

(109) シールドトンネルの耐震性能に関するプレストレス導入効果

一 軸方向交番載荷試験結果の分析と応答変位法による解析 一

機関組 技術研究所 正員 浦野 和彦

同上 正員 松原 勝己

1. はじめに

大地震時にシールドトンネルには、大きな軸方向引張りずみが生じ、この引張りずみが、リング間継手部に集中し、継手板の塑性変形や目開き量の増大により、漏水の恐れが生じることになる。この対策の一つとして、シールドトンネル一次覆工軸方向にプレストレスを導入し、軸方向耐震性能を向上させる方法が考えられる。筆者らは、このプレストレスの耐震効果をより有効に発揮させる手段として、セグメント間にゴムを介在させ、PC鋼棒を用いて1リングごとにプレストレスを導入する方法を提案し、RCセグメント模型による軸方向交番載荷試験を実施し、本手法の耐震効果を既に実証した¹⁾。

本報では、その試験結果に基づき簡易な軸剛性評価モデルを設定し、試験時の供試体間目開き量、PC鋼棒応力、ゴム圧縮応力と比較することによって、モデルの妥当性を検討した。さらに、提案した軸剛性モデルを用いた応答変位法により、地震時におけるシールドトンネルの軸方向の解析を実施し、トンネル諸元、PC鋼棒およびゴムの断面諸元、地盤特性等が地震時応力に及ぼす影響及び耐震効果の有効性を検討した。

2. 試験結果の分析

図-1に試験に用いたRCセグメント供試体の形状寸法を示す。この供試体は、想定した実大シールドトンネルと同様の挙動が得られる様に、実大シールドトンネルの2リング間から一次覆工の一部を切り出したものである。また、図-2にプレストレス導入の概念を示す。図-2に示している様に、地震時に周辺地盤より引張りずみを与えられた場合、プレストレスによってあらかじめゴムに与えられた圧縮ひずみとPC鋼棒の変形能がこの引張りずみを吸収する。また、ゴムの残留圧縮応力により、大変形時にも止水性が保持される。本試験では、プレストレス導入力PがP₀の時点でセグメント端面が面接触し、面接触後更にP_{PC}までプレストレスを導入した。

プレストレス導入時の軸変位と軸力の関係を示す軸剛性モデルとして、図-3に示す様に端面接触時(P ≤ P₀)はセグメントとPC鋼棒の並列バネとして端面非接触時(P ≥ P₀)にはセグメントとゴムを直列につないだものにPC鋼棒バネを並列に組み合わせたモデルを考えた。したがって、等価剛性(EA)_{eq}^Iは、

$$(EA)_{eq}^I = E_s A_s + \frac{1}{I_p} E_p A_p \quad (1)$$

$$(EA)_{eq}^{II} = \frac{E_s A_s}{1 + \frac{E_s A_s l_g}{E_g A_g l_s}} + \frac{1}{I_p} E_p A_p \quad (2)$$

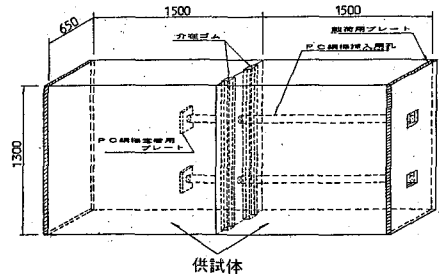


図-1 試験に用いたRCセグメント供試体

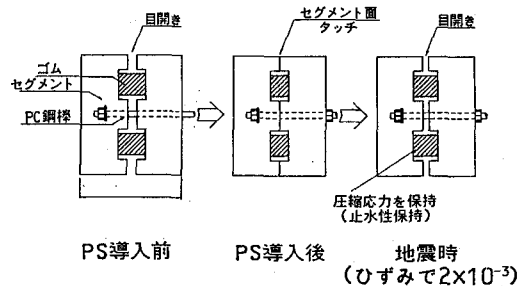


図-2 プレストレス導入の概念

ここに、 $(EA)_{eq}^I$: 端面接触時 ($P \leq P_0$) の等価剛性
 $(EA)_{eq}^{II}$: 端面非接触時 ($P \geq P_0$) の等価剛性
 となる。また、表-1に、実験材料の諸元を示す。

試験時の荷重-供試体目開き量、荷重-PC鋼棒応力、荷重-ゴム圧縮応力の関係を図4~6示す。図中に図-3の軸剛性モデルによる計算値を破線にて示したが、実験値と良く一致しており、提案した軸剛性モデルの妥当性がうかがえる。

