# 無筋部材を含む老朽下水道管きょに対する新たな耐震化工法の実装

岡本　萌[1]・高地　透[1]・中村ゆかり[1]・中野　雅章[1]・田中　健一[2]

[1]日本工営（株）中央研究所（〒300-1259 茨城県つくば市稲荷原2304）
[2]東京都下水道サービス（株）（〒100-0004 東京都千代田区大手町2-6-3）

下水道管きょにおける大規模地震での機能障害や老朽化での道路陥没等の被害が社会課題となっている．これらの課題を未然に防ぐことを目的に耐震化，長寿命化が進められており，東京都でも再構築事業が行われている．再構築の対象となる幹線の中には旧水路を利用した蓋掛け幹線があり，側壁や底版に無筋部材を含む構造となっている．この中には，防災上重要な幹線も含まれており，これらの構造に対しても耐震性を確保できる工法が必要であった．本研究では，無筋部材を含む老朽化下水道管きょに対する新たな耐震化工法の構築と実装を行った．

***Key Words*** ： *耐震化，無筋部材，再構築，老朽化，SPR工法，炭素繊維グリッド*

## １．背景・目的

近年，下水道管きょにおける大規模地震での機能障害，埼玉県八潮市の事故事例のような道路陥没等の被害が社会課題とされ，それらを未然に防ぐことを目的とした耐震化，長寿命化が進められている．東京都では，昭和30年以前に築造された区部47幹線を中心に，ライフサイクルコストや再構築事業の平準化を勘案しつつ整備を進めている[1)]．これらの再構築事業においては，重要な幹線ではレベル２地震動に対する耐震性能を満たすよう，耐震化工法による補強を実施している．

一般的に，下水道管きょの耐震化は，流下機能を確保するための力学面の性能と，施工時の流下阻害や通行規制を極力抑えるための施工面の性能が必要とされる[2)]．これらの要求性能を満足するために，複合管更生工法の一つであるSPR（Sewage Pipe Renewal）工法は，下水道を流下しながら施工でき，鉄筋コンクリート部材の既設管の残存耐力を生かした複合管として外力に対して抵抗するため，補強厚が最小限にできると共に，流下断面を最大限確保できる特徴がある（**図-1**参照[3)]）．

しかしながら，SPR工法においても，レベル2地震動に対する耐震性能を確保するためには，既設管が鉄筋コンクリート部材であることが条件となる．

再構築の対象となる幹線のうち，築造年が古い蓋掛け幹線の場合は，**図-2**に示すように側壁や底版に無筋部材を含む構造が多く，SPR工法ではレベル2地震動に対して十分な対策を取ることができない．管内に鉄筋を組み再構築した場合，鉄筋かぶりの確保等により部材厚が増すため，更生管径が大きく減少し，設計流量を確保できなくなる恐れがある．

このような背景から，蓋掛け幹線のような無筋部材を含む構造に対しても，耐震性能を確保可能で，適切な設計・施工ができるような手法として，既存工法と補強材料を組み合わせた新たな耐震化工法を考案した．

本研究では工法を構築するため，補強効果の確認を目的とした梁試験体を用いた耐荷力試験の実施や設計手法の構築および設計マニュアルの策定を行った．また，工法の現場実装に向けて，鋼製模擬管を用いた施工性の確認，施工時の品質管理方法の整理を通して施工マニュアルを取りまとめた．現場適用にあたっては，これらの設計・施工マニュアルを活用して，実際の現場での設計および試行工事を行い検証を行った．以上の内容について本論文で報告する．

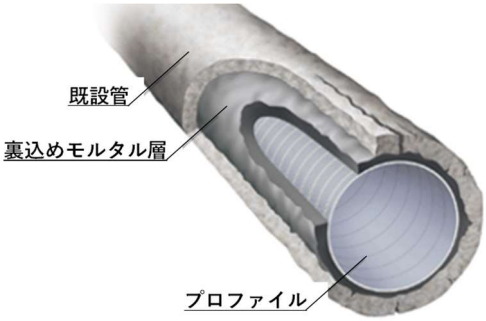


**図-1**　SPR工法の概要[3)]

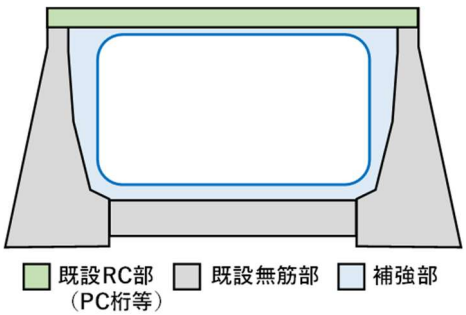


**図-2**　蓋掛け幹線の概要

## ２．新たな耐震化工法の概要

下水道管きょの耐震化工法には，流下機能の確保と，施工時の流下阻害や通行規制を極力抑えることが必要とされる．

本検討では，スチール入りのプロファイルと裏込め材で構成されるSPR工法に加えて，既存補強技術の炭素繊維グリッド[4]（以下，「CFG」と記す．）を組み合わせることで，従来工法の利点を生かしつつ独自性のある新たな耐震化工法とした．CFGは既設管の前処理が不要で，軽量かつ加工も容易であるためマンホールからの搬入や任意の断面形状に対応可能である．既設管に密着させて設置することができ，CFG設置後に打設する裏込め材とも格子形状のため一体性が高い補強材料である．

