

令和 4 年 6 月 2 日現在

機関番号：15201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K05878

研究課題名(和文) たわんだ管に作用する内水圧の真円復元効果に関する研究

研究課題名(英文) Studies on re-rounding effect of internal pressure on deflected circular pipes

研究代表者

石井 将幸 (ISHII, Masayuki)

島根大学・学術研究院環境システム科学系・准教授

研究者番号：50293965

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：楕円形の管に内圧が作用すると、断面を真円に近づけるような変形が生じる。内圧によってたわみが解消する量の定式化を目標として、楕円断面の管に内圧が作用した際の変形をフレーム解析で求めた。その結果曲げによる変形と伸びによる変形の両方で、楕円が真円へ近づくように変形することがわかった。

これらの変形を表す数値として長半径と短半径の変化に着目し、フレーム解析の結果に重回帰分析を適用して、内圧、弾性係数、長短半径、管厚と、長短半径の差の間に成り立つ微分方程式を誘導した。これを解いて得られた基礎方程式は内圧の指数関数となり、長半径と短半径の差が内圧の増加に伴い指数関数的に減少して0に近づくことがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

パイプラインに用いられている管は埋設によりたわむことが多く、そのたわみが内圧で復元する現象は古くから認識されてきた。しかし現行の設計基準には「内水圧以外の荷重は、管断面に曲げモーメントを生じ」と記載されており、内圧は断面内に曲げモーメントを生じさせない荷重として扱われ、応力の算出式もその前提に従ったものとなっている。内圧を上向きの鉛直荷重で近似したうえで曲げモーメントを算出する式が知られているものの、正確な計算手法が確立しているとは言い難い。本研究は内圧によるたわみ復元量の定式化に成功しており、内圧によるたわみ復元の影響を正しく考慮した設計手法の確立に向けた端緒となるものである。

研究成果の概要(英文)：Internal pressure on an oval pipe has an effect to deform and re-round the cross section of the pipe. Aiming to derive a formula to calculate the reduction of deflection caused by internal pressure, deformation of oval pipes under internal pressure is analyzed using frame analyses. Obtained results showed that deformations caused by each of in-plane bending and extension reduces oblateness of oval pipes.

Focusing on the difference between longer and shorter radii of ovals, multiple regression analyses are applied to the results of frame analyses, and a differential equation is derived between internal pressure, elasticity modulus, longer and shorter radii, thickness of the pipe and the difference between longer and shorter radii. An exponential function is obtained which proves that the difference of radii reduces and approaches to zero with application and increase of internal pressure.

研究分野：農業農村工学

キーワード：真円復元効果 内圧 たわみ パイプライン 楕円管 とう性管

1. 研究開始当初の背景

農業用パイプラインで発生する事故には様々なものがあるが、管が突然破裂する形態のものが少なくなく、原因究明が急がれている。その一因として材料の疲労が挙げられており、水圧の変動によって応力が変動、疲労が生じると考えられている。これを踏まえ、管に用いる材料の疲労試験が行われるようになったが、引張応力の大きさを変えての疲労試験が一般的であり、圧縮と引張を行き来するような試験はあまり行われていない。内水圧で生じる応力は引張応力のみであることが、その理由であると推察される。

真円に作られた管に荷重が作用して楕円状にたわむ際には、曲げによって圧縮応力と引張応力の両方が局所的に発生し、特に圧縮応力が図1に示すように長軸内側と短軸外側に生じる。もし内水圧によって管が真円に戻り、さらに膨らむようであれば、引張応力のみが全体に生じる状態へ移行することになる。内水圧の変動による応力変化が、広く想定されているような引張応力の変動にとどまらず、圧縮応力と引張応力の行き来を伴うものであれば、疲労の進行速度は想定を大きく超えるものとなる。申請者は、パイプラインで生じている破裂の中にこの種の疲労を原因とするものが含まれていると考え、その解明が急務であると捉えている。

