

(172) 二次覆工されたシールドトンネルの模型振動実験について

東急建設(株) 高松伸行・日本シールドエンジニアリング(株) 深井直光
早稲田大学 小泉 淳・早稲田大学 村上博智

1. はじめに

二次覆工されたシールドトンネルの地震時の挙動を調べる目的で模型振動実験を行った。本研究は、①相似則を考慮し、セグメントリング10リング分の等価剛性¹⁾を有するリングとリング継手とからなる模型を用いている、②セグメントリングのみで構成されたトンネルと、これに二次覆工を施したトンネルとを用いて、トンネル全体の剛性の違いによる挙動に着目している、③洪積地盤と沖積地盤とからなる不整形地盤を対象としている、④トンネル軸方向と軸直角方向の2方向から振動を与えている、などの特徴を有している。本報告は、振動台入力波として正弦波を用いた場合の、沖積層の一次共振時における地盤とトンネルの変形について考察を加えたものである。

2. 実験で用いた模型

(1) 対象とするトンネルと地盤

実験の対象とするシールドトンネルは図-1に示す外径7.0m、仕上り内径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形セグメントを想定している¹⁾。セグメントリングの弾性係数は、 $E_1=3.9 \times 10^5$ kgf/cm²とし、二次覆工は現場打ちコンクリートを想定して厚さ20cmと定め、その弾性係数は $E_2=2.7 \times 10^5$ kgf/cm²とした。また、リング継手の軸引張ばねのばね定数と回転ばねのばね定数は文献2)よりそれぞれ $K_{a1}=1.44 \times 10^6$ kgf/cm、 $K_{a2}=1.66 \times 10^{11}$ kgf・cm/radとした。

地盤については、大都市における実測のボーリング調査結果³⁾を参考に、洪積層(単位体積重量1.9tf/m³、変形係数750kgf/cm²)から沖積層(単位体積重量1.8tf/m³、変形係数100kgf/cm²)にまたがる不整形地盤を想定した。

(2) 相似模型

本実験では、地盤模型に生じる慣性力と弾性力とが支配的な物理量であると考えられるため、これら2つの力の比から相似則を定めた⁴⁾。模型と実物との相似比を定めるにあたっては模型の大きさや使用する材料の選択範囲から、長さ、弾性係数および密度の相似比を基礎相似比とし、時間と加速度の相似比を求めた(表-1)。この様にして定めた相似比を用いてシールドトンネルを忠実に模型化すると、トンネル軸方向には、セグメントリング模型とリング継手模型が相当密に配置されることになる。そこで、本実験では10リング分のトンネルを剛性が一様に低下した1リングと考慮して模型化することとした。トンネル10リング分の軸剛性の有効率 α_r' と曲げ剛性の有効率 α_e' は文献1)に示す方法にしたがって算定し、これらの値を平均した $\bar{\alpha} = 7.63 \times 10^{-3}$ を用いてセグメントリング10リング分の各種等価剛性を定めた。

表-2は対象とした実物の各種弾性係数と、相似比から求めた弾性係数およびこれらの結果から選択した模型材料の弾性係数を示したものである。模型材料の弾性係数はそ

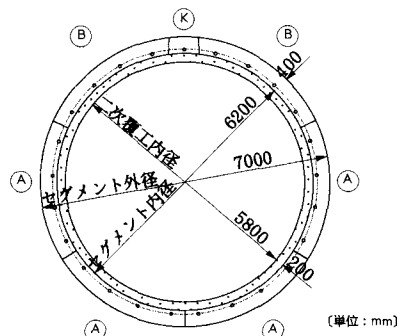


図-1 対象としたトンネル

表-1 相似則

	密度 P	長さ L	弾性係数 E	時間 t	加速度 a	ひずみ ϵ
相似則	ρ_m / ρ_s	l_m / l_s	E_m / E_s	$L \sqrt{\frac{P}{E}}$	$\frac{e}{P \cdot L}$	ϵ_m / ϵ_s
相似比	$1.0 / 1.8 = 0.556$	0.01	0.01	7.5×10^{-2}	1.8	1.0

表-2 弾性係数 (単位: kgf/cm²)

	沖積層	洪積層	一次覆工	リング継手	二次覆工
対象とした実物のE	100	750	2976	810.2	2.7×10^5
相似比から求めたE	1.0	7.5	29.76	8.102	2.7×10^4
実験に用いた材料のE	1.2	7.3	28.0 (73.0)	9.8 (39.7)	3.5×10^4

