

超高性能繊維補強コンクリートの更生管裏込注入材としての応用に関する可能性の検討

チン ユリン¹・山口 哲司²・岩波 基³

¹ 学生会員 早稲田大学 理工学術院建設工学専攻（〒169-8555 東京都新宿区大久保三丁目 4-1）

E-mail: chenylun@fuji.waseda.jp

² 正会員 株式会社熊谷組 土木設計部（〒162-0004 東京都新宿区津久戸町 2）

E-mail: tyamagu@ku.kumagaigumi.co.jp

³ 正会員 早稲田大学 理工学術院社会環境工学科（〒169-8555 東京都新宿区大久保三丁目 4-1）

E-mail: miwanami@waseda.jp.

下水本管の経年劣化が進んでいる。例えば、東京都では、本管のうち 800mm 以上のものは延長 3000km あり、管内面の劣化だけでなく、耐荷力の低下を生じている場所が生じている箇所が多く存在することが懸念される。そこで、本研究では、直径 800mm から 3000mm のヒューム管を鋼繊維補強コンクリート、高性能繊維補強モルタルそして超高強度繊維補強コンクリートの更生管で補強した場合の強度増加を解析によって推定し、それらの材料の適応性を検討したものである。その結果、鋼繊維補強コンクリートと高性能繊維補強モルタルを用いた更生管の強度は、線荷重に対してはモルタルで補強した場合の約 1.5 倍、土水圧荷重については 5 倍以上となり、十分に変形性能も有することから、両材質が更生管へ採用できる可能性を有することが確認された。

Key Words: sewer, SFRC, pipeline renewal, Hume pipe.

1. はじめに

100 年を超える歴史を持つ日本の下水道は、大都市部ではほぼ 100%完備し、全国的に見ても 80%以上が整備されている状況にある。その点で、下水整備はほぼ終結する状況が近づいている。一方、供用年数が長くなったため、下水道破損等に伴う道路陥没が全国で 1 年に 4000 件、東京 23 区内でも 29 年度に 373 件生じている。東京 23 区の場合、そのうち 14%が地域の下水をまとめる比較的大きな本管の破損によって道路陥没が起こっている。しかし、道路陥没の多数は直径 800mm 未満の下水管が破損であるため、東京都では、これらの本管の点検がロボット等を用いてほぼ完璧に状態把握が行われている¹⁾。一方、本管のうち 800mm 以上のものは延長 3000km の全てについてを詳細に点検することが困難な場所も多くある。したがって、管内面の劣化だけでなく、耐荷力の低下を生じている場所が生じている箇所が多く存在することが懸念される。

800mm 以上の下水本管に対する補強は、樹脂材とモルタル等を用いた更生管による方法が多く実施されており、既設管の鉄筋断面が欠損欠損している場合には更生

管に鉄筋等を配置してさらに補強する方法が採用されている。しかし、この方法では、施工条件によって補強効果が大きく低下する可能性があると考えられる。

そのような状況で、コンクリート材料分野では、繊維補強コンクリートおよびモルタルの研究開発が行われ、高強度で高耐久性のワーカビリティ特性もよい繊維補強コンクリート等が用途ごとに採用されている。

そこで、本研究では、下水管路のうち延長が膨大な距離におよぶ直径 800mm から 3000mm のヒューム管について検討を進めるものとし、その第一段階として直径 1000mm のものに、更生管で補強した場合の強度増加を、モルタル、鋼繊維補強コンクリート（以後、SFRC と称す）²⁾、高性能繊維補強モルタル（以後、HPFRM と称す）³⁾そして超高強度繊維補強コンクリート（以後、ダクトルと称す）³⁾そしてについて、従来の上載荷重と推進工法を想定した土水圧荷重について試算を行い、適応性を検討するものである。

なお、どの繊維補強コンクリートも効果であるが、更生管は劣化検査を行うことが困難であり、再補強もできないため、品質が比較的施工条件の影響を受けにくく、耐久性についてはモルタルと補強鉄筋の組合せより確保