表-1 試験材料の諸元

実験材料	諸元	備考	
ゴム	圧縮方向厚さ l_s (m)	3.85×10^{-2}	
	断面積 A_0 (m ²)	0.208	
	弾性係数 E_0 (tf/m ²)	532	プレストレス導入時のゴム応力と変形の関係より推定
PC鋼棒	長さ l_p (m)	2.248	
	断面積 A_p (m ²)	1.062×10^{-3}	PC鋼棒2本当り
	弾性係数 E_p (tf/m ²)	2.075×10^4	別途引張試験を実施して決定
コンクリート	軸方向長さ l_s (m)	3.000	
	断面積 A_s (m ²)	0.845	
	弾性係数 E_s (tf/m ²)	3.12×10^6	別途引張試験を実施して決定

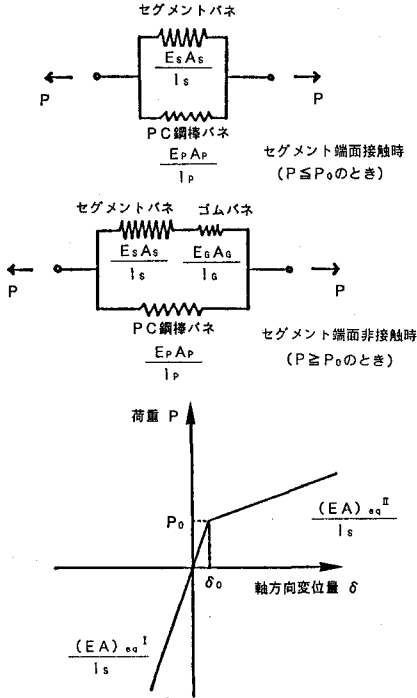


図-3 軸剛性モデル

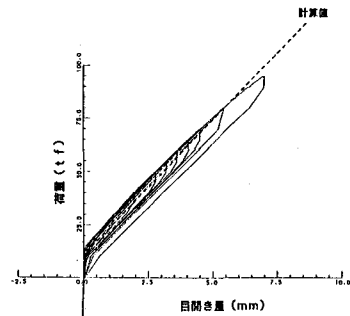


図-4 荷重と目開き量の関係
(実験値と計算値の比較)

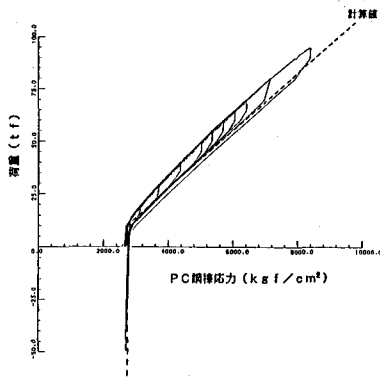


図-5 荷重とPC鋼棒応力の関係
(実験値と計算値の比較)

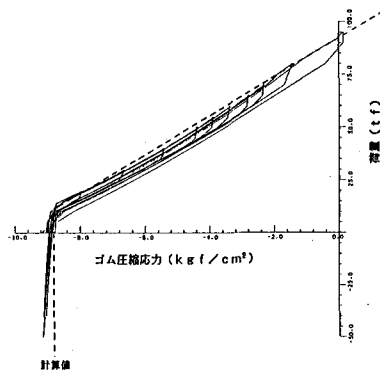


図-6 荷重とゴム圧縮応力の関係
(実験値と計算値の比較)

3. 応答変位法を用いた解析

2で述べた軸力-軸変位の関係を用いて応答変位法によりシールドトンネルに発生する軸方向応力を算定し、地震時のプレストレス導入の耐震効果を解析的に検証する。また、表-2に示す様にトンネル深度、口径、PC鋼棒およびゴムの断面諸元、プレストレス導入力、地盤特性をパラメータとして変化させた場合、これらのパラメータが地震時応力に及ぼす影響についても検討する。

応答変位法では、トンネルを地盤バネ k_G に支持された弾性床上の梁と考え、バネ端にトンネル深さでの地盤変位を与えることで、トンネルに生じる最大断面力を求めるものである。本解析では、図-7に示す様な軸方向の地盤変位 $U(x)$ （トンネル軸方向では正弦波形分布、その鉛直方向分布は1/4正弦波形と仮定）を作用させる。地盤変位 $U(x)$ は、

$$U(x) = U_0 \sin\left(2\pi \frac{x}{L}\right) \quad (3)$$

ここに、 U_0 ：トンネル深さでの地盤変位振幅

L ：地盤変位の波長

と表せる。また、入力地盤変位の算定に用いるスペクトル(L2地震動)を図-8²⁾、解析モデルを図-9に示す。

式(3)のような周期性を有する外力がトンネルに作用する場合、図-10に示すようにトンネルに生じる軸力も周期性を有する³⁾。したがって、軸方向の力の釣合い関係より得られるトンネルの軸方向変位 $\delta(x)$ に関する微分方程式は、

