

平成 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：32658

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06191

研究課題名(和文) スマートフォンを用いた簡易支持力測定システムの開発

研究課題名(英文) Development of the simply system to evaluate the bearing capacity of pavement structure using the smartphone

研究代表者

川名 太 (KAWANA, Futoshi)

東京農業大学・地域環境科学部・准教授

研究者番号：90349837

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、鉄球を落下させることで、地盤に衝撃的な荷重を作用させ、地盤表面に発生する加速度から支持力を評価する試験法を開発した。試験をより簡便に行うために、加速度の測定にはスマートフォンに内蔵された加速度センサの活用を試みた。まず、スマートフォンから出力される加速度データを取得し、そのデータをファイルへ記録するためのスマートフォン用アプリケーションを作成した。また、種々の舗装構造を対象に数値解析を行い、路盤や路床の弾性係数と地盤表面に発生する加速度の関係を明らかにした。この弾性係数と加速度の関係に基づいて、スマートフォンで測定した加速度から直接的に路盤や路床の支持力を推定する方法を提案した。

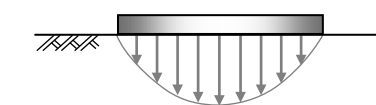
研究成果の概要(英文)：The plate loading test and the light weight deflectometer test are commonly used for evaluating the bearing capacity of the roadbed or base course. However, these survey methods need special apparatus and the interpretation of the result is often difficult. In this study, the newly method for evaluating the bearing capacity of pavement structure based on acceleration caused by loading in ground surface was developed. The impact load was applied at the ground surface by falling iron ball. To perform the test more easily, the acceleration sensor built in the smartphone was utilized. At first, the smartphone application for measuring acceleration was created. Furthermore, the numerical analysis was performed for various pavement structures. As a result, the relationship between elastic modulus and accelerations at the surface of ground was clarified. Using this relationship, the elastic modulus of the roadbed or base course is estimated based on accelerations measured with the smartphone.

研究分野：構造力学，舗装工学

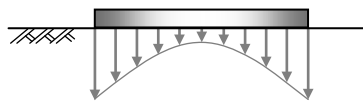
キーワード：路床・路盤の支持力 スマートフォン 加速度計測用アプリケーション

1. 研究開始当初の背景

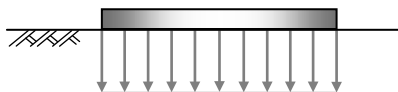
(1) 路盤や路床の支持力を評価する方法には、平板載荷試験や小型 FWD 試験などがある。これらの試験は、測定対象物上に円形平板(載荷板)を設置し、それに荷重をかけることで地盤に生じる鉛直方向の変位(たわみ)を測定するものである。載荷板の接地圧分布に関する研究は、古くから行われており、図-1に示す通り、砂質土地盤の場合には、凸型分布(パラボリック型)を、また、粘性土地盤の場合には凹型分布(インバースパラボリック型)を仮定するのが一般的である。しかしながら、多層構造を対象とする場合や碎石等を測定対象とする場合の接地圧分布については、必ずしも明らかにされているとはいえず、そのような場合には、接地圧分布として、等分布が適用されることが多い。



(a)凸型分布 (パラボリック型)



(b)凹型 (インバースパラボリック型)



(c)等分布

図-1 接地圧分布

接地圧分布は、載荷板直下のたわみに大きく影響を与えるため、可能であれば試験時の接地圧分布を明らかにしておくことが望まれる。しかしながら、このことは試験の利便性を損なうだけでなく、技術的にも困難といえる。また、粒径の大きな粒状材料等を対象に平板による載荷試験を実施する場合、載荷板の設置が不安定となり計測結果に個人差やばらつきが生じることが指摘される。以上のように、載荷方法として、平板を用いることは、平板載荷による理論を適用できる利点がある反面、課題も多く残されている。

(2) 路盤や路床の支持力の評価にあたっては、載荷に伴う地表面のたわみが活用されている。載荷の方法には、重機などで反力を取り、ジャッキで載荷板に荷重をかける方法や重錘を落下させる方法などがある。また、たわみの評価にあたっては、変位計を用いて直接的に測定する方法と速度や加速度を測定して、それらを数値積分して求める方法など

が適用されている。このように、既往の試験では、特定の装置や大掛かりな準備が必要になる場合や煩雑なデータ処理を伴う場合があり、試験法としては利便性が高いものとはいえない。よって、より簡便な支持力の評価方法の開発が求められている。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、載荷板を用いずに、より簡便な方法で路盤および路床の支持力を評価する試験方法の開発を行う。具体的には、鉄球を落下させることで地盤に衝撃的な荷重を作用させ、それに伴い生じる加速度から路盤および路床の弾性係数を推定する。

