

巻厚不足の覆工における補強設計・施工の手引き
ー矢板工法トンネルの補強技術の提案ー

設計・施工指針

2024年5月

飛島建設株式会社

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

山口大学

設計・施工指針

目次

第1章 総則	1
1.1 工法概要	1
1.2 適用範囲	4
1.3 用語の定義	5
第2章 使用材料	6
2.1 材料の種類と仕様	6
2.2 材料定数	9
第3章 内巻補強工の設計	11
3.1 設計の基本	11
3.2 設計フロー	12
3.3 設計条件の整理	14
3.4 補強断面の検討	15
3.5 構造計算	18
第4章 施工方法および品質管理	24
4.1 事前補修	24
4.2 モルタル吹付け (TDR ショットライニングシステム)	26
4.3 シヤキー	31
4.4 ウォータージェット	33
4.5 あと施工アンカー	37
参考文献	38

別添資料1 吹付けモルタルの性能評価試験 試験結果報告書

別添資料2 巻厚不足の覆工における補強設計例

第1章 総則

1.1 工法概要

本工法は、主として矢板工法により施工されたトンネルのうち、既設の覆工コンクリート（以下、既設覆工という）において巻厚不足等の構造欠陥を有するものに適用する内巻補強工である。本工法では、内巻補強工として、内空側に補強鉄筋を配置し、TDR ショット工法により高品質のモルタルを吹付ける。さらに内巻補強工と既設覆工の接合面にシヤキーを設けることで、両者の一体化を図っている。

下記に本工法の特徴を示す。

- 1) 繊維シート補強に比べて補強効果が大きい。
- 2) 接合部を確実に一体化することが可能である。
- 3) 既設覆工と内巻補強工を一体化と見なした構造に対する合理的な設計が可能である。
- 4) 耐久性（耐酸性、中性化抵抗性）、剥落抵抗性に優れる。
- 5) 仕上り面の健全性、平滑性に優れる。
- 6) 既設覆工の形状や必要とする補強厚さに対する広い適用性を有する。

〔解説〕

矢板工法で施工された昭和50年代以前のトンネルでは、覆工天端の巻厚不足や背面空洞等の構造欠陥を有する例が少なくない。これらのトンネルにおいては、地山や覆工の経年劣化に伴って構造的に有害なひび割れの増加とともに、覆工の耐荷力や剛性が徐々に低下していくことが懸念されている。また、山岳トンネルにおいては、土被りの少ない坑口部や断層破碎帯等の脆弱部における耐震性の確保が注目されているが、これらの施工箇所では、地山条件等に伴う施工の困難さから巻厚不足が生じやすく、設計上の耐荷力が確保できていない場合がある。点検・診断の実施に伴い、その多くが予防保全上、対策の必要な状態にあると判定されている。さらに、工事対象となる矢板工法のトンネルでは、内空断面に余裕のないケースもあり、覆工の耐荷力向上を目的とした内巻工法等の補強対策を実施することが困難な場合もある。

本工法は、コンクリート構造物の断面修復工法として開発され、その後、シールドトンネルの特殊二次覆工（鋼製セグメント区間の二次覆工）で多数の施工実績を有する TDR ショット工法（TDR ショットライニングシステムを含む）と一律的な形状を穿孔して作成する円柱型のシヤキーを組み合わせで開発された工法である。これらの工法の特徴を活かして、本工法は補強が必要な範囲に対して必要とされる補強仕様（モルタル強度、補強厚さ、有筋構造の採用等）を適宜設けるとともに、環境劣化等に対しても既設覆工との一体性を確保でき、既設覆工の耐荷力にも期待できる補強設計を可能とした工法である。

なお、本工法は矢板工法によるトンネルのみでなく、NATM で施工されたトンネルで、巻厚不足のトンネルに対する補強にも適用可能である。さらに、NATM で施工された無筋構造の覆工区間に対して有筋構造とすることで耐震性能向上を図ることも可能である。

本工法の特徴として、以下に示す内容が挙げられる。

- 1) トンネルの変状対策として内面補強工が挙げられ、その代表的な対策工として繊維シート補強工等がある。内面補強工は厚さが薄いため、内空余裕のないトンネル覆工の補強に対しては優位である。しかしながら、その主要な効果は剥離防止や変形抑制にあり、覆工の耐荷力を現在の劣化状態より向上させる効果やその設計方法は現状では明確にされていない。特に、補強対象箇所の

覆工の内面が圧縮状態となる場合には、十分な補強効果が望めないと考えられる。本工法では、補強鉄筋を配置し、高品質のモルタルを吹付け施工することで高い補強効果が期待できるとともに、地震時における覆工の急激な崩壊を抑制する効果も期待できる²⁾。

- 2) 環境劣化を受けるような場合でも既存躯体と新設躯体を一体化させる場合には、既存躯体の表層を研り、そこに新設躯体のコンクリートもしくはモルタルを打ち込み、凹凸の噛み合いにより機械的に一体化させることが求められる。一般的にはウォータージェットによる切削が採用される場合が多いが、本指針で対象とする天端部の巻厚が薄い条件ではその施工が難しい。そこで、本工法では接合面に円柱型のシヤキーを施工し、高品質のモルタルを吹付け施工することで、従来の不規則な凹凸の目荒らしに比べて、確実かつ簡易に一体性の確保が期待できる。さらに、ウォータージェットと比較して、コストの低減も期待できる。
- 3) 表 1.1.1 に補修・補強工法の分類³⁾を示す。覆工内面の補強対策として、「内面補強工」、「内巻補強工」がある。「内面補強工」は、「繊維シート補強工」や「鋼板接着工」が対象となるが、正規の巻厚での構造性能を保証するものではない。一方、「内巻補強工」は、巻厚不足の覆工に対し、その内面に新たに耐荷力を有する補強材を配置するものであり、巻厚不足の覆工に対し、正規の巻厚での構造性能を確保することが可能である。「内巻補強工」には、プレキャスト部材等の内巻補強工のみで荷重を負担する構造と既設覆工の耐荷力にも期待する構造に大別される。さらに、後者のうち、既設覆工と内巻補強工が一体化されていない重ね梁構造と一体性を確保した合成梁構造の2つがある。本工法による内巻補強工は、既設覆工と内巻補強工を一体化し、両者間で応力を伝達させることで、既設覆工の耐荷力にも期待する合成梁構造である。両者を一体と見なした構造に対する合理的な設計により、既設覆工そのものの安全性を確保した上で補強が可能である。また、既設覆工の耐荷力にも期待することで内巻補強工が負担する断面力の抑制も可能となり、補強厚の低減が見込めることから、建築限界の制約がある中においても施工が可能である。

表 1.1.1 補修・補強対策工の分類³⁾

対策の区分 ^{注1)}			対策の種類	対策工の種類
外力	はく落防止	漏水		
	○		はく離部の事前除去対策	はつり落とし工
	○		はく落除去後の処理対策	断面修復工（鉄筋防錆対策含む）
	○		覆工の一体性の回復対策	ひび割れ注入工
	○		支保材による保持対策	金網・ネット工
	○			金網工、ネット工
	○		当て板工	パネル系当て板工、繊維シート系当て板工他
	○		補強セントル工	鋼アーチ支保工
	△		覆工内面の補強対策	内面補強工
	△			繊維シート補強工、鋼板接着工他
			内巻補強工	プレキャスト工法、鋼材補強工他
		○	漏水対策	線状の漏水対策工
		○		面状の漏水対策工
		○		地下水位低下工
		○	導水植工、溝切り工	止水注入工（ひび割れ注入）
		○		防水パネル工、防水シート工、防水塗布工
		○		水抜き工（水抜きボーリング、水抜き孔）他
	△	○	凍結対策	断熱工
		○		断熱材を適用した線状・面状の漏水対策工他
	○		覆工背面の空洞充填対策	裏込注入工
	○	△	地山への支持対策	ロックボルト工
	○			ロックボルト工、アンカー工
	○		地山改良対策	地山注入工
	○			薬液注入工
	○	△	覆工改築対策	覆工改築工
	○	△		インパート工
				インパート新設または改築

凡例○：対策の主目的として効果を期待するもの、△：対策を行うことで同時に効果が期待できるもの
 注1) トンネル坑内より施工する工法の分類であり、坑外より実施する外力対策（アンカー工、抑止杭等）は除外している
 注2) 水圧が外力として作用する場合 注3) 凍上圧が作用する場合 注4) 凍結防止

- 4) 本工法の補強構造は、補強鉄筋と高品質の TDR モルタルからなる。本工法適用後に覆工背面からの湧水の滲出も懸念されることから、樹脂塗装鉄筋の適用を標準としている。さらに TDR モルタルの中性化抵抗性は、24N/mm² コンクリートの 3 倍、遮塩性も 2 倍程度で、高い耐久性能を有し

ている 4)。

- 5) TDR モルタルは 2 層仕上げを標準とし、表層 20mm にひび割れを抑制するナイロンファイバーを添加する。基層は木ゴテで粗仕上げを行い、表層は翌日以降に施工する。表層は金ゴテで仕上げするため、セントルの型枠面と同等の平滑性が確保できる。
- 6) 内巻補強工の吹付け厚さは 80~300mm の範囲で任意に設定可能であり、設計により天端部は厚く、それ以外は薄くすることが可能である。トンネルによっては、坑口区間の断面が変化するものや、断面が拡大する非常駐車帯部を有するもの等、補強対象となる既設覆工の内空が変化する場合があります。さらに、覆工の肩部近傍は建築限界を確保するため、一部をウォータージェットで切削する等の対応が求められる場合もあり、不連続な内空形状となるケースがある。本工法では、吹付けによって補強部材を施工することから、これらのような既設覆工の様々な形状に対しても適用が可能である。

1.2 適用範囲

本指針は、本工法による補強工法的设计・施工に関する一般的事項および特に配慮すべき事項について示すものである。

〔解説〕

道路トンネル維持管理便覧【本体工編】第7章 措置³⁾では、変状の発生原因や発生状態等に応じて表1.1.1に示す各種対策方法を選定することとしている。本指針に示す補強工法は、覆工天端の巻厚不足に伴う構造欠陥を有するトンネルの耐久性向上を目的として、矢板工法で施工され、建設後相当年数経過したトンネルを対象としている。そのため、矢板工法にて施工可能とされ、発破掘削を主体とした岩質の覆工側部においては、矢板工法にて標準とされた50cm以上の覆工厚を有し、膨張圧や偏土圧等の外力を受けない一般的なトンネルを標準的な対象トンネルとしている。

建設年度が古い矢板工法トンネルにおいては、現在の道路構造令にて必要とされる内空が確保されていない場合が多い。本工法による補強工法では、既設覆工を活用しつつ制約条件内での内巻補強工によって、構造欠陥を有する現在の耐荷力から補強目標とされる覆工仕様と同等の耐荷力へと向上させることを目的としている。巻厚不足のトンネルの補強目標として、設計巻厚まで復旧することが理想であるが、現実には極端に巻厚が不足しているトンネルが多く(10~15cm程度)、これを設計巻厚まで戻すことは困難である。従って、本工法においては、標準的な覆工仕様(覆工厚30cm, 無筋)や坑口部覆工仕様(覆工厚35cm, 単鉄筋)等と同等以上の耐荷力が期待できる補強目標を検討する。

本工法にて目的とする補強設計の考え方や施工面における留意事項を十分に理解し、設計にて期待する性能を十分に発揮させることが重要である。そのため、本指針では本工法における設計および施工に関する標準的な考え方を示しており、その内容を十分に理解した上で本工法を適用するものとする。なお、本指針にて対象としていない偏土圧等の水平方向の外力が作用するトンネルや、地震時にトンネルの崩壊を抑制するための対応等に対しても、本工法が完全に適用不可となるものではない。本指針にて想定した荷重条件と異なる場合には、本工法の特徴を十分に理解し、想定される設計条件について十分な解析等の検討を行うとともに、施工面における検討も十分に実施した上で適用の可否を判断する。

本指針では、補強方法としてTDRショット工法および円柱型シヤキーの適用を想定している。他工法においても既存覆工と一体化する補強方法の中で、本指針で示す力学特性の検証が可能であれば準用できるものとしており、工法を限定するものではない。

本指針以外に準拠すべき、主な基準類は次のとおりである。

- ・ 土木学会：トンネル標準示方書〔共通編〕・同解説/〔山岳工法編〕・同解説，2016.8
- ・ 土木学会：コンクリート標準示方書〔設計編〕，2023.3
- ・ 日本道路協会：道路トンネル技術基準（構造編）・同解説，2003.12
- ・ 日本道路協会：道路トンネル維持管理便覧【本体工編】，2020.9

1.3 用語の定義

本指針に用いる主な用語の定義は以下による。

- 1) 既設覆工：対策が必要とされる対象トンネルの覆工コンクリートの部分をいう。
- 2) 内巻補強工：本工法において内空側に吹付け工法にて増し打ちする内巻補強の部分をいう。
- 3) 建築限界：トンネル内で車両等が通行する際に必要とする寸法上の制限をいう。トンネルの内空は建築限界に対して余裕をもって設定されているが、一般的に肩部において最小余裕となる場合が多く、補強設計・施工上の着目点となる。
- 4) 吹付けモルタル：TDR ショットライニングシステムにより施工される高品質な吹付けモルタルをいう。
- 5) シヤキー：既設覆工を円柱型に穿孔し、凹部に吹付けモルタルが充填されたせん断抵抗要素をいう。
- 6) 補強鉄筋：補強部材を RC 構造とするために用いるエポキシ樹脂塗装鉄筋をいう。
- 7) あと施工アンカー：既設覆工を穿孔・設置し、補強鉄筋を支持するアンカーボルトをいう。

[解説]

本工法の概要と各部の名称を図 1.3.1 に示す。

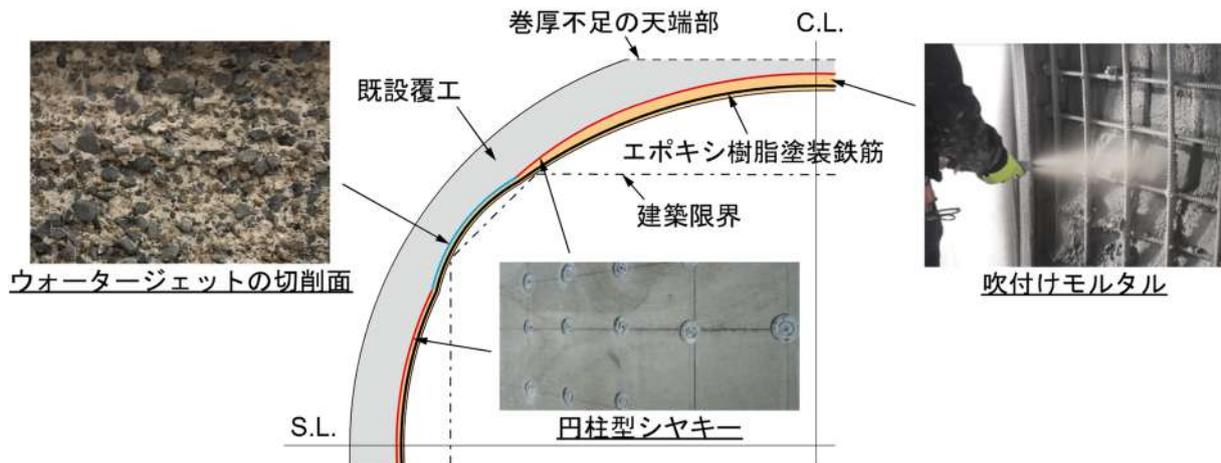


図 1.3.1 補強工法の概要と各部の名称

また、本工法で用いる円柱型のシヤキーの概要を図 1.3.2 に示す。

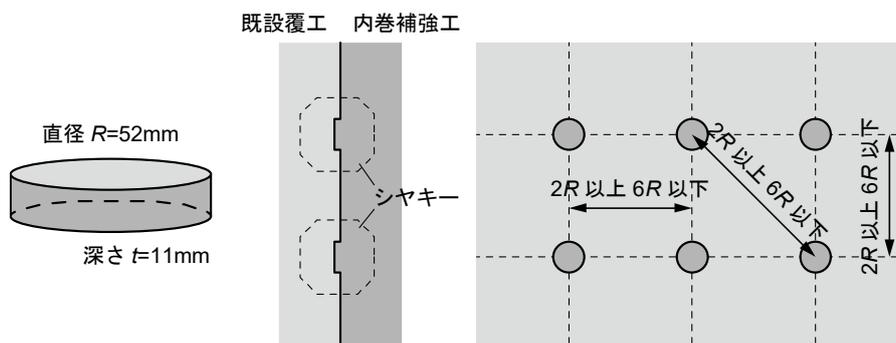


図 1.3.2 シヤキーの概要

第2章 使用材料

2.1 材料の種類と仕様

本工法に用いる主な材料の種類と仕様は以下を基本とする。

1) 吹付けモルタル

内巻補強工に用いる吹付けモルタルの仕様は表 2.1.1 による。

表 2.1.1 吹付けモルタル

(a) 標準配合

単位量 [kg/m ³]		硬化促進剤 ^{※2} [kg]
TDR モルタル ^{※1}	水	
1,900	266	38

※1 0.5Vol%のビニロンファイバーを含む

※2 表層 20mm にはナイロンファイバー50g/m³も添加

(b) フレッシュ性状と施工性

ミニスランプ [mm]	モルタル吐出量 [m ³ /hr]	はね返り率 [%]
95±25	0.2~1.0	2~5

2) 鉄筋

内巻補強工の鉄筋には、エポキシ樹脂塗装（JSCE-E105-2003）を施した鉄筋コンクリート用棒鋼（JIS G 3112）」を用いる。その仕様は原則として表 2.1.2 による。いずれの鉄筋も呼び径が D19、鋼種が SD345 の異形棒鋼を用いることを基本とする。配筋は主筋、配力筋ともに 200mm ピッチを基本とし、既設覆工側のかぶり厚さは 10mm 以上、内空側のかぶり厚さは 30mm を基本とする。

表 2.1.2 鉄筋

部材	鋼種	呼び径
主筋	SD345	D19
配力筋	SD345	D19

3) あと施工アンカー

接合面に施工するあと施工アンカーは、施工性、付着強度、クリープ性状、その他構造特性等を検討した上で決定することとし、原則として、M16 の金属系アンカーとする。

〔解説〕

1) 吹付けモルタル

本工法の内巻補強工には図 2.1.1 に示す TDR ショット工法による吹付けモルタルを用いる。本吹付けモルタルは、セメントおよび細骨材を主成分としたプレミックスタイプの無機系特殊モルタルを現

場にて練り混ぜて施工するものである。また、硬化促進剤を用いることにより、剥落の無い安定した厚吹付が可能であり、粉塵やはね返りも少なく良好な作業環境を実現することが可能である。施工は原則2層仕上げとし、最終層は20mmで、ナイロンファイバーを混入し、左官で仕上げる。

施工面積が広い場合は、施工の効率を上げるため、連続練り・吹付けを可能にしたTDRショットライニングシステムを推奨する。(4.2節参照)

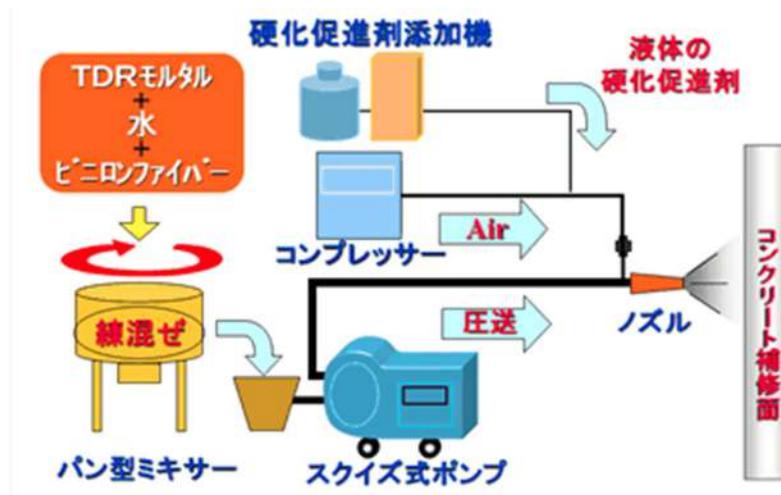


図 2.1.1 TDR ショット工法の概要

2) 鉄筋

内巻補強工の主筋および配力筋には、エポキシ樹脂塗装 (JSCE-E105-2003) を施した鉄筋コンクリート用棒鋼 (JIS G 3112) を用いる。これらの鉄筋は既設覆工の巻厚不足に起因して低下した断面性能を補うことを目的として施工する。したがって、いずれの鉄筋も呼び径が D19、鋼種が SD345 の異形棒鋼を用いることを基本とする。また、配筋は図 2.1.2 に示すように、主筋、配力筋ともに 200mm ピッチを基本とし、既設覆工側のかぶり厚さは 10mm 以上、内空側のかぶり厚さは 30mm を基本とする。ただし、別途検討により基本とする仕様を変更することは可能である。

