

# 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

## EFFECTS OF THE AXIAL STIFFNESS OF A SHIELD TUNNEL INCLUDING EFFECTS OF SHEARING INTERACTION BETWEEN PRIMARY AND SECONDARY LININGS

佐久間彰三\*・石田智朗\*\*・上原精治\*\*\*・小泉 淳\*\*\*\*

By Shouzou SAKUMA, Tomoaki ISHIDA, Seiji UEHARA and Atsushi KOIZUMI

In earthquake-proof designing on shield tunnel, the accurate evaluation of the axial stiffness of the tunnel is extremely important. Because the shield tunnel lining consists of many tunnel segments with joints, bolts, and other fasteners, and the inner surface is protected with a secondary lining, evaluation of the stiffness is not simple.

Shearing experiments were carried out on the lining models with different types of isolation. It was found that the shearing characteristic of isolation could for the most part be expressed by Coulomb's criterion.

Further, axial seismic responses of the shield tunnel were analyzed with a new analytical model that allowed for isolation effects and was verified with experimental results. It confirmed the observations that the axial response could be reduced by the insertion of an isolation sheet between the primary and secondary linings.

*Keywords: shield tunnel, secondary lining, isolation, seismic response*

### 1. はじめに

シールド工法は都市トンネルの構築工法として、最も一般的に用いられている工法の1つであり、道路トンネルへの適用を始めとした“大深度地下開発”に対しても、欠くことのできない施工法の1つとなっている。シールド工法により構築されるシールドトンネルの力学的特性の把握、地震時の安全性の確認に不可欠な、トンネル軸方向の剛性評価法の確立が、現在急務となっている。

シールドトンネルの力学的特性は、その横断方向と縦断方向（トンネル軸方向）とに分けて考えられるが、前者に関しては、現在までに二次覆工を含めた構造解析モデルがほぼ明らかにされている<sup>1)2)</sup>。一方、後者に関しては、シールドトンネルが非常に多くの継手を有する長大な構造物であり、これらの継手の適切な力学的評価の問題や、膨大な部材数をどのようにして構造モデルに組み

入れるか、一次覆工の内側に存在する二次覆工コンクリートを含めた剛性評価の問題、一次覆工と二次覆工との間の接合状況の評価の問題など多くの困難な問題をかかえており、一次覆工のみの場合に、その剛性評価がおおよそ把握できるようになりつつあり<sup>3)~6)</sup>、二次覆工を含めた構造解析モデルの検討が、現在盛んに進められている<sup>8)~13)</sup>。

今後、都市トンネルの需要がますます増加し、さらに、厳しい条件下でのシールドトンネルの建設が余儀なくされている。これに伴い、トンネルの周辺地山が急変する場合や、不等沈下が生ずる可能性が考えられる場合、またトンネルが併進したり交差する場合、さらには地震時の安全性を検討する場合など、シールドトンネルの軸方向の検討を避けて通れない状況となってきており、より信頼性が高くかつ経済的なシールドトンネルを構築するためには、二次覆工を含めたシールドトンネルの合理的な設計法の確立が急務となっている。

本報告は、特に海底道路トンネルなどトンネルの機能上、一次覆工と二次覆工との間に防水シート等を使用してシールドトンネルの覆工をアイソレーション構造とした場合を対象に、両覆工間の付着状況が、地震時にトンネル全体にどのような影響を及ぼすかを明確にすることを目的としたものである。まず種々のアイソレーション

\* 正会員 日本国土開発(株)エンジニアリング本部  
(〒107 港区赤坂4-9-9)

\*\* 正会員 工修 日本国土開発(株)エンジニアリング本部  
(〒243-03 神奈川県愛甲郡愛川町中津4036-1)

\*\*\* 正会員 工修 住友建設(株)技術研究所  
(〒329-04 栃木県河内郡南河内町仁良川1726)

\*\*\*\* 正会員 工博 東洋大学助教授 工学部土木工学科  
(〒350 川越市鯨井中野台2100)

材を挟んだ覆工の模型せん断実験を行い、両覆工間のせん断特性や付着性能等を明らかにし、次に両覆工間の付着状況を一次覆工と二次覆工との間のせん断特性として考慮することにより、シールドトンネルの軸方向挙動を合理的に説明することのできる構造モデルを提案した。最後にこの構造モデルに東京湾横断道路六社研究会（以下、六社研究会と称す）で実施した“シールドトンネルの軸方向剛性確認実験”（以下、確認実験と称す）をもとに、そこで得られたシールドトンネルの軸剛性を用いて一次覆工と二次覆工との間のせん断特性を考慮したシールドトンネルの地震時安全性について検討を行った。

## 2. 実験概要

### (1) 供試体および実験ケース

実験に用いた供試体は、一次覆工と二次覆工とをそれぞれ50×50×15 cmのコンクリート平板にモデル化したもので、両覆工の間にはアイソレーション材を挟んでいる。供試体は、まず一次覆工の平板を作製し、その上にアイソレーション材を所定の方法で挟み、最後に二次覆工コンクリートを打設して形成した。実験に用いたアイソレーション材の種類は、表-1に示すとおりで、一

