

FWD 試験による栈橋上の舗装構造評価 のための基礎的検討

川名太¹・前川亮太²・鈴木紀慶³

¹正会員 博士(工学) 独立行政法人港湾空港技術研究所(〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)

E-mail : kawana-h@pari.go.jp

²正会員 工修 独立行政法人港湾空港技術研究所(〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)

³正会員 国土交通省関東地方整備局東京空港整備事務所(〒144-0041 東京都大田区羽田空港 3-5-7)

東京国際空港のD滑走路は、埋立地盤と栈橋を併用した新空港島に建設される。栈橋上に滑走路が施工される事例は、我が国でははじめてであり、床版を含めた栈橋上の舗装の健全度評価手法の確立は、早急に解決すべき課題の一つである。舗装の健全度評価の手法としてFWD試験があるが、栈橋上の舗装構造評価への適用性については、検討がなされていない。そこで、本検討では、栈橋上に施工された舗装の健全性点検技術を確認するための基礎資料を得ることを目的として、床版上で、FWD試験を実施し、衝撃荷重に対する床版の応答性状を把握することとした。FWD試験の結果、D0たわみについて施設ごとに顕著な差異が確認でき、栈橋を含めた舗装構造評価の指標として活用できる可能性が示された。

Key Words : FWD test, Time history of deflection, Natural frequency, slab

1. はじめに

新たに整備が進められている東京国際空港D滑走路は、埋立地盤と栈橋を併用した新空港島に建設される。栈橋上に滑走路を施工する事例は、我が国でははじめてであり、栈橋の床版を含めた舗装の健全度評価手法の確立は、早期に解決すべき課題の一つである。

舗装構造の健全度評価に用いられる非破壊試験法には、FWD試験があるが¹⁾²⁾、この手法は、地盤上の舗装の健全度評価に対しては実績があるものの、栈橋上の舗装に適用した事例はほとんどなく、栈橋上の舗装構造評価に適用が可能であるか否かは定かではない。また、適用が可能であった場合、床版の固有振動や自重によるたわみが解析結果に与える影響を明らかにする必要がある。

類似の構造に対するたわみ計測の例として、橋梁の床版を対象に、衝撃的な荷重に対する床版上及び主桁上での自由減衰振動を計測し、主桁の曲げ振動およびねじれ振動を考慮して、床版のたわみを評価している事例がある³⁾。しかしながら、この手法は、空港舗装の構造評価に適用された事例が無く、荷重等の設定において不利となることが考えられるため、ここでは、既存の空港舗装の構造評価に対応したFWD試験機を用いることとした。本論文では、栈橋上に施工された舗装の健全性点検技術を

確立するための基礎資料を得ることを目的として、床版上で、FWD試験を実施し、衝撃荷重に対する床版の応答性状を把握することとした。

2. FWD試験による床版のたわみ量測定

D滑走路の栈橋部において舗装構造の健全性評価を行うためには、舗装を支持する床版の荷重に対する応答特性を把握しておく必要がある。そこで、衝撃的な荷重に対する床版のたわみの発生状況および振動性状の把握を目的として、床版上でFWD試験を実施した。

FWDによるたわみ測定は、空港舗装の構造評価に対応したFWD測定機を用いて実施した。試験に使用したFWD試験機およびその仕様をそれぞれ写真-1および表-1に示す。荷重条件は載荷板直径を450mmとし、空港舗装に対する標準荷重196kNの衝撃荷重を与えている⁴⁾。たわみの測定は、載荷板中央及び中央より300, 450, 600, 900, 1500, 2500mmの計7点の位置に、差動トランス式の変位センサ(LVDT)を設置して行い、載荷にともなうたわみの時系列を得た。なお、サンプリング周波数は、5000Hzまたは2000Hzとし、用途に応じて、0.2~8秒間のたわみデータの収集を行った。試験は、図-1に示すD滑走路の栈橋部及び連絡誘導路部において実施した。D



写真-1 空港舗装構造評価に対応したFWD試験機

表-1 FWD試験機仕様

項 目	内 容			
衝撃荷重発生装置	2マス落錘式			
①衝撃荷重	100, 150, 200, 250kNの4段階			
②載荷版	直径450mm(4分割)			
③駆動方式	油圧シリンダ(車両PTO)およびマグネット式			
計測装置				
①載荷荷重	圧力変換器 100, 150, 200, 250kN			
②たわみ・振動計	方式	差動トランス方式変位センサ(LVDT)		
	センサの配置	設置位置	計測範囲	
		第1センサ/載荷版中心から	-450mm	5.0mm
		第2センサ/載荷版中心から	-300mm	5.0mm
		第3センサ/載荷版中心		5.0mm
		第4センサ/載荷版中心から	300mm	5.0mm
		第5センサ/載荷版中心から	450mm	5.0mm
		第6センサ/載荷版中心から	600mm	2.5mm
		第7センサ/載荷版中心から	900mm	2.5mm
		第8センサ/載荷版中心から	1500mm	2.5mm
	第9センサ/載荷版中心から	2500mm	2.5mm	
③温度	測定対象	方式	計測範囲	計測精度
	気温	ICセンサ	-10℃～+100℃	±1℃
	路面温度	非接触型	-30℃～+70℃	±1℃