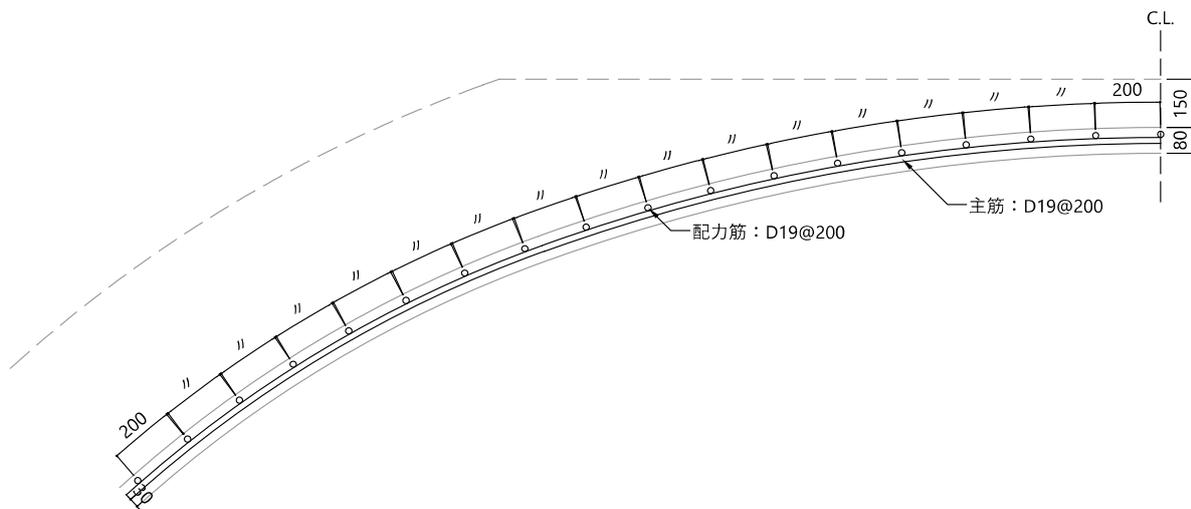


図 2.1.2 補強部の配筋

3) あと施工アンカー

あと施工アンカーは、主に既設覆工と内巻補強工の接合面において主に引張応力を伝達させるものとして施工する。したがって、あと施工アンカーの仕様は、既設覆工と内巻補強工の間で引張応力が十分に伝達されるよう、付着強度、クリープ性状、その他構造特性や施工性を検討した上で決定する。

金属系アンカーの施工例を図2.1.3に示す。同図に示す金属系アンカーの種類は、本体打ち込み式であるが、施工時の状況に応じて他の種類の金属系アンカーを用いてもよいものとする。既設側はアンカー筋に生じる引張応力に応じて、十分な定着長さを確保する。新設側はU形クリップおよびナット等を用いて配力筋に固定し、機械式定着とする。このU形クリップは、配筋時における配力筋の固定にも有用である。

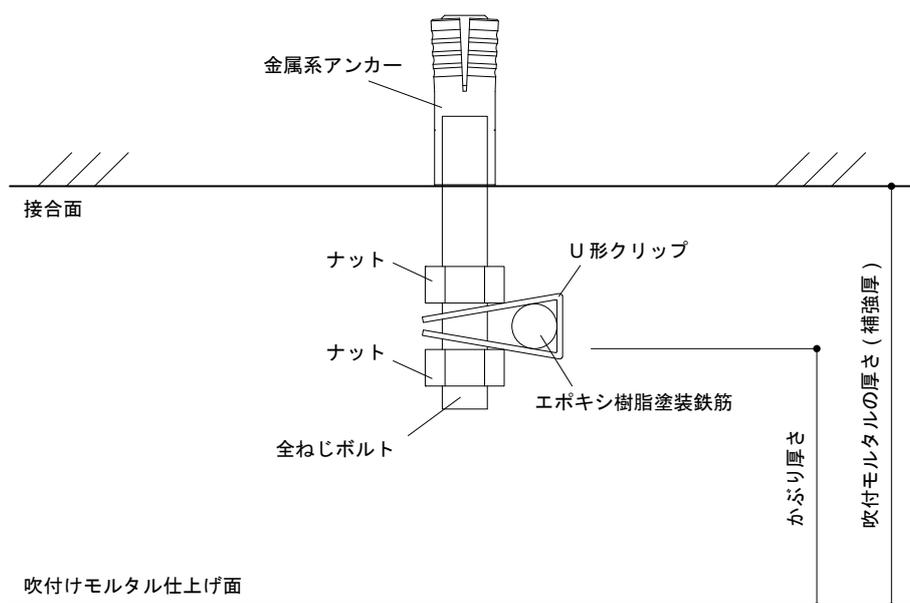


図 2.1.3 あと施工アンカーの施工例 (金属系アンカーの場合)

2.2 材料定数

本工法の設計で使用する各材料定数は以下による。

1) 覆工コンクリート

覆工コンクリートの各設計強度は、コンクリートの設計基準強度 f'_{cck} をもとに算出することを基本とする。ただし、既設覆工に対する事前調査（コア採取・圧縮試験）において、コンクリートコアの圧縮強度が設計基準強度を下回ることが確認された場合にはその数値を設計基準強度 f'_{cck} とする。設計圧縮強度 f'_{cc} は式(2.2.1)、設計引張強度 f_{ct} は式(2.2.2)、ヤング係数 E_c は式(2.2.3)により算出した数値とする。

設計圧縮強度

$$f'_{cc} = f'_{cck}/1.3 \quad \text{式(2.2.1)}$$

設計引張強度

$$f_{ct} = 0.23 f'_{cck}{}^{2/3} \quad \text{式(2.2.2)}$$

ヤング係数

$$E_c = \left(2.2 + \frac{f'_{cck} - 18}{20}\right) \times 10^4 \quad (f'_{cck} < 30\text{N/mm}^2) \quad \text{式(2.2.3.a)}$$

$$E_c = \left(2.8 + \frac{f'_{cck} - 30}{33}\right) \times 10^4 \quad (30 \leq f'_{cck} < 40\text{N/mm}^2) \quad \text{式(2.2.3.b)}$$

$$E_c = \left(3.1 + \frac{f'_{cck} - 40}{50}\right) \times 10^4 \quad (40 \leq f'_{cck} < 70\text{N/mm}^2) \quad \text{式(2.2.3.c)}$$

また、特に調査を行わない場合は、単位体積重量 γ_c は 23.0kN/m³、ポアソン比 ν_c は 0.20 とする。

2) 吹付けモルタル

別添資料1の「吹付けモルタルの性能評価試験 試験結果報告書⁴⁾」をもとに、吹付けモルタルの設計基準強度 f'_{mck} は 40N/mm²、ヤング係数 E_m は 20,000N/mm² とする。また、設計圧縮強度 f'_{mc} は式(2.2.1)、設計引張強度 f_{mt} は式(2.2.2)を準用して算出する。したがって、吹付けモルタルの材料定数は表 2.2.1 に示す数値とする。

表 2.2.1 吹付けモルタルの材料定数

設計基準強度 f'_{mck} [N/mm ²]	設計圧縮強度 f'_{mc} [N/mm ²]	設計引張強度 f_{mt} [N/mm ²]	ヤング係数 E_m [N/mm ²]
40	30.8	7.00	20,000

また、単位体積重量 γ_m は 21.7kN/m³、ポアソン比 ν_m は 0.20 とする。

3) 鉄筋

主筋，配力筋の鋼種は SD345，あと施工アンカーとして用いる全ねじボルトの鋼種は SNR490B を基本とし，それぞれの材料定数は表 2.2.2 による．ただし，別途検討によりその安全性を確認し，鋼種を変更する場合には，その鋼種に応じた数値を用いてよい．

表 2.2.2 鉄筋の材料定数

	鋼種	設計引張強度 f_u [N/mm ²]	設計降伏強度 f_y [N/mm ²]	ヤング係数 E_s [N/mm ²]
主筋	SD345	490	345	200,000
配力筋				
全ねじボルト	SNR490B	490	325	

また，単位体積重量 γ_s は 78.5kN/m³，ポアソン比 ν_s は 0.30 とする．

〔解説〕

既設覆工の設計基準強度については，18N/mm² を基本とするが，事前調査にて低い強度が確認された場合には，工学的な判断に基づき，適切な値を用いる．なお，事前調査にて 18N/mm² よりも高い強度が確認された場合には，設計者の判断により定めた値を用いてもよい．

第3章 内巻補強工の設計

3.1 設計の基本

本工法は、天端部において巻厚が不足する既設覆工の構造性能を内巻補強工により補う工法である。したがって、既設覆工と内巻補強工による合成断面を設計し、その構造性能を照査する。さらに、既設覆工と内巻補強工の界面が接合され、十分に応力伝達が行なわれていることを照査する。すなわち、既設覆工と内巻補強工が一体として機能するように内巻補強工ならびにその接合部の設計を行う。

〔解説〕

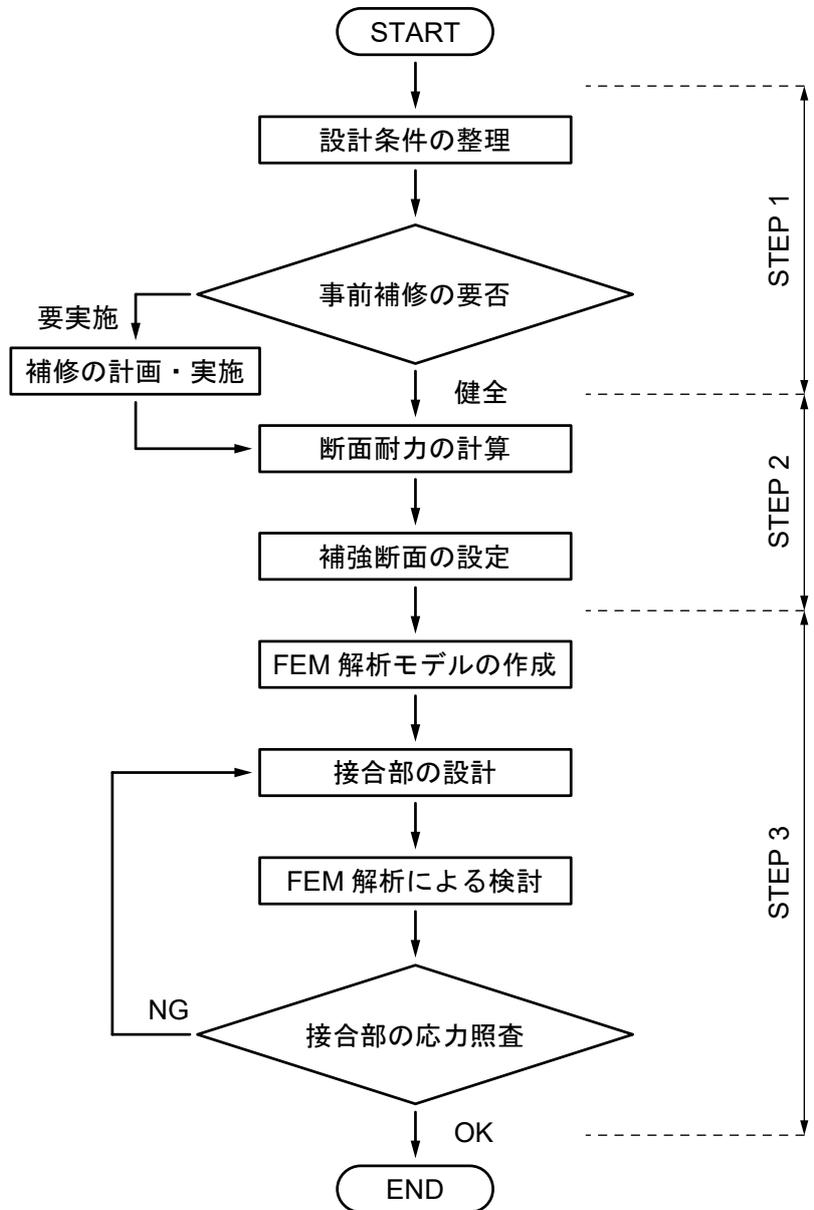
設計巻厚に対して巻厚が不足する覆工は、本来期待される構造性能を有していない可能性が高く、設計段階で想定されていた範囲の外力に対して安全であるとは言い難い。そのため、既設覆工の内空側を内巻補強工で補強し、構造性能を向上させることが求められる⁵⁾。内巻補強工による補強効果を得る際には、既設覆工と内巻補強工の間で応力伝達が行なわれ、環境劣化による剥離等が発生しないよう、一体性を確保することが重要となる。

本設計では、既設覆工と内巻補強工を合成した部材が終局耐力（圧縮縁が圧壊する状態）に達するまで、既設覆工と内巻補強工の接合部で応力が伝達できている状態、すなわち接合面に生じる応力が接合部の強度以下である状態を一体性が確保できているものと定義する。既設覆工と内巻補強工の間における応力伝達を担保するためには、接合面の力学的挙動を考慮して設計を行う必要がある。

なお、本設計法による補強設計例を別添資料2に示す。

3.2 設計フロー

本工法の設計は、下記のフローに従う。



[解説]

本工法の設計は、以下のとおり大きく3ステップに分けて行う。

STEP 1 設計条件の整理

STEP 1 では設計条件の整理を行う。事前調査に基づき既設覆工の諸元、周辺地山の地盤種別を把握する。また、本工法の目標とする要求性能を設定する。原則として、本設計では坑口部覆工仕様（覆工厚35cm, 単鉄筋）の構造性能を目標とするが、発注者と協議の上、必要に応じてそれ以外の要求性能、例えば標準的な覆工仕様（覆工厚30cm, 無筋）を設定する。もしくは、設計条件（荷重条件等）が明確であれば、その条件を満たす補強設計を行う。ここで、背面空洞やひび割れ等の補修は本設計施工指針の対象外とする。事前調査によりこれらが確認された場合には、別途ガイドライン等に準拠して適切な補修を行った上で本工法を適用する。

また、本工法は既設覆工の内面を補強することから、内空の建築限界についても検証しなければならない。吹付けモルタルの吹付け厚さを考慮して建築限界に抵触する場合には、ウォータージェット切削等により既設覆工の切削を検討する。

STEP 2 補強断面の検討

STEP 2 では補強断面の検討を行う。内巻補強工の断面は、現状における既設覆工の断面性能および目標とする断面性能を把握した上で検討する必要がある。ここで、覆工の断面には軸力と曲げモーメントが作用することから、本設計では覆工の断面性能を評価する指標として、M-N 破壊包絡曲線を用いて検討する。目標とする断面性能に対して、現状の断面性能がどの程度不足しているのかを踏まえ、内巻補強工の厚さや鉄筋の配筋について検討する。

STEP 3 構造計算

STEP 3 では既設覆工と内巻補強工の接合部を設計し、有限要素解析モデルを作成して構造計算を行う。作成する解析モデルはSTEP 2 で設定した合成断面を有するモデルとし、天端部における既設覆工の縁応力が設計圧縮強度に達する時の荷重を設計荷重として定める。そして、設計荷重を与えた時の接合面に生じる応力を照査し、接合部が破壊せず一体性が確保されていることを確認する。

ここで、接合部に生じる応力が接合部の強度に対して NG となる場合には、あと施工アンカーやシヤキーの数量を増やす等して、接合部の設計を再度行う。

3.3 設計条件の整理

本工法の設計検討を進めるにあたっては、補強後に期待する要求性能を設定するとともに対象となるトンネルの諸条件を確認し、設計条件として整理することが必要となる。設計上必要な情報が不足する場合には、最低限必要とされる調査等を行わなければならない。

〔解説〕

本工法は、天端の巻厚不足に伴う構造欠陥を有するトンネルを対策検討対象としており、巻厚不足に伴って対象トンネルの有する耐荷力が低いことが想定される。さらに、変状発生に伴ってトンネルが有する耐荷力がさらに低下していくことが十分に想定され、変状をさらに進行させるといった負の現象を繰り返す可能性がある。

本工法では補強を行うことにより、現在よりも耐荷力を高めることでトンネルの耐久性向上を図ることを目的としている。その設計に際しては、求める補強目標を設定することが必須となり、経済性を考慮した合理的な要求性能を設定することが重要となる。期待する要求性能としては、標準的な覆工仕様（覆工厚 30cm、無筋）や坑口部覆工仕様（覆工厚 35cm、単鉄筋）等が想定され、その仕様と同等以上の耐荷力が期待される補強仕様を設計検討する流れとなる。ただし、設計条件（荷重条件等）が明確であれば、それに対応した設計検討を行う。

新設トンネルとは異なり、供用中で一般的には建設年度が古い在来工法で施工されたトンネルが対象となるケースが多いと思われる。そのため、現在のトンネル内空断面によっては、建築限界との関係で側部や特に肩部における余裕がなく、補強工法となる吹付けが実施できる厚さに制約が生じることや現在の NATM トンネルよりも厚いとされる覆工の状態や厚さ等によっては部分的な切削にて対応するケースもある。

そのため、設計検討を行う際には、補強を行う対象トンネルに関する制約条件を明確にすることが大切であり、以下に示す点を事前に確認することが望ましい。

- ①補強対象トンネルの設計概要（設計図面、設計仕様）
- ②トンネル点検記録等（変状記録、変状発生要因、変状進展の有無）
- ③調査記録（最小覆工厚、概略覆工強度、内空断面、背面空洞の有無（有の場合：対策内容））

なお、トンネルによっては①に関する情報が得られない場合もあり、その他の情報についても調査されていない場合もある。設計検討を進める上で③に関する情報は、内面補強が実施可能となる施工可能厚さが建築限界との関係で制約されることや補強効果を解析検討する際に既設覆工に対して見込んでよい設計強度等を決める上で必須のものとなる。また、建築限界との関係で吹付け厚さに制約が生じる場合には、切削を含めた設計検討も必要となる。具体的には、建築限界に余裕が無い肩部近傍の巻厚が目標とする覆工厚さより十分に厚い場合は、切削によって断面を切り広げ、補強巻厚を確保する。設計を進める上で必須となる情報が不足する場合には、別途調査（削孔や電磁波による巻厚探査）を実施する。

トンネルの耐荷力を検討する際には、トンネル全周に渡って地山反力が期待できる条件としている。特に覆工天端の巻厚不足があり、その背面に空洞が存在した状態であると突発性の崩壊の可能性が懸念され、単に内面への補強のみで対応可能とはならない。そのため、巻厚不足に伴う構造欠陥を有し、対策区間となる範囲において背面空洞が確認されている場合には、適切な背面空洞充填が実施されていることを原則とする。

3.4 補強断面の検討

(1) 断面検討の概要

補強断面の設計を行うためには、構造計算が実施可能となる補強断面（補強厚さ、配筋等）を検討することが必要となる。補強断面の検討は、本工法の主な対象トンネルとなる天端付近の覆工厚さ不足箇所に着目し、期待される補強効果を既設覆工と内巻補強工が一体化した状態における M-N 破壊包絡曲線を用いて求めることを基本とする。

(2) 断面耐力の計算

トンネル各部位の応力照査および断面力照査を行うために、原則として以下に示す 3 つの解析モデルを作成することを基本とし、その他懸念事項がある場合には適宜モデルを増やして検証する。

