FWD によるコンクリート舗装の空洞検出方法

河村 直哉¹・坪川 将丈²・加藤 絵万³

¹正会員 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)
E-mail: kawamura-n92y2@mlit.go.jp

²正会員 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 (同上)
E-mail: tsubokawa-y92y2@mlit.go.jp

³正会員 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 構造研究領域 構造研究グループ (同上)
E-mail: katoh-e@pari.go.jp

FWD (Falling Weight Deflectometer) で得られるコンクリート舗装の応答から、コンクリート版下の空洞を検出する方法を提案することを目的として、空洞を有する空港および港湾施設のコンクリート舗装においてFWD調査を実施し、コンクリート版下の空洞が舗装の応答に及ぼす影響を分析した。その結果に基づき、空洞を検出する指標として、正規化したわみ(載荷板中心と載荷板中心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中心から離れた点のたわみが最大となる時間差)の2指標を提案する。これらの指標を複合的に用いる空洞検出方法は、版中央部、目地部、隅角近傍部および隅角部に適用できると考えられる。

Key Words : concrete pavement, void, FWD, 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)}。コンクリート舗装に空洞が生じた場合、広範囲の空洞であればコンクリート版(以下、版)がその自重で沈下するものの¹⁾、空洞の規模によっては表面に変状が表れない場合もある³⁾。航空機等が表面に変状のない空洞化箇所を走行すると、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、舗装の支持力を評価するとともに、舗装における空洞の有無や位置を把握することが重要である。

舗装の支持力評価はFWD (Falling Weight Deflectometer) で可能であり⁴⁾、空洞の検出は地中レーダで可能である⁵⁾。しかしながら、地震後の空港は早期の運用再開を求められ、時間的制約を踏まえると、FWDと地中レーダ双方の機器を準備して調査を実施することは容易でない。そのため、FWDによって、支持力を評価することに加えて空洞を検出できることが望まれる。

FWDによる空洞検出方法として、八谷ら⁶⁾は、空洞幅の増加に伴い載荷板中心の最大たわみ(以下、 D_0)が大きくなることに着目して、空洞箇所と非空洞箇所の D_0 の

比によって空洞幅を推定する方法を提案している。また、Zengら⁷⁾は、コンクリート舗装に発生する理論たわみを解析的に求め、解析で求めた D_0 に対する実測の D_0 の比に基づいて空洞の有無を判定する方法を提案している。その一方で、 D_0 は、ひび割れ等空洞以外の要因でも大きくなることや同一舗装断面であっても構成材料や層厚のばらつきに起因してばらつくため⁸⁾、空洞の有無の情報がない状態では、 D_0 のみでの空洞検出は困難であるという指摘がある⁹⁾。以上のように、これまでにFWDによる空洞検出方法を検討した研究は数例あり、いずれも D_0 に基づく方法であるが、その検出精度には限界があると考えられる。

そこで本研究は、FWDによる新たな空洞検出方法を提案することを目的として、まず、版下に空洞がある可能性の高いコンクリート舗装においてFWD調査を実施し、版下の空洞が舗装の応答に及ぼす影響を分析した。その結果、正規化したわみ(載荷板中心と載荷板中心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中心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指標である可能性を示した。次に、空洞の平面分布が既知の舗装において、これら2指標の空洞検出指標としての適用性を検証した。

2. 版下の空洞がコンクリート舗装のFWD応答に及ぼす影響の分析

本章では、版下に空洞がある可能性の高い場所において実施したFWD調査の結果を分析し、空洞検出に適用できる可能性のある指標を検討する。

(1) FWD調査場所

調査を実施した舗装は、仙台空港のエプロンの無筋コンクリート舗装である。版の寸法は1辺7.5mの正方形であり、厚さは0.42mである。路盤は粒度調整碎石により構築され、設計支持力係数は 70MN/m^3 であった。目地にはダウエルバーやタイバーが設置されている。

図-1に、エプロンの高さおよびひび割れ発生位置を記載したエプロン平面図を示す。舗装施工当初より、15列と16列の版の目地を境として北側および南側に向けて0.5%の下り勾配が確保されているが、地震時の液状化によって版は局所的に沈下し、それに伴いひび割れが生じた。

