

デプスゲージによるひずみ推定手法の検証

古澤 忠義・林田 清華

近畿農政局 淀川水系土地改良調査管理事務所 保全計画課 (〒612-0855 京都市伏見区桃山町永井久太郎56)

キーワード 農業用水路, FRPM管, 機能診断, 曲率半径, ひずみゲージ

1. はじめに

パイプラインの構造的な安全性を評価するため、パイプラインの変状状態の確認手法のひとつとして、一般的にたわみ量の計測が行われている。機能診断におけるたわみ量による健全度評価は、「土木工事施工管理基準」（農村振興局）の規格値であるたわみ率5%以下のものをS-5（変状なし）とし、5%を超えるものをS-3（変状あり（補修））とする評価基準が設けられている¹⁾が、たわみ量と構造的な安全性の関係は不明確であり、その評価としては定性的な評価に留まっている。しかしながら、昨今の厳しい財政状況のもと、維持管理や施設更新に関しては、より精度の高い更新計画の策定が求められていることから、パイプラインの安全性の定量的な調査・評価手法の確立が急務となっている。

こうした状況の中、有吉らの研究^{2,3)}により、デプスゲージを用い計測した鋼管の曲率から発生するひずみと応力を推定する手法が開発されており、様々な材料で明確となっている破断ひずみや破壊応力を基準として、この手法で推定したひずみや応力によりパイプラインの構造的な安全性を定量的に評価することが可能となる。本報では、デプスゲージによるひずみの推定手法について、鋼管以外での適用の可能性や現場での適用の可能性を検討するため、FRPM管を用いた試験により、施工性、経済性の観点からその他のひずみ推定手法と比較しながら、その有効性を評価する。

2. 検証の概要

FRPM管を用いて外圧試験を行い、ひずみゲージにより計測されるひずみの実測値と管の曲率より推定したひずみを比較検証する。また、通常载荷に加え、現場での適用の可能性を検討するため、底部強制変位载荷により現場で起こりうる歪な変形を再現し試験を行う。さらに施工性、経済性を比較するため、その他の手法として、

レーザースキャナにより図化される断面図から解析により求めたひずみについても比較し、それぞれのひずみ推定手法の有効性について検証する。

3. ひずみの推定手法

(1) 曲率の変化によるひずみと応力の推定手法

本手法では、デプスゲージにより管の曲率を測定し、曲率の変化から、横断方向のひずみを推定する。測定方法を図-1に示す。変形後の曲率半径(管厚中心)を r' とすると、次の式(3a)により計算できる。

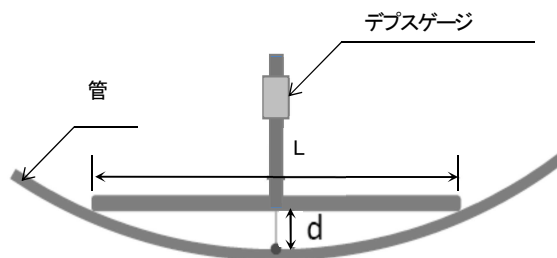


図-1 曲率の測定方法

$$r' = \frac{L^2 + 4d^2}{8d} + \frac{t}{2} \quad (3a)$$

ここで、 L :ベース長、 d :ゲージ読み値、 t :管厚である。

曲がり梁の理論により、上式(3a)にて求めた曲率半径を下式(3b)、(3c)に代入して、パイプに発生する最大曲げひずみ ϵ_{max} 及び最大応力 σ_{max} が計算できる。

$$\epsilon_{max} = \frac{t}{2} \left(\frac{1}{r'} - \frac{1}{r} \right) \quad (3b)$$

$$\sigma_{max} = E \epsilon_{max} \quad (3c)$$

ここで、 r :変形前の管厚中心半径、 E :弾性係数である。ただし、この方法は曲がり梁の理論を使用するため、次

の仮定条件の下に成立している。①変形は曲げのみを考慮し、軸力による変形はないものとする。②応力は弾性領域にある。③管の半径は管厚に比べてかなり大きい。

(2) レーザースキャナによるひずみの推定手法

本手法では、レーザースキャナにより管の形状を点群データとして取得し、作成される断面図を用いて解析によりひずみを求める。レーザースキャナにより取得される点群画像を図-2に示す。点間距離は5mm以内である。解析はフレーム解析とFEM解析により行った。フレーム解析は汎用ソフトで計算可能であるが、FEM解析は解析ソフトが必要であり専門業者に委託される場合が多い。解析の流れを以下のように定めた。①材料の物性値を定める。②管底は固定とし、レーザースキャナ断面図から求めた変位量に近似する荷重を加え変形させる。③解析結果の断面図とレーザースキャナ断面図を比較し計算モデルの妥当性を確認する。④変形した格点のひずみを求める。

