

「スーパーリング工法」の開発 －設計手法と実物大施工実験の再現解析（その3）－

鹿島建設(株) 正会員 ○望戸健雄, 小坂琢郎, 牛垣 勝, 増田昌弘

1. はじめに

スーパーリング工法は、開削/非開削工法で確保された施工空間にプレキャスト部材であるセグメントをリング状に組み立ててトンネルを構築する工法である。リング構造は、シールドトンネル工法で実績のあるP&PCセグメント¹⁾をベースとしており、リングの円周方向と軸方向に配置したPC鋼材にPC緊張力を導入することで一体化を図っている。また、継手は、セグメント継手は突合せ継手、リング継手は本工法のために開発した“モルタル中詰鋼管継手”を標準としている。本報では本工法の設計手法を紹介するとともに、実物大施工実験の再現解析を行ったので、その結果について報告する。

2. 設計手法

リングの設計はシールドトンネル工法のセグメントの設計手法に準じた。解析モデルは千鳥組みの効果を再現できる“はりばねモデル”とし、図-1に示すリング継手（モルタル中詰鋼管継手）のせん断ばね定数は、実物大せん断試験から得られたばね定数を使用することとした。本継手は、予めリング継手孔へモルタル中詰鋼管を配置しておき、リングの軸方向連結後に無収縮モルタルを充填するものである。鋼管仕様やモルタル強度は作用荷重に応じて設定でき、所要のせん断耐力を確保できる。セグメント継手の回転ばね定数は、継手部の幾何学的関係から導かれたLeonhardt(レオンハルト)の“Betongelenke(ベトンゲレンケ)の理論式”をベースに3段階の偏心率($m=1/6, 1/4, 1/3$)に応じた階段状のばね定数で設定する方法を採用した(図-2)。

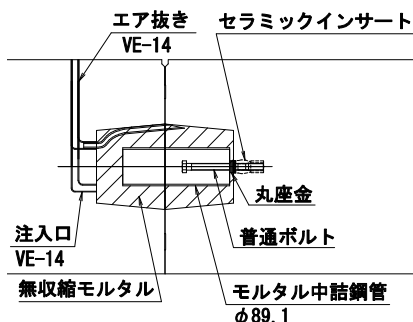
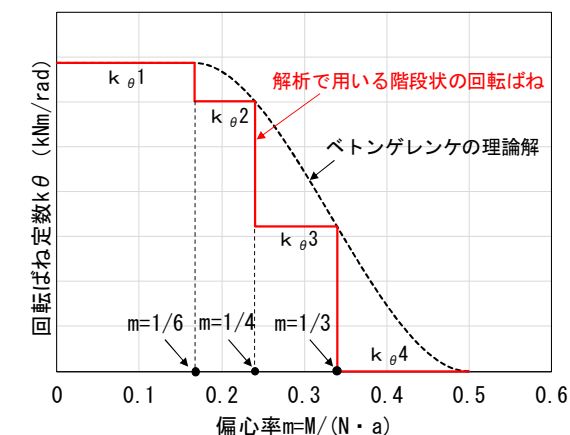


図-1 リング継手（モルタル中詰鋼管継手）の構造



$$k_{\theta} = \alpha \cdot \frac{M}{\theta}$$

$$= \frac{9a^2 \cdot b \cdot E}{8} m \cdot (1-2m)^2$$

k_{θ} : 回転ばね定数 (kN・m/rad)
 m : 荷重偏心率 (= 偏心量 $e/a = M/(N \cdot a)$)
 M : 曲げモーメント (kN・m)
 N : 軸力 (kN)
 θ : 継手部の回転角 (rad)
 a : セグメント桁高 (m)
 b : セグメント幅 (m)
 E : コンクリートのヤング係数 (kN/m²)
 α : 回転ばね定数の低減率 (=0~1.0)

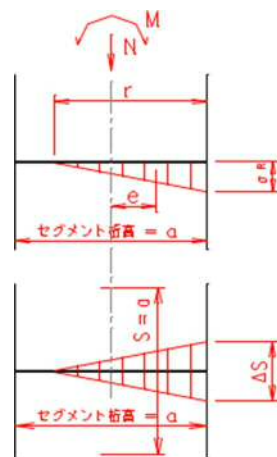


図-2 セグメント継手の回転ばね定数

3. 再現解析

実物大施工実験で計測したリング真円度（変形量）とセグメント間の目開き量を対象に再現解析を行った。実験では4リングを製作し、地組み→立起し→吊上げ→設置→スライド→軸方向連結を4回繰り返しており、リング真円度（変形量）の計測を全リングで行った。また、計測は地組み後、設置後、隣接リング接続完了後に行った。セグメント間の目開き量の計測は、地組み後に計測器を設置し、リングNo.1のみで実施した。

キーワード スーパーリング工法, 設計手法, 実物大施工実験, 再現解析

連絡先 〒107-8502 東京都港区赤坂 6-5-30 鹿島建設(株) 土木設計本部 地下空間設計部 TEL 03-6229-6623

再現解析は、リング真円度（変形量）とセグメント間の目開き量を計測したリング No.1 を対象とし、解析モデルは“単リングはりばねモデル”で、地組み（平置き緊張時）から設置後までを解析した。コンクリートのヤング係数や円周方向 PC 緊張力は実測値を用いた。再現解析の入力条件を表-1 に示す。

