

トンネル断面変位計の構造と計測精度実証試験結果

キーワード シールドトンネル・現場計測・変位計測

(財)地域 地盤 環境 研究所 正会員 早川 清
 正会員 水原勝由
 正会員 藤原正明
 坂田電機 (株) 正会員 才田 誠
 正会員 石坂周平

1. はじめに

建設工事に伴うトンネル断面の変位を計測する従来の方法としては、コンバージェンスメータによる対辺計測、トータルステーションによる座標計測、デジタルカメラによる画像処理などの方法がある。しかし、これらの計測方法は、トンネル内空を占有する測定装置や視野が必要であり、施工中あるいは稼働中の計測が困難である場合が多い。

そこで著者らは、できるだけ設置占有スペースが小さく、施工条件に作用されず、しかも、リアルタイムにトンネル断面の変位（二次元座標変位）計測が可能な計測器（以降はユニバーサル変位計と称す）¹⁾²⁾を開発した。

ここでは、ユニバーサル変位計の開発過程で確認したセンサ特性と計測精度、実際のトンネル坑内で実施した校正試験結果および実現場での計測事例について報告する。

2. ユニバーサル変位計の概要

2.1 機器構造

ユニバーサル変位計は、図 - 1 に示すように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、さまざまな二次元変位を計測するものである。本体は摩擦抵抗の小さい回転支点、連結ロッドの角度変化を測る傾斜計、連結ロッドの伸縮（支点間距離）を測る変位計で構成する。

隣接する連結ロッド相互の角度を計測する方法には、ロッド連結点の相対角度（内角）を計測する方法と、各ロッドの鉛直に対する傾斜角を計測する方法がある。計測対象が、構造物の水平変位を計測するような場合は内角変化を、トンネルの内空変位や構造物の鉛直変位を計測する場合は鉛直傾斜角を計測する方法を用いる。

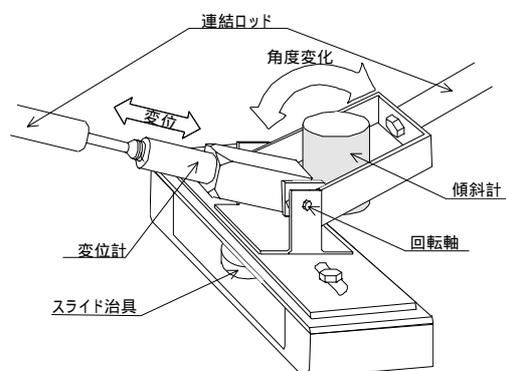


図 - 1 ユニバーサル変位計構造

2.2 計測範囲

各センサの計測範囲は、ロッドの鉛直傾斜：±120分、ロッドの変位：±2.5mmである。ユニバーサル変位計としての計測範囲は、支点数および支点間距離によって異なるが、直径2.5mのトンネル断面に正8角形でユニバーサル変位計を配置した場合、トンネル断面1測点あたりの変位は、最大約4mmまで測定可能である。また、計測範囲以上に変位が発生した場合は、盛り換えて測定を再開することになる。

2.3 温度特性

ユニバーサル変位計の温度特性を把握するため、温度特性試験を行った。試験は直径2.5mのトンネル断面を模擬し、正8角形にユニバーサル変位計（ $P_1 \sim P_8$ ）を配置した状態で、室内温度を0、25、50と室内温度のみを変化させた。

温度が5、10と変化した時の $P_1 \sim P_8$ センサの変位と角度の変位量を表 - 1 に示す。温度が10と変化した時の最大値は、変位計+0.04mm、傾斜計-0.145分であった。

表 - 2 は支点 P_1 を基点(0,0)とし、支点 P_8 までの支点座標の変位を算出したものである。温度変化が10の時、支点座標の最大変化量は X: +0.089mm, Y: -0.085mmである。この時、 P_1 座標と P_1' 座標の相違が閉合誤差であり、 P_1 X: 0.021mm, Y: -0.085mmであった。

試験結果から明らかであるように、支点座標の温度変化に伴う発生誤差は、0.1mm以下と非常に小さい。

表 - 1 温度による各センサの変化量

変位計 変化量 (mm)								
T	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8
5	0.018	0.017	0.018	0.016	0.018	0.019	0.019	0.020
10	0.037	0.034	0.037	0.032	0.037	0.038	0.038	0.041

