

中口径下水道管きよを対象とした塩化ビニル管と 螺旋状 FRP の 2 層構造更生管の管厚設計に関する研究

Study on pipe thickness design of two-layered pipe rehabilitation method
for intermediate caliber using PVC pipe and spiral FRP

古川愛子*, 坂田賢亮**, 清野純史***
Aiko Furukawa, Kensuke Sakata, Junji Kiyono

*博(工), 京都大学大学院准教授, 地球環境学堂(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

furukawa.aiko.3w@kyoto-u.ac.jp

**修(工), 大成建設株式会社 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1)

***博(工), 京都大学大学院教授, 地球環境学堂 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

This paper deals with a two-layered pipe rehabilitation method made of a PVC pipe and a spiral FRP. First, flattening tests were simulated by contact analysis of FEA considering interaction between layers. It was confirmed that the contact analysis successfully simulated the test. Then acceptable thickness of PVC and FRP which meets design criteria was calculated by the contact analysis, and the results were compared with those by the design equations assuming the independency and uniformity between layers. The results of the contact analysis were similar to the results by the design equation assuming the independency of layers, and the required thickness by the contact analysis is 1mm thinner than that by the design equation assuming the independency of layers.

Key Words: two-layered pipe rehabilitation, PVC pipe, spiral FRP, contact analysis

キーワード: 2 層構造更生管, 塩化ビニル管, 螺旋状 FRP, 接触解析

1. はじめに

我が国では, 下水道用鉄筋コンクリート管の経年劣化の問題が深刻化しており, 劣化した下水道管の更生を進めていくことが急務となっている. 既設管の外径に応じて様々な更生工法が存在し, 適用可能な工法を施工条件の中で比較検討して最終的には経済性で決定される. 小口径管 (外径 450mm 程度未満) に対しては, 例えば, 既設管内に塩化ビニル管¹⁾ (PVC 管, Polyvinyl Chloride 管) を引き込み, 蒸気により加熱拡張させて既設管内面に密着させる, 形成工法と呼ばれる自立管の更生工法がある²⁾. なお自立管とは, 土圧および活荷重等に対して既設管の強度を期待せず自らで抵抗するものであり, 新管と同等以上の耐荷能力を有するものである.

しかし, これと同様の更生工法を, 中口径管 (外径 450 mm 程度~700 mm 程度) に適用すると, PVC 管の管厚が大きくなりすぎ, 現場での施工が困難になるだけでなく, 断面形状が小さくなり流下能力が低下するといった

問題が生じ, 管厚を抑えるために高強度の補強材を併用することなどが必要となってくる. なお, 大口径管 (外径 800 mm 程度~) においては, 人が管路の中で作業可能な口径となることから, 形成工法に頼らないものとして, 例えば製管工法などが利用されている³⁾. 本研究は, 中口径管に対する自立管の新更生工法として, PVC 管と螺旋状の FRP (Fiber Reinforced Plastics) を用いた更生管 (以下, 本更生管という) の研究を行うものである.

筆者ら⁴⁾ は, PVC 管と FRP 間に摩擦が生じず, 互いに独立して変形を生じる「独立」の状態と, その対極である, PVC 管と FRP が完全に一体となって変形を生じる「一体」の状態の 2 つの仮定に基づいて, 本更生管の PVC 管と FRP の管厚設計式を提案した. しかし, これらは両極端な仮定であり, 実際は, PVC 管と FRP の間には, 両者が接触しているときだけ圧縮力および摩擦力が働き, 接触していないときは力が働かない. 本研究では次の 2 つを目的とする. 1 つ目は, 有限要素法の接触解析を用いた, 2 層間の接触および摩擦といった相互作用

用を考慮に入れた数値解析によって、本更生管の挙動の特徴を調べることである。2 つ目は、接触解析によって新しい更生管の PVC 管および FRP それぞれの許容管厚を調べ、更生管の管厚をどの程度薄くできるかを調べるとともに、既往の「独立」および「一体」を仮定した管厚設計式で求めた許容管厚と比較することで、2 層間の摩擦が許容管厚に及ぼす影響を検討することである。

本論文では、2 章で新しい更生管について、3 章で偏平試験と摩擦試験の概要および結果を述べる。4 章で 2 次元有限要素法の接触解析による偏平試験の再現結果を述べ、本更生管の挙動の特徴を分析する。最後に 5 章で、PVC 管と FRP の「独立」と「一体」を仮定した既往の管厚設計式を説明し、接触解析と既往設計式によって求めた許容管厚を比較、考察する。

2. PVC 管と螺旋状 FRP を用いた更生管⁴⁾

本研究で開発する自立管タイプの下水道管更生工法は、図-1(a)に示すような剛性の高い螺旋状の FRP と、図-1(b)に示すようなライニング材としての PVC 管の 2 層から成り立つ複合構造であり、単一部材から成り立つことの多い自立管としては特殊な構造を持っている。PVC と FRP の両者で土圧や活荷重等の外力に耐え、PVC 管で外水圧に耐えることを期待している。

施工方法は、既設管内径よりも大きな外径をもつ螺旋状 FRP に力を与えて縮径させて既設管内に引き込んだ後、拡張させて既設管内面に張り付ける。さらに小口径管の形成工法と同様に PVC 管を引き込み、蒸気により加熱拡張させて FRP 内面に密着させる、といったものである。施工の結果、更生管は図-1(c)のような外観となる。荷重が小さい場合は、螺旋状に隣り合う FRP と FRP の間に隙間を生じさせる。図-1(d)に更生管断面図を示す。

このような複合構造は更生工法としては実例が無いが、類似の構造のパイプは下水用のリブパイプや土木資材のコルゲート管で既に実用化されている。これらと比べて本更生管はリブ部分がライニングとは別材料の非常に剛性の高い材料であることが特徴である。

