

# 報告 無機系被覆工の摩耗深さ測定手法

浅野 勇<sup>\*1</sup>・渡嘉敷 勝<sup>\*2</sup>・森 充広<sup>\*2</sup>・西原 正彦<sup>\*3</sup>

**要旨：** レーザ距離計を用いた無機系表面被覆工の定量的な摩耗進行測定手法を開発した。被覆面にステンレス製のアンカーを2箇所標点として設置し、測定値を基線補正することにより機器据付により発生する測定誤差を除去した。測定手法の現場適用性を確認するために実際の無機系被覆工水路側壁の摩耗深さの繰返し測定を行い、その測定精度が測定値 $\pm 0.1\text{mm}$ 程度であることを確認した。また、被覆工の施工完了から約2年間の摩耗測定を行い、被覆工側壁では1年間に平均摩耗深さで約0.1~0.3mmの摩耗が発生することを明らかにした。

**キーワード：** 農業用開水路, 無機系表面被覆工, 補修, 摩耗計測, レーザ測定

## 1. はじめに

無機系表面被覆工（以下、被覆工と呼ぶ）は、農業用開水路の表面被覆補修工の6割以上を占める主要工法であるが、摩耗劣化による使用限界などが明らかにされていないため、設計や工法選定の障害となっている。この問題を解決するためには、被覆工の摩耗を適切に予測・評価する技術開発とともに、被覆工の摩耗進行を定量的測定するための手法の開発が必要とされる。

摩耗進行の定量的な測定方法としては、中矢ら<sup>1)</sup>によるレーザ変位計を用いた測定手法、北村ら<sup>2)</sup>による型どりゲージを用いた測定手法、長谷川ら<sup>3)</sup>による3次元画像解析技術を用いた表面粗さの測定手法が提案されているが、いずれの手法も摩耗進行を長期間かつ定量的にモニタリングできるかについては、文献中では明らかにされておらず、被覆工の摩耗進行を定量的にモニタリングできる測定手法は未だ確立されていない。

本報告では、被覆面2つの標点を設置し、その標点間において被覆面までの距離をレーザ距離計により測定し、被覆工の摩耗進行を定量的に表す指標となる平均摩耗深さを求める測定手法を提案する。また、提案手法に関する測定精度および現場適用性について検証する。

## 2. 測定機器および測定方法の概要

### 2.1 測定機器

被覆面までの距離測定を行うレーザ距離計の外観を図-1に、諸元を表-1に示す。距離計の寸法は、幅265mm、高さ225mm、質量は1.7kgであり、片手での操作が可能である。電力は外部から供給され、1回の充電で約8時間稼働する。

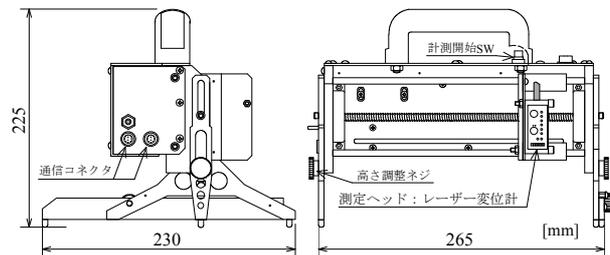


図-1 レーザ距離計

表-1 レーザ距離計の諸元

	測定中心	85 mm
レーザ変位計 (CD33-L85)	測定範囲	$\pm 20$ mm
	スポット径	0.75×1.25 mm
	出力	0~10 V
	繰返し精度	0.01 mm
	直線性	$\pm 0.1\%$ F.S
水平計測区間		150 mm
計測間隔		0.1 mm
作動時間		8 時間

### 2.2 測定方法

測定システムの概要を図-2示す。測定では、測定値を補正するための2本の標点を被覆面に予め埋設する。測定精度の向上には、測定毎に距離計を可能な限り同じ位置に据付けることが重要である。そこで、据付前に、図-3(a)に示す位置決め定規を用いて距離計の設置位置を決める。距離計を据付後、スタートボタンを押すとレーザ測定ヘッド移動し、0.1mm間隔でレーザヘッドから被覆面までの距離を測定する(図-3(b))。ヘッドの最大移動量は150mm、1回の走査で1,500個の距離データを収集する。測定ヘッドの移動に伴い、赤いレーザ光点が被覆面を移動するので、被覆面上のどの位置の測定を行っているか、その状況を目視により確認できる。