注) カッコ内の値は一次覆工模型に水性ペンキを塗布した場合の見かけの弾性係数

それぞれの要素試験から求めた。

図-2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-3に示すように、長さ200cm、幅80cm、高さ28cmで長さ方向中間部で洪積層から沖積層へ変化する地盤を想定した。地盤は弾性体と仮定し、地盤材料にはシリコンゴムを用いた。地盤材料であるシリコンゴムとトンネル材料である天然ゴム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ンキを塗布し被膜とした。ペンキを塗布することで、一次覆工模型とリング継手模型の見かけの弾性係数は模型材料単体の弾性係数よりも大きくなった(表-2参照)。

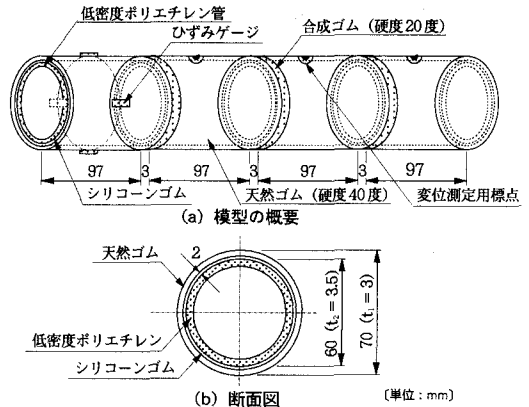


図-2 トンネル模型

3. 実験概要

実験は、トンネル模型を埋設しない地盤だけの実験と一次覆工のみのトンネルを埋設した実験および二次覆工されたトンネルを埋設した実験の3種類を行っている。実験名は表-3に示すとおりである。

実験は、地盤模型の底面を振動台に固定し、トンネル軸方向および軸直角方向から正弦波(実験Dおよび実験D1では最大80gal、実験D2では最大50gal)を入力して行った。加振には、動電型の振動台(最大加速度3.3G、最大加振力3000kgf、加振振動数範囲2~100Hz)を用いた。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、定常振動時に各種の計測を行った。

計測項目は、図-3に示す地盤表面およびトンネル埋設高さにおける地盤の加速度と地盤変位およびトンネルの変位である。地盤変位は、図-4に示すように、地表から15cmの深さの地中に埋設した外径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貼付した標点のぶれ写真を撮影して求めた。また、トンネルの変位は、図-2に示すように、トンネル模型上端に貼付した標点のぶれ写真から求めた。

4. 実験結果および解析方法

図-5は、軸方向に加振した場合のトンネル埋設高さにおけるトンネル横断面方向の地盤変位分布(振動台加速度の最大50gal当り)を示したものである。縦軸はトンネル埋設位置を零としたときの地盤自由端方向の距離を示したものである。トンネル位置を対称軸として対称な2点では平均した値を示している。地盤変位の実験結果を求めるにあたっては、地盤深さ方向の変位分布の実験結果から、地盤模型は正弦波状のせん断振動をしていることが確認された⁵⁾ため、地盤変位は地表面の変位計測結果をもとにして求めた。

図-5を見ると、実験Dでは、それぞれの断面で均等に地盤は変形しているのに対して、トンネルを埋設するとトンネルの剛性の影響によりトンネル近傍の地盤の変形は小さくなっていることがわかる。また、トンネ

