

# FWDによる空港舗装構造評価システムの開発

坪川将丈<sup>1</sup>・八谷好高<sup>2</sup>・水上純一<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 国土交通省国土技術政策総合研究所（〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1）

<sup>2</sup>フェロー会員 工博 国土交通省国土技術政策総合研究所（〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1）

<sup>3</sup>正会員 工修 国土交通省国土技術政策総合研究所（〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1）

FWDにより測定したたわみデータを用いた空港アスファルト舗装ならびに空港コンクリート舗装の新しい構造評価システムを開発したので、その概要を報告する。この構造評価システムでは、従来用いられていた構造評価システムではできなかった小規模空港の舗装の構造評価や、空港用以外のFWDによる測定値を用いた構造評価についても対応できるよう改良を行った。また、BALMやGAMESを使用して計算精度の向上を図るとともに、個別のプログラムから構成されていたシステムのパッケージ化を図ることにより汎用性を高めた。さらに、空港コンクリート舗装の補修方法として、既設舗装上にコンクリートオーバーレイを施す場合を想定し、必要とされるオーバーレイ厚を計算することが可能である。

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

## 1. はじめに

空港舗装の構造評価を迅速に行うために、近年ではFWD（Falling Weight Deflectometer）を用いた非破壊構造調査が国内空港において実施されている。FWDによる空港舗装の非破壊構造評価手法としては、空港アスファルト舗装と空港コンクリート舗装についてそれぞれ提案されており<sup>1,2)</sup>、これらの研究成果を基に、各種の個別計算プログラムからなるシステムを使用することで構造評価が可能である。しかしながら、評価の対象が大型航空機が就航する空港の舗装に限定されており、主に小型航空機が就航する空港や交通量が少ない小規模空港の空港舗装には用いることができなかった。また、このシステムでは200 kNの最大荷重を発生可能な空港用FWDによる測定値のみを対象としていたことから、その他のFWDによる測定値については対応することができなかった。さらに、空港コンクリート舗装に関しては、構造評価後の具体的な補修規模の検討を実施することができなかった。

以上の背景から、従来用いていた構造評価システムを、航空機が走行・駐機する全ての空港舗装に対応できるよう拡張し、さらに、空港用以外のFWDによる測定値に対しても構造評価が実施できるようにした。同時に、汎用性を高めるために、この構造評価システムのパッケージ化を図った。また、空港コンクリート舗装に関しては、構造的に問題がある場合の補修工法としてコンクリートによるオーバーレイを想定し、コンクリートオーバーレ

イ厚を算出できるように改良を施した。

## 2. 空港アスファルト舗装の構造評価システム

FWDを用いた空港アスファルト舗装の構造評価フローを図-1に示す。空港アスファルト舗装の構造評価では、たわみを用いた簡易構造評価、ならびに設計航空機脚荷重が当該舗装に載荷された場合に舗装内に発生するひずみを用いた構造評価を採用している<sup>1)</sup>。

### (1) 構造評価システムの概要

従来用いていた空港アスファルト舗装の構造評価システムでは、一部の計算過程において、市販の特殊なアプリケーションの導入が必要であった。また、このシステムでは、使用するパーソナルコンピュータの環境に依存していることが原因と考えられる不具合が生じる場合があった。このことから、アスファルト舗装用の新しい構造評価システムは、Microsoft Excel ならびに Microsoft Visual Basic for Application を基に開発した。また、図-1に示す構造評価フローに従った一連の解析機能の他に、図-2に示すメニュー画面において、構造評価フローを構成する個別の計算処理を選択して実行できるようにしている。

