

# 山岳トンネル覆工における分割型プレキャスト覆工システムの開発

井野 裕輝

## 1. はじめに

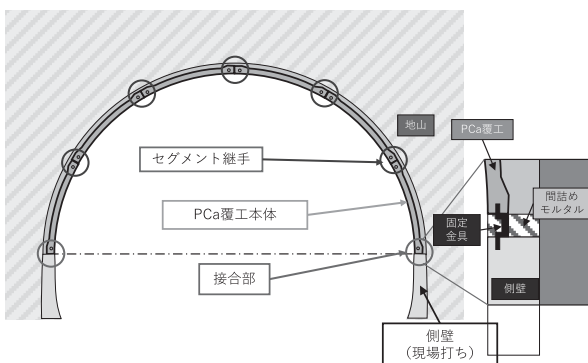
山岳工法により建設される覆工の構築方法は、現場打設が標準となっている。覆工作業の生産性向上を目的に分割型プレキャスト覆工（以下、PCa 覆工）を用いて機械により組み立てる工法の開発を清水建設(株)と(株)IHI 建材工業業との共同研究により行っている。覆工のプレキャスト化により、工程短縮や省人化が図れるとともに高品質な構造物を構築することができる。しかし、従来の覆工構造と異なる点を有しており、耐荷力など必要な性能の確保が重要となる。

本稿は、PCa 覆工の開発における実物大の供試体を用いた載荷試験と数値解析による従来覆工との耐荷力比較について報告するものである。

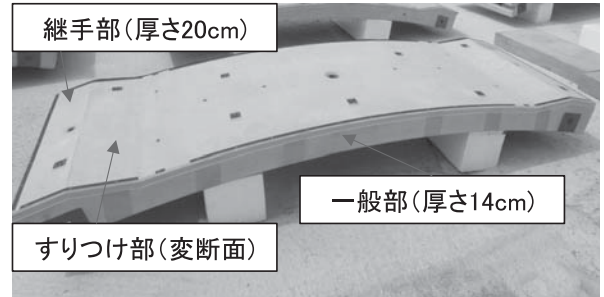
## 2. 分割型 PCa 覆工システムの概要

### (1) PCa 覆工の構成

図一1に開発を行っているPCa覆工の概要を示す。PCa覆工は、上半アーチ1リングが6つのピースにより構成される構造で、継手にはシールドトンネルで多くの実績のあるワンパス型の継手(セグメント継手:くさび継手〈2か所/断面〉, リング継手:ピン挿入型継手〈2か所/断面〉)を採用しており、トンネル軸方向のリング配置はイモ継ぎとした。PCa覆工本体は、図一2に示すように幅は1m、厚さは一般部が14cm、継手部が20cmであり、すりつけ部は変断面



図一1 PCa 覆工の概要

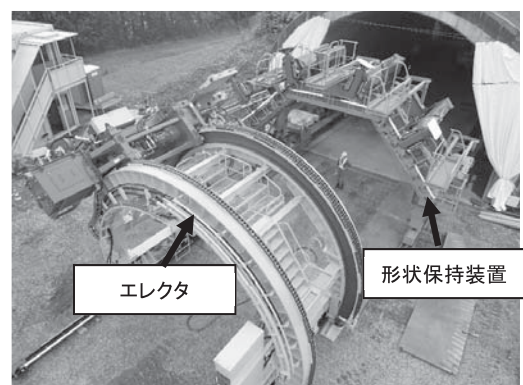


図一2 PCa 覆工本体の外観

となっている。無筋構造が基本である従来覆工と異なり、有筋構造で主筋としてSD345-D13を配置している。コンクリートの設計基準強度については、従来覆工の $18 \text{ N/mm}^2$ よりも高強度な $40 \text{ N/mm}^2$ とした。側壁部は現場打ちコンクリートで厚さは30cm、設計基準強度は $18 \text{ N/mm}^2$ で無筋構造としている。上半アーチ部と側壁部の接合部は、固定金具でPCa覆工と側壁コンクリートをつなぎ、隙間を設計基準強度 $24 \text{ N/mm}^2$ のモルタルで埋める構造である。これらの構造諸元を基本とするが、個別の条件に合わせて適宜決定する。

