

令和 3 年 6 月 15 日現在

機関番号：32658

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04311

研究課題名(和文) 移動式たわみ測定装置を用いた歩行者系舗装の健全度評価に関する研究

研究課題名(英文) Study on the soundness evaluation of pedestrian pavement using a mobile deflection measuring device

研究代表者

竹内 康 (TAKEUCHI, Yasushi)

東京農業大学・地域環境科学部・教授

研究者番号：90271329

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、歩道等において発生している路面下空洞等による舗装の健全度低下部を迅速に検出することを目的に、ターレットトラックをベース車両とした移動式たわみ測定装置の開発を行い、東京農業大学構内のアスファルト舗装区間において実証実験を行った。その結果、移動式たわみ測定装置による健全度評価結果は、路面下空洞探査に用いられている各種試験機と相関性が高いことが確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発した移動式たわみ測定装置では、移動しながら連続的に非破壊検査を行うため、定点に非破壊試験機を設置して調査する既往の方法に比べて局所的な舗装の健全性の変化を精密に捉えることはできない。しかし、広域の調査を目的とする場合には、そのような局所的な変化を評価する必要はなく、舗装の健全性が低下しているエリアが把握できれば良い。そのような用途においては、本装置は効率よく舗装の非健全部を抽出できるものであり、今後の生活道や歩道といった歩行者系道路の維持管理の効率化に寄与できるものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：In this study, for the purpose of quickly detecting the soundness lowering point of pavement due to the underlying cavity of the road surface generated in the sidewalk, etc., the mobile deflection measuring device using the turret truck was developed, and the demonstration experiment was carried out in the asphalt pavement section in the Tokyo University of Agriculture premises. As a result, it was confirmed that the soundness evaluation result by the mobile deflection measuring device was highly correlated with various test machines used for the under-road cavity exploration.

研究分野：土木工学

キーワード：移動式たわみ測定装置 小型FWD 地中レーダ 歩行者系道路 非破壊検査

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

1988年に銀座晴海通りで発生した路面陥没事故以降、日本各地で路面陥没事例が次々と報告され、国土技術政策総合研究所の調査結果¹⁾では、年間4~5000件の路面陥没事例があるとされている。路面陥没は、下水道管等の地下埋設物の継ぎ手部等からの土砂の吸い出しを起因とする路面下空洞が舗装内に到達したときに生じる場合が多く、国土技術政策総合研究所の調査結果によると、2006年~2009年までに発生した路面陥没のうち85%が車道部、13%が歩道部となっている。この4力年の路面陥没発生件数は17178件であることから、歩道部で発生した路面陥没は約2200件と無視できない件数に上っている。したがって、安全な生活空間を構築するためには、歩行者系道路の路面下空洞を効率良く検出することは重要である。

現在、路面下空洞の探査には電磁波レーダ (Ground Penetrating Radar, GPR) が用いられているが、GPRは比誘電率の異なる材料を検知するのみで、それが空洞であるか否かを判断するには経験が必要であり、最終的にはボアホールカメラ等で目視確認する以外に方法はない。そのため、研究代表者は小型FWD (Falling Weight Deflectometer, 写真-1) とGPRを併用した効率的な路面下空洞探査方法について検討してきた²⁾。しかし、小型FWDによるたわみ測定は、定点載荷方式により行うため、長距離にわたる計測には不向きであり、かつ路面下空洞以外の支持力低下箇所を見逃す可能性があることから、移動しながら連続的にたわみを計測する方法 (移動式たわみ計測装置) が必要となる。一方で我々の研究グループでは、道路舗装ストックの効率的な維持管理法の構築を目的として、大型・中型車両にドップラー振動計を搭載した車道用の移動式たわみ計測装置 (Moving Wheel Deflectometer, MWD, 写真-2) を開発し、実用化に向けた様々な検討を行っている³⁾。しかし、MWDは幅員の狭い歩行者系道路を走行できないという問題があった。



写真-1 小型FWDによる支持力調査



写真-2 車道用MWD (中型車両)

2. 研究の目的

2020年度の道路統計年報⁴⁾によると、一般国道、都道府県道のうち歩道が設置されている道路の実延長は、26.7万kmにおよぶ。日本の舗装道路は約100万kmで、そのうちの84%が生活道路を含む市町村道路であり、同じく道路統計年報によると、生活道路と思われる幅員3.5m未満の道路延長は約50万kmにのぼる。したがって、歩道と生活道路を歩行者系道路と総称すると、その延長は80万km弱となる。

