

中詰材料がもたらすパイプインパイプの塑性曲げ変形特性について

Effect of Filling Material on the Plastic Bending Behavior of Pipe-in-Pipe

北海道大学工学部	○学生員	林昌宏 (Akihiro Hayashi)
北海道大学大学院工学研究院	フェロー	蟹江俊仁 (Shunji Kanie)
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院	学生員	笹祐也 (Yuya Sasa)

1. はじめに

北極圏を含む寒冷地帯では、石油や天然ガスなどの未開発の資源が多く存在していることが確認されており、現在、エネルギー資源の安定供給を実現する輸送技術に資する信頼性の高いパイプラインが求められている。例えば、地盤変動が多発する地帯や断層を有する地帯、あるいは不連続永久凍土地帯にパイプラインを埋設する場合、地盤の残留変位や凍上により大きな曲げ変形を受けることが知られている。こうした現象に対して、これまで曲げ強度の高いパイプを適用することが多く用いられてきたが、高い靱性を有し大きな曲げ変形まで許容できる可塑性材料充填パイプインパイプの適用は、その代替案として注目されるようになってきた。

本研究は、中詰材に砂を用いたパイプインパイプに着目し、塑性領域での曲げ変形に対して、中詰材料の果たす効果と影響について、実験的な考察を行うものである。

2. パイプの限界曲げモーメントと限界曲率

今、中空のパイプがその両端で曲げモーメントを受ける場合を考える(図-1)。作用する曲げモーメントを増加していくと、断面の形状が楕円化し、やがて局所的に折れるような Brazier 効果を生ずることが知られている。筆者らの実験においても、中空パイプに曲げを作用させた時、図-3のような状態で終局状態を迎えることが確認されている。このような破壊が発生すると、破壊箇所が局所に限定されるため、材料全体の靱性を活かすきれないまま破壊に至ることになる。

これに対し、本研究で考えるパイプインパイプ(以降、PIP と称す)は、図-4のような断面構成になっており、コアと呼ばれる内管と外管との間に砂を中詰することで断面内での変形を防止しようとするものである。砂はパイプ材料であるアルミニウムに比べて弾性係数が格段に小さく、引張力には抵抗できないため、PIP の曲げ剛性の向上には寄与しない。しかし、断面変形に対する拘束性能を向上させることから、応力をパイプ全体で効果的に受け持ち、材料の靱性を活かした構造となることが期待される。



図-1 曲げを受けるパイプ 図-2 断面変形と Brazier 効果



図-3 Brazier 効果による破壊

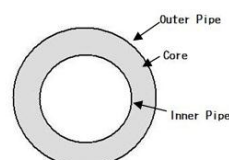


図-4 PIP 断面

3. 実験概要

中詰材の違いによる影響を調べるために、単管の曲げ実験を行った。パイプの材質はアルミニウムであり、管径 50mm、管厚 1mm、全長 1000mm、中詰材として豊浦標準砂を用いた。また、内管径の違いによる影響を調べる実験においては、内管径を 20mm、30mm、40mm と変化させたが、その材料や肉厚については、外管と全く同じである。砂を中詰する際は、ソフトハンマーで中詰材の叩き締めを行い、最大乾燥密度の 90%以上を確保できるようにした。なお、内管の両端部には、図-5に示すエンドキャップを外管の両端に設置して、内管と外管の中心を一致させるようにした。

実験に用いた荷重装置を図-6に示す。荷重点、支点(図-7)共に 2 点の 4 点荷重試験であり、支点荷重点間距離 L:390mm、荷重点距離:120mm、変位計間距離:50mm、ロードセルによる荷重速度:1.0mm/min とし一定の速度で荷重を行った。また、等間隔に設置した 3 点の変位計と、外管、内管共にパイプの引張・圧縮側の中央 2 点に張り付けたひずみゲージから、荷重、変位量、ひずみの値をそれぞれ出力する。荷重からパイプに作用する曲げモーメント M 、変位量とひずみから曲率 C をそれぞれ求め、 M - C 関係を求めるものとした。



図-5 エンドキャップ 図-6 荷重装置 図-7 支点

4. 単管曲げ実験結果

4.1 中空単管、モルタル充填単管曲げ実験比較

図-8 は中詰材にモルタルを用いた単管の曲げ実験により得られた M - C 関係を示したものである。比較のため、中空単管の曲げ実験結果も示してある。この図より、中空単管と比べてモルタル充填単管の破壊曲率は低い値

を示していることがわかる。これは、モルタルが引張に弱いことから、パイプより先に中詰材にひび割れが入り、モルタルが受け持っていた分のひずみがパイプ部分に集中し、パイプが局所的な破壊に至ったためと考えられる。すなわち、パイプの限界曲率が、中詰材に用いる材料の引張強さに依存してしまった結果と言えるであろう。

4.2 中空単管，砂充填単管曲げ実験比較

一方、図-9 は中詰材に砂を用いた単管の曲げ実験から得られた $M-C$ 関係を、中空単管による曲げ実験結果とともに示したものである。この $M-C$ 関係より、中空単管曲げ実験と砂充填単管曲げ実験の弾性域の傾きに大きな差異が認められず、中詰材である砂が曲げ剛性に寄与していないことがわかる。しかし、その限界曲率は中空単管に比べて大きく伸びており、中詰材に可塑性材である砂を用いることによって、パイプがより大きな曲げ変形を許容することが確認された。

