

# 簡易で効率的な路面下空洞探査手法について

大成ロテック(株) 正会員 ○城本 政一  
同上 正会員 青木 政樹  
東京農業大学 正会員 竹内 康

## 1. 目的

道路陥没は毎年 4000 件程度発生しており、その中の数件は人命に係わるような重大事故を引き起こしている。道路陥没が起きる原因として、下水道管の埋め戻し砂の小規模な液状化や管内への砂の流入によって、路盤以下に空洞が生じていると言われている。このような空洞が生じた箇所では道路陥没が引き起こされている。現在、道路陥没事故を防ぐために、路面下空洞を探査する技術として地中電磁波レーダ（GPR）が用いられてきている。しかしながら、GPR を用いて空洞を発見するためには、測定機器特有の性質を把握するなど、経験に基づく技術が必要であり、測定された反射波の画像から空洞の有無を判断することは容易ではない。そのため、測定機器や測定者が異なることで、空洞の有無に関する判断結果に相違がみられる。そこで、当社は東京農業大学と共同で、簡易かつ効率的に路面下空洞を発見できる探査技術について開発を行った。

本文では、その探査技術の概要、調査結果、空洞の有無を判定するための判定式について述べる。

## 2. 探査技術の概要

路面下空洞を探査する技術としては、前述したように GPR が一般的に用いられている。GPR では、測定波形の変化を表した画像により、路面下の変状を容易に検出することができるが、その変状を特定することは難しく、時には誤認識を行う場合がある。一方、路面下に空洞がある場所では、舗装の支持力が低下することから、FWD 等の支持力を測定できる試験機によりたわみ量を測定することで、空洞の有無が判定できる。しかしながら、この手法では、任意の位置から空洞が存在する位置を特定するために、数多くの箇所でのたわみ量の測定を行わなければならないという測定効率の面での欠点がある。

今回開発した技術は、それら測定技術を併用することで、双方が有する弱点を補い、効率的に路面下空洞の存在する箇所を特定するものである。具体的には、GPR の反射波画像に異常が認められた場合、FWD により異常箇所およびその周辺の舗装の支持力を測定し、異常箇所でのたわみ量が周辺に比べて大きい場合に路面下空



写真-1 探査機器（左：GPR，右：小型 FWD）

キーワード 路面下空洞，小型 FWD，地中電磁波レーダ，支持力

連絡先 〒365-0027 埼玉県鴻巣市上谷 1456 大成ロテック株式会社事業本部技術研究所 TEL 048-541-6511

洞が存在すると判定する技術である。測定イメージを図-1 に示す。

### 3. たわみ判定基準値の算出方法

FWD によるたわみ量の測定値は、舗装厚の違いや測定誤差によって変動する。井上<sup>1)</sup>によると、同じ舗装構造を仮定した場合、層厚や舗装材料のポアソン比のバラツキ、測定誤差によって、逆解析により算出される各層の弾性係数の変動係数 C.V. は、アスファルト混合物層で 45%、路盤層で 17%、路床で 3% としている。舗装構造が既知の場合には、舗装各層の弾性係数の変動を考慮して、多層弾性理論による順解析によりたわみ量の上限值を求めることができる<sup>2)</sup>が、軽交通舗装区間ではそのような事前情報が得られない場合が多い。

そこで本研究では、GPR で異常が認められない同一舗装区間で測定されたたわみ量は正規分布していると考え、その区間の平均値と標準偏差を用い、式(1)により信頼度を考慮したたわみの上限值を求めることとした。

$$f_k = f_m + k \cdot \sigma \quad (1)$$

- ここに、 $f_m$  : たわみ量の平均値 (mm)
- $\sigma$  : たわみ量の標準偏差 (mm),
- $k$  : 信頼度 R (%) に応じた係数

健全度評価を行うにあたっては、アスファルト舗装設計の信頼度の上限值を参考に、 $R=90\%$  ( $k=1.28$ ) としてたわみ量の上限值を求め、その値を超えた箇所の GPR の異常箇所を空洞と判定することとした。

