

大型航空機による空港舗装の挙動

BEHAVIOR OF AIRPORT PAVEMENTS FOR LARGE TYPE AIRCRAFT

阿部 洋一*・宮下 盛雄**・笠原 篤***

By Yoichi ABE, Morio MIYASHITA and Atsushi KASAHARA

In airport pavement, the design load is extraordinarily large and the variety of running speed is very wide. Further more, the loading condition of each pavement differs greatly depending on its location and object.

From these characteristics, there are still many unknown structural factors in designing airport pavement.

The main parts of the pavements such as runway and apron, of New Tokyo International Airport, were constructed from 1971 to 1973. To collect the response data of the pavements by aircraft loads, pressure gauges, deflection meters and strain gauges were set at two points of the runway and one point of apron during the construction period.

Just after the completion of pavements in 1972 and 1973, the tests were conducted using the testing vehicle with large type aircraft gear wheels, and the response data by static and dynamic loads were obtained by the above instruments.

After opening of the airport in May 1978, the dynamic response data of vertical stress in the subbases and subgrades of the runway and apron pavements were collected using the actual aircraft.

This thesis clarifies the characteristics of different usage conditions of runway and apron facilities by comparing the static and dynamic response of the testing vehicle with the dynamic response of aircrafts, and also deals with structural evaluation of both runway and apron pavements.

1. 概 説

新東京国際空港（以下成田空港とよぶ）の基本施設である滑走路、誘導路はアスファルト舗装、エプロンは連続鉄筋コンクリート舗装からなる。わが国初の本格的空港舗装であったことから、さまざまな角度から舗装構造の検討がなされた。その結果アスファルト舗装の設計法としてCBR法（別称CE法：米国陸軍工兵隊法）が、コンクリート舗装はPCA法（米国ポルトランドセメント協会法）が適切であると判断された¹⁾。

これらの設計法に基づいて構造設計がなされ、数種の構造断面案について、力学的検討を目的とした原寸大の試験舗装が昭和44年に建設された。断面案の特徴としては、アスファルト舗装に大々的なセメント安定処理路盤を採用し、コンクリート舗装としては当時ほとんど事例のなかった連続鉄筋コンクリート版を取り入れていることである。

試験舗装は運輸省港湾技術研究所と新東京国際空港公団の共同研究²⁾で実施され、120 m²の面積をもつ屋内テストピットに空港建設地域と同様な関東ローム地盤を再現して、5種類の舗装断面を製作した。これらの舗装に原寸大の航空機脚荷重載荷装置を用いて試験を行い、ひずみ、応力、たわみなど多くの実測データを得た。

成田空港の滑走路、誘導路、エプロンは、このとき検証された舗装断面を用いて、昭和46～48年にかけてその主要部分が建設された。

建設時には、テストピット内舗装と半無限地盤および広大な幅を有する現地舗装との対比や、載荷条件に対する舗装の応答調査を目的として、各施設の主要交通部分に、土圧、沈下、ひずみなどを測定する計器を埋設した。

引き続き昭和47年8月から昭和53年12月にかけて、これらの埋設計器などを用い、載荷重としての実物大主脚車輪装置や実際の航空機による空港舗装の静的、動的載荷試験を実施し、舗装の応答データを収録した³⁾。

本論文は、空港舗装に関するこれら応答データを整理解析することにより、アスファルト舗装およびコンクリート舗装から成る空港舗装の挙動を明らかにすることを目的とし、ひいては合理的な空港舗装の設計に寄与させることにある。

* 正会員 工修 新東京国際空港公団調査役 空港計画室
(〒103 中央区日本橋2-4)

** 正会員 工修 新東京国際空港公団課長代理 工務部
(同上)

*** 正会員 工博 北海道工業大学教授 土木工学科
(〒006 札幌市西区手稲前田419-2)

2. 舗装構造と挙動測定

(1) 舗装構造と計器配置

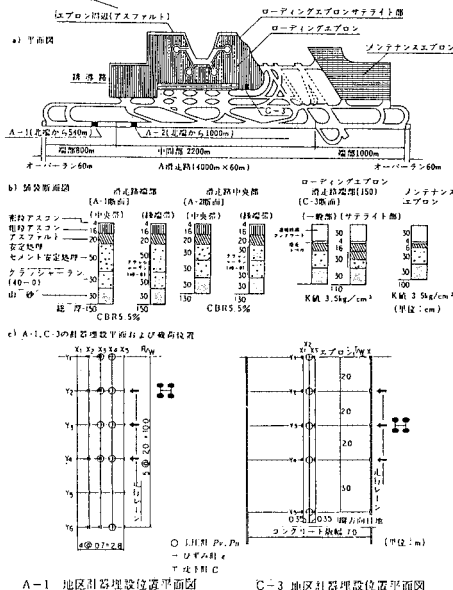
成田空港の主滑走路およびエプロンの設計諸元と舗装厚を表一に示す。設計荷重は、現有大型航空機(B-747)の重量である353トンを上回る500トンを採用している。

図一は成田空港における滑走路、誘導路、エプロンの各施設位置と舗装構造ならびに埋設計器の平面配置を示したものである。図中滑走路上のA-1、A-2はおの縦断方向の両端にあたる滑走路端部、およびそれに挟まれる中間部の舗装構造を示し、中間部の構造は高速走行による荷重軽減効果を反映して薄くなっている。

滑走路は、横断的に荷重が集中する中央帯と荷重頻度が小さい両側の縁端帯とに分けられている。端部での中央帯は40m、中間部でのそれは30mとなっている。したがって、縁端帯は滑走路幅60mから中央帯幅を引いた残りの両側部分であり、構造的には中央帯に比べ走行