\*1 農研機構農村工学研究所 上席研究員 農博 (正会員)

\*2 農研機構農村工学研究所 主任研究員 農博 (正会員)

\*3 農研機構農村工学研究所 主任研究員 (正会員)

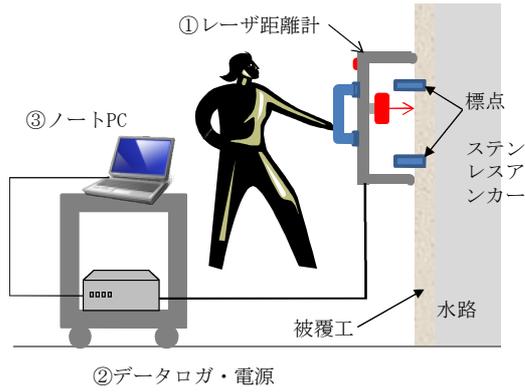


図-2 測定システム

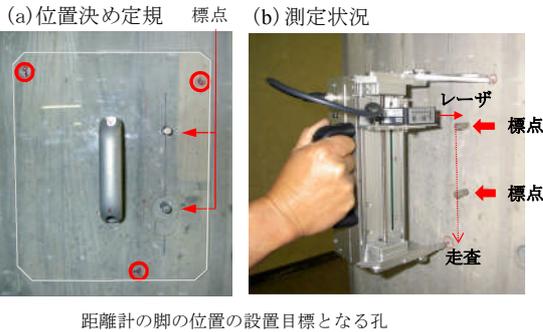


図-3 測定手順

距離データはデータログを経由しノートパソコンに送られ、表計算ソフト (Excel) の中で平均摩耗深さ等の計算を行う。なお、レーザーを安定させるため、システムに電源を投入して10分程度放置してから測定する。測定は2人1組で行い、1測点の測定時間は約3分である。また、標点としては、ステンレス製のホールインアンカー(φ10×60mm)を用いる。また、標点中心間距離100mm、アンカーの突出長さ10mmになるように調整する。

### 3. 測定指標とデータ処理

#### 3.1 摩耗進行のモデル化

流水等により被覆面が削り取られ、被覆面の形状が時間的に変化する現象を被覆工の摩耗と定義する。また、図-4に示すように、2つの標点を基準とした $xw$ 座標平面が被覆面と交わる交線を断面曲線と定義する。本報告では、この断面曲線の時間的変化により摩耗進行をモデル化する。図-4に示すように、摩耗が発生していない被覆工完成時の断面曲線を $w(x,0)$ 、完成から時間 $t$ が経過し、通水により摩耗が生じた断面曲線を $w(x,t)$ とする。標点間の摩耗を代表する区間を $L$ とし、区間 $L$ で $w(x,t)$ と $w(x,0)$ に囲まれる面積を $S$ とすれば、 $S$ は時間 $t$ の間に発生する摩耗による被覆工の断面欠損量を表す。

$$S = \int_{L_1}^{L_2} \{w(x,t) - w(x,0)\} dx \quad (1)$$

$S$ を区間 $L$ で割った値 $d_w$ は、時間 $t$ の間に区間 $L$ で生じる平均的な摩耗深さに等しい。本報告では、 $d_w$ を平均摩耗深さと呼び、被覆工の摩耗進行の指標とする。 $d_w$ は式(2)に示すように、時刻 $t=0$ 、 $t$ において、基準となる $x$ 軸から被覆面までの平均距離 $d$ 、 $d_0$ が求まれば算定できる。 $d_t$ および $d_0$ はレーザー距離計による距離測定値から求めることができる。

$$\begin{aligned} d_w &= \frac{1}{L} \int_{L_1}^{L_2} \{w(x,t) - w(x,0)\} dx \\ &= \frac{1}{L} \int_{L_1}^{L_2} w(x,t) dx - \frac{1}{L} \int_{L_1}^{L_2} w(x,0) dx \\ &= d_t - d_0 \end{aligned} \quad (2)$$

