

水路トンネルの補修・補強対策

森 康 雄¹・岩井 孝幸¹・斎藤 孝志²

¹正会員 株式会社熊谷組 土木事業本部環境・リニューアル技術部（〒162-8557東京都新宿区津久戸町2-1）

²テクノス株式会社 建設事業部建設・リニューアル部（〒110-0016東京都台東区台東2丁目27番3号）

水路トンネルには、水力発電所水路トンネル、農業用水路トンネル、上下水道トンネルなどがあり、その内電力用は約4,700kmに達する。農業用も加えれば数万kmにもなる。これらの水路トンネルは、竣工後50年以上経過しているものがかなりの割合を占め、覆工コンクリートの背面空洞、巻き厚不足、ひび割れなどが多く見られる。このため、水路トンネルの機能を損なわない補修・補強対策が望まれている。

本報告は、上記水路トンネルの補修・補強対策として、超高強度繊維補強コンクリート製埋設型枠を用いた補強工法（サポートライニング工法）及びダクトイル覆工板を用いた補修工法について述べる。

キーワード：水路トンネル、補強、ダクトイル、ダクトイル覆工板、サポートライニング工法

1. はじめに

水路トンネルには、水力発電所水路トンネル、農業用水路トンネル、上下水道トンネルなどがあり、総延長で数万kmにのぼるとされる。国民生活を支える重要なインフラであり、建設のピークは用途によって異なるが、昭和の前半であり、竣工後50年以上経過しているトンネルも数多くあり改修の時期を迎えている。矢板工法であり、コンクリートの供給も不安定で、打設機械も発展途上であり良質な覆工コンクリートを施工することは極めて難しい時代であった。このようなトンネルが50年以上経過し、水路トンネル特有の覆工表面の洗掘、磨耗だけでなく潜在的な覆工コンクリートの不具合も顕在化してきている。

本報告は、このような水路トンネルの補修・補強対策として、超高強度繊維補強コンクリート製埋設型枠を用いた補強工法（サポートライニング工法）及びダクトイル覆工板を用いた補修工法について述べる。

2. 水路トンネルの要求性能

水路トンネルの果たすべき役割は、トンネル内の流水をロスなくスムーズに流下させることにあり、以下の性能が要求される¹⁾。

- ①トンネルの構造が安定なこと（構造物安定）
- ②流水抵抗が小さいこと（覆工表面粗度）
- ③トンネル内の流水が所定以外の箇所から漏出しないこと（防水性）
- ④その他（保守の利便性、圧力トンネルの場合には内水圧に耐えうること等）

これらの事項を満足するためには、以下のような検討が必要になる。

(1) 構造物安定性

構造物が安定していない状況としては覆工の背面に空洞があり、周辺地山が不安定な場合と断層や偏土圧により覆工が変位している場合がある。後者の場合、覆工内面補強を行うことにより内空断面が小さくなるため、所定の通水量を確保できる工法の選定が重要となる。

(2) 覆工表面粗度

覆工表面の粗度については材料の選定が重要となる。モルタル及びコンクリートの粗度係数は、0.013～0.014程度であるが、さらに粗度係数が小さい材料を使うことが望まれる。

(3) 防水性

地下水位より低い位置にあるトンネルは、漏水対策が必要になる。供用年数が長い既設の水路トンネルは、漏水と共に土砂を流出させトンネル背面に新

たな空洞を生じさせ安定性を損なう原因になる。

このように、水路トンネルの補修・補強は、立地条件、トンネルの施工方法（昭和 50 年代以前は矢板工法）、通水量、通水停止期間など諸条件により検討課題が異なる。

3. トンネル補修・補強工法の開発

トンネル補強工法開発のコンセプトを表-1 に示す。水路トンネルでは一定期間送水を止めて補修・補強を行うことが多く、資機材搬入用の立坑や坑口が少なく、周辺は狭隘な山岳地帯であるため、人力による施工が可能な工法であることが望ましい。また、設計流水量の確保は当然であるが、流水等による覆工面の洗堀も防止（抑制）しなければならない。さらに、送水を止めた状態でも、漏水や溜まり水がある環境でコンクリートを打設しなければならない。狭い箇所でも流動性が良く水中分離抵抗性を有するコンクリートが必要となる。