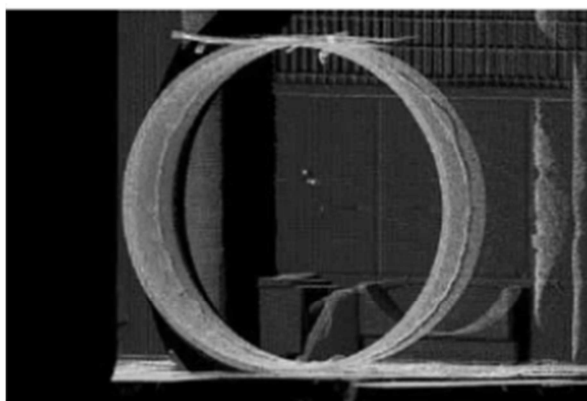


図-2 点群画像

(図-3) . ひずみゲージの設置位置、及びデプスゲージの計測位置は、管軸方向の中央部に、半円上部は円周30° 間隔とし、半円下部は底部強制変位载荷時に応力集中が予想されるため、円周10° 間隔とし、合計24点で計測した(図-4) . なお、デプスゲージは0.01mm単位の精度で計測できるものを使用した。また、デプスゲージのベース長は特殊仕様の400mmのものをを用いたが、ベース長が測定精度に与える影響を把握するため、通常载荷の5%たわみ時には既製品の79mmのものでも併せて測定を行った。

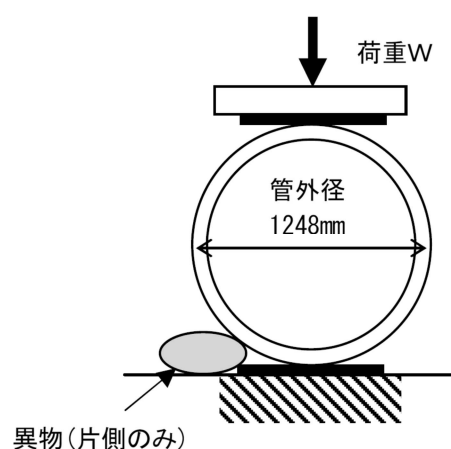


図-3 底部強制変位载荷

4. 外圧試験

(1) 試験の概要

FRPM管(φ1200内圧4種、長さ300mm)を用いて外圧試験(曲げ試験)を行った。試験管の内面に所定間隔でひずみゲージを設置し、変形時のひずみを計測するほか、レーザースキャナによる変形状態の計測、デプスゲージによる管の曲率の計測を行った。デプスゲージ同様に周方向ひずみのみを考慮するため、ひずみゲージは単軸ひずみゲージを用いた。計測は管設置時、1%たわみ時、2%たわみ時、3%たわみ時、4%たわみ時、5%たわみ時の計6回行った。载荷ケースは通常载荷と底部強制変位载荷の2ケースとした。通常载荷とは管底部を延長方向に線支持し、管頂部に延長方向に線载荷する方法であり、底部強制変位载荷とは、管底付近の片側のみに異物として木片を固定し、通常载荷と同様に载荷する方法である。

