(61) 光ファイバを用いた3次元地中変位計による ねじれ算出手法の検証実験

中島　拓巳[1]・山内　良昭[2]・永谷　英基[3]・今井　道男[4]
・川端　淳一[5]・岸田　欣増[6]

[1]正会員　鹿島建設株式会社（〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1）
E-mail: nakastak@kajima.com

[2]非会員　ニューブレクス株式会社（〒650-0023 兵庫県神戸市中央区栄町通 1-1-24）
E-mail: yamauchi@neubrex.com

[3]正会員　鹿島建設株式会社（〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1）
E-mail: nagatanh@kajima.com

[4]正会員　鹿島建設株式会社（〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1）
E-mail: michio@kajima.com

[5]フェロー会員　鹿島建設株式会社（〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1）
E-mail: kawabata-j@kajima.com

[6]正会員　ニューブレクス株式会社（〒650-0023 兵庫県神戸市中央区栄町通 1-1-24）
E-mail: kishida@neubrex.com

シールド工事や開削工事において，地中変位の計測結果を施工管理にフィードバックできれば，地中変位に起因する事故発生を確実に防止する安全な施工管理が可能となる．これを実現するために，筆者らは光ファイバを用いた3次元地中変位計の開発を進めている． 3次元地中変位計は6本の光ファイバをポリエチレン製のケーブルに螺旋状に編み込んだ機構であり，計測ひずみからねじれと 3 次元変位量を算出できる．ねじれと 3 次元変位量を算出するためには初期ねじれが必要であり，従来，加速度計を用いてこれを実測してきたが，コストや手間がかかるという課題があった．そこで，光ファイバ計測による初期ねじれの算出方法を考案し，実験でその手法を検証した．その結果，鉛直変位量への影響度が±10%以内の精度で初期ねじれを取得できることが分かった．

Key Words: *optical fiber sensor, 3D underground displacement，torsion，measurement accuracy*

1. はじめに

(1) 3次元地中変位計の開発背景

シールド工事や開削工事において，地中変位の計測結果を施工管理にフィードバックできれば，地中変位に起因する事故発生を確実に防止する安全な施工管理が可能となる．例えば，シールド工事において，切羽直上の地中変位を掘進線形に沿って計測し，沈下や陥没現象の予兆が把握できれば，予め適切な対策を講じることができる．そこで，筆者らはひずみ分布計測が可能な光ファイバを活用し，3 次元変位量を分布計測できる 3 次元地中変位計（**図-1**）を開発している [1)]．実際，シールドマシン直上に事前にさや管を埋設し，その中に30mの3次元地中変位計 を挿入することで，掘進時における地中変位をリアルタイムに監視した実績がある [1)]．また，長距離計測を模擬した延長 170 m の 3 次元地中変位計を用いた曲げ実験を実施し，1 mm の 3 次元変位量を精度よく算出できることを実証した [1)]．



図-1　3次元地中変位計の外観

図-2 に示すとおり，3 次元地中変位計を現場で敷設する際は，さや管挿入時に 3 次元地中変位計にねじれが生じる可能性がある．すなわち，現場敷設直後の初期ねじれを把握していないと，正確に 3 次元変位量を算出することが難しい．そのため，従来は加速度計を用いて初期ねじれを実測していた．しかし，今後さらに長距離での敷設を考えた際，加速度計による初期ねじれの実測は労力も費用も増大する．そこで，本稿では光ファイバ計測を用いた初期ねじれの算出方法を考案し，3 次元地中変位計に強制ねじれと強制変位を与える実験を行い，考案手法の妥当性を検証したのでその結果について報告する．

(2) 3 次元地中変位計の技術概要

3 次元地中変位計の内部構造を図-3 に，ひずみから変位量を算出する際の各記号の説明を表-1 に示す．図-3 の断面図に示すとおり，3 次元地中変位計は，フレキシブルなポリエチレン製のケーブル（外径：22 mm）に螺旋状に 6 本の光ファイバを編み込んだ機構である（内層に 3 本，外層に 3 本）．また，角度のレングスマークとして，ケーブルには 2 凸（図-3 参照）を示している．内層・外層ともに光ファイバは中心から 120 度毎に円を 3 分割した位置にあり，3 本とも同じ巻きピッチで編み込まれているが，内側と外側で逆向きに巻いている．1 本の光ファイバで計測できるひずみ（ε）の算出式を式(1)に示す．

$$\begin{aligned}\varepsilon = \epsilon(sin^2\,\varphi - \nu\,cos^2\,\varphi)\\ -\kappa_x r\sin\theta\,(\sin^2\varphi - \nu\cos^2\varphi)\\ -\kappa_y r\cos\theta\,(\sin^2\varphi - \nu\cos^2\varphi)\\ +\Phi r\sin\varphi\cos\varphi\end{aligned} \quad (1)$$

