

生活安全のための新しい地盤表層（表面）の調査法の検討事例

Some New Geotechnical Investigation Methods of Ground Surfaces for Daily Life Safety

一井 康二¹⁾

1) Koji ICHII, 教授, 関西大学社会安全学部, ichiik@kansai-u.ac.jp

構造物の建設において地盤情報は重要であり、これまでに様々な地盤調査法が開発され、取得された地盤情報を用いた設計がなされている。しかし、地盤の状態は、構造物の安全性だけでなく、人々の日常生活の安全に直接影響する場合もある。特に、地盤の表層や表面の状態は、その上で生活する一般市民の安全を確保する上で重要となるが、このような地盤表層（表面）を対象とした地盤調査法は必ずしも十分に研究されていない。そこで本論文では、生活安全の観点から地盤表層および地盤表面の特性を調査する方法の検討事例を紹介する。それぞれの検討事例の完成度は必ずしも十分ではないが、構造物の建設を目的とした地盤調査とは異なる視点での地盤調査法の開発事例であり、地盤工学の知見や経験が様々な観点で社会に貢献できることを示唆している。

キーワード：路面下空洞、舗装、床面、弾力性、剣道場

(IGC : C-07, C-08)

1. はじめに

地盤の性質は構造物の安全性を評価する上で重要であるため、様々な地盤調査法が開発され、実務で用いられている¹⁾。一般の構造物の設計においては、標準貫入試験などのサウンディング試験の結果や、サンプリングした試料の土質試験結果を参照することが多いが、非破壊で現地の地盤の状況を確認する方法として、表面波探査^{例えば 2)}や常時微動^{例えば 3)}などの物理探査が用いられることもある。

さらに最近では、ICT 施工などの情報化技術の進展を踏まえて、建設機械を用いて掘削時の地盤情報を収録するシステムの開発も進められている^{例えば 4), 5)}。

しかし、地盤の状態は、構造物の安全性だけでなく、人々の日常生活の安全に直接影響する場合もある。特に、地盤の表層や表面の状態は、その上で生活する一般市民の安全を確保する上で重要となる場合がある。そして、地盤の表層や表面の状態にかかわる身近な安全問題においても地盤工学的な検討方法、さらに地盤工学者の経験は役に立つのではないかと考えられる。

そこで本論文では、地盤の表層や表面の状態にかかわる身近な安全問題を対象とした調査法の検討事例を紹介する。それぞれの検討事例の研究としての完成度は必ずしも十分ではなく、参照可能な先行研究としては発表されていない検討事例である。しかし、構造物の建設を目的とした地盤調査とは異なる視点での地盤調査法の開発事例であり、これまで必ずしも十分に研究されてこなかった分野にも地盤工学者の活躍の場があることを示唆する事例である。そして、これらの問題への読者の皆様の関与・貢献のきっかけとなれば幸いである。

2. 路面下空洞の厚みの評価方法の試み

2.1 路面下空洞の評価における課題

道路の路面下には排水溝、上水道、下水道など、数多くの埋設物があり、これらの埋設物の損傷などに起因して空洞が形成されることがある。また、埋設物がなくても、護岸近傍などでは材料劣化等で生じた構造物の隙間等から土砂が流出し、空洞が形成されることもある。このため、全国の道路陥没事故発生件数は年間 9000 件程度⁶⁾に達しており、2001 年の明石市大蔵海岸の砂浜陥没事故⁷⁾のような痛ましい事案が発生することもある。

路面下空洞の存在を事前に察知して適切な対策をとるためには、一般にマイクロ波などを用いたレーダー探査が用いられることが多い^{例えば 8)}。そして、最近では時速 100 km で走行する車両からのレーダー探査も可能となっている⁹⁾。

一般のレーダー探査では、空洞の上面位置で地盤と空洞の比誘電率の違いにより電磁波が反射することにより、空洞の上面の位置を異常信号として検出することができる。しかし、空洞の下端位置を検出することは難しく、そのため、空洞の厚みを検出することは難しい。厚みのある大きな空洞ほど陥没の危険性が高いため、異常信号の検出地点において削孔を行い、空洞の状況を確認することになる。そこで、簡便に空洞の厚みを推定する技術の開発が期待されている。