Model 1：天端部の巻厚が不足した既設覆工の断面モデル

Model 2：補強目標とする覆工断面モデル

Model 3：補強断面検討モデル

断面耐力の計算条件は、以下を基本とする。

- 1) 天端部における断面の M-N 破壊包絡曲線を求める。
- 2) 既設覆工と内巻補強工は、完全一体梁として計算する。
- 3) コンクリートおよび吹付けモルタルの応力-ひずみ関係は、非線形モデルを採用し、引張応力は見込まない。
- 4) 鉄筋の応力-ひずみ関係は、完全弾塑性のバイリニアモデルとする。
- 5) 内巻補強工の厚さは 8cm を基本とする。本検討の段階で不足する場合には天端部の厚さを局所的に大きくする。ただし、トンネル断面の周方向において極端に断面厚が変わらぬよう配慮する。

(3) 補強断面の設定

Model 1~3 の M-N 破壊包絡曲線を計算し、Model 3 の M-N 破壊包絡曲線が Model 1 を上回り、Model 2 と同等以上となることを確認する。この時の補強断面を用いて次節以降の構造計算を行う。Model 3 の M-N 破壊包絡曲線が Model 2 に達しない場合は、補強断面を再検討する。

(4) 設計条件が明確である場合の検討

設計条件が明確である場合は、補強断面の M-N 破壊包絡曲線を求め、設計荷重が作用した時の断面力が M-N 破壊包絡曲線の内側になるように、内巻補強工の補強厚さ、補強鉄筋の配筋を設定する。

〔解説〕

(1) 検討の概要

補強断面の検討は、後述の構造計算に用いる断面仕様を設定することを目的とする。そのため、ここでは補強断面を決定するのではなく、断面を事前検討するという位置づけとなる。補強断面の検討では、断面耐力の把握および比較が重要となる。断面耐力の比較検討は、最も断面耐力が小さくなる想定される巻厚不足の天端部断面を対象として行う。断面耐力の評価には様々な手法が挙げられるが、本設計では図 3.4.1 に示す軸方向耐力と曲げ耐力の関係を整理した曲線（以下、M-N 破壊包絡曲線と称す）を用いて補強断面を検討する。M-N 破壊包絡曲線の線上は軸力と曲げモーメントの組合せにより決まる断面耐力であることから、曲線の内側は断面耐力に達していない安全な状態であることを意味する。そのため、安全性の照査において活用する場合には、検討対象の断面によって決まる M-N 破壊包絡曲線が、目標とする断面の M-N 破壊包絡曲線と同等あるいは外側に大きくなるようにすることが基本的な考え方となる。なお、M-N 破壊包絡曲線は、断面の大きさだけでなく、配筋の影響により、左右対称形にならないことに注意する必要がある。

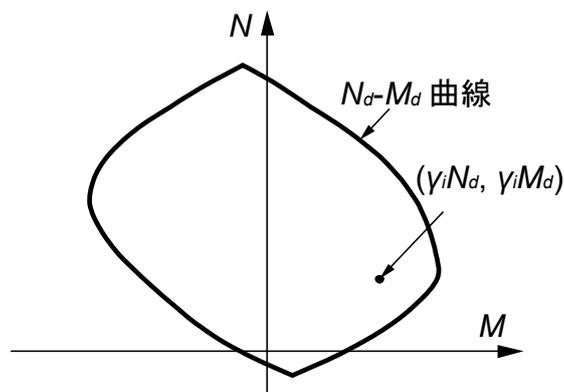


図 3.4.1 M-N 破壊包絡曲線の概要

(2) 断面耐力の計算

本指針における断面では、既設覆工に内巻補強工を重ね合わせる補強工法であり、両者が一体化している場合と分離している場合とで応力状態が異なるものとなる。本工法における補強断面の検討においては、補強前の既設覆工と内巻補強工は完全一体と仮定し、平面保持が終局状態まで保たれるものとして検討を行う。

コンクリートおよび鋼材の応力-ひずみ曲線は、コンクリート標準示方書に規定されている非線形関係を用いることとし、コンクリートの引張応力については見込まないものとする。算出に用いる物性値については第 2 章による。なお、M-N 破壊包絡曲線の算出方法については、様々な算出手法があるが、比較検討を行う際にはすべて同一手法で算出するものとする。

(3) 補強断面の設定

下記の M-N 破壊包絡曲線を算出する.

- ① 天端の覆工厚さが薄い在来工法のトンネルの M-N 破壊包絡曲線
- ② 目標とする M-N 破壊包絡曲線
- ③ 補強後のトンネルの M-N 破壊包絡曲線

上記③が①を大幅に上回り、②と同等程度となるような補強厚さと配筋仕様を検討する。同等程度を判断する目安としては、M-N 破壊包絡曲線の頂点となる最大軸力および内巻補強工を引張縁とした際に作用する最大曲げモーメントの大きさに着目し、概ね同等であることを確認する。なお、下図 3.4.2 において、③が第二象限で大きく膨らんでいるが、これは既設覆工と内巻補強工の強度差に起因するものである。本設計では、天端において内空側に沈下する作用状態を想定しており、天端に着目する際には内巻補強工が引張縁となる曲げモーメント（第一・第四象限）に着目する必要がある。

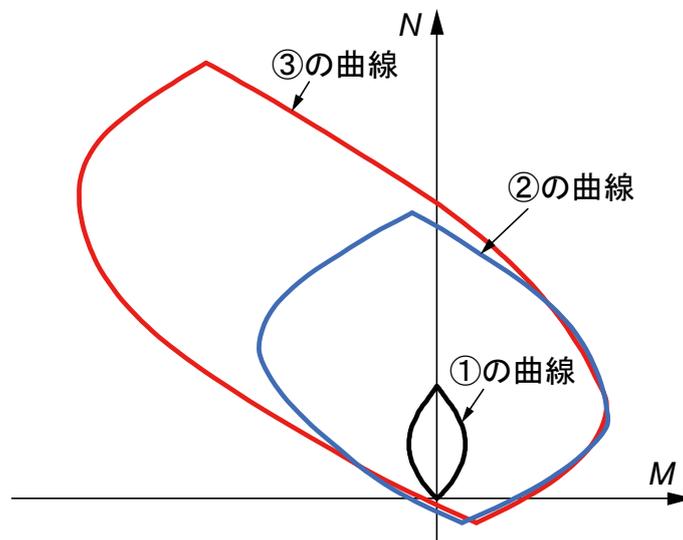


図 3.4.2 M-N 破壊包絡曲線の比較による検討の例

(4) 設計条件が明確である場合の検討

設計条件が明確である場合は、既設覆工と基本補強厚 80mm の補強断面で M-N 破壊包絡曲線を求め、設計荷重が作用した時の断面力が M-N 破壊包絡曲線の内側にあることを確認する。

断面力が M-N 破壊包絡曲線の外側になる場合は、内巻補強工の補強厚さ、補強鉄筋の配筋を変更し、再度検討を行うことで補強断面を決定する。

3.5 構造計算

(1) 構造計算の概要

3.4 節で求めた補強断面による内巻補強工と既設覆工を接合した覆工の構造計算を有限要素解析により行う。天端部における縁応力が設計圧縮強度に達する時の荷重を設計荷重として定め、その設計荷重を与えた時の接合面に生じる応力を照査する。

(2) 有限要素解析モデルの作成

有限要素解析の条件は、以下を基本とする。

- 1) 解析モデルは2次元で作成する。
- 2) 覆工コンクリートおよび吹付けモルタルは平面要素でモデル化する。
- 3) 内巻補強工の鉄筋はトラス要素でモデル化する。
- 4) 既設覆工と内巻工の接合面はジョイント要素を用いてモデル化する。
- 5) 周辺地盤の特性に応じて、地山側の全周囲に地盤ばねをモデル化する。
- 6) 既設覆工と内巻補強工の脚部には自重を考慮したせん断ばねをモデル化する。

(3) 接合部の設計

既設覆工と内巻補強工の接合面では、垂直応力（引張および圧縮）とせん断応力が伝達される。本設計では応力の分担を仮定し、垂直応力に対してはあと施工アンカー、せん断応力に対してはシヤキーもしくはウォータージェット切削面で応力が伝達させるものとして、設計を行う。

あと施工アンカーの数量は4本/m²、シヤキーの数量は25穴/m²を基本とし、接合面の特性は表3.5.1による。ただし、次項「接合部の応力照査」でNGとなった場合にはそれぞれの数量を増やし、それに応じた数値を用いる。

表 3.5.1 あと施工アンカーの垂直特性（4本/m²）

引張強度 σ_T [kN/m ²]	引張剛性 K_{nt} [kN/m ³]	圧縮強度 σ_C [kN/m ²]	圧縮剛性 K_{nc} [kN/m ³]
204.1	3,925×10 ³	∞	3,925×10 ⁷

表 3.5.2 シヤキーのせん断特性（25穴/m²）

粘着力 c_{sky} [kN/m ²]	内部摩擦角 ϕ_{sky} [deg.]	せん断剛性 K_{ssky} [kN/m ³]
1,660	42.5	3,320×10 ³

表 3.5.3 ウォータージェット切削面のせん断特性

粘着力 c_{wj} [kN/m ²]	内部摩擦角 ϕ_{wj} [deg.]	せん断剛性 K_{swj} [kN/m ³]
2,400	57.1	3,300×10 ³

(4) 設計荷重の検討

本設計では、天端部における縁応力が設計圧縮強度に達する時の荷重を設計荷重とする。

(5) 接合部の応力照査

設計荷重を与えた時の接合要素における垂直応力度およびせん断応力度の分布を抽出し、それぞれが接合面の強度以下であることを確認する。

〔解説〕

(1) 構造計算の概要

前節では、内巻補強工と既設覆工を完全一体とした条件の下で、内巻補強工の補強断面を設定した。本節では、実際の内巻補強工と既設覆工の接合面における垂直方向およびせん断方向の特性に応じた挙動を踏まえて一体性が確保されていることを確認するため、接合面の力学的挙動を考慮した構造計算を有限要素解析により行う。天端部における縁応力が設計圧縮強度に達する時の荷重を設計荷重として定め、その設計荷重を与えた時の接合面に生じる応力を照査する。

(2) 有限要素解析モデルの作成

本設計では、有限要素解析は2次元で行うことを基本とする。

覆工コンクリートおよび吹付けモルタルは平面要素でモデル化する。内巻補強工の鉄筋はトラス要素でモデル化し、吹付けモルタルの節点と共有節点として完全付着とする。

既設覆工と内巻補強工の接合面は後述する接合部の設計をもとに得られる応力伝達特性を考慮したジョイント要素を用いてモデル化する。既設覆工の地山側には全周囲において、周辺地盤の特性に応じた地盤ばねをモデル化し、既設覆工の脚部は自重を考慮したせん断ばねをモデル化する。

(3) 接合部の設計

既設覆工と内巻補強工の間では、垂直応力（引張および圧縮）とせん断応力が伝達されるため、各応力に対して接合部を設計しなければならない。本設計では応力の分担を仮定し、垂直応力に対してはあと施工アンカー、せん断応力に対してはシヤキーもしくはウォータージェット切削面で応力が伝達させるものとして、設計を行う。

[垂直方向の設計]

本設計では、引張応力はあと施工アンカーで応力を伝達させることとする。引張強度はアンカーボルトの降伏強度とする。また、接合面から既設側に $1d_a$ 、新設側に $1d_a$ の合計 $2d_a$ の区間で変形すると仮定する。よって、接合部の引張特性は、以下により算出することができる。

引張強度

$$\sigma_T = \sigma_y \times sc a \times n_a \quad \text{式(3.5.1)}$$

引張剛性

$$K_{nt} = \sigma_T / \delta_{va} \quad \text{式(3.5.2)}$$

$$\delta_{va} = 2d_a \times \sigma_y / E_s \quad \text{式(3.5.3)}$$

ここに、

- σ_T : 単位面積あたりの引張強度
- σ_y : アンカーボルトの設計降伏強度
- $sc a$: アンカーボルトの断面積
- n_a : 単位面積あたりのアンカーボルトの本数
- K_{nt} : 引張剛性
- δ_{va} : アンカーボルトの伸び
- d_a : アンカーボルトの直径
- E_s : アンカーボルトのヤング係数 (=200,000N/mm²)

圧縮応力についてはコンクリートと吹付けモルタルが接触することで応力が伝達されるため、十分な大きな剛性を持つ弾性体でモデル化する。特に検討を行わない場合、圧縮剛性 K_{nc} は引張剛性 K_{nt} の 1.0×10^4 倍とする。

以上より、M16 (SNR490) のアンカーボルト 4 本/m² 時の垂直特性は表 3.5.1 に示す数値とおりとなる。

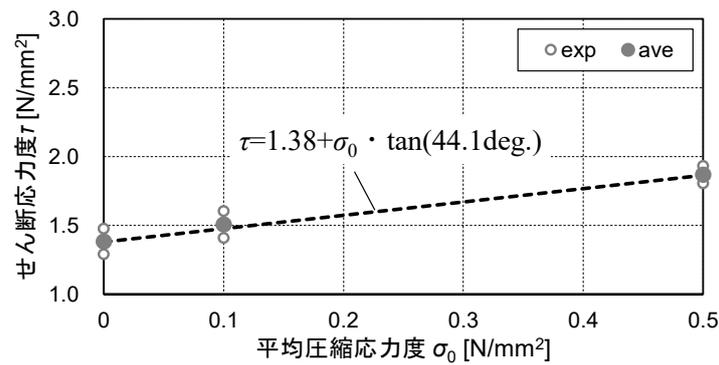
表 3.5.1 アンカーボルトの垂直特性 (4 本/m²)

引張強度 σ_T [kN/m ²]	引張剛性 K_{nt} [kN/m ³]	圧縮強度 σ_C [kN/m ²]	圧縮剛性 K_{nc} [kN/m ³]
204.1	$3,925 \times 10^3$	∞	$3,925 \times 10^7$

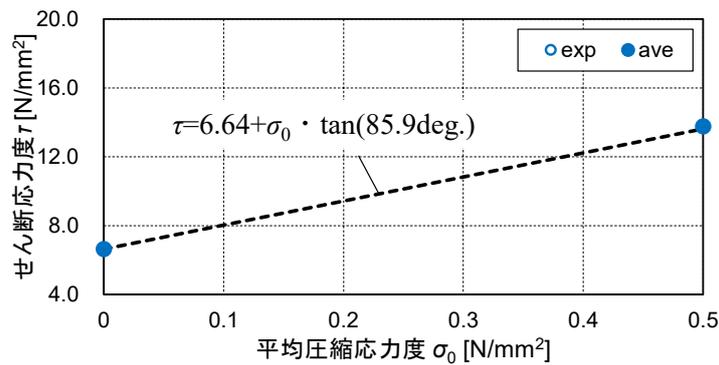
[せん断方向の設計]

本設計では、せん断応力は基本的にシヤキーで応力を伝達させることとする。シヤキーは直径 R に対する深さ t の比 R/t を 5 以下として、吹付けモルタルのシアオフ破壊となるように設定する。すなわち、既設覆工の状態によらず内巻補強工の強度でシヤキーのせん断耐力を設計する。シヤキーの最大ピッチは 200mm (25 穴/m²) として設計する。接合面にはプライマーを全体的に塗布することを基本とする。

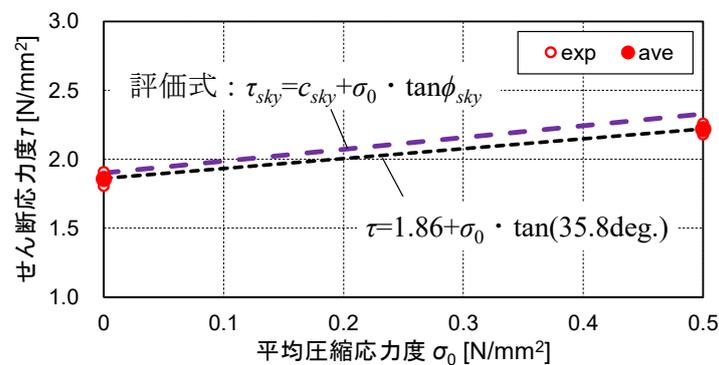
図 3.5.1 に示す実大せん断実験の結果から、シヤキー+プライマー接合面のせん断特性は以下により算出することができる。



(a) プライマーのみ



(b) シヤキーのみ



(c) シヤキー+プライマー

図 3.5.1 シヤキーの実大せん断実験結果

せん断強度

$$\tau_{sky} = c_{sky} + \sigma_0 \tan \varphi_{sky} \quad \text{式(3.5.4)}$$

粘着力

$$c_{sky} = \tau_m \times \frac{A_{sky}}{A_j} + c_{bond} \times \frac{A_{bond}}{A_j} \quad \text{式(3.5.5)}$$

内部摩擦角

$$\varphi_{sky} = \frac{(\tau_m + \tau_{bond}) - (\tau_m + c_{bond})}{\sigma_0} \quad \text{式(3.5.6)}$$

$$\tau_{bond} = c_{bond} + \sigma_0 \tan \varphi_{bond} \quad \text{式(3.5.7)}$$

せん断剛性

$$K_{ssky} = c_{sky} / \delta_s \quad \text{式(3.5.8)}$$

ここに、

- τ_{sky} : シヤキーを施工した接合面のせん断強度
- c_{sky} : シヤキーを施工した接合面の粘着力
- c_{bond} : プライマーを施工した接合面の粘着力 (=1.38N/mm²)
- τ_m : 吹付けモルタルのせん断強度 (=6.64N/mm²)
- A_j : 接合面の単位面積 (=1m²)
- A_{sky} : シヤキーの総断面積
- A_{bond} : プライマーの吹付け面積 (= $A_j - A_{sky}$)
- φ_{sky} : シヤキーを施工した接合面の内部摩擦角
- φ_{bond} : プライマーを施工した接合面の内部摩擦角 (=44.1deg.)
- σ_0 : 接合面に作用する平均圧縮応力度
- τ_{bond} : プライマーを施工した接合面のせん断強度
- K_{ssky} : シヤキーを施工した接合面のせん断剛性
- δ_s : シヤキーのせん断強度時の変位 (=0.5mm)

以上より、単位面積 1m²にシヤキーを 200mm ピッチで 25 穴施工した時のせん断特性は表 3.5.2 に示すとおりとなる。

表 3.5.2 シヤキーのせん断特性

粘着力 c_{sky} [kN/m ²]	内部摩擦角 φ_{sky} [deg.]	せん断剛性 K_{ssky} [kN/m ³]
1,660	42.5	3,320×10 ³

ただし、建築限界の制限から、既設覆工をウォータージェットにより切削した範囲については、ウォータージェットのせん断特性を用いる。

図 3.5.2 に示す実大せん断実験の結果から、ウォータージェット切削面のせん断特性は表 3.5.3 に示す値とする。

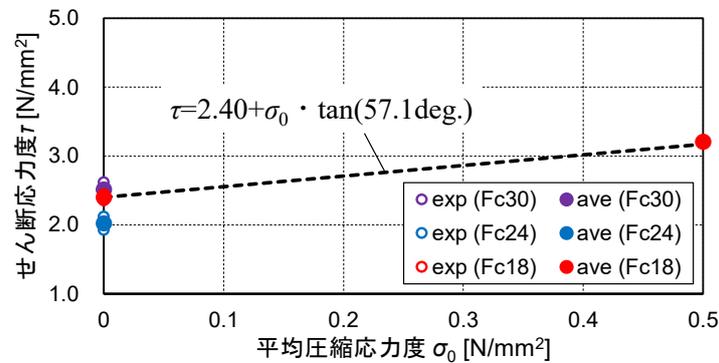


図 3.5.2 ウォータージェット切削面の実大せん断実験結果

表 3.5.3 ウォータージェット切削面のせん断特性

粘着力 c_{wj} [kN/m ²]	内部摩擦角 ϕ_{wj} [deg.]	せん断剛性 K_{swj} [kN/m ³]
2,400	57.1	$3,300 \times 10^3$

(4) 設計荷重の検討

坑口付近における覆工設計等では、トンネルの土被りやゆるみ荷重を設計荷重として採用されることが多い。しかしながら、内巻補強工における既設覆工との接合面を照査する際の設計荷重の設定方法は確立されていない。そのため、本設計では前節で設定した内巻補強工を施した合成断面で、天端部における既設覆工の圧縮縁が設計圧縮強度に達するまで鉛直方向に等分布荷重を与え、その荷重を設計荷重とする。