その根拠として、鉄筋コンクリート管に内水圧と外部からの荷重を同時に作用させた試験の結果を示す。3つの図には初期ひび割れ、目視ひび割れ、破壊が生じた荷重の組み合わせを、単独で作用した際に各現象が生じる荷重で正規化したものを示した。図中の線は、両荷重の関係が持つ線形性や非線形性を評価するためのものであり、 n の値が大きいほど非線形性が強い。

荷重の小さい初期ひび割れでは、ひび割れの生じる内水圧と外圧の関係に線形性がみられる。しかし目視ひび割れ、破壊と荷重が増えていくと非線形性が強くなり、破壊では内圧が大きいほど大きい外圧に耐えるという、通常では考えられない結果となった。なお鉄筋コンクリート管の目視ひび割れに関する設計では $n=1.5$ に従うとされており、既往の知見と整合性の高い結果である。

鉄筋コンクリート管は硬く、ひび割れが生じるまでは外圧に抗してほぼ真円を保つ。しかしひび割れが生じると剛性が低下して変形が進み、破壊時には数%程度のたわみを起こす。このたわみを復元しようとする内圧と、管をたわませようとする外圧の相互作用が、管が耐える外圧の大きさを見かけ上増大させたと考えられる。

復元作用による影響の大きさは、管のたわみ量によって決まる。不とう性管でも見られたこの現象は、とう性管ではさらに大きくなるため、パイプラインの設計や維持管理でこの現象を考慮する手法の開発が極めて重要であると言える。

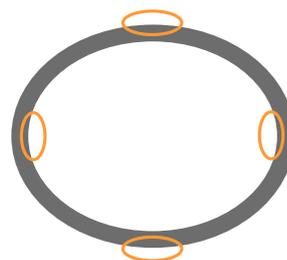
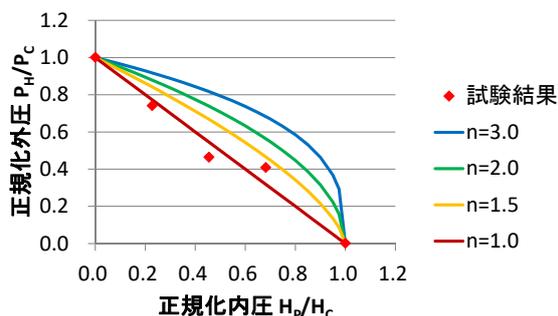
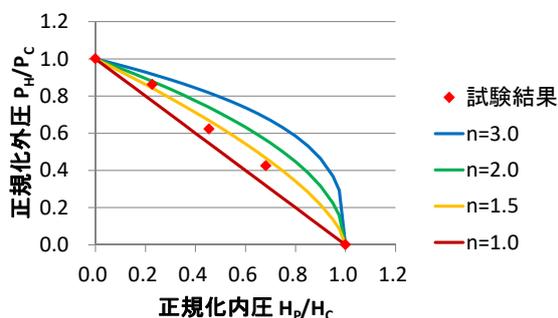


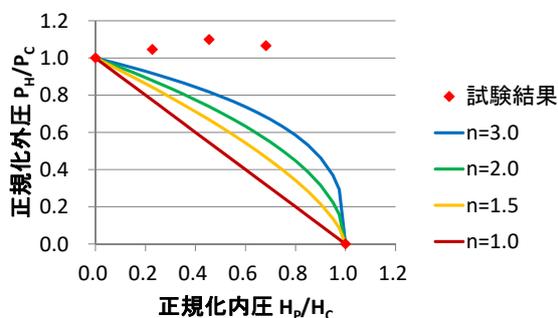
図1 圧縮応力の発生位置



(a) 初期ひび割れ



(b) 目視ひび割れ



(c) 破壊

図2 内外圧载荷試験の結果

2. 研究の目的

本研究は、たわんだ管に内水圧が作用することによって生じる真円復元作用の大きさを定量化し、管や埋設地盤の剛性に抗して管をどれくらい変形させるのかを明らかにしようとするものである。そしてこの作用によって生じる応力変化の詳細、特に圧縮と引張の行き来が生じるか、またその絶対値はどれくらいなのかを明らかにし、パイプラインに用いる管の材料に対し、どのような疲労試験を行う必要があるのかについての提言を行うことを最終的な目的とする。