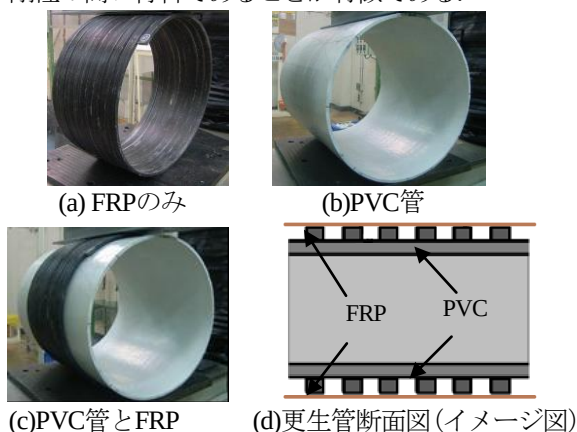


図-1 新しい更生管の概要

3. 偏平試験および摩擦試験

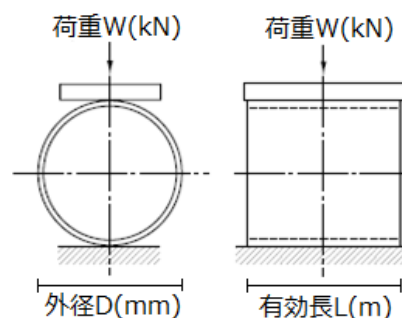
3.1 偏平試験⁴⁾

(1) 概要

偏平試験¹⁾とは図-2に示すように、更生管を用いた供試体に上から荷重 W (kN)をかけ、そのときの偏平量（管頂の鉛直方向変位）を測定する試験である。この試験において線荷重とは、供試体が荷重を受ける有効長 L (m)で荷重 W を除いたものである。ここでは、外径を450mmとし、① PVC 管単体（管厚7.62mm）、② FRP単体（管厚8.00mm）、③ PVC 管と FRP の2層構造（管厚7.62+8.00=15.62mm）の3種類の供試体に対して、供試体の外径の5%程度を目標偏平量とし、目標偏平量に至るまでの荷重を測定した結果について述べる。なお、偏平試験は本来、目標偏平量を生じさせる線荷重が許容値以上あることを調べることで安全性を照査するものであるが、本研究では更生管の挙動を調べることを目的としており照査は目的としていない。FRPには、ガラス繊維強化プラスチックを用いた。FRPの幅は22.5mmで、②③では隙間なく配置した。いずれも、有効長 L は500mmとした。偏平試験の試験片は長さ300mmが標準¹⁾であるが、PVCの巻き数を相当数確保して端部の影響を取り除くため本研究で500mmとした。③は、自然状態で外径が450mmとなるように加工したFRPを外径450mmのPVCの外側から巻き付けているだけで接着はしていないが、FRPは自然状態よりも僅かに拡張された状態でPVCに巻き付けているため、両者の間に隙間は見られなかった。

(2) 結果⁴⁾

偏平試験によって得られた各供試体における偏平量と線荷重の関係を表-1に示す。供試体の外径の5%程度の偏平量を与えるためには、③2層構造の場合は①②の単体のときよりも、より大きな荷重が必要であることがわかる。ここでは結果を示さないが、②FRP単体について、隣り合うFRPの間に、FRPの幅22.5mmと同じ隙間を与えた場合は、同じ偏平量を得るのに必要な線荷重の値が約半分となったことから、FRPの断面の比と、見かけの剛性の比はほぼ同程度であることが確認できた。



(a) 管を正面から見た図 (b) 管を側面から見た図
図-2 偏平試験

表-1 偏平試験結果

モデル	偏平量(mm)	線荷重(kN/m)
①PVC 管単体	21.6	1.38
②FRP 単体	22.6	19.0
③2 層構造	22.3	21.0

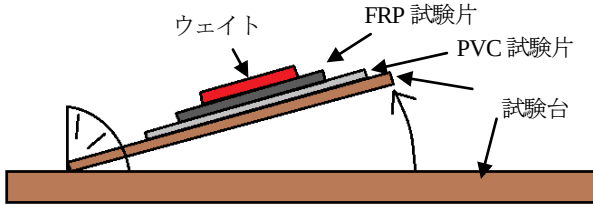


図-3 摩擦試験の概要

表-2 摩擦試験結果 (tanθの値)

回数	上載荷重		
	9.8N	19.6N	49.0N
1	0.132	0.158	0.158
2	0.194	0.167	0.185
3	0.213	0.194	0.150
4	0.167	0.194	0.132
5	0.150	0.176	0.140
平均	0.17	0.18	0.15

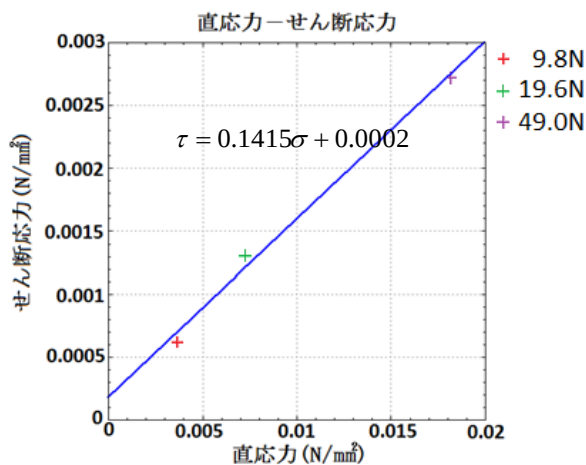


図-4 摩擦試験結果（直応力-せん断応力関係）

3.2 摩擦試験

(1) 概要

数値解析において、PVC管とFRPの間に働く摩擦を考慮した解析を行うために、PVC管とFRPの間の粘着力と摩擦係数を求める摩擦試験を行った。試験方法は「紙及び板紙-静及び動摩擦係数の測定方法（JIS P 8147:2010）」⁹⁾に準じて行うものとし、測定方法として傾斜法を用いた。傾斜法による摩擦試験の概要を図-3に示す。

供試体は、PVC管平板は施工と同様の手順で作成したPVC管から適当な寸法の試験片を切り出し、プレス機を

用いて板状に加工を施すことで作製した。FRP平板は専用の金型を用いて作製した。試験片寸法は、PVC平板が幅80mm×長さ250mm×高さ8mm、FRP平板が幅22.5mm×長さ120mm×高さ8.5mmである。本試験では、PVC平板をベース試験片として、その上部にFRP平板を設置する。FRP平板の上部に9.8N、19.6N、49.0Nの3通りのウェイトで上載荷重を与えた状態で傾斜速度が3.0%/secを越えないように傾斜台を徐々に傾斜させ、FRP平板が滑り始めたときの傾斜角度θを記録する。FRP平板は作製した10個の中から5個をランダムに選択して使用し、3通りの上載荷重ケースそれぞれに対して5回の試験を行い、上載荷重ケースごとにtanθの平均値をとった。

(2) 結果

tanθの算定結果を表-2に示す。次に、tanθの平均値に上載荷重から求まる直応力σを乗じてせん断応力τとし、直応力-せん断応力の関係をプロットしたものを図-4に示す。この3点の近似直線として、最小二乗法により $\tau=0.1415\sigma+0.0002$ が得られた。これより、粘着力 $c=0.002\text{N/mm}^2$ 、摩擦係数 $\mu=0.1415$ が得られた。

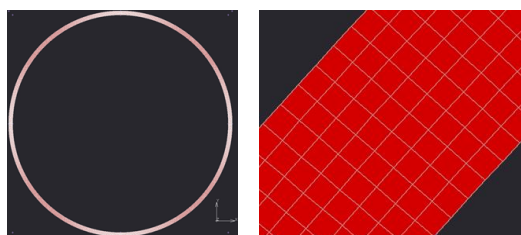
4. 2次元有限要素解析

4.1 概要

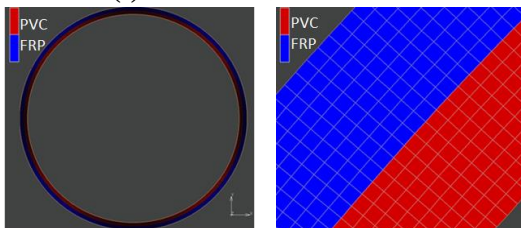
2次元有限要素解析によって、供試体①②③の偏平試験の再現解析を行った。PVC、FRPともに、四角形の平面ひずみ要素を用いた。試験に用いたFRPは螺旋状であるが、数値解析ではこれを簡易化し、円筒モデルで表現している。①PVC管単体と②FRP単体の解析モデルを図-5(a)に示す。周方向に1440分割、半径方向に8分割した。③2層構造の解析モデルを図-5(b)に示す。周方向に1440分割、半径方向にPVCを8分割、FRPを8分割とした。③2層構造では、隣り合うPVCとFRPの節点を共有とした解析（一体）と、節点を共有せず、PVCとFRPが接触している場合だけ圧縮力とせん断力を伝達する接触解析（接触）の2通りを実施した。奥行きを1mとした。解析に用いたパラメータを表-3に示す。これは、試験に用いた供試体と同じ条件で作成された試験体の実験結果に基づいている。解析では、表-1に示す偏平試験と同じ線荷重を管頂の節点に与え、管頂の変位を算出した。管底の節点を固定とした。

