

更生部材と既設管の付着強度が 製管工法の補強効果に与える影響

島根大学学術研究院

石井 将幸・上野 和広

積水化学工業株式会社

渡辺 充彦・垣根 伸次・菊池 隆太

株式会社太陽建設コンサルタント

森脇 陽花

1. はじめに

多くの社会インフラと同様に、管きよの老朽化は重大な社会問題として認識されている。地中に埋設され、中を水が流れる管きよは日常的な保守点検が困難であり、突発的な事故による機能停止や第三者被害が増加している。そのような老朽管きよを非開削で補修・補強する手法として、管路更生工法が用いられるようになった。この手法は既設管の内側に補強部材である内管を構築し、管きよの長寿命化を図るというものである。

管路更生工法に現在用いられている設計法の特徴として、既設管と更生部材（内管）の相互作用が極めて単純化されているという点がある。更生管の設計法には自立管設計（既設管の存在を無視しすべての荷重を内管が受けると仮定する）、複合管設計（既設管と内管が一体化した構造がすべての荷重を受けると仮定する）、二層構造管設計（多くの場合、管外からの荷重は既設管のみが、管内からの荷重は内管のみが受けると仮定する）の3つがあり、工法、構造や材料の特性に応じて使い分けられている。これらのうち、既設管と内管の間の荷重伝達を考慮するものは複合管設計のみであるが、通常は既設管と内管の剥離は想定されず、完全な一体化が仮定される¹⁾。

本報では、ヒューム管を製管工法で更生した更生管に対し、付着状態を変化させた実物大供試体の載荷試験を実施した結果を報告する。そ

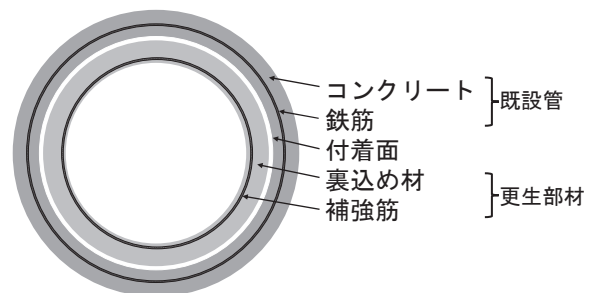


図1 製管工法でRC管を更生した管の概要

の中で既設管と内管が剥離した更生管の力学的挙動と、部分的な剥離が伝播する危険性について検証する。加えて既設管と更生部材の剥離と、剥離後の接触を考慮した解析手法の開発を行い、試算の結果を示して試験結果との整合性について検討を加える。

2. 複合管設計の課題

本研究で対象とした更生管は、製管工法に分類されるSPR工法によるものである。この工法では、既設管の内側に補強筋を備えた表面部材で内管の表面を設置し、表面部材と既設管の間を裏込めモルタルで充填、硬化させて更生部材を構築し、既設管と一体化させる。裏込めモルタルは強度、剛性に加えコンクリートとの付着性を持つため、RC構造を持つ既設管の更生に適している。製管工法による更生管のうち、強度や剛性に寄与する部分の概要を図1に示す。

RCの既設管を製管工法で更生する際の設計

には、既設管と更生部材の付着性の高さから複合管設計が用いられることが多く、既設管と更生部材が剥離する危険性は考慮されない。もし付着面の剥離に先立って初期ひび割れが生じるのであれば、完全な一体化を仮定したフレーム解析でも初期ひび割れ荷重を正確に求めることができる。加えて更生管が破壊されるまで剥離が生じないのであれば、フレーム解析ですべての設計計算が可能となる。一体性が保たれる限界の評価や、剥離後の挙動の検証を通して剥離を考慮する必要性を確認し、複合管設計の適用限界とともに、必要な解析の手法を再構築することが必要である。

3. 実寸供試体を用いた载荷試験

3.1 供試体と試験の概要

既設管と更生部材の付着状態が更生管の強度や剛性に与える影響を調べるために、更生管の

表 1 载荷試験における付着条件

名称	付着条件	試験数
NF	フィルムなし（全体が付着）	3
F30	管頂部 30 度の範囲にフィルム	3
F60	管頂部 60 度の範囲にフィルム	3
F360	全体にフィルム	3

表 2 载荷試験対象の既設管と更生部材の諸元

構造条件	既設管	更生部材
内径 (mm)	800	740
管厚 (mm)	66	30
配筋量 (mm ² /m)	707 (外側) 962 (内側)	650 (単鉄筋)
かぶり (mm)	21.0 (外側) 22.5 (内側)	10 (内面)
管長 (mm)	800	