本研究で検討し明らかにしようとした項目は、以下のとおりである。

1. 楕円管に外圧を作用させた実験による真円復元効果の確認
2. 数値解析による実験結果の再現
3. 内圧を受ける楕円形の管に生じる変形に関するフレーム解析
4. 楕円形の管が内圧を受けた際に生じる真円復元効果の理論式導出

たわんだ管の形状は、概ね楕円で近似できると考えられる。真円復元効果は内圧によるものであるが、楕円管に外圧を作用させるとその逆の現象が発生する。この性質を利用し、内圧試験よりも容易な外圧試験を実施して、圧力の大きさと楕円管の変形量や生じるひずみを測定し、その結果を数値解析で検証する。

真円復元効果が実際に生じることが確認できたら、続いて楕円形の管に内圧が作用した際に生じる変形の量をフレーム解析で求める。そして得られた結果に多変量解析を用いることによって、真円復元効果を長半径と短半径の変化量の形で算出する理論式を誘導する。真円復元効果とは、たわんで曲率が小さくなったところの曲率を大きく、逆に曲率が大きいところの曲率を小さくし、全体の曲率が一定になるように変形させる、と表現することができる。つまり内水圧という荷重で生じる曲げモーメントによる曲げたわみを定式化することができれば、真円復元効果の大きさを定量的に算出することが可能となる。

3. 研究の方法

3. 1 外圧実験による真円復元効果の確認

外圧実験に用いた供試体の断面図を図3に示す。楕円断面の管の両端をふさいだ形状となっており、厚さは管とふたの両方で4mmである。管厚の中央で長軸径は55mm、短軸径は45mmであり、直径50mmの真円から10%ずつの拡径と縮径を受けた形状となっている。

この形状の供試体を3Dプリンターで作成した。使用した機種はzortrax社のM200、用いたフィラメントはZ-ESDである。楕円管供試体に先立ち材料試験用の供試体を作成して試験を行い、後述するように弾性係数を得た。

楕円管供試体の変形を計測するために、高さ方向の中央、長軸の両端と短軸の両端に計4枚のひずみゲージを貼り付けた。用いたひずみゲージは東京測器研究所のGFLAB-3、長さ3mmのプラスチック用ゲージである。そして楕円管供試体を三軸圧縮試験機のセルに入れ、浮上しないように上下端を押さえたのちセルに注水し、供試体の外から水圧を作用させた。

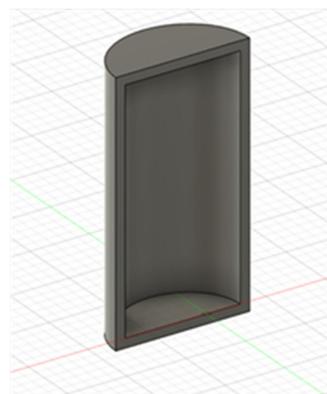


図3 楕円管供試体の断面図

3. 2 FEMによる外圧試験の再現

外圧試験で得られた結果を再現する目的で、FEMによる3次元解析を行った。用いたソフトウェアはATENA 3Dで、対称性に基づく解析対象領域の縮小は行わず、供試体全体を対象とした。これは、解析結果と実験結果との比較に、ひずみという離散化誤差の生じやすい値を用いなければならないためである。模型実験で生じたひずみが図4の領域1に収まっていたことから、材料を線形弾性体とみなし、弾性係数を 1.55kN/mm^2 とした。

3. 3 フレーム解析による変形量の計算

フレーム解析とは構造解析方法の一種であり、構造物を棒部材の集合体としてモデル化するものである。FEMと同様に節点と要素の概念を持ち、一つ一つの棒部材は節点と節点を結ぶ一次元の棒要素として設定される。

