

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

八谷好高¹・坂井典和²・廣田道紀³・高橋 修⁴

¹ 正会員 運輸省港湾技術研究所土質部滑走路研究室長（〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1）

² 正会員 運輸省港湾技術研究所土質部滑走路研究室研修生（(株)日本空港コンサルタンツ）

³ 正会員 運輸省港湾技術研究所土質部滑走路研究室前研修生（(株)日本空港コンサルタンツ）

⁴ 正会員 運輸省港湾技術研究所土質部主任研究官

本論文では200kNを載荷可能なFWDを用いた空港コンクリート舗装の非破壊構造評価法について論じている。この方法は、コンクリート版中央部でのたわみ測定によりコンクリート版弾性係数・路盤支持力係数を推定すること、目地・ひび割れ部での測定から構造健全性・荷重伝達機能・コンクリート版下の空洞について評価することの2項目により構成されている。いずれも理論的解析手法として弾性支承上の平板理論を用いているが、前者では解析解の回帰式を、後者では有限要素法を用いている。評価法の開発過程ではいくつかの供用中の空港舗装ならびに試験舗装での実測結果を解析し、従来より用いられている方法との比較検討を経た上で、最終的には具体的な評価値を明らかにしている。

Key Words: FWD, airport pavement, concrete pavement, structural evaluation

1. はじめに

舗装はその供用に伴ってサービス性能が徐々に低下する。これは空港舗装においても同様であるが、空港では近年航空機の大型化ならびに運行回数の増加が図られているので、その度合いは著しいものとなっている。そのために舗装の状態、すなわち、表面の勾配、すべり摩擦係数といった機能面ならびに荷重支持力といった構造面に関して定期的に確認する必要がある。このうち後者については、舗装表面に現れてくる破損程度からPRIを計算することにより補修時期を判定することで間接的には行われているものの、具体的な補修方策を検討する場合には構造状態を直接調査することが必要となる。この直接構造評価としては解体調査によるものと非破壊調査によるものとがあるが、迅速性、経済性の点からは後者が有利で、FWDによる試験方法が一般的となってきた。その構造評価法が新設構造設計法に準拠したものであれば、設計から評価・補修まで同一の原理を使用できることとなるので、舗装の管理上きわめて有利となる。

エプロンを中心に用いられている空港コンクリート舗装の構造設計原理は以下のようなものである¹⁾。

i) 支持力係数 K_{75} （載荷板直径750mm）が 70MN/m^3 となるように路盤構成を決定する。

ii) 設計航空機荷重がコンクリート版中央部に載荷されたときの応力を算定し、設計交通量に応じた適切な安全係数を導入することによってコンクリート版厚を決定する。
iii) 目地には原則的にスリップバー、タイバー等鋼製荷重伝達装置を設けて、目地部における荷重伝達機能を確保する。

筆者らは、載荷重50kNのFWDを用いた空港コンクリート舗装の構造評価法として、上記の設計原理の観点から舗装各層の力学定数ならびに目地荷重伝達機能を推定する方法について報告したところである²⁾。その後、200kNと実際に近い荷重を載荷可能なFWDを導入し、これによる空港コンクリート舗装でのたわみ測定ならびにその解析を数多く行ってきている。それらを総括する形で載荷重200kNのFWDによる評価方法として本論文にまとめた。

2. 構造評価の方針

FWDを使ったコンクリート舗装構造の非破壊評価法では、上記の構造設計に必要な設計用値に加え、ひび割れ等の構造的健全度を確認することが必要となる。これは連続鉄筋コンクリート舗装のひび割れ、特殊目地³⁾等、スリップバー等で補強された通常の目地と異なる構

造特性を有するものを対象として、その健全度を確認するために必要となる。このことから、構造評価法は、

- i) コンクリート版中央部での測定により、コンクリート版の弾性係数(E_c)、路盤支持力係数(K)を推定すること
- ii) 目地・ひび割れ部での測定により荷重伝達機能を推定すること
- iii) 目地・ひび割れ部での測定により空洞の有無、大きさを推定すること
- iv) ひび割れ・特殊目地部での測定により、その構造健全度を推定すること

の4項目から構築されると考えた。iv)についてはii)と同義であるが、その方法が異なるため、ここでは別項目として取り上げた。なお、コンクリート版のポアソン比も設計用値ではあるが、その影響程度は E_c に比較して小さいことから、ここでは空港コンクリート舗装構造設計要領に記載されている数値をそのまま使用することにした。

上記の4項目について以下にその具体的な方法を示す。

i) E_c , K は、コンクリート版中央部におけるFWDの測定値からNewton-Rapson法を用いた逆解析により求めた。ここでは、載荷時のたわみの解析解として、剛比半径、載荷板半径、荷重中心からたわみ測定点までの距離の回帰式として表されるものを順解析に用いる。これは、得られた7点のたわみを全て用い、路盤以下を1層とみなした弾性地盤上の平板理論を用いたものである。この逆解析により得られた路盤以下の弾性係数から求めることが必要となる。

ii) コンクリート版応力に着目して評価されるべき目地・ひび割れ部における荷重伝達機能は、それらの近傍におけるたわみを用いて荷重伝達率(E_{ff})として実務上定量化されている⁴⁾。ここではFWDによる測定値から計算される荷重伝達率 E_{FWD} がこの E_{ff} と等価であるとみなした。 E_{FWD} は、図-1に示すように、載荷板中心が目地・ひび割れから30cm離れるように載荷板を設置することによって得られる D_0 , D_{60} (載荷板中心からそれぞれ、0, 60cm離れた点のたわみ)から、(1)式により求める。

$$E_{FWD} = \frac{D_{60}}{(D_0 + D_{60})/2} \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

iii) ポンピング等により目地・ひび割れ部のコンクリート版下に発生した空洞は、ii)で示した E_{FWD} と D_0 に注目することによって、その有無、大きさを判定する。

iv) ひび割れ・特殊目地部の構造健全度は載荷側コンクリート版のたわみ勾配から判定した。このときには載荷板中心から30cm離れた点のたわみである D_{30} としてひび割れ・特殊目地の載荷側コンクリート版近傍の値が得られるように載荷板を設置してたわみ測定を行い、(2)式によりたわみ勾配 G を計算する(たわみの単位はmm)。