表-1 供試体の種類

	1 直打ち方式	2 吹付け方式
アイソレーション材の種類	二次覆工 一次覆工	吹付け材 4mm
	シート方式(薄)	シート方式(厚水漏付)
	シート 0.4mm	シート 1.0mm 1.5mm 厚水漏
	シート方式(厚)	シート方式(突起付)
	シート 2mm	シート 8mm 2mm
	アイソレーション材の固定方法	1 押え板+コックリヒツ方式
コックリヒツ 押え板 不燃缶		固定用i' (x) コックリヒツ (i' (x) + i' (x))
9 吊り鉄筋金具方式		10 i' (x)埋込み方式
吊り鉄筋金具 コックリヒツ コックリヒツ		固定用i' (x) 固定用i' (x) (一次覆工埋込み)
セグメントの目違いの影響	11 せん断方向直角(厚シート)	12 せん断方向直角(薄シート)
	シート(S) 2mm 3mm	シート(S) 0.4mm 3mm
	13 せん断方向平行(厚シート)	14 せん断方向平行(薄シート)
	シート(S) 2mm 3mm	シート(S) 0.4mm 3mm

次覆工の上に二次覆工コンクリートを直打ちした場合 (Case-1)を含め、アイソレーション材の種類を変えたものの6ケース、またアイソレーション材の固定方法による違いをみるためのもの4ケース、さらに一次覆工セグメント組立て誤差による目違いの影響をみるためのもの4ケースの全14ケースとした。

また、固定方法については従来からあるものを主としたが、Case-10はディスクタイプの欠点と思われるディスクの高さによる二次覆工厚減少を防ぐ目的およびディスク取付け作業を省く目的で一次覆工製作時にディスクを埋め込んだ方法を試みた。

なお、一次覆工および二次覆工のコンクリートは、それぞれ設計基準強度400, 240 kgf/cm<sup>2</sup>としたが、28日強度は620, 410 kgf/cm<sup>2</sup>であった。

### (2) 実験装置および実験方法

実験装置の概要を図-1に示す。荷重は一次覆工と二次覆工との間のアイソレーション部に垂直応力( $\sigma_n$ )を加えたまません断変位を生じさせることができるように、それぞれ鉛直および水平の2本の油圧ジャッキを用いて行った。

鉛直応力は、二次覆工自重を考慮して $\sigma_n=0.4, 1.0, 2.0, 4.0$  kgf/cm<sup>2</sup>の4種類とした。また、せん断は1.0 mm/minの変位制御とし、せん断力がほぼ一定となるまで実施した。

計測項目は鉛直および水平の作用荷重、せん断変位および垂直変位であり、荷重はロードセルを用いて、また変位はストレインゲージタイプの変位計を用いてパソコンによる自動計測を実施した。

## 3. 実験結果

代表的な荷重( $\tau$ )-変位( $\delta$ )曲線を図-2に示す。また、各供試体の垂直応力( $\sigma_n$ )とピークせん断強度( $\tau_{max}$ )との関係を図-3に示す。

図-3から、各供試体とも垂直応力の増加に伴いせん断強度が増加し、それぞれ大小はあるものの摩擦係数 $\mu$

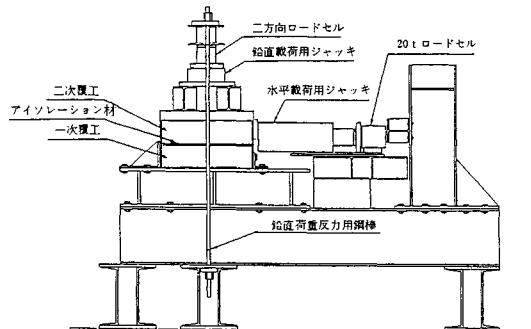


図-1 実験装置の概要

の存在がうかがえる。また、アイソレーション材の種類ではせん断抵抗は Case-2 の吹付け方式が一番小さく、Case-1 の直打ち方式が最大を示している。なお、吹付け方式の材料は、ほぼ粘性流体的な挙動を示し、せん断力が変位速度の対数に比例して増加することを確認した。

固定方法の違いによるせん断抵抗は、ディスク方式が小さく、吊り鉄筋金具方式が大きい値を示している。各方式の固定用部材は、Case-8 のディスク方式ではディスク内でせん断破壊を生じ、Case-10 のディスク埋め込み方式ではディスクとシートとの着着面でせん断され、また、その他のピン、金具部材は境界面でせん断されていた。

組立て誤差による目違いの影響をみると、平行目違いはせん断に対してほとんど影響を与えていない。直角目

違いでは Case-11 の厚いシートの場合にはシートは目違いを乗り越える挙動を示し、せん断抵抗にはほとんど影響を与えていない。しかし、Case-12 の薄いシートの場合には、目違い部の咬み合わせ現象が生じ、せん断抵抗も増大して最終的にはシートは目違い部で切断されていた。

以上の結果から、一次覆工と二次覆工との間のせん断特性は、アイソレーション材の種類やその取り付け方法などの違いにより多少異なった挙動を示すが、全体の傾向として垂直応力に対応した摩擦係数  $\mu$  が予測できるため、そのせん断特性を Coulomb の破壊規準である式(1)で評価した。

$$\tau = \tau_0 + \sigma_n \times \mu \dots\dots\dots(1)$$

- ここに、 $\tau$  :せん断応力
- $\tau_0$  :付着力 (=C)
- $\sigma_n$  :垂直応力
- $\mu$  :摩擦係数 (=tan  $\phi$ )

