

(145) 二次覆工を考慮したシールドトンネルの長手方向地震応答解析

大成建設(株) 正員 志波 由紀夫
同上 正員 岡本 晋

1. はじめに

シールドトンネルの長手方向の地震時挙動を論ずる上で二次覆工の影響を無視することはできないが、これまで二次覆工を考慮した数値解析的な検討はあまり行われていない。これはシールドトンネル覆工をモデル化する際に、二次覆工コンクリートにクラックが生じて剛性が低下することや、軸方向鉄筋を配筋することの効果を適切に表現することが難しいことによるものと思われる。

このような現状を踏まえ、著者らは、上記のような二次覆工の非線形な挙動を考慮した、比較的詳細な地震応答解析を試みた。本文は、二次覆工を含めたシールドトンネル覆工のモデル化手法、およびそれを用いた解析例を紹介するとともに、二次覆工がシールドトンネルの軸方向の地震時挙動に及ぼす影響について考察したものである。なお本解析ではトンネル軸方向加振の問題を対象としている。

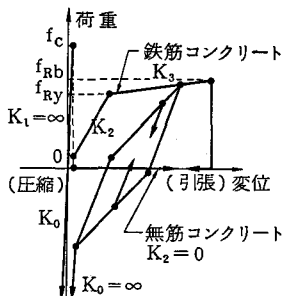
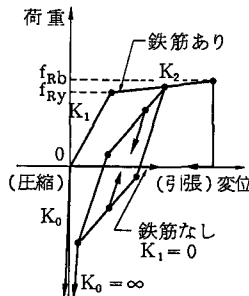
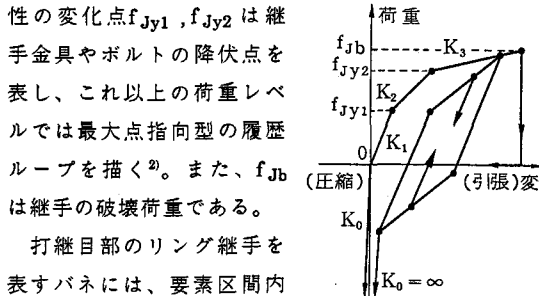
2. 二次覆工を含むシールドトンネル覆工のモデル化

シールドトンネルの一次覆工は長さ1m前後のセグメントリングをリング継手で接合したものであり、二次覆工はこの内側にコンクリートを連続打設したものである。すなわち覆工は、不連続な構造体に連続な構造体が重なった構造となっている。

このような覆工の特性が考慮できるように、図-1に示す解析モデルを考えた。このモデルは、覆工を適当な区間(リング長の整数倍、二次覆工の打継目間隔、等)に分割し、それぞれの区間を以下に示す5個1組のパネに置き換えるものである。覆工への外力は、応答変位法の考え方にに基づき、周辺地盤の応答変位をトンネル~地盤間のパネを介して作用させることとする。

①、②リング継手を表すパネ(2種類、図-2(a)参照)

リング継手は、圧縮に対しては変形せず、引張に対しては継手金具やボルトの剛性に依りて変形する。RCセグメントの載荷実験結果¹⁾を参考にし、リング継手の荷重~変形関係の骨格曲線を、圧縮側の剛性 k_0 (無限大)と引張側の剛性 k_1 、 k_2 および k_3 の4つの勾配によって構成する。 k_1 は弾性範囲での剛性を表す。剛性の変化点 f_{Jy1} 、 f_{Jy2} は継手金具やボルトの降伏点を表し、これ以上の荷重レベルでは最大点指向型の履歴ループを描く²⁾。また、 f_{Jb} は継手の破壊荷重である。



打継目部のリング継手を表すパネには、要素区間内にある打継目数分の变形特(a)リング継手を表すパネJ性を、要素区間全体のリン

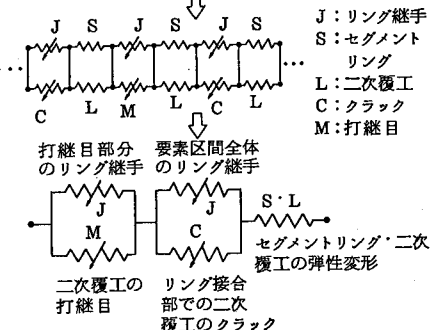
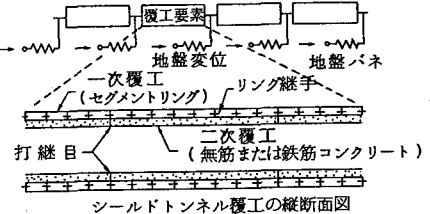


