

下水道管渠更生工法の設計法に関する実験的検討

～更生管に対する老朽既設管の基礎効果～

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE DESIGN PROCEDURE OF REHABILITATION FOR SEWER PIPES AND CONDUITS

～THE BEDDING EFFECTS OF THE EXISTING PIPE ON THE REHABILITATION PIPES～

高橋良文*・出口敏行**・李 黎明***・埴原 強****・栗木 実****

Yoshifumi TAKAHASHI, Toshiyuki DEGUCHI, Liming LI, Tsuyoshi HAIBARA and Minoru KURIKI

Focused on the bedding effects of existing host pipes on the flexible liners for the pipe rehabilitation, in this study, earth pressure and deformation behavior of flexible liners for different deterioration conditions of the host pipes were investigated through a full-scale loading test, a series of centrifuge model tests and FEM numerical analysis. The bedding effects of the host pipes were quantitatively analyzed. It was clarified that the external loads acting on the flexible liners were mitigated, since the deteriorated host pipe partially supported the external loads in response to the deterioration degrees, such that the bending strain and vertical deflection of the flexible liner were restrained. A reasonable design methodology for pipe rehabilitation should reflect such bedding effects.

Key Words : centrifuge model test, sewer, rehabilitation, bedding effects, design

1. まえがき

現在下水道老朽管渠の更生法としてさまざまな工法が実用化されている。このうち、既設管の損傷が小さく、構造部材として機能しうる場合は、更生管渠とともに外力に抵抗するものとして設計されるが、既設管の損傷が大きい場合は、既設管の強度を全く考慮せずに、更生管が単独で地盤内に埋設されるものと考えて設計されている^{1)~4)}。実際の更生管設置状況を考えた場合、既設管が破壊状態であっても更生管の周囲には剛性の大きい領域が存在することになるため、更生管単独の場合に比較して管の応力やたわみが抑制、減少することが予想される。本報告は、上記の観点からいくつかの老朽度をモデル化した既設管の更生工法を実験的に再現し、更生管単独で埋設した場合と比較することで、既設管の基礎効果およびそのメカニズムについて考察を加えたものである。また、更生工法は施工法で分類すると、反転工法、形成工法、鞘管工法、製管工法があり、更生管材料および構造形態で分類すると、ガラス繊維やポリエステル繊維などで補強したプラスチック管、塩化ビニル管、ポリエチレン管などのたわみ性管の他に、既設管と一体化した剛性管がある。一般的に、

前者は「自立管」と言い、既設管の構造機能を期待せず、後者は「複合管」と言い、更生管と既設管が一体となる構造である。ここでは、反転工法や鞘管工法におけるたわみ性の「自立管」を検討対象とする。

2. 現行設計法とその問題点

老朽管渠を対象にたわみ性管を用いて更生する場合、一般には以下の設計法を採用している。すなわち、既設管が土圧および活荷重を負担できる場合は、更生管には外水圧のみが作用するとし、既設管が外圧を全て負担できない場合は、日本下水道協会規格 JSWAS K-1⁵⁾などに示されているたわみ性管を単独で地盤に埋設するものと考えて、応力、たわみの照査を行う。計算式の細部は、工法によってまちまちであり、既設管の存在を全く考慮せずに設計する考え方と、既設管の存在を考慮する考え方が存在している。後者の場合の設計法⁴⁾の一例を以下に示す。

既設管が土圧、活荷重を負担できる場合は、更生管には水圧のみが作用するものとし、既設管の周面拘束を考慮してチモシェンコの座屈式に支持向上率 K を考慮して、(1)式によって更生管の肉厚を求めるものとしている。

* 東京都下水道局計画部
** 東京都下水道サービス(株)
*** 中央研究所 総合技術開発部
**** 首都圏事業部 都市基盤部

$$t = \frac{D}{\left\{ \frac{2KE}{P \cdot N(1-\nu^2)} \right\}^{\frac{1}{3}} + 1} \quad (1)$$

- P : 外水圧 (kg/cm²) (管中心位置)
- K : 支持向上率 (7.0)
- E : 更生管の弾性係数 (kg/cm²)
- ν : ポアソン比
- t : 更生管肉厚 (cm)
- D : 既設管内径 (cm)
- N : 安全率 (既設管が剛性管の場合4.0)

一方、既設管が外圧を負担できない場合、(2)式 (Spangler式) により、応力、たわみを照査するものとしている。

$$\frac{\delta h}{2r} = \frac{12 \cdot F_r}{E(t/r)^3 + 0.732E'} \cdot P_v \leq 0.05 \quad (2)$$

$$\frac{\sigma}{N} = 12 \left(\frac{r}{t} \right)^2 \left\{ K - \frac{F_r \cdot E' \cdot r^3}{12(EI + 0.061E'r^3)} \right\} \cdot P_v \leq \sigma_a \quad (3)$$

