# 傾斜データを活用した掘削土留め工の3次元的な変形挙動の評価

鉄道総合技術研究所	正会員	松丸 貴樹	田中 祐二
中央開発		王寺 秀介	
	正会員	橋本 和佳	

## 1.はじめに

掘削土留め工の施工においては,設計時には不確実な点が多いこと,また近接施工となる場面も多いことから, 状態監視を行いながら施工を行うことが基本となる。この中で,土留め壁の変形の把握は最も重要な項目であり, 具体的な計測の方法としては測線ごとに傾斜計による傾斜計測を行って,設置間隔と傾斜角から変位に換算するこ とで評価することが多い。しかしながら,この手法では鉛直方向の傾斜計設置間隔を密とする必要があり,離散的 な傾斜計の配置では計測データを十分に活用することが難しい。著者らは新たに計測データを3次元的に解析・表 示できるシステムを構築しており<sup>1)</sup>,本研究では本システムを活用して傾斜データを変位に換算することなく変形 評価に活用する手法を提案し,既知である曲面関数の再現,および載荷試験の評価をもとに妥当性の検証を行った。

#### 2.3次元計測システムの概要と傾斜データの取扱い

計測データの3次元評価システムは,各種計測機器で計測したデータをリアル タイムに集約し,面的に評価することで土留め壁全体の挙動を3次元的に可視化 するものである<sup>1)</sup>。

本システムにおいては, 土留め壁の変形形状を図-1 に示す 3 次元座標空間内 での曲面 f(x, y)の関数で表す。トータルステーションによる測量などにより,座 標 $(x_p, y_p)$ での変位  $u_p$  ( $=z_p - z_{p0}$ , ここで点 p での初期の z 座標を  $z_{p0}$ ,現在の座標 を  $z_p$  とする)が直接得られた場合には,(1)式の条件が満足される。ここに,  $\sigma$ は標準偏差であり,計測器・測定手法ごとの誤差の範囲を表す。一方,傾斜デー タについては,傾斜計の設置位置の座標 $(x_q, y_q)$ で傾斜角  $\theta_q$ が得られた際に,傾 斜角を変位等に変換することなく直接的に曲面の条件式として(2)式のように fの y 方向の導関数として取り扱うこととする。



図-1 3次元座標における土留め 壁の変形の表現方法

$$f(x_p, y_p) = z_p \pm \sigma \quad (1)$$

$$f_{y}(x_{q}, y_{q}) = -\tan\theta_{q} \quad (2)$$

$$f(x, y) = \sum_{i=1}^{M_{x+3}M_{y+3}} \sum_{j=1}^{C_{ij}} c_{ij} N_i(x) N_y(x)$$
(3)

曲面の形状は,(3)式に示す野々垣ら<sup>2)</sup>の3次B-スプライン関数を用いて表  $Q(f;\alpha)=J(f)+\alpha R(f)$  (4) すものとする。この式において  $c_{ij}$ が未知数となるが,具体的には(4)式で示す拡大目的関数  $Q(f;\alpha)$ を最小化する条件により求める。ここで,J(f)は曲面の滑らかさを評価する汎関数,R(f)はデータの充足度を評価する汎関数, α は両者のバランスを調整するパラメータである。その他の詳細は,文献2)を参照されたい。

### 3.提案手法の検証

既知の曲面関数の再現,模擬壁面の載荷試験の計測結果の評価を行い,**2**の提案手法の妥当性の検証を行った。 3.1 既知である曲面関数の再現 曲面を関数によって表し,各評価点でのy方向の導関数f<sub>y</sub>(x<sub>q</sub>, y<sub>q</sub>)を与条件として 曲面の再現を行い,提案手法の妥当性の検証を行った。

検討ケースは2ケースとし, CASE1 では(5)式で, CASE2 では(6)式によって曲面が表されるものとする。曲面の 作成領域は,0 x 1000,0 y 1000とし  $f(x, y) = \left(20 + 10\sqrt{2}\right) \sin\left(\frac{x}{1000}\pi\right) \left\{ \sin\left(\frac{1000 - y}{2000}\pi\right) - \sin\left(\frac{1000 - y}{4000}\pi\right) \right\}$ (5) た。それぞれのケースにおいて, (x<sub>a</sub>,  $y_{q}$ )=(100 · 200 · ... · 900 , 100 · 200 · ... ·  $f(x, y) = 15 \exp\left(\frac{x - 1000}{1000}\right) \sin^2\left(\frac{x}{500}\pi\right) \exp\left(\frac{y}{200}\right)$ (6)900)の各座標での f<sub>v</sub>(x<sub>a</sub>, y<sub>a</sub>)の値を算定し,これらの値と(7) 式で示された境界条件を与条件とすることとした。曲面作 f(x, 1000) = 0成時の領域の分割数は,水平・鉛直方向共に 50×50 とした。また,3次 B-スプライン関 (7)f(0, y) = 0数で用いる各パラメータは文献 3)に示す値を活用している。 f(1000, y) = 0