2.2 路面加熱による空洞厚み評価の考え方

著者らは、レーダー探査により空洞の存在が予測されていることを前提として、路面を加熱することにより空洞の厚みを推定する技術を検討している。

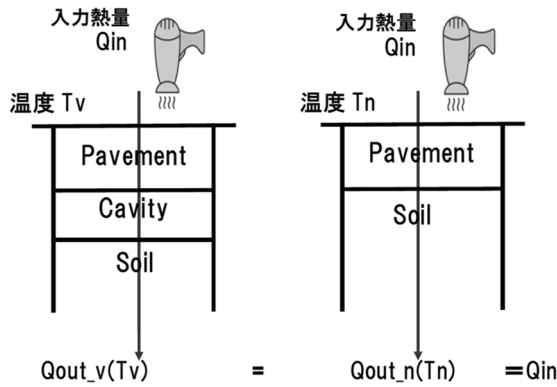


図-1 路面加熱時の熱移動の模式図

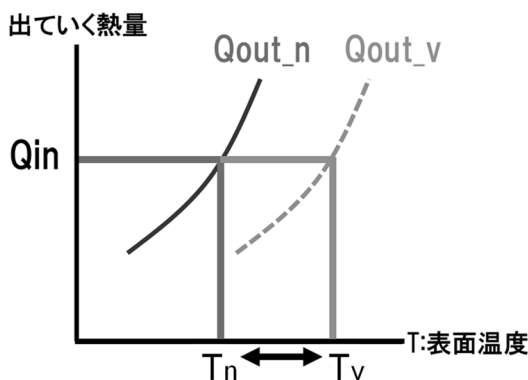


図-2 表面温度と地盤内に出ていく熱量の関係

図-1 に提案手法の概念を示す。路面を一定の熱量で加熱すると、路面の温度 T_v (空洞有) および T_n (空洞無) が上昇する。しかし、路面の温度が際限なく上昇することはなく、一定の温度に達すると定常状態に至ると考えられる。そして、図-1 に示すように地表面温度に依存して地盤内に放出される熱量 ($Q_{out_v}(T_v)$ と $Q_{out_n}(T_n)$) と、地表面から入力される熱量 (Q_{in}) が等しくなる。

このとき、熱移動は温度差に依存するため、空洞が断熱効果を有する (熱移動を阻害する) ことを考えると、同量の入力熱量を地盤下方に放出するためには、地中の温度が一定であるとするならば、図-2 に示すように地表面の温度が高くなる必要がある。すなわち、地表面の温度は入力熱量、すなわち定常状態で地盤内に放出される熱量と関係しており、入力熱量が一定であるならば、地表面の温度差 (空洞有の地表面温度 T_v と空洞無の地表面温度 T_n の差) が地中の熱移動の特性の差を示している。そして、同様の路面下構造をもつ道路面であれば、熱移動の特性の差は空洞の有無であり、空洞の厚みに応じて温度差が大きくなると考えられる。

なお、赤外線サーモグラフィを用いた非破壊の診断技術は、建物外壁¹⁰⁾、コンクリート¹¹⁾など、様々な分野で適用されている。

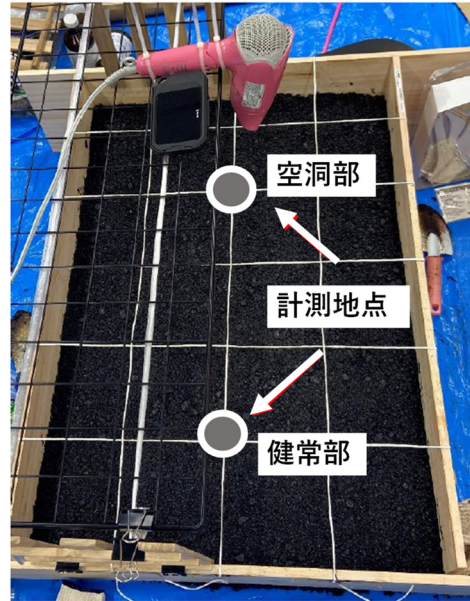


図-3 小型模型実験の概要

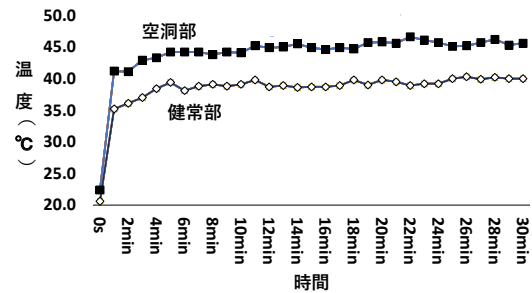


図-4 実験結果 (表面温度の変化)

2.3 小型模型実験による検討

図-3 に示すように小型の道路模型を作成し、ドライヤーを用いた加熱実験を行った。90 cm×60 cm の木枠内に 12.5 cm の厚さで土 (含水比 16.7% の粒状培養土) を入れ、その上に約 3 cm の厚さでアスファルト路面を作成した。なお、アスファルトは補修用のアスファルト (家庭化学工業製アスファルト V) であり、全体を 3 層に分けて各層にアスファルト接着強化剤を刷毛で塗り固めることで、アスファルトの強度を確保した。なお、地盤の密度は約 0.8 g/cm³、アスファルトの密度は約 1.85 g/cm³ である。模型では実際の路面のようなしっかりした転圧が不可能であったため、土の密度がかなり小さい値となった。また、空洞は直径 7 cm のカラーボール 8 個を段ボールで囲ったものを埋め込むことで作成し、おおよそ長さ 30 cm、幅 15 cm、厚さ 7 cm の空間を空洞として作成した。

実験結果を図-4 に示す。図-3 に示すようにビニールひもの格子で計測点を定め、空洞部と健全部のそれぞれを 1200 W のドライヤーで加熱し、表面温度を測定した。



