

数値解析による山岳トンネルにおける プレキャスト覆工の耐荷力の評価

真下 英人¹・井野 裕輝²・鹿島 竜之介³・夏目 岳洋⁴

¹正会員 一般社団法人日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所 (〒417-0801 静岡県富士市大淵 3154)
E-mail: mashimo@cmi.or.jp

²正会員 一般社団法人日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所 (〒417-0801 静岡県富士市大淵 3154)
E-mail: ino@cmi.or.jp

³正会員 清水建設株式会社 土木技術本部シールド統括部 (〒104-8370 東京都中央区京橋 2-16-1)
E-mail: kashima@shimz.co.jp

⁴正会員 株式会社 IHI 建材工業 事業推進統括部 (〒130-0026 東京都墨田区両国二丁目 10 番 14 号)
E-mail: natsume3024@ihi-g.com

山岳工法により建設されるトンネルの覆工を構築する作業の施工性向上のために、分割されたプレキャスト覆工を機械により組み立てる工法の開発を行っている。プレキャスト覆工の構造は、従来の現場打ち覆工とは、厚さ、継手の存在などの点で異なるため、現場への適用に当たっては従来の覆工と耐荷力や耐久性などに関して同等の性能を有していることを検証しておく必要がある。このため、本研究では材料の非線形性が考慮できるファイバーモデルを用いた数値解析により、プレキャスト覆工の耐荷力の評価を行った。その結果、プレキャスト覆工は従来の覆工と同等の耐荷力を有しており、破壊の形態もほぼ同じであること、継手の剛性がプレキャスト覆工の耐荷力に及ぼす影響は小さいことなどが明らかとなった。

Key Words: precast tunnel lining, load-bearing capacity, mountain tunneling method, numerical analysis, fiber model

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が、作業の施工性を向上させるために、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覆工を組み立てる工法の開発を行っている。覆工のプレキャスト化を図ることにより、省人化、工期の短縮が図れるとともに、施工に起因するひび割れの発生が抑制され、品質の高い長期耐久性に優れた構造物の構築が可能となるが、PCa覆工の構造は従来覆工とは厚さが薄い、継手が存在するなどの点で異なるため、必要とされる性能の確保が重要となる。しかし、これまでの山岳工法によるトンネルの覆工（以下、従来覆工）の設計では、その仕様は性能照査を行って決められているのではなく、施工性などを考慮して経験的に基づいて決められており、目標とする性能は規定されていない。このため、従来覆工と異なる構造を採用するに当たって

は、耐荷力や耐久性などに関して従来覆工と同等の性能を有していることを検証しておく必要がある。本研究では、材料の非線形性を考慮した数値解析により、荷重条件を変えてPCa覆工および従来覆工が破壊する時の荷重を算出し、PCa覆工が有する耐荷力の評価を行った。

2. 解析方法

(1) 分割型プレキャスト覆工の概要

図-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複鉄筋構造で、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（2 か所／断面）、リング間：ピン挿入型継手（2 か所／断面））を採用している。PCa 覆工の 1 ピース（写真-1 参照）の幅は 1m、厚さは一般部は 14cm、継手部は 20cm、

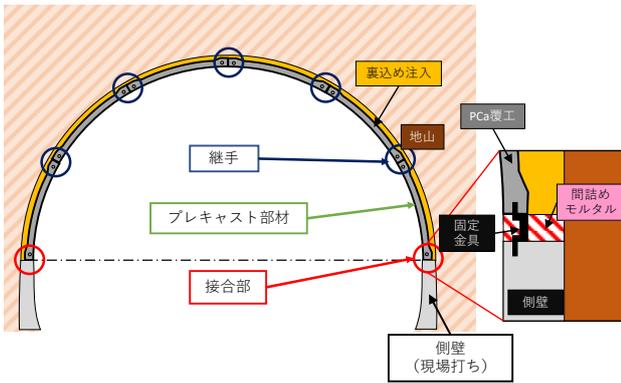


図-1 プレキャスト覆工の概要

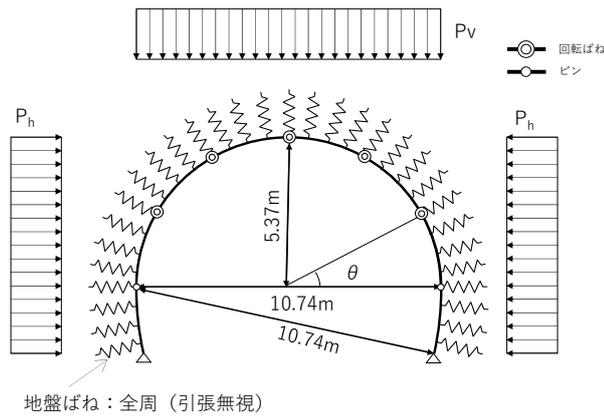


図-2 解析モデル

すりつけ部は変断面，コンクリートの設計基準強度は 40N/mm^2 で，主筋は D13 が 8 本，継手部のアンカー筋は継手一か所につき D19 が 2 本配置されている．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 18N/mm^2 で無筋となっている．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 24N/mm^2 のモルタルで埋める構造となっている．

(2) 解析モデル

図-2 に解析モデルを示す．解析には，材料の非線形性が考慮できるファイバーモデルを用いた．モデルは 2 車線の道路トンネル相当の断面を有し，上半アーチは幅 10.74m ，高さ 5.37m の単心円である．PCa 覆工は，一般部，継ぎ手部，すりつけ部で厚さが異なるため，それぞれ厚さが 14cm ， 20cm ， 17cm のはりモデル化した．また，スプリングラインより $\theta=30^\circ$ ， 60° ， 90° ， 120° ， 150° の位置にあるピース間のくさび継手は回転バネとしてモデル化した．回転バネ定数 k_θ は軸力の増加とともに大きくなり，また，軸力が同一であっても発生する回転角によって非線形の挙動を示す．理論計算によれば軸力が全く作用しない場合は $k_\theta=3 \times 10^3 \text{ kN} \cdot \text{m/rad}$ 程度，軸力が作用する場合は $k_\theta=3 \times 10^3 \text{ kN} \cdot \text{m/rad} \sim \infty$ の範囲の値を示すこ

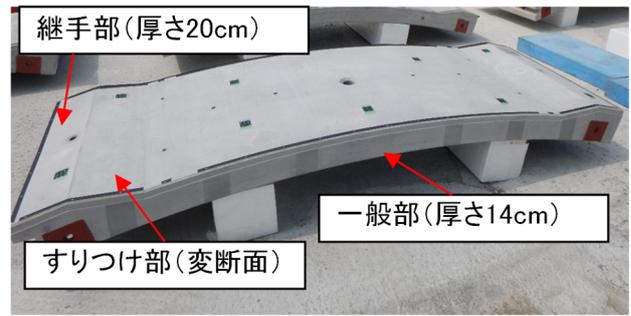


写真-1 PCa 覆工部材

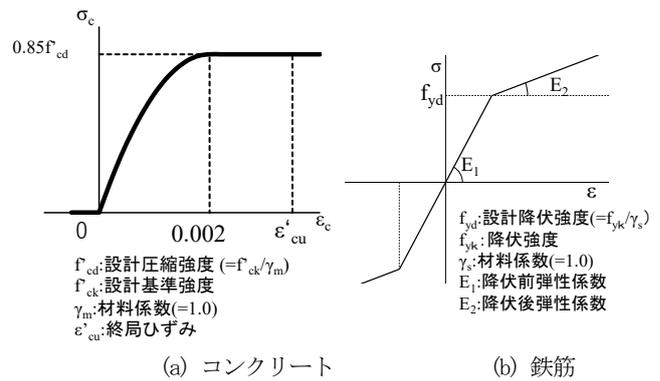


図-3 応力-ひずみ曲線

とが分かっている．しかし，解析上 k_θ の非線形性を考慮することは難しいため，解析では線形バネとして与え，回転バネ定数を $k_\theta=1 \times 10^3$ ， 10^5 ， $10^{10} \text{ kN} \cdot \text{m/rad}$ と変化させてその影響を調べた．側壁部と上半アーチ部との接合部，および側壁部の脚部はピン構造とした．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．また，比較のための従来覆工は，2 車線道路トンネルの標準パターンとして採用されている厚さ 30 cm の無筋コンクリートとした．