表-1 トンネル補強工法開発のコンセプト

要求性能	課 題
内空断面の確保	できる限り内空断面の縮小を避けるため補強厚を小さくする。
トンネル内側面の耐久性の向上	水流などによる覆工表面の摩耗を抑制する。
裏込めコンクリートの品質確保	トンネル底版にたまり水があることを想定して、材料分離抵抗性、水中不分離性を、補強厚さが薄くても裏込めコンクリートが打設できることを前提に、流動性、セルフレベルリング性を確保する。
経済性	既存の補強工法よりも経済的であることが要求される。

4. サポートライニング工法

(1) サポートライニング工法の開発

a) 既存工法の問題点

水路トンネルの覆工補強としては既に鋼製支保工+内巻工が実施されているが、以下のような問題点があり、これを解決するために本工法を開発した。

- ①鋼製の支保材は、錆びが発生する。
- ②内巻工に普通コンクリートを用いると表面が摩耗しやすい。
- ③搬入口が狭いと材料等の搬入、施工が困難となる。
- ④溜まり水や漏水箇所では、材料分離するためコンクリートの品質が確保できない。

- ⑤支保工の組立てが煩雑であり、スライドフォーム+鋼製支保工の工法は経済性、施工性に劣る。

b) 開発内容

内巻きコンクリートの打設方法は、埋設型枠方式とし、型枠に使用する覆工板および裏込めコンクリートの開発を行い、鋼製の模擬トンネルを使用して本工法の施工性と補強効果の確認実験を行なった。

c) 要素実験

・覆工板の検討

覆工板は、軽量化と薄肉化を目指して超高強度繊維補強コンクリート製のパネルを検討した。実験に使用した覆工板（標準パネル）の形状を図-1 に示す。覆工板は、幅 1470mm、高さ 470mm、厚さ 10mm とし、質量約 30kg と人力施工が可能な大きさとした。

また、裏込め材と覆工板の一体性を確保するため覆工板背面にインサートを埋込んだ。超高強度繊維補強コンクリートは、圧縮強度 約 200N/mm² 曲げ強度 約 50 N/mm² である。

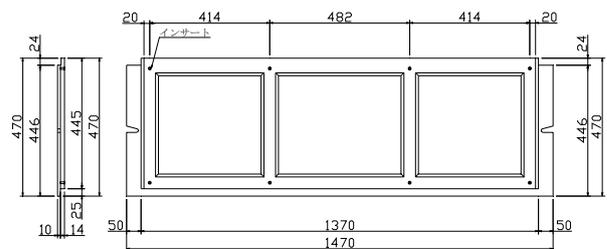


図-1 覆工板の形状

・裏込めコンクリートの検討

裏込めコンクリートは、水路トンネルの要求性能を満たすため、粗骨材の最大寸法 (G_{MAX}) を 10mm、水中不分離性混和剤、膨張剤を混入した配合について検討した。基本配合を表-2 に示す。

表-2 裏込めコンクリートの基本配合

材料	単位	数量
W/C	%	35.0
s/a	%	38.0
単位水量		205
セメント*1	kg/m ³	586
細骨材		552
粗骨材		901
Ad1	C*%	0.75~1.0
Ad2	W*%	1.75~2.0

*1 単位セメント量中の 20kg に膨張剤が含まれている

d) 施工性および補強効果の確認実験

・施工性の確認

施工性確認実験²⁾で行った補強工法の施工フローを図-2 に示す。

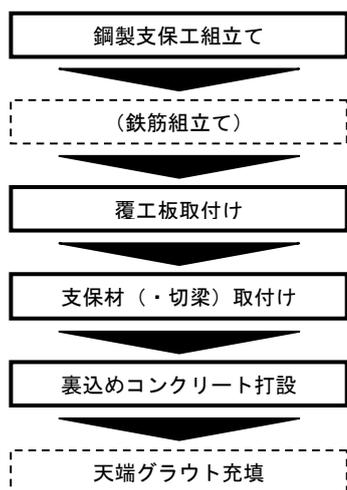


図-2 施工フロー図

写真-1 に実験状況を示す。覆工板は、鋼製支保工にあらかじめ溶接で固定したボルトを介して仮止めし、支保材で固定した。この結果、全ての補強を人力で施工できることが確認できた。