本研究のフレーム解析では図4に示すように、楕円のうち右上90°の領域を解析対象とし、これを19個の節点と18本の要素で分割した。両端の支持条件は図4に示すとおりで、考慮する荷重は全領域で一定の内圧のみである。楕円上に分布する各節点の位置を決める手順として、まず半径1m、中心角90°の円弧上に、中心からの角度5°間隔で節点を配置した。

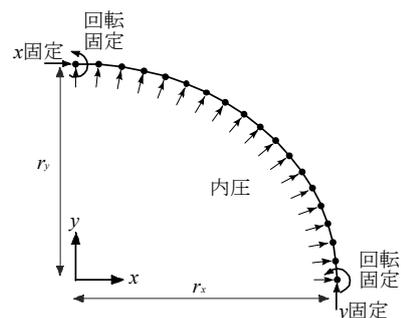


図4 解析対象領域と解析条件

3. 4 半径変化量の定式化と試算

フレーム解析を使えば、様々な形状の楕円に対し内圧で生じる変形の量を求めることができるが、それは解析で想定された個別の条件における、個別の変形量に過ぎない。しかしフレーム解析で求めた変形量と各条件の間関係性を誘導することができれば、各条件が変形量に与える影響の大きさを明らかにでき、様々な形状の楕円に対して変形量を求めることが可能となる。

フレーム解析で得られた各節点の変位のうち、楕円が真円に近づく変形を定量的に示す値として、長半径と短半径の変化量に着目した。楕円管の形状と弾性挙動を表す値には長半径 a 、短半径 b 、管長 l 、管厚 t と弾性係数 E がある。これらと内圧 P を変数とする関数によって、半径変化量の定式化を試みた。

4. 研究成果

4. 1 外圧試験と数値解析の結果

図 4 に示した供試体に外水圧を作用させたときのひずみを図 6 に示す。長軸端では引張ひずみが、短軸端では圧縮ひずみが生じている。外水圧で生じる断面方向の軸力は全体的に圧縮であるため、引張ひずみは曲げ変形が生じなければ発生しない。長軸端では外側を引張とする曲げ、つまり楕円を押しつぶすような変形が生じていることが確認された。またこれに伴って、短軸端では外側が圧縮になるような曲げとなっていると推察される。

圧力が小さい領域では、水圧とひずみの関係は長軸端と短軸端の両方で、ほぼ線形である。しかし圧力が大きくなると、ひずみの増加が鈍り、そして減少に転じる。これは 3D プリンターで制作した供試体の水密性が不十分であり、内部に水が浸入したためであると考えられる。実験中には供試体からの気泡は一切見られなかった一方、実験終了後の減圧中に気泡が供試体から外へ出たことを考えると、供試体の中と外にある程度の圧力差がなければ水や空気の入りは生じないと考えられる。

図 5 に引かれた 2 本の直線は、3 次元 FEM で求めた長軸端と短軸端における水圧とひずみの関係である。水圧の小さい領域では長軸端と短軸端の両方でひずみがおおむね一致しているが、当然ながら水の浸入による非線形性は再現されていない。またひずみの計算結果にはかなりのメッシュ依存性がみられ、実験結果と直接的な比較が可能な計算結果が得られているかについては、まだ検討が必要な状況である。