歩行者系道路において、多く発生している路面下空洞を迅速に検出することは、利用者の安全を確保する上で極めて重要である。そこで本研究では、安全な生活空間の構築に寄与できるよう、これまでに蓄積してきた車道用MWDのノウハウを活かして歩行者系道路用の移動式たわみ測定装置 (MWD-mini) の開発を行うとともに、路面下空洞発生箇所等の非健全部の評価方法の提案を目的としている。

3. 研究の方法

(1)MWD-miniの開発

本研究では、幅員の狭い歩行者系道路での走行を想定して、卸売市場などで用いられている荷役用のターレットトラックをベース車両とし、図-1に示すようにMWD-miniを試作した。

MWD-miniでは、荷台車軸直上の荷台に500kgの鉄製重錘を載せ、車軸左側のセンサ架台に取り付けたレーザ変位計で載荷輪直下と載荷輪前後の路面のたわみ形状を計測できるようにした。また、たわみ形状と計測位置を対応させるため、左後輪にロータリーエンコーダを設置した。

これまでの研究成果では、縦断 (車両走行) 方向の路面凹凸に起因する車両振動によってレーザ変位計の計測データにノイズ成分が混入するが、これは離散ウェーブレット解析等のデジタルフィルタにより除去できることがわかっている。そのため、デジタルフィルタの効果を検討するために、センサ架台に加速度計を設置して走行時の鉛直方向加速度を計測することとした。

MWD-miniに使用したターレットトラックには、車両寸法が小さいだけでなく、荷台と車軸受が剛結 (サスペンション無し) されており車輪にはソリッドタイヤを用いているため、一般車両

とは異なってサスペンションとタイヤによる緩衝作用が生じにくいという特徴がある。サスペンションとタイヤによる緩衝時の振動特性は、路面凹凸により生じる振動特性より低い周波数帯域で特徴的となり、車道用 MWD の研究成果ではドップラー振動計によるたわみ速度は低い周波数帯域で発生することがわかっている⁵⁾。そのため、MWD-mini のベース車両にターレットトラックを用いることで、レーザ変位計データに含まれるノイズを除去するデジタルフィルタの簡素化が期待できる。具体的には、データロガーに組み込まれているローパスフィルタを適用するだけで、十分なノイズ除去効果が見込まれると考えられる。

また、MWD-mini の載荷輪によって生じる路面のたわみは、車輪直下で最も大きく、車輪から遠ざかるにつれて小さくなる。MWD-mini では、レーザ変位計で計測される路面までの距離の変化から、荷重の影響がほぼ 0 になる位置と載荷直下での変位計の読みの差から式(1)によりたわみ量を算出することとした。

$$\delta = w_0 - w_{d=0} \quad (1)$$

ここに、 δ ：輪荷重により生じるたわみ量

$w_{d=0}$ ：荷重の影響がほぼ 0 になる位置での変位計の読み

w_0 ：載荷直下での変位計の読み

弾性理論上では、 $w_{d=0}$ と見做せる位置は車輪から 1~2m 離れた位置であり、その位置にレーザ変位計を設置することは MWD-mini の構造上難しい。また、センサ架台を長くすると、車両振動によってセンサ架台に不規則振動が生じたことから、本研究では車輪の前後 30cm の位置に設置したレーザ変位計の計測結果から式(2)に示すように相対たわみを求めることとした。車輪前後の計測値の平均をとったのは、センサ架台の僅かな上下方向の振動をキャンセルするためである。

