

FWD を用いた舗装内部の空洞検出方法について

国土交通省 国土技術政策総合研究所 空港研究部 河村 直哉
国土技術政策総合研究所 空港研究部 空港施設研究室 坪川 将丈

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。空港舗装に空洞が生じた場合、広範囲の空洞であれば舗装が自重で沈下するものの、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。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、空洞の検出は地中レーダで可能である。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。

本稿では、FWDによる空洞検出方法を提案することを

目的として、コンクリート舗装とアスファルト舗装において実施したFWD調査結果を分析した結果を報告する。

2. 版下に空洞が生じたコンクリート舗装でのFWD調査

本章では、コンクリート版の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した。

(1) FWD の調査場所

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。コンクリート版（以下、版）の寸法は1辺7.5mの正方形であり、厚さは0.42mである。路盤は粒度調整砕石により構築され、設計支持力係数は70MN/m³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

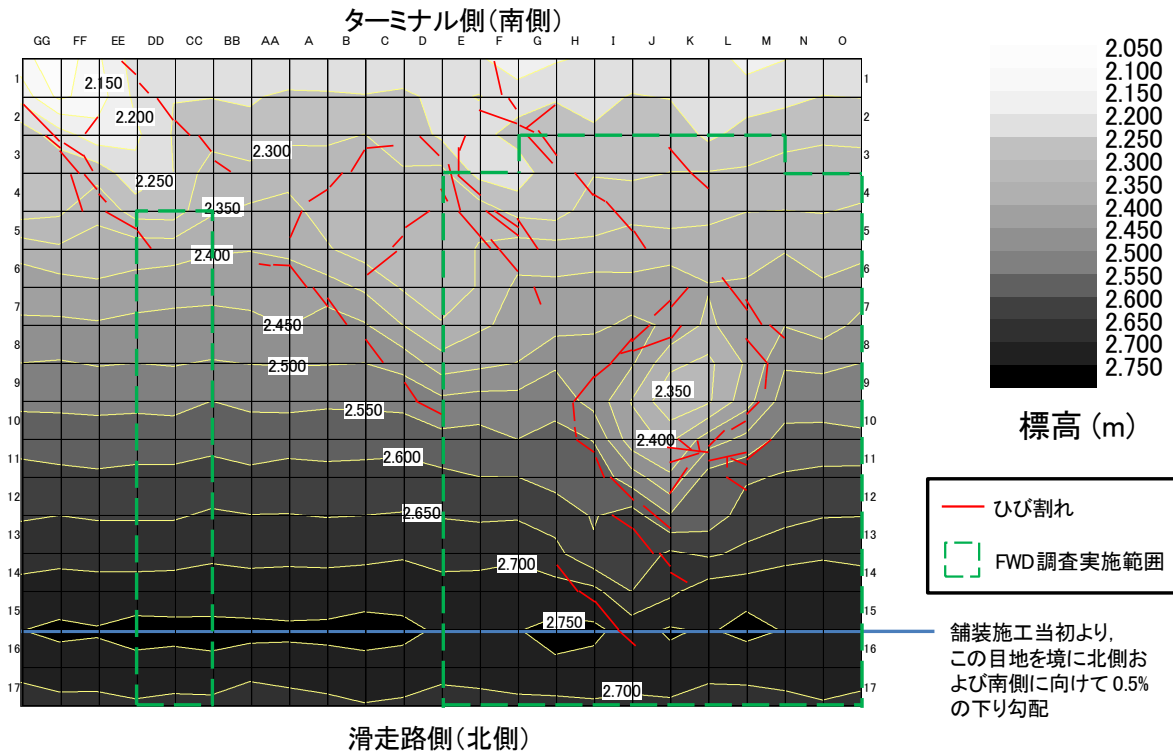


図-1 エプロンの高さおよびひび割れ発生位置 (升目は一枚のコンクリート版を示す)

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 の調査方法

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 回目のデータを棄却し、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)。

(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、载荷板中心の最大たわみに対する、载荷板中心から 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 : 载荷板中心から x mm の測定点の正規化たわみ

D_x : 载荷板中心から x mm の測定点の最大たわみ (μm)

