

(105) アイソレーションシートを施工したシールドトンネルの 軸方向剛性と地震時ひずみの二次覆工への伝達

東京湾横断道路(株) 内田恵之助
同上 和佐勇次郎
同上 ○吉田幸司
(株)オリエンタルコンサルタンツ 田中 努

1. はじめに

シールドトンネルの耐震性や地盤沈下に対する安全性を確保するためには、トンネル軸方向の剛性やひずみの発生状態を正しく評価することが大切である。これまでのシールドトンネル軸方向の剛性に関する研究において、一次覆工と二次覆工の間にアイソレーションシート(以後「シート」とする)を施工した状態を対象としたものは数少なく、佐久間らの研究(文献)程度であろう。

筆者らは、シートの滑りに関する基礎的な実験およびシートを施工したリング状のシールドトンネルの大規模載荷実験を行い、その軸方向剛性や地震時ひずみの一次覆工から二次覆工への伝達について研究を行った。その結果、二次覆工打設時の乾燥収縮等を十分に吸収するシートでも、地震時の地盤の変形状態と実トンネルの覆工状態では、有効な滑り現象は発生せず、二次覆工には一次覆工とほぼ等しいひずみが発生することがわかった。なお本発表では、アイソレーション効果が現れ易いと考えられる軸方向載荷に対して述べる。

2. アイソレーションシートの基礎的な実験

シートの摩擦係数や滑る時の状態を把握するための基礎的な実験を行った。供試体はセグメントを模した幅50cm×奥行き50cm×厚さ15cmのコンクリートブロックに、シートを貼り、二次覆工に相当するコンクリートを厚さ15cmで打設したものである。載荷は一定の鉛直荷重を与えながら、二次覆工ブロックを固定し、セグメントブロックに繰り返しの正負交番水平荷重を与えて、せん断ずれを起こさせるものである。

実験を行ったケースは、直打ちの他にシート7種類、シートのセグメントへの定着方法3種類、セグメントの組立目違いを想定した段差の有無、鉛直応力3種類の組合せで計29ケースである。

この結果、不織布がある場合は、不織布がある程度せん断変形をした後に不織布とシートの間で滑りが生じ、段差や定着方法の影響はあまりなかった。また、これより摩擦係数は $\mu \approx 0.37$ が得られた。

3. シールドトンネルの軸方向載荷実験

3-1 実験概要

供試体の一次覆工は、厚さ20cm幅90cm外径3.3mのセグメントリングを長尺ボルトで10リング連結した。二次覆工は、シートを施工した後、厚さ15cmの鉄筋コンクリート構造として打設した。実験状況を写真-1に示す。

シートは1mm厚のEVAシートで、一次覆工に5mm厚の不織布とともに取り付けられたカーボディスクに溶着した。なお、セグメントのボルトボックスには発泡スチロールを埋め込んだ。

供試体への載荷は、供試体の一端で一次覆工と二次覆工を共に固定し、他端で一次覆工のみにジ

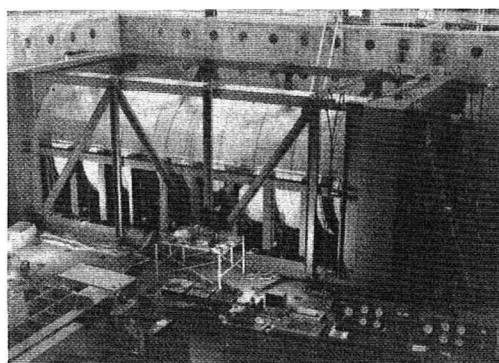


写真-1 実験状況

ヤッキを連結して行った。載荷方法は長手方向の軸力のみ、の載荷の他に、曲げモーメントのみ、軸力と曲げモーメントの同時載荷の計3種類とし、正負交番で載荷した。載荷荷重は耐震設計の設計ひずみまでとした。

