

逐次 2 角法を用いた小型プロファイラによる 歩道の平坦性測定

石田眞二¹・亀山修一²・福原敏彦³・笠原篤⁴

¹正会員 修士（工学）北海道工業大学講師 工学部社会基盤工学科
（〒 006-8585 札幌市手稲区前田 7 条 15 丁目 4-1）

²正会員 博士（工学）北海道工業大学助教授 工学部社会基盤工学科
（〒 006-8585 札幌市手稲区前田 7 条 15 丁目 4-1）

³株式会社 サンウェイ 技術開発部（〒491-0838 愛知県一宮市丹陽町猿海道字七反田 367）

⁴フェロー会員 工博 北海道工業大学教授 工学部社会基盤工学科
（〒 006-8585 札幌市手稲区前田 7 条 15 丁目 4-1）

歩道の平坦性測定装置として逐次 2 角法を用いた凸凹ウォークが開発された。逐次 2 角法は、進行方向に 25cm 間隔で配置された直径 15cm の 3 つの車輪を 2 本の棒で連結し、その角度を測定する方法である。本研究では、凸凹ウォークで測定されたデータからプロファイルを復元する方法、およびプロファイルの復元精度に関する検討をおこなった。その結果、凸凹ウォークの測定データと測定開始点および終了点の高さからプロファイルを復元する方法が有効であることが分かった。また、この方法によって復元されたプロファイルから路面の段差と勾配を高精度で測定できることを明らかにした。さらに、歩道の車両乗り入れ部のように平坦性が著しく悪い区間のプロファイルも測定可能であることを示した。

Key Words : *sidewalk, barrier free, profile, evenness, sequential two angles method*

1. はじめに

わが国では、道路は高度経済成長を支える重要な社会基盤として位置づけられ、車道を中心に急ピッチで整備されてきた。そのため、歩道は、車道の付加構造物として設計、施工されることが多く、歩道の安全性や快適性に十分配慮されてきたとは言い難い。また、車道舗装に関しては、すべり抵抗、平坦性、わだち掘れなどに関する基準が設けられているものの、歩道舗装に関する基準は定性的に記述されているだけであり¹⁾、歩道利用者の安全性、快適性に基づく明確な基準はない。その結果、わが国では凹凸、急勾配、段差が著しい歩道が数多く見られ、歩行者の安全性や快適性、特に、高齢者および身体障害者の円滑な移動に対する大きな障害（交通バリア）となっている²⁾。

平成 12 年、公共構造物における交通バリアの解消

を目的として「高齢者、身体障害者等の公共交通機関を利用した移動の円滑化の促進に関する法律」（通称「交通バリアフリー法」）が制定された。これを受けて、国土交通省は「歩道における段差及び勾配等に関する基準」を設け、バリアフリー化に対応した歩道の整備を進めている。この基準は、歩行者の安全かつ円滑な通行を確保するために歩道内においては有効幅員 2m 以上の平坦部を連続して確保する歩道内における縦断勾配は 5% 以下、横断勾配は 1% を標準とする。歩道と車道のすり付け部の段差は 2cm を標準とし、その他の歩行者の通行箇所には段差を設けない、という 3 つの基準を設けている。したがって、歩道のバリアフリーを実現するには、歩道の平坦性、勾配、および段差を評価することが極めて重要となる。

従来、歩道の平坦性測定装置として 3m プロファイラを用いる場合が多く見受けられたが³⁾、これは車道の平坦性を測定するための装置であり、歩道の縦断勾配や歩道と車道のすり付け部の段差を正確に測定することには適していない。また、車椅子に加速度計を取り付け、走行させたときに生じる鉛直方向加速度を測定する方法^{4), 5)}や変位計を備えた装置の先端にソリッドタイヤを取り付け、ソリッドタイヤの上下運動から路面の凹凸を求める方法^{6), 7)}などが報告されているが、いずれもプロファイルを測定していないため、歩道の勾配や段差を得ることはできない。このように、従来用いられていた測定装置は、歩道の平坦性、勾配、段差を評価するための装置として不十分であることから、歩道のプロファイルを高精度で測定する装置（プロファイラ）の開発が望まれていた。