できる可能性が高いものと考えている。また、生産量の増加に伴い、価格低下の可能性もある。

2. 解析

(1) 解析方針

ヒューム管をモルタルで構築した更生管で補強した場合の強度を基本とし、SFRC、HPFRM とダクトアルによる更生管の補強強度増加量を非線形解析によって試算する。計算では、図-1 に示すようにヒューム管の断面欠損がない状態で更生管による補強を行った状態について強度を算出した。これは、断面欠損を生じたものに繊維補強コンクリートで更生管補強を行うと強度増加が大きい、補強強度増加の最小値を本研究では求めることとしたためである。

なお、計算条件は更生管のマニュアルを参考に定めた。荷重は、開削工法による場合を想定した線荷重と推進工法の場合の土水圧分布荷重について解析を行った。

SFRCは、鋼製の短繊維（Steel Fiber）を補強材として混入したコンクリートで、設計基準強度が 35N/mm^2 程度を使用するため、硬化後も大変形が可能となる特性を持つコンクリートである。HPFRMは、極細の短繊維を用

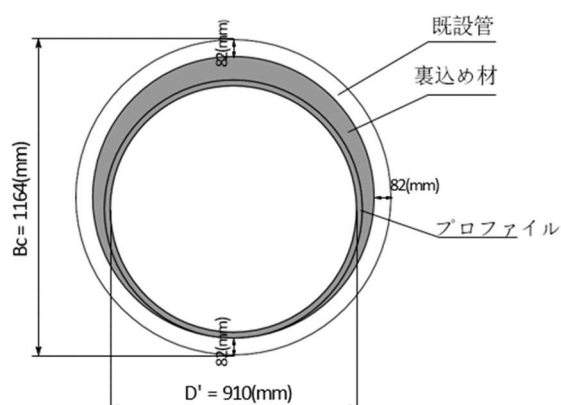


図-1 ヒューム管と更生管の構造概要

表-1 解析対象寸法

構造条件	
既存管直径(m)	1.164
既存管厚さ(m)	0.082
既存管内径(m)	1.000
更生管直径(m)	0.910
プロファイル(m)	0.0215
更生管に含む	
鉄筋径(mm)	5.000
ピッチ(mm)	75.000
かぶり(mm)	24.000

いた高強度モルタルで充填性が高く、硬化後の強度は圧縮および引張とも大きく、高いひび割れ分散性を有した材料である。さらに、ダクトアルは、現場施工に適さないが現在多く使用されているコンクリート材料のうち最も高強度であるため比較のために計算を行った。

(2) 解析対象寸法

解析対象は呼び径 $\phi 1000$ のヒューム管とした。ヒューム管と更生管の構造寸法を表-1 に、構造概要を図-1 に示す。なお、更生管下部の厚さを薄くするのは構造上合理的とはいえないが、下水の自然流下を妨げないため必要な配慮である。

(3) 解析条件

ヒューム管のコンクリート、更生管のモルタル、SFRC²⁾、HPFRM³⁾、ダクトアルの解析に用いた物性値を表-2 に示す。なお、SFRC と HPFRM の物性値は商品化されていないことから論文の値を参考に定めた。

(4) 荷重条件

線荷重は強制変位で与えた。また、土水圧は表-3 の地層内に地下水位 GL-3.3m、土被り 10m として算出した。なお、解析で差異化する際には、非線形解析であるため、算定した土水圧の $1/10$ の荷重を表-4 のように算定し、破壊に至るまで同じ増加量で載荷して解析を実施した。

表-2 材料諸元

材料の物性値		弾性係数 (N/mm^2)	圧縮強度 (N/mm^2)	圧縮強度解析換算 (/係数0.85)	引張強度 (N/mm^2)	ポアソン比
既存管	コンクリート	20000	40	47.059	4.00	0.2
	モルタル	6600	21	24.706	1.83	0.2
更生管	SFRC(普通補強)	30000	35	41.176	2.46	0.2
	HPFRM(塩永)	40000	115	135.294	6.00	0.2
	ダクトアル	50000	180	211.765	8.80	0.2

表-3 地盤構成

No.	土質区分	深度(m)	層厚(m)	有効単位土圧	有効土圧
1	砂質土	0.0-0.5	0.5	18	9
2	砂質土	0.5-3.3	2.8	17	47.6
3	粘性土	3.3-5.2	1.9	7	13.3
4	砂質土	5.2-8.5	3.3	8	26.4
5	粘性土	8.5-20.7	1.5	7	10.5

