

連結ユニバーサル変位計の開発 - 基礎実験結果及び設置方法 -

キーワード シールドトンネル・現場計測・変形測定

(財)地域地盤環境研究所 正会員 橋本 正
 正会員 水原勝由
 大成建設株式会社 西田義則
 和田幸司
 坂田電機株式会社 正会員 才田 誠
 正会員 樋口佳意

1. はじめに

建設工事に伴うトンネル断面の変形など 2次元あるいは3次元変形計測を実施する場合 多種多様な複数の測定系によって複雑に行われることが多い。このため従来よりもシンプルな設置方法で小スペースかつ高精度で自動計測が可能な計測手法が望まれている。そこで、筆者らは連結ロッドと回転軸を用いた変位検出方法を開発した。このユニバーサル変位計は連結ロッドの伸縮量と隣接ロッド回転軸の回転角を測定することによって、さまざまな二次変形を測定することが可能なものである。ここでは、ユニバーサル変位計の基礎実験結果及び実際のシールドトンネル坑内での設置方法について報告する。

2. ユニバーサル変位計の構造および動作

2.1 機器構造

図1は、つくばエクスプレス常磐新線「常新、つくばT他」工事¹⁾において内径 6700mmのセグメント覆工内面に設置したユニバーサル変位計の設置位置図を示す。本体は小さい摩擦で回転する支点、連結ロッドの角度変化を測る傾斜計および連結ロッドの伸縮より得られる支点間距離を測る変位計で構成される。

傾斜計は、前支点から連なる連結ロッドにより固定されており、各連結ロッドの相対角度すなわち連結ロッドの回転角 q_i を測定する。変位計は次支点到連なる連結ロッド間の伸縮 Δl_i を測定する。

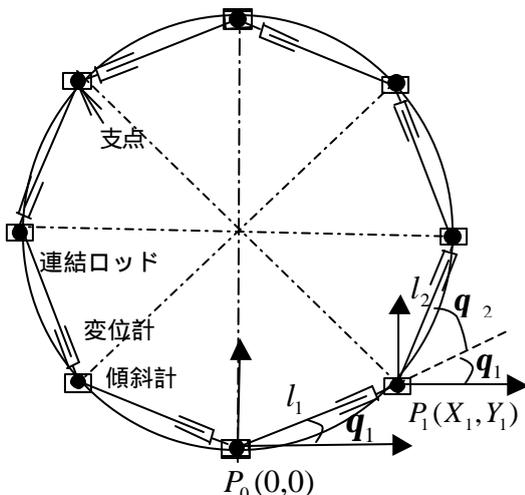


図1 ユニバーサル変位計設置位置

2.2 支点位置の算出

基準点を $P_0(0, 0)$ とし、各支点座標を $P_n(X_n, Y_n)$ とした時の座標計算式は以下のように表せる。

$$P_0(0, 0), P_1(X_1, Y_1) \cdots P_n(X_n, Y_n)$$

$$X_1 = (l_1 + \Delta l_1) \cdot \cos(q_1 + \Delta q_1)$$

$$Y_1 = (l_1 + \Delta l_1) \cdot \sin(q_1 + \Delta q_1)$$

$$X_2 = X_1 + (l_2 + \Delta l_2) \cdot \cos\left\{ \sum_{i=1}^2 (q_i + \Delta q_i) \right\}$$

$$Y_2 = Y_1 + (l_2 + \Delta l_2) \cdot \sin\left\{ \sum_{i=1}^2 (q_i + \Delta q_i) \right\}$$

$$X_n = X_{n-1} + (l_n + \Delta l_n) \cdot \cos\left\{ \sum_{i=1}^n (q_i + \Delta q_i) \right\}$$

$$Y_n = Y_{n-1} + (l_n + \Delta l_n) \cdot \sin\left\{ \sum_{i=1}^n (q_i + \Delta q_i) \right\}$$

