

地震動が軸方向に作用する場合の層厚が変化する地盤中の
シールドトンネルの縦断方向の挙動について

A Study on the Dynamic Behavior in Longitudinal Direction of Shield Tunnel in Non-uniform
Depth Ground under the Axial Seismic Force

何 川*, 町田 能章**, 小泉 淳***
Chuan HE, Yoshiyuki MACHIDA and Atsushi KOIZUMI

*工修 早稲田大学大学院博士後期課程 理工学研究科建設工学専攻 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)
**工修 西松建設株式会社 技術研究所 (〒242-8520 神奈川県大和市下鶴間 2570-4)
***工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

In order to investigate the dynamic behavior in the longitudinal direction of shield tunnel in non-uniform depth ground under the axial seismic force, a series of model shaking tests was carried out and the response analyses of shield tunnel were performed with emphasis on the seismic deformation method of time history. The investigation concerns the axial vibration characteristics of tunnel, the interaction effects between tunnel and ground, the suitability of the analytical model of tunnel under the axial seismic force, the effects on results of the response analyses of tunnel for using different response displacements of free ground. In the model tests, the non-uniform depth ground and different tunnel rigidities were focused, the ground and tunnel materials were chosen according to the law of similarity.

Key Words: shield tunnel, earthquake-proof design, longitudinal behavior, shaking table test, seismic deformation method

1. はじめに

層厚が変化する地盤中のシールドトンネルの縦断方向の地震時挙動は作用する地震動の方向がトンネル軸方向であるか軸直角方向であるかによって異なるが、筆者らは、これらのうち地震動がトンネルの軸直角方向に作用する場合のシールドトンネルの挙動についてはすでに検討を行って一応の知見を得ている¹⁾。本論文は、これに続くものであり、地震動がトンネル軸方向に作用した場合のシールドトンネルの地震時挙動を検討したものである。模型振動実験には地震動がトンネル軸直角方向に作用する場合の検討と同じ条件の地盤模型、シールドトンネル模型および入力波を用い、また、解析には広義の応答変位法を用いている。模型実験結果と解析結果との比較から、層厚が変化する地盤の挙動、トンネルと地盤との相互作用、トンネルの構造解析モデルの妥当性を検討した。

2. 実験概要

2.1 想定したトンネルおよび地盤とそれらのモデル化¹⁾

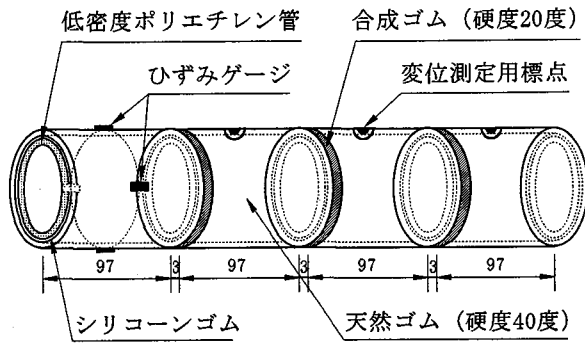
実験の対象としたシールドトンネルは外径 7.0m、仕上

表-1 相似則

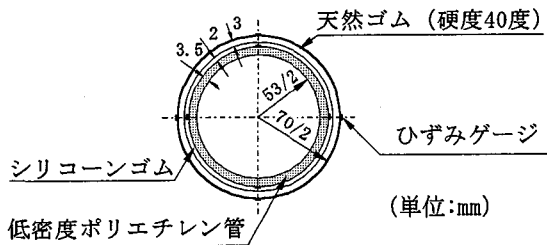
	密度 P	長さ L	弾性係 数e	時間	加速 度	ひずみ
相似 則	ρ_m/ρ_p	l_m/l_p	E_m/E_p	$L\sqrt{\frac{P}{e}}$	$\frac{e}{P\cdot L}$	$\varepsilon_m/\varepsilon_p$
相似 比	1.0/1.8 =0.556	0.01	0.01	7.5×10^{-2}	1.8	1.0

がり内径 5.8m の鉄道単線トンネルで、セグメントは幅 1m のコンクリート平板型セグメントを想定している。また、地盤は大都市における実測のボーリング調査結果を参考に沖積層厚が変化する場合の地盤を想定している²⁾。

本実験では、地盤模型に生じる慣性力と弾性力とがその支配的な物理量であると考え、また模型材料を選択することの便利さを考慮して、密度と弾性係数とを独立のものと考え相似比を定めている³⁾⁴⁾。模型の長さおよび弾性係数の実物に対する基礎相似比は 1/100 とした。また、実験結果に与える影響が一番大きいのは地盤の振動であると考え、密度の基礎相似比は地盤の密度から決定した。本実験に用いた相似則を表-1に示す。表中、 ρ は密度、 l は

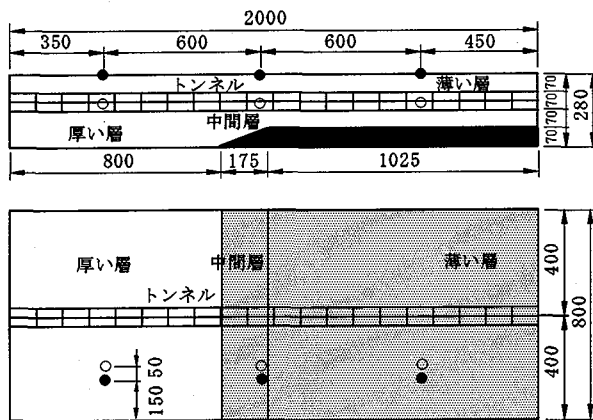


(a) 模型の概要



(b) 断面図

図-1 トンネル模型



- : 地表面加速度計(軸方向)
 - : 地中加速度計(軸方向)
- (単位:mm)

図-2 地盤模型の概要

長さ, E は弾性係数, ε はひずみをそれぞれ表わし, 添字 m は模型を, 添字 p は実物を表わしている. また, P, L, e はそれぞれ密度, 長さ, 弾性係数の相似比である. これらの相似則の定め方は参考文献 1) を参照されたい.