表-4 載荷土水圧（土水圧の $1/10$ の値）

鉛直荷重	0.01068	MN/m^2
底版反力	0.01135	MN/m^2
頂部水平荷重 $K_0=0.5$	0.00534	MN/m^2
底部水平荷重 $K_0=0.5$	0.00575	MN/m^2

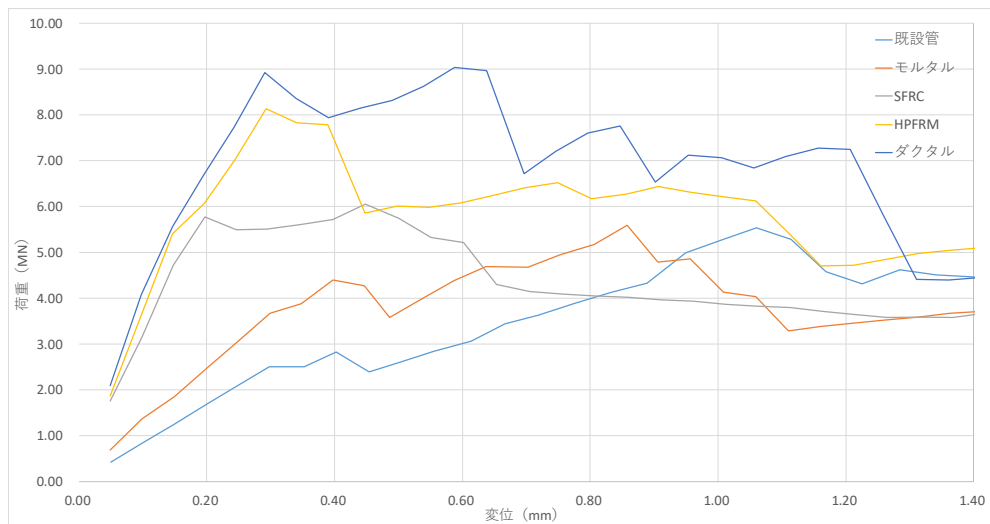


図-2 変位と荷重の関係

表-5 線荷重解析結果

	既設管	モルタル	SFRC	HPFRM	ダクトアル
降伏強度 (MN)	2.50	3.67	5.76	5.40	8.92
降伏強度時変位 (mm)	0.30	0.30	0.20	0.15	0.29
モルタル更生管降伏強度に対する比率	0.68	1.00	1.57	1.47	2.43
最大強度 (MN)	5.53	5.59	6.04	8.13	9.02
最大強度時変位 (mm)	1.06	0.86	0.45	0.29	0.59
モルタル更生管強度に対する比率	0.99	1.00	1.08	1.45	1.61

3. 解析結果

(1) 線荷重

線荷重を載荷したときの荷重と変位の関係を示したグラフを図-2 示す。なお、変位は半径 500mm に対する変位量で示す。また、各更生管の降伏強度と最大強度をまとめ、モルタルで構築した更生管の強度を 1 としたときの比率も合わせて表-5 に示した。

図-2 から分かるようにヒューム管のみとヒューム管の内部にモルタル更生管を設置した場合では、降伏強度に達した後、変形が半径の 0.1%程度まで強度がほぼ同じ値を示し、0.1%前後で最大強度を示す。一方、2 種類の繊維補強コンクリートは降伏強度と最大強度が近く、最大強度を生じた後は、ヒューム管のみの強度まで低下する結果となった。

