

掘削土留め工の 3 次元計測システムの開発

松丸 貴樹* 小島 謙一* 田中 祐二**
 栗山 亮介*** 久島 敏靖# 小湊 祐輝##

Development of Three-dimensional Measurement System for Earth Retaining Wall for Excavating Work

Takaki MATSUMARU Kenichi KOJIMA Yuji TANAKA
 Ryosuke KURIYAMA Toshiyasu HISASHIMA Yuki KOMINATO

Monitoring of deformation of earth retaining wall for excavating work is important in order to protect surrounding environment and to ensure the safety of structures during construction. However, it is difficult to evaluate the overall behavior only by the partial measurement, but the multipoint measurement tends to be expensive. In this paper, we introduced a system developed by us for evaluating and visualizing retaining wall as three-dimensional curved surface. In order to confirm the effectiveness of the proposed system for actual monitoring, we tried to apply the system to the on-site measurement. Furthermore, we proposed a method to conduct monitoring of retaining walls by combining this system and simple inclinometers.

キーワード：掘削土留め工，3次元計測，3次B-スプライン法，傾斜，独立型傾斜計

1. はじめに

掘削土留め工の施工時には、周辺環境や構造物の安全性を確保する観点から、施工時に状態監視を行いながら進めていくことが基本となる。また、鉄道近接工事では、土留め壁の変位に対する厳しい管理値が設けられていることが一般的である。しかしながら、具体的な計測方法は現場の規模や近接施工であるか否かなどの条件により大きく異なる。例えば、下げ振りをを用いた部分的な傾斜計測は小規模な掘削工事で適用されるが、土留め壁の全体的な挙動の把握が難しくなる。一方、近接施工では、多段式傾斜計により測線ごとに多数の深度で傾斜計測を行うことが一般的であるが、この方法でも設置箇所の測線での挙動の把握しかできない。土留め壁全体の挙動を把握するには複数の測線を設ける必要があり、計測費用の増加につながる。このため、土留め壁の変形挙動を簡易にかつ安価に捉える手法を構築することが求められる。

本研究では、計測機器の種類や配置を問わず、土留め壁の変形に関する計測データを3次元的に評価・可視化する手法を構築し、土留め壁の挙動を適切にかつリアル

タイムに評価可能なシステムとして現場計測への適用性を検討した。また、構築した手法の活用として、簡便な独立型傾斜計と組み合わせることで安価で精度良く計測を行う方法を提案し、その妥当性について検証を行った。

2. 掘削土留め工の 3 次元計測システム

2.1 3次元計測システムの概要

開発した3次元計測システムは、各種計測機器から得られた情報をリアルタイムに収録し、離散的な計測データを面的なデータに展開した後、土留め壁の変形状況を3次元的に可視化するものである。システムのイメージを図1に示す。

本システムは、大きく分けて①データ収録、②データ

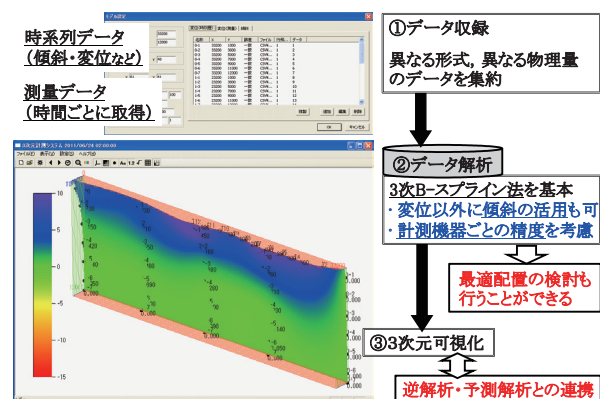


図1 掘削土留め工の3次元計測システムの概要

* 構造物技術研究部 基礎・土構造研究室
 ** 構造物技術研究部 (現 ジェイアール東日本コンサルタンツ株式会社)
 *** 構造物技術研究部 (現 株式会社復建エンジニアリング)
 # 東日本旅客鉄道株式会社 (東京工事事務所)
 ## 西日本旅客鉄道株式会社 (大阪工事事務所)