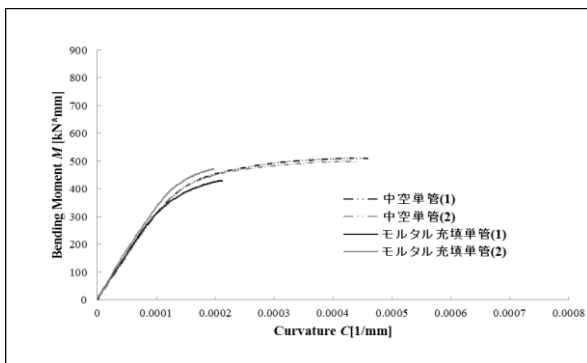


図-8 中空-モルタル充填単管 $M-C$ 関係比較

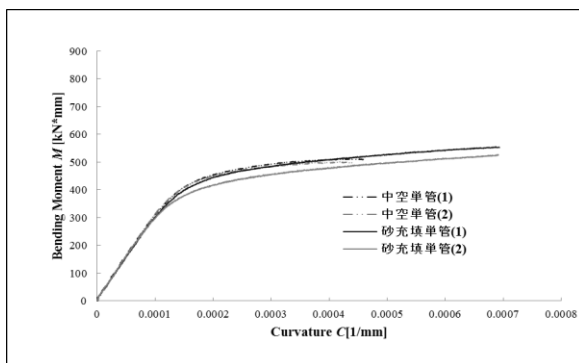


図-9 中空-砂充填単管 $M-C$ 関係比較

5. PIP 曲げ実験結果

次に PIP の $M-C$ 関係について考える。内管径の違いによる断面拘束性能への影響を比較するため、20mm、30mm、40mm と内管径を変えて実験を行った。この時の実験結果を図-10 に示す。

まず、内管径の大きいケースで、限界曲げモーメントが大きくなっていることが認められる。これは内管の有する断面二次モーメントがパイプの曲げ剛性の向上に寄与した結果と考えられる。したがって、限界曲げモーメントだけを比べた場合、内管径が大きいほどその限界曲げモーメントも大きくなる傾向が見て取れる。また、限

界曲率においても、中空単管の場合よりも相当に大きくなっており、充填した砂による断面拘束効果が発揮されたものと思われる。しかし、限界曲率の大きさについては、単管中詰状態に近い内管径の小さいケースの方が、より断面の拘束性能も高く、限界曲率も大きくなるものと予想されたのに対し、実際の実験結果は内管径が大きいものほど、その限界曲率も大きな結果となった。このため、外管と内管との管径比については、中詰材の粒径との関係も含めて適切なバランスがある可能性も考えられ、そのメカニズムの解明に向けてさらなる検討が必要と思われる。

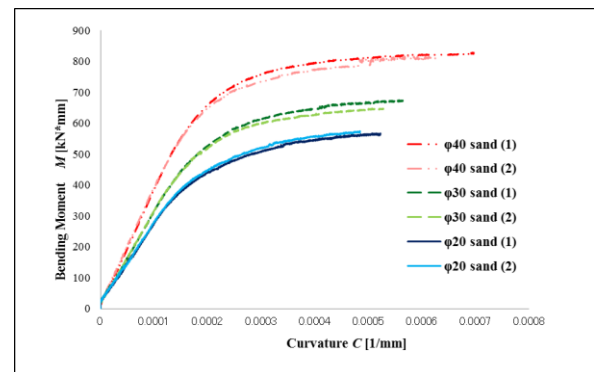


図-10 砂充填 PIP 管径別比較

6. 考察

中空単管曲げ実験に比べ、砂充填単管の曲げ実験の曲率が伸びていることが確認できることから、中詰材として可塑性材を充填した場合、中詰材が曲げ剛性に寄与せず、パイプの変形拘束性を向上させる機能を果たすことが立証された。この結果より、応力をパイプ全体で効果的に受け持つことによって局所的な破壊を避け、より大きな曲げ変形を許容することが期待される。しかし、外管と内管との適切な管径比を求めるためには、そのメカニズムの解明も含めて、さらなる検討が必要である。

また、本研究で実用を目指す本来のパイプラインの管径は直径 1m を超えるものになるものと想定しており、パイプの管径と中詰材の粒径のバランスといったスケール効果についても検討が必要である。今後、こうした研究をさらに積み重ね、より実用性の高い PIP 構造の実現を目指す予定である。

参考文献

- 1) S.Kanie, M.Sato, T.Kowatari and S.Akagawa, : Development of flexible and ductile pipe-in-pipe filled with granular material for cold regions, Hokkaido University, Cryosphere Engineering Laboratory, 2012.
- 2) M.Sato and M.H.Patel: Exact and Simplified Estimations for Elastic Buckling Pressure of Structural Pipe-in-pipe Cross-section under External Hydrostatic Pressure, Journal of Marine Science and Technology, Vol.12(4), pp251-262, 2007
- 3) 白石圭祐: フレキシブルパイプインパイプの曲げ特性に関する実験的検討, 北海道大学大学院工学研究科寒冷地建設工学講座構造システム研究室, 2010.