

モルタルを充填したパイプの曲げ変形挙動モデルの構築

Modeling of bending behavior of a pipe filled with mortar

北海道大学工学部環境社会工学科	○ 学生員	伊原 かすみ	(Kasumi Ihara)
北海道大学大学院工学院	学生員	林 昌宏	(Akihiro Hayashi)
北海道大学大学院工学院	学生員	寺田 豊	(Yutaka Terada)
北海道大学大学院工学研究院	フェロー	蟹江 俊仁	(Shunji Kanie)

1. 研究の背景と目的

社会基盤施設の高度化・複雑化に加え、大深度地下や大水深域、さらには極寒地域といった過酷環境での開発ニーズは、構造物に従前とは異なる性能を要求するようになってきている。さらに、我が国では社会基盤施設の老朽化問題が顕在化しており、メンテナンスコストにも優れた構造材料や構造形式の開発が求められている。こうした中、二重管構造の間にコア材という中詰材を充填したパイプインパイプ（以下、PIP と称す）は、中詰材の材質を変えることにより、さまざまな曲げ変形特性を示すことから、多様な環境条件下での適用の可能性が論じられている。たとえば、コアにセラミックを充填した PIP は、その高い曲げ剛性から、大水深域での石油掘削リグのライザー管として既に利用が進められている。一方著者らは、中詰材に乾燥砂を充填することにより、曲げ剛性向上への寄与は非常に小さいものの、Brazil Effect の発生を抑え、高いひずみ領域まで滑らかに変形する PIP の開発を進めてきた¹⁾(特許第 5262684 号)。このような PIP は発生個所があらかじめ限定しにくく、大きな残留変位により大きな曲げ変形を受容するような場所への適用が考えられる。これらの実績をもとに、PIP のさらなる可能性を考えた結果、充填砂をあえて水で飽和した後、凍結させた凍結砂充填の PIP 開発に取り組んでいる。凍結砂を用いた場合、乾燥砂の場合には期待できなかったパイプ軸方向の曲げ応力負担も期待できる上、コンクリートやモルタルよりも高いクリープ変形性能が期待できるため、新たな曲げ挙動特性を有する構造材料になる可能性がある。本研究では、ある程度のパイプ軸方向曲げ応力の負担が可能で、凍結砂よりも材料の均質性保持や温度管理といった面での取り扱いの簡単なモルタル充填単管パイプを用いて、まずその基本的な曲げ挙動評価について考え、凍結砂を適用した場合の曲げ挙動評価に資するデータを提供することを目的とする。

2. 実験概要

載荷装置にロードセル(図-1)を用い、4 点載荷試験を行った。構造条件(図-2)は、全長:900[mm]、載荷点間距離:520[mm]、支点載荷点距離:190[mm]、ロードセルによる載荷速度:1.0[mm/min]である。モルタル充填単管(図-3)の曲げ実験を行い、その曲げ変形挙動を M-C 関係で表現した。パイプの材質はアルミニウム合金、管径 50[mm]、管厚 1[mm]であり、中詰材はモルタル(細骨材:豊浦標準砂)を用い、7 日間養生した後、実験を行った。曲げモーメント M はロードセルによる荷重から

換算し、曲率 C はパイプの引張・圧縮側の中央にひずみゲージを 2 点設置し測定した曲げ引張ひずみの値と、3 点に設置した変位計の値から算出する。



図-1 ロードセル

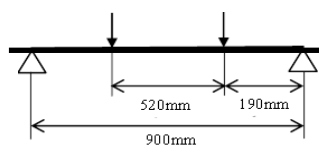


図-2 構造条件



図-3 モルタル充填単管

3. 実験結果

モルタルが中詰材としてパイプに与える影響を確認するため、モルタル充填単管 2 供試体(実験 1 および実験 2)を用いて曲げ試験を行った。このとき実験 1 および 2 の条件は同じである。図-4 の実験 1 と実験 2 は弾性域においてほぼ同じ曲げモーメントの値を示すものの、変曲点付近以降は実験 2 が実験 1 に比べて大きな値を示す。この結果は、中詰材であるモルタルの圧縮強度の違いが、パイプの曲げ変形挙動に差異をもたらすことを示唆している。また、モルタル充填単管は図-5 のように圧縮側の局部座屈で破壊された。