$$(EA) \cdot \frac{d^2 \delta}{dx^2} - k_G \delta = -k_G U \quad (4)$$

となる。式(3)、(4)及び図-10に示す境界条件等から求められた解析結果を表-3に示す。

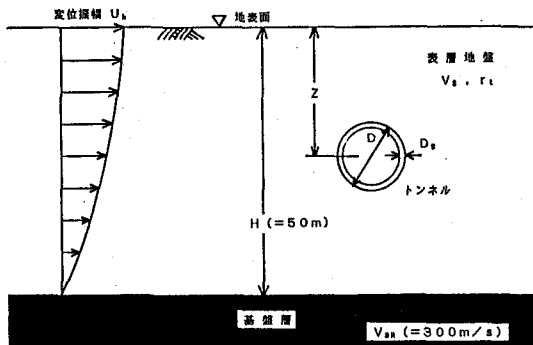


図-9 解析モデル

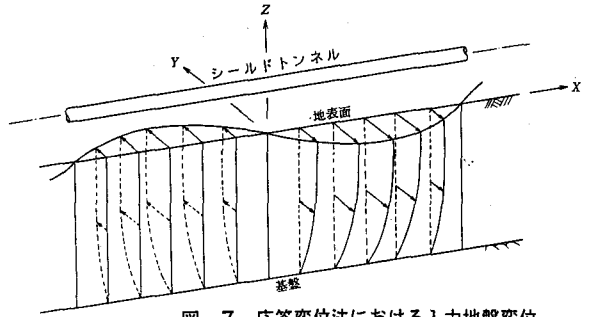


図-7 応答変位法における入力地盤変位
(トンネル軸方向変位)

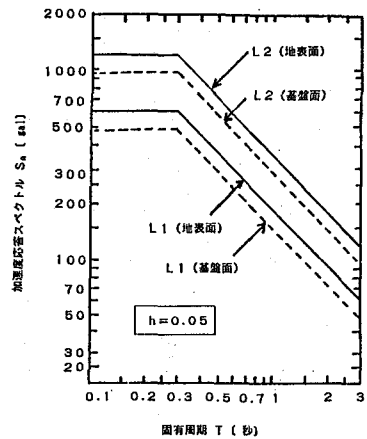


図-8 入力地震動の加速度応答スペクトル曲線
(文献2より)

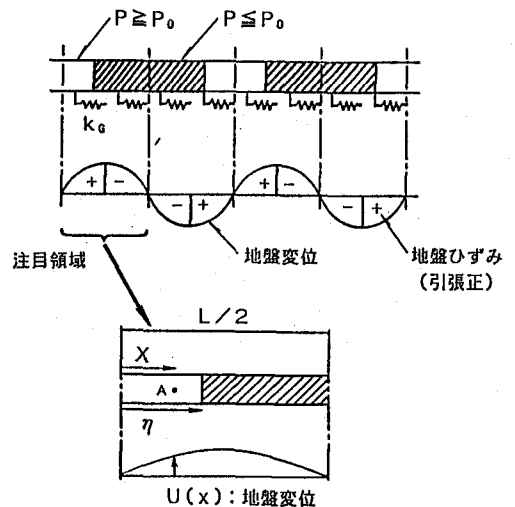


図-10 地盤変位と境界条件
(文献3を修正)

解析結果より、すべての解析ケースにおいて、
① PC鋼棒応力は降伏応力 (10500kg/cm²) 以下であり、安全性が確保されている。

② ゴム圧は高い圧縮応力を保持し、大地震時にも高止水性が期待できる。

以上の事が明らかになり、本手法の耐震効果が試験結果と同様に解析面からも実証された。

各パラメータの地震時応力への影響について見てみると、以下の事が判明した。

① トンネル口径と覆工厚をパラメータとしたケースにおいて、目開き量が最大値を示していることから、トンネル口径と覆工厚の影響が大きい。

② ゴム厚をパラメータとしたケースにおいて、最大引張時のゴム圧縮応力が最小値を示していることから、ゴム厚が大きい方がゴム圧縮応力の低減が小さく有利である。

③ ゴム断面積をパラメータとしたケースにおいて、プレストレス導入力および最大引張時のPC鋼棒応力が最大値を示していることから、ゴム断面積が小さい方がプレストレス導入力およびPC鋼棒応力が小さく有利である。