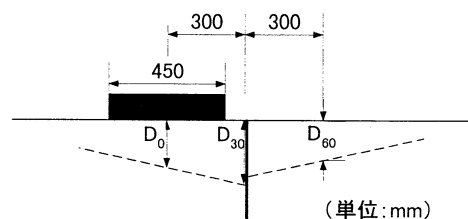


図-1 E_{FWD} 算定時のたわみ測定方法

$$G = \frac{D_{30} - D_0}{300} \quad (2)$$

以下の章では、以上に示した方法を採用するに至った研究の内容について詳細に述べる。なお、今回の研究に用いたFWDは、載荷重が最大で200kN(載荷板直径450mm)、たわみ測定点が7点(載荷板中心ならびに中心からの距離が30, 45, 60, 90, 150, 250cm)となっているものである。たわみを測定した舗装は試験舗装が3箇所のほかは供用中の空港におけるコンクリート舗装である。いずれも空港コンクリート舗装構造設計要領に従って設計され、そして建設されたもので、設計荷重は大型ジェット機(LA-1, LA-12)である。

3. 中央部測定による評価

コンクリート舗装の力学定数であるコンクリート版弾性係数 E_c 、路盤支持力係数 K は、コンクリート版中央部でFWDより測定されたたわみから逆解析により求める。この場合、計算によるたわみの値、特にその形状は路盤以下(以下では単に路盤と記す)のモデル化方法によって大きく異なることから、以下ではまず逆解析手法を示してから、この路盤モデルについての検討を行って最適な逆解析方法を明らかにする。そして、その方法に基づいた舗装力学定数の推定法をまとめ、最後に50kNのFWDによる方法との比較を行う。

(1) 逆解析手法

コンクリート舗装は、剛なコンクリート版が路盤に支持された構造であるので、一般的には弾性支承上の平板としてモデル化される。このとき、路盤はWinkler支承もしくは弾性地盤と考えられ、それらの力学特性は、前者においては K 、後者においては弾性係数 E_b とポアソン比 ν_b で表される。空港コンクリート舗装の版厚算定においては、路盤をWinkler支承とみなす方法が用いられているので、いずれにしても K が必要となる。

コンクリート舗装に、荷重 P 、載荷半径 a の円形等分布荷重が載荷された場合のたわみは、路盤をWinkler支承、弾性地盤とモデル化した場合、それぞれ(3), (4)式で表される。

表-1 A, B空港における舗装の力学定数

項 目	A空港	B空港
コンクリート		
h_c (mm)	350	350
E_c (kN/mm ²)	34.0	34.8
ν_c	0.20	0.18
路盤		
K_{75} (MN/m ³)	147*	83.6
K_{30} (MN/m ³)	368	—

$$^* K_{75} = \frac{1}{2.5} K_{30} \text{ により推定}$$

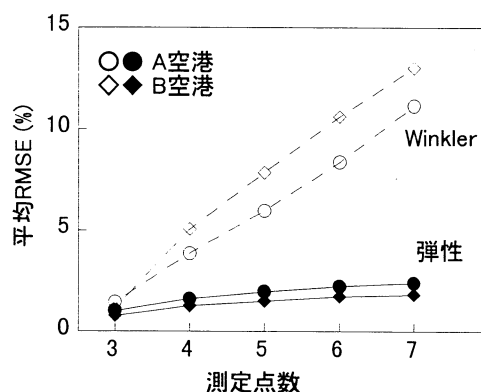
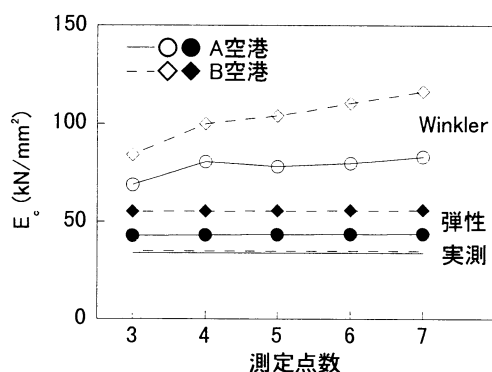


図-2 路盤モデル・測定点数が平均RMSEに及ぼす影響

図-3 路盤モデル・測定点数が E_c に及ぼす影響

$$w_k(r) = \frac{P}{\pi K a^2} \cdot \bar{w}_k(r, l_k) \quad (3)$$

$$w_e(r) = \frac{P \cdot (1 - \nu_b^2)}{E_b \cdot l_e} \cdot \bar{w}_e(r, l_e) \quad (4)$$

ここに、

r : 荷重板中心からたわみ測定点までの距離、
 l_k, l_e : Winkler 支承, 弾性地盤としたときの剛比半径

($= \sqrt[4]{D/K}, \sqrt[3]{2D(1-\nu_b^2)/E_b}$),

$\bar{w}_k(r, l_k), \bar{w}_e(r, l_e)$: Winkler 支承, 弾性地盤としたときのたわみ係数,

D : 平板の曲げ剛性 ($= E_c \cdot h_c^3 / 12(1-\nu_c^2)$),

h_c : コンクリート版厚.

$\bar{w}_k(r, l_k), \bar{w}_e(r, l_e)$ は, それぞれ, a/l_k と $r/l_k, a/l_e$ と r/l_e

に関する多項式による回帰式が得られており, その信頼度も確かめられている⁵⁾. たわみが剛比半径と荷重板中心からの距離の関数として表されるので, 荷重からの距離が異なる2点のたわみに対してNewton-Rapson法を適用して l_k または l_e について逆解析を行えば, K または E_b (ν_b :一定値)ならびに E_c が算出できることとなる. 路盤を弾性地盤とする場合には, 得られた E_b から $l_k=l_e$ とすることにより K が推定できる.

(2) 路盤モデルの選定

路盤の適切なモデル化方法を決定するために, たわみの実測値とそれから逆解析された力学定数を用いた計算値の平均平方誤差 (RMSE) の平均値, すなわち平均 RMSE にまず注目した. これは使用する測定点数ごとに (5) 式で計算される値を下記の測定点の組合せ数全体で平均したものである. ここでは, 解析に使用するたわみを 3~7 点に変え, FWD により測定される D_0 から D_{250} までの 7 点のなかで種々に組み合わせた.

$$RMSE = 100 \cdot \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{\delta_{c_i} - \delta_{m_i}}{\delta_{m_i}} \right\}^2 \right]^{1/2} (\%) \quad (5)$$

ここに、

n : 計算に用いる測定点数,

$\delta_{m_i}, \delta_{c_i}$: 測点 i におけるたわみの実測値, 計算値.