図-5 路面加熱装置（デルタくん）

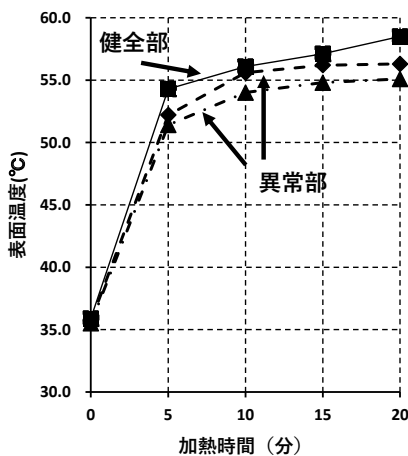


図-6 異常部（2地点）及び健全部の加熱実験結果

同じ模型を用いて空洞部と健全部の2回の測定を行ったため、加熱開始時点の表面温度に若干の違いがある。とはいえ、10分もたたないうちに表面温度はほぼ定常状態に達し、空洞を有する路面の方が定常状態の表面温度が高い。このことから、加熱時の定常状態の温度を計測することで、空洞の有無を評価可能であることが確認できた。しかしながら、小型の模型地盤では空洞の厚みを変化させた実験が困難であり、空洞の厚みの評価の可能性はこの実験では確認できていない。

2.4 実地試験による検討

実際の路面は上記の検討で用いた道路模型より舗装面の厚みが大きく、また、路面下の構造も複雑である。そこで、提案手法の実現性を検討すべく、レーダー探査で異常信号が確認されていて空洞の存在が疑われている臨海部の施設を対象に、実際に路面の加熱を実施した。

図-5に実際の路面加熱に用いた器具（デルタくん）を示す。三角形の鋼製アングルに1200Wのドライヤーを2つ設置し、中央部を効率よく加熱することができる。屋外での調査であるため、可搬型の発電機を2台用意し、それぞれのドライヤーに電力を供給した。

放射温度計を用いてドライヤーの熱風の交点部分の温度を計測し、異常部（2地点）と健全部を比較した。図-6に結果を示す。計測地点の詳細を公表することができないことと、削孔による異常部2地点のそれぞれの空洞の厚みの確認が未実施であるため、計測結果と空洞の厚みの関係はまだ整理できていない。しかし、異常部と健全部では加熱時の表面温度に違いがあること、さらに、異常部でも表面温度に違いが生じることが確認できた。

2.5 今後の課題

図-1に示した熱移動の模式図は、1次元の熱移動だけ考えた単純なモデルである。実際には、側方への熱移動もあり、空洞の厚みが一定レベル以上になると側方への熱の移動が支配的になってくるものと考えられる。このため、1次元から2次元、3次元の熱移動シミュレーションを行い、評価可能な空洞のサイズ（広がりや厚み）を検討する必要がある。

また、模型実験及び実地試験とも10分程度で定常状態に至る結果となったが、熱移動が生じる地盤の大きさ、すなわち、地盤の熱容量を考えると、やや早すぎるように思われる。このため、加熱時の地盤内の温度変化を計測し、熱移動シミュレーション結果と突き合わせることで実現象を詳細に把握していく必要がある。

3. 路面の滑りやすさの簡便な測定方法の試み

3.1 路面の滑りやすさの評価における課題

一般の市民が地盤の性質を意識するのは、例えばぬかるみで足を滑らすなど、地表面の性状がよくないときが多いと考えられる。つまり、地盤技術者は見えない地盤内の状態を重視し、その状態を何とか把握しようとする。しかし、一般市民の生活にとっては、歩行・通行するための表面が重要であり、地表面が滑りやすいと転倒などの事故につながるため危険である。

ここで、路面の滑りやすさについては、車両のブレーキ性能などの観点からタイヤと路面の摩擦係数に着目した研究がいくつかなされている^{例えは 12), 13)}。しかし、歩行時に足を滑らすことが一般人の生活における危険である。この観点からは、使用しているうちに摩耗などにより変化していく靴裏の状態と、地表面の状態の様々な組み合わせに対して、滑りやすさを検討する必要がある。しかし、靴裏の摩耗が人間の歩行動作に及ぼす影響などについての研究^{例えは 14)}はあるものの、靴裏の摩耗の程度がタイヤやアスファルト舗装などの様々な性状の地表面における摩擦に及ぼす影響の程度の検討事例はあまりない。