トンネル模型の製作上の精度と制約および測定機器の設置等を考慮して, 10 リング分のセグメントを剛性が一様に低下したリングと考えてモデル化することとした⁷⁾. なお, リング継手は幅 3mm で, セグメントリングと同じ断面形状を有する円環状のゴムを貼付して評価した. 長さの相似比および製作上の便利さ等を考慮して, 一次覆工は厚さ 3mm の天然ゴム管に, 二次覆工は厚さ 3.5mm の低

表-2 弾性係数 (単位:N/mm²)

	地盤	一次覆工	リング継手	二次覆工
対象とした実物の E	10	297.6	81.02	2.7×10^4
相似比から求めた E	0.1	2.976	0.8102	2.7×10^2
実験に用いた材料の E	0.12	2.8(7.3)	0.98(3.97)	3.5×10^2

注) () 内の値は一次覆工模型に水性ペイントを塗布した場合の弾性係数

表-3 実験の種類

種類	地盤のみ	一次覆工のみ	二次覆工あり
実験名	J	J1	J2

密度ポリエチレン管にモデル化し, また, 一次覆工と二次覆工との隙間には厚さ 2mm のシリコンゴムを注入して両覆工間の力の伝達ができるようにしている. 図-1 はトンネル模型の概要を示したものである. 地盤模型は図-2 に示すように, 沖積層厚が変化する地盤を想定した. 地盤材料にはシリコンゴムを用いた.

表-2 は対象とした実物の各種弾性係数と, 相似比を考えて模型材料が有すべき弾性係数およびこれらの結果から実際に選定した模型材料の弾性係数を示したものである. シリコンゴムとトンネル材料とした天然ゴムとが直に接するとシリコンゴムに硬化阻害が生じるため, トンネル模型の表面にはアクリル樹脂系の水性ペイントを塗布し被膜している. 水性ペイントを塗布することで, 一次覆工模型とリング継手の模型の弾性係数は模型材料単体の弾性材料よりも結果的に大きくなり (表-2 参照), このことから, 模型トンネルの一次覆工の軸剛性は相似則による軸剛性より大きくなった.

2.2 実験概要

トンネル模型を埋設した振動実験に先立ち, トンネルを埋設しない地盤だけの実験を行っている. 表-3 は実験の種類を示したもので, 地盤だけの実験を実験 J, 一次覆工のみの実験を実験 J1, 二次覆工されたトンネルの実験を実験 J2 と略称する.

(1) 正弦波を対象とした振動実験

図-2 に示す地盤模型の底面を振動台に固定し, トンネル軸方向から正弦波 (最大加速度 50gal) を入力して振動実験を行った. 入力正弦波の振動数は各地盤の一次共振点付近では 0.1Hz ずつ, その他では 1Hz ずつ 2Hz から 20Hz まで変化させ, 定常振動状態で計測を行っている.

計測項目は, 図-2 に示す地盤模型の表面およびトンネル埋設深さにおける地盤の軸方向加速度と地盤軸方向変位およびトンネル模型の軸方向の軸ひずみである. 地盤変位は, 地表面から 15cm の深さに埋設した外径 2mm のシリコンチューブ製の格子と, 格子の交点直上の地表面に

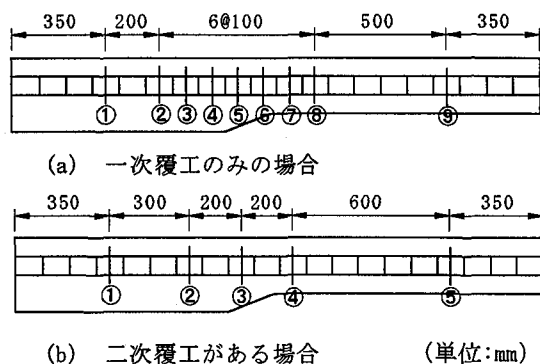


図-3 ひずみの計測断面

貼付した標点のぶれ写真を撮影して求めた。図-3はトンネルの軸ひずみの測定断面を示したものであり、ひずみは一次覆工のみの実験では9断面で、二次覆工されたトンネルの実験では5断面で測定した。ひずみゲージは図-1に示すように、各断面とも鉛直および水平の直径点の4箇所に貼付している。

(2) 実地震波を対象とした振動実験

正弦波を対象とした振動実験に引き続き、実地震波を対象とした振動実験を行った。入力波は、EL CENTRO地震波と十勝沖地震波（八戸）であり、また、表-1の時間の相似比（0.075）と振動台の性能等を考慮し、それぞれ時間軸を実時間の5分の1（ $t/5$ と表記）に短縮したものと10分の1（ $t/10$ と表記）にしたものの4種類の波（それぞれEL CENTRO $t/5$ 波、EL CENTRO $t/10$ 波、八戸 $t/5$ 波、八戸 $t/10$ 波と呼ぶ）を用い、振動台における最大加速度の目標値を約100galとして入力している。計測項目は地盤の軸方向加速度とトンネルの軸方向の軸ひずみである。

3. 解析の方法

解析には広義の応答変位法を用いた。入力地盤変位には、正弦波の場合は模型振動実験（実験 J1）において厚い層の一次共振時に計測されたトンネル埋設位置の地盤の最大軸方向変位を、実地震波の場合は模型地盤の時刻歴地震応答解析により得られたトンネル埋設位置の地盤の軸方向の時刻歴応答変位をそれぞれ用いた。これらの地盤変位は地盤ばねを介してトンネルに入力される。

3.1 トンネルの解析モデル

(1) 解析モデル^{1), 9), 10)}

図-4は応答変位法に用いたトンネル縦断方向の静的解析モデルである。一次覆工のみ（実験 J1）の解析モデルは図-4(a)に、二次覆工がある場合（実験 J2）の解析モデルは図-4(b)に示すとおりである。

解析に用いた地盤ばねのばね定数およびリング継手と両覆工間の相互作用を評価するばね部材のばね定数は以

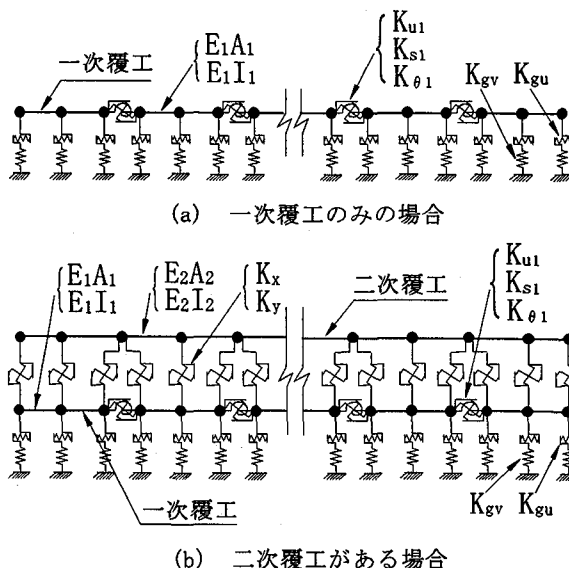


図-4 トンネルの解析モデル

下に示す方法により定めた。なお、本研究は、トンネル軸方向からの地震動に対する検討をその対象としているため、図-4に示す解析モデルのうち、リング継手のせん断ばねのばね定数 $K_{\theta 1}$ と回転ばねのばね定数 $K_{\theta 1}$ 、軸直角方向の覆工間ばねのばね定数 K_y および軸直角方向の地盤ばねのばね定数 K_{gv} は用いない。これらのばねのばね定数の求め方は文献1)を参照されたい。