この平均 RMSE に加えて, 逆解析された力学定数⁶⁾ と実測値の違いについても注目した. この場合の実測値は解体調査の結果として得られたものである.

現地調査を行った空港は2つの第二種空港 (A, B と称す) であり, 解体調査により得られたそれぞれの力学定数は表-1 に示すとおりである. FWD によるたわみ測定は航空機の運行のない夜間に行ったため, 版厚方向の温度変化はわずかであるとみなして, たわみ補正は特に行っていない.

解析結果として, まず逆解析に使用する測定点数によって, 平均 RMSE が変化する状況を図-2 に示した. A, B 空港とも, 測定点数が増加することによって平均 RMSE が増加するものの, Winkler 支承モデルに比べて弾性地盤モデルではその割合は非常に小さいことがわかる.

また, 逆解析により得られた E_c の計算値を実測値と対比したものが図-3 である. Winkler 支承モデルでは計算値は逆解析に使用する測定点数の影響を大きく受け, 点数が多いほど大きくなることがわかる. これに対して, 弾性地盤モデルでは測定点数によらず計算値はほぼ一定値をとっている. E_c の値そのものをみると, 弾性地盤モデルのほうが実測値に近いことも明らかである.

同様に, K について図-4 に示した. この図には, 弾性地盤モデルとして得られた E_b を変換したのも含まれて

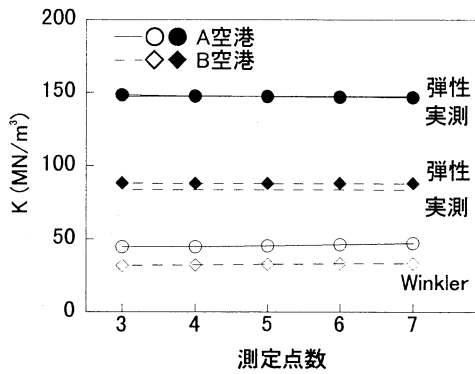


図-4 路盤モデル・測定点数がKに及ぼす影響

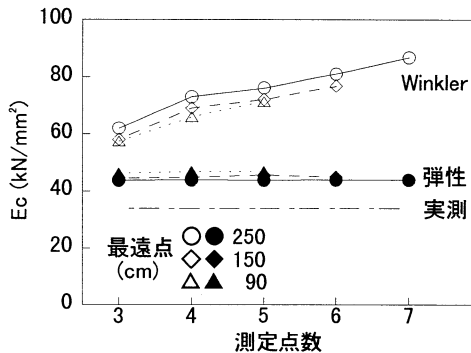


図-5 解析に使用するたわみの最遠点による E_c の違い

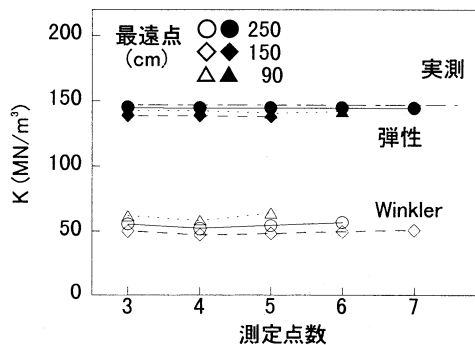


図-6 解析に使用するたわみの最遠点によるKの違い

表-2 逆解析により求められた舗装力学定数の変動係数

最遠点(cm)	250				150			90	
測定点数	3	4	5	6	3	4	5	3	4
Winkler 支承									
E_c	10.3	19.0	13.3	10.4	5.9	20.0	14.1	7.6	17.2
K	29.4	17.4	14.6	11.1	27.0	17.8	14.1	27.8	22.3
弾性地盤									
E_c	8.1	5.8	4.1	2.8	9.3	7.1	4.6	10.1	8.7
E_b	2.7	1.8	1.2	0.8	3.1	2.1	1.5	3.6	2.8

(単位: %)

いる。この図から、 K は路盤モデルや測定点数によらずほぼ一定値をとることがわかる。路盤モデルによる違いをみれば、弾性地盤モデルでは実測値と同程度の計算値が得られているのに対して、Winkler 支承モデルでは得られる値が非常に小さく、実測値とは合っていないことがわかる。

次に、コンクリート舗装上でFWDにより測定されたたわみがアスファルト舗装上でものものと比べると小さいことから、たわみセンサの精度上荷重から遠い点における測定値の信頼度を確認する必要があると考えた。そこで、逆解析に使用する、荷重から最も遠いたわみ測定点（最遠点）を、上記の250cmの場合のほかに、90、150cmとした場合についても解析して比較した。この解析にはA空港におけるデータを使用した。

最遠点を150cmとしたときの平均RMSEを250cmのものと比較すると、弾性地盤モデル、Winkler 支承モデルとも、最遠点が異なっても測定点数に対する平均RMSEの増加傾向は同じであること、その値自体は最遠点が近いと小さくなることがわかった。

得られた力学定数 E_c 、 K について、逆解析に使用する最遠点ごとに求めた平均値を、それぞれ図-5、図-6に示す。Winkler 支承モデルの場合は、 E_c 、 K とも最遠点が小さいほど実測値にいくぶん近づく傾向はみられるものの、その程度はわずかである。また、 E_c の場合で逆解析に使用するたわみ点数が増加するほど E_c も増加するという250cmの場合にみられた傾向は、最遠点が異なっても同様にみられる。これに対して、弾性地盤モデルの場合には、たわみの最遠点、逆解析に使用する測定点数の影響はほとんどみられず、しかも、 E_c 、 K の値はWinkler 支承モデルの場合に比べて実測値に近いことが認められた。

一連の解析結果のまとめとして、逆解析に用いたたわみの最遠点ならびに測定点数別に、得られた E_c 、 K 、 E_b の変動係数を表-2に示した。路盤のモデル化の違い、すなわちWinkler 支承、弾性地盤モデルのいずれを用いるかによる違いが顕著で、 E_c ならびに、 K （ E_b ）のいずれにおいても弾性地盤で変動の少ないことが認められる。さらに、弾性地盤モデルにおいて、測定点数が同一で、最遠点が増える場合についてみると、最遠点の遠いほう、すなわち250cmとするほうが変動も少ないことが明らかである。

以上のことから、FWDにより測定されたたわみを用いて逆解析によりコンクリート舗装の力学定数を求める場合には、路盤を弾性地盤とみなした弾性支承上の平板としてモデル化することが適切であるとまとめられる。また、平均RMSEのいく分の増加はあるものの、力学定数の推定精度を高めるためには、測定可能な全点のたわみ、すなわち7点のたわみを用いることも必要である。

