

ポリリング工法の開発（その2）

－耐水圧性能向上およびテレフォームタイプ支保工の開発－

須田宗宏* 佐藤和夫*
大橋茂樹* 植田和博**

1. まえがき

シールド工事におけるコスト削減のために、二次覆工の省略や覆工厚を薄くすることによる掘削断面の縮小化が求められている。しかし、鋼製セグメントでは内面平滑性の確保や防食の観点から二次覆工を省略できないのが現状である。

これらを解決するために、鋼製セグメントにおける薄肉二次覆工工法として、ポリリング工法を開発し、2001年度年報 No. 27 において報告を行った。

開発当初は背面にL型リブを配置したライニング材の形状であった。このL型リブと中詰材が一体となり、セグメントからの地下水の漏水による外水圧 0.1MPa まで対応してきた。本工法開発後の主な施工実績を表-1に示す。

しかし、下水や雨水幹線において深度 20m 以上で計画される事例もあり、その場合には 0.2MPa 以上の地下水圧に対応できる耐水圧性能がもめられた。

耐水圧性能向上のためにライニング材形状の検討を行い、リブ形状をL型からT型に変更した。リブ形状変更の妥当性の検討と、T型リブライニングの耐水圧性能の確認を、数値解析及び実験により行ったので報告する。また、本工法の省力化のために中詰材充填時に使用するテレフォームタイプ方式の支保工を開発したので合わせて報告する。

2. 工法の概要

本工法では耐摩耗性や耐薬品性に優れた高密度ポリエチレン製の帯状ライニング材(幅 500mm)を、シールドトンネル内で熱融着しリング状に成形する。ライニング材は鋼製セグメントに結合されたレール材(等辺山形鋼L-30および底部固定金具T型鋼T-50)により固

定されている。ライニング材背面とセグメントとの空間(50mm)に中詰材を充填し二次覆工を構成している(図-1、2参照)。

表-1 主な施工実績

工事名	工事概要
1. 東灘処理場伏越補修工事(神戸市)	硫化水素によって劣化した管路の更生 覆工長：20m×2列 施工時期：平成11年5月
2. 富岡雨水幹線築造工事(徳島県阿南市)	鋼製セグメント二次覆工(シールド・推進併用)仕上がり内径3000mm、延長224m 施工時期：平成13年5月
3. 丸山幹線築造工事(大阪市)	急曲線部の二次覆工(半径30m) 仕上がり内径2400mm、延長10m 施工時期：平成14年1月
4. 中野雨水幹線築造工事(富田林市)	鋼製セグメント二次覆工(断面縮小) 仕上がり内径2600mm、延長556m 施工時期：平成14年10月
5. 高槻市平成13年度公共下水道築造工事(高槻市)	鋼製セグメント二次覆工(断面縮小) 仕上がり内径2200mm、延長260m 施工時期：平成14年11月
6. 奈良公共下水道佐保分水幹線築造工事(奈良市)	鋼製セグメント二次覆工(断面縮小) 仕上がり内径2600mm、延長1696m 施工時期：平成16年2月～(施工中)

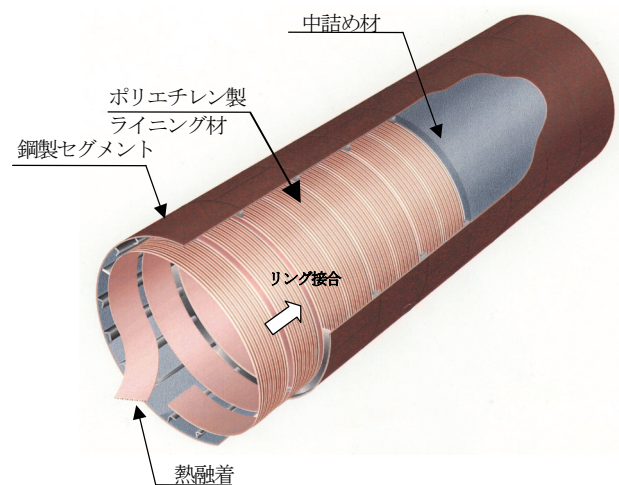


図-1 ポリリング工法概要

*関西支社土木技術部 **関西支社土木部

3. 耐水圧性能向上

本工法ではセグメントから地下水が漏水した場合に、外水圧(地下水圧)によりライニング材と中詰材がはがれることがない耐水圧性能が要求される。セグメントからの漏水が中詰モルタル内を浸透しライニング材に達すれば、漏水圧はライニング材のリップに対して引抜力として作用することになる。

