

(107) 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

東急建設(株) 高松伸行
 早稲田大学 荻野竹敏・村上博智
 東洋大学 小泉 淳

1. はじめに

二次覆工を有しないシールドトンネルはリング継手が存在することによりかなりフレキシブルな構造であるので、地震の影響は吸収しやすい。しかしながら、そのトンネルに二次覆工を付加した場合にはフレキシビリティが損われるため、地震時には一次覆工のみのシールドトンネルより大きな断面力を受けることとなる。筆者らが行った二次覆工されたシールドトンネル模型の静的載荷実験¹⁾では、二次覆工に適切な間隔で継目を設ければ両覆工に発生する断面力を低減できることが明らかになっている。本報告は、二次覆工されたシールドトンネルを2本の並列した梁モデルに置換し、これに応答変位法により算出した地盤変位をばね支承を介して与え、二次覆工されたシールドトンネルの地震時挙動を数値実験によって明らかにしようとしたものである。

2. 検討概要

2-1. シールドトンネルの概要

検討の対象としたシールドトンネルは図-1に示すように仕上り内径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た。また、両覆工間にはジベルはなく、二次覆工を直打ちした場合と両覆工間にアイソレーション材(厚さ5mm)を挿入した場合とを取扱っている。解析ケースは、二次覆工の有無、二次覆工の打設状況および二次覆工継目の個数により表-1に示す7通りとした。ここで、継目とは二次覆工に何らかの処置を施し軸引張力および曲げモーメントに抵抗しない部分を言い、通常の打継目は継目以外の部分と同じ剛性を有するものとした。なお、計算に用いた各種弾性係数を表-2に示す。

2-2. 地盤の概要

検討区間の地質は、図-2に示すように極めて固結度の高い泥岩層の上に軟弱な沖積層が堆積した溺れ谷地形の地盤である。泥岩層は、N値が50以上を示し一軸圧縮強度も10~50(kgf/cm²)と大きい。一方軟弱な沖積層は、N値が3~5と低く、一軸圧縮強度も0.2~1.0(kgf/cm²)で全般に低い値を示す。また、溺れ谷部は谷壁の傾斜が急で、地層の分布が急変する。トンネルは、この溺れ谷を、泥岩層から軟弱層へ平均土被り2D程度で通過するものと仮定した。図中①~⑦は、ボーリング位置を示している。

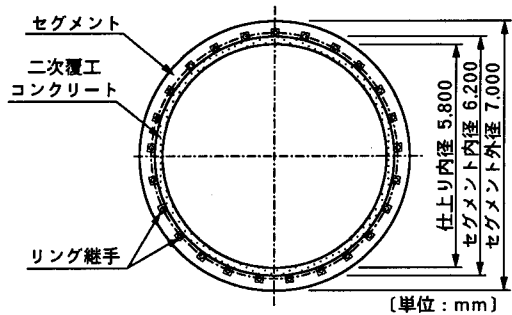


図-1. シールドトンネル概要

表-1. 解析ケース

TYPE	二次覆工	覆工間の処理
A	なし	——
B	継目なし	直打ち
C		アイソレート
D	継目1個	直打ち
E		アイソレート
F	継目5個	直打ち
G		アイソレート

表-2. 弾性係数

覆工材料	弾性係数 (kgf/cm ²)
一次覆工	$E_1 = 3.9 \times 10^4$
二次覆工	$E_2 = 2.7 \times 10^5$
アイソレーション材	$E_A = 75$