写真-1 覆工板の取付け状況

・補強効果の確認実験²⁾

断面形状は馬蹄形で、S 型（平面）2 枚と A 型（曲面）3 枚の鋼製セグメントにより構成されている。奥行き方向は 1m 幅のものを 3 組繋ぐことにより延長 3m とした。鋼製セグメントは主桁が SM490、その他の部材が SS400 材で、セグメント同士は 20mm 普通ボルトを用いて接合した。この模擬トンネル単体に荷重するのが「補強前」で、模擬トンネルに補強覆工を施工した後に荷重するのが「補強後」である。なお、補強後の荷重は裏込めコンクリート打設後 32 日目に実施した。

写真-2 に荷重装置を示す。インバートを反力床に設置し、両スプリングラインの水平方向変位をゴム板を介して拘束した。荷重はトンネル頂部軸方向に荷重梁（H-400）を渡し、1000kN ジャッキにより強制変位を与え、一方向単調荷重とした。

・実験結果

サポートライニング工法は、断面積が 10～20m² のトンネルであれば、鋼製支保工の建て込み、覆工板の取り付けは人力で施工できることがわかった。

また、粘性が高い水中不分離性コンクリートは、1.5～2.0m³/h 打設することができ、粗骨材の最大寸法が 10mm のコンクリートであっても 2 インチの配管で打設可能である。

補強後の終局耐力を確認することはできなかったが、補強前後の剛性比較から本補強工法の効果を確認することができた。さらに、実験結果の解析により、既設覆工と補強体の変形メカニズムをシミュレーションすることができた。



写真-2 荷重試験状況

(2) 水路トンネルの補強対策工事（施工事例）

本工事は、中部電力東上田発電所の約 50 年経過した水路トンネル（延長 12,807m）を補修する工事である。土被りが 6m と浅く河川下に位置する補強区間（71m）は、技術提案型の公募となり、土圧、水圧に耐えられる対策工法の提案を行った。

ここでは、3 分割プレキャスト版（超高強度繊維補強コンクリート製のパネル）による補強方法の概要・施工状況について述べる。^{3),4)}

3 分割プレキャスト版とは、サポートライニング工法の機械化施工方式であり、施工機械搬入坑および内空断面に余裕があるために採用したものである。

a) 工事の概要

東上田発電所は、岐阜県の飛騨川上流域に位置し、最大使用水量 40m³/sec、最大出力 35,000kw の中規模な水路式発電所である。本水力発電所は、昭和 29 年の運転開始以来約 50 年経過しており、最近の水路点検の結果、導水路トンネルの各所に劣化状況が見られた。本導水路トンネルは無圧トンネルで、水路延長約 12km、内径 4.42m、覆工厚はアーチ部 60cm、側壁部 30cm である。

工事名：東上田発電所水路トンネル修繕工事

発注者：中部電力(株)
 工事場所：岐阜県
 工期：平成15年10月1日～平成16年3月19日
 発電所停止期間：
 断水日：平成15年11月25日
 水路トンネル内で作業できる期間:84日間
 (平成15年11月26日～平成16年2月17日)

- 通水日：平成16年2月18日
 請負者：(株)熊谷組・シーテック・金子共同企業体
 工事内容及び工事数量
- ①工事延長：水路トンネル延長 12.807 km トンネル断面を図-3に示す。
 - ②トンネル補強工：トンネル延長 71 m はつり工 852.6 m² 覆工内巻き工 71 m
 - ③トンネル補修工：アーチ・側壁の防水工 2,900 m²，亀裂補修 500m