特集：構造物技術

解析，③3次元可視化の各機能から成る。①データ収録では，各種計測機器で取得した計測データを解析機能に引き継ぐものである。取り扱える土留め壁の計測データ（物理量）としては変位と傾斜がある。また，データの形式としては計測機器により時系列データとして取得するものと，トータルステーション測量や写真測量など不定期に人を介して取得するものがあるが，本システムでは両タイプのデータを収録できるものとした。

②データ解析機能は，①で収録した測点ごとの計測データをもとに土留め壁の変形挙動を3次元の曲面として解析する機能である。ここでは，地形学の分野で標高データから面的な地形形状の再現等で有用性が示されている3次B-スプライン法¹⁾を用い，土留め壁の変形計測への適用を図るため傾斜データの活用や計測機器ごとの精度を考慮できるよう改良を行った。詳細は2.2節に示す。

③3次元可視化機能は，②データ解析で求めた面情報を3次元ビュー上に表現する機能である。3次元ビュー上に表現する技術は，OSが標準装備する3次元グラフィックツールを使用している。

また，信頼性解析手法を組み合わせることにより，本システムは工事開始前に計測機器の種類と数量に応じた最適配置の検討を行うことができる²⁾ほか，弾塑性法による掘削土留め工の設計計算プログラムとの連携により，適宜設計の見直しや再評価というような情報化施工も容易に行うことができる³⁾。

2.2 解析手法の概要

土留め壁の変形挙動を3次元的に解析・可視化するには，各種計測機器により得られた離散的な計測データを3次元的な曲面として評価する必要がある。ここでは，野々垣ら¹⁾の3次B-スプライン法を用い，土留め壁の変形計測への適用を図った。

2.2.1 3次B-スプライン法

図2に示すような3次元の座標空間上において，土留め壁の延長方向をx軸，深度方向をy軸，変形の発生方向をz軸とする。土留め壁の形状はこの3次元空間上で，滑らかで連続な関数fにより次式で表されるものとする。

$$f(x, y) = z \tag{1}$$

3次B-スプライン法では，曲面の作成領域をx軸およびy軸方向にそれぞれ M_x ， M_y 個に等間隔で分割を行い， M_x+7 ， M_y+7 個の等間隔節点を設定し，これらの節点をもつ3次B-スプラインの積を基底とした一次結合として曲面を(2)式のように表す。

$$f(x, y) = \sum_{i=1}^{M_x+3} \sum_{j=1}^{M_y+3} c_{ij} N_i(x) N_j(y) \tag{2}$$

ここで， $N_i(x)$ ， $N_j(y)$ は変数x，yに関する3次B-スプライン関数であり， c_{ij} は $(M_x+3) \times (M_y+3)$ 個の未知係数

である。

この曲面を決定する際には，各計測点での変位データを満足する面の中から，最も滑らかなものを求めるという最適化問題として，外点ペナルティ関数法に基づいて解く。具体的には，曲面の滑らかさを評価する汎関数 $J(f)$ とデータの充足度を満足する汎関数 $R(f)$ を用いて拡大目的関数 Q を次式のように記載する。

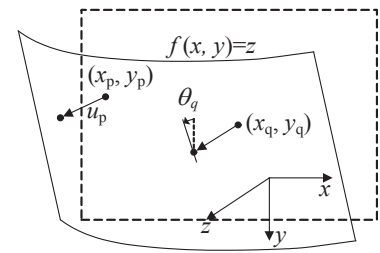


図2 3次元座標における土留め壁の変形の表現方法

$$Q(f; \alpha) = J(f) + \alpha R(f) \tag{3}$$

ここに， α は面の滑らかさとデータの充足度のバランスを調整するパラメータである。最適面は $\partial Q(f; \alpha) / \partial c_{ij} = 0$ として得られた解 c_{ij} を(2)式に代入することで得られる。

曲面の滑らかさを評価する汎関数 $J(f)$ は塩野ら⁴⁾が示した関数を用いる。一方，データ充足度を表す関数は以下のように考える。計測機器の設置位置 (x_p, y_p, z_p) での曲面と計測された変位 u_p の間には次式の関係が成り立つ。

$$f(x_p, y_p) = z_p + u_p \tag{4}$$

データの充足度を満足する関数は，曲面と変位データとの残差 ε_p の2乗平均を使って(5)式のように評価する。

$$R(f) = \sum \varepsilon_p^2 / n_h \tag{5}$$

$$\varepsilon_p = \sum_{i=1}^{M_x+3} \sum_{j=1}^{M_y+3} c_{ij} N_i(x_p) N_j(y_p) - (z_p + u_p) \tag{6}$$