表一 設計諸元と舗装厚

設計条件	アスファルト舗装		滑走路コンクリート舗装	
	滑走路端部	滑走路中央部	ローディングエプロン	メンテナンスエプロン
設計荷重(t)	5.00	5.00	5.00	3.50
脚高係数(t)	1.21	1.21	1.21	0.85
タイヤ接触圧(kg/cm ²)	18.4	18.4	18.4	12.9
接触面積(cm ²)	1.645	1.645	1.645	1.645
路床設計CBR値	5.5	5.5	-	-
路床K値(kg/cm ²)	-	-	3.5	3.5
路盤設計K値(kg/cm ²)	-	-	1.0	7
Coverage	5.000	5.000	-	-
無筋コンクリート厚(cm)	-	-	42	38
CIRC厚(cm)	-	-	30	30
コンクリート版安全率(fs)	-	-	1.7	2.0
標準舗装厚(cm)	178	152	-	-
実施舗装厚(cm)	150	130	110	100



図一 舗装構造と計測位置

頻度の少ない分だけ減厚されていることがわかる。図をみれば、縁端帯と中央帯の厚さは同じであるが、材料の質を下げることで実質的減厚を図っている。また、コンクリート舗装はローディングエプロンとメンテナンスエプロンの2種を示すが、応答測定はローディングエプロン(C-3)で実施された。

(2) 埋設計器

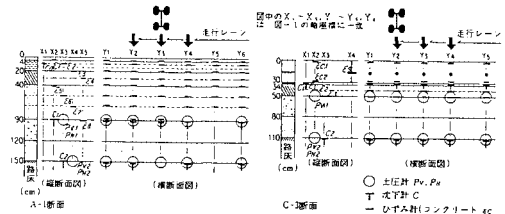
A-1 (A-2もほぼ同様)、C-3断面における計器の埋設位置は図二に示されている。図の沈下計のうち、路盤たわみ(C1)は路床たわみと路盤層の圧縮量の合計として検出される。埋設計器の種類と個数は表二のとおりである。

載荷試験は図三に示すDC-8-63型航空機の実物大主脚車輪載荷装置(以下これを原型走行車と称する)を用いて行った⁴⁾。原型走行車は、車輪中心間隔80cm、車軸中心間隔140cmの脚を有しており、B-747と荷重、タイヤ圧ともほぼ近似していると考えても支障はない。

(3) 原型走行車による応答測定

a) アスファルト舗装

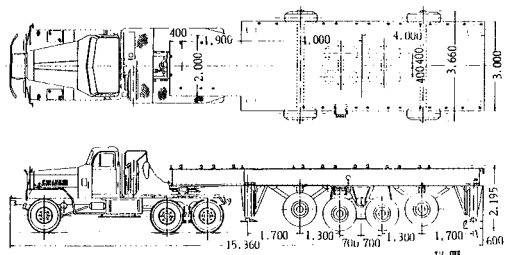
滑走路の端部(A-1)、中間部(A-2)の2つの構造について、建設直後の昭和47年に原型走行車を用いて、



図二 計器の埋設位置

表二 埋設計器の種類と個数

地区	計器名	計器仕様	埋設位置	計器数
A-1	土圧計	BE-K型(ダイヤフラム型)	A-1(6個)A-2(4個)C-3(5個)	A-1(6個)A-2(4個)C-3(5個)
A-2	沈下計	LD-501型(自動トランス型)	ストローク40mm/1.00mm/m	A-1(4個)A-2(4個)C-3(7個)
A-3	アスコン計	正付シールドゲージ(X, Y軸方向)	6層	A-1(96個)A-2(96個)C-3(30個)
C-3	コンクリート厚計	アクアルキメドゲージおよびBS-S-A型(差ゲージ式)	コンクリートスラブの上下面(44個)12個	
C-3	スリップパーセント計	KFC-C型	スリップパーセント	5個
C-3	敷設計	BF-A型(差ゲージ式)	敷設計	縦3層 横3層
A-1	温度計	CTE-100L(カーボン管)	名層	A-1(6個) 舗装厚層 -30~70°C
C-3	変位計	LD-501型(自動トランス型)	コンクリートスラブ	C-3(12個) 舗装厚層 -30~100°C
C-3	変位計	LD-501型(自動トランス型)	コンクリートスラブ	縦7層 横4層



図三 載荷用実物大主脚車輪装置

静的・動的载荷試験を行った。試験舗装での成果²⁾をもとにして、载荷は、路床での応力、たわみが最大値を示す脚中心载荷を主体として行った。载荷位置は、路盤での最大応力も確認しながら、対象とする埋設計器から脚中心までの距離によって表わすことにした。なお、脚についている4輪の相互作用の程度をみるため、影響範囲を三次元で把握している。载荷は主脚自重である20トンから80トンまで4種類、タイヤ内圧は6, 10, 14 kgf/cm²の3種類を主として行った。動载荷では、走行車の自走速度の制約もあり、6, 10, 20 km/hの3種類で実施した。

b) コンクリート舗装

連続鉄筋コンクリートで舗装されているエプロン端誘導路(打設幅7m)にも打設方向と目地の伝達機構を配慮してアスファルト舗装と類似の静的・動的载荷試験を実施した。

アスファルト舗装の場合に加え脚荷重100トン、タイヤ内圧16 kgf/cm²についても载荷試験を実施した。また、荷重分散効果を検討する目的で隣接版目地のスリップバーに配したひずみ計の応答も収録している。

