アスファルト舗装下の空洞が FWD のたわみに及ぼす影響

河村直哉¹・坪川将丈²

¹正会員 修士 (システム生命科学) 国土交通省 国土技術政策総合研究所 空港研究部
(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)
E-mail : kawamura-n92y2@mlit.go.jp

²正会員 博士 (工学) 国土交通省 国土技術政策総合研究所 空港研究部 空港施設研究室
(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

FWD(Falling Weight Deflectometer)を用いたアスファルト舗装下の空洞検出方法を提案することを目的として、空洞を有する試験舗装を製作し、空洞の存在および空洞の位置に対する載荷板の設置位置がFWDのたわみに及ぼす影響を調査した。得られた主な知見は以下2点である。1)路床に空洞があり、空洞上に載荷板が設置される場合、最大たわみおよび正規化たわみは大きく、たわみ時間差は小さくなる。特に載荷板中心から1500mmの点の最大たわみとたわみ時間差の関係に基づく、空洞の有無や幅の違いが表れる。2)載荷板中心から1500mmの点の最大たわみについては、載荷板の設置位置が空洞周辺の場合でも大きくなる。

Key Words: asphalt pavement, void, FWD, standardized deflection, peak time difference of deflection

1. はじめに

地震発生後の空港舗装では、基礎地盤の液状化や切土・盛土境界部の変形に伴い空洞が発生することがある^{1),2)}。アスファルト舗装内部に空洞が発生し、舗装表面が沈下する場合^{2),3),4)}、目視で空洞の存在を疑うことができるが、空洞の深さによっては表面に変状が表れず空洞の存在を見逃すおそれがある。舗装表面に変状のない空洞化箇所を航空機等が走行すると、突発的に陥没する危険性があるため、地震発生後に液状化等が確認された場合には、アスファルト舗装の支持力を評価することに加え、空洞の有無や位置を把握することも重要である。

舗装の支持力評価はFWD (Falling Weight Deflectometer)で可能であり⁵⁾、空洞検出は地中レーダで可能であるが⁶⁾、早期の運用再開を求められる地震後の空港において両方の機器を準備して調査を実施することは、時間的制約を踏まえると容易ではない。地中レーダは空洞の面的分布を把握できるという利点があるものの、空洞に起因した舗装支持力の低下を評価できないため、FWDによって、支持力評価と併せて空洞検出ができることが望まれる。

著者らはこれまでに、コンクリート舗装下の空洞がFWDのたわみに及ぼす影響を検討し、正規化たわみ(載荷板中心と載荷板から離れた点の最大たわみの比)とた

わみ時間差(載荷板中心と載荷板から離れた点のたわみが最大となる時間差)が、空洞の存在により影響を受けることを明らかにし、この2指標を空洞検出指標として提案した^{7),8)}。その一方で、空洞を有するアスファルト舗装において上記の2指標が適用できるかについては、まだ十分には検討を行っていない⁹⁾。

そこで本研究では、FWDによるアスファルト舗装下の空洞検出方法を提案することを目的として、空洞を有するアスファルト試験舗装を製作し、空洞の存在および空洞の位置に対する載荷板の設置位置(以下、載荷地点)がFWDのたわみに及ぼす影響を分析した。

2. アスファルト試験舗装の製作

(1) アスファルト試験舗装

図-1に、製作したアスファルト試験舗装(以下、試験舗装)の平面図と断面図を示す。試験舗装は、全長17.0m、幅5.0mであり、施工幅2.5mの2レーンである。舗装の構成は、2レーンともに、表層0.06m、基層0.10m、アスファルト安定処理上層路盤0.15m、粒状下層路盤0.64mであり、大型ジェット機が就航する空港の舗装構成を想定した。表-1に各層に使用した材料を示す。アスファル

【平面図】

【断面図】

図-1 試験舗装の平面図と断面図

表-1 各層に使用した材料

	材料	規格
表層	密粒度 アスファルト混合物	最大粒径20mm 針入度60/80
基層	粗粒度 アスファルト混合物	最大粒径20mm 針入度60/80
上層路盤	アスファルト 安定処理混合物	最大粒径40mm 針入度60/80
下層路盤	クラッシャーラン	最大粒径40mm
路床	砂	-