(5) 接合部の応力照査

解析モデルに設計荷重を与え、ジョイント要素に生じる応力度を照査する。垂直応力度についてはアンカーボルトの引張強度を超えないこと、せん断応力度についてはシヤキーおよびウォータージェット切削面のせん断強度を超えないことを確認する。

ここで、接合面の応力照査が NG となった場合には、「(3) 接合部の設計」に戻り、あと施工アンカーやシヤキーの数量を増やす。その手順の例としては、ジョイント要素の特性を大きな剛性を持たせた弾性モデルに置き換えた解析を行う。その解析結果から、接合面に生じる最大引張応力度および最大せん断応力度を抽出し、その数値を目安に接合部を再設計する。

第4章 施工方法および品質管理

4.1 事前補修

補強対象区間の既存覆工において経年劣化による変状が確認される場合、本工法による補強効果を確保するために必要な事前補修について検討、実施する。

〔解説〕

本指針で示す補強設計では、既存覆工と内巻補強部材を一体として、所定の構造性能を目指す。一方で、矢板工法のトンネルは建設から長期間が経過しており、背面空洞の崩落、ひび割れ、剥離、漏水等の劣化が進行している場合が多い。定期点検の結果を踏まえ、補強前に点検調査を行う。その結果に準拠し、各種変状に対して適正な補修方法を選定し、実施する必要がある。

表4.1.1に道路維持管理便覧から引用した目的別の汎用的な補修・補強方法を示す。ただし、内巻補強工を実施する上で、その設置を阻害する補修・補強方法は選定できない。内巻補強工は、耐荷力の向上を目的としていることから、耐荷力の向上を目的とした対策工は行う必要はない。既存覆工に生じているひび割れ、剥離、漏水等で、コンクリート部材としての機能が低下している場合には、表4.1.1の赤枠で示すような、ひび割れ注入、断面修復、漏水対策を中心とした対策を検討する。なお、軽微な剥離については、そのまま叩き落とし、その後の吹付工で欠損の修復に対応できるが、打ち継ぎ部に生じる半月形の深部に至るような大きな欠損については、内巻補強工の実施前に断面修復する。また、既に他の補強工が適用されている場合は取り外すことを基本とし、その影響について十分に検討を行う。

既存覆工に漏水が生じている場合、既に漏水樋や面導水等の設置が行われていることが多い。補強前に面導水や漏水樋を取り外し、湧水量に応じて一体性を阻害しない新たな湧水対策を行う必要がある。覆工の鉛直打ち継ぎ目は湧水が多く、これを吹付けで覆うことは困難であることから、施工中は導水パイプで排水しながら、写真4.1.1に示すように改めて導水樋を補強後に設置する場合もある。

表 4.1.1 補修・補強対策工の分類³⁾

外力	対策の区分 ^{注1)}		対策の分類	対策工の種類	
	はく落防止	漏水			
	○		はく離部の事前除去対策	はつり落とし工	
	○		はく落除去後の処理対策	断面修復工（鉄筋防錆対策含む）	
	○		覆工の一体性の回復対策	ひび割れ注入工	
	○		支保材による保持対策	金網・ネット工	金網工、ネット工
				当て板工	パネル系当て板工、繊維シート系当て板工 他
	○	△	覆工内面の補強対策	補強セントル工	鋼アーチ支保工
				内面補強工	繊維シート補強工、鋼板接着工他
			内巻補強工	プレキャスト工法、鋼材補強工他	
		○	漏水対策	線状の漏水対策工 導水樋工、溝切り工、 止水注入工（ひび割れ注入）	
				面状の漏水対策工 防水パネル工、防水シート工、防水塗布工	
○ ^{注2)}				地下水位低下工 水抜き工（水抜きボーリング、水抜き孔） 他	
△ ^{注3)}		○ ^{注4)}	凍結対策	断熱工	断熱材を適用した線状・面状の漏水対策工 他
○			覆工背面の空洞充填対策	裏込注入工	
○	△		地山への支持対策	ロックボルト工	ロックボルト工、アンカー工
○			地山改良対策	地山注入工	薬液注入工
○	△	△	覆工改築対策	覆工改築工	部分改築工、全面改築工
				インバート工	インバート新設または改築

凡例○：対策の主目的として効果を期待するもの、△：対策を行うことで同時に効果が期待できるもの
 注1) トンネル坑内より施工する工法の分類であり、坑外より実施する外力対策（アンカー工、抑止杭等）は除外している
 注2) 水圧が外力として作用する場合 注3) 凍上圧が作用する場合 注4) 凍結防止



写真 4.1.1 打ち継ぎ部における導水樋の施工事例（福岡北九州道路公社 奥田トンネルの設置状況）

4.2 モルタル吹付け（TDR ショットライニングシステム）

本指針におけるモルタル吹付けは、高品質の無機系モルタルによる TDR ショットライニングシステムの適用を基本とする。

〔解説〕

TDR ショットライニングシステムは、劣化したコンクリートを断面修復する高性能モルタルの湿式吹付け工法（TDR ショット工法）をベースにした技術で、図 4.2.1 に示すように高品質の無機系モルタルを連続練りミキサーおよび吹付け機で吹付けることで、大容量（最大 3m³/hr）で施工できることを特徴としている。本システムは、シールドトンネルの鋼製セグメント区間のリブ内や分岐合流部の鋼製支保工内の狭空間に吹付け充填し、さらに表層部にナイロンファイバーを混入させることで、ひび割れに対する抵抗性を有する高耐久な覆工を形成することができる。シールドトンネルを中心に、既に 50 現場、20,000m²の実績を有している。以下に本施工システムの特徴を示す。

1) 特徴

- ① 充填が困難な鋼製セグメントのリブ裏の充填を可能にすると共に、作業員が充填状況を確認しながら施工できる。
- ② 急曲線部の鋼製セグメント区間や、分岐合流部や断面変化部等の特殊な形状に対しても臨機応変に対応できる。
- ③ 硬化促進剤の効果により、上向き吹付けでも安定した施工が可能である。さらに硬化促進剤の添加量を調整することで、表面の仕上げ性能を確保できる。
- ④ 連続練りミキサを用いることで大容量の吹付け施工が可能である。また、施工設備が簡便で他工種との並行作業が可能である。
- ⑤ 表面の仕上げ層のモルタルに予めナイロンファイバーを添加することで、高い剥離・剥落抵抗性、ひび割れ抵抗性を確保できる。

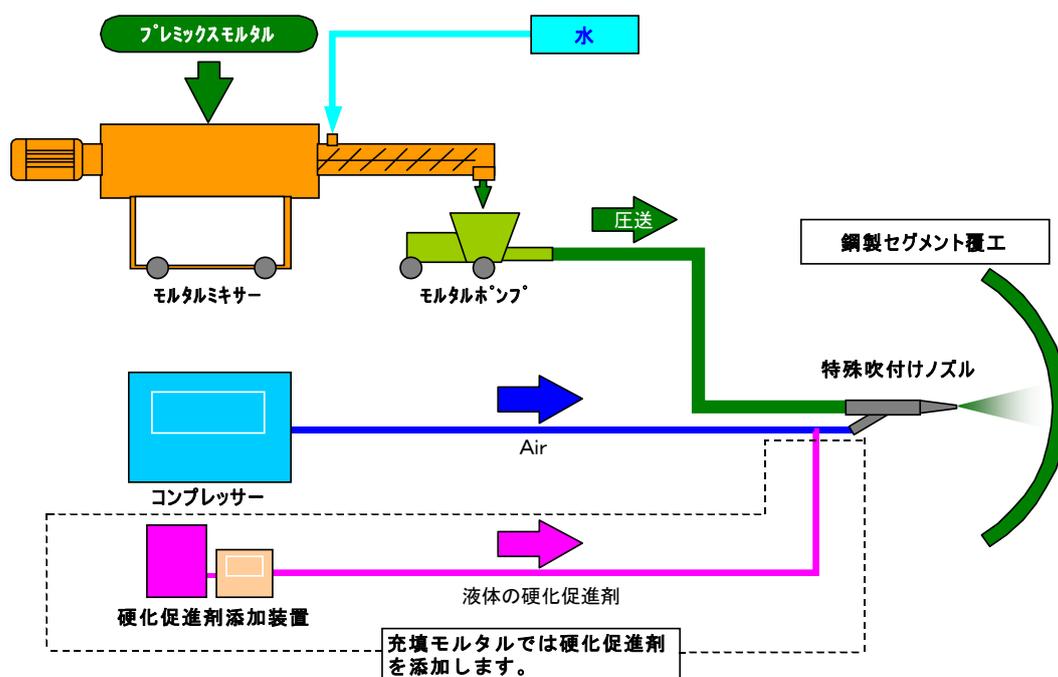


図 4.2.1 施工システム

2) 補強配筋計画

奥田トンネルでの配筋事例を図 4.2.2, 鉄筋の固定治具を図 4.2.3 に示す。

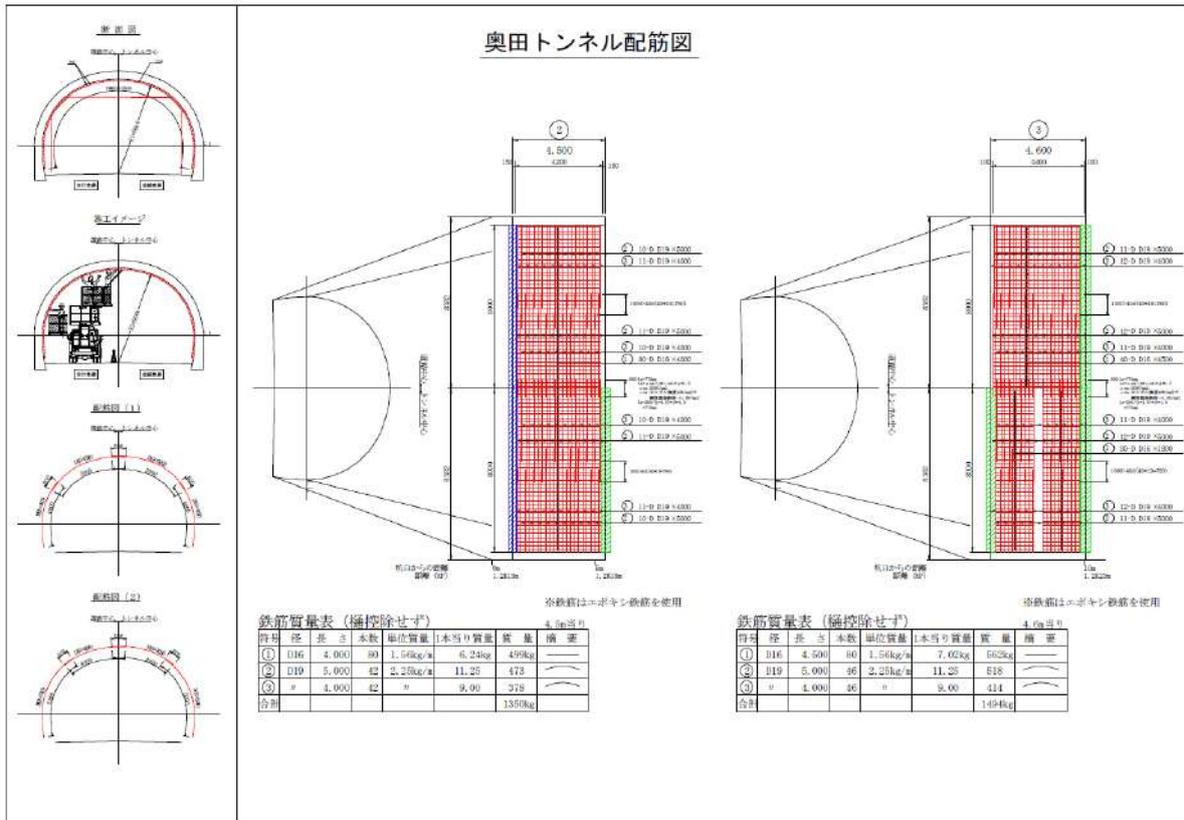


図 4.2.2 補強部材の配筋事例 (奥田トンネル)

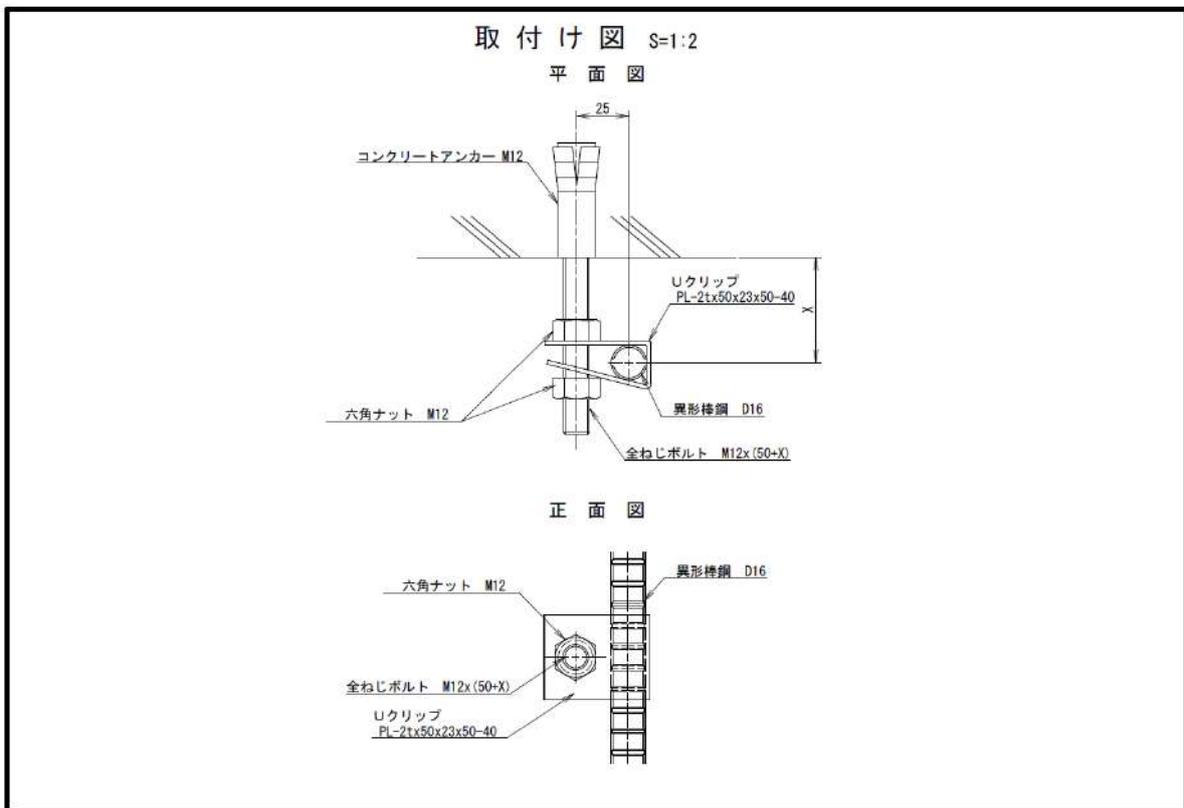


図 4.2.3 補強鉄筋の固定治具 (奥田トンネル)

3) 使用材料の種類および使用量

表 4.2.1 使用材料一覧表

種類	一般名	商品名	製造・販売元	荷姿
プライマー	アクリル樹脂系 吸水防止下地処理材	マスターシール 520	BASF ジャパン (株)	18 (kg/缶)
吹付けモルタル	プレミクスモルタル	TDR モルタル	デンカ (株)	25 (kg/袋)
	硬化促進剤	TDR-ACC	デンカ (株)	20 (kg/缶)
吸湿防止剤	EVA 系エマルジョン	RIS211E	デンカ (株)	18 (kg/缶)
養生剤	表面養生材	フルコート	デンカ (株)	18 (kg/缶)
仕上層 (20mm) 補強用短繊維	ナイロン繊維 10mm	タフバインダー	東レ・アムテックス (株)	50 (g/袋)

表 4.2.2 TDR モルタル配合表

	TDR モルタル	硬化促進剤	水道水	ミニスランブ 自主管理値
1m ³ 当り	1,900 kg	38 kg ^{**}	266 kg	95±25 mm

※硬化促進剤の使用量は、1層目の標準使用量のプレミクス材×2%=38kg/m³を計上する。
但し、2層目（仕上げ薄層部）では、使用量が1%以下となり、総使用量はこれに配慮する。

表 4.2.3 プライマー・養生剤の使用量

項目		希釈倍率	塗布量
プライマー	マスターシール 520	原液使用	100 (g/m ²) が目安量
吸湿防止剤	RIS211E	1:2 希釈	150 (g/m ²) が目安量
養生剤	RIS フルコート	原液使用	コンクリート躯体が湿る程度 1層 75g/m ² を目安、2層塗り

4) 主な使用機械

表 4.2.4 使用機材一覧表

名称	仕様	単位	数量	摘要
モルタルミキサ	連続練りミキサ (HM24)	台	1	充填吹付け時 標準吐出量 1.0m ³ /hr
モルタルポンプ	N2 型	台	2	充填吹付け、 仕上げ吹付けとも
ダマカットミキサ	100~150ℓ	台	1	仕上げ吹付け時 標準吐出量 0.6m ³ /hr
同上共通ベース	吹付け作業用台車	台	1	
硬化促進剤添加装置	プランジャー式液体ポンプ、電源 200V-1.5KW	台	1	
ノズルセット	ゴム製ノズル、口径 16mm	セット	2	
モルタル耐圧ホース	2MPa 耐圧ゴムホース、ホース内径 40mm	本	2	20m
エア耐圧ホース	エアーホース	本	2	20m
電動コンプレッサ	空気消費量 2~5m ³ /min, 37KW	台	1	吹付け時エア使用量、 0.8~1.2m ³ /min
電源 (100KVA)	発動発電機	台	1	現場条件による
水中ポンプ		台	1	



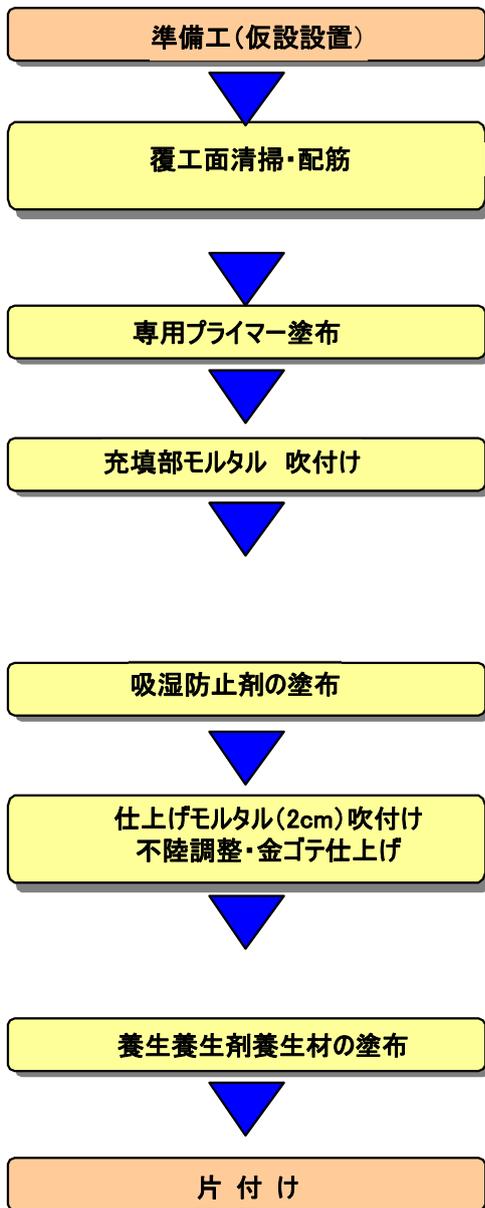
(a) 充填用連続練りミキサ (HM24)