PCa 覆工および従来覆工で用いた鉄筋およびコンクリートの応力-ひずみ曲線を図-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が，一部のケースについては比較のため，弾性体とした解析も行った．コンクリートの設計基準強度は PCa 覆工は 40N/mm^2 ，側壁部および従来覆工は 18N/mm^2 としたが，一部のケースについては PCa 覆工の強度を増加させたケースも実施した．

荷重については，鉛直荷重 P_v および鉛直荷重に対して一定の比率で与えられる水平荷重 P_h を覆工に作用させた．山岳工法においては，通常は支保工によってトンネル周辺の地山は安定しているため，覆工に荷重は作用しない．しかし，過去の経験によれば，覆工には周辺地山の一体性が崩れて緩み荷重が作用する場合や，稀では

表-1 覆工および地山の物性値

PCa 覆工	上半アーチ部 (プレキャスト)	コンクリート		設計基準強度 f'_{ck} (N/mm ²) ¹⁾	40	
				終局ひずみ ϵ'_{cu} (μ) ²⁾	3,500	
		鉄筋	降伏強度 f_{yk} (N/mm ²)		345	
			降伏前弾性係数 E_1 (N/mm ²)		2.0×10^5	
	降伏後弾性係数 E_2 (N/mm ²)		3.0×10^3			
		継手回転ばね定数 k_θ (kN・m/rad)		$1 \times 10^3, 10^5, 10^{10}$		
	側壁部 (現場打設)	コンクリート設計基準強度 f'_{ck} (N/mm ²)			18	
従来覆工		コンクリート設計基準強度 f'_{ck} (N/mm ²)			18	
地山		変形係数 E_g (MPa) ³⁾			1,000	

- 1) $Ph/Pv=1$ のケースについては $f'_{ck}=54\text{N/mm}^2$, $Pv=0$ のケースについては $f'_{ck}=48\text{N/mm}^2$ も実施
- 2) $f'_{ck}=48\text{N/mm}^2$ の場合は $\epsilon'_{cu}=3500\mu$ 、 $f'_{ck}=54\text{N/mm}^2$ の場合は $\epsilon'_{cu}=3100\mu$
- 3) $Ph=0$ のケースについては $E_g=100, 500, 2000, 5000\text{MPa}$ も実施

あるが膨張性土圧、水圧、地震時荷重などが作用する場合があることが分かっている。このため、本研究では緩み荷重の作用を想定して鉛直荷重のみが作用するケース ($Ph=0$) を基本とし、さらに、水平荷重の作用を想定して $Ph/Pv=0.5$, $Ph/Pv=1$, $Pv=0$ の3つのケースについても解析を行った。

トンネル周辺の地山は引張無視の地盤ばねでモデル化し、地山の地盤反力係数 k_r は式(1)⁹⁾により求めた。地山の変形係数 E_g は $1,000\text{MPa}$ (CII地山相当)を基本とし、一部のケースについては地山の変形係数を変化させてその影響を調べた。

$$k_r = 1.7 \times \alpha \times E_g \times D^{-3.4} \quad (1)$$

α : 補正係数 (=1), E_g : 地山の変形係数, D : トンネル幅

表-1 に解析で用いた覆工および地山の物性値を示す。

(3) 耐荷力の評価方法

トンネル覆工は、アーチ構造を有しているため、1か所で断面破壊が生じても直ちに構造全体の破壊に至ることはなく、引き続き他の箇所でも断面破壊が生じたのち、構造全体の破壊に至ることが分かっている。しかし、断面破壊が生じるとトンネルの機能の一部が損なわれる場合があることや解析で構造全体の破壊状態を明確に定めることが難しいことなどから、本研究では覆工に最初の断面破壊が発生する時の荷重で覆工の耐荷力を評価することとした。具体的には、解析で鉛直荷重 Pv および水平荷重 Ph を段階的に増加させ、ある断面の発生断面力が部材断面の耐荷力を示す M-N 破壊包絡線と最初に交差する時の荷重を求め、PCa 覆工と従来覆工との比較を行った。

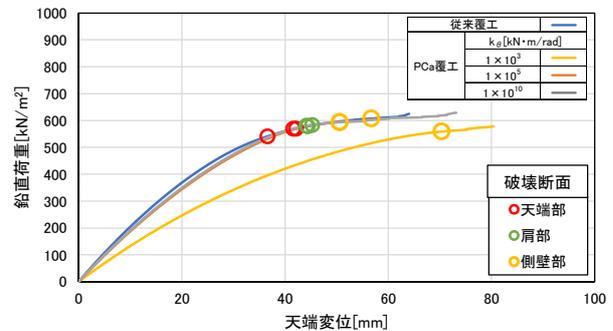


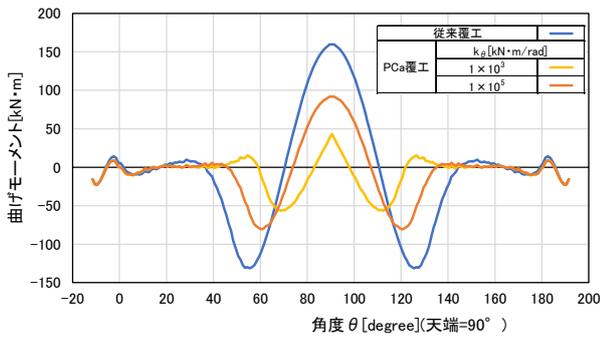
図-4 荷重と変位の関係 ($Ph=0$)

3. 数値解析から得られた PCa 覆工の耐荷力

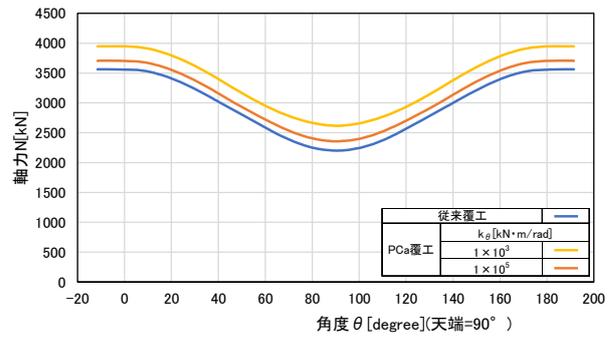
(1) 鉛直荷重のみ作用 ($Ph=0$) するケース

a) 基本条件下での挙動

図-4 は鉛直荷重のみが作用するケースの荷重と天端変位との関係を示したものである。図中には発生する断面力が、M-N破壊包絡線と交差する時の荷重値も示した。従来覆工は、荷重が 541kN/m^2 の時に天端部で曲げ圧縮破壊が、次に肩部で曲げ圧縮破壊が、さらに側壁部で全断面圧縮破壊が発生した後、荷重が 625kN/m^2 の時に解が発散し始めた。なお、図中から発散後のデータは削除している。鉛直方向の荷重が作用した場合に、最初に天端部で曲げ圧縮破壊が発生し、やがて肩部で曲げ圧縮破壊が発生する挙動は、従来覆工の上半アーチ部を対象に過去に実施された実大規模の載荷実験結果²⁾とも整合した結果となっている。PCa 覆工は、回転バネ定数が $k_\theta=1 \times 10^3 \text{ kN} \cdot \text{m/rad}$ の場合は上半アーチ部に断面破壊は発生せず、荷重が 559kN/m^2 の時に側壁部で全断面圧縮破壊が発生し、