### (2) データ入力

データ入力画面を図-3に、入力必要項目を表-1に示

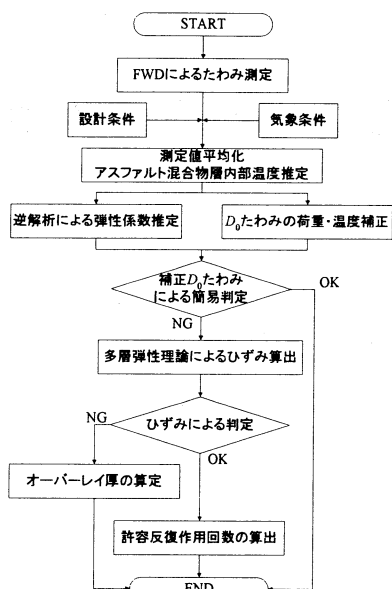


図-1 空港アスファルト舗装の構造評価フロー

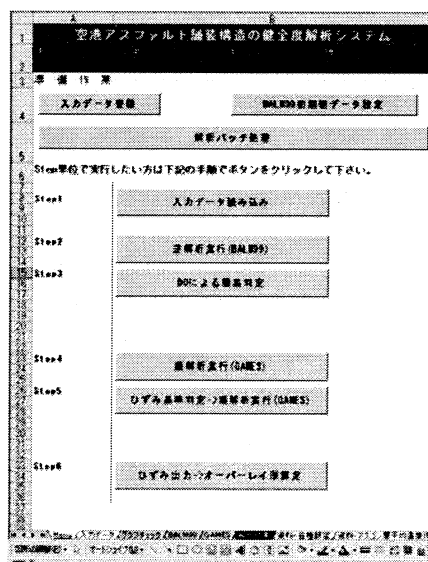


図-2 メニュー画面

す。データは全て Microsoft Excel のデータ入力用シートに入力する。FWD により測定したデータは、同一地点で 4 回測定したもののうち 1 回目のデータを棄却し、2 回目以降に測定したデータのみ入力を行う<sup>3)</sup>。入力したたわみデータに関しては、たわみ曲線図が自動的に描画されるため、たわみ曲線図を確認し、入力測定値間の変動が大きいデータについては、当該測定データを棄却することが可能である。

また、国土技術政策総合研究所で所有している空港用 FWD は、載荷板の直径が 450 mm、標準載荷荷重が 200 kN、たわみ測定位置は 7 点(載荷板中心から 0, 300, 450, 600, 900, 1500, 2500 mm)であるが、汎用性の観点から、その他の FWD で測定したデータも入力が可能である。たわみに関しては、任意の位置で測定したたわみを最大 10 点まで入力することが可能である。

図-3 データ入力画面

表-1 入力必要項目<sup>4)</sup>

|         | 入力項目・単位                 | 備考                                   |
|---------|-------------------------|--------------------------------------|
| 調査時の測定値 | 測定地点名                   |                                      |
|         | 測定日 (yyymmdd)・時刻 (hhmm) |                                      |
|         | 載荷荷重 (kgf)・載荷板直径 (cm)   |                                      |
|         | たわみ (μm)・測定位置 (cm)      | 最大 10 点まで入力可能                        |
|         | 温度 (°C)                 | 舗装表面温度、気温、測定前日の最高気温                  |
| 舗装構成    | アスファルト混合物層厚 (cm)        | アスファルト安定処理上層路盤厚を含む                   |
|         | 粒状路盤厚 (cm)              |                                      |
|         | 路床厚 (cm)                | 600 cm - 舗装厚                         |
|         | 上層路盤の材料種別               | アスファルト安定処理材、粒状材                      |
| 設計条件    | 設計荷重の区分                 | LA-1, LA-12, LA-2, LA-3, LA-4        |
|         | 舗装区域区分                  | A, B, C, D                           |
|         | 設計反復作用回数 (回)            | 3,000, 5,000, 10,000, 20,000, 40,000 |
| その他     | 路床 CBR 低減係数             | 0~1                                  |

### (3) 各層の弾性係数の逆解析

FWD により測定した荷重とたわみを用いて、各層の弾性係数を逆解析により推定する。弾性係数の逆解析には、BALM99<sup>5)</sup>を使用した。

この構造評価システムでは、まず、入力データに従い、BALM99 用の入力テキストファイルを自動的に作成する。次に、外部プログラムとして BALM99 を実行し、その結果得られた出力ファイルを読み取り、逆解析結果を整理している。逆解析を実施する際の弾性係数の初期値としては、BALM99 において推奨されている値を使用した。また、層構成としては、アスファルト混合物層、粒状路