傾斜計 変化量 (min)								
T	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8
5	0.051	-0.061	-0.017	-0.073	0.040	-0.058	-0.025	0.047
10	0.102	-0.123	-0.033	-0.145	0.081	-0.116	-0.050	0.093

表 - 2 温度による各点座標の変化量

X (mm)								
T	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_1'
5	-0.021	-0.013	-0.002	0.023	0.044	0.037	0.022	0.010
10	-0.043	-0.025	-0.004	0.046	0.089	0.073	0.044	0.021

Y (mm)								
T	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_1'
5	-0.008	0.015	0.028	0.014	0.016	-0.008	-0.024	-0.042
10	-0.017	0.030	0.057	0.028	0.032	-0.016	-0.048	-0.085

2.4 分解能

傾斜計の分解能と指示値の安定度を確認するため、微小変位角試験を実施した²⁾。図-2に試験装置を示す。試験は、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変位角を与えるものであり、微小角度範囲10秒を連続的に制御することができる。

図-3に試験結果を示す。試験結果より、微小変位角に対して傾斜計が追従した変位を示し、傾斜角1秒(スパン2.5mに対して0.012mm)の極微小な変位角を連続して計測できることが確認できた。

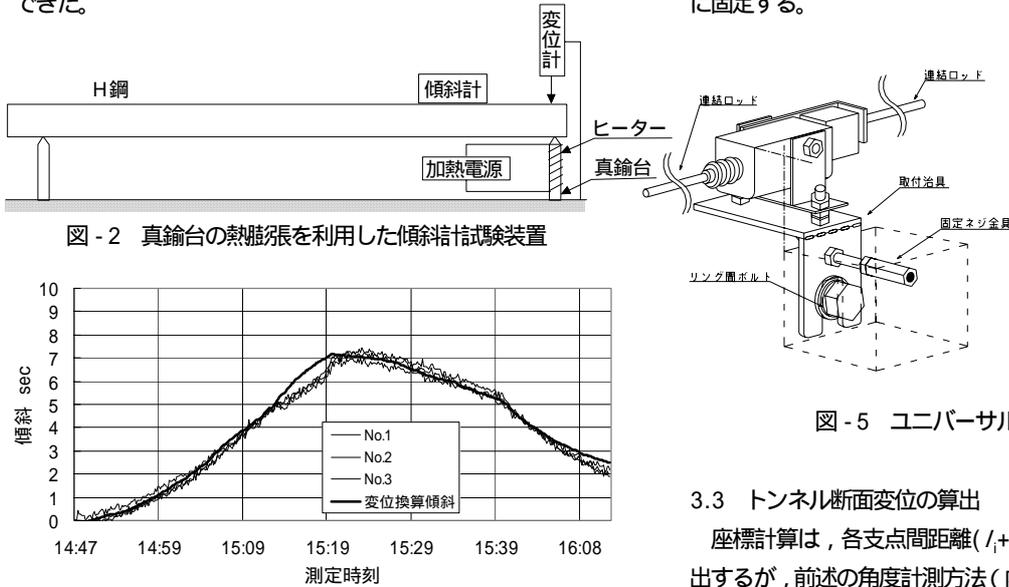


図-2 真鍮棒の熱膨張を利用した傾斜計試験装置

図-3 微小変位に対する傾斜計の応答

3. トンネル断面変位の計測

3.1 計測方法

ユニバーサル変位計を用いたトンネル断面の変位計測方法を図-4の模式図で示す。トンネル内の壁面にユニバーサル変位計を多角形に設置し、計測位置である各支点間の角度すなわち連結ロッドの回転角 θ_i を計測すると同時に、変位計によって各連結ロッドの伸縮 l_i を計測するものである。