ト混合物と粒状材料の品質は、空港土木工事共通仕様書¹⁰⁾を満足するものとした。

(2) 空洞の製作

図-1 の A2, A3, A4 および B1 区画の路床上面において、以下の手順により空洞を製作した。

まず、路床施工時に、水を充填したゴムバッグ（オカモト(株)製、長さ2.4m、幅1.0m、厚さ0.2mもしくは0.4m）を路床上面に設置した。このゴムバッグは、合成繊維布の内側と外側に特殊合成ゴムをコーティングしたものである。A3 区画ではゴムバッグを2つ並べ、幅2.0mの空洞を製作することとした。

次に、下層路盤、上層路盤、基層、表層を順に施工した。その際、塩化ビニール製のパイプ（直径75mm）を路床上面から舗装表面まで鉛直に通しておき、試験舗装を構築後にパイプを通して鉄棒でゴムバッグを破裂させ、

空洞を発生させた。なお、図に記載の空洞厚および幅は、水を充填したゴムバッグの寸法であり、空洞の正確な寸法ではないが、以降では空洞幅および空洞厚と称する。また、各種試験の安全性に配慮して、空洞幅は最大2.0m、隣接する空洞間距離は2.5mとした。

以降、3章では、A2, A3, A4 および C1 区画での FWD 調査結果に基づき、空洞の存在が FWD のたわみに及ぼす影響を明らかにする。4章では、B1 区画付近とその比較対象の C1 区画での FWD 調査結果に基づき、空洞の位置に対する載荷地点の位置が FWD のたわみに及ぼす影響を明らかにする。

3. 空洞の存在が FWD のたわみに及ぼす影響

(1) FWD 調査概要

a) 調査位置

FWD の載荷地点は、路床に空洞のある A2, A3, A4 区画の中央（以下、A2, A3, A4）と空洞のない C1 区画の2地点（以下、C1）である。

載荷地点ごとの調査実施回数は、夏から秋にかけて計5回である。その際の舗装表面温度は19.9～28.9℃であった。なお C1 では、1脚4輪の航空機荷重（脚荷重910kN）による繰返し走行試験を行ったため、2回目以降の調査は走行荷重が作用した後の状況である。たわみは走行荷重作用前後で変化するため¹¹⁾、その変化が生じたと考え

られる C1 の 2 回目以降の調査結果は棄却した。表-2 に、各 FWD 調査時の走行試験の実施状況を示す。

b) 載荷条件

載荷板直径は 0.45m、載荷荷重は 196kN であり、載荷地点ごとに 2 回載荷を行い、時刻歴（計測間隔 0.2ms）でたわみを計測した。なお、載荷 1 回目のデータについては、載荷板やたわみセンサと路面の接触不安定により計測のばらつきが大きいとため¹²⁾、棄却した。

たわみセンサの配置方向は、図-1 の平面図の左方向とした。たわみセンサによるたわみの計測点（以下、計測点）は、載荷板中心、中心より 300, 450, 600, 900, 1200, 1500 および 2500mm である。

(2) 評価指標

評価には最大たわみの他に、コンクリート舗装における空洞検出指標として著者らが提案した正規化たわみとたわみ時間差^{7,8)}を用いた。以下、各指標を詳述する。

a) 最大たわみ

載荷板中心から x mm の計測点の最大たわみ D_x には、載荷荷重を 200kN として荷重補正した値を用いた。

b) 正規化たわみ

正規化たわみは、たわみ形状に着目した指標であり、 D_0 に対する D_x の比（式(1)）である。

$$ND_x = D_x / D_0 \quad (1)$$

ここに、

ND_x ：載荷板中心から x mm の計測点の正規化たわみ

D_x ：載荷板中心から x mm の計測点の最大たわみ (mm)