### (2) 架設装置

架設機械は組立を行うエレクタ(図一3手前)と組立中の形状を保持する形状保持装置(図一3奥)の2台で構成される。架設の手順を図一4に示す。まずエレクタがプレキャスト部材を把持し、組立位置まで移動させる。次に、エレクタのスライド力により継手



図一3 架設機械の外観

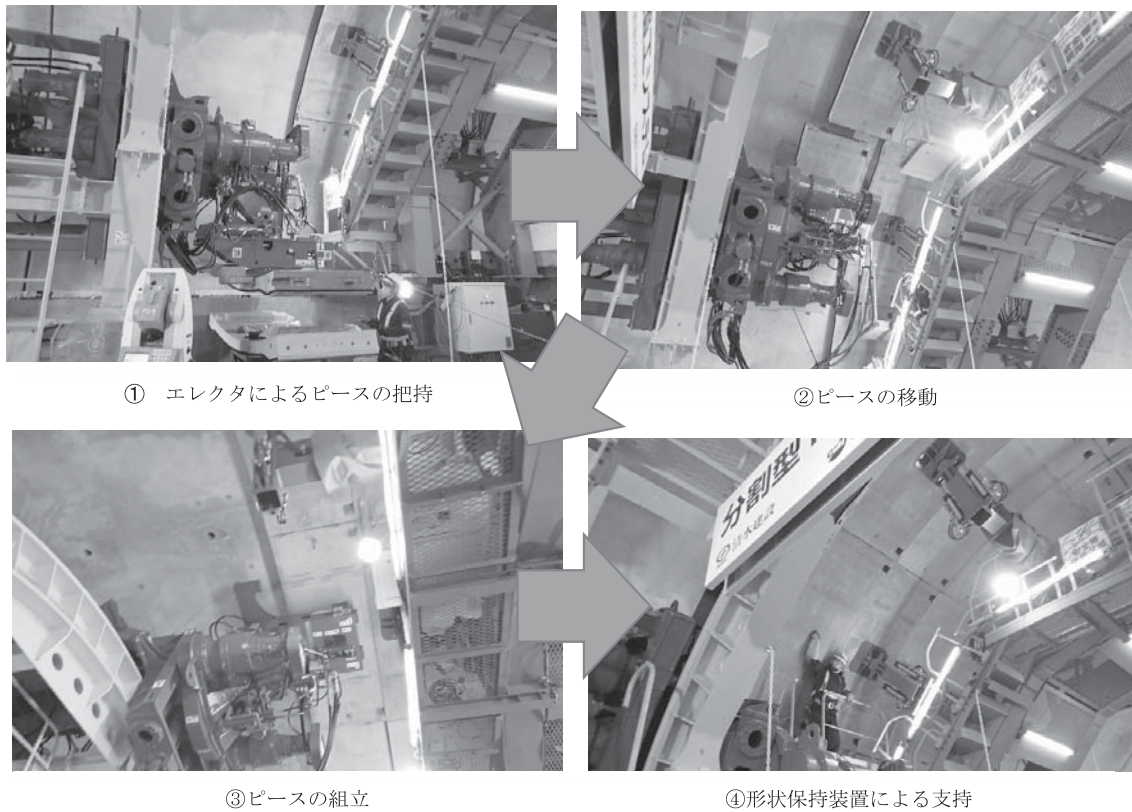


図-4 施工フロー

を挿入し組み立てる。エレクタがプレキャスト部材を離れた後に、形状保持装置が組み立て済みの部材を保持する。その後、プレキャスト部材に設置された形状保持ボルトを作用させて、変形を抑制する。1リング分(6ピース)組立終了後に形状保持装置を解除し、エレクタ及び形状保持装置を次の施工位置に移動する。

実際のトンネル内を模擬した実証実験を弊所敷地内の模擬トンネルにて実施した。実施後の様子を図-5に示す。9リング分の施工実験を行い、下記のような結果が確認された。

- ① PCa 覆工 1 ピースの把持～設置～形状保持までの一連の作業は平均 10 分で完了した。
- ② PCa 覆工の形状は全線を通して設計値の  $\pm 5$  mm 以内と非常に高精度で施工できた。