リップの引抜耐力向上を目的としてライニング材のリップ形状をL型からT型に改良し、改良型ライニング材について実物大リング水圧試験および数値解析により耐水圧性能を確認した。

L型リップの形状を図-3に、T型リップの形状を図-4に示す。

3.1 ライニング材形状の改良

ライニング材のリップ形状をL型からT型に改良し、数値解析および要素実験によりT型リップがL型リップよりも耐水圧性能に優れていることを確認した。

a. 数値解析

① 解析条件

- ・二次元FEMモデルによりライニング材のリップ単体及び中詰材をモデル化した。要素は平面応力要素とした。物性値を表-2に解析モデルを図-5に示す。
- ・セグメントからの漏水によるライニング材背面での水圧は、リップに対して引抜力として作用する。その総和を載荷重としてリップ頂部の節点に0.01MPaから増分0.01MPaで、中詰材の降伏領域が境界に達するまで暫増させた。
- ・中詰材は降伏に達すると弾性係数を初期の1/100とし、リップ近傍の要素から降伏領域が伝播する様子を追跡した。また、ライニング材はポリエチレン樹脂であり、中詰材とライニング材の付着は期待できないことから、ライニング材下面での中詰材との間に薄い空間を設けた。

② 解析結果

L型、T型リップにおける降伏領域が拡大する様子を図-6、7に示す。これから、以下の事項がうかがわれる。

- ・L型リップではリップ左側に応力集中が生じ、リップ右側に比べて低い荷重段階で要素の降伏が生じた
- ・L型リップでは0.30MPaで降伏領域は解析の境界に達し、隣のリップから生じた降伏領域とつながりライニ

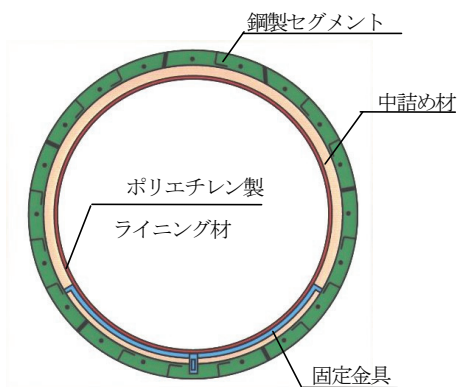


図-2 覆工断面

表-2 リップ形状による比較解析の物性値

ライニング材	部材厚さ	L型リップ 3.5mm	T型リップ 3.5mm
	断面二次モーメント	L型リップ 2.26cm ⁴	T型リップ 2.23 cm ⁴
	弾性係数	1,080 N/mm ²	
	ポアソン比	0.4	
中詰材	弾性係数 (降伏後は弾性係数を1/100とする)	9,550 N/mm ²	
	ポアソン比	0.2	
	圧縮強度	9.15 N/mm ²	
	引張強度	0.7 N/mm ²	