- σ : 更生管の引張強度 (kg/cm²)
- σ_a : 更生管の許容曲げ応力 (kg/cm²)
- r : 更生管中心半径 (cm)
- K : モーメント係数 (2θ=120° : 0.138)
- P_v : 鉛直荷重 (水圧+土圧+活荷重)
- I : 断面二次モーメント (cm⁴)
- δh : 更生管のたわみ (cm)
- F_r : 埋設管基礎の支承角から決まる係数
- E' : 地盤反力係数 (kg/cm²)
- N : 安全率

ここで、更生管の周囲に既設管が存在していることから、支承角を 120° と大きめにとることを提案している。

以上、現行設計法の一例を示したが、他の工法では老朽既設管の存在を無視して取り扱ったりするように、統一されていないのが現状である。この背景には、既設老朽管の存在が更生管の応力、変形に与える影響に関する調査・研究事例が少ないことにある。代表的な既存設計法である英国の WRc 規格¹⁾と米国の ASTM 規格^{2),3)}のベースとなった WRc の埋設実験⁶⁾と Utah 州立大学の埋設実験⁷⁾は、いずれも破損した既設管を対象に更生管の有無による耐荷力の変化にだけ着目したもので、たわみ性更生管の発生応力および変形挙動に対する破損した既設管の拘束効果といった、相互作用の観点からの研究の取組みはほとんどなされていないのが実情である。これらの事情にかんがみて、筆者らは、実規模の管を用いた室内載荷実験と、縮小模型を用いた遠心力載荷実験を行い、既設管の有無、損傷程度と更生管の挙動の関係を調べることにした。

3. 実規模実験による検討

(1) 実験の目的

既設管が存在する場合のたわみ性管の挙動と、単体での挙動の相違を観察し、既設管の存在による影響を確認する。

(2) 実験概要

載荷装置は、内寸法:幅 1,000mm×高さ 1,000mm×奥行 1,000mm の鉄製の剛な土槽と載荷用反力枠で構成されている。土槽の全面中央部に開口部が設けられており、供試管の変形状況観察およびたわみ計測などができるように施されている。載荷重は剛な載荷板と反力枠の間に油圧シリンダーを介して発生させた。最大載荷能力は 490.5kN である。実験は奥行方向に同一変形条件をもつ二次元平面ひずみ条件とした。図-1 に載荷装置と供試管のセットアップ状況を示す。

供試管としては、高密度ポリエチレン管単体 ($E=882.9$ MPa、 $\nu=0.4$ 、以下、CP 単体)と、 $\phi 250$ mm の陶管を 5~30 cm 程度の大きさの破片に砕いたものをもとの形状に復元した管を CP 単体で密着させて更生したもの (以下、CP+陶管) の二種類を用いた。更生管の断面方向壁面の発生ひずみを測定するために、内外壁面の六箇所に計 12 枚のひずみゲージを貼り付けた。管のたわみを測定するため、鉛直方向たわみ計を設置した。また、管に作用する土圧を計測するために、既設管 (CP+既設管の場合) または更生管 (CP 単体の場合) の管頂、管側、管底位置の四箇所に小型圧力センサーを設置した。供試管の寸法を計器配置とあわせて図-2 に示す。