(3) 中央部測定による構造評価

(1)、(2)で示した逆解析手法を用いたコンクリート版中央部でのFWDによる測定結果として、コンクリート版弾性係数 E_c 、路盤支持力係数 K が得られる。これらの値を設計用値として用いることによって、設計航空機荷重に対するコンクリート版の応力が算定でき、舗装の構造健全度、すなわち舗装の当初設計において設定した安全係

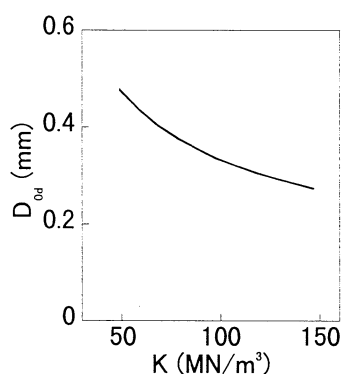


図-7 荷重板中心たわみ D_0 に注目した舗装構造評価規準

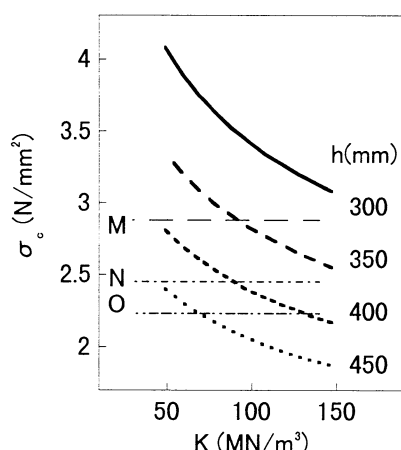


図-8 コンクリート版応力に注目した舗装構造評価規準

表-3 従来法と新法による逆解析結果の比較

項目	E_c (kN/mm ²)		K (MN/m ³)	
	新	従来	新	従来
平均	44.1	48.4	148	54
標準偏差	7.7	0.6	26.5	7.2

数が確保できているかどうか判定可能となる⁷⁾。

実際のFWDによるたわみ測定、そしてそれに引き続く構造評価を考えると、上記の判定の前段として簡易な構造評価手法が見出せれば好都合であろう。そこで、本研究では、簡易評価としてFWDによる最大たわみ D_0 に注目した方法を採用し、これに引き続く詳細評価として設計荷重に対するコンクリート版応力に注目した方法を開発した。具体的な評価の流れは次のようになる。

a) 簡易評価

まず、 E_c 、 E_b として種々の値を設定して、(4)式で表される弾性地盤上の平板理論により、コンクリート舗装に200kNのFWD荷重が載荷された場合の荷重板中心たわみ D_0 を計算しておく。その例は図-7(コンクリート版厚350mm)に示すようなもので、図の横軸は E_b から(5)式を用いて計算された K である。この図は E_c 、 ν_c を空港コンクリート舗装構造設計要領において標準としている35kN/mm²、0.15としたものであるが、構造設計においてこれ以外の値を用いている場合にはそれに対応した図を

用意する必要がある。次に、実際に測定された D_0 に対して線形補間を施して荷重200kNに相当する補正たわみ D_{0c} を求める。そして、この D_{0c} と設計図書にある設計路盤支持力係数を用いて図-7を参照し、 D_{0c} が D_{0d} よりも大きければ構造上何らかの問題があると判定できる。

しかし、実際には設計当初に想定していたコンクリート版弾性係数と路盤支持力係数が供用開始後に変化することが考えられる。その場合にはたわみからこの逆解析により得られた E_c 、 E_b から前述の方法により K を計算し、この K と D_{0c} を用いて、 E_c の値に応じた上図のような D_{0d} と K の関係から構造健全度がおおよそ判定できる。

b) 詳細評価

まず、逆解析により得られた E_c 、 K を設計用値として、空港コンクリート舗装構造設計要領で用いられているWestergaardの中央部載荷公式により、設計航空機荷重が載荷されたときのコンクリート版応力 σ_c を計算する。同時に、この E_c を有するコンクリートの曲げ強度を推定し、設計交通量(カバレッジ)に応じた安全係数を考慮して設計応力 σ_{cd} を計算する。そして、 σ_c と σ_{cd} を比較して、所定の安全係数が確保できていなければこの舗装は構造的に何らかの問題があると判定される。図-8にはコンクリート版厚350mmの場合の σ_c 、 σ_{cd} を示してある(図中のM、N、Oは設計カバレッジ)。

(4) 50kN荷重のFWDによる方法との比較

空港コンクリート舗装に対して従来使用していたFWDは、載荷重が最大で50kN、荷重板直径が300mm、たわみ測定点が3点(荷重板中心からの距離: 0, 30, 105cm)のものである。このFWDによりコンクリート版中央部で測定されたたわみからコンクリート版弾性係数 E_c 、路盤支持力係数 K を推定する方法として、Westergaardのたわみに関する中央部載荷公式(Winkler支承)をPickettとRayが変形した式を順解析として使用する逆解析手法を採用している。この逆解析においては、剛比半径 l_k と路盤支持力係数 K がまず求められ、そして両者の関係からコンクリート版弾性係数 E_c が得られる。

この従来より用いている方法(従来法)と今回開発した方法(新法)による解析結果の比較は、A空港において200kNを載荷可能なFWDによって測定したデータ(108点)を用いて行った。ここでは、従来法を用いるにあたり7点のたわみ全てを用いている。従来法と新法による一連の解析結果を表-3にまとめた。得られた E_c 、 K は、標準偏差では従来法によるもののほうが新法に比べて小さいものの、平均値をみると、解体調査結果と比較して、従来法による結果は E_c については高めの値を、 K については低めの値を与えることがわかる。これは、(2)で示したWinkler支承モデルに対する結果と同様の傾