物性値	既設管		更生部材	
	コンクリート	鉄筋	モルタル	補強筋
圧縮強度 (MPa)	67.8	704	115	408
引張強度 (MPa)	4.45	713	4.98	408
弾性係数 (GPa)	34.5	200	29.5	207
ポアソン比	0.2	0.3	0.2	0.3

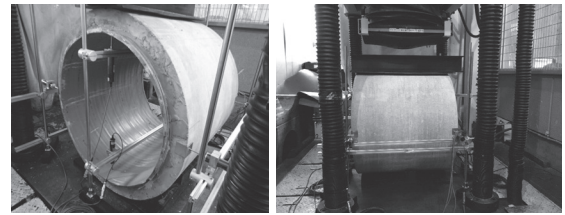


図 2 载荷試験の供試体と载荷装置

実物大供試体を作製し、外部から線荷重を与えて破壊させる試験を行った。新品のヒューム管を既設管に用い、そのまま更生して良好な付着状態が期待される条件と、既設管内面と裏込めモルタルの間にフィルムを挟み、付着のない条件との組み合わせで条件付けを行った。供試体の付着条件は表1に示すとおりであり、全体が付着したもの、全く付着していないものに加え、充填不良を想定し一部が付着していないものを設定している。フィルムを貼りつけた範囲の大きさは管断面の中心からみた角度で表現されている。なお表1に示したように、本実験では12個の供試体を用いている。試験結果の比較を行うために12個全てで既設管の条件が同一である必要があるが、条件の均一な劣化管を多数用意することは困難である。そのため、新品のヒューム管を既設管に用いることとした。

既設管と更生部材の諸元を材料特性と併せて表2に示すとともに、試験の様子を図2に示す。既設管は複鉄筋のヒューム管である。これらの更生管供試体を横置きし、上面から線荷重を作用させて荷重と変位を測定した。

3.2 载荷試験の結果

载荷試験で得られた結果のうち、図3に全体の付着が良好な場合の結果を、図4に付着が一切生じないようにした場合の結果を示す。なおF360-1は試験結果の記録が取られておらず欠番である。付着の有無によって両者には荷重や変位が小さい領域から剛性に差異があり、最大荷重にも開きがある。境界面が一体化している場合は、既設管と補強部材が一体の厚いはりとして曲げを受ける一方、付着がない場合は二重