平成 13 年、歩道のプロファイルを測定する装置として凸凹ウォークが開発された。従来のプロファイラでは、路面の高さをレーザセンサや光センサによって測定する方法が主流であったが、凸凹ウォークは、これらとは全く異なる逐次 2 角法という測定原理を採用している。

本研究では、凸凹ウォークによって測定された角度データからプロファイルを復元する方法およびプロファイルの復元精度に関する検討をおこなった。また、既知の段差および勾配を設けた路面において凸凹ウォークの測定をおこない、復元プロファイルから求めた段差・勾配と真の段差・勾配との関係を求めた。さらに、実際に供用されている歩道において凸凹ウォークの測定を実施し、歩道の平坦性とプロファイルの復元精度に関して検討した。

2. 凸凹ウォークによるプロファイルの測定

本研究で用いた平坦性測定装置（凸凹ウォーク）を写真-1 および図-1 に示す。凸凹ウォークは、25cm 間隔に配置した直径 15cm のローラ 3 個を 2 本の棒（連結棒）で連結した装置である。連結棒は、その両端がローラの中心軸に取り付けられており、自由に回転できることから 3 個のローラの高低差に応じて連結棒の傾きが変化する。ローラ には距離測定器が取り付けられており、回転数および回転角度から走行距離が求められる。また、ローラ に取り付けられたロータリエンコーダによって連結棒 と連結棒 の角度（以後、連結角と称する）を測定する。なお、距離および連結角の測定値はパルスで記録され、1 パルス当たりの距離は 0.092960mm、角度は



写真-1 凸凹ウォークの概観

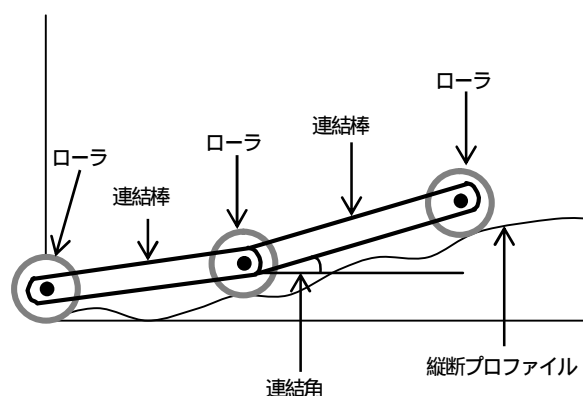


図-1 凸凹ウォークの測定原理

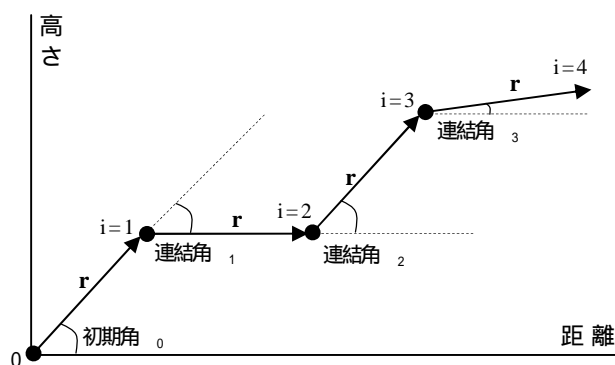


図-2 プロファイルの復元

0.0144°である。凸凹ウォークの測定、制御および測定データの保存などは、凸凹ウォークに接続したパソコン上で実行可能である。

凸凹ウォークは、図-1 に示すように中央のローラ（ローラ）が位置する地点の連結角と走行距離を測定する。図-1 の状態から凸凹ウォークが 25cm 進んだ場合、ローラ はローラ のあった位置に移動し、連結角を測定する。これを繰り返すことにより図-2 に示すようなベクトルが得られる。図-2 から i 点の座標 (x_i, y_i)、すなわち路面のプロファイルは、測定開始点における連結棒 の傾斜角（初期角 q_0 ）

と $(i-1)$ 点までの連結角の累積を式 (1), (2), (3) に代入することによって復元される．なお，本研究では，デジタル式傾斜計によって初期角 q_0 を測定した．