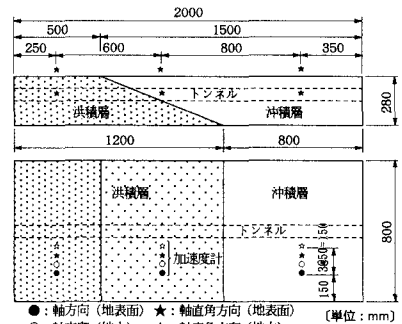


図-3 地盤模型

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	D	D1	D2

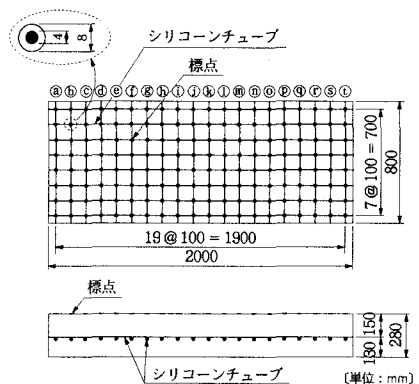


図-4 地盤変位測定用標点と格子

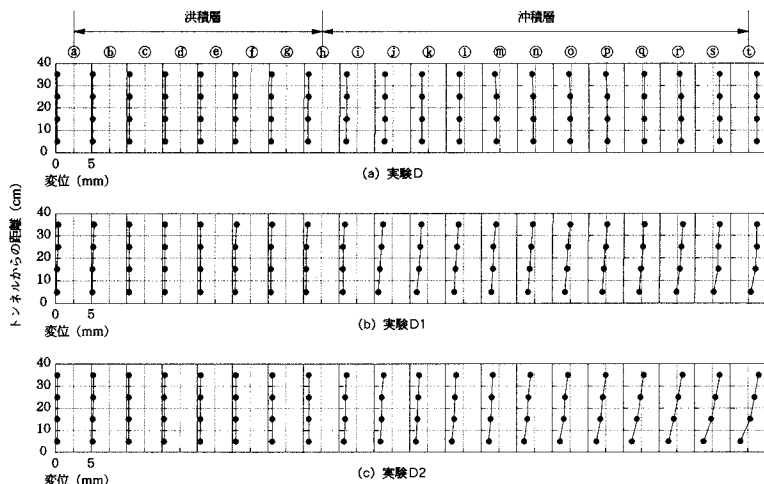


図-5 トンネル埋設高さにおける地盤変位分布（軸方向）

ルを埋設しても地盤模型の自由端付近ではトンネルを埋設していない場合の地盤変位とほぼ同じである。したがって、本実験で用いた地盤模型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同じ挙動をしていることが確認できた。このため、本実験の解析には応答変位法が適用可能であると考えた。

各種の解析値は、実験Dにより得られた地盤変位を図-6に示す解析モデル^{6), 7)}の地盤ばねを介して入力し求めた。なお、地盤ばねのばね定数 K_{gv} および K_{gv} は、直径70mmの載荷板を用いた平板載荷試験により得られた地盤反力係数 k_g （洪積層: 1.93kgf/cm²、沖積層: 0.28kgf/cm²）を用いて次式により求めた。

$$\left. \begin{aligned} K_{gu} &= k_{gu} \pi D_1 \bar{\ell}_s / 2, \quad k_{gu} = k_g / 3 \\ K_{gv} &= k_{gv} D_1 \bar{\ell}_s / 2, \quad k_{gv} = k_g \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 D_1 はトンネル模型の外径を、 $\bar{\ell}_s$ は模型1リング当りの長さを表わす。軸方向加振時の計算は、沖積層の地盤反力係数 k_{gv} の値を2分の1したものおよび3分の1したものについても行っている。

また、表-4は、加速度共振曲線⁸⁾から得られた地盤模型の共振振動数一覧である。図-7(a)は地盤のみ軸方向に加振した場合のトンネル埋設中心位置での地盤変位分布($f=5.7\text{Hz}$)で、図-7(b)は軸直角方向に加振した場合の地盤変位分布($f=5.2\text{Hz}$)である。図中、黒丸印は実験結果を、点線は実験結果をもとに最小2乗法を用いて平滑化した地盤変位分布である。実験結果は、振動台加速度の最大振幅50gal当りに換算した⁹⁾。これら2つの変位分布を見ると、トンネル埋設位置での地盤変位は地盤の急変部で大きく変化していることが確認できる。解析にはこれら平滑化した変位分布を用いた。

5. 実験結果と解析結果との比較

図-8(a)、(b)は、実験D1のトンネル変位の実験結果と解析結果とを示したものである。図-9(a)、(b)は、実験D2のそれらである。図中、黒丸印はぶれ写真から読み取った実験結果を、一点鎖線($k_{gv}=k_{gv}$)、実線($k_{gv}=k_{gv}/2$)および点線($k_{gv}=k_{gv}/3$)は解析結果を示している。

これらの図より、軸直角方向加振時の実験結果と解析結果とはよく一致している。また、トンネルの変形

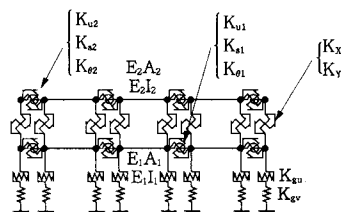


図-6 解析モデル

表-4 共振振動数 (単位: Hz)

		実験D	実験D1	実験D2
軸方向	沖積層	5.7	6.1	6.8
	地層変化点	12.9	13.5	15.0
	洪積層	12.9	13.7	15.3
軸直角	沖積層	5.2	5.3	5.4
	地層変化点	12.5	12.6	13.0
	洪積層	12.6	12.7	13.1

は地盤の変形とほぼ同じであることがわかる。

一方、軸方向加振時には、一次覆工のみのトンネルを対象とした実験（実験D1）では解析結果は実験結果をほぼ説明しているのに対して、二次覆工されたトンネルを対象とした実験（実験D2）では解析結果（ $k_{gw}=k_{gw}$ ）と実験結果とは良い符合を示しているとはいいがたく、地盤反力係数 k_{gw} を2分の1から3分の1程度小さくした場合に解析結果は実験結果をよく説明していることがわかる。また、トンネル全体の軸剛性が大きくなるほど変形は小さくなっており、実験Dによる地盤の変形とはかなり異なっている。