また，式(1)で用いるθ（ファイバ敷設角）は，図-4 に示す初期ねじれA_0と相対的ファイバ敷設角θ_{ref}から決定する．A_0の値が変わるとθの値が変わり，κ_xとκ_yの値も変わる．したがって，A_0が正確な値でなければ，κ_xとκ_yを正確に算出できなくなる．また，ねじれと 3 次元変位量算出のフロー図を図-5 に示す．まず，6 本の光ファイバのそれぞれの計測ひずみ（$\varepsilon_{1,2,3,4,5,6}$）を式(1)に代入し，6 つの連立方程式を解くことで，引張ひずみ・x 方向曲率・y 方向曲率・比ねじれ角を求める．比ねじれ角を固定点から積分することで，ねじれを算出する．ねじれの算出式を式(2)に示す．

$$A(n) = \frac{\Delta s}{2}\sum_{i=1}^{n}(\Phi_i + \Phi_{i-1}) \quad (2)$$

ここに，$A(n)$：ある地点 n で生じたねじれ，Δs：光ファイバの計測間隔，Φ_i：地点iにおける比ねじれ角，Φ_{i-1}：地点$i-1$における比ねじれ角である．

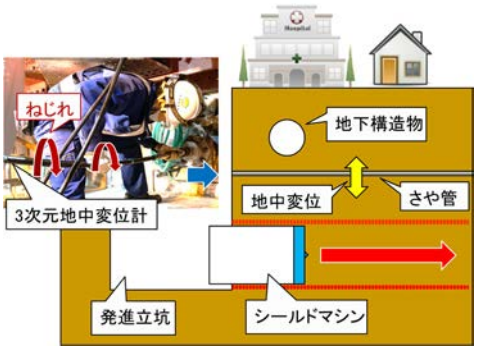


図-2　シールドマシン直上への光ファイバ設置例

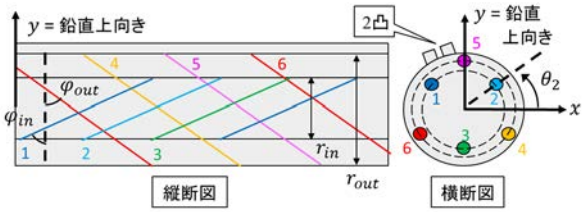


図-3　各種計算パラメーター

表-1　各種パラメーター

計測値	$\varepsilon_{(1,2,3,4,5,6)}$	計測ひずみ
算出値	ϵ	引張ひずみ
	κ_x	x 方向曲率
	κ_y	y 方向曲率
	Φ	比ねじれ角
計算パラメーター	$r_{(in,out)}$	径
	$\varphi_{(in,out)}$	ピッチ角
	$\theta_{(1,2,3,4,5,6)}$	ファイバ敷設角
	ν	ポアソン比

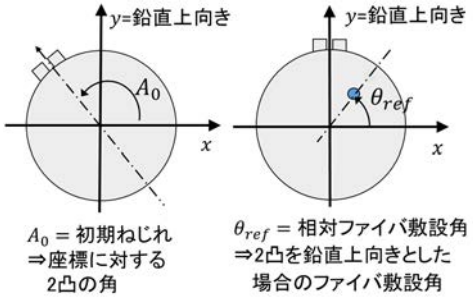


図-4　θを定義するパラメーター

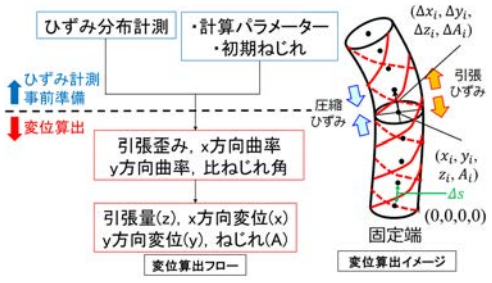


図-5　ねじれと 3 次元変位量算出のフロー図

2. ねじれ算出方法

(1) 初期ねじれ算出方法

光ファイバによる初期ねじれ算出のフローを**図-6**に示す．光ファイバによるひずみ分布計測には，ブリルアン散乱光 [2]を用いる（以下，ブリルアン計測）．光ファイバによるひずみ分布計測は解析する散乱光の種類により特徴が異なるが，ブリルアン計測は大変形計測に向いている [2]．ブリルアン計測を採用したのは，敷設前と敷設後で大きな変形が生じる可能性があるためである．敷設前と敷設後にブリルアン計測を実施し，その差分から敷設前後で生じた初期ねじれを算出する．