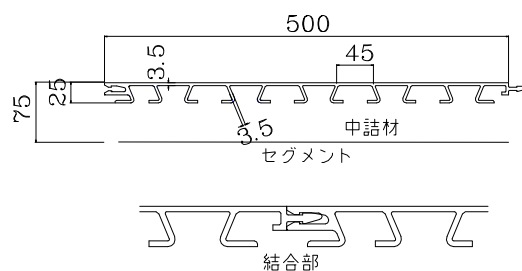


図-3 L型リップ

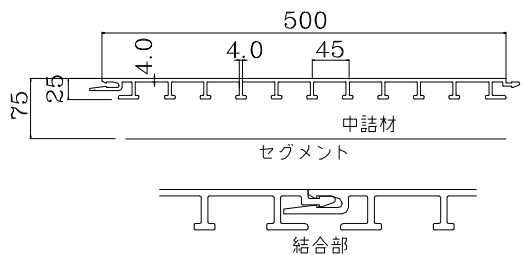


図-4 T型リップ

ング材は剥離する状態になる

- T型リブでは左右均等に降伏領域が生じ、0.32MPaでも降伏はリブ付近にとどまっている。L型リブに比べて耐水圧性能が優れていると判断できる
- L型リブでは降伏領域はほぼ水平方向に破壊が進展し、T型リブでは水平から45度方向に進展することが判明した。これはL型リブではリブ先端位置で水平面での引張破壊、T型リブではリブ先端からのせん断破壊が主体となる。これはリブ形状に起因する破壊形態であること推測した
- コンクリートの材料強度特性はせん断強度が引張強度の2倍程度であり、せん断型の破壊形態が主体であるT型リブは、引張破壊が主体となるL型リブに比べて引抜耐力に有利であることが推測でき、L型リブからT型リブへ形状変更を判断した

b. 要素実験

① 要素実験の内容

リブ形状による破壊形態の相違および引抜耐力の定量的確認を目的に次の要素実験を行った。

供試体寸法 幅30 cm、高さ30 cm、奥行25 cm
モルタル強度 10~15N/mm²

② 実験結果

破壊荷重はT型リブの場合はL型リブに比べて1.3~2.0倍であった。また、上記数値解析で示したようにL型リブではリブ先端位置から水平方向に破壊面が生じ、T型リブではリブ先端から30~45度方向への破壊面が多く見られた(写真-1参照)。これは先の数値解析で示した破壊形態を確認する結果となった。



リブ右側水平面内での破壊



リブ両側斜め上方への破壊

写真-1 リブの引抜要素実験

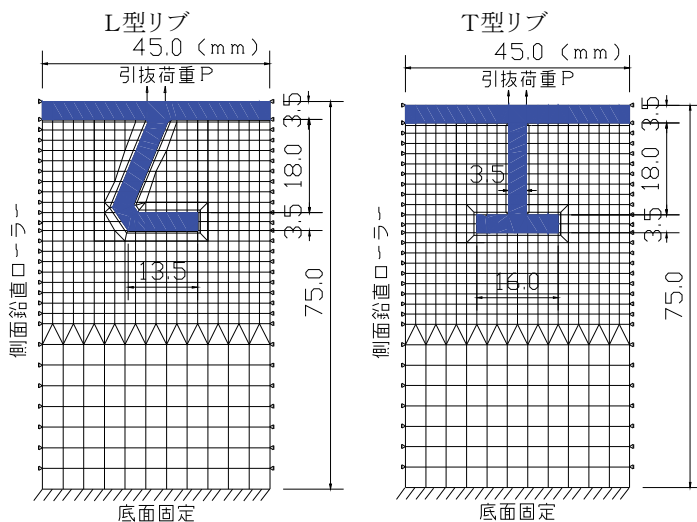


図-5 解析モデル

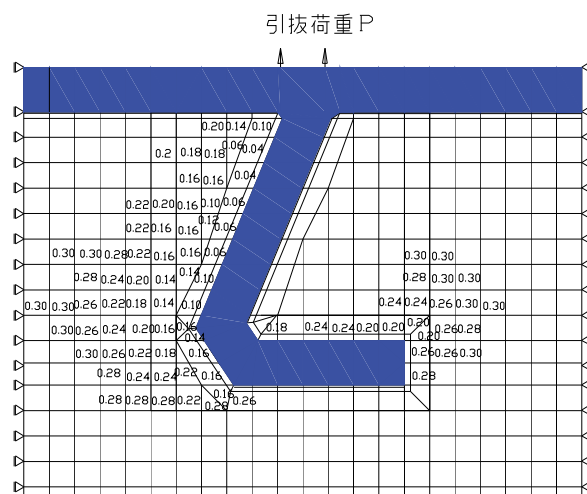


図-6 降伏領域(L型リブ)0.30MPa 載荷時

(数字は要素が降伏したときの荷重(MPa)を示す)

