

繰返し荷重載荷による塑性変形を考慮した 空港滑走路舗装の変形解析

秋本 恵一¹・金澤 寛²・稲田 雅裕³・薮中 克一⁴・浜 昌志⁵

¹ 正会員 運輸省第二港湾建設局 東京空港工事事務所長（〒144 東京都大田区羽田空港三丁目3-1）

² 正会員 工修 運輸省第二港湾建設局 横浜調査設計事務所長（〒231 横浜市中区北仲通5-57）

³ 正会員 工修 運輸省第二港湾建設局 横浜調査設計事務所第二設計室長（〒231 横浜市中区北仲通5-57）

⁴ 正会員 工修 運輸省第二港湾建設局 横浜調査設計事務所工事専門官（〒231 横浜市中区北仲通5-57）

⁵ 正会員 日本工営株式会社 都市土木部四課（〒102 東京都千代田区麹町5-4）

東京国際空港国際空港新B滑走路の舗装断面には、現空港から発生する舗装材料をリサイクル活用することを技術的な課題として挙げており、その可否を検討するために試験舗装調査を行った。試験舗装調査は、リサイクル材を用いた試験舗装において、航空機相当荷重の繰返し走行を行いながら、FWD試験、静的載荷試験、路面形状測定、解体調査等を実施し、舗装の損傷程度を調べたものである。本報告では、これらの調査結果を報告するとともに、多層弾性理論に基づいた舗装断面の弾性係数の推定、繰返し走行載荷を受けた後の舗装体の評価を試みたものである。結論として、繰返し荷重走行後の舗装体の評価は、層厚の減少とみかけの弾性係数の低減といったことを組み合わせることで、再現することができた。

Key Words : airport, pavement, recycle, field test, FWD

1.はじめに

東京国際空港では沖合展開事業第Ⅲ期事業の一つとして、平成12年度に新B滑走路の供用を目標としている。新B滑走路の技術的な課題としては、舗装材料に旧空港の基本施設から発生する舗装材料を積極的にリサイクル活用していくことを掲げており、これまで現空港から舗装材料の一部を採取して室内試験を行ってきた。このような課題検討の最終確認を目的に、図-1に示すように舗装発生材を用いた舗装断面を現地に築造して試験舗装調査を行った。試験舗装調査とは、試験舗装断面上を航空機荷重に相当させた原型荷重走行車を設計反復作用回数分（10,000回）走行させることで、舗装断面の評価を行うものである。その調査内容としては舗装発生材を空港舗装に用いることの確認のため、走行回数に応じて舗装内に埋設した計測器による静的載荷試験、FWD試験機を用いた舗装上でのたわみ量、わだち掘れ量等であり、新材で構築された標準断面との比較検討を行った。

本報告は、試験舗装調査で行った調査結果を基に舗装材料の弾性係数の推定、試験舗装調査終了後の塑性変形を受けた舗装体の評価について得られた知見を報告するものである。

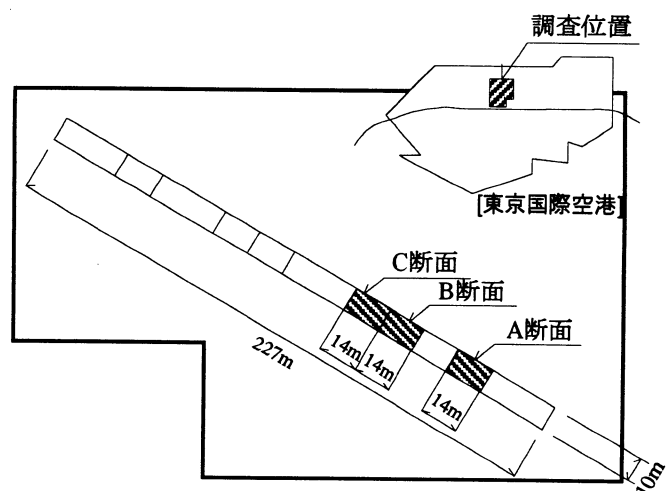


図-1 試験舗装平面図

2.調査内容

試験舗装調査として行った内容の内、本報告に関わる調査内容を表-1に示す。

表-1 試験舗装調査内容

	試験名	仕 様	備 考
ヤード造成時	FWD試験	下層路盤、上層路盤、基層、表層上といった施工段階で測定	関西国際空港所有 FWD試験機使用
走行試験	静的載荷試験	任意の走行回数終了後、原型荷重走行車の主脚を舗装上で載荷し、埋設してある土圧、変位計を測定	港湾技術研究所所有 原型荷重走行車使用
	FWD試験	任意の走行回数終了後、舗装上で走行ラインと非走行ラインとに分けて測定	港湾技術研究所所有 FWD試験機使用
	路面形状測定試験	任意の走行回数終了後、舗装上の塑性変形量を横断方向に測定	横断プロファイルメータ使用
解体調査	累積変位量調査	走行終了後、舗装の一部を切削、解体して層厚をレベル測量	