3-2 実験結果

一次覆工のみの場合と二次覆工がある場合の軸方向載荷のケースで得られた、載荷軸力と一次覆工の伸縮量の関係を図-1に示す。一次覆工のみの引張剛性は既往の剛性評価方法で近い値が得られ、圧縮剛性はコンクリート全断面有効の円筒の剛性より継手が存在することにより小さい値を示した。また、二次覆工がある場合の引張剛性は、一次覆工のみの引張剛性と両覆工を重ね梁とした引張剛性の中間にあり、3-3節の解析モデルでよく表現できることがわかった。また、図-3(a),(b)の実線で示したように二次覆工がある場合のセグメントの変位や継手の目開き量の分布は、載荷側の右端から急に減少しており、覆工間に有為な力の伝達があることがわかる。

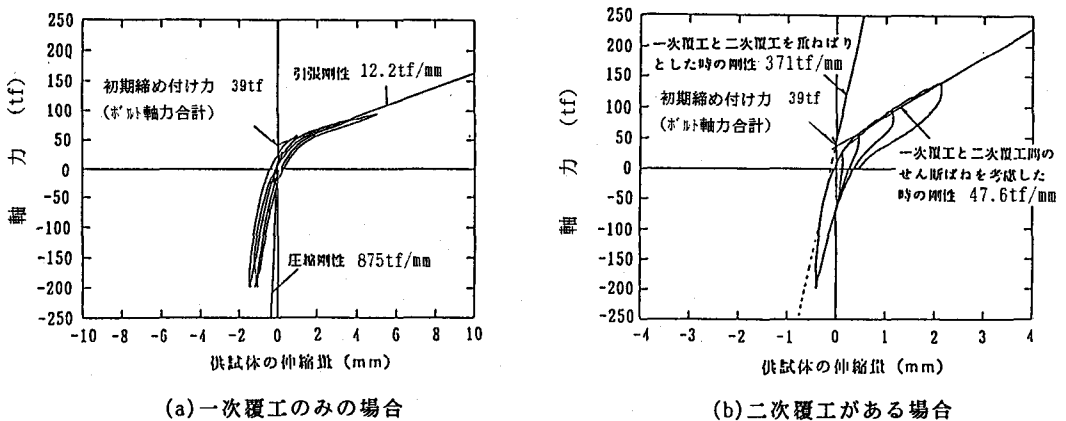


図-1 載荷軸力と一次覆工の伸縮量

3-3 解析モデルによる検討

解析モデルは図-2のように考え、一次覆工の剛性は一次覆工のみの実験で得られた非線形な荷重～変位関係から求め、二次覆工の剛性は供試体から抜いたコアの弾性係数より、 $EA = 2.85 \times 10^6$ tfと定めた。

シートのせん断バネは、セグメント両端のリングボルトの軸力差がシートのせん断抵抗力であるとし、これをセグメントと二次覆工の相対変位で除して求め、 $ks = 1.8 \text{ kgf/cm} / \text{cm}^2$ が得られた。一方、シートの基礎

礎の実験で得られた摩擦係数より、二次覆工の滑動抵抗力(=摩擦係数×二次覆工重量)は $S = 0.37 \times 3.2 \text{ tf} / \text{m} = 1.2 \text{ tf} / \text{m}$ となり、覆工間のせん断力がこれを上回ると二次覆工が滑り出すと推定された。

これらの条件で、実験の載荷状態に対して滑りを考慮して解析すると、図-3の密な点線のようになり、解析によるセグメントの変位や継手の目開き量の分布は、実験結果(実線)と大きく異なった。

一方、滑り考慮せず上記せん断バネ、およびこれの1/2の値の線形ばねを持つモデルで載荷状態を解析する

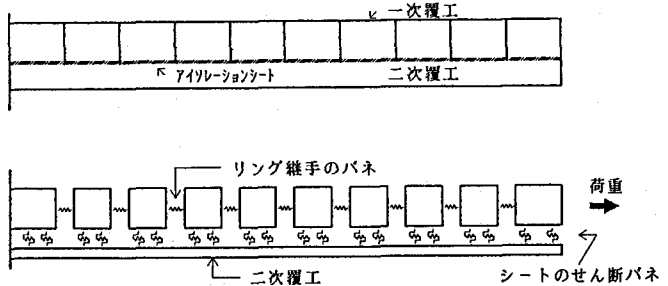


図-2 実験結果の解析モデル

と図-3の荒い点線と破線のようになり実験値にはほぼ一致した。これらの事より、実験では覆工間のせん断力が上記の滑動抵抗力を上回っても、覆工間は滑動していないことがわかる。