トンネル断面の変位は、トンネル最下端部 P_1 を基準点とし、隣接する支点座標及び変位座標(X_i, Y_i)を順々に算出する。

なお、計測器の精度誤差および測定値の有効数字まるめ誤差等により、始終点間では閉合誤差が生じる。そのため閉合誤差の補正を必要に応じて行う。

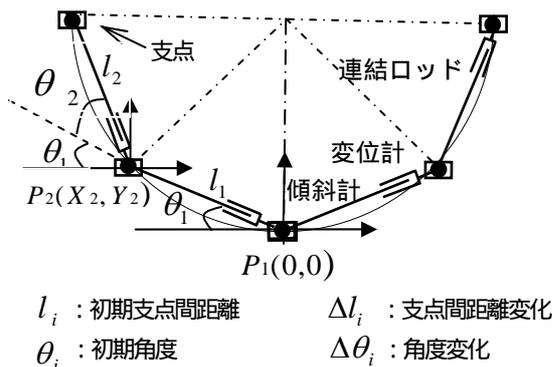


図-4 ユニバーサル変位計計測模式図

3.2 設置方法

ユニバーサル変位計の設置例を図-5に示す。設置例は、シールドトンネルのセグメント覆工断面周方向に設置したものである。ここでの設置は、セグメントリングのリング間接続ボルトに取付治具を固定し、取付治具にユニバーサル変位計を設置している。その他、取付治具を覆工コンクリートにアンカーを用いて設置する方法もある。

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する。結合部の傾斜計は、指示値が概略ゼロとなるようほぼ鉛直に固定する。

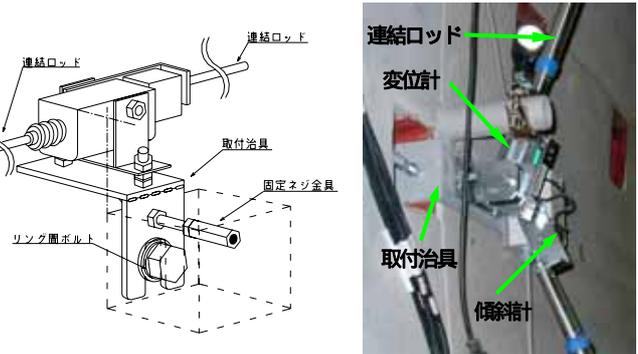


図-5 ユニバーサル変位計設置状況

3.3 トンネル断面変位の算出

座標計算は、各支点間距離($l_i + \Delta l_i$)と角度($\theta_i + \Delta \theta_i$)から算出するが、前述の角度計測方法(内角計測、鉛直傾斜計測)の違いにより、測定した角度の取り扱いが異なる。ロッドの鉛直傾斜角を計測する場合は、図-6のように測定角から単純に座標計算できる。一方、図-7のように隣接するロッドの内角変化を計測する場合は、角度変化量を累積計算する必要がある。

基準点を $P_1(0, 0)$ とし、各支点座標を $P_n(X_n, Y_n)$ とした時のそれぞれの座標計算式を以下に示す。

1) 鉛直傾斜の角度変化を用いた座標計算式

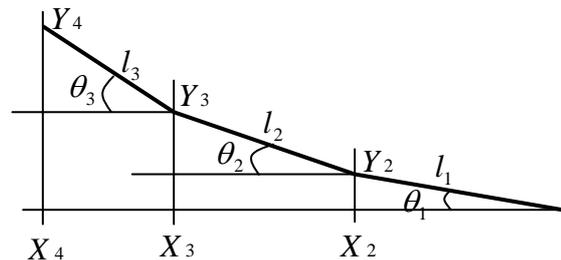


図-6 鉛直基準とした傾斜を用いた座標計算概念

$$P_1(0,0), P_2(X_2, Y_2) \dots P_n(X_n, Y_n)$$

$$X_2 = (l_1 + \Delta l_1) \cdot \cos(\theta_1 + \Delta \theta_1)$$

$$Y_2 = (l_1 + \Delta l_1) \cdot \sin(\theta_1 + \Delta \theta_1)$$

$$X_3 = X_2 + (l_2 + \Delta l_2) \cdot \cos(\theta_2 + \Delta \theta_2)$$

$$Y_3 = Y_2 + (l_2 + \Delta l_2) \cdot \sin(\theta_2 + \Delta \theta_2)$$

$$X_n = X_{n-1} + (l_{n-1} + \Delta l_{n-1}) \cdot \cos(\theta_{n-1} + \Delta \theta_{n-1})$$

$$Y_n = Y_{n-1} + (l_{n-1} + \Delta l_{n-1}) \cdot \sin(\theta_{n-1} + \Delta \theta_{n-1})$$