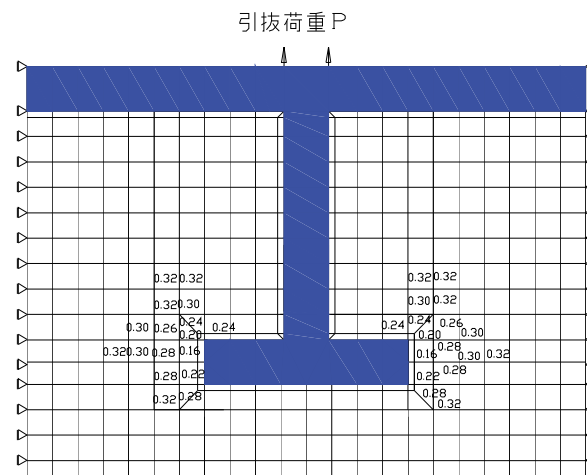


図-7 降伏領域(T型リブ)0.33MPa 載荷時

(数字は要素が降伏したときの荷重(MPa)を示す)

3.2 耐水圧性能の確認

数値解析および実物大リング水圧試験により耐水圧性能を確認した。

a. 実物大リング水圧試験による耐水圧性能の確認
リング水圧試験設備概要を図-8に示す。

試験体は鋼製セグメントに二次覆工仕上がり内径2200mmとした。延長は8リング、8mである。

変位計、水圧計の設置状況を写真-2に示す。水圧計は計測断面ごとに各4点、加圧するライニング材に8点設置した。変位計は計測断面のセグメント左右のスプリング位置とライニング材左右のスプリング位置と底面に設置した。

加圧方法はライニングに注水孔を設置し、リング全体に水圧がかかるように注水孔を断面内で移動した。水圧の増分を0.01MPaとし、水圧ステップごとに5分間水圧を保持した。確認水圧は最大で0.51MPaまで行った。

実験ケース及び実験結果を表-3に示す。実験ケースは中詰材の配合及び養生期間をパラメータとした。

表-3 実験ケース及び結果

試験ケース	中詰材強度 (N/mm ²)		確認水圧 (MPa)
	圧縮強度	引張強度	
1	27.3	1.26	0.42
2	27.6	2.07	0.51
3	8.4	0.92	0.32

b. 数値解析による降伏荷重の試算

二次元FEM解析により中詰材の圧縮、引張強度、破壊エネルギーを変数として、リブの引抜に対する降伏荷重を試算した。

① 解析条件

- モデルは対称断面であることから1/2モデルとした
- 要素はすべて平面応力要素とした
物性値を表-4に、解析モデルを図-9に示す。
- 境界条件は側方は鉛直方向自由、水平方向拘束、底面固定境界とした
- 荷重はリブ頂部要素に引抜力として荷重増分を0.01MPaとした
- 中詰材は引張強度以上の応力状態になればひび割れが生じ、徐々に引張強度が低下する引張軟化特性を考慮する。なお、中詰材の引張軟化特性を図-10に示す
- 中詰材の強度特性はコンクリート標準示方書で示さ

れた関係式を準用した(表-4における式①、②)