図-2 において $i = 1$ のとき

$$x_1 = r \cos q_0, y_1 = r \sin q_0 \quad (1)$$

図-2 において $i > 1$ のとき

$$x_i = x_{i-1} + r \cos(q_0 + \dots + q_{i-1}) \quad (2)$$

$$y_i = y_{i-1} + r \sin(q_0 + \dots + q_{i-1}) \quad (3)$$

なお， r は連結棒の長さ (25cm) を表し，初期角 q_0 にはデジタル式傾斜計によって測定した値を用いた．一方，ロータリエンコーダによって測定された角度データには，装置特有の偏り (オフセット) が含まれているため，上式によるプロファイルの復元に際しては，測定された連結角を式 (4) で補正する必要がある．

$$q_i = q_i' + f_i \quad (4)$$

ここで，

i : 測定点 ($i = 1, \dots, N$)

q_i : 補正された連結角

q_i' : 測定された連結角

f_i : オフセット

凸凹ウォークでは，連結角のサンプリング間隔を任意に設定することが可能であるが，測定路面のプロファイルを復元するためには，上述したようにサンプリング間隔をローラの間隔と等しい 25cm に設定する必要がある．

3. プロファイルの復元

(1) プロファイルの復元に及ぼすオフセットの影響

プロファイルを復元するには，式 (4) に示したようにロータリエンコーダのオフセットを決定する必要がある．そこで，本研究では，凸凹ウォークの測定データから復元したプロファイルと水準測量から得られたプロファイル (以後，真のプロファイルと称する) を比較し，オフセットが復元プロファイルに及ぼす影響について検討した．

北海道工業大学校舎内の廊下に延長 5, 10, 15, 20, 25m の測定区間を設けた．各測定区間において 25cm 間隔に水準測量を実施し，真のプロファイルを

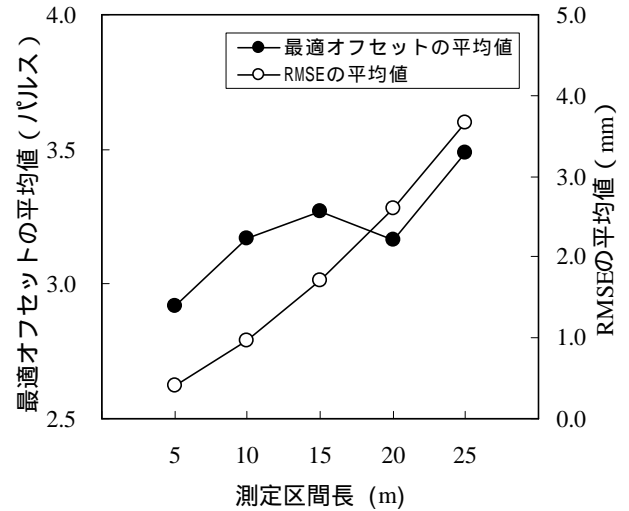


図-4 最適オフセットの平均

測定した後，その上をローラが走行するように注意しながら凸凹ウォークの測定をおこなった．なお，凸凹ウォークの測定は 5 回実施した．

本研究では，真のプロファイルと復元プロファイルの一致度を表す指標として，式 (5) に示す RMSE (Root Mean Square Error) を用いた．

$$RMSE = \sqrt{\frac{(y_i - Y_i)^2}{N}} \quad (5)$$

ここに，

y_i : 復元プロファイル (mm)

Y_i : 真のプロファイル (mm)

i : 測定点 ($i = 1, \dots, N$)

オフセットを変化させて復元プロファイルを計算し，その中で復元されたプロファイルと真のプロファイルの RMSE が最小となるオフセット (以後，最適オフセットと称する) を決定した．

測定区間長が 5, 10, 15, 20, 25m における 5 回の測定から得られた最適オフセットの平均を図-4 に示す．最適オフセットは一定値を示さず，測定区間長が長くなるほど最適オフセットの平均値が大きくなる傾向が見られた．したがって，プロファイルを復元するためには，測定毎に適切なオフセットを決定する必要があると考えられる．

各測定区間長における復元プロファイルと真のプロファイルの RMSE の平均を図-4 に併せて示す．測定区間長が長くなるほど RMSE が大きくなる傾向が見られたことから，プロファイルの復元精度が高いレベルで要求される場合は，測定区間長を短くする必要があると考えられる．

(2) プロファイルの復元方法の検討

凸凹ウォークの測定データからプロファイルを復元するためには、測定毎に適切なオフセットを設定する必要がある。本研究では、水準測量によって測定された測定開始点および終点の高さと復元プロファイルの始終点の高さが一致するようにオフセットを決定する方法（以後、始終点一致法と称する）によってプロファイルを復元することを試みた。