なおアスファルト舗装、コンクリート舗装とも载荷試験に先立ち、輪荷重・タイヤ内圧・タイヤ接地面積の関係把握するためのタイヤプリントならびに舗装体内温度も測定した。

3. 原型走行車による静的・動的応答

(1) アスファルト舗装

a) 垂直応力

図-4は滑走路端部、中間部舗装における路床ならびに路盤(砕石路盤)上面の垂直応力の分布を示したものである。

路盤応力の最大値はタイヤ直下で、路床応力の最大値は脚中心下で生じていることがわかる。このことは路盤および路床の強度を論ずるときに非常に重要な示唆を与えている。

図-4のa)とb)とを比較すると、舗装構造の違いが垂直応力の分布形状に顕著に現われているのがわかる。端部(A-1)の最大

応力に比べ中間部(A-2)の最大応力は荷重60トン、80トンとも路盤で5割増、路床で2倍を示している。荷重60トン、80トンでの荷重分散効果を端部、中間部の各路盤応力、路床応力の比でみると端部が0.6であるのに対し、中間部は0.8であり、中間部の方が分散による軽減効果が小さいといえる。また、80トンのとき路床応力は端部の0.39 kgf/cm²に対し、中間部は0.82 kgf/cm²と大きな値を示しており、端部と同一条件で载荷することが非常に苛酷であることを示している。しかし、中間部は航空機の高速走行区域であるので端部より航空機荷重は小さくなると予想されるが実証データは得られていない。本来は高速走行時における中間部の路盤・路床応力を実測することにより、端部と中間部を比較することで両者の評価をすべきであると考える。

走行速度の変化は小さいが、動的応答については静载荷と同一の荷重であっても走行速度に応じて、路盤応力・路床応力とも静载荷に比しわずかに下回っているこ

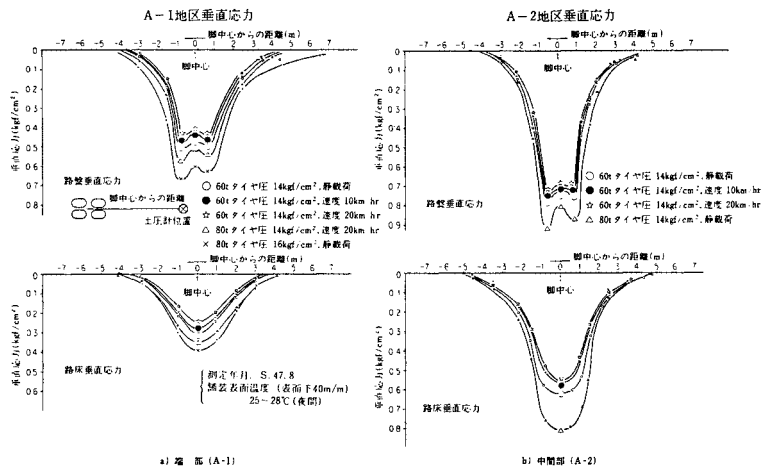


図-4 原型走行車による滑走路の垂直応力

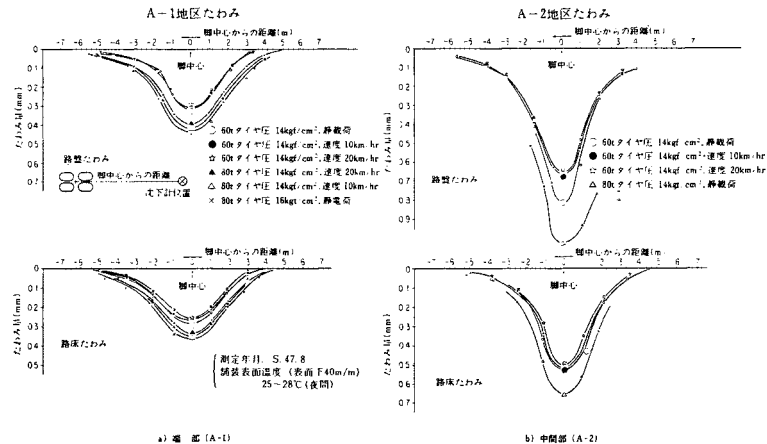


図-5 原型走行車による滑走路のたわみ

とがわかる。このことは、荷重時のアスファルト混合物の温度影響を極力小さくするため、表層温度（表面下40mm）が25°C前後で一定となる夜間を測定時間として選定したことから、アスファルト混合物層の荷重分散性能が走行速度（荷重時間）によって異なることを示している。なお、動荷重における応力応答には位相のずれも観測されているが、この現象自体が大きなテーマとなることから、ここでは論じないこととする。

b) たわみ

滑走路端部（A-1）と中間部（A-2）のたわみを図-5のa), b) で比較すると、端部の分布形状は平らでたわみ量が小であるのに対し、中間部は局部的なたわみ量が多い。端部、中間部とも静荷重が最大のたわみを与え、走行速度が増すにつれてたわみはわずかに小さくなっている。なお、測定されたたわみの値については、試験舗装での結果²⁾に比べかなり小さくなっているが、その理由を明確にすることはできなかった。

c) アスファルト層の水平ひずみ

滑走路端部、中間部舗装のアスファルト層（40cmの厚さ）内に生じる最大引張りひずみは、車輪直下で脚中心下よりも大きく、荷重80トン時で100マイクロ程度であった。なお、端部・中間部の構造差、静荷重・動荷重の差、動荷重時の速度差などを識別できるほど精度のよいデータは集録されていない。

d) セメント安定処理層の水平ひずみ

水平ひずみの実測値は端部、中間部の厚さに差があるにもかかわらず、深さ方向（図-2のA-1の $\epsilon_5 \sim \epsilon_8$ ）の有意差は明確には認められなかった。ただ、両者ともタイヤ直下で最大値を示し、荷重80トンで150~200 μ の最大水平ひずみが得られている。