(a) 曲げモーメント

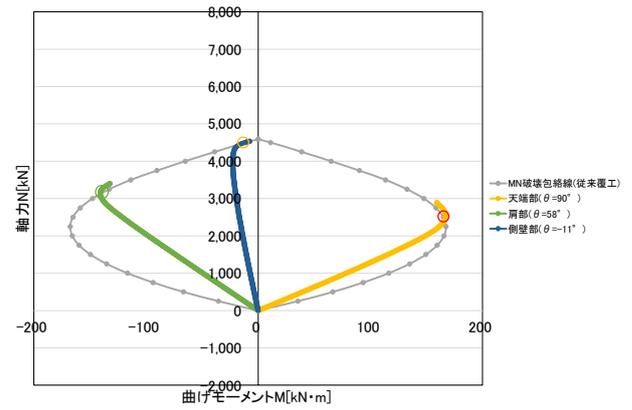


(b) 軸力

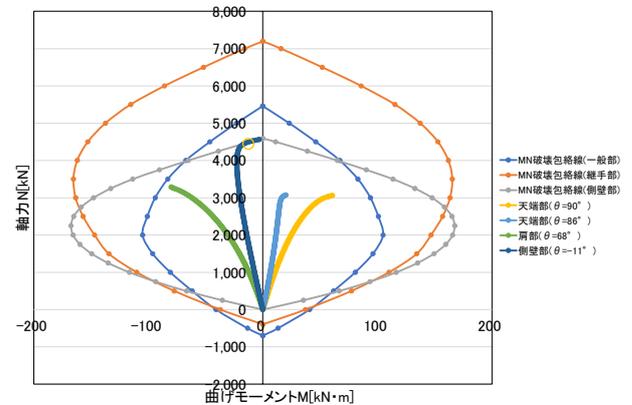
図-5 断面力分布 (Ph=0)

荷重が 587kN/m^2 の時に解が発散し始めた。 $k_{\theta}=1\times 10^5\text{kN}\cdot\text{m/rad}$ の場合は荷重が 570kN/m^2 の時に天端部で曲げ圧縮破壊が、わずかな荷重の増加により肩部で曲げ圧縮破壊が発生し、さらに側壁部で全断面圧縮破壊が発生した後、荷重が 616kN/m^2 の時に解が発散し始めた。また、 $k_{\theta}=1\times 10^{10}\text{kN}\cdot\text{m/rad}$ の場合は $k_{\theta}=1\times 10^5\text{kN}\cdot\text{m/rad}$ とほぼ同様の挙動を示した。なお、天端部、肩部の位置には継手があるが、継手部、すりつけ部は部材が厚いため、断面破壊はすりつけ部と一般部の境界で発生している。したがって、最初に断面破壊が発生した時の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と言える。PCa 覆工の継手部の曲げ剛性が挙動に及ぼす影響については、継手の回転バネ定数が $k_{\theta}=1\times 10^5\text{kN}\cdot\text{m/rad}$ までは、曲げ剛性が大きくなると耐荷力はやや大きくなり、発生する変形量は小さくなる傾向にあるが、 $k_{\theta}=1\times 10^5\text{kN}\cdot\text{m/rad}$ を超えるとその影響は小さいと言える。ただし、ある程度の荷重が作用すると継手には k_{θ} が $1\times 10^5\text{kN}\cdot\text{m/rad}$ を超える値となる軸力が作用するため、実際には $k_{\theta}=1\times 10^5\text{kN}\cdot\text{m/rad}$ の結果に近い挙動を示すものと思われる。なお、参考までに解が発散し始めた時を構造全体の破壊と見なして耐荷力の評価を行った場合でも PCa 覆工は従来覆工とほぼ同等の耐荷力を有していると言える。

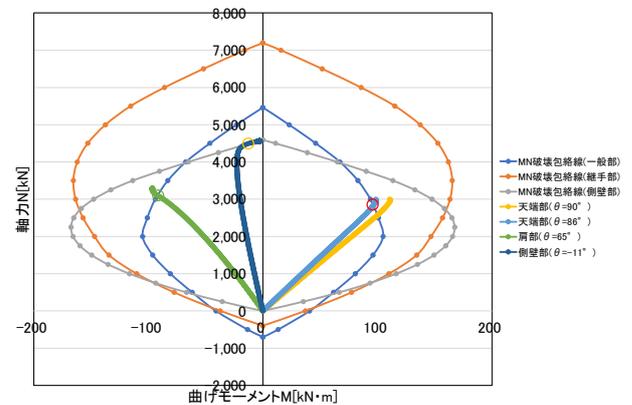
図-5 は、荷重が 500kN/m^2 の時に発生する曲げモーメントおよび軸力の分布を示したものである。曲げモーメントの符号は、内側が引張りとなる場合を正としている。曲げモーメントは従来覆工は天端部で最大値を示すのに対して、PCa 覆工は天端部にある継手の影響により天端部と肩部の差は小さくなり、継手の回転バネ定数が $k_{\theta}=1\times 10^3\text{kN}\cdot\text{m/rad}$ の場合は、天端部より肩部の方が大きくなる。また、曲げモーメントの値も PCa 覆工は従来覆工に比べて全体的に減少している。天端部を中心とした主働領域、肩部を中心とした受働領域は、従来覆工より PCa 覆工のほうがその範囲は小さく、PCa 覆工の場合は回転バネ定数が小さくなるに伴い、さらに小さくなっている。軸力は従来覆工、PCa 覆工ともに天端部で最小値、



(a) 従来覆工

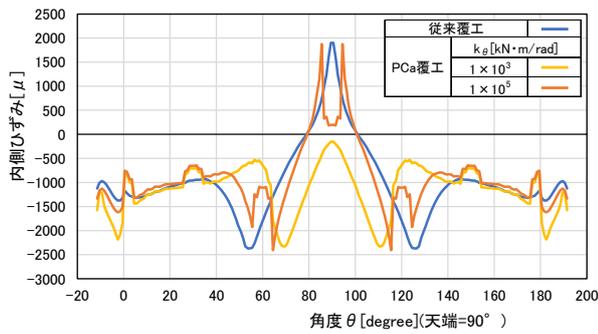


(b) PCa 覆工 ($k_{\theta}=1\times 10^3[\text{kN}\cdot\text{m/rad}]$)