図-1 二次覆工を考慮したシールドトンネル覆工の非線形力学モデル

図-2 覆工要素の力学特性

グ継手を表すバネには打継目を除くリング接合面全部の変形特性を、それぞれ集約して与える。

③二次覆工の打継目を表すバネ(図-2(b)参照)

二次覆工には通常9~12m(1.5mの整数倍)間隔で打継目があり、ここではコンクリートの引張抵抗が期待できない。打継目で軸方向鉄筋を継がない場合は、引張には抵抗せず圧縮に対しては剛性無限大のバネ特性を与える。打継目で軸方向鉄筋を継ぐ場合は、圧縮に対しては剛性無限大、引張に対しては鉄筋量に応じたバネ定数を与える。後に示す解析例ではこのバネ定数を、打継目近傍での鉄筋の見かけの自由長(20cmとした)を設定して評価した。 f_{Ry} 、 f_{Rb} は軸方向鉄筋の降伏荷重と破断荷重である。

④リング接合部での二次覆工のクラックを表すバネ(図-2(c)参照)

要素区間内にある全リング接合部の、二次覆工側の挙動を集約したバネである。引張荷重が二次覆工コンクリートのクラック発生荷重 f_c より小さい範囲では、剛性無限大とする。引張荷重が f_c 以上では、③と同様に、無筋コンクリートと鉄筋コンクリートの場合とで、それぞれに応じたバネ特性を与える。

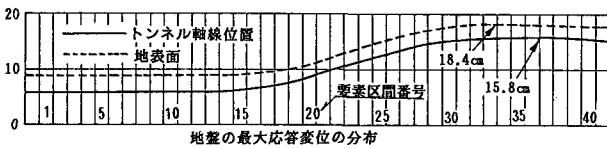
⑤セグメントリング・二次覆工の弾性変形を表すバネ

要素区間全長での、セグメントリングと二次覆工そのものの弾性変形を集約した線形バネである。

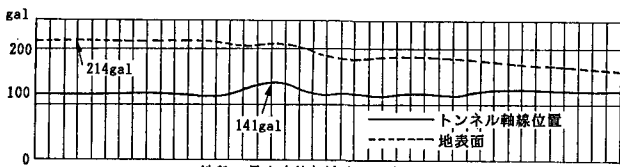
3. 試算による二次覆工の影響の検討

3.1 試算の概要および解析条件

仮想の地盤およびシールドトンネルを設定し、上記の解析モデルを用いて地震応答解析を行った。解析対象としては、図-3に示すように、基盤層に傾斜部があり表層厚が変化する地盤中に、シールドトンネルが造られるケースとした。表-1に地盤の物性値を示す。入力地震動は図-4(a)に示す八戸波N-S成分の主要動部分20秒間とし、最大加速度を100galに調整して、基盤への入射波として用いた。