(2) コンクリート舗装

a) 垂直応力

図-6は路盤・路床の上面に作用する垂直応力の分布を示したものであり、路床応力は路盤応力の75~85%に軽減されていることがわかる。

図中の垂直応力をみると、80トンと60トンには明らかな差があるのと同時に、静荷重に比べ低速といえども動荷重は垂直応力に関して軽減効果があることも示されている。なお、荷重時のコンクリート版（表面下65mm）の温度は13~29°Cと測定されている。

b) たわみ

図-7は路盤・路床のたわみ分布を示したものである。図から、垂直応力のとときと同様に、路床たわみは路盤たわみに比し、60トン、80トンとも65%に軽減されている。

また、路床、路盤たわみとも静荷重に比べ、動荷重の軽減効果が大きくなっている。

c) コンクリート版の水平ひずみ

測定されたコンクリート版下面の最大引張りひずみは、タイヤ直下で生じており静荷重・動荷重とも差がなく、荷重60トンで40マイクロ、80トンで50マイクロ程度であった。

d) スリップバーのひずみ

図-8は、目地間隔5mmにおいて、スリップバーにひずみ計を張り原型走行車を前後7mまで移動させたとき実測されたひずみ分布を示したものである。

この実測値から、連続鉄筋コンクリート舗装版の60トン、80トン荷重時の隣接版への荷重伝達はスリップ

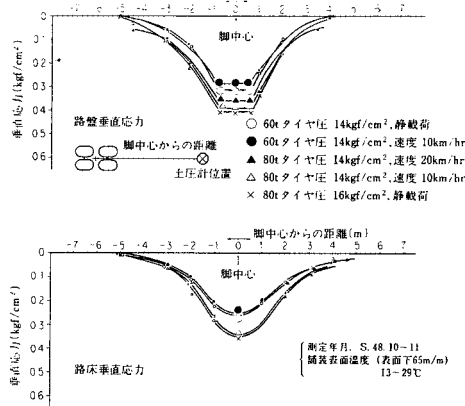


図-6 原型走行車によるエプロン（C-3）の垂直応力

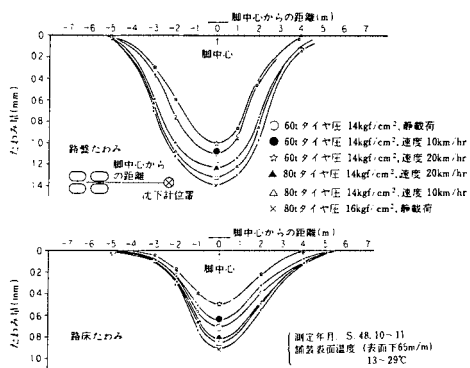


図-7 原型走行車によるエプロン（C-3）のたわみ

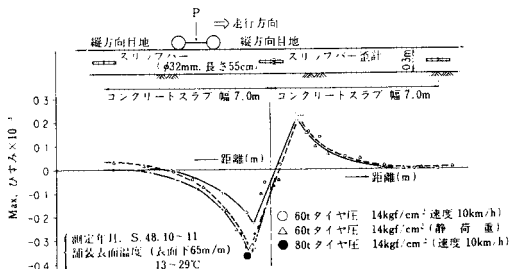


図-8 スリップバーのひずみ分布

バーを介して行われていることが確認された。スリップバーのひずみの最大値が350マイクロ程度であったことは、スリップバーは適正な目地機能を果たしているといえる⁵⁾。

(3) 滑走路端部、中間部およびエプロンの応答差

滑走路端部、中間部におけるアスファルト舗装およびエプロンにおける連続鉄筋コンクリート舗装の原型走行車に対する応答測定を行って得られたデータから、およそ次のようなことがいえる。

1) 滑走路端部 (A-1) ならびに中間部 (A-2) におけるアスファルト舗装の応答差は、路盤・路床に作用する垂直応力・たわみに顕著にみられる。中間部は端部に比し同一荷重において路盤応力は約1.5倍、路床応力は約2倍、路盤たわみは約2倍、路床たわみは約1.6倍となっている。

2) 滑走路端部におけるアスファルト舗装 (A-1) とエプロンにおける連続鉄筋コンクリート舗装 (C-3) の応答を垂直応力でみるならば、脚荷重80トンのときのA-1の路盤応力はC-3のそれに比し約1.8倍であるのに対し、両者の路床応力はほぼ等しい。さらに、路床応力の分布幅はA-1に比べC-3の方が広いことも明らかとなっている。これらのことは、表層材料の荷重分散性能(弾性係数)に大きな差があることによるものと思われる。また、路盤・路床たわみについてはA-1に比べC-3の方が大きい傾向を示していた。

3) 路盤・路床の垂直応力、たわみにおいて脚荷重の差および荷重時間の差を反映している応答を測定することができた。また、走行速度が荷重軽減効果をもつという実測データも得た。

4) 実測された表層の最大引張りひずみは、脚荷重80トンのときのアスファルト舗装で約100マイクロ(温度25±3℃)、連続鉄筋コンクリート舗装で約50マイクロであった。

5) 同一荷重で設計された滑走路端部のアスファルト舗装とエプロン部の連続鉄筋コンクリート舗装の路床に作用する垂直応力の応答測定結果からみれば⁶⁾、両者はほぼ同一の耐荷力をもつといえる。

4. 航空機による動的応答

(1) 測定法

昭和53年5月の成田空港の開港に伴い、同年10月飛来する航空機による応答を滑走路 (A-1)、エプロン (C-3) の両舗装について収録した。測定に先立ち埋設計器のチェック、感度調整を行い、正常作動計器としてA-1、C-3地区の土圧計をおのおの5個、3個確認したので、測定にはこれらを用いた。ここでは航空機種、離着陸重量などを比較要素としている。

a) 滑走路舗装の測定

供用開始後15000便を受け入れた滑走路の北端部に位置するA-1地区で、実機応答を測定した。

表一3は測定できた航空機の種類と重量を示しており、離着陸機合わせて59機の応答を得た。

測定は滑走路横に設けた地下観測室で行い、スイッチ作動は観測室から航空機の走行位置を視認して行った。また、走行速度を算出するため踏板式のシグナルを計器埋設地点前後に配し、動的応答は電磁オシログラフにより検出した。

b) エプロン舗装の測定

C-3地点は、出発、到着する自走の航空機が通過するほか、ローディングエプロンとメンテナンスエプロン間を整備のためトーイングトラクターにより牽引される空積載の航空機も通過する。