盤、路床、基盤層の4層構造としている。ただし、弾性係数の初期値や層数については、逆解析条件設定シートにおいて変更することが可能である。

#### (4) 多層弾性解析によるひずみの算出

ひずみによる構造評価では、設計航空機脚荷重が舗装表面に載荷された場合に舗装内に発生するひずみ（アスファルト混合物層下面の最大水平ひずみ $\epsilon_t$ 、路床上面の最大鉛直ひずみ $\epsilon_v$ ）を多層弾性理論により計算し、それぞれの規準ひずみ（ $\epsilon_{tcri}$ 、 $\epsilon_{vcri}$ ）と比較することで構造評価を実施している。多層弾性理論によるひずみの計算には、前節で得られた各層の弾性係数（アスファルト混合物層の弾性係数に関しては、載荷周波数と舗装代表温度に関して補正を行った値）と設計航空機脚荷重の諸元を用い、多層弾性解析プログラム GAMES for Windows version 2.3（以下、GAMES）<sup>9)</sup>を使用している。

この構造評価システムでは、まず、外部プログラムとして GAMES を起動し、各層の弾性係数、設計航空機脚荷重の諸元を使用して、入力ファイルを作成する。次に、多層弾性解析を実行し、得られた結果から $\epsilon_t$ 、 $\epsilon_v$ の整理を行う。ひずみを算出する着目点については、航空機主脚のタイヤ直下ならびに脚中心としている。

#### (5) 規準たわみ、規準ひずみの設定

FWD により測定した載荷板直下のたわみ（ $D_0$ ）による簡易構造評価、ならびに設計航空機脚荷重により舗装内に発生するひずみを用いた構造評価を行うための規準たわみ、規準ひずみを GAMES により算出している。

規準たわみ $D_{0cri}$ の設定は、まず、各種の設計条件に応じた舗装構造を空港舗装構造設計要領<sup>4)</sup>を基に決定する。次に、GAMES により、舗装表面に載荷板を介して FWD 荷重が載荷された場合の舗装表面のたわみを計算し、載荷板中心のたわみを $D_{0cri}$ として採用した。

規準ひずみ $\epsilon_{tcri}$ 、 $\epsilon_{vcri}$ は、規準たわみの算出に用いた舗装構造に対して、設計航空機脚荷重が載荷された場合の舗装内のひずみを採用した。

規準たわみ、規準ひずみ算出に使用した各層の弾性係数を表-2 に示す。アスファルト混合物層の弾性係数は、Heukelom らの示した方法<sup>7)</sup>に従って設定している。規準たわみの算出時には、比較する $D_0$ たわみが FWD の載荷周波数に対応したものであることから、国土技術政策総合研究所で所有している空港用 FWD の載荷周波数を参考に、載荷周波数を 16 Hz として算出したアスファルト混合物層の弾性係数を使用している。一方、規準ひずみの算出時には、滑走路と誘導路における載荷周波数を、それぞれ 10 Hz と 2 Hz<sup>8)</sup>として算出したアスファルト混合物の弾性係数を使用している。粒状路盤の弾性係数は、過去に実施された実大規模試験<sup>1)</sup>から逆解析により得ら

表-2 規準たわみ、規準ひずみ算出に使用した弾性係数

| 上層路盤<br>材料種別    | 層              | 弾性係数 (MPa) |                                        |       |
|-----------------|----------------|------------|----------------------------------------|-------|
|                 |                | $D_{0cri}$ | $\epsilon_{tcri}, \epsilon_{vcri}$ 算出時 |       |
|                 |                | 算出時        | 滑走路                                    | 誘導路   |
| アスファルト<br>安定処理材 | アスファルト<br>混合物層 | 5,978      | 5,096                                  | 2,450 |
|                 | 粒状路盤           | 196        |                                        |       |
|                 | 路床             | 10×路床の CBR |                                        |       |
|                 | 基盤層            | 6,860      |                                        |       |
| 粒状材             | アスファルト<br>混合物層 | 5,978      | 5,096                                  | 2,450 |
|                 | 粒状路盤           | 294        |                                        |       |
|                 | 路床             | 10×路床の CBR |                                        |       |
|                 | 基盤層            | 6,860      |                                        |       |