4.2 PVC管およびFRP単体の偏平試験再現解析

表-4に管頂の変位を示す。表-4より、①PVC管単体も②FRP単体も、2次元の有限要素解析によって良い精度で偏平量を再現できている。②のFRP単体のモデルは、3次元的な螺旋形状を2次元で簡略化した解析ではあったが、良好な精度で再現できた。以上より、モデル化および表-3の解析諸元の妥当性を検証することができたので、次に、③2層構造の再現解析を行う。



(a)①PVC 単体, ②FRP 単体



(b)PVC と FRP の複合構造 (赤：PVC. 青：FRP)

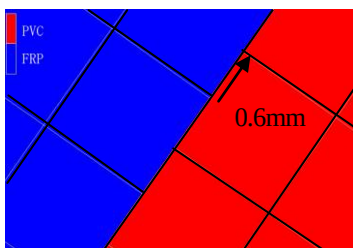
図-5 有限要素モデル

表-3 解析パラメータ

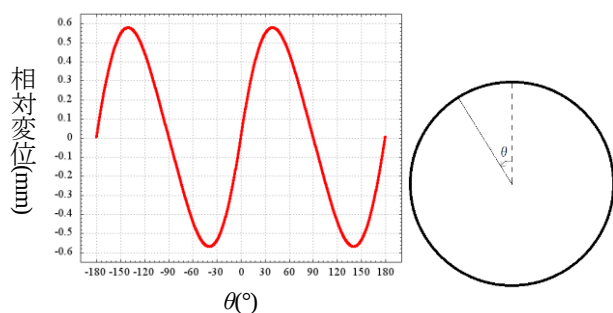
	PVC	FRP
弾性係数 (N/m ²)	2.0×10^9	3.0×10^{10}
ポアソン比	0.38	0.24

表-4 偏平試験結果と解析結果 (偏平量(mm))

モデル	偏平試験	解析	誤差(%)
①PVC 管単体	21.6	22.2	2.86
②FRP 単体	22.6	23.0	1.49
③2層構造 (一体)	22.3	13.0	41.9
③2層構造 (接触)	22.3	22.5	0.90



(a)解析モデル拡大図 ($\theta=40$, 赤：PVC. 青：FRP)



(b)管頂からの角度と2層間相対変位の関係

図-6 周方向の2層間相対変位

4.3 PVC 管と FRP の2層構造の偏平試験再現解析

隣り合う PVC と FRP の有限要素の節点を共有させ「一体」を仮定したときは、偏平試験の圧縮量 22.3mm に対して解析結果が 13.0mm となり、誤差は 41.9%と大きく、一体の仮定では実際の挙動を再現できないことがわかった。接触解析によって、PVC と FRP 間の相互作用を考慮に入れた解析を実施したところ、偏平試験の圧縮量が 22.3mm に対して解析結果が 22.5mm となり、誤差は 0.9%と、大変良好な精度で再現できていることがわかった。以上より、接触解析によって2層間の相互作用を考慮することで、本更生管の挙動を再現可能であると考え、次節では管頂の変位以外の挙動の分析を行う。

4.4 PVC 管と FRP の2層構造の挙動分析

(1) 2層間の周方向相対変位

偏平試験と同じ荷重を解析モデルの管頂に与えた後の PVC と FRP 間の周方向の相対変位 (ずれ) について考察する。管頂から40度離れた地点での解析モデルの拡大図を図-6(a)に示す。PVC と FRP が周方向にずれていることが見てとれる。この地点では約0.6mmの相対変位が発生していた。図-6(b)に管頂からの角度 θ と相対変位の関係を示す。FRP が PVC に対して θ と同じ方向にずれている場合を正とする。±40と±140度において極値をとっており、管頂、管底、管側では相対変位は認められなかった。

(2) 直ひずみ分布

次に、偏平試験と同じ荷重を管頂に载荷したときの径方向の直ひずみ分布を調べた。モデルの対称性を考慮して、(a)管頂 ($\theta=0$)、(b)最大相対変位発生箇所 ($\theta=40$)、(c)管側 ($\theta=90$) の3か所における直ひずみ分布を求めた。結果を図-7に示す。引張が正である。

接触解析では、層境界でひずみが不連続となっている。PVC および FRP 端部の直ひずみは、(a)管頂 ($\theta=0$) が最も大きく、次に(c)管側で大きく、(b)最大相対変位発生箇所 ($\theta=40$) における直ひずみは小さいことがわかる。

また、(b)(c)において、FRP の管厚中心の直ひずみはほぼ0であるのに対し、PVC 管の管厚中心の直ひずみは負の値 (圧縮) となっており、PVC の方が FRP よりも、軸方向に縮む向きにより変位していることがわかる。

なお、結果は示していないが、粘着力も摩擦係数も0として接触解析を行った場合は、PVC 管の管厚中心の直ひずみはほぼ0となったことから、この圧縮ひずみは2層間の摩擦によって発生したものであると考えられる。

剛性の大きい FRP が軸方向にほとんど変形しないのに対して、剛性の小さい PVC は軸方向に変形しやすいため、図-6(a)に示すような相対変位が生じたものと考えられる。