ここに， n_h は(4)式を満足するデータの数である。

2.2.2 傾斜データの活用

土留め壁の変形計測においては，計測のし易さから一般に直接変位を計測するよりも傾斜を計測する場面が多い。従って，傾斜データを土留め壁の変形評価に取り込むことができる手法を構築することの意義は大きい。以下ではその手法を示す。まず，(3)式に記したデータの充足度の汎関数 $R(f)$ を，変位に関する充足度の汎関数 $R_h(f)$ と傾斜の充足度を評価する汎関数 $R_d(f)$ に分離し，次式で表す。

$$R(f) = R_h(f) + \gamma R_d(f) \tag{7}$$

ここに， γ は傾斜の充足度の重みを表す。 $R_h(f)$ には(5)式を適用する。一方， $R_d(f)$ は以下のように考える。傾斜計設置位置 (x_q, y_q, z_q) では，図2を参考にすると f のy方向導関数に関して次式の制約条件が得られる。

$$f_y(x_q, y_q) = -\tan \theta_q \tag{8}$$

したがって、具体的な汎関数は次式のように表される。

$$R_d(f) = \sum_{i=1}^{n_d} \left\{ \sum_{j=1}^{M+3} c_{ij} N_i(x_q) N'_j(y_q) + \tan \theta_q \right\}^2 / n_d \quad (9)$$

ここに、 n_d は領域内にある傾斜データの個数を表す。

3. 現場計測への適用⁵⁾

3.1 現場および土留め壁の計測の概要

対象とした現場の条件、計測機器の配置を図3に示す。現場は39m×16m程度の領域において9mの掘削を行うものである。地盤は地表面から約15mにわたりN値が10を下回る軟弱な粘土層が堆積し、その下にはN値が50の良質な砂礫層がある。土留め工は中間杭を有する切梁式であり、土留め壁には長さ12mの鋼矢板IV型が用いられている。掘削は3ステップで行われ、1次掘削でGL-1.5m、2次掘削でGL-5.5m、3次掘削時にGL-9.0mまでの掘削を行った。

土留め壁の変形計測は、図3中の南側に既設構造物が近接していることから、この部分で重点的に実施している。計測は測線を4つ設けた多段式傾斜計による傾斜計測を行っており、1つの測線には傾斜計が深さ方向に6個設置されている。また、図中B-B断面の西側を中心に土留め壁頭部にターゲットを設置し、トータルステーション（以降ではTSと記載する）測量を各次掘削段階終了時に実施した。

3.2 土留め壁の変形の評価

土留め壁の変形の3次元解析・可視化は図3中の点線で囲った延長約33.4mの領域で行った。解析に用いた計測機器は、傾斜計を24個のみ用いた場合（Case1）と、これにTS測量を併用した場合（Case2）の2つを考えた。

図4に、Case1で解析・可視化された各次掘削段階終了時の土留め壁の変形状況を示す。この図から、3

次元計測システムを用いた解析により、掘削段階ごとに土留め壁の変形状況を面的に可視化できていることが確認できる。掘削深さが大きくなる2次、3次掘削に進むにつれ、掘削領域側への土留め壁の変形は増大していくが、一方で切梁が架設されることにより最大変位が発生する深度は深い位置へシフトしていき、地表面に近い部分では変位が背面地盤側へ戻っていく状況が表現されている。

図3中の測線①および④における各次掘削段階終了時の土留め壁の変位の深度分布を整理したものを図5に示す。3次元計測システムを使ったCase1・Case2の解析では、いずれの掘削段階終了時であっても傾斜角と傾斜計設置間隔から換算された土留め壁の変位のモードを再現できている。また、TS測量の結果を用いるか否かで変位の分布は変わり、本計測例ではTS測量用のターゲットが集中している測線①で両ケース間の違いが顕著なものとなっている。測線①に着目すると、Case2の解析結果は、TS測量のデータの活用により、土留め壁頭部でTS測量結果に近づくように変化していることが確認できる。