凸凹ウォークの測定データから始終点一致法によって復元したプロファイルと真のプロファイルのRMSEを算出した。測定区間長 5, 10, 15, 20, 25m における RMSE の平均を図-5 に示す。なお、最適オフセットを用いて復元したプロファイルと真のプロファイルの RMSE も併せて図-5 に示す。測定区間長が 10m 以下の場合には、始終点一致法の RMSE と最適オフセットの RMSE はほぼ一致したが、測定区間長が 10m 以上では両者の差が増加する傾向が見られた。しかしながら、始終点一致法と最適オフセットの RMSE の差は区間長 25m の場合で 0.8mm 程度と非常に小さいことから、始終点一致法を用いることにより最適オフセットを用いた場合と同程度の精度でプロファイルを復元できると考えられる。

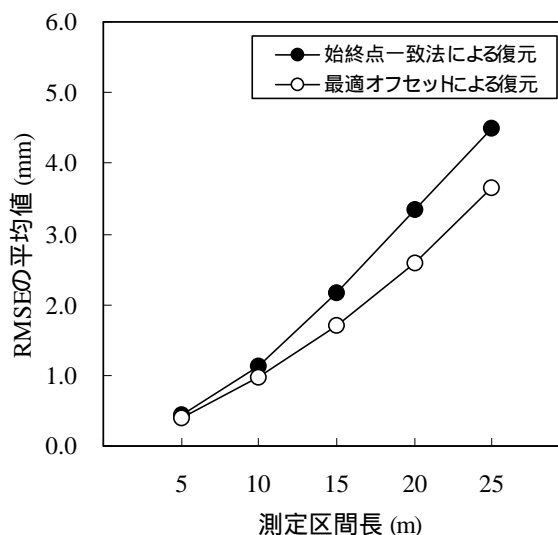


図-5 測定区間長と RMSE の関係

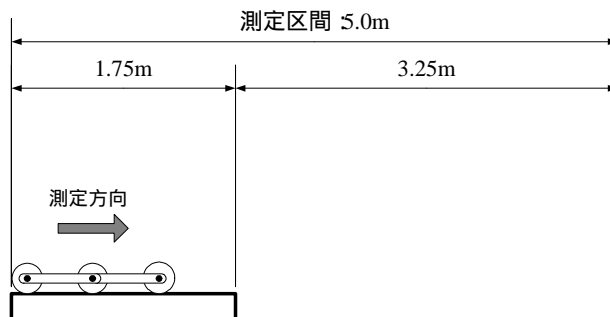


図-6 段差の測定

4. 段差および勾配を有する路面の測定

(1) 段差を有する路面の測定

歩道のバリアフリーを評価する項目の一つとして段差がある。国土交通省が定めた「歩道における段差及び勾配等に関する基準」では、歩道と車道のすり付け部の段差を 2cm 以下と定めている。そこで、測定区間内に既知の段差を設けた路面上で凸凹ウォークの測定を実施し、復元されたプロファイルから得られる段差と真の段差の関係について検討した。

測定区間長は、図-6 に示すように 5m とし、測定開始点から 1.75m の位置に、高さ 0.55cm, 1.2cm, 2.4cm, 3.6cm, 4.8cm, 5.35cm, 6.0cm の 7 種類の段差を設けた。25cm 間隔で水準測量を実施し、真のプロファイルを求めるとともに凸凹ウォークによる測定を 5 回実施した。凸凹ウォークの測定データから始終点一致法によってプロファイルを復元した後、始点から 1.75m 離れた地点の高さと 2.0m 離れた地点の高さの差を復元プロファイルから求め、これを段差とした。

測定区間に設けた段差と復元プロファイルから算出された段差の関係を図-7 に示す。段差が 6.0cm のケースでは、連結棒が段差に接触するため測定が不可能であった。測定が可能であった段差が 5.35 cm

