

改訂 SPR工法の設計概論

東京都下水道サービス(株)では、創立40周年記念事業の一つとして、改訂 SPR工法の設計概論(2024年7月、全300ページ)を発刊しました。これまでに得られたSPR工法に関する知見や改良点、新たに開発したSPR-NX工法や自立管として開発したSPR-SE工法の考え方を解説しています。

東京都下水道サービス株式会社
TOKYO METROPOLITAN
SEWERAGE SERVICE CORPORATION





SPR工法

第Ⅱ部 1章

SPR工法は老朽した多様な構造の下水道管きょに対応可能な複合管更生工法です

SPR工法は、既設管の内側に硬質塩化ビニル製プロファイルをら旋状に製管し、既設管との間に特殊裏込め材を充填することで、老朽した既設管とプロファイルが裏込め材で一体となった強固な複合管を連続的に築造します。

SPR工法の設計では、既設管と更生部材が一体となって外力に抵抗するという考え方を取り入れており、既設管の残存耐力を評価することで、不足分を更生部材で補強するという経済的な設計を行うことができます。



曲線用プロファイルにより曲線部での施工が可能



● 曲線半径R=5Dまで可能

“次世代”型の SPR-NX工法 (SPR工法支保省略型)



- 製管機の小型化と支保工レス注入技術により安全な施工を実現
- 水位が高い場合やゲリラ豪雨等による急激な水位上昇にも対応可

MEMO

複合管は日本独自の設計法を採用しており、「管きょ更生工法における設計・施工管理ガイドライン-2017年版-(公社)日本下水道協会発行(以下、ガイドラインと記す)」に基本的な考え方がまとめられています。SPR工法を解説した実用書「Structural Analysis and Renovation Design of Aging Sewers」がDe Gruyter社(独)より出版され、国内外から高く評価されています。

1 部材や実寸大供試体の試験による性能検証

■ 梁供試体を用いた部材耐力試験

部材供試体による試験で界面挙動を確認済



■ 複合管の耐荷力試験

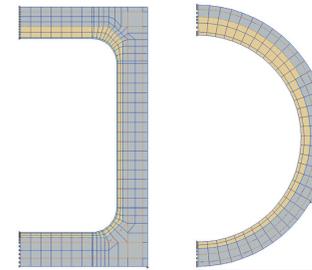
実寸大供試体による試験で更生効果を確認済



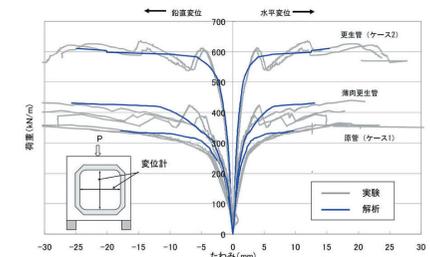
2 理論根拠のある設計手法

■ 非線形FEM解析を用いた複合管の終局耐力評価

解析モデルでは部材欠損など劣化状態の反映が可能



実験結果と解析結果が精度よく一致することを確認し、解析手法の妥当性を検証済



3 地震被災時にも性能を発揮

■ 過去の地震後の被災調査

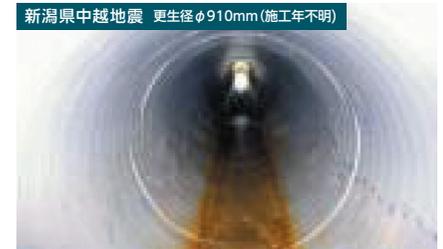
東日本大震災 更生径φ1230mm (H9施工)



異常なし

下水の流下障害や管きょの鉛直断面の崩壊の発生なし

新潟県中越地震 更生径φ910mm (施工年不明)



5リング分かん合トータルで40~45mm伸張

部分的なかん合部外れや伸張による白化箇所でも土砂流入や漏水なし

更生材料の特徴、材料物性

SPR工法では多様な条件の老朽下水道管きよで優れた性能を発揮できるよう材料にこだわっています

第II部 3章



SPR裏込め材

SPR裏込め材は、SPR工法に適合するように開発した材料で、ポルトランドセメントに骨材およびポリマーなどを配合したポリマー系特殊モルタルです。

裏込め材の特長

- 硬化後の耐久性に優れ、安定した強度が得られる
- 注入後、1.5~2.5%体積膨張してプロファイルと付着一体化する
- 既設管との付着力が高く、硬化後の止水性に優れている
- 水中に注入した場合、拡散せず水を押し出しながら細部まで注入できる