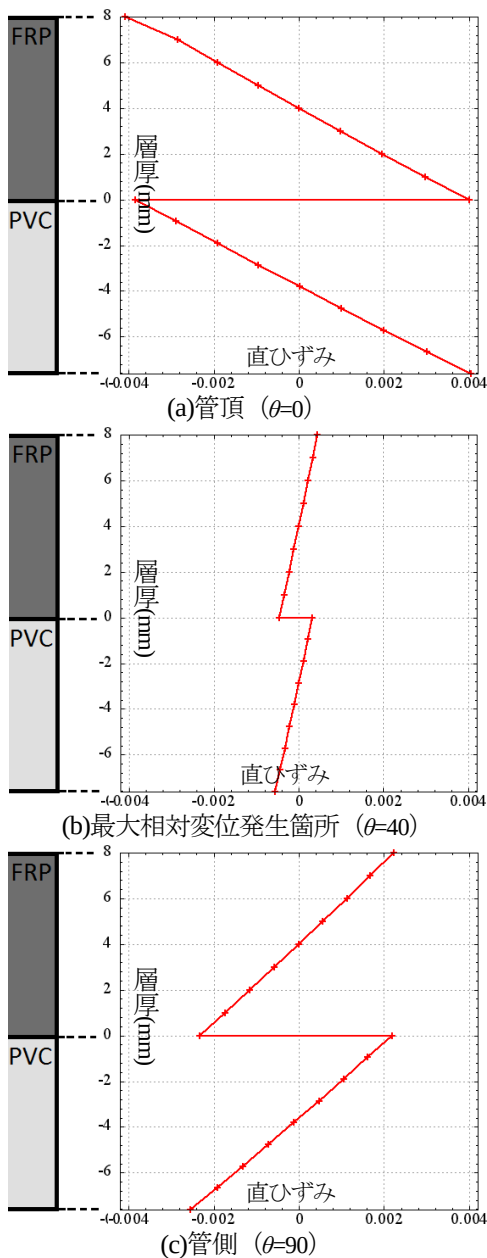
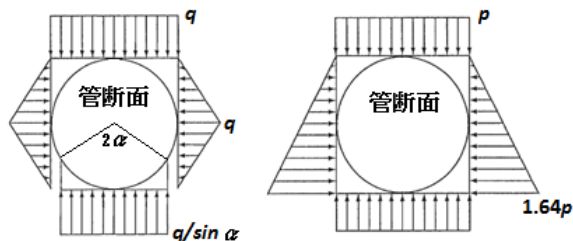
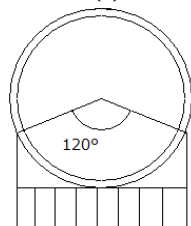


図-7 直ひずみ分布



(a)土荷重による土圧分布 (b)活荷重による土圧分布



(c) 有効支承角120° (2α=120°)

図-8 土圧分布図¹⁾

5. 接触解析による許容管厚の算定

5.1 自立管の設計

更生管の外側には既設管が存在しており、荷重は既設管を介して更生管に作用することになる。どのような荷重が更生管に作用するかは、既設管の破損状況によって異なってくる。現状の管更生の設計実務では、「既設管が存在しない」と安全側に仮定し設計をすることがスタンダードになっており、このような更生管は自立管と呼ばれている。本研究でも、現行のスタンダードを踏襲し、既設管の耐荷力を見込まず、更生材だけで外力に抵抗するように設計する自立管として設計を行うこととし、「管きょ 更生工法における設計・施工管理の手引き (案)」⁹⁾に従って設計することとした。単一材料を用いた下水道更生管の管厚算定では、更生管の曲げ強度による計算式および更生管のたわみ率による計算式の2つの計算に準じて算出した更生管厚のうち大きい方の値を採用することが定められている⁶⁾。自立管に作用する荷重は、図-8に示す土による鉛直土圧と活荷重による鉛直土圧の2つであり、管路機能の保持を考慮した5%を許容たわみ率としている⁶⁾。また、下水道更生管は既設管と同等以上の流下性能を確保するために必要な内空断面を考慮しなければならないことから、管厚の上限が定められている¹⁾。さらに、更生管の外側に水圧が作用すると、更生管の周方向に働く軸力によって、更生管が内側に座屈する可能性があることから、座屈に対して安全となるように更生管の管厚を設定することとする。

以上のことから、以下の5つの管厚の設計式を考える。

- ①PVCの曲げ強度による設計式⁶⁾
- ②FRPの曲げ強度による設計式⁶⁾
- ③たわみ率による設計式⁶⁾
- ④水理公式による必要流量に基づく設計式¹⁾
- ⑤Timoshenkoの薄肉円環座屈式⁷⁾

このうち、設計式①②③は現行の設計式を直接使用することができないため、既往研究では⁴⁾、PVC管とFRPが「独立」および「一体」を仮定したときの設計式を提案したが、本研究では、2次元有限要素法の接触解析により算定した。解析結果を、「独立」および「一体」を仮定したときの設計式と比較する。5.2では既往の設計式を、5.3ではPVCとFRPが独立と仮定したときの設計式を、5.4ではPVCとFRPが一体と仮定したときの設計式を述べる。設計式④⑤は、現行の設計式を大きく変えることなく使用できることから、5.5で設計式の概要を述べ、2層構造の場合の条件について説明する。

なお設計式①②③は、図-8(c)に示す自立管の有効支承角に依存する。規定¹⁾では、既設管の基礎施工状態に関して管周360°が地盤に囲まれ、支持されている場合の有効支承角は120°としている。また、有効支承角120°と180°で算出した更生管の管厚の間に大きな違いは見られ

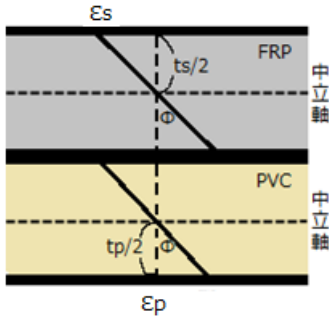


図-9 2層が独立の場合の直ひずみ分布図

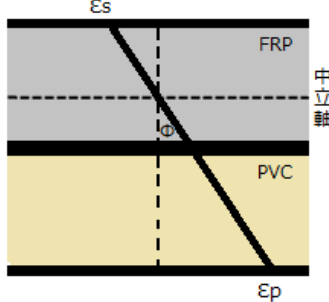


図-10 2層が一体の場合の直ひずみ分布図

ないため、有効支承角が更生管厚に与える影響が少ないことから、設計上の有効支承角は 120° とされている⁹⁾。本研究もこれに倣い、設計上の有効支承角を 120° とした。曲げ強度による算定式で使用する曲げモーメント係数と、たわみ率による算定式で使用するたわみ係数は、有効支承角 120° に対する係数を使用する。

5.2 現行の自立管更生管厚の設計式

(曲げ強度およびたわみ率による設計式)

(1) 曲げ強度による設計式

現行の曲げ強度による設計式⁹⁾では、土による曲げモーメント係数 k_1 (管頂で 0.107)、活荷重による曲げモーメント係数 k_2 (管頂で 0.079)、土による鉛直土圧 q (N/mm^2)、活荷重による鉛直土圧 p (N/mm^2)、更生管外径 D (mm)、管厚 t (mm)、管厚中心半径 r' (mm) ($r' = (D-t)/2$) を用いて、土と活荷重により発生する単位長さあたりの曲げモーメント M ($\text{N}\cdot\text{mm}$) は、

$$M = (k_1 q + k_2 p) r'^2 \quad (1)$$

で表される。この曲げモーメントによって発生する曲率 $\phi = 12M / Et^3$ より求まる最大曲げ応力 $\sigma_{\max}$ が設計曲げ強度 σ を超えないという条件から、許容管厚 t が得られる。

$$\sigma_{\max} = Et\phi / 2 < \sigma \quad (2)$$

(2) たわみ率による設計式

現行のたわみ率による設計式⁹⁾では、土によるたわみ係数 K_1 (0.070)、活荷重によるたわみ係数 K_2 (0.030)、単位長さあたりの曲げ剛性 EI ($\text{N}\cdot\text{mm}$)、管厚中心半径 r' (mm) を用いて、土と活荷重による管の鉛直方向のたわみ量の和 S (mm) とたわみ率 V (%) がそれぞれ

$$S = (K_1 q + K_2 p) r'^4 / EI \quad V = (S / 2r') \times 100 \quad (3)$$

で表される。 $r' = (D-t)/2$ と $I = t^3/12$ を代入して、

$$V = \frac{50(K_1 q + K_2 p) (D-t)^3}{EI} \frac{1}{8} = \frac{75(K_1 q + K_2 p) (D-t)^3}{Et^3} \quad (4)$$