沈下は、DD3, D6, F3 および K9 付近で確認された。F3 と K9 においてコアボーリング（直径100mm）により削孔調査を行ったところ、厚さ約0.07mと約0.20mの空洞が版直下に確認されたため、沈下部付近の版直下には空洞があることが示唆される。

FWD調査は、ひび割れや沈下が確認された版を中心に、航空機が駐機する範囲で実施した（図-1の破線範囲）。

(2) FWD調査方法

a) 载荷条件

载荷板直径は0.3mであり、载荷荷重は200kNである。载荷は同一位置にて4回行い、時刻歴（測定間隔0.25ms）でたわみを計測した。なお、载荷1回目のデータについては、载荷板やたわみセンサと路面の接触不安定により測定の際のばらつきが大きいため¹⁰⁾、棄却し、2～4回目のデータを平均化した。たわみの測定点（以下、測定点）は、载荷板中心、中心より200, 300, 450, 600, 750, 900, 1200, 1500および2500mmである。

b) 载荷板設置位置

载荷板の設置位置は版中央部とした。たわみセンサの配置方向は北向きとした。

(3) 分析データの選定

空洞の平面的な分布は不明である。そこで、版下に空洞がある可能性の高い版と低い版を、沈下量と補正 D_0 が相対的に大きい版および小さい版という視点で選定した。補正 D_0 とは、 D_0 と载荷荷重の各平均値から、载荷荷重を200kNとした場合のたわみに補正した値である。

空洞のある可能性が高い版として、沈下量と補正 D_0 が相対的に大きい版のうち、载荷板やたわみセンサ付近にひび割れのない20枚を選定した（以下、沈下版群）。

空洞のある可能性が低い版として、沈下量と補正 D_0 が相対的に小さい版のうち、载荷板やたわみセンサ付近にひび割れのない20枚を選定した（以下、非沈下版群）。

図-1 エプロンの高さおよびひび割れ発生位置¹⁾ (升目は一枚のコンクリート版を示す)

図-2 に、調査した全ての版の沈下量と補正 D_0 の関係を示し、そのうち、選定した版は丸と四角で示す。図の解析 D_0 は、FEM 解析プログラム CPfor で得た D_0 である。解析条件は、版厚 0.42m、版の弾性係数 34,000MPa、路盤支持力 70MN/m³、載荷荷重 200kN、載荷直径 0.3m である。

なお、調査中の気温差は小さかったことから (6.1°C ~ 9.6°C)、沈下版群と非沈下版群では、温度勾配とそれに伴う反りの程度に大差はないと考えられる。そのため、両群のたわみを比較するにあたっては、版ごとの温度勾配が異なることによるたわみの温度補正を行っていない。

(4) FWD による沈下版群と非沈下版群の応答分析

a) 分析項目

沈下版群と非沈下版群の調査結果を種々の項目で整理した結果、分析には2指標を用いることとした。1つは、たわみ形状に着目した正規化たわみであり、載荷板中心の最大たわみに対する、載荷板中心から x mm の最大たわみの比である。式(1)に正規化たわみの定義を示す。

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

ここに、

ND_x : 載荷板中心から x mm の測定点の正規化たわみ

D_x : 載荷板中心から x mm の測定点の最大たわみ(μm)

D_0 : 載荷板中心の最大たわみ (μm)

もう1つは、時刻歴のたわみに着目したたわみ時間差であり、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 のたわみが最大となる時間の差である。式(2)および図-3 に、たわみ時間差の定義を示す。

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

ここに、

Δt_x : 載荷板中心から x mm の測定点のたわみ時間差(ms)

t_x : 載荷板中心から x mm の測定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)

b) 分析結果

図-4 に、載荷板中心から測定点までの距離と正規化たわみの関係を示す。図では、沈下版群と非沈下版群の結果を比較しやすくするために、両群の各プロットを、実際の測定点までの距離から左右にずらして記載した。

