

可塑性材料を用いた高靱性パイプインパイプの開発

北海道大学工学部	○学生員	野口 大基 (Daiki Noguchi)
北海道大学大学院工学院	学生員	小渡 知己 (Tomoki Kowatari)
北海道大学大学院工学研究院	正 員	佐藤 太裕 (Motohiro Sato)
北海道大学大学院工学研究院	正 員	蟹江 俊仁 (Shunji Kanie)

1. はじめに

パイプに曲げ外力が作用する場合、単管パイプでは、曲げ破壊を起こせずに曲げモーメントが、最大となる箇所での局所的な破壊、曲げ変形による断面の潰れ (Brazier effect) を生じ、滑らかに変形せずパイプの素質を十分に活かすきれいなまま破裂や破壊を起こしてしまう。本研究では、この欠点を改善すべく、中詰材に流動性の高い砂を用いることで、変形拘束性・応力伝達性能を向上させ、その結果として座屈に強く、要求される性能に十分な効果を発揮すると考えられる新しいパイプインパイプ (Pipe in pipe, 以下 PIP とする。)の研究を行う。07 年度より実験・解析両面から開始した研究であるが、07 年度に行った中空の単管パイプに対しての曲げ実験、08 年度から 09 年度にかけて行われた中詰材として砂を充填した PIP 構造の曲げ実験結果に加え、今年度は PIP の寒冷地における利用を想定して、中詰材中の間隙水を凍結させることにより得られる結果に対して重点を置き考察し検討して行く。

2. 実験概要

本研究で用いた実験装置は図-1 で示す。本実験では、支点が 2 点、載荷点が 2 点の 4 点載荷実験装置を用いる。モーターによって一定のひずみ速度でパイプに曲げ荷重を加えて行く。パイプとの接触点つまり支持点においては、グリスを塗ったテフロンシートを挟み接触条件が変形前後で、極力変わらない工夫を施している。パイプに加わる曲げモーメントはロードセルによって計測した値から換算し、曲率は 3 点に設置した変位計から計測し換算する。またパイプの中央に一对のひずみゲージを外管・内管にそれぞれ設置することにより圧縮・引張の曲げひずみからも曲率を換算できる。パイプはアルミニウムパイプであり、管厚 1mm の外管 (外径 $\phi_0 = 50\text{mm}$) と内管 (外径 $\phi_1 = 20\text{mm}$) から PIP を作製し曲げ実験を行う。



図-1 実験装置

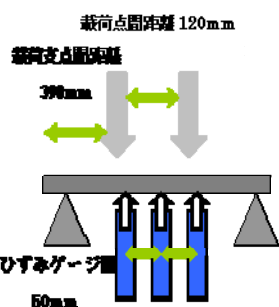


図-2 実験装置概略

3. 実験条件

本実験で使用する実験装置は、図-2 に示すように、支点間距離 $d=390\text{mm}$ 、載荷点間距離 $L=120\text{mm}$ 、変位間距離 $l=50\text{mm}$ として実験を行う。供試体製作にあたり、PIP の中詰材は、全て豊浦標準砂を用い、いずれの場合も充填する際に、6 回に分けて砂を入れていき、その都度外管をハンマーで叩きながら行うことで、高い密度を保つようにした。その後、パイプを傾けつつ蒸留水を注入する。この際、凍結時の体積膨張によるパイプの変形を防ぐために完全に飽和させないようにする。蒸留水を注入し、下端から溢れてきた時点で注入を止め、凍結実験を行う。凍結方法としては、パイプ内に -10°C の不凍水を 24 時間常温 10°C で循環させ、全体を均質にするため -10°C の低温室内に 24 時間放置した後、低温室内で曲げ実験を行う。実験はロードセルの荷重の値が低下した時点でパイプが破壊したと見なし、載荷終了とする。実験は、氷の弾性係数と圧縮強度のひずみ速度依存性を考慮して、載荷速度 0.1mm/min と 5.0mm/min の二つのケースを行い、凍結実験のケース名として、載荷速度 0.1mm/min を行った場合 PIP (0.1mm/min)、載荷速度 5.0mm/min を行った場合 PIP (5.0mm/min) と記載することとする。各載荷速度に 2 本ずつ供試体を製作し実験を行う。

4. 実験結果

図-3 のグラフは、曲げモーメントとひずみの関係をグラフにしたものである。曲げモーメント M はロードセル荷重 P と載荷点間距離 d を用いて下記で表される。

$$M = Pd/2$$

曲率はひずみゲージから換算したものを使用し、ひずみを ε として下記で表される。

$$C = \varepsilon/y$$

y はパイプの中心軸から外管までの距離 ($y = 25\text{mm}$) である。

中空単管、単管パイプに砂を充填した砂充填単管パイプ、PIP の内管径 20mm のものに中詰材として砂を詰めたもの (不凍結: PIP 砂充填) 及び PIP (0.1mm/min)、PIP (5.0mm/min) の曲げモーメント M - 曲率 C 関係のグラフに、比較できるように中空単管の塑性理論解を加えたものである。

このグラフからわかるように、砂充填単管パイプや PIP の中詰材として単に砂を充填したものは、中空単管パイプに比べて最終的な曲率レンジは大きくなっていることがわかる。しかし、曲げ剛性は弾性域においては、おおよそ一致し大きな変化はなく、