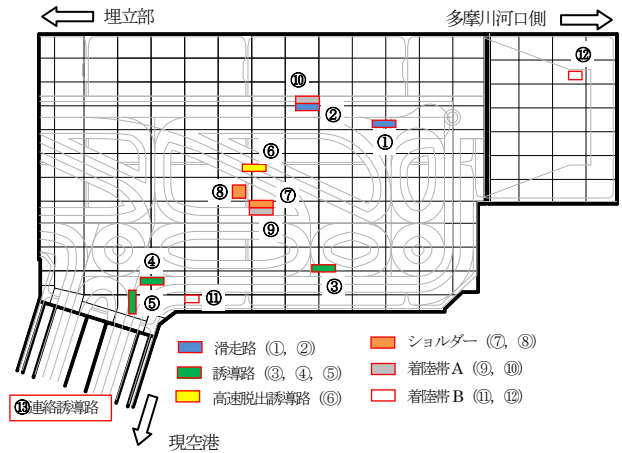


図-1 東京国際空港D滑走路（栈橋部）

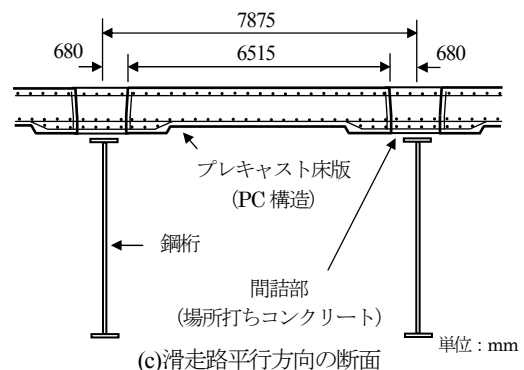
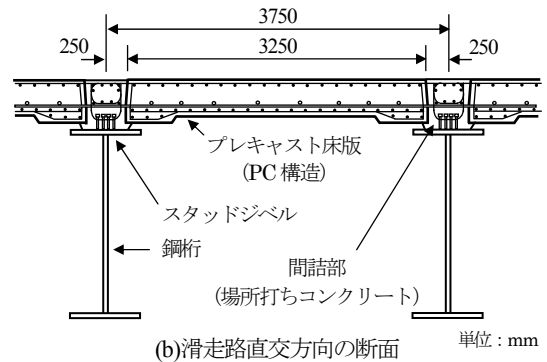
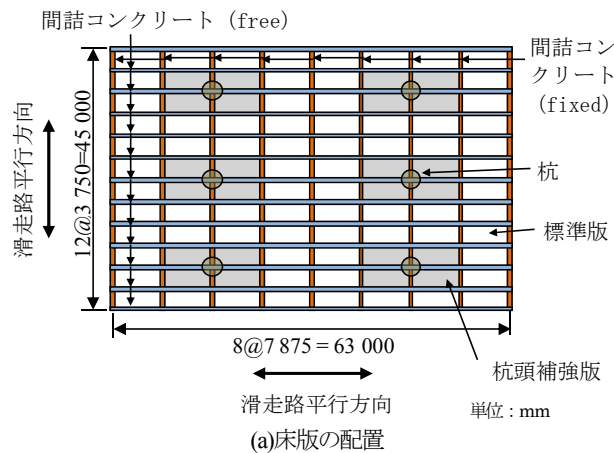


図-2 栈橋部の床版の配置および断面

滑走路の栈橋部は、新空港島の多摩川の河口側 1,100m の区間に位置し、198 基の栈橋から構成されている。栈橋の構造形式は、ジャケット式栈橋が採用されており、基礎杭、鋼管トラス上部構造及び鋼管トラス下部構造からなる鋼製部材により、8×12 枚のプレストレストコンクリート床版を支持する構造で、床版間は、場所打ちコンクリートで間詰めされている。栈橋部の床版の配置及び断面の概略図を、図-2 に示す。図-2 (b) に示される通り、滑走路平行方向に配置されている鋼桁上には、スタッドジベルが配置されており、間詰コンクリートを打設することで、鋼桁と床版が一体化されている。なお、滑走路直交方向に配置されている鋼桁と床版の縁は切れているため、構造上は、床版は一方版として挙動する。新空港島と現空港を結ぶ連絡誘導路（延長 630m）は、栈橋構造と橋梁構造の複合構造となっており、その栈橋部は、下部が鋼製ジャケット構造、上部が PC 梁スラブ構造で、受梁、床版の架設後、プレストレスを与えて一体化させた構造となっている。連絡誘導路部の床版の配置及び断面の概略図は、図-3 の通りである。