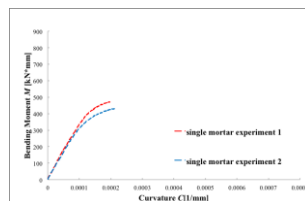


図-4 モルタル充填単管
M-C 関係



図-5 モルタル充填単管の
破壊形式

4. モルタル充填単管の曲げ変形挙動解析

筆者らは既往の研究²⁾で乾燥砂充填 PIP のモデル化を行った。その際、砂が軸方向の応力を伝えないことを理由に、砂を Winkler バネでモデル化し、PIP を重ね梁と捉えて計算を行った。しかし、本研究では中詰材としてモルタルが用いられた場合、この手法の導入は妥当ではない。本解析では、パイプをモルタルとアルミニウム合金の合成梁と捉え、数値解析的手法からその挙動のモデ

ル化を試みた。

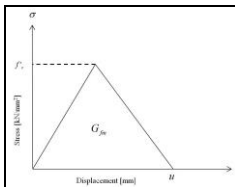
4. 1 応力-ひずみ関係のモデル化

管に用いたアルミニウム合金の応力-ひずみモデルは、筆者らの既往の研究³⁾において、tri-linear型を定義し、中空単管の曲げ実験から得られたM-C関係に対してデータフィッティングを行うことによって求めた。

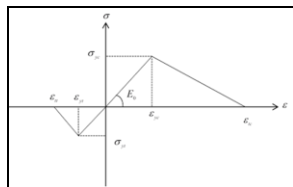
本研究ではモルタルの応力-ひずみ関係のモデル化を行う。数値解析では、図-6(a)に示す破壊構成則から算定されるbi-linear型の応力-ひずみ関係(図-6(b))を用いた⁴⁾。

モルタルの破壊エネルギーは式-1の様に図-6(a)に示す三角形の面積として算定される。弾性係数と圧縮降伏ひずみの値から圧縮降伏応力 f_c を計算することによって、破壊に至る変位量 u を求めることができる。また、適切なひずみ領域を考慮することにより圧縮限界ひずみが算出される。引張側に関しては、ひび割れ幅0.1[mm]をひずみ領域で除した値を限界ひずみとして定義し、引張降伏ひずみは圧縮側の0.1倍の値を仮定した。

$$\begin{aligned} E_0 &= 20\text{GPa} & \varepsilon_{yc} &= 1000\mu & \varepsilon_{yt} &= 100\mu \\ \varepsilon_{ic} &= u(\text{圧縮側の変位})/100\text{mm}(\text{ひずみ領域}) \\ \varepsilon_{it} &= 0.1\text{mm}(\text{ひび割れ幅})/520\text{mm}(\text{ひずみ領域}) \end{aligned}$$



(a) 破壊構成則



(b) 応力-ひずみ関係

$$G_{fm} = 4.4\sqrt{f_c} = \frac{1}{2}f_c u \quad (\text{式-1})$$

図-6 モルタルの材料特性

4. 2 数値解析モデルの構築

モルタル充填単管の曲げ変形挙動の再現には、軸方向に弾性域から塑性領域に及ぶ曲げを一貫して評価できるモデルが求められる。まず面積誤差を減じることを目的として、微小面積を有するファイバー要素に分割した(図-7)。モルタル等の脆性材料は圧縮に強く、引張に弱い、という材料特性を持つ。この特性から、中立軸はモルタル引張側の破壊によって上部圧縮側へ移動(図-8)することが推測される。そこで本研究では、モルタル充填単管を管と中詰材から成る一つの合成梁と捉え、式-2に示すように圧縮合力・引張合力の力のつり合いを求めて中立軸を算出する。その中立軸から断面高さを定義し、断面内における曲げモーメント M を式-3から計算した。