図-10は、実験D1における地盤変位の伝達率を示したもので、図-11は実験D2における地盤変位の伝達率を示したものである。図中、黒三角印は図-7に示す平滑化した変位に対するトンネルの変位の実験結果の割合を示す。洪積層では、地盤およびトンネルの変形が小さいため、変形の読み取り誤差が大きくなっており伝達率が1より大きくなっている。軸直角方向加振時の沖積層では、トンネルの剛性の大小にかかわらず伝達率はほぼ1であるのに対して、軸方向加振時には伝達率は1よりも小さくなり、トンネルの剛性がかなり大きくなる実験D2では、沖積層において0.35程度に低下している。

6. おわりに

以上により、二次覆工されたシールドトンネルの地震時の挙動を把握することができた。本報告で示した解析モデルを用いてトンネルの挙動を調べる場合、二次覆工されたトンネルに軸方向から地震が作用するような時には地盤変位の伝達率が大幅に低減されるため、特に地盤ばねのばね定数を慎重に定める必要があると考えられる。

□□□ 参考文献 □□□

- 1) 高松・荻野ら：二次覆工されたシールドトンネルの地震時における挙動について、第21回地震工学研究発表会講演概要、No. 107, pp. 409~412, 1991年7月。
- 2) 小泉・村上・西野：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。
- 3) 吉川恵也：大深度地下鉄道の技術と課題、トンネルと地下、Vol. 21, No. 1, pp. 37~48, 1990年1月。
- 4) 深井・高松ら：シールドトンネルの模型振動実験に用いた地盤の挙動について、土木学会第47回年次学術講演会講演概要集、Ⅲ-27, pp. 96~97, 1992年9月。
- 5) 高松・小泉・村上：シールドトンネルの地震時挙動に関する模型振動実験とその考察、早稲田大学理工学研究所報告第140輯、pp. 31~40, 1993年4月。
- 6) 高松・村上・小泉：覆工間にアイソレーション材を用いたシールドトンネルの軸方向挙動に関する研究、構造工学論文集、Vol. 38A, pp. 1397~1407, 1992年3月。
- 7) 高松・小泉ら：二次覆工されたシールドトンネルの軸方向の覆工間相互作用について、土木学会第48回年次学術講演会講演概要集、1993年9月（投稿中）。
- 8) 小泉・高松ら：シールドトンネルの模型振動実験について（その3）、土木学会第48回年次学術講演会講演概要集、1993年9月（投稿中）。
- 9) 大井・高松ら：シールドトンネルの模型振動実験について（その4）、土木学会第48回年次学術講演会講演概要集、1993年9月（投稿中）。

◆◆連絡先：〒150 東京都渋谷区渋谷1-15-21 ポーラ渋谷ビル8階 東急建設(株) 土木技術部 ☎03-5466-5276 ◆◆

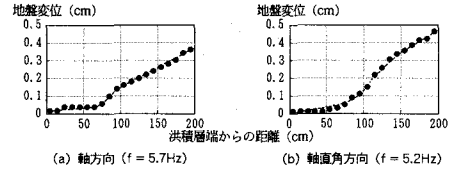


図-7 地盤変位分布（実験D）

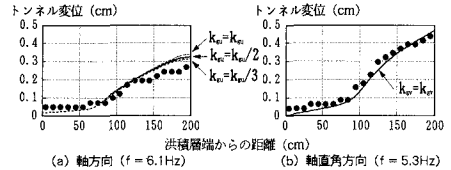


図-8 トンネル変位分布（実験D1）

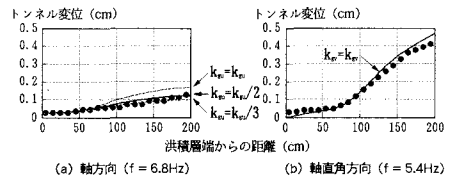


図-9 トンネル変位分布（実験D2）

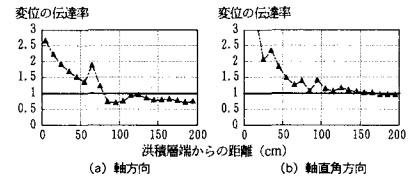


図-10 地盤変位の伝達率（実験D1）

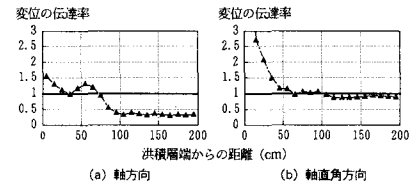


図-11 地盤変位の伝達率（実験D2）