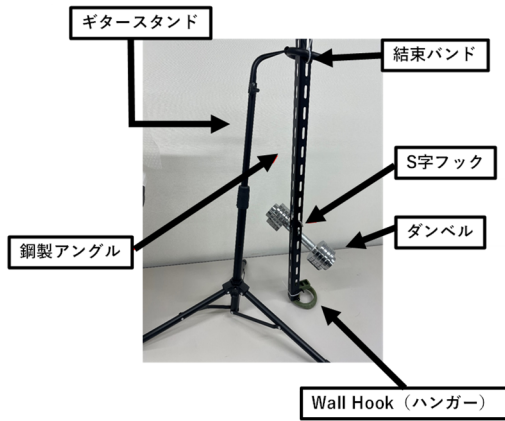
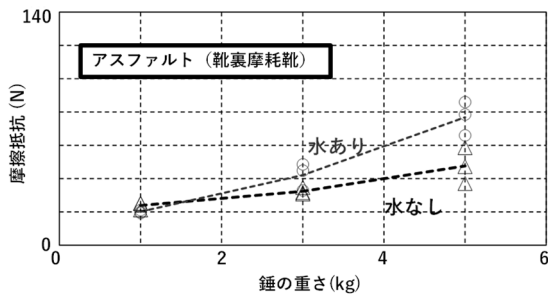
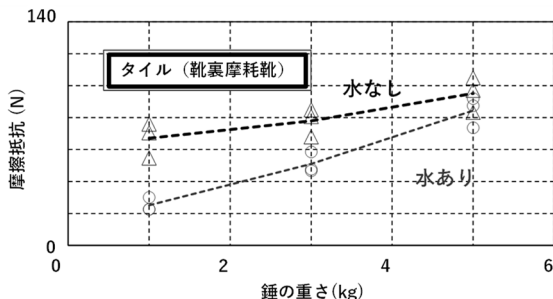


図-7 路面の滑りやすさ計測装置



(a) アスファルト上での摩耗した靴の摩擦抵抗



(b) タイル上での摩耗した靴の摩擦抵抗

図-8 路面の滑りやすさの計測結果の例

3.2 路面の滑りやすさの簡便な計測法

著者らは摩耗した靴裏などの滑りやすさを実際の路面において簡便に測定する手法を開発した。相川¹⁵⁾がエルボークラッチ杖先ゴムの摩擦を評価した際の計測装置を参考に、著者らが作成した計測装置を図-7に示す。ギタースタンドを流用した載荷用のフレームに結束バンドを用いて鋼製のアングルを取り付け、その下端に Wall Hook (ハンガーの一種) を取り付ける。このハンガーに靴を履かせ、鋼製のアングルが結束バンドを回転中心として回転することで、実際の靴の使用状態を再現できる。また、S字フックにより取り付けられたダンベルにより靴裏

の接地圧を調整する。

計測時は、鋼製のアングルにワイヤーをかけ、地表面から約 15 cm の高さで水平方向に引っ張り、ピーク時の荷重を測定した。

3.3 長年使用した靴の滑りやすさの計測結果

計測結果の例として、図-8に著者が長年使用して完全に靴裏が摩耗した状態の靴の実験結果を示す。アスファルトおよびタイルを対象とし、水をまいた状態と、乾燥した状態のそれぞれを計測した。ダンベルの重さを変化させ、それぞれの接地圧で3回の計測を実施している。ただし、実際の靴に加わる荷重は数十 kg であると考えられるため、ダンベルの重量を 1 kg から 5 kg まで変化させていても、実際の使用時よりは接地圧が低い状態で実験していることになる。

かなり簡便な計測方法であるため、計測値が大きくばらつく結果となるのではないかと危惧していたが、実際には各3回の計測値が大きくばらつくような結果にはなっていない。したがって、路面の状態ごとの滑りやすさの違いを評価できているものと考えられる。

アスファルトとタイルのどちらであっても、錘を重くして接地圧を増加させるほど、摩擦抵抗が大きくなる結果となった。しかし、計測結果を線形近似しても原点を通らない場合があり、必ずしも純粋に摩擦抵抗のみが発揮されているわけではないと考えられる。これは、路面の凹凸と靴裏の凹凸のかみ合わせなどの影響と思われる。

水の有無で比較すると、アスファルトでは水がある方が水の無いときに比べて摩擦抵抗が大きい。接地圧が小さいときは摩擦抵抗がどちらも小さいため、水によりアスファルトの性状が少し変化し、靴裏とのなじみがよくなり、摩擦抵抗が十分に発揮された可能性がある。一方で、タイルでは水を撒くと摩擦抵抗が小さくなる。特に、接地圧が小さいときの摩擦抵抗の減少量が大きく、タイルが濡れていることに気づかず歩くと滑りやすいという日常の感覚と一致する。タイルはアスファルトと異なり表面に孔がないため、撒かれた水が表面に残り、水膜となって滑りやすくなっている可能性が考えられる。

なお、同様の実験を杖や未使用の靴を対象として行ったが、未使用の靴では水の影響もアスファルトとタイルの違いも明瞭ではない結果となった。本実験で与えた接地圧のレベルでは、靴裏の滑り止めの凹凸が明瞭な未使用靴では、摩擦よりも路面の凹凸とのかみ合わせの有無が大きく影響したものと考えられる。したがって、実際の値に近い接地圧を与えられるような改良が望まれる。