D_0 ：載荷板中心の最大たわみ (mm)

c) たわみ時間差

たわみ時間差は、時刻歴のたわみに着目した指標であり、載荷板中心のたわみが最大となる時間と載荷板中心から x mm の計測点のたわみが最大となる時間の差である（式(2)および図-2）。

$$\Delta t_x = t_x - t_0 \quad (2)$$

ここに、

Δt_x ：載荷板中心から x mm の計測点のたわみ時間差(ms)

t_x ：載荷板中心から x mm の計測点のたわみが最大となる時間 (ms)

t_0 ：載荷板中心のたわみが最大となる時間 (ms)

コンクリート舗装の版直下に空洞がある場合には、図-3 に示す概念図のように、正規化たわみは大きく、たわみ時間差は小さくなることを確認されている^{7,8)}。これは、コンクリート版の版厚、弾性係数、ポアソン比および路盤の支持力係数より計算される剛比半径が、空洞に起因する路盤の支持力低下で大きくなることから、荷重の影響範囲が水平方向に広がり、載荷板から離れた点のたわみの挙動が、載荷板中心のたわみの挙動に近くなるためであると考えられる。

表-2 各 FWD 調査時の走行試験実施状況

	A2, A3, A4	C1	備考
調査 1 回目	走行試験 未実施	走行試験 未実施	・C1での調査2 回目以降の結果(網掛けセル) は棄却
調査 2 回目		200回 走行後	
調査 3 回目		500回 走行後	
調査 4 回目		1500回 走行後	
調査 5 回目		2500回 走行後

図-2 たわみ時間差の定義 (Δt_{1500} の場合)

a) 正規化たわみ

空洞があるとたわみ時間差は小さくなる

b) たわみ時間差

図-3 コンクリート舗装の版直下の空洞が正規化たわみとたわみ時間差に及ぼす影響の概念図

(3) 調査結果

a) 最大たわみ

図-4 に、調査 1 回目に得られた D_x を載荷地点ごとに示す。C1 については 2 地点の平均値を示しており、これ以降の結果も同様とする。A2, A3 および A4 での $D_0 \sim D_{1500}$ は、いずれも C1 よりも大きかった。この結果は、空洞の有無以外にも載荷地点ごとの舗装温度の違いによる可能性も考えられるが、調査 1 回目の表面温度 (25.2 ~ 27.0°C) に違いは殆どなかったため、舗装温度の影響は小さいと考えられる。

空洞の影響により最大たわみが特に大きくなった計測点を調べるために、調査 1 回目に得られた A2~A4 での D_x を C1 での D_x で除した値を図-5 に示す。空洞の大きさによらず、載荷板中心から離れた計測点の最大たわみが大きく、特に D_{900} および D_{1500} が大きい傾向であった。載荷板中心から離れた計測点の最大たわみは、路面からある程度の深さの層の支持力を表す傾向があり¹³⁾、今回の調査では、 D_{900} と D_{1500} が、路床に存在する空洞の影響を受けて比較的大きな値を示したと考えられる。

図-6 には、計 5 回の調査で得られた A2~A4 での D_{900} および D_{1500} を示す。載荷地点ごとに D_x の変動はあるものの、 D_{900} および D_{1500} の平均値は空洞幅が広いほど大きかった。A3 と A2 での平均値の差および A3 と A4 での

図-4 最大たわみ D_x

図-5 C1 に対する A2, A3, A4 の最大たわみ D_x の比

平均値の差に関して、Steel の方法による統計的検定 (片側検定, 有意水準 5%, 以下, 検定と称す) を行ったところ、各平均値の差は有意であった。

なお、載荷地点ごとの D_x の変動要因として、空洞の変化 (時間の経過に伴い空洞上方および左右の層が崩れ、空洞が広がる現象) や舗装温度等の影響が考えられるが、時間経過に伴う D_x の変化に明確な傾向を確認できなかったため、空洞の変化が影響しているとは考えにくい。

b) 正規化たわみ

図-7 に、調査 1 回目に得られた ND_x を載荷地点ごとに示す。A2~A4 での $ND_{300} \sim ND_{900}$ は C1 よりも大きかったが、空洞の有無による違いは最大たわみの場合ほどではなかった。