※ポアソン比は各層 0.3 とした。

れた値を、路床の弾性係数（単位：MPa）は、路床の CBR（単位：%）に 10 を乗じた値を使用している。

一例として、上層路盤材料がアスファルト安定処理材、設計反復作用回数が 10,000 回という条件で設計された滑走路の舗装に関する規準たわみと規準ひずみを図-4 に示す。なお、構造評価を行う際の路床の CBR としては、逆解析により得られた路床の弾性係数（単位：MPa）を 10 で除し、単位（%）を付与した値を用いている。

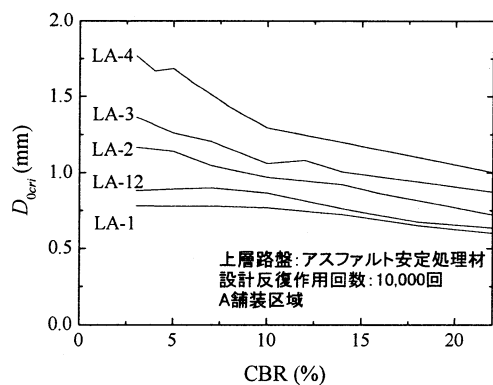
#### (6) オーバーレイ厚ならびに許容反復作用回数の算出

ひずみを用いた構造評価において、構造的に問題があると判定された場合、その場合の補修方法としては、表層上にアスファルトコンクリートによるオーバーレイを施すことを想定し、計算ひずみが規準ひずみ以下となるのに必要なオーバーレイ厚を決定している。この場合、既設アスファルト混合物層の弾性係数としては、逆解析により推定した値に対して、載荷周波数と舗装代表温度に関する補正を実施した値を用いている。また、オーバーレイ層の弾性係数としては、これらを新規混合物とみなし、弾性係数としては表-2 に示す値を用いた。

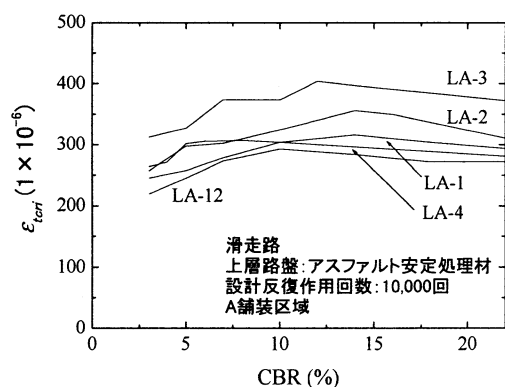
ひずみによる判定を実施した結果、計算ひずみが規準ひずみを超過していない場合は、その時点の舗装構造状態から推定される許容反復作用回数を計算する。この許容反復作用回数は、その時点までの累積損傷は考慮しておらず、設計反復作用回数と規準ひずみの関係、ならびに計算ひずみの値から、今後許容される反復作用回数を算出したものである。

### 3. 空港コンクリート舗装の構造評価システム

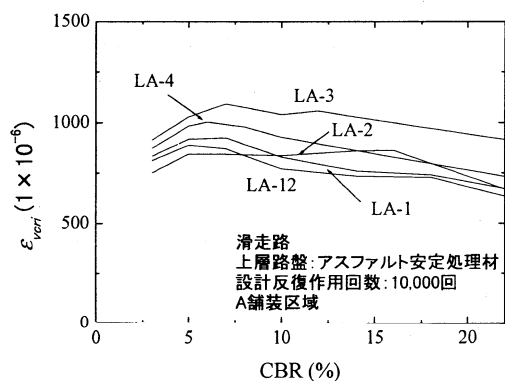
空港コンクリート舗装の構造評価フローを図-5 に示



(a) 規準たわみ



(b) アスファルト混合物層下面の規準水平ひずみ



(c) 路床上面の規準鉛直ひずみ

図-4 空港アスファルト舗装の規準たわみ, 規準ひずみの一例

す。空港コンクリート舗装の構造評価システムでは、コンクリート版中央部ならびに目地部・ひび割れ部において測定した FWD たわみデータを使用して構造評価を実施する<sup>2)</sup>。