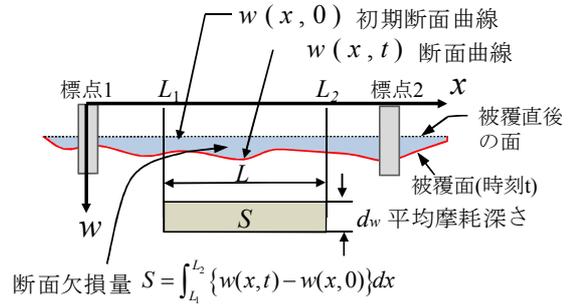


図-4 平均摩耗深さ

#### 3.2 基線補正

レーザー距離計単独で被覆面までの距離を測定すると、毎回距離計の据付高さが増えるため、測定値の相互比較ができない。この問題を解決するために、被覆面に2本の標点1、標点2を埋め込み、標点の中心点を結んだ直線ABを $x$ 軸(基線)として測定値の補正を行った。以下標点は不動とする。

基線補正の方法を図-5の下図に示す。基線ABと被覆面で囲まれる閉曲線EFJIの面積を $S_w$ 、閉曲線EFGHの面積を $S_m$ 、台形IJGHの面積を $S_v$ とすれば、 $S_m$ から $S_v$ を引けば $S_w$ が得られる。

$$S_w = S_m - S_v \quad (3)$$

ここで、 $S_m$ は後で述べるようにレーザー距離測定値から算定可能である。 $S_m$ は距離計の据付によって変動するが、 $S_m$ の中で距離計の据付高さにより変動するのは $S_v$ の部分のみであり、測定毎に $S_m$ から $S_v$ を引き $S_w$ を求めれば、据付高さの変動に依存しない基線と被覆面に囲まれた面積 $S_w$ が求まる。さらに、 $S_w$ を $L$ で割れば基線ABから被覆面までの平均距離 $d$ を求めることができ、式(2)から平均摩耗深さ $d_w$ を算定できる。

$S_v$ は台形IJGHの面積から求めることができ、

$$S_v = \frac{L}{2} (h_1 + h_2) \quad (4)$$

と求まる。ここで、 $L$ は平均摩耗深さ算定のための積分区間、 $h_1$ 、 $h_2$ は積分区間 $L$ の開始点H、終了点Gから基

線 AB に下ろした線分 HI, GJ の長さを表す.  $h_1, h_2$  は, 相似関係を用いて,

$$h_1 = T_1 + \frac{(T_2 - T_1)}{l} x_1 \quad (5)$$

$$h_2 = T_1 + \frac{(T_2 - T_1)}{l} x_2 \quad (6)$$

と求まる. ここで,  $T_1, T_2$  はレーザ投光面の軌跡から標点 1, 標点 2 の中心点 A, B までの距離を示す. また,  $x_1, x_2$  は, 積分開始点 H, 終了点 G から  $x$  軸に下ろした垂線の足の座標を,  $l$  は標点 A, B 間の距離を表す.

$S_m$  は, レーザ距離計から得られる測定距離を数値積分して求める. 今回は簡単に, 閉曲線 EFGH を  $x$  軸方向に間隔  $d$  で分割し  $n$  個の短冊を作成しその和を  $S_m$  とした. この場合, 各短冊の高さはレーザ測定距離  $y_i$  に等しい.  $S_m$  は次式から求めることができる.

$$S_m = dy_1 + dy_2 + \dots + dy_n = d \sum y_i \quad (7)$$

式 (3) に式 (4) ~ (6) および式 (7) を代入し, 整理すると, 基線と被覆面に囲まれる面積  $S_w$  は次式となる.

$$S_w = S_m - S_V = d \sum y_i - \frac{L}{2} (h_1 + h_2) \quad (8)$$

$S_w$  を積分区間  $L$  で割れば, 基線 AB から被覆面までの平均測定距離  $d$  を求めることができる.

$$d = \frac{S_w}{L} = \frac{S_m}{nd} = \frac{\sum y_i}{n} - \frac{1}{2} (h_1 + h_2) \quad (9)$$

$d$  はレーザ距離計計測から得られる距離測定データ  $y_i$ , 測定データ数  $n$  および  $h_1, h_2$  から算定され,  $d$  を求めることにより式 (2) から平均摩耗深さを算定できる.

実際の計算では, 各標点の中心  $\pm 2.5\text{mm}$  区間で測定した距離データ (51 点) の平均値を  $T_1, T_2$  として, 積分区間  $L$  は, 標点間中央から  $\pm 25\text{mm}$  の区間とした.