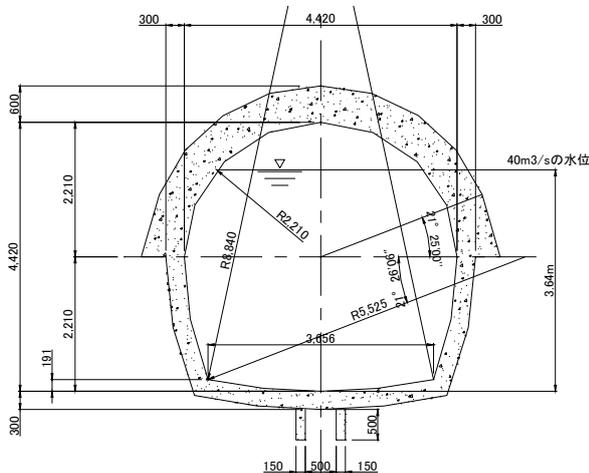


図-3 トンネル断面

b) トンネル補強工法の選定

水路トンネルの補強断面は、以下に示す基本仕様であった。

- ①通水能力の確保
 - ・仕上がり断面は、旧断面より 5cm 内側まで許容する。
 - ・仕上がり面の粗度係数は $n=0.014$ 以下とする。
 - ②補強に際しての耐力
 - ・旧断面から最低 5cm は、切削・はつりを実施する。
 - ・新旧一体化後の覆工耐力は、許容値内に収める。
- 対策工法の選定は、補強に対しての基本仕様のほか、下記に示す発注者からの要求事項に対して、全て満足できる工法を選定し、技術提案を行った。
- ①通水能力を確保するため所定の断面と粗度係数を有する。
 - ②導水路トンネルの断水期間を極力短縮する。

- ③地圧、水圧等の外圧に耐えうる強度を有する。
- ④施工期間中のトンネルの安定性を確保する（はつり作業時の旧覆工体への損傷を最小限に抑え、且つはつり厚さを最小限とする）。
- ⑤既設コンクリートを有効に利用するため、新たな覆工が既設コンクリートと一体となって構造的に作用する。

・トンネル補強工法の選定

トンネル補強工法は、既設覆工のはつり工と並行して先受け防護工を施工し、3分割プレキャスト版を建込み、裏込コンクリートを打設する工法を選定した。

先受け防護工は、既設覆工コンクリートを 5cm はつることにより断面欠損が発生し、覆工の耐荷力が減少する。このため、地圧に対抗する防護工が必要となる。水圧に関しては、湧水を遮断しないため発生しないと考える。施工方法は、側壁部のはつりを先行させつつ、後続のアーチ部はつりと先受け防護工とを組み合わせで行う。即ち一般的なトンネル掘削と同様にはつりと支保の繰り返しで施工する。鋼製支保工は、建て込み間隔 1m で BH-100×50×12×9（高耐力 SS540）を使用する。5cm のはつり深さに合わせるため高さ 50mm，幅 100mm の支保工を特注した。

また、スライドセントルを使用した現場打ち内巻工では、巻厚 10cm のコンクリートを打設することは困難であり、工期短縮に寄与しない。このような施工条件では、打ち込み型枠方式が有利と考えられた。打ち込み型枠に使用するパネルは、補強材として使用するため、超高強度繊維補強コンクリートを採用しパネル化を行った。パネルの強度特性を表-3に示す。

表-3 パネルと高強度コンクリートの強度特性

	単位	超高強度繊維補強コンクリート	高強度コンクリート
密度	kN/m ³	25.6	24.0
圧縮強度	N/mm ²	210	60
曲げ強度	N/mm ²	45	9
引張強度	N/mm ²	9	4

超高強度特性を有する材料をパネル化することの利点は、以下のとおりである。

- ①パネルの厚さを 3cm に薄肉化できる。
- ②パネル表面は平滑で既設コンクリートに比べ粗度係数 (0.013 以下) が低いため、通水能力を大幅に改善することができる。
- ③通水能力を改善できることにより、既設コンクリートのはつり幅を軽減できる。

写真-3 に 3 分割プレキャストパネルを示す。



写真-3 プレキャストパネル

c) 既設覆工コンクリートのはつり工

既設覆工コンクリートは、クラックや湧水等が発生しているが、コンクリートの圧縮強度は 21N/mm^2 (設計基準強度 18N/mm^2)程度であり、コンクリート自体の劣化は生じていなかった。