2) 内角変化を用いた座標計算式

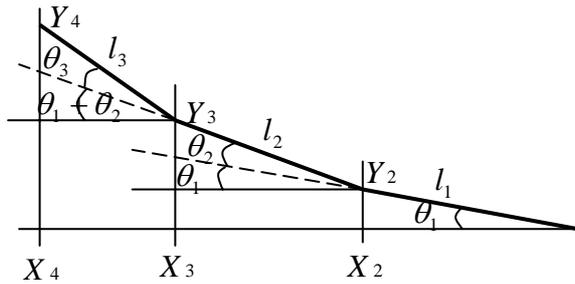


図-7 内角を用いた座標計算概念

$$P_1(0,0), P_2(X_2, Y_2) \dots P_n(X_n, Y_n)$$

$$X_2 = (l_1 + \Delta l_1) \cdot \cos(\theta_1 + \Delta \theta_1)$$

$$Y_2 = (l_1 + \Delta l_1) \cdot \sin(\theta_1 + \Delta \theta_1)$$

$$X_3 = X_2 + (l_2 + \Delta l_2) \cdot \cos\left\{\sum_{i=1}^2 (\theta_i + \Delta \theta_i)\right\}$$

$$Y_3 = Y_2 + (l_2 + \Delta l_2) \cdot \sin\left\{\sum_{i=1}^2 (\theta_i + \Delta \theta_i)\right\}$$

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

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

3.4 閉合誤差の補正

測点・測辺を1周させ、始点と終点を一致させれば、両点の座標は理論上一致する。計測値から算出した始終点間の座標の不一致分が変位の閉合誤差となり、それを各点に比例配分して差引くことにより誤差補正が可能となる。

また、内角変化を計測する手法では、内角変化の総和はゼロになることから、角度の閉合補正も可能である。

図-8, 9 は鉛直傾斜を計測する形式での実験における閉合誤差の補正前と補正後を示すもので、全支点で変位量が0(零)の時、計測結果から得られた誤差は、補正前が最大誤差は0.24mmであり、補正後0.17mmとなった。

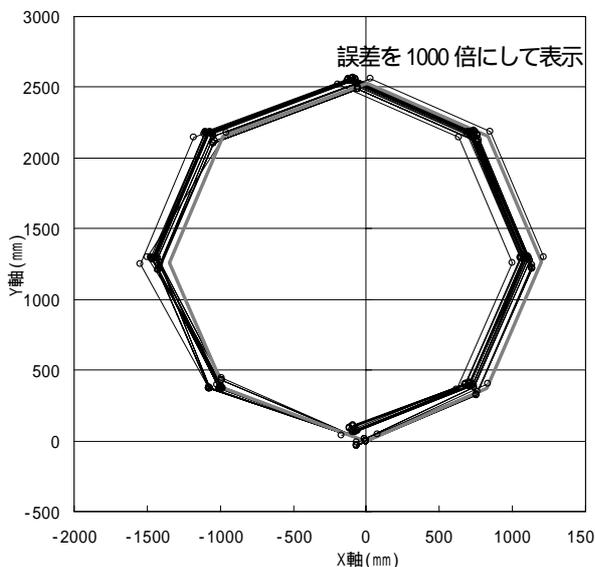


図-8 閉合誤差補正前の変位分布

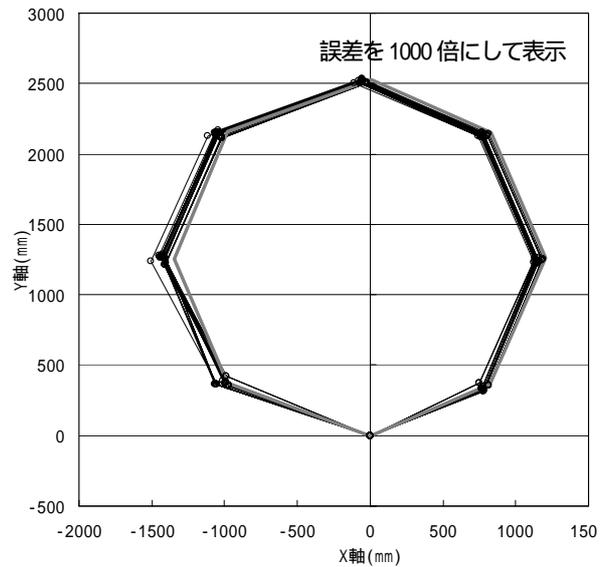


図-9 閉合誤差補正後の変位分布

実験時の閉合誤差は微小であるが、閉合誤差の補正前後を比べると、閉合補正後は全体的にばらつきが軽減されていることがわかる。

3.5 実トンネルでの校正試験

ユニバーサル変位計の計測精度を検証するため、実トンネル(内径 2,672mm)に45度ピッチに8箇所(支点間長:972mm)のユニバーサル変位計を図-10に示すように設置し、変位校正試験を行った。試験は、図-10に示すスライド治具によって、個々の計測支点をトンネル断面の中心方向へ0~3mmまで変位させ、支点の実変位とユニバーサル変位計出力値との比較を行なった。なお、支点の実変位は別途の変位計で計測している。