解析手法は、前ステップの継手部断面力、荷重偏心率 m および支点反力を次ステップに引き継ぐ逐次解析とし、3 ステップに分けた（図-3）。解析ステップ 1[地組み時（平置き緊張時）]では平置き状態のため自重は作用させておらず、PC 緊張力を法線方向等分布荷重に置き換えた荷重（195.1kN/m²）のみ作用させた。解析ステップ 2[吊上げ時]や解析ステップ 3[設置時]では、吊り点（上部 90 度）やスライドレール位置（下部 60 度）を支点でモデル化し、解析ステップ 2 から鉛直方向下向きに自重を作用させた。

表-1 再現解析の入力条件

コンクリートのヤング係数	E	(kN/mm ²)	30.1
円周方向 PC 緊張力	$\angle P$	(kN/m)	1122
リング外径	Do	(m)	12.0
リング内径	Di	(m)	11.0
セグメント桁高(覆工厚)	a	(m)	0.5
セグメント幅	b	(m)	1.0
図心半径	Rc	(m)	5.75
セグメント分割数	—	—	8等分割
セグメント振り角	—	(度)	11.25
法線方向等分布荷重	$p=\angle P/Rc$	(kN/m ²)	195.1
セグメントの単位体積重量	γc	(kN/m ³)	26.0
回転ばね定数	$k_{\theta 1}$	(kN・m/rad)	627900
	$k_{\theta 2}$	(kN・m/rad)	550100
	$k_{\theta 3}$	(kN・m/rad)	295100
	$k_{\theta 4}$	(kN・m/rad)	0
回転ばね定数の低減率	α	—	1.0

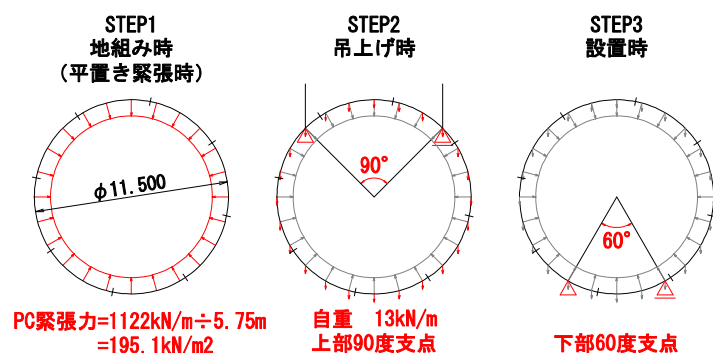


図-3 解析ステップ

4. 解析結果

図-4 に地組み時（平置き緊張時）と設置時の変形量（真円からの変位量）の比較結果を示す。また、表-2 に鉛直方向（0 時～6 時）と水平方向（3 時～9 時）のリングのつぶれ量の比較結果を示す。鉛直方向の変形量やつぶれ量は概ね再現できたが、設置時の水平方向の変形量やつぶれ量は実測値が大きい結果となった。なお、目開き量については実測値が解析値に比べて大きい結果となった（表-3）。本検討では回転ばね定数の低減率 α は 1.0 として解析を行ったが、実際は、回転ばね定数が理論値に比べて小さい可能性がある。

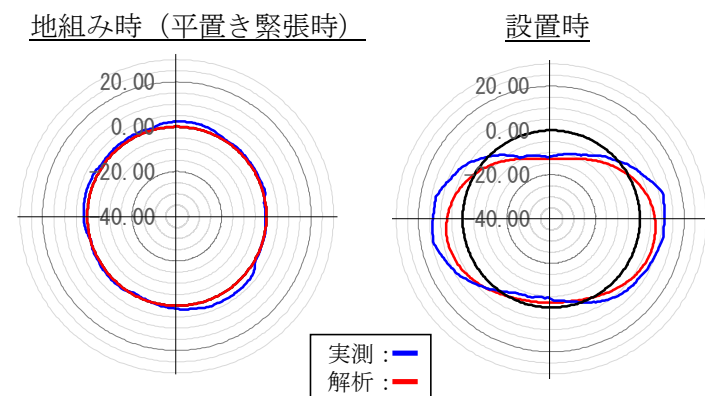


図-4 リングの変形量の比較

表-2 リングのつぶれ量の比較

	単位	地組み時		設置時	
		鉛直	水平	鉛直	水平
解析値	(mm)	0.0	0.0	15.2	-14.1
実測値	(mm)	-3.8	-1.4	15.7	-24.6

注) 符号+（正）は真円状態からつぶれた状態を示す

表-3 目開き量の比較

	単位	目開き量			
		0時	3時	6時	9時
解析値	(mm)	0.08	0.08	0.05	0.16
実測値	(mm)	0.72	0.58	0.34	0.70

注) リングNo.1の設置後

5. おわりに

今回、実物大施工実験の実測値について“はりばねモデル”を用いて再現解析を試みた。解析の結果、リングの鉛直方向の変形量やつぶれ量については実測値を概ね再現することができた。今後は、回転ばね定数の設定方法の見直しなどを行い、水平方向変形量や目開き量についても再現を試みる予定である。

参考文献

- 1) シールド工法技術協会：P&PC セグメント工法 ―技術資料―，平成 19 年 6 月