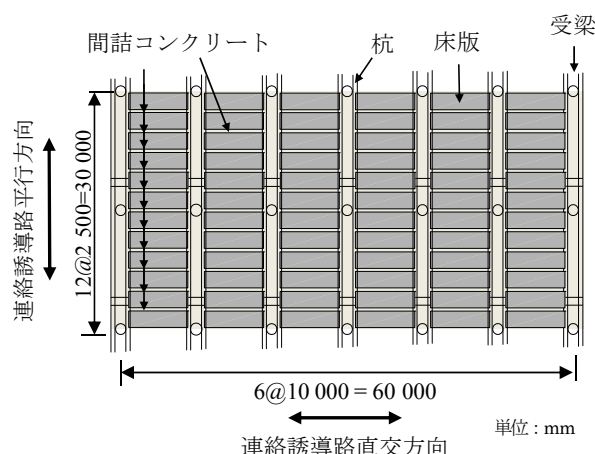
栈橋部の床版は、滑走路、誘導路または着陸帯などの空港施設ごと、また、栈橋の杭を囲う床版（以下、杭頭補強版という）とそれ以外の床版（以下、標準版という）とで、版厚や配筋等が異なる。さらに、杭頭補強版同士

の床版間の間詰部はPC構造、その他の間詰部はRC構造となっており、床版間の荷重伝達機能などに差異がある。よって、FWD試験は、空港施設及び標準版、杭頭補強版といった床版の構造の違い等に留意して、計93地点の床版上において実施した。また、床版の応答は、床版のいずれの位置を載荷するかでも大きく異なる。本研究では、床版の応答特性を把握することを目的とすることから、床版の中央、間詰コンクリート上及び杭頭において、載荷を行うものとした。

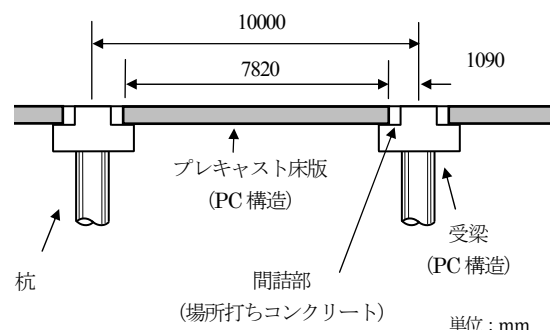
3. FWD 試験結果

図-4に、FWD試験で得られた代表的なたわみの時系列を示す。図中、載荷版直下のたわみを D_0 （以下、 D_0 たわみという）、載荷版中央からの距離に応じて、たわみを $D_{300} \sim D_{2500}$ のように表わしている。ここでは、0～2.0秒までの計測記録のみを示している。図-4(a)は、誘導路部において、床版の中央を載荷して得られた結果である。何れの測定位置の記録についても、載荷に伴い最大のたわみが生じ、その後、ほぼ一定の周期で振動していることが確認される。図-4(b)は、(a)の近傍に位置する杭上で載荷した結果である。応答値は、床版の中央を載荷した場合に比べ、極めて小さいことが確認できる。図-4(c)及び(d)は、それぞれ着陸帯B部及び連絡誘導路部で得られた記録である。なお、図-4(c)の D_{1500} の記録は、一部欠損があったため、表示していない。着陸帯B部の床版は、床版の形式が異なり、他の施設と比べて曲げ剛性が小さいため、たわみ量が多い。連絡誘導路部の結果は、他の施設と比べて、後続の振動が不明瞭である。

