

シールド工法の合理的施工 に関する研究

1. 研究目的

シールドトンネルにおける二次覆工は、一次覆工（セグメント）だけではトンネルの使用目的が難しい場合に、一次覆工の内側にコンクリートを巻き立てることによりトンネルの機能を満足させるものである。二次覆工の目的は、それぞれのトンネルの用途やトンネルを管理する各機関の考え方により異なるが、多くの場合は、トンネルの使用目的に応じた機能を有する仕上げ工として施工されている。

すなわち、二次覆工は一次覆工に対する蛇行修正、内面平滑化、防水・止水、防食、あるいは特殊荷重対応等を目的とした二次部材として位置づけられ、特殊荷重以外は一次覆工がトンネルの主体構造と考え、構造計算は省略されているのが通常である。また、二次覆工の使用材料、覆工厚さ、型枠脱型の養生時間は実績や経験に基づいて慣用的に行われている。このように考えると、二次覆工の機能を一次覆工の二次機能として代替できる合理的な技術が開発、適用できれば二次覆工の省略は可能と考えられる。

これらの状況を踏まえ、下水道シールド管渠に対する二次覆工のあり方とその機能を明確にし、二次覆工の機能を満足させる組合せ技術の適用により、従前型（現場コンクリートの巻立て）二次覆工の省略を検討したものである。

従前型の仕上げ工として慣用的に二次覆工を施工するのではなく、必要とする条件下では従来以上に

二次覆工機能を積極的に活用し、二次覆工が不要な場合には省略するなど、二次覆工施工に関する各種機能の位置づけとその内容を明確にすることが合理的な覆工を目指す方針となる。

これら検討結果として、トンネルの覆工厚さが薄くでき、掘削径を小さくすることにより掘削費の低減、残土量の低減、シールド機外径の縮小などのコストダウン、および二次覆工に要する工期短縮が図れることになる。

2. 研究内容と成果

本研究は、下水道シールド管渠の二次覆工に関して、二次覆工の機能を満足させる組合せ技術の適用により、従前型二次覆工の省略および代替する技術の検討を行ったものである。

対象とする管渠は、雨水管渠、合流式管渠、污水管渠および内圧が作用する雨水貯留管とする。

「下水道シールド管渠には二次覆工が必要である」との認識は、二次覆工機能のうちの「蛇行・勾配修正」と「粗度係数調整（内面平滑化）」を二次覆工施工の主要目的として捉えていた。一方で、「蛇行・勾配修正」と「粗度係数調整（内面平滑化）」機能を目的においた二次覆工により、付加価値的に得られる「防水・止水」、「防食」、あるいは「一次覆工の補強」に対する機能も潜在的に兼ねるようになり、管渠の種類に係わらず二次覆工の施工は、現

在まで慣用的な位置づけの「仕上げ工」であったと予想される。シールド管渠における二次覆工の役目を整理し、従前型二次覆工による適用性を示したのが表-1である。特に「セグメントの防食」に対しては、コンクリート巻立てによる二次覆工適用が完全なものではないことから、下水道シールド管渠の使用状況および環境状況に合わせ、省略可能な場合はそれぞれの機能を満足する覆工技術の適用を行うことが重要であると判断された。

本検討の最後には、下水道管渠築造計画段階で二

次覆工省略の可否をどのように考えるかを、覆工技術の選定フローとしてとりまとめた。

以下に二次覆工の役目について整理した内容と合理的な覆工のあり方について示す。

2.1 蛇行・勾配修正

東京都下水道局におけるシールド施工実績（近年5年間施工）における蛇行量実績データを分析し、施工精度向上の確認により、蛇行および勾配修正を目的とした二次覆工は省略することが可能であると判断した。蛇行・勾配修正を目的としての二次覆工

表-1 下水道シールド管渠の二次覆工の役目

従前型二次覆工の役目		適用性	備 考
主 目 的	蛇行・勾配修正	○	
	粗度係数の確保	○	
付加機能	防水・止水	△	漏水の遅延には貢献する
	セグメントの防食	×	硫化水素による腐食に対応不可
	補強	△	有筋コンクリートによる