図-5 実証実験後の覆工

### 3. 実物大載荷実験

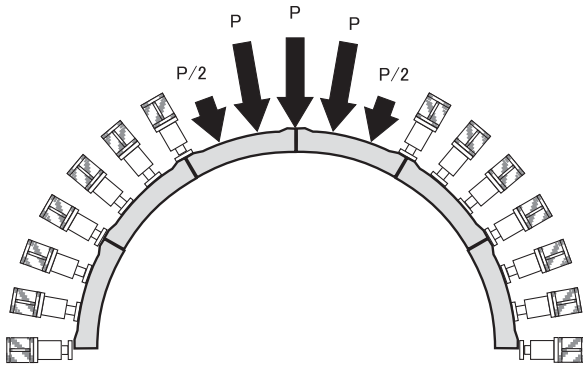
#### (1) 試験概要

新たに開発した PCa 覆工の耐荷力を検証するためにプレキャスト部材から構成される上半アーチ部を対象とした実物大の載荷実験とシミュレーション解析を行った。実験の外観を図-6に示す。実験装置は、地盤反力の模擬と載荷のために、ジャッキを  $10^\circ$  ピッチで 19 箇所設置した構造とした。供試体は 2 車線の道路トンネルを想定し、プレキャスト部材 6 ピースで構成される内径 10.6 m、高さ 1 m の半円形とした。水平より  $30^\circ$  ピッチでの位置に存在するプレキャスト部材同士の接合部にはセグメント継手を有する構造である。載荷方法は荷重制御(図-7参照)にて行い、天端及び両側  $10^\circ$ 、 $20^\circ$  離れた位置に載荷した。



図-6 実物大実験の外観





図一七 荷重方法の概要

(2) 解析概要

今回開発したPCa覆工の耐荷力評価手法の検討を目的に数値解析による実験のシミュレーションを行った。様々な解析手法がある中で、今回はファイバーモデルを用いた非線形解析手法を採用した。PCa覆工を評価する上で、従来覆工にはない継手部分のモデル化が重要となり、今回はシールドトンネルにおけるセグメントの評価に用いられる手法を参考に線形の回転ばねでモデル化して解析を行った。

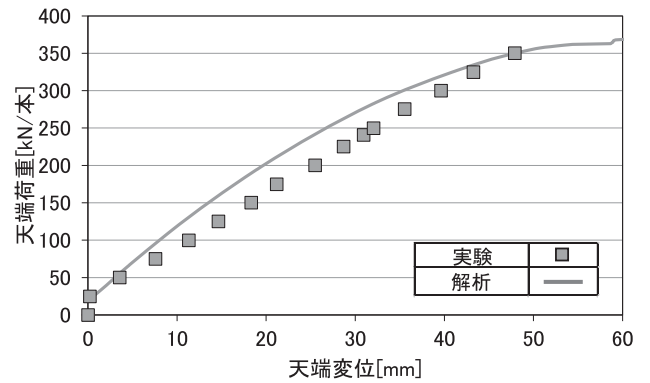
(3) 試験及び解析結果

試験では最終的に荷重値が350 kN/本を超えた時に天端部から反時計回りに5~10°付近の部材厚さが薄くなった一般部の外面において圧壊によるひび割れが生じ、構造全体の破壊に至った。破壊状況を図一八に示す。覆工構造全体の破壊に至った時の天端の変位量は48 mmでトンネル半径に対する比率(変形率)は約0.9%となる。