(2) 調達が容易な装置を組み合わせることで試験システムを構築することは、試験の利便性の向上に寄与するものと考えられる。そのため、近年、所有率の増加が著しいスマートフォンに着目し、スマートフォンに内蔵された加速度計の本試験システムへの活用を検討する。

(3) 路盤の支持力の評価を行う場合、測定対象物を路床および路盤の2層構造として取り扱うほうがより合理的な結果が得られる。そのため、本研究では、現場において瞬時に結果を確認できるようなツールとは別に、スマートフォンで計測された加速度の時系列データを逆解析して、詳細な構造解析を行う手法についても検討を行う。

3. 研究の方法

(1) 本研究は、地盤に衝撃的な荷重を作用させ、それに伴い生じる加速度から地盤の支持力を評価する簡易試験法を構築するものである。そのため、まず、スマートフォンに内蔵された加速度計の活用方法について検討を行う。本検討で用いたスマートフォンには、水平2成分および鉛直1成分の加速度計が搭載されている。地盤の支持力を精度良く推定するためには、加速度の時系列データを測定しておくことが望ましい。そのため、3成分の加速度を指定するサンプリング間隔で記録し、それをCSV形式のファイルで保存するスマートフォン用アプリケーションを開発する。なお、プログラミング言語には、Javaを用いる。

(2) 重錘を落下させて衝撃的な荷重を載荷する試験では、載荷状況により測定対象物の応答が変化する。いま、質量 M (kg)の物体を h (m)の高さから落下させたときの衝撃荷重 $F(t)$ (N)は、以下の式により表される。ただし、ここでは測定対象物をバネ定数 k (N/m)のバネでモデル化できるものとしている。

$$F(t) = \sqrt{2ghkm} \sin\left(\sqrt{\frac{k}{m}}t\right) \quad (1)$$

ここで、 g は重力加速度 (m/s^2)、 t は時間である。この式より、最大荷重と載荷周期は、

鉄球の落下高さや質量、測定対象物によって変化することがわかる。そのため、まず、実際に測定対象物上において、鉄球を落下させ、荷重状況を把握した。なお、荷重の計測には、圧力計を用い、接地面の面積を乗じることで荷重とした。試験の実施状況は、**図-2**に示す通りであり、荷重点から等距離の位置に加速度計とスマートフォンを設置し、計測される加速度の周期等を同時に確認した。

次に、路床や路盤の弾性係数と衝撃的な荷重が作用した時に生じる加速度との関係を数値解析により評価した。計算モデルは、**図-3**に示す通り、1層地盤および2層地盤とした。1層地盤を対象とした解析では、地盤の弾性係数 E を 10, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 150, 200, 250, 300, 400 および 500MPa とした。2層地盤では、1層目の弾性係数 E_1 を 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500 および 600MPa とし、2層目の弾性係数 E_2 を 10, 20, 40, 60, 80, 100, 150 および 200MPa とし、全ての組み合わせに対して加速度を算定した。なお、1層目の層厚は、10, 20 および 30cm とした。別途検討を行った結果、加速度は、荷重点によって大きく変化すること、荷重点から 20~50cm 程度離れた位置における加速度は、接地面積の影響を受けないこと、また、その傾向は、荷重点が変化しても同様なことを確認した。そのため、ここでは、最大荷重 1kN、周期 $T=0.01, 0.02, 0.05, 0.10$ および $0.20s$ のハーバーサイン波を荷重点波形とし、荷重点から 20~50cm 離れた位置での加速度を算定し、弾性係数と加速度の関係を整理した。

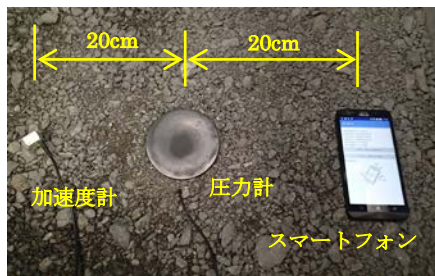


図-2 試験の実施状況

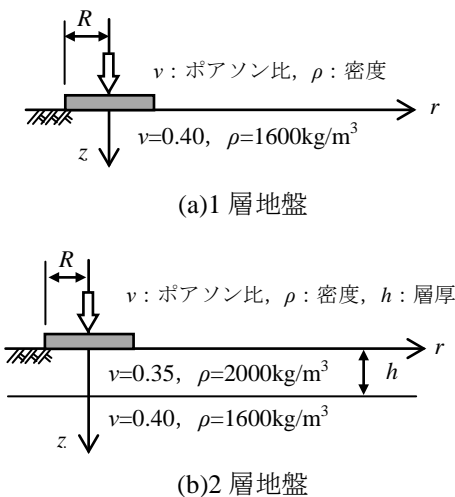
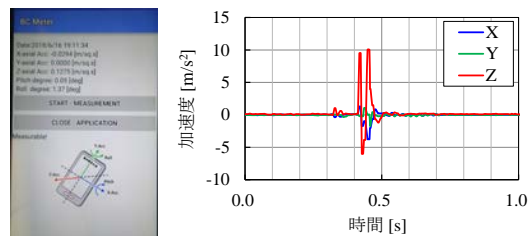