l_i : 支点間距離 Δl_i : 支点間距離

q_i : 初期角度 Δq_i : 角度変化量

2.3 ユニバーサル変位計の設置方法

つくばT他工事では、ユニバーサル変位計をセグメントリングのリング間接続ボルトを使用した取付治具によりユニバーサル変位計を設置した。図2に設置状況を示す。

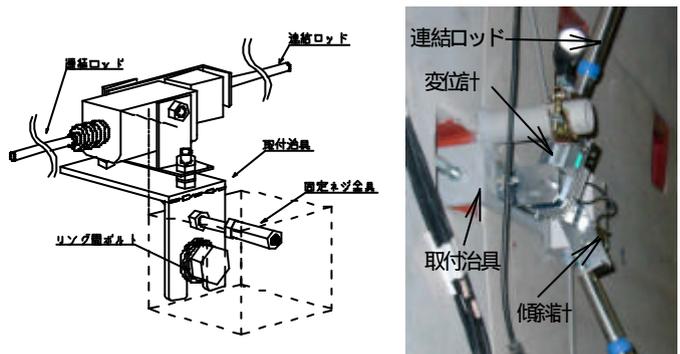


図2 ユニバーサル変位計設置状況

連結ロッドは変位計の測定範囲に合わせて長さを調整し連結、結合部の傾斜計は指示値が概略ゼロとなるよう鉛直方向に固定した。連結ロッドはスパンに応じた剛性が必要であり、つくばT他工事(約2.5mピッチ)では、外径32mm、内径29mmの鋼管 ($I=1.7 \times 10^4 \text{mm}^4$) を使用することで良好な結果が得られた。

3. ユニバーサル変位計の信頼性

3.1 測定精度確認試験

2000年に筆者等が発表したユニバーサル変位計²⁾は連結ロッド結合部の隣接ロッドとの角度差を検出し、二回累積して変位を求める方式であった。今回は、各連結ロッドの鉛直に対する傾斜角を直接求める方式に改良し、変位換算時の累積回数を一回とすることで測定精度の改善を期待している。

図3は傾斜計の分解能と検出信号の安定性を確認するための試験装置を示す。傾斜計を取り付けた長さ2.5mのH鋼両端を支持する真鍮棒の片側をヒータ線で加熱することによって微小角度変化を与えるものであり、動作範囲10秒を連続的に制御することができる。図4はこの試験装置で得られた測定結果であり傾斜角1秒(スパン2.5mに対して0.012mm)の連続変化を測定できることが確認された。

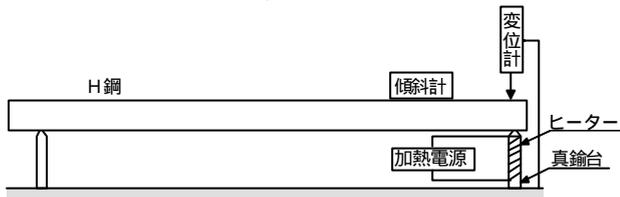


図3 真鍮台の熱膨張を利用した傾斜計試験装置

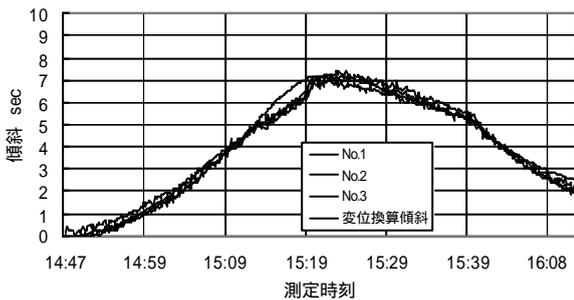


図4 微小変化に対する傾斜計の応答

3.2 ユニバーサル変位計のランニング試験

地表面の4点のコンクリートブロックに2台ずつのユニバーサル変位計をセットし、4台は進行方向、4台は戻り方向に向け、計器間をワイヤーで連結してランニング試験した。図5は傾斜角から求めた区間変位を累積して得られた変形分布であり、測定期間7日間、0, 6, 12, 18時の各測点変位を示す。