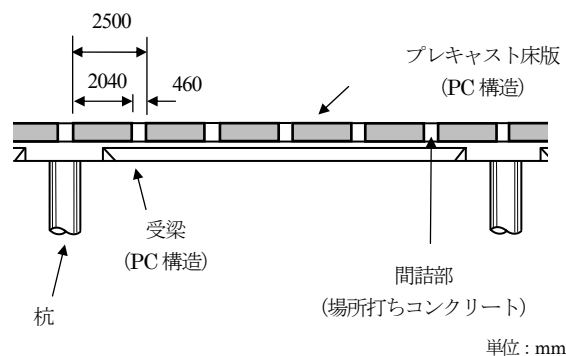
図-5に、各測点におけるたわみの時系列より最大値を抽出し、載荷版からの距離に応じてまとめたものを示す（以下、たわみ曲線という）。なお、載荷荷重は、空港における舗装構造評価で一般的に用いられている標準荷重196kNを目標としたが、載荷地点によって、最大で±10kN程度の差が生じていたことから、ここに示すたわみは、載荷荷重の大きさの影響を除去するために、比例計算によって標準荷重に対するたわみに補正したものである。また、図中に、試験実施位置を併記する。図-5(a)は、滑走路部の床版において、床版の中央を載荷した場合の結果である。なお、たわみセンサは、滑走路に対して平行方向に配置している。図に示す通り、①、②及び⑤は標準版、③及び④は杭頭補強版上で得られたたわみ曲線である。また、⑥から⑨は、別の栈橋の標準版上で得られたたわみ曲線である。標準版と杭頭補強版の結果を比較すると、杭頭補強版のほうが床版に生じるたわみが小さいことがわかる。標準版におけるたわみ曲線は、床版及び栈橋ごとでばらつきは小さいが、杭頭補強版については、載荷位置から距離が離れるにつれて、たわみに差が



(a)連絡誘導路部の床版の配置



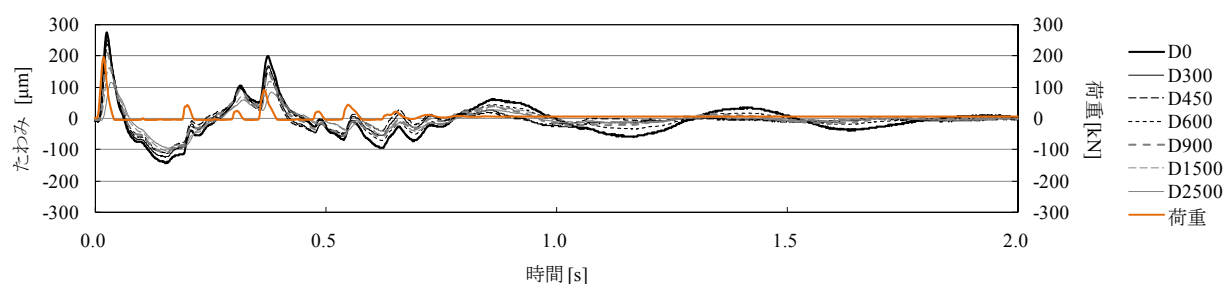
(b)連絡誘導路直交方向の断面



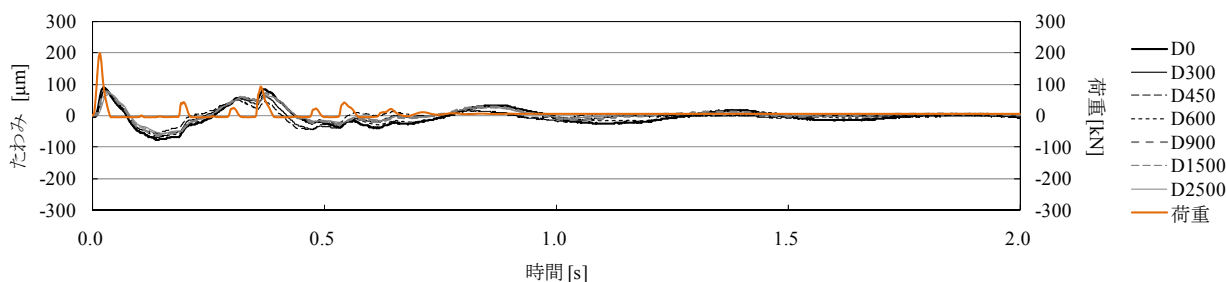
(c)連絡誘導路平行方向の断面

図-3 連絡誘導路部の床版の配置および断面

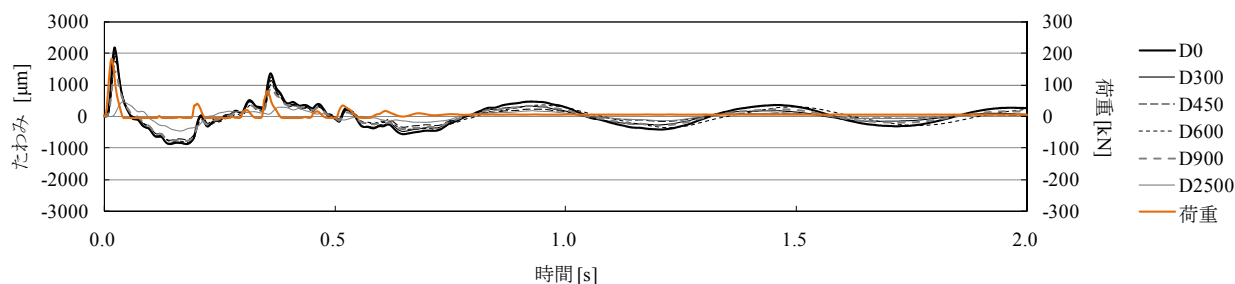
生じている。これは、各床版とも、同じ方向にセンサを配置して試験を実施しているためであり、杭及び杭頭補強版間の間詰部の拘束条件を反映したものとなっている。図-5(b)には、床版の端部において載荷した結果を示す。①及び⑤は、標準版同士の境界、②及び④は、標準版と杭頭補強版の境界、③は、杭頭補強版同士の境界付近を載荷したものである。なお、載荷地点から-450、-300、0、300及び450mmの結果は、載荷した床版上のたわみを、