測定点までの距離によらず、沈下版群の正規化たわみの平均値は、非沈下版群よりも大きかった。特に沈下版群では、正規化たわみ ND_{200} と ND_{300} が 1.0 以上である版 (D_{200} や D_{300} が D_0 より大きい版) が多く確認された。

図-5 に、載荷板中心から測定点までの距離とたわみ時間差の関係を示す。測定点までの距離によらず、たわみ時間差の平均値は、沈下版群の方が小さかった。空洞がある版では、載荷板から離れた測定点のたわみが大きくなるだけでなく、たわみ時間差が小さくなる可能性がある。

図-2 沈下量と補正 D_0 の関係

図-3 たわみ時間差の定義 (Δt_{1500} の場合)

図-4 正規化たわみ

図-5 たわみ時間差

図-6に、測定点 300mm および 1500mm における正規化たわみとたわみ時間差の関係を一例として示す。どちらの測定点でも沈下版群と非沈下版群の分布に違いが確認された。また、図-4や図-5のように単指標で沈下版群と非沈下版群を比較した場合、両群の分布が重なっていた一方で、図-6に示した2指標による比較では分布は殆ど重なっていない。

なお、本調査では、沈下版群と非沈下版群の温度勾配は同程度であると考えられるため、版に反りが発生していれば、両群で発生していたこととなり、図-6に示した両群の分布は重なると考えられる。しかし、分布は明確に分かれているため、版の反りが2指標に及ぼす影響は小さいと考えられる。

c) 分析結果に関する検定

沈下版群と非沈下版群間の正規化たわみの平均差およびたわみ時間差の平均差が有意であることを確認するために、統計的検定を行った。検定では帰無仮説を「沈下版群と非沈下版群の平均値に差がない」として、母集団の分布を仮定しない Mann-Whitney's U 検定（両側検定、有意水準 5%、以下、検定）を行った。表-1に検定結果を示す。全測定点において、正規化たわみの平均差およびたわみ時間差の平均差は有意であった。

以上の分析および検定結果より、正規化たわみやたわみ時間差は、空洞の検出指標として適用できる可能性があり、特に2指標の併用がより検出に適している可能性がある。

なお、沈下版群と非沈下版群の結果に差が明確に表れた要因として、空洞がある可能性の高い箇所（沈下版群）、空洞がある可能性の低い箇所（非沈下版群）という、両極端な箇所を分析対象としており、その中間については分析対象としていないことによる可能性がある。

(5) 正規化たわみとたわみ時間差の空洞検出指標としての妥当性考察

沈下版群の正規化たわみが大きく、たわみ時間差が小さかった要因は、空洞が発生し路盤の支持力が著しく低下したことであると考えられる。本節では、上記の因果関係を解析的に確認する。

a) 解析条件

解析では、健全な舗装と、版直下の路盤の支持力を著しく低下させた舗装のモデルを作成し（以下、健全モデルと空洞モデル）、動的順解析により FWD 荷重に伴う時刻歴たわみを求め、正規化たわみとたわみ時間差を得た。動的順解析は、動的逆解析プログラム Wave-BALM¹¹⁾のオプションで実施した。

図-7に解析モデルを示す。健全モデルでは、版厚を前述の調査場所と同じ 0.42m とし、路盤以深は単層とみなした。単層の弾性係数は、調査場所の路盤の設計支持力

係数 70MN/m³ から換算した¹²⁾。それ以外の層特性は、既往文献を参考に設定した¹³⁾。空洞モデルでは、削孔調査における空洞厚さを参考に、健全モデルの版直下 0.2m の路盤について、弾性係数、密度および減衰係数を 1% に低減させた。