図-8 には、計 5 回の調査で得られた A2~A4 での ND_{900} および ND_{1500} を示す。 ND_{900} および ND_{1500} には空洞幅が広いほど大きくなる傾向はなかった。空洞幅が広くなれば剛比半径は大きくなり、正規化たわみは大きくなると考えられるが、幅 1m の違いは、正規化たわみに影響する程のものではなかったと考えられる。なお、コンクリート舗装の場合と異なり、正規化たわみに空洞の影響が表れにくかった要因として、アスファルト舗装の剛性はコンクリート舗装よりも小さく、剛比半径も小さいこと

図-6 最大たわみ D_{900} および D_{1500}

図-7 正規化たわみ ND_x

が挙げられる。

c) たわみ時間差

図-9 に、調査 1 回目に得られた Δt_x を載荷地点ごとに示す。A2～A4 での Δt_x は、いずれの計測点においても C1 より小さかった。

図-10 には、計 5 回の調査で得られた A2～A4 での Δt_{900} および Δt_{1500} を示す。載荷地点ごとに Δt_x の変動があり、

図-8 正規化たわみ ND_{900} および ND_{1500}

図-9 たわみ時間差 Δt_x

図-10 たわみ時間差 Δt_{900} および Δt_{1500}

A2～A4 での Δt_{900} での平均値はほぼ同じであったが、 Δt_{1500} の平均値は空洞幅が広いほど小さかった。しかし、A3 と A2 での Δt_{1500} の平均値の差および A3 と A4 での Δt_{1500} の平均値の差に関して検定を行ったところ、各平均値の差は有意ではなかった。これは、A3 での 3 回目の結果が極端に大きかったためである。この値を除いた場合の平均値の差には有意差があった。

なお、載荷地点ごとの Δt_x の変動に関しても、空洞の変化や舗装温度等の影響が考えられるが、時間の経過による Δt_x の変化に明確な傾向を確認できなかったため、空洞の変化が影響しているとは考えにくい。

d) 最大たわみとたわみ時間差の関係

着目した 3 指標ともに空洞の有無による差が確認された。ここで、空洞の有無による違いが比較的明瞭であった最大たわみとたわみ時間差について、載荷板中心から 900mm と 1500mm の計測点における両指標の関係を図-11 に示す。図には、A2～A4 での計 5 回の調査結果と C1 での調査 1 回目の結果を示す。

a) 載荷板中心から 900mm の計測点

b) 載荷板中心から 1500mm の計測点

図-11 最大たわみとたわみ時間差の関係

空洞幅が広いほど、図の左上方、すなわち、最大たわみは大きく、たわみ時間差は小さい傾向となり、特に載荷板中心から 1500mm の計測点においてその傾向が顕著であった。

以上の結果より、アスファルト舗装の路床に空洞がある場合には、載荷板中心から 1500mm の計測点の最大たわみとたわみ時間差を複合的に用いることが、空洞検出に適していると考えられる。

4. 空洞の位置に対する載荷地点の位置が FWD のたわみに及ぼす影響

(1) FWD 調査概要

a) 調査位置

図-1 に示した B1 区画の空洞中央を原点として、原点から±2.0m の範囲（右方向を正）の 2 側線上で載荷地点を 0.5m ずつ移動させて FWD 調査を実施した。載荷地点ごとの調査実施回数は、夏から秋にかけて計 4 回である。その際の舗装表面温度は 19.7～26.9℃ であった。なお、いずれの調査も航空機荷重が 30 回作用した後の状況である。表-3 に各 FWD 調査時の走行試験実施状況を示す。

B1 での調査結果の比較対象として、走行回数が比較的近い C1 での結果（表-3 に示す調査 1 回目と 2 回目、調査時の表面温度 25.9～28.9℃）も次節で示す。

b) 載荷条件

載荷条件は前章と同じである。なお、載荷地点が-2.0m の場合、後方に十分なスペースがなく、1500mm と 2500mm のたわみセンサを取り外して調査を実施したため、1500mm と 2500mm のデータは取得していない。

(2) 調査結果

ここでは、前章において空洞の有無による違いが比較的明瞭であった 1500mm の計測点の最大たわみとたわみ時間差に関する結果を示す。

a) 最大たわみ

図-12 に、各載荷地点での D_{1500} を示す。載荷地点ごとに D_x の変動はあるものの、載荷地点が空洞上の場合の D_{1500} の平均値は、C1 よりも大きく、特に空洞中央の場合に大きかった。