4. 3次元計測システムと独立型傾斜計を用いた計測

前章での現場への適用事例から、構築した手法の妥当性が確認できた。本システムでは、傾斜計測データを変位に換算することなく解析・可視化に活用できることが

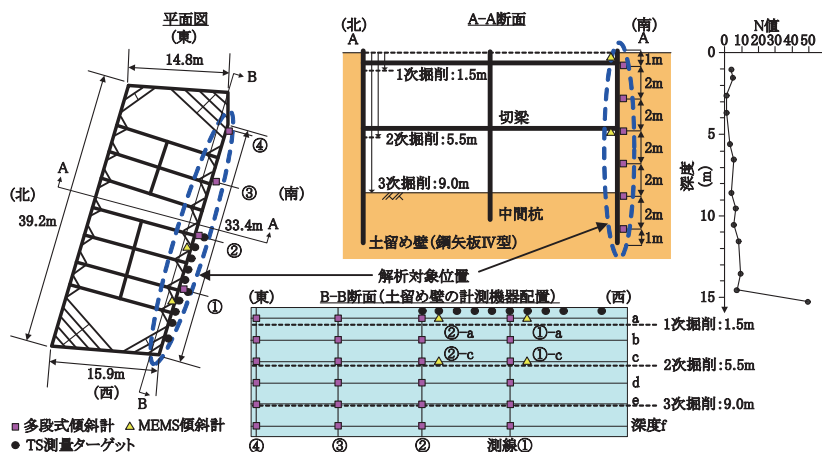


図3 対象とした現場状況・計測状況

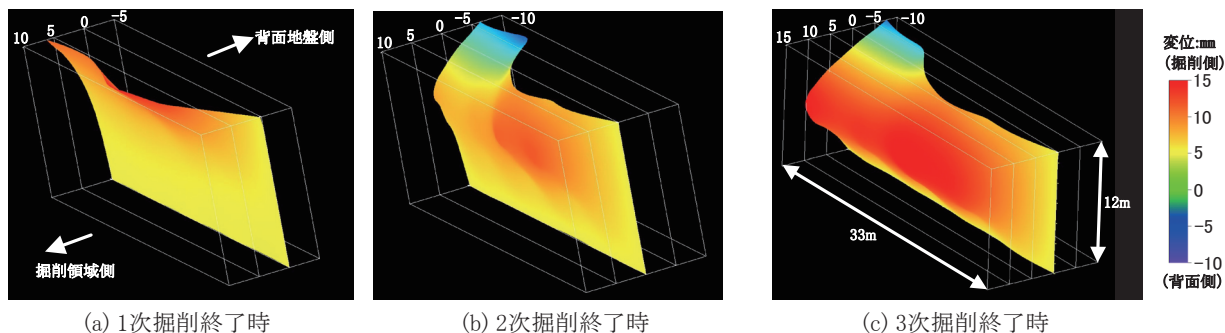


図4 3次元計測システムの適用結果（4測線の多段式傾斜計のデータを活用）

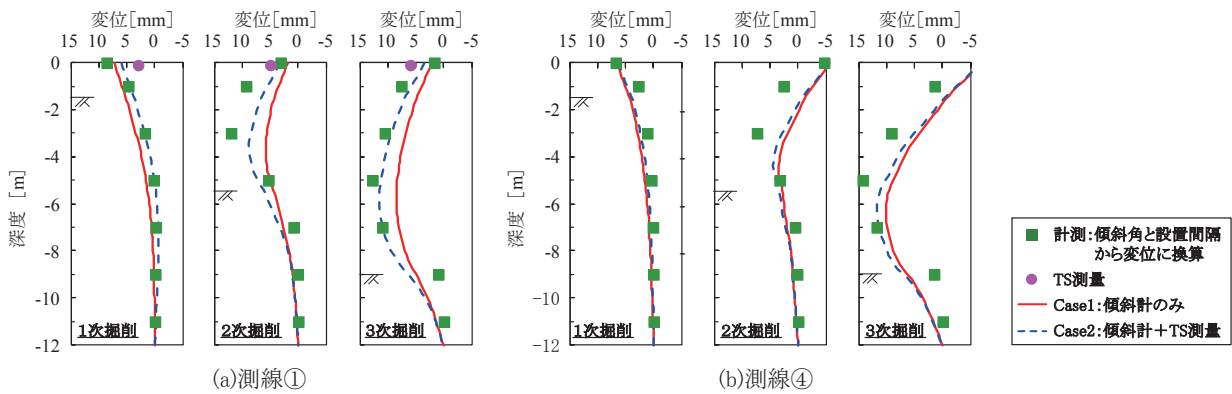


図5 土留め壁の変位の深度分布

大きな利点であり、従来から行われている多段式傾斜計の計測データ（傾斜角）の変位への換算が必要であった測線の設定が不要となるため、計測機器の配置に対して自由度が増す。また、近年は例えば MEMS 傾斜計⁶⁾のように、安価で簡易に設置が可能な（ボーリングが不要な）独立型傾斜計が開発されている。本計測システムとこれらの簡易な傾斜計を組み合わせることで土留め壁の変形挙動を評価できれば、計測の簡素化によるコストダウンが期待できる。そこで、適用に際しての課題となる事項の検討を行った後に、実際の現場計測への適用を試みた。

4.1 土留め壁計測における独立型傾斜計の適用性

3章で対象とした現場において、多段式傾斜計の設置箇所とほぼ同一の箇所に MEMS 傾斜計を設置し、計測される傾斜角の精度がどの程度となるか確認を行った。

MEMS 傾斜計の設置位置は図3に示した4カ所である。①-a および②-a の傾斜計は掘削開始前に設置を行い、GL-5.5m 付近の①-c および②-c は2次掘削が完了した後に設置を行った。MEMS 傾斜計は土留め壁の掘削領域側に、治具を介して鋼矢板に溶接することで固定を行った。