ほぼ弾性挙動を示すの限界の強度である降伏強度は、SFRC と HPFRM の降伏強度がモルタル更生管の約 1.5 で

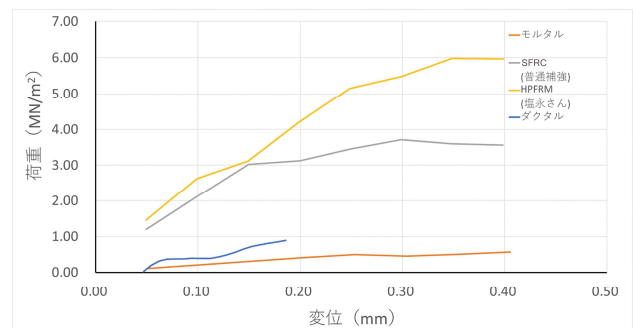


図-3 変位と荷重の関係

あった。さらに、ダクトアルはモルタルの 2.4 倍であった。

一方、最大強度については、SFRC の値がモルタル更生管の値と同程度であったが、HPFRM とダクトアルの最大強度は、モルタル更生管の 1.46 倍と 1.61 倍となることが分かった。

(2) 土水圧荷重

土水圧を想定した荷重を載荷したときの荷重と変位の関係を示したグラフを図-3 示す。変位は線荷重と同様に半径 500mm に対する変位量で示す。また、各更生管の降伏強度と最大強度をまとめ、モルタルで構築した更生管の強度を 1 としたときの比率も合わせて表-6 に示した。

図-3 に示したようにヒューム管の内部にモルタル更生管で補強した場合は、耐荷力が鉛直方向の変形が半径の 0.04%程度まで増加した。この強度は、土水圧では深度 50m 以上に耐える値に相当する。これに対して、2 種類の繊維補強コンクリートは変形が 0.03%を超えた時点で、モルタル更生管の 6 倍以上の耐荷力を有する計算結果となった。その後、0.2%まで大きな荷重低下をを起こさ

表-6 土水圧荷重解析結果

	モルタル	SFRC	HPFRM	ダクタル
最大強度 (MN/m ²)	0.57	3.71	5.98	0.89
最大強度時 変位(mm)	0.41	0.30	0.35	0.19
モルタル更 生管強度に 対する比率	1.00	6.55	10.57	1.58

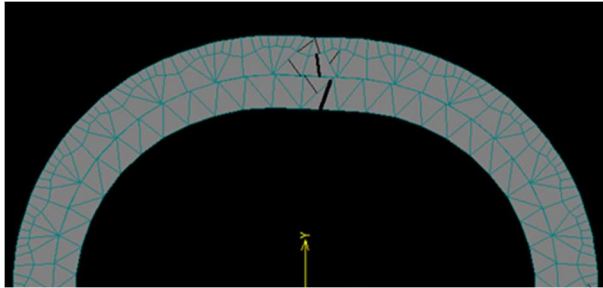


図-4 変形図（モルタル 最大荷重載荷時）

なかった。ダクタルのよる更生管は変形が 0.02%程度で大変形が生じて解析結果が収束しなくなった。

表-6 のように SFRC 更生管の最大強度がモルタル更生管の 6.55 倍となり、HPFRM ではモルタル更生管の 10.57 倍に達した。しかし、ダクタル更生管はモルタルの場合の 1.58 倍にしかならなかった。

4. 考察

(1) 線荷重

線荷重載荷ケースのモルタル更生管における最大荷重での変形図を図-4 に示す。

モルタルの更生管は、引張応力に対する抵抗力がほとんど期待できないことが、図-4 に示すように最大荷重載荷時の曲げモーメント抵抗力に対して大きなひび割れが生じていることから、最大強度の増加に効果がないことが分かる。