4. 床面の固さの簡便な測定方法の試み

4.1 地表面や床面の固さの評価における課題

地表面の性状としては、滑りやすさのほか、固さが問題となる場合がある。例えば、長距離ランナーでは、着

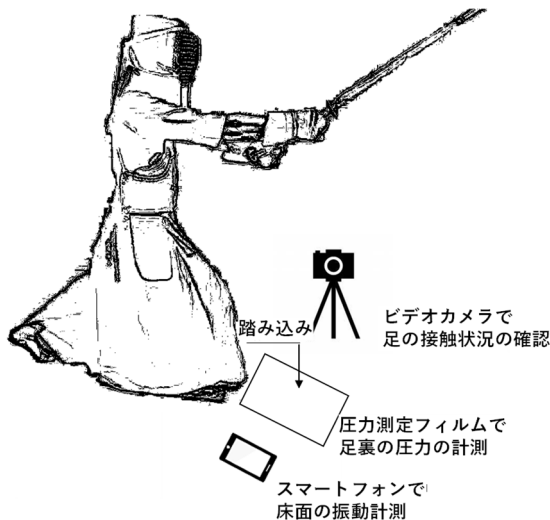


図-9 剣道場の床面の弾力性の計測実験の概要

地時の衝撃が疲労レベルや障害の発生可能性に影響するため、舗装種別毎の着地時の衝撃の計測¹⁶⁾や、適切な足の接地パターンの研究¹⁷⁾がされている。長距離ランナー以外でも、鉄棒や遊具から固いグラウンドに落下して怪我をする事例は多く、小中学校の校庭の芝生化が推進されている。

また、人間がスポーツを行う際に足裏に設置するものは地表面とは限らず、屋内であれば床面の固さが問題となる場合もある。例えば、剣道は屋内の剣道場や体育館で実施されるが、床面の構造は様でない。このため、床面の弾力性の計測方法が提案されており、床面が柔らかいほど怪我をしにくいことが示されている¹⁸⁾。

すなわち、地表面などの足の接地面の性状としては、滑りやすさの評価だけでなく、固さの評価も安全面で必要となる場合がある。しかし、固さは表面の材質等によってのみ定まるものではなく、表層部分の材料の圧縮の程度やたわみの程度に依存するため、実際に様々な場面で適用できるような適切で簡便な計測方法がない。

4.2 剣道場の床面の弾力性の計測実験

著者らは、地表面の固さを評価する手法の検討の前段階として、剣道場の床面の弾力性の計測実験を実施した。実験内容を図-9に示す。剣道場で面打ちの姿勢を取り、足裏に加わる圧力と、床の振動の大きさを測定した。この時、実際の面打ちを想定し、すべての道着・袴・面・小手・胴・垂れのすべての防具を着用し、竹刀を持った上で踏み込みを行った。すべての面打ちは剣道三段の学生が担当し、各回で同様の条件の面打ちとなるように心がけた。著者（剣道二段）が実施するよりは、安定した面打ちとなっていたと考えられる。

計測は関西大学ミュージックキャンパス武道場、および、吹田市武道館洗心館で実施した。また、同じ剣道場内で

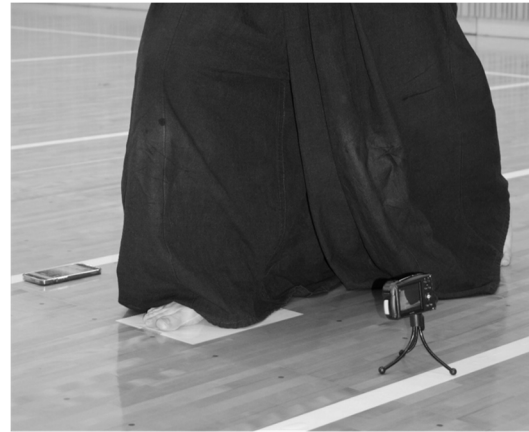


図-10 剣道場の床面への踏み込みの状況

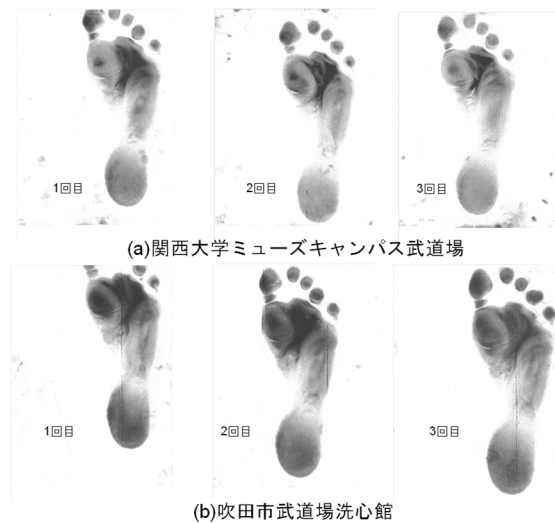


図-11 圧力フィルムによる足裏圧力の計測結果

も、床の梁の位置により弾力性や床の振動特性が異なる可能性がある。そこで、各剣道場内で場所を変えて3箇所、各箇所ですべて1回の面打ちの踏み込みを実施した。

足裏に加わる圧力に関しては、圧力測定フィルム（富士フィルム製 PRESCALE, LLLW-PS）を養生テープで固定し、その上に踏み込みを行うことで測定した。このフィルムは受けた圧力の大きさに応じて赤く発色するため、発色後のフィルムをスキャナで読み取り、圧力値ごとの標準色見本のカラースケールと RGB 値を対応させて、圧力を読み取った。なお、標準色見本は温度と湿度に応じて定まるため、室内の温度と湿度も計測している。