一般モルタル

SPR 裏込め材

物性	名称	SPR裏込め材 12A	SPR裏込め材 21A	SPR裏込め材 21B	SPR裏込め材 35A	SPR裏込め材 55A	NX裏込め材	単位
圧縮強度		12.0	21.0	21.0	35.0	55.0	21.0	(N/mm ²)
弾性係数		6.0	6.6	6.6	22.0	28.4	6.6	(kN/mm ²)
単位体積重量		12.5	13.0	17.5	21.0	20.0	17.0	(kN/m ³)
ポアソン比		0.23	0.25	0.22	0.20	0.22	0.22	—
引張強度		1.65	1.83	1.83	2.92	5.46	1.95	(N/mm ²)
破壊エネルギー		17.0	17.6	17.6	38.5	35.0	5.6	(N/m)

MEMO

SPR工法の設計支援システム SPRana においても上表の材料物性値が材料語元として設定されています。

プロファイル

プロファイルは、下水道管きよ用途の硬質塩化ビニル樹脂をベースとし、SPR工法に適合するように適度の柔軟性と強度、耐薬品性、耐摩耗性および耐久性を備えた材料です。

止水性の確保、製管径の維持

プロファイルはリブ形状のIビーム連続体で、両端にはスパイラル状に製管かん合するためのダブルロックかん合機構を有しています。製管後は、メインロックとサブロックのかん合とシール材の圧接により止水性を確保するとともに、かん合部の滑りを防止し、製管径の維持が図られます。

地震時の軸方向変形に対する追従性

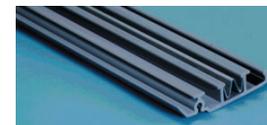
引抜試験の試験結果から、地盤の永久ひずみ1.5%変位に対する追従性が確認されています。かん合部の離脱までは目開きが13~14箇所のかん合部に分散して生じる傾向が確認されています。



ジャッキ加圧部



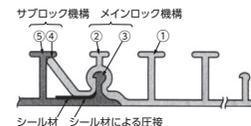
試験後の試験体切断面



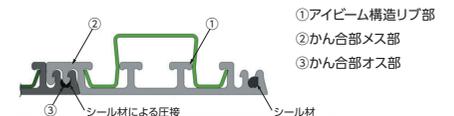
#795W



#70N20W



- アイビーム構造リブ部
- メインロック用メス部
- メインロック用オス部
- サブロック用オス部
- サブロック用メス部



- アイビーム構造リブ部
- かん合部メス部
- かん合部オス部

	材料名	硬質塩化ビニル材					スチール補強材		
		ピッチ (mm)	厚さ (mm)	断面積 (mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)	断面積 (mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
SPR 工法	#90S	90.0	9.0	291.28	37.2	2,350	—	—	—
	#87S	87.0	11.9	367.29	37.2	2,350	—	—	—
	#87SW	87.0	11.9	367.29	37.2	2,350	41.0	205	165
	#80S	80.0	16.3	509.91	37.2	2,350	—	—	—
	#80SW	80.0	16.3	509.91	37.2	2,350	50.0	205	165
	#79S	79.0	21.5	671.51	37.2	2,350	—	—	—
	#79SW	79.0	21.5	671.51	37.2	2,350	72.7	205	165
SPR-NX 工法	#792SU	79.2	31.7	1033.66	37.2	2,350	124.6	205	165
	#70N20W	70.0	22.4	398.83	37.2	2,350	115.86	205	165
	#11N08W	111.0	20.0	484.37	37.2	2,350	74.00	205	165
	#11N12W	111.0	20.0	484.37	37.2	2,350	108.60	205	165

