

実大規模載荷実験によるプレキャスト覆工版の耐荷力の評価

PCL 協会：(株) IHI 建材工業 正会員 夏目 岳洋 ジオスター (株) 正会員 ○藤原 慎八
日本コンクリート工業 (株) 正会員 小嶋 賢 日本サミコン (株) 正会員 渡部 敏
国立開発研究法人土木研究所 道路技術研究グループ：正会員 小泉 悠 正会員 菊地 浩貴

1. はじめに

近年、品質向上や施工の合理化・省力化を目的に、様々な工事でプレキャスト化が推進されているが、山岳トンネルの覆工は、トンネル条件に合わせた巻厚の場所打ちコンクリートが採用されることが多い。また、プレキャスト版を覆工に用いた場合の耐荷力は明らかにされていない。そこで、山岳トンネル覆工構造として既設トンネルの内巻補強工（プレキャスト工）の一種である当協会のプレキャスト版を用いた場合の耐荷力や破壊性状、結合部の性能について確認することを目的に、実大規模の載荷実験を実施した。

2. 実験概要

写真-1 に実験装置および供試体の概要を、写真-2 に天端結合部の概要を示す。実験に用いたプレキャスト版は、天端に結合部を用いた 2 分割構造とし、内径 9.2m、版幅 1.0m の構造仕様を試設計により設定した。試設計では部材をファイバー要素でモデル化し、既往研究¹⁾で示された解析モデルおよび

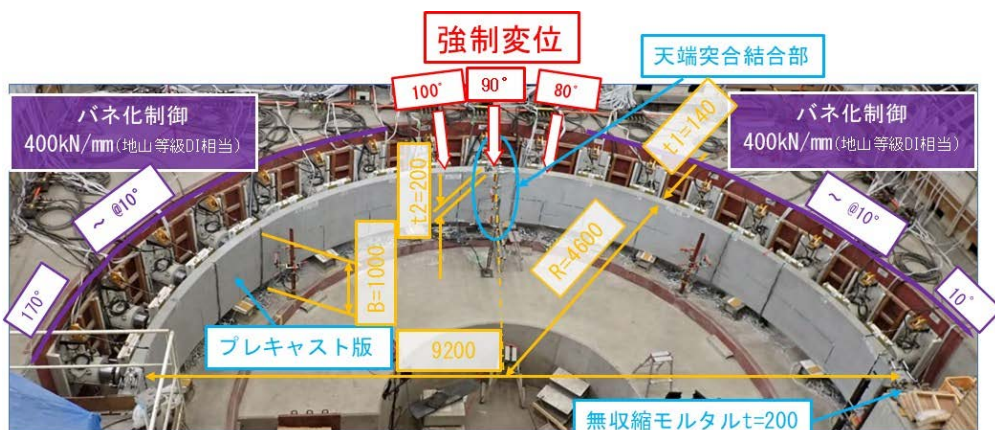


写真-1 実験装置および供試体概要

解析条件を適用して実施した。解析に際して既往研究¹⁾の実験で得られた数値を基に再現解析を実施し、コンクリートの圧縮強度の補正 ($f'_{ck}=25.4\text{N/mm}^2 \rightarrow f'_{ck}=18\text{N/mm}^2$) を行うことで、厚さ $t=30\text{cm}$ 、設計基準強度 $f'_{ck}=18\text{N/mm}^2$ の場所打ち覆工の耐荷力を 1748kN と想定した。これと同等の耐荷力が期待できるプレキャスト版の仕様として、 $t=14\text{cm}$ 、 $f'_{ck}=60\text{N/mm}^2$ の RC 構造で、D16 鉄筋を内外面に各 8 本配置することとした。天端はカギ型形状となっており、部材端面から M24 ボルトを挿入してプレートとナットを配し、締付けトルク $100\text{N}\cdot\text{m}$ で連結した。また、天端の突合せ部には、厚さ 5mm、硬度 65 のゴム板を配置した。脚部は、試験装置との取り合いのため 200mm の調整幅を確保し、供試体設置後に供試体と同等強度となる無収縮モルタルで調整部を二次施工した。

