

(126) 併設シールドトンネルの地震応答特性

建設省土木研究所 正員 川島 一彦
建設省関東地建 正員 大日方尚巳
建設省土木研究所 正員○加納 尚史

1. まえがき

地盤条件が複雑に変化する箇所にシールドトンネルが併設された場合には、個々のトンネルの地震時挙動は同一ではない。このため、トンネル（以下、本線トンネルと呼ぶ）を相互に連絡横坑で連結した場合には、連絡横坑で連結したことによる影響が生じると考えられる。本文は、連絡横坑と本線シールドトンネルの結合条件及び2次覆工の剛性評価方法に着目して地震応答解析を行い、連絡横坑の設置が本線シールドトンネルに与える耐震上の影響を検討した結果を報告するものである。

2. 解析対象とするシールドトンネル及び入力地震動

〔1〕解析対象とするシールドトンネル及びそのモデル化

解析対象としたのは、3本の本線シールドトンネルと、これを結ぶ連絡横坑シールドトンネルから成る構造である。本線トンネル及び連絡横坑の覆工断面を図1に示す。ここで、2次覆工の軸方向鉄筋はトンネル全長にわたって連続しているものと仮定した。リング継手はボルト接合方式を想定し、本線トンネル及び連絡横坑の継手金具の板厚はそれぞれ16mm及び12mm、また、継ぎボルトはそれぞれM36とM30とした。

本線トンネルの長手方向に沿う地盤条件は図2に示すものを想定した。この地盤を単純化し、軸直角方向の地盤の変化を考慮した地盤モデルを図3に示す。Ac層は層厚25mで一様に堆積しており、Dc1層とDc2層の層厚が軸方向及び軸直角方向に変化するものと仮定した。本線トンネルの中心線は海底面下25mの位置にあり、トンネル相互の間隔は26.8mとした。

図3に示した地盤をトンネル軸方向に27m毎に20分割、トンネル軸直角方向に26.8m毎に11分割、計20@11=220分割とした後、個々の土柱をバネ～質点系に置換した。なお、各質点相互を連結するバネの算定は、田村らにより提案された三次元地盤解析法に基づいたものである²⁾。

〔2〕リング継手のモデル化及びシールドトンネル覆工の等価剛性

セグメントとリング継手から構成される1次覆工の等価剛性の算出方法については、既に提案している³⁾。これに加えて2次覆工を考慮して覆工の軸剛性を算定するためには、セグメントとリング継手は直列バネとして、また、2次覆工は、これに並列するバネとしてそれぞれ評価することとした。また、覆工の曲げ剛性を算定するためには、圧縮側はセグメント及び2次覆工から、引張側はセグメント、リング継手及び2次覆工からそれぞれ評価することとした。

リング継手の軸方向剛性はリング継手の継手金具板の曲げ剛性から算定した。ここでリング継手の軸方向剛性は、一般に図4に示すような非線形性を持つが、シールドトンネルの耐震計算上は引張力に対する検討が重要であるため、本解析では引張側1次軸剛性 K_{11} によりリング継手を代表させることとした。

〔3〕入力地震動

入力地震動としては、図5に示す動的解析用入力地震動L2を用いた。本解析では、図示した60秒間の加速度波形を0.02秒刻みで使用した。また、トンネルの加振方向は、トンネル軸方向及び軸直角方向とした。

〔4〕解析ケース

解析ケースは、表1に示すように連絡横坑の有無の影響、2次覆工剛性の評価方法の違いによる応答の差異、本線トンネルと連絡横坑間の結合方式の違いによる応答の差異に着目して、下記の4ケースとした。

- ①ケース1 : 本線トンネルのみの応答解析
- ②ケース2 : 本線トンネルに連絡横坑が剛結されている場合の応答解析
- ③ケース3 : 本線トンネル及び連絡横坑の2次覆工を、鉄筋のみ有効として剛性を評価した場合の応答解析
- ④ケース4 : 本線トンネルに連絡横坑が可とう性継手を介在して設置されている場合の応答解析

3. シールドトンネルの地震応答に及ぼす併設の影響

[1] 連絡横坑の影響

図6に本線トンネルの軸方向に入力地震動を作用させた場合の本線トンネルに生じる最大軸力を、また、図7に連絡横坑を設けたことにより新たに本線トンネルに生じる最大曲げモーメント及び最大せん断力を、それぞれ示す。これによれば、本線トンネルに生じる軸力は、連絡横坑の存在によってほとんど変化しないが、曲げモーメント及びせん断力については、かなりの値が生じることがわかる。