表中の調査内容の結果は、本論文にて以下の基礎資料として用いている。

(1) 弾性係数の推定：FWD試験，静的載荷試験

なお，FWD (Falling Weight Deflectometer) 試験は以下の時点で行っている。

- 1) 試験舗装ヤード造成時（下層路盤，上層路盤，基層，表層上）
- 2) 舗装築造後の走行試験時（0，1,000，2,000，5,000，7,000，10,000回時）

(2) 舗装の塑性変形量：路面形状測定試験，解体調査
走行試験時の各試験の測定位置は図-2に示す通りであるが，FWD試験は走行側と非走行側に分けて行った。

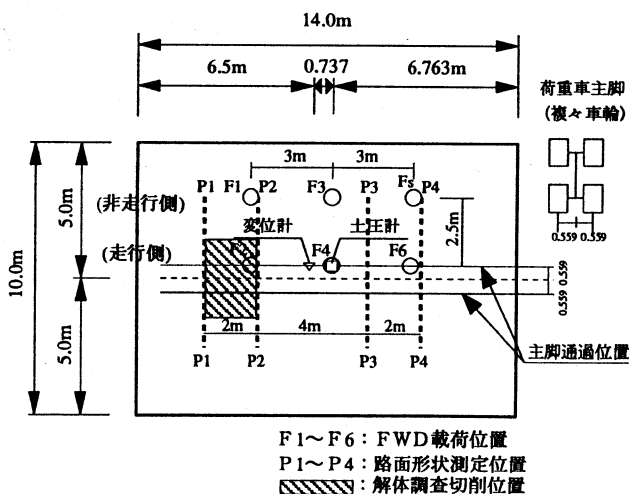


図-2 試験位置

本報告において性状比較に用いた舗装断面は図-3に示すような3断面である。

A断面：全て新材で構築した標準断面

B断面：A断面の舗装構造に再生材（舗装発生材）を用いた断面

C断面：再生材を用い下層路盤をアスファルト安定処理としたフルデプス断面

再生骨材配合率，設計強度などは，これまでの室内試験で明らかになった事項に基づいて定めている。なお，舗装構造の設計は「空港アスファルト舗装構造設計要領」¹⁾に準拠して行った。