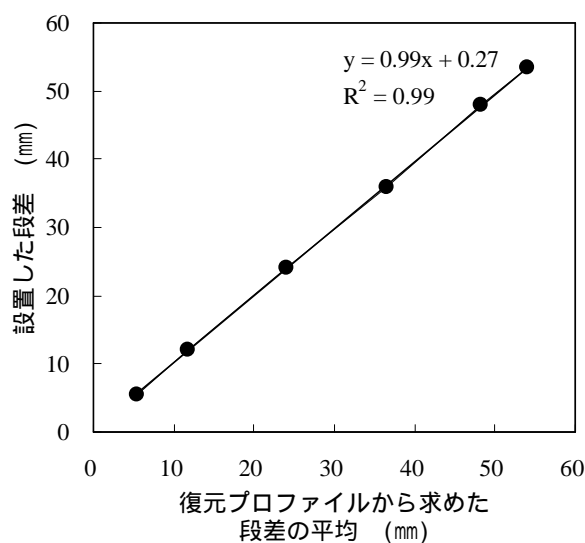


図-7 設置した段差と復元プロファイルから求めた段差の関係

以下であり，このケースでは設置した段差と復元プロフィールから算出された段差はほぼ一致した．したがって，連結棒が段差に接触しない限り（段差が5.35cm以下），凸凹ウォークの測定データから路面の段差を高精度で求めることができると考えられる．

(2) 勾配を有する路面の測定

歩道を利用する高齢者や身体障害者にとっては，段差の他に歩道と車道のすり付け部や車両乗り入れ部などの勾配も大きな交通バリアとなる．測定区間に図-8 に示すような斜面を設けた路面上で凸凹ウォークの測定をおこない，復元されたプロフィールから得られる勾配と真の勾配の関係について検討した．測定区間に設置した傾斜台と平行台の寸法，および傾斜台の勾配を表-1 に示す．

表-1 に示した傾斜台と平行台を区間長 10m の測定区間に図-9 のように配置し，水準測量によって真のプロファイルを測定した後，凸凹ウォークによる測定を 5 回実施した．凸凹ウォークの測定データから始終点一致法によってプロフィールを復元し，上り勾配の開始点と終了点の 2 点間の距離と高さから勾配を算出した．

表-1 に示した傾斜台の勾配と凸凹ウォークの測定データから算出した上り勾配の関係を図-10 に示す．復元プロフィールから求めた上り勾配と傾斜台の勾配は完全には一致しないが，両者の間には非常に強い相関が見られた．したがって，凸凹ウォークの測定データから路面の勾配を高精度で求めることが可能であると考えられる．

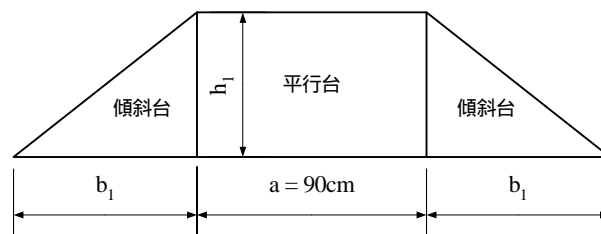


図-8 測定区間に設置した傾斜台と平行台

表-1 傾斜台と平行台の組合せ

ケース	傾斜台		平行台	
	b_1 (cm)	勾配 (%)	a (cm)	h_1 (cm)
A	90.0	11.1	90.0	10.0
B	90.0	6.2	90.0	5.6
C	90.0	3.1	90.0	2.8
D	45.0	22.2	90.0	10.0
E	45.0	12.4	90.0	5.6
F	45.0	6.2	90.0	2.8

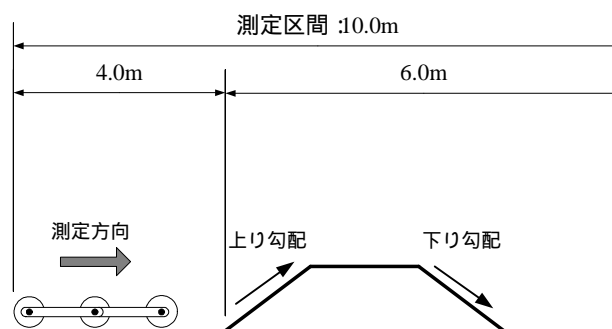


図-9 勾配の測定

5. 供用されている歩道のプロフィール測定

実際に供用されている歩道において真のプロファイルを測定した後，凸凹ウォークの測定を実施し，始終点一致法によって復元されたプロフィールの精度に関して検討した．

(1) 測定区間長がプロフィールの復元精度に及ぼす影響

屋内において測定した凸凹ウォークのデータからプロフィールを復元した場合，測定区間長が長くなるほど RMSE が増加したことから，北海道工業大学構内にある平坦な歩道（アスファルト舗装およびインターロッキングブロック舗装）において測定区間長を変えて凸凹ウォークの測定をおこない，測定区間長と RMSE の関係について検討した．