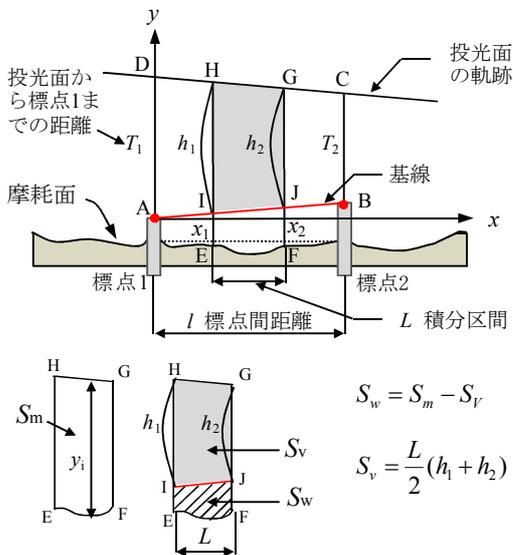


図-5 基線補正

### 3.3 基線補正の検証

レーザ距離計の据付高さを変化させた室内試験を行い, 基線補正の有効性を検証した. 試験では, 図-6 に示すように被覆工を模擬した平板供試体の上に距離計を据付け, 距離計の片脚の下に厚さ 5mm のアクリル板を順次挟み込み, 5mm 間隔で脚の高さを 5 mm から 25 mm まで変化させ, それぞれの断面曲線を求めた.

図-7 に基線補正を行う前の断面曲線を示す. 各曲線の横に描いた記号  $w_z$  の添え字  $z$  は脚の高さ変化量を表す (例えば,  $w_5$  は脚を 5mm 嵩上げたケース). 図-7 から, 距離計の据付高さが変化すると断面曲線は大きく変化する. これは, 据付高さが変化すると測定ヘッドから被覆面までの距離が離れるためである. 図-8 に基線補正後の断面曲線を示す. 基線補正後の断面曲線は距離計の据付高さの影響を受けず, ほぼ 1本の曲線となる. このことから, 基線補正により, 据付高さの変化による測定誤差が有効に除去されていることがわかる.

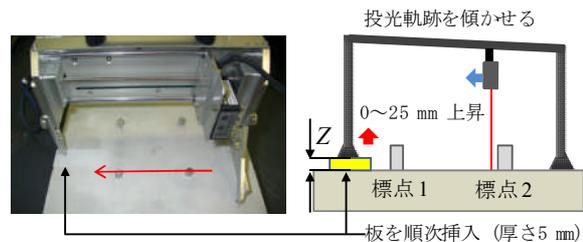


図-6 基線補正の検証試験概要

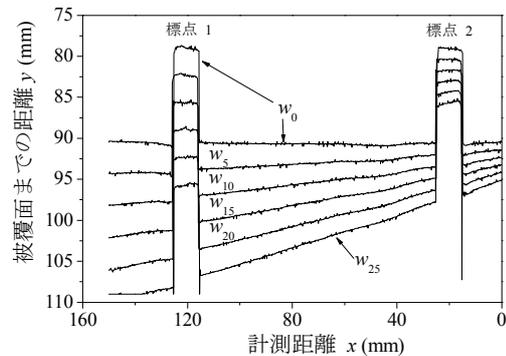


図-7 基線補正前の断面曲線

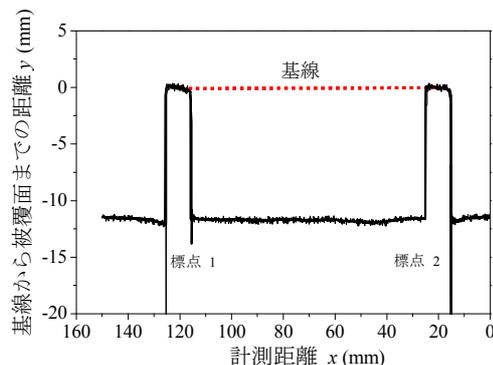


図-8 基線補正後の断面曲線

#### 4. 測定誤差の検証

測定手法の精度検証のため、精度に影響を与える要因として、①測定者の違い、②据付操作、③据付後の反復レーザ測定を想定し、図-9に示す室内繰返し測定試験を実施した。表面被覆水路の側壁と測定環境が似通ったコンクリート壁を試験対象とし、壁面に2本のステンレスアンカーを埋設し標点とした。A、Bの2名の測定者を選定し、距離計を据え付けた後に、レーザ測定を3回繰り返した。このような計測操作を20回繰返し、最終的には(据付操作20回)×(繰返し測定3回)=合計60回の測定を行い、測定者1人に対して60本の断面曲線と被覆面までの平均距離データを得た。