SFRC 更生管における最大荷重での変形図を図-5 に示す。

SFRC の更生管は、短鋼繊維によって引張応力に対する抵抗力が増加するとともに、短鋼繊維によりひび割れ分散性能が高まるため、最大強度の増加が期待できる。

図-5 に示すように最大荷重載荷時の変形が図-4 より小さく、曲げモーメント発生部位のひび割れが分散していることが分かる。したがって、最大強度の増加に対する

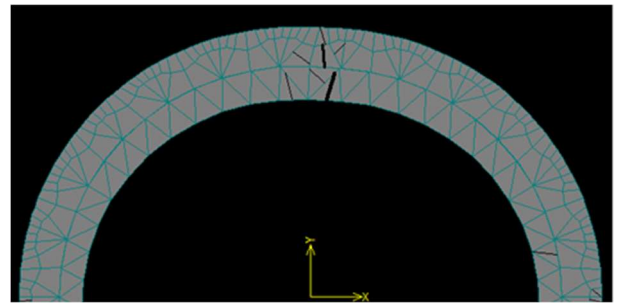


図-5 変形図（SFRC 最大荷重載荷時）

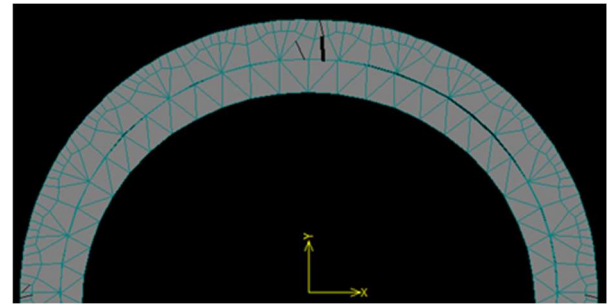


図-6 変形図（HPFRM 最大荷重載荷時）

効果があると判断される。

HPFRM 更生管における最大荷重での変形図を図-6 に示す。

HPFRM の更生管は、超細鋼繊維によって引張応力に対する抵抗力が増加するとともに、鉄筋によるひび割れ分散性能が高まる。さらに、高強度モルタルを施工流動性を向上させるために採用している。これにより、最大強度の増加が期待できる。図-6 に示すように最大荷重載荷時の変形が他の変形図より小さく、更生管に曲げモーメント発生部位のひび割れが生じていない。さらに、更生管が健全なまま既設管と一部分離している。したがって、最大強度の増加に対する効果があると判断されるが、既設管と更生管の弾性係数のバランスが必要であると考えられる。

ダクタル更生管における最大荷重での変形図を図-7 に示す。

ダクタルの更生管は、超細鋼繊維と超高強度コンクリートを採用しているものである。しかし、図-7 に示すように最大荷重載荷時の変形図で、更生管と既設管が大きく分離し、更生管が健全なままである。したがって、更生管の強度が最大強度の増加に効果的に寄与しているとはいえないと考えられる。

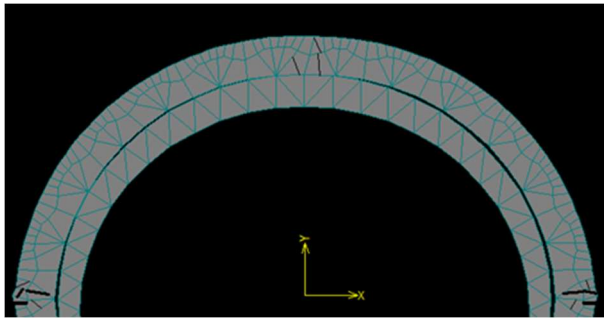


図-7 変形図（ダクトル 最大荷重載荷時）

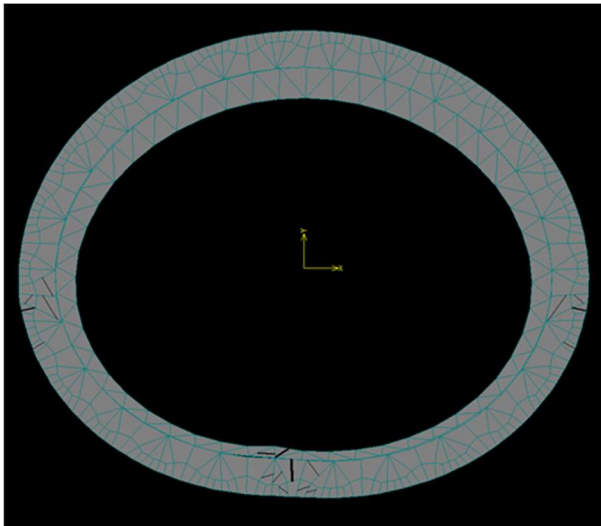


図-8 変形図（モルタル 最大荷重載荷時）

(2) 土水圧荷重

土水圧荷重載荷ケースのモルタル更生管における最大荷重での変形図を図-8 に示す。

土水圧荷重では軸圧縮力が卓越する。しかし、モルタルの更生管は、最下部で薄く、さらに、圧縮強度も小さい。そのため、土水圧荷重に対する抵抗力増加が期待できない。このことは、図-8 から最大荷重載荷時に最下部でモルタル更生管が既設管から剥離して圧壊しており、既設管が曲げモーメントで破壊している状態となっている。このことから、モルタル更生管は、最大強度の増加に効果がないことが分かる。