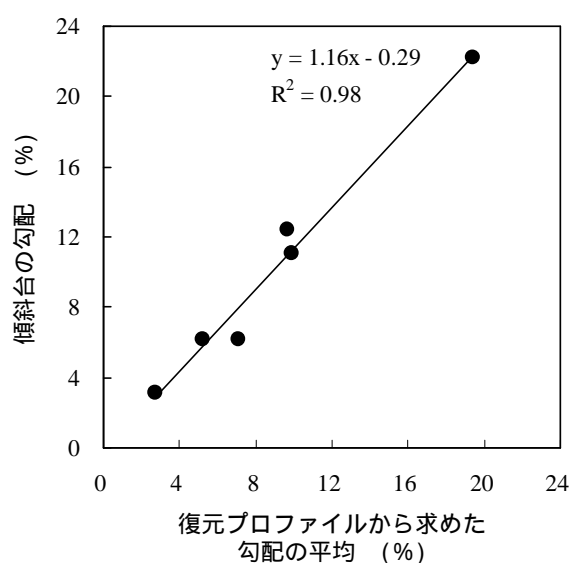


図-10 傾斜台の勾配と復元プロフィールから求めた勾配の関係

測定区間長が 5, 10, 15, 20, 25m の場合におけるアスファルト舗装およびインターロッキングブロック舗装の RMSE を図-11 に示す。いずれの舗装でも測定区間長が長くなるとともに RMSE が増加する傾向が見られた。特に、インターロッキングブロック舗装ではこの傾向が顕著であることから、インターロッキングブロック舗装における凸凹ウォークの測定にあたっては、測定区間を短く設定する必要があると考えられる。

(2) 歩道の平坦性と復元プロファイルの精度の関係
北海道工業大学周辺の歩道（アスファルト舗装）に 8 箇所の測定区間（区間長 10m）を設け、真のプロファイルの測定および凸凹ウォークの測定を実施した。

凸凹ウォークの測定データから始終点一致法によって復元されたプロファイルの標準偏差を算出した。8 箇所の測定区間の標準偏差と復元プロファイルの RMSE の関係を図-12 に示す。この図からプロファイルの標準偏差が大きくなるにしたがって RMSE，すなわちプロファイルの復元精度が低下することが分かる。

図-12 中の標準偏差の大小を調べるために、真のプロファイルと復元プロファイルの比較を標準偏差の小さい順に区間 A, B, C をそれぞれ図-13, 14, 15 に示す。区間 A では、真のプロファイルと復元プロファイルはほぼ一致した。一方、区間 B では、区間 A と比べ真のプロファイルと復元プロファイルの間には最大で 9.2mm 程度の差が見られた。

標準偏差が最大となった区間 C（標準偏差 26.3mm）を写真-2 に示す。この区間は、測定開始点が車両乗り入れ部に位置することから、車両乗り入れ部とそれ以外の高低差が大きく、車両乗り入れ部端部に急勾配を有する。区間 C における真のプロファイルと凸凹ウォークの測定データから復元されたプロファイルを図-15 に示す。真のプロファイルと復元プロファイルの差は車両乗り入れ部（測定開始点から 2～6m）で大きく、最大で 10mm 程度であった。また、車両乗り入れ部端部の高低差および勾配は、真のプロファイルで 5.85cm, 5.9%, 復元プロファイルでは 5.84cm, 5.8% となり、ほぼ同じ値を示した。したがって、車両乗り入れ部によって大きな高低差や急勾配が生じている歩道の平坦性評価にも凸凹ウォークを用いることができると考えられる。