図-3 計算モデル

(3) 次に、地盤上で計測された加速度の時系列データを用いて、路盤や路床の弾性係数を精度良く推定する方法について検討を行った。本検討では、シミュレーションデータを対象に動的逆解析を行って、路盤および路床の弾性係数の推定を試みた。なお、逆解析手法としては、ガウス・ニュートン法を用いるものとし、計測された加速度の時系列データと解析で得られた加速度の時系列データが一致するような構造を推定する。対象とする構造は、**図-3**と同様とし、種々の弾性係数、荷重周期および層厚を設定してシミュレーションデータを作成し、それを逆解析することで、シミュレーションデータを作成した際に設定した弾性係数が得られるのかを確認した。なお、多層構造の評価においては、未知数となる弾性係数と粘性係数の数が増えるので、複数の加速度データが必要となることが想定される。

4. 研究成果

(1) スマートフォン用の加速度計測アプリケーションの開発では、支持力の評価に最低限必要な加速度の時系列データの取得・保存に加え、データの転送方法の検討を行い、スマートフォンに実装するまでに至った。本研究で開発したアプリケーションの起動時の画面を**図-4(a)**に示す。また、スマートフォンにて記録された加速度の時系列データを**図-4(b)**に示す。同図より、鉛直方向(Z方向)の加速度が卓越していることがわかる。



(a)起動時 (b)測定された時系列データ

図-4 開発したアプリケーション

(2) コンクリート上および土層内に構築した砂質土地盤や礫質土地盤上において鉄球の落下試験を実施した結果、鉄球の落下高さにより荷重の大きさが変化することが確認された。しかしながら、荷重点は、測定対象および落下高さによらず0.002s程度となり、明瞭な差異を把握するには至らなかった。なお、荷重点にゴム等の緩衝材を設置することで、荷重点を調整することが可能であることが確認され、今後、適当な荷重点が得られる緩衝材の条件を明確にしていく必要がある。

(3) 1層地盤における加速度と弾性係数との関係を**図-5**に示す。**図-5(a)**および**(b)**は、それぞれ荷重点から20cmおよび40cmの位置のものであり、荷重点により加速度に明確

な差が生じていることが確認できる。なお、この図は、載荷荷重 1kN あたりの加速度を表している。例えば、鉄球による載荷周期 T が 0.02s, 最大荷重が 10kN のとき、載荷点から 20cm の位置で 70m/s^2 の加速度が得られたとすると、この地盤の弾性係数は、 $T=0.02\text{s}$ のグラフの 7m/s^2 に対応する 200MPa と推定できる。

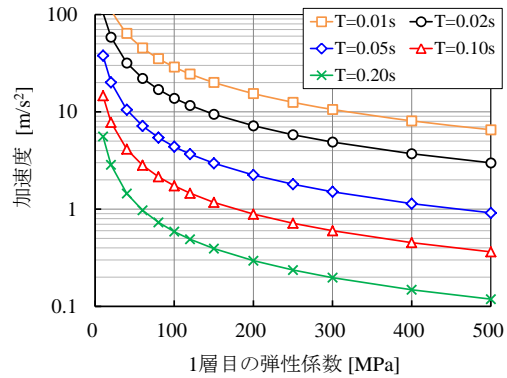
また、図-6 は、2層地盤における加速度と弾性係数との関係を表している。同図は、載荷周期を 0.05s とし、1層目の層厚を 30cm としたときの結果である。この図より、2層地盤の場合には、1地点の図表から一意的に1層目と2層目の弾性係数の組み合わせを決定することができない。そのため、載荷点から 20cm および 40cm といった異なる位置での複数の図表を組み合わせる必要がある。1点のみでなく複数点において加速度を計測する必要があることが確認された。

(4) シミュレーションデータに基づき加速度の時系列データを逆解析して、舗装構造の弾性係数を推定する方法について検討を行った。その結果、1層地盤の場合には、地盤の弾性係数および載荷周期によらず、載荷点から 20cm 離れた位置の加速度の時系列データを用いることで、精度良く地盤の弾性係数を評価することができることを確認した。2層地盤の場合には、載荷点から 20cm 離れた1地点の加速度の時系列データのみを用いると1層目の弾性係数の推定値に2割程度の誤差が生じることが確認された。また、載荷点から 20cm および 30cm 離れた2地点の加速度の時系列データを用いて逆解析すると、精度良く地盤の弾性係数が評価できることが確認された。以上より、路盤および路床の弾性係数の評価にあたっては、2つのスマートフォンを用いる必要があることが確認された。