また、載荷地点が空洞端より外側（以下、空洞周辺）の場合の D_{1500} の平均値も、C1 より大きかった。既往の研究¹⁴⁾において、空洞やその周囲の密度の低下している領域¹⁵⁾（以下、ゆるみ）が存在すると推定される範囲の端から、載荷地点が 2.0m 離れた位置であっても、 D_{1500} が比較的大きい値を示すことが確認されている。このことから、本調査でも、空洞やその周囲のゆるみによって、載荷地点が空洞周辺の場合に D_{1500} が大きい値を示した

と考えられる。

なお、C1 と各地点との平均値の差に関して検定を行ったところ、全地点で有意な差であることを確認した。

また、載荷地点ごとの D_x の変動要因として、空洞の変化や舗装温度等の影響が考えられるが、時間経過に伴う D_x の変化に明確な傾向を確認できなかったため、空洞の変化が影響しているとは考えにくい。次項の Δt_{1500} についても同様である。

b) たわみ時間差

図-13 に、各載荷地点での Δt_{1500} を示す。空洞中央での Δt_{1500} に極端に小さい値が確認されるが、これは、車輪走行後の路面の凹凸にたわみセンサが適切に接触していなかった可能性が考えられるため、以後、異常値として扱

表-3 各 FWD 調査時の走行試験実施状況

B1		C1		備考
調査 1 回目	30回 走行後	調査 1 回目	走行試験 未実施	・B1の比較対象として、C1での調査 1 回目と 2 回目の結果を採用し、3 回目以降の結果（網掛けセル）は棄却
調査 2 回目		調査 2 回目	200回 走行後	
調査 3 回目		調査 3 回目	500回 走行後	
調査 4 回目		調査 4 回目	1500回 走行後	
		調査 5 回目	2500回 走行後

図-12 各載荷地点での最大たわみ D_{1500}

図-13 各載荷地点でのたわみ時間差 Δt_{1500}

うこととする。載荷地点ごとに Δt_{1500} の変動があるものの、載荷地点が空洞上の場合の Δt_{1500} の平均値は、C1よりも小さく、特に空洞中央の場合に小さかった。また、載荷地点が空洞周辺の場合の Δt_{1500} の平均値は、C1と同程度もしくはそれ以下であったが、前項の D_{1500} のような、C1と空洞周辺との明確な差は確認されなかった。

なお、C1と各地点との平均値の差に関して検定を行ったところ、空洞中央、空洞中央から+0.5mおよび+2.0mは有意な差であった。

以上の結果をまとめると、載荷地点が空洞上の場合には、 D_{1500} が大きく Δt_{1500} が小さい値を示し、 D_{1500} については、載荷地点が空洞周辺の場合でも大きい値を示すことが示唆される。この傾向によれば、空洞の存在が疑われる場所付近で複数点載荷することによって、空洞のおおよその位置を把握できる可能性がある。

5. まとめ

本研究では、空洞を有するアスファルト試験舗装を製作し、空洞の存在および空洞の位置に対する載荷地点の位置がFWDのたわみに及ぼす影響を調査した。得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 路床に空洞がある場合、最大たわみおよび正規化たわみは大きく、たわみ時間差は小さくなることを示した。特に、載荷板中心から1500mmの計測点における最大たわみとたわみ時間差の関係に基づく、空洞の有無や空洞幅の違いが表れる。
- (2) 載荷地点が空洞上の場合、特に、空洞中央の場合には、 D_{1500} は大きく Δt_{1500} は小さくなる。また、 D_{1500} は、載荷地点が空洞周辺の場合でも、空洞やその周囲のゆるみの影響によって大きくなる。

6. おわりに

本研究より、たわみ時間差については、コンクリート舗装のみならず、アスファルト舗装における空洞検出指標としても適用できると考えられる。この指標は、高度なデータ処理アプリケーションに頼ることなく、FWD調査直後に容易に計算可能であることから、地震直後のような迅速な評価が求められる場面において有用性が高いと考えられる。

