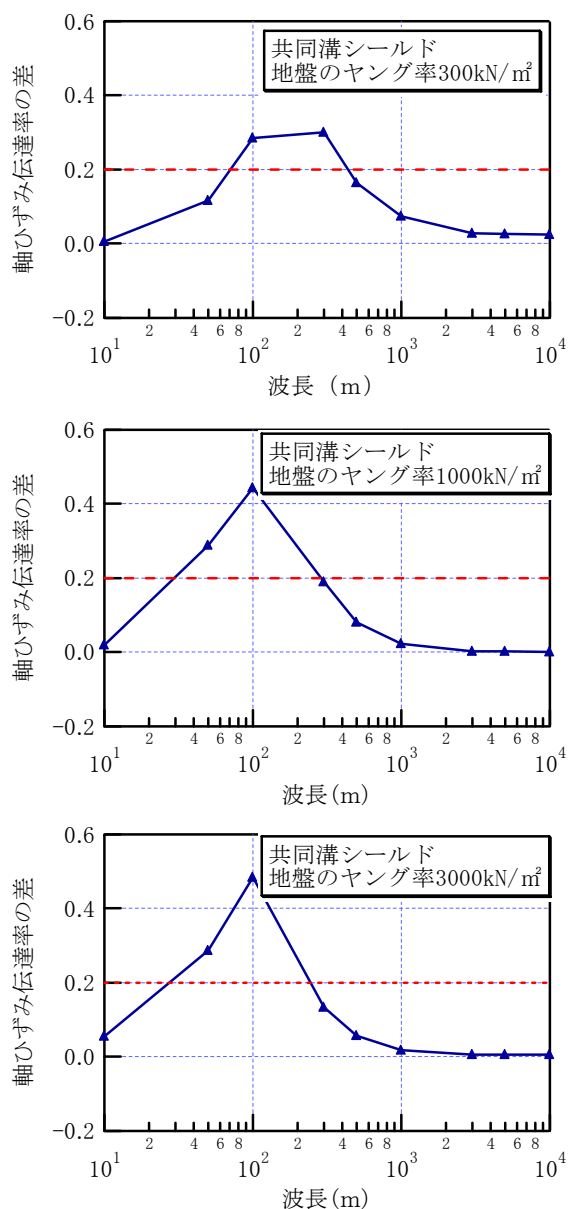


図-10(a) 軸ひずみ伝達率の差（上水道シールドトンネル（等価引張剛性））

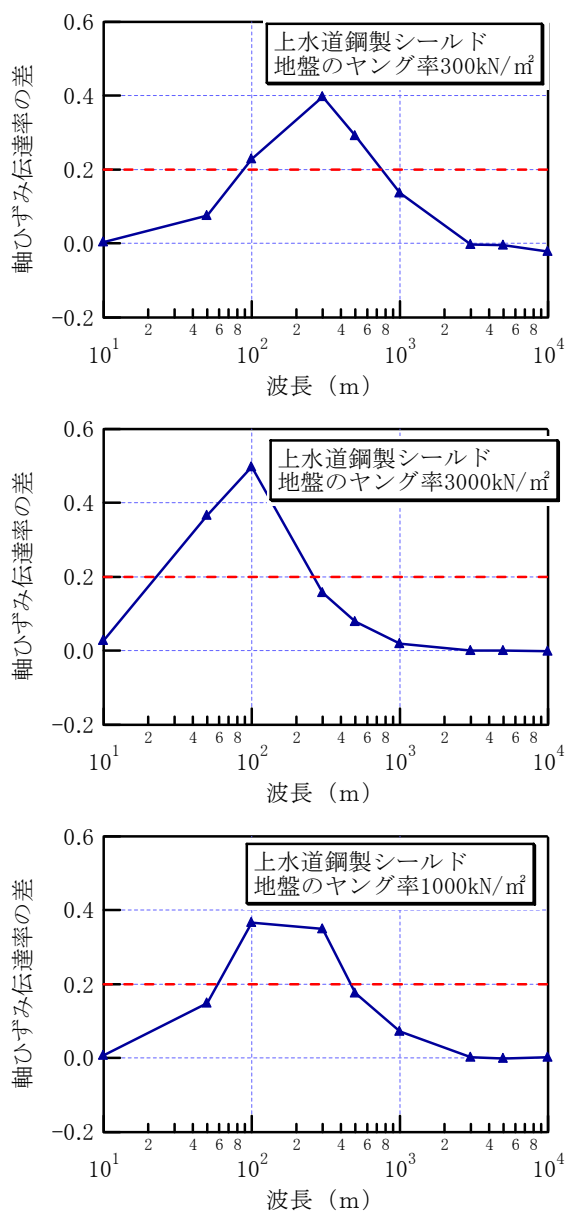


図-10(b) 軸ひずみ伝達率の差（共同溝シールドトンネル（等価引張剛性））

図-10 の(a)は上水道トンネル、(b)は共同溝トンネル、(c)は大口径トンネルの等価引張剛性の構造条件で、地盤のヤング率を 200, 1000, ならびに 3000kN/m² としたケースについて、軸ひずみ伝達率の差と地盤ひずみの波長との関係を整理したものである。上水道トンネル（図-10(a)）では、3つのグラフに大きな相違は認められないが、地盤のヤング率が大きいほど、グラフのピークが左側へ、すなわちピークの位置が波長の短い方向へと移動することがわかる。ピークの数値は 0.5 であるから、このことは応答変位法では 50%軸ひずみを過大評価していることを意味している。図中には縦軸の 0.2 の位置で水平線を入れている。耐震設計において、設計技術者は多少の余裕を持たせて構造設計を実施するが、この余裕代を 2 割程度と設定し、ここでは 0.2