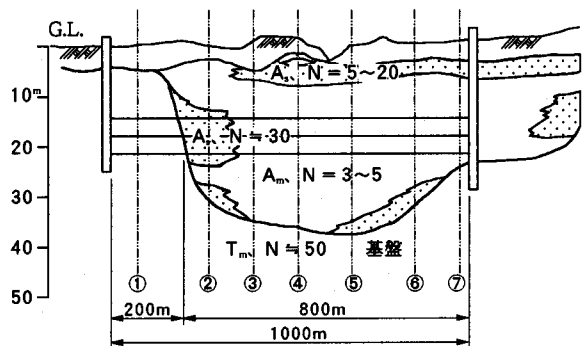


図-2. 地質概要

3. 解析方法

3-1. 構造モデル

シールドトンネルの構造モデルは、図-3に示すような2本の並列した棒-ばね構造モデルで、このモデルの一次覆工部分が地盤ばねを表す支承ばね K_{gs} 、 K_{gv} に支持されているものとした。図中、 $\alpha'_v \cdot E_1 A_1$ および $\alpha'_\theta \cdot E_1 I_1$ はセグメントリング n リング分の等価軸剛性と等価曲げ剛性を表し、後述する方法によりその値を求めた。また、 $E_2 A_2$ および $E_2 I_2$ は二次覆工の軸剛性と曲げ剛性を表している。 K_{u1} 、 K_{s1} および $K_{\theta 1}$ はリング継手の軸ばね、せん断ばねおよび回転ばねを表し、これらのばね定数はシールドトンネルの立体構造モデル²⁾ を用いて求めた。 K_{u2} 、 K_{s2} および $K_{\theta 2}$ は二次覆工間の接合ばねを表し、節点位置が継目の場合は、 K_{u2} (引張) = $K_{\theta 2} = 0$ 、 $K_{s2} = \infty$ とし、それ以外の場合はすべて無限大とした。さらに、 K_x は、両覆工間に発生するせん断力を伝達するばねで、そのばね定数は文献(3)にしたがい求めた。 K_y は、両覆工間に発生するトンネル軸直角方向の力を伝達するばねで、そのばね定数は後述する方法により求めた。 K_{us} 、 K_{vs} および $K_{\theta s}$ は立坑を評価するばねである。本検討では立坑とトンネルとの取り付けをフリーとしたのでそのばね定数はゼロとした。

3-2. セグメントリング n リング分の等価剛性

シールドトンネルの棒-ばね構造モデル²⁾ ではセグメントリング1リング分を棒部材に、リング継手1箇所をばね部材で評価している。しかしながら、検討区間のトンネル延長が長くなる場合には解析における節点数が多くなり計算機の容量の上で制約を受けることや、クリティカルな設計部材以外の計算量の増大など計算効率に問題がある。このようなことから、本検討では $n = 10$ とし、10リング分の等価剛性を有する梁とリング継手を評価するばね部材を交互に連結した一次覆工モデルを用いることにより検討を行った。

① n リング分の等価軸剛性 $\alpha'_v \cdot E_1 A_1$

図-4に示すように、シールドトンネルの棒構造モデル m リング分に軸力 N が作用した場合の軸方向変位 u_1 は、次式で与えられる。

$$u_1 = \frac{m \cdot N \cdot \ell_s}{E_1 A_1} + \frac{m \cdot N}{K_{u1}} \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 ℓ_s はセグメント幅、 $E_1 A_1$ はセグメントリングの軸剛性、 K_{u1} はリング継手部の軸ばねのばね定数を表す。

一方、セグメントリング n リング分の等価軸剛性を $\alpha'_v \cdot E_1 A_1$ (α'_v : トンネル n リング分の軸剛性の有効率) とおくと、軸方向変位 u_2 は次式で与えられる。

$$u_2 = \frac{\frac{m}{n} \cdot N \cdot (n \ell_s)}{\alpha'_v \cdot E_1 A_1} + \frac{\frac{m}{n} \cdot N}{K_{u1}} \quad \dots \dots (2)$$

したがって、 α'_v は、 $u_1 = u_2$ とおくことにより次式で与えられる。

$$\alpha'_v = \frac{K_{u1}}{K_{u1} + \frac{E_1 A_1}{\ell_s} \left(1 - \frac{1}{n}\right)} \quad \dots \dots \dots (3)$$

なお、セグメントリングに軸圧縮力が作用する場合には $\alpha'_v = 1$ とした。

② n リング分の等価曲げ剛性 $\alpha'_\theta \cdot E_1 I_1$

トンネル n リング分の曲げ剛性の有効率 α'_θ は、等価軸剛性と同様に考えて次式で与えられる。

$$\alpha'_\theta = \frac{K_{\theta 1}}{K_{\theta 1} + \frac{E_1 I_1}{\ell_s} \left(1 - \frac{1}{n}\right)} \quad \dots \dots \dots (4)$$

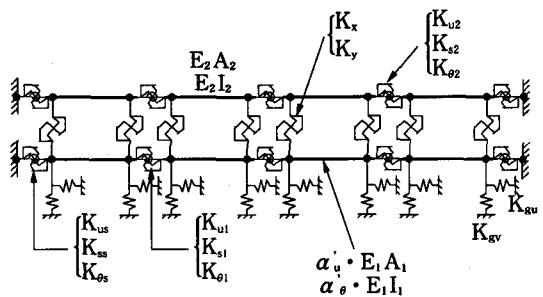


図-3. 解析モデル

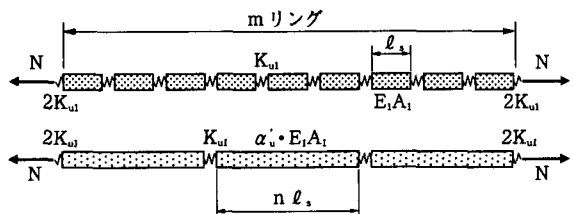


図-4. n リング分の軸等価剛性

3-3. 覆工間ばね定数 K_y

トンネル軸直角方向の覆工間ばね定数 K_y はアイソレーション材の有無により以下の2つの方法で求めた。

① 二次覆工がセグメントリングに直打ちされる場合

二次覆工されたシールドトンネルがトンネル軸方向に曲げを受けると両覆工の軸方向圧縮域では、覆工の厚さ方向にも互いに圧縮される。その圧縮有効厚さ t_1 および t_2 はそれぞれの覆工厚の2分の1⁹⁾ とすると図-5より両覆工の半径方向のばね定数 k_1 および k_2 は、