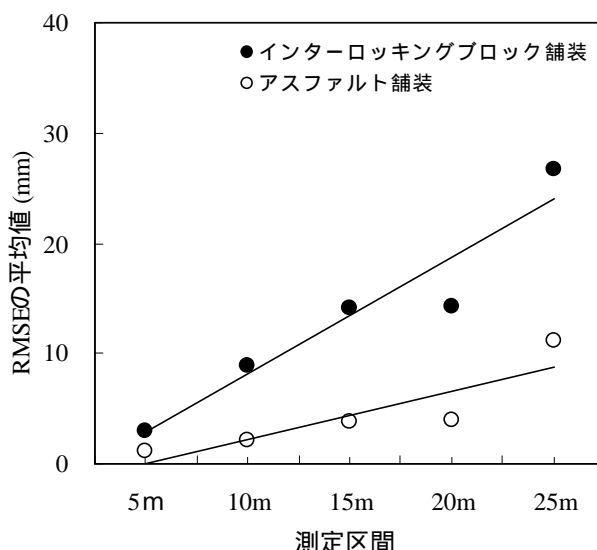


図-11 測定区間長と RMSE の関係

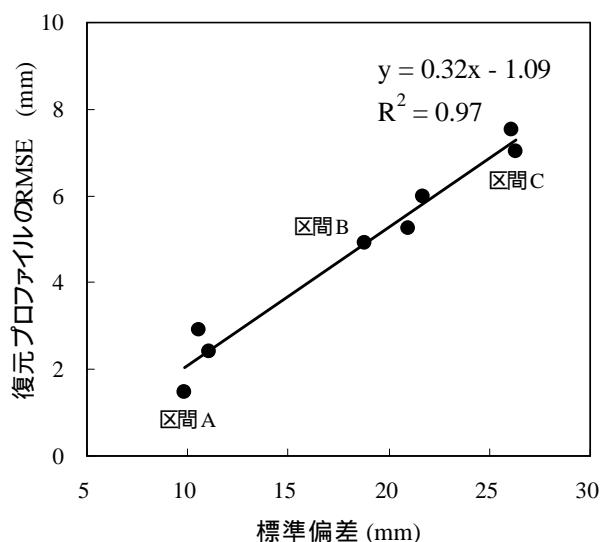


図-12 標準偏差と RMSE の関係



写真-2 測定区間 C

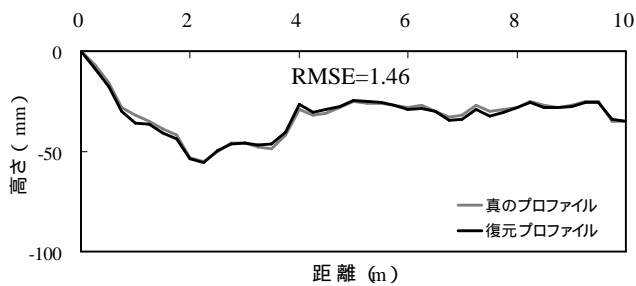


図-13 真のプロファイルと復元プロファイル
(区間 A : 標準偏差 9.8mm)

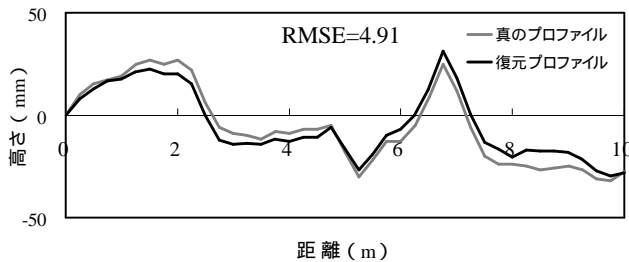


図-14 真のプロファイルと復元プロファイル
(区間 B : 標準偏差 18.8mm)

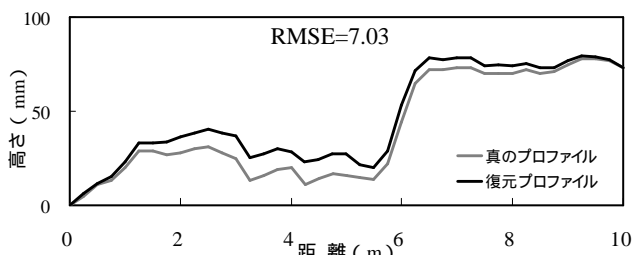


図-15 真のプロファイルと復元プロファイル
(区間 C : 標準偏差 26.3mm)