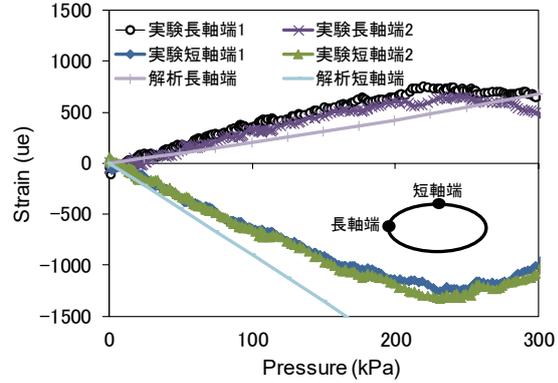


図 5 外水圧で生じたひずみ

4. 2 曲げと伸びによる半径変化量の算定式

フレーム解析で得られた曲げによる変形について、 x 半径 r_x と y 半径 r_y の 4 次項を説明変数、 x 半径変化量 δr_{x1} と y 半径変化量 δr_{y1} を目的変数とした重回帰分析を行った。その結果、 δr_{x1} の算出に用いる関数 $f_{x1}(r_x, r_y)$ と δr_{y1} の算出に用いる関数 $f_{y1}(r_x, r_y)$ の両方で、定数項の値が 0 である下記式が得られ、また予想どおり、 f_{x1} の r_x^4 の係数と f_{y1} の r_y^4 の係数や、 f_{x1} の $r_x^3 r_y$ の係数と f_{y1} の $r_x r_y^3$ の係数などが一致した。

同様に、伸びによる x 半径変化量 δr_{x2} と y 半径変化量 δr_{y2} を算出するための関数 f_{x2} と f_{y2} を、 r_x と r_y の 2 次項である r_x^2 、 $r_x r_y$ 、 r_y^2 の 3 つを説明変数として求めた。こちらでも同様に定数項が 0 である回帰式が得られた。

とう性管は埋設によって縦長にたわむことも、横長にたわむこともある。重回帰分析の対象となったフレーム解析の計算条件には、 x 半径 r_x が長半径 a になったものも、逆に短半径 b になったものもあり、どちらの場合にも高い説明力を持つ回帰式が得られた。つまり得られた関数 f_1 と f_2 は、 r_x と r_y のどちらが a でどちらが b なのかを区別せずに使用できる。またこれは同時に、 a と b のどちらが r_x でどちらが r_y なのかを区別する必要もないことを意味する。よって曲げによる長半径変化量 δa_1 と短半径変化量 δb_1 は、 $PI/EI=12P/Et^3$ であることより関数 f_1 を使って以下のよう求められる、

$$\delta a_1 = \frac{12P}{Et^3} f_1(a, b), \quad \delta b_1 = \frac{12P}{Et^3} f_1(b, a) \quad (1)$$

伸びによる半径変化量 δa_2 と δb_2 も $PI/EA=P/Et$ より

$$\delta a_2 = \frac{P}{Et} f_2(a, b), \quad \delta b_2 = \frac{P}{Et} f_2(b, a) \quad (2)$$

によって求めることができる。

4. 3 長短半径差の基礎方程式

ここまでの検討で得られた関数 f_1 と f_2 を用いて、長短半径差 $a-b$ の微分方程式を導出する。微小内圧 dP による長半径と短半径の微小変化量 da と db が

$$da = \left(\frac{l}{EI} f_1(a, b) + \frac{l}{EA} f_2(a, b) \right) dP, \quad db = \left(\frac{l}{EI} f_1(b, a) + \frac{l}{EA} f_2(b, a) \right) dP \quad (3)$$

と表せることから、これらの差を取ることで次に示す式が得られ、

$$d(a-b) = \left\{ \frac{l}{EI} (f_1(a, b) - f_1(b, a)) + \frac{l}{EA} (f_2(a, b) - f_2(b, a)) \right\} dP \quad (4)$$

次のように変形できる。

$$\frac{l}{EI} (f_1(a, b) - f_1(b, a)) = - \left[\frac{12}{Et^3} (\alpha_5 - \alpha_1) \{ (a+b)^2 - 2ab \} (a+b) + \frac{12}{Et^3} (\alpha_4 - \alpha_2) (a+b) ab \right] (a-b) \quad (5)$$

右辺の負号は $\alpha_1 < \alpha_5$ かつ $\alpha_4 < \alpha_2$ であることから、大かっこの中を正の値にするためのものである。

同様にして、 f_2 に関する部分も

$$\frac{l}{EA} (f_2(a, b) - f_2(b, a)) = \left[\frac{1}{Et} (\beta_1 - \beta_3) (a+b) \right] (a-b) \quad (6)$$