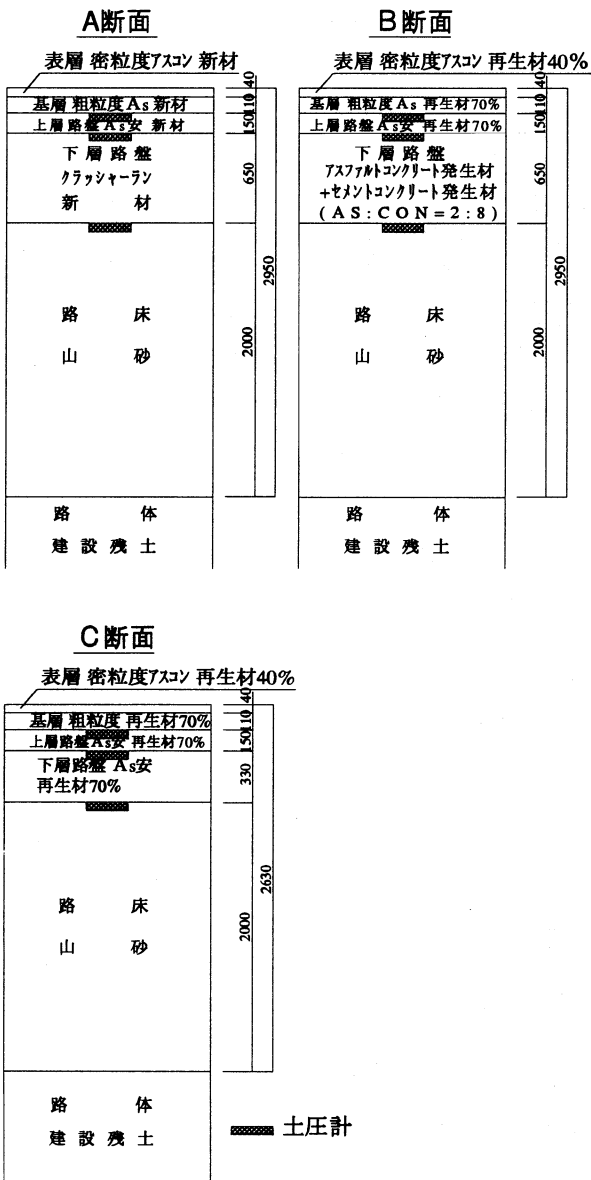


図-3 比較検討断面

3.調査結果

(1) 試験舗装ヤード築造時におけるFWD試験

各試験断面において、舗装工事中に各層の築造時毎にFWD試験を実施した。

A, C断面における各層毎のFWD試験結果を図-4に示す。図では横軸に各層をとり、凡例はFWDの振動計(D₀~D₂₅₀₀)を示している。

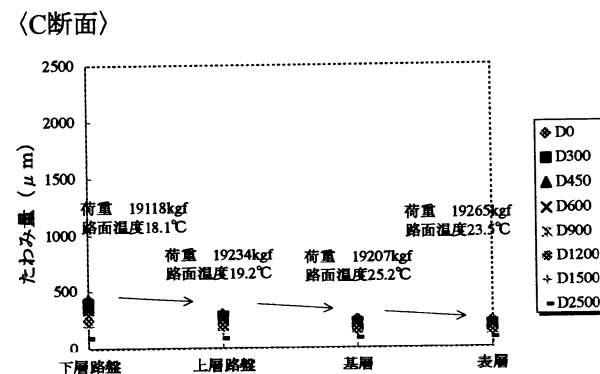
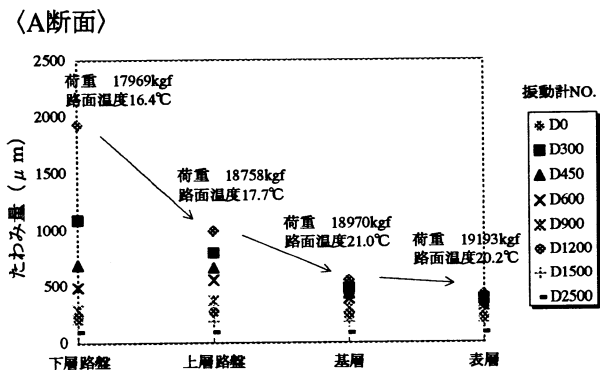
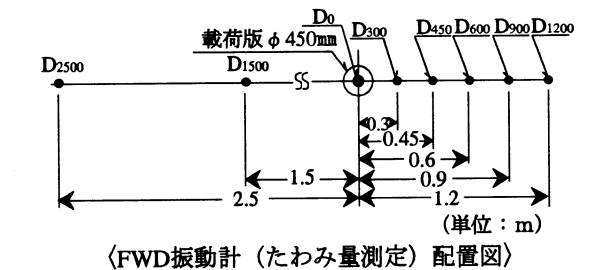


図-4 たわみ量変化

図中に示すように下層路盤上での測定から表層上での測定に移ることで、たわみ量は減少していくことが確認できる。また、構造の異なるA,C断面を比べると、構造の違いにより発生するたわみ量が異なること、C断面は上層路盤、基層、表層と層を積み上げた後でのたわみ量の低下は少ないこと、さらに表層まで築造した段階では、たわみ量に差がないことが確認できる。

