発泡ウレタン樹脂を充填した鋼管の座屈耐荷力に関する研究

石川島播磨重工(株)基盤研　正会員　山本尚樹　石川島播磨重工(株)生技セ　正会員　猪瀬幸太郎
石川島播磨重工(株)橋梁事業部　正会員　宇野名右衛門　石川島検査計測　鎌田敬治
石川島検査計測　木村忠

1.はじめに

通常鋼管を補強する際は、鋼管内部にコンクリートを充填したり、補強リブを溶接したりする施工法がとられる。これら従来の施工法の代りに、発泡ウレタン樹脂を鋼管に充填した複合構造にすると、少しの重量増加で鋼管の局部座屈がおさえられ、耐荷力向上が期待できる。本研究では、中空鋼管と発泡ウレタン樹脂を鋼管に充填した複合構造に対して座屈試験を実施した。この複合構造は中空鋼管に対して座屈耐荷力の向上が認められ、変形性能についても優位性が確認された。また、中空鋼管と発泡ウレタン樹脂を充填した鋼管双方について、試験結果の荷重－変位曲線をよく摸擬できるようなＦＥＭ弾塑性有限変形解析用モデルを構築した。

2.実験的検討

弊社所有の 600tf（6000kN）試験機を使用して、樹脂を充填している鋼管（2 体）と充填していない鋼管（2 体）について、それぞれ座屈試験を実施した。座屈試験概要図を図 1 に示す。試験体の選定に当り、以下の条件を満足するような鋼管を選定した。

①樹脂充填による座屈強度の向上の実証が目的のため、樹脂を充填していない鋼管は弾性座屈すること。

②樹脂充填により座屈強度は塑性座屈強度と同程度になると考えられるため、塑性座屈強度が試験機能力の 600tf より小さいこと。

③板の局部座屈モードが先に生じ、柱の全体座屈モードが生じないこと。

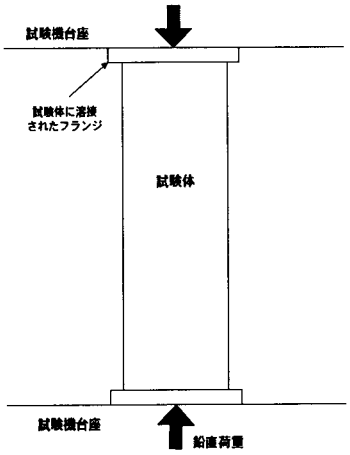

図 1　試験概要図

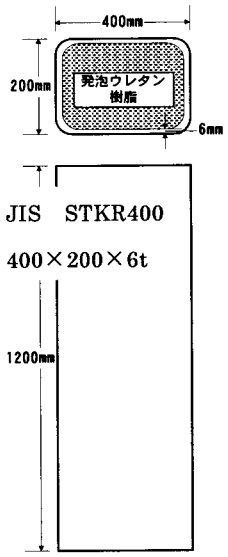

図 2　試験体寸法図

図 2 に試験体諸寸法を示す。試験体鋼管の両端面には厚さ 30mm のフランジを溶接し、このフランジを通して荷重が鋼管に伝わる構造とした。発泡ウレタン樹脂の密度は、FEM 線形座屈解析を実施して、鋼管の塑性座屈強度よりも線形座屈強度が高くなるように 0.15g/cm^3 と設定した。発泡ウレタン樹脂注入の際、樹脂が発熱し膨張するために鋼管に大きな応力がはたらく恐れがあるため、補強治具を用いて樹脂を充填した。鋼管材料の降伏応力は、鋼管の一部を切り取って引張り試験を 2 片実施することにより取得した。2 片の平均降伏応力は 330N/mm^2(33.7kgf/mm^2)であった。荷重点変位は鋼管に溶接されたフランジにダイヤルゲージを据付けて測定した。座屈試験による荷重－変位線図は図 3 のようになり、座屈耐荷力、変形性能とも発泡樹脂を充填した鋼管の方が優れていることが分かった。また、中空鋼管の座屈モードは線形座

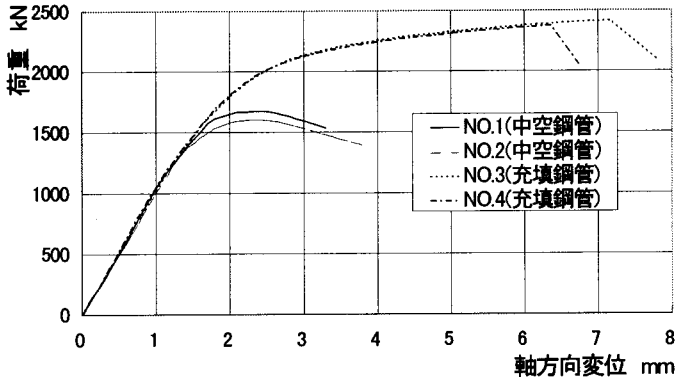

図 3　座屈試験による荷重－変位曲線

キーワード：発泡ウレタン樹脂、座屈耐荷力、鋼管、弾塑性有限変位解析
連絡先：〒135-8732 東京都江東区豊洲 3-1-15　TEL：03-3534-3345　FAX：03-3534-3348