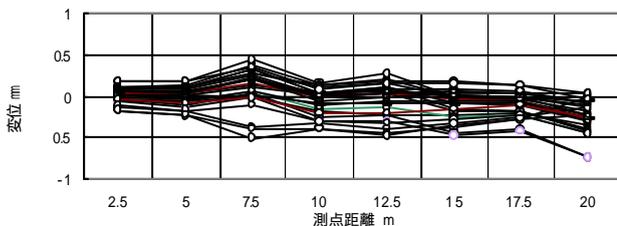


図5 0, 6, 12, 18時 7日間の変位分布

この試験は経時的な計測データの安定性の確認を目的に実施したものである。試験期間中の変位量は若干のバラツキが見られるがほぼ±0.5mm以内で安定していることがわかる。

3.3 閉合誤差の補正

つくばT他工事のセグメント覆工の断面周方向のように設置した場合、円周上の基点から順次累積して変位座標を求めることで、始点と終点の座標は理論上一致するものであり、不一致分は誤差と考えなければならない。この誤差の修正方法の一つとしては、始終点を不動点とし、最終点変位を比例配分して差し引く補正法(図6)が考えられる。

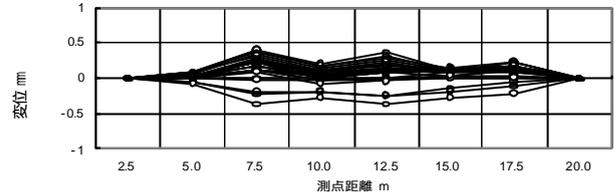


図6 両端を不動点とする閉合補正

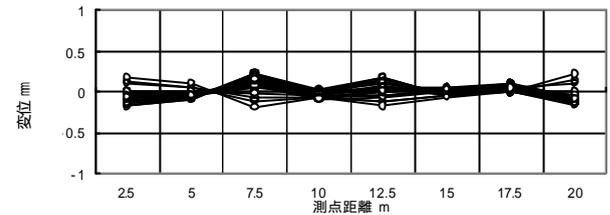


図7 一回帰法による閉合補正

しかし、この方法(図6)では個々に誤差を含む各点センサのうち始終点センサのみが誤差を持たないことになるため、始終点以外の誤差が変形パターンを乱すことが考えられる。一方、始点の距離に対する累積変位の一回帰線を読み、測定結果との差を求めた場合、個々のセンサの誤差によるばらつきを含めた評価ができると考えた。そこで、今回は後者による補正を採用した。図7は一回帰法による補正結果を示したものであり、図6と比較して誤差の分布が均等に評価されることが分かる。図8は補正結果の経時変化と温度変化との関係を示したものである。

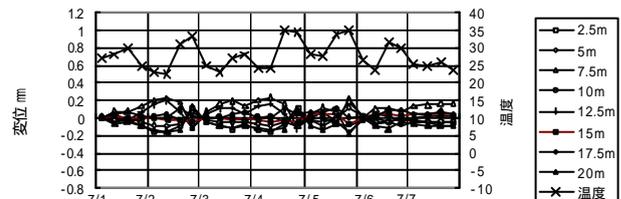


図8 各測点変位の経時変化

4 まとめ

今回、トンネル断面の変形挙動を高精度に計測する手法として連結ユニバーサル変位計の開発を行った。開発に際しては、個別計測器の測定精度や温度特性等の基本特性について室内実験を実施し、温度変化等の厳しい条件下においても1mm以下の微小な変位量が高精度かつ信頼性の高いデータを得られることが検証できた。また、実際のシールドトンネル現場では、設置作業の方法および施工性について検討を行い、実用性についても確認することができた。課題としては、累積計算した始終点変位の閉合誤差の問題がある。今後、実測結果を踏まえ、より高精度の計測が可能な計測器および評価方法の研究開発を進める予定である。

- <参考文献> 1) 種田, 高嶋, 西田, 新井, 小山, 水原: 連結ユニバーサル変位計を用いたトンネル断面の変形挙動計測, 第39回地盤工学研究発表会, 2004.7
2) 橋本, 藤原, 西田, 他: ユニバーサル変位計の開発, 第2回地盤計測技術に関するシンポジウム研究論文集 2000.