床面の振動については、スマートフォン(iPhone)を踏み込み地点から0.5 mの位置に置き、白山工業株式会社製のソフトウェア(i地震)を起動して計測した。

実際の計測状況を図-10に示す。踏み込みの様子はビデオカメラで撮影し、圧力フィルムが滑るなどの異常がないことを確認した。

圧力の計測結果を図-11に示す。それぞれの剣道場で

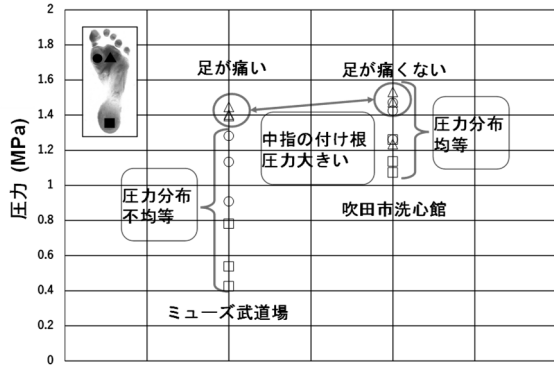


図-12 足裏の部位ごとの圧力の比較

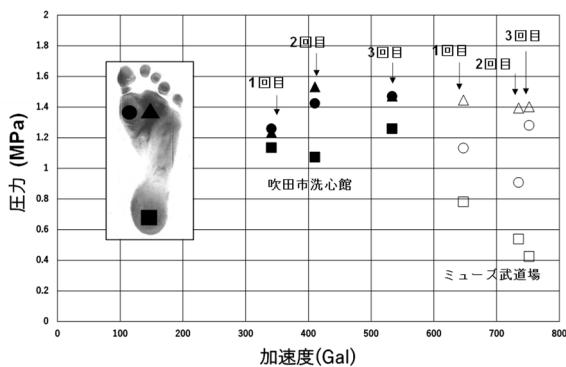


図-13 床面の加速度と足裏の圧力の関係

3回の踏み込みを行っているが、3回の圧力分布には大きな違いはない。しかし、剣道場の違いによる圧力分布の違いは明瞭である。関西大学ミュージズキャンパス武道場では足裏の圧力分布が一様ではなく、中指の付け根に大きな圧力が加わっているが、他の部位にはあまり圧力が加わっていない。一方で、吹田市武道館洗心館では、土踏まずを除くほとんどの部位での足裏の圧力が大きくなった。なお、踏み込みを行った学生の体感では、関西大学ミュージズキャンパス武道場より吹田市武道館洗心館の方が足が痛くないということである。

図-12に親指の付け根(●)、中指の付け根(▲)、かかと(■)の圧力の算出結果の比較を示す。図-11に示した画像から読み取れたように、関西大学ミュージズキャンパス武道場の方が不均等な圧力分布となっている。吹田市武道館洗心館のように、足裏全体で一様に踏み込みの力を負担する方が、足が痛くならず、安全であると考えられる。

なお、図-12では、圧力の最大値が1.4~1.6 MPa程度となっている。これは、圧力測定フィルムの計測限界に達していた可能性が考えられ、足裏全体の踏み込み力が一定であるとする、関西大学ミュージズキャンパス武道場での中指の付け根の圧力はもっと大きかった可能性もある。