一例として、傾斜計②-a と②-c における傾斜角の経時変化を図6に示す。図6にはほぼ同一箇所に位置する多段式傾斜計のデータもプロットしている。この図から、設置位置に関わらず、多段式傾斜計と MEMS 傾斜計の傾斜角は概ね一致していることがわかる。しかしながら、例えば35～38日頃の挙動に代表されるように、多段式傾斜計の傾斜角にはほとんど変動がないのに対して、MEMS 傾斜計では0.002rad程度の変動がある、というような差も生じた。その要因としては、この期間の気温の変動が、図中に示すように前後の期間と比較して最低気温・最高気温ともに低めの値となっていることから、鋼矢板に直接固定している MEMS 傾斜計では計測される傾斜角に気温の変動の影響が幾分か生じたものと考えられる。しかしながら、全体的な挙動は両者で概ね一致していることを踏まえると、MEMS 傾斜計を土留

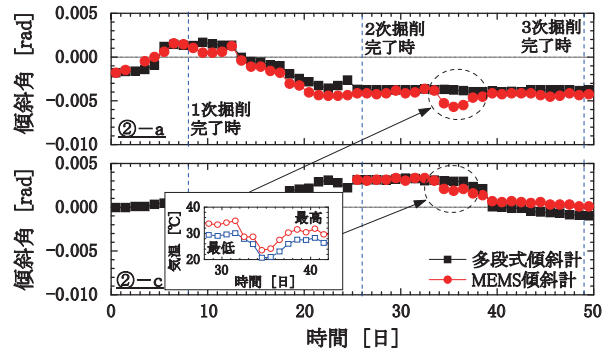


図6 MEMS 傾斜計による傾斜計測の経時変化

め壁の変形計測に活用することは十分可能であるものと考えられる。

4.2 傾斜計の配置に関する検討

独立型傾斜計を用いる場合には、ボーリングの必要がない反面、掘削底面以深に傾斜計を設置できず、現実的には掘削の進行とともに傾斜計を土留め壁に追設していくことになる。そこで、多段式傾斜計で得られた傾斜データを独立型傾斜計と見立て、各次掘削段階で掘削底面以浅のみの傾斜計を3次元計測システムに活用した場合に、解析される土留め壁の変形がどの程度の精度のものとなるか検討を行った。