SFRC 更生管の最大荷重における変形図を図-9 に示す。SFRC の更生管は、短鋼繊維によって圧縮破壊を起こすためにエネルギーが大きくなるため土水圧荷重に対する抵抗力が増加するため、最大強度の増加が期待できる。図-9 に示すように最大荷重載荷時の変形が図-8 より小さく、管上部の最大曲げモーメント発生部位で既設管と更生管にひび割れが生じており、管のスプリング部には既設管外側にひび割れが生じている。最大荷重載荷の更生管ひび割れ幅が伝達できる応力の増加限界を超えているので、これ以後、耐荷力が低下する。したがって、最大強度の増加に対する効果があると判断される。

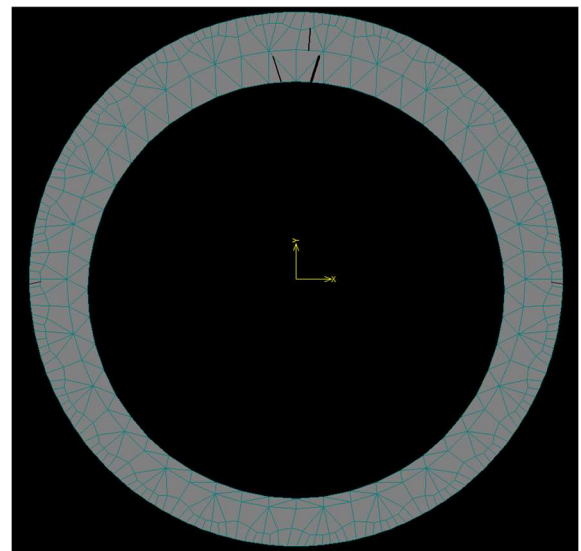


図-9 変形図（SFRC 最大荷重載荷時）

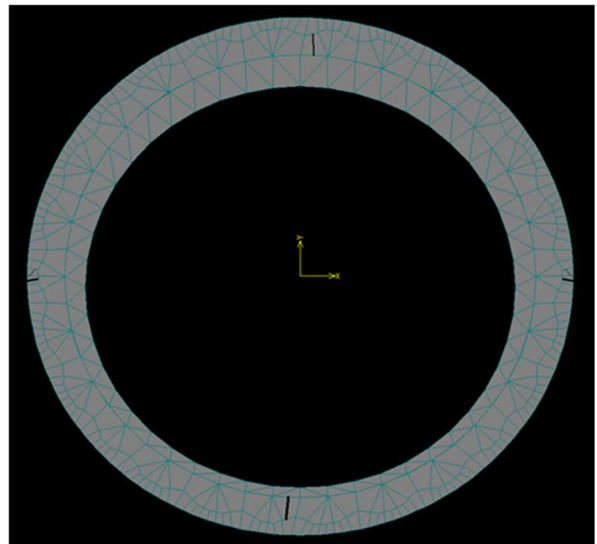


図-10 変形図（HPFRM 最大荷重載荷時）

HPFRM 更生管における最大荷重での変形図を図-10 に示す。

HPFRM の更生管は、超細鋼繊維によって引張応力に対する抵抗力が増加するとともに、高強度モルタルを採用しているため、図-10 に示すように最大荷重載荷時の変形が他の変形図より小さく、最大強度が大幅に増加している。既成管にひび割れが生じても更生管には生じていない。しかし、軸力が卓越する土水圧荷重では線荷重と異なり既設管と更生管の分離が生じていない。したがって、HPFRM 更生管は土水圧に対して最大強度増加に大きく寄与するとともに、既設管と更生管の弾性係数のバランスが妥当である可能性があると考えられる。