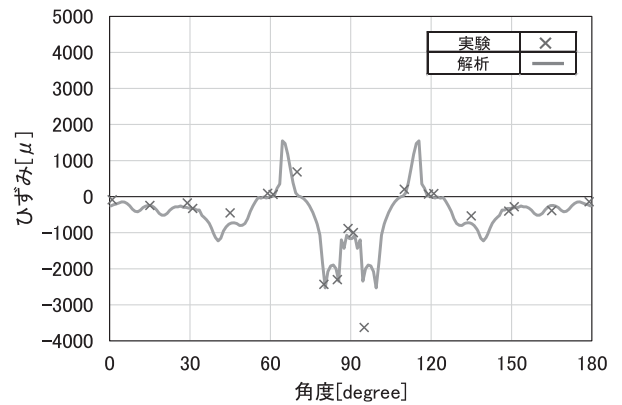
実験で得られた天端荷重と変位の関係とその解析値を図一九に示す。実験値の傾向を概ね再現できており、今回採用した手法で開発したPCa覆工の変形挙動を再現できることが確認できた。次に、荷重が300 kN/本時の外面ひずみ分布を図一十に示す。ある荷重点における外面ひずみ分布もおおよそ再現できており、今回採用した解析手法が妥当であることが確認できた。



図一八 覆工コンクリートの破壊状況



図一九 実験結果と解析結果の比較(変位荷重関係)

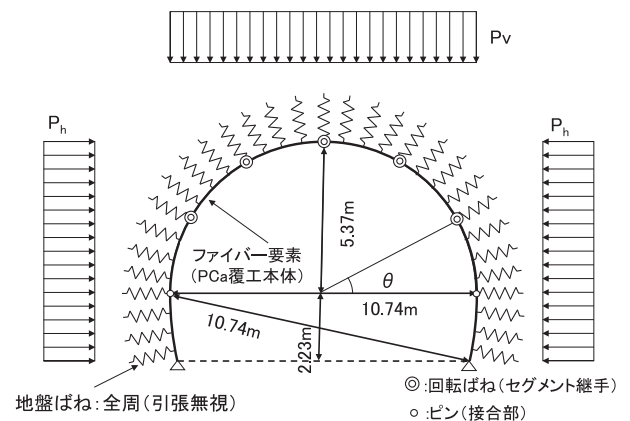


図一十 実験結果と解析結果の比較(外面ひずみ分)

4. 解析による従来覆工との耐荷力の比較

(1) 比較概要

新たに開発したPCa覆工を対象とした解析手法の妥当性を実物大荷重実験との比較により確認できた。そこで、従来から用いられている覆工と同等以上の耐荷力を有していることを確認するために、比較解析を行った。比較解析では、実際の地山を想定し、図一十一に示すように荷重は鉛直及び水平方向に作用させ、地盤による反力を模擬したばねを全周にわたって配置した。なお、PCa覆工のコンクリート設計基準



図一十一 比較概要

強度は  $40 \text{ N/mm}^2$  で、従来覆工及びPCa覆工における現場打ちとなる側壁部はコンクリート設計基準強度  $18 \text{ N/mm}^2$ 、厚さ  $30 \text{ cm}$  の無筋コンクリートとした。

(2) 比較結果

今回断面の破壊荷重の評価手法として、コンクリートの終局ひずみと鉄筋の降伏ひずみで規定される M-N 破壊包絡線を採用した。図-12 中の○で示したのが、発生する断面力が、M-N 破壊包絡線と交差する時の荷重値である。鉛直荷重のみの場合の結果を図-13に、水平荷重のみの場合の結果を図-14に示す。

鉛直荷重のみの場合については、従来覆工とPCa覆工ともに天端部で断面破壊が生じている。断面破壊荷重で耐荷力を評価すると、PCa覆工は従来覆工と同等以上の耐荷力を有していることが確認された。

水平荷重のみが作用する場合については、PCa覆工のコンクリートの設計基準強度を  $48 \text{ N/mm}^2$  に大きくしたのも示す。従来覆工は側壁部で断面破壊を生じているのに対して、PCa覆工は上半脚部において断面破壊が生じている。耐荷力は従来覆工に比べてやや劣る結果となったが、コンクリート強度を増加させることにより、同等の耐荷力確保が可能となった。