測定者A、Bの測定値の分布を図-10に示す。グラフでは、据付試験ケースを横軸に取り、回反復測定結果を黒丸でプロットした。また、3回の反復測定値の平均を折れ線で結んだ。黒丸は反復測定間の測定値の変動を、折れ線は据付操作間の測定値の変動を表す。折れ線の変動から、据付操作に関しては測定者Bの方がAより変動が大きい、1回の据付操作内における反復測定の変動は測定者Aの方がBより小さいことが分かる。

図-10で示した測定値の変動を一元配置分散分析により定量的に求めた。その結果を表-2に示す。表-2では、据付操作による測定の際ばらつきを「据付操作間」、反復測定間のばらつきを「反復測定間」という用語を用いて区別し、それぞれの標準偏差の値を示した。「合成標準偏差」は、後から述べるように1回の据付操作内で3回反復測定した平均測定値の標準偏差を表す。

表-2から、測定者Aの測定の際ばらつき(標準偏差)は、据付操作間=0.013 mm (45%)、反復測定間=0.016 mm (55%)と分解され、両者のばらつきはほぼ等しい。すなわち、Aの測定精度の向上のためには、反復測定および据付操作両方の技術向上が必要である。一方、測定者Bの測定の際ばらつきは、据付操作=0.030 mm (79%)、反復測定間=0.008 mm (21%)と分解され、据付操作の際ばらつきは反復測定に比べ約4倍大きい。Bの測定精度を向上させるためには据付操作に対する技術向上が必要である。

対象測点に距離計を $m$ 回据付け、1回の据付操作内で $r$ 回の反復距離測定を行う場合、その平均測定値の標準偏差(標準誤差)の期待値 $\hat{\sigma}$ は次式から推定できる<sup>4)</sup>。

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{\sigma_b^2}{m} + \frac{\sigma_w^2}{mr}} \quad (10)$$

ここで、 $\sigma_b^2$ は据付操作間の分散、 $\sigma_w^2$ は反復測定間の分散である。式(10)から明らかのように、標準偏差はサンプリング数 $m$ 、 $r$ が増加すると向上する。しかし、現実的には測定コスト、労力の面から適切な値の選択が必要となるため、今回は、距離計を据付け後に3回の反復距離測定を行う( $m=1$ ,  $r=3$ )測定方法をモデルケース

とし検証する。

表-2には $m=1$ ,  $r=3$ の場合の平均測定値の標準偏差 $\hat{\sigma}$ を測定の標準偏差(合成)として示した。表から、合成標準偏差は、測定者Aが0.016, Bが0.030となり、AはBに比較して1.5倍ほど測定精度が高い。測定者Bの合成標準偏差(0.030)を用いて、包含係数 $k=2$ (信頼区間の棄却限界値に相当)とした場合の被覆面までの平均測定距離の測定精度は、測定値 $\pm 0.030 \times 2 =$ 測定値 $\pm 0.060\text{mm}$ と求まる。なお、包含係数 $k=2$ と置くことは、測定平均値の95%信頼区間を求めたことに相当する<sup>5)</sup>。