(2) トンネル軸方向の地盤ばねのばね定数 K_{gu}

地盤模型材料であるシリコンゴムは透明であり、目視の結果、振動を与えても地盤とトンネル模型との接触面で相互に滑りは生じていなかった。したがって、地盤ばねのばね定数 K_{gu} は線形ばねと仮定し、直径70mmの載荷板を用いた平板載荷試験を行って求めた。得られた地盤反力係数 k_g は 2.8 MN/m^3 であった。

地盤反力係数 k_g は荷重の載荷方向（法線方向）の反力を表す係数であることから、これをトンネルの接線方向の反力係数 k_{gu} に変換する必要がある。いま接線方向の地盤反力が地盤のせん断変形に伴って発生するものと仮定し、これをせん断弾性係数 G と弾性係数 E との関係に対比させると、

$$k_{gu} = \frac{1}{2(1+\nu)} k_g \quad (1)$$

と表すことができる。ここに ν は地盤のポアソン比である。この式を用いてトンネルの軸方向の地盤ばねのばね定数 K_{gu} は式(2)により算出した。

$$\begin{aligned} K_{gu} &= \frac{1}{2} \cdot k_{gu} \cdot \pi \cdot D_1 \cdot B \\ &= \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2(1+\nu)} \cdot k_g \cdot \pi \cdot D_1 \cdot B \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、 D_1 はトンネル模型の外径を、 B は図-4に示す節点間隔を表す。

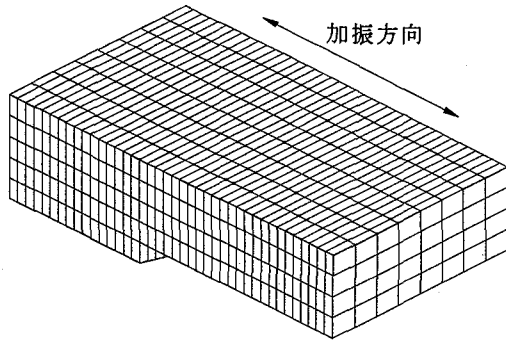


図-5 地盤の3次元FEM解析モデル

(3) リング継手を評価する軸ばねのばね定数 K_{ul}

リング継手を評価する軸ばねのばね定数 K_{ul} は、リング継手を評価した合成ゴムリングに軸力が作用した場合の荷重と変形との関係から式(2)により求めることとした。

$$K_{ul} = \frac{E_g A_g}{l_g} \quad (3)$$

ここに、 E_g は継手ゴムの弾性係数を、 A_g は継手ゴムの断面積を、また、 l_g は継手ゴムの幅を表す。

本解析では実際に実験に用いたゴムのリング継手を評価できるように式(3)によって、軸引張、軸圧縮ともに同じリング継手のばね定数を設定しているが、一般的なシールドトンネルのリング継手構造に対しては、軸圧縮を受ける場合のリング継手のばね定数は ∞ に設定する必要がある。

(4) 覆工間ばねのばね定数 K_x

トンネル軸方向の力を伝達する覆工間ばねのばね定数 K_x は式(4)により求めることができる。

$$K_x = \frac{K_{x1} \cdot K_{x2}}{K_{x1} + K_{x2} + \frac{K_{x2} \cdot K_{x1}}{K_{xiso}}} \quad (4)$$

ここに、 K_{x1} 、 K_{x2} 、 K_{xiso} はそれぞれ式(5)～(7)により定めた。

$$K_{x1} = \frac{E_1 \cdot A_x}{2(1+\nu_1)t_1} \quad (5)$$

$$K_{x2} = \frac{E_2 \cdot A_x}{2(1+\nu_2)t_2} \quad (6)$$

$$K_{xiso} = \frac{E_{iso} \cdot A_x}{2(1+\nu_{iso})t_{iso}} \quad (7)$$

ここに、 E_1 、 E_2 、 E_{iso} は、それぞれ一次覆工、二次覆工、覆工間のシリコン材の弾性係数で、 t_1 、 t_2 、 t_{iso} はそれらの厚さ、 ν_1 、 ν_2 、 ν_{iso} はそれらのポアソン比であり、 A_x は、図-4(b)に示す解析モデルにおける節点間の二次覆工周面積の2分の1である。

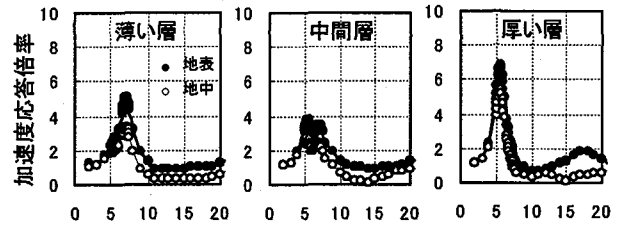


図-6 加速度の共振曲線 (実験 J)

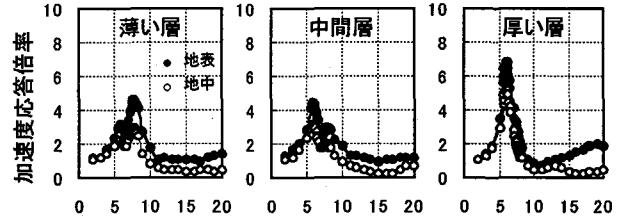


図-7 加速度の共振曲線 (実験 J1)

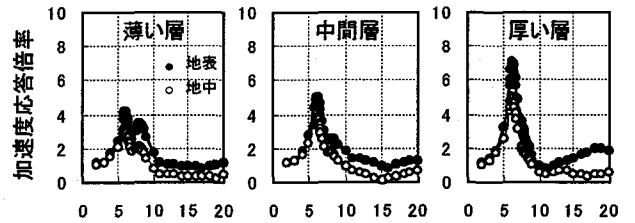


図-8 加速度の共振曲線 (実験 J2)

表-4 一次共振振動数 (単位:Hz)

	実験 J	実験 J1	実験 J2
厚い層	5.6	6.1	6.3
薄い層	6.9	7.7	8.1

3.2 三次元 FEM による地盤の時刻歴地震応答解析^{1), 11)}

図-5 は地盤の三次元動的 FEM のモデルを示したものである。20 節点 6 面体アイソパラメトリック要素を用いている。また時刻歴応答解析には、直接積分法であるニューマークの β 法を用いた。模型地盤として用いたシリコンゴムは完全弾性体であることから、この手法は線形問題に対して無条件に安定である。