校正試験におけるP₂, P₃, P₅の測定結果を図11, 12に示す。各支点でのユニバーサル変位計出力値と実変位の差が0.1~0.2mmという良好な結果が得られた。また、この時の補正前の閉合誤差は最大で0.38mmであった。

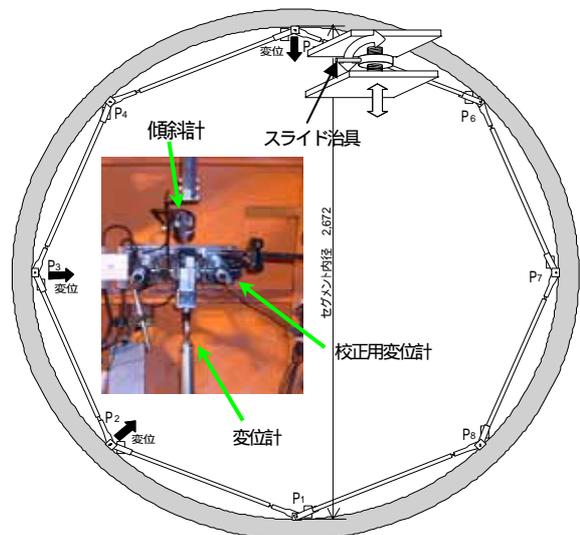


図-10 変位校正時の状況図

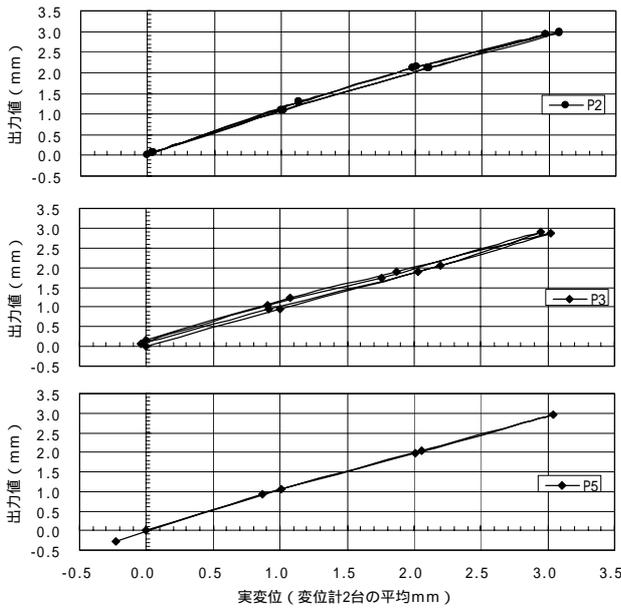


図 - 11 実変位とユニバーサル変位計出力値の比較

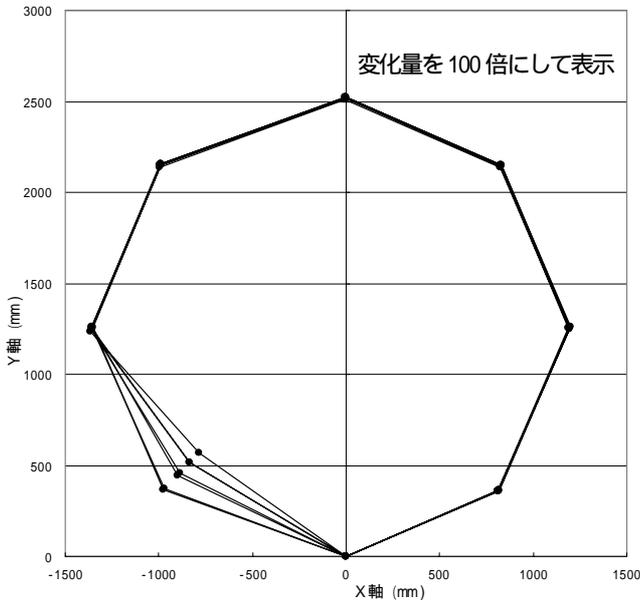


図 - 12 P₂点にステップ変位を与えた場合の変位分布

4. 現場計測事例

セグメント外径 7300mm, 内径 6700mm の単線並列トンネル (泥土圧式シールド) の実施工現場でユニバーサル変位計の計測³⁾を行った。

計測は下り線シールド施工後のトンネル断面にユニバーサル変位計を設置し、近接する上り線シールド施工が与える下り線トンネルの変位計測を行ったものである。なお、計測位置における上下線トンネルの離隔は2.5mである。