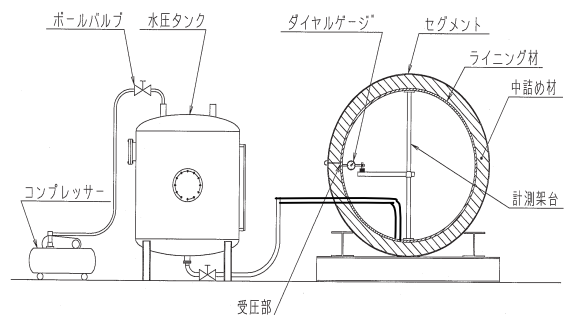


図-8 リング水圧試験設備概要

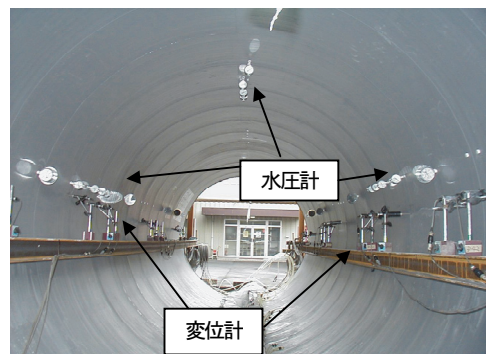


写真-2 水圧計、変位計設置状況

表-4 降伏荷重試験解析の物性値

ライニング材	弾性体	
	弾性係数 (N/mm ²)	1080
ポアソン比	0.4	
中詰材		ひび割れによる引張軟化特性を考慮
	ポアソン比	0.2
	単位体積重量 ρ (kN/m ³)	16.5
	圧縮強度 f ^c (N/mm ²)	1~40
	弾性係数 E _c (N/mm ²)	1430 · ρ ^{1.5} · f ^{c0.5}
	引張強度 f _t (N/mm ²)	0.23 · f ^{c2/3} · · · · ①
破壊エネルギー G _f (N/m)	10 · d _{max} ^{1/3} · f ^{c1/3} · · · · ② d _{max} : 粗骨材の最大寸法 1.0mm と仮定	

② 解析結果

ひび割れ発生要素の分布図を図-11に示す。リブ先端から斜め方向にひび割れが進展することがうかがえる。解析における中詰材の引張強度と降伏荷重の関係

を図-12に示した。また、実物大リング水圧試験において確認した結果をあわせてプロットしたが、実験結果と良く一致している。

引張強度と圧縮強度の関係を図-13に示す。図中の実験データは実物大リング水圧試験における中詰材及び他に実施した材料強度試験の結果である。

図-12より降伏強度を0.50MPaまで期待するためには、引張強度が1.90N/mm²程度必要であること、図-13で引張強度を1.90N/mm²とするには圧縮強度が23.0~45.0N/mm²程度必要であることが予測できる。