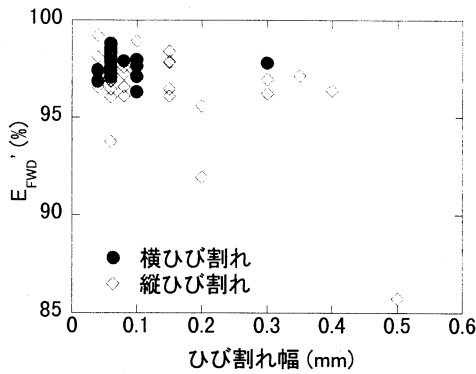


図-9 CRCPのひび割れ幅と荷重伝達率

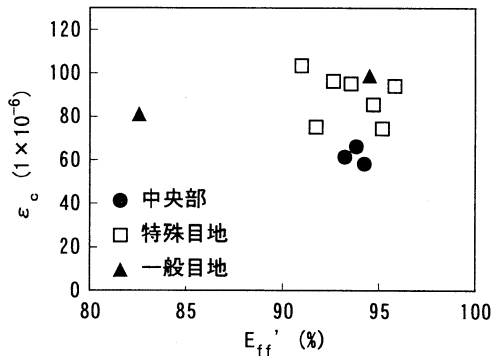


図-10 PPC版舗装の荷重伝達率とコンクリート版ひずみ

向であり、今回開発したもののほうが実際の状況をよく推定できていると結論づけられる。

4. 目地・ひび割れ部測定による評価

コンクリート舗装の目地・ひび割れ部における構造健全度は、荷重伝達機能ならびにコンクリート版直下の空洞の有無によって評価する。なお、連続鉄筋コンクリート舗装（CRCP）のひび割れ、特殊目地の構造健全度は荷重伝達機能と同義であるので、(1)での検討に含めている。

(1) 荷重伝達機能

目地ならびにひび割れ部における荷重伝達機能は、コンクリート版に発生する荷重応力の観点から表されなければならない。具体的には、コンクリート版の縁部に載荷されたときの応力が他のコンクリート版と接続されない場合（単独版）と接続された場合（連結版）とで異なる度合い、すなわち応力の低減度として定量化されるべきものである。しかし、既設舗装の構造評価においては応力もしくはひずみを計測することは事実上不可能であり、たわみによらざるを得ない。

荷重伝達機能をFWDたわみにより定量化する場合には、従来よりコンクリート版の目地近傍に荷重を加えることによって生ずる、目地から等距離の地点における載荷側

と非載荷側のたわみに基づく手法が用いられてきている。この場合、わが国の空港舗装を対象にしては(6)式で定義される荷重伝達率 E_{ff}' が使用されている。このたわみによる荷重伝達率は、スリッパ、かぎ型といった一般的な目地や無筋コンクリート舗装のひび割れにおける測定結果に基づいて検討されたものである。このときのたわみは載荷板を目地・ひび割れに接して設置して測定するものである。

$$E_{ff}' = \frac{D_{45}}{(D_0 + D_{45})/2} \times 100 (\%) \quad (6)$$

a) 連続鉄筋コンクリート舗装のひび割れ・特殊目地

CRCPのひび割れ部における荷重伝達機能は、この荷重伝達率のみによって定量化することは難しい⁸⁾。これが明らかとなったたわみの測定は、第一種空港であるC空港のエプロンにおいて、横ひび割れ部のほか、縦ひび割れ部と縦目地部で行われた（夜間測定）。この測定においては載荷板中心から目地までの距離が375mmとなるようにして載荷板をひび割れ・目地から離して設置しているが、載荷側と非載荷側でひび割れ・目地から等距離の地点でのたわみ、すなわち、(1)式の D_0 、 D_{60} に代わって D_{30} 、 D_{45} を使用することによって荷重伝達率が計算できる（ E_{FWD}' と称す）。このようにして得られる E_{FWD}' をひび割れ幅に対して示したものが図-9である。横ひび割れ・縦ひび割れと種類が異なっていたり、ひび割れ幅が異なっていれば荷重伝達機能も異なるはずであるが、 E_{FWD}' ではほとんど差のみられないことがわかる。

これと同様の事例として、プレキャストプレストレストコンクリート（PPC）版舗装において測定された(6)式による荷重伝達率 E_{ff}' とコンクリート版ひずみ ϵ_c （上または下縁ひずみの絶対値）の関係を図-10に示した。これは、直径300mmの載荷板による支持力係数 K_{30} が417MN/m³である路盤上に設置された8枚のPPC版（幅2.4m、長さ6m、厚さ240mm）を特殊な方法で連結した舗装上で従来の方法により計測したときの値である（大型屋内実験場での試験であるので、温度変化によるたわみ補正は考えていない）。ひずみ ϵ_c については目地部においては目地近傍の目地平行方向におけるデータであり、中央部においては荷重直下のデータである。なお、中央部の場合は目地部における E_{ff}' 算定時と同様の方法によって便宜的に E_{ff}' として値を算出している。この図から E_{ff}' が大きい範囲ではそれがほぼ同一であっても ϵ_c が大きく異なることから、この場合もたわみを用いた荷重伝達率によって荷重伝達機能を表すことは難しいことがわかる。

この問題を解決する方法として、中央部載荷時と目地・ひび割れ部載荷時におけるたわみ曲線の違い、すな

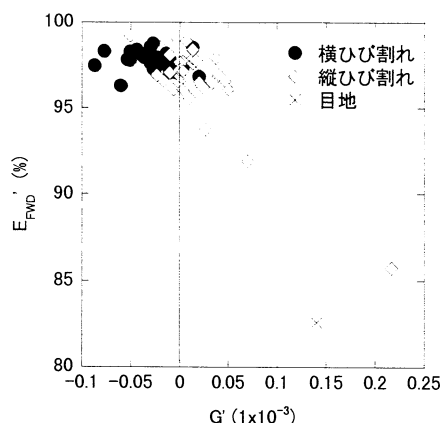


図-11 CRCPにおけるたわみ勾配と荷重伝達率

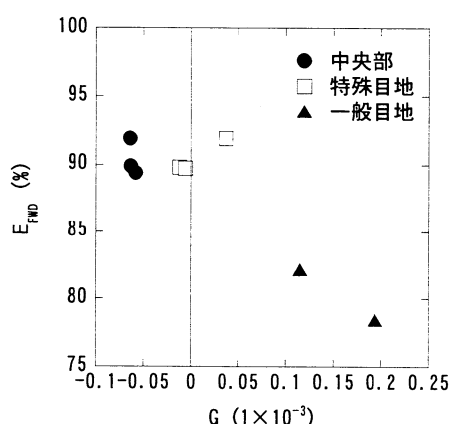


図-12 PPC版舗装におけるたわみ勾配と荷重伝達率

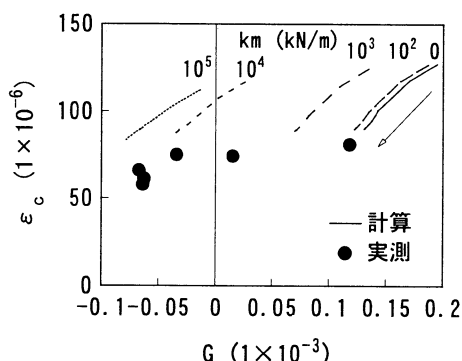


図-13 PPC版舗装のたわみ勾配とコンクリート版ひずみ

わちたわみ勾配の違いに注目するものについて検討した。これは、静的荷重試験等任意の点のたわみを計測可能な試験結果から、前者では荷重板中心におけるたわみが最大となるのに対し、後者では目地・ひび割れ直近におけるものが最大となることがわかっているからである⁴⁾。