昭和53年11月初旬に、表一4に示す合計40機の通過航空機をとらえることができた。

(2) アスファルト舗装の垂直応力

滑走路端部での航空機による動的応答を路盤・路床の垂直応力としてとらえたものが図一9である。

航空機が滑走路中心を走行した場合を想定して計器を配置したが、離着陸に伴う走行は中心より相当にずれている。したがって、図一1に示した計器位置に対して荷重位置が相対的にずれていれば、測定される垂直応力は小さくなることから路盤・路床とも図の最大値が、車輪配置と計器との相対位置(車輪直下、脚中心)の中で最大の応答を与える条件を具備していると考えた。路盤・路床応力を、着陸機と離着陸機の双方をすべて各運航条件における脚荷重の違いによって整理すると、路盤応力、路床応力おのおのの最大値を結ぶ線は右上がりの直線と

表一3 測定航空機種と重量 (滑走路舗装)

航空機種	主脚数	着陸機(53.10.7-10.9)			離陸機(53.10.27)			
		車輪数	測定数	全重量(t)	測定数	全重量(t)	脚重量(t)	
L-1011	2	4	2	162	76.6	1	196	92.6
DC-10-30	2	4	2	182	69.0			
B-747-200	4	4	15	256	59.8	20	353	82.5
A-300B	2	4	1	120	59.8			
DC-8-63F	2	4	2	117	56.3			
DC-8-62	2	4	2	109	50.8	5	160	74.7
B-747SP	4	4	2	105	50.4	1	316	73.8
IL-62	2	4	1	216	48.3	1	165	75.9
B-707	2	4				4	152	68.6
計			27			32		

表一4 測定航空機種と重量 (エプロン舗装)

航空機種	測定数(機)	航空機全重量(t)	走行区分
B-747	10	237~239	けん引機
DC-8-50Bサイズ	6	79~86	〃
DC-8-60Bサイズ	6	101~105	〃
D C - 1 0	5	165	〃
B-727	1	49	〃
B-747	4	323~352	出発機
B-747	8	254~260	到着機
計	40		

なった。

観測対象となった航空機のうち、最大脚荷重を与えているのは離陸時のL-1011であり、92トン程度であった。国際線で最も一般的に使用されているB-747による路盤応力は0.45、路床応力は0.32 kgf/cm²程度であった。

(3) コンクリート舗装の垂直応力

エプロン端部での航空機による動的応答を路床応力としてとらえたものが図一10である。

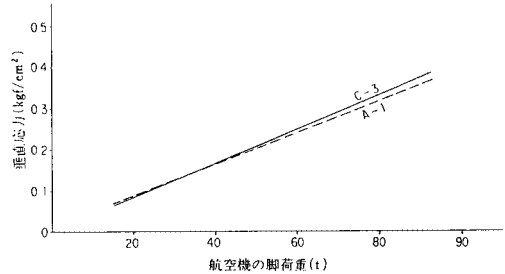
図中、上限の実測点を結ぶ直線を路床の最大応力と考えると、図一9と同様な傾向を示しており、B-747-200による路床応力は0.35 kgf/cm²とアスファルト舗装の場合と同程度の値を示した。

(4) 原型走行車と航空機の応答差

アスファルト舗装とコンクリート舗装の垂直応力について、原型走行車と航空機を比較すると(アスファルト舗装：図一4のa)と図一9、コンクリート舗装：図一6と図一10)、次のようなことがいえる。

1) アスファルト舗装において、原型走行車の静載荷(80トン)による路盤応力を1とすると動載荷(20 km/h)のとき0.9、航空機の場合0.65となっており、走行速度が大きくなるほど荷重軽減効果が顕著となっている。

2) コンクリート舗装の路床応力について、原型走行



図一11 路床垂直応力の比較

車による60トンの静載荷で0.26 kgf/cm²、80トンでは0.35 kgf/cm²であった。同一脚荷重において原型走行車による静載荷と航空機による走行荷重を路床応力で比較しても、航空機の方が若干小さいものの、ほとんど差がない。このことはエプロン部での走行速度が小さいことからみて妥当であるといえる。

3) アスファルト舗装とコンクリート舗装を航空機による路床応力で比較してみると、図一11のようになる。図からわかるように、両者の路床応力にはほとんど差がみられない。このことは、同一強度として設計したA-1、C-3断面が実測から等値であり、原型走行車による応答測定でも認められた結果とよく符合している。

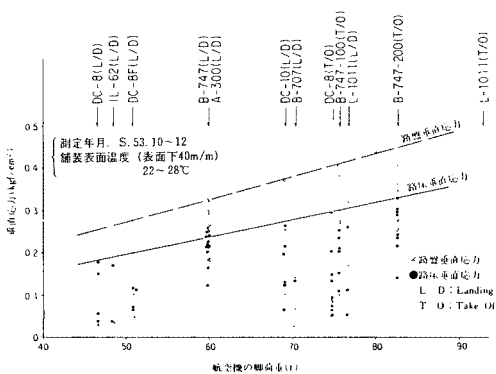
5. 層構造弾性理論による応答解析

(1) 舗装構成層の弾性係数の推定

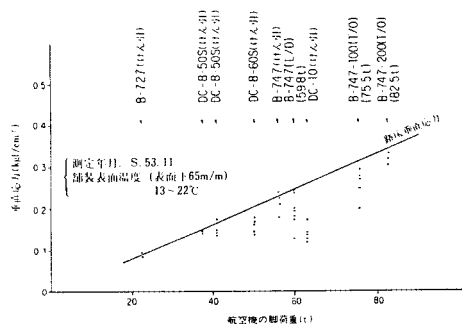
舗装構造の理論解析を進めるためには、構成層の弾性係数を合理的に推定することが必要となる。ここでは滑走路舗装の建設段階で各層が舗装されるごとにダイナフレクト^{7)~9)}を用い測定した最大たわみ(DMD)データ(図一12)と、層構造の弾性理論解析のプログラムであるBISAR¹⁰⁾を用いて算出した理論たわみとを組み合わせ各層の弾性係数を推定する手法を用いている。