$$k_1 = \frac{E_1 \cdot A}{t_1}, \quad k_2 = \frac{E_2 \cdot A}{t_2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

となる。ここで、 E_1 および E_2 は両覆工の弾性係数、 A は解析モデルにおける節点間隔の2分の1を幅とする二次覆工の射影面積である。したがって、覆工間ばね定数 K_y はこれらのばねを直列につないだものと考えて次式のようになる。

$$K_y = \frac{k_1 \cdot k_2}{k_1 + k_2} \quad \dots\dots\dots (6)$$

② アイソレーション材を用いる場合

アイソレーション材を用いる場合には、上述の両覆工の半径方向ばねの間にアイソレーション材を評価したばねが直列につながれているものとする。アイソレーション材の半径方向のばね定数 k_A は、アイソレーション材の弾性係数および厚さをそれぞれ E_A 、 t_A とすると以下のようになる。

$$k_A = \frac{E_A \cdot A}{t_A} \quad \dots\dots\dots (7)$$

したがって、覆工間ばね定数 K_y は次式のようになる。

$$K_y = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot k_A}{k_1 \cdot k_2 + k_2 \cdot k_A + k_A \cdot k_1} \quad \dots\dots\dots (8)$$

3-4. 入力地震波

図-2に示すように地盤の急変部が存在したり表層厚が変化するような地盤の地震時の挙動はかなり複雑になると考えられるが、ここでは、入力地震波の最大振幅は表層地盤が最も厚い部分の変位振幅とし、波長は検討区間内の各ボーリング位置間で得られた調和平均波長の平均値を有する単純正弦波としてトンネル軸方向に対して45度の方向から入射するものと仮定した。なお、トンネル位置における地盤の最大変位振幅は応答変位法により求めた。

4. 検討結果とその考察

図-6は、TYPE Bの軸直角方向変位図である。また図-7および8はTYPE AとTYPE Bのそれぞれの曲げモーメント図である。計算結果から、二次覆工を施したトンネル全体の剛性が上がってもトンネルが地盤の動きに追従するため軸直角方向の変位分布は入力波とほとんど

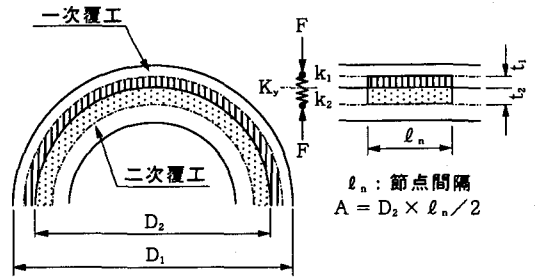


図-5. 覆工間ばね K_y

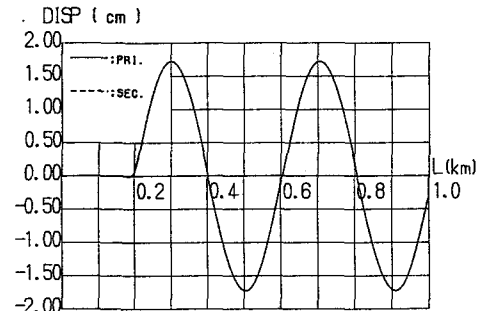


図-6. 軸直角方向変位図 (TYPE B)

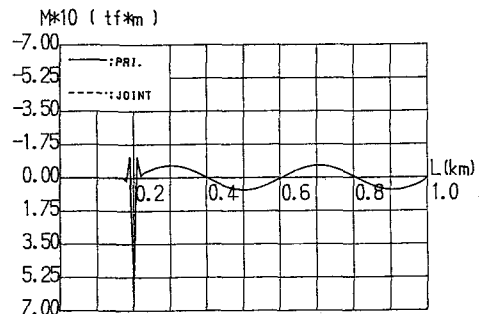


図-7. 曲げモーメント図 (TYPE A)