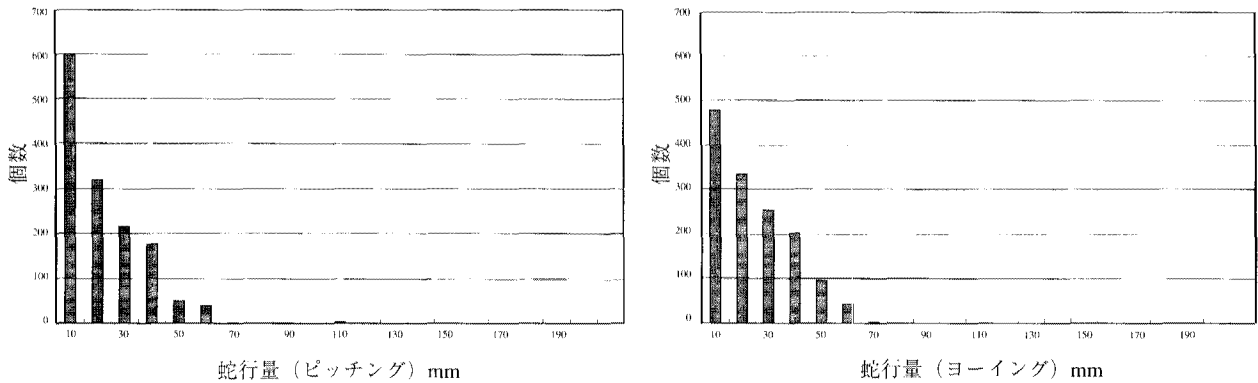


図-1 東京都下水道シールドにおける近年の蛇行量実績 (H.4~H.8)

表-2 出来形管理基準および規格値 (シールド工)

工 種	測定項目	規格値	測定基準	測定箇所
シールド工 管渠	一次基準高 ∇	$\pm 50\text{mm}$	一次覆工の基準高 (管低高), 中心線の偏位は, 5リングにつき1箇所測定する。	
	一次中心線の偏位 (水平方向) λ	左右 150mm		
	延長 L	管径ごとの延長 $\pm 0.2\%$ かつ 総延長 -100mm		
	二次中心線の偏位 λ	$\pm 50\text{mm}$	二次覆工の中心線の偏位, 仕上り内径は, 施工延長40mにつき1箇所測定 (水平, 垂直の内径) する。	
	仕上り内径 D	$\pm 10\text{mm}$		

の要・不要の判断は、シールド施工の精度と関連する。

東京都下水道局におけるシールド施工の蛇行量実績データは、**図-1**に示すようにピッチング（縦断方向の傾斜）で-30～+50mm、ヨーイング（水平方向の曲がり）で±50mmの範囲に分布している。

上記の実績データからも明確なように、近年のシールド施工はシールド機の制御技術や管理技術等の向上により蛇行量はかなり小さくなっており、トンネルの一次覆工における施工誤差は±50mm以内と考えられる。**表-2**は、東京都下水道局によるシールド工管渠の出来形管理基準および規格値である。二次覆工の中心からの許容偏位量は±50mmであり、シールドトンネル一次覆工の精度管理内で満足するものであり、蛇行および勾配修正を目的とした二次覆工はその機能的意義が少ないと判断される。

2.2 粗度係数調整（内面平滑化）

新しく開発されたセグメントの技術調査を行った。その結果、ボルトボックスがセグメント内面に露出しない「完全内面平滑タイプのセグメント」の適用や、ボルトボックスの穴埋工により内面平滑（必要な粗度係数）は確保できることから、内面平滑確保を目的とした二次覆工は省略することが可能である。

蛇行・勾配修正とともに下水管渠における二次覆工の重要な施工目的であるのが粗度係数の確保である。粗度係数の確保を目的としての二次覆工の要・不要の判断は、セグメントの内面形状ならびに管渠の使用目的と関連している。内面形状に関しては、セグメント内面にボルトボックスが露出しない新しいセグメントが開発されている。また、ボルトボッ