用いた傾斜計は図3に示した傾斜計のうち掘削底面より上方のものとした。すなわち、1次掘削終了時は4個、2次で12個、3次で20個となる。なお、TS 測量データは1～3次掘削終了までの全ての段階で活用することとする。

解析された土留め壁の変位の深度分布を図7に示す。独立型傾斜計の使用を想定し、掘削底面以浅の傾斜計のみを活用した解析結果は、24個全ての傾斜計を用いた解析（3章のCase2）と比較して、測線①では変位分布の違いはほとんどないが、測線④では大きな違いが見られる。これは、図4に示すように測線④付近では測線①とは異なり TS 測量ターゲットがなく、直接的に補完可能な変位計測が行われておらず、掘削底面以浅の少ない傾斜計だけでは変形の評価が困難となったものと思われる。

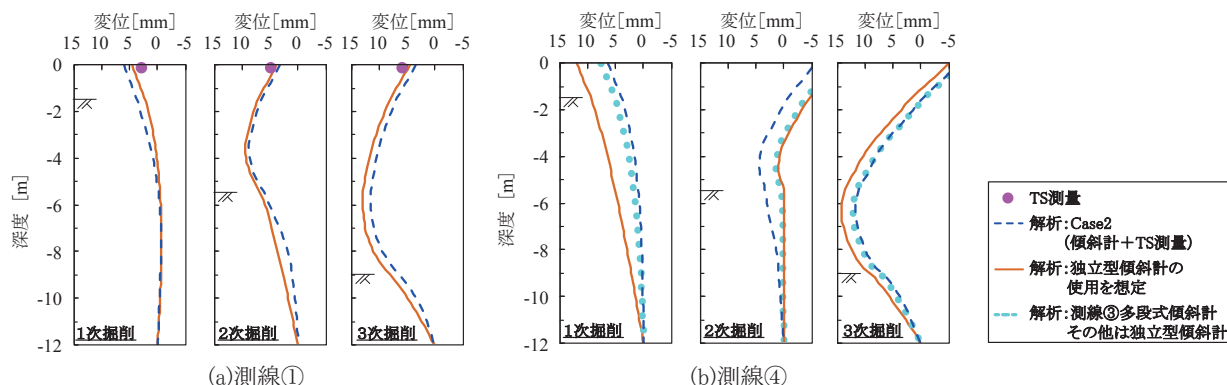


図7 土留め壁の変位の深度分布

そこで、測線④のグラフに、隣接する測線③のみ全深度の傾斜計を用いた（多段式傾斜計を想定した）解析結果を併せて示す。この場合は初期から全測線で多段式傾斜計の使用を想定し傾斜計を24個用いた場合とほぼ一致していることが確認できる。

以上の評価から、本システムと独立型傾斜計を併用した計測では、掘削底面以浅のみの傾斜計の使用を基本として、TS測量などで部分的に土留め壁の変位の直接計測を行う、あるいは多段式傾斜計による測線での深度方向の計測を施工の初期から最低1測線は設定するなど、従来からの計測を併用することで、より高い精度の計測を行うことができるものと考えられる。

4.3 現場計測への適用⁷⁾

3次元計測システムと独立型傾斜計を用いた計測の妥当性を、実際の掘削現場への適用を行い検証した。また、本手法の大きな特徴でもあるコストについても試算を行った。

4.3.1 現場および土留め壁の計測の概要

図8に、現場の概略を示す。計測対象は、線路下(複線)横断函渠構築のための立坑の線路側土留め壁である。線路側土留め壁は、掘削深さ3.0mの自立式ソイルセメント壁(長さ13.0m)で、軌道中心との離隔は4.1~4.4mである。地盤は、地表面から約5.0mにわたりN値0の超軟弱な粘土層であり、その下層はN値10程度の良質な粘土層となっている。また軌道直下は、超軟弱粘土層を対象に、地盤強化の目的で薬液注入による地盤改良を行っている。掘削は、1次掘削GL-0.5m、2次掘削GL-3.0mの2段階で行った。