ダクトル更生管における最大荷重での変形図を図-11 に示す。

ダクトルの更生管は、超細鋼繊維と超高強度コンクリートを採用しているが、図-11 に示すように最大荷重載荷時の変形図では、荷重レベルが低い状況で、既設管も

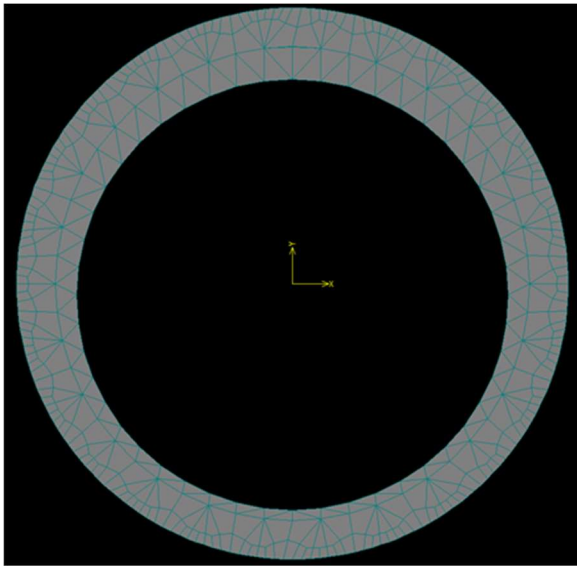


図-11 変形図（ダクトル 最大荷重載荷時）

更生管も全く健全な状態である。しかし、荷重をこのステップから増加させると解析が収束せず、急激な破壊と変形が生じているものと推測される。したがって、更生管の強度が最大強度の増加に効果的に寄与しているとはいえないと考えられる。

(1) 線荷重は浅く小孔径のヒューム管を安全に設計するための設計荷重で有り、(2) 土水圧荷重は土留め壁の影響がない場合の荷重である。したがって、ヒューム管へ実際に作用する側方荷重は、(1) と (2) の間の大きさであることが考えられる。また、大口径のヒューム管では変形による側方の地盤反力を生じる可能性があ

る。したがって、大口径更生管の検討では、軸力が大きく生じる場合について検討することが必要であると考えられる。なお、前述の通り、ダクトルは現場打設が非常に困難であるため、更生管への採用は考えていない。

4. おわりに

上記の検討を以下にまとめる。

- ・線荷重については、SFRC 更生管が降伏耐力が大きく許容応力度設計法では有効であるが、限界状態設計法で設計する場合は HPFRM 更生管の補強効果が高い。
- ・土水圧荷重では、SFRC 更生管も HPFRM 更生管の補強効果が高い。

今後、既設管の劣化程度を想定して更生管の試算を行う予定である。さらに、既設管の残留応力の考慮や耐震性能の検討が不可欠であることを認識しており、解析ケースを予定している。

参考文献

- 1) 東京都下水道局：技術開発推進計画，2016.
- 2) 鋼材倶楽部 S F R C 構造設計施工研究会：鋼繊維補強コンクリート設計施工マニュアル トンネル編，1995.
- 3) 塩永亮介:博士論文 高性能繊維補強モルタルを適用した鉄筋コンクリート部材の引張り特性に関する研究,2019.

(2019. 8. 9 受付)

FEASIBILITY STUDY ON THE APPLICATION OF ULTRA-HIGH PERFORMANCE FIBER-REINFORCED CONCRETE AS GROUTING MATERIAL FOR SEWAGE PIPE RENEWAL

Yulin CHEN, Tetsuji YMAGUCHI and Motoi IWANAMI

Sewage pipe are deteriorating over time. For instance, in Tokyo, pipes more than 8,000 mm in diameter are more than 3,000 km long. Not only the deterioration of the inner surface of the pipe, but also the low bearing capacity of the pipe should be concerned. Therefore, in this study, the strength increase of 800mm to 3000mm diameter renewal concrete pipe was calculated analytically using steel Fiber-reinforced concrete, high performance fiber reinforced mortar and ultra high strength Fiber-reinforced concrete renewal. Then the applicability of these materials is discussed. The results show that, under concentrated load, the strength of the sewage pipe renewed and strengthened with steel Fiber-reinforced concrete and high performance fiber reinforced mortar is about 1.5 times that of the mortar. With the addition of water and soil pressure, the strength ratio is about 5 times. Due to the sufficient deformation properties, it is determined that the two materials have the possibility of application in pipeline renewal.