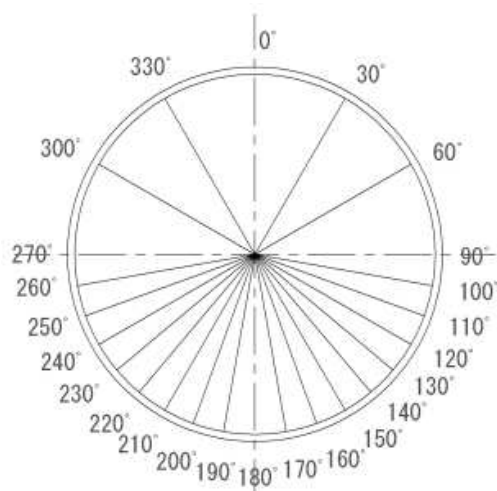


図-4 ひずみゲージ設置位置

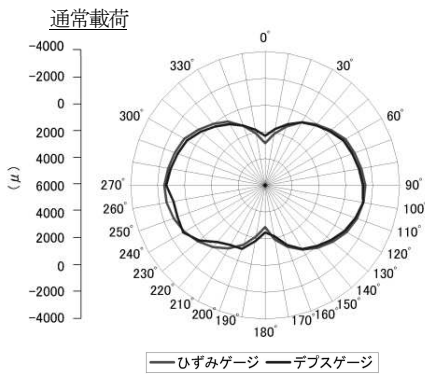


図5 ひずみ分布図 (3%たわみ時)

(2) デプスゲージによるひずみ推定結果

a) ひずみゲージとデプスゲージの比較

ひずみは引張を正、圧縮を負とし、3%たわみ時のひずみ分布を図-5に、5%たわみ時のひずみ分布を図-6に示す。ひずみゲージ値とデプスゲージによる計算ひずみは、5%たわみ時に管頂部および管底部で最大約1300 μ のひずみ差が生じており、実測ひずみよりデプスゲージの計算値が小さい結果となった。また、たわみ率が大きくなると管頂及び管底部の差が大きくなるが、分布としては概ね相関（ピアソンの積率相関係数 $r=0.95\sim0.99$ ）が得られている。強制変位载荷ケースでも両手法とも管底部の歪な変形を捉えており、同様に分布としては概ね相関（ピアソンの積率相関係数 $r=0.95\sim0.99$ ）が得られている。

外圧試験においては、载荷板と台により管頂と管底が拘束を受け変形が抑制される。たわみ率が大きくなるにつれ、管頂及び管底部の差が大きくなる要因としては、ひずみゲージではその拘束による微少な変形を捉えられるが、デプスゲージでは捉えられないためと考えられる。管頂部に生じる1300 μ のひずみとは15°～15°間の周方向長さ $L=314\text{mm}$ に対して約0.41mmの変形である。

b) デプスゲージのベース長による比較

ベース長400mmではひずみゲージ値におおよそ近似していたが、ベース長79mmはひずみゲージ値と大きな差が生じた（図-6）。

ベース長79mmを使用した場合、0.01mmの測定誤差が計算上約167 μ のひずみとして現れ、400mmでは0.01mmの測定誤差が約7 μ のひずみとして現れる。このため、ベース長によってひずみ計算の精度に差が現れたと考えられる。

したがって、 $\phi 1200$ 程度の管を計測する場合は、ベース長400mmの方が適していると考えられるが、今後デプスゲージを利用してのひずみ計算には、管径に見合ったベース長の検証を行い、妥当性を確認する必要がある。

c) 計算諸元による比較

デプスゲージによるひずみの計算においては、実測す

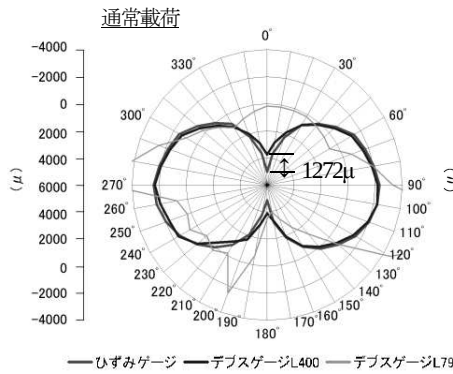
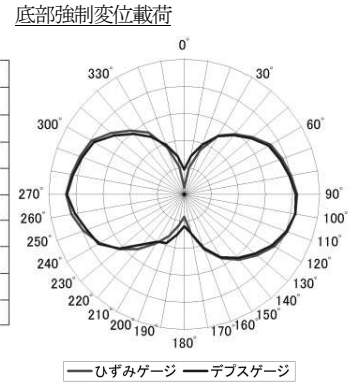


図6 ひずみ分布図 (5%たわみ時)



る管厚等の諸元を用いるのが最も実際のひずみに近いと考えられるが、埋設されている管の諸元は厳密には分からないことが多い。そこで、現場での適用性の観点からJIS規格値を使用して計算を行うことの妥当性を、実測値諸元とJIS規格値諸元を用いた計算結果を比較し検証した。