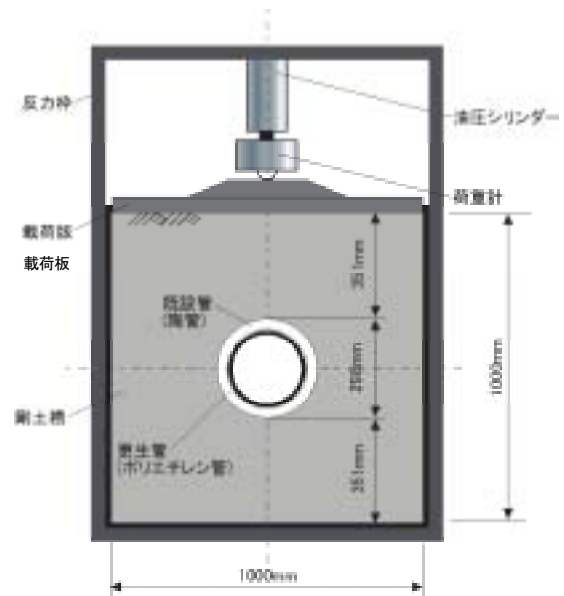


図-1 載荷装置と供試管のセットアップ状況

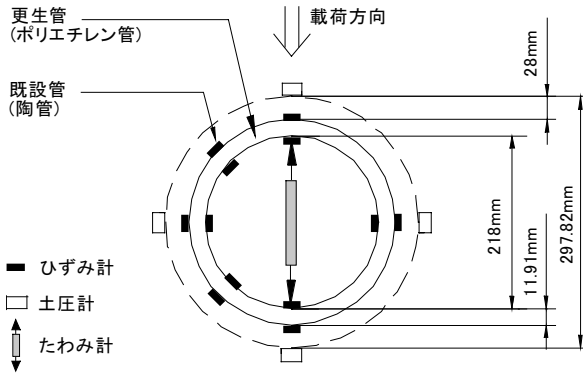


図-2 供試管の寸法と計器配置

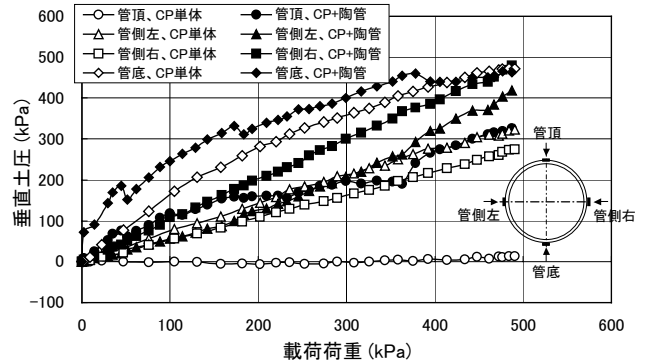


図-3 管周の作用土圧と載荷荷重の関係

実験ケースは、設置状況、地盤条件および載荷方法を一定とし、二種類の供試管(CP 単体、CP+既設管)に対して一ケースずつ行った。

供試管は実験土槽の中心に設置し、埋戻し材料として 5 号珪砂を高さ 1m から落下させて均一地盤を作成した。埋戻し土の密度は 1.345g/cm³、含水比は 0.2~0.9% (風乾状態)であった。

荷重は埋設管中央直上部より剛な載荷板を介して地表面全面荷重として与えた。載荷速度は 49.05kN/min とし、490.5kN (平均分布荷重 490.5kPa) まで載荷した。

計測は、管に作用する土圧、管の沈下量、たわみおよび更生管の壁面ひずみについて行った。

(3) 実験結果と考察

1) 管に作用する土圧

図-3 に管周の土圧計測値と載荷荷重の関係を示す。土圧は載荷荷重にはほぼ比例して増加している。「CP 単体」と「CP+陶管」を比較すると、管底土圧は両ケースでほぼ同程度の値を示しているが、管頂土圧、管側土圧のいずれも「CP+陶管」の方が大きくなっている。特に「CP 単体」の管頂土圧はほとんど 0 に近い値を示しており、載荷に伴って管がたわむことにより、管頂には直上からの土圧が作用しないことを示している。

2) 管壁面のひずみ

図-4 に載荷荷重と更生管の管周ひずみの関係を示す。ここに示したひずみは管の内外面の実測値を軸・曲げひずみに分離したものである。図によれば「CP 単体」では荷重の増加とともに、軸・曲げひずみとも比例的に増加している。曲げひずみは管底が大きいものに対して、軸ひずみ(圧縮)は管側が最も大きい。軸圧縮ひずみが曲げひずみと同程度に発生しており、設計において圧縮強度に対する照査も必要であると思われる。

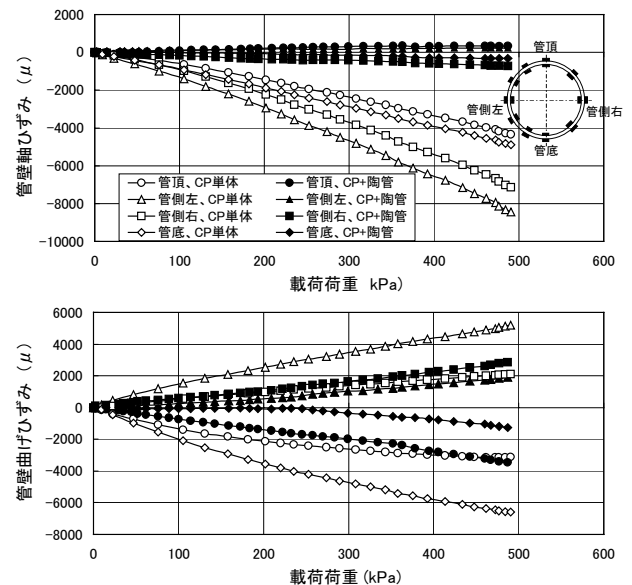


図-4 管周軸・曲げひずみと載荷荷重の関係

「CP+陶管」のひずみを見ると、軸ひずみはほとんど発生せず、曲げひずみのみが載荷荷重の増加とともに増加している。このケースで更生管に軸ひずみがほとんど発生しなかったのは、剛性が大きい陶管部分でほとんどすべての軸力を分担しているためである。「CP 単体」のケースに比べると、「CP+陶管」のケースの平均的な曲げひずみは、管頂・管底で 50%、管側で 65% 減少している。