塑性域にて、理論解よりも多少向上する程度である。

しかし、間隙水を凍結させた凍結 PIP は、限界ひずみだけでなく曲げに対して大きく向上していることがわかる。これは凍結させたことにより、PIP の性能が向上した結果であり、凍結させることで、より多くの曲げ変形を可能にすることができた。

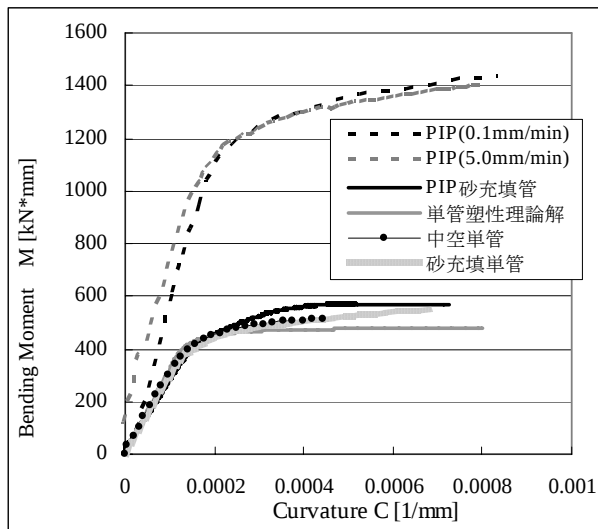


図-3 曲げモーメント曲率関係

表-1 実験データ些細

実験 ケース	中空 単管	砂充填 PIP
限界曲げ モーメント (KN・mm)	517.51	553.85
限界曲率 (1/mm)	0.000452	0.000674
限界ひずみ ($\mu\epsilon$)	11896	15269
破壊形式	Brazier	せん断破壊
実験 ケース	PIP (0.1mm/min)	PIP (5.0mm/min)
限界曲げ モーメント	1435.763	1402.577
限界曲率	0.000863	0.000781
限界ひずみ	22000	17913
破壊形式	曲げ破壊	曲げ破壊
備考	測定限界 まだ曲げ変形可能	破裂音とともに 引張り側が破裂

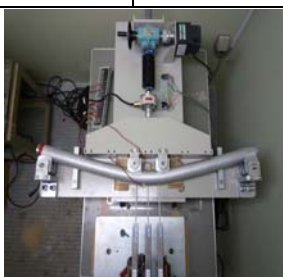


図-4 測定限界



図-5 破壊の様子

5. 考察

表-1 は実験のデータをまとめた表である。砂を充填した PIP は断面のつぶれによる破壊は防ぎ、中空単管よりも大きな曲率まで変形できるが、圧縮軸方向へ局部座屈を起こしてしまい、曲げ破壊を起こすことまで至らなかった。しかし、PIP の間隙水を凍結させることで、測定限界値のひずみレベル(22000 $\mu\epsilon$)まで到達することができた。これは同時に、アルミパイプの限界のひずみレベルでもあり、パイプ本来の靱性を最大限に発揮することを可能にしていると推測することができ、砂を充填した PIP よりも遥かに大きな曲げ変形を許容できる。図-4 は測定限界時の写真である。また、凍結させることにより、曲げ剛性と限界曲率が向上したことは、永久凍土帯のパイプラインの利用において有利である。というのも、パイプラインシステムは負の温度のガスを管内に通すことで構造安定性を保っており、負の温度のガスを通すことによってパイプの周りに人工的な永久凍土(フロストバブル)が生じる。この人工的な永久凍土と非永久凍土の境界付近で、凍上現象によりパイプに曲げ変形がかかるが、凍結 PIP は、そのような現場でも高い靱性を発揮し破断することなく利用可能であると推測されるからである。また PIP(0.1mm/min)と PIP(5.0mm/min)の载荷速度を変えた実験において、パイプの変形は大きく異なり、PIP(5.0mm/min)では、測定限界に達することなく、破裂音とともに亀裂を生じて破壊を起こした。図-5 はその破壊した後の様子である。これは、間隙水が凍結することにより、パイプ内に生じた氷のひずみ速度依存性によって現れた違いであり、この結果は、凍結 PIP は、地震などの地殻変動の多い地盤においての利用は、変動の少ない地盤よりも、曲げ変形を許容できないため、配慮をする必要があることを示唆している。

6. あとがき

本研究では、昨年度までに行われた実験結果を元に凍結 PIP を中心に実験を行ってきた。今後の展開としては、内管径が 30mm・40mm の凍結 PIP に対して同様の実験を行っていく予定であり、凍結 PIP の開発をさらに進めていく。また今後の課題としては、凍結させたことにより実際の理論解よりも曲げ剛性が向上すること及び、変位計で得たデータとひずみゲージから得たデータは誤差を考慮しても、大きく異なるものであることなどを解決していくつもりである。

参考文献

- 1) M. Sato and M. H. Patel: Exact and Simplified Estimations for Elastic Buckling Pressures of Structural Pipe-in-Pipe Cross-sections under External Hydrostatic Pressure, Journal of Marine Science and Technology, Vol. 12(4), pp.251-262, 2007.
- 2) Brazier, L. G.: On the flexure of thin cylindrical shells and other "thin" sections, Proceedings of the Royal Society of London A116, pp.104-114, 1927.
- 3) 白石圭祐・佐藤太裕・嶋崎賢太・田中邦憲・蟹江俊仁・赤川敏：可塑性材料を充填した鋼管の曲げ特性に関する基礎的検討, 土木学会全国大会第 63 回年次学術講演会講演概要集, I-370, 2008