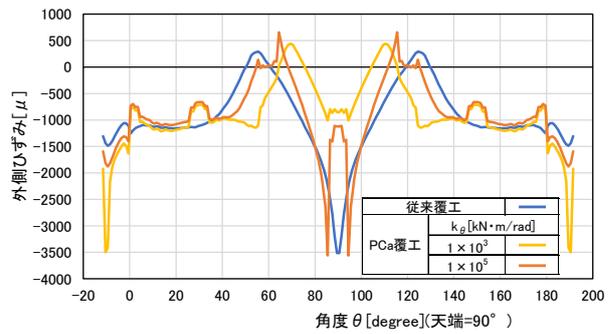


(c) PCa 覆工 ($k_{\theta}=1\times 10^5[\text{kN}\cdot\text{m/rad}]$)

図-6 発生断面力と M-N 破壊包絡線との関係 (Ph=0)



(a) 内側ひずみ



(b) 外側ひずみ

図-7 ひずみ分布 (Ph=0)

側壁部で最大値を示し、また、PCa 覆工の軸力の値は、 $k_g=1 \times 10^5 \text{ kN} \cdot \text{m/rad}$ の場合は従来覆工に比べてやや大きく、継手の回転バネ定数が小さくなるとさらに大きくなる。

図-6 は、発生する断面力と M-N 破壊包絡線との関係を示したものである。PCa 覆工は従来覆工に比べて厚さが薄いために、曲げモーメントに対する部材断面の耐荷力は小さくなるが、継手の存在により発生する曲げモーメントも抑えられるために、最初の断面破壊が発生する時の荷重は従来覆工と同等以上となることが分かる。

図-7 は最初の断面破壊が生じた時の覆工の表面に発生するひずみの分布を示したものである。ひずみの符号は、圧縮を負としている。従来覆工、PCa 覆工ともにひずみは天端部と肩部周辺に集中しているが、ひずみの集中領域の範囲は従来覆工より、PCa 覆工の方が小さい。なお、PCa 覆工の場合、継手部およびすりつけ部は、部材が厚いため、周辺に比較して発生しているひずみは小さくなっている。また、PCa 覆工の場合は回転バネ定数が小さくなるに伴い天端部のひずみが小さくなり、 $k_g=1 \times 10^3 \text{ kN} \cdot \text{m/rad}$ の場合は天端部において引張りひずみが発生しなくなるとともに側壁部のひずみが大きく増加している。

b) 地山の変形係数の影響

図-8 は、地山の変形係数を変化させた場合の、従来覆工および PCa 覆工に最初の断面破壊が発生する時の荷重値を示したものである。PCa 覆工の継手の回転バネ定数は $k_g=1 \times 10^5 \text{ kN} \cdot \text{m/rad}$ とした。従来覆工、PCa 覆工ともに断面破壊が発生する時の荷重値は地山の変形係数の値の影響を大きく受けるが、地山の変形係数が $1,000 \text{ MPa}$ 以上になるとほぼ一定の値を示すことが分かる。また、何れの変形係数の場合も PCa 覆工は従来覆工と同等以上の耐荷力を有することが分かる。なお、最初の断面破壊は、従来覆工は変形係数に関係なく天端部で発生するのに対して、PCa 覆工の場合は変形係数が $1,000 \text{ MPa}$ 以下の場合には天端部で、 $2,000 \text{ MPa}$ 以上の場合には肩部で発生している。

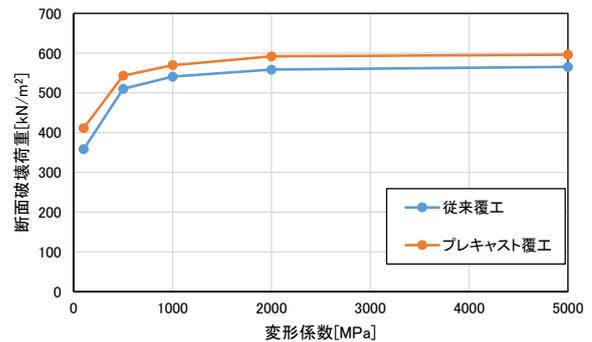


図-8 地山の変形係数と断面破壊荷重の関係

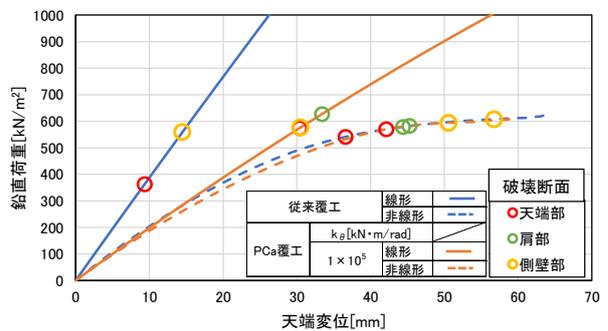
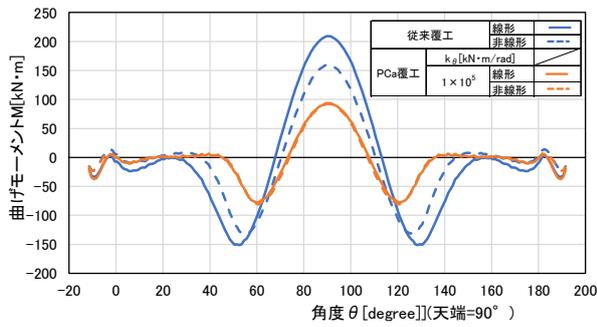


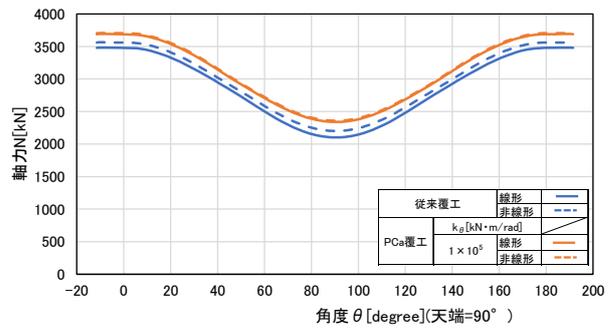
図-9 荷重と変位の関係 (線形解析 Ph=0)

c) 線形解析を用いた耐荷力の評価

図-9 は、部材を弾性体とした線形解析の荷重と天端変位との関係を非線形解析の場合と併せて示したものである。なお、線形解析でのコンクリートの弾性係数は、 $E_c=3.1 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ とし、PCa 覆工の継手の回転バネ定数は $k_g=1 \times 10^5 \text{ kN} \cdot \text{m/rad}$ とした。PCa 覆工は荷重が 300 kN/m^2 程度までは非線形解析に近い挙動を示すが、従来覆工は荷重の小さい段階から非線形解析に比較して同一荷重に対する発生変位はかなり小さい。図中には線形解析で得られる断面力が M-N 破壊包絡線と交差する時の荷重値も示したが、従来覆工は荷重が 363 kN/m^2 の時に天端部で交差しており、交差した荷重で断面破壊が発生した



(a) 曲げモーメント



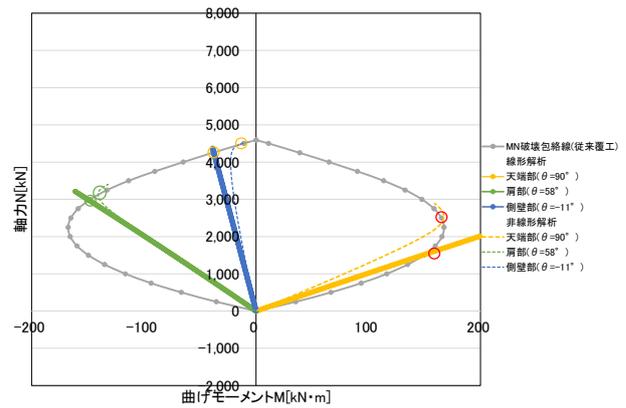
(b) 軸力

図-10 断面力分布 (線形解析 Ph=0)