コンクリート標準示方書では

引張強度 $f_t = a \cdot f_c^{2/3}$ ($a=0.23$)とされているが、

実験に使用中詰材では図-13に示すように係数aは0.14~0.23程度のばらつきが認められた。

引張強度は圧縮強度から推定されることが多いが、ライニング材の耐水圧性能評価の精度を高めるには、中詰材の引張強度の把握が重要になると考えられる。

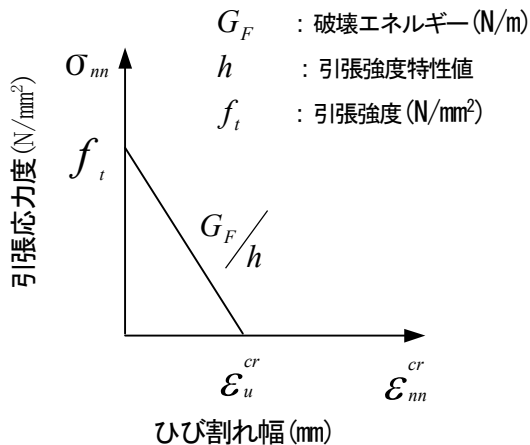


図-10 中詰材(モルタル)の引張軟化特性

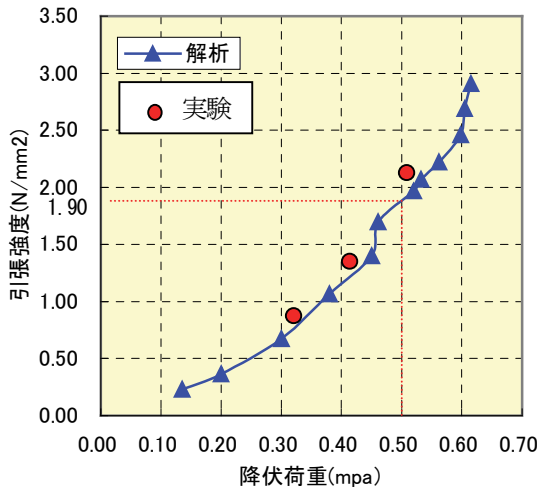


図-12 中詰材の引張強度と降伏荷重

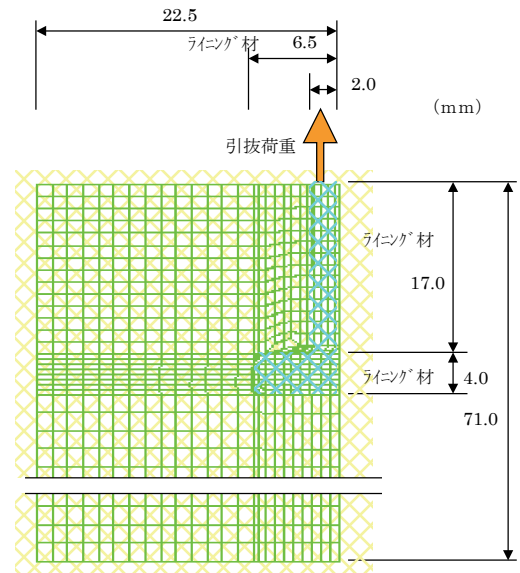


図-9 解析モデル

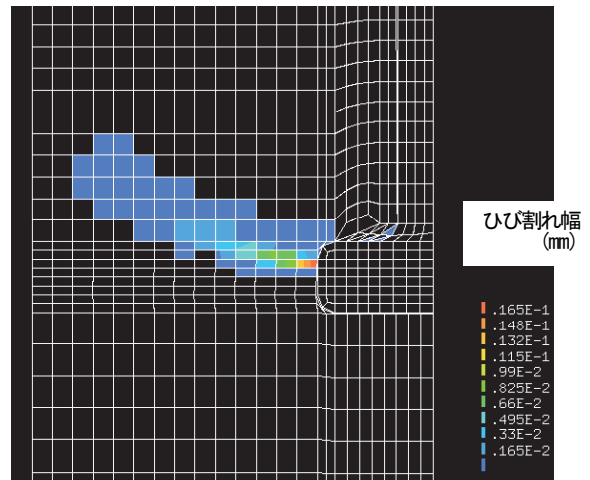


図-11 ひび割れ発生要素の分布

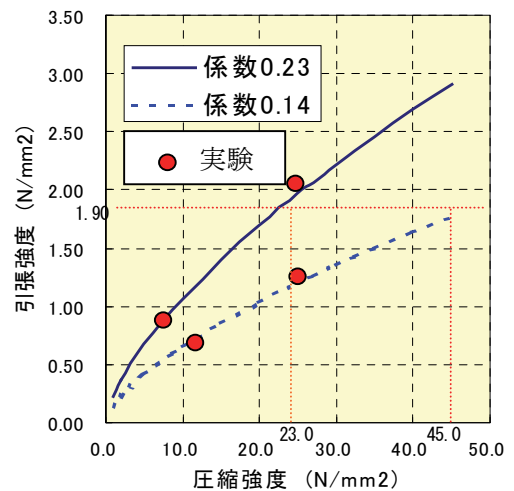


図-13 引張強度と圧縮強度

4. テレフォームタイプ支保工の開発

従来のリング支保工の省力化を図るためにテレフォームタイプの支保工を開発し、実施工に適用した(以降このテレフォームタイプ支保工を用いた中詰材充填工法をテレフレーム工法と称す)。

a. テレフレーム工法の概要

テレフォームタイプ支保工の断面を図-14に、写真-3に組立完了状況を示す。この支保工は1セットの延長1.5mであり、クラウンフォーム、サイドフォーム2ピース、インバートフォーム2ピースの5ピースから構成されている。

クラウンフォームとサイドフォーム2ピースはピン結合し、移動時には折りたたみ一体として移動する。また、インバートフォームの2ピースも一体とし移動を行う。これら折りたたみ、移動、設置の一連の作業は運搬架台にて機械化した。