応答解析には入力地震波である 4 種類のうちの八戸 $t/15$ 波を用いた。これは、八戸 $t/15$ 波の卓越振動数が実験に用いた厚い層地盤模型の固有振動数に近く、トンネル模型に発生するひずみが最大となったことによる。解析用の入力波には、実験から得られた振動台の時刻歴加速度を用いた。

4. 正弦波を対象とした模型振動実験結果と解析結果およびその考察

4.1 共振曲線の実験結果

図-6～図-8 は各実験における地盤の軸方向加速度の共振曲線を示したものである。それぞれの図は厚い層、層厚変化点(中間層)および薄い層の軸直角方向加速度の共

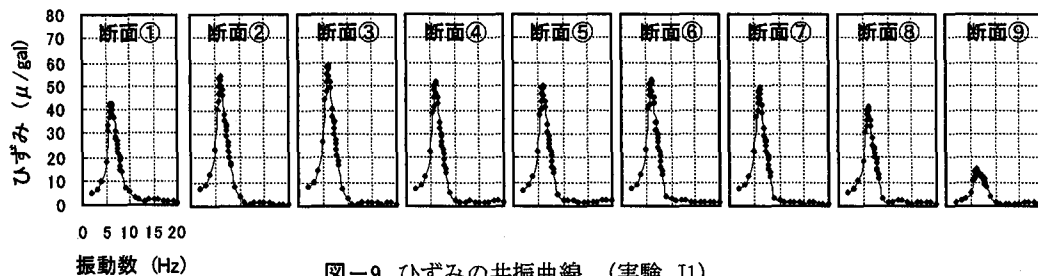


図-9 ひずみの共振曲線 (実験 J1)

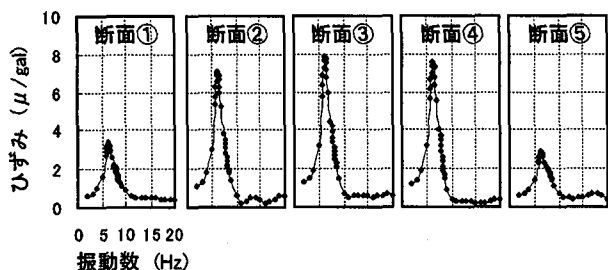


図-10 ひずみの共振曲線 (実験 J2, 一次覆工)

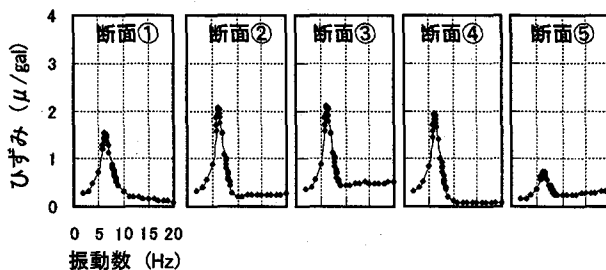


図-11 ひずみの共振曲線 (実験 J2, 二次覆工)

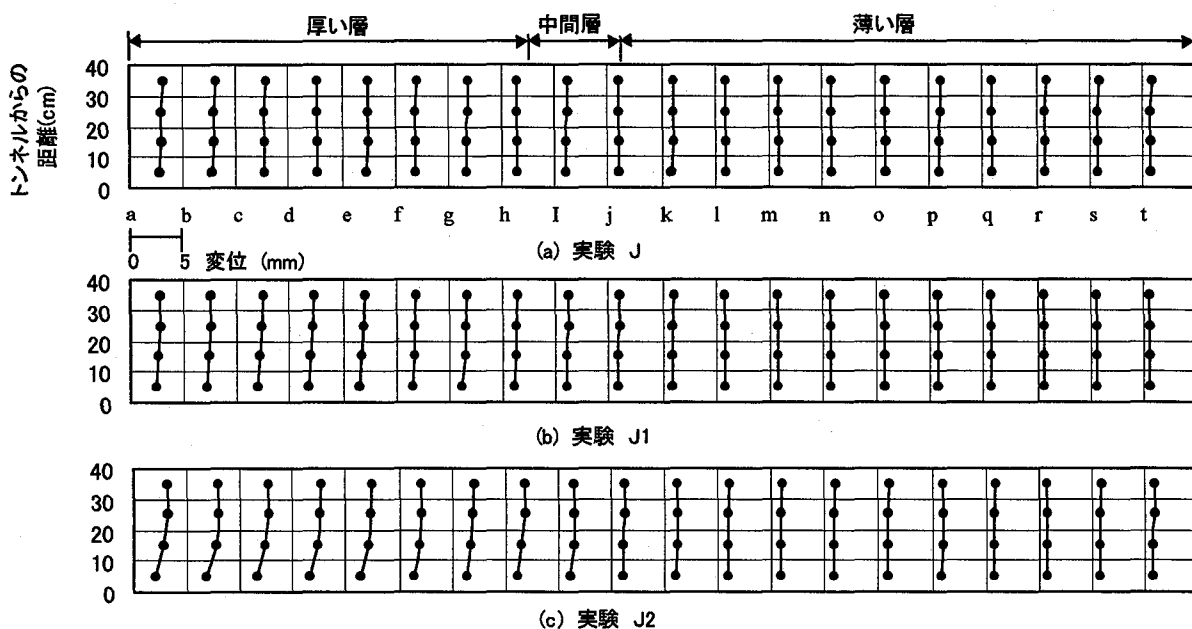


図-12 トンネルの埋設深さにおける地盤の軸方向変位分布

振曲線である。図中、黒丸は地表面における加速度応答倍率を、白丸はトンネル位置における地盤のそれを示している。また、表-4はこれらの図から求めた一次共振振動数をまとめたものである。

これらの図と表から、厚い層において各実験とも地盤の軸方向加速度の共振曲線の形状、応答倍率の最大値、一次共振振動数はほぼ同じであるが、薄い層において実験 J1 と実験 J2 は実験 J と異なる挙動を示していることがわかる。トンネルが埋設された場合にはその軸剛性が地盤の挙動にある程度の影響を与えていることが推察される。

図-9 は実験 J1 の一次覆工の軸ひずみの共振曲線であり、図-10 と図-11 は、それぞれ実験 J2 の一次覆工と二次覆工の軸ひずみの共振曲線である。軸ひずみはトンネ

ル断面の4箇所(図-1参照)で計測した値がほぼ同じで、曲げ成分は無視しうる範囲であったので4つの値を平均して求めた。また、軸ひずみの応答はすべて入力 1gal あたりに換算してある。