クス凹部が残るセグメントに対しては、ボルトボックス穴埋工によりセグメント内面と段差のつかない状態に仕上げることににより対処できることから、二次覆工省略が可能である。一方、雨水貯留管としての管渠使用目的の場合には粗度係数調整目的としての二次覆工省略は可能であるが、二次覆工を行わない場合は、セグメント継手部の劣化防止の観点からボルトボックス穴埋工を行う。穴埋工に関しては次の問題点が挙げられる。①シールドトンネルの上半からの材料脱落、②手詰めによる施工の難しさ、③摩耗によるすり減り、④ボルト周りへの材料の充填不良などである。このような課題に対しては、穴埋め材料の品質に十分配慮する必要がある。以下の条件を充たす必要がある。①水密性があること。②ボックスとの接着性が良好であること。③十分な強度を有し、流砂等による摩耗に対しての耐久性を有すること。④内面粗度が二次覆工のコンクリート表面と同等であることなどである。最近の実績としては、材料として短繊維混入モルタルの吹付け等が採用されている例がある。

新タイプのセグメントの適用判断は、各セグメントの使用実績による信頼性、施工性、作業性および安全性を勘案し選定しなければならない。各ゼネコンおよびセグメントメーカーは、日々、新しいセグメントの研究開発および実験を行っており、適用判断は、使用実績による信頼性が主となる。

下水道管渠への適用セグメントは、セグメントの内面状態および材質の違いにより、下記に示す【タイプ1】～【タイプ6】に分類され、適応条件に見合う選定を行う。

- | | | |
|---|-----------|------------------------------|
| ① | タイプ1 内面状態 | : 内面完全平滑型 |
| | 材質 | : 鉄筋コンクリート |
| | セグメント例 | : コネクセグメント, ワパセグメント, ヒカセグメント |
| ② | タイプ2 内面状態 | : 内面完全平滑型 |
| | 材質 | : 鋼材とコンクリートの合成構造 |
| | セグメント例 | : NMセグメント |
| ③ | タイプ3 内面状態 | : 継手露出型（リング間） |
| | 材質 | : 鉄筋コンクリート |
| | セグメント例 | : コッター・クイックジョイントセグメント |
| ④ | タイプ4 内面状態 | : ボルトボックス露出型 |
| | 材質 | : 鉄筋コンクリート |
| | セグメント例 | : ほぞ付セグメント, TBRCセグメント |
| ⑤ | タイプ5 内面状態 | : ボルトボックス露出型 |
| | 材質 | : 鋼材とコンクリートの合成構造 |
| | セグメント例 | : CP（コンクリート中詰め）セグメント |
| ⑥ | タイプ6 内面状態 | : ボルトボックス露出型 |
| | 材質 | : 鉄筋コンクリートと被覆枠一体型 |
| | セグメント例 | : HDライニングセグメント |

2.3 防水・止水

止水は、セグメントにより対処するものである。

現場打設コンクリートの二次覆工では、施工継手および施工不良による漏水は否めない。したがって、止水・防水という視点で二次覆工は漏水の遅延には貢献するが、本質的な防護になるとは言い難い。よって、一次覆工にて止水対策を充実する必要がある。

止水対策はセグメント継手面にシール材を貼り付けて行う。止水設計はセグメントの設計に合わせて行うことが重要である。また、止水効果をより高めるため、以下の点を考慮する。①シール材料は、水膨張ゴムシールを基本とする。②シール溝は切羽側と坑口側に設け、シール材は両面貼り付けすることが望ましい。③取付け段数は1段を基本とする。④セグメント隅角部の欠け防止に留意する。