$$\delta_r = w_0 - \frac{w_{30F} + w_{30R}}{2} \quad (2)$$

ここに、 δ_r ：相対たわみ量

w_{30F} 、 w_{30R} ：載荷直下から 30cm 前後の位置での変位計の読み

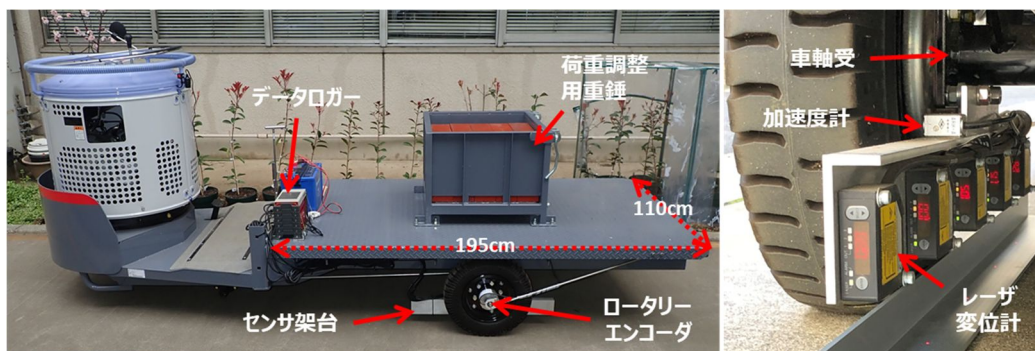


図-1 本研究で試作した歩行者系道路用の MWD-mini

(2)MWD-mini の計測精度の確認

本研究では、2020 年に発生した新型コロナウイルス感染症の流行にともない研究活動が大きく制限されたため、MWD-mini の計測精度の検証は東京農業大学世田谷キャンパス内のアスファルト舗装部（直線距離 55m）においてのみ実施した。

MWD-mini を走行させて得られる連続たわみの妥当性を評価するために、舗装の構造評価において一般的に活用されている小型 FWD 試験および GPR 試験を実施した。小型 FWD 試験では、路面に重錘を落下させたときのたわみが測定できるため、MWD-mini で得られる連続たわみの妥当性の検証に用いることとした。また GPR は、電磁波の反射特性を利用して地盤探査を行うものであり、GPR 試験によって走行試験中探査データとの比較により地盤内の構造変化を MWD-mini で検出できるか否かを確認した。

4. 研究成果

MWD-mini 走行試験は、直線距離 55m のアスファルト舗装部に走行ラインを設定し、小型 FWD 試験を実施する測点を等間隔でマーキングした後に、MWD-mini の左側車輪（レーザ変位計、ロータリーエンコーダ設置側）が一定速度で走行ライン上を通過するように留意して実施した。なお、走行試験を行う度に、アスファルト舗装区間に並行して設置されているコンクリート舗装区間においてレーザ変位計の 0 調整を実施した。また、走行試験時に路面凹凸によって生じるレーザ変位計のノイズを除去するためのデジタルフィルタとしてデータロガーに標準装備されているローパスフィルタ（以下、LPF）を採用し、予備試験によってその効果を確認した。

予備試験の結果より、LPF を 5Hz 以下に設定することで主に路面凹凸に起因する走行時の振動加速度を効率よく除去できていることがわかる。このことより、走行試験では LPF のフィルタレベルを 5Hz, 3Hz, 1Hz に設定し、各レベルに対して 3 回の走行試験を行うこととした。また、走行試験終了後には小型 FWD 試験, GPR 試験を実施し、MWD-mini の測定精度について検討した。MWD-mini と小型 FWD による計測たわみの結果の例を図-2 および 3 に、GPR による地盤内映像を図-4 に示す。

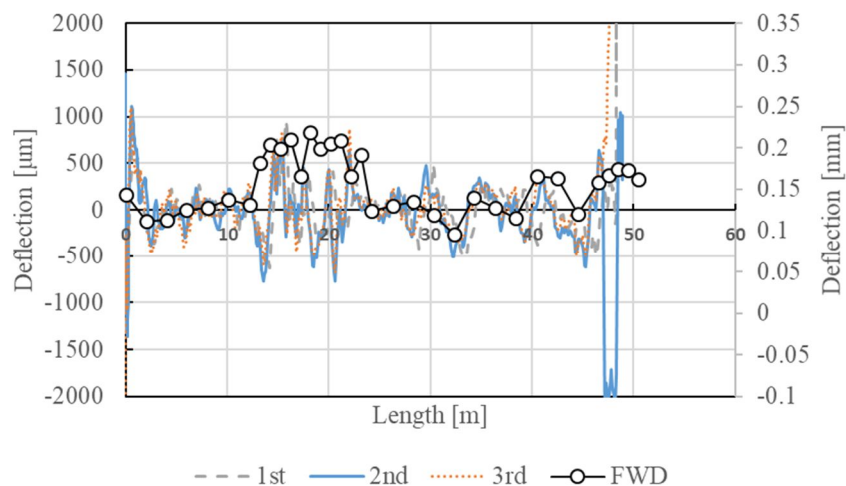


図-2 MWD-mini と小型 FWD の計測たわみ (LPF=5Hz)