となり、許容たわみ率が 5% であることから $V=5$ を代入し、許容管厚 t が得られる。

5.3 2層が独立している場合の自立管更生管厚の設計式 (曲げ強度およびたわみ率による設計式)⁴⁾

まず、PVC 管と FRP が独立であると仮定した管厚設計式について述べる。独立とは、図-9 のように PVC と FRP それぞれに平面保持を仮定し、かつ両者の曲率が同じで接触部において直ひずみが不連続となっている状況を仮定する。周方向のずれはないものとする。また、螺旋状 FRP の間隙を考慮するために、FRP の長手方向の剛性の割合 α というパラメータを使用する。図-1(c) のように PVC 管を FRP が完全に覆っている状態を $\alpha=1.0$ とする。

(1) 曲げ強度による設計式

管の単位長さあたりの曲げモーメントを M 、PVC の弾性係数、管厚を E_p 、 t_p 、螺旋 (Spiral) 状 FRP の弾性係数、管厚を E_s 、 t_s 、PVC と FRP の長手方向の剛性の比を α とすると、曲率 ϕ は次式となる。

$$\phi = 12M / (E_p t_p^3 + \alpha E_s t_s^3) \quad (5)$$

PVC と FRP それぞれに発生する最大曲げ応力 $\sigma_{p|\max}$ 、 $\sigma_{s|\max}$ はそれぞれの設計曲げ強度 σ_p 、 σ_s よりも小さくなくてはならないことから、次の 2 つの不等式が成り立つ。

$$\sigma_{p|\max} = E_p t_p \phi / 2 \leq \sigma_p \quad \sigma_{s|\max} = E_s t_s \phi / 2 \leq \sigma_s \quad (6)$$

この 2 つの不等式を、独立を仮定したときの曲げ強度からの設計式として使用する。

(2) たわみ率による設計式

たわみ率を表す式(4)において、曲げ剛性 EI に、 $EI = (E_p t_p^3 + \alpha E_s t_s^3) / 12$ を代入し、管厚中心半径 r' を t_p 、 t_s を用いて $r' = (D - t_p - t_s) / 2$ と表すことで、たわみ率 V (%) が得られる。許容たわみ率 5% を超えない条件

$$V = 75(K_1 q + K_2 p) (D - t_p - t_s)^3 / (E_p t_p^3 + \alpha E_s t_s^3) \leq 5 \quad (7)$$

を、独立を仮定したときのたわみ率による設計式とする。

5.4 2層が一体の場合の自立管更生管厚の設計式 (曲げ強度およびたわみ率による設計式)⁴⁾

次に、PVC 管と FRP が一体であると仮定した管厚設計式について述べる。一体とは、図-10 のように 2 層全体で平面保持が成り立ち、PVC と FRP の曲率が等しく接合部で直ひずみが連続している状態を仮定する。

表-5 水理公式による設計式

外径 (mm)	粗度 係数	必要内径 (mm)	t_p と t_s の関係
450	0.01	407.9	$t_p+t_s=21.05$
500	0.01	453.2	$t_p+t_s=23.4$
600	0.01	543.8	$t_p+t_s=28.1$
700	0.01	634.4	$t_p+t_s=32.8$

表-6 衝撃係数

土被り H (m)	$H \leq 1.5$	$1.5 < H \leq 6.5$	$6.5 < H$
衝撃係数 i	0.5	$0.65 - 0.1H$	0

(1) 曲げ強度による設計式

一体化した PVC 管と FRP による 2 層構造断面の中立軸の下端からの位置 h は次式で表される.

$$h = \{E_p t_p^2 / 2 + \alpha E_s t_s (t_p + t_s / 2)\} / (E_p t_p + \alpha E_s t_s) \quad (8)$$

一体化の状態での単位長さあたりの曲げ剛性 EI は

$$EI = b \left\{ \int_{-h}^{-(h-t_p)} E_p y^2 dy + \alpha \int_{-(h-t_p)}^{t_p+t_s-h} E_s y^2 dy \right\} \quad (9)$$

となるので, 単位長さあたりの曲率 ϕ は次式となる.

$$\phi = (M/b) / \left\{ \int_{-h}^{-(h-t_p)} E_p y^2 dy + \alpha \int_{-(h-t_p)}^{t_p+t_s-h} E_s y^2 dy \right\} \quad (10)$$

更生管に発生する最大の曲げ応力が, 曲率 ϕ と曲げ弾性係数, そして中立軸から表面までの距離の 3 つの値の積で表されることから, PVC 管と FRP それぞれに発生する最大曲げ応力と設計曲げ強度についての不等式が

$$\sigma_p|_{\max} = E_p \phi h \leq \sigma_p \quad (11)$$

$$\sigma_s|_{\max} = E_s \phi (t_p + t_s - h) \leq \sigma_s \quad (12)$$

の 2 式として得られる. この 2 式を, 一体を仮定した場合の曲げ強度による設計式とする.

(2) たわみ率による算定式

式(9)の一体化状態での曲げ剛性 EI を式(4)の EI に代入し, 管厚中心半径 $r' = (D - t_p - t_s)/2$ を代入すると, たわみ率が得られる. 許容たわみ率 5% を超えない条件

$$V = \frac{50(K_1 q + K_z p)(D - t_p - t_s)^3}{EI \cdot 8} \leq 5 \quad (13)$$

を, 一体を仮定したときのたわみ率による設計式とする.

5.5 自立管更生管厚の設計式 (その他)

(1) 水理公式による必要流量に基づく設計式

下水道更生管は既設管と同等以上の流下性能を確保するために必要な内空断面を考慮しなければならない¹⁾. 更生管は既設管に比べて断面が縮小するが, 既設管である鉄筋コンクリート管に対して更生管の PVC の粗度係数が小さいことにより断面縮小が可能となっている.

PVC による更生管内面の流速及び流量の計算にはマニング式が用いられており, マニング式によると, 中口径下水道更生管の中でも代表的な外径である 450mm, 500mm, 600mm, 700mm それぞれについて管厚の上限を求めた結果は表-5 のとおりである.