3) 管の鉛直たわみ

図-5 に載荷荷重と管の鉛直たわみ率の関係を示す。載荷荷重に対して、鉛直たわみ率はおおむね比例的に増加しており、「CP 単体」に比べ、「CP+陶管」の方がかなり小さくなっている。載荷荷重 100kPa 以降、「CP+陶管」では変位計の故障で計測不能となったが、載荷荷重 100kPa の時点におけるたわみ率は、「CP 単体」が 1.40%、「CP+陶管」のケースが 0.43% であり、後者のたわみ率は「CP 単体」のケースの 31%に減少している。

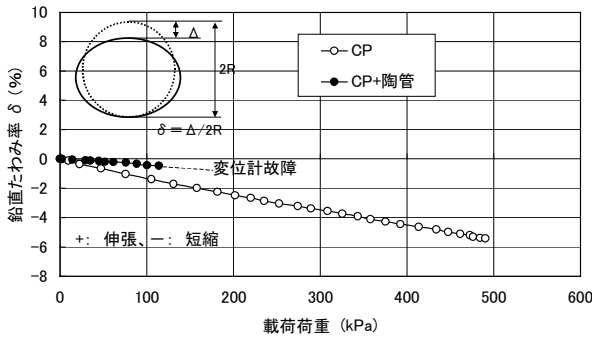


図-5 管の鉛直たわみと載荷荷重の関係

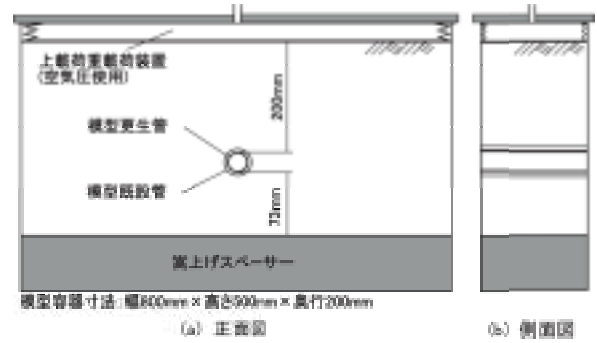


図-6 模型の概要

4. 遠心载荷模型実験による検討

(1) 実験の目的

3. で示した実規模実験では破損させた陶管で既設老朽管をモデル化したが、完全な円管に還元しているため、噛み合い効果により軸力の他に曲げ抵抗も有しており、実現場と比べてたわみ、ひずみ抑制効果が高めに発揮されていると解釈される。老朽ヒューム管の場合は、この陶管モデルと異なり化学的劣化作用を受けているため、現場ではより厳しい劣化状態が想定される。そこで、遠心载荷模型実験では、2種類の損傷(劣化)程度の既設老朽ヒューム管について、たわみ性管で更生した場合をモデル化し、既設管の拘束効果を調べた。

(2) 実験概要

模型は、二次元平面ひずみ条件とし、鉄製の剛な容器に縮尺1/10で作製した。実験は遠心加速度10G場において行った。図-6に模型の概要を示す。模型容器の前面は強化ガラス張りの仕様となっており、遠心载荷中の写真撮影により、模型管および模型地盤の変形を観測することができる。

実物更生管は、高密度ポリエチレン管 (ASTM F-1533) と想定し、模型更生管は、内径φ40mmの水道用硬質塩化ビニル管 (PVC、 $E=2943\text{Mpa}$ 、 $\nu=0.38$) (JIS-K-4672) を旋盤加工により、外径仕上げで作製した。肉厚は断面方向曲げ剛性の相似則より1.11mmとした。表-1に実物更生管と模型更生管の諸元を示す。実験用の供試管としては、模型更生管のみを用いたケース(以下、既設管なし)と、既設管があるケースの二ケース用いた。老朽既設管のモデルとしては、上下左右にひび割れが発生して曲げを伝達できなくなった状態(ヒンジ状態)のモデル化として、アルミ管を分割して各ピースを更生管の周囲に還元したケース(以下、損傷小)、損傷小の状態が進行した状態を想定し、アルミ管を29分割して更生管の周囲に還元したケース(以下、損傷大)とした。いずれのケースもアルミピース間の平均的な間隙は0.3mm(実物レベル:3mm)となるように作成した。構造寸法を計器配置とあわせて図-7に示す。

表-1 模型更生管と実物更生管の諸元

諸元	模型更生管	実物更生管
管材料	PVC	HDPE
外径 D (mm)	42.22	422.2
肉厚 t (mm)	1.11	16.27
管肉厚中心半径 R (mm)	20.555	202.97
弾性係数 E (MPa)	2943.0	882.9
ポアソン比 ν	0.38	0.40