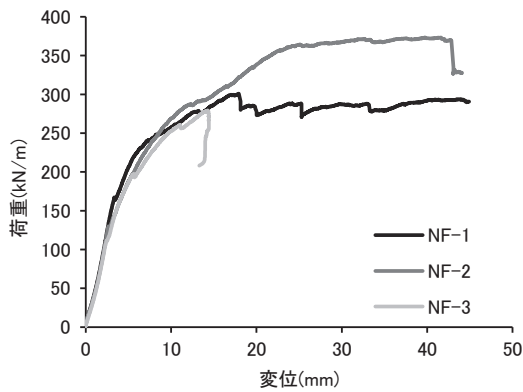


図3 全体が付着した供試体の載荷試験結果

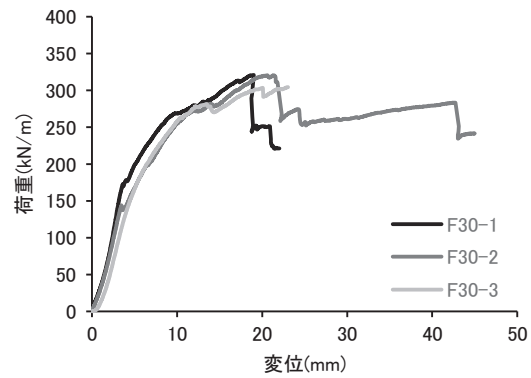


図5 付着不良が狭い供試体の載荷試験結果

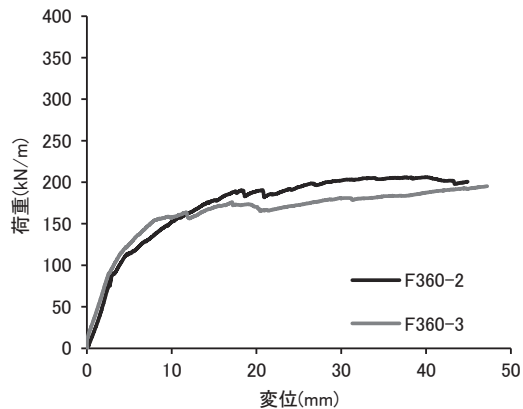


図4 付着のない供試体の載荷試験結果

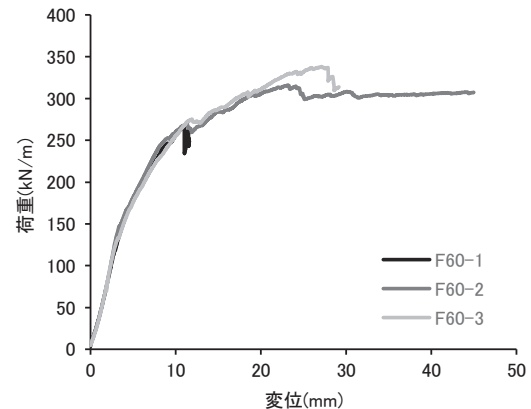


図6 付着不良が広い供試体の載荷試験結果

ばりとして働く。両者の曲げ剛性の違いが、変位や強度の差異の原因と考えられる。

続いて管頂部にのみフィルムを貼り、局所的に付着のない領域を作った試験の結果を図5と図6に示す。最大荷重やそれが生じる変位などに、両方で顕著な差異は見られない。また10mmで約250kN、20mmで約300kNという変位と荷重の組み合わせは、全体が付着したNFともほぼ等しい。管頂部に全体の1/12から1/6程度の付着不良が生じていても、その他の部分の付着強度が清浄なコンクリート表面と裏込めモルタル間程度のものであれば剥離の伝播は生じず、破壊に至るまで補強効果は保たれると言える。

4. 有限要素法による接触解析

4.1 接触解析の概要

既設構造物と補強部材の剥離は構造耐力や剛性の低下を引き起こすため、剥離が生じる荷重

の大きさ、剥離の起点位置とその後の伝播の予測は、補強構造物の設計において極めて重要である。加えて更生管においては、剥離後に生じる既設管と更生部材の接触を考慮しなければならない。構造物の外側を補強する一般的な補強構造物とは異なり、図1に示したように更生管では既設管の内側に補強部材が存在する。そのため既設管と剥離した構造部材が接触し、荷重の伝達と変形の拘束が生じる可能性がある。剥離後の挙動を把握するためには、接触解析を用いなければならない。

そこで本研究では、剥離とその後の接触解析が可能なプログラムとして、Femap with NX Nastran Version 2022.1のBasicにMultistep Nonlinearを加えたもの(以下Nastranとする)を用いた。剥離の可能性がある境界面をあらかじめ指定し付着強度を設定しておくことで、付着強度を上回る応力が作用した際に境界面を剥離させることができる。付着強度は境界面の引

表3 解析モデル上の既設管と更生部材の諸元

構造条件	既設管	更生部材
内径 (mm)	800	730
管厚 (mm)	66	35
配筋量 (mm ² /m)	393 (単鉄筋)	621 (単鉄筋)
内面かぶり (mm)	33	10

物性値	既設管		更生部材	
	コンクリート	鉄筋	モルタル	補強筋
圧縮強度 (MPa)	55.8	688	69.8	205
引張強度 (MPa)	3.36	688	5.97	205
弾性係数 (GPa)	34.2	200	24.9	165
ポアソン比	0.2	0.3	0.2	0.3

張方向とせん断方向を個別に設定することで、引張剥離とせん断剥離を再現することが可能である。加えて剥離後に生じた2つの表面の接触を判定できるため、表面を介した荷重の伝達を考慮した結果が得られる。

4.2 解析の対象と条件

この解析で想定する既設管と更生部材の諸元を表3に示す。既設管は載荷試験のものとは異なる単鉄筋のヒューム管であり、更生部材も補強筋を有している。載荷試験と同じ複鉄筋のヒューム管を既設管とした更生管の解析を実施したところ、荷重と変形が小さい領域で解析の収束が得られなくなるという問題が生じた。後述するように、この解析では更生管を多層の管としてモデル化している。鉄筋層が多くなる複鉄筋の管に対して信頼できる解析結果が得られないことが判明したため、単鉄筋のヒューム管を既設管とした解析を行うこととした。

解析モデルを管軸方向の長さ8.25mmの3次元モデルとし、管軸方向には要素を1層のみ配置した。解析モデルは管軸方向の両端面に相当する表面を2つ持ち、すべての節点はいずれかの端面上に位置している。

管外からの線荷重による載荷試験を模擬するため、管の上下端を水平方向、加えて下端を

鉛直方向に固定し、上端に1ステップあたり0.1mm、下向きの強制変位を与えて増分解析を行い、各ステップにおける反力の値を算出した。これを非線形解析の収束が得られなくなるまで繰り返した。