### (1) 構造評価システムの概要

空港コンクリート舗装用の新しい構造評価システムについても、空港アスファルト舗装と同様に Microsoft Excel ならびに Microsoft Visual Basic for Application を基に開発した。また、構造評価フローに従った一連の解析機能の

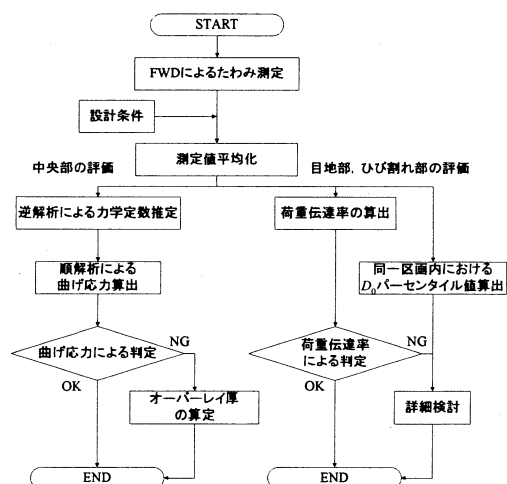


図-5 空港コンクリート舗装の構造評価フロー

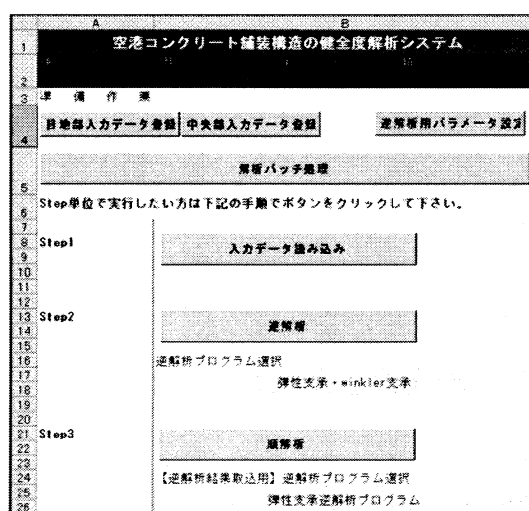


図-6 メニュー画面

他に、図-6に示すメニュー画面において、構造評価フローを構成する個別の計算処理を選択して実行できるようにしている。

### (2) データ入力

入力必要項目の一覧を表-3に示す。アスファルト舗装の場合と同様に、データは全て Microsoft Excel のデータ入力用シートに入力する。汎用性を持たせるために、たわみ測定位置については、最大10点まで任意に設定することが可能である。

### (3) 版中央部における構造評価

コンクリート版中央部において測定した FWD たわみデータを使用し、コンクリート版ならびに路盤の構造評価を実施する。

まず、測定した FWD たわみを用いて舗装の力学定数を逆解析により算出し、次に、設計航空機脚荷重がコンクリート版に載荷された際のコンクリート版下面の最大曲げ応力を算出し、設計基準曲げ強度と安全率を考慮する

表-3 入力必要項目<sup>4)</sup>

|             | 入力項目・単位                     | 備考                              |
|-------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 調査時の<br>測定値 | 測定地点名                       |                                 |
|             | 測定日 (yyymmdd)・<br>時刻 (hhmm) |                                 |
|             | 載荷荷重 (kgf)・<br>載荷板直径 (cm)   |                                 |
|             | たわみ (μm)・<br>たわみ測定位置 (cm)   | 最大 10 点まで入力可能                   |
| 舗装構成        | コンクリート版厚<br>(cm)            |                                 |
| 設計条件        | 設計荷重の区分                     | LA-1, LA12, LA-2,<br>LA-3, LA-4 |
|             | 舗装区域区分                      | A, B, C, D                      |
|             | 設計反復作用回数<br>の区分             | M, N, O                         |