図8及び図9は本線トンネルの軸直角方向に入力地震動を作用させた場合に本線トンネルに生じる最大曲げモーメント及び最大せん断力を、また、図10は連絡横坑を設けたことにより新たに本線トンネルに生じる軸力を、それぞれ示したものである。これによれば、連絡横坑が存在することにより曲げモーメント及びせん断力は大きく増加しているが、連絡横坑の有無により断面力の分布が変化するのは、連絡横坑を中心とする前後約160mの区間であり、その他の区間では連絡横坑の設置の影響は認められない。また、連絡横坑の存在により本線トンネルに生じる最大軸力は50ton程度であり、これは大きなものではない。

[2] 2次覆工剛性の評価の違いによる影響

表2に2次覆工剛性として全断面を有効と見なしたケース(ケース2)と鉄筋のみ有効と見なしたケース(ケース3)の最大断面力の比較を示す。これによれば、ケース3による断面力は、ケース2による断面力よりも、当然ながら小さく、ケース2に対するケース3の断面力の比は、全体として全断面有効とした場合の覆工剛性に対する鉄筋のみ有効とした場合の覆工剛性の比(軸剛性、曲げ剛性共に約1/10)に近いことがわかる。ただし、2次覆工が耐震上に与える影響を検討するためには、リング間継手部に生じる変形を基に別途評価していく必要がある。

[3] 本線トンネルと連絡横坑間の結合方式の影響

表3にケース2とケース4の最大断面力の比較を示す。これによれば、本線トンネルの軸方向に入力地震動を作用させた場合に本線トンネルに生じる軸力を除けば、他の断面力は可とう性継手を設けることにより、いずれも減少することがわかる。本線トンネルの軸方向に入力地震動を作用させた場合に本線トンネルに生じる軸力が可とう性継手の影響をほとんど受けないのは、この方向に対する連絡横坑の存在が本線トンネルの軸力に、もともとほとんど影響を与えないためである。

4. まとめ

シールドトンネルが併設され、連絡横坑により連結された場合の耐震上の影響につき、動的応答解析により検討した。本検討により得られた結論をまとめると以下のようになる。

- 1) 連絡横坑を設置することにより、本線トンネルに生じる曲げモーメント及びせん断力は、連絡横坑の近傍において増加するが、軸力はほとんど変わらない。
- 2) 本線トンネル間を連絡横坑で結ぶことにより、連絡横坑にも断面力が生じる。
- 3) 2次覆工全断面有効として剛性を評価した場合に比較して、2次覆工鉄筋のみ有効として剛性を評価した場合の断面力は、ほぼ両者の剛性比に等しい1/10程度に減少する。
- 4) 本線トンネルと連絡横坑間の接続部に可とう性継手を設けることにより、本線トンネル及び連絡横坑に生じる断面力を減少できる。ただし、本線トンネル軸方向に入力地震動を作用させた場合に本線トンネルに生じる軸力は、ほとんど減少しない。

参考文献

- 1) 川島、大日方、加納：シールドトンネルの耐震性に関する調査 —— (その4) トンネル軸直角方向の地盤の変化を考慮した併設シールドトンネルの地震応答解析 ——、土研資料第2496号、昭和62年2月
- 2) 田村、鈴木：地下構造物の地震応答解析のための疑似3次元地盤モデルの提案 —— 地盤モデルの構成 ——、生産研究、Vol. 39、No. 1、昭和62年1月
- 3) 川島、大日方、志波、加納：シールドトンネルの耐震性に関する調査 —— (その1) シールドセグメントの等価剛性の評価及び応答変位法の適用 ——、土研資料第2262号、昭和61年1月