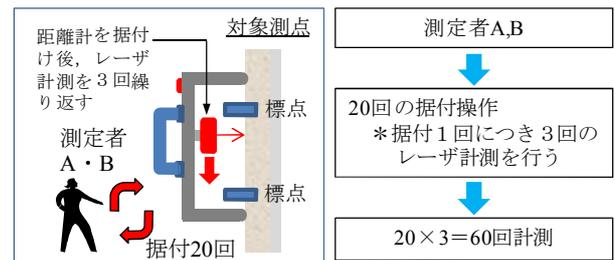


図-9 繰返し測定による精度検証

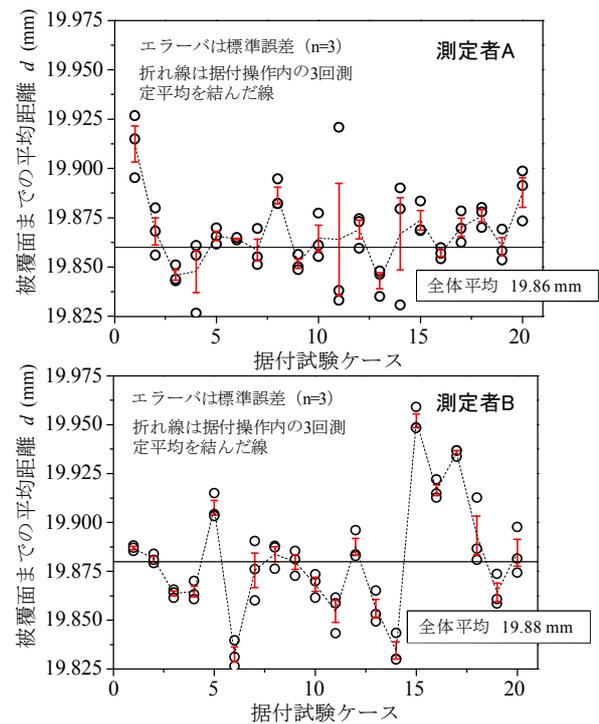


図-10 繰返し測定の結果

表-2 据付操作間および反復測定の際ばらつき

測定者	要因	自由度	平方和	分散	分散比	測定の標準偏差 (mm)	
						測定者間	測定者内
A	据付操作	19	0.01458	0.000767	3.05	据付操作間	$\sigma_b$ 0.013
	反復測定	40	0.01001	0.000252		反復測定間	$\sigma_w$ 0.016
	総変動	59	0.02459			合成	$\hat{\sigma}$ 0.016
B	据付操作	19	0.05147	0.002709	41.00	据付操作間	$\sigma_b$ 0.030
	反復測定	40	0.00264	0.000066		反復測定間	$\sigma_w$ 0.008
	総変動	59	0.05411			合成	$\hat{\sigma}$ 0.030

## 5. 現地測定試験による適用性の検証

被覆工補修開水路を対象に、施工後2年間の摩耗測定を実施し、提案測定手法の現地適用性を検証した。

### 5.1 対象水路

栃木県真岡市大沼地区を流下する鬼怒川南部幹線水路の被覆工試験区間（連続6スパン、延長72m）を対象とした。鬼怒川南部幹線水路は、栃木県真岡市の勝瓜頭首工を起点とする延長88kmのRC開水路であり、かんがい期の4月1日～9月25日の間は常時通水、非かんがい期はである冬季は完全に落水する。表面被覆前に水路表面は粗骨材の露出が見られる程度の摩耗が進行していた。対象水路の外観と標点の設置状況を図-11に示す。



図-11 対象被覆水路と標点の状況

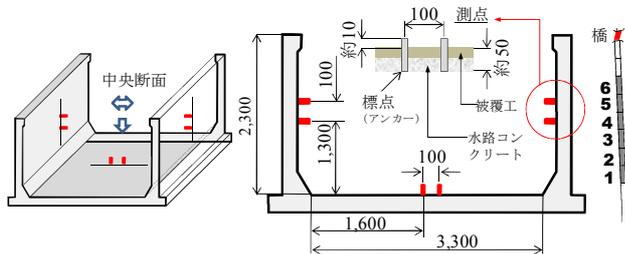


図-12 被覆水路スパン内の測点位置

### 5.2 標点の設置および測定概要

試験区間では、2012年1～3月の間にストックマネジメント高度化事業によるポリマーセメントモルタル(PCM)を用いた被覆工が施工された。流況がほぼ等しい連続スパンを選定し、各スパン内の図-12に示すスパンの中央断面に配置した測点で摩耗深さを測定した。標点は、水流を乱さないように基線方向が水流と直交する方向に配置した。標点の設置では、旧水路側壁を高圧水で洗浄した後、頭が平らなステンレスホールインアンカー(φ10mm、長さ60mm)を標点間距離が約100mm、アンカーの突出高が約10mmになるように打ち込んだ。標点設置後、PCMによる表面被覆を実施した。

現地における摩耗測定を被覆工が完了した2012年3月に初期値を1回、半年の通水を経た2012年の非かんがい期に3回(2012.12.25, 2013.1.18, 2012.3.19)、同様に2013年の非かんがい期に2回(2013.12.14, 2013.12.17)

行った。初期値以外は同一の測定者が測定した。使用機器はすべて同一である。測定手順は2.2に示した方法で行い、1回の距離計を据え付けに対し3回の反復距離測定を実施した。