である。

表-2 に各ケースの結果から式(1)の直線回帰を行い付着力  $\tau_0$ 、摩擦係数  $\mu$  を求めた結果を示す。また、吹付け方式は後述のように、せん断速度に依存するが、表-2 中には、1.0 mm/min の結果を示している。

#### 4. シールドトンネルのモデル化

シールドトンネル軸方向のモデル化を行う場合に、次に示す2つの方法が考えられる。

- 1) 一次覆工を構成しているセグメント本体 (鋼製セ

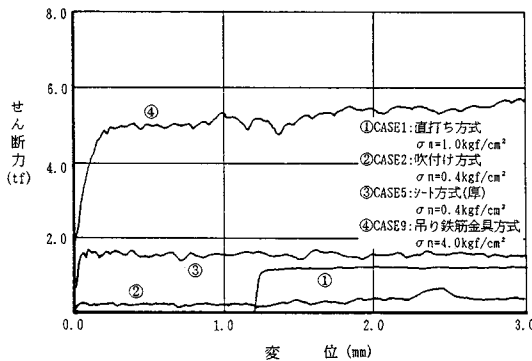


図-2 荷重-変位曲線

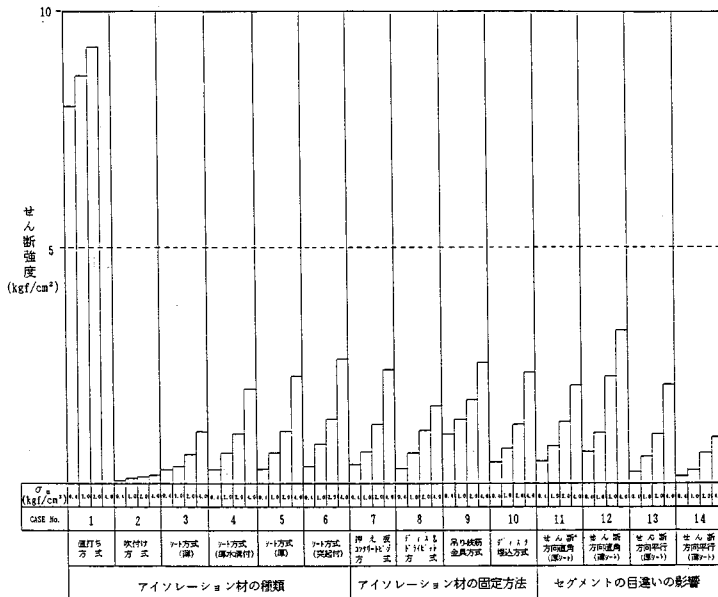


図-3 垂直応力カーピークせん断強度

表-2  $\epsilon_0, \mu$ 一覧表

CASE No.	構 要	せん断荷重ピーク時	
		$\epsilon_0$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\mu$
1		7.80	0.75
2	7177-7177材 の 種 類	直打ち方式	0.18
3		吹付け方式	0.18
4		シート方式(薄)	0.14
5		シート方式(厚)	0.09
6		シート方式(突起付)	0.16
7		7177-7177材 の 固 定 方 法	0.14
8	押し板+コナリシート方式	0.28	0.36
9	吊り鉄筋金具方式	0.92	0.42
10	ひし埋込み方式	0.22	0.54
11	ヒサノット の 目 途 ぎ の 形 態	せん断方向直角(薄シート)	0.36
12		せん断方向直角(厚シート)	0.48
13		せん断方向平行(厚シート)	0.05
14		せん断方向平行(薄シート)	0.09

グメントの場合には主桁・縦リブ・継手板・スキンプレート), セグメント継手, リング継手および二次覆工等を1つ1つ忠実にモデル化する方法。

2) シールドトンネルのセグメントリングおよび二次覆工をそれぞれ棒要素に, リング継手をばね要素に, また二次覆工コンクリートのクラック発生前後における剛性変化をばね要素にそれぞれモデル化する方法。

1) の方法は, トンネルを立体解析モデルにモデル化する方法であり, これを用いればシールドトンネルの挙動を把握することが可能となる。しかし, トンネル全体をこのような立体解析モデルに置換することは, シールドトンネルの構造が複雑であり, 立坑間にわたるトンネルの解析は計算機の容量上の問題から現状では不可能であると考えられる。さらに, シールドトンネルのモデル化の精度が高められたとしても, トンネルに作用する荷重系やトンネル周辺地盤の物性値など解析上必要なデータの精度がそれに追いつかないという問題点が残されている。

2) の方法は, シールドトンネルが径に比べて延長の十分に長い構造物であることから, これを平面的な棒構造モデルにモデル化する方法である。この方法では, シールドトンネル全体の剛性を1本または2本の棒要素に置換するものであり, その際の剛性の評価や, 継手の取扱いなど問題が残されている。

