

山岳トンネルにおけるプレキャスト覆工の耐荷力に関する数値解析的検討

(一社)日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所 正会員 ○井野 裕輝 正会員 真下 英人
清水建設株式会社 正会員 鹿島 竜之介
株式会社 IHI 建材工業 夏目 岳洋

1. はじめに

山岳トンネルにおける生産性向上を目的に分割型プレキャスト覆工の開発を行っている。本プレキャスト覆工（以下、PCa 覆工）は、トンネル上半1リングが6つのピースにより構成され、継手にはシールドトンネルで実績のあるワンパス型の継手（ピース間：くさび継手，リング間：ピン挿入型継手）を採用している。これまで山岳トンネルの覆工は、一般的に無筋のコンクリート構造が採用されており、新たな構造を採用するに当たっては、耐荷力や耐久性などについて従来の覆工と同等以上の性能を確保することが必要となる。そこで、本研究では、開発した PCa 覆工が有する耐荷力に関して数値解析による検討を行った。

2. 解析概要

今回開発した PCa 覆工を構成する 1 ピースを図-1 に示す。数値解析には、ファイバーモデルを用いた非線形解析手法を用いた。モデルは図-2 に示す幅 10.6m、高さ 5.3m の単心円である。PCa 覆工は水平より $\theta = 30^\circ$ 、 60° 、 90° 、 120° 、 150° の位置にピース間のくさび継手を有する構造である。ピース間のくさび継手は線形の回転ばねとしてモデル化し、回転ばね定数 k_θ は継手曲げ試験結果等の値を参考に $10^3 \text{kN}\cdot\text{m}/\text{rad}$ と $10^5 \text{kN}\cdot\text{m}/\text{rad}$ の 2 ケースについて検討した。トンネル軸方向のリング配置はイモ継ぎのため、解析は 1 リングで行った。比較のため、従来覆工を厚さ 30 cm の無筋コンクリートとして解析を行った。

PCa 覆工及び従来覆工で用いた鉄筋及びコンクリートの物性値を表-1 に示す。構成側は図-3 に示す。コンクリートは 2 次放物線とし、鉄筋はバイリニア型とした。解析は 2.2kN ずつ上載荷重を増加させ、側圧は側圧係数 $\lambda = 0$ と $\lambda = 0.75$ の 2 ケースとした。トンネル周辺の地盤は引張無視の地盤ばねでモデル化し、地盤反力係数 k_r は次式により求め、地盤の変形係数 E は 100MPa (D II 地山相当)、1000MPa (C II 地山相当)、5000MPa (B 地山相当) の 3 ケースとした。

$$k_r = 1.7 \times \alpha \times E \times D^{-3/4}$$

α : 補正係数 (=1), E : 地盤の変形係数, D : トンネル幅

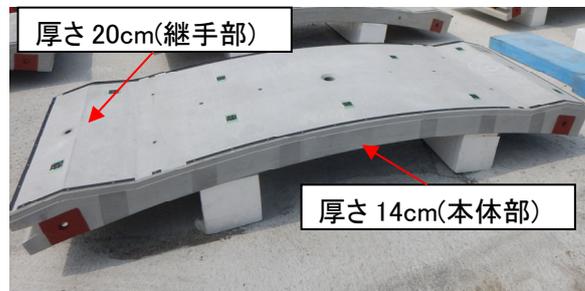
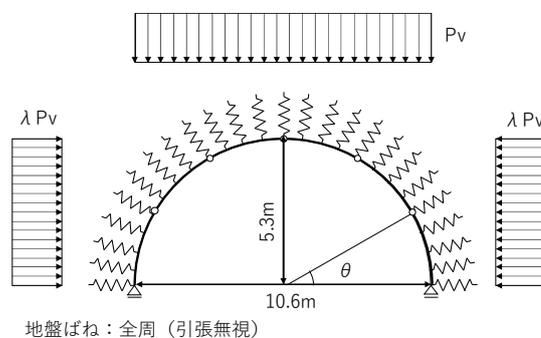