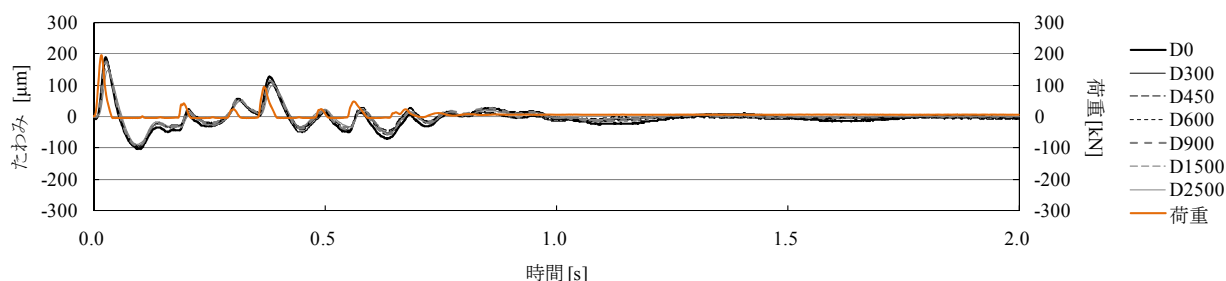
(a) 誘導路部での載荷結果 (版中央を載荷, 0~2.0 秒)



(b) 誘導路部での載荷結果 (杭頭部を載荷, 0~2.0 秒)



(c) 着陸帯 B 部での載荷結果 (版中央を載荷, 0~2.0 秒)



(d) 連絡誘導路部での載荷結果 (版中央を載荷, 0~2.0 秒)

図-4 たわみの時系列の例

600, 900 及び 1500mm の結果は, 間詰コンクリート上でのたわみを, 2500mm の結果は, 載荷した床版の隣の床版上のたわみを示している. この結果より, 杭頭補強間の接続部付近において変位の拘束が著しいことが確認できる. また, 間詰コンクリート上で得られたたわみは, 載荷地点からの距離にかかわらず, ほぼ一様に生じていることから, 鋼桁の変形の影響を受けているものと考えられる. 図-5(c)は, 杭頭及び杭頭以外の間詰コンクリートの交点を載荷して得られた結果である. いずれの場合においても, たわみの発生状況は, ほぼ一様であり, 杭頭で載荷した場合のたわみは, 極め小さいことが確認できる. 図-5(d)は, 誘導路部において, センサを滑走路直

交方向に配置して, 床版の中央を載荷して得られたたわみ曲線である. 標準版におけるたわみ (①, ②及び⑤) と杭頭補強版におけるたわみ (③及び④) には, 明瞭な差異が確認できる. また, 滑走路平行方向の場合と同様に, 杭及び杭頭補強版間の間詰部によりたわみが拘束されていることがわかる. 上記のたわみの発生状況は, 床版の形式及びジャケット構造が類似する滑走路部, 誘導路部, 高速脱出誘導路部, ショルダー及び着陸帯 A 部について, 同様の傾向が得られている.

図-6 は, 床版の形式及び床版を支持する構造等が異なる着陸帯 B 部及び連絡誘導路での計測結果である. 着陸帯 B 部の任意の床版について, 床版中央を載荷し, セン