今回提案する構造モデルは, これら2つの方法を併用することによって前述の問題点を解消することを試みたものである。

(1) 一次覆工のモデル化

立体構造モデルは, 鋼製セグメントの場合, スキンプレートは主桁・縦リブ・継手板と協力して外力に抵抗すると考え有効幅を考慮して, 主桁を曲がりばり要素に, 縦リブ・継手板を直線ばり要素にそれぞれ置き換えて評価するものである。コンクリート平板形セグメントの場合は, セグメントの形状を考えてセグメント本体を円筒シェル要素に置き換えて評価する。また, いずれの場合においても継手部をばね要素として評価する (図-4 (a))。

一方, 一次覆工を評価する棒構造モデルは, セグメントリング1リング分をそれと等価な剛性をもつ棒要素に, リング継手1断面当たりの剛性を軸力に対する軸方向のばね要素に評価するものである (図-4 (c))。

なお, これらのモデルは, 参考文献4) に詳述されている。

(2) 二次覆工のモデル化

立体構造モデルは, 二次覆工コンクリートの形状を考えて, 円筒シェル要素に置き換えて評価するものである。また, 六社研究会で実施した“確認実験”の結果から, 二次覆工にトンネル軸方向の引張力が作用すると二次覆

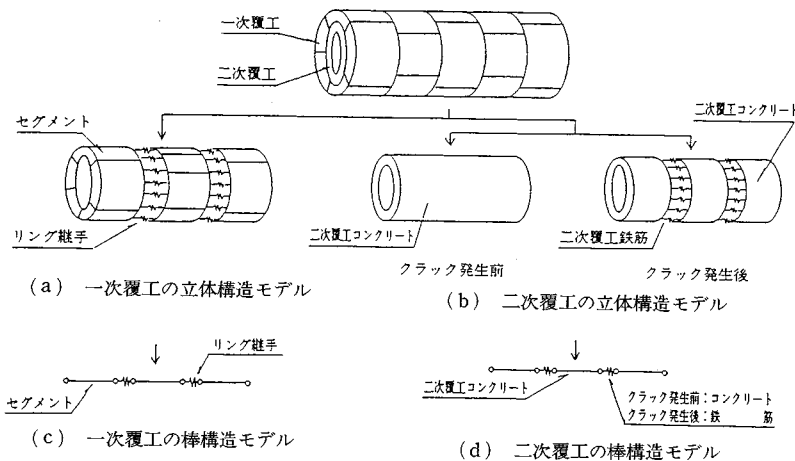


図-4 シールドトンネルの構造モデル概要図

工コンクリートは一次覆工のリング継手の位置にクラックが発生し、荷重レベルによりその剛性が変化することを確認している。このことから、リング継手位置における二次覆工コンクリートの剛性をばね要素として評価する。このばね要素は、クラック発生前は二次覆工コンクリートを全断面有効とした場合の剛性と等価な剛性を持ち、クラック発生後は二次覆工鉄筋断面のみの剛性と等価な剛性をもつものである(図-4(b))。

二次覆工を評価する棒構造モデルは、二次覆工コンクリートのクラック発生位置を一次覆工のリング継手部とすることからセグメントリング1リング分に相当する二次覆工コンクリートを等価な剛性をもつ棒要素に、またリング継手部の二次覆工コンクリートは、クラックの発生前後で剛性が変化することを考えクラック発生前はコンクリートの全断面有効な剛性を、クラック発生後は二次覆工の軸方向鉄筋の総断面をそれぞれ軸力に対する軸方向のばね要素に評価する。このばねのばね定数を求めるにあたっては、上述の実験結果および吉川・田辺ら<sup>14)</sup>の研究結果を参照している(図-4(d))。

(3) 両覆工間のせん断特性の評価

一次覆工と二次覆工との間のせん断特性は、一次覆工に対して二次覆工を直打ちする場合、両覆工間に防水シート等でアイソレーションを施した場合など両覆工間の接合状況および付着状況により異なり、これが両覆工に発生する応力に影響を与えると考えられる。そこで、一次覆工であるセグメントと二次覆工コンクリートとの接合状況に応じて両覆工間の相互作用をせん断力に対するせん断ばね要素に評価する。

(4) トンネル周辺地盤の評価

トンネルとトンネル周辺地盤との相互作用は、トンネル周辺の地盤をトンネル周辺摩擦を評価するトンネル接線方向の地盤ばねに置換する。

以上のような方法によりモデル化したシールドトンネル全体系の解析モデルを図-5に示す。

5. 解析概要

(1) ケーススタディ

解析は、現在計画中の東京湾横断道路シールドトンネル部(全長約9.1 km)のうち浮島側立坑から川崎人工島へ向かって約3421 mの地点を中心に川崎側、木更津側へそれぞれ207 mの計414 mの区間を対象とした(図-6)。

なお、この区間は、解析上の容量の制約(276リング)を考えたうえで、他の区間に比べて地盤が悪く、地震による影響が大きいと考えて選定した区間である。

(2) 入力地震波

入力地震波は、“東京湾横断道路シールドトンネル設計規準(案)”に従って、図-7に示すようなL-2波形(最大加速度426 gal)を用いた。

(3) トンネル剛性

解析に用いたトンネルの剛性は、“確認実験”<sup>9)</sup>の結果をもとに、一次覆工(セグメントリング本体)、リング継手、クラック発生前後の二次覆工コンクリートの剛性を表-3に示すように定めた。