(b) 仕上げ用ダマカットミキサ

写真 4.2.1 吹付け装置

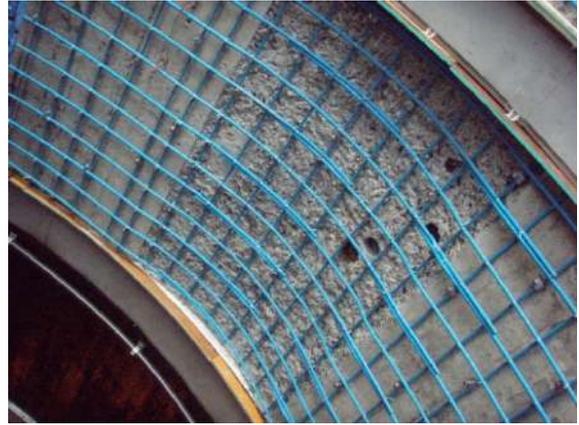
5) 施工手順



- ①資機材の搬入，機材の据え付けを行う．電力設備，給水・排水設備，足場を準備する．使用材料は，日々使用量を施工前に搬入する．
- ②覆工面をバキュームサンダーで研磨，その後ハイウォッシャーで洗浄し，覆工面に 4 本/m² のアンカーを配置，D16@200 で樹脂塗装鉄筋を配筋する．
- ③プライマー（マスターシール 520）を噴霧器で塗布する．なお，このプライマーは，事前の検討で安定した付着性が得られることを確認している．
- ④施工開始段階に材料の切出し量，給水量のキャリブレーションを行い，練上がったモルタルのスランプを確認する．さらにミキサの練上がり量とポンプの吐出量を調整する．
- ⑤作業員は，吹付け状況を自ら確認しながら施工する．また，モルタルのダレが生じないよう硬化促進剤の適正添加量を設定する．
- ⑥一日の施工範囲を設定し，下側から天端に掛けて，順次施工する．
- ⑦EVA 系の吸湿防止剤（充填モルタルによる吸湿防止）を噴霧器で塗布する．
- ⑧充填モルタル同様，施工開始段階にキャリブレーションを行う．
- ⑨検測ピンを目安に仕上がり高さを管理する．一日の施工範囲を設定し，吹付け面にリバウンドが溜まらないように，下側から天端に掛けて，順次施工する．
- ⑩金ゴテ仕上げの際に「仕上げ材／コテ滑り改善」等を塗布し，仕上がり面を平滑にする．
- ⑪施工後，翌日に養生材をローラで塗布する．
- ⑫ロス材は，日々回収搬出する．資機材・足場を撤去する．



(a) 鉄筋補強と打ち継ぎ部の導水樋の配置



(b) 肩部のはつりと鉄筋の曲げ加工



(c) モルタル吹付状況



(d) 車線規制下での施工状況



(e) 表層の左官仕上状況

写真 4.2.2 TDR ショットライニングシステムによる覆工補強（施工状況）

4.3 シヤキー

シヤキーの施工は、所定の品質が確保できるように、直径と高さによる形状の管理および配置計画を行い、事前に施工管理体制や施工手順を決定する。

- 1) 形状は直径 $R=52\text{mm}$ 程度、深さ $t=11\text{mm}$ 以上とする。
- 2) ピッチは、中心間距離で直径 R に対し、 $2R$ 以上 $6R$ 以下とする。
- 3) 施工手順や出来形検査方法については、試験施工の結果により定める。

[解説]

シヤキーの施工は、省力化を目指して機械化を進めている。そのため、本節ではシヤキーの構造性能を確保するための形状や配置等について記載し、施工手順や出来形検査方法については、注意点を記載する。

- 1) シヤキーの形状は直径 $R=52\text{mm}$ 程度、深さ $t=11\text{mm}$ 以上とする。シヤキーの形状は、破壊形式を吹付けモルタルのせん断強度で決定させるために、幅高比 $R/t=5$ 以下とする。図 4.3.1 にシヤキーの形状を示す。シヤキーの形状を異なるものとする場合は、構造性能が異なる可能性があるため、実験等により構造性能の確認を行う。

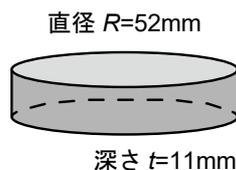


図 4.3.1 シヤキーの形状

- 2) シヤキーの配置例を図 4.3.2 に示す。シヤキーのピッチは中心間距離 $2R$ 以上 $6R$ 以下とする。また、本規定のピッチは、シヤキーの中心間距離としているため、シヤキーを一直線上に配置する必要はない。しかしながら、極力均等にせん断力を負担させることが望ましいため、偏った配置は避ける。

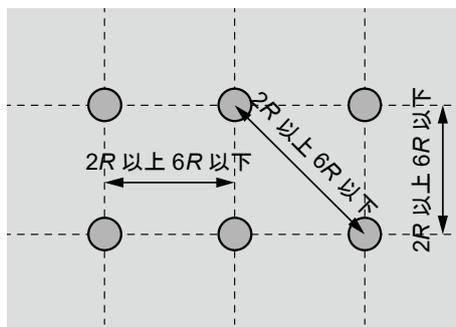


図 4.3.2 シヤキーの配置例

- 3) 前述の通り、機械化施工の開発を進めているため、ここでは施工時の注意点および出来形検査方法の例を示す。

湿式コアドリルを用いて施工した場合は、穿孔部にノロが残留することがあるため、穿孔後は水洗いを行い、ノロを除去する。また、ビットの摩耗により深さが浅くなっていく場合は、所定の

施工数量毎に高さを確認し，11mm 以上穿孔できていることを確認していく．

出来形検査方法は，直径と高さを計測して，規定範囲内であることを確認する．出来形検査方法の例を以下に示す．

- ・ 高さの管理は図 4.3.3 に示すように，シヤキー1 個あたり 2 箇所を測定する．また，測定する 2 箇所の中心角は 180 度（反対側）とする．
- ・ 直径の管理は，施工試験の結果により設定する．
- ・ 検査数量は，試験施工の結果により設定する．
- ・ シヤキーの穿孔部に凹凸がある場合は，図 4.3.4 に示すように，シヤキーの縁部分からの深さが所定の深さであることを確認する．

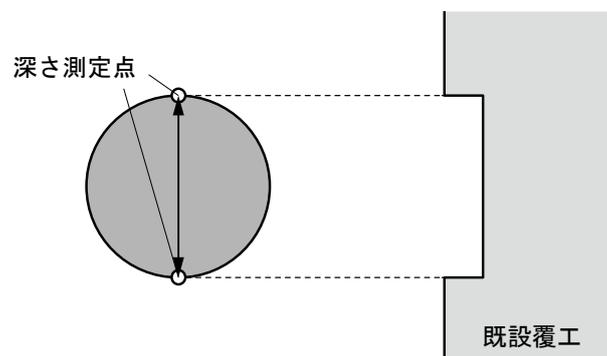


図 4.3.3 シヤキーの高さの管理位置の例

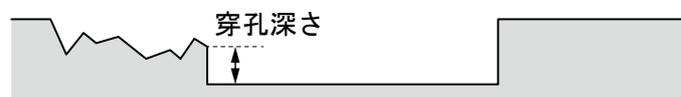


図 4.3.4 既存覆工に凹凸がある場合の高さ測定

4.4 ウォータージェット

補強部材が建築限界を侵す場合には、予め該当する範囲をウォータージェット（WJ）で切削することを検討する。切削範囲の検討にあたっては、切削後の覆工厚さが設計巻厚以上あることを確認した上で、切削量が最小となるように計画する。

〔解説〕

一般的に山岳トンネルは、肩部の建築限界を考慮した上で断面形状と大きさが決定される。ただし、矢板トンネルにおいては、建築限界に余裕のない構造となっている場合がある。そのため、本工法におけるモルタル吹付けの補強断面においても 70~80mm 程度は内側に厚くなることから、建築限界を侵す可能性がある。一方で、矢板工法の施工の特徴上、肩部については設計巻厚以上の覆工厚さであることが多い。これらのことから、本工法において、対策後に建築限界を侵す場合には、建築限界に余裕のない覆工の肩部を中心に WJ で切削を行い、建築限界を確保した上で切削量が最小となる形状について検討する。ここで、既存のトンネルを切削することから、覆工に作用する応力変化が少なくなるように配慮することが必要であり、三日月形など滑らかな形状を計画する。なお、切削方法としては多くの工法があるが、本指針では、既存覆工の損傷を抑制するため、WJ での切削を原則としている。

1) 工法概要

ウォータージェット工法の概要を図4.4.1に示す。ウォータージェット工法は、ノズルから噴射された超高圧水の力によりコンクリートの結合を破壊するため、対象物に与えるひずみが少なく、マイクロクラックが殆ど発生しない。また、振動を低く抑えられるので残存構造物への影響を低減できる。



図 4.4.1 ウォータージェット工法概要図

2) 施工方法

施工フローを図 4.4.2, ウォータージェット工法の概要図を図 4.4.3 に示す。

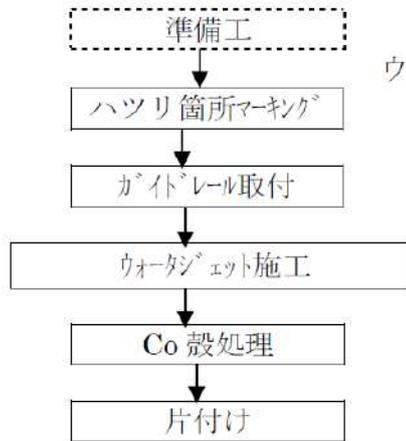


図 4.4.2 施工フロー

ウォータージェットロボット工法



図 4.4.3 ウォータージェット工法概要図

ウォータージェットロボットは、図 4.4.4 に示すようにウォータージェットポンプ、コントロールボックス・油圧制御装置およびノズルで構成される。WJ ロボットが施工面に取り付けたガイドレール上を移動しながら作業を行うことで、移動速度・直進性・噴射角度等を正確に制御でき、安定した施工品質を確保できる。

ウォータージェットによる切削は、周辺に研りガラが飛散することと、切削時の騒音が問題となるケースがある。その際には、施工箇所周辺を防音シートで養生する対策が挙げられる。

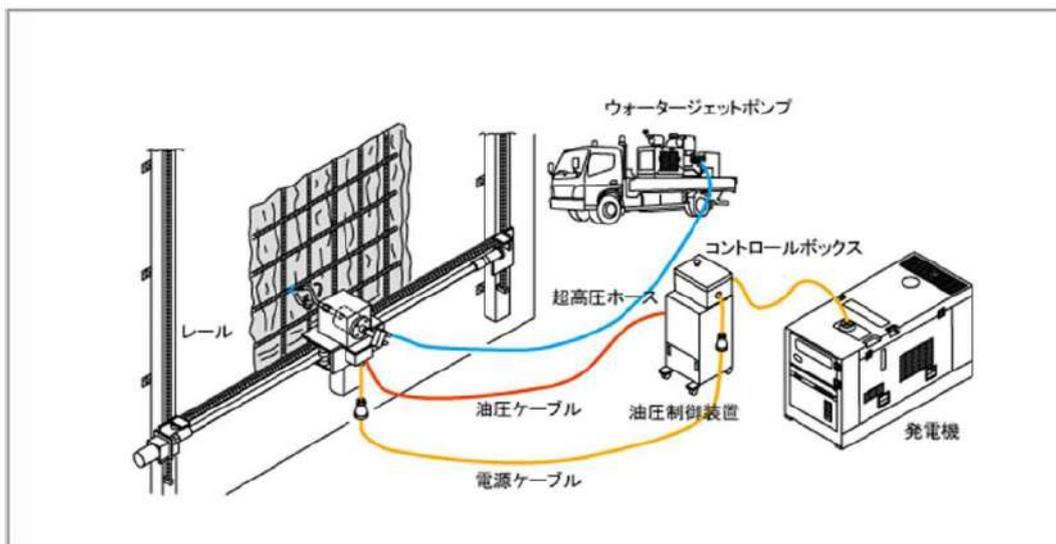


図 4.4.4 ウォータージェットロボットシステム

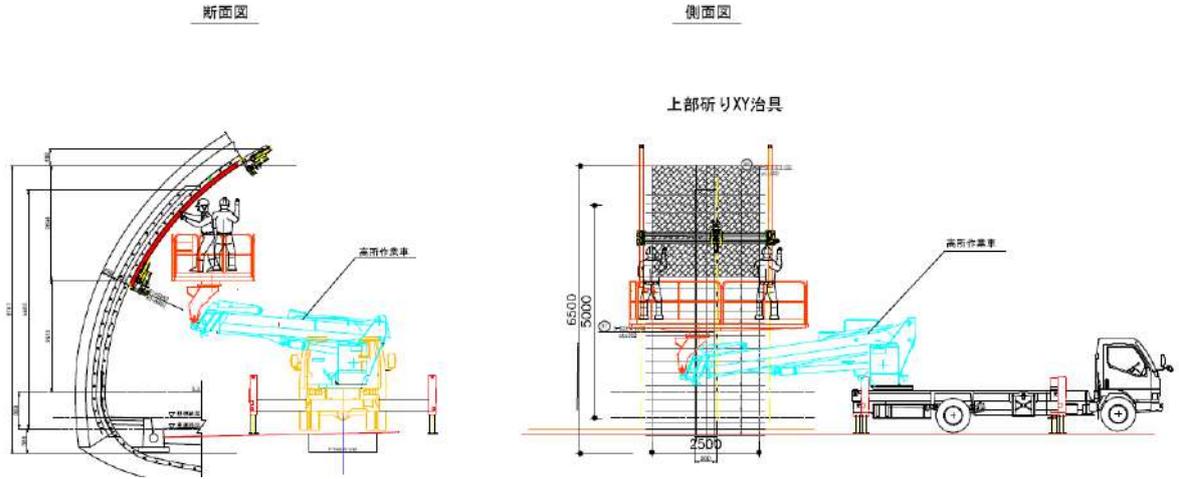


図 4.4.5 施工次第図

3) 機械・人員配置

作業場所における機械類と人員の配置計画を表4.4.1に示す.

表4.4.1 機械・人員配置表

項目	名称	数量
機械・設備	超高圧水発生装置（トラック車載）	1台
	バキューム車（大型車，ガラ運搬）	1台
	鋼製タンク（清水用）	1基
	水中ポンプ（清水給水用）	1台
	ベッセル（1.5m ³ クラス）	1台
	水中ポンプ（排水用）	1台
	給水車（運転手付）	2台
	高所作業車（機械設置，準備用）	2台
人員	現場管理者	1名
	超高圧水発生装置運転手	2名
	XY研り装置オペレーター	1名
	作業員	2名

また，機械配置図を図4.4.6に示す.

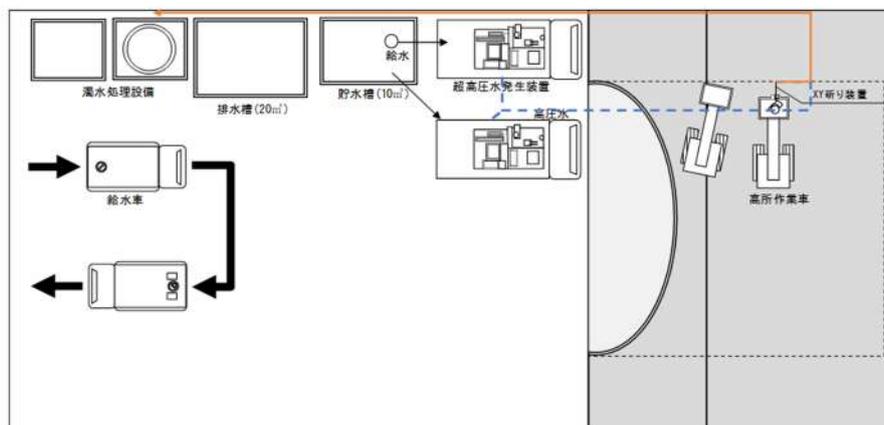


図4.4.6 機械配置図

4) 主要機械の諸元

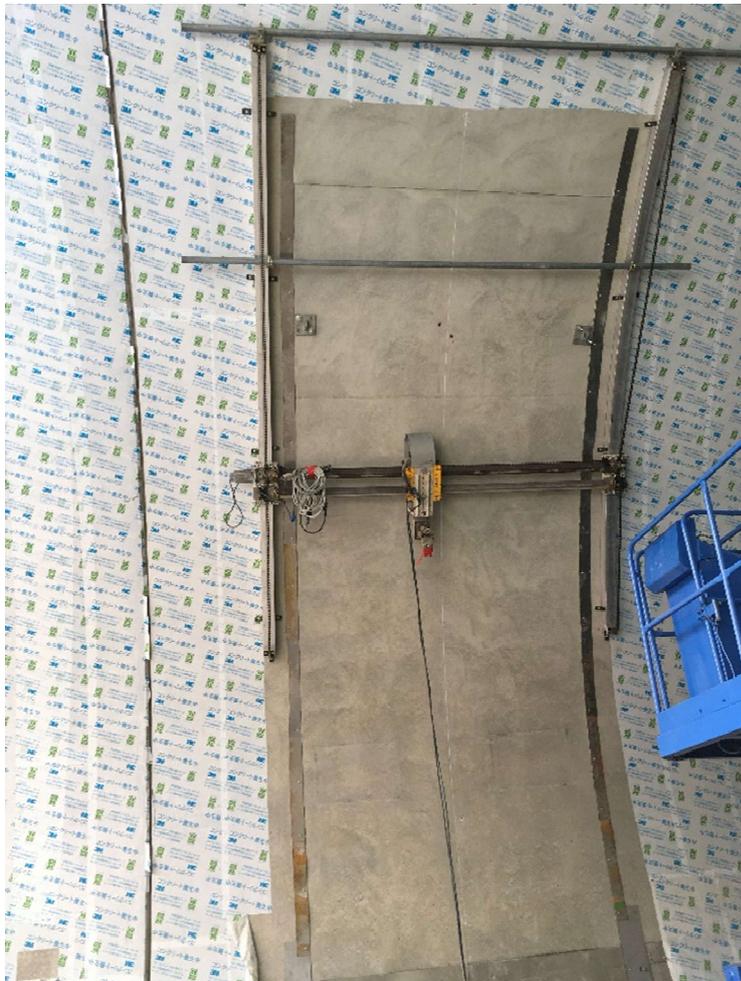
本工事で使用する各種機械、設備を以下に示す。

表4.4.2 ウォータージェットシステムの諸元

機械名	能力・仕様	備考
超高圧水発生装置	240MPa, 35~46ℓ/分	
XY研り装置	機械式	
ノズル	油圧回転式	
高所作業車	スーパーデッキ	

表4.4.3 給排水設備の諸元

機械名	能力・仕様	備考
鋼製タンク	10口	受水タンク
	20m ³	排水タンク
給水車	4t	清水運搬
水中ポンプ	100V, 50φ	清水送水



(a) XY 研り装置の設置状況



(b) 切削状況



(c) 車切削時の養生



(d) 高圧ポンプ

写真 4.4.1 ウォータージェットによる覆工切削

4.5 あと施工アンカー

本指針に定めるあと施工アンカーは、以下を基本とする。

- 1) あと施工アンカーの種類は、原則として、金属系アンカーを用い、土木学会や日本建設あと施工アンカー協会が刊行する指針に準じて施工する。ただし、第三者機関により技術性能評価を取得しているあと施工アンカーは、これに従うものとする。
- 2) あと施工アンカーの平米当たりの配置本数は、表 4.5.1 に示す通りとし、U 形クリップ等により機械的に配力筋に固定する。

表 4.5.1 平米当たりに配置するあと施工アンカーの本数

あと施工アンカー種類	アンカーボルト鋼種・呼び径	平米当たり配置本数
金属系アンカー	SNR490B・M16	4 本以上

〔解説〕

- 1) あと施工アンカーの種類は、原則として、金属系アンカーを用い、下記に示す土木学会や日本建設あと施工アンカー協会が刊行する指針に準じるものとする。

- ・ 土木学会：コンクリートライブラリー160 号 コンクリートのあと施工アンカー工法の設計・施工・維持管理指針（案），2022.1
- ・ 日本建設あと施工アンカー協会：あと施工アンカー施工指針（案）金属系（第3版）2016.6

現在、日本建設あと施工アンカー協会では製品認証制度を適用し、あと施工アンカーの所定の品質性能が確保されていることを認定している。また、その他の第三者機関においても同様に、技術性能評価を行っている。製品認証や技術性能評価を受けたあと施工アンカーは、認証や評価を取得した施工方法に従い、施工するものとする。