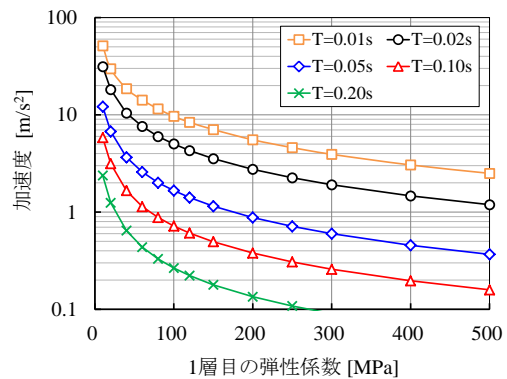
(5) スマートフォンおよび実際の加速度計を用いて地盤表面に生じる加速度を測定した結果、スマートフォンで計測された加速度はばらつきが大きく、同じ位置において加速度計で計測したものと的一致性も良好とはいえなかった。このことは、載荷周期が極端に短いためと考えられ、今後、載荷方法等について、更なる改良が必要であることが確認された。

<引用文献>

- ①Boddapati, K.M. and Nazarian, S. : Effect of pavement -falling weight deflectometer interaction on measured pavement response, ASTM STP 1198, Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli V2, pp.326-340, 1994.
- ②Pavana K.R.Vennapusa and David J. White : Comparison of Light Weight Deflectometer Measurements for Pavement Foundation

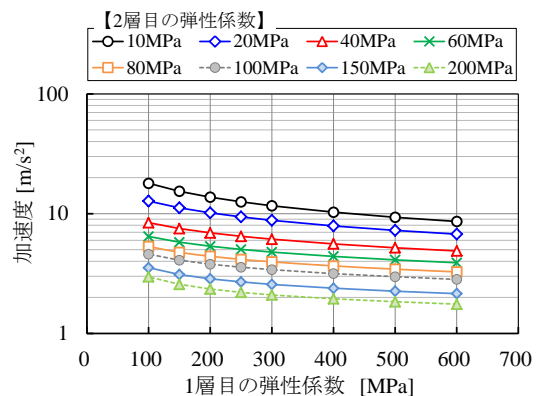


(a)載荷点から 20cm の位置

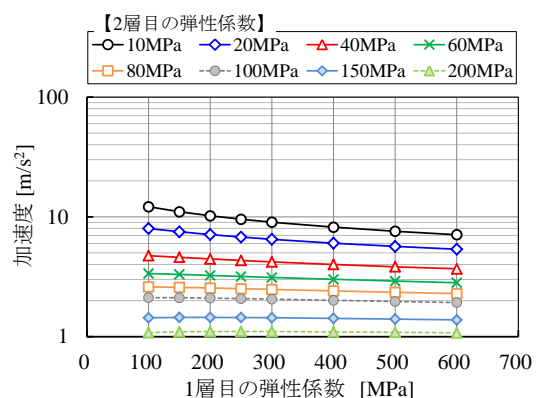


(b)載荷点から 40cm の位置

図-5 1層地盤の加速度と弾性係数の関係



(a)載荷点から 20cm の位置



(b)載荷点から 40cm の位置

図-6 2層地盤の加速度と変形係数の関係

Materials, Geotechnical Testing Journal, Vol. 32, No. 3, pp.239-251, 2009.

- ③川名太, 久保和幸, 松井邦人: 体積ひずみを用いた動的荷重に対する軸対象多層弾性構造の理論解, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol.69, No.3 (舗装工学論文集第 18 卷), pp.I_117~I_124, 2013.

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 1 件)

- ①小原絢菜, スマートフォンを用いた路盤の荷重支持性能の評価方法に関する研究, 第 32 回日本道路会議, 2017.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川名 太 (KAWANA, Futoshi)
東京農業大学・地域環境科学部・准教授
研究者番号: 9 0 3 4 9 8 3 7

(2) 研究分担者

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: 9 0 2 7 1 3 2 9

小梁川 雅 (KOYANAGAWA, Masashi)
東京農業大学・地域環境科学部・教授
研究者番号: 0 0 1 7 5 3 4 0

久保 和幸 (KUBO, Kazuyuki)
国土技術政策総合研究所・道路構造物研究部・室長
研究者番号: 8 0 4 4 2 8 3 8

寺田 剛 (TERADA, Masaru)
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)・研究員
研究者番号: 3 0 3 5 5 8 7 0

(3) 研究協力者

小原 絢菜 (OBARA, Ayana)
松井 邦人 (MATSUI, Kunihiro)