断面方向曲げ剛性の相似則

$$(Sp)_m = (Sp)_p$$

$$Sp = E t^3 / (12(1 - \nu^2) R^3) \quad \text{: 管断面方向の曲げ剛性}$$

$$E \quad \text{: 管材料の弾性係数}$$

$$\nu \quad \text{: 管材料のポアソン比}$$

$$R = (D - t) / 2 \quad \text{: 管肉厚中心半径}$$

添字の m 、 p はそれぞれ模型と実物を表す。

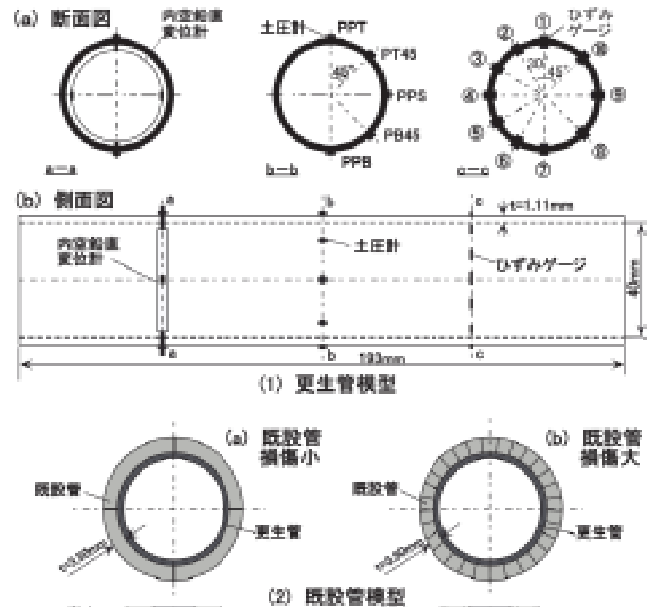


図-7 模型管と計測器配置

模型地盤材料は実施工の埋戻し材料を想定し、豊浦砂とカオリン粘土を乾燥重量比8:2で混合し、最適含水比で調整したものを用いた。締め固め度は道路の埋戻し基準を参考にし $D_c=90\%$ とした。

土被り高を増やした場合の管の挙動を調べるため、模型では初期土被りを 2m(実物換算)とし、地表面等分布荷重載荷により、地盤の土被り圧を再現した。地表面載荷は、ゴム風船を介した空気圧より、荷重増分 19.62kPa で、313.92kPa まで段階的に行った。

計測は、管に作用する土圧、更生管壁面の発生ひずみおよび更生管の内空鉛直たわみなどの項目について行った。

(3) 実験結果と考察

1) 管に作用する土圧

図-8 に管に作用する土圧と換算土被り圧の関係を示す。土圧と載荷荷重はほぼ直線関係を有している。管頂、管底土圧に関しては、既設管の剛性が大きい「損傷小」、「損傷大」、「既設管なし」の順で大きく、管側土圧についてはこれとは逆の順になっている。管頂、管底土圧の大小関係は実規模実験の場合と同様であり、たわみ性管の場合はたわみの進行に伴って上下方向の土圧が減少することを示している。

2) 管壁面のひずみ

図-9 に更生管に発生したひずみを軸・曲げひずみに分離して示す。「既設管なし」の場合、軸ひずみ、曲げひずみともに載荷荷重の増加とともにほぼ線形的な増加傾向を示す。実規模実験の場合と同様に、両ひずみは同程度の値となっており、応力照査において軸応力が無視できないことを示している。

「損傷大」の発生ひずみを見ると、曲げひずみは「既設管なし」のケースに比べて管頂では減少しているが、管底ではほぼ同程度であり、管側では逆に増加している。軸ひずみは全体的に「既設管なし」と比較して減少しており、軸力を既設管が負担していることを示している。

「損傷小」のケースでは、軸ひずみの減少は顕著で、管側の最大ひずみは「既設管なし」の場合の 15%程度まで減少しており、軸力の大部分を既設管が負担していることを示している。一方、曲げひずみは全体的に減少しているが、管底の曲げひずみは逆に増加している。これはアルミピースが隣接するピースと不連続となっているため、端部が更生管に点接触となり、応力集中が起こったためと考えられる。

3) 管の鉛直たわみ

図-10 に三ケースの実験から得られた更生管の鉛直たわみ率と換算土被り圧の関係を示す。いずれのケースも鉛直たわみ率は載荷荷重の増加とともに線形的な増加傾向を示す。増加率はそれぞれ、「既設管なし」が 0.0152 (%/kPa)、「損傷大」が 0.0104 (%/kPa)、「損傷小」が 0.0064 (%/kPa) である。「既設管なし」の増加率を 1.0 とした場合、「損傷大」で 0.68、「損傷小」で 0.42 となり、既設管が一体性を確保できない程度まで損傷を受けても、それなりのたわみ抑制効果があることが分かった。