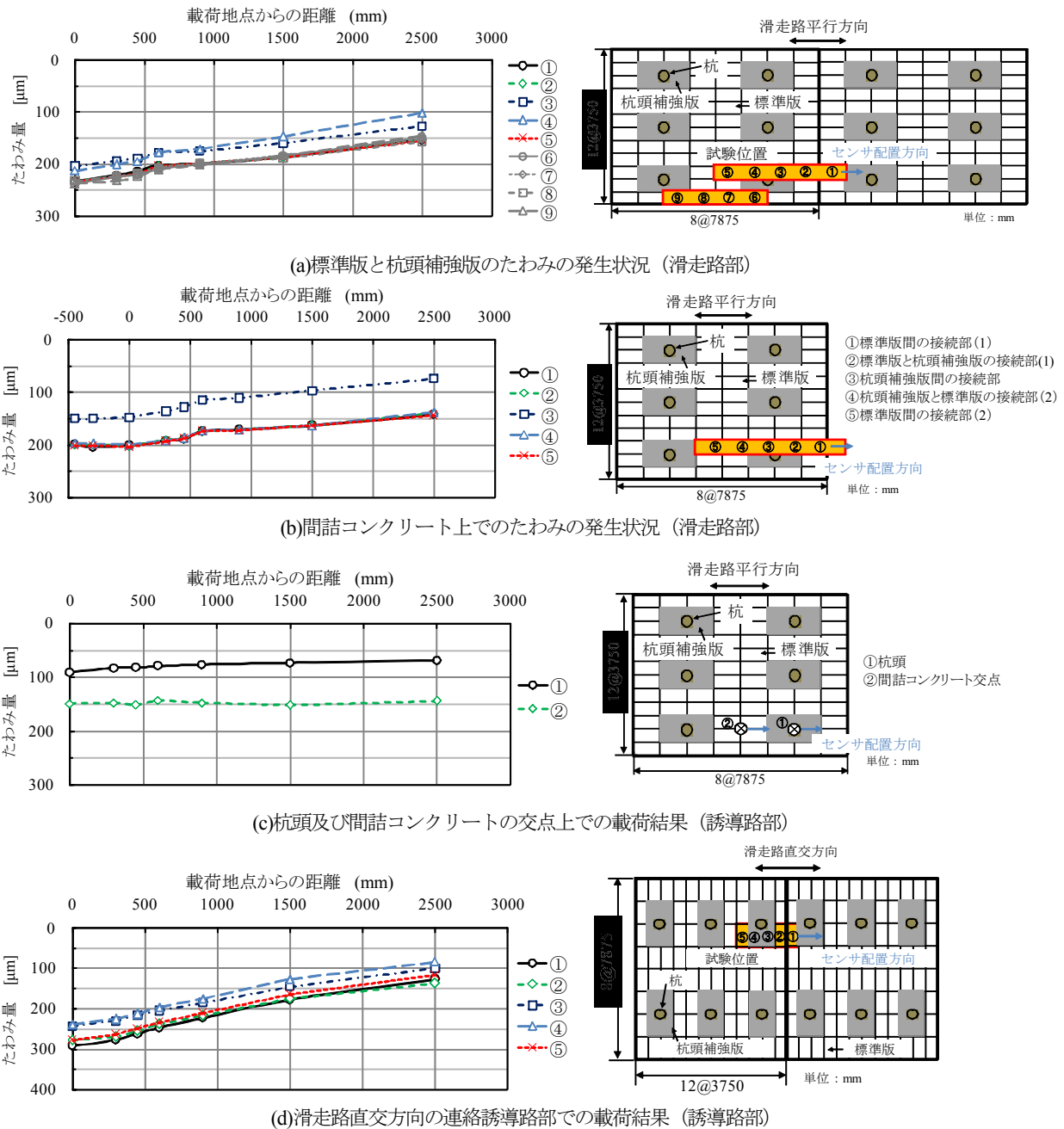


図-5 たわみ曲線

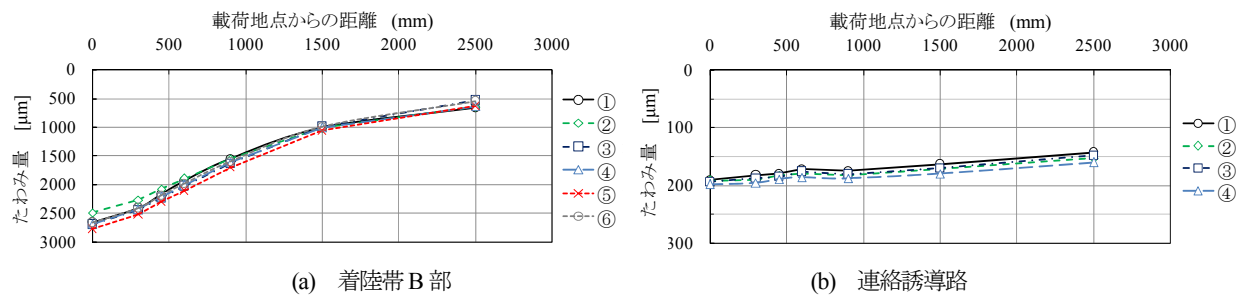


図-6 着陸帯 B 部及び連絡誘導部におけるたわみ曲線

サを滑走路平行方向に配置した場合のたわみ曲線を図-6(a)に示す。たわみ量は、他の施設と比較して、格段に大きな値となり、また、載荷地点からの距離に応じたたわみの減少量が非常に大きいことが確認できる。図-6(b)は、連絡誘導路の任意の床版について、床版中央を載荷し、センサを連絡誘導路平行方向に配置して得られたたわみ曲線である。なお、載荷地点からの距離 0~900mm の位置におけるたわみは、載荷した床版上のたわみを、1500mm 及び 2500mm の位置におけるたわみは、載荷した隣の床版上のたわみとなっている。たわみ量は、他の空港施設に比べ、相対的に小さい。また、載荷地点からの距離に応じたたわみの変化は、ほとんどなく、たわみが一様に生じていることが確認できる。これは、上述の通り、連絡誘導路の床版が、架設後、プレストレスを導入して、一体化を図っているためであると考えられる。