入力荷重には、実際の載荷板半径と荷重波形を用いた。

b) 解析結果

図-8に解析結果を示す。空洞モデルの正規化たわみは大きく、たわみ時間差は小さく、前述の FWD 調査結果と同様の傾向を得た。路盤に空洞が発生した場合、コンクリート版の厚さ、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、路盤の支持力低下により大きくなることから、荷重の影響範囲は広がる。

a) 測定点 300mm

b) 測定点 1500mm

図-6 正規化たわみとたわみ時間差の関係

表-1 沈下版群と非沈下版群間の各指標の平均差に関する検定結果（有意水準 5%）

a) 正規化たわみ

b) たわみ時間差

	検定結果
ND ₂₀₀	p値<0.05:有意
ND ₃₀₀	p値<0.05:有意
ND ₄₅₀	p値<0.05:有意
ND ₆₀₀	p値<0.05:有意
ND ₇₅₀	p値<0.05:有意
ND ₉₀₀	p値<0.05:有意
ND ₁₂₀₀	p値<0.05:有意
ND ₁₅₀₀	p値<0.05:有意
ND ₂₅₀₀	p値<0.05:有意

	検定結果
Δt ₂₀₀	p値<0.05:有意
Δt ₃₀₀	p値<0.05:有意
Δt ₄₅₀	p値<0.05:有意
Δt ₆₀₀	p値<0.05:有意
Δt ₇₅₀	p値<0.05:有意
Δt ₉₀₀	p値<0.05:有意
Δt ₁₂₀₀	p値<0.05:有意
Δt ₁₅₀₀	p値<0.05:有意
Δt ₂₅₀₀	p値<0.05:有意

これにより、載荷板から離れた位置のたわみの挙動が、載荷板直下のたわみの挙動に近くなり、正規化たわみは大きく、たわみ時間差は小さくなると考えられる。

3. 正規化たわみとたわみ時間差の空洞検出指標としての適用性検証

空洞位置を明らかにした舗装における調査結果に基づき、正規化たわみとたわみ時間差の空洞検出指標としての適用性を検証する。

(1) 調査場所

調査場所は、港湾施設の重力式岸壁のエプロン（全長

図-7 解析モデル

図-8 解析で得た正規化たわみとたわみ時間差

400m)である。図-9に、岸壁の標準断面図とエプロン平面図の一部を示す。舗装構成はコンクリート版および粒状路盤である。版厚は約0.25mであり、路盤の厚さは不明である。版の寸法は一辺約5.0mである。目地にはダウエルバーもしくはタイバーが設置されている。

(2) 地中レーダによる空洞探索

a) 探索概要

探索幅2.5mの地中レーダ（以下、レーダ）を用いて、エプロン全長の空洞をエプロン海側端部より12.5mから17.5mの範囲で探索した（図-9）。この範囲には、版の目地が存在するほか、陥没の生じた版があり、他の箇所よりも空洞が多くある可能性があった。

b) 探索結果

図-10に、推定された空洞の面積の頻度分布を示す。多くの空洞が版直下であり、2枚以上の版に跨る大きさの空洞もあった。本調査では、図-11に示すとおり、版直

図-9 調査した岸壁の標準断面図とエプロン平面図

図-10 レーダで推定された空洞面積の頻度分布

図-11 空洞版群の各版における空洞平面分布 (単位 : m)

下に空洞が確認された版 14 枚 (以下, 空洞版群) について, 正規化たわみとたわみ時間差を指標とした空洞検出の適用性を検証した。また, レーダで空洞が確認されなかった版 10 枚 (以下, 非空洞版群) を比較の対象とした。

レーダによる判定結果の確認のため, 図-11 の 14 枚中 3 枚の版において, 赤塗り範囲で 1 か所ずつコアボーリングにより削孔調査を行い, 全位置で版直下の空洞 (厚さ 0.20~0.25m) を確認した。選定した全 24 枚には陥没およびひび割れは生じていない。

(3) FWD 調査

a) 載荷条件

載荷板直径は 0.3m であり, 載荷荷重は 147kN である。

載荷は同一位置にて 4 回行い, 載荷 1 回目のデータを棄却した。なお, 調査の制約から載荷 2 回目のみ, 時刻歴のたわみデータ (測定間隔 0.25ms) を取得した。たわみの測定点は, 載荷板中心, 中心より 200, 300, 450, 600, 750, 900, 1200, 1500 および 2000mm である。

b) 載荷板設置位置

図-12 に, FWD の載荷板設置位置とたわみセンサの配置方向の模式図を示す。載荷板は, 目地部, 隅角から縦横 1.0m の位置 (以下, 隅角近傍部) および隅角部に設置した。図-11 には空洞版群における実際の載荷板設置位置を示した。なお, 隅角近傍部では, 空洞版群のすべてにおいて載荷板が空洞直上となる。