既設管の鉄筋と更生部材の補強筋については、配筋に基づいて管長8.25mm分の鉄筋量を算出し、その断面積を持つ板として配置した。そして外側から既設管外側、鉄筋、既設管内側、裏込めモルタル外側、補強筋、裏込めモルタル内側の6層構造のモデルとして更生管を表現した。これらの層間に存在する5つの境界面に対し、既設管内側と裏込めモルタル外側の間の境界面を剥離の可能性がある面とした。一方、残り4つの境界面については、すべての解析において完全に一体化した面とした。剥離の可能性がある面に設定した付着強度は、無限大（完全一体化）と0（付着なし）の2とおりである。

各材料の強度は表3に示したとおりである。Nastranは金属製の機械や構造物を主に扱うプログラムであり、コンクリートや裏込めモルタルの物性を正確に再現するのは困難である。本解析ではすべての材料に対し、引張側と圧縮側の両方で、応力が強度に達するまでは表3に示した弾性係数を持つ線形弾性体とし、応力が強度に達した以降は、弾性係数の値が0.01倍に低下するものとした。

4.3 解析の結果

図7に、既設管内面と裏込めモルタルの境界面が完全に一体化した条件と、付着の全くない条件における解析結果を示す。反力は管長1mあたりの値に換算したものである。一体化した更生管の方が、付着のないものと比較して高い剛性を持っているという結果が得られている。既設管や更生部材の条件が異なるため載荷試験の結果と直接比較することはできないが、載荷試験の結果と合致した結果であると言える。

また両者とも、荷重と変位が増すにつれてグラブの傾きが減少している。これは更生管の剛

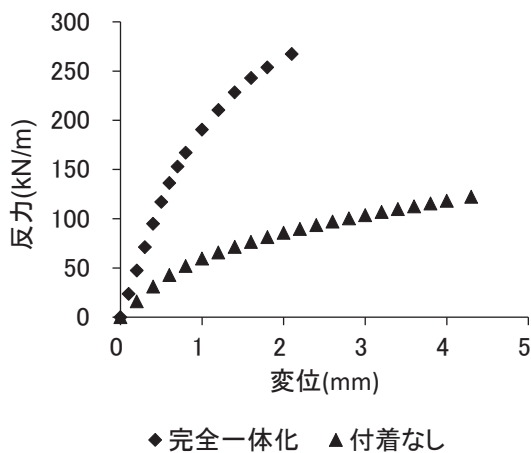


図7 完全一体化と付着なしの解析結果

性が低下していることを表しており、局所的な材料破壊による全体的な構造剛性の低下を再現できているとみられる。

5. おわりに

既設管と内管の一体性が全体的に損なわれると、更生管の剛性と強度が大幅に低下することが載荷試験によって確かめられた。また接触解析による試算では、この試験結果と合致する計算結果も得られた。

加えて付着が良好な場合には、部分的な剥離が生じても終局状態に至るまで、大規模な剥離の伝播が発生しないことも確認された。既設管と内管の一体性が荷重や変位のかなり大きい領域まで保たれるという、複合管設計の仮定に近い結果であると言える。

しかし、いかなる場合にも複合管設計が適用可能である、ということが明らかになったわけではない。接触解析の本領は、実測値に基づく付着強度を設定した解析で初めて発揮される。一般的な引張方向の付着強度測定に加え、せん断方向の付着強度を測定する手法も開発され

た^{2), 3), 4)}。既設管コンクリートと裏込めモルタルの付着強度を測定し、その値に基づいた解析の実施が急務である。加えて更生時における既設管内面の状態が付着強度に与える影響を明らかにし、製管工法の施工管理条件を明らかにしていかなければならない。

これらと並行してコンクリートと裏込めモルタルの材料モデルを見直すとともに、複鉄筋のヒューム管で解析の収束が得られなくなる原因を明らかにすることが必要である。接触解析の精度をより高めることで、複合管設計の適用限界とより高度な更生管設計手法を確立したい。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 学術研究助成基金助成金 基盤研究 (C)「接触解析を用いた管路更生工法の設計手法高度化に関する研究」(課題番号: 21K05829, 代表: 石井将幸) の助成を受けて行いました。記して謝意を表します。

引用文献

- 1) 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 2017 年版, 3-31-3-43, 2017.
- 2) 上野和広, 浅野純平, 長東 勇, 石井将幸, 西山竜朗: 無機系材料間のせん断付着強度の評価に関する基礎的研究, 農業農村工学会論文集, 308, pp. I_17-I_25, 2019.
- 3) 上野和広, 森本由利子, 石井将幸, 長東 勇: 一面せん断試験でせん断付着強度を評価するためのクランプ間距離, 農業農村工学会論文集, 309, pp. I_339-I_348, 2019.
- 4) 上野和広, 森山翼, 石井将幸, 長東 勇: 一面せん断試験による無機系材料間のせん断付着強度の評価手法, 農業農村工学会論文集, 312, pp. I_103-I_109, 2021.