① はつり工に対する要求事項

はつり工に対する要求事項は前述のとおり以下の2項目である。

- ・施工期間中のトンネルの安定性の確保

油圧あるいは空圧式の打撃方式では、既設覆工に対して損傷(マトリックス部分及び粗骨材へのダメージ)が発生すると考えられた。また、はつり深さのコントロールが困難である。

- ・新旧コンクリートの一体化

新旧コンクリートの一体化を阻害するマイクロクラック⁵⁾を発生させない工法が必要となる。打撃により既設コンクリート表面部分にマイクロクラックが発生すると、付着力が低下し一体化が損なわれる。

これらの条件を満足する工法として、超高圧水を利用してコンクリートをはつる工法を検討した。

② ウォータージェット工法の選定

本工法の特徴を以下に示す。

- ・ブレーカー、削岩機などの打撃破壊とは異なり、ノズルから噴射された高圧水のエネルギーにより、コンクリートのセメントモルタル部分を破壊するメカニズムであるため、振動が非常に小さく環境問題への対応も容易である。
- ・コンクリート構造物に与える変形、ひずみ、残留応力が少なく、マイクロクラックもほとんど発生しないため、新旧コンクリートの一体化が容易である。
- ・適切な圧力、流量をコントロールすることにより、鉄筋を傷めずにコンクリートの変状部分だけを除去する選択的なコンクリート除去処理が

可能である。

- ・対象物とノズルが接触しないため、機械の遠隔操作化が容易で、自由な曲線・曲面の作業が可能で、さらに均一な施工品質が得られる。

工法は、機械方式(以下、ロボットと呼ぶ)と人力方式(以下、ハンドガンと呼ぶ)の併用工法とした。機械方式は、自動化、遠隔操作ができるため、高圧、大流量、即ち高エネルギーの作業ができ大規模施工に適している。ハンドガンは、ロボットでコンクリート除去ができないデッドエリアの補助施工並びに部分的な補正作業に適しており、作業員の操作性が良く、後方設備の容量が小さい中高圧・小流量のタイプを選定した。

③ 施工状況

ウォータージェットによるはつり作業は、アーチ部及び側壁部に関してはロボットで施工を行った。根底部より1m上りの範囲はロボットで施工できなかったためハンドガンで行った。ロボットを昼間、ハンドガンを夜間作業として工程短縮を図った。

写真-4 に現場はつりロボットの施工状況を示す。

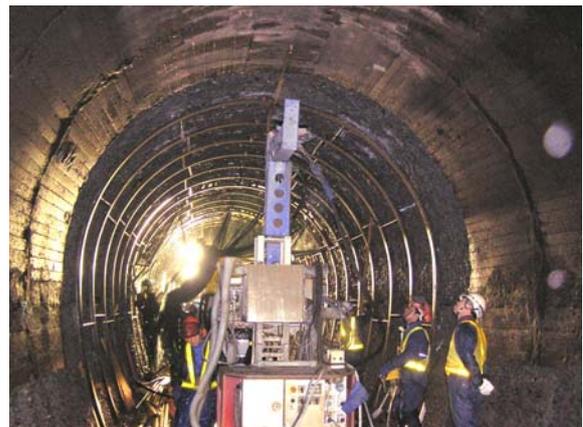


写真-4 現場はつり状況(ロボット)

d) 内巻工

プレキャストパネルは、両側壁、頂版3分割でそれぞれに専用の取り付け機械で運搬・設置を行った。1日当たりの施工は、3リング($2\text{m} \times 3\text{リング} = 6\text{m}$)の予定であったが、途中から工期確保のため、昼夜作業に変更し4リングの施工を行った。

裏込めコンクリートの打設は、シンテック社製(MKW-10SVH)のコンクリートポンプを使用し、生コン運搬は、キャリアダンプを改良してアジテーターを搭載したものを使用した。打設足場は、キャリアダンプに単管で足場を組み、移動式として使用した。

内巻工の工事数量、実績は以下のとおりである。

全体施工数量 810 m^2 (施工延長 72m : 36 リング)
1 リング (3 分割) L=2.0m 22.5 m^2

(1枚当たり約 7.5 m²)

パネル重量 側壁部：640kg 頂版部：690kg

パネル設置実績 (コンクリート打設含む)