また，CFGは高強度炭素繊維の材質が強度を発揮できるため，施工後の流下断面の縮小を極力抑えられること，下水道供用下でも施工できることから他の補強材料よりも優位性が高い材料であると判断した．（**写真-1**）．CFGの選定に際しては，異形棒鋼や炭素繊維シート等の補強材と比較を実施した上で選定している．

**写真-1**　炭素繊維グリッド（CFG）

## ３．工法の構築と実装に向けた手順

新たな耐震化工法の構築と実装にあたり，以下の①～⑤の手順で検討を行った．

### (1) 補強効果の確認

新たな耐震化工法の性能を検証するために，梁供試体を用いた4点曲げ試験で補強効果やCFG量・有効高さによる耐力差を確認した．試験結果を**表-1**に示す．

CFGを引張縁に配置した場合，CFGなし（No.1）とCFGあり（No.4）の比較では最大荷重が4.59倍（表中実線）となり，補強効果を示した．CFGの筋断面積を統一し，重ね合わせを1層（No.2）と2層（No.3）とした比較では，ひび割れ荷重，最大荷重ともに同程度であり（表中二重線），重ね合わせによらず，筋断面積に応じた補強効果が得られることがわかった．有効高さ（モルタル厚）は高いほど最大荷重が大きくなり（表中点線），補強効果があることがわかった．また，載荷試験後の**写真-2**のように，ひび割れが分散して発生することで脆性破壊しない効果も確認できた．以上の検討内容からCFGを重ね合わせた場合や筋断面積，有効高さを変化させた場合もそれらに応じた補強効果が確認できた．

### (2) 設計手法の構築

再現解析や既往のせん断耐力評価式との比較から，設計に関わる計算手法を構築し，設計マニュアルに取りまとめた．

先ずは，既往せん断耐力評価式と試験結果の比較を実施した．ここで，試験結果はCFG引張縁配置に比べ耐力の低いCFG圧縮縁配置の荷重を用い，既往の評価式はSPR更生部材のせん断耐力式[5]である数式（1a～1b）を適用して比較を行った．ここで，$V_{spr}$はSPR更生部材のせん断耐力（更生部寄与分），$V_d$はSPR更生断面の設計せん断耐力，$\sigma_{spr}$はSPR更生部材のせん断強度，$H$はSPR更生部材の厚さ，$\gamma_m$は材料係数（1.3），$\gamma_b$は部材係数（1.3）とする．

$$V_{spr} = \sigma_{spr} H \qquad (1a)$$

$$V_d = V_{spr}/\gamma_m/\gamma_b \qquad (1b)$$

**表-2**に，試験結果の最大荷重とせん断耐力式により求めたせん断耐力の比較結果を示す．求めたせん断耐力は試験結果の最大荷重を評価できている．また，安全側な評価となっており，せん断耐力式の適

**表-1**　試験結果（CFG引張縁配置）

| 載荷面 | ケースNo. | モルタル厚さ (mm) | 補強部材（FRPグリッド） 筋番（筋断面積） | 層数 | 筋断面積 ($mm^2$) | ひび割れ荷重(kN) 平均値 | 最大荷重(kN) 平均値 | 最大荷重比率 vs No.1 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| （CFG引張縁配置）プロファイル面 | 1 | 170 | － | － | 0 | 51.9 | 69.4 | － |
| | 2 | 170 | CR8 (26.4) | 1 | 26.4 | 50.9 | 245.9 | (3.54) |
| | 3 | 170 | CR5 (13.2) | 2 | 26.4 | 55.4 | 258.8 | (3.73) |
| | 4 | 170 | CR5 (13.2) | 3 | 39.6 | 58.2 | 318.4 | (4.59) |
| | 5 | 120 | CR8 (26.4) | 1 | 26.4 | 47.3 | 202.7 | (2.92) |