表-4 応答変位法で過大評価となる条件

トンネル	地盤 E (kN/m ²)	波長 (m)
上水道	200～800	50～500
	1000～3000	50～300
共同溝	すべて	50～300
大口径	3000	100

する領域と定義することとする。地盤のヤング率を 200～3000kN/m² まで 11 種類変化させ、地盤ひずみの波長 10m～10000m まで 9 種類変化させて解析を行った結果、表-4 に示すとおり、上水道トンネルでは地盤のヤング率が 200～800kN/m² かつ地盤ひずみの波長が 50～500m の場合、ならびに地盤のヤング率が 100～3000kN/m² かつ地盤ひずみの波長

が 50~300m の場合、応答変位法が軸ひずみを過大評価していることが分かった。

共同溝トンネル（図-10(b)）でも、軸ひずみ伝達率の差のピークの現れる地盤ひずみの波長や軸ひずみ伝達率のピーク値の傾向は、上水道トンネルとはほぼ同じであった。その結果、表-3 に示すとおり、共同溝トンネルでは、地盤ひずみの波長が 50~300m の場合、地盤のヤング率にかかわらず、応答変位法が軸ひずみを過大評価していることが分かった。一方、大口径トンネル（図-10(c)）では、地盤のヤング率 3000kN/m² で地盤ひずみの波長 100m のケース以外では軸ひずみ伝達率の差が 0.2 を超えることはなく、明らかに他のトンネルとは異なる結果が得られた。

(2) 等価剛性比に基づいた考察

前節で示したように、大口径トンネルでは応答変位法と EASIT によって算定される軸ひずみ伝達率が、非常に近い結果となった。図-9 では(4) 式で与えるひずみ伝達率の比 r_{rm} を、地盤に対するトンネルの等価剛性比との関係で整理した。ひずみ伝達率の比、 r_{rm} は、大口径トンネルの場合でも、0.2~1.6 の広い範囲に分布することとなったが、ひずみ伝達率の差としては小さかったわけである。検討対象とした地盤のヤング率である 200~3000kN/m² の範囲で、本検討における 3 つの種類のトンネルの等価剛性比がどの範囲にあったかを算定してみると、大口径トンネルでは等価剛性比は 0.3~4 と 1 に近い範囲であったのに対して、上水道トンネルでは 8~120、共同溝トンネルでは 103~1546 であった。すなわち、大口径トンネルの場合には寸法効果はあるものの、軸剛性は地盤とほぼ同じオーダーであるため、相互作用力としては比較的小さいと言え、これが解析手法による差を発生させなかったと考えることができる。

大口径のシールドトンネルを応答変位法で設計されることはなく、主として梁ばねモデルによる地震応答解析で、耐震性の照査が行われていると思われるが、上記の結果は、梁ばねモデルを用いたトンネル縦断方向の地震応答解析⁶⁾の妥当性を示していると言える。

4. まとめ

本論文では、応答変位法の適用性を具体的かつ定量的に示すことを目的として、外径の異なる比較的大型の 3 種類のシールドトンネルを対象とし、地盤からトンネルへの軸ひずみ伝達率に着目して EASIT を用いた数値解析（数値解）と応答変位法（解析解）の比較を行った。以下に、本論文で得られた結果をまとめた。