止水シール技術の考え方は、パッキン理論に基づくものとして取り扱われている。パッキン理論は、界面応力が作用水圧以上であれば漏水は生じないが、界面応力が作用水圧より小さければ固体との接触面から漏水が発生するという考え方である。なお、シール材の形状および設計については、各機関の考え方が確立されているが(社)日本トンネル技術協会の「セグメントシール材による止水設計手引き(東京電力株式会社委託)平成9年1月」によれば、設計条件として、施工時の設計水圧、供用時の設計水圧、設定目開き量、設定目違い量、セグメント構造(セグメント高さ・継手タイプ・使用ボルト等)などの要素が挙げられている。実計画においては、これらの条件を考慮するとともにシール材の品質試験(曝露試験)の実施による性能評価を充実することが重要である。シールドトンネルは、セグメントをボルトなどによって組立構築されるトンネルであることから、継手目地が多い構造物である。トンネル内への漏水の大部分は、継手目地部から発生しており、セグメント間の継手からトンネル内に水が浸入するのを防ぐためには、以下に示すような対策が講じられる。①ボルト孔の防水:ボルト座金とボルト孔との間にリング状のパッキンを挿入し、これをボルトで押え込むことによって防水する。パッキン材としては、合成ゴム、合成樹脂および水膨張性ゴムなどを用いる。②目地コーキング:コーキング工は、セグメント継手面内側に設けられたコーキング溝にコーキング材を充填する防水工である。コーキング材料は、以下の品質を備えている必要がある。①湿潤接着が良いこと。②耐水性に優れていること。③硬化収縮が少ないこと。④施工環境がよいことなどである。

2.4 特殊荷重への対応

二次覆工を特殊荷重等に対する二次部材として取り扱う考えも存在するが、通常無筋コンクリートが使用される二次覆工において力学的負担は無いと考える。例えば、開口部等が必要となる場合、セグメントは鋼製あるいはダクティル製を部分的に採用する必要があり、補強は一次覆工桁高断面内で行う。補強策としては、以下のことに留意する必要がある。①主桁断面の増加、②事前処理による開口補強、③後処理による開口補強などである。また、中間マンホール部や枝線接合部が存在する場合も、開口補強を後処理として行う。

2.5 内圧荷重への対応

下水道は本来、自然流下を原則とした施設であるが、近年では緊急対策としての必要性から、一部暫定貯留管や、放流規制による暫定貯留管の利用ケースがある。

内圧作用トンネルの設計方法については従来まで確立されておらず、表-3に示すような構造形式の中から種々採用されていたが、平成6年に「地下河川内圧トンネル覆工構造設計要領(案): (財)先端建設技術センター」が出され、地下河川シールドについては、二次覆工省略・一次覆工単独負担による一貫した方針が確立されている。

2.6 鋼製・ダクティル製セグメント

鋼製・ダクティル製セグメントは、構造桁がセグメント内面に露出しているため、下水流下の機能上、二次覆工は必要となる。従前二次覆工以外には、中詰めコンクリートを施工する方法がある。

中詰めコンクリートのセグメント内面からの厚さは、腐食度を考慮する必要がある。また、二次覆工用管材として、FRPM管(繊維強化プラスチック複合管)を搬入・接合し、所定の配管延長に達した時点で管材とセグメントの隙間に中込剤を注入する工法も考えられる。本工法は、FRPM管の特徴である水密性・耐食性に優れた機能を利用したものであり、安全な作業環境のもとで短時間に管渠築造が可能である。また、粗度係数もコンクリートに比べると有利である。FRPM管は、酸・アルカリに対して耐食性を有している。汚水の滞留等により発生する硫化水素に対しても長期に渡って耐食性能を発揮するとされている。曝露試験結果より、その耐用年数は概ね60年としている。

2.7 セグメント防食について

腐食環境にさらされるセグメントの劣化を永久的完全に防止することは、現状では困難であると考えられる。したがって、腐食環境にさらされるセグメ

表-3 内水圧作用トンネル構造形式比較

検討ケース			ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
構造概要			一次覆工	一次・二次覆工合成覆工		一次・二次覆工
			単独荷重分担	一次構造	合成	荷重分担
荷重 分担	一次覆工	外圧	○	○	○	○
		内圧	○	○	○	
	二次覆工	外圧		○		
		内圧		○	○	○
構造形式の説明			・外圧および内圧に対して、すべて一次覆工で抵抗させる。 ・二次覆工には構造上期待しない。	・外圧および内圧に対して一次・二次覆工を一体構造として抵抗させる。	・外圧に対して一次覆工のみで抵抗させ、内圧作用時は、一次・二次覆工を合わせ構造として抵抗させる。	・外圧に対しては一次覆工のみで、内圧に対しては二次覆工のみで、それぞれ単独で抵抗させる。