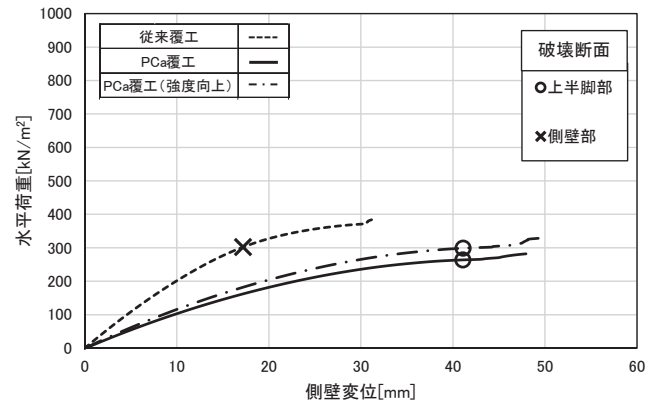


図-14 変位関係 (水平荷重のみ)

5. おわりに

覆工作業の生産性向上を目的とした分割型プレキャスト覆工を用いて専用の架設機械で組立てる覆工システムの開発において、下記のことが確認できた

- ①架設機械の開発及び覆工組立の実証実験を行い、本工法の省人化への有効性を確認した。
- ②実物大実験を対象としたシミュレーション解析によって、従来とは異なる構造を有する分割型プレキャスト覆工においても、解析的手法が有効であることが確認できた。
- ③数値解析による検討によって、本工法が従来の覆工と同等以上の耐荷力を確保できることが確認できた。

これらは、一つの断面形状のPCa覆工を対象に実施した実験と解析にて得られた知見であり、今後各種現場条件に応じた検討は必要と考えている。

J C M A

《参考文献》

- 1) 小池 悠介, 安井 成豊, 井野 裕輝, 土谷 勝也, 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システムの実物大実証実験, 土木学会第76回年次学術講演会講演概要集, VI-922, 2021
- 2) 吉武 謙二, 鹿島 竜之介, 真下 英人, 井野 裕輝, 夏目 岳洋, 山岳トンネルにおけるプレキャスト覆工の変形挙動に関する実験的検討, 土木学会第76回年次学術講演会講演概要集, III-14, 2021
- 3) 井野 裕輝, 真下 英人, 吉武 謙二, 鹿島 竜之介, 夏目 岳洋, 山岳トンネルにおけるプレキャスト覆工の変形挙動に関する数値解析的検討, 土木学会第76回年次学術講演会講演概要集, III-15, 2021

【筆者紹介】

井野 裕輝 (いの ゆうき)  
 (一社)日本建設機械施工協会  
 施工技術総合研究所  
 研究第一部 研究員

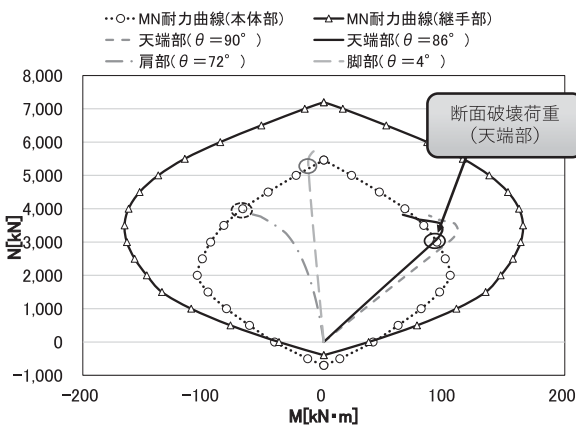


図-12 MN破壊包絡線と評価方法

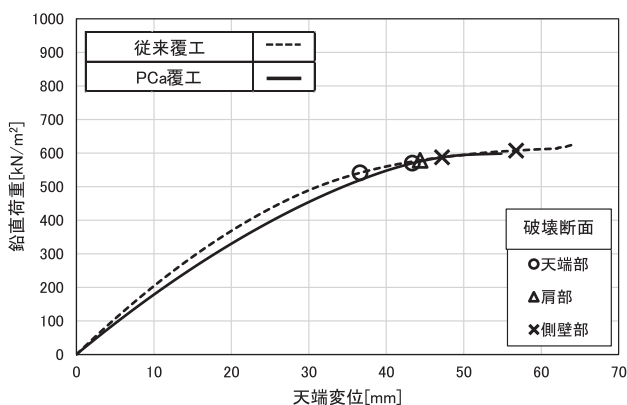


図-13 荷重変位関係 (鉛直荷重のみ)