D_0 : 载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、载荷板中心のたわみが最大となる時間と载荷板中心から 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-2 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 : 载荷板中心から x mm の測定点のたわみ時間差 (ms)

t_x : 载荷板中心から x mm の測定点のたわみが最大となる時間 (ms)

t_0 : 载荷板中心のたわみが最大となる時間 (ms)

b) 分析結果

図-3 に、各測定点における正規化たわみを示す。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-4 に、各測定点におけるたわみ時間差を示す。測定

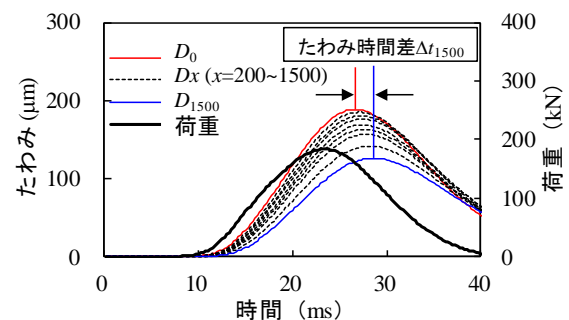


図-2 たわみ時間差の定義 (Δt_{1500} の場合)

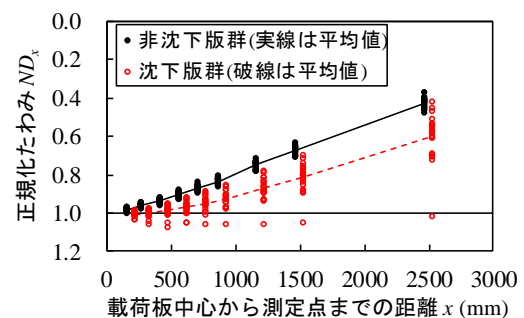


図-3 正規化たわみ

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と考えられる。

図-5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-3や図-4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-5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。

(5) 空洞が正規化たわみとたわみ時間差に及ぼす影響
コンクリート版直下に空洞がある場合には、図-6に

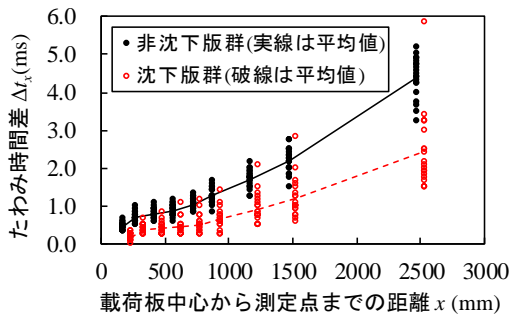
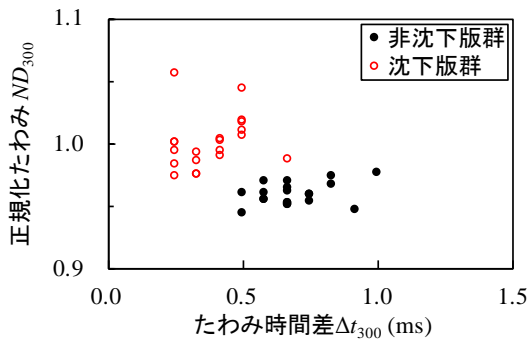
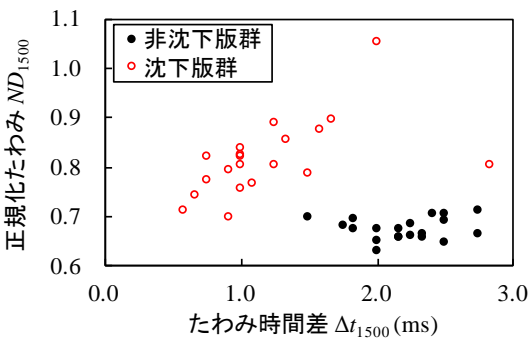


図-4 各測定点におけるたわみ時間差



a) 測定点 300mm



b) 測定点 1500mm

図-5 正規化たわみとたわみ時間差の関係

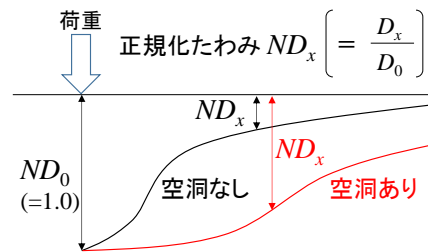
示すように、正規化たわみは大きく、たわみ時間差は小さくなると考えられる。これは、コンクリート版の厚さ、弾性係数、ポアソン比および路盤の支持力係数より計算される剛比半径が、空洞に起因する路盤の支持力低下で大きくなることから、荷重の影響範囲が水平方向に広がり、載荷板から離れた点のたわみの挙動が、載荷板中心のたわみの挙動に近くなるためであると考えられる。