(4) 地盤のばね定数

トンネルと地盤の間の相互作用を評価する地盤のばね定数は、東京湾横断道路(側)における“L-1地震時の検討成果”に基づいて表-4に示す値を用いた。

なお、これらの値はトンネル軸方向の単位長さ(1.0 m)当たりの値である。

(5) 両覆工間のせん断ばね定数

今回の解析は、実験結果の中から顕著な特性を示した直打ちの場合とアイソレーション(吹付け)を施した場合に着目して行った。それぞれのせん断ばね定数は、以下のようにして求めた。

なお、これらの値はトンネル軸方向の単位長さ(1.0 m)当たりの値である。

a) 直打ちの場合

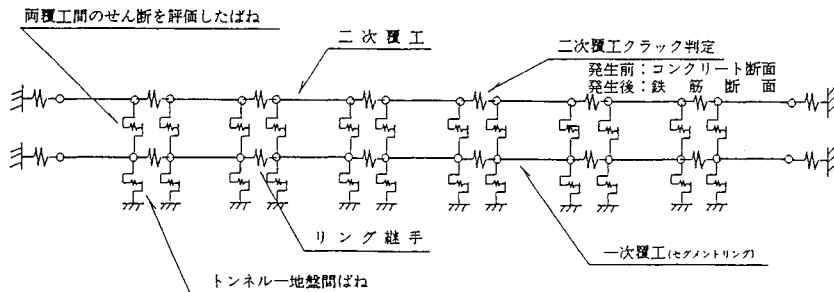
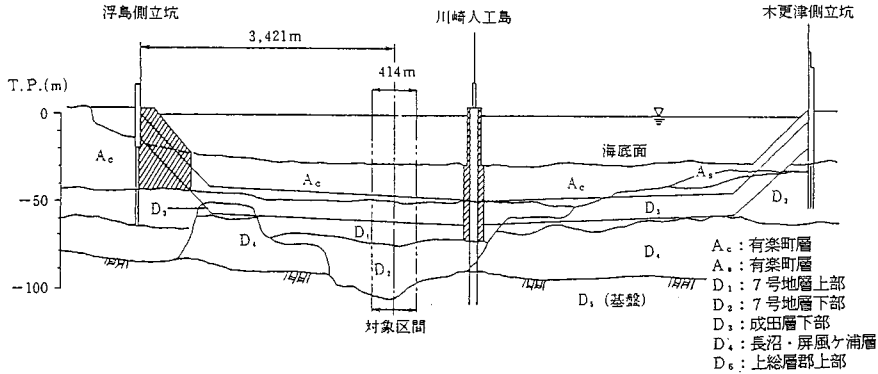
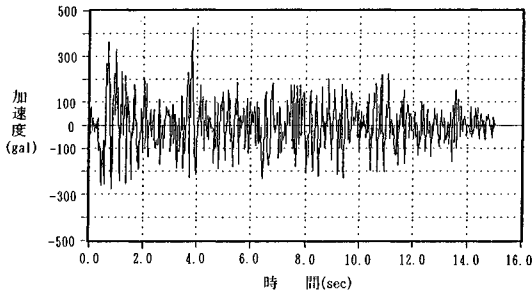


図-5 シールドトンネル全体系の解析モデル



図一六 解析対象区間概要図



図一七 L-2加速度波形

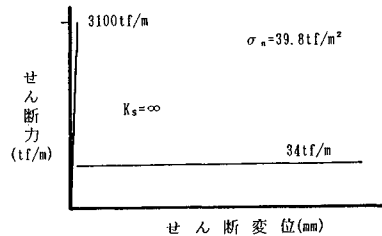
表一三 トンネル剛性

		ばね定数 (tf/m/リツク)
一次覆工	セグメント	$3.52 \times 10^8$
	リツク継手	$1.38 \times 10^8$
二次覆工	クランク発生前	$1.11 \times 10^7$
	クランク発生後	$2.11 \times 10^8$
等価剛性		$5.59 \times 10^8$

表一四 地盤ばね定数

区間 (m)	軸方向ばね (tf/m/m)
0.0~103.5	$7.506 \times 10^8$
103.5~207.0	$7.640 \times 10^8$
207.0~310.5	$7.830 \times 10^8$
310.5~414.0	$8.060 \times 10^8$

一次覆工と二次覆工との間のせん断特性  $\tau_0=7.8 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $\mu=0.75$  を用いて、トンネル単位長さ当たりのばね定数  $k_s$  を求めると、図一八に示すような両覆工間に発生するせん断力とせん断変位の関係が得られる。一次・二次覆工間の垂直応力は、本来トンネルの建設から完成後、あるいは排水による水圧の変化、さらに地震動により変化するものと考えられるが、今回アイソレーション材の比較の意味から、二次覆工の自重のみを考慮し、両覆工間の垂直応力を算定し、垂直応力  $\sigma_n=39.8 \text{ tf/m}^2$  として