### 5.3 繰返し測定による測定精度の検証

被覆工が完成してから半年の通水を経た2012年の非かんがい期に日時の異なる3日の摩耗測定を行った。対象測点は側壁10箇所である。測定値は様々な要因によってばらつくが、4章で行ったばらつきの分析と同様に、測定値のばらつきを「測定日の違いによるばらつき」と「3回反復測定間のばらつき」に分離して検証した。

図-13(a)に、各測点の反復測定値から3回の測定平均を引いた偏差のプロットを表す。偏差は据付操作内の反復測定値間のばらつきを示す。グラフの横軸は、数字がスパン番号を、L、Rが左岸、右岸の区別を示す。番号1のスパンが最下流に位置する。y軸原点は測定日毎の各測点の3回の反復測定の平均値に相当する。各測点の据付操作内の測定値のばらつきをその標準偏差により評価すると、最大は6Rの0.046mm、全測点の標準偏差の平均は0.019mmであった。

図-13(b)に、各測点の3回反復測定平均値から測点の全体平均値(9個のデータの平均)を引いた偏差のプロットを示す。偏差は各測点の測定日の違いによるばらつきを示す。y軸原点は各測点の3測定日の全体平均値に相当する。測定日の違いによる測定値のばらつきをその標準偏差に評価すると、最大が0.10mm(5R)、全測点の標準偏差の平均は0.044mmであった。

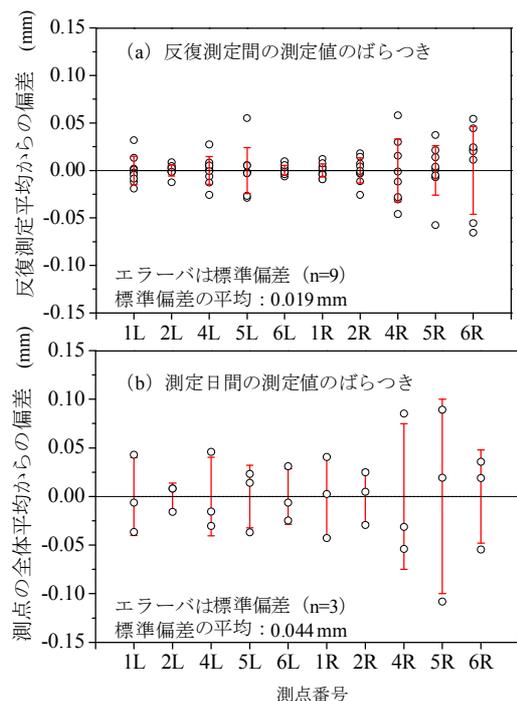


図-13 反復測定間および測定日間での測定値の変動

以上の結果より、現地測定条件下での摩耗測定のばらつきは、反復距離測定に関するものが標準偏差で $\sigma_w=0.016$ 、測定日の違いに関するものが標準偏差で $\sigma_b=0.044$ と推定される。測定日の違いによるばらつき $\sigma_b$ は、据付後の反復距離測定のばらつき $\sigma_w$ に較べ約3倍大きく、レーザ距離計を用いた摩耗深さ測定の主要な誤差は測定日の違いによる誤差が大きいと推定される。測定日の違いによる誤差要因としては、据付操作や気温、被覆面の条件の違いが考えられる。

4章の室内繰返し試験結果で実施した精度検証と同様に、据付後3回の反復レーザ距離測定を行った場合( $m=1, r=3$ )の測定精度を求める。現地測定試験から繰返し反復間の測定のばらつきを $\sigma_w=0.016$ 、据付操作等を要因とする測定日間の測定のばらつきを $\sigma_b=0.044$ と推定すれば、式(10)から合成標準偏差 $\hat{\sigma}$ は0.045と求まる。この $\hat{\sigma}$ を現場測定における測定のばらつきと仮定し、95%信頼区間の係数に相当する包含係数 $k=2$ とすれば、今回の測定条件に対する測定精度は測定値 $\pm 0.044 \times 2 =$ 測定値 $\pm 0.088\text{mm}$ と推定される。安全側を考慮して、この推定値の数値を丸めれば、1回の据付操作内で3回の反復距離測定を行い算定した平均摩耗深さの測定精度は測定値 $\pm 0.1\text{mm}$ と推定できる。