ントに対しては劣化程度の差こそあれ、避けられないものとして対処する必要がある。セグメントの腐食は、主として次の3点が挙げられる：①コンクリート中性化，②下水中の固形物による摩耗，③硫化水素である。

それぞれの原因に対する合理的な方策を検討した。ここでは、下水管渠の耐用年数を50年とする。また、腐食に対する設計時の対応は以下の3つの方法に分けられる。

- 耐用年数50年に見合う腐食代を設ける。
- 被覆工によりセグメントを腐食から遮断する。
- セグメント自体を耐腐食性に強化する。(コンクリートの強化)

2.7.1 コンクリート中性化

下水管渠内の炭酸ガスによるコンクリート中性化は、鉄筋発錆を促し、かぶりコンクリートの剥離・ひび割れを発生させる。東京都がとりまとめた「管渠更生工法の使用に関する調査報告平成3年3月」および「管路改良工法作成基礎調査報告平成8年2月」

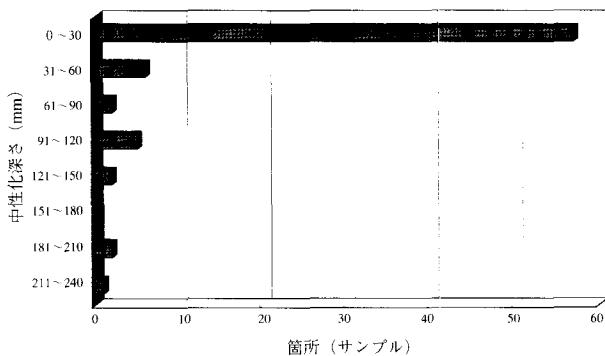


図-2 中性化深さの頻度分布について

によれば、中性化深さに対して図-2に示すようなデータが得られている。(供用開始後17年~65年)

これによると、中性化深さの分布は90mmまでが約85%を占めており、さらに最頻値は、0~30mmとなっている。したがって、中性化深さについては30mmを1つの指標にすることができる。セグメント鉄筋かぶりとして、30mm以上確保する必要がある。

2.7.2 摩耗

二次覆工の省略によりセグメント表面が粒砂等を含んだ流水にさらされると、表面はすりへり作用により摩耗する。「コンクリート標準示方書[設計編]平成8年制定」では、耐摩耗性の材料で保護するか、あるいは鉄筋かぶりを厚くする等の処置が必要としている。ここで、下水道管渠であることを考慮すると以下の2点が予想される。①衝撃作用がほとんどないためすりへり作用は小さい。②セグメントの圧縮強度(420~480kgf/cm²)は一般のコンクリートより大きいためすりへり量も少ない。

以上より、摩耗による腐食対策は、セグメントの鉄筋かぶりを10mm以上増厚にて対処することとする。また、同時に中性化の対策と兼ねるものとする。よって、セグメントの鉄筋かぶり(17mm~20mm以上)+腐食代(10mm以上)=27mm~30mm以上≒30mm以上とする。

2.7.3 硫化水素

硫化水素による下水管渠腐食は、管内の硫化水素濃度を指標に50年経年時の腐食量を想定した。

下水管渠内の腐食は、硫化水素をはじめ下水中の有機物濃度(BOD, COD), 硫酸イオン濃度, 水温,

管内気温，溶存酸素，ORP，流下状況等様々な条件に起因するといわれており，厳密なメカニズムは解明されていない。ここでは，腐食の主たる原因となる硫化水素濃度を用いてコンクリート腐食の定量化を試みた。コンクリート腐食に関する技術論文によれば，様々な硫化水素濃度のもとで，コンクリートコア，モルタル供試体，ヒューム管を使用して行った曝露試験の1年間のデータが得られた。これらを整理し，年間の腐食量を算出した。さらに，腐食量は経年的に毎年同じであると仮定して，経年50年時の腐食量を算出した。腐食量と硫化水素濃度の関係を示したものが図-3である。「コンクリート標準