地盤の最大応答変位の分布



地盤の最大応答加速度の分布

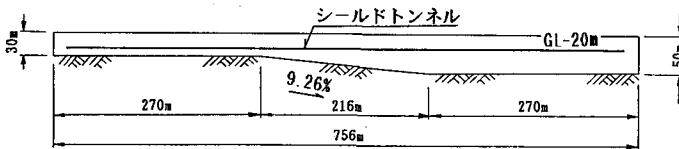


図-3 解析対象地盤とその動的応答

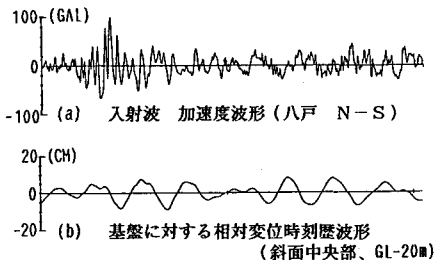


図-4 入力地震動と地盤の応答変位

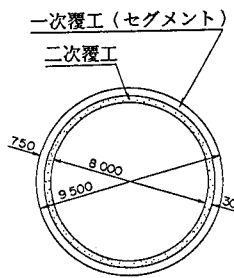


図-5 覆工断面図

表-1 解析対象地盤の物性値

物性	表層地盤	基盤層
土質	沖積粘性土	土丹
N 値	1~2	50以上
単位体積重量 γ_t (ton/m ³)	1.6	2.0
せん断波速度 V_{S0} (m/s)	110 *	400 *
せん断弾性係数 G_0 (ton/m ²)	1,980 **	32,650
ポアソン比 ν	0.48	0.35
減衰定数 h_0 (%)	1.35 **	1.35

*: 共同溝設計指針 $V_{S0} = 100 N^{1/3}$ により設定

** : 低ひずみレベルでの初期値

表-2 一次覆工(セグメント)諸元

セグメントの種類	RC平板型
外径	9.50 m
厚さ	0.45 m
幅(リング長)	0.90 m
断面積	12.794 m ²
設計基準強度	420 kgf/cm ²
弾性係数	3.5×10^6 ton/m ²
リング継手数	41個
リング継ぎボルト	M 27(強度区分 8.8)
継手金具の降伏耐力 f_{Jy1}	692 ton/断面全体
継手金具の降伏変位	0.397 mm/1接合面
ボルトの降伏耐力 f_{Jy2}	1205 ton/断面全体
ボルトの降伏変位	1.390 mm/1接合面
ボルトの破断耐力 f_{Jb}	1506 ton/断面全体
ボルトの破断変位	6.064 mm/1接合面

地盤の動的応答は二次元動的FEM解析 (FLUSH) により求めた。その結果を図-3に示す。シールドトンネルへ作用させる地盤変位は、トンネル軸線に沿って18m(覆工20リング分)間隔に設けた節点の応答変位(時系列)とした。変位波形の一例を図-4(b)に示す。

シールドトンネルの覆工として、図-5に示す断面を設定した。一次覆工は外径9.5m、厚さ45cmのRCセグメントで、表-2に示す諸元とした。二次覆工は巻厚30cmとし、9m(10リング)間隔で打継目を設けるものとした。シールドトンネルと立坑との取付けは軸方向にフリーな結合条件とし、立坑はモデル化していない。覆工のモデル化は、トンネル全長720mを18m(20リング)毎、計40区間に分割して行った。

解析ケースとしては、二次覆工の条件がトンネルの地震応答に及ぼす影響をみるため、表-3に示す6ケースとした。今回の解析対象トンネルでは、リング継手の破断耐力が二次覆工コンクリートのクラック発生荷重よりも小さい。このため、二次覆工が無筋コンクリートの場合(ケース2, 6)は、二次覆工の引張応力がクラック発生荷重に達すると、1つの要素区間内では1か所のリング接合部だけにクラックが集中し、隣接するリング接合部にはもはやクラックが生じない条件となっている。二次覆工が鉄筋コンクリートの場合の3ケースは、軸方向鉄筋とリング継手の耐力の合計をクラック発生荷重よりも大きくし、クラックが複数のリング接合部に生ずるように条件設定した。軸方向鉄筋量としては、ケース4は鉄筋の降伏耐力がクラック発生荷重と等しくなるように、ケース3とケース5はそれぞれケース4の約1/3、約2倍となるように、設定した。

表-3 解析ケース(二次覆工の条件)

ケース番号	想定条件	二次覆工の条件											
		厚さ(m)	断面積(m ²)	弾性係数(ton/m ²)	コンクリート強度(kgf/cm ²)		クラック発生荷重f _c (ton)	打継目	軸方向鉄筋の配筋鉄筋量(鉄筋比)	鉄筋の降伏*		鉄筋の破断*	
					圧縮	引張			耐力f _{Ry} (ton)	変位(mm)	耐力f _{Rb} (ton)	変位(mm)	
1	二次覆工なし	-----	-----	-----	----	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
2	無筋	0.30	7.823	2.6 × 10 ⁶	240	22	1721	9m間隔(10リング毎)	無筋	-----	-----	-----	
3	軸方向鉄筋量:少								D16 ctc250 1段配筋 206.5 cm ² (0.264%)	620	0.286	1033	20
4	軸方向鉄筋量:中								D19 ctc250 2段配筋 595.9 cm ² (0.762%)	1788	0.286	2980	20
5	軸方向鉄筋量:多								D25 ctc250 2段配筋 1053.9 cm ² (1.347%)	3162	0.286	5270	20
6	無筋・打継目なし								無筋	-----	-----	-----	-----
									なし	無筋	-----	-----	-----