その手法を示せば、次のとおりである。

a) 路床の弾性係数を変化させ、BISARを用いてダイナフレクトの載荷条件下で1層理論の最大たわみを算出し、ダイナフレクトの実測値(DMD)に対応する



図一9 航空機による垂直応力(滑走路部)



図一10 航空機による垂直応力(エプロン部)

深さ (cm)	層別	測定弾性係数E (kgf/cm ²)
0	表層	9,000
10	表層	9,000
15	表層	9,000
20	表層	9,000
25	表層	9,000
30	表層	9,000
35	表層	9,000
40	表層	9,000
45	表層	9,000
50	表層	9,000
55	表層	9,000
60	表層	9,000
65	表層	9,000
70	表層	9,000
75	表層	9,000
80	表層	9,000
85	表層	9,000
90	表層	9,000
95	表層	9,000
100	表層	9,000
105	表層	9,000
110	表層	9,000
115	表層	9,000
120	表層	9,000
125	表層	9,000
130	表層	9,000
135	表層	9,000
140	表層	9,000
145	表層	9,000
150	表層	9,000
155	表層	9,000
160	表層	9,000
165	表層	9,000
170	表層	9,000
175	表層	9,000
180	表層	9,000
185	表層	9,000
190	表層	9,000
195	表層	9,000
200	表層	9,000
205	表層	9,000
210	表層	9,000
215	表層	9,000
220	表層	9,000
225	表層	9,000
230	表層	9,000
235	表層	9,000
240	表層	9,000
245	表層	9,000
250	表層	9,000
255	表層	9,000
260	表層	9,000
265	表層	9,000
270	表層	9,000
275	表層	9,000
280	表層	9,000
285	表層	9,000
290	表層	9,000
295	表層	9,000
300	表層	9,000
305	表層	9,000
310	表層	9,000
315	表層	9,000
320	表層	9,000
325	表層	9,000
330	表層	9,000
335	表層	9,000
340	表層	9,000
345	表層	9,000
350	表層	9,000
355	表層	9,000
360	表層	9,000
365	表層	9,000
370	表層	9,000
375	表層	9,000
380	表層	9,000
385	表層	9,000
390	表層	9,000
395	表層	9,000
400	表層	9,000
405	表層	9,000
410	表層	9,000
415	表層	9,000
420	表層	9,000
425	表層	9,000
430	表層	9,000
435	表層	9,000
440	表層	9,000
445	表層	9,000
450	表層	9,000
455	表層	9,000
460	表層	9,000
465	表層	9,000
470	表層	9,000
475	表層	9,000
480	表層	9,000
485	表層	9,000
490	表層	9,000
495	表層	9,000
500	表層	9,000
505	表層	9,000
510	表層	9,000
515	表層	9,000
520	表層	9,000
525	表層	9,000
530	表層	9,000
535	表層	9,000
540	表層	9,000
545	表層	9,000
550	表層	9,000
555	表層	9,000
560	表層	9,000
565	表層	9,000
570	表層	9,000
575	表層	9,000
580	表層	9,000
585	表層	9,000
590	表層	9,000
595	表層	9,000
600	表層	9,000
605	表層	9,000
610	表層	9,000
615	表層	9,000
620	表層	9,000
625	表層	9,000
630	表層	9,000
635	表層	9,000
640	表層	9,000
645	表層	9,000
650	表層	9,000
655	表層	9,000
660	表層	9,000
665	表層	9,000
670	表層	9,000
675	表層	9,000
680	表層	9,000
685	表層	9,000
690	表層	9,000
695	表層	9,000
700	表層	9,000
705	表層	9,000
710	表層	9,000
715	表層	9,000
720	表層	9,000
725	表層	9,000
730	表層	9,000
735	表層	9,000
740	表層	9,000
745	表層	9,000
750	表層	9,000
755	表層	9,000
760	表層	9,000
765	表層	9,000
770	表層	9,000
775	表層	9,000
780	表層	9,000
785	表層	9,000
790	表層	9,000
795	表層	9,000
800	表層	9,000
805	表層	9,000
810	表層	9,000
815	表層	9,000
820	表層	9,000
825	表層	9,000
830	表層	9,000
835	表層	9,000
840	表層	9,000
845	表層	9,000
850	表層	9,000
855	表層	9,000
860	表層	9,000
865	表層	9,000
870	表層	9,000
875	表層	9,000
880	表層	9,000
885	表層	9,000
890	表層	9,000
895	表層	9,000
900	表層	9,000
905	表層	9,000
910	表層	9,000
915	表層	9,000
920	表層	9,000
925	表層	9,000
930	表層	9,000
935	表層	9,000
940	表層	9,000
945	表層	9,000
950	表層	9,000
955	表層	9,000
960	表層	9,000
965	表層	9,000
970	表層	9,000
975	表層	9,000
980	表層	9,000
985	表層	9,000
990	表層	9,000
995	表層	9,000
1000	表層	9,000

図一12 ダイナフレクトによるたわみ測定値と推定された各層の弾性係数

弾性係数を求める。

b) 既知となった路床の弾性係数を代入し、山砂層の弾性係数を変化させ2層理論で最大たわみを算出し、山砂層で実測したDMDに対応する弾性係数をもって山砂層の弾性係数とする。

c) 以下同様にして既知となった弾性係数を代入して上載層の弾性係数を実測値に対応させて求める。

最終的に滑走路舗装の層構造すべてについて弾性係数を求めた結果は図-12に示されている。

推定された弾性係数は、CBR 5.5%の路床が580、山砂層が1500、砕石層が3700 kgf/cm²であり、これらの値は他の数多くの研究成果からみてほぼ妥当であるとしてもよいと考えられる。また従来から各種舗装に多く利用されてきているセメント安定処理路盤層の弾性係数は20000 kgf/cm²の値を得たが、それは文献11)からみてもおおむね妥当であるといえよう。なおアスファルト混合物層についての弾性係数は、載荷試験時に温度を測定して得られた表層25±3°Cに基づいて算出されたものである。