14日間 2.6 リング/日

打設回数 10回(3 リング及び4 リング毎)

打設時間 6時間

e) まとめ

本工事は、平成 15 年 11 月 26 日から平成 16 年 2 月 17 日までの発電停止期間内 (84 日間) の計画に対して、平成 16 年 2 月 9 日に無事竣工し、8 日間の工期短縮を行うことができた。

5. ダクタイトイル覆工板による補強工法⁶⁾

(1)工法の開発

a)工法の概要

既設覆工コンクリート補強箇所の内面にダクタイトイル覆工板をアンカーボルトにより固定し、ダクタイトイル覆工板と覆工コンクリートの隙間に無収縮モルタルを充填することによって、ダクタイトイル覆工板のアーチ効果によりトンネルを補強する工法である。ダクタイトイル覆工板を写真-5、継手部分を写真-6 に示す。

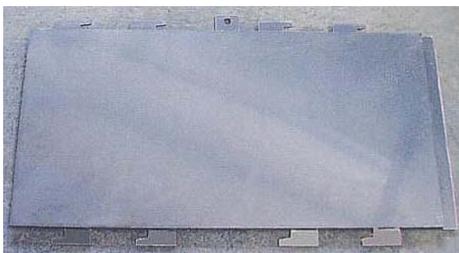


写真-5 ダクタイトイル覆工板

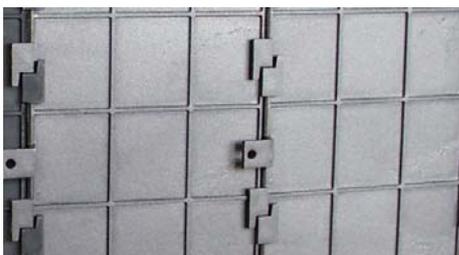


写真-6 ダクタイトイル覆工板の継手

b)特 徴

水路トンネルの多くは、資機材搬入用の坑口等が少なく、周囲が狭隘な地域が多々あり、補強・補修箇所が坑口から数 km 奥となる場合がある。また、工事期間としては送水を一定期間止めて短期間での補修・補強が多い。このような条件においても、本工法は十分期間・コストの面において対応できる工法である。

本工法と鋼板補強工法の比較を表-4 に示す。

表-4 工法比較表

工 法	ダクタイトイル覆工板工法	鋼板補強工法
概要図		
施工方法	既設トンネル側壁下端に覆工板を載せる支持材をアンカーボルトで既設覆工面に固定する。リング始点側から順にダクタイトイル覆工板をアンカーボルトにより既設覆工面に沿って取付・固定する。ダクタイトイル覆工板と既設覆工面との隙間にモルタルを充填する。	トンネル側壁下端に支持材をアンカーボルトで覆工面に固定する。始点位置にゲージを組み立て、鋼製覆工板を取付けボルトにより既設覆工面に沿って組み立て固定する。組立後、鋼製覆工板と既設覆工面との隙間にモルタルを充填する。
	<ul style="list-style-type: none"> 覆工板が軽く(1枚23kg)人力施工。 覆工板は、噛合せ構造のため、施工性が良く、単一モデルによりコスト低 単リング配置のためリングごとに断面変化に対応でき、補強後の断面減少が小さく、粗度係数も0.010と小さくなり取水量が確保できる。 	<ul style="list-style-type: none"> 覆工板1枚25kg~30kg。 覆工板は、嵌合とボルトで固定。 製作はオーダーメイド、コスト高。 千鳥配置のため区間ごとに補強断面の設計が必要。補強後の断面減少が大きい区間が発生する。
施工性	10m ² /日	6~7m ² /日
総合	◎	△

c)施工性確認試験

半径 3.4m の模擬トンネル内にダクタイトイル覆工板を取付、施工性の確認を行った。その結果、10 m²/日以上以上の施工ができることが確認できた。施工フローを図-4 に示す。