図-1 PCa 覆工

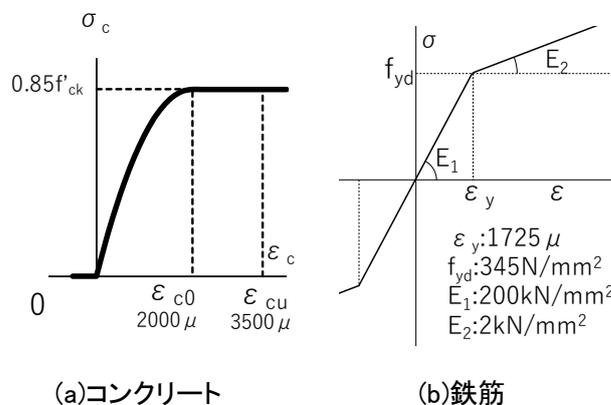


地盤ばね：全周（引張無視）

図-2 モデル図

表-1 物性値

		従来覆工	PCa覆工
コンクリート	設計基準強度	18N/mm ²	40N/mm ²
鉄筋	種類	—	SD345
	主筋	—	D13×8本
継手部	継手種類	—	くさび継手
		—	D19型



(a)コンクリート

(b)鉄筋

図-3 材料構成側

キーワード 山岳トンネル, プレキャスト

連絡先 〒417-0801 静岡県富士市大淵 3145 (一社)日本建設機械施工協会施工技術総合研究所 TEL 0545-35-0212

3. 解析結果と考察

図-4 に変形係数 $E=1000\text{MPa}$, $\lambda=0$ における天端変位と荷重の関係を示す。図-5, 図-6 に従来覆工と PCa 覆工の $k_{\theta}=10^5\text{kN}\cdot\text{m}/\text{rad}$ の MN 図を示す。比較のため、図-4 には線形解析の結果も示した。MN 図は断面破壊荷重の算出のために利用し、MN 耐力曲線と解析から得られた各位置の MN プロットとの交点をそれぞれの断面の破壊荷重として求め、断面の破壊荷重のうち最も小さい荷重を断面破壊荷重とした。また、非線形解析が解析に打ち切りになった荷重を構造全体破壊荷重とした。全ケースの破壊荷重の比較を表-2 に示す。

断面破壊の発生順序は、従来覆工は天端部(曲げ圧縮)→肩部(曲げ圧縮)→脚部(全圧縮)の順であり、PCa 覆工の $k_{\theta}=10^3\text{kN}\cdot\text{m}/\text{rad}$ は肩部(曲げ圧縮)の破壊、 $k_{\theta}=10^5\text{kN}\cdot\text{m}/\text{rad}$ は天端部(曲げ圧縮)→脚部(全圧縮)→肩部(曲げ圧縮)の順であった。なお、PCa 覆工で破壊した部分はすべて厚さ 14cm の本体部で、厚さ 20cm の継手部は破壊しなかった。PCa 覆工の $k_{\theta}=10^3\text{kN}\cdot\text{m}/\text{rad}$ の場合に天端部ではなく肩部が先に破壊した要因として天端に回転ばねを有する構造のため天端部の発生モーメントが肩部に比べて抑えられたことが考えられる。継手の回転ばね定数により断面破壊の発生順序は異なるが、従来覆工と PCa 覆工の断面破壊荷重を比較すると、どちらの回転ばね定数においても従来覆工と同等以上の耐荷力を有することがわかる。加えて、今回検討した 2 ケースの回転ばね定数においては回転ばね定数による断面破壊荷重の差は小さいことも確認された。この傾向は地盤の変形係数、側圧係数が変化してもほぼ同じであった。加えて、線形解析と非線形解析の断面破壊荷重を比較するとほぼ同等の結果であった。

4. まとめ

本研究では開発した PCa 覆工が有する耐荷力に関して数値解析による検討を行い、以下の結果が得られた。

- 解析を行った地山条件、荷重条件の範囲内においては PCa 覆工は従来覆工と同等以上の耐荷力を有する。
- 継手部の回転ばね定数が PCa 覆工の耐荷力に与える影響は小さい。
- 耐荷力を最初に断面破壊が生じた荷重で評価した場合、線形解析は非線形解析とほぼ同等な値を示す。

参考文献

1)真下英人, 井野裕輝, 山田健明, 鹿島竜之介, 夏目岳洋: 山岳トンネルにおける分割型プレキャスト覆工の設計, 土木学会第 74 回年次学術講演会講演概要集, VI-121, 2019