- 2) あと施工アンカーは、新設側の補強厚さの制約から、十分に定着長さを確保することが難しい場合がある。そのため、本指針ではアンカーボルトと配力筋を機械的にU形クリップとナットで固定する方法を定めた。平米当たりの最小配置本数は4本とし、図 2.1.3 に示すように新設側の配力筋にU形クリップとナットを用いて固定する。この方法の場合、使用するあと施工アンカーの種類は金属系アンカーとし、アンカーボルトの径はM16、鋼種はSNR490Bとする。

[参考文献]

- 1) 土木学会：トンネルの地震被害と耐震設計—山岳トンネル・シールド・開削トンネル—トンネルライブラリー33号，2023
- 2) 土木研究所：山岳トンネル地震時挙動と耐震対策に関する研究報告書，土木研究所資料第No.4358，2017
- 3) 日本道路協会：道路トンネル維持管理便覧【本体工編】，2020.8
- 4) 飛島建設株式会社：吹付けモルタルの性能評価試験 試験結果報告書，（社）建設機械化協会施工技術総合研究所，2004.8
- 5) 石田雄太郎，川端康夫，真下英人，進士正人，安井成豊，井野裕輝，細井秀憲，小原勝巳，阿部隆英，林久資，中村明彦，鯨井巧：巻厚不足の矢板工法トンネルにおける補強設計の提案，トンネル工学報告集，Vol.33，I-24，2023.11

平成15年度

吹付けモルタルの性能評価試験

試験結果 報告書

平成16年12月

飛島建設株式会社

社団法人 日本建設機械化協会

施工技術総合研究所



まえがき

この報告書は、飛島建設株式会社の委託により、社団法人 日本建設機械化協会 施工技術総合研究所が実施した「吹付けモルタルの性能評価試験」の成果をとりまとめたものである。

本試験は、コンクリート構造物の補修に使用する断面修復材の性能を確認する目的で、依頼された吹付け材料について各種の性能評価試験を行ったものである。

JHの構造物施工管理要領では、断面修復材に求められる要求性能として、既存のコンクリート面や表面被覆材との優れた密着性があり、硬化後に十分な密実性を有し、硬化時の収縮量が少なく、自重や振動によりはく落しない性能が挙げられている。

しかし、近年の補修・補強工法の多様化などに伴って、劣化・損傷程度に応じた補修・補強材の選定が要求されており、施工管理要領等の技術資料について見直しの時期にきていると考えられる。

このような背景のもとに、現在、JHでは検討会を設け、吹付け工法による断面修復材の性能評価試験方法を検討しているところである。今回の試験は、依頼のあったTDRショット工法による湿式吹付けモルタルの材料について、検討中の性能評価試験方法に基づいて各種試験を行ったものである。なお、本業務における試験項目および試験方法については、平成15年10月段階での検討の成果を参考に定めた。

本報告ではこれらの一連の試験を行った結果を報告する。

平成16年12月

(社) 日本建設機械化協会
施工技術総合研究所

目次

まえがき

1. 概 要	1
1. 1 試験目的	1
1. 2 試験材料	1
1. 3 試験内容	1
1. 4 試験期間	2
2. 試験方法	3
2. 1 試験条件および試験体	3
2. 2 吹付け方法	11
3. 試験結果	13
4. まとめ	20

1. 概 要

1. 1 試験目的

本試験は、コンクリート構造物の補修に使用する断面修復材の性能を確認する目的で、次節に示す吹付け材料について各種の性能評価試験を行ったものである。

1. 2 試験材料

試験依頼された材料は以下のとおりである。

- ① TDRショット工法による湿式吹付けモルタル
(ビニロンファイバー、硬化促進剤入り)
- ② TDRショット工法による湿式吹付けモルタル
(スチールファイバー、硬化促進剤入り)

1. 3 試験内容

本試験の内容は以下のとおりである。

- ① 圧縮強度試験 (ビニロンとスチールファイバー)
- ② 静弾性係数試験 (ビニロンとスチールファイバー)
- ③ 曲げ強度試験 (ビニロンとスチールファイバー)
- ④ 鉄筋背面への充填性試験 (その1) (ビニロンファイバーのみ)
- ⑤ 振動負荷試験 (ビニロンファイバーのみ)
- ⑥ 引張接着性試験 (振動負荷後) (ビニロンファイバーのみ)
- ⑦ 鉄筋背面への充填性試験 (その2) (ビニロンファイバーのみ)
- ⑧ 熱膨張係数試験 (ビニロンファイバーのみ)
- ⑨ 促進中性化試験 (ビニロンファイバーのみ)
- ⑩ 凍結融解試験 (ビニロンファイバーのみ)
- ⑪ 吸水性試験 (ビニロンとスチールファイバー)
- ⑫ 透水試験 (ビニロンとスチールファイバー)
- ⑬ 硬化収縮性試験 (ビニロンファイバーのみ)
- ⑭ 塩化物イオン浸透深さ試験 (ビニロンファイバーのみ)
- ⑮ 付着試験 (湿潤) (ビニロンファイバーのみ)
- ⑯ 付着試験 (耐アルカリ性試験後) (ビニロンファイバーのみ)
- ⑰ 付着試験 (温冷繰返し試験後) (ビニロンファイバーのみ)

これらの試験のうち、① 圧縮強度試験、② 静弾性係数試験、③ 曲げ強度試験、⑪ 吸水性試験、⑫ 透水試験は、ビニロンファイバーとスチールファイバーの両方の材料の試験を行い、残りの試験は、ビニロンファイバーのみの試験を行った。

1. 4 試験期間

期間： 平成15年10月2日～平成16年12月27日

(4) 熱膨張係数試験

硬化した断面修復材の有害なひび割れ・はく離を起こさない性能を評価するため、断面修復材の熱膨張係数を把握する試験を行った。断面修復材の温度は熱電対で、ひずみはモールドゲージで測定した。熱電対とモールドゲージは鋼製型枠（ $\phi 150 \times 300\text{mm}$ ）の中心に設置し、吹付けを行った際に中心からずれないように針金等で鋼製型枠に固定した。また、鋼製型枠とコンクリートの接する全面（側面、端面）にテフロンシート（厚さ 2mm）を 2 重に敷き、型枠とコンクリートの摩擦低減を図った。写真 2.1.1 に熱膨張係数試験体の吹付け後の状況を示す。

試験体は水平面から 70° に傾けて横向き吹付けで作製した。吹付け後は恒温恒湿養生とし、温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $60 \pm 5\%$ の室内に 28 日間静置した。試験体数は 3 体とした。

養生後、埋込みゲージをひずみ計測器に結線し、試験体を温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ に調整した試験槽の水中に 2 日間浸せきした後にひずみを測定し、この値を初期値とした。試験槽に試験体を浸せき後、水温を約 $20^\circ\text{C}/\text{h}$ の速度で昇温し、 20°C 増すごとに、その温度を保持しながら 1.5 時間放置して、各温度におけるひずみを計測した。水温 20°C 、 40°C 、 60°C 、 80°C のひずみ値を熱膨張ひずみ-水温の関係図にプロットし、最小二乗法により近似直線を求め、この勾配から熱膨張係数を求めた。



写真 2.1.1 熱膨張係数試験体の吹付け後の状況

(5) 促進中性化試験

断面修復材の中性化に対する耐久性を評価する目的で、促進中性化試験を実施した。促進中性化試験の試験体は、大型の木製型枠（ $\square 500 \times 500 \times 250\text{mm}$ ）に吹付けたものから $\square 100 \times 100 \times 400\text{mm}$ を切出して作製した。試験体は、現場養生3日～4日後に切出し、材齢28日まで水中養生し、相対湿度 $60 \pm 5\%$ 、温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ の恒温恒湿室に材齢56日まで静置した。4週間乾燥の最後の1週間間に試験体の打込み面、底面および両端面をエポキシ樹脂等でピンホールがないようにシールした。試験体数は3体とした。

中性化促進の条件は、温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $60 \pm 5\%$ 、炭酸ガス濃度 $5 \pm 0.2\%$ とした。

中性化深さの測定面は、所定の材令に達した時点で試験体の長さ方向と直角に試験体を端部から約16cmの一位置で割裂した面とした。1%フェノールフタレインエタノール溶液を試験体に噴霧した後、図2.1.4に示すコンクリート表面から赤着色部までの距離をノギスで計測した。測定材令は促進中性化試験開始後標準として、1, 4, 8, 13, 26週の材令で行った。

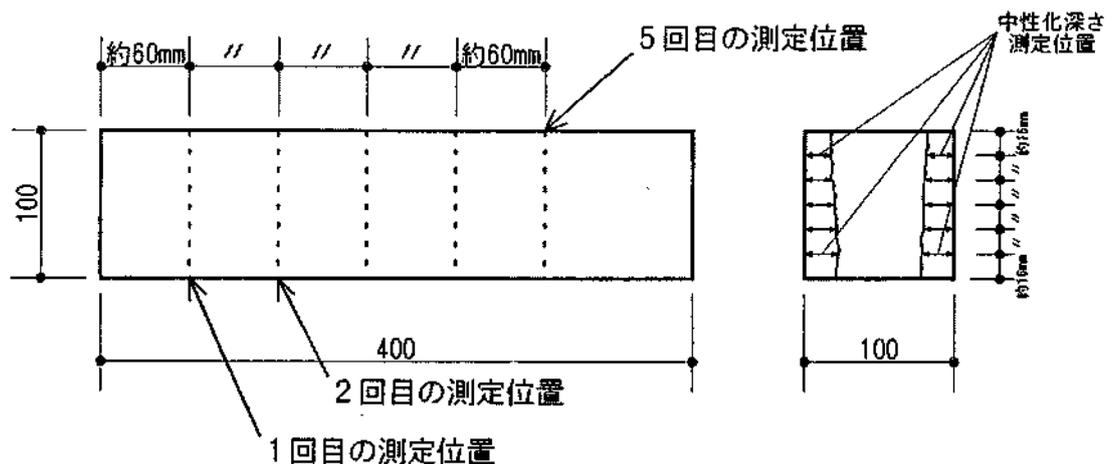


図 2.1.4 中性化深さ測定位置

(6) 凍結融解試験

断面修復材の凍結融解作用に対する耐久性を評価するため凍結融解試験を行った。凍結融解試験体は、大型の木製型枠（□500×500×250mm）に吹付けたものから□100×100×400mmに切出して作製した。試験体は、現場養生3日～4日後に切出し、材齢28日まで水中養生した。試験体数は3体とした。

試験方法は以下のとおりとした。

凍結融解試験方法はA法（水中凍結融解方法）を用い、試験温度は、凍結作用は5→-18℃、融解作用は-18℃→5℃を1サイクルとし、1サイクルは3時間以上4時間以内とした。試験サイクルは300サイクルとした。

測定は融解工程終了直後に行い、試験体を水洗い後、表面の水を拭取り、速やかにたわみ振動の一時共鳴振動数および質量を計測した。相対動弾性係数が60%以下になった場合は、そのサイクルをもって試験を終了とした。

(7) 吸水性試験

断面修復材の水密性を把握するため吸水性試験を行った。吸水性試験体は、大型の木製型枠（□500×500×250mm）に吹付けたものから□40×40×160mmに切出して作製した。試験体は、吹付けてから3～4日まで現場養生した後、切出しを行い、切出し後は材齢28日まで水中養生とした。試験体数は3体とした。

吸水性試験は、試験体を温度80±2℃で48時間乾燥し、デジケータ内で冷却してから質量を測定した。次に、試験体を温度20±2℃の静水中に浸せきし、48時間経過したのち取り出し、試験体の各面を湿布で手早くふき、直ちに質量を測定した。次の式によって吸水率を計算した。吸水率は、3個の試験体の平均値で表した。

$$W_a = \frac{W_1 - W_0}{W_0} \times 100$$

ここに、 W_a ：吸水率（%）

W_0 ：乾燥後の質量（g）

W_1 ：吸水後の質量（g）

(8) 透水試験

断面修復材の透水性を把握するため透水性試験を行った。透水試験体は、大型の木製型枠（□500×500×250mm）に吹付けたものからφ150×40mmに切出して作製した。試験体は、吹付けてから3～4日まで現場養生した後、切出しを行い、切出し後は材齢28日まで水中養生とした。試験体数は3体とした。

透水試験は、試験体を温度80±2℃で48時間乾燥し、デシケータ内で冷却してから、その両面の中央部径5cm以上を軽くブラシをかけて表皮部を除き、質量を測定した。次に、JIS A 1404の11.5によって、試験体に100kPaの水圧を1時間加えた後、質量を測定した。

試験体の質量は、0.1g まで測定した。次の式によって透水量を計算し、整数値に丸めた。透水量は、3 個の試験体の平均値で表した。

$$W_p = w_1 - w_0$$

ここに、 W_p ：透水量 (g)

w_0 ：乾燥後の質量 (g)

w_1 ：透水後の質量 (g)

(9) 硬化収縮性試験

断面修復材の硬化後の収縮性を把握するため硬化収縮性試験を行った。硬化収縮性試験体は、ゲージプラグ付き金型 (□40×40×160mm) にモルタルを下向きで吹付け施工後、コテ仕上げし、温度 $20 \pm 3^\circ\text{C}$ 、湿度 $65 \pm 5\%$ の状態で 2 日間養生後、型枠を脱型して作製した。試験体数は 3 体とした。

脱型後を基長として JIS A 1129 の 3.3 のダイヤルゲージ方法で、温度 $20 \pm 3^\circ\text{C}$ 、湿度 $65 \pm 5\%$ の状態で 28 日後の長さ変化を測定した。

ダイヤルゲージの読みから、長さ変化率 ΔL を次の式より算出した。

$$\Delta L = \frac{(x_{01} - x_{02}) - (x_{i1} - x_{i2})}{L_0} \times 100$$

ここに、 ΔL ：長さ変化率 (%)

L_0 ：基長

x_{01} 、 x_{02} ：それぞれ基準とした時点での測定値

x_{i1} 、 x_{i2} ：それぞれ時点 i における測定値

硬化収縮性について試験体 3 体の長さ変化率 ΔL の平均値が規格を満足しなければならない。なお、硬化収縮性の数値は小数点以下 2 桁に丸めた。

(10) 塩化物イオン浸透深さ試験

断面修復材の塩害に対する耐久性を評価するため塩化物イオン浸透深さ試験を行った。

塩化物イオン浸透深さ試験は、JIS A 1171 ポリマーセメントモルタルの試験方法に準拠して実施した。試験体形状は□100×100×100mm とし、試験体数は 3 体とした。塩化物イオン浸透深さ試験に用いる試験体については、養生終了 3 日前に試験体の両端部、打込み面および底面を JIS K 5664 に規定する 1 種またはこれと同程度の性能をもつエポキシ樹脂塗料で密封した。試験体を温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ で JIS A 6205 の附属書 1 (鉄筋の塩水浸せき試験方法) の 3.2.1 (塩分溶液) に規定する塩分溶液に浸せきし、28 日経過した後に取り出した。ただし、塩分溶液の量は、浸せきする試験体の体積の 3 倍以上とし、試験体相互の間隔及び試験槽の底からの距離を 3cm 以上として、試験体を完全に浸せきする。塩分溶液に浸せき後の試験体を割裂して二分割し、その断面に 0.1%フルオレセインナトリウム水溶液及び

0.1N 硝酸銀溶液を噴霧して、蛍光を発する部分を塩化物イオン浸透域とし、塩化物イオンが浸透した 1 側面 3 か所ずつ、計 6 か所で、試験体表面から蛍光を発しない所までの深さをノギスを用いて 1mm まで測定した。測定した 6 か所の平均値を 1 個の試験体の塩化物イオン浸透深さとし、整数値に丸めた。塩化物イオン浸透深さは、3 個の試験体の平均値で表した。

(1 1) 付着試験 (湿潤)、(耐アルカリ性試験後)、(温冷繰返し試験後)

JH 構造物施工管理要領の断面修復材 (モルタル工) の品質規格に基づき、断面修復材の気象の変化および水の影響等による既設コンクリートとの付着性を評価するため、湿潤時、耐アルカリ性試験後、温冷繰返し試験後の付着試験を行った。

試験方法を以下に示す。

(1) 試験体

①基板

基板は JIS R 5201 の 10.4 に規定する方法によって調整したモルタルを、内のり寸法 70×70×20mm の金属製型枠を用いて成形し温度 20±2℃、湿度 80%以上の状態で 24 時間静置した後、脱型し、その後 6 日間 20±2℃の水中で養生し、更に 7 日間以上養生室で静置した後、JIS R 6252 に規定する 150 番研磨紙を用いて成形時の下面を十分に研磨したものとした。

②試験体の作製

基板の研磨した面の中央部に、図 2.1.6 に示すように、内のり寸法 40×40×10mm の金属製又はプラスチック製型枠を置き、水湿しを行った後、モルタルを斜め下向きに吹付けて成形した。成形後、温度 20±2℃、相対湿度 90%以上で 48 時間経過した後、脱型してから、温度 20±2℃の水中で 5 日間養生し、さらに、温度 20±2℃、相対湿度 60±10%で 21 日間養生して、試験体とした。

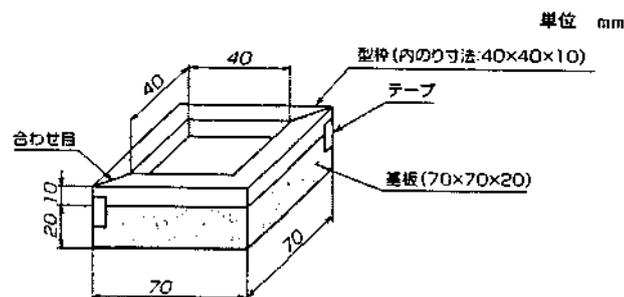


図 2.1.6 試験体作製用型枠

③湿潤時

基板を温度 20±3℃の水中に 24 時間浸漬して取り出し、布で水分を拭き取り、10 分以内に所定の材料を厚さ 10mm になるように吹付け施工したものを試験体とした。

④耐アルカリ性試験後

湿潤時試験と同様の基板に、所定の材料を厚さ 10mm になるように吹付け施工したものを試験体とした。

⑤温冷繰返し試験後

湿潤時試験と同様の基板に、所定の材料を厚さ 10mm になるように吹付け施工したものを試験体とした。

(2) 試験条件

①湿潤時

試験体を温度 $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$ 、湿度 85%以上で 28 日間養生したものを試験に供した。

②耐アルカリ性試験後

試験体を温度 $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $65 \pm 5\%$ で 28 日間養生した後、JIS A 6909 の 6.10.2 に準じて 30 日間飽和水酸化カルシウム溶液中に半漬し試験に供した。

③温冷繰返し試験後

試験の手順は、試験体を $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ の水中に 18 時間浸せきした後、直ちに $-20 \pm 3^{\circ}\text{C}$ の恒温器中で 3 時間冷却し、次いで $50 \pm 3^{\circ}\text{C}$ の別の恒温器中で 3 時間加温し、この 24 時間を 1 サイクルとする操作を 10 回繰返した後、試験室に 2 時間静置し、断面修復材のはがれ、ひび割れおよび膨れの有無を目視によって調べた。この試験で終了したものを試験に供した。

(3) 試験方法

JIS A 6909 の 6.10 に従って付着強さを測定した。付着性は、最大引張荷重(N)を上部引張用ジグの面積(mm^2)で割った値として、個々の試験体の値と、これらの平均値を表示した。

2. 2 吹付け方法

(1) 吹付け材料および吹付け方式

吹付け材料は、依頼された下記に示すビニロンファイバー、スチールファイバーの材料を用いて、吹付け方式は湿式とした。

a) モルタルの種類 : TDRショット工法による湿式吹付けモルタル
(硬化促進剤入り)

b) 繊維の有無 : ビニロンファイバー、スチールファイバー

c) 使用材料および配合表

表 2.2.1 使用材料表

No.	一般名	商品名	製造元	荷姿
1	ブレックスモルタル	TDR モルタル	電気化学工業 (株)	25Kg/袋
2	硬化促進材	TDR-ACC	電気化学工業 (株)	25Kg/缶
3	ビニロンファイバー	RF350	クラレ (株)	8Kg/袋、L=12mm
4	スチールファイバー		東洋精鋼 (株)	20kg/袋、L=10mm
5	水	水道水		