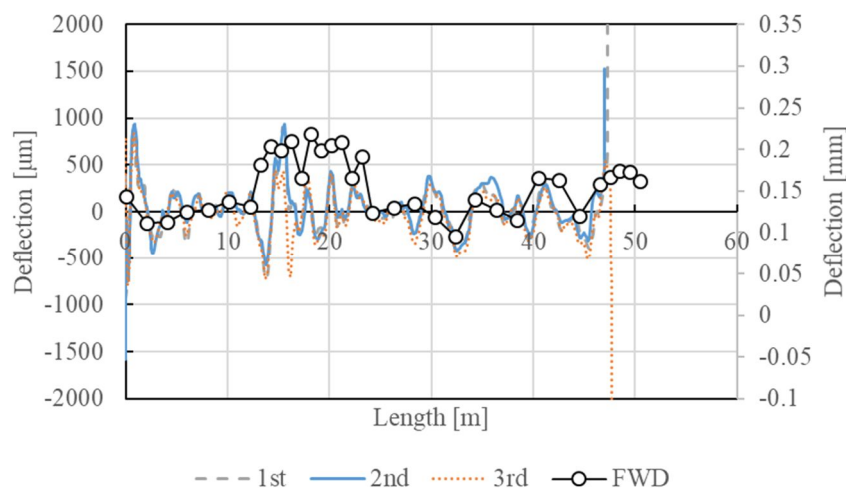


図-3 MWD-mini と小型 FWD の計測たわみ (LPF=1Hz)

図-2, 3 の結果において、1~3 回目の走行試験結果をそれぞれ破線、実線および点線で示している。この結果より、1~3 回目の測定結果は概ね同様の値が得られており、走行試験の再現性は高いことがわかる。なお、測定記録の最初と最後に見られる大きな変動は、発進と停止の際に車両が傾くことに影響しているものと考えられる。

図中には小型 FWD 試験で得られたたわみ量を併記している。なお、MWD-mini で得られる連続たわみは、式(2)に示したように相対たわみであるため、小型 FWD で得られる絶対値とは同じではない。そのため、MWD-mini の計測値は、舗装の相対的な剛性の変化を表す指標として捉えることとする。また、LPF=5Hz~1Hz のいずれの場合においても、小型 FWD 試験のたわみ量のトレンドと MWD-mini の相対たわみのトレンドは概ね一致しており、小型 FWD のたわみ量が大きくなる 12~24m 付近の相対たわみも大きくなっていることがわかる。しかし、小型 FWD のたわみ量は、MWD-mini の結果のように敏感に反応していない。これは、小型 FWD の荷重レベルを 4.9kN で統一したのに対し、MWD-mini の荷重レベルは 2.5~3.0kN 程度と小さく、かつ路面の凹凸によって走行中の左右の荷重バランスが変化した可能性がある。これについては、マット式の荷重計を用いるなどして、今後検討していく必要がある。

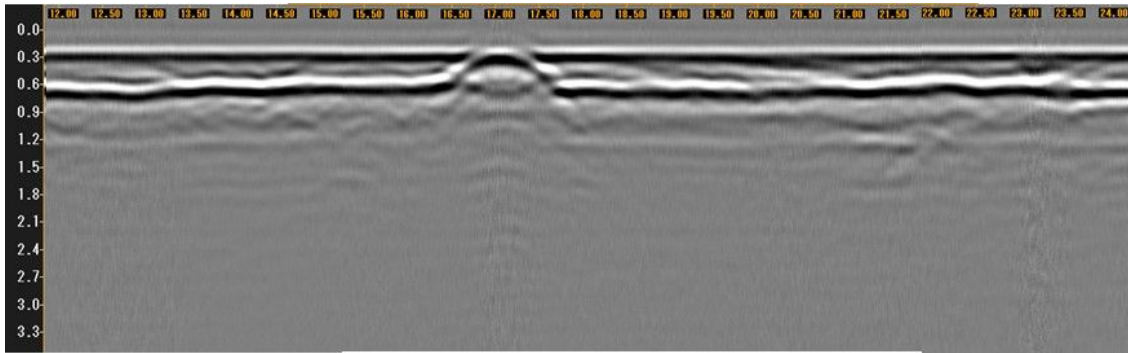


図-4 走行レーンにおける GPR 調査結果 (12 ~ 24m を抽出)