図-9 から、実験 J1 の一次覆工の軸ひずみについては、
①ほとんどの断面で、その断面が厚い層の一次共振点付近において最大応答を示している、
②中間層地盤から厚い層に入ったところ(断面②～④)の軸ひずみ応答は最大である、
などの知見が得られ、また、図-10 と図-11 から実験 J2 の軸ひずみについては、

①一次覆工の軸ひずみの共振曲線は実験 J1 と同じ位置(断面)においてほぼ同様の形状を示している、

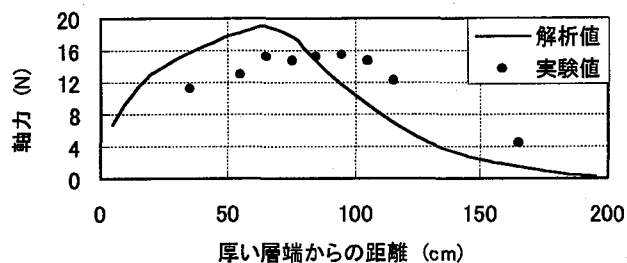


図-13 一次覆工の軸力 (実験 J1)

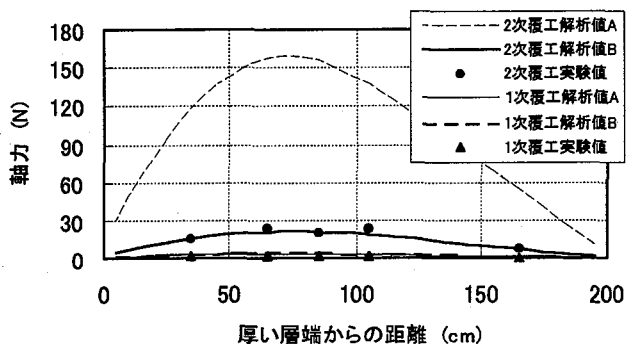


図-14 一次覆工と二次覆工の軸力 (実験 J2)

- ②一次覆工の軸ひずみの最大応答は、実験 J1 が実験 J2 の 7.5 倍程度になっている、
- ③軸ひずみの最大応答は、厚い層に入ったところ (断面 ②～④) 付近で発生している、
- などの知見が得られた。

4.2 地盤とトンネルの変位

地盤の変形はトンネル埋設深さにおける変形に着目し、実験結果を整理した。図-12 は厚い層地盤の一次共振時トンネル埋設深さにおけるトンネル軸方向の地盤変位分布を示したものである。横軸はトンネル軸方向の位置を表し、縦軸はトンネル埋設位置を零としたときの地盤の自由端方向 (幅方向) への距離を示したものである。トンネル位置を軸として対称な 2 点の測定値は平均して示してある。

この図を見ると、実験 J では、それぞれの断面で地盤は均等に変形しているのに対して、トンネルを埋設すると厚い層側のトンネル近傍の地盤の変形は小さくなり、二次覆工されたトンネルの場合にはこれが特に顕著となる。このことからトンネルの軸剛性が周辺地盤の変形を拘束する影響があることがわかる。また、トンネルを埋設しても地盤の自由端付近では地盤変位が地盤のみの場合とほとんど同じになっていることから、この変形拘束の影響はトンネルの周辺のみには発生しているものと推定される。以上の結果から、トンネルを軸方向に加振した場合に、本実験で用いた模型地盤は自由端の影響がほとんどなく、トンネルから離れた位置では無限に広がる自由地盤とほぼ同じ挙動をしていることがわかる。

4.3 断面力

図-13、図-14 は実験 J1 と実験 J2 の沖積層の一次共振時における一次覆工と二次覆工とに発生する最大軸力の実験結果と解析結果とを比較したものである。図-14 中の解析値 A は本論文に示した方法により解析を行った結果であり、解析値 B は両覆工間の接線ばねのばね定数のみを解析値 A の約 75 分の 1 に低減した場合の結果である。実験結果は厚い層の地表面の加速度が最大となる時刻における断面力を示している。解析に用いた入力変位は厚い層の一次共振時における実験 J のトンネル埋設中心位置の最大地盤変位の計測値をもとにこれを最小 2 乗法を用いて平滑化した変位である。これらの図から実験 J1 の一次覆工 (図-13) では、実験結果と解析結果とは概ね一致しているものの、実験 J2 ではよい一致は見られない (図-14 中の解析値 A)。二次覆工されたトンネル模型を作製するときに、一次覆工と二次覆工との間にシリコン材を打設したが、シリコン材が硬化する際には若干の収縮が発生する。このため一次覆工と二次覆工との間の力の伝達は式(3)に示したようなばねで 100%行われず、両覆工間にすべりが生じていたことが十分に考えられる。特にひずみゲージを貼付した位置ではその影響が大きいものと推定される。しかし、それがどの程度であったかは調べようがないため、両覆工間のせん断ばねのばね定数を低減し、実験結果を説明できるように“あてはめ”を行った。その結果が図-14 に示す解析値 B である。以降の解析にはこのばね定数 ($K'_x \approx 0.013K_x$) を用いた。なお、実際のトンネルでも打設される二次覆工のコンクリートは硬化に伴い収縮すると考えられるが、その収縮量は小さく無視できる程度と思われることから式(7)に示す K_{x100} を無限大とすれば、式(3)は実用できるものと考えている。また、トンネルの軸直角方向から地震動が作用する場合⁹⁾には、トンネルは曲げを受けるわけであるからシリコン材の硬化収縮の影響が少ないものと推定され、特にこのような両覆工間のすべりを考慮しなくても解析結果は実験結果を説明していたものと考えられる。

5. 実地震波を対象とした模型振動実験結果と解析結果およびその考察

5.1 加速度応答

(1) 振動実験による加速度応答

図-15 は八戸 t/5 波を入力した実験 J における地盤の軸方向加速度の時刻歴応答波形を示したものである。これらの図を見ると、厚い層、中間層と薄い層の加速度応答は、それぞれ地表面と地中とでほぼ相似形となっており、加速度振幅は地表面の方が若干大きめであることがわかる。このことから、地盤模型は一次固有振動モードのせん断振動が卓越していることが推測される。