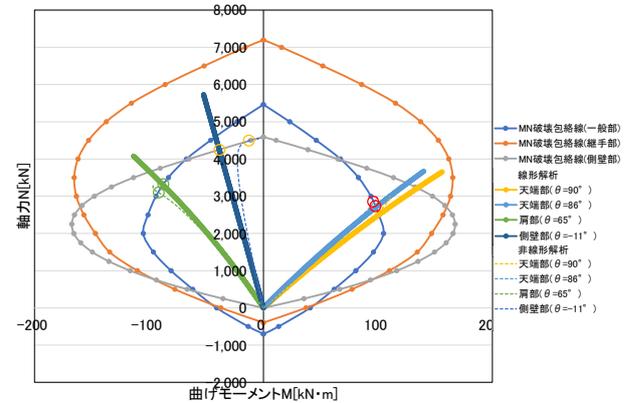
と見なした場合、耐荷力は非線形解析の場合に比較してかなり小さく評価されることになる。一方、PCa 覆工は、荷重が 574kN/m^2 の時に天端部で破壊包絡線と交差しており、耐荷力は非線形解析の場合とほぼ同等と評価されることになる。

図-10 は、荷重が 500kN/m^2 の時に発生する曲げモーメントおよび軸力の分布を非線形解析の結果と併せて示したものである。曲げモーメントは、従来覆工は線形解析の方が非線形解析に比較して大きな値が発生しているのに対して、PCa 覆工は両者にほとんど差は見られない。従来覆工の場合は、ひび割れの発生による曲げ剛性の変化の影響が大きく現れているものと思われる。軸力は、従来覆工、PCa 覆工ともに線形解析と非線形解析との間に大きな差は見られない。

図-11 は、発生断面力と M-N 破壊包絡線との関係を示したものである。PCa 覆工の場合、線形解析の場合の曲げモーメントと軸力の比率 M/N は、M-N 破壊包絡線と交差する直前まで非線形解析の場合とほぼ同程度の値を示しているため、断面破壊が発生する時の荷重もほぼ同程度となる。一方、従来覆工は、線形解析の M/N は非線形解析の場合よりも大きく、より小さな軸力で破壊包絡線と交差するため、断面破壊が発生する時の荷重は小さくなる。



(a) 従来覆工



(b) PCa 覆工 ($k_{\theta}=1 \times 10^5 [\text{kN} \cdot \text{m}/\text{rad}]$)

図-11 発生断面力と M-N 破壊包絡線との関係 (線形解析 Ph=0)

(2) 水平荷重が鉛直荷重の半分 (Ph/Pv=0.5) のケース

図-12 は、水平荷重と鉛直荷重との比が 0.5 のケースの荷重と天端変位との関係を示したものである。最初の断面破壊が発生する時の荷重は、従来覆工は 644kN/m^2 、PCa 覆工は $k_{\theta}=1 \times 10^3 \text{kN} \cdot \text{m}/\text{rad}$ の場合が 638kN/m^2 、 $k_{\theta}=1 \times 10^5 \text{kN} \cdot \text{m}/\text{rad}$ の場合が 680kN/m^2 となっており、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分かる。また、従来覆工、PCa 覆工ともに断面破壊が発生する時の荷重値は Ph=0 のケースよりも大きくなっている。なお、PCa 覆工の $k_{\theta}=1 \times 10^{10} \text{kN} \cdot \text{m}/\text{rad}$ の場合は $k_{\theta}=1 \times 10^5 \text{kN} \cdot \text{m}/\text{rad}$ の場合とほぼ同様の挙動を示しており、 $k_{\theta}=1 \times 10^5 \text{kN} \cdot \text{m}/\text{rad}$ を超えると継手の曲げ剛性の影響は小

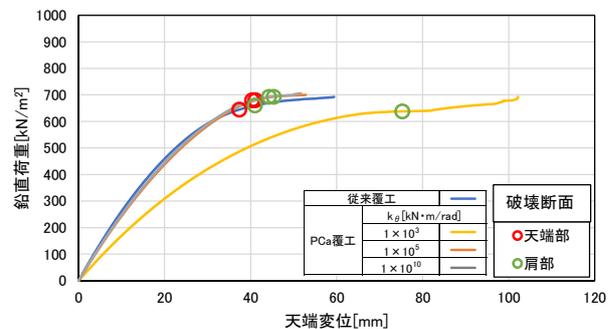
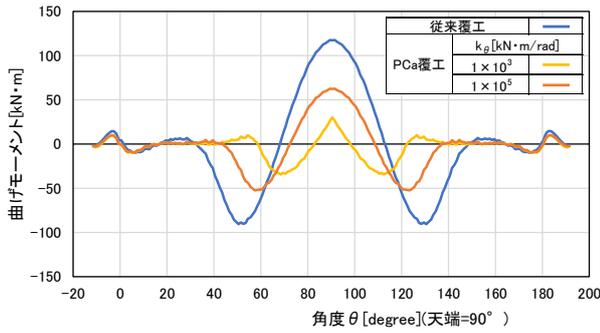
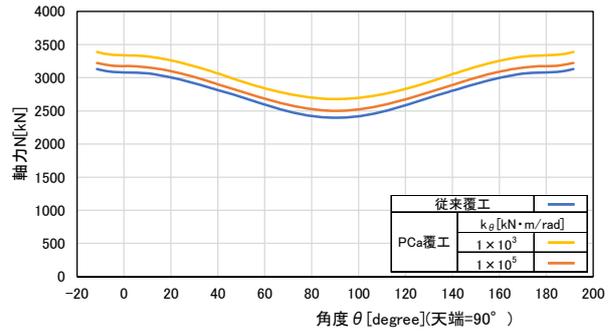


図-12 荷重と変位の関係 (Ph/Pv=0.5)



(a) 曲げモーメント



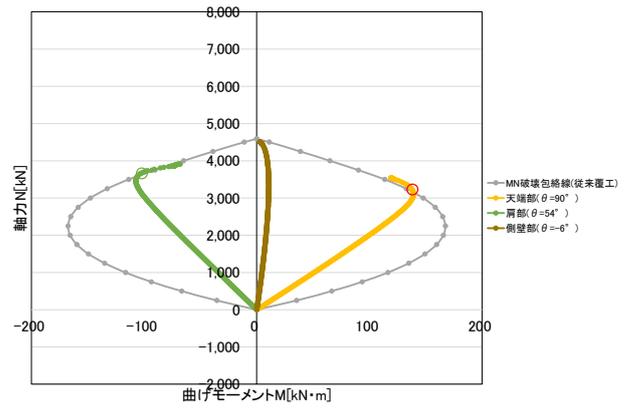
(b) 軸力

図-13 断面力分布 (Ph/Pv=0.5)