示方書」によると「特に厳しい腐食性環境」にある場合の鉄筋かぶりは100mm以上とすることが望ましいとされている。また，2.7.1コンクリート中性化において，鉄筋かぶりは30mm以上確保することから，腐食量30mm～100mmに相当する硫化水素濃度0.5ppm付近～5ppm付近を「腐食性環境」とした。

硫化水素濃度0.5ppm以下を「一般の環境」，5ppm以上を「特に厳しい腐食性環境」とした。

また，東京都下水道局における現在供用中の下水管渠について，管内環境実態調査を行った。調査結果を表-4に示す。

調査結果より，雨水管は管内環境が良好であるが，

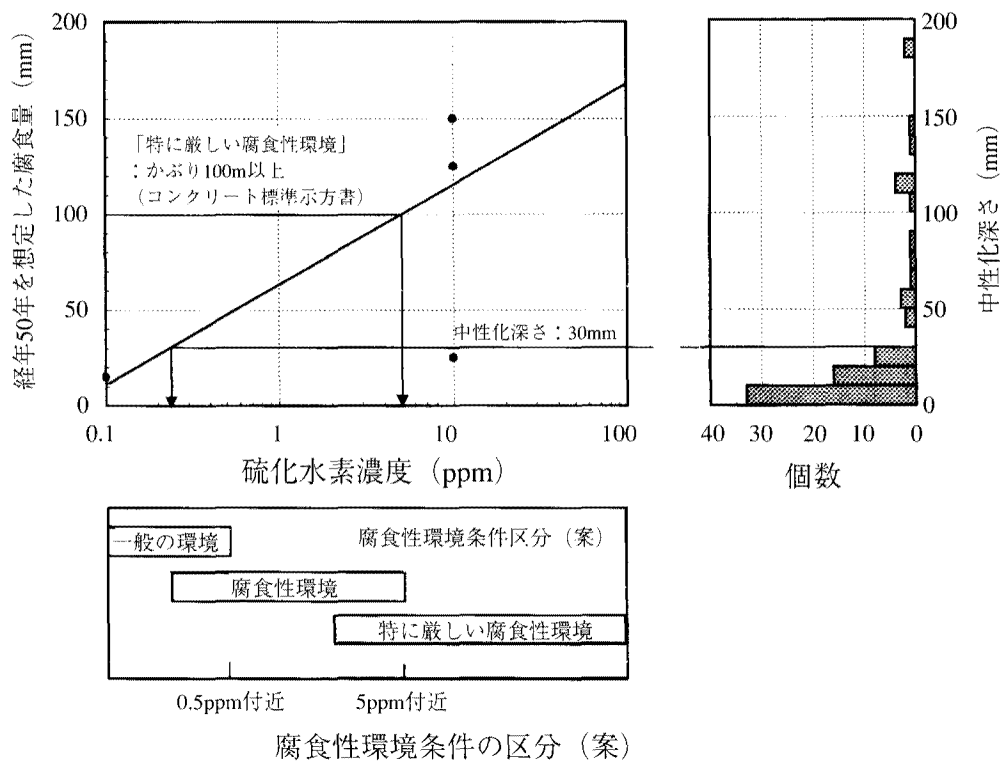


図-3 硫化水素濃度と腐食量および腐食性環境条件区分 (案)