(2) ねじれ算出式

ブリルアン計測によるひずみ結果には式(1)のとおり，初期ねじれと3次元変位量による成分を含むため，初期ねじれのみを抽出する必要がある．そこで，3次元地中変位計内の内巻き3本のファイバと外巻き3本のファイバのそれぞれの平均値の差分をとることにした．式(1)から導出した式(3)に示すとおり，φ_{in}とφ_{out}が異なる螺旋構造のため，3次元変位量の成分を式からなくすことができる（各記号の説明は**表-1**を参照）．

$$\frac{(\varepsilon_1+\varepsilon_2+\varepsilon_3)}{3}-\frac{(\varepsilon_4+\varepsilon_5+\varepsilon_6)}{3} = \Phi(r_{in}\sin\varphi_{in}\cos\varphi_{in}-r_{out}\sin\varphi_{out}\cos\varphi_{out}) \quad (3)$$

r_{in}，r_{out}，φ_{in}，φ_{out}，は3次元地中変位計製作時に決まるため，ブリルアン計測結果を式(3)に代入すれば，比ねじれ角を算出することが可能である．なお，ブリルアン計測結果のばらつきを考慮し，比ねじれ角は区間長1 mにおける移動平均値を使用する．この移動平均後の比ねじれ角を式(2)に代入して初期ねじれを算出する．

3. ねじれ実験

(1) 実験方法

50 mの3次元地中変位計を用いて実験を行った．まずは3次元地中変位計を平滑面に延伸した（**図-7** (a)）．その後，予め設定した強制ねじれと強制変位を3次元地中変位計に人力で与え（**図-7** (b)），強制ねじれを維持できるように小型万力で固定した．強制変位を与える場合は，強制ねじれを固定した後に水平方向に強制変位を与えた．その後，強制ねじれと強制変位によって生じた初期ねじれを，3次元地中変位計の全長を対象に2 mピッチで実測した（**図-7** (c)）．ブリルアン計測の計測仕様を**表-2**に示す．

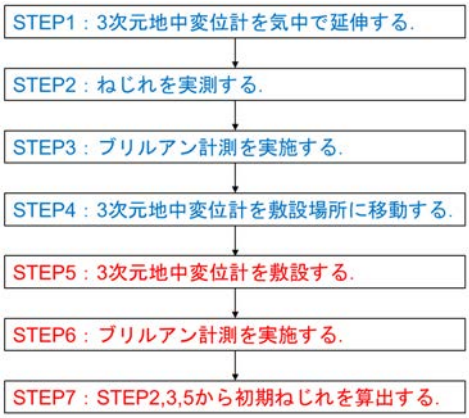


図-6 初期ねじれ算出のフロー図
（青字：敷設前，赤字：敷設後）



(a) 3次元地中変位計の延伸



(b) 3次元地中変位計に強制ねじれ負荷



(c) 3次元地中変位計の初期ねじれ実測

図-7 実験状況の写真

表-2 計測仕様

使用計測器	NBX-7031(ニューブレクス社製)
計測間隔	5 cm
空間分解能	50 cm

(2) 実験ケース

実験ケースは強制ねじれと強制変位をパラメーターに 3 ケース設定した（**表-3**）．事前に実施した現場での敷設方法を模擬した実験で，敷設後初期ねじれの比ねじれ角は約 1.8 度/m となることが分かっていた．そのため，強制ねじれは比ねじれ角が 1.8 度/m となるように，2 水準で設定した（ケース 1,2）．また，強制変位を与えた場合でも，想定どおりに初期ねじれのみを抽出できるかを検証するため，強制ねじれに加えた後に強制変位を与えたケースも設定した（ケース 3）．

表-3 実験ケース

ケース番号	ねじれ		変位	
	地点 (m)	ねじれ量 (度)	地点 (m)	変位量 (mm)
1	25	45	—	—
2	12.5 37.5	22.5 -22.5	—	—
3	25	45	25	100