ひずみの大きくなる管底部の結果を図-7に示す。実測値と規格値では約5%の差が生じたものの、その差は微小であることから、規格値をひずみ計算に適用し、埋設管のひずみなど評価を行っても支障がないと考えられる。

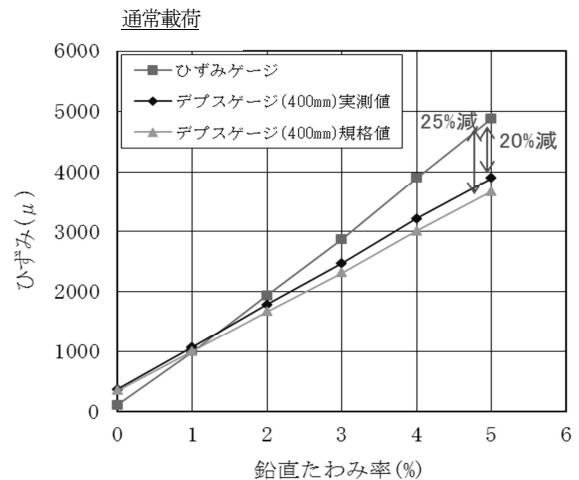


図7 ひずみ分布図 (計算諸元比較)

(3) レーザースキャナによるひずみ推定結果

レーザースキャナの測定画像を図-8に示す。また、レーザースキャナの断面図から解析（FEM解析およびフレーム解析）により求めた5%たわみ時のひずみの分布を図-9に示す。何れの解析手法もデプスゲージの計算値、及びひずみゲージ値におおよそ近似していた。ただし、管頂、管底部及び強制変位部ではひずみゲージ値と差が生じており、さらにFEM解析値は管側部でも差が見られた。

この差の要因としては、レーザースキャナで捉えた歪で微小な変形を正確に図化するのが困難であるためと考えられる。また、レーザースキャナの断面図から解析によりひずみを求めるためには、断面図化や解析に作業時間がかかり、結果を導くまでの効率が悪いといえる。

通常载荷

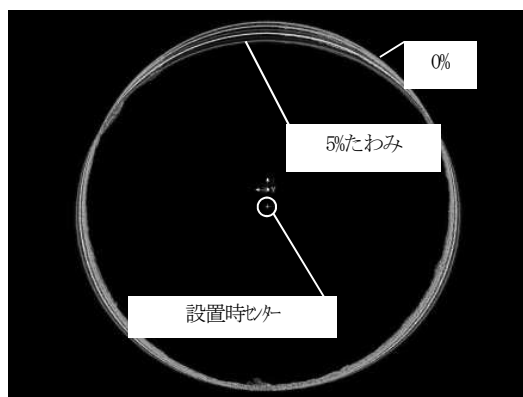
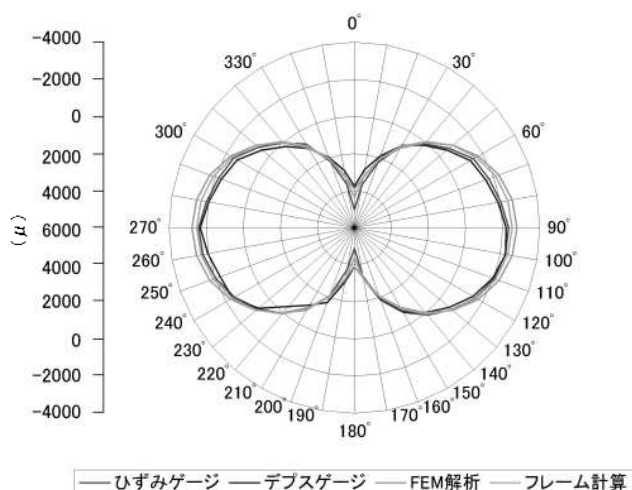