屈解析によるモードと等しかったが、樹脂を充填した鋼管では両端部が外側に膨らむモードが生じて（図４）崩壊した。この位置を切断して断面を観察したところ、樹脂が鋼管から剥がれていることが確認された（図5）。中空鋼管のように内側に窪むモードは現れなかった。

図４　発泡ウレタン樹脂充填鋼管崩壊モード

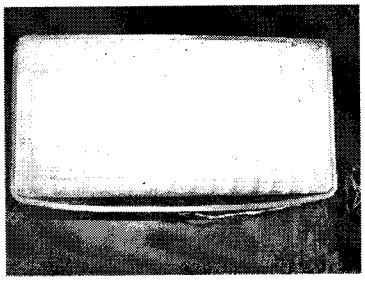

図５　樹脂剥がれ状況図

3.解析的検討

樹脂を充填していない鋼管と充填した鋼管について弾塑性有限変位解析を実施し、試験結果との対応をとった。樹脂充填鋼の解析モデルを図 6 に示す。荷重は鋼管の端面に強制変位を与える変位制御とした。鋼管端面は固定条件とした。鋼管材料データは引張り試験のデータを用いた。初期不整は正弦半波（振幅＝L/1000：L は全長）と線形座屈解析により得られたモード（振幅=B/150：B は長辺）の足し合わせとした。解析コードは汎用コード ABAQUS を用いた。

まず、樹脂を充填していない鋼管に対して初期不整を考慮した上で弾塑性有限変位解析を実施した。鋼管はすべてシェル要素でモデル化した。解析の結果得られた荷重－変位曲線を図 7 に示す。解析結果は最大耐荷力付近までの挙動をよく摸擬していると言える。

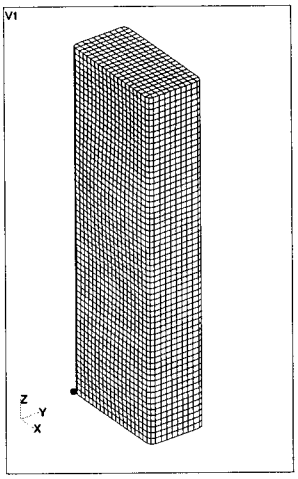

図６　発泡ウレタン樹脂充填鋼管解析モデル

樹脂を充填した鋼管に対しては、樹脂を充填した後の樹脂の膨張分だけ内圧を負荷した後に、中空鋼管と同様に初期不整を入力して軸方向に強制変位を与えた。樹脂のヤング率は初期段階では無視したが、荷重－変位曲線の傾きが急激に変化するところから樹脂が稠密化したものとみなし、試験結果の曲線の傾きからヤング率を 814MPa と定めた。樹脂はソリッド要素によりモデル化した。解析結果を図 8 に示す。樹脂が鋼管より剥がれる直前までは、解析結果と試験結果が良く一致している。

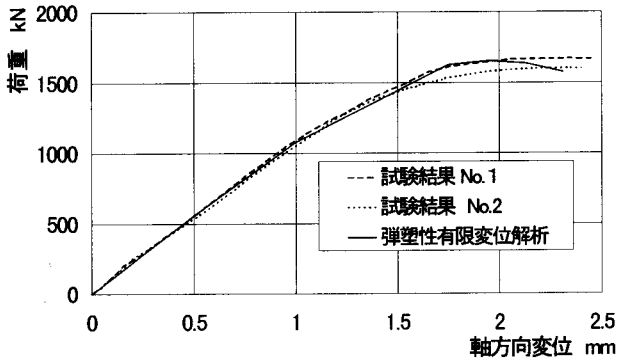

図７　中空鋼管：弾塑性有限変位解析結果

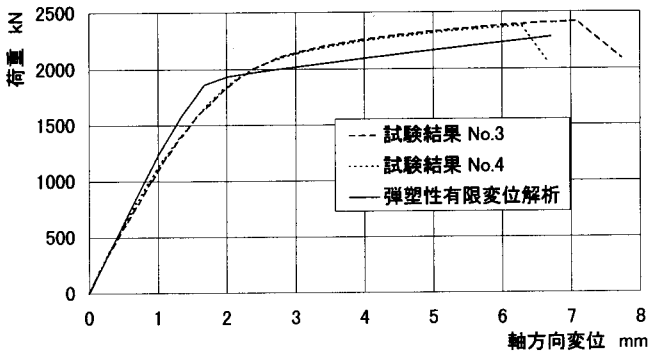

図８　発泡ウレタン樹脂充填鋼管：弾塑性有限変位解析結果

4.まとめ

発泡ウレタン樹脂充填鋼管に対する座屈試験、および弾塑性有限変位解析を実施し、以下の結果が得られた。

・鋼管内部に発泡ウレタン樹脂を充填すると耐荷力、変形性能ともに向上する。

・発泡ウレタン樹脂を充填した鋼管の崩壊は、樹脂が鋼管から剥がれることによって起こる。

・試験結果を良く摸擬する弾塑性有限変位解析用モデルを構築した。

謝辞

本研究にあたって、発泡ウレタン樹脂の充填作業でご協力を頂きました大日本インキ化学工業株式会社殿、有限会社ポリマーエンジニアリング殿に謝意を表します。