図一八 せん断力-せん断変位の関係

せん断力を求めた。

これを見ると、両覆工間に 3100 tf/m のせん断力が作用するまでは両覆工間のせん断変位はほとんど発生せずばね定数としては無限大となり、せん断力が 3100 tf/m を越えるとせん断力は低下するが、せん断力一定のまません断変位が増加する傾向にあることがわかる。

したがって、せん断ばね定数は、せん断力 3100 tf/m までは  $k_s=\infty$ 、それ以上は  $k_s=0$  とした。

b) アイソレーションを施した場合

吹付け方式のアイソレーションの場合、その材料が、粘性流体の挙動を示し、せん断力は変位速度の対数に比例して増加する結果が得られた。したがって、今回の解析では、せん断ばねの速度依存性を評価することが解析上不可能なため、予備解析から両覆工間の相対平均せん断速度を求め、3000 mm/min 時の値を用いた。この結果からせん断特性として  $\tau_0=0.6 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $\mu=0.13$  の値が得られた。直打ちの場合と同様にばね定数  $k_s$  を求めると図一九に示すような両覆工間に発生するせん断力とせん断変位の関係が得られる。

これを見ると、せん断力 240 tf/m までは両者が比例し、それを越えるとせん断力が一定のまません断変位は増加する挙動を示す。

したがって、せん断ばね定数は、せん断力 240 tf/m までは  $k_s=6.0 \times 10^4 \text{ tf/m/m}$ 、それ以上は  $k_s=0$  とした。

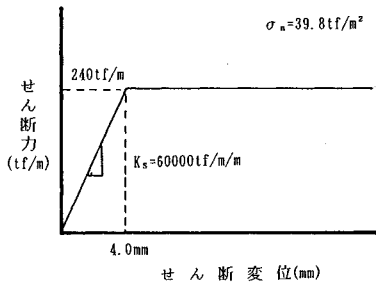


図-9 せん断力-せん断変位の関係

この2ケースについて、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軸方向の地震時挙動について検討を行う。

(6) 解析方法

まず、トンネル設置位置(約GL-52.40 m)における地盤変位振幅を“SHAKE”により求め、次に、得られた最大変位を振幅とする SIN 波を作成した。SIN 波は、変位振幅 8.0 cm、伝播速度 117.5 m/s となった。最後に、この SIN 波を地盤を評価するばねを介して、一次覆工側端部からトンネルの解析モデルに入力した。SIN 波の入力方向は、トンネル軸方向である。

なお、解析時間は 7.2 s (2 波長分) とし、解析時間ステップは 0.1 s とした。

計算は解析時間ステップごとに両覆工間の付着状況を判定し、付着切れを起こした場合は両覆工間のせん断特性を評価したばねを取り除く。この計算を各節点において状態が確定するまで収束計算を繰り返し行い、その時点での一次覆工(セグメントリング本体)、リング継手部、二次覆工コンクリートおよび二次覆工鉄筋に発生する軸力を計算する。

6. 解析結果および考察

前節で述べた解析ケースについてシールドトンネルが地震による軸方向の変位を受けた場合を計算した。その結果および考察について述べる。

(1) 発生軸力

図-10に、一次覆工に対して二次覆工を直打ちとした場合、図-11に、一次覆工と二次覆工の間にアイソレーション(吹付け方式)を施した場合について時間 5.6 s における一次覆工(セグメント)、二次覆工およびリング継手部の軸力分布を示す。この時間は、二次覆工の軸力が最大となった時間である。また、図-12に、各節点において発生した一次覆工と二次覆工の軸力を加え合わせた値と、両覆工をその剛性と等価な剛性をもつ1本のはりに置換した等価剛性ばりとした場合の軸力分布を示す。

これらの図より、アイソレーション(吹付け)を施し

た場合、一次覆工および二次覆工に発生する軸力は異なった分布形状を示しているのに対し、直打ちの場合の一次覆工および二次覆工に発生する軸力の分布形状は、ほぼ一致しておりその形状は両覆工を等価剛性ばりに置換した場合の解析結果とほぼ一致している。

これは、一次覆工と二次覆工との間のせん断特性の違いによるものと考えられる。すなわち、アイソレーションを施した場合は一次覆工と二次覆工との間のせん断抵抗が小さいため付着切れが比較的低い荷重レベルで発生し、両覆工がおのおの単独で挙動することにより生じた現象であると考えられる。これに対して、直打ちの場合は一次覆工と二次覆工との間のせん断抵抗が大きく、付着切れが高い荷重レベルで発生することから、その荷重

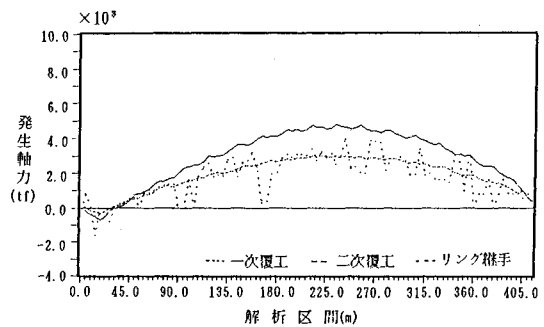


図-10 発生軸力分布(直打ち方式)