(2) 三次元 FEM による加速度時刻歴応答

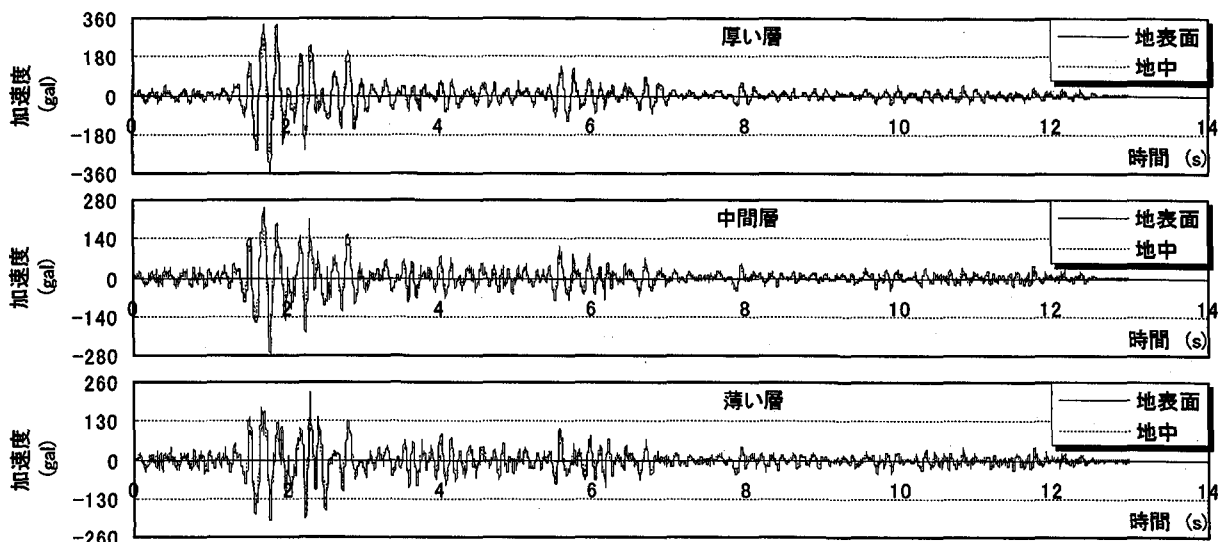


図-15 実験による地盤の加速度時刻歴応答 (八戸 $t/5$ 波, 実験 J)

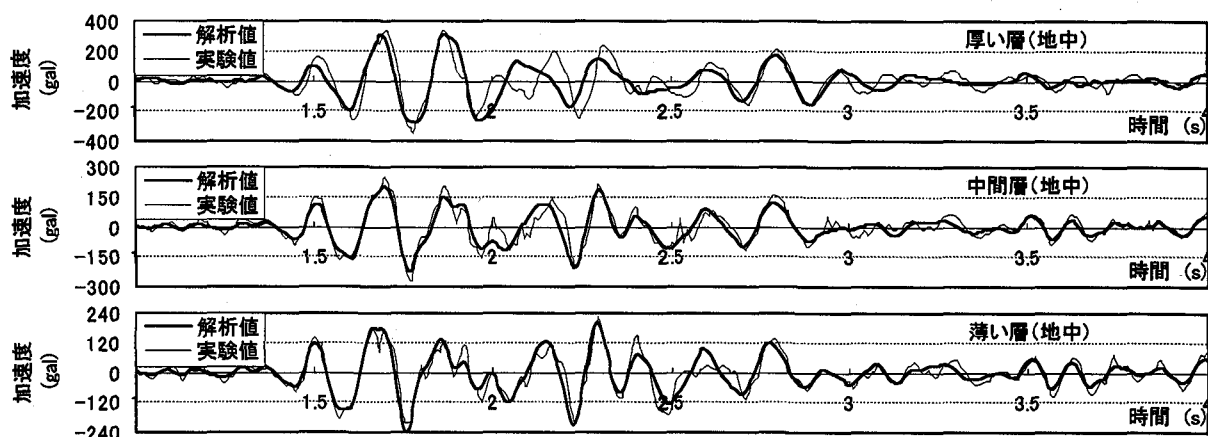


図-16 三次元FEMによる地盤の加速度時刻歴応答の解析結果と実験結果との比較(八戸 $t/5$ 波, 実験 J)

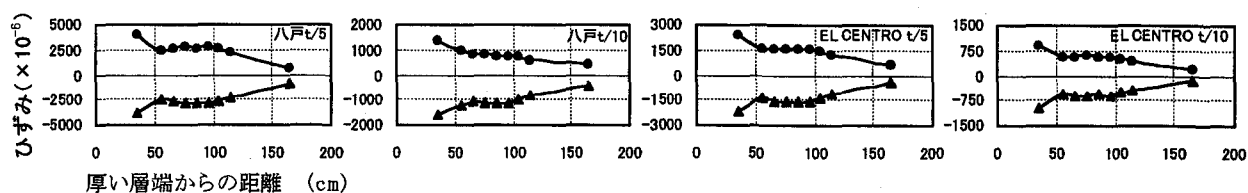


図-17 最大軸ひずみ分布(実地震波入力, 実験 J1)

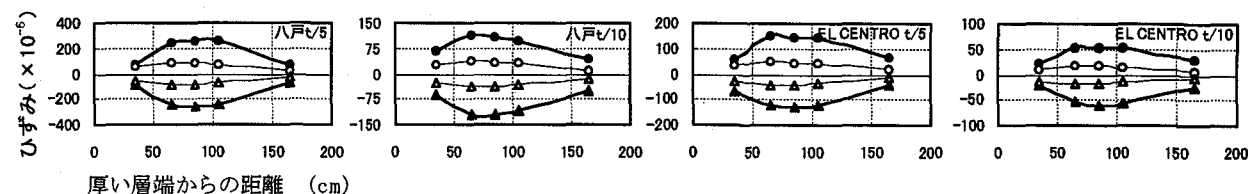


図-18 最大軸ひずみ分布(実地震波入力, 実験 J2)

図-16 は八戸 $t/5$ 波を入力した実験 J を対象に、三次元 FEM 地盤応答解析を行い、トンネル埋設位置における軸方向の加速度時刻歴応答を求め、これと実験結果とを比較した図である。それぞれの図には全体の 14 秒間のうち応答の大きかった 1~4 秒間を示している。この図から加