図 - 13 に下り線トンネル断面の各計測点の変位量 (X, Y 座標変位) を経時変化で示し、図 - 14 に下り線トンネル断面の変位分布を示す。計測結果より、シールド切羽接近時からテール通過までの施工過程に対応したトンネルの変位が計測できていることがわかる。シールドの近接施工時の最大変位は、水平変位 (X 座標) が約 1.5mm, 鉛直変位 (Y 座標) が約 1mm であった。

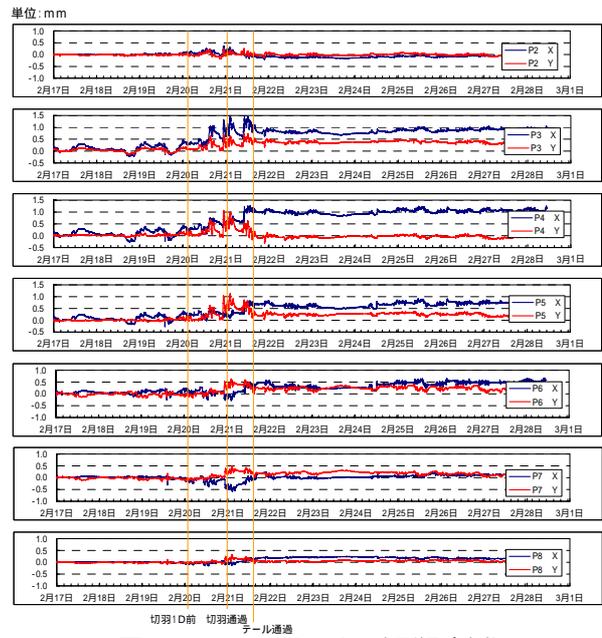


図 - 13 シールドトンネル変形経時変化

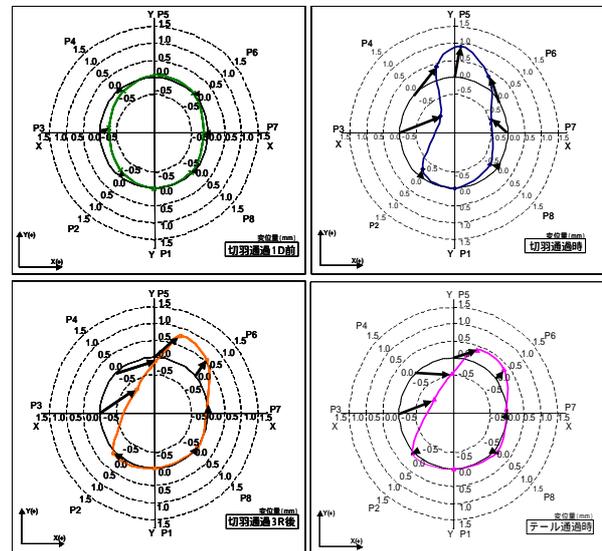


図 - 14 シールドトンネル変形分布

5. おわりに

実トンネルでの校正試験及び現場計測結果より、ユニバーサル変位計は、トンネル断面の詳細な変位挙動を高精度で計測できるものであることが確認できた。ユニバーサル変位計は、様々な複合断面や構造物の縦断方向変位計測にも適用が可能なものである。開発したユニバーサル変位計は、今後ますます増えることが予想される構造物の近接工事や多種多様な複合断面の変位計測手法として有効なものであると考えている。

参考文献

- 1) 橋本, 藤原, 西田, 他: 連結ユニバーサル変位計の開発, 第2回最近の地盤計測技術に関するシンポジウム, pp.11-14, 2000.
- 2) 橋本, 水原, 西田, 和田, 他: 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 -, 第39回地盤工学研究発表会 pp.1679-1688, 2004.7
- 3) 小野, 清水, 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 pp.1681-1682, 2004.7