図-8 レーザースキャナ測定画像

通常载荷



底部強制変位载荷

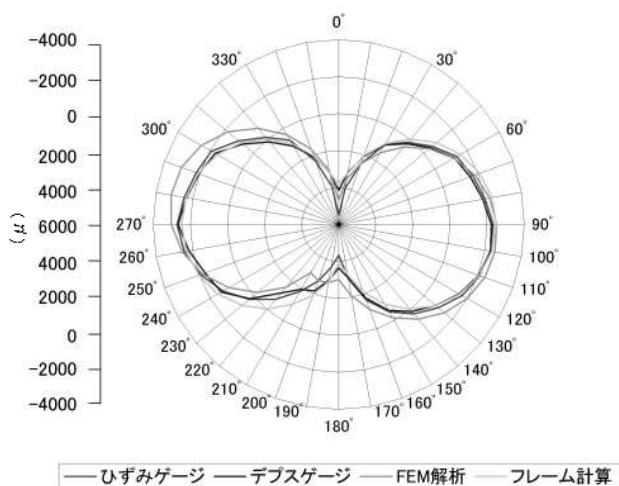


図-9 ひずみ分布図（手法比較）

5. 各手法の有効性評価

デプスゲージにより求められたひずみとレーザースキャナと解析（FEM解析およびフレーム解析）により求められたひずみを総合的に比較し、最も簡単に管体の状態を評価するのに適した調査・解析手法の有効性を検討する。

デプスゲージの計算値とFEM解析およびフレーム解析の値は何れも近似値を示し、ひずみゲージとの相関（ピアソンの積率相関係数 $r=0.97\sim0.99$ ）も概ね得られた。以下に3手法のメリットとデメリットを示す。

(1) デプスゲージ

a) メリット

- ・精度は比較的高い。
- ・計測は比較的容易に行える。
- ・ひずみや応力を求めるのが比較的容易である。
- ・管内調査で併用して計測できるため経済的（FRPM管φ1200においてたわみ量、継手間隔、デプスゲージによる曲率計測を含み1m当たり2200円（諸経費除く））である。

b) デメリット

- ・斜め方向の厳密な位置（角度）の計測には誤差が生じる。
- ・管径によりデプスゲージベース長の検証が必要である。
- ・保護層の膨れなどの著しい変形は計測できない。
- ・水没部は計測できない。

(2) レーザースキャナとFEM解析

a) メリット

- ・精度は比較的高い。

b) デメリット

- ・レーザースキャナによる管の変形形状を取得する必要があり費用が掛かる（FRPM管φ1200において1m当たり6500円（諸経費除く））。
- ・解析に必要な諸条件（管の物性値、载荷条件など）が必要であり条件の整理に時間を要する。
- ・物性値を与えるメッシュの数により結果が大きく異なり、レーザースキャナの変形形状に合うように何度もトライアルが必要で、解析に時間を要するため不経済である（外注価格：解析1ケース（1断面）当たり10万円（諸経費除く））。
- ・FEM解析は解析ソフトが必要で、専門業者へ委託する場合がほとんどであり不経済である。
- ・水没部はレーザースキャナによる測定ができない。

(3) レーザースキャナとフレーム解析

a) メリット

- ・精度は比較的高い。
- ・汎用ソフトで解析可能である。

b) デメリット

- ・レーザースキャナによる管の変形形状を取得する必要がある費用が掛かる（FRPM管φ1200において1m当たり6500円（諸経費除く））。
- ・解析に必要な諸条件（格点に与える数値）が必要であり条件の整理に時間を要する。
- ・レーザースキャナの変形形状に合うようにトライアルが必要であり、解析に時間を要するため不経済である（解析1ケース（1断面）当たり7万円（諸経費除く））。
- ・水没部はレーザースキャナによる測定ができない。

6. おわりに

デプスゲージによるひずみの推定手法については、FRPM管においても施工性、経済性からその有効性につ

いて確認でき、管の安全性を定量的に評価できる手法として、集中的な機能診断に活用できる可能性が示唆された。ただし、ベース長によりひずみ計算の測定精度に大きな差が表れるため、今後の適用にあたっては管径に見合うベース長の検証が必要である。

参考文献

- 1) 社団法人農業土木事業協会：農業水利施設の機能保全の手引き「パイプライン」,pp.参-111,2010
- 2) 有吉充：埋設パイプラインのひずみ推定手法の開発, H23 農業農村工学会大会講演会要旨集,pp.406-407,2011
- 3) 有吉充：パイプラインの変形と発生応力の算定方法～デプスゲージによる応力の測定～,第2回パイプライン事例検討会資料,2009