### 4. 現地での検証結果

福島県南相馬市小高区内の生活道路にて、前述の空洞を検出するためのたわみ量判定式の検証をおこなった。以下に、測定箇所の概要および測定結果を示す。

#### (1) 測定場所と測定方法の概要

福島県南相馬市を調査対象とした理由は、①東日本大震災後の立ち入り禁止が解除され (2012 年 4 月 16 日)、道路が震災後ほぼ手つかずの状態であったこと、②復旧作業のために今後交通量の増加が見込まれるため、道路状況の把握が必要となること、が挙げられる。なお、調査機器として、GPR は、GSSI 社製 SIR-3000 (周波数 400MHz)、小型 FWD は東京測器研究所社製 FWD-Light を使用した。また、調査は 2012 年 7 月 6-7 日に実施した。調査位置は、下水管マンホールを結ぶ直線区間を選定し、路面下の状況を GPR で検査するとともに、異常箇所とその周辺にて小型 FWD 試験を実施した。調査位置図は図-2 に示す通りであり、

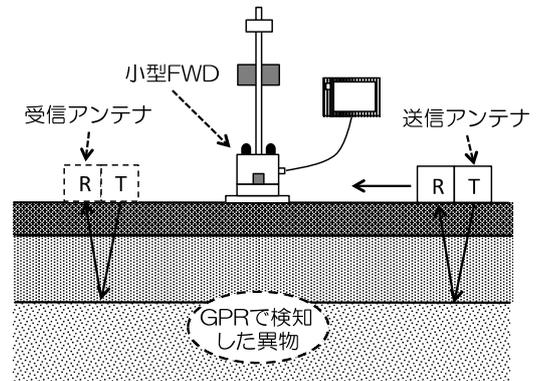


図-1 GPR と小型 FWD を用いた路面下空洞調査のイメージ

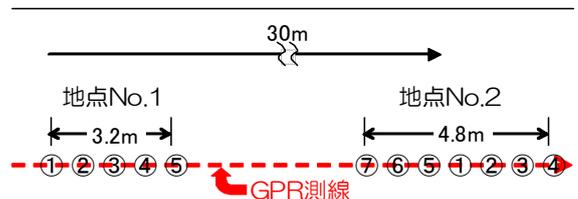


図-2 調査位置図

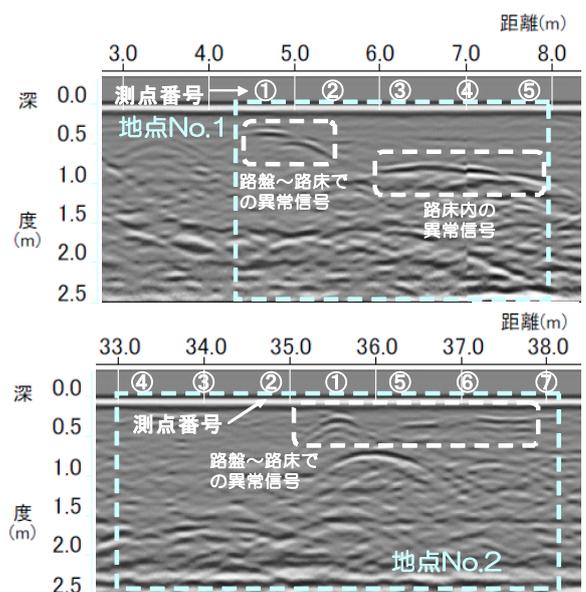


図-3 GPR 測定画像

(上：地点 No. 1, 下：地点 No. 2)

調査箇所の路面に変状はみられなかった。なお、小型 FWD の載荷半径は 5cm, 載荷重は平均で 8,000N であったため基準荷重を 8,000N とし、式(2)にしたがって FWD によるたわみ量の測定値を補正した。

$$w' = w \times 8000 / P \quad (2)$$

ここに、 $w \cdot w'$  : 補正前・後のたわみ量(mm)

P : 載荷重

## (2) 路面下空洞の調査結果

GPR により測定された反射波画像を図-3 に示す。

図-3 より、調査を行った箇所は生活道路であることから、埋設管が多く存在していることが分かる。この反射波画像のように、多くの埋設管がある箇所から反射波の異常をとらえ空洞を判定することは経験豊富な測定者でなければ困難である。図-3 の異常箇所の中から 4.7m 及び 35.5m の位置に空洞と思われる反射波画像が検出されたので、4.7m を地点 No. 1, 35.5m の位置を地点 No. 2 として、小型 FWD によるたわみ量の測定を行った。また、空洞の有無については、ボアホールカメラにより、路面下の状況を直接確認した。小型 FWD によるたわみ量の測定結果を図-4, 5 に、ボアホールカメラの画像を図-6 に示す。なお、調査地点での、健全部での平均たわみ量は 0.304mm, 標準偏差 0.077mm であったことから、式(1)を用い、空洞を判定する上限たわみ量は 0.403mm とした。