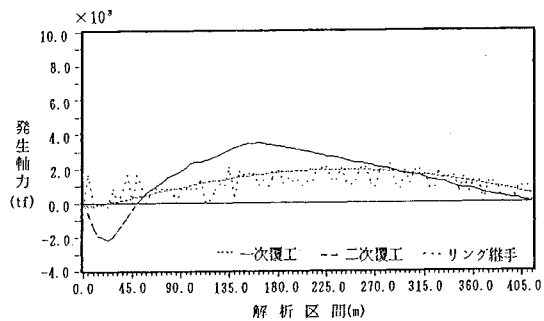


図-11 発生軸力分布(吹付け方式)

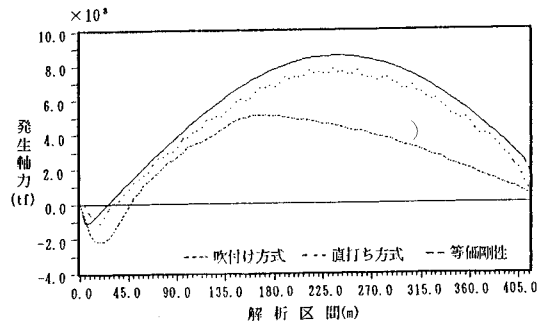


図-12 発生軸力分布

に達するまでは両覆工と一緒に挙動することにより生じた現象であると考えられる。

(2) 最大発生軸力 (引張)

図-13に、直打ちとした場合、図-14に、アイソレーションを施した場合の一次覆工、二次覆工およびリング継手部における最大発生軸力分布をそれぞれ示す。また、図-15に各節点において発生した両覆工の軸力を加え合わせた値と、両覆工の剛性と等価な剛性をもつ1本のりに置換した等価剛性ばりとした場合の最大発生軸力分布を示す。表-5はこれらの一覧表を示したものである。

直打ちの場合は、セグメントリング本体、リング継手、二次覆工ともに発生する最大軸引張力が大きく、リング継手に発生する引張力が、セグメントリング本体に発生する引張力を上回る箇所も多くみられる。一方、アイソレーション (吹付け方式) を施した場合は、それらに発生する軸引張力が直打ちの場合に比べ小さく、リング継手に発生する引張力も、セグメントリング本体に発生する引張力を上回る箇所が少ない。また、その上回る量もわずかである。

以上のことから、アイソレーション (吹付け方式) を施した場合は直打ちの場合と比較して、一次覆工 (セグメント) に発生する断面力がアイソレーション材による分離効果の影響で約36%程度低減され、二次覆工に発生する断面力が約12%程度低減されることが認められる。また、両覆工の剛性を1本の等価剛性に置き換えたモデルの場合は、本報告で提示したモデルに比べ、大きめの断面力を与え、その割合は、アイソレーション (吹付け方式) を施した場合に約60%、直打ちの場合に約20%になる。

今回の解析では入力波として SIN 波を用いたため、発生した軸力は実地震波入力に比べて大きめの値を示したと考えられるが、定性的にはシールドトンネル軸方向の地震時の挙動を説明できたと考えている。

なお、今回の解析では、地震波の入力方向がトンネル軸方向のみであり、せん断特性を支配する垂直応力も一定として計算を行ったが、基本的にはここに示した解析モデルを用いれば、より詳細なシールドトンネルの地震時挙動を評価できると思われる。

7. ま と め

本研究で得られた知見をまとめると次のとおりである。

(1) 一次覆工と二次覆工とのせん断特性には、垂直応力に依存する摩擦係数  $\mu$  が存在し、そのせん断特性を、Coulomb の破壊規準により表わすことができる。

(2) 二次覆工コンクリートのクラック発生前後にお

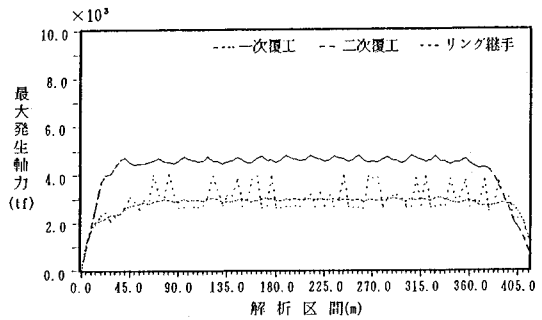


図-13 最大発生軸力分布 (直打ち方式)

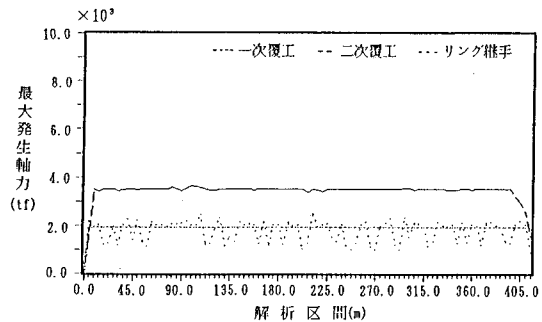


図-14 最大発生軸力分布 (吹付け方式)