6. 結論

本研究では、逐次 2 角法を適用したプロファイル（凸凹ウォーク）の測定データからプロファイルを復元する方法と復元精度に関する検討をおこなった。また、実際に供用されている歩道においてプロファイル測定を実施し、凸凹ウォークの現場測定への適用性に関して検討した。

本研究によって得られた結論を以下に示す。

- 北海道工業大学校舎内の廊下に延長 5, 10, 15, 20, 25m の測定区間を設け、水準測量によって真のプロファイルを求めるとともに、凸凹ウォークによる測定をおこなった。その結果、オフセットを適切に設定することによって凸凹ウォーク

ークの測定データからプロファイルを高精度で復元できることが分かった。しかしながら、真のプロファイルと復元プロファイルの RMSE を最小にするオフセット（最適オフセット）は常に一定値を示さないことから、測定毎にオフセットを決定する必要があることが分かった。また、測定区間長が長くなるほど RMSE が大きくなる傾向が見られたことから、プロファイルの復元精度が高いレベルで要求される場合は、測定区間長を短くする必要があると考えられる。

- オフセットの決定方法に始終点一致法を採用し、この方法によって復元されたプロファイルの精度について検討した。始終点一致法を用いて復元したプロファイルの RMSE と最適オフセットを用いて復元したプロファイルの RMSE には大きな差が見られなかったことから、凸凹ウォークのプロファイル復元方法として始終点一致法が有効であることが分かった。
- 測定区間内に段差および勾配を設け、凸凹ウォークによる測定をおこなった。その結果、凸凹ウォークの測定データから路面の段差と勾配を高精度で求めることができたことが分かった。
- 実際に供用されているアスファルト舗装およびインターロッキングブロック舗装において凸凹ウォークの測定を実施した。インターロッキングブロック舗装の RMSE はアスファルト舗装の RMSE よりも大きいことから、インターロッキングブロック舗装の測定をおこなう場合は測定区間長を短く設定する必要があると考えられる。
- 供用されている歩道から 8 箇所を選定し、真のプロファイルの測定および凸凹ウォークによる測定をおこなった。その結果、車両乗り入れ部の影響によって著しい高低差や急勾配が生じた歩道のプロファイルを凸凹ウォークによって測定できることが分かった。

参考文献

- 日本道路協会：アスファルト舗装要綱，歩行者系道路舗装，pp.172-174，2001。
- 国土技術研究センター：バリアフリー歩行空間ネットワーク形成の手引き，大成出版社，2001。
- 前川亮太，新木圭一，姫野賢治，大谷智夫：歩行者用舗装の路面特性と歩行者の歩きやすさとの関係，土木学会第 54 回年次学術講演会講演概要集第 5 部，pp.370-371，1999。
- 牧恒雄，竹内康：歩行者系道路舗装材の快適性に関する検討，舗装第 30 巻 6 号，pp.16-20，1995。

- 5) 牧恒雄, 竹内康, 松田誠: 舗装の凹凸評価法に関する研究, 第 1 回舗装工学講演会講演論文集, pp.151-158, 1996 .
- 6) 小森谷一志, 池田拓哉, 谷口聡: 歩行者系舗装の歩きやすさの評価手法に関する研究, 第 2 回舗装工学講演会講演論文集, pp.181-188, 1997 .
- 7) 池田拓哉, 谷口聡, 小森谷一志: 歩行者系舗装の歩きやすさの評価手法に関する研究, 舗装第 33 巻 4 号, pp.4-8, 1998 .
- (2002. 7. 29 受付)

MEASUREMENT OF SAIDEWALK EVENNESS BY A HANDY PROFILER USING SEQUENTIAL TWO ANGLES METHOD

Shinji ISHIDA, Shuichi KAMEYAMA, Toshihiko FUKUHARA,
and Atsushi KASAHARA

DEKO-BOKO Walk was developed to measure sidewalk profile. It employs the Sequential Two Angles Method that measures the angle of the two connection shafts that connect three wheels located every 25 cm in the running direction.

In this study, we developed a method for calculating profiles from the data measured by the DEKO-BOKO Walk, and examined the Root Mean Square Error between true profile and calculated profile. It was found that faulting and slope of the pavement could be obtained from the profile calculated by this method. We also showed that it was possible to obtain an accurate profile from the data measured on bumpy sidewalks including entrance to driveway.