*: 鉄筋の降伏点 3000 kgf/cm², 破断強度 5000 kgf/cm² と仮定。耐力は断面全体、変位は1接合面当たりで表示。

3.2 解析結果

解析結果を表-4にまとめた。また、ケース2で最大軸力の発生した区間の軸力波形と、打継目のリング継手の荷重履歴を、図-6、7に示す。図-7は、図-2(a)に示したバネJに相当するもので、応答解析が忠実に示している。

覆工の最大軸力の分布を、図-8に示す。図に示していないケース2、3、4の圧縮力は、ケース5とケース6の中間にあり、二次覆工がある場合の圧縮力には大きな差はなかった。二次覆工を施すことにより覆工全体に発生する圧縮力は増加するが、セグメントの圧縮応力度は減少し、二次覆工の補強効果が現れている。引張力は、二次覆工の鉄筋量が多いほど大きいが、セグメントの引張応力度については、無筋の場合(ケース2)と、鉄筋の降伏耐力をクラック発生荷重より小さくした場合(ケース3)は、二次覆工なしのときよりも大きくなった。

図-9、10は、打継目の目開き量と二次覆工のクラック幅の分布を被害の程度とともに示したものである。二次覆工を無筋

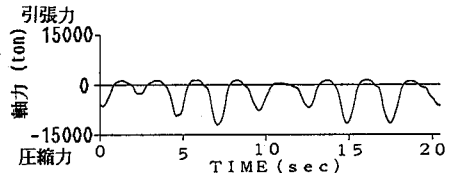


図-6 応答軸力波形

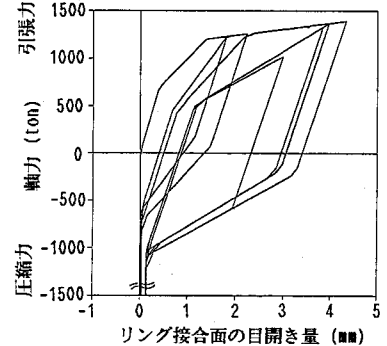


図-7 打継目の荷重履歴図

とし、打継目を設けたケース2では、二次覆工にクラックが発生しなかったかわりに、打継目に変形および被害が集中している。二次覆工に鉄筋を配筋すると、二次覆工にクラックが発生してリング接合部に目開きが生じたため、打継目の変形が相対的に小さくなっている。また、軸方向鉄筋量の増加とともにクラックの発生区間数が増加し、クラック幅およびそれらの位置でのリング継手張力が減少する傾向がみられる。このためケース4、5では、リング接合部の目開き量とリング継手張力が二次覆工なしの場合よりも小さくなり、二次覆工鉄筋が降伏するものの、一次覆工を補強する効果がみられる。ただし、ケース4と二次覆工鉄筋量が約2倍のケース5とでは結果はあまり変わらず、二次覆工鉄筋量を増しても補強効果は頭打ちとなっている。なお、二次覆工が無筋で打継目なしのケース6では、二次覆工のクラック発生は4区間のみであり、一部ではボルトが破断している。