上記のCRCPにおける測定結果から(2)式で示されるような形式のたわみ勾配を算出したところ、横ひび割れの勾配が負の値なのに対して縦ひび割れのものが正の値となっているというように両者に差がみられ、前者は中央部荷重時のたわみ形状に近いことがわかった。そこで、CRCPにおける荷重伝達率とたわみ勾配 G に注目して、

両者の関係をまとめたものが図-11である。この場合の荷重方法が(2)式により G を算出するときのものと異なっていることから、ここでは G' と表記している。これから、 E_{FWD}' が95%以上となっていて荷重伝達機能が良好とされるひび割れにおいても、たわみ勾配には大きな差がみられることが明らかである。同様にPPC版舗装における測定結果を図-12にまとめた。この場合は荷重板を目地から離して設置することにより、(1)、(2)式で計算される E_{FWD} 、 G が得られている。中央部と特殊目地部では E_{FWD} がほとんど同一であるものの、 G ではその差が明らかになっている。したがって、たわみを用いた荷重伝達率だけでは把握できないようなCRCPのひび割れ、特殊目地等の構造状態を判定するためには、ここで用いたたわみ勾配が有効であると認められる。

荷重時のコンクリート版ひずみが得られているPPC版舗装の場合について、 G と ε_c の関係を解析的に調べてみた。ここではコンクリート舗装をWinkler支承上の平板としてモデル化している有限要素法を用いている⁹⁾。目地のモデル化に際しては従来より2枚の平板をせん断ばねで連結する方法を用いているが、ここで対象としている特殊目地の場合はそれだけでは不十分で、曲げばねを使用しなければならないことがわかった。具体的には、せん断ばね定数(k_s)として $5 \times 10^2 \sim 1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ を、目地横断方向の曲げばね定数(k_m)として $0 \sim 1 \times 10^{10} \text{ kN/m}$ を計算に用いている。図-13には、 G と ε_c の関係についてこの計算結果を実測値と一緒に示してある。せん断ばねだけでは計算値は実測値を説明できないこと、曲げばねを導入することによってそれが可能となることが明らかである。

以上のように、CRCPの横ひび割れ、特殊目地等たわみによる荷重伝達率だけではその荷重伝達機能を十分に表わしえない場合には、たわみ勾配に注目することにより評価可能である。その評価基準はこれらの設計において想定された構造状態が確定されているかどうかの視点から定められるべきである。たとえば、特殊目地の構造設計においてせん断ばねと曲げばねを考慮する場合には、その状態に対応した G の値が得られていれば構造健全度は十分であると判断されよう。

b) 一般目地・ひび割れ

スリッパ目地のような一般目地や無筋コンクリート舗装のひび割れにおける荷重伝達機能の評価法については、前述のように、従来より目地近傍に荷重板を設置して測定を行う方法を採用しているが、目地・ひび割れの種類によらず同一の方法を採用することが合理的であると考えて、a)で用いたものと同様に、荷重板を目地から離して設置する方法について検討した。

ここでは上記のPPC版舗装ならびにコンクリート版厚

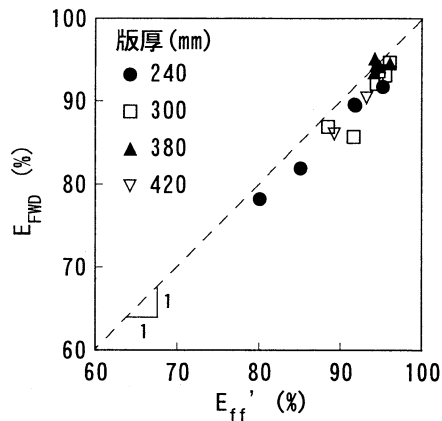


図-14 実測による E_{FWD} と E_{ff}' の比較

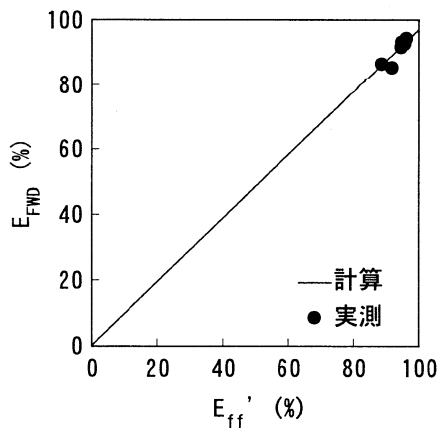


図-15 計算による E_{FWD} と E_{ff}' の比較

が300, 380, 420mmと3種類である無筋コンクリート舗装上で従来方法と新方法の2種類の荷重方法を用いることにより、同一地点での E_{ff}' と E_{FWD} を算出した。無筋コンクリート舗装のうち版厚300, 380mmのものは4. (2)のコンクリート版下の空洞の推定時に使用したものである。コンクリート版厚が420mmのものは幅、長さとも7.5mで支持力係数 K_{30} (荷重板直径300mm) が250MN/m³の路盤上に打設された試験舗装であり、目地には荷重伝達装置としてスリッバーが設けられている (たわみ測定は昼間に行ったが、荷重伝達率については温度の影響が小さいと考えて補正はしていない²⁾)。

図-14には、これら4種類のコンクリート舗装の目地部において2種類の方法によりたわみを計測して算定した荷重伝達率 E_{FWD} と E_{ff}' を比較してある。コンクリート版厚、目地構造の違いによらず E_{FWD} と E_{ff}' の相関性は高く、相関係数は全体で0.950となっている。

コンクリート版厚が300mmの場合について、前述の有限要素法を用いて E_{FWD} と E_{ff}' を算出した結果を実測値と一緒に図-15に示した。両者の関係は、 $E_{FWD} = 0.97E_{ff}' + 0.22$ で回帰される。この E_{ff}' は静的荷重試験における E_{ff} とほぼ同一であることがすでにわかっている