ここで得られたたわみの発生状況は、床版の形式及び床版を支持する構造等より、概ね説明が可能であり、このことは、FWD 試験が床版の構造評価へ適用できる可能性を示唆するものである。

4. 試験結果の評価

(1) D_0 たわみの検討

空港施設の舗装構造の健全度評価法として、FWD 試験により得られる載荷点直下のたわみ(D_0 たわみ)が基準たわみを超えないことを確認する方法がある。ここでは、床版上で得られた D_0 たわみに注目し、FWD 試験の床版の構造評価への適用の可能性について、検討を行う。

図-7 に、測定で得られた D_0 たわみを床版の版厚ごとに示す。なお、着陸帯 B 部については、たわみ量のオーダーが異なることから、別途図示している。各施設の床版の D_0 たわみと、床版厚には、相関があることが確認できる。図中の波線は、たわみが板厚の三乗に反比例するものとして、全ての計測値との残差二乗和が最小となるように求めたものである。厳密な係数等の議論については、別途、数値解析等により検証が必要ではあるが、概ね理論は、試験結果を説明しているものと考えられる。

表-2 には、測定で得られた D_0 たわみの平均値、標準偏差を示す。なお、高速脱出誘導路及び滑走路とショルダーの杭頭補強版については、十分なサンプル数が得られていないため、標準偏差は評価していない。 D_0 たわみの平均値は、施設ごとに有意な差が生じていることがわかる。また、変動係数は、概ね 7% 程度以下となっており床版構造の差異を評価できる可能性を示しているものといえる。

(2) 床版の振動特性の把握

FWD 試験で得られたたわみの逆解析により、床版を含

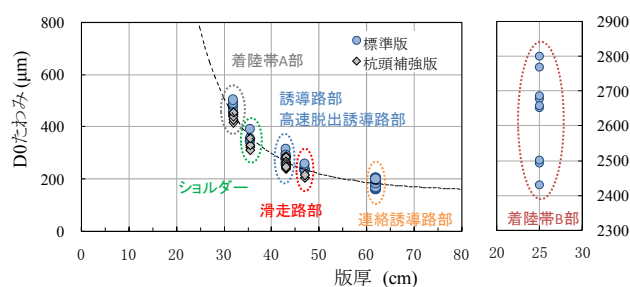


図-7 各床版における D_0 たわみ

表-2 D_0 たわみのまとめ

施設	標準版				杭頭補強版			
	平均 (μm)	標準偏差 (μm)	変動係数	データ数 (個)	平均 (μm)	標準偏差 (μm)	変動係数	データ数 (個)
滑走路	239	9	0.037	9	209	—	—	2
誘導路	289	14	0.049	6	249	9	0.036	6
高速脱出誘導路	258	—	—	2	244	—	—	2
ショルダー	343	10	0.030	4	316	—	—	2
着陸帯A部	478	15	0.032	14	439	16	0.036	6
着陸帯B部	2629	127	0.048	9				
連絡誘導路	181	13	0.073	18				

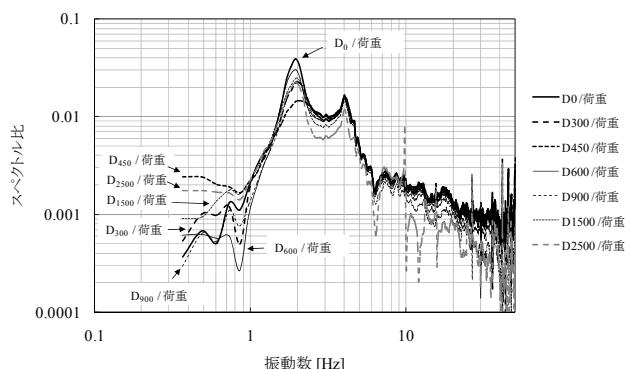


図-8 卓越振動数の算定例

表-3 各施設の固有振動数

(1) 低振動数側の卓越振動数(Hz)

測定位置	滑走路	誘導路	ショルダー	着陸帯B	連絡誘導路
D_0	2.10	2.01	1.94	1.85	2.03
D300	2.13	2.11	2.06	1.91	2.12
D450	2.33	2.26	2.18	1.91	2.16
D600	2.00	2.01	1.94	1.83	2.03
D900	2.09	2.08	1.96	1.91	2.08
D1500	2.04	2.01	1.96	1.91	2.08
D2500	2.09	2.04	1.95	1.91	2.08