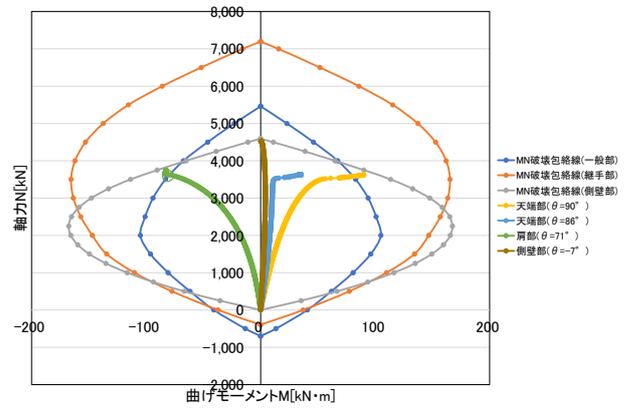
さいと言える。破壊の形態は従来覆工，PCa 覆工の $k_{\theta}=1 \times 10^5 \text{ kN} \cdot \text{m/rad}$ の場合は $Ph=0$ のケースと同様に最初の断面破壊は天端部で曲げ圧縮破壊が発生しているが，PCa 覆工の $k_{\theta}=1 \times 10^3 \text{ kN} \cdot \text{m/rad}$ の場合は側壁部の全断面圧縮破壊は発生せず肩部で曲げ圧縮破壊が発生している。

図-13 は，荷重が 500 kN/m^2 の時に発生する曲げモーメントおよび軸力の分布を示したものである。曲げモーメントは従来覆工は天端部で最大値を示すのに対して，PCa 覆工は天端部にある継手の影響により天端部と肩部の差は小さく， $k_{\theta}=1 \times 10^3 \text{ kN} \cdot \text{m/rad}$ の場合は，天端部の曲げモーメントより肩部の曲げモーメントが大きくなっている。また， $Ph=0$ のケースに比較して，従来覆工，PCa 覆工ともに分布形状は大きく変わらないが，全体的に値は減少している。軸力は従来覆工，PCa 覆工ともに天端部で最小値，側壁部で最大値を示すが， $Ph=0$ のケースに比較して天端部が増加し，側壁部が減少している。

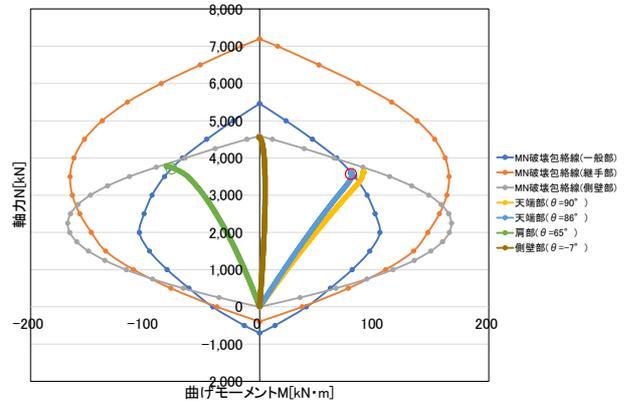
図-14 は，発生する断面力と M-N 破壊包絡線との関係を示したものである。従来覆工，PCa 覆工ともに $Ph=0$ の場合に比較して曲げモーメントと軸力の比率 M/N は小さくなり，より大きな軸力，小さな曲げモーメントで破壊包絡線と交差するため，断面破壊が発生する時の荷重は大きくなっている。



(a) 従来覆工



(b) PCa 覆工 ($k_{\theta}=1 \times 10^3 [\text{kN} \cdot \text{m/rad}]$)



(c) PCa 覆工 ($k_{\theta}=1 \times 10^5 [\text{kN} \cdot \text{m/rad}]$)

図-14 発生断面力と M-N 破壊包絡線との関係 (Ph/Pv=0.5)

(3) 鉛直荷重と水平荷重が等しい (Ph/Pv=1) ケース

図-15 は，水平荷重と鉛直荷重との比が 1 のケースの荷重と側壁変位 ($\theta=0^\circ$) との関係を示したものである。図中には PCa 覆工のコンクリート強度を 54 N/mm^2 に上げた時の結果も示した。なお，本ケースでは天端変位はほとんど発生しない。従来覆工は荷重が 359 kN/m^2 の時に側壁部において曲げ圧縮破壊が発生しているのに対して，PCa 覆工は継手部の回転バネ定数 $k_{\theta}=1 \times 10^5 \text{ kN} \cdot \text{m/rad}$ の場合は，荷重が 297 kN/m^2 の時に上半脚部において曲げ圧縮破壊が発生しており，PCa 覆工の耐荷力は従来覆工に比べて劣る結果となっている。しかし，コンクリートの強度を 54 N/mm^2 に上げることにより破壊時の荷重は

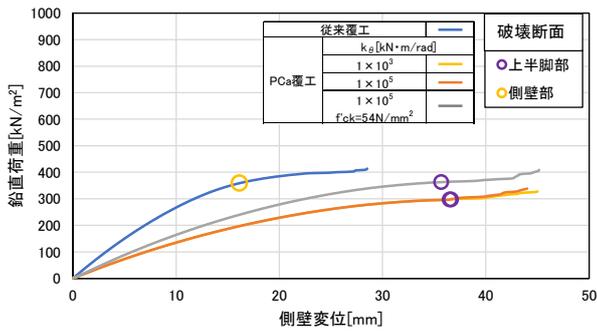
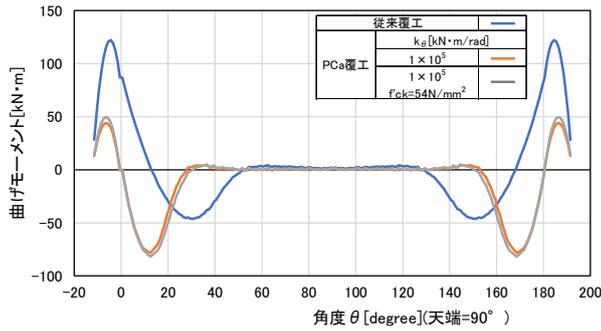
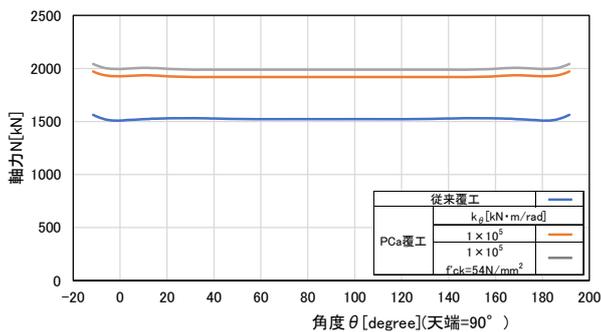


図-15 荷重と変位の関係 (Ph/Pv=1)



(a) 曲げモーメント

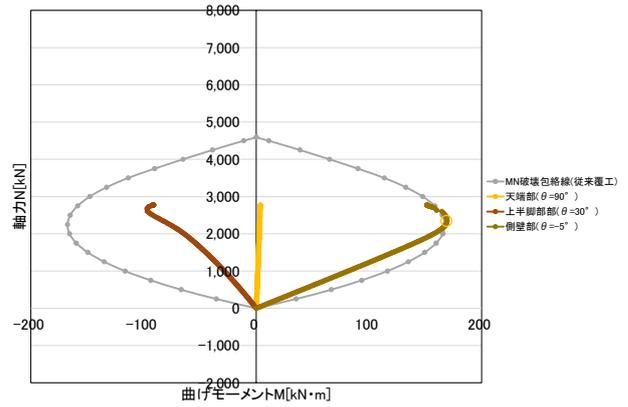


(b) 軸力

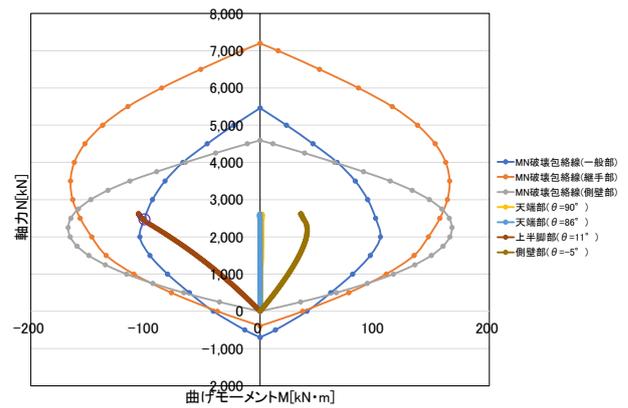
図-16 断面力分布 (Ph/Pv=1)