本調査では, 調査中の気温差は小さかったことから

(9.7℃～12.5℃), 選定した版ごとの温度勾配とそれに伴う反りの程度に大差はないと考えられるため, 版ごとの温度勾配が異なることによるたわみの温度補正は行っていない。また, 調査は冬季の昼間であり, 版が反っていたとしても上に凸の変形であるため, 版の反りが目地付近のたわみに及ぼす影響は小さいと考えられる。

(4) FWD 調査結果

以下では, 目地部, 隅角近傍部および隅角部について, 空洞版群と非空洞版群の正規化たわみ, もしくは, たわみ時間差を比較する。

a) 目地部

図-13 に載荷板中心から測定点までの距離と正規化たわみの関係を示し, 図-14 には載荷板中心から測定点ま

図-12 載荷板設置位置とたわみセンサの配置方向

図-13 目地部の正規化たわみ

図-14 目地部のたわみ時間差

での距離とたわみ時間差の関係を示す。測定点までの距離によらず, 空洞版群の方が正規化たわみの平均値は大きく, たわみ時間差の平均値は小さかった。

図-15 に, 測定点 300mm および 1500mm における正規化たわみとたわみ時間差の関係を一例として示す。300mm では空洞版群と非空洞版群の 2 群の分布に明確な違いは確認されなかった。1500mm では空洞版群の分布は相対的に左上方に位置した。

ここで, 全測定点について 2 群間の正規化たわみの平均差およびたわみ時間差の平均差に関する検定を行った。表-2 に結果を示す。正規化たわみの平均差は全測定点で有意であり, たわみ時間差の平均差は 450mm 以上の測定点で有意であった。300mm 以内の測定点においてたわみ時間差に有意差が確認されなかった要因として, たわ

a) 測定点 300mm

b) 測定点 1500mm

図-15 目地部の正規化たわみとたわみ時間差の関係

表-2 目地部の空洞版群と非空洞版群間の各指標の平均差に関する検定結果（有意水準 5%）

a) 正規化たわみ

	検定結果
ND ₂₀₀	p値<0.05:有意
ND ₃₀₀	p値<0.05:有意
ND ₄₅₀	p値<0.05:有意
ND ₆₀₀	p値<0.05:有意
ND ₇₅₀	p値<0.05:有意
ND ₉₀₀	p値<0.05:有意
ND ₁₂₀₀	p値<0.05:有意
ND ₁₅₀₀	p値<0.05:有意
ND ₂₀₀₀	p値<0.05:有意

b) たわみ時間差

	検定結果
Δt ₂₀₀	p値>0.05
Δt ₃₀₀	p値>0.05
Δt ₄₅₀	p値<0.05:有意
Δt ₆₀₀	p値<0.05:有意
Δt ₇₅₀	p値<0.05:有意
Δt ₉₀₀	p値<0.05:有意
Δt ₁₂₀₀	p値<0.05:有意
Δt ₁₅₀₀	p値<0.05:有意
Δt ₂₀₀₀	p値<0.05:有意

み時間差がサンプリング間隔 (0.25ms)に近い 0.25～0.75ms であったためと考えられる。

b) 隅角近傍部

図-16 に、測定点 300mm および 1500mm における正規化たわみとたわみ時間差の関係を一例として示す。300mm, 1500mm とともに、2 群間の正規化たわみには明確な違いは確認されなかったが、たわみ時間差では空洞版群が小さい傾向であった。

ここで、全測定点について 2 群間の各指標の平均差に関する検定を行った。表-3 に結果を示す。正規化たわみの平均差は、全測定点で有意でなかった。一方、たわみ時間差の平均差は、200mm 以外の測定点で有意であった。これより、たわみ時間差は正規化たわみよりも空洞の存