図-5,6は下層路盤築造時、上層路盤築造時における各断面のたわみ量測定結果であるが、構造が同様なA, B断面の発生たわみ量は同様であること、構造

の異なるC断面から生じるたわみ量はA断面と異なることが確認できる。その傾向は、基層、表層築造時ともに同様である。

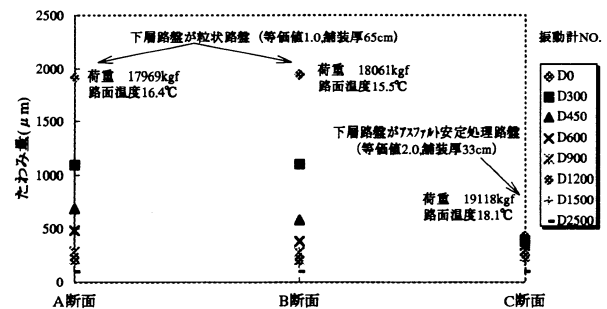


図-5 下層路盤築造時のたわみ量

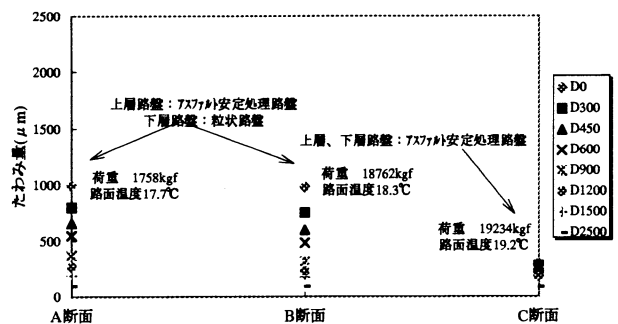


図-6 上層路盤築造時のたわみ量

(2) 走行試験中におけるFWD試験

走行試験では走行回数0, 1,000, 2,000, 5,000, 7,000, 10,000回走行終了後にFWD試験を図-2に示す位置(F1~F6)にて行っている。本調査より繰り返し荷重走行が増すことで、図-7に示すように舗装表面において測定されるたわみ量(荷重点直下の振動計D₀)は、走行回数とともに増加していくことが確認された。

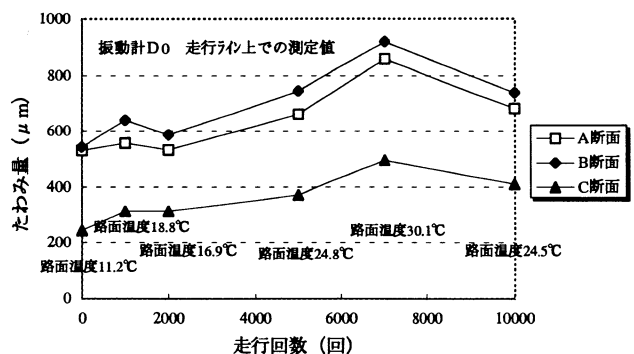
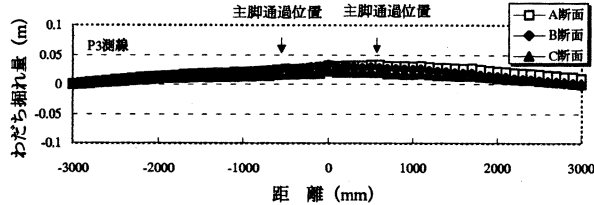


図-7 繰り返し荷重走行によるたわみ量

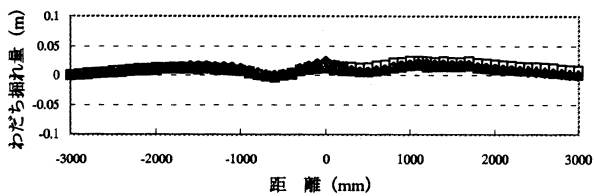
(3) 走行試験で得られた舗装表面の塑性変形量

走行試験では任意の走行回数走行終了後に舗装表面のわだち掘れを図-2に示す位置（P1～P4）で測定しており、塑性変形量の経時変化を測定している。図-8は、0、5,000、10,000回走行後の測定結果(P3)を記したものであるが、舗装表面のわだち掘れ量は3断面ともに大差ないことが確認できる。

〈0回時〉



〈5,000回時〉



〈10,000回時〉

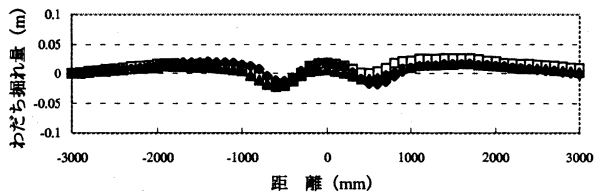


図-8 舗装表面のわだち掘れ

(4) 走行完了後の舗装断面の切削解体調査

10,000回の繰り返し荷重走行終了後、図-2に示す位置で舗装を切削解体し、舗装内部の各層の塑性変形量を調査した。一例として、B断面の調査結果を図-9に示すが、舗装表面のわだち掘れの影響を受けているのは、表層、基層であることが確認された。特に、基層において材料の流動が生じ、厚さの変化（1～1.5cm減）が確認された。また、若干ながら施工継目にて層間剥離が生じていることも確認された。