また、2セットを合わせて1ブロックとする。1ブロックあたりスパットを天端4本、側方4本設置して中詰材充填時の浮力対策と左右の振れ止対策とした。ブロック間は0.5mの間隔を設け角鋼管(□-100)で連結する。カーブ区間ではこの0.5mの間隔を調整し対応する。8~9ブロック(延長30m)程度を1スパンとして中詰材の充填を行う。

b. テレフレーム工法の特徴

従来のリング支保工と比較して、次のような特徴がある。

i. 機械化による省力化

テレフレーム工法は解体から移動組立まで一連化が可能な組立移動台車を用いており、付随する部品類も在来工法に比べ少量・軽量であるため少人数での施工が可能である。

ii. 施工性、品質の向上

- ・中詰め充填時の浮力によって生じる支保工浮き上がりや横ずれに対してスパットで防止しているため、その変動が0~2mm程度と少ない
- ・中詰材注入は、従来工法では2~3リフトに分割したが、テレフレーム工法は1リフトで施工が可能となり工程サイクルの短縮はもちろんのこと、充填材や坑内温度による品質のばらつきが小さい
- ・支保工の解体組立に要する日数は、従来工法の2日に対し1日である(延長30m/日)。充填は従来工法

では6日サイクルであるが、テレフレーム工法では3日サイクルである

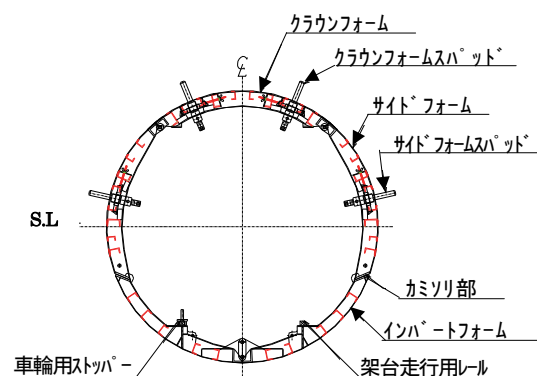


図-14 テレフォームタイプ支保工断面

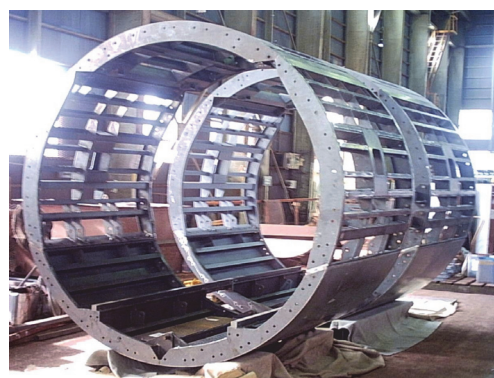


写真-3 組立完了状況(2ブロック×2個)

5. あとがき

ポリリング工法の耐水圧性能向上についてリブ形状変更の妥当性と、中詰材の強度特性から期待できる耐水圧性能を実験と数値解析により検証した。

検討結果の要約を以下に示す。

- ① 中詰材の引張強度を $1.8\text{N}/\text{mm}^2$ 以上とすることで 0.5MPa 程度の耐水圧が期待でき、安全率2を見込むと許容水圧を 0.25MPa とできることを確認した。
- ② 数値解析は中詰材の強度特性を把握すれば耐水圧性能の予測に有効な手段であることがわかった。
- ③ テレフォームタイプ支保工は施工の省力化で大きな効果が期待できる。ただコスト面では従来型の支保工が有利であり、曲線半径が小さく($\phi 2600$ で $R = 80\text{m}$ 以下、 $\phi 1500$ では $R=30\text{m}$ 以下)なれば対応が難しく、今後さらなる改善が必要である。

なお、ポリリング工法は㈱大阪防水建設社との共同開発である。また、テレフォームタイプ支保工の同工法への適用は㈱大阪防水建設社と共同で特許出願中である。