在に対して鋭敏であると示唆される。

c) 隅角部

図-17 に、測定点 300mm および 1500mm の正規化たわみとたわみ時間差の関係を示す。300mm と 1500mm は、それぞれ目地部の傾向と同様であった。

ここで、全測定点について 2 群間の各指標の平均差に関する検定を行った。表-4 に結果を示す。正規化たわみの平均差は 1500mm 以下の測定点で有意であり、たわみ時間差の平均差は 450mm 以上の測定点で有意であった。

(5) 調査結果の分析

a) FWD の結果に基づく空洞有無の追加確認

レーダで空洞があると判定された版と空洞がないと判

a) 測定点 300mm

b) 測定点 1500mm

図-16 隅角近傍部の正規化たわみとたわみ時間差の関係

表-3 隅角近傍部の空洞版群と非空洞版群間の各指標の平均差に関する検定結果 (有意水準 5%)

a) 正規化たわみ		b) たわみ時間差	
	検定結果		検定結果
ND ₂₀₀	p値>0.05	Δt ₂₀₀	p値>0.05
ND ₃₀₀	p値>0.05	Δt ₃₀₀	p値<0.05:有意
ND ₄₅₀	p値>0.05	Δt ₄₅₀	p値<0.05:有意
ND ₆₀₀	p値>0.05	Δt ₆₀₀	p値<0.05:有意
ND ₇₅₀	p値>0.05	Δt ₇₅₀	p値<0.05:有意
ND ₉₀₀	p値>0.05	Δt ₉₀₀	p値<0.05:有意
ND ₁₂₀₀	p値>0.05	Δt ₁₂₀₀	p値<0.05:有意
ND ₁₅₀₀	p値>0.05	Δt ₁₅₀₀	p値<0.05:有意
ND ₂₀₀₀	p値>0.05	Δt ₂₀₀₀	p値<0.05:有意

a) 測定点 300mm

b) 測定点 1500mm

図-17 隅角部の正規化たわみとたわみ時間差の関係

表-4 隅角部の空洞版群と非空洞版群間の各指標の平均差に関する検定結果 (有意水準 5%)

a) 正規化たわみ		b) たわみ時間差	
	検定結果		検定結果
ND ₂₀₀	p値<0.05:有意	Δt ₂₀₀	p値>0.05
ND ₃₀₀	p値<0.05:有意	Δt ₃₀₀	p値>0.05
ND ₄₅₀	p値<0.05:有意	Δt ₄₅₀	p値<0.05:有意
ND ₆₀₀	p値<0.05:有意	Δt ₆₀₀	p値<0.05:有意
ND ₇₅₀	p値<0.05:有意	Δt ₇₅₀	p値<0.05:有意
ND ₉₀₀	p値<0.05:有意	Δt ₉₀₀	p値<0.05:有意
ND ₁₂₀₀	p値<0.05:有意	Δt ₁₂₀₀	p値<0.05:有意
ND ₁₅₀₀	p値<0.05:有意	Δt ₁₅₀₀	p値<0.05:有意
ND ₂₀₀₀	p値>0.05	Δt ₂₀₀₀	p値<0.05:有意

定された版において、正規化たわみおよびたわみ時間差が同様の値を示す版が確認された（例えば、図-15 b)の Δt_{1500} が1.5~3.0ms付近）。正規化たわみとたわみ時間差の関係を考慮すると、それらの版のレーダによる判定結果は、実際の空洞有無と異なる可能性も考えられる。

そこで、非空洞版群のうち、図-15 b)で Δt_{1500} が1.5~3.0msであった4枚の版の目地部において削孔調査を追加で実施し、空洞有無を確認した。

図-18 に調査結果を示す。4枚ともに空洞が確認された。空洞厚さは3枚で0.01~0.02m、1枚で0.10mであり、空洞版群における削孔調査で確認された空洞厚さよりも薄かった。このことから、正規化たわみおよびたわみ時間差の関係を削孔調査の結果と照らし合わせることで、0.01m程度の厚さの空洞も検出できる可能性がある。

b) 空洞寸法と各種指標の関連性

正規化たわみやたわみ時間差と、空洞の平面寸法の方に相関があれば、空洞の有無だけでなく、その寸法も推測できる可能性がある。そこで、各指標とレーダで判定された空洞の平面寸法の間関係を調べた。