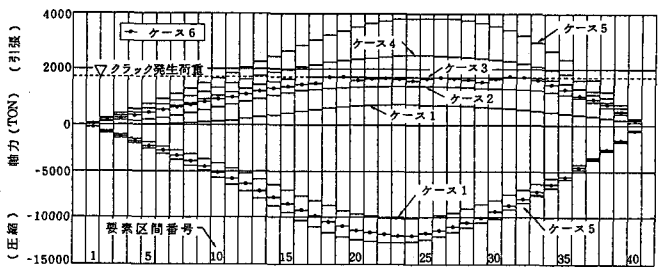


図-8 最大軸力分布

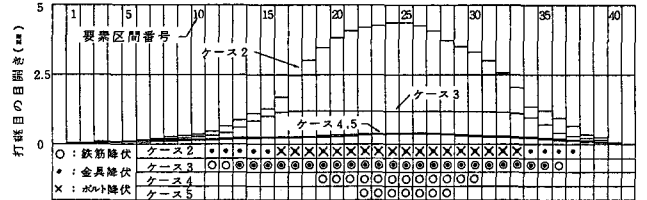


図-9 打継目の目開き量と被害状況の分布

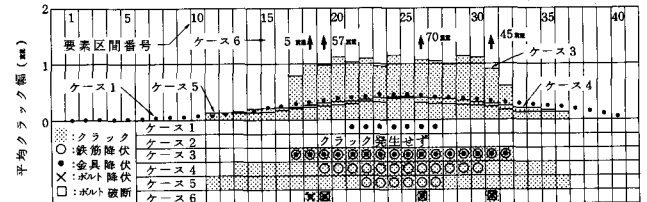


図-10 クラック幅と被害状況の分布

表-4 解析結果一覽

ケース 番号	覆工全体				打継目部分(継目1か所当たり)				一般部								備考				
	最大圧縮		最大引張		最大 目開き (mm)	リング継手		二次覆工鉄筋		全区間 の平均 目開き (mm)	セグメント		継手		二次覆工			クラックの発生			
	荷重 (ton)	区間 No.	荷重 (ton)	区間 No.		張力/ 1継手 (ton)	降伏 区間 数	引張 応力度 (kg/cm ²)	降伏 区間 数		圧縮 応力度 (kg/cm ²)	引張 応力度 (kg/cm ²)	降伏 区間 数	引張 応力度 (kg/cm ²)	鉄筋 応力度 (kg/cm ²)	降伏 区間 数		発生 区間 数	最大 幅 (mm)	平均 幅 (mm)	
1	10107	23	719	23	---	17.5*	---	---	---	1.84	79.0	5.6	7	---	---	---	---	0.45*	0.22*	二次覆工なし	
2	12214	23	1393	25	4.36	34.0	27	---	---	1.84	65.6	10.9	0	48.8	17.8	---	---	0	0	0	18区間でボルト降伏
3	12303	23	1722	24	1.19	26.6	23	3090	26	0.71	66.1	8.5	16	49.1	22.0	3001	16	16	1.15	1.00	ボルトは降伏せず
4	11939	23	2486	24	0.40	16.9	0	3012	12	0.22	64.2	5.4	0	47.7	22.0	3012	12	23	0.40	0.29	継手金具は降伏直前
5	12697	23	3833	25	0.38	16.1	0	3008	7	0.19	68.2	5.2	0	50.7	22.0	3008	6	26	0.38	0.22	継手金具は降伏せず
6	11899	23	1721	26	---	36.7**	---	---	---	---	64.0	11.8	4	47.5	22.0	---	---	4	69.86	44.28	3区間でボルト破断

*:二次覆工なしの場合のリング接合部の状況。

** :クラックの発生した4区間のうち、3区間でボルトが破断耐力に達している。

4. まとめ

二次覆工を考慮したシールドトンネルの軸方向地震応答解析を行い、以下の結果を得た。

- ① 二次覆工が無筋コンクリートの場合は、トンネルのひずみが二次覆工のクラック発生箇所や打継目に集中し、それらの位置で一次覆工側のリング接合面の目開きおよびリング継手張力が大きくなる。
- ② 二次覆工が鉄筋コンクリートの場合は、幅の小さいクラックが多数発生して、リング接合面の目開きが分散される。その効果は軸方向鉄筋量に依存するが、鉄筋量を増しても効果は頭打ちとなる。

参考文献

- 1) 川島・大日方・加納・志波：交番載荷実験に基づくRCシールドセグメントの力学特性、第19回地震工学研究発表会 講演概要、pp.361~364、1987年7月
- 2) 志波・丸山・横山：シールドトンネルの地震応答解析—リング継手の非線形モデル—、土木学会第43回年次学術講演会 講演概要集第1部、pp.1156~1157、1988年10月