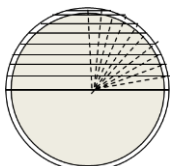


図-7 メッシング手法

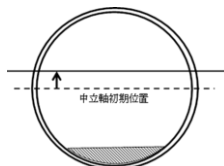


図-8 中立軸の移動

$$F_{pipe} + F_{core} = 0 \quad (\text{式-2}) \quad M = \sum \sigma_i (y_i - y_{lag}) A_i \quad (\text{式-3})$$

y_i …断面高さ y_{lag} …移動後の中立軸の位置

A_i …モルタル要素の面積

$i=1 \sim 180$ …モルタル断面方向に角度で180分割

5. 解析結果

実験結果よりモルタルの応力-ひずみ関係を見直し、解析で用いるモルタルの圧縮強度を80, 100, 120, 150 [kgf/cm²]の4パターンに設定して計算を試みた。図-9に示す実線はモルタル充填単管の実験結果1・2を示しており、破線はモルタルの圧縮強度別の解析結果を示している。モルタルの圧縮強度が120 [kgf/cm²]の解析結果は、実験2に対して高い整合性を示しており、以降、モルタルの圧縮強度を低下させていくにつれ、解析結果は実験1の結果へ近づいていく傾向が伺える。

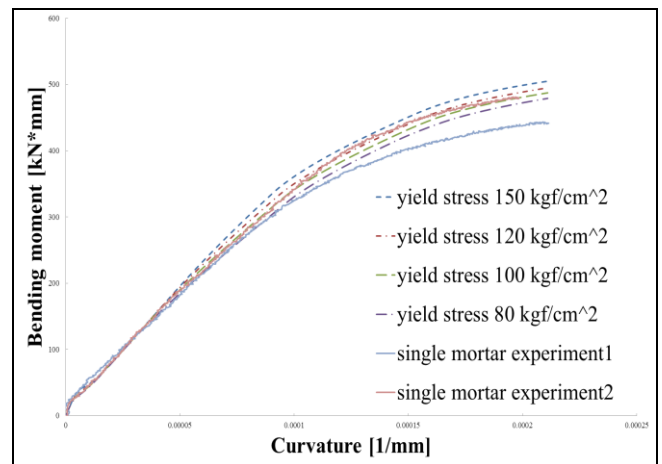


図-9 M-C関係 解析結果と実験結果の比較

6. 考察・まとめ

本モデルを用いた解析の結果と実験結果の比較から、中詰材の適切な応力-ひずみ関係が明らかになったとき、軸方向に応力を伝える中詰材を用いた単管について、その基本的な曲げ挙動評価を行うことができることが明らかになった。

これは、曲げ変形の過程における中立軸の移動とそれに伴う応力分布の変化を適切に表現できるモデルであることを意味しており、凍結砂充填PIPを適用した場合の曲げ変形挙動評価に適応可能であると考えている。

7. 今後の展望

スケール効果を考えたときの管に対する中詰材料の最適化を見据えて、今後はモルタル充填単管の破壊メカニズムに関する考察を深めたいと考えている。その際に得られる知見が、管と中詰材の力学的な相互関係を明らかにする切り口となり、実用化へ向けて、研究の歩をさらに前に進めるであろうと考えている。

参考文献

- 1) 蟹江俊仁, 佐藤太裕, 赤川敏, 田中俊哉, 「埋設用二重管, 該埋設用二重管を有するパイプライン」, 特許番号 5262684 号, 特許庁, 2013
- 2) Hayashi, A., Terada, Y., Kanie, S.: Development of pipe-in-pipe filled with granular material for flexible and ductile bending performance, Proceeding of SCESCM, 2014
- 3) 笹 祐也 蟹江 俊仁 佐藤 太裕 林 昌宏: 数値近似による中詰材充填パイプインパイプの塑性変形評価, 平成24年度 土木学会北海道支部論文報告集 第69号
- 4) Jan G.M.van Mier: Fracture processes of concrete, CRC press, 1996