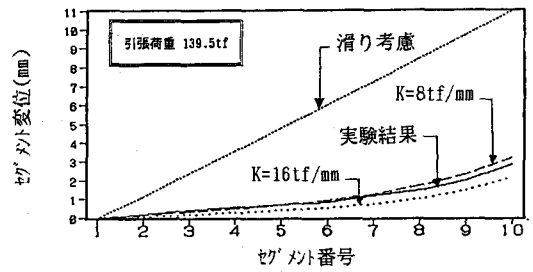
実験後供試体を解体し、観察しても覆工間には滑った形跡は見られなかった。これは、二次覆工打設時の圧力によりコンクリートがボルトボックスへ腹み出し、これがキーのような効果を果たしたことや、セグメント組立時の目違いによる段差の存在が原因と考えられる。この段差は、前述のシートの基礎実験では、容易に乗り越えられる程度のものであったが、セグメントがリング状に組み立てられたことにより図-4のようなリングとしての拘束（段差を乗り越えようとするときの面圧の増加）が生じ、二次覆工自重による滑動抵抗力以上の力を伝達していることが考えられる。

4. シールドトンネルの地震時挙動

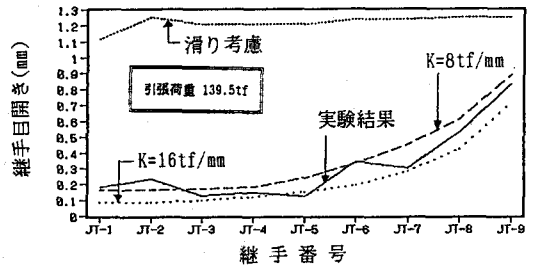
東京湾横断道路シールドトンネルの代表的な地盤条件における、耐震設計時の地盤変位($\delta = 2.6$ cm, $L = 420$ m, $\varepsilon_{\max} = 3.5 \times 10^{-4}$)を図-5の解析モデルに入力し、トンネルに発生する断面力を算定することによりシートの効果・影響を検討した。なお、トンネル地盤間ばねはFEM解析結果より $K_L = 8210$ tf/mとし、一次覆工はボルト初期締め付け力を考慮した非線形な等価剛性を持たせ、二次覆工は全断面有効のコンクリートとして表-1のように評価した。

図-6, 7に示した解析結果より、以下のようなことが判明した。

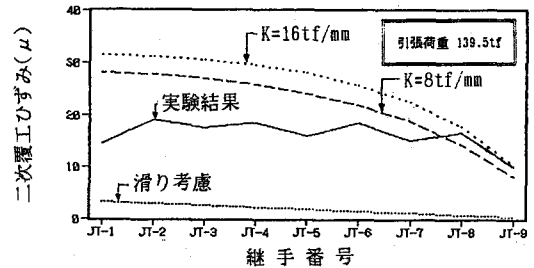
- ①覆工間がせん断バネで連結された場合、二次覆工の変形は一次覆工とほぼ等しくなり、二次覆工に発生する軸力は7130tfで、シートがなく両覆工が一体の場合の7530tfより若干小さい程度である。
- ②シートにより滑ると仮定した場合は、一次覆工の変位は若干増加し、二次覆工の変位は大きく減少する。したがって、二次覆工に発生する軸力はかなり低減され3230tfとなる。
- ③いずれのケースでも、二次覆工には引張強度($F_u = 2960$ tf)以上の軸引張力が生じ、ひびわ



(a) セグメントの変位量



(b) リング継手の目開き



(c) 二次覆工のひずみ

図-3 実験値と解析値の比較

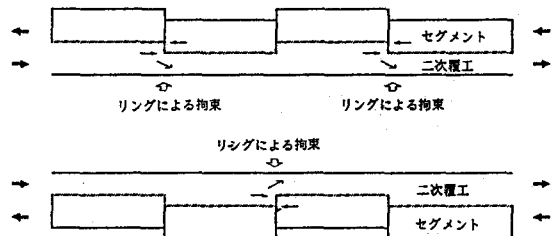


図-4 リングとしての拘束の概念

れが発生する。

本トンネルの場合、覆工間がせん断ばねで連結された状態になっていれば、一次覆工から二次覆工へのひずみの伝達率は90%以上になると考えられる。また、シートのせん断抵抗力が小さくて滑る場合でも、震時に受ける地盤変位の波長が長いために、二次覆工のひずみが累積され大きくなる。設計では安全側の条件を採り、前者の状態を想定する。