(2) 路床応力の実測値と理論値の比較

滑走路(A-1)およびエプロン(C-3)において、脚荷重が異なる種々の航空機が通過したときに測定された路床に作用する応力と、層構造弾性理論解析により推定される路床に作用する応力について比較を行ってみた。

表-5は解析対象としたA-1断面およびC-3断面のBISAR入力データと層構成を示したものである。対象荷重としては現有航空機350トン(一部チェックのため仮想荷重500トンを追加)を考えた。

また、連続鉄筋コンクリート版の弾性係数については、鉄筋量(縦方向0.6%、横方向0.08%)、および横方向クラックの存在等の影響により、その値をどの程度にしたらよいか問題であるが、ここでは上限値と思われる350000 kgf/cm²を採用している。

図-13は実測された路床応力と計算値を示しており、概して計算値より実測値の方が大きな値となっているが、この計算条件下ではほぼ一致しているといつてよい。すなわち、150cm厚のアスファルト舗装と110cm厚の連続鉄筋コンクリート舗装とでは大局的にみれば、ほぼ同じ路床応力を示しており、両者は同程度の荷重分散効果をもつといえる。

ただし、夏期の高温時にはアスファルト層の弾性係数が低下することから、アスファルト舗装の荷重分散効果は連続鉄筋コンクリート舗装のそれを下回ることは予想されることである。

6. 大型航空機による舗装の挙動

現在わが国で使用されている代表的な大型航空機であ

表-5 BISARの入力条件

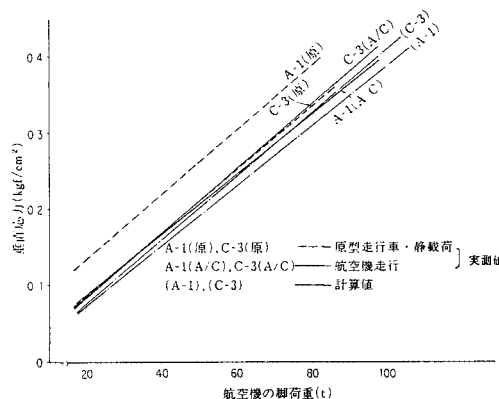
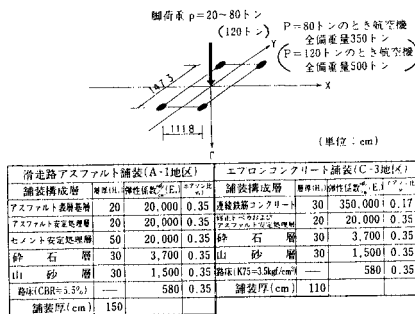


図-13 路床土圧の実測値と計算値との比較

るB-747は主脚が4個あり、各脚は4本のタイヤをもっている。ここでは、B-747(350トン)が滑走路を走行しているときに路盤・路床上面に発生する垂直応力の分布がどのようになるかを求めるために、表-5に示されている条件でBISARを用いて計算をしてみた。

図-14は、その一例を示し、走行方向および横断方向における路盤・路床の垂直応力の分布を表わしたものである。図から路盤応力はタイヤ直下で最大であり、その値は0.55 kgf/cm²程度である。また路床応力は脚中心下で最大を示し、その値は0.3 kgf/cm²程度であり、その影響は脚中心から7mまで及ぶこともわかる。これらの応力については成田空港の路床条件(CBR:5.5%)に照らし、十分安全であるといえる¹²⁾。

さらに、滑走路におけるアスファルト舗装、エプロンにおける連続鉄筋コンクリート舗装において、各舗装構成層に生じる応力・ひずみを計算し、それらの考察を以下に述べる。

a) アスファルト舗装の場合、アスファルト安定処理層下面に生じる引張りひずみの最大値はタイヤ直下で56.6マイクロであり、この程度では疲労は問題とならないといえる。セメント安定処理層の下面に生じる引張りひずみの最大値はタイヤ直下、脚中心下とも、115マ

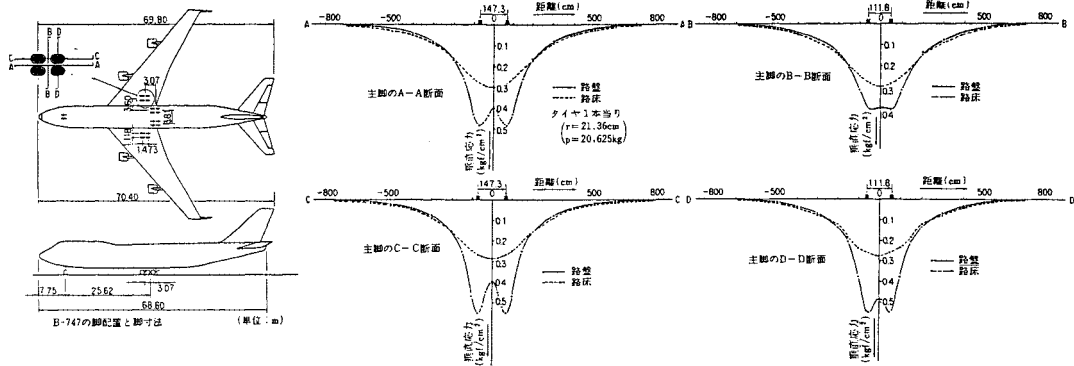


図14 B-747により、路盤・路床に生じる垂直応力の分布

マイクロ程度（応力で 3.2 kgf/cm^2 ）であり、この程度の値では文献11)から、かなり安全であると推測される。また路床上面に生じる圧縮ひずみの最大値は脚中心下で生じ、517マイクロと計算された。これをシェルのアスファルト舗装設計法¹³⁾に示されている許容載荷回数にあてはめてみれば、約800万回となり、航空機の走行軌跡分布をも考慮すれば、路床からみたカバレッジは全く問題にしなくてもよいことになる。

