

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 5 月 4 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01667

研究課題名（和文）二軸応力状態で繰返し負荷-除荷を受ける高密度ポリエチレン管の変形挙動測定と解析

研究課題名（英文）Measurement and analysis of deformation behavior of polyethylene pipe subjected to biaxial repeated loading-unloading

研究代表者

桑原 利彦（KUWABARA, Toshihiko）

東京農工大学・工学（系）研究科（研究院）・卓越教授

研究者番号：60195609

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,900,000円

研究成果の概要（和文）：第三世代高密度ポリエチレン(PE100)は、耐震性や長期耐久性をもつことから、全国の水道事業体で採用が進んでいる。水道管は実使用時には多軸応力を受けるにも関わらず、多軸応力状態下における変形特性は解明されていない。本研究では、樹脂円管に対して任意の二軸応力を付与可能な二軸バルジ試験機を用い、二軸応力試験を実施した。まず線形応力経路（円管の管軸方向と円周方向の主応力比一定）におけるPE100管の変形挙動を測定した。その挙動は高次降伏関数により概ね再現可能であることがわかった。さらに非線形応力経路における挙動は、線形応力経路試験から作成した材料モデルによる計算値から若干乖離することがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

我が国では地震や津波などが多発し、時に社会インフラが甚大な被害を受ける。その備えとして、ガス管や水道管に多用されている高密度ポリエチレン管（以下、PE管）を研究対象として、地震や津波などでPE管が大きな変形を受けたときに発生する、二軸応力状態における変形挙動を解明し、その挙動を数値シミュレーション上で再現するための適切な降伏関数を同定することができた。これにより、社会インフラの基盤を支えるPE管の変形挙動を従来よりもより正確に予測することができるようになり、その安全性をより定量的に評価することができ

研究成果の概要（英文）：Third-generation high-density polyethylene (PE100) is being adopted by water utilities across the country due to its earthquake resistance and long-term durability. Although water pipes are subjected to multiaxial stress during actual use, their deformation characteristics under multiaxial stress conditions have not been elucidated. In this study, we performed biaxial stress tests using a biaxial tube bulge testing machine that can apply arbitrary biaxial stress to circular pipes. First, we measured the deformation behavior of a PE100 pipe in linear stress paths (constant principal stress ratio between the pipe axis and circumferential directions). It was found that the behavior can be roughly reproduced using a higher-order yield function. Furthermore, the behavior in nonlinear stress paths was found to deviate slightly from the calculated values based on the material model created from the linear stress path experiment.

研究分野：塑性力学

キーワード：二軸応力 材料試験 ひずみ速度制御 大ひずみ 塑性 材料モデル 降伏関数

1. 研究開始当初の背景

高密度 PE 管は、JIS 規格の制定を契機として、ガス・水道用として全国に普及した。地震国である日本では、PE 管の耐震性に関する研究はあるが、いずれも軸方向引張（もしくは圧縮）試験や内圧試験のように単純応力状態における試験研究に限定されている^{1), 2)}。土中の埋設 PE 管が地震時に受ける応力状態は、軸力と内圧による組合せ二軸応力状態であり、かつ繰返し負荷-除荷を受ける。しかし二軸応力状態での負荷除荷過程における PE 管の変形挙動については実験値が皆無であり、数値計算で必要となる適切な材料モデルも考案されていない。

2. 研究の目的

ガス管や水道管に多用されている高密度ポリエチレン管（以下、PE 管）を研究対象として、二軸応力状態における変形挙動や破断限界を解明するために、繰返し負荷-除荷型二軸バルジ試験機を新たに開発する。この試験機は、円管試験片に軸力と内圧を同時に負荷しつつ、応力経路を自在に制御する機能を備える。地震時における埋設管の弾塑性変形挙動および破断限界を解明するために、二軸応力状態で繰返し負荷-除荷を PE 管に負荷し、その変形挙動を精密に測定する点が本研究の新規性である。さらに、その変形挙動を数値解析で再現するための高精度な材料構成式を構築する。もって、耐震性を考慮した PE 管の安全性評価指標を確立する。

3. 研究の方法

二軸バルジ試験法の概要を Fig. 1 に示す。二軸バルジ試験とは円管試験片に軸力と内圧を同時に負荷することで、試験片中央部に任意の二軸応力 ($\sigma_\phi, \sigma_\theta$) を負荷する試験法である。以下、管軸方向を ϕ 、円周方向を θ とする。軸力と内圧の測定は、それぞれロードセルと圧力計を使用した。管軸および円周方向ひずみ $\varepsilon_\phi, \varepsilon_\theta$ は、エリアカメラとレーザ変位計により測定した。