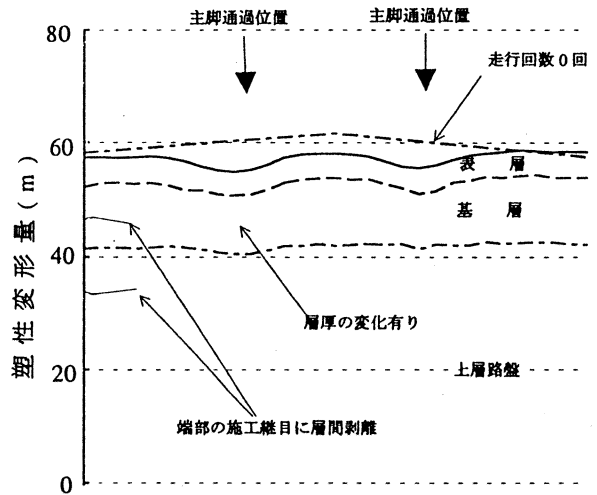


図-9 解体調査時の舗装断面（B断面）

以上の(1)～(4)の調査結果をまとめると、以下の通りである。

- ①構造が同様であれば、新材と再生材のたわみ量発生量、塑性変形量は同等である。
- ②構造の異なる断面を比較した結果、表層で生じたたわみ量は下層路盤以下の弾性係数に影響を受けるものと思われる。
- ③温度による影響もあるが、繰り返し荷重走行によって舗装表面におけるたわみ量は増加していく。
- ④繰り返し荷重により舗装体には塑性変形が生じており、特に基層における材料の流動が顕著である。

4. 解析内容

3.調査結果を基に、各層の物性を舗装用弾性解析理論のプログラム BISAR (BItumen Stress Analysis in Road) を用いて推定した。推定する上での着目点は以下の通りである。

- (1)ヤード築造時において、各層において得られたたわみ量を用いて各施工段階にて行う。具体的には、下層路盤上で得られたたわみ量を基に下層路盤と路床の物性を定め、その得られた物性を固定して、上層路盤上で得られたたわみ量を基に上層路盤の物性を定めるといった手法で設定する。

また、推定後の物性値を用いて、繰り返し荷重走行終了後の舗装体の評価を以下の点に着目して行うものとした。

- (2)走行が増すことでたわみ量が増加することへの対処は、舗装厚の変化あるいは、物性値の低減にて推定する。

上記の解析の背景として、これまで当空港において舗装体の弾性係数の推定を行うに当たって、表層まで施工完了後に舗装表面上でFWD試験を行い、多層弾性理論に基づいた材料物性の推定を試みてきた。しかしながら、表層まで仕上がった状態での弾性係数の推定は、推定すべき層が多く、解析を困難としていた。また、物性値推定の問題点として、路盤に用いられる切込み砕石などは弾性体ではないのに弾性体として扱っていること、舗装が受ける荷重は大きさが常に変化する動的なものなのに、現時点の弾性理論は静的な荷重としてしか扱えないといった課題も残されている²⁾。

解析断面は前記した3.調査結果より、構造の同様なA断面とB断面より得られるたわみ量は同等であることが確認されたため、構造の異なるA断面とC断面で行うものとした。図-10に解析モデルを示すが、本モデルにて1点荷重（載荷荷重約20t（196kN））、載荷半径22.5cm、層間は粗であるとして行った。

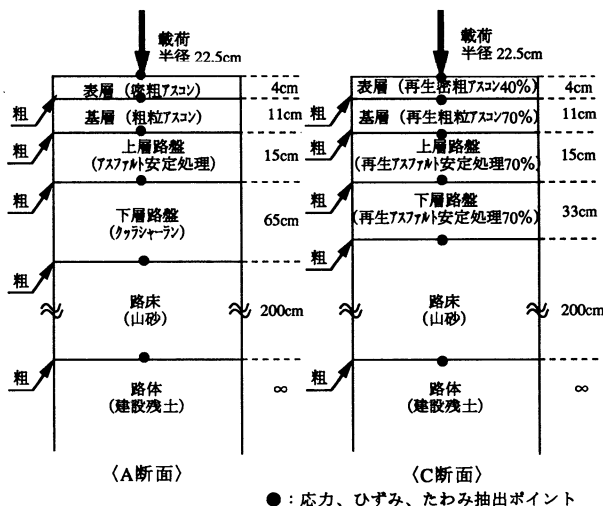


図-10 解析モデル

解析を行うに当たり、層の物性は弾性係数Eとポアソン比 ν の2つがあるが、ポアソン比の値が解析値に及ぼす影響は比較的小さい³⁾ことから、ポアソン比は既存資料^{1),4)}として示されている値の平均値を用い、弾性係数を変化させるものとした。また、図-11は東京国際空港新A滑走路上でこれまでにを行ったFWD試験の測定結果であるが、測定たわみ量は、同じ温度でも標準偏差で0.18～0.21程度とバラツキが大きく、最小二乗法から得られる一次式も相関係数の低いものとなっている。したがって、FWD試験によって得られる実測たわみ量にはある程度の許容範囲をもたせ、弾性係数を推定していくものとした。