b) コンクリート舗装の場合、連続鉄筋コンクリート版下面に生じる曲げ応力の最大値はタイヤ直下にみられ、現有機で 21.7 kgf/cm^2 と計算された。この数値は3.(2)c)で述べた水平ひずみの実測値 50μ にはほぼ同じである。ちなみに、仮想航空機500トンでの値は 33.5 kgf/cm^2 であった。空港コンクリート舗装では、安全率（設計基準曲げ強度/許容曲げ応力度）が2.0確保されれば、温度応力も含めて設計カバレッジ20000回に対応するとしている¹⁴⁾。したがって、現有機に対する曲げ応力 21.7 kgf/cm^2 は安全率2.3に相当し問題はないが、仮想航空機の場合は安全率1.5になり、設計カバレッジとしては3000回以下となって問題の生じることが予想される¹⁵⁾。しかし、このカバレッジには不確定要素がかなり含まれており、コンクリートの曲げ疲労曲線に多くの研究者の提案もあり¹⁶⁾、それらが整理統合されればカバレッジの信頼性も大きく高まるものと考えられる。

アスファルト安定処理層下面に生じる引張りひずみの最大値はタイヤ直下と脚中心下で108マイクロであり、アスファルト舗装の場合に比べ約2倍の値となっているが、それでも空港舗装のカバレッジに照らして疲労抵抗性は非常に大きいといえる。路床上面に生じる圧縮ひずみの最大値は脚中心で535マイクロと計算され、アスファルト舗装の場合と同程度である。

以上を総括すれば、成田空港の滑走路のアスファルト舗装およびエプロンの連続鉄筋コンクリート舗装の構造

的な耐久性は、現有大型航空機の総重量に照らして十分なものであるといえる。

7. 結 論

わが国において初の本格的国際空港の基本施設である滑走路、誘導路、エプロン舗装の建設にあたり、建設にあわせ基本施設本体に試験実施区域を設定して、アスファルト舗装、コンクリート舗装の挙動の測定ならびに解析を行った。それらから得られた成果を整理すれば、およそ次のとおりとなる。

(1) 高い安全性が要求される第一級空港で、立入り不能な滑走路、エプロン本体に各種計器を埋設し、原型走行車を手始めに実機運航による両施設の膨大な量の応答データを得ることができた。これらのデータは測定や計器の精度などいろいろな問題があるものの、空港舗装にとって類例のない有益な資料として位置づけられる。

(2) アスファルト舗装において原型走行車により、動载荷を行った結果、静载荷と荷重が同一であっても走行速度に応じて、路盤・路床応力の軽減効果があることが明らかになった。

(3) 航空機により滑走路舗装の路床に生ずる垂直応力の大きさは、脚荷重に直線的に比例する。このことはアスファルト舗装が弾性的挙動を示している。

(4) 航空機荷重による路床応力から舗装を眺めてみれば、舗装厚150cmのアスファルト舗装と110cmの連続鉄筋コンクリート舗装とはほぼ等値であることが明らかとなった。このことは、滑走路端部とローディングエプロンが航空機の最大荷重を受ける部分であることから、設計の妥当性を傍証していることにもなる。

(5) 現在運航している大型航空機の代表として、B-747を選定し、それが滑走路舗装上を走行しているときの舗装体の挙動を層構造の弾性理論解を用いて求めた。アスファルト層下面の引張りひずみ、セメント安定

処理層下面の引張りひずみ、路床面の圧縮ひずみの大きさを検討した結果、滑走路のアスファルト舗装は構造的に問題がないといえる。

8. あとがき

空港舗装の大型航空機による応答を各種埋設計器で測定し、かつ層構造理論を用いその挙動を種々の面から明らかにし、成田空港の舗装の構造評価を行ったが、今後このような努力の積み重ねにより、より合理的な空港舗装の建設が進められよう。

また、空港舗装の特徴として、構造的に十分安全であることが確認されるならば、アスファルト舗装においては、わだち掘れ、表層の劣化、不等沈下に基づく縦断プロファイルの悪化などに対する対策を取ればよいことになる。また連続鉄筋コンクリート舗装においては、表面の荒れ、角欠け、微小横断クラックなどに対する対策を考慮し、その合理的な設計法が確立していない今日、継続的なパフォーマンスの測定が必要となる。

最後に、本研究を進めるにあたり約8年に及んだ基本施設舗装の動態観測調査に参画、従事されたコンサルタントの各位、空港公団工務部、工事局、運用局の技術職員の皆様に深甚の謝意を表します。また、本論文をとりまとめるにあたり有益な議論とご意見をいただいた、日大理工学部の三浦裕二教授、運輸省港研の佐藤勝久室長、運輸省三建の福手勤課長に心から感謝する次第である。

参考文献

- 1) 空港舗装研究委員会：空港舗装研究委員会報告，第1編～第4編，(社)土木学会，昭和42年度。
- 2) 須田，ほか：静的載荷試験による空港舗装の実験的研究，運輸省港湾技術研究所報告，第9巻，第3号，1970。
- 3) 新東京国際空港公団：基本施設舗装の動態観測追跡調査報告書，(その1)～(その6)，昭和46.6～53.12。
- 4) 須田，ほか：原型載荷槽および原型走行車の製作について，運輸省港湾技術研究所資料，No.97，1970.3。
- 5) 福手・八谷・山崎：コンクリート舗装の目地部における荷重伝達機能，運輸省港湾技術研究所報告，第21巻，第2号，1982.6。
- 6) 阿部：コンクリート舗装の構造設計における多層弾性理論の適用性，土木学会論文報告集，No.319，1982.