#### 5.4 被覆工の摩耗進行

レーザ距離計による被覆水路側壁の実測結果を図-14に示す。グラフの横軸には測定スパンを、縦軸には年間平均摩耗深さを取った。グラフの中の黒丸とエラーバは2012年度に3回測定した平均摩耗深さの平均値および標準誤差を示すを、同様に青丸とエラーバは2013年度のそれらを示す。各年度の平均摩耗深さの初期値には、2012年度は2011年度の施工直後の計測値を、2013年度には2012年度の3日間の測定の平均値を用いた。

測定データから、側壁8スパン全体の年間平均摩耗深さを求めると、2012年度が0.28mm(標準誤差0.028, 95%信頼区間0.22~0.34mm)、2013年度が0.16mm(標準誤差0.017, 95%信頼区間0.13~0.19mm)であった。この結果から、①スパン間の年間平均摩耗深さのばらつきは2012年度より2013年度の方が小さい、②側壁8スパン全体の年間平均摩耗深さは初年度(2012年度)の方が2年目(2013年度)より大きい(0.28mm>0.16mm)こと、がわかる。

2012年度のスパン間での測定値のばらつきが大きい原因としては、初期値の測定を1回しか行っていないため、初期値のばらつきの影響を受けたと推測している。②の初年度の方が2年目より全体平均摩耗深さが大きくなる現象については、初期値の信頼性の問題もあり、この現象が他の被覆水路で一般的に生じる現象であるかに

ついては今回の測定のみからは結論づけられない。今後の課題としたい。いずれにしても、初年度および2年目の全体平均摩耗深さの推定値は、信頼区間がゼロを含まず正の値を取ることから、5%の危険率は存在するものの、対象とする測定区間では被覆工の厚さが減少し、摩耗が進行したといえる。また、被覆工の施工から約2年間の間に側壁で発生し年平均摩耗深さは約0.1~0.3mmと推測される。

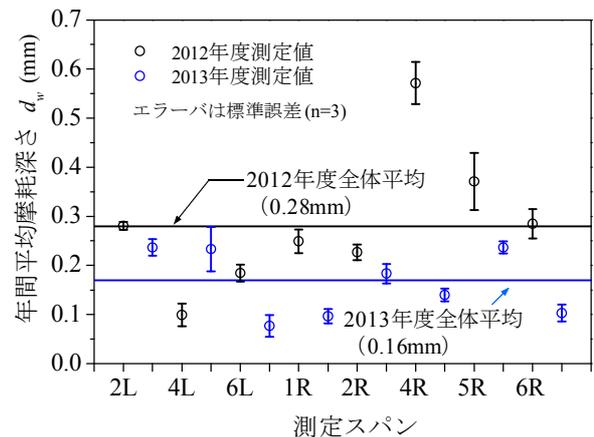


図-14 被覆工の年間摩耗進行

#### 6. まとめ

レーザ距離計を用いた無機系表面被覆工の定量的な摩耗進行測定手法を開発した。標点(ステンレスアンカー)を予め被覆面の2箇所に設置し、距離計を据え付ける際の測定誤差を補正する。測定精度は測定値 $\pm 0.1\text{mm}$ である。無機系表面被覆工の定量的な摩耗進行モニタリングに活用できる。今後は、被覆工の摩耗進行のモニタリングを継続し、摩耗進行の計測および予測の定量化を進める。なお、本研究は、農林水産委託プロジェクト水田底力6系の一部として行われたことを付記する。

#### 参考文献

- 1) 中矢哲郎, 渡嘉敷勝, 森充広, 森丈久: 摩耗したコンクリート水路表層形状からの粗度係数推定手法, 農業農村工学会論文集, 第258号, pp.23-28, 2008.
- 2) 北村浩二, 本間新哉, 今泉真之, 加藤敬: 農業用水路の壁面の摩耗劣化と継目劣化の予測, 農業農村工学会論文集, 第254号, pp.123-134, 2008.
- 3) 太田垣晃一郎, 長谷川雄基, 鈴木哲也, 松本伸介, 佐藤周之: 三次元画像解析によるコンクリート水路表面粗度の測定手法に関する研究, 農業農村工学会論文集, 第280号, 7-13, 2012
- 4) 加藤洋一: サンプルングと抜取検査, 日本規格協会, pp.20-23, 1984.
- 5) 関根嘉香: 品質管理の統計学, オーム社, pp.95-100, 2012.