(2) Timoshenko の薄肉円環座屈式

FRP が荷重を受け持ち, PVC 管が外水圧に耐えて土砂や地下水の侵入を防ぐ役割を持つため, PVC 管については 2 層構造管の考え方により, 次の Timoshenko の薄肉円環座屈式を使用する⁷⁾.

$$t_p = \frac{R}{\left(\frac{2CKE_L}{P_w N(1-\nu^2)} \right)^{1/3} + 1} \quad (14)$$

ただし, t_p : PVC 管厚(mm), R : PVC 管外径(mm), C : 楕円変形率(0.64), K : サポート向上係数(7.0), P_w : 地下水圧(N/mm²), N : 安全率(2), ν : ポアソン比(0.30), E_L : 長期曲げ弾性係数である. C : 楕円変形率は, 更生管に土圧が作用する場合は 0.64, 更生管には外水圧のみが作用する場合は 1.0 と規定されており⁷⁾, 本研究では 0.64 を用いた. 楕円変形率 C の値は, 既設管の楕円率 (平均内径-最小内径)/(平均内径)×100, または(最大内径-平均内径)/(平均内径)×100 から算定され, 更生管に土圧が作用する場合は 5%, 外水圧のみが作用する場合の楕円率は 0% の仮定のもとに値が設定されている. また, 本研究における更生管は複合構造を持つため, $R=D-2t_s$ を代入する. この管厚計算式は, PVC 管が外水圧に耐えられるよう定められる管厚の下限を表すものであり, PVC 管の管厚設計にのみ適用する式である.

5.6 PVC 管と FRP の許容管厚の算定条件

(1) 算定に用いる物性値

自立管の設計に用いる更生材の曲げ弾性係数および曲げ強度は, 長期試験値を品質のバラツキを考慮に入れた安全度で除した値を使用するとされている⁸⁾. これらを考慮に入れた値として, PVC 管については設計曲げ弾性係数 $E_p=1041\text{N/mm}^2$, 設計曲げ強度 $\sigma_p=12.8\text{N/mm}^2$ を使用する⁸⁾. FRP については, 実験結果をもとに算出された設計曲げ弾性係数 $E_s=12500\text{N/mm}^2$, 設計曲げ強度 $\sigma_s=160\text{N/mm}^2$ を使用する. 設計曲げ弾性係数 12500N/mm^2 は, 長期試験値を短期試験値である実験結果 30000N/mm^2 の半分とし, さらに安全率 1.2 で除することを得た.

(2) 算定条件

荷重条件として埋設位置は地下 5m, 地下水位 1m, 車両重量 T-25 を設定した. 土による鉛直土圧 q (N/mm²) はヤンセン公式を用いた.

$$q = \left(\frac{\gamma \cdot B_d}{2} - f \right) \cdot \left(\frac{1 - e^{-2K_d \mu H/B_d}}{K_d \mu} \right) \quad (15)$$

γ : 土の単位体積重量 ($1.8 \times 10^6 \text{ N/mm}^3$), B_d : 仮想掘削溝幅 (外径400mmのとき1200mm, 外径500mmのとき1250mm, 外径600mmのとき1400mm, 外径700mmのとき1450mm), μ : 埋め戻し土と側壁との摩擦係数 ($=\tan 30^\circ$),

$K = (\sqrt{\mu^2 + 1} - \mu) / (\sqrt{\mu^2 + 1} + \mu)$: 埋め戻し土の主働土圧係数, H : 土被り (5000mm), f : 埋め戻し土の粘着力 (0.0 kN/mm^2) として, $q = \gamma H = 4.48 \times 10^{-2} \text{ (N/mm}^2\text{)}$ を得た.

活荷重による鉛直土圧 $p \text{ (N/mm}^2\text{)}$ については, 道路の場合は自動車による活荷重として日本道路協会「道路橋示方書・同解説」⁹⁾の活荷重の影響に準じた計算式を用い, P : 後輪荷重 (100000N), C : 車体占有幅 (2750mm), a : タイヤの接地長さ (200mm), θ : 荷重の分散角 (45°), i : 衝撃係数 (表-6), β : 断面の低減係数 (0.9) として,

$$p = \frac{2P(1+i) \cdot \beta}{C(a + 2H \tan \theta)} \quad (16)$$

により, $p = 7.38 \times 10^{-3} \text{ (N/mm}^2\text{)}$ を使用する.

また, 埋設位置は地下 5m で地下水位 1m であることから Timoshenko の薄肉円環座屈式(14)における P_w : 地下水压 (N/mm^2) を, 水の単位体積重量を $1.0 \times 10^5 \text{ (N/mm}^2\text{)}$ として, $P_w = (5000 - 1000 + D/2) \times 10^5 \text{ (N/mm}^2\text{)}$ とし, 更生管外径 450mm, 600mm, 700mm ごとにその値を求めた. また, FRP の隙間はなく, $\alpha = 1$ とした.

5.7 PVC 管と FRP の許容管厚の算定方法

5.1 で述べた 5 つの管厚の算定式のうち, ④水理公式による必要流量に基づく設計式については表-5, ⑤ Timoshenko の薄肉円環座屈式については式(14)を用いる. ①PVC の曲げ強度による設計式, ②FRP の曲げ強度による設計式, ③たわみ率による設計式については, 次の 3 通りの方法で求める.

(1) 接触解析により算定する場合

2 次元有限要素法の接触解析を用いて許容管厚を算定する場合は, 5.6(2) の q の値を代入して土荷重による土圧分布 (図-8(a)) を求め, さらに p の値を代入した活荷重による土圧分布図 (図-8(b)) も求め, これらを合わせた土圧を解析モデルの外側の節点に载荷した. ①②については, 最大曲げモーメントの発生する管頂において, PVC と FRP に発生する最大応力をそれぞれ求め, 許容応力よりも小さいことで許容できる管厚であるかどうかを判断した. ③については, 管頂におけるたわみ率が 5%以下かどうかで許容できる管厚かどうかを判断した.

PVC の管厚を 0.5mm から 0.5mm 刻みで増加させ, FRP も管厚を 0.5mm から 0.5mm 刻みで増加させ, それぞれの PVC の管厚に対して, 許容される最小の FRP の管厚を求めた. 有限要素解析における要素分割は, 3 章と同じで, 周方向に 1440 分割, 半径方向に PVC, FRP ともに 8 分割とした.

(2) 2 層の独立を仮定した設計式により算定する場合

5.6(2) の q と p の値を式(1)に代入して最大曲げモーメントが発生する管頂の曲げモーメントを求め, 式(6),(7)により許容される PVC と FRP の管厚を求めた.

(3) 2 層の一体を仮定した設計式により算定する場合

5.6(2) の q と p の値を式(1)に代入して最大曲げモーメントが発生する管頂の曲げモーメントを求め, 式(11)-(13)により許容される PVC と FRP の管厚を求めた.