たわみ量の測定結果によると、GPR の測定により空洞の中心と考えられる測点①では、たわみ量の測定値は上限値である 0.403mm を大きく越えていることがわかる。また、地点 No. 1 の測点②、地点 No. 2 の測点⑤-⑦のように、比較的浅い位置に空洞を示す GPR の異常波がみられた箇所でも同様にたわみ量の測定値は上限値を越えていた。このことより、式(1)の空洞の判定式の有効性が確認された。

しかしながら、地点 No. 1 の測点③-⑤のように、GPR による反射波の異常箇所が 1.0m と比較的深い位置にある場合には、たわみ量の測定値が小さくなり、たわみ上限値を明らかに越えているとは言い難い結果となった。また、地点 No. 2 の測点②-④では、反射波画像に異常が認められない箇所であっても上限値を大きく越える箇所があった。このような箇所は、GPR の検出範囲外の側方に空洞等が存在し、支持力が低下している可能性を示しているものと考えられる。

## 5. 模擬空洞による検証実験

前述した福島県の実道での空洞調査において、GPR によって空洞を示す反射波が検知されない箇所であっても、小型 FWD で計測したたわみ量が明らかに路面下空洞による異常値を示している箇所があった。このような箇所は、GPR の測定検出範囲外の側方に空洞等の舗装の緩みがあり、支持力が低下している可能性を示しているものと考えられる。この現象を確認するために、模擬空洞を作成し、検証をおこなった。以下にその概要お

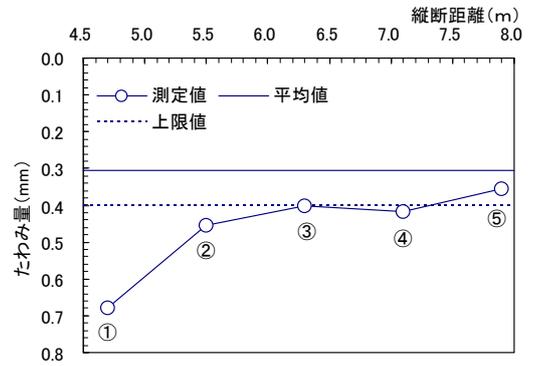


図-4 地点 No. 1 での小型 FWD 測定結果

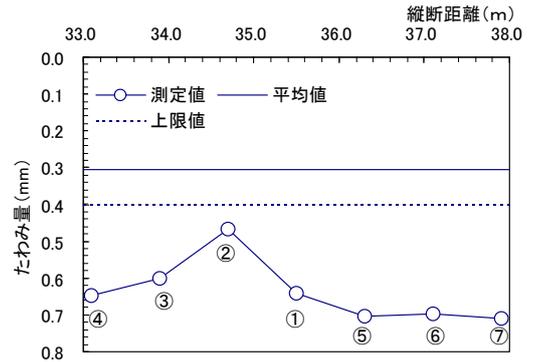


図-5 地点 No. 2 での小型 FWD 測定結果

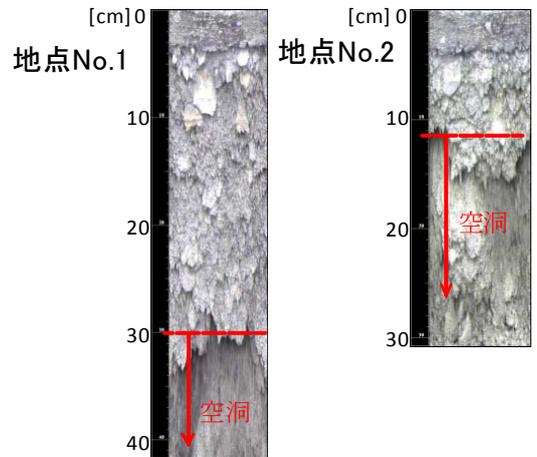


図-6 各地点の測点①での路面下空洞

よび測定結果を示す。

### (1) 模擬空洞と試験舗装の概要

小型 FWD で測定されたたわみ量が空洞の深さおよび位置関係によりどれだけの影響を受けるかを検証するために、大成ロテック技術研究所構内に模擬空洞を設置した試験舗装を施工した。その試験舗装の詳細を図-7(上:平面図, 下:断面図)に示す。図-7に示すように、試験舗装には3つの深さの異なる模擬空洞を配置した。この試験舗装での小型 FWD および GPR の試験位置は図-7の平面図に示すとおりで、D 工区の横断方向5測点とその横 50cm の3測点でのデータを健全部データとし、平均値と標準偏差を算出した。なお、模擬空洞(1.0×1.0×0.2m)は木枠を用いて作製し、転圧によって木枠が破損しないように砂や硬質発泡スチロールを密詰めにした。空洞調査時には写真-2に示すように、試験舗装路肩部を掘削し、木枠内部の充填材料を取り除いたが、C 工区のみ、小型 FWD の载荷による路面陥没を防ぐために、空洞に硬質発泡スチロールを挿入したまま実験をおこなった。