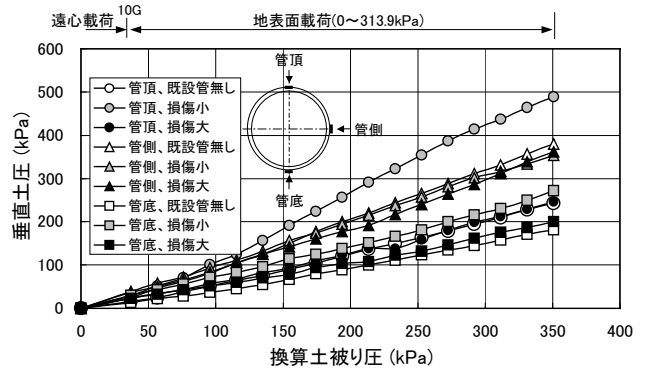


図-8 管に作用する土圧と換算土被り圧の関係

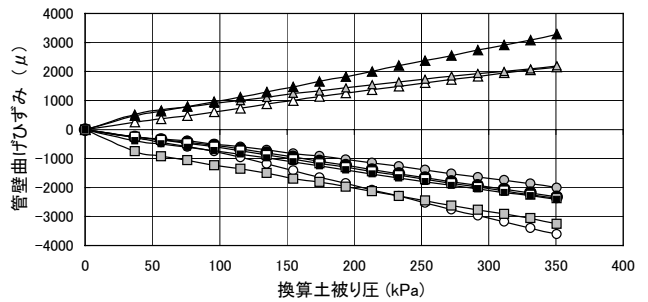
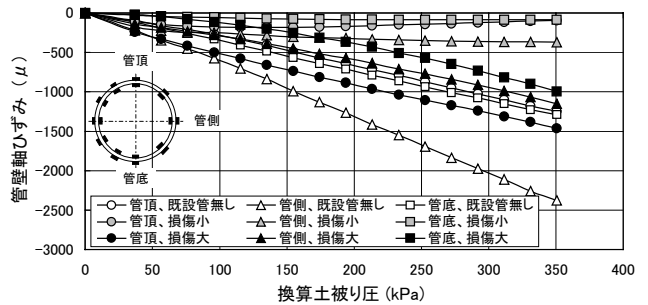


図-9 更生管壁面の発生ひずみと換算土被り圧の関係

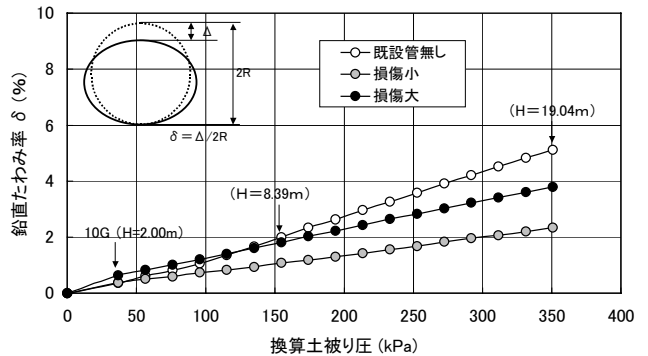


図-10 更生管の鉛直たわみ率と換算土被り圧の関係

5. 既設管の基礎効果とそのメカニズム

実規模実験結果と模型実験結果をあわせて、更生管の曲げおよびたわみに対する損傷した既設管の拘束効果について考察する。実規模実験の既設管(陶管)は、損傷程度は大きいものの破片間の噛み合わせや摩擦力が大きいことから、ある程度の曲げを負担できる構造であったため、軸力と曲げを負担すること

により、更生管の軸力、曲げを抑制し、結果としてたわみを抑制する効果を発揮した。一方、模型実験の既設管は、構造的には曲げに抵抗できない構造であったが、結果的には曲げおよびたわみ抑制効果を発揮した。曲げと異なり軸力は管のたわみにほとんど寄与しないにもかかわらず、これらのケースでたわみが減少したことから、模型実験のケースにおいても、破損した既設管は周囲地盤に拘束され、ある程度の軸力を伝達することにより、曲げを分担していたことは明らかである。結局、更生管の変形に対する老朽既設管の拘束効果とメカニズムは、管に作用する土圧によって発生する軸力と曲げを、既設管がその損傷程度に応じて負担することにより、更生管の発生応力、たわみを抑制することである。

6. FEM 数値解析による検証

(1) 解析の目的

実験結果の信頼性を確認するとともに、実規模実験および模型実験結果から明らかになった、たわみ性更生管の曲げおよびたわみに対する損傷した既設管の拘束効果について、解析的にも検証を行うため、遠心载荷模型実験の結果を対象として、線形弾性 FEM によりシミュレーション解析を行った。