5.8 PVC 管と FRP の許容管厚の算定結果

自立管の設計において, 管厚は①～⑤の設計式を全て満たさなければならない. そこで各式をグラフ化し, 許容できる PVC 管厚 t_p と FRP の管厚 t_s の組み合わせを可視化する. 座標系は (t_p, t_s) 平面とし, 更生管外径 450, 600, 700mm の 3 通りに対して, FRP 間に間隔を空けない場合 ($\alpha = 1.0$) について, 2 層の独立を仮定した場合, 接触解析による場合, 2 層の一体を仮定した場合, それぞれの許容管厚のエリアの比較を図-11,12,13 に示す. 許容な管厚 t_p と t_s の組み合わせの領域は, 図中の緑色で塗りつぶしたエリアである. 2 層構造でも, 一般的な自立管設計式と同様に, 曲げ強度による計算式よりもたわみ率による計算式の方が大きな値をとる傾向が見られたので, ③たわみ率による設計式と④必要流量による設計式と, ⑤ Timoshenko による設計式で囲まれるエリアとなった. したがって, 600mm と 700mm の接触解析の結果では, ①②のグラフは示さず③④⑤のグラフのみ示している.

グラフの傾向を見ると, 接触解析から求まる許容管厚の限界を表す曲線は, 2 層の独立を仮定したものに近いくことが分かる. これは, 4 章の接触解析で明らかとなったように, 2 層の間で直ひずみが一不連続となっている状態は, 一体よりも独立の仮定に近いためであると考えられる. また, 接触解析で得られた許容管厚の範囲は, 独立を仮定した算定式よりも広く, 一体を仮定した算定式よりも狭いことがわかる. 図-11,12,13 の(a)と(b)の比較より, ③たわみ率と⑤ Timoshenko の座屈式の交点から求まる, 必要総管厚である $t_p + t_s$ の値の最小値は, 2 層の独立を仮定したときよりも接触解析の方が約 1mm 低減できることが分かる.

この理由を調べるため, 管頂に発生する曲げモーメント, 曲率, 曲げ剛性を求めた. 比較を図-14 に示す.

管頂に発生する曲げモーメントは, 接触解析では管頂の 16 要素に発生する応力を積分することによって求めた. 独立と一体の場合は理論式である式(1)により求めた. なお, 一体モデルに対して有限要素法で得られた応力を積分して曲げモーメントを求めたが, 理論式と 1%程度の誤差でほぼ同じ値を得られることを確認済みである. 管頂の曲げモーメントは, 独立 $\equiv$ 一体 $>$ 接触, となっており, 接触解析では独立と一体に比べて約 5%小さい値となった. これは, 2 層の間での周方向のずれを考慮することによって, 管頂部の最大曲げモーメントが低減されたためと考えられる.

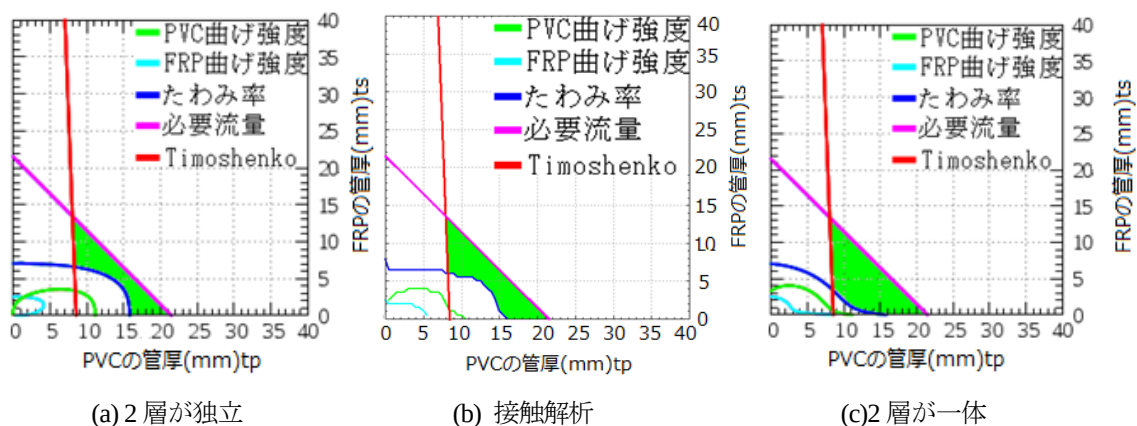


図-11 PVC管の許容管厚 t_p とFRPの許容管厚 t_s (更生管外径450mm, $\alpha=1.0$, 緑色の領域が許容領域)

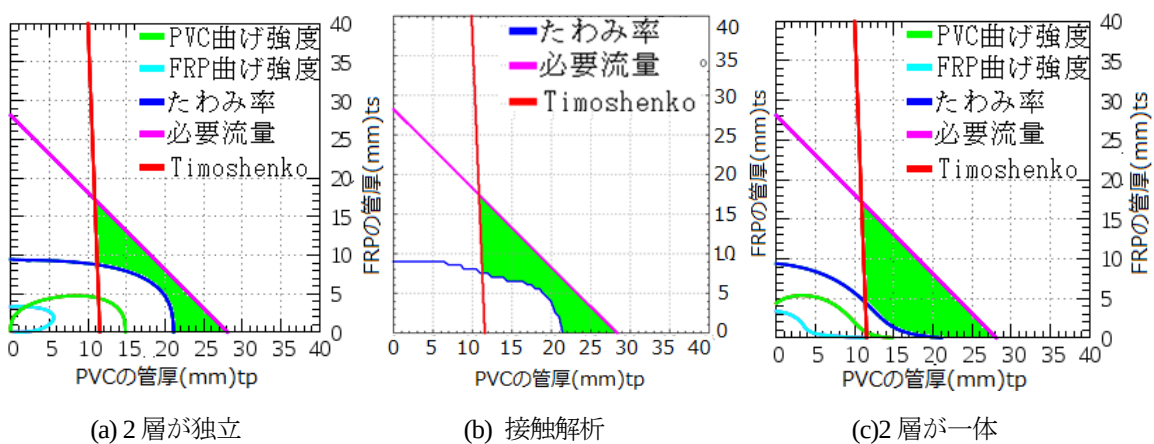


図-12 PVC管の許容管厚 t_p とFRPの許容管厚 t_s (更生管外径600mm, $\alpha=1.0$, 緑色の領域が許容領域)

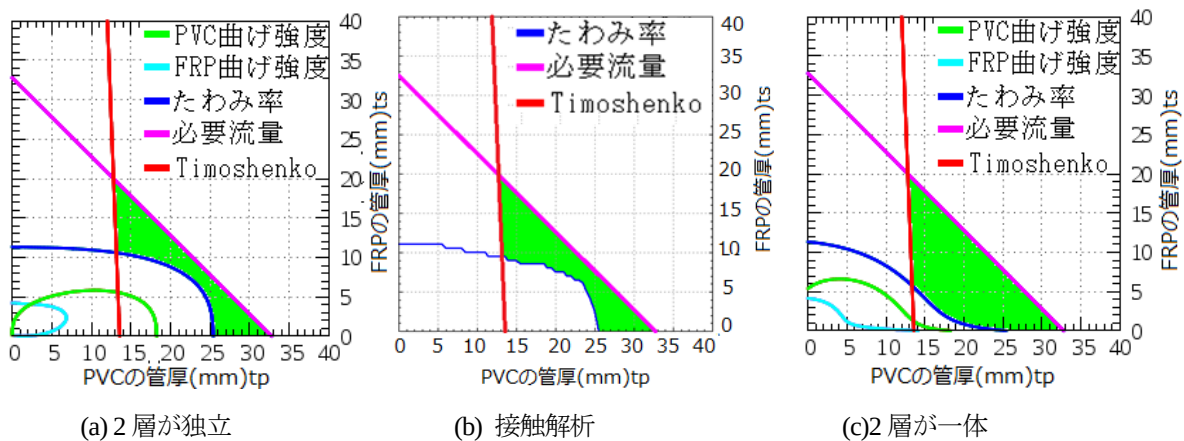


図-13 PVC管の許容管厚 t_p とFRPの許容管厚 t_s (更生管外径700mm, $\alpha=1.0$, 緑色の領域が許容領域)