土留め壁の計測には、MEMS傾斜計を活用することとした。具体例として、下り線側(発進立坑側)の土留め壁の計測機器の設置状況を図9に示す。MEMS傾斜計は深度方向に2段、線路延長方向に5箇所計10機を設置した。なお、3章の現場での計測データを踏まえ、MEMS傾斜計は極力気温変動の影響を受けにくい構造とするため、図9拡大図に示すように断熱性に優れた箱で覆った上で、SMW芯材や腹起こしへ設置を行った。

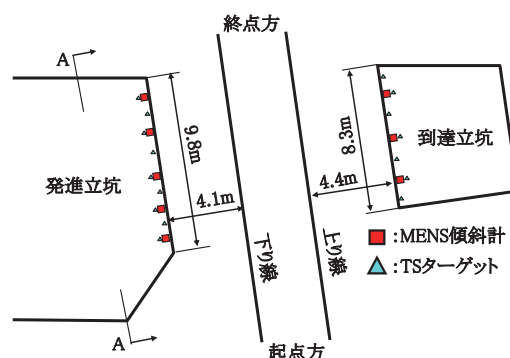


図8 対象とした現場の概略(平面図)

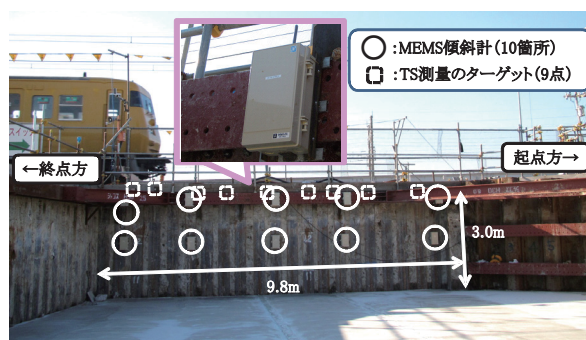


図9 現場状況・計測状況(A-A断面, 下り線側)

また、比較のためTS測量ターゲットを土留め壁頭部に9点設け、1回/日の定期的な測量を併せて行った。

4.3.2 土留め壁の変形の評価

3次元計測システムを用いて、MEMS傾斜計で計測されたデータをもとに、土留め壁の変形挙動の解析・可視化を行った。可視化された下り線側の掘削終了時の土留め壁の変形状況を図10に示す。掘削に伴って土留め壁が掘削領域側へ変位する状況を表現できていることがわかる。

また、土留め壁頭部の位置において、2次掘削終了時を対象に、3次元計測システムで解析・可視化を行った結果とTS測量結果の比較を図11に示す。TS測量に含まれる数mm程度の誤差を考慮すると、両者は概ね整合していると考えられる。独立型傾斜計を現場計測に適用した場合においても、3次元計測システムを用いることで土留め壁の変形挙動を適切に評価できることがわかった。

特集：構造物技術

4.3.3 計測コストの試算

当現場を対象に、MEMS 傾斜計による計測を導入したことによるコスト削減の効果を、多段式傾斜計による計測と比較する形で試算した。多段式傾斜計での計測は、上下線両側の土留め壁にそれぞれ測線を1つ、傾斜計を2深度設けることを想定した。なお、計測機器やデータ収録の機材は基本的に3ヶ月間のリースを考えている。また、鉄道近接工事となることの歩掛りは考慮していない。

図12にコスト試算の結果を示す。試算の結果、MEMS 傾斜計を用いることで約45%のコスト削減となった。その内訳は、傾斜計本体が約55%、データ収録が約40%、設置・撤去が約10%である。計測機器の数量が増となった場合でも、計測機器の単価の違いやボーリング等が不要となることから、MEMS 傾斜計を用いることで計測に関わる大幅なコスト削減が期待される。

5. 結論

本研究では、土留め壁の変形挙動を3次元的に解析・可視化する手法を構築し、手法の妥当性を検証するとともに、実際の現場計測への適用を試みた。また、本システムの応用として、独立型傾斜計を用いた土留め壁の計測の適用性について検討を行った。得られた主な知見は以下のとおりである。