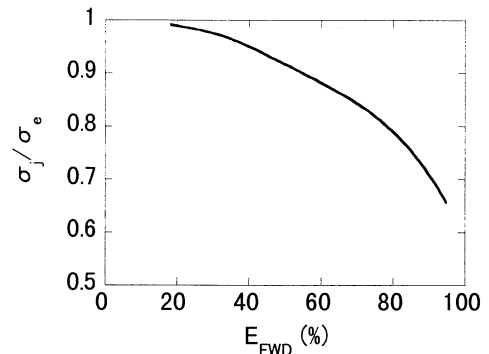


図-16 荷重伝達率がコンクリート版応力比に及ぼす影響

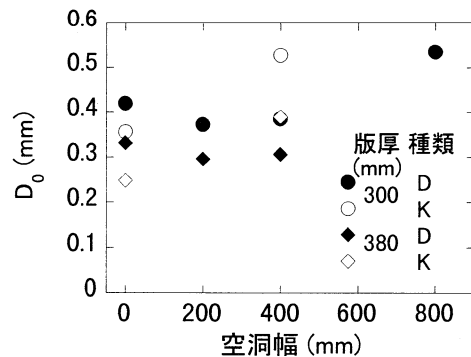


図-17 空洞幅による D_0 の変化

こと²⁾から、今回用いたFWDによるたわみ測定法により得られた E_{FWD} は E_{ff} とほぼ同一であると判断できよう。

目地の荷重伝達機能は縁部荷重応力の低減度として表されるべきものであるので、 E_{FWD} を用いた荷重伝達機能の評価規準もこの応力低減度に基づいて定められるべきであると考えられる。図-16は、このような考え方に基づいて、縁部荷重時応力に対する目地部荷重時応力の比 σ_j/σ_e を E_{FWD} に対してプロットしたものである (コンクリート版厚380mm)。これを使えば、米国連邦航空局の規準¹⁰⁾のように σ_j/σ_e として0.75を採用するとした場合には E_{FWD} が85%以上必要となることがわかる。

(2) コンクリート版下の空洞

航空機は車両に比べて質量が大きいことから、航空機がコンクリート舗装上を繰返し走行する空港舗装では、その層構成や使用材料等が原因で路盤以下に不可逆的な変形の生ずることが懸念される。これは、荷重荷重時のたわみがコンクリート版中央部よりも大きい目地部や隅角部で生ずる危険性が高い。特に、目地からの雨水の浸入や外部からの浸透水の流入があったり、地下水位が高い場合には、航空機が目地上を走行するとき水と一緒に路盤材料が舗装表面に出てくる、いわゆるポンピン

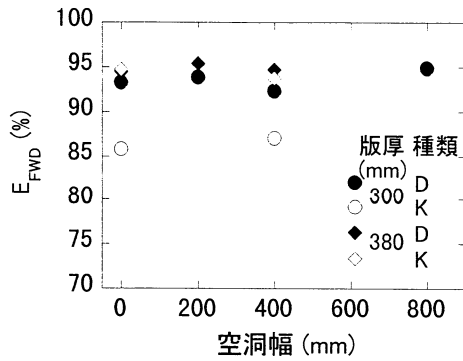


図-18 空洞幅と荷重伝達率の関係

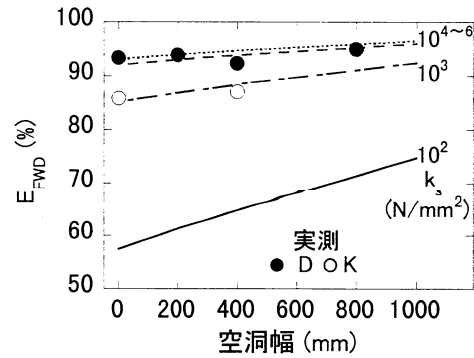


図-20 解析値と実測値による空洞幅と荷重伝達率の関係

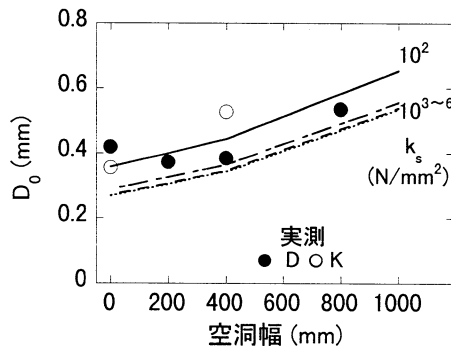


図-19 解析値と実測値による空洞幅と D_0 の関係

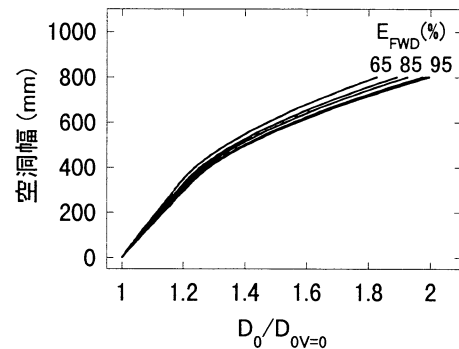


図-21 D_0 と E_{FWD} に注目した空洞幅の推定法

グ現象も生じ、最終的にはコンクリート版と路盤との間に空洞が生ずるに至ると考えられる。

したがって、目地部の構造評価においてはコンクリート版下方の空洞の有無、大きさを推定することが必要となる。50kNのFWDを用いた方法では、コンクリート版中央部ならびに目地部における測定結果から推定した路盤支持力係数に注目することによってそれを行うこととしていた。これは計算が煩雑であること、また今回中央部における解析手法として弾性地盤上の平板モデルを用いるとしたことから、ここでは D_0 ならびに E_{FWD} に基づく方法について検討することとした。

あらかじめ寸法のわかっている人工的な空洞を目地に沿ってコンクリート版下に設けた無筋コンクリート試験舗装上でFWDによるたわみ測定を行った。この試験舗装のスリッパ目地部には200, 400, 800mm幅の空洞を設け、かぎ型目地部においても400mm幅の空洞を設けている。施工管理試験の結果として、コンクリート版の弾性係数 E_c 、ポアソン比 ν は、それぞれ、32kN/mm²、0.21であること、また路盤支持力係数 K_{30} （载荷板直径300mm）は350MN/m³であることがわかっている（FWDによる測定は昼間に実施）。