とできる。つまり式(4)の右辺は $(a-b)$ でくることができ、また残った部分は $a+b$ 、 ab と係数のみで表される。式(5)と(6)の大かっこの中をそれぞれ $F_1(>0)$ 、 $F_2(>0)$ と表し、式(12)に代入した後両辺を $(a-b)$ で除すことで、以下の微分方程式が得られる。

$$\frac{d(a-b)}{a-b} = - [F_1 - F_2] dP \quad (7)$$

曲げによる変形が卓越する条件では、内圧の作用で長半径 a は小さくなり、短半径 b は大きくなる。特に初期たわみが内径と比較して小さい場合には $a+b$ と ab は変化しないと仮定でき、また式(14)の大かっこの中は正の値となる。この仮定を用いて式(7)の大かっこの値を定数 $F(>0)$ 、内圧が作用する前の初期長半径と初期短半径をそれぞれ a_0 、 b_0 とし、式(7)を積分して自然対数を指数に直すと、長短半径差と内圧の関係を表す式(8)が得られる。

$$a-b = (a_0 - b_0) e^{-FP} \quad (8)$$

この式によれば、内圧の作用によって長短半径差は指数関数的に縮小し、管は真円に近づくことになる。そしてその速さは F の値に影響する E 、 $a+b$ 、 ab と t によって決まる。

4. 5 楕円管に生じる変形量の試算

式(8)を用いて、内圧によってたわみが解消される様子の試算を行う。管の内径、管厚と弾性係数を、大山らが行った実験に合わせて定めた。計算で想定する初期たわみについては、パイプラインの施工で許容されるたわみが内径の 5%以下とされていることから、拡張と縮径が同時に起きているとみなし、初期の長半径と短半径をそれぞれ $a_0 = 1.05 \times (D+t)/2$ 、 $b_0 = 0.95 \times (D+t)/2$ とした。そして $a+b$ 、 ab 、 a_0 、 b_0 、 D と t の間に $a+b = a_0 + b_0 = D+t$ 、 $ab = a_0 b_0 = 0.9975 \times (D+t)^2 / 4$ という関係が成り立つものとした。

最大内圧を 1.0MPa として得られた結果を図 6 に示す。内圧の作用によって長短半径差は急激に減少し、特に環剛性の低い VU 管では内圧 0.8MPa においてたわみの約 99%が解消される。一方剛性の高い FRPM 管では、同じ 0.8MPa におけるたわみの解消は約 70%となった。

埋設された管には背面土による拘束が生じるため、埋設管で生じるたわみの解消量は図 9 に示したのものよりも小さいと考えられる。大山らの実験では、荷重と変形の大きい領域において、VU 管では同一荷重におけるたわみの量が埋設後には埋設前の約 6.7 分の 1、FRPM 管では同じく約 3.1 分の 1 となったことが示されている。

とう性管の変形に与える背面地盤の影響が極めて大きいことを踏まえると、内圧による変形のみでの評価では実用上不十分であることは明らかである。背面土による拘束を定量的に評価する手法を開発し、本研究の計算式と併用しなければならないと考えられる。

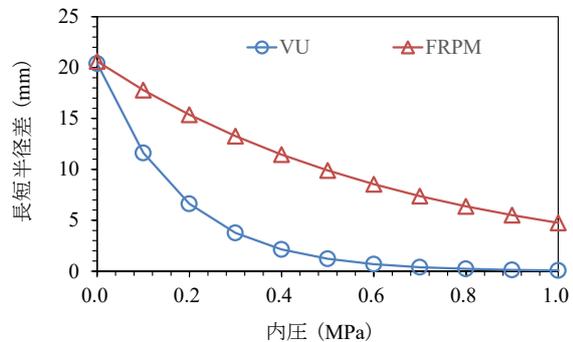


図 6 内圧による長短半径差の変化

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 石井将幸・上野和広・兵頭正浩・大山幸輝	4. 巻 90
2. 論文標題 内圧を受ける楕円管に生じる真円復元効果	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 農業農村工学会論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 石井将幸・上野和広
2. 発表標題 内圧による楕円管の真円復元効果に関する模型実験と数値解析
3. 学会等名 2020年度農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

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
---------	---------