性能確認試験

SPR工法では外圧試験による更生管の耐荷性能の実証やその耐荷性能の根拠を明らかにするための各種要素試験を実施しています

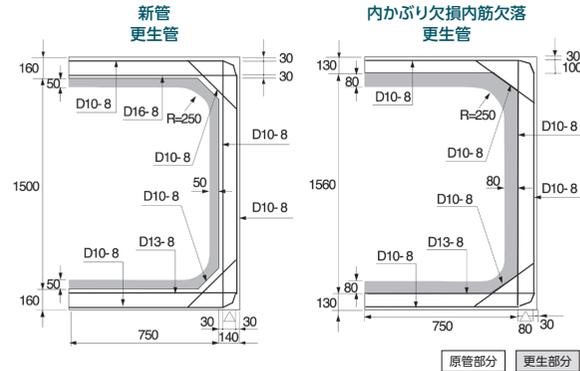
第II部 3章



外圧試験

既設管きよの劣化状態を人為的に再現した実寸大の原管を用いた更生管に対する破壊実験により、更生管の耐荷性能を確認しています。

鉛直荷重による耐荷力試験



- 更生管は各原管よりも1.8～3.4倍に耐力が増加
- 約7割の耐力減の原管でも更生することで新管と同程度まで耐荷力が回復

管種	破壊荷重 ^{※1} (kN/m)	各原管に対する 比率	新管原管に対する 比率
新管	原管	364.3	—
	更生管	643.4	1.8
内かぶり欠損 内筋欠落	原管	104.5	—
	更生管	359.4	3.4

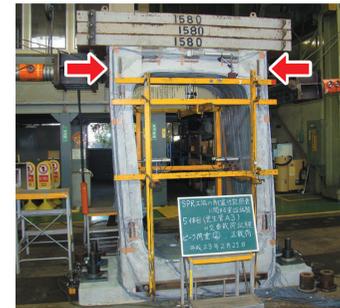
※1 試験値平均

耐震性能実証試験

既設管きよの劣化状態を再現した実寸大の原管を用いた更生管に対する水平交番載荷試験と耐荷力試験により、更生管の耐震性能を確認しています。

水平荷重による交番載荷試験

(左右から交互に荷重を載荷)



鉛直荷重による耐荷力試験

(交番載荷試験後の試験体を使用)



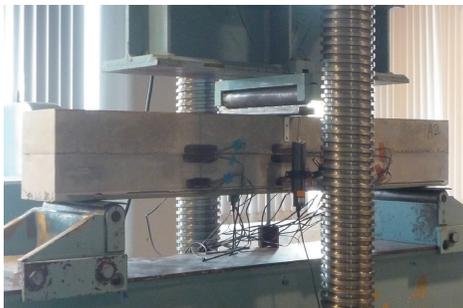
- 減肉既設管が終局状態に至るような変位を受けた場合でも、
- 減肉更生管のかん合は外れない(試験時の試験体観察より)
- 減肉更生管は新管と同等以上の耐荷力を有する

試験体名	最大荷重 (kN)	新管に対する比率
減肉既設管	183.8	0.68
新管	271.1	1.00
減肉更生管	298.5	1.10

梁供試体の曲げ試験

梁供試体を用いた曲げ試験により、SPR工法による補強効果を大きく左右する界面の付着性能を確認しています。

梁供試体を用いた曲げ試験



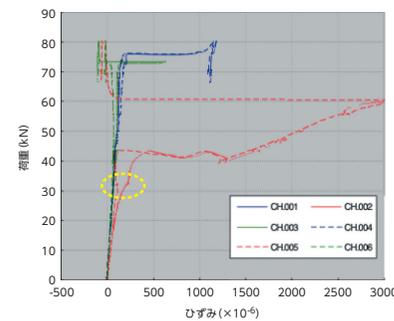
コンクリート/裏込め材界面

供試体軸中央位置(CH002,CH005)では30kN付近でひずみの解放が確認されるが、それ以外の左右位置のひずみは連続して増大し、付着切れは部分的であると言える

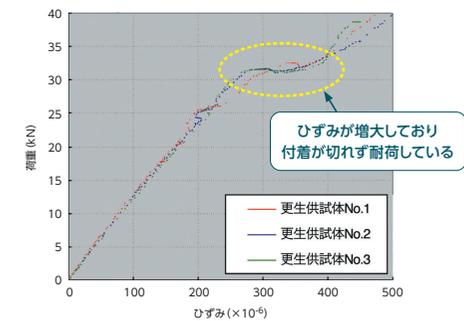
スチール補強材

供試体軸中央位置(CH28)では30kN付近で荷重値が一旦横ばいとなるが、その後もひずみは増大しており、裏込め材とプロファイルの付着が良好であると考えられる

コンクリート/裏込め材界面の荷重-ひずみ (更生供試体No.1)