ことで、構造評価を実施している。

逆解析では、Yin らが開発した逆解析プログラム<sup>9)</sup>を使用して、コンクリート版の弾性係数 $E_c$ と路盤の力学定数（路盤支持力係数 $K_{75}$ 、もしくは路盤弾性係数 $E_b$ ）を推定する。このプログラムでは、Winkler 支承上の平板をモデル化した Winkler 支承モデル、弾性路盤上の平板をモデル化した弾性支承モデルの両方で逆解析が可能である。

順解析によるコンクリート版下面の最大曲げ応力の算定は、逆解析により推定した $E_c$ ならびに $K_{75}$ 、設計航空機脚荷重の諸元を用いて、Westergaard の中央部載荷公式を Picket と Ray が変形した式による曲げ応力算定プログラム<sup>10)</sup>を使用している。このプログラムでは、路盤支持力係数が必要となるため、逆解析において弾性支承モデルを使用した場合は、両モデルにおける剛比半径が等しいと仮定し、(1)式により $E_b$ から $K_{75}$ を算出している。

$$K_{75} = \sqrt[3]{\frac{E_b^4}{16D(1-\nu_b^2)^4}} \quad (1)$$

ここに、

$E_b$  : 路盤弾性係数 (MPa),

$D$  : コンクリート版の曲げ剛性

( $=E_c h_c^3 / 12(1-\nu_c^2)$ , N・m),

$h_c$  : コンクリート版厚 (m),

$\nu_c$  : コンクリート版のポアソン比 (=0.15),

$\nu_b$  : 路盤のポアソン比 (=0.30)。

以上の要領で計算した最大曲げ応力が、設計基準曲げ強度を安全率で除した値を超過する場合には、構造上問題があるものと判定した。また、その場合の補修方法と

してコンクリートオーバーレイを想定し、オーバーレイ厚の算定を行うこととした。オーバーレイ厚の算定では、付着オーバーレイ、分離オーバーレイを想定し、それぞれ(2)式と(3)式によりオーバーレイ厚の算定を行うことが可能である<sup>11)</sup>。なお、分離オーバーレイの場合には、係数 $C$ （破損の状況に応じ 0.0~1.0）により、既設コンクリート版の破損状況を考慮したオーバーレイ厚を算定することができる。

付着オーバーレイの場合

$$h_o = h_d - h_e \quad (2)$$

分離オーバーレイの場合

$$h_o = \sqrt{h_d^2 - C \left[ \left( \frac{h_d}{h_{db}} \right) \cdot h_e \right]^2} \quad (3)$$

ここに、

$h_o$  : オーバーレイ厚 (mm),

$h_d$  : 既設路盤上に直接敷設されると仮定し、オーバーレイコンクリート版の設計基準曲げ強度を用いて設計したコンクリート版厚 (mm),

$h_{db}$  : 既設路盤上に直接敷設されると仮定し、既設コンクリート版の設計基準曲げ強度を用いて設計したコンクリート版厚 (mm),

$h_e$  : 既設舗装のコンクリート版厚 (mm),

$C$  : 既設舗装の状態により決定する係数。

#### (4) 目地部・ひび割れ部における構造評価

コンクリート版の目地部・ひび割れ部において測定した FWD たわみデータを使用し、目地部・ひび割れ部における荷重伝達機能の評価を実施する。目地部・ひび割れ部の構造評価では、目地・ひび割れを挟んで載荷側、非載荷側のたわみを測定し、(4)式により荷重伝達率 $E_{ff}'$ を算出する。標準では、載荷板直径を 450 mm、たわみの測定位置を目地から 225 mm 離れた位置としているが、載荷板寸法やたわみの測定位置がこれら以外の場合でも計算は可能である。

$$E_{ff}' = \frac{D_{45}}{(D_0 + D_{45})/2} \times 100 \quad (4)$$

ここに、

$D_0$  : 載荷側における目地・ひび割れ位置から 225 mm の位置のたわみ (mm),

$D_{45}$  : 非載荷側における目地・ひび割れ位置から 225 mm の位置のたわみ (mm)。

空港コンクリート舗装における荷重伝達率の規準値と

して明確なものは存在しないが、米国連邦航空局の版厚設計法では、コンクリート版自由縁部に生じる荷重応力を25%低減した値を版厚の設計に使用している。八谷らは中央部載荷時応力と自由縁部載荷時応力の比が0.75となるような荷重伝達率 $E_{ff}'$ を概ね85%としていることから<sup>2)</sup>、本解析システムでは85%を荷重伝達率の下限の目安とした。