5. おわりに

今回実験を行ったような厚さのシートであれば、一次覆工がリング状に組まれた場合、セグメントに存在する凹凸や組立時に生じた段差を乗り越えて変形することは純粋な軸方向荷重状態でもかなり困難であると考えられる。実際の地震時には、さらに軸方向の曲げ変形や断面内のせん断変形が加わるため、覆工間が滑ることは考えにくく、滑ったとしても二次覆工にはびびわれが発生する程度の軸力は生じると考えられる。

このことから、二次覆工は軸方向鉄筋で補強することが必要となるが、一方、一次覆工の変形に対しては二次覆工も抵抗することとなり、予測しがたい地震時の地盤変形等に対しては、一次覆工の安全性を高めていることになると考えられる。

今後、同時に行った曲げモーメント荷重と軸力と曲げモーメントの同時荷重のケースについてもさらに研究を進める予定である。

最後に、シールドの荷重実験を共同研究として行って頂くとともに、貴重なご指導を頂いた建設省土木研究所の川島室長を始めとする多くの方々と、シートの基礎的実験や施工方法に関してご協力頂いた方々に、心より感謝の意を表します。

【参考文献】

佐久間・石田・上原・小泉：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，pp.251～259

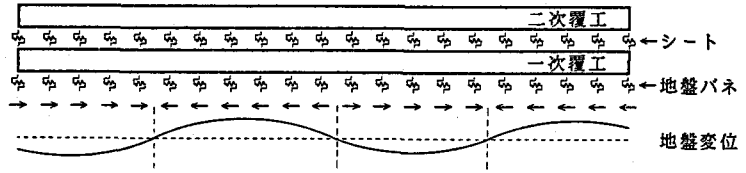
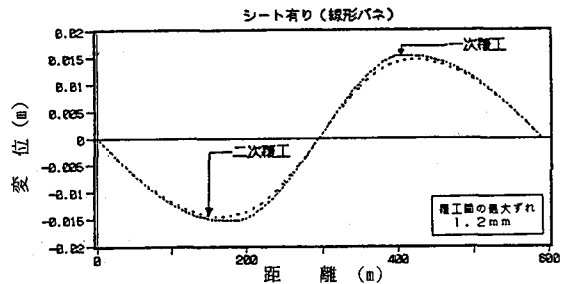


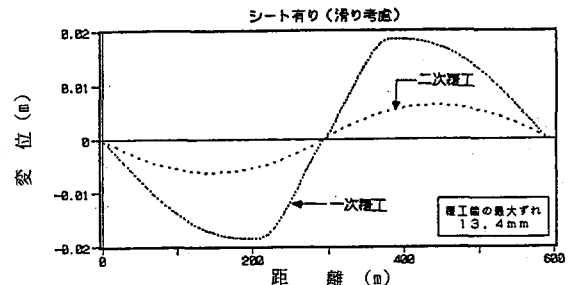
図-5 トンネルの解析モデル

表-1 トンネルの剛性

	EA(tf)	備考
一次覆工	4.13×10^6	$\varepsilon = 3.5 \times 10^{-4}$ 時
二次覆工	3.83×10^7	全断面有効



(a)シート有り／線形バネ



(b)シート有り／滑動考慮

図-6 トンネル変位

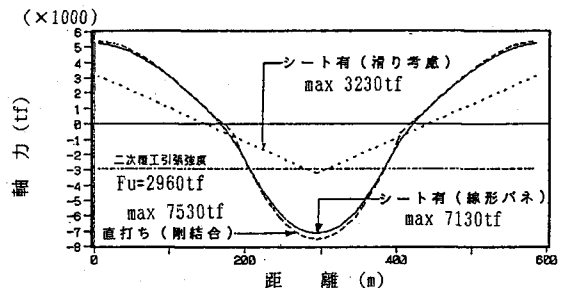


図-7 二次覆工の軸力分布