(2) 解析条件

解析は遠心载荷模型実験条件にあわせて、二次元平面ひずみ条件とし、線形弾性 FEM 解析モデルとした。更生管は梁要素で、既設管は簡単のため均一円環としてモデル化した。境界条件として、接線方向力を伝えないように、地盤と既設管、そして、既設管と更生管の間にジョイント要素を挿入し、ジョイントの接線剛性 ks を $1kPa$ とした。

更生管の曲げ剛性は供試管の弾性係数と断面二次モーメントから決定したが、埋戻し土と既設管の変形係数、ポアソン比は以下の手順で設定した。埋戻し土の変形係数は、「既設管なし」のケースの鉛直たわみが実測値と合うように、 $E=6376.5kPa$ 、 $\nu=0.3$ とした。既設管に相当する円環の変形係数は、それぞれの鉛直たわみが実験値とあうように、「損傷大」で $E=981MPa$ 、 $\nu=0.2$ 、「損傷小」で $E=2242.56MPa$ 、 $\nu=0.2$ とした。図-11 に数値解析モデルと入力定数をあわせて示す。

解析ケースは遠心载荷模型実験条件にあわせて、「既設管なし」、「損傷大」、「損傷小」の三ケースとした。

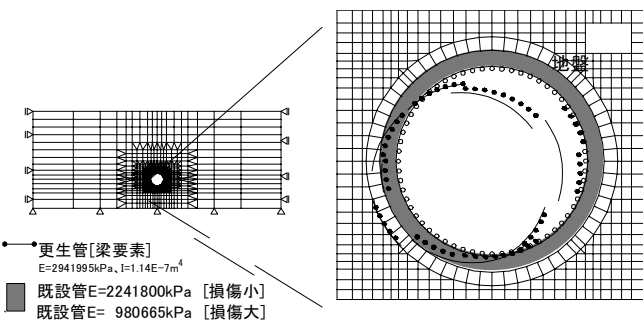


図-11 数値解析モデル

(3) 解析結果と考察

曲げひずみ、軸ひずみの解析結果を実験値とあわせて図-12 に示す。これによれば、曲げひずみに関しては、「既設管なし」の管側の値は、実測値の方が解析値よりも小さいことを除けば、実験値と解析値はおおむね整合性を示している。管周軸ひずみについても、実測値にばらつきがあるため一部の箇所では相違は見られるが、おおむね解析値は実測値に近い値を示している。実験と解析の不整合箇所に関しては、実験誤差によるものである可能性が高いと思われる。また、既設管の損傷が小さいほど、更生管に発生する管周方向の軸力が減少し、更生管の曲げ、たわみが減少する結果となり、模型実験結果で再現されている。

以上の結果から、既設管が更生管の周囲に存在する場合、更生管に発生する軸ひずみ、曲げひずみおよびたわみの減少することが明らかになった。そのメカニズムとして、既設管がその損傷程度に応じて、外力である土圧を分担し、結果として既設管には軸力と曲げモーメントが発生すると共に、更生管に作用する外力を減少させ、更生管の発生曲げモーメントとたわみを抑制することが解析的にも検証できた。

遠心载荷模型実験における既設管モデルは、構造的には曲げモーメントを負担できない構造であるが、周囲地盤に拘束されて軸力が伝達されるため、相応の曲げモーメントも負担することができたものと考えられる。

7. まとめ

自立管更生工法におけるたわみ性更生管の発生応力と変形挙動に対する破損した既設管の拘束効果に着目し、実規模実験、遠心力模型実験ならびに FEM 数値解析を通して、既設管の有無、損傷程度と更生管の挙動の関係を調べ、以下の結論を得た。

- ① 更生管の周囲に破損した既設管がある場合、既設管がない場合に比較して、更生管に発生するひずみ、たわみは減少する。
- ② そのメカニズムは、既設管がその損傷度合いに応じて外力を分担し、結果として更生管に作用する外力が減少するためである。
- ③ 地中に埋設されたたわみ性管には、管周方向に軸力による圧縮応力が曲げ応力と同程度に発生する。設計においてこれを考慮する必要がある。
- ④ 更生管の変形に対する既設管の拘束効果を考慮することにより、経済的な更生管の設計が可能になる。