速度時刻歴応答の実験値と解析値とは最大値、位相ともによく一致していることがわかる。

5.2 実験による軸ひずみの応答

図-17、図-18 は実地震波を対象とした実験 J1 および

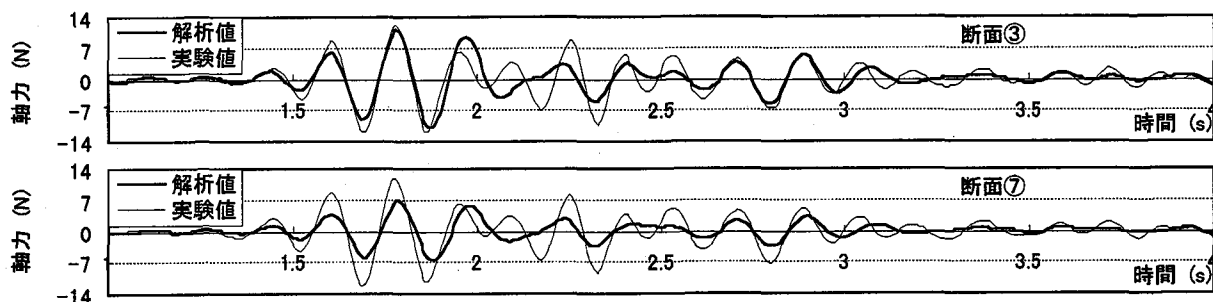


図-19 軸力の時刻歴解析結果と実験結果との比較(八戸 $t/5$ 波, 実験 J1)

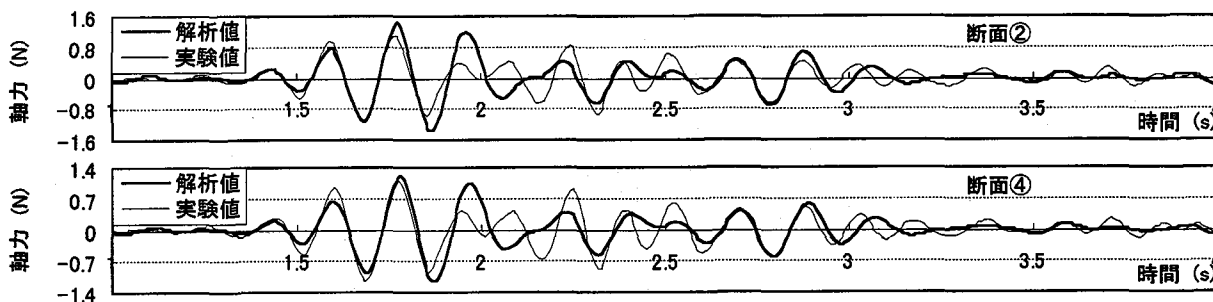


図-20 軸力の時刻歴解析結果と実験結果との比較(八戸 $t/5$ 波, 実験 J2, 一次覆工)

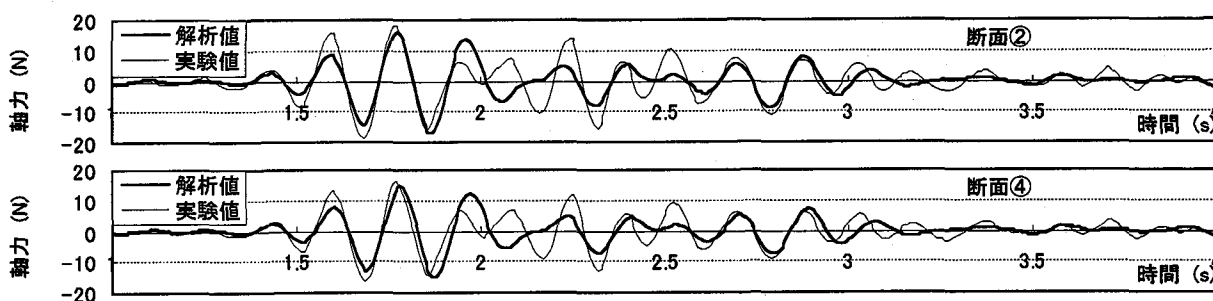


図-21 軸力の時刻歴解析結果と実験結果との比較(八戸 $t/5$ 波, 実験 J2, 二次覆工)

実験 J2 において各計測断面に発生する最大軸ひずみの分布(同時刻における分布ではない)を示したものである。図中、黒印は一次覆工の軸ひずみを表し、白印は二次覆工の軸ひずみを表している。これらの図より、以下の知見が得られる。

- ①二次覆工されたトンネルの一次覆工に発生する軸ひずみは、一次覆工のみのトンネルの $1/10$ 程度となっている。
- ②図-17 および図-18 に示す最大ひずみの入力 1gal あたりの換算値(軸方向自由端の影響を受ける可能性がある断面①と断面⑨を除く)は、図-9～11 に示す正弦波を対象とした実験の場合の最大応答ひずみ(厚い層の地盤の共振時)よりも小さく、約 $1/2$ 程度となっている。
- ③最大軸ひずみが発生する八戸 $t/5$ 波の場合、その分布形状は、実験 J2 において正弦波を対象とした実験の厚い層の一次共振時におけるひずみ分布形状と類似しているが、実験 J1 においては異なる分布形状に

なっている。

5.3 断面力

図-19、図-20、図-21 は三次元 FEM による地盤の時刻歴応答変位を用いて八戸 $t/5$ 波を入力した場合を対象に算出した実験 J1 の一次覆工(断面③と断面⑦)および実験 J2(断面②と断面④)の一次覆工と二次覆工に発生した軸力の時刻歴解析結果と実験結果とを比較したものである。これらの図は全体の 14 秒間のうち応答の大きかった 1～4 秒間について示している。これらの図を見ると、各断面では、各実験ケースの一次覆工、二次覆工ともに軸力の最大値、位相が概ねよく一致している。以上の結果から、三次元 FEM をもとにした軸力の解析結果は実験結果を説明できることがわかる。

5.4 地盤とトンネルの変位

この模型振動実験では、その構成上の理由から、正弦波を対象とした場合には地盤の変位の最大値が計測でき

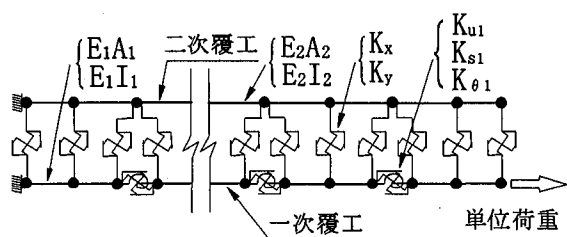


図-22 トンネルの等価軸剛性の算出モデル

るが、実地震波を対象とした場合には変位の最大値も時刻歴も計測できない。そこで、図-5に示した解析モデル中のトンネルの中心位置にトンネルの等価軸剛性を評価したはり要素を挿入し、三次元FEMによる動的解析を行った。トンネルが一次覆工のみの場合には、20リング分の等価軸剛性を考えて一本のほりにした⁸⁾。また二次覆工を有するトンネルの場合には、これを一樣な軸剛性を持つほりに置換する目的で、図-22に示すような解析モデルの一次覆工の端部に単位荷重を軸方向に載荷し、そのときの変位量からはり要素の等価軸剛性を求めた。