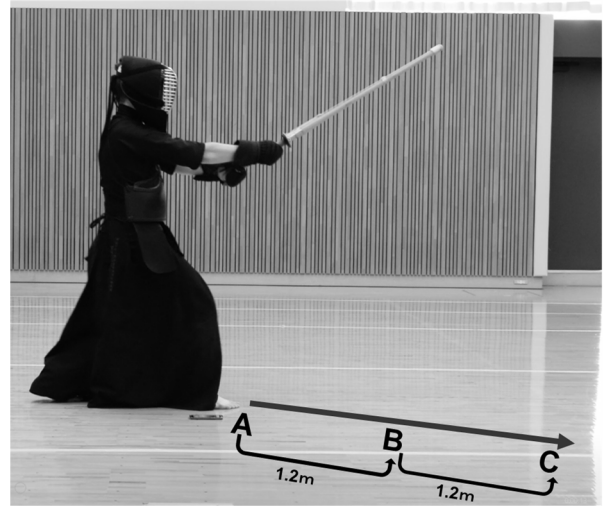


図-14 床面の振動の距離減衰の計測位置

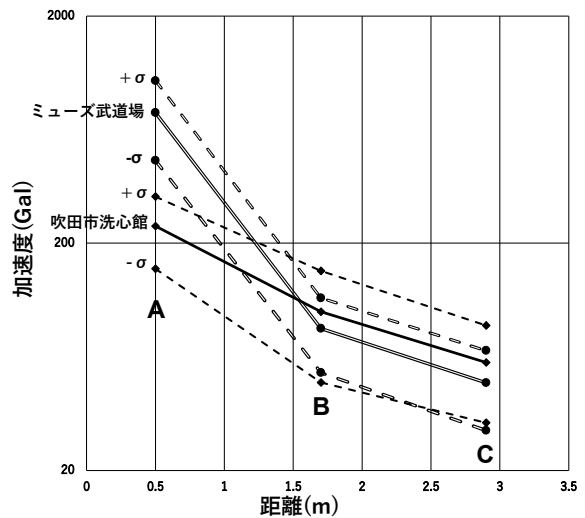


図-15 床面の振動の距離減衰の計測結果

次に、それぞれの踏み込みにおける床面の振動の最大値(最大加速度)と、足裏の各部位の圧力の関係を図-13に示す。加速度の値にばらつきがあり、これは踏み込みによる床面への荷重が衝撃荷重に近い性質を持つものに対し、使用したソフトウェアは地震観測用であり、サンプリング(100 Hz)が不十分であったことが理由として考えられる。しかし、ばらつきの存在を考慮しても、関西大学ミュージズキャンパス武道場での計測値の方が吹田市武道館洗心館での計測値よりも大きいことがわかる。これは、床面が固いほど加速度が大きくなったものと考えられ、踏み込み時の床面の振動を計測することで床面の固さを評価できる可能性があることを示唆している。

4.3 剣道場床面の特性の評価法の検討

床面の振動計測により床面の固さを評価することを目指し、関西大学ミュージズキャンパス武道場と吹田市武道館洗心館の両方で、図-14に示すように床面振動の距離減衰を計測した。当初の振動計測位置が踏み込み位置か

ら0.5 m離れた位置（A）であり、そこから、竹刀1本分（1.2 m）ずつ離れた2点で振動を計測した。したがって、踏み込み位置からの距離は、それぞれ、0.5 m (A), 1.7 m (B), 2.9 m (C)となっている。

踏み込みの力のばらつきや、計測時のサンプリングの問題を考慮し、それぞれの計測に対し10回の踏み込みを実施した。

計測結果を、平均値及び標準偏差として、図-15に示す。距離が遠くなるほど振動が小さくなる傾向（距離減衰）が評価できている。また、関西大学ミュージックキャンパス武道場の方が吹田市武道館洗心館よりも、踏み込み位置からの距離が0.5 mから1.7 mに増加したときの振動の減少率が大きいことがわかる。つまり、関西大学ミュージックキャンパス武道場はAの位置とBの位置で床面の最大加速度の値の差が大きい。一方で、吹田市武道館洗心館では、A, B, Cと計測位置が踏み込み位置から離れた際に、滑らかに最大加速度の値が小さくなっている。このことから、武道場の床面の固さの違いに応じて、踏み込み位置からの距離に応じた床面の加速度の減少傾向（距離減衰）に違いが生じていることがわかる。そして、足が痛くなるような固い剣道場では、踏み込み位置近傍の局所的な床面の変形が反力として作用するため、踏み込み位置近傍で局所的に大きな振動が観測されるものと思われる。

5. まとめ

本論文では、地盤の表層や表面の状態にかかわる身近な安全問題を対象とした調査法の検討事例を紹介した。それぞれの検討事例の要点を以下にまとめて示す。それぞれ、検討事例には未完成な部分が散見されるが、地盤の表層や表面の状態にかかわる身近な安全問題においても地盤工学的な検討方法、さらに地盤工学者の経験が役に立つことを示唆する事例であると考えている。従来の構造物の設計等にかかわる諸問題にとどまらず、これらの日常生活の安全にかかわる諸問題に地盤工学分野の技術者や研究者がさらなる関与・貢献をしていくことを期待している。

- (1) 人々が日常的に使用する路面の下には、埋設物の損傷等に起因して発生した空洞が存在する場合があります。陥没事故の発生前に空洞を探知し、対策を行っていく必要がある。このため、レーダー探査等の先進的技術が開発されているが、空洞のサイズ（厚み）などに関しては、非破壊で簡便に調査する方法は確立されていない。そこで、著者らは加熱による温度変化を計測する技術の開発を試み、模型実験及び実地試験により、提案手法に実現可能性があることを示した。このような路面下の空洞など、「見えない損傷」は人々の生活の安全を脅かすものであるため、さまざまな手法で可視化する技術を開発していく必要が