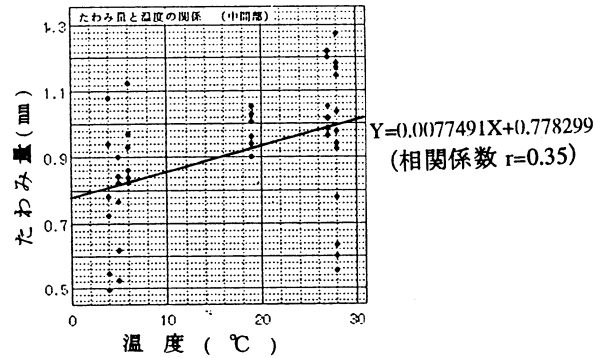


図-11 新A滑走路上のFWD試験結果

5. 解析結果

(1)ヤード造成時のたわみ量を用いての弾性係数の推定

FWD試験で得られたたわみ量は、前述のとおりバラツキが大きいことから図-11の統計処理データによる標準偏差を考慮して、実測値に対して $\pm 0.2\text{mm}$ の値を許容値として考えた。

解析結果の一例として下層路盤築造時のたわみ量（振動計D₀）を用いて解析を行ったものを図-12に示す。

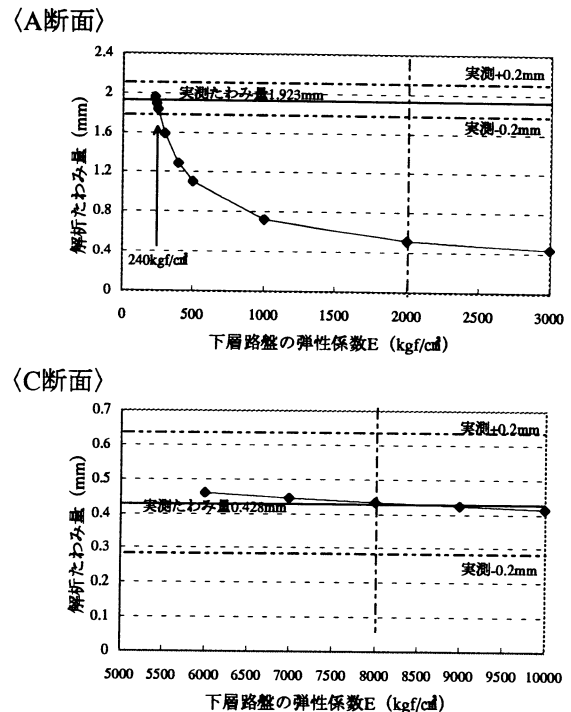


図-12 下層路盤の弾性係数と解析たわみ量の関係

図-12に示すようにA断面のような粒状路盤上では、たわみ量に合わせようとすると、 $E = 240 \text{ kgf/cm}^2$ （ 24MN/m^2 ）となり、既存資料^{1),4)}で示されている値とは異なった値を示すこととなるが、C断面のよう

にアスファルト安定処理路盤では既存資料で示されている値を用いることで精度良く近似できた。なお、本検討で用いた路床の弾性係数はこれまでの当空港における既存報告、 $E = 45 \text{ CBR}^5$ （現場CBR20程度）といった関係式より、 $E = 1,000 \text{ kgf/cm}^2$ （ 98 MN/m^2 ）と設定した。

同様な解析を上層路盤上、基層上、表層上で行い、解析結果として得られた弾性係数を表-2に示す。

表-2 解析結果

		弾性係数E (kgf/cm ²)		ポアソン比 ν
		A断面	C断面	
表層	密粒アスコン	20,000		0.35
基層	粗粒アスコン	20,000		0.35
上層路盤	アスファルト安定処理	8,000		0.35
下層路盤	粒状路盤/アス安	240	8,000	0.30/0.35
路床	山砂	1,000		0.30
路体	建設残土	50		0.35

表-2の定数を用いて航空機荷重を載荷（ボーイング747-400相当、複々車輪、1車輪当たり23,200kgf（228kN））した場合のBISARの解（解析値）と走行試験時に静的載荷試験として行った土圧計測定結果（実測値）を比較したものを図-13に示す。土圧計測定結果は、走行回数0回時において原型荷重走行車の主脚を土圧計直上に位置させ計測したものであり、上層路盤、下層路盤、路床上の値を測定している。図-13に示すように、たわみ量で設定した弾性係数を用いた応力の値と土圧計による実測値は概ね近似できていることが確認できた。ただし、A断面の下層路盤（粒状路盤）上の応力は十分な近似ができず、応力の値にて近似させようとするならば、弾性係数を既存資料で示されているような $E = 2,000 \text{ kgf/cm}^2$ 程度（ 196 MN/m^2 ）といった値にする必要がある。これは、前述のとおり粒状材を弾性体として取扱うことの困難性に起因している。