施工性確認状況を写真-7 および写真-8 に示す。

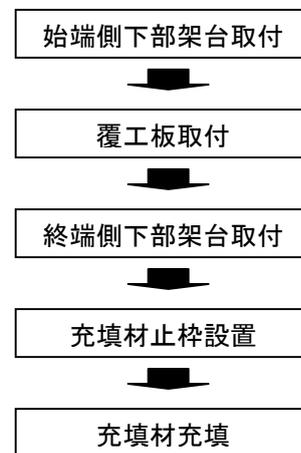


図-4 施工フロー



写真-7 覆工板取付状況



写真-8 モルタル充填状況

d) 覆工板性能試験

ダクトイル覆工板の単体及び継手部の強度試験を行った。

①単体曲げ試験

覆工板単体の正方向（トンネル外側方向）に荷重を載荷して覆工板単体の強度を検証した。

無収縮モルタルを充填した状態の覆工板試験体を作成して、正方向（トンネル内側方向）、負方向（トンネル外側方向）に荷重を載荷して覆工板の継手強度を検証した。継手曲げ試験状況を写真-9 に示す。



写真-9 継手曲げ試験（正方向）

②性能試験結果

覆工板の単体曲げ試験と継手曲げ試験の結果を以下に示す。

表-5 覆工板の性能試験結果

曲げ耐力	最大抵抗モーメント (kN・m)		比率
単体曲げ耐力	4.23		1.0
継手曲げ耐力	正	4.95	1.17
	負	0.95	0.22

継手曲げ試験の結果と単体曲げ試験の結果と比較すると、継手正曲げは、単体試験結果の 1.17 倍あり、継手負曲げでは、0.22 倍であった。この結果から、継手正曲げにおいては単体曲げ強度と同等、継手負曲げにおいては単体曲げ強度の 20%程度の強度があることが分かった。

(2)ダクトイル覆工板によるトンネル補強事例

a) 工事概要

①工事名：長者原発電所導水路トンネル補強工

②発注者：東北水力地熱(株)

③補強延長：延長 53.3m

(補強箇所 4 箇所 7.4m, 7.4m, 14.8m, 23.7m)

④工期：平成 18 年 8 月 1 日～10 月 31 日

長者原発電所導水路は、昭和 13 年の通水以来 68 年が経過した施設である。導水路トンネルの覆工コンクリートが地山の偏圧等により変状していると考えられる箇所の補強対策として本工法が採用された。

b) 設計

本工法の設計は、断層または背面空洞の影響で地圧のバランスが崩れたことにより、覆工コンクリートが変状したものと想定し、土荷重としてゆるみ荷重(ゆるみ高さ 2D)を作用させて構造検討を行った。

①補強構造

補強構造は導水路内の覆工コンクリート側壁およびアーチ部の範囲を、ダクトイル覆工板 14 枚により補強する構造である。既設覆工コンクリートと覆工板との隙間に無収縮モルタルを充填することにより両者の一体性を確保し、ダクトイル覆工板のアーチ効果で導水路トンネルを補強する構造である。導水路の標準断面図を図-5 に示す。

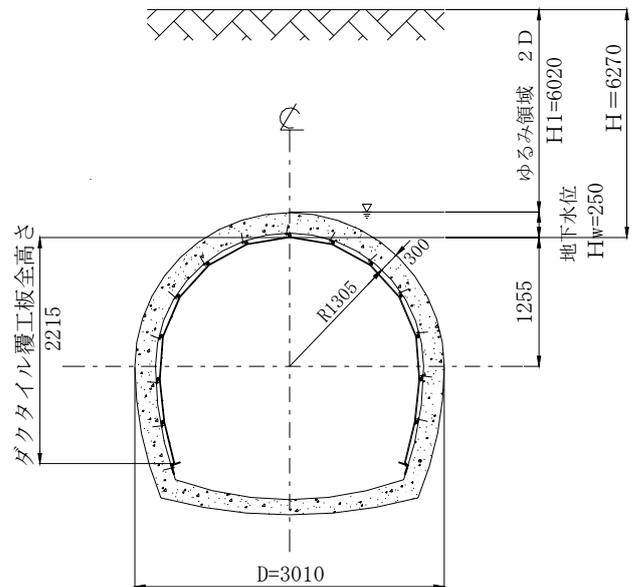


図-5 標準断面図

②断面諸元および物性値

ダクトイル覆工板の断面諸元を表-6 および物性値を表-7 に示す。

表-6 断面諸元

長さ (mm)	幅 (mm)	厚さ (mm)	断面積 (mm ²)	断面二次モーメント (mm ⁴)	断面係数 (mm ³)
420	840	8	6,500	43,987	14,927