ただし、同一構造の舗装範囲における調査であっても、様々な要因に起因してたわみがばらつくことは避けられず、空洞の深さや大きさによっては、空洞がある箇所と

空洞がない箇所とで差が表れにくいことも有り得る。今後は、最大たわみおよびたわみ時間差を複合的に用いたアスファルト舗装の空洞検出方法の妥当性を検証していく予定である。

参考文献

- 1) 坪川将丈, 水上純一, 畑伊織, 前川亮太: 東北地方太平洋沖地震による仙台空港の舗装被害, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol. 68, No. 3, pp. I_123-I_129, 2012.
- 2) 田村敬一, 他 55 名: 平成 19 年 (2007 年) 能登半島地震被害調査報告, 国土技術政策総合研究所資料, Vol. 438, pp. 1-243, 2008.
- 3) 竹内康: 東北地方被災地における舗装の視察結果, アスファルト, Vol. 54, No. 227, pp. 11-17, 2012.
- 4) 佐藤徹, 加藤絵万, 川端雄一郎, 岡崎慎一郎: 港湾施設の空洞化調査に関する報告: 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 70, No. 2, pp. I_552-I_557, 2014.
- 5) 国土交通省航空局・国土交通省国土技術政策総合研究所監修: 空港舗装補修要領及び設計例, (一財) 港湾空港総合技術センター, 2017.
- 6) 元野一生, 今永繁, 藤田浩一, 島野好: 福岡県西方沖地震における港湾施設の被災について, 海洋開発論文集, Vol. 22, pp. 499-504, 2006.
- 7) 坪川将丈, 水上純一: 版下の空洞がコンクリート舗装の FWD たわみに及ぼす影響, 土木学会第 67 回年次学術講演会, V-343, 2012.
- 8) 河村直哉, 坪川将丈, 加藤絵万: FWD によるコンクリート舗装の空洞検出方法, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol. 73, No. 1, pp. 1-11, 2017.
- 9) 坪川将丈, 河村直哉, 竹高麗子: アスファルト舗装内の空洞が FWD たわみに及ぼす影響, 土木学会第 71 回年次学術講演会, V-043, 2016.
- 10) 国土交通省航空局監修: 空港土木工事共通仕様書, (一財) 港湾空港建設技術サービスセンター, 2017.
- 11) 東滋夫, 神谷和明, 富澤健, 金井利浩, 松井邦人: 荷重の相異による舗装挙動に関する基礎的研究, 土木学会舗装工学論文集, Vol. 10, pp. 31-38, 2005.
- 12) 土木学会舗装工学委員会: FWD および小型 FWD 運用の手引き, pp. 14, 2002.
- 13) 丸山暉彦, 姫野賢治, 林 正則: FWD による舗装診断システム, 舗装, Vol. 23, No. 11, pp. 16-20, 1988.
- 14) 秋葉正一, 城本政一, 加納陽輔, 島崎勝, 佐藤克己: 地中レーダーと FWD 試験を併用した舗装診断に関する一考察ー市街地道路に対する簡易評価手法の検討ー, 地盤工学ジャーナル, Vol. 10, No. 2, pp. 317-328, 2015.
- 15) 桑野玲子, 佐藤真理, 瀬良良子: 地番陥没未然防止のための地盤空洞・ゆるみの探知に向けた基礎的検討, 地盤工学ジャーナル, Vol. 5, No. 2, pp. 219-229, 2010.

INFLUENCE OF VOID BENEATH ASPHALT PAVEMENT ON FWD DEFLECTION

Naoya KAWAMURA and Yukitomo TSUBOKAWA

The authors carried out Falling Weight Deflectometer (FWD) test on asphalt test pavement that has voids in subgrade to investigate influence of the voids on deflections gained from the FWD. Followings are the main conclusions; 1) Maximum deflection and standardized deflection increases and peak time deference of maximum deflections decreases when a void exists in subgrade. In particular, maximum deflection at 1500 mm from the center of FWD's loading plate (D_{1500}) and peak time deference between D_0 and D_{1500} clearly changes depending on void width. 2) Void can affects the maximum deflection when the plate is set around the void that does not exist beneath the plate.