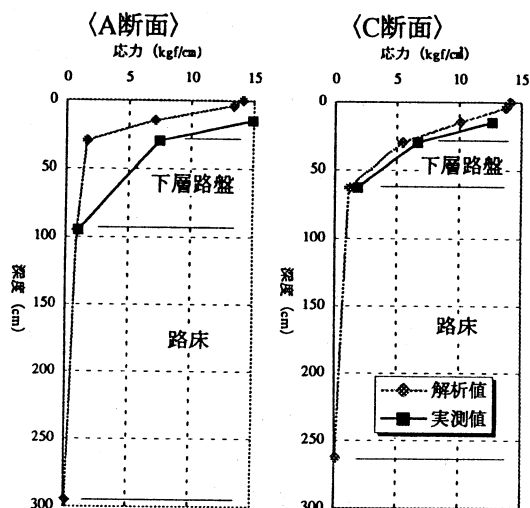


図-13 静的載荷試験結果による応力比較

(2) 繰り返し荷重走行によるたわみ量増加のシミュレーション

舗装解体調査で、繰り返し荷重走行を受けた後の舗装厚は変化することが確認されたことと、繰り返し荷重走行により舗装表面のたわみ量は増加することが確認されたため、表-2の解析結果を用いて、たわみ量が増加する現象を実際に層厚の変化が確認された基層の厚さの変化で表現してみた。その結果を図-14に示すが、厚さの変化に伴い解析たわみ量は増加していくことが確認できる。

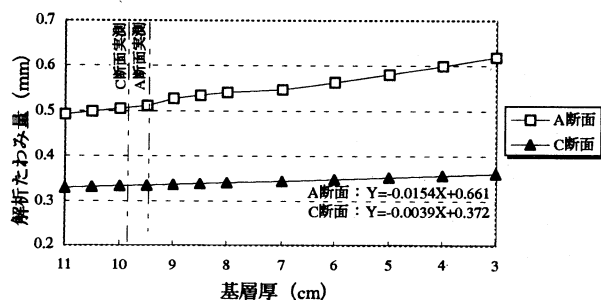


図-14 舗装厚の変化と解析たわみ量の関係（基層）

ここで、前記した図-7に示す繰り返し荷重走行で得られた実測たわみ量は、温度による影響を受けていること、FWDから得られるたわみ量は図-11に示すようにバラツキがあること、繰り返し荷重走行を行っていない非走行側でも経時的にたわみ量が増加していることから以下の補正を行った。

- ・新A滑走路のFWD試験から得られた温度とたわみ量の関係式より、実測たわみ量を20℃に温度補正した。
- ・最小二乗法にて回帰する際に、温度による影響を大きく受けている7,000回データを省いた。回帰計算結果を図-15（C断面）に示す。
- ・走行側で10,000回の繰り返し荷重走行により得られた走行側の回帰式の勾配から、非走行側の回帰式の勾配を差し引いた。

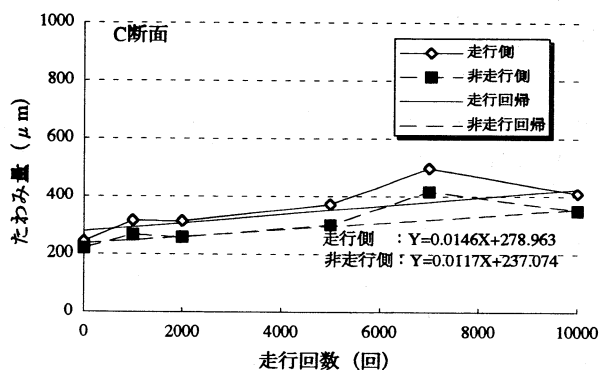


図-15 補正後のたわみ量と走行回数の関係

これらの補正を行ったことで10,000回走行といった繰り返し荷重走行によって増加するたわみ量（増加たわみ量）は，A断面で0.087mm，C断面で0.028mmとなった．これらの増加たわみ量を層厚の変化でシミュレーションした図-14と比較してみると，層厚を6～7cm程度減らすことで増加たわみ量に近似させることができたが，解体調査で得られた減少層厚（1～1.5cm）とは異なることから，層厚の変化だけでは十分なシミュレーションはできないものとなった．

したがって，層厚の変化は解体調査で得られた結果である基層厚（A断面9.5cm，C断面9.9cm）を固定し，本解析では一つの仮定として表・基層の弾性係数の低下にて増加たわみ量をシミュレーションしてみた．その結果を図-16に示す．