(2) 高振動数側の卓越振動数(Hz)

測定位置	滑走路	誘導路	ショルダー	着陸帯B	連絡誘導路
D_0	3.97	3.92	4.11	4.12	6.71
D300	3.95	3.88	4.11	4.09	6.71
D450	4.01	3.97	4.11	4.01	6.75
D600	3.97	3.94	4.11	4.14	6.75
D900	3.99	3.95	4.11	4.06	6.80
D1500	3.98	3.98	4.10	4.43	6.67
D2500	4.01	4.00	4.04	4.74	6.80

めた栈橋上の舗装構造の健全度評価を行う場合、栈橋及び床版の固有振動が FWD 試験結果に与える影響が懸念される。ここでは、この問題に対する基礎的な検討として、得られたたわみの時系列データをスペクトル解析して、床版の振動特性の把握を行うものとした。検討には、サンプリング周波数 2000Hz、記録長約 8.2 秒のたわみの時系列を用いた。まず、荷重及び各測定点におけるたわみの時系列データをフーリエ変換し、各々のスペクトルを算定した。次に、各測定点のたわみのスペクトルを荷重のスペクトルで除すことで、構造系の卓越振動数を評価した。結果の一例を図-8 に示す。なお、縦軸は、スペクトル比としているが、あくまで、スペクトルの除算を行った結果を示すものであり、その絶対値に物理的な意味はない。図-8 の結果では、2.0Hz 及び 4.0Hz 付近にピークが確認できる。同様にして、各施設について、卓越振動数を算定した結果を表-3 に示す。いずれの施設についても、図-8 と同様に、2 つの顕著な卓越振動数を確認することができたため、表では、低振動数側に現れる卓越振動数と高振動数側に現れる卓越振動数を分けて示している。低振動数側の卓越振動数は、施設によらず 2.0Hz 程度を示しており、検討対象の構造系の固有振動または測定系の振動を評価しているものと考えられる。また、高周期側の卓越振動数は、連絡誘導路部以外は、4.0Hz、連絡誘導路は、6.0Hz 程度を示している。これは、たわみデータからもわかるように、連絡誘導路の床版の曲げ剛性が他の施設に比べて高いことによるものと考えられる。

5. まとめ

栈橋上に施工された舗装の健全性点検技術を確立する

ための基礎資料を得ることを目的として、床版上で FWD 試験を実施し、衝撃荷重に対する床版の応答性状を把握した。FWD 試験の結果より、以下の知見を得た。

- (a) 構造形式の違い、あるいは同様の構造形式であっても版厚の違いにより、 D_0 たわみに顕著な差異が確認でき、栈橋を含めた舗装構造評価の指標として活用できる可能性が示された。
- (b) たわみの時系列のスペクトル解析より、いずれの床版においても、卓越周期は、おおよそ 2.0Hz 程度であることが確認された。

今後、舗装施工後においても FWD 試験を実施し、本検討で得られた知見に基づいて、栈橋上に施工された舗装の健全度評価手法の検討を行う予定である。

謝辞：当該試験の実施にあたっては、羽田再拡張 D 滑走路建設工事共同企業体栈橋 I 工区の奥津氏をはじめ、多くの工事関係者より多大なご協力を賜りました。ここに記して深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 運輸省航空局監修：空港舗装構造設計要領，1999。
- 2) 阿部長門，丸山暉彦，姫野賢治，林 正則：たわみ評価指標に基づく舗装の構造評価，土木学会論文集，No.460/V-18，pp.41-48，1993。
- 3) 関口幹夫，佐々木俊平：IIS による各種床版の評価，東京都土木技術センター年報，pp.229-240，平成 19 年
- 4) 土木学会舗装工学委員会：FWD および小型 FWD 運用の手引き，舗装工学ライブラリー2，2002。

BASIC STUDY ON STRUCTURAL EVALUATION OF PAVEMENT BY USE OF FWD TEST RESULT ON WHARVES

Futoshi KAWANA, Ryouta MAEKAWA, and Noriyoshi SUZUKI

A part of new runway at HANEDA airport (D runway) is constructed on pile founded steel jacket type wharves. But, structural evaluation method of pavement to asphalt pavement on wharves does not exist. Objective of this study is to suggest the structural evaluation analysis method of pavement on wharves. In this paper, we report the results of FWD test on concrete slab at new runway (D runway) in HANEDA airport. A natural frequency and deflection curve obtained from FWD test on concrete slab are explained by the structural property of wharves. The possibility of the structural evaluation of pavement on jacket type wharves by use of FWD test result was demonstrated.