3. 空洞を有するアスファルト舗装での FWD 調査

本章では、コンクリート舗装における FWD 調査で得られた空洞の検出指標がアスファルト舗装においても適用可能か検討するために、空洞を有するアスファルト試験舗装を製作し、FWD 調査を行った。

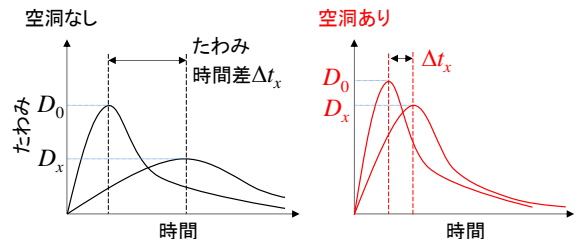
(1) アスファルト試験舗装

図-7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。各層に使用したアスファルト混合物と粒状材料の品質は、空港土木工事共通仕様書を満足するものとした。



空洞があると正規化たわみは大きくなる

a) 正規化たわみ

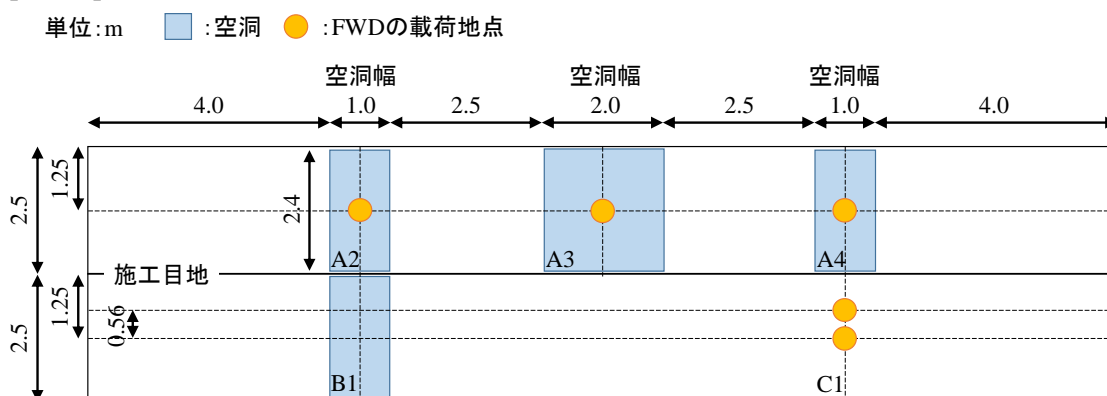


空洞があるとたわみ時間差は小さくなる

b) たわみ時間差

図-6 コンクリート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

【平面図】



【断面図】

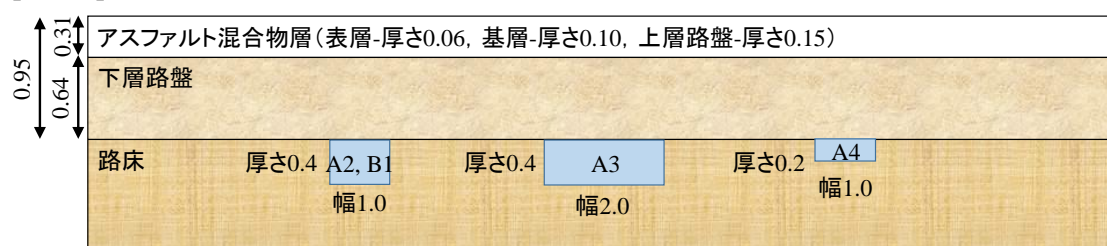


図-7 試験舗装の平面図と断面図

(2) 空洞の製作

図-7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（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。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。

(3) FWD 調査の概要

a) 調査位置

FWDの载荷地点は、図-7に示すとおり、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。

载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、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。

b) 载荷条件

载荷板直径は0.45m、载荷荷重は196kNであり、载荷地点ごとに2回载荷を行い、時刻歴（計測間隔0.2ms）でたわみを計測した。

たわみセンサの配置方向は、図-7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、载荷板中心、中心より300, 450, 600, 900, 1200, 1500および2500mmである。