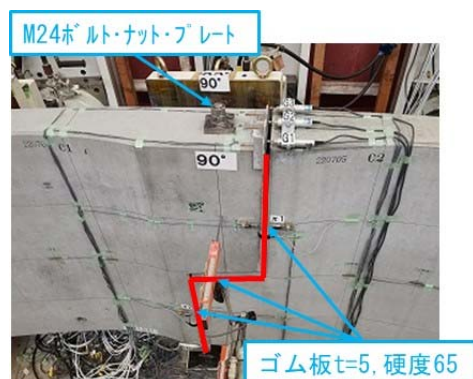


写真-2 天端結合部の概要

実験は、写真-1 に示した通り、覆工を内面側から見て右側を 0° と定義した座標系において、半円形の反力枠に油圧ジャッキを 10° ピッチで 17 箇所配置された試験装置を用いて行った。まず予備載荷として $10\sim 170^\circ$ 全ジャッキを荷重制御にて段階的に 40kN となるまで載荷し、軸力を導入した。その後、本載荷として、天端からの緩み土圧を想定し、 $80\sim 100^\circ$ の 3 つのジャッキを載荷ジャッキとして $1\sim 2\text{mm/min}$ の載荷速度で、 $80^\circ : 90^\circ : 100^\circ = 0.5\text{mm} : 0.8\text{mm} : 0.5\text{mm}$ の比で内空側へ変位制御で載荷を行った。このとき載荷ジャッキ以外のジャッキはバネ化制御とし、地山側の変形に対して反力を与えることで地山を模擬した。なお、バネ値は 400kN/mm に設定しており、ここで模擬される地山の変形係数は 500MN/m^2 程度（地山等級 DI 相当）となる。

キーワード トンネル、覆工、プレキャスト、耐荷力、結合部

連絡先 〒130-0026 東京都墨田区両国 2-10-14 (株) IHI 建材工業内 PCL 協会事務局 TEL03-6271-7327

3. 実験結果および考察

表-1に管理供試体の強度試験結果を示す。各試験は載荷実験前日に行ったものであり、設計基準強度 $f'_{ck}=60\text{N/mm}^2$ よりも 16%程度高強度であった。図-1に載荷実験時の荷重－変位曲線を示す。荷重は載荷ジャッキ 3 台の合計値で、変位は 90° 位置の内側方向への変位とした。また、試設計で実施した解析の結果、既往研究で行った場所打ち覆工の実験および解析の結果についても示す。

実験では、図-1 グラフの①実験-69.4NRC14cm-突合結合に示したとおり、最大荷重 2355kN を示した後、天端の断面変化部の内面側で圧縮破壊した(写真-3)。耐力は試設計で用いた場所打ち覆工の②実験-25.4N 無筋 30cm の最大荷重 2421kN を若干下回ったが、②からコンクリート強度の補正を行った③解析-18N 無筋 30cm の最大荷重 1748kN を上回った。また、解析で天端部の結合条件を変えて試算した最大荷重に対しては、④解析-60NRC14cm-剛結合の 2625kN と⑤解析-60NRC14cm-ピン結合の 1506kN の間で、1000kN 程度までの傾きは⑤に近くそれ以降は④に近い傾きとなり、最終的には④に近い耐力が得られた。

ここで、結合部の挙動を把握するため、天端近傍 (85° , 95°)の鉄筋ひずみ計測データより求めた曲げモーメントと、結合部に設置した変位計による目開き角度から算出した $M-\theta$ 曲線を図-2 に示す。 $M-\theta$ 曲線は、初期の載荷から $\theta=0.02\text{rad}$ (載荷重 1000kN 程度)までは解析の頂部結合をピン結合としたモデルと近似し、 $\theta=0.04\text{rad}$ (載荷重 2000kN 程度)までと最大荷重までの 2 段階で解析の頂部結合を剛結合としたモデルに近づく様に、ほぼ 3 段階の線形となって推移した。荷重の増加に伴ってゴム板が圧縮され、結合部の見かけの回転剛性が増加したものと考えられる。