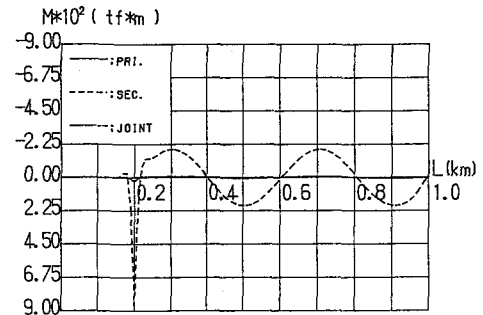


図-8. 曲げモーメント図 (TYPE B)

変わらないことがわかった。したがって、地盤急変部以外では、一次覆工に発生する曲げモーメントは一次覆工のみの場合でも二次覆工を施した場合でもほとんど変わらなかった。一方、二次覆工は、一次覆工に比べ剛性が大きいと過大な曲げモーメントが発生した。図-9は、TYPE Dの曲げモーメント図を、図-10はTYPE Fの曲げモーメント図を示す。図-9より、地盤急変部に継目を設ければ二次覆工に発生する過大な曲げモーメントをかなり低減できることが明らかとなった。また、TYPE Fのように継目を多く設けると二次覆工に発生する曲げモーメントを低減できることがわかった。表-3は、各タイプに発生する断面力の最大値を示したものである。この表を見るとアイソレーション材を用いることによる曲げモーメントの低減効果はそれ程顕著には表れていない。これは、想定したアイソレーション材が薄く、両覆工の変位を十分に吸収できなかったためと考えられる。

5. おわりに

以上、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以下のことが得られた。

- ① トンネル軸直角方向の挙動は、トンネル軸方向の挙動とは異なり、トンネル全体の剛性が大きくなっても応答変位はほぼ地震動に追従する。したがって、二次覆工を施しても一次覆工の負担する断面力は一次覆工のみの場合とほとんど変わらず、また、二次覆工が負担する断面力も大きな値を示す。
- ② 地盤が急激に変化する位置に二次覆工継目を多く設けると、二次覆工が負担する断面力を低減できる。
- ③ アイソレーション材を厚くし、両覆工間の変位差を吸収できるような構造とすれば、二次覆工が負担する断面力を低減できる可能性がある。

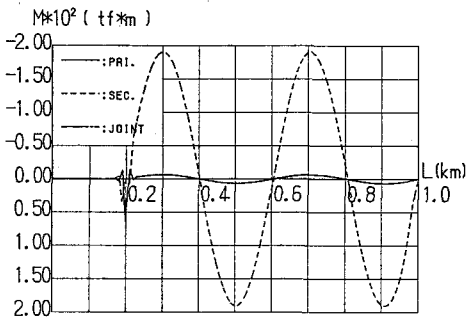


図-9. 曲げモーメント図 (TYPE D)

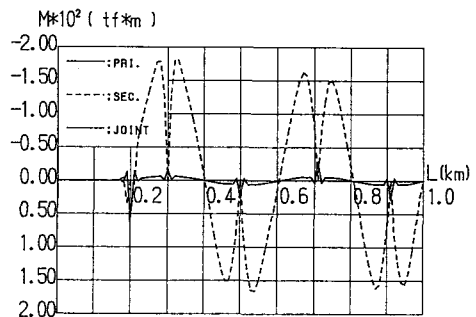


図-10. 曲げモーメント図 (TYPE F)

表-3. 最大発生断面力

TYPE	一次覆工			リング継手		二次覆工		
	N ₁ (引張)	N ₁ (圧縮)	M ₁	N ₂ (引張)	M ₂	N ₂ (引張)	N ₂ (圧縮)	M ₂
A	38	5851	+60	49	+60	—	—	—
B	33	5491	+28	0.0	+28	2261	1728	+860
C	31	5491	+63	336	+63	2085	1728	-191
D	31	5491	+63	336	+63	2085	1728	-179
E	33	5484	+29	35	+29	1821	1549	+836
F	33	5494	+63	161	+63	1534	1553	-186
G	33	5494	+63	161	+63	1534	1553	-177

《単位: N₁ (tf)、M₁ (tf・m)》

参考文献

- 1) 蔵品・村上：二次覆工されたシールドトンネルの軸方向挙動について(その3)、土木学会第45回年次学術講演会概要集、Ⅲ-22、1990。
- 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、1988.6。
- 3) 佐久間・石田・上原：一次覆工・二次覆工間のせん断特性を考慮したシールドトンネルの軸剛性評価、土木学会論文集、第424号、Ⅲ-14、1990.12。
- 4) 村上・小泉：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、1980.4。

◆◆連絡先：〒160 新宿区大久保3-4-1 早稲田大学理工学部土木工学科村上研究室 ☎03-3203-4141 ◆◆