(4) 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正規化たわみ（式(1)）とたわみ時間差（式(2)）を用いた。

(5) 調査結果

a) 最大たわみ

図-8に、調査1回目に得られた D_x を载荷地点ごとに示す。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载荷地点ごとの舗装温度の違いによ

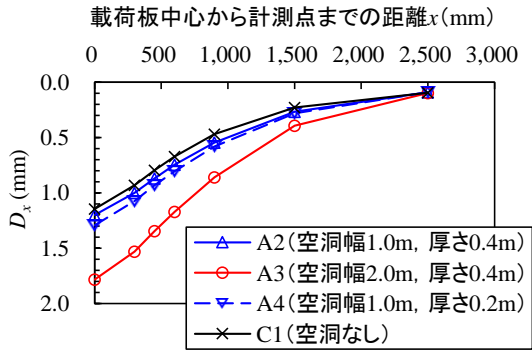


図-8 最大たわみ D_x

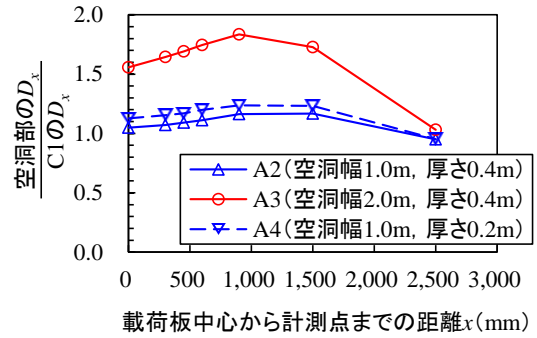


図-9 C1に対するA2,A3,A4の最大たわみ D_x の比

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-9に示す。空洞の大きさによらず、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。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、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。

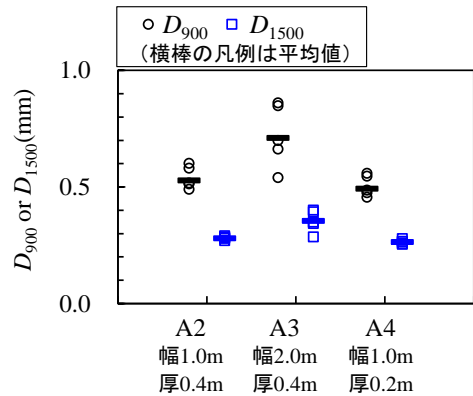


図-10 最大たわみ D_{900} および D_{1500}

図-10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。荷板地点ごとに 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。

b) 正規化たわみ

図-11に、調査1回目に得られた ND_x を荷板地点ごとに示す。A2~A4での ND_{300} ~ 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。

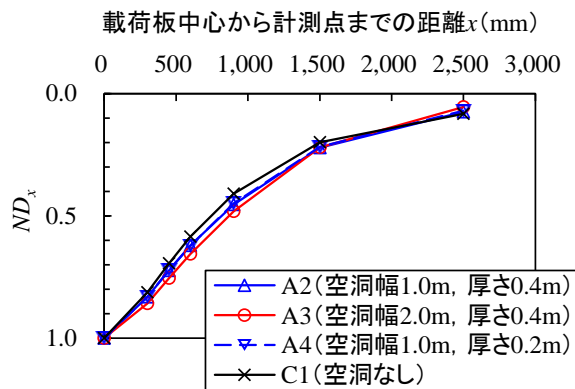


図-11 正規化たわみ ND_x

図-12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が挙げられる。

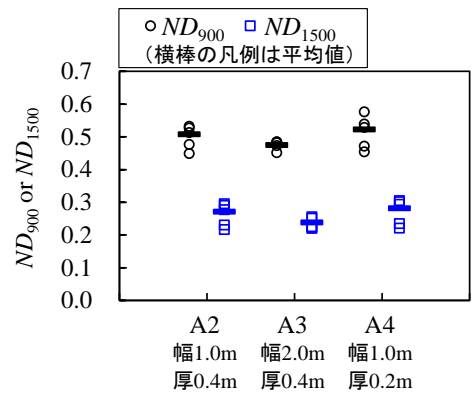


図-12 正規化たわみ ND_{900} および ND_{1500}

c) たわみ時間差

図-13に、調査1回目に得られた Δt_x を荷板地点ごとに示す。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-14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。荷重地点ごとに Δt_x の変動があり、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。