表 2.2.2 示方配合表 (ビニロンファイバー)

	W/C	TDRモルタル	ビニロンファイバー	TDR-ACC	水	フロー 自主管理値
1m ³ 当り	42.5%	1900kg	13kg (1 vol%)	38kg (TDRモルタル2%)	266kg	180~210mm
1バッチ当り	42.5%	100kg	0.68kg	2.0kg	14.0kg	

表 2.2.3 示方配合表 (スチールファイバー)

	W/C	TDRモルタル	スチールファイバー	TDR-ACC	水	フロー 自主管理値
1m ³ 当り	42.5%	1900kg	78.3kg (1 vol%)	38kg (TDRモルタル2%)	266kg	180~210mm
1バッチ当り	42.5%	100kg	4.12kg	2.0kg	14.0kg	

2) 吹付け機械

吹付け機械の仕様を表 2.2.4 に、吹付け機械の配置図を図 2.2.1 に示す。

表 2.2.4 吹付け機械の仕様

機材	仕様
ミキサー	左官ミキサ、電源 200V-1.5KW、容量 180 リットル
モルタルポンプ	スクイズ式ポンプ、電源 200V-3.7KW
急結剤添加機	プランジャー式液体ポンプ、電源 200V-0.4KW
配管	2MPa 耐圧ゴムホース、ホース長 10m、ホース内径 40mm
ノズル	ゴム製ノズル、口径 16mm
コンプレッサー	空気消費量 2~5m ³ /min、30HP 以上

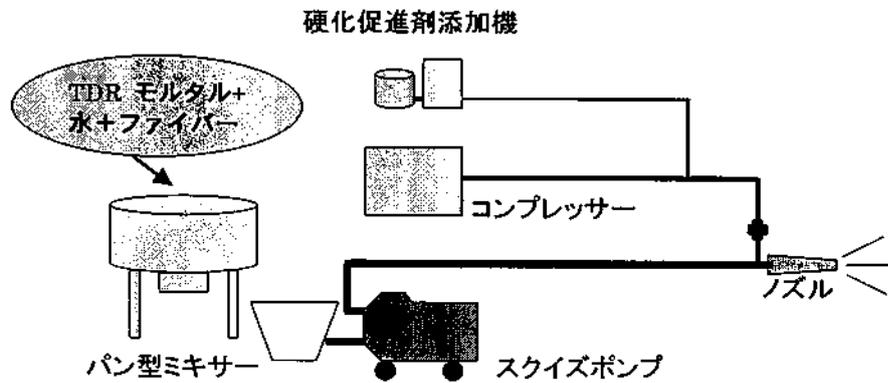


図 2.2.1 吹付け機械の配置図

(3) 吹付けノズルマン

東興建設(株)所属の吹付けノズルマンが吹付けを行った。

3. 試験結果

各種性能評価試験結果を表 3.1.1 に示す。ここでは、JHにおいて現在検討中の断面修復工法施工マニュアル(案)等に基づき、各試験結果を評価基準値と照らしあわせた結果も合わせて示す。ただし、これらの評価基準値は暫定的なものであり、一部の試験で評価基準値が明確になっておらず検討中のものもある。

以下に一連の試験方法について試験を行った結果を示す。

(1) 圧縮強度試験

ビニロンファイバー入り湿式吹付けモルタルの圧縮強度は、材齢 28 日(水中養生)で 42.3 N/mm^2 で、スチールファイバー入り湿式吹付けモルタルの圧縮強度は 28 日(水中養生)で 42.0 N/mm^2 であった。

圧縮強度は既設コンクリートの設計基準強度以上であることが求められている。ビニロンおよびスチールファイバー入りモルタルの圧縮強度は、JHにおけるコンクリートの仕様 B1-1 の設計基準強度 24 N/mm^2 以上を確保しており、良好な結果が得られた。

(2) 静弾性係数

ビニロンファイバー入り湿式吹付けモルタルの静弾性係数は、材齢 28 日(水中養生)で 19.3 kN/mm^2 で、スチールファイバー入り湿式吹付けモルタルの静弾性係数は、28 日(水中養生)で 19.9 kN/mm^2 であった。

JHにおけるコンクリートの仕様(B1-1)の設計基準強度 24 N/mm^2 に相当する静弾性係数は道路橋示方書によると 25 kN/mm^2 である。この静弾性係数の設計値と材齢 28 日(水中養生)の試験値を比較すると、ビニロン、スチールファイバーいずれの場合も、設計値の 80%程度であった。

下面増厚用の材料では、伸びのあるもので有害なひび割れ・はく離の発生を防ぎ、一体性をより確実なものとしたものもあるので、ここでは、静弾性係数は断面修復部に要求される水準以上の値があれば良いこととしている。

(3) 曲げ強度

ビニロンファイバー入り湿式吹付けモルタルの曲げ強度は、28 日(水中養生)が 7.60 N/mm^2 で、スチールファイバー入り湿式吹付けモルタルの曲げ強度は、28 日(水中養生)が 7.94 N/mm^2 であった。

(4) 振動負荷試験後の断面修復材の性状

振動数 5 Hz、たわみ全振幅 0.5mm の振動条件下で、下面吹付けを行い、母材コンクリートと吹付けモルタルの付着強度を確認した。振動継続時間は吹付けから 24 時間とした。付着強度試験方法は建研式のプルアウトあるいは直接引張による方法とした。

表3.1.1

吹付けモルタルの性能評価試験結果

No.	試験の種類	試験体形状	試験結果		備考
			ビニロンファイバー	スチールファイバー	
1	圧縮強度試験	φ100×200mm	42.3 N/mm ²	42.0 N/mm ²	材齢28日
2	静弾性係数試験	φ100×200mm	19.3 KN/mm ²	19.9 KN/mm ²	材齢28日
3	曲げ強度試験	□100×100×400mm	7.60 N/mm ²	7.94 N/mm ²	材齢28日
4	鉄筋背面への充填性試験 (その1)	□200×1200×2450mm	振動下の条件においてもモルタルと母材コンクリートとの界面にはく離なし。 鉄筋のまわりに大きな空隙がなく概ねモルタルがまわりこんでいた。		上向き吹付け
5	振動負荷試験	□200×1200×2450mm	たれ、ふくれ、はがれ、ひび割れなし		
6	引張接着性試験 (振動負荷後)	□200×1200×2450mm (φ100mm)	直接引張式 1.7 N/mm ² 建研式 1.8 N/mm ²	—	材齢28日
7	鉄筋背面への充填性試験 (その2)	500×500×100mm	試験体の鉄筋まわりに大きな空隙がなくモルタルがまわりこんでいた。		横向き吹付け
8	熱膨張係数試験	φ150×300mm	1.61×10 ⁻⁵ /℃	—	
9	促進中性化試験	□100×100×400mm	26週負荷後の中性化深さ 6.7mm	—	
10	凍結融解試験	□100×100×400mm	300サイクル負荷後の相対動弾性係数 88.7%	—	
11	吸水性試験	□40×40×160mm	5.5 %	4.3 %	48時間浸せき
12	透水試験	φ150×40mm	1.2 g	1.2 g	100kPa水圧1時間加える
13	硬化収縮性試験	□40×40×160mm	0.04%	—	
14	塩化物イオン浸透深さ試験	□100×100×100mm	3mm	—	
15	付着試験 (湿潤)	□40×40×10mm	2.1 N/mm ²	—	
16	付着試験 (耐アルカリ性試験後)	□40×40×10mm	1.6 N/mm ²	—	
17	付着試験 (温冷繰返し試験後)	□40×40×10mm	1.5 N/mm ²	—	

振動試験の結果、ビニロンファイバー入り湿式吹付けモルタルにはひび割れや振動による落下は生じなかった。また、振動下における上向き吹付けでのモルタルの付着強度は、材齢 28 日（現場養生）で確認し、平均値で見ると、直接引張式が $1.7\text{N}/\text{mm}^2$ 、建研式が $1.8\text{N}/\text{mm}^2$ であった。

上記振動条件下における吹付けにおいて、モルタルと母材コンクリートとの平均付着強度は、 $1.5\text{N}/\text{mm}^2$ 以上確保できることがわかった。

引張試験後の試験体を切断した写真を写真 3.1.1 に示す。切断面の観察から、振動下の条件においてもモルタルと母材コンクリートとの界面には、はく離はなかった。また、試験体の鉄筋まわりに大きな空隙がなく、モルタルがまわりこんでいた。これらの結果から、ビニロンファイバー入り湿式吹付けモルタルの充填性は概ね良好な結果であった。

(5) 鉄筋背面への充填性（その2）

D19 鉄筋を交差配置とし最大吹付け厚さ 100mm とした鉄筋背面への充填性試験体の切断面の写真を写真 3.1.2 に示す。今回は、試験体を壁に設置して横向きに吹付けを行ったが、ビニロンファイバー入り湿式吹付けモルタルは、試験体の鉄筋まわりに大きな空隙がなくまわりこんでおり、良好な結果であった。

(6) 熱膨張係数

ビニロンファイバー入り湿式吹付けモルタルにおける熱膨張係数は、平均で $1.61 \times 10^{-5}/\text{℃}$ であった。

JH 構造物施工管理要領の断面修復工の品質規格では、断面修復材の熱膨張係数が $2.0 \times 10^{-5}/\text{℃}$ 以下であることが求められている。ビニロンファイバー入り湿式吹付けモルタルにおける熱膨張係数は、 $2.0 \times 10^{-5}/\text{℃}$ 以下を確保しており、良好な結果が得られた。

(7) 中性化抵抗性

ビニロンファイバー入り湿式吹付けモルタルにおける中性化促進（温度 $20 \pm 2\text{℃}$ 、相対湿度 $60 \pm 5\%$ 、炭酸ガス濃度 $5 \pm 0.2\%$ ）26 週間後の中性化深さは、平均で 6.7mm であった。

ビニロンファイバー入り湿式吹付けモルタルの中性化深さ（26 週で 6.7mm）は、普通コンクリート打込み（室内実験値 $W/C=60\%$ 、26 週で 18.6mm）の場合の $1/3 \sim 1/2$ 程度であり、普通コンクリートより優れた中性化抵抗性を示しており、良好な結果が得られた。

(8) 遮塩性

ビニロンファイバー入り湿式吹付けモルタルにおける塩化物イオン浸透深さ（28 日間塩水浸せき後）は、平均値で 3mm であった。

ビニロンファイバー入り湿式吹付けモルタルの塩化物イオン浸透深さは、普通コンクリ



写真 3.1.1 鉄筋背面への充填性試験体（その1）の切断面
（振動あり：上向き吹付け）

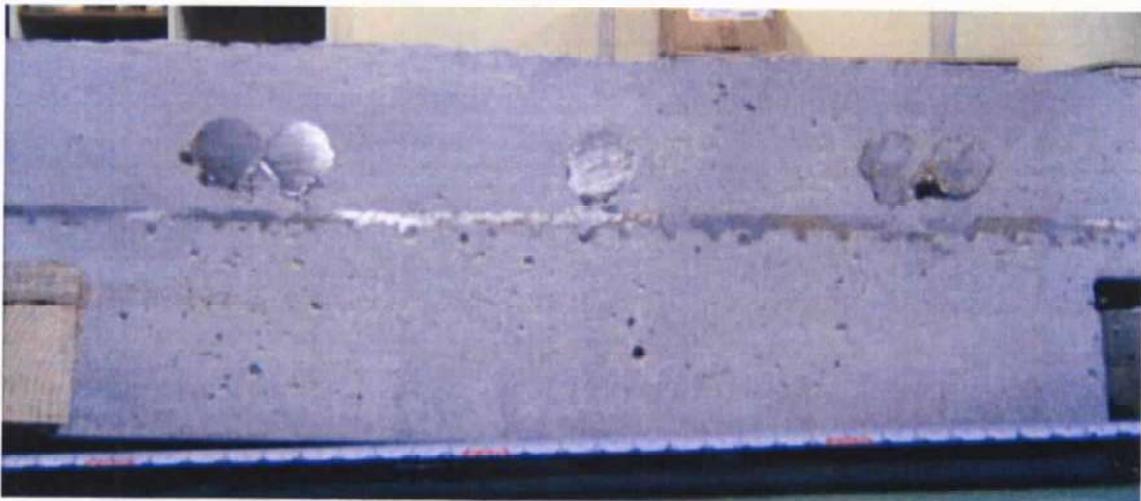


写真 3.1.2 鉄筋背面への充填性試験体 (その2) の切断面
(振動なし: 横向き吹付け)

ート打込み（呼び強度 24N/mm^2 、 $W/C=55\%$ ：浸透深さ 6mm 、呼び強度 40N/mm^2 、 $W/C=39\%$ ：浸透深さ 5mm ）の場合の $1/2$ 程度であり、普通コンクリートより優れた遮塩性を示しており、良好な結果が得られた。

(9) 凍結融解抵抗性

ビニロンファイバー入り湿式吹付けモルタルにおける 300 サイクル負荷後（凍結作用は $5 \rightarrow -18^\circ\text{C}$ 、融解作用は $-18^\circ\text{C} \rightarrow 5^\circ\text{C}$ ）の相対動弾性係数は、 88.7% （質量減少率 0.43% ）であった。

凍結融解負荷後の相対動弾性係数は 80% 以上であることが求められている。ビニロンファイバー入りモルタルの凍結融解負荷後の相対動弾性係数は 80% 以上を確保しており、良好な結果が得られた。

(10) 吸水量

ビニロンファイバー入り湿式吹付けモルタルの吸水率は、 5.5% （48 時間浸せき後の吸水量 31.5g ）で、スチールファイバー入り湿式吹付けモルタルの吸水率は、 4.3% （48 時間浸せき後の吸水量 23.7g ）であった。

ビニロンおよびスチールファイバー入りモルタルの吸水率は、一般的に用いられている断面修復用の湿式吹付けポリマーセメントモルタル（室内実験値 $W/C=40\sim 50\%$ 、吸水率 $1.7\sim 6.6\%$ ）と同程度であり、断面修復用の湿式吹付けポリマーセメントモルタルと同等の水密性を示しており、良好な結果が得られた。

(11) 透水量

ビニロンファイバー入り湿式吹付けモルタルの 100kPa の水圧を 1 時間加えた時の透水量は、 1.2 g/h （ 1.2 ml/h ）で、スチールファイバー入り湿式吹付けモルタルにおける透水量は、 1.2 g/h （ 1.2 ml/h ）であった。

ビニロンおよびスチールファイバー入りモルタルの透水量は、一般的に用いられている断面修復用の湿式吹付けポリマーセメントモルタル（室内実験値 $W/C=40\sim 50\%$ 、吸水率 $1.7\sim 7.8\text{ g/h}$ ）と同程度であり、断面修復用の湿式吹付けポリマーセメントモルタルと同等の水密性を示しており、良好な結果が得られた。

(12) 硬化収縮率

ビニロンファイバー入り湿式吹付けモルタルの硬化収縮率は、 0.04% であった。

JH 構造物施工管理要領の断面修復工の品質規格では、断面修復材の硬化収縮率が 0.05% 以下であることが求められている。ビニロンファイバー入り湿式吹付けモルタルの硬化収縮率（ 0.04% ）は、 0.05% 以下を確保しており、良好な結果が得られた。

(1 3) 付着強さ (湿潤時、耐アルカリ性試験後、温冷繰返し試験後)

基板モルタルとビニロンファイバー入り湿式吹付けモルタルの付着強度は、湿潤時が 2.1 N/mm^2 で、耐アルカリ性試験後が 1.6 N/mm^2 で、温冷繰返し試験後が 1.5 N/mm^2 であった。

JH 構造物施工管理要領の断面修復工の品質規格では、湿潤時、耐アルカリ性試験後、温冷繰返し試験後のコンクリートと断面修復材の付着強度は、 1.5 N/mm^2 以上であることが求められている。ビニロンファイバー入り湿式吹付けモルタルの付着強度は、 1.5 N/mm^2 以上を確保しており、良好な結果が得られた。

4. まとめ

JHにおいて現在検討中のコンクリート構造物の断面修復工法施工マニュアル（案）等に基づいて行った吹付けモルタルの性能の総合評価結果を表 4.1.1 に示す。

これらのうち、耐久性能に関わる性能の中酸化抵抗性、遮塩性、水密性、透水性については、コンクリート構造物の劣化要因に対する抵抗性を耐久性能の照査式によって検証するものとし、ここでは、これらの性能評価試験を実施して材料の試験値を把握しておくものとした。これらの性能評価試験で得られた値の評価に当たっては、これまでに一般的に実施されている吹付けモルタル等の試験値と対比してここで定めている性能を有しているかどうか確認した。ただし、表 4.1.1 の結果は、今回の暫定的な断面修復材の性能評価試験方法の範囲であり、一部の試験で評価基準値が明確になっておらず検討中のものがある。

ここで記述している湿式吹付けモルタルの評価性能である「断面の修復に要する性能」、「力学的性能」、「耐久性能」の全てにおいて、良好な結果が得られている。

表 4.1.1(1) 吹付けモルタルの基本性能に関する総合評価

要求性能	適用試験	評価基準値 (注)	型式吹付け基本性能評価	備考
圧縮強度	硬化後の圧縮強度試験 (断面修復マニキュアル(案))	既設コンクリートの設計基準強度以上であること。 参考:道路橋示方書	○ (4.23N/mm ² 、母材コンクリートの設計基準強度 24N/mm ² 以上を確保している。)	
静弾性係数	硬化後の圧縮強度試験 (コンプレッションマト) (断面修復マニキュアル(案))	断面修復部に要求される水準以上(検計中) 参考:道路橋示方書	○ 28日強度で19.32N/mm ² (母材コンクリートの弾性係数の80%程度となっている)	ポリマーセメントモルタル同様、モルタルによる断面修復のため、コンクリートより静弾性係数は低い。母材と一体化していることで、要求される静弾性係数はある程度満足していると考えられている。
曲げ強度	硬化後の曲げ強度試験 (断面修復マニキュアル(案))	断面修復部に要求される水準以上 (検計中、参考値5N/mm ² 以上)	○ 7.60N/cm ²	
振動負荷後のたれ、ふくれ、はがれ、ひび割れ、充填性	振動負荷試験 鉄筋背面への充填性試験(その1) (断面修復マニキュアル(案))	JH 構造物施工管理要領 厚さ 20mmでたれ、ふくれ、はがれが生じないこと。 (一般に、有害なひび割れ幅は0.2mm以上とすること。 多くは、ひび割れ幅と数は検計中。)	○ 振動負荷後のモルタルのため、ふくれ、はがれ、ひび割れはなく、良好。 ・上向き吹付けにおいてモルタルと母材コンクリート界面にはく離なし良好。 ・大きな空隙がなく充填性は概ね良好。	
振動負荷後の引張接着性	振動負荷試験 (断面修復マニキュアル(案))	参考値 1.5N/cm ² 以上	○ 引張引張 1.7N/mm ² 建築式 1.8N/mm ²	
鉄筋背面への充填性	鉄筋背面への充填性試験(その2) (断面修復マニキュアル(案))	鉄筋背面に空隙がないこと。 (空隙の大きさ、数は検計中)	○ 空洞なし。鉄筋まわりに大きな空隙がなく充填性良好。 (横向き吹付け)	
収縮・膨張性 (熱膨張係数)	熱膨張係数試験 (断面修復マニキュアル(案))	JH 構造物施工管理要領 熱膨張係数 2.0×10 ⁻⁵ /℃以下	○ 1.61×10 ⁻⁵ /℃	
中性化抵抗性	促進中性化試験 (断面修復マニキュアル(案))	断面修復部に要求される水準以上	○ 26通気前後の中性化深さ 6.7mm	普通コンクリート打込み (室内実験値 W/C=60%、26週で18.6mm)
遮音性	塩化鉛イオン透過透過試験 (JIS A 1171)	断面修復部に要求される水準以上	○ 9mm	普通コンクリート打込み 24N/mm ² (W/C=55%) 6mm 40N/mm ² (W/C=39%) 5mm
凍結融解抵抗性	凍結融解試験 (断面修復マニキュアル(案))	負荷後の相対動弾性係数が80%以上	○ 88.7%	
水溶性	吸水試験 (断面修復マニキュアル(案))	断面修復部に要求される水準以上	○ 5.5%	断面修復用の型式吹付けポリマーセメントモルタル (室内実験値 W/C=40~50%、1.7~7.8%)
水密性	透水試験 (断面修復マニキュアル(案))	断面修復部に要求される水準以上	○ 1.2g	断面修復用の型式吹付けポリマーセメントモルタル (室内実験値 W/C=40~50%、1.7~7.8%)
硬化収縮性	硬化収縮試験 (HS416) (注)	JH 構造物施工管理要領 断面修復材の硬化収縮率は40.05%以下であること。 また、硬化に伴う発熱による反りかえりがないこと。	○ 0.04%	
コンクリート との付着性 (付着強さ)	湿潤時	JH 構造物施工管理要領 1.5N/cm ² 以上	○ 2.1N/cm ²	
	面アルカリ性試験後 (付着強さ)	JH 構造物施工管理要領 1.5N/cm ² 以上	○ 1.6N/cm ²	
	湿冷繰返し試験後	JH 構造物施工管理要領 1.5N/cm ² 以上	○ 1.5N/cm ²	