ある。

- (2) 人々が日常的に使用する路面の材料はアスファルトやタイルなど様々な性質のものがあるが、はきなれた靴の裏側の摩耗の状態や、雨天時の路面の濡れ具合などに応じて、非常に滑りやすくなる場合がある。したがって、実際の様々な状態での路面のすべりやすさを評価することが、転倒防止など人々の生活の安全を確保する上で重要となる。そこで、著者らは簡便な路面のすべりやすさの評価法を検討した。そして、実際に摩耗した靴裏を対象とした滑りやすさの検討が可能であることを示した。今後は、実際の靴の使用条件に対応した接地圧でのすべりやすさの検討が可能となるように改良を行う必要があると考えられる。
- (3) 人々が日常的に使用する路面の性質は、滑りやすさだけでなく、固さが問題となる場合がある。そこで、著者らは地表面の固さを評価する手法の検討の前段階として、剣道場の床面の弾力性の計測実験を実施した。実験の結果、剣道場により床面の固さは異なり、足裏に加わる圧力分布の違いが生じていることを確認した。また、床面の振動特性、特に距離減衰特性に違いがあり、ケガにつながるような固い床面を持つ剣道場では、踏み込み位置近傍の局所的な床面の変形が反力として作用していると考えられ、踏み込み位置近傍で局所的に大きな振動が観測されることがわかった。

謝辞

2章で述べた内容は著者の指導の下、岩佐百花、田中実秀の両氏が卒業研究として実施したものであり、ジオ・サーチ（株）との共同研究の一部でもある。また、同様に、3章の内容は久松拓睦氏、4章の内容は木内捷人氏が卒業研究として実施した内容である。さらに、2章の実地計測では多くの方のご協力をいただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 地盤工学会：地盤調査の方法と解説，889p，2004.
- 2) 北出圭介，一井康二，河野真弓，栗原大，田口依久夫：港湾構造物の健全度診断のための表面波探査の適用性の検討，地盤工学ジャーナル，Vol. 9, No. 4, pp.495-510, 2014.
- 3) 一井康二，河野真弓：擁壁や盛土の健全度診断への地盤震動計測—適用性と課題—，物理探査，Vol.68, No.2, pp.101-118, 2015.
- 4) 一井康二，宮地裕暁，廣部玲央：ミニショベルを用いた簡便な地盤調査法の実現可能性の実験的検討，地盤と建設，Vol.36, No.1, pp.137-144, 2018.
- 5) (株)加藤組：Smart土質判定システム，令和4年度試行結果に関する報告会～建設現場の生産性を飛躍的に向上するための革新的技術の導入・活用に

- 関するプロジェクト～，国土交通省
<https://www.youtube.com/watch?v=yzR1hvoR4iQ>
(参照 2023.11.3).
- 6) 国土交通省：道路の陥没発生件数とその要因（令和3年度）
<https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/ijikanri/pdf/r1-r3kanbotu.pdf>, (参照 2023.11.3).
- 7) 明石市：大蔵海岸砂浜陥没事故報告書－再発防止に向けて－，平成16年3月
https://www.city.akashi.lg.jp/anzen/anshin/ookurakaiganjiko/documents/0403saisyu_1.pdf (参照 2023.11.3).
- 8) 吉澤幸佑：地中レーダによる路面下の空洞探査について，国土交通省関東地方整備局
https://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000105696.pdf (参照 2023.11.3).
- 9) (株)ジオ・サーチ：探査車（スケルカー）の特長
<https://www.geosearch.co.jp/service/01.php>
(参照 2023.11.3).
- 10) 道村和正：赤外線法による劣化診断技術，マテリアルライフ学会誌，Vol.20, No.1, pp.21-26, 2008.
- 11) 渡辺健：コンクリート構造物の点検における評価対象別の非破壊試験③剥離および内部欠陥，コンクリート工学，Vol.53, No.8, pp.715-720, 2015.
- 12) 安藤和彦，倉持智明：路面のすべり摩擦と路面管理水準及びすべり事故，土木技術資料，Vol.52, No.5, pp.56-59, 2010.
- 13) 景山一郎，小林ゆき，原口哲之理，浅井基博，松本学：実路面の摩擦特性計測に関する研究－計測システムの基本設計について－，自動車技術会論文集，Vol.51, No.5, pp.924-930, 2020.
- 14) 斎藤誠二，村木里志：靴底の摩耗が歩行中の下肢に与える影響，人間工学，Vol.42, No.4, pp.243-250, 2006.
- 15) 相川考訓：エルボークラッチ杖先ゴムの摩擦の評価結果，国立身体障害者リハビリテーションセンター研究紀要，Vol.24, pp.11-20, 2003.
- 16) 前蔦大輝，中島伸一郎，池田茜：ランナー走行時の舗装種別による着地衝撃の評価手法の提案，土木学会論文集 E1(舗装工学)，Vol.78, No.2, pp.I_144-I_151, 2023.
- 17) 肥田直人，石井慎一郎，山本澄子：足部接地パターンがランニングにおける推進特性に及ぼす影響，理学療法科学，Vol.31, No.6, pp.815-818, 2016.
- 18) 田淵俊彦：剣道場床面の弾力性から見たスポーツ障害，武道学研究，Vol.22, No.2, pp.153-154, 1989.

(2023年11月8日 受付)