4. まとめ

山岳トンネル覆工としてプレキャスト版を用いた実大規模の載荷実験を行った結果、今回の載荷条件においては、一般的な場所打ち覆工と同等以上の耐力を有することが確認できた。また、天端部の結合構造の回転バネ性能の参考資料を得ることが出来、今後の再現解析に向けた基礎データが得られた。トンネル覆工にプレキャスト部材を適用する場合に備え、引き続き実験及び解析的検討を重ねていく所存である。

なお、本実験は PCL 協会と(国研)土木研究所との「プレキャスト部材の適用による山岳トンネルの覆工構造の力学的性能等に関する共同研究」の一環として行われたものである。

参考文献

1) 菊地浩貴, 日下敦, 砂金伸治, 佐々木亨, 巽義知: 山岳トンネルにおける覆工の耐力性能の評価手法の提案, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学), Vol. 78, No. 2, p. I1-I15, 2022.

表-1 強度試験結果

項 目			PCL版製作2日平均値	無収縮モルタル脚部
覆工厚	t	mm	140 ※1	196
圧縮強度	f'_{ck}	N/mm^2	69.4	82.9
引張強度	f_t	N/mm^2	4.00	※2
ヤング係数	E	kN/mm^2	36.22	26.85
ポアソン比	ν	-	0.20	0.25

※1 天端結合部は200mm,脚部は196mm

※2 割裂引張試験未実施のため、引張強度未取得

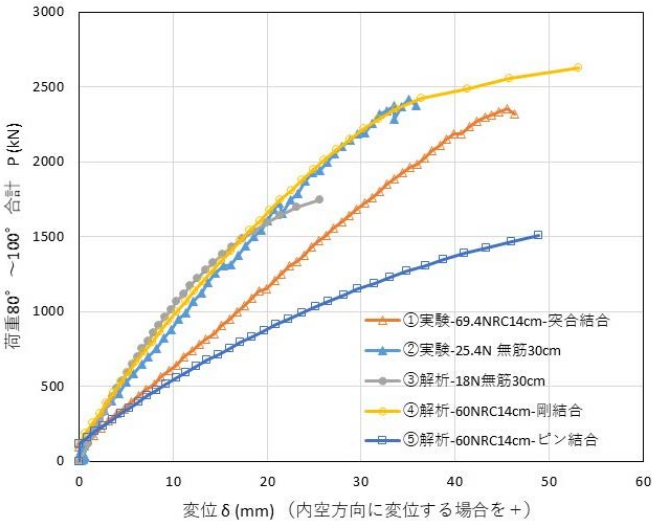


図-1 荷重-変位曲線

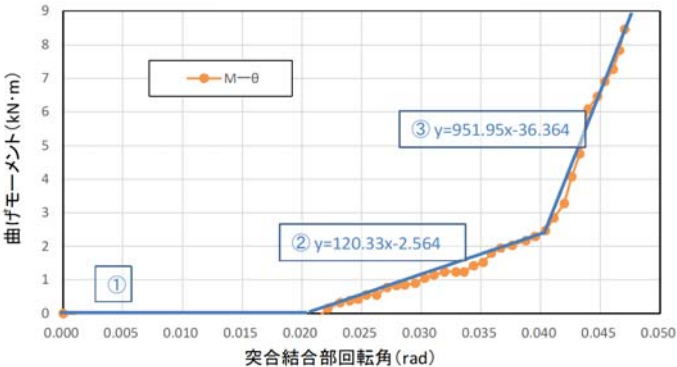


図-2 M-θ 曲線



写真-3 頂部の載荷後状況