※No.1のひび割れ荷重は、スチール補強材ひずみの変化点

※モルタル物性値：圧縮強度（91.8N/$mm^2$）、静弾性係数（29.7kN/$mm^2$）、引張強度（5.17N/$mm^2$）

**写真-2**　梁供試体の破壊状況

用性を確認した．

次に，載荷試験の再現解析を実施し，試験結果と比較することで，補強後の断面力算定に使用するモデル化を検討した．再現解析は，通常のSPR工法における地震時解析でも使用しているUC-win/WCOMDを用いて非線形解析を実施した．解析モデルは，**図-3**左側に示すように材料種別ごとに設定し，CFG層には弾性要素を挿入することとした．解析の結果，**図-3**右側に示すように試験時に見られたひび割れの分散や斜め方向のひび割れの発生，耐荷力を再現することができた．以上の結果を基に，「中大口径ＳＰＲ工法設計マニュアル[6)]」に，無筋蓋掛け幹線の耐震化に関する項目（CFGの設置・選定・解析モデル等）を追加し，設計マニュアルを作成した．

**表-2**　試験結果（CFG圧縮縁配置）と耐力式の比較

| 載荷面 | ケースNo. | モルタル厚さ (mm) | 補強部材（FRPグリッド） 筋番（筋断面積） | 層数 | 筋断面積 (mm²) | 最大荷重 (kN) 平均値 | せん断耐力 (kN) Vd |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| コンクリート面（CFG圧縮縁配置） | 1 | 170 | － | － | 0 | 69.4 | 96.6 |
| | 2 | 170 | CR5 (13.2) | 2 | 26.4 | 115.0 | 96.6 (0.84) |
| | 3 | 170 | CR6 (17.5) | 1 | 17.5 | 111.1 | 96.6 (0.87) |
| | 4 | 170 | CR5 (13.2) | 3 | 39.6 | 131.1 | 96.6 (0.74) |
| | 5 | 120 | CR8 (26.4) | 1 | 26.4 | 103.1 | 68.2 (0.66) |
| | 6 | 100 | CR8 (26.4) | 1 | 26.4 | 83.8 | 56.8 (0.68) |
| | 7 | 170 | CR8 (26.4) | 1 | 26.4 | 100.3 | 96.6 (0.96) |

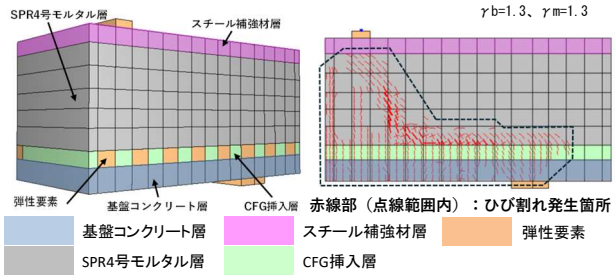


**図-3**　再現解析モデルおよび結果

### (3) 施工性の確認

CFG設置後のSPR工法の施工性および現場でのCFGの取扱いや設置を確認することを目的として，内径1,500×1,500mm，長さ2mの鋼製模擬管（**写真-3**）を使用した施工試験と，供用中の下水道管内でのCFG設置確認試験を行った．

施工確認試験では，既設下水道管に見立てた鋼製模擬管の内面にCFGを設置した（**写真-4**）．ハンチ部用に曲げ加工したCFGを壁面に設置する手順やCFGを複数枚重ねた場合の固定方法の確認を行った．次に，CFGの内側で製管機を用いたプロファイルの巻き立てを行い（**写真-5**），所定クリアランス内での製管の可否やCFGのずれや損傷発生の有無の確認を行った．その後，更生管と模擬管の間隙に裏込め材の充填を行った．充填時には鋼製模擬管外側に確認孔を設け，CFG設置による充填への影響の有無を確認した．

その結果，CFG設置，製管作業および充填作業を計画どおり実施することができた．製管作業の確認では，進行方向左側では製管ローラーがCFGに接触する可能性があるため，当て板等での養生の必要性が確認できた．

施工試験後には，鋼製模擬管を解体し，更生部外側の裏込め材の充填状況を確認した．頂版，側壁，底版のいずれの部位もCFG格子内の裏込め材の充填状況が良好であることが確認できた（**写真-6**）．

**写真-3**　鋼製模擬管

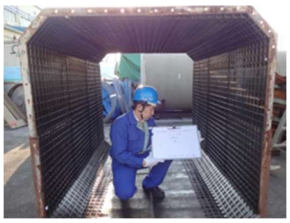

**写真-4**　CFG設置状況

**写真-5**　製管状況

**写真-6**　充填状況の確認

下水道管内でのCFG設置確認試験では，地上での納入材料の検収，マンホールからの材料搬入および管内各部位へのCFG設置作業を行い，作業性や作業の可否を確認した．**写真-7**，**8**に示すように，CFGの搬入から設置まで問題なく実施することができた．また，取付管周辺については，電動カッターで取付管形状に合わせた加工により対応できることを確認した．