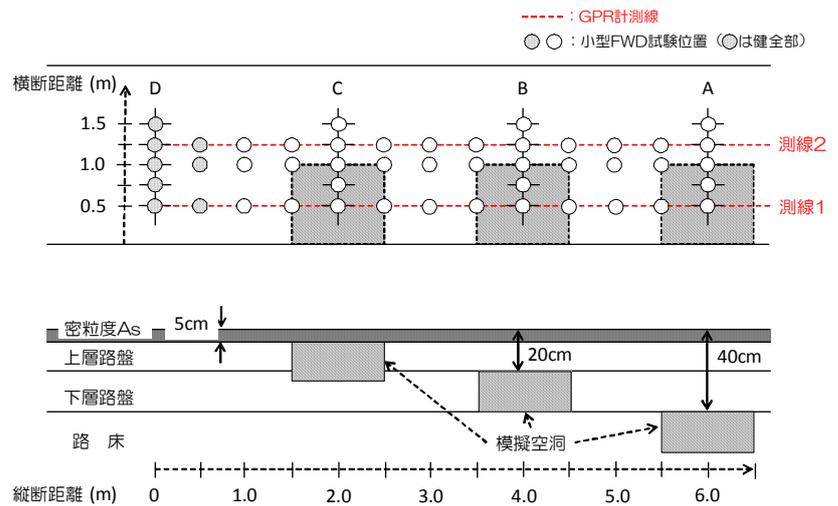


図-7 模擬空洞を設置した試験舗装の概要



写真-2 模擬空洞を設置した試験舗装

### (2) 路面下空洞調査結果

GPR と小型 FWD による空洞調査は 2013 年 4 月 18 日に行い、調査実施時の路面温度は 35～38℃であった。

GPR による測定された反射波画像を図-8, 9 に示す。図-8 は模擬空洞の真上(図-7の測線1)を通過したときの結果である。これに対し、図-9 は空洞縁部から横断方向に 25cm 離れた測線(図-7の測線2)での結果である。これらの結果より、GPR では、空洞の縁部から 25cm 程度離れると舗装体内の異常を検知できないことがわかる。

次に小型 FWD による測定結果を図-10, 11 に示す。図-10, 11 のたわみ量は、福島での測定と同じく式(2)を用いて全て基準荷重を 8,000N として補正した値である。

この結果を見ると、B, C 工区の空洞直上のたわみ量が非常に大きな値となっていることがわかる。これは、当該工区では空洞が浅い位置にあるために重錘落下時の反力が得られず、小さい荷重で大きなたわみが発生したことが原因である。