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、荷重板中心から900mmと1500mmの計測点における両指標の関係を図-15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。

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、特に荷重板中心から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、荷重板中心から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. まとめ

空洞を有するコンクリート舗装とアスファルト舗装においてFWD調査を実施し、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) コンクリート舗装の場合、空洞の存在により正規化したたわみは大きく、たわみ時間差は小さくなることを示した。これら2指標を複合的に用いることにより、コンクリート版直下の空洞を検出できる可能性がある。
- (2) アスファルト舗装の路床に空洞がある場合、最大たわみおよび正規化したたわみは大きく、たわみ時間差は小さくなることを示した。特に、荷重板中心から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。

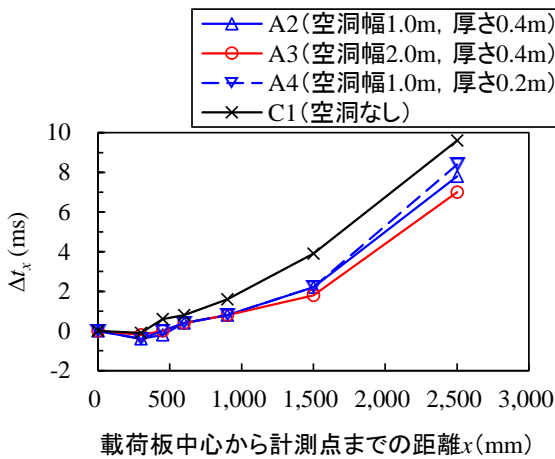


図-13 たわみ時間差 Δt_x

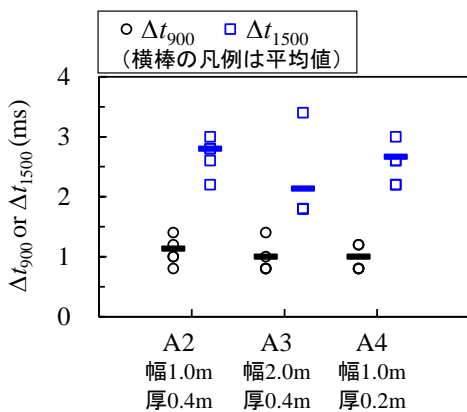
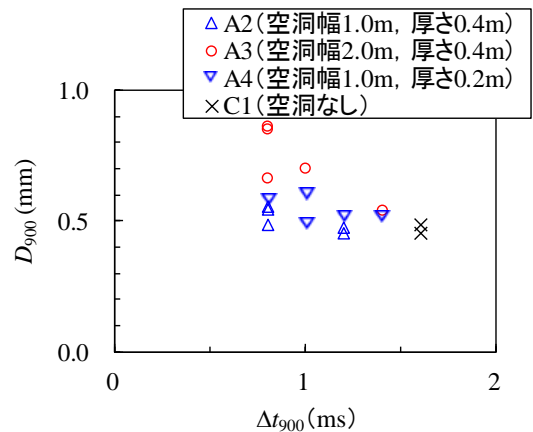
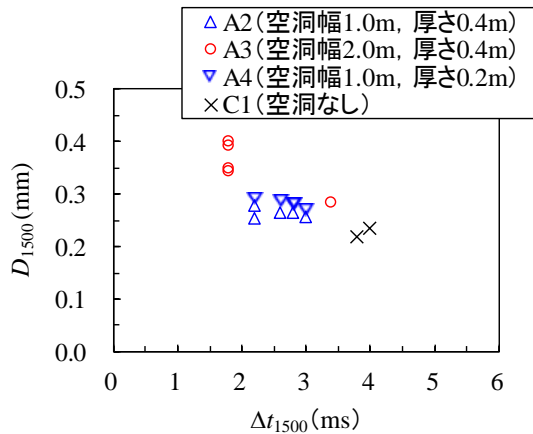


図-14 たわみ時間差 Δt_{900} および Δt_{1500}



a) 荷重板中心から900mmの計測点



b) 荷重板中心から1500mmの計測点

図-15 最大たわみとたわみ時間差の関係