また、荷重伝達率による評価とは別に、同一の舗装構造を有する区画において、目地部・ひび割れ部で測定した載荷板直下のたわみ( $D_0$ )のパーセンタイル値を算出することが可能である。 $D_0$ のパーセンタイル値を用いて、同一区画内において測定したたわみを相対比較することにより、目地部・ひび割れ部における異常箇所を検出することが可能である。

#### 4. まとめ

FWDにより測定したたわみを用いた空港アスファルト舗装ならびに空港コンクリート舗装の構造評価システムを拡張し、そのパッケージ化を図った。内容は次のとおりまとめられる。

- (1) 大規模空港のみを対象としていた従来のシステムを、小規模空港の設計条件における規準たわみや規準ひずみを整理し、空港用以外のFWDによる測定値についても対応できるよう改良したことで、小規模空港の舗装構造評価が可能となった。さらに、システムのパッケージ化を図ることで、パーソナルコンピュータの環境に依存せずに計算を行うことが可能となった。
- (2) 空港アスファルト舗装に関しては、解析プログラムとしてBALMならびにGAMESを使用することで計算精度の向上を図った。空港コンクリート舗装に関しては、既設コンクリート版の破損状況に応じたコンクリートオーバーレイ厚を算定することが可能となった。

#### 5. おわりに

以上で示したように、FWDにより測定したたわみデータを用いた空港舗装構造評価システムを開発した。今後、各空港で実施される調査結果を数多く解析することで、本システムの適用性を判断し、システムの精度を高めていく必要があると考えている。

本研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助金(基盤研究(C), 研究代表者八谷好高)の助成を受けた。ここに記して謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) 八谷好高, 高橋修, 坪川将丈: FWDによる空港アスファルト舗装の非破壊構造評価, 土木学会論文集, No. 662/V-49, pp. 169-183, 2000.
- 2) 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, 第4巻, pp. 199-208, 1999.
- 3) 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.
- 4) 運輸省航空局監修: 空港舗装構造設計要領, 1999.
- 5) FWD 研究会: FWDに関する研究(2002年度報告書), pp. 21-24, 2001.
- 6) 土木学会舗装工学委員会: 多層弾性理論による舗装構造解析入門~GAMES (General Analysis of Multi-layered Elastic Systems) を利用して~, 舗装工学ライブラリー3, 2005.
- 7) Shell International Petroleum Company Limited: *Shell Pavement Design Manual*, A1-A4, 1978.
- 8) Department of the Army and the Air Force: *Flexible Pavement Design for Airfields (Elastic Layered Method)*, 1989.
- 9) Yin, J. and Hachiya, Y.: Back-Calculation for Structural Parameters of Pavement Slab on Winkler and Elastic Solid Subgrades, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, No. 606/V-41, pp. 165-169, 1998.
- 10) 福手勤: 空港コンクリート舗装厚設計への電算プログラムの応用, 港湾技研資料, No. 262, 1977.
- 11) 運輸省航空局監修: 空港舗装補修要領(案), 34p., 1999.

### Packaged Structural Evaluation System for Airport Pavements with FWD

Yukitomo TSUBOKAWA, Yoshitaka HACHIYA and Junichi MIZUKAMI

New structural evaluation system for airport pavements using deflection data measured by FWD was developed. Since conventional evaluation system could not conduct structural evaluation for pavements in small airports, could not evaluate deflection data using FWD with load smaller than 200 kN, and could not be used in some computers due to problems, it was improved to solve them and it adopted BALM and GAMES to improve calculation accuracy. Furthermore, thickness of concrete overlay on concrete pavements could be calculated if necessary.