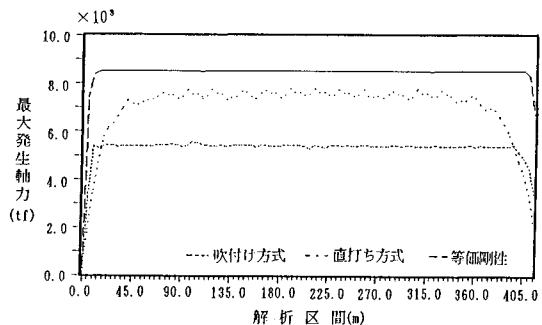


図-15 最大発生軸力分布

表-5 最大発生軸力の一覧表

	直 打 ち		吹 付 け		等 価 剛 性
一次覆工	2,994	6,991	1,910	5,407	8,529
	11.1		7.1		
二次覆工	3,997	25.9 (1835)	3,497	16.4	20.1
	3,962		2,069		
リング継手	10,776		5,627		

上段：発生軸力 (tf)  
下段：発生応力 (kgf/cm<sup>2</sup>)、( ) 内は鉄筋

ける剛性変化および、一次覆工と二次覆工とのせん断特性を評価したシールドトンネルの軸方向の挙動を説明することのできる構造解析モデルを提案した。

(3) このモデルを用いてシールドトンネルの地震時



応答解析を行った結果、一次覆工と二次覆工の間にアイソレーション材を挟み両覆工を分離構造とすることにより、トンネルに発生する軸力を低減できる可能性が示された。

## 8. おわりに

今回提案した構造モデルを用いることにより両覆工間のせん断特性を考慮したうえシールドトンネル軸方向の地震時挙動を把握することが可能となり、シールドトンネルを構成しているセグメント、リング継手、二次覆工コンクリートおよび二次覆工鉄筋の検討を行うことが可能となった。

今回の解析では、シールドトンネルの軸方向に入射する地震波に対してのみその耐震性の検討を行ったが、この解析モデルに曲げに関する剛性評価を加えることによりさらに現実に近いシールドトンネルの地震時挙動を把握することが可能となる。これについても検討を進めており、機会をみて公表したいと考えている。

なお、本研究は東京湾横断道路六社研究会の活動の一環として行われたものである。また、本報告をまとめるにあたりいろいろとご指導を頂いた、元・東京湾横断道路(株)林 光俊氏に深く感謝する次第です。

## 参考文献

- 1) 村上博智・小泉 淳：シールドセグメントリングの耐荷機構について、土木学会論文集，第 272 号，pp.103～115，1978.4.
- 2) 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、土木学会論文集，第 296 号，pp.73～86，1980.4.
- 3) 小泉 淳・石田智朗・村上博智：シールドトンネルの急曲線施工時の検討，東洋大学工学部研究報告，第 22 号，pp.63～76，1987.
- 4) 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.74～88，1989.6.
- 5) 志波由紀夫・川島一彦・大日方尚巳・加納尚史：シールドトンネルの耐震解析に用いる長手方向覆工剛性の評価法，土木学会論文集，第 398 号/I-10，pp.319～327，1988.10.
- 6) 志波由紀夫・川島一彦・大日方尚巳・加納尚史：応答変位法によるシールドトンネルの地震時断面力の算定法，土木学会論文集，第 404 号/I-11，pp.385～394，1989.4.
- 7) 三上 博・森 信介・石田智朗・林 光俊・小泉 淳：シールドトンネルの軸方向剛性確認実験，土木学会第 44 回年次学術講演会概要集，pp.112～113，1989.10.
- 8) 三上 博・森 信介・石田智朗・二宮康治・小泉 淳：アイソレーションを考慮したシールドトンネルの軸方向剛性評価，第 24 回土質工学研究発表会，pp.1733～1734，1989.6.
- 9) 川島一彦・大日方尚巳・志波由紀夫・加納尚史：シールドトンネルの耐震性に関する研究一(その 1)シールドセグメントの等価剛性の評価および応答変位法の適用一，土木研究所資料，No. 2262，昭和 60 年 10 月.
- 10) 川島一彦・杉田季樹・加納尚史：耐震設計に用いるシールドトンネルの長手方向剛性および耐力の評価法，土木技術資料，Vol. 31，No. 9，pp.27～33，平成元年 9 月.
- 11) 元山 宏・三木克彦・林 光俊・田中 努：二次覆工を有するシールドトンネルの縦断方向の耐震設計法，第 20 回地震工学研究発表講演概要，土木学会耐震工学委員会，pp.593～596，平成元年 7 月.
- 12) 元山 宏・三木克彦・林 光俊・田中 努：非線形性を考慮したシールドトンネル地震応答解析法，第 20 回地震工学研究発表会講演概要，土木学会耐震工学委員会，pp.589～592，平成元年 7 月.
- 13) 東京湾横断道路六社研究会 [五洋建設(株)・住友建設(株)・(株)銭高組・東急建設(株)・日本国土開発(株)・不動建設(株)]：東京湾横断道路シールドトンネル軸方向剛性確認実験/一次・二次覆工の力学的挙動の検証実験に関する報告書，平成元年 6 月.
- 14) 吉川弘道・田辺忠顕：鉄筋コンクリート部材の引張剛性に関する解析的実験，土木学会論文集，第 366 号/V-4，pp.93～102，1986.2.

(1990.6.4・受付)