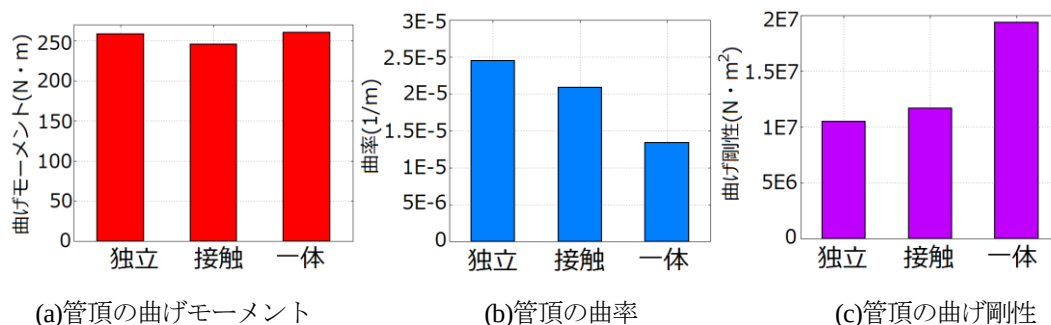


図-14 管頂の曲げモーメント・曲率・曲げ剛性の比較

管頂に発生する曲率は、接触解析では管頂の 16 要素に発生する直ひずみの勾配をとることによって求めた。独立>接触>一体、となり、接触解析では独立の仮定に比べて、約 14%の低減となった。接触解析では摩擦による抵抗がある上に、管頂曲げモーメントが約 5%小さいため、独立の仮定よりも曲率が小さくなったものと考えられる。

管頂の曲げ剛性は、曲げモーメントを曲率で除することによって求めた。独立<接触<一体、となり、接触解析では独立の仮定よりも曲げ剛性が約 11%増加することがわかった。

以上のように、2 層間の周方向のずれを考慮することによって、最大曲げモーメントの発生する管頂における曲げモーメントが低減でき、さらに摩擦による抵抗を考慮することによって、2 層モデルの見かけの曲げ剛性が独立状態よりも増加することがわかった。以上の理由により、接触解析によって必要管厚を算定する場合は、独立を仮定した設計式を用いるときよりも、必要総管厚を 1mm 程度低減できるものと考えられる。2 層間のずれと摩擦を考慮に入れた設計によって、より経済的な設計が可能となる可能性のあることが明らかとなった。

2 層の一体化を仮定した場合は、必要総管厚である t_p+t_s の値が最小となり、独立の場合より 3~5mm 程度薄くできるだけでなく、 t_p と t_s 組み合わせの幅も広がることから、2 層間の摩擦力の向上や、施工時に接着や突起を引っ掛けるなどの工夫によって、PVC と FRP を一体化させる仕組みを作ることができれば、より少ない材料で強度の確保が実現できると期待できる。施工コストや施工方法については今後の課題としたい。

6. まとめ

本研究では、中口径下水道更生管における新工法として、既存の PVC 管に剛性の高い螺旋状 FRP を組み合わせた 2 層構造に対して検討を行った。

まず更生材として用いる PVC 管、螺旋状 FRP、および両者を重ねた 2 層構造の偏平試験結果を、2 次元有限要素解析で再現した。その結果、以下の知見が得られた。

- 1) 2 層の一体化を仮定した数値解析では、剛性を過大評価し、偏平量を過小評価することがわかった。
- 2) 2 層間の接触、ずれ、摩擦等の相互作用を考慮に入れた接触解析によって、2 層構造の偏平試験結果を良好な精度で再現できることを確認した。
- 3) 接触解析より、管頂から 40 度、140 度離れた地点で、2 層間の周方向のずれの大きさの絶対値が最大となること、径方向の直ひずみ分布は、2 層の境界で不連続であることを確認した。

以上のように、2 層間の接触および摩擦といった相互作用を考慮に入れた数値解析によって、本更生管の挙動の特徴を明らかにすることができた。

接触解析の妥当性が示されたと考え、接触解析により設計条件を満たす許容管厚の範囲を算定した。そして、提案済の、2 層間の独立を仮定した設計式と、2 層間の一体化を仮定した設計式によって求めた許容管厚の範囲と比較した。その結果、以下の知見が得られた。

- 4) 接触解析によって得られた許容管厚のグラフは、一体よりも独立を仮定したときの許容管厚のグラフに近いことがわかった。
- 5) 接触解析により、2 層間の周方向のずれと摩擦等を考慮することによって、独立の仮定に比べて、管頂に作用する曲げモーメントが約 5%低減され、曲げ剛性は約 11%増加した。その結果、必要総管厚を 1mm 程度低減できることがわかった。

以上のように、更生管の管厚をどの程度薄くできるかを、既往の「独立」および「一体」を仮定した管厚設計式との比較を通して明らかにすることができた。

謝辞

クボタシーアイ(株)の原田孝知様、堀智明様、中村良一郎様および関係の皆様には、研究を進めるにあたり様々なサポートをして頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 社団法人 日本下水道協会：下水道用硬質塩化ビニル管 (JSWAS K-1)，2010.
- 2) 財団法人 下水道新技術推進機構：下水道管きよの更生工法—形成工法・熱形成タイプ—および取り付け管の修繕工法 EX 工法，2009.
- 3) 財団法人 下水道新技術推進機構：下水道管きよの更生工法—製管工法— ダンビー工法，2010.
- 4) 清野純史，古川愛子，坂田賢亮，Freddy Duran：塩化ビニル管と螺旋状 FRP を用いた中口径下水道更生管に関する基礎的研究，構造工学論文集，Vol.59A，pp.957-966，2013.
- 5) 財団法人 日本規格協会：「紙及び板紙-静及び動摩擦係数の測定方法 (JIS P 8147：2010)」，pp.2-13，2010.
- 6) 社団法人 日本下水道協会：管きよ更生工法における設計・施工管理ガイドライン案，2011.
- 7) 財団法人 下水道新技術推進機構：管きよ更生工法 (二層構造管) 技術資料，2006.
- 8) 財団法人 日本規格協会，日本プラスチック工業連盟：「プラスチック—曲げ特性の求め方 (JIS K -7171)」：pp.18，2008.
- 9) 日本道路協会：「道路橋示方書・同解説」：2012.

(2014 年 9 月 24 日受付)

(2015 年 2 月 1 日受理)