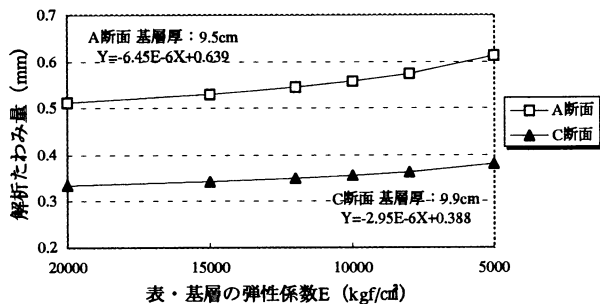


図-16 弾性係数と解析たわみ量の関係

表-2の数値から求められる解析たわみ量を初期値として，増加たわみ量を再現できる弾性係数は以下の通りとなった．

表層，基層： $E = 8,000 \text{ kgf/cm}^2$ (785 MN/m^2)

すなわち本解析からは，たわみ量増加の原因としては，舗装は繰り返し荷重走行を受け，1～1.5cm程度の層厚の減少， $E = 8,000 \text{ kgf/cm}^2$ (785 MN/m^2)程度への弾性係数の低下といった組み合わせが生じたのではないと思われる．ただし，解体調査時に行ったアスファルト混合物の密度試験結果は，繰り返し荷重走行により造成時に比べて増加しており，弾性係数の低下には直接関連しないと思われるため，みかけの弾性係数の低下といった表現とすべきと思われる．みかけの弾性係数の低下には，アスファルトの劣化・老化等による要因が含まれるのではないかとと思われる．また，路床の支持力も造成時と比較して大差ないことも解体調査時に確認されている．

6. 結 論

本試験舗装調査および，得られたデータを用いての弾性解析から得られた知見を次に示す．

- 現場走行試験結果より，新材と再生材の材料物性（弾性係数）の違いはないと言える．
- 粒状路盤材の弾性係数をたわみ量で近似させた場合，粒状体が弾性体でないことに起因して，一般に言われる値よりかなり低い値となった．
- FWDによるたわみ量は温度の影響，試験条件によって変化するものであるため，本試験を基に材料物性（弾性係数）の推定を行うに当たり，得られた実測値にはある程度の許容値を持たせる必要がある．
- 繰り返し荷重走行によって舗装表面のたわみ量は増加するが，その増加傾向は表・基層における層厚の減少とみかけの弾性係数を半分に以下に低下させることによって表すことができた．
- ただし，繰り返し荷重走行によって得られた増加たわみ量は，アスファルトの劣化・老化，温度による影響，層間剥離等の種々の要因が含まれるものと思われるため，今回の解析結果として得られたみかけの弾性係数の持つ意味については，今後さらに検討が必要であろう．

最後に，今回，試験舗装として行った調査，解析結果が，未だ課題となる項目はあるものの，今後の弾性解析および舗装設計に何らかの参考になれば幸いである．

謝辞：本試験舗装調査に当たっては（財）沿岸開発技術研究センターに「東京国際空港舗装構造研究委員会（委員長：菅原照雄北海道大学名誉教授）」ならびに「リサイクル材活用検討小委員会（委員長：国府勝郎東京都立大学教授）」を設置し，検討してきた．委員諸氏および調査，設計，施工に関与された関係者に対し，ここに感謝の意を表す．

参考文献

- 空港アスファルト舗装構造設計要領，運輸省航空局監修（財）航空振興財団，1990
- 亀山修一，姫野賢治，丸山暉彦，笠原篤：舗装体の弾性係数の逆解析における解の唯一性に関する研究，土木情報システム論文集，Vol.4，1995
- 舗装工学，（社）土木学会，p116，1995
- アスファルト舗装要綱，日本道路協会，pp303～307，1992
- 佐藤勝久，八谷好高：空港アスファルト舗装構造における荷重伝達機構，運輸省港湾技術研究所，pp103～110，1982

DEFORMATION ANALYSIS OF RUNWAY PAVEMENT IN CONSIDERATION OF ELASTIC DEFORMATION BY REPEATED LOADS

**Keiichi AKIMOTO, Hiroshi KANAZAWA, Masahiro INADA,
Katsuichi YABUNAKA and Masashi HAMA**

Tokyo International Airport assigned a technical task of recycling the pavement waste for construction of New B-Runway. Accordingly, an investigation was carried out on the test pavement containing recycled materials to explore the possibility. In the investigation a running load equivalent to the weight of an airplane was applied repeatedly to the test pavement. Outlining the result of the investigation, this report presents estimation of the elastic modulus of the cross section based on the multi-layer elasticity theory and evaluation of the pavement after the application of repeated loads. As a result, it was shown that characteristics of pavement damage can be illustrated by combining such factors as changes in layer thickness and reduction in apparent elastic modulus.