- (1) 各種計測機器から得られた計測データをもとに、土留め壁の変形挙動を3次元的に解析・可視化する手法を構築した。解析手法においては土留め壁の計測の実態を考慮し、傾斜データの活用などの改良を加えた。
- (2) 3次元計測システムの現場計測への適用性を検討するために、実際の掘削工事において得られた計測データを用いた検証を行った。掘削の開始から終了まで土留め壁の変形を3次元的な曲面として評価・可視化することができ、その結果は従来からの変位計測手法と概ね一致することを確認した。また、計測データの種類を増やすことで精度が向上することが示唆された。
- (3) 独立型傾斜計と3次元計測システムを用いて土留め壁の変形挙動を容易かつ安価に実施する方法について、得られる傾斜角の精度の確認と、配置に関する机上検討を行った。これらの結果を踏まえ、計測への適用を試みたところ、土留め壁の変形挙動を適切に評価できることが確認できた。また、計測コストの試算を行ったところ、多段式傾斜計による計測と比較して、大幅にコストを削減できることがわかった。

文献

- 1) 野々垣進, 升本眞二, 塩野清治: 3次 B- スプラインを用い

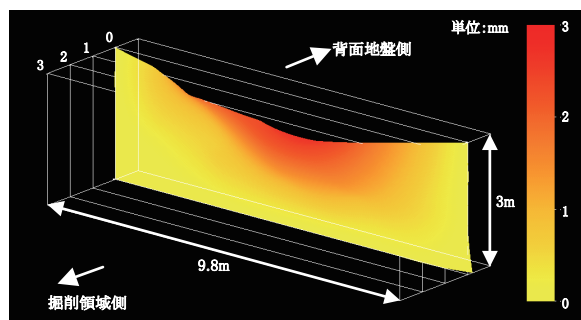


図10 土留め壁の変形挙動の可視化状況

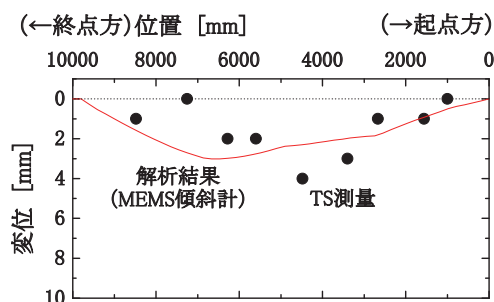


図11 土留め壁頭部での変位比較

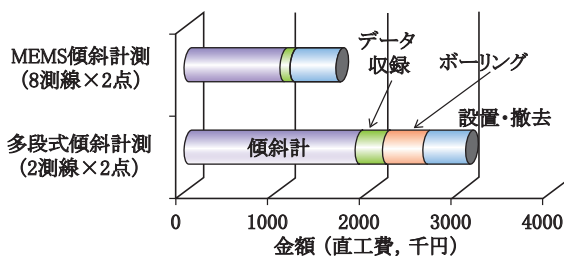


図12 計測コストの比較

- た地層面境界面の推定, 情報地質, No.19, pp.61-77, 2008
- 2) 松丸貴樹, 小島謙一, 田中祐二: モンテカルロ法を用いた土留め壁の変形計測における計測機器の最適配置に関する検討, 第47回地盤工学研究発表会, 2012
- 3) 小島謙一, 松丸貴樹, 栗山亮介, 松尾伸之: 掘削工事における3次元可視化解析を用いた情報化施工, 第67回土木学会年次学術講演会, 2012
- 4) 塩野清治, 能美洋介, 升本眞二, 坂本正徳: Horizon 2000; 等式・不等式制約条件や傾斜データを活用した地層面推定プログラムの改良, 情報地質, Vol.12, No.4, pp.229-249, 2001
- 5) 久島敏靖, 小泉秀之, 栗山亮介, 小島謙一: 架道橋に近接した掘削工事に伴う土留め壁の変形挙動の3次元可視化, 第67回土木学会年次学術講演会, 2012
- 6) 福田穰, 内村太郎, 東畑郁生, 瀬古一郎, 王林: 斜面崩壊を対象とした傾斜計によるリアルタイム危険予測, 第42回地盤工学研究発表会, 2007
- 7) 小湊祐輝, 山田孝弘, 松丸貴樹, 田中祐二: 鉄道近接掘削工事におけるMEMS 傾斜計を用いた計測システムの適用, 第47回地盤工学研究発表会, 2012