4. おわりに

本報では、提案した軸剛性モデル及び地震時の耐震効果の有効性を確認したが、さらに応答変位法による想定シールドトンネルの地震時応答解析のパラメータ・スタディを進めていき、その解析結果を設計に利用しやすい形の図表等にまとめる予定である。なお、本研究は建設省総合プロジェクト「地下空間の建設技術の開発（地下構造物の耐震設計技術の開発）に関する共同研究」⁴⁾の一環として実施しているものである。

参考文献

- 1) 脇田、松原、平沢、新井；シールドトンネルの耐震性能に関するプレストレス導入効果、土木学会年講第一部 1990
- 2) 荒川、川島；動的解析における入力地震動の設定法、土木技術資料 Vol.26, No.3, 1984
- 3) 川島、大日方、志波、加納；シールドセグメントの耐震性に関する研究、土木研究所資料 NO.2262, 1985
- 4) 建設省土木研究所、先端建設技術センター、奥村組、鹿島建設、鴻池組、清水建設、大成建設、飛鳥建設、間組、フジタ工業；地下構造物の耐震設計技術に関する研究 平成元年度共同研究報告書 1990

表-2 解析ケース

No		1	2	3	4	5	6	7	8
トンネル	口径 D (m)	16.0	16.0	6.0	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0
	覆工厚 Ds (m)	0.8	0.8	0.3	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
	深さ Z (m)	25.0	40.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0
	As/As	1.25×10 ⁻⁹	1.25×10 ⁻⁹	1.25×10 ⁻⁹	1.25×10 ⁻⁹	1.25×10 ⁻⁹	1.25×10 ⁻⁹	1.25×10 ⁻⁹	1.25×10 ⁻⁹
	Aa/Aa	0.25	0.25	0.25	0.25	0.50	0.25	0.25	0.25
	Ppc/Ppc	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.5	1.2	1.2
表層地盤	せん断波速度 Vs (m/s)	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0	100.0	200.0
	単位体積重量 γt (t/m ³)	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.6	1.8
備考	基本ケース	深さ変更	口径変更	PC鋼棒断面積変更	ゴム断面積変更	プレストレス導入力変更	地物変更	粘性変更	ゴム厚変更

As : セグメント断面積 (m²)
 Ap : PC鋼棒断面積 (m²)
 Aa : ゴム断面積 (m²)
 Ppc : プレストレス導入力 (tf)
 Ppc0 : セグメント端面接触に必要なプレストレス力 (tf)

表-3 解析結果

No	1	2	3	4	5	6	7	8
プレストレス導入力 Ppc (tf)	1219.4	1219.4	171.5	1219.4	2439.8	1524.9	1219.4	1219.4
最大圧縮軸力 P _c (tf)	-23504.0	-10208.0	-8925.1	-23352.0	-23351.0	-23338.0	-18412.0	-23484.0
最大引張軸力 P _t (tf)	1001.1	583.9	183.9	1631.4	1305.1	1378.0	970.5	1133.0
最大圧縮ひずみ ε _c (×10 ⁻⁴)	-1.954	-0.849	-5.278	-1.924	-1.941	-1.940	1.984	-1.952
最大引張ひずみ ε _t (×10 ⁻⁴)	6.777	2.948	8.524	5.989	6.577	6.741	5.928	6.690
最大圧縮時応力 σ _c ^a = P _c /As (tf/m ²)	-615.3	-267.2	-1611.4	-611.3	-611.3	-610.9	-425.6	-614.8
最大引張時応力 σ _t ^a = P _t /As (tf/m ²)	28.3	15.3	34.2	42.7	36.3	36.1	25.4	29.7
最大圧縮時 PC鋼棒応力 σ _c ^b (tf/m ²)	21031.0	23579.0	13371.0	8332.7	46596.0	27447.0	22390.0	21035.0
最大引張時 PC鋼棒応力 σ _t ^b (tf/m ²)	41160.0	32393.0	45189.0	26529.0	86238.0	47462.0	39198.0	40980.0
最大圧縮時 ゴム応力 σ _c ^c (tf/m ²)	-106.4	-106.4	-106.4	-106.4	-106.4	-106.4	-106.4	-106.4
最大引張時 ゴム応力 σ _t ^c (tf/m ²)	-92.4	-100.9	-88.8	-94.1	-92.9	-92.5	-94.2	-88.0
総目開き量 δ _o (mm)	1.02	0.442	1.28	0.895	0.987	1.011	0.889	1.004
入力データ U ₀	0.0464	0.0203		0.0464			0.0929	0.0464
L	339.41	338.41		339.41			424.26	339.41
K ₀	7346.9	7346.9		7346.9			1632.7	7346.9

(注) 表中において引張側を正とする。