363kN/m²となり、従来覆工と同等の耐荷力を確保することができる。なお、継手の回転バネ定数 $k_{\theta}=1 \times 10^3 \text{ kN} \cdot \text{m/rad}$ の場合と $k_{\theta}=1 \times 10^5 \text{ kN} \cdot \text{m/rad}$ の場合はほぼ同様の挙動を示しており、継手の曲げ剛性の影響は小さい。

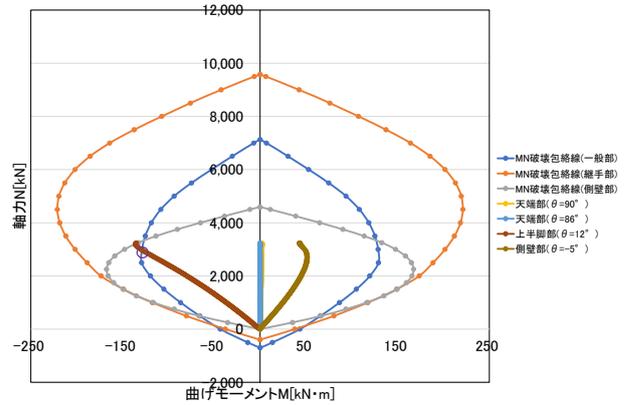
図-16は、荷重が250kN/m²の時に発生する曲げモーメントおよび軸力の分布を示したものである。曲げモーメントは、肩部から天端部にかけてはほとんど発生せず、最大値は、従来覆工の場合は側壁部で、PCa覆工の場合は上半脚部で発生しているが、値は従来覆工の方が大きい。また、PCa覆工のコンクリート強度を大きくしても、発生する曲げモーメントはほとんど変わらない。曲げモーメントの分布形状から、側壁部が内空側に押し出されて上半脚部が地山側に押し出されていることが分かるが、



(a) 従来覆工



(b) PCa 覆工 ($k_{\theta}=1 \times 10^5 [\text{kNm/rad}]$)



(c) PCa 覆工 ($k_{\theta}=1 \times 10^5 [\text{kN} \cdot \text{m/rad}]$, $f_{ck}=54\text{N/mm}^2$)

図-17 発生断面力と M-N 破壊包絡線との関係 (Ph/Pv=1)

PCa覆工は、接合部をピン構造としているため、接合部を境に側壁部が主働領域、上半脚部が受働領域となっている。これに対して、従来覆工は上半脚部まで主働領域が広がっており、上半脚部の受働領域の範囲もPCa覆工に比べると広がっている。軸力は従来覆工、PCa覆工ともに全周にわたってほぼ同一の値を示しており、大きさはPCa覆工の方が従来覆工よりも3割程度大きい。また、PCa覆工のコンクリート強度を大きくすると、発生する軸力は若干大きくなる。

図-17は、発生する断面力と M-N 破壊包絡線との関

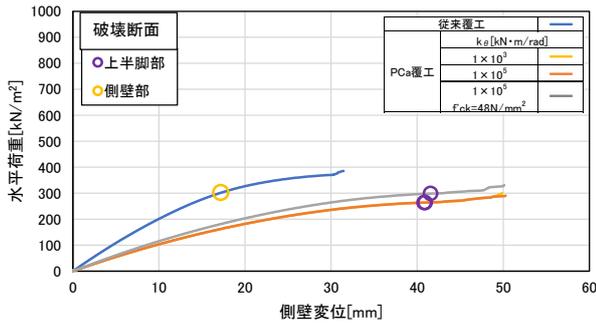
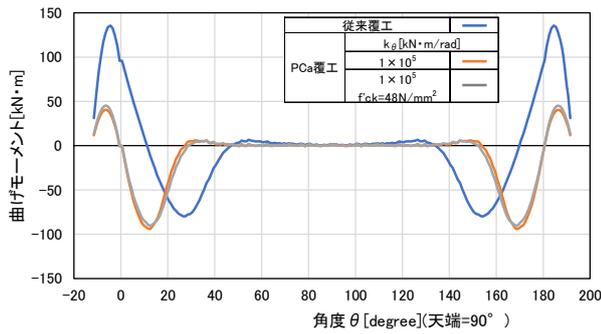
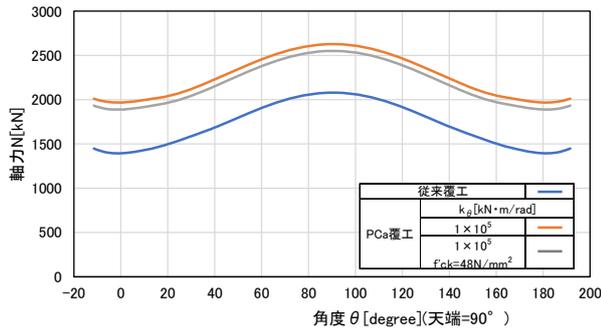


図-18 荷重と変位の関係 (Pv=0)



(a) 曲げモーメント



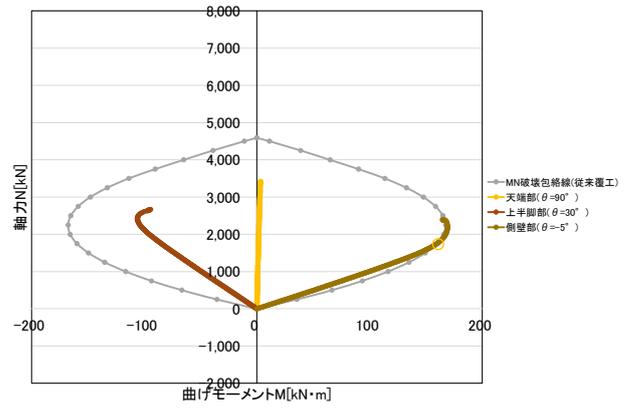
(b) 軸力

図-19 断面力分布 (Pv=0)

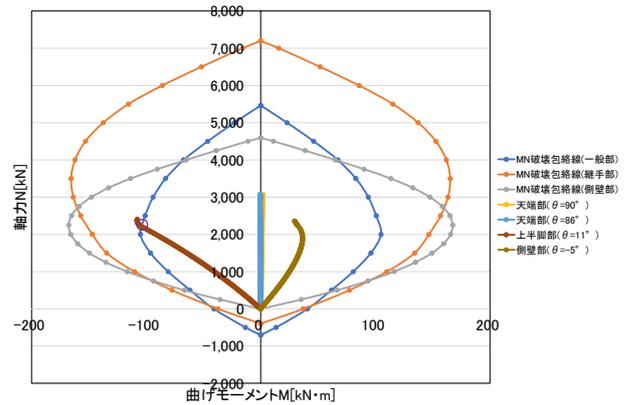
係を示したものである。PCa 覆工は従来覆工に比べて厚さが薄いために曲げモーメントに対する部材断面の耐荷力が小さく、従来覆工よりも小さい曲げモーメントで、上半脚部において破壊包絡線と交差している。しかし、コンクリートの強度を大きくして耐荷力の向上を図ることにより、破壊包絡線と交差する時の曲げモーメントおよび軸力が大きくなり、断面破壊が発生する時の荷重が大きくなる事が分かる。