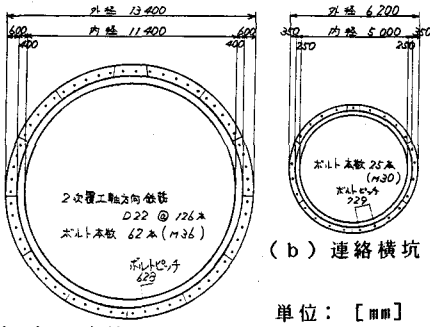


図1 解析対象シールドトンネル断面図

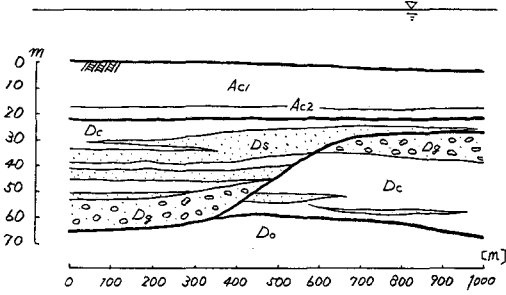


図2 シールドトンネル軸線に沿う地盤縦断面図

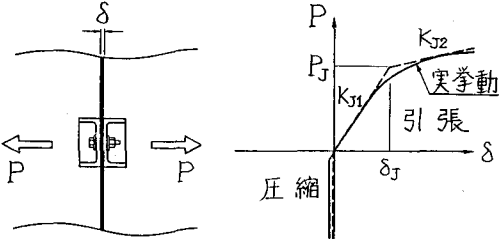


図4 リング継手のバネとしての評価

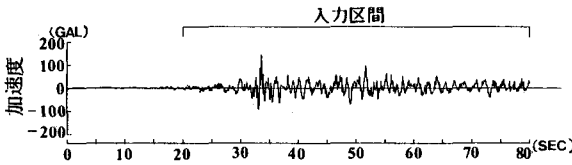


図5 基盤入力地震動L2

表1 解析ケース

ケース	連絡横坑の有無	本線トンネルと連絡横坑の結合方式	二次覆工剛性の評価
1	無	—	全断面有効
2	有	剛結	全断面有効
3	有	剛結	鉄筋のみ有効
4	有	可とう性継手有	全断面有効

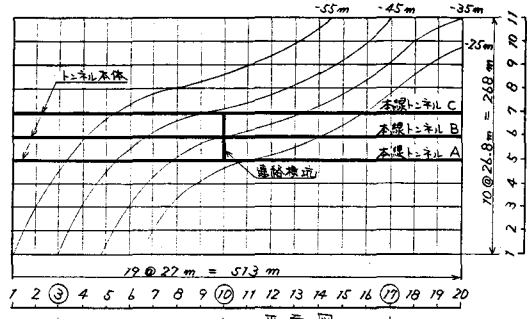


図3 地表面下25m, 45m, 55m, 位置におけるDc1層とDc2層の境界線

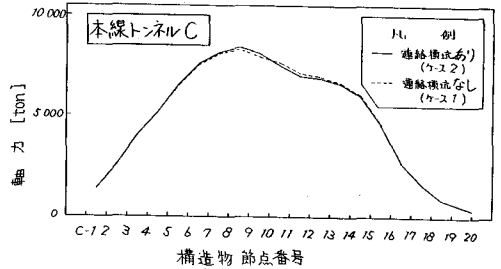
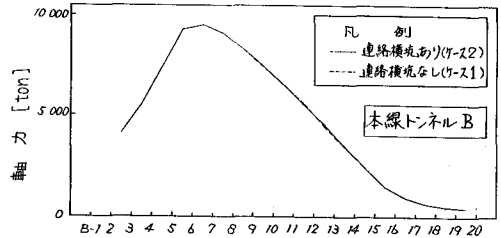
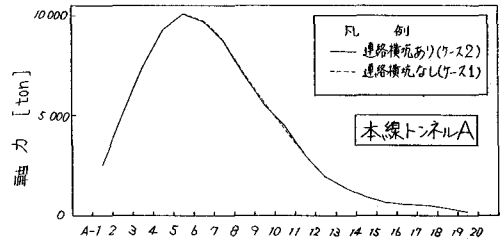


図6 連絡横坑の有無が本線トンネル最大軸力に与える影響(トンネル軸方向加振)

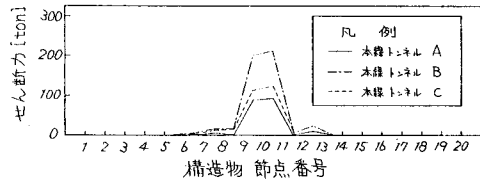
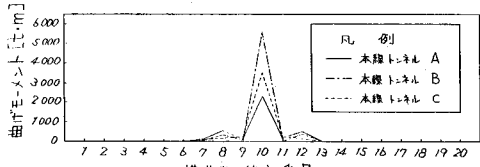


図7 連絡横坑の存在により本線トンネルに生じる最大曲げモーメント及び最大せん断力(本線トンネル軸方向加振)