キーワード 傾斜計,土留め壁,3次元,変形

連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 (公財)鉄道総合技術研究所 TEL 042-573-7261

各ケースの,代表的な位置でのf(x, y)の関数値と提案手法による解析結 果の比較図を図-2 に示す。CASE1 で は、いずれの位置・方向においても 関数値と解析結果は一致している。 一方, CASE2 では関数値と解析結果 に乖離が見られており,fのy方向導 関数のみの活用では局所的な変化の 大きい曲面を再現することが難しい

ものと考えられる。そこで, f(x<sub>p</sub>, 0), x<sub>p</sub>=100, 200, ..., 900の値を追加で活用し, 曲面を再度求めることとした。 その結果を図中の緑色の波線で示すが,f(xn,0)を活用して求めた曲面は関数値と概ね一致することが確認された。 3.2 模擬壁面載荷試験の評価 載荷試験は,高さ2.0m,延長3.0m,奥行き10mmのポリカーボネート製の供試体 に強制変位を与え,各種計測器を用いて壁面の変位や傾斜,ひずみを測定するものである。載荷は,位置・変位量 ならびに境界条件を変えて数パターン行った<sup>4</sup>。本検討では,MEMS 傾斜計から得られた傾斜データ,ならびに比 較としてトータルステーション(以降では ,TS と記述する )による測量から得られた変位を対象とすることとする。

検討に用いた計測器・測点の配置図を 表-1に示す。配置は計3ケースを設定し, 配置 A では比較対象として, TS による測 量ターゲットの計測データを密に配置し た場合を取り扱うこととする。配置 B は 傾斜計を用いた場合であり,配置 C-1,C-2 については傾斜計だけでなく,TS による壁面頭 部ないし中央部での延長方向のデータを活用す ることとした。曲面は,水平・鉛直方向を 60×40 の領域に分割して作成した。載荷は位置,変位量, 境界条件を変えて数パターン実施しているが,本 検討では表-2に示すCASE1~3の3ケースを取り 扱うこととした。

ケースごとの代表断面位置(表-2参照)での変位の深度分布の 比較図を図-3 に示す。CASE2 を除き,配置AとBで概ね類似し た変位分布が得られている。また,傾斜データのみならず TS の変 位も活用した配置 C では ,CASE2 も含め配置 A により近づく結果 が得られている。

### 4.まとめ

本論文では,掘削土留め工における土留め壁の変形の評価において,3次B-スプライン法において傾斜データ を直接活用する手法を提案し、既知である曲面関数の再現、ならびに模擬壁面の載荷試験の評価により提案手法の 妥当性の検証を行った。土留め壁の変形形状にもよるが,傾斜データのみであっても概ね土留め壁の変形の再現が 可能であり、さらに部分的に変位計測データを追加で活用することで、精度が向上することを確認した。

x = 1500

下端固定



A В C-1(載荷1・2) C-2(載荷3) 0 . . . . 0 0 0 • 0 ۰ 0 0 0 • 0 D ........ o 0 o • 0 0 0 D ۰ 0 ۰ 0 は TS の測量ターゲット, は傾斜計設置位置を表す。 表-2 載荷ケース CASE1 CASE2 CASE3 載荷: 30mm 載荷<u>:</u>80mm 固定 固定 固定 載荷: <mark>3</mark>0mm



表-1 計測器・測点配置一覧

参考文献 1)王寺秀介,大西徹夫,松丸貴樹,田中祐二:地盤構造物を対象とした計測データの3次元評価システムの構築,第 46 回地盤工学研究発表会,2011.2)野々垣進,升本眞二,塩野清治:3次 B-スプラインを用いた地層面境界面の推定,情報地質, No.19, pp.61-77, 2008.3)松丸貴樹,田中祐二,王寺秀介,橋本和佳:計測データの3次元評価システムを用いた地盤構造物施 工時の計測手法に関する検討,第46回地盤工学研究発表会,2011.4)西原聡,橋本和佳,田中祐二,松丸貴樹:仮想土留め壁 を用いた強制変位実験における MEMS 傾斜センサーの精度検証事例,第46回地盤工学研究発表会,2011.