表-4 実態調査結果

調査諸元				液相					気相	
管種	箇所	回数	時期	水温 (°C)	pH	DO (mg/λ)	ORP (mV)	SO ₄ ²⁻ (mg/λ)	気温 (°C)	硫化水素濃度 (ppm)
雨水管 (暫定貯留)	1	1	3月	13.6	8.1	2.1	479	11	14.6	検出限界以下
合流管 (自然流下)	3	2	11月～1月	14.0～	7.6～	2.6～	22～	31.0～	11.7～	0.002～0.045
				21.7	8.2	5.2	170	42.0	22.4	
汚水管	(自然流下)	4	1月	11.3～	7.5～	2.9～	110～	47.0～	11.4～	0.003～0.018
				15.2	8.2	5.5	330	79.0	15.8	
(滞留箇所)	1	4	11月～3月	15.7～	7.2～	0.2～	-7～	36.0～	12.3～	0.014～0.016
				19.6	7.7	3.0	319	100.0	17.9	

合流管、汚水管は硫化水素濃度が検出されている。

本調査結果では、汚水管に比べると、合流管の方が使用環境の悪い状態にある。検出されている硫化水素濃度は0.002～0.045ppmといずれも0.1ppm以下であり、**図-3**によれば、腐食量10mm程度の「一般の環境」と想定される。

2.7.4 腐食対策

以上、述べてきた視点から、腐食対策としては、摩耗、コンクリート中性化、腐食性環境が「一般の環境」に対しては、セグメント鉄筋かぶりを増加する方法が合理的であると判断した。また、硫化水素に対しては、使用環境が「腐食性環境」以上と判断された時は、被覆工やコンクリート材料強化を図る場合が合理的な場合がある。「コンクリート標準示方書」によると腐食環境においては鉄筋かぶりを75mm以上確保することが望ましいとしている。一方、セグメントはコンクリート設計基準強度が420～480kgf/cm²であり、工場製作によるものであることから、鉄筋かぶりは最大60mm（75mm×80%）までを考慮する。以上を総括してまとめたものが**表-5**である。

被覆工としては、FRPM管挿入工法（PF-L工法）、シート型ライニング工法（PVCライニング工法）、樹脂被覆一体型セグメント工法（HDライニング工法他）等が挙げられる。コンクリート材料強化策（防食）としては、防菌コンクリート、レジンコンクリート等の採用が考えられる。

2. 8 設計段階における覆工適用フロー

最後にこれまでの研究成果を総括し、シールド下水道管渠築造計画段階で覆工技術の適用に際してのフローを、**図-4**に示す。

3. おわりに

本研究では、下水道シールド管渠に対する二次覆工のあり方とその機能を明確にし、二次覆工の機能を満足させる組合せ技術の適用により、従前型二次覆工（現場巻立てコンクリート）の省略の可否を検討した。長期的社会資本の視点から従前型二次覆工の意義を再度「セグメントの保護効果」として、十分吟味することは重要である。しかし、現状の一次覆工に関する技術開発は目覚ましいものがあり、製品としてその耐久性も向上している。その点を考慮すれば、二次覆工省略はコスト縮減効果として大きな意義が認められる。以下に本研究成果を踏まえ、今後の課題を示す。

3.1 管渠の実態調査

今回調査した下水管渠の実態調査では、坑内の腐食環境は「一般の環境」と判断された。しかし、その調査件数は雨水管（暫定貯留管）で1件、合流管で3件、汚水管で5件の合計9件の調査結果に基づくものであり、今後はより多くの調査データの蓄積と分析により環境条件を一般化、若しくは標準化していくことが重要である。したがって、既設管渠の機能別に対する硫化水素濃度の測定を優先的に、調査データの絶対数を増やすことが先決と考える。

3.2 二次覆工省略による代替工法の標準化

二次覆工省略を可能にするためには、一次覆工にこれまで以上の機能が要求されることになる。

今後は、設計条件にあわせた代替技術および工法の標準化を目指す必要があり、ボルトボックス穴埋工法の標準化やシールド溝とシールド材寸法の標準化を提案する。また、荷重に対する補強策について今回は開口部補強構造等の提案にとどまったが、枝線接