**写真-7**　マンホールからの管路内へのCFG搬入状況

**写真-8**　既設管内面へのCFG設置状況

### (4) 施工時の品質管理方法の整理

構築した耐震化工法の現場での試行工事に向けて，(3)の施工性確認で得られた知見や確認試験から抽出した課題への解決策を施工マニュアルとして取りまとめた．

施工マニュアルは，「ＳＰＲ工法施工マニュアル-下水編-[7]」に，CFG設置に関連する項目を追加する形で行った．追加事項は，納入材料の強度性能，製造番号，部材寸法の確認による品質管理，CFG設置や固定状況の確認，製管工時の注意点などの施工管理および出来形管理とした．

特に施工管理においては，裏込め材注入までの期間にCFGのずれや外れが生じないよう1㎡あたり5箇所以上の固定を行うこと，CFG同士の定着を確保するため継手は3交点（2格子）以上とすることを定めた．

### (5) 実現場での試行工事と追跡調査による検証

現場実装に向けた技術的確立を目的として，②の設計マニュアルと④の施工マニュアルを基に，実現場における設計と試行工事を行い，下水供用下の現場での全工程の施工性や留意点の確認を通して検証を実施した．

試行工事の対象路線は，これまでの再構築工事で取り残されていた幹線（□2,280×1,600㎜）とした．

試行工事の施工評価，試行工事後の出来形評価を行うため，試行工事の実施状況の確認および施工後の追跡調査を実施した．実施状況の確認は，工事資料の確認と施工会社ヒアリングにより行った．追跡調査は，施工後の3か月後と6か月後に更生管の管路内調査により行った．

目視調査では更生管の表面に損傷は確認されず，打音調査でも充填不良などの不具合は見られなかった（**写真-9**）．コア抜き試験による確認においても，裏込め材の充填状況や強度に問題はなく更生管完成時の状態を満たしていた（**写真-10**）．

工事資料の確認と施工会社ヒアリングの結果，施工マニュアルに準じることで問題なく施工可能であったことが確認できた．一部，施工時の工夫点として挙がった項目については，施工マニュアルに反映を行った．

**写真-9**　打音試験状況

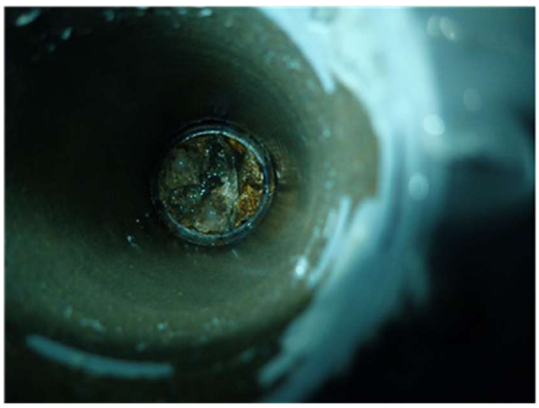

**写真-10**　裏込め材充填状況の確認

## ４．まとめ

本研究では，性能確認，設計手法の構築，施工性の確認および実現場での施工性検証といった一連の検討を通して，無筋部材を含む蓋掛け幹線に対する耐震化工法を確立した．本工法は口径φ800㎜以上の中大口径管を対象としており，これらに実装する段階まで至ることができた．

本研究において下記5点が明らかになった．

(1) 梁供試体試験により，従来のSPR工法とCFGを組み合わせた新工法の補強効果を示した．
(2) 試験結果とせん断耐力式，再現計算を行い，設計手法を構築した．
(3) 模擬管におけるCFG設置から一連の更生作業を行い，施工方法を確立した．
(4) 品質管理方法の整理を行い，現場作業に寄与する施工マニュアルを取りまとめた．
(5) 実現場での試行工事と追跡調査を実施し，実装に向けた技術検証を実施した．

現在では，本工法の現場導入中の観点から限定採用の段階であるが，東京都での複数の幹線に対して，本工法を適用した再構築設計が進められている．

今後は，SPR工法の特徴を踏まえて，新たな耐震化工法適用時に使用する裏込め材を適切に選択し，再構築事業の推進を目指す．

### 参考文献


1) 東京都下水道事業経営レポート2024：https://www.gesui1.metro.tokyo.lg.jp/vr/2024_keiei_report/#page=1
2) (公社)日本下水道協会：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，2017.7
3) 日本SPR工法協会HP：https://spr.gr.jp/spr
4) FPRグリッド工法研究会HP：https://www.frp-grid.com/01.html
5) 東京都下水道サービス㈱他：SPR更生部材のせん断耐力評価方法の構築（H19.3）
6) 東京都下水道サービス㈱他：中大口径ＳＰＲ工法設計マニュアルー2019年版ー，2019.6
7) 日本SPR工法協会：SPR工法施工マニュアル-下水編-，2024.4