(1) 軸ひずみ伝達率は、トンネル外径や材質、地盤とトンネルとの軸剛性比、地盤ひずみの波長によって変化するが、応答変位法はトンネル軸ひずみを過

大に算定する可能性があることが示された。

(2) 地盤に対してトンネルの軸剛性が大きいほど、

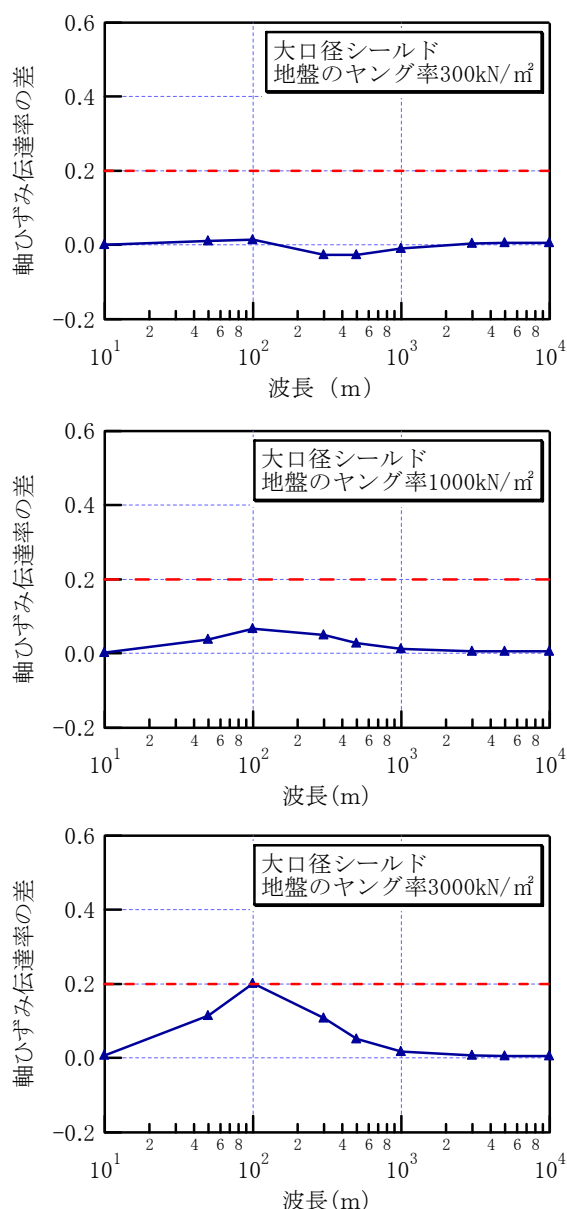


図-10(c) 軸ひずみ伝達率の差（大断面シールドトンネル（等価引張剛性））

応答変位法では過大なトンネル軸ひずみを算定する傾向があり、その傾向は地盤ひずみの波長が短いほど顕著であることがわかった。

(3) 応答変位法と EASIT によって算定した軸ひずみ伝達率の差が 0.2 を超える場合、応答変位法が軸ひずみを過大評価する領域と定義すると、上水道トンネルと共同溝トンネルの場合にはほとんどの地盤条件で、地盤ひずみの波長が 50~300m の場合、応答変位法が軸ひずみを過大評価していることが分かった。

(3) 大口径トンネルの場合、地盤に対するトンネルの軸剛性比が 1 前後であり、みかけの剛性が地盤と同じオーダーであるので、地盤と構造物の相互作用力が小さいため、応答変位法あるいは梁ばねモデル

を用いた地震応答解析の適用性は比較的高いと思われる。

謝辞：本論文の3章の解析については，山梨大学工学部土木環境工学科4年生の伊藤彩都君に手伝っていただいた。ここに謝意を表する次第です。

参考文献

- 1) Suzuki, T.: The axisymmetric finite element model developed as a measure to evaluate earthquake responses of seismically isolated tunnels, Proc. 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, 2000.
- 2) 鈴木猛康，勝川藤太：地下構造物の滑り型免震構造の提案と検証実験，土木学会論文集，No.689/I-57, pp.137-151, 2001.10.
- 3) 鈴木猛康，勝川藤太，鈴木和重：地下構造物へのひずみの伝達率に与える構造物の寸法ならびに剛性の影響（その1：構造物の外径ならびに材質の影響），第59回土木学会年次学術講演会講演概要集CD-ROM, pp.125-126, 2004.
- 4) 鈴木猛康，勝川藤太，鈴木和重：地下構造物へのひずみの伝達率に与える構造物の寸法ならびに剛性の影響（その2：構造物の剛性の影響），第59回土木学会年次学術講演会講演概要集CD-ROM, pp.127-128, 2004.
- 5) 鈴木猛康，勝川藤太，鈴木和重：地下構造物へのひずみの伝達率に与える構造物の寸法ならびに剛性の影響（その3：地盤と構造物の軸剛性比（構造物／地盤）の影響），第59回土木学会年次学術講演会講演概要集CD-ROM, pp.129-130, 2004.
- 6) Tamura, C. and Okamoto, S. and Hamada, M.: Dynamic Behavior of a Submerged Tunnel during Earthquakes, 東京大学生産技術研究所報告, Vol.24, No.5, 1975.

COMPARISON BETWEEN FINITE ELEMNT ANALYSIS AND SEISMIC DISPLACEMENT METHOD ON A TRANSMISSION COEFFICIENT OF SEISMIC AXIAL STRAIN OF SHIELD-DRIVEN TUNNELS

Takeyasu SUZUKI

In order to examine the applicability of seismic displacement method to seismic axial response of shield-driven tunnels, the comparison between seismic displacement method and finite element analysis is carried out in this paper, for a water supply tunnel, a common conduit and a large-diameter road tunnel. The comparison between the two different methods is conducted using a transmission coefficient of axial strain from ground to tunnel as an indicator. Then, a quantitative evaluation on the applicability of seismic displacement method to a seismic design of shield-driven tunnels with relatively large diameter is demonstrated.