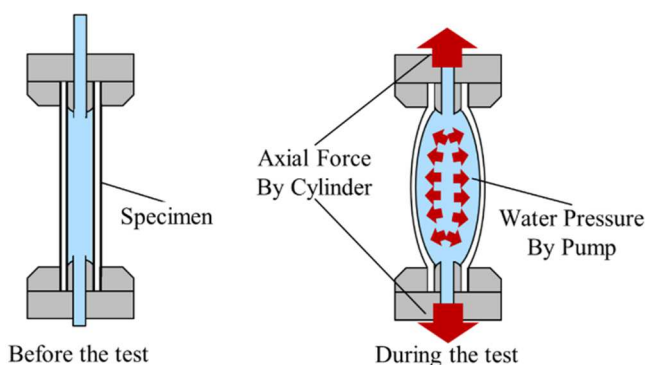


Fig. 1 Schematic diagram of the multiaxial tube expansion test

4. 研究成果

試験方法

応力経路は $\sigma_\phi: \sigma_\theta = 1:0, 4:1, 2:1, 4:3, 1:1, 3:4, 1:2, 1:4, 0:1$ の 9 通りの線形応力経路とした。試験中の温度は $20.9 \sim 22.1$ °C、試験速度は、相当ひずみ速度が $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 一定となるように軸力と内圧をフィードバック制御し、負荷した。

供試材は、株式会社クボタケミックス社製、水道給水用高密度ポリエチレン管とした。外径 21.5 mm、肉厚 3.5 mm、長さ 4 m の処女材を、長さ 100 mm に切断し試験片とした。

全ひずみから弾性ひずみを差し引くことにより対数塑性ひずみを算出した。その際に用いた弾性率 E は、真応力-対数ひずみ線図における、真応力 0 MPa と 5 MPa の間を線形近似した直線の傾きとした。二軸引張応力を受ける供試材の加工硬化特性を定量的に評価するために、以下の手法で等塑性仕事面を作成した。応力比 $\sigma_\phi : \sigma_\theta = 1 : 0$ の真応力-対数塑性ひずみ線図において、基準塑性ひずみ ε_0^p に達するまでになされた単位体積当たりの塑性仕事 W_0 を算出する。他の線形応力経路において、 W_0 と等量の塑性仕事を与えられた時点での真応力 $(\sigma_\phi, \sigma_\theta)$ を主応力平面上にプロットし、等塑性仕事面を決定した。本研究では、9 経路すべての応力比において、 $\varepsilon_0^p = 0.24$ までの等塑性仕事面を測定した。各基準塑性ひずみ ε_0^p における応力値を管軸方向単軸引張応力 σ_0 で除した、無次元化等塑性仕事面を **Fig. 2** に示す。等塑性仕事面は変形の進展に伴い、等二軸方向に対して相対的に張り出す異方硬化挙動を示した。

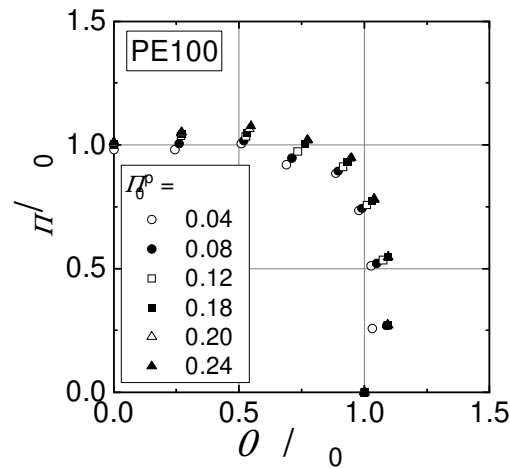


Fig. 2 Contours of plastic work normalized by σ_0

$\varepsilon_0^p=0.24$ における等塑性仕事面に対して、von Mises 降伏関数、Hill 降伏関数および Yld2000-2d 降伏関数³⁾を同定した。Yld2000-2d 降伏関数の次 M および異方性係数 α_i ($i = 1 \sim 8$) は、遺伝的アルゴリズムを適用し決定した。同定した各関数と $\varepsilon_0^p=0.24$ における等塑性仕事面を **Fig. 3** に示す。von Mises 降伏関数は応力を過大に評価したため、等塑性仕事面の再現性が低い。一方、Hill 降伏関数、Yld2000-2d 降伏関数は等塑性仕事面を高精度に再現した。Hill 降伏関数と Yld2000-2d 降伏関数は、材料の異方性を考慮した降伏関数であるため、異方性をもつ PE100 の実験値を高精度に再現した。