図-19 に隅角近傍部の正規化たわみ ND_{1500} およびたわみ時間差 Δt_{1500} と、センサ配置方向の空洞の長さとの関係を示す。空洞が長くなると、正規化たわみは大きくなり、たわみ時間差は小さくなる傾向であるが、決定係数 R^2 では各指標と空洞の長さの間に相関があるとは言えない。本調査の範囲においては、正規化たわみやたわみ時間差によって、空洞の大きさを推定することは困難であると考えられる。

(6) 正規化たわみとたわみ時間差の空洞検出指標としての適用性考察

a) 正規化たわみおよびたわみ時間差と D_0 の空洞検出感度の比較

正規化たわみやたわみ時間差が、既往研究で空洞検出

図-18 目地部の正規化たわみ ND_{1500} とたわみ時間差 Δt_{1500} の関係（追加の削孔調査で確認後）

指標として検討された D_0 よりも、空洞の存在により影響を受けやすい指標であることを確認するために、空洞版群と非空洞版群間の補正 D_0 の平均差に関する検定を行い、その結果を、前述した正規化たわみやたわみ時間差に関する検定結果と比較することとした。

表-5 に補正 D_0 に関する検定結果と、表-2, 3, 4 に示した検定結果のうち、測定点1500mmにおける正規化たわみとたわみ時間差の結果を一例として示す。

補正 D_0 では、目地部、隅角近傍部および隅角部のいずれでも有意差を確認できなかった。一方、正規化たわみおよびたわみ時間差については、目地部、隅角近傍部および隅角部の殆どで、空洞版群と非空洞版群間で有意差が確認された。このことから、正規化たわみおよびたわみ時間差の方が、空洞と非空洞で差が表れやすく、空洞の存在により影響を受けやすい指標であると考えられる。

ただし、測定点300mmのように、載荷板中心から近い

a) 正規化たわみ ND_{1500}

b) たわみ時間差 Δt_{1500}

図-19 センサ配置方向の空洞の長さとは各種指標の関係

表-5 空洞版群と非空洞版群間の補正 D_0 、正規化たわみ、または、たわみ時間差の平均差に関する検定結果（有意水準5%）

	目地部	隅角近傍部	隅角部
補正 D_0	p値>0.05	p値>0.05	p値>0.05
ND_{1500}	p値<0.05:有意	p値>0.05	p値<0.05:有意
Δt_{1500}	p値<0.05:有意	p値<0.05:有意	p値<0.05:有意

測定点のたわみ時間差では、サンプリング間隔(0.25ms)に近くなり、空洞と非空洞箇所では差が表れ難くなる可能性があることに留意する必要がある。

b) 適用可能箇所

2章および3章の調査結果に基づくと、正規化たわみは、版中央部、目地部および隅角部に位置する空洞の存在により変化し、たわみ時間差については、上記に加え、隅角近傍部に位置する空洞でも変化した。このことから、2つの指標を複合的に用いる空洞検出は、版中央部、目地部、隅角近傍部および隅角部において適用できると考えられる。

また、空港舗装での版厚は0.42mであり、港湾舗装での版厚は0.25mであったことから、本方法は一般的なコンクリート舗装の版厚であれば、版厚によらず適用できる可能性がある。