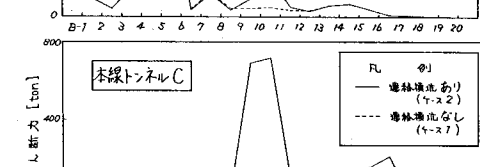
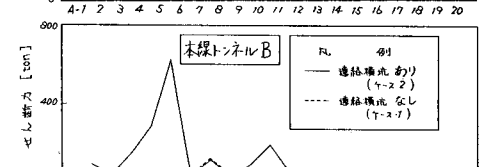
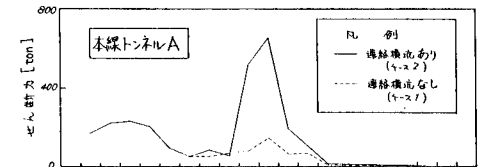


図9 連絡横坑の有無が本線トンネル最大せん断力に与える影響(トンネル軸方向直角方向加振)

表2 最大断面力の比較(ケース2~3)

(a) 本線トンネル

ケース	トンネル	本線トンネルの軸方向に加振			本線トンネルの軸直角方向に加振		
		軸力 (ton)	曲げモーメント (ton.m)	せん断力 (ton)	軸力 (ton)	曲げモーメント (ton.m)	せん断力 (ton)
全断面	本線トンネルA	10088	2381	95	48	10005	649
	本線トンネルB	9559	5572	214	15	12685	633
	本線トンネルC	8365	3286	122	65	16108	722
鉄筋のみ有効	本線トンネルA	1200	232	11	2	1254	46
	本線トンネルB	1267	600	27	1	2267	133
	本線トンネルC	864	380	17	3	733	33

(b) 連絡横坑

ケース	トンネル	本線トンネルの軸方向に加振			本線トンネルの軸直角方向に加振		
		軸力 (ton)	曲げモーメント (ton.m)	せん断力 (ton)	軸力 (ton)	曲げモーメント (ton.m)	せん断力 (ton)
全断面	本線トンネルA~B間	3	4732	348	3114	1788	129
	本線トンネルB~C間	0.4	6491	481	3786	2008	147
鉄筋のみ有効	本線トンネルA~B間	0.02	462	34	290	175	13
	本線トンネルB~C間	0.002	754	56	437	201	15

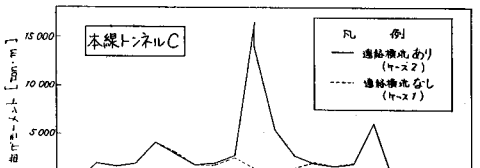
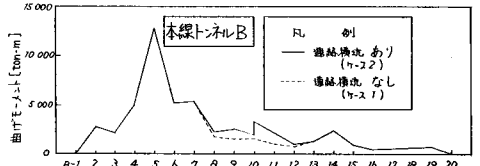
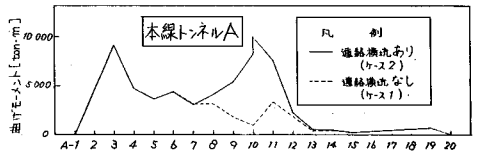


図8 連絡横坑の有無が本線トンネル最大曲げモーメントに与える影響(トンネル軸直角方向加振)

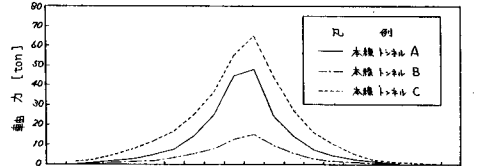


図10 連絡横坑の存在により本線トンネルに生じる最大軸力(本線トンネル軸直角方向加振)

表3 最大断面力の比較(ケース2~4)

(a) 本線トンネル

ケース	トンネル	本線トンネルの軸方向に加振			本線トンネルの軸直角方向に加振		
		軸力 (ton)	曲げモーメント (ton.m)	せん断力 (ton)	軸力 (ton)	曲げモーメント (ton.m)	せん断力 (ton)
継手なし	本線トンネルA	10088	2381	95	48	10005	649
	本線トンネルB	9559	5572	214	15	12685	633
	本線トンネルC	8365	3286	122	65	16108	722
継手あり	本線トンネルA	10089	105	4	2	9312	252
	本線トンネルB	9571	251	10	1	12685	633
	本線トンネルC	8263	147	5	3	8069	218

(b) 連絡横坑

ケース	トンネル	本線トンネルの軸方向に加振			本線トンネルの軸直角方向に加振		
		軸力 (ton)	曲げモーメント (ton.m)	せん断力 (ton)	軸力 (ton)	曲げモーメント (ton.m)	せん断力 (ton)
継手なし	本線トンネルA~B間	3	4732	348	3114	1788	129
	本線トンネルB~C間	0.4	6491	481	3786	2008	147
継手あり	本線トンネルA~B間	0.02	208	15	430	86	6
	本線トンネルB~C間	0.008	290	22	630	94	7