(4) 水平荷重のみ作用 (Pv=0) するケース

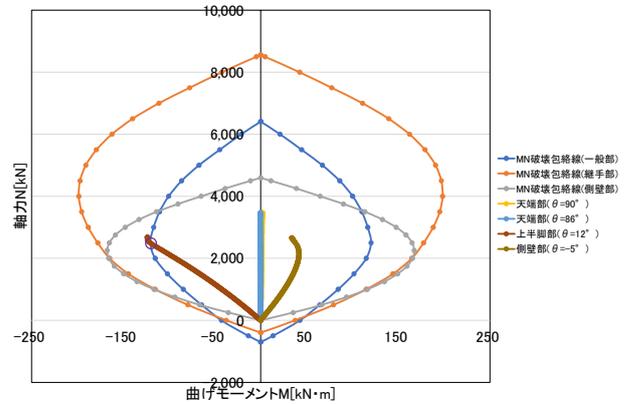
図-18 は、水平荷重のみが作用するケースの荷重と側壁変位 ($\theta=0^\circ$) との関係を示したものである。図中にはPCa覆工のコンクリート強度を大きくした時の結果



(a) 従来覆工



(b) PCa 覆工 ($k_\theta=1 \times 10^5$ [kN · m/rad])



(c) PCa 覆工 ($k_\theta=1 \times 10^5$ [kN · m/rad], $f_{ck}=48$ N/mm²)

図-20 発生断面力と M-N 破壊包絡線との関係 (Pv=0)

も示した。従来覆工は、荷重が 301 kN/m^2 の時に側部壁で曲げ圧縮破壊が生じるのに対して、PCa 覆工は、継手部の回転バネ定数 $k_\theta=1 \times 10^5 \text{ kN} \cdot \text{m/rad}$ の場合、荷重が 264 kN/m^2 の時に上半脚部において曲げ圧縮破壊が発生し、耐荷力は従来覆工に比べてやや劣る。しかし、コンクリートの強度を 48 N/mm^2 に上げるにより破壊時の荷重は 299 kN/m^2 となり、従来覆工と同等の耐荷力を確保することができる。なお、 $Ph/Pv=1$ の場合と同様に継手の曲げ剛性の影響は小さい。

図-19 は、荷重が 250 kN/m^2 の時の従来覆工と PCa 覆工に発生する曲げモーメントおよび軸力の分布を示したも

のである。曲げモーメントは、 $Ph/Pv=1$ のケースと同様に、最大値は、従来覆工は側壁部、PCa 覆工は上半脚部で発生しており、値は従来覆工の方が大きい。また、PCa 覆工のコンクリート強度を大きくしても、発生する曲げモーメントの大きさはほとんど変わらず、受働領域と主働領域の発生領域は $Ph/Pv=1$ のケースと同じである。軸力は、従来覆工、PCa 覆工ともに天端部で最大値、上半アーチ部と側壁部の接合部で最小値を示し、値は PCa 覆工の方が従来覆工に比べて 2~3 割程度大きい。また、PCa 覆工のコンクリート強度を大きくすると、発生する軸力は若干小さくなる。

図-20 は、発生する断面力と M-N 破壊包絡線との関係を示したものである。 $Ph/Pv=1$ の場合と同様に PCa 覆工の曲げモーメントに対する部材断面の耐荷力が劣るために従来覆工よりも小さい曲げモーメントで破壊包絡線と交差する。しかし、コンクリートの圧縮強度を大きくすることにより、破壊包絡線と交差する時の曲げモーメントおよび軸力が大きくなり、断面破壊が発生する時の荷重も大きくなるのが分かる。

なお、今回は、上半アーチ部と側壁部の接合部をピン構造としてモデル化を行っており、水平荷重が支配的となる荷重条件の場合に、曲げモーメントの最大値が上半脚部に発生する要因の一つとなっている。今後、接合部の構造を工夫することにより、曲げ剛性が期待できることになれば、上半脚部に発生する曲げモーメントが抑えられ、耐荷力の向上につながる可能性がある。

4. まとめ

材料の非線形性を考慮したファイバーモデルを用いた数値解析を行い、発生する断面力と M-N 破壊包絡線を比較することにより断面破壊が発生する荷重を算出し、PCa 覆工が有する耐荷力を評価した。以下に得られた結果をまとめる。

- ・覆工に鉛直荷重だけが作用する場合、地山の変形係数の大きさに関わらず、PCa 覆工は、従来覆工と同等の耐荷力を有する。破壊の形態は、従来覆工、PCa 覆工ともに天端部で曲げ圧縮破壊が発生するが、PCa 覆工は継手の曲げ剛性、地山の変形係数によっては肩部で曲げ圧縮破壊、あるいは側壁部で全断面圧縮破壊が発生する可能性がある。また、鉛直荷重および鉛直荷重の半分の水平荷重が同時に作用する場合もほぼ同様の傾向を示す。
- ・覆工に鉛直荷重および鉛直荷重と等しい水平荷重が同時に、あるいは水平荷重だけが作用する場合、PCa 覆工はコンクリートの強度を上げることにより、従来覆工と同等の耐荷力が得られる。破壊の形態は、従来覆工は側壁部で曲げ圧縮破壊、PCa 覆工は上半脚部で曲げ圧縮破壊が発生する。
- ・荷重条件に関わらず、PCa 覆工の継手の曲げ剛性が PCa 覆工の耐荷力に及ぼす影響は小さい。
- ・部材を弾性体とした線形解析から得られた断面力を用いて覆工の耐荷力を評価した場合、PCa 覆工の耐荷力は非線形解析の場合とほぼ同程度となるが、従来覆工の耐荷力はかなり小さくなる。

今後は、実大規模の供試体を用いた載荷実験による解析手法の妥当性の検証、想定すべき荷重条件とそれに応じたより合理的な構造の検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 土木学会：トンネル標準示方書 [共通編]・同解説／[開削工法編]・同解説，pp.302-303, 2016
- 2) 真下英人，日下敦，砂金伸治，木谷努，海瀬忍：トンネル覆工の破壊メカニズムと補強材の効果に関する実験的研究，土木学会論文集 F Vol.64 No.3, pp.311-326, 2008.9.

(2020. 8. 7 受付)

EVALUATION OF LOAD-BEARING CAPACITY OF PRECAST TUNNEL LINING BY NUMERICAL ANALYSIS

Hideto MASHIMO, Yuuki INO, Ryuunosuke KASHIMA and Takehiro NATSUME

Numerical analysis using fiber-model with non-linear behavior has been performed under a few kinds of load conditions to evaluate the load-bearing capacity of precast tunnel lining. It is found that precast tunnel lining has load-bearing capacity equivalent to that of conventional cast-in-place tunnel lining and bending compression fracture occurs at tunnel crown when vertical load acts on the lining dominantly. Precast tunnel lining can also have load-bearing capacity equivalent to that of cast-in place tunnel lining by increasing the concrete strength and bending compression fracture occurs at the foot of tunnel arch when horizontal load acts on the lining dominantly. Furthermore, it is verified that the bending rigidity of the joint which connects precast concrete member has little effect on the load-bearing capacity of precast tunnel lining.