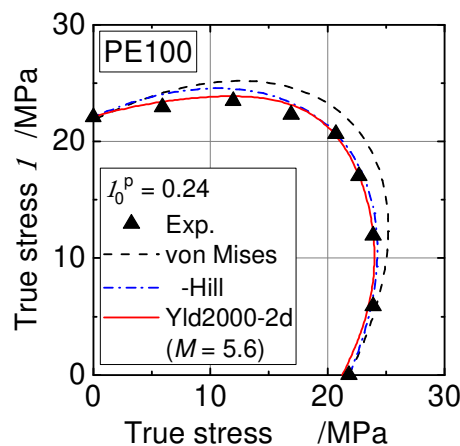


Fig. 3 Measured stress points forming contours of plastic work, compared with the yield loci calculated using selected yield functions

二軸応力状態における法線則を評価するために、 $\varepsilon_0^p=0.24$ における塑性ひずみ方向 β に対して、von Mises 降伏関数、Hill 降伏関数および Yld2000-2d 降伏関数を同定した。同定した各関数と $\varepsilon_0^p=0.24$ における塑性ひずみ方向を **Fig. 4** に示す。 β は塑性ひずみ経路を線形近似し、その傾きとして求めた。 近似区間は、測定点の前後 10 s とした。 どの関数も実験値の傾向を概ね再現できているが $\sigma_\phi:\sigma_\theta=4:3, 1:1, 3:4, 2:1, 4:1, 0:1$ において、Yld2000-2d 降伏関数が最も精度よく実験値を再現した。 以上より、線形応力経路においては、PE100 は法線則を満たす。

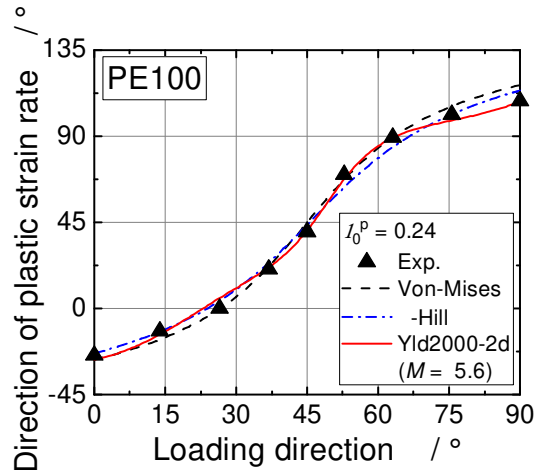


Fig. 4 Directions of plastic strain rates, compared with those calculated using selected yield functions

非線形応力経路試験では、線形応力経路試験で用いたものと同じ試験機を用いた。 指令値は **Fig. 5** 中の破線で示すように、 $(\sigma_\phi, \sigma_\theta) = (20 \text{ MPa}, 20 \text{ MPa})$ まで $\sigma_\phi:\sigma_\theta=1:1$ で負荷する。 その後 $(\sigma_\phi, \sigma_\theta) = (20 \text{ MPa}, 25 \text{ MPa})$ まで直線で負荷するものを Path 1, $(\sigma_\phi, \sigma_\theta) = (25 \text{ MPa}, 20 \text{ MPa})$ まで直線で負荷するものを Path 2 とした。

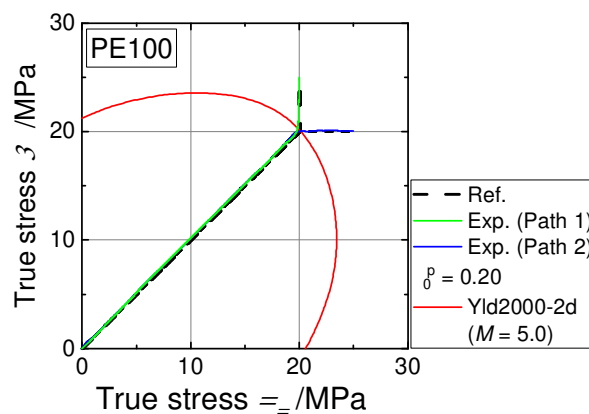


Fig. 5 Reference and experimental non-linear stress path

測定された非線形応力経路を **Fig. 5** に示す。 Path 1, 2 いずれにおいても、指令値に実験値が良好に追従したことを確認した。 非線形応力経路における経路変化に伴う β の変化を **Fig. 6** に示す。 β は塑性ひずみ経路を線形近似し、その傾きとして求めた。 近似区間は、測定点の前後 10 s とした。 **Fig. 6** 中の \star は応力経路変化点を表す。 応力経路変化後、 β はどの降伏関数からも乖離する。 この結果より、非線形応力経路において PE100 は法線則を満たさないことが示唆される。