今回用いることにした測定方法により得られた D_0 と空洞幅の関係を図-17にまとめた。この図は、目地構造が2種類（D：スリッパ目地、K：かぎ型目地）で、版厚も2種類（300, 380mm）のデータである。全体的にみれば、空洞幅の増加につれて D_0 も増加することから、 D_0 に

注目することによって空洞幅を推定することが可能となるものと思われる。同様に E_{FWD} と空洞幅の関係について図-18にまとめてある。この場合には、空洞幅が増加しても E_{FWD} はほとんど変化しないものとみなせよう。

次に、上記のコンクリート版下方に空洞があるコンクリート舗装にFWDによる荷重が载荷された状態を4.(1)で用いた有限要素法により解析した。これを行なうためには、まず版中央部におけるたわみ測定結果を逆解析することにより E_c 、 K を推定し、次に、これらの値を使用し、路盤に空洞のある状況をモデル化したWinkler支承上の平板の有限要素法により D_0 、 E_{FWD} の計算値を求めるという手順となる。この場合、目地ではせん断ばねのみで荷重が伝達されるものと考えた。この結果として、図-19には D_0 が、図-20には E_{FWD} が空洞幅によって変化する状況をまとめてある。 D_0 が空洞幅につれて増加する状況はこの解析によっても明らかになっている。また、 E_{FWD} については、その変化が少なく、 E_{FWD} が比較的大きい範囲では空洞幅によらずほぼ一定値をとると考えられるが、小さな値の範囲では変化が大きくなっている。

目地部におけるFWDでのたわみ測定結果からコンクリート版下空洞の有無ならびにその大きさを推定する方法としては、空洞がないときの D_0 （ $D_{0=0}$ ）に対する問題となっている箇所の D_0 の比率 $D_0 / D_{0=0}$ に注目するものを考えた。具体的なものとして、版厚300mmについては図-21に示すようなものになる。 D_0 の比率に注目することにより、 E_{FWD} の値そのものにはあまり影響を受けることな

く、空洞の大きさが推定可能になることがわかる。このことから、FWDによるたわみ測定においては、問題となっている箇所 D_0 と E_{FWD} を求め、 D_0 の明らかに空洞がない箇所 D_0 ($D_{0=0}$) に対する比と E_{FWD} から、空洞幅が推定可能となる。

5. 結論

荷重として200kNを載荷可能なFWDによる空港コンクリート舗装の非破壊構造評価法について以下に示す結論が得られた。

- (1) コンクリート版中央部における測定によりコンクリート版弾性係数ならびに路盤支持力係数を推定する方法としては、路盤を弾性地盤とみなした弾性支承上の平板理論としてコンクリート舗装をモデル化して、7点のたわみを全て使用して逆解析するものが適切である。
- (2) 一般的な目地ならびにひび割れでは、FWDの載荷板をそれらから少し離して設置することによってたわみを測定し、目地・ひび割れの両側でそれから等距離のものをを用いて算出する荷重伝達率により定量化できる。
- (3) 連続鉄筋コンクリート舗装の横ひび割れ・特殊目地等では、(2)と同様の方法による荷重伝達率に加えて、たわみ勾配に注目することによって、それらの構造健全性が評価できる。
- (4) 目地・ひび割れ部のコンクリート版下の空洞は、(2)と同一な方法でたわみを測定し、荷重伝達率と載荷板中心の最大たわみを用いて、その有無・大きさを推定できる。

6. おわりに

本文でまとめた方法によって空港コンクリート舗装の構造評価がほぼできるようになった。しかし、目地・ひ

び割れの構造健全性・荷重伝達機能・路盤の空洞については実証試験が難しいこと、舗装残存寿命の推定が難しいこと等、課題が残されていると認識している。今後は、これらについて研究を進めるとともに、構造評価法としてシステム化を図っていく所存である。

参考文献

- 1) 運輸省航空局：空港コンクリート舗装構造設計要領，121p., 1990.
- 2) Hachiya, Y. and Sato, K.: Nondestructive Evaluation Method of Concrete Pavement by FWD, 土木学会論文集, No.420/V-13, pp.303-309, 1990.
- 3) 深沢勝一, 八谷好高, 横井聰之, 川守田正路：プレキャストPC版舗装のアンボンドPC鋼材による圧縮ジョイント, 第54回年次学術講演会講演集第V部, pp.466-467, 1999.
- 4) 福手 勤, 八谷好高：コンクリート舗装の目地部における荷重伝達機能, 土木学会論文報告集, No.343, pp.239-24, 1984.
- 5) Yin, J. and Hachiya, Y.: Back-Calculation for Structural Parameters of Pavement Slab on Winkler and Elastic Solid Subgrades, 土木学会論文集, No. 606/V-41, pp.165-169, 1998.
- 6) 廣田道紀, 殷 建軍, 八谷好高：FWDたわみデータ数がコンクリート舗装における逆解析結果に及ぼす影響, 第53回年次学術講演会講演集第V部, pp.22-23, 1998.
- 7) 坂井典和, 廣田道紀, 八谷好高：FWDによる空港コンクリート舗装力学定数の評価法, 第54回年次学術講演会講演集第V部, pp.388-389, 1999.
- 8) Hachiya, Y., Kameta, S. and Sato, R.: Implementation of Nondestructive Evaluation on Airport Concrete Pavements, 3rd International Workshop on the Design and Evaluation of Concrete Pavements, pp.375-384, 1994.
- 9) CP - コンクリート舗装構造解析プログラムパッケージ Windows95 版 (<http://www.plan.civil.tohoku.ac.jp/pave/hoso-m/download.html>)
- 10) Federal Aviation Administration: Airport Pavement Design and Evaluation, FAA Advisory Circular, AC150/5230-6C, 159p., 1978.

NONDESTRUCTIVE STRUCTURAL EVALUATION OF AIRPORT CONCRETE PAVEMENTS WITH 200kN-FWD

Yoshitaka HACHIYA, Norikazu SAKAI, Michinori HIROTA and Osamu TAKAHASHI

Nondestructive structural evaluation method of airport concrete pavements using FWD with 200kN is described. The method consists of two phases; one is to estimate both elastic coefficient of concrete and coefficient of subgrade reaction based on measured deflections at slab center, and the other is to evaluate structural integrity, load transfer effectiveness and voids underneath slab, based on the deflections at joints and cracks. In the process of this development, deflections measured at various airport pavements in service and some experimental pavements have been analyzed, and then practical criteria are described after comparing with the current procedure.