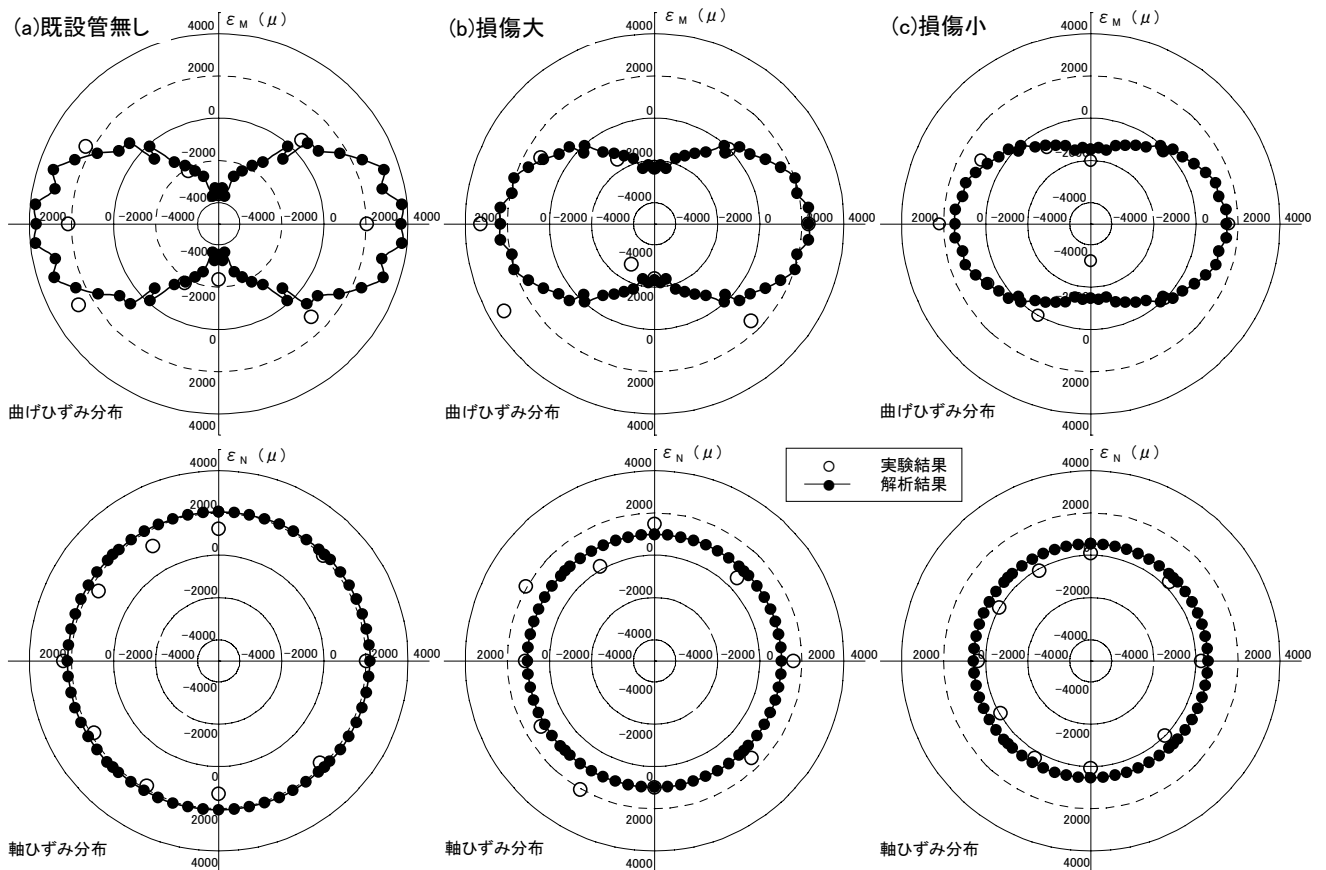


図-12 管壁面の発生曲げ・軸ひずみの解析結果と実験結果の比較

参考文献

- 1) WRc/WAA, "Sewerage Rehabilitation Manual" UK Water Research Center/Water Authorities Association, 1st Edition 1983
- 2) ASTM F1216-98 "Standard Practice for Rehabilitation of Existing Pipelines and Conduits by the Inversion and Curing of a Resin-Impregnated Tube", American Society for Testing and Materials, 1998
- 3) ASTM F1867-98 "Standard Practice for Installation of Folded/Formed Poly (Vinyl Chloride) (PVC) Pipe Type A for Existing Sewer and Conduit Rehabilitation", American Society for Testing and Materials, 1998
- 4) 下水道技術研究会編:下水道管渠更生工法の選定比較マニュアル、近代図書、1997.7
- 5) 日本下水道協会規格(JSWAS K-1-1985):下水道用硬質塩化ビニル管(呼び径75~800)、(社)日本下水道協会、1985.7
- 6) WRc, Structural Tests on Cracked and Renovated Pipes-Summary report No. ER51E, GMA Jones, WRc Engineering, Swindon (UK), Juan, 1982
- 7) Watkins, R.K. & Sorrell, L.P., "Buried Structural Capacity of Insituform", Unpublished Report to Insituform of North America, Inc., Utah City University, Department of Civil and Environmental Engineering, July 1988