スチール補強材の荷重-ひずみ (供試体軸中央位置 CH28)



複合管の設計理論

SPR工法では複合管としての合理的な設計を実現するために限界状態設計法を適用しています

第II部 5章



限界状態設計法とは、要求性能に対して、構造物に作用する荷重や材料特性のばらつき、構造解析手法、構造物の重要性等の影響をそれぞれ別々に考慮することが可能な設計体系です。構造設計における着目点が明確で、複数の要求性能に対して総合的に照査することができます。

常時荷重に対して

限界状態と要求性能

- 使用限界状態：設計荷重までは新たなひび割れが発生しないこと
- 終局限界状態：更生管きよの終局耐力が、設計荷重に基づく設計耐力の2.5倍以上の安全率を有すること

荷重係数を指標とした照査

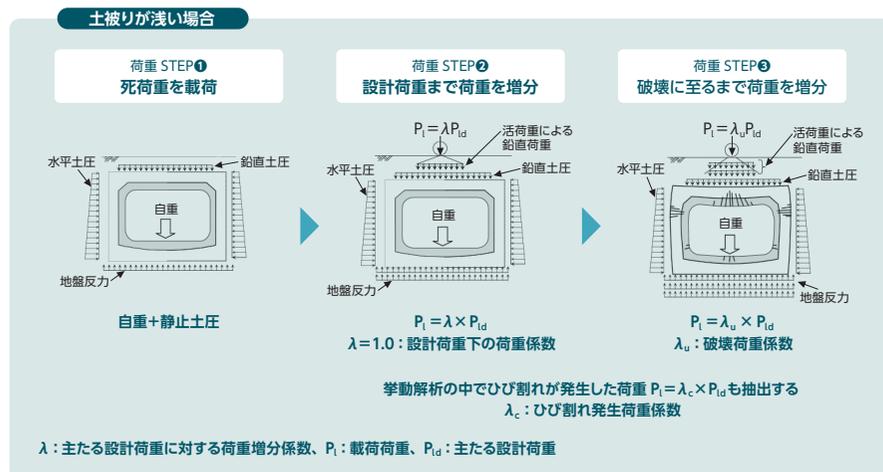
- 使用限界状態に対して：ひび割れ発生荷重係数 $\lambda_c > 1.0$
- 終局限界状態に対して：最大荷重係数 $\lambda_u \geq 2.5$

MEMO

荷重係数を指標とした耐力評価は、「ガイドライン」において限界状態設計法に基づく円形複合管の設計について評価例が示されています。これまで東京都で25年以上の適用実績のある耐力評価法です。

荷重増分法に基づく耐力評価

二次元非線形FEM解析を用いて、荷重増分法により構造物の破壊過程を考慮した挙動解析を行い、終局耐力評価を行います。



地震時荷重に対して

限界状態と要求性能

- 使用限界状態：レベル1地震動に対して大きな変形が生じないこと
- 終局限界状態：レベル2地震動に対して破壊が生じないこと

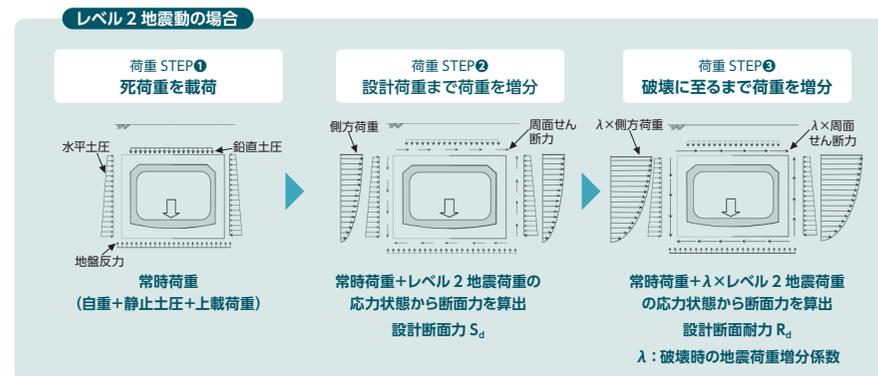
コンクリート標準示方書に準拠した指標

- 使用限界状態（レベル1地震動）に対して：鉄筋の降伏が生じないこと
- 終局限界状態（レベル2地震動）に対して：終局変位とせん断に関して、設計断面力が設計断面耐力を超えないこと