4. まとめ

空洞を有する空港および港湾コンクリート舗装でFWD調査を実施し、版下の空洞が舗装の応答に及ぼす影響を分析した。その結果をまとめると以下の通りである。

- (1) 空洞の存在により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。これら2指標は、 D_0 よりも版直下の空洞の存在により影響を受けやすい指標であると考えられる。
- (2) 正規化たわみとたわみ時間差を複合的に用いる空洞検出方法は、版中央部、目地部、隅角近傍部および隅角部において適用できると考えられる。また、本方法は一般的なコンクリート舗装の版厚であれば、版厚によらず適用できる可能性がある。
- (3) 載荷板中心からたわみ測定点までの距離が300mm程度でのたわみ時間差は、サンプリング間隔に近くなり、空洞と非空洞箇所では差が表れ難くなる可能性がある。
- (4) センサの配置方向の空洞の長さが0.4mから4.0mの範囲では、空洞の長さ、たわみ時間差や正規化たわみの間に相関を確認できなかった。本研究の範囲では、たわみ時間差やたわみ時間差によって空洞の長さを推定することは困難であると考えられる。
- (5) レーダでは空洞がないと判定された版でも、実際には空洞がある場合があり、正規化たわみおよびたわみ時間差の関係と、削孔調査の結果を照らし合わせることで、空洞があると判定できる可能性がある。

5. おわりに

本研究では、空洞検出に用いる2つの指標を提案したが、2指標に関する空洞検出のための閾値の設定方法は提案できなかった。これについて、現時点では2つの設定方法を考えている。

1つは、2章で実施した解析のように、評価の対象とする舗装各層の厚さや材料定数を用いて時刻歴のたわみ波形を解析的に求め、正規化たわみやたわみ時間差を導出し、それらを閾値とする方法である。

もう1つは、正規化たわみおよびたわみ時間差の関係と、削孔調査の結果を照らし合わせて、分布の境界線を技術者が暫定的に設定する方法である。

今後、閾値の設定方法や設定した閾値による空洞判定の正答率を検討することにより、2指標を用いた空洞判定方法の妥当性を検証する予定であるが、空洞の厚さや大きさによっては判別しにくい中間的なデータがあることは避けられないと考えられる。したがって、現時点では本方法は、空洞有無の可能性の一次スクリーニング手法として活用できると考えられる。

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) 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.
- 4) 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)港湾空港建設技術サービスセンター, 2011.
- 5) 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.
- 6) 八谷好高, 坂井典和, 廣田道紀, 高橋修: 200kN荷重のFWDによる空港コンクリート舗装の非破壊構造評価, 土木学会舗装工学論文集, pp. 199-208, 1999.
- 7) Sheng, Z., Jia, X. and Xiaojun, Z.: Analysis on criterion for void identifying under cement concrete pavement corner, In: *New Technologies in Construction and Rehabilitation of Portland Cement Concrete Pavement and Bridge Deck Pavement*, pp. 125-132, 2009.
- 8) FWD研究会: 2000年度報告書「FWDに関する研究」, 2000.
- 9) 城本政一, 青木政樹, 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路, 土木学会論文集E1(舗装工学), Vol. 69, No. 3, pp. I_167-I_173, 2013.
- 10) 土木学会舗装工学委員会: FWDおよび小型FWD運用の手引き, (社)土木学会, 2002.
- 11) 小澤良明, 松井邦人: フォークトモデルで構成された

舗装構造の波動伝播解析, 土木学会論文集 E, Vol. 64, No. 2, pp. 314-322, 2008.

- 12) 竹内康, 小梁川雅, 牧恒雄, 丸山暉彦, 木村慎: コンクリート舗装における路盤 K 値と弾性係数の換算式に関する実験的研究, 土木学会論文集 E, Vol. 50, No.

669, pp. 17-25, 2001.

- 13) 土木学会舗装工学委員会: 非破壊試験による舗装のたわみ測定と構造評価, (社) 土木学会, 2015.

(2016. 9. 16 受付)

DETECTION METHOD OF VOIDS UNDER CONCRETE SLAB BY USING FWD

Naoya KAWAMURA, Yukitomo TSUBOKAWA and Ema KATO

This paper proposes a method for detecting void that occurred under concrete pavement slab on the basis of pavement's response gained from Falling Weight Deflectometer (FWD). FWD tests were carried out on airport and port concrete pavements that have voids under their concrete slabs. Then, the test results were analyzed to clarify influences of void on the response of concrete pavement. As a result, the authors found out that two index: normalized deflection and peak time difference of deflection can be used for detecting voids underneath concrete slabs, which were more sophisticated indexes to detect void when they were compared with maximum deflection of the center of loading plate. The two indexes are applicable to any thickness of concrete slab and in any distance from concrete joint.