表-7 物性値

部材名	材質	静弾性係数	単位堆積重量
		(N/mm ²)	(kN/m ³)
ダクトイル覆工板	FCD450	1.7×10 ⁵	72.0
許容応力度		許容せん断応力度	
長期	短期	長期	短期
170	255	110	165

③解析モデル

補強構造を 14 分割した多面体の単リング覆工板モデルとして解析した。なお、ピース間継手は非線形の回転バネによる継手結合とし、回転バネ定数は継手曲げ試験より算出した値を採用した。地盤反力バネは、引張時には $K_v=0.0MN/m^3$ とした。図-6 に解析モデル、図-7 に土荷重モデルを示す。



図-6 解析モデル

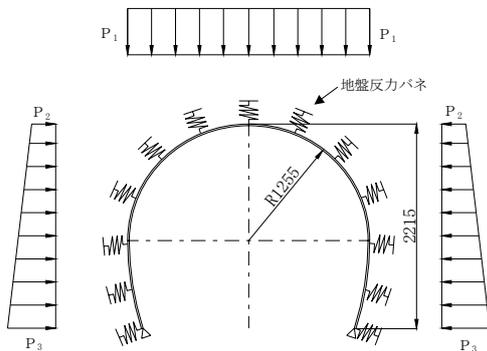
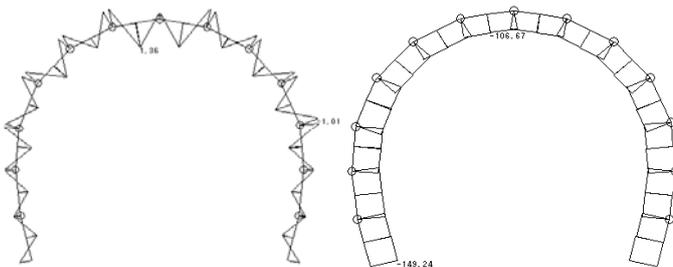


図-7 土荷重モデル

④解析結果

ダクトイル覆工板の自重・充填モルタルの重量および想定される土荷重を作用させ解析した。断面力図を図-8 に示す。



曲げモーメント図

軸力図

図-8 断面力図

c) 施工状況

東北水力地熱(株)長者原発電所導水路トンネル補強工における施工完了状況を写真-10 に示す。



写真-10 施工完了状況

(3)まとめ

ダクトイル覆工板を試作し、半径 3.4m の模擬トンネルで施工実験を行い、人力施工および施工サイクルの検証ができた。また、補強厚 5cm 以下であるため、断面減少が小さく、設計通水量が確保できる等、本工法の利点が確認された。

参考文献

- 1) 土木学会岩盤力学委員会：トンネルの変状メカニズム，(社)土木学会，p7-8，2003.9
- 2) 濱田 真，佐藤孝一，森康 雄，緒方明彦：鋼製支保工と内巻工を併用したトンネル補強工法の開発，コンクリート工学，VOL.43/N03，p19-27，2005.3
- 3) 織田晃治，小林 憲，光川 健（中部電力株式会社）：水路トンネル改修におけるR P Cを用いたP c a パネルの適用，平成 16 年度土木学会全国大会第 59 回年次学術講演会，第VI部門 6-134，2004.09.10
- 4) 駒谷恒雄，淵上幸彦，土井亮太，上西一成，植松澄夫，岩井孝幸：合理的なトンネル補強対策工法の技術提案と施工，熊谷組技術研究報告，No.63，2004
- 5) 紫桃孝一郎，上東 泰，野島昭二，吉田 敦（日本道路公団試験研究所）：ウォータージェット技術を利用した新旧コンクリート構造物の一体化処理，コンクリート工学テクニカルレポート，Vol. 38，No. 8，2000.8
- 6) 森 康雄，藤原正雄，斎藤孝志：ダクトイル覆工板によるトンネル補強工法の開発，電力土木，No. 328，p55-58，2007.3