$$\gamma_i \frac{S_d}{R_d} \leq 1.0$$

S_d ：設計断面力 R_d ：設計断面耐力 γ_i ：構造物係数

地震時の検討では、下水道管きよの耐震計算方法として一般的に用いられている応答変位法を基本とした耐震照査を採用しています。



MEMO

非線形動的応答解析による耐震性能照査

SPR工法では「ガイドライン」に示す考え方のうち、最も精度が高い非線形動的応答解析による耐震性能照査を行うことも可能です。地盤と構造物を一体化とした連成解析モデルの非線形動的解析を用いて下記の照査を行います。

- 使用限界状態（レベル1地震動）に対して：鉄筋の降伏が生じないこと
- 終局限界状態（レベル2地震動）に対して：終局変位に関して、面内主圧縮ひずみが圧縮強度に対するひずみの2倍とならないこと
- せん断に関して、設計断面力が設計断面耐力を超えないこと

複合管の設計支援システム SPRana

SPR工法で更生された管きょに対して、非線形FEM解析による限界状態設計法に基づく性能照査を行う設計支援システムです

第II部 6章



入力する条件

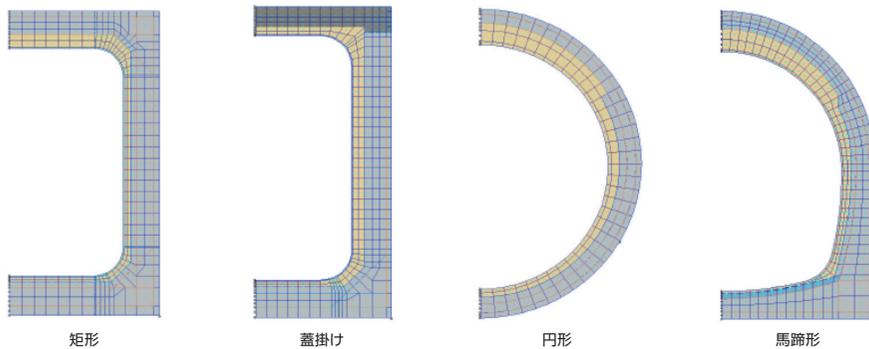
解析条件として、照査条件、埋設条件、荷重条件、既設管きょ形状、配筋条件、物性値、更生条件、安全係数および任意荷重を入力します。

FEM解析モデルおよび解析データの自動作成

矩形、蓋掛け、円形および馬蹄形の全4タイプから選択できます。

条件を入力することでFEM解析モデルおよび解析入力データを自動作成します。

コンクリート部材および裏込め材部材(プロファイル部を含む)はソリッド要素、鉄筋およびスチール補強材はバー要素で構成されます。



MEMO

部材欠損や鉄筋の断面欠損のような腐食が生じている場合は、腐食位置と腐食量を入力することで、解析モデルに反映させることが可能です。コンクリートおよび鉄筋の物性値は、予め登録された材料から選択が可能であるほか、各値を任意で与えることができるため、材料の劣化状態を反映させることも可能です。

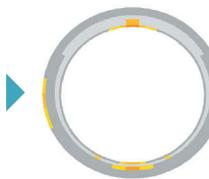
計算結果

計算結果としてクラック図、断面力図、照査表が出力され、システムの画面上および計算書で確認することが可能です。照査は、限界状態設計法に基づいて行われており、更生管の設計における安全係数(材料係数 γ_m 、部材係数 γ_b 、構造解析係数 γ_d 、作用係数 γ_l 、構造物係数 γ_1)が考慮されています。

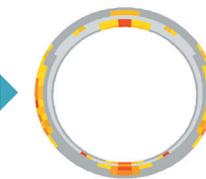
常時荷重に対する検討

クラック図は、設計荷重時、ひび割れ発生時および最大荷重時で確認できるとともに、破壊に至るまでのひび割れ進展をアニメーションで確認することもできます。これにより、最初にひび割れが発生する箇所や破壊に至るまでの過程、破壊状況の確認が可能です。