注1) JHS416 : 日本道路公団標準 断面修復材料品質報告試験方法。
 注2) 耐久性能に關する性能の中性化抵抗性、遮音性、水密性、透水性については、コンクリート構造物の劣化要因に對する低劣性を耐久性能の断面式に對して検証するものとし、ここでは、これらの性能評価試験を実施して材料の試験値を把握しておくものとした。
 これらの性能評価試験で得られた値の詳細に当たっては、一般的に実施されている吹付けモルタル等の試験値と対比してここで定めている性能を有していることが確認された。

表 4.1.1(2) 吹付けモルタルの基本性能に関する総合評価(スチールファイバー)

要求性能	適用試験	評価基準値 ^{注1)} (断面修復工法施工マニュアル(案)中に準拠)	型式吹付け基本性能評価 スチールファイバー		備考
			既設コンクリートの設計基準強度 $24\text{N}/\text{mm}^2$ 以上を確保している。	既設コンクリートの設計基準強度 $24\text{N}/\text{mm}^2$ 以上のことを確保している。	
圧縮強度	硬化後の圧縮強度試験 (断面修復マニュアル(案))	既設コンクリートの設計基準強度以上であること。 参考:道路橋示方書(24N/mm ² 以上)	○	(42.0N/mm ² 、母材コンクリートの設計基準強度 $24\text{N}/\text{mm}^2$ 以上のことを確保している。)	
静弾性係数	硬化後の圧縮弾性係数試験 (コンプレッションメータ) (断面修復マニュアル(案))	断面修復部に要求される水準以上(検討中) 参考:道路橋示方書	○	28日強度で $19.9\text{N}/\text{mm}^2$ (母材コンクリートの弾性係数の80%程度と仮定している)	ポリマーセメントモルタル同様、モルタルによる断面修復のため、コンクリートより静弾性係数は低い。母材と一体化していること、要求される静弾性係数はある程度満足していると考えて良い。
曲げ強度	硬化後の曲げ強度試験 (断面修復マニュアル(案))	断面修復部に要求される水準以上 (検討中:参考値 $5\text{N}/\text{mm}^2$ 以上)	○	$7.94\text{N}/\text{mm}^2$	
水密性	吸水試験 (断面修復マニュアル(案))	断面修復部に要求される水準以上	○	4.3%	断面修復用の型式吹付けポリマーセメントモルタル (室内実験値 W/C=40~50%、1.7~6.6%)
水密性	透水試験 (断面修復マニュアル(案))	断面修復部に要求される水準以上	○	1.2g	断面修復用の型式吹付けポリマーセメントモルタル (室内実験値 W/C=40~50%、1.7~7.8%)

注) 耐久性能に関する性能の水密性、透水性については、コンクリート構造物の劣化要因に対する抵抗性を耐久性能の観点から評価するものとし、ここでは、これらの性能評価試験を実施して材料の試験値を把握しておくものとした。
これらの性能評価試験で得られた値の評価に当たっては、これまでに一般的に実施されている吹付けモルタル等の試験値と比較して、ここで定めている性能を有しているかどうかを確認した。

【別添資料 2】

巻厚不足の覆工における補強設計例

STEP 1：設計条件の整理

[既設覆工の形状]

対象とする既設覆工の形状を図 1 に示す。

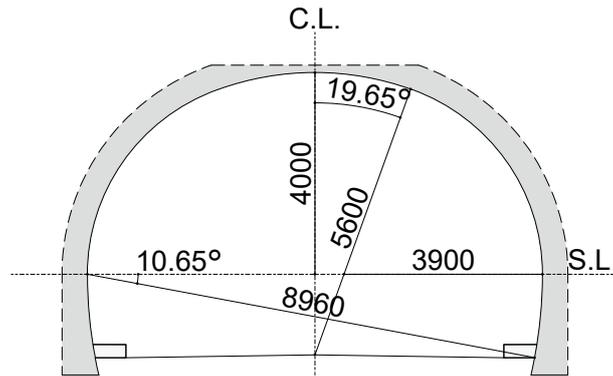


図 1 既設覆工の形状

既設覆工の半径は 5.6m，標準巻厚は 50cm，天端部の巻厚 15cm である，巻厚が不足した既設覆工を補強設計の対象とする。

[補強目標の設定]

補強後の断面性能として，現在の坑口付近の覆工仕様（NATM DIIIa パターン，覆工厚 35cm，単鉄筋）と同等の構造性能を補強の目標とする。

[コンクリート（既設覆工）]

コンクリート（既設覆工）の材料諸元は表 1 に示すとおりとする。

表 1 コンクリート（既設覆工）の材料諸元

設計基準強度 f_{ck}' [N/mm ²]	設計圧縮強度 f_{cc}' [N/mm ²]	設計引張強度 f_{ctk} [N/mm ²]	ヤング係数 E_c [N/mm ²]	単位体積重量 γ_c [kN/m ³]	ポアソン比 ν_c [-]
18	13.8	1.58	22,000	23.0	0.20

[吹付けモルタル（補強材）]

吹付けモルタル（補強材）の材料諸元は表 2 に示すとおりとする。

表 2 吹付けモルタル（補強材）の材料諸元

設計基準強度 f_{mck}' [N/mm ²]	設計圧縮強度 f_{mc}' [N/mm ²]	設計引張強度 f_{mt} [N/mm ²]	ヤング係数 E_m [N/mm ²]	単位体積重量 γ_m [kN/m ³]	ポアソン比 ν_m [-]
40	30.8	7.00	20,000	21.7	0.20

[鋼材]

主筋、配力筋およびアンカーボルトの材料諸元は表 3 に示すとおりとする。主筋および配力筋はいずれも呼び径 D19 で鋼種は SD345 を想定した数値とする。アンカーボルトは呼び径 M16 で鋼種は SNR490B を想定した数値とする。

表 3 鉄筋の材料諸元

	設計引張強度 σ_{su} [N/mm ²]	設計降伏強度 σ_{sy} [N/mm ²]	ヤング係数 E_s [N/mm ²]	単位体積重量 γ_s [kN/m ³]	ポアソン比 ν_s [-]
主筋	490	345	200,000	78.5	0.30
配力筋					
アンカーボルト	490	325	200,000	78.5	0.30

[地盤ばね]

地盤ばねについては、周辺地盤の地質が強風化層であると想定して、各数値は表 4 に示すとおりとする。

表 4 地盤ばね

地質	変形係数 [kN/m ²]	法線バネ定数 [kN/m ³]	接線バネ定数 [kN/m ³]
強風化層	100,000	464,243	0

STEP 2 : 補強断面の検討

[断面耐力の計算]

天端部の断面として、図 2 に示す 3 ケースの M-N 破壊包絡曲線を求める。

Model 1 : 既設覆工の巻厚が不足した「補強前モデル」 ($t=15\text{cm}$)

Model 2 : 補強の目標とした「NATM DIIIa モデル」 ($t=35\text{cm}$)

Model 3 : 既設覆工と内巻補強工を完全一体とした「補強後モデル」 ($t=15+18\text{cm}$)

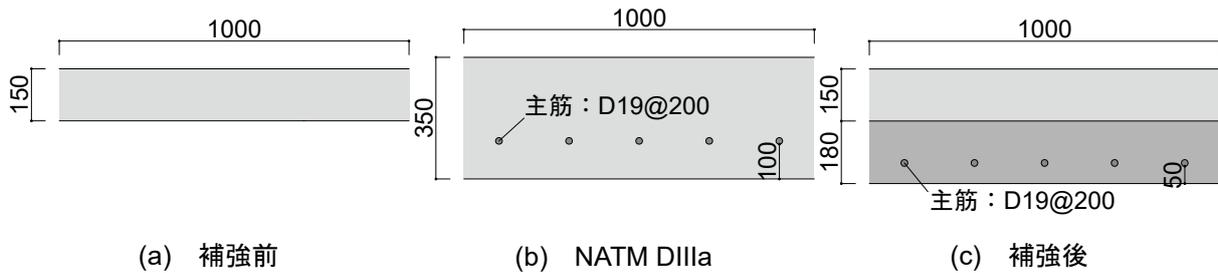


図 2 天端部の断面図

解析の条件は以下に示すとおりとする。

- 1) 既設部と新設部は、完全一体梁として計算する。
- 2) コンクリートおよび吹付けモルタルの応力-ひずみ関係は、非線形モデルを採用し、引張応力は見込まない。
- 3) 鉄筋の応力-ひずみ関係は、完全弾塑性のバイリニアモデルとする。

[補強断面の設定]

以上の 3 ケースのモデルから得られた M-N 破壊包絡曲線を比較したものを図 3 に示す。

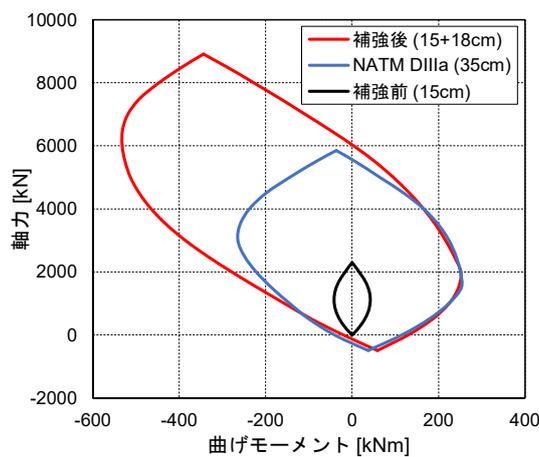


図 3 M-N 破壊包絡曲線の比較

図 3 より、NATM DIIIa の M-N 破壊包絡曲線と同等となるように、天端部における補強厚を 18cm とする。

STEP 3 : 構造計算

[有限要素解析モデルの作成]

有限要素解析モデルの覆工断面を図4に、有限要素解析モデルの概要を図5に示す。

有限要素解析の条件は、以下のとおりとする。

- 1) 対称性を利用し、トンネル断面の中心線に対して半分を2次元でモデル化する。
- 2) 覆工コンクリートおよび吹付けモルタルは平面要素でモデル化する。
- 3) 補強鉄筋はトラス要素でモデル化する。吹付けモルタルの節点と共有節点とし、完全付着とする。
- 4) 既設覆工と新設部の接合面はジョイント要素を用いてモデル化する。
- 5) 周辺地盤の地質を強風化層として、地山側の全周囲に地盤ばねをモデル化する。
- 6) 脚部の境界条件は各部材芯の鉛直並進のみを拘束し、自由を考慮したせん断ばねをモデル化する。
- 7) 切断面の境界条件は、水平並進および全回転自由度は拘束する。
- 8) 鉛直荷重は分布荷重で与え、側圧係数は0（鉛直荷重のみ）とする。

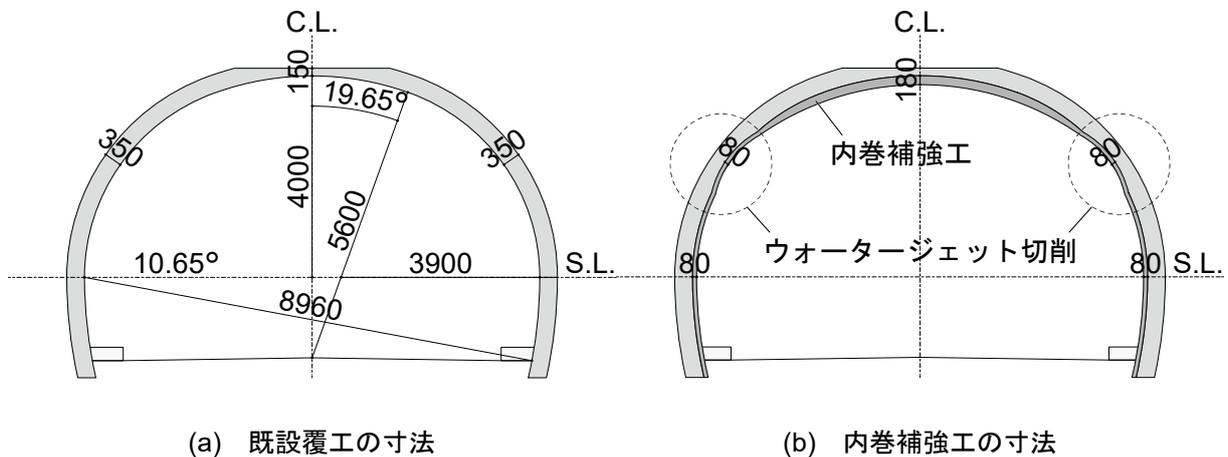


図4 有限要素解析モデルの覆工断面

以上を踏まえた有限要素解析モデルの概要を図5に示す。

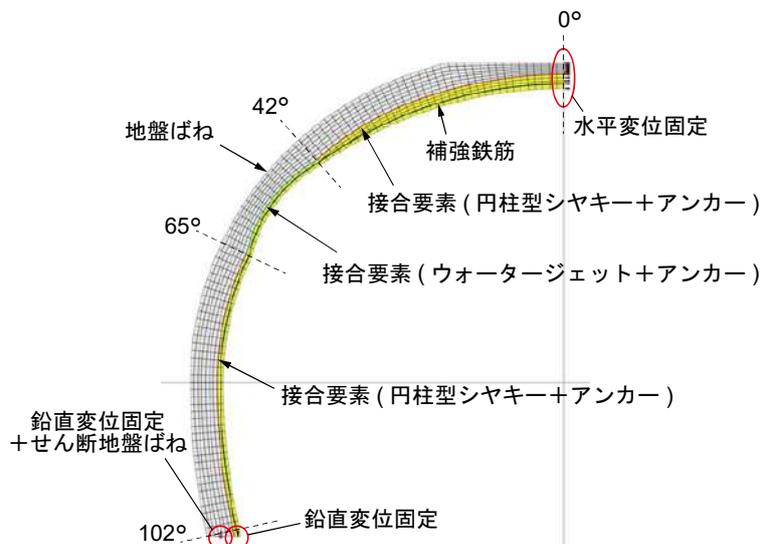


図5 解析モデルの概要

[接合部の設計]

単位面積 1m²あたり、あと施工アンカー（M16, SNR490B）は 4 本/m²、シヤキーは 25 穴/m²の数量で施工するものとする。

あと施工アンカーの垂直特性を表 5、シヤキーのせん断特性を表 6、ウォータージェットによる切削面のせん断特性を表 7 に示す。これらの値をジョイント要素に与える。

表 5 あと施工アンカーの垂直特性

引張強度 σ_T [kN/m ²]	引張剛性 K_{nt} [kN/m ³]	圧縮強度 σ_C [kN/m ²]	圧縮剛性 K_{nc} [kN/m ³]
204.1	3,925×10 ³	∞	3,925×10 ⁷

表 6 シヤキーのせん断特性

粘着力 c_{blk} [kN/m ²]	内部摩擦角 ϕ_{blk} [deg.]	せん断剛性 K_{sblk} [kN/m ³]
1,660	42.5	3,320×10 ³

表 7 ウォータージェットによる切削面のせん断特性

粘着力 c_{wj} [kN/m ²]	内部摩擦角 ϕ_{wj} [deg.]	せん断剛性 K_{swj} [kN/m ³]
2,400	57.1	3,300×10 ³

[設計荷重の検討]

天端部における既設覆工の圧縮縁が設計圧縮強度に達するまで鉛直方向に等分布荷重を与えた結果から、設計荷重は 285kN/m²とする。設計荷重 285kN/m²を与えた時の縁応力の分布を図 6 に示す。

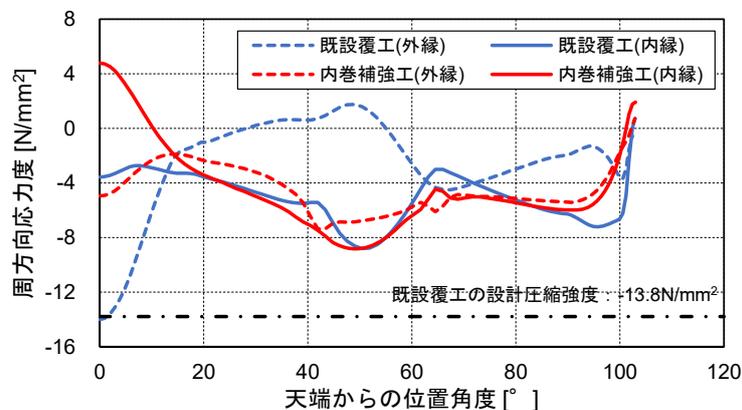
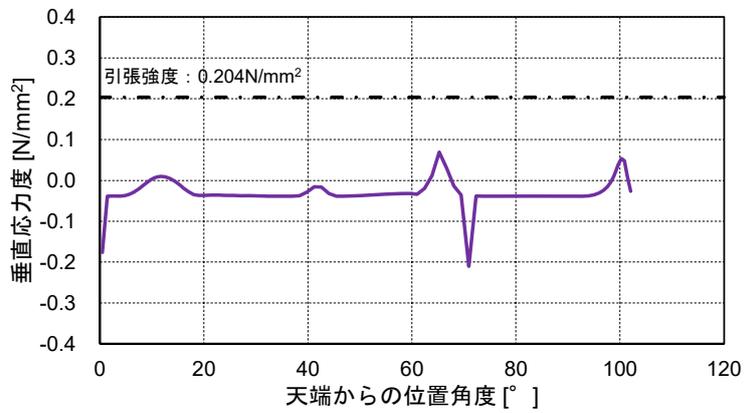


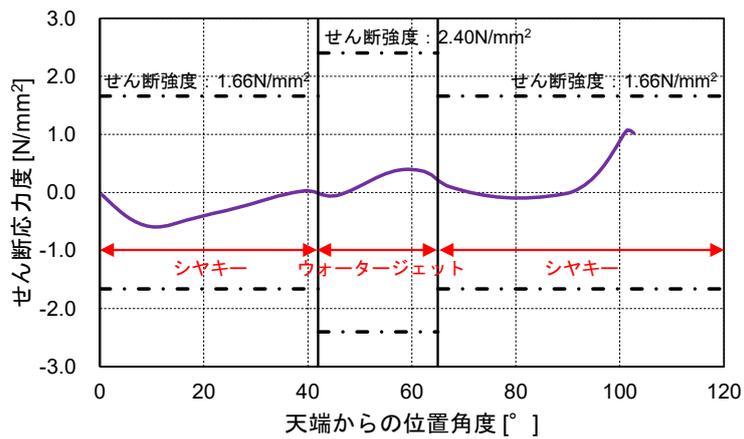
図 6 設計荷重 285kN/m²時の縁応力分布

[接合部の応力照査]

設計荷重 285kN/m² を与えた時の接合部の応力分布を図 7 に示す。図 7 より、接合面の全範囲において垂直応力度があと施工アンカーの引張強度を超えないこと、せん断応力度がシヤキーおよびウォータージェット切削面のせん断強度を超えないことが確認できる。



(a) 垂直応力度の分布



(b) せん断応力度の分布

図 7 接合部の応力度分布

巻厚不足の覆工における補強設計・施工の手引き
－矢板工法トンネルの補強技術の提案－
設計施工指針

2024年5月 初版

お問合せ先

飛島建設株式会社

土木本部 土木技術部 TEL : 03-6455-8327

土木本部 土木FSC リニューアルG TEL : 03-6455-8324