表-5 腐食性環境とその対策

環境条件	指標値 硫化水素濃度予想	予想される管渠の種類	腐食対策
一般の環境	～0.5ppm	雨水（自然流下） 雨水貯留管	鉄筋かぶりによる対策 （30～35mm程度）
腐食性環境	～5ppm	雨水貯留管 合流管（自然流下） 汚水管（自然流下）	鉄筋かぶりによる対策 （～60mm程度） または、被覆工による対策
特に厳しい腐食性環境	5ppm以上	合流管（滞留考慮） 汚水管（滞留考慮）	被覆工による対策

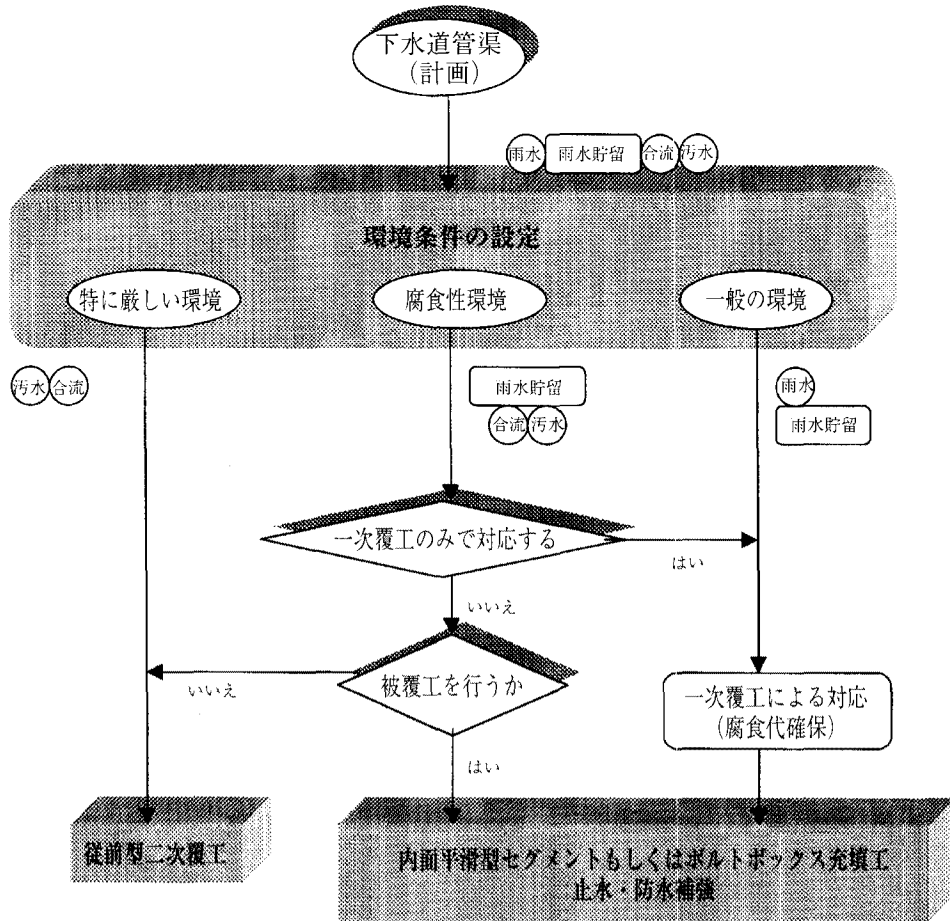


図-4 下水道シールド管渠における合理的覆工技術の選定フロー

合計画（有無，箇所数，規模等）を考慮した補強工法の詳細検討も行う必要がある。

3.3 二次覆工省略管渠に対する追跡調査

実際に二次覆工を省略し，施工を完了したシールド管渠については，供用開始直後から追跡調査を行う必要がある。調査結果の分析により，技術的問題

点や維持管理上の問題点を検討することは重要である。例えば，セグメント継手の目開き，目違い調査や漏水調査およびセグメントと同等品質のコンクリートコアを坑内に設置しておき，その劣化状況を調査することなどが考えられる。

●この研究に関する問い合わせは	研究第二部長	篠田 康弘
	技術部課長	松本 征
	研究第二部研究員	伊東 良秀
	研究第一部研究員	山口 英