図-23はこのような解析モデルを用いて八戸t/5波を対象とした三次元FEMによる動的解析を行い、実験Jのトンネル埋設中心位置における正負の変位の最大値が発生した1.71秒と1.81秒時の地盤の軸方向変位および実験J1と実験J2のトンネルの軸方向変位の同時刻における分布を示したものである。この変位分布から、一次覆工のみの場合のトンネルの軸方向変位は地盤の変位には追従して変形しているのに対して、二次覆工がある場合のトンネルの軸方向変位は地盤の変形には追従せず、比較的長い区間の地盤の平均的変位に対応して変形していることがわかる。

6. 結論

地震動がトンネル軸方向に作用する場合を対象にした層厚が変化する地盤中のシールドトンネルの縦断方向の地震時挙動に関する模型振動実験とその解析結果から、以下の結論が得られた。

- ①本実験で用いた模型地盤は軸直角方向の自由端の影響がほとんどなく、トンネルから離れた位置では無限に広がる自由地盤とほぼ同じ挙動をしている。
- ②4種類の入力地震波のうち八戸t/5波の場合にはトンネル模型に発生する軸ひずみは最大となった。軸方向の自由端の影響を受ける可能性がある断面を除いて、実地震波による実験から得られた軸ひずみの最大応答(入力加速度1galあたり)は、正弦波を対象とした実験の場合の最大応答ひずみ(厚い層の地盤の共振時)の1/2程度となっている。
- ③地震動が軸方向に作用する場合、シールドトンネルが二次覆工を有すると一次覆工の軸ひずみは低減され

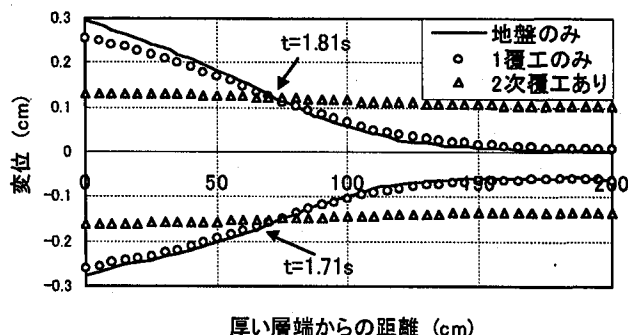


図-23 地盤とトンネルの変位分布モード

る。

- ④トンネルの軸線に沿った軸方向の変位分布を的確に算定できれば、本研究に用いたモデルによる解析結果と実験結果とは一致しており、本研究に用いたシールドトンネルの縦断方向モデルは、地震動がトンネルの軸方向に作用する場合の解析に有効である。
- ⑤地震動がトンネル軸方向に作用する場合、シールドトンネルに発生する軸力を正確に算定するためには、トンネルの軸線に沿った地盤の軸方向変位を適切に算定することが解析上最も重要であり、三次元FEMにより忠実に算出された地盤変位を用いた場合にはシールドトンネルの地震時挙動を説明できる。

7. おわりに

本論文は層厚が変化する地盤中のシールドトンネルの軸方向に地震動が作用する場合のトンネル縦断方向の挙動を模型実験とその解析から検討したものであるが、ここで述べた解析方法や得られた知見は実際のシールドトンネルにも適用できると考えている。シールドトンネルの耐震設計上の観点から見るとやや複雑な面もあり、簡易な設計法の確立が望まれるが、静的に求める地盤変位をトンネルの構造モデルに静的に入力するいわゆる狭義の応答変位法では、現在のところまだ必要な精度でもって設計を行うには到っていないように思われる。しかし、今後シールドトンネルにおいても耐震設計を要求されるケースが増加すると予想されることから、ここに述べたような解析手法を用いて多くの数値実験を行い、その適用精度の検証を行うとともに、それらの結果を用いて簡易な設計法を提示するか、または数値実験から実験式を作って耐震設計の簡単な照査ができるようにするなどの検討が必要になるものと考えている。

謝辞：本論文をまとめるにあたって、実験や解析などで多大なご助力をいただいた東急建設(株)高松伸行博士、当研究室の修士課程修了者である深井直光氏(現日本シビックコンサルタント(株))、大井純氏(現大成建設(株))、高橋裕輔氏(現建設省)ほか、本研究に関係された各位に感謝する次第

である。また、本実験には、東洋大学工学部土木工学科の多目的大型振動装置(DLS-3000-15)を用いているが、その使用に際して同大学工学部、新延泰生教授にいろいろと便宜を図っていただいたことを付記し、深く感謝する次第である。

参考文献

- 1) 何川, 胡仁倩, 釜范真人, 小泉淳: 地震動が軸直角方向に作用する場合の層厚が変化する地盤中のシールドトンネルの縦断方向の挙動について, 構造工学論文集, Vol.45A, 1999年3月.
- 2) 吉川恵也: 大深度地下鉄道の技術と課題, トンネルと地下, 第21巻1号, pp.37~48, 1990年1月.
- 3) 江守一郎: 模型実験の理論と応用, 技報堂出版, 1985年.
- 4) 香川崇章: 土構造物の模型振動実験における相似則, 土木学会論文報告集, 第275号, pp.69~77, 1978年7月.
- 5) 丹羽正徳, 八幡夏恵子, 越井太郎: 振動実験用地盤模型材料としてのシリコンゴムの動特性, 第23回土質工学研究発表会講演集, No.380, pp.1001~1002, 1988年6月.
- 6) 土木学会: 動的解析と耐震設計[第1巻] 地震動・動的物性, 技報堂出版, pp.91~103, 1989年.
- 7) 村上博智, 小泉淳: シールド工用セグメントのセグメント継手の挙動について, 土木学会論文報告集, 第296号, pp.73~86, 1980年4月.
- 8) N.Takamatsu, H.Murakami, A.Koizumi: A study on the bending behavior in the longitudinal direction of shield tunnels with secondary linings, Proc. of ITA Congress Towards New Worlds In Tunnelling, Acapulco, 1992.
- 9) 小泉淳, 村上博智, 西野健三: シールドトンネルの軸方向特性のモデル化について, 土木学会論文集, 第394号, III-9, pp.79~88, 1988年6月.
- 10) 高松伸行, 小泉淳, 村上博智: 二次覆工されたシールドトンネルの軸方向挙動に関する覆工間相互作用について, 第3回トンネル工学研究発表会論文・報告集, Vol. 3, pp.55~62, 1993年11月.
- 11) 土木学会: 動的解析と耐震設計[第2巻] 動的解析の方法, 技報堂出版, pp.47~57, 1989年.
(1998年9月18日受付)