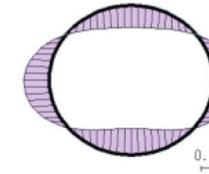
ひび割れ発生時のクラック図



最大荷重時のクラック図



設計荷重時の変位図



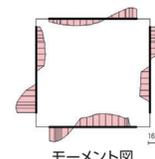
常時荷重に対する照査結果

使用限界状態		
ひび割れ荷重係数	S_i	1.50
安全率		1.0
照査	ひび割れ荷重係数 > 安全率	○
終局限界状態		
最大荷重係数	S_i	5.50
安全率		2.5
照査	最大荷重係数 \geq 安全率	○

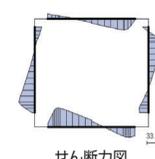
地震時荷重に対する検討

断面力照査表に加え、設計荷重時と最大荷重時の断面力図と変位図が出力され、断面力の卓越箇所や変形挙動の確認が可能です。

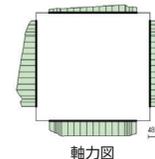
最大荷重時



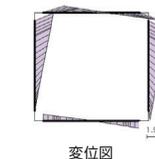
モーメント図



せん断力図



軸力図



変位図

地震時荷重に対する照査結果

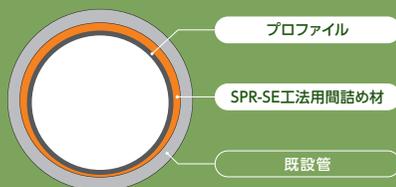
終局限界状態 - 曲げモーメント					
部材位置		頂版	右側壁	底版	左側壁
設計断面力	Md (kN·m)	9.387	13.551	13.054	16.384
最大発生断面力	Mu (kN·m)	61.698	86.932	70.833	83.176
材料係数	γ_m	1.30	1.30	1.30	1.30
部材係数	γ_b	1.00	1.00	1.00	1.00
設計断面耐力	Mrd (kN·m)	47.460	66.871	54.487	63.982
構造物係数	γ_d	1.10	1.10	1.10	1.10
照査	$\gamma_m \cdot Md / Mrd \leq 1.0$	0.218	0.223	0.264	0.282
		○	○	○	○
終局限界状態 - せん断力					
部材位置		頂版	右側壁	底版	左側壁
設計断面力	Vd (kN)	20.289	18.471	33.871	26.417
最大発生断面力	Vu (kN)	62.882	70.485	79.953	87.112
材料係数	γ_m	1.30	1.30	1.30	1.30
部材係数	γ_b	1.30	1.30	1.30	1.30
設計断面耐力	Vrd (kN)	37.208	41.707	47.309	51.546
構造物係数	γ_d	1.10	1.10	1.10	1.10
照査	$\gamma_m \cdot Vd / Vrd \leq 1.0$	0.600	0.487	0.788	0.564
		○	○	○	○

SPR-SE工法

第三部

SPR-SE工法は既設管の老朽化が著しく残存強度が期待できない場合でも適用可能な自立管更生工法です

既設管きよ内にスチール部材が組込まれた硬質塩化ビニル製の帯状材料(プロファイル)をら旋状にかん合しながら製管し、既設管きよと更生管きよのすき間に間詰め材を充填して、新しい管きよを構築する更生工法です。



MEMO

自立管 製管工法(ら旋巻管)は、令和元(2019)年7月より自立管・製管工法として「ガイドライン」の適用対象となりました。

SPR-SE工法の特長

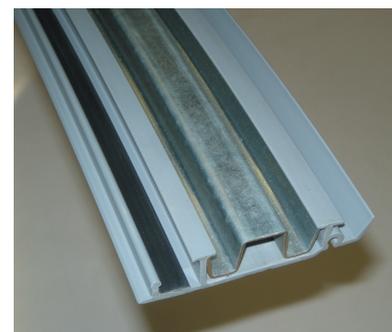
- 製管工法で自立管を構築する更生工法である
 - 水を流しながら施工可能である
 - 施工現場での熱硬化や光硬化等の化学反応が不要である
 - 既設人孔からの施工が可能ため立坑が不要である
 - 管路状態により曲がり管路(屈曲角5°)にも対応可能なため、施工における自由度が高い
 - 現場状況に応じて製管方式の選択が可能である
- 製管方式：けん引式製管方式(450mm～900mm)、自走式製管方式(800mm～1,650mm)