図-4 は GPR による地盤内映像を示している。17m の部分にはマンホールがあり、その前後にはマンホール回りの転圧不足に起因する地盤の緩みを示す多重反射画像が得られている。この周辺での MWD-mini の計測結果は、図-2 に示したように大きく上下していることから、このような地盤内の緩みが走行中の左右の荷重バランスを変化させる要因であるとも考えられる。

MWD-mini では、小型 FWD に比べて局所的な舗装の健全性の変化を精密に捉えることはできていないが、広域の調査を目的とする場合には、そのような局所的な変化を評価する必要はなく、大局的に舗装の健全性が低下している地点が把握できれば良い。そのような用途においては、データロガーに標準装備されている LPF を適用することで、効率よく舗装の非健全部を抽出可能ではないかと考えられる。今後は走行試験データを蓄積するとともに、空洞発生部においても走行試験を実施し、MWD-mini の舗装の非健全部検出精度について検討していきたい。

- 1) 横田敏宏，深谷 渉，宮本豊尚：下水道管路施設に起因する道路陥没の現状，国土技術政策総合研究所資料，No.688，2012．
- 2) 城本政一，青木正樹，竹内康：小型FWDと地中レーダを併用した路面下空洞調査方法に関する検討，土木学会論文集E1（舗装工学），第69巻，第3号，pp.I_167～I174，2013．
- 3) 竹内康，川名太他：動的たわみ計測装置(Moving Wheel Deflectometer)の開発と舗装の健全度評価に関する研究，国土技術政策総合研究所製作技術土木学会第70回年次学術講演会，V-322，2015．
- 4) 国土交通省：2020年道路統計年報，<https://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-data/tokei-nen/2020/nenpo02.html>（2021年閲覧）
- 5) 竹内康：舗装路面の動的たわみ計測装置の開発と健全度評価に関する研究，道路政策の質の向上に資する技術研究開発成果報告レポート，No.24-9，2013．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 5件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 鈴木 達朗, 吉沢 仁, 井上 浩一, 中須賀 聡, 竹内 康	4. 巻 75巻, 2号
2. 論文標題 全国の直轄国道点検データを用いた劣化傾向把握と信頼性を考慮した予測結果評価	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集E1 (舗装工学)	6. 最初と最後の頁 I_17-I_24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejpe.75.2_I_17	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 國井 洋一	4. 巻 82(5)
2. 論文標題 VQMIに対する深層学習および距離画像の応用による定量的景観評価手法の提案	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ランドスケープ研究	6. 最初と最後の頁 563-566
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5632/jila.82.563	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 岩永 真和, 内田 雅隆, 藪 雅行	4. 巻 61(4)
2. 論文標題 コンクリート舗装の目地部の点検・診断における課題と課題解決に向けた取組み	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木技術資料	6. 最初と最後の頁 16-19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 綾部 孝之, 寺田 剛, 渡邊 真一, 藪 雅行	4. 巻 61(4)
2. 論文標題 移動式たわみ測定装置の実用化に向けた取組み	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木技術資料	6. 最初と最後の頁 12-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 FUTOSHI KAWANA	4. 巻 Vol.9 (1)
2. 論文標題 Strength Characteristics of Stabilized Soils Containing Bamboo Fiber Extracted by Steam Explosion	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Environmental and Rural Development	6. 最初と最後の頁 156-161
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 JOMOTO, Masakazu , TAKEUCHI, Yasushi , AOKI, Masashige	4. 巻 Vol.8
2. 論文標題 Examination on road surfacelower cavity investigation method using portable FWD and GPR	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of 8th Japan-China Workshop on Pavement Technologies	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 國井洋一, 久本優希, 諸橋弘樹	4. 巻 10
2. 論文標題 UAV(ドローン)を用いた造園空間に対する写真測量精度検証と3次元計測	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ランドスケープ研究82増刊, 技術報告集	6. 最初と最後の頁 104-107
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	國井 洋一 (KUNII Yoichi) (10459711)	東京農業大学・地域環境科学部・教授 (32658)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	川名 太 (KAWANA Futoshi) (90349837)	東京農業大学・地域環境科学部・教授 (32658)	
研究分担者	藪 雅行 (YABU Masayuki) (30391626)	国立研究開発法人土木研究所・土木研究所（つくば中央研究所）・上席研究員 (82114)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関