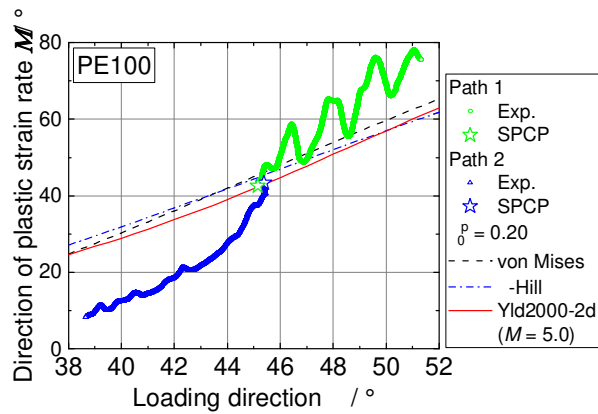


Fig. 6 Direction of plastic strain rate β of non-linear stress path

Path 1 において β が振動している理由は、塑性ひずみ経路が振動したためである。本試験機における制御は、真応力の指令値と測定値の差分による P 制御である。そのため、一定の真応力を維持しようとする、真応力の測定値が振動してしまう。それに伴い、塑性ひずみ経路が振動したことにより β も振動した。一方、Path 2 において β の振動が抑えられている理由は、内圧の制御にプランジャーポンプを用いたことにより、 σ_θ を一定に保つ際は真応力が振動しづらいためである。

結論

本研究から得られた知見を以下にまとめる。

- (1) $\epsilon_0^p=0.24$ において等塑性仕事面を作成し、PE100 の異方硬化挙動を測定した。
- (2) $\epsilon_0^p=0.24$ における等塑性仕事面に対して Yld2000-2d 降伏関数が再現性に優れた。
- (3) 線形応力経路において、PE100 は法線則を満たす。
- (4) 非線形応力経路において、PE100 は法線則を満たさない。

参考文献

- 1) 配水用ポリエチレンパイプシステム協会, 水道配水用ポリエチレン管の耐震性能に関する技術資料, (2017), 2-4.
- 2) 配水用ポリエチレンパイプシステム協会, 水道配水用ポリエチレン管路の 100 年寿命の検証, (2014), 3-47
- 3) Barlat, F., Brem, J.C., Yoon, J.W., Chung, K., Dick, R.E., Lege, D.J., Pourboghrat, F., Choi, S.-H., Chu, E.: Int. J. Plasticity, 19 (2003), 1297-1319

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kubo S., Kuwabara T., Sumiyama T., Kobayashi T., Furuichi K., Nonomura C.	4. 巻 16
2. 論文標題 Measurement and Analysis of Deformation Behavior of Thermoplastic Elastomer Tube Subjected to Biaxial Tensile Stress under loading and unloading	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 International Journal of Material Forming	6. 最初と最後の頁 27
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s12289-023-01752-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Shintaro Obuchi, Sohta Kubo, Toshihiko Kuwabara
2. 発表標題 Measurement of biaxial deformation behavior and material modeling for HI-PVC using multiaxial tube expansion test
3. 学会等名 10th International Conference on Tube Hydroforming（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大淵慎太郎, 桑原利彦, 久保漱汰, 小林卓哉
2. 発表標題 樹脂材料の二軸バルジ試験による変形挙動と材料モデリング
3. 学会等名 2022年度塑性加工春季講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Obuchi, S. Kubo, T. Kuwabara
2. 発表標題 Measurement of Biaxial Deformation Behavior and Material Modeling for HI-PVC using Multiaxial Tube Expansion Test
3. 学会等名 25th International Conference on Material Forming (ESAFORM2022)（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 長田勇輝, 桑原利彦
2. 発表標題 非線形応力経路における高密度ポリエチレンの弾塑性変形特性の測定と解析
3. 学会等名 2024年度塑性加工春季講演会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

東京農工大学 桑原研究室 http://web.tuat.ac.jp/~kuwabara/index.html

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------