プロファイル

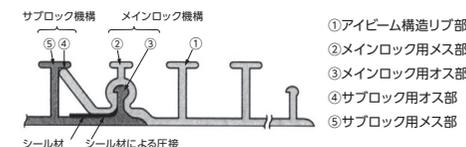
更生管きよを形成するための帯状部材(プロファイル)は硬質塩化ビニル製の帯材料とスチール部材で構成されています。スチール部材は自立強度を発現させることを目的としています。

JIS G 3302で規定する溶融亜鉛めっき鋼板をロールフォーマー等の成形設備で逆W字状断面に加工しており、材料諸元は表に示すとおりです。

プロファイル	#53RW	#62RW	#67RW	#78RW	#85RW	#97RW	単位
プロファイル全高	11.9	18.5	21.7	27.0	37.5	49.0	(mm)
底板肉厚	1.7	2.6	2.6	3.0	3.5	4.0	(mm)
スチール部材圆心高	4.77	7.39	9.19	11.38	15.44	20.51	(mm)
単位当り断面二次モーメント	13.92	40.50	79.15	157.81	327.70	653.36	(mm ⁴ /mm)
単位当り断面係数	2.56	4.70	7.83	12.55	17.66	26.68	(mm ³ /mm)



スチール部材	
材質	溶融亜鉛めっき鋼板
種類	SGC400
基準強度	295MPa以上
引張強度	400MPa以上

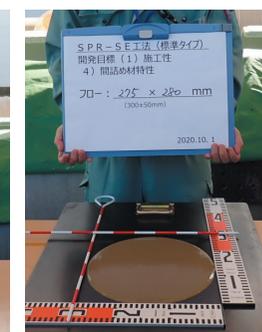
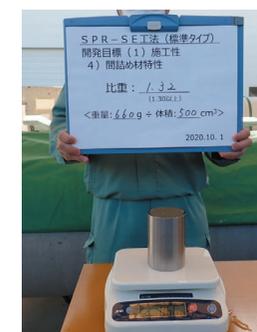


間詰め材

間詰め材は既設管きよと更生管きよの間に充填し、更生管きよを固定するために用いられます。本工法は自立管のため、間詰め材の強度は見込みません。

施工時に既設管きよと更生管きよのすき間の細部まで充填できる流動性を有し、硬化後の体積収縮がなく、水よりも大きな比重をもつ、下表のような必要特性をもつ材料を使用します。

比重	1.30以上
フロー値	300±50mm以上



SPR-SE工法の設計

SPR-SE工法の設計では、荷重を負担するスチール部材が異形断面かつ、ら旋構造という、一様断面の均質円筒管との違いを計算式に反映するために実証実験から設定した補正係数を導入しています。

【補正係数】 曲げ剛性補正係数 $\alpha = 0.7$
断面変形補正係数 $\beta = 1.2$

MEMO

「ガイドライン」ならびに「下水道用硬質塩化ビニル管 (JSWAS K-1-2010) ((公社)日本下水道協会)に記載の自立管の設計手法は、一様断面の均質円筒管を前提とした計算式です。

SPR工法の受賞実績

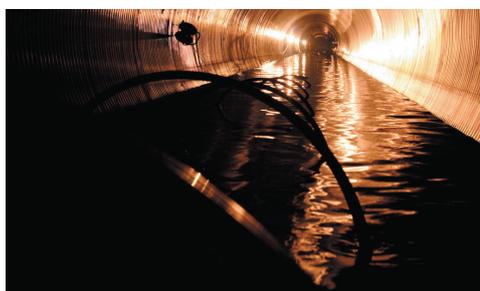
第1回ものづくり日本大賞
経済産業大臣賞受賞



第59回大河内賞
大河内記念賞受賞



2013 グッドデザイン賞



SPR工法は、東京都が東京都下水道サービス(株)、積水化学工業(株)、足立建設工業(株)の民間3社と共同開発した我が国最初の製管工法です。
昭和61(1986)年度に初めて採用され、令和6(2024)年度で38年を迎えました。

2025年3月 初版 1刷発行

発行：東京都下水道サービス株式会社
〒100-0004 東京都千代田区大手町二丁目6番3号
電話番号：03(3241)0711(管理部)
03(3241)0960(技術部)

© 東京都下水道サービス株式会社 2025 無断転載複製はご遠慮ください。

改訂 SPR工法の設計概論