各工区での横断方向の測定結果(図-10)を見ると、载荷位置が空洞上部である場合には空洞位置が浅いほ

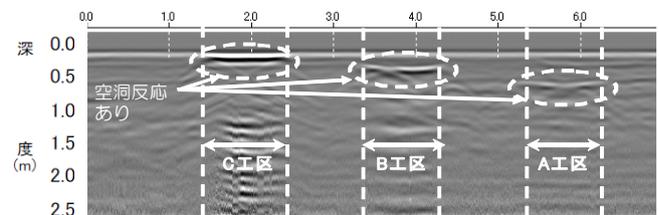


図-8 側線1(空洞中央部) GPR 計測結果

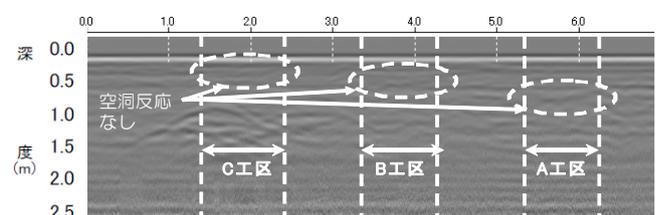


図-9 側線2(空洞より25cm外) GPR 計測結果

どたわみ量は大きくなるが、横断方向で 100cm 以降の B、C 工区での結果では、空洞位置の深淺が必ずしもたわみ量の大小を決定していない。これは、図-11 の縦断方向の測定結果のうち、125cm での結果にも表れており、B 工区 (350~450cm) でのたわみ量の方が C 工区 (150~250cm) の結果よりも大きな値を示していることがわかる。地盤表面に作用した荷重の地盤内での影響範囲は、コンター図を描くと下方に至るほど広がる球根状に分布することが知られている。つまり、C 工区よりも僅か下方に空洞が位置する B 工区の方が荷重の影響線の範囲内に空洞が位置したために、たわみ量が大きくなったものと考えられる。また、空洞中心から 100cm 離れた場合 (図-10 の 150cm の位置) では、何れの工区でも測定されたたわみ量は上限値を超えず、健全部として判定されることがわかった。なお、A 工区では空洞位置が深いこともあり、空洞の縁部より 25cm (図-10 の 125cm の位置) 離れた測線では健全部として判定された。以上のことより、表層下の比較的浅い位置に空洞がある場合には、空洞直上でなくとも小型 FWD のたわみ量の変化によって空洞を検出できることがわかった。

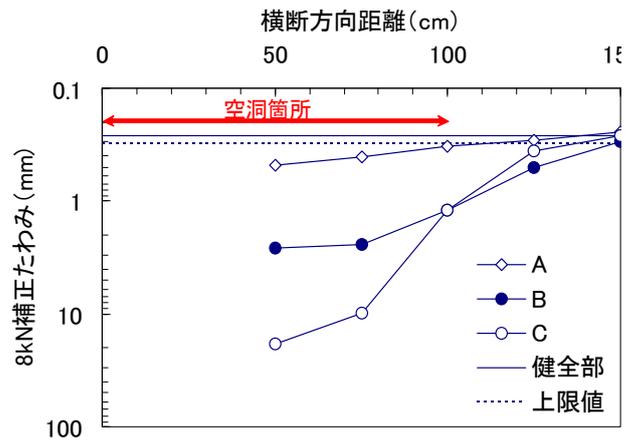


図-10 A-C 工区での横断方向のたわみの変化

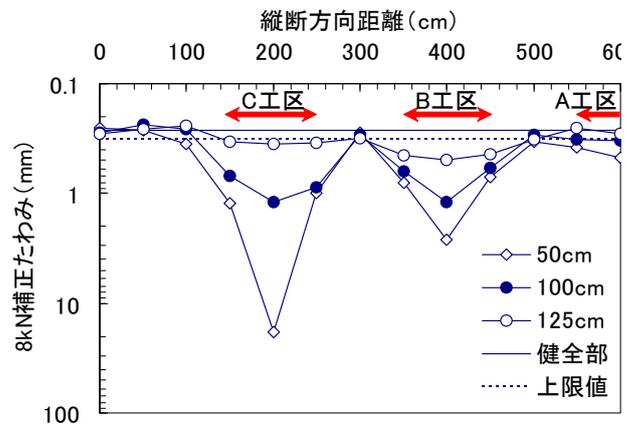


図-11 縦断方向のたわみの変化

## 6. まとめ

本研究では、GPR と小型 FWD を併用した路面下空洞調査法の有効性および測定精度について検討してきた。主な結果をまとめると以下の通りである。

- (a) GPR と小型 FWD を併用することで、簡易かつ効率的に路面下空洞を発見できる探査技術について開発することができた
- (b) 舗装構成が分かっていない路線においても、GPR で異常が認められない同一舗装区間の平均たわみ量、標準偏差を用いることで、空洞を判定するたわみ量の上限値を算出する方法を見出すことが出来た。また、この判定式を用いることで、現地にて空洞箇所の判定を簡易に行うことができ、空洞箇所を特定することができた。
- (c) GPR では探知できないような空洞の周囲でも、支持力が低下していれば、たわみ量を測定することで空洞を検出可能なことが分かった。

今回行った本探査技術では、比較的浅い箇所での空洞を発見することができた。今後は路面下深くに存在する空洞について、本探査技術が有効であるかを引き続き検証していく予定である。

## 参考文献

- 1) 井上武美, 松井邦人, 三瓶辰之: 舗装の逆解析において層弾性係数の推定に影響を及ぼす因子とその影響度の検討, 土木学会論文集, No. 433/V-15, pp. 177-185, 1991.
- 2) 竹内康, 城本政一, 緑川兼広: 軽交通道路における小型 FWD を用いた簡易な路面下空洞評価方法の検討, 第 12 回北陸道路会議, 報文集 B-9 (CD-ROM), 2012.