(3) 実験結果

図-8 に 3 次元地中変位計による初期ねじれの算出値と実測値比較を，**図-9** に算出値と実測値の差分を示す．初期ねじれ分布の傾向が実測値と算出値で概ね一致し，算出値と実測値の差分も全体的に 10 度以内でおさまったことから，本手法で精度良く初期ねじれを算出できていると考える．また，ケース 1,3 の結果が大きく変わらなかったことから，初期ねじれと変位が同時に生じた場合でも，初期ねじれのみを算出できることを実証した．また，全てのケースで算出値と実測値の差分は最大値は 20 度であった．この差分が算出する鉛直変位に与える影響は，真値の鉛直変位の約 0.93 倍となる（真値が 1 mm の場合，算出値は 0.93 mm）．よって，今回考案した手法による初期ねじれの計測誤差は最大で 20 度であり，鉛直変位量の算出誤差は±10 %以内の精度で初期ねじれを算出できることが分かった．

4. おわりに

今回考案した手法は，鉛直変位量の算出精度に大きな影響を与えることない精度で，初期ねじれを算出できることが検証できた．今後は敷設時に本手法を用いて初期ねじれを算出し，これを用いて 3 次元変位量を算出することとした．今後も安全な施工管理に資する研究開発を進める所存である．

参考文献

1) 中島拓巳，永谷英基，那須郁香，藤原航太郎，今井道男，川端淳一：光ファイバによる 3 次元地中変位計測技術(Geo-NewROn)の開発，鹿島建設技術研究所年報 Vol.70，2022.
2) 岸田欣増，李哲賢，西口憲一，山内良昭，グジク アーター：SMF におけるひずみと温度が識別できるハイブリッド分布測定システムの開発，電子情報通信学会 信学技報，Vol.112，No.403，2013.

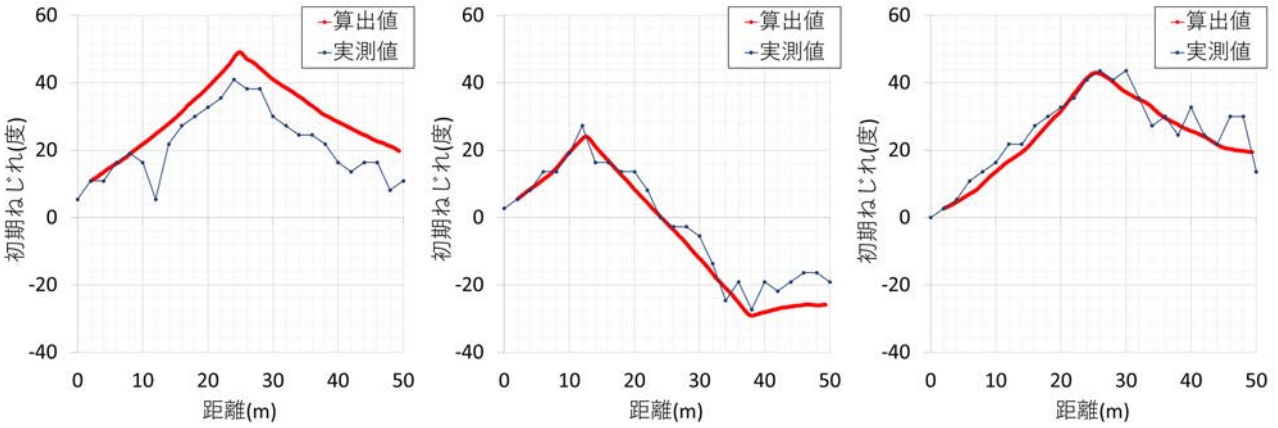


図-8 算出値と実測値の比較（左からケース 1,2,3）

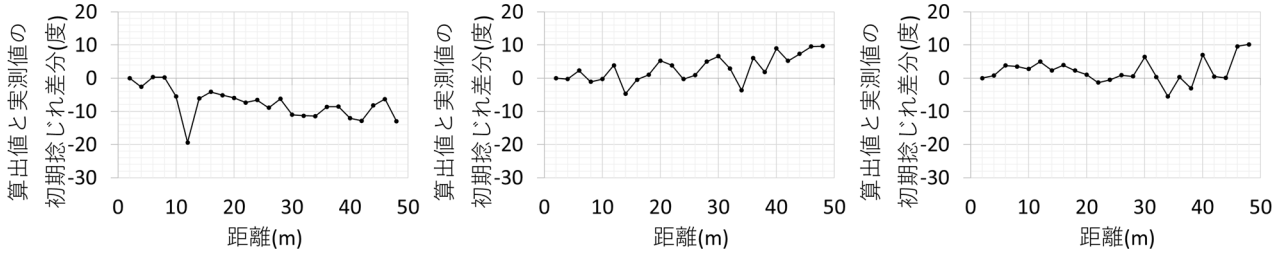


図-9 算出値と実測値の差分（左からケース 1,2,3）