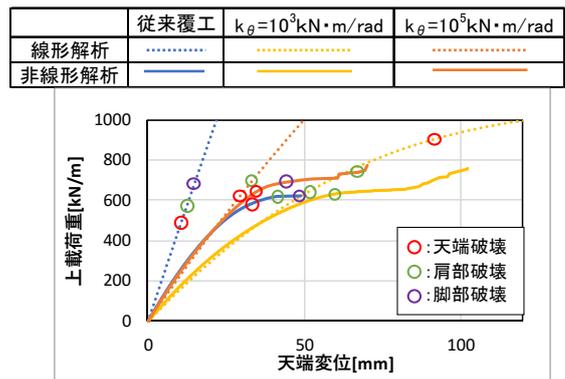


図-4 天端変位—荷重関係

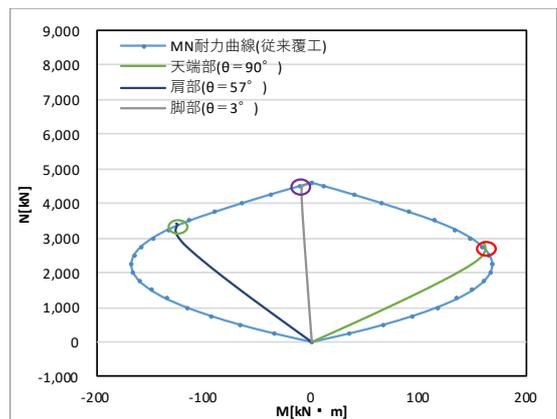


図-5 非線形解析 MN 図(従来覆工)

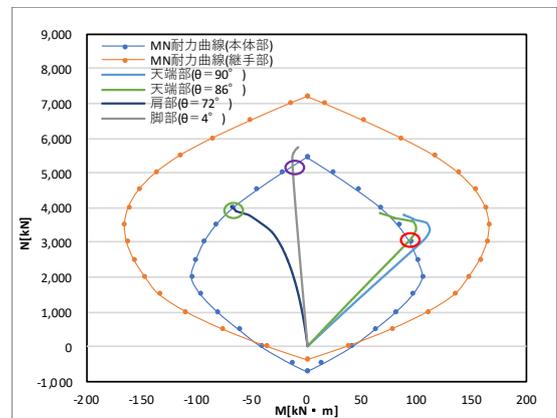


図-6 非線形解析 MN 図($K_{\theta}=10^5\text{kN}\cdot\text{m}/\text{rad}$)

表-2 破壊荷重の比較

変形係数	側圧	破壊形態	従来覆工	PCa覆工		
				$k_{\theta}=10^3\text{kN}\cdot\text{m}/\text{rad}$	$k_{\theta}=10^5\text{kN}\cdot\text{m}/\text{rad}$	
1000MPa	$\lambda=0$	構造全体	28.3	34.4	35.2	
		断面破壊	非線形 26.6(天端部) 線形 19.8(天端部)	28.5(肩部)	28.8(天端部) 27.3(天端部)	
	$\lambda=0.75$	構造全体	36.6	33.7	40.4	
		断面破壊	非線形 32.8(天端部) 線形 31.7(天端部)	33.2(肩部) 35.1(肩部)	36.4(天端部) 36.0(天端部)	
	100MPa	$\lambda=0$	構造全体	24.8	21.7	27.6
			断面破壊	非線形 17.9(天端部)	21.1(肩部)	20.0(天端部)
$\lambda=0.75$		構造全体	32.9	31.4	35.7	
		断面破壊	非線形 31.0(天端部)	28.0(肩部)	32.7(天端部)	
5000MPa	$\lambda=0$	構造全体	28.8	30.6	33.8	
		断面破壊	非線形 27.8(天端部)	29.1(肩部)	29.8(肩部)	
	$\lambda=0.75$	構造全体	34.1	37.7	47.5	
		断面破壊	非線形 33.0(天端部)	33.7(肩部)	36.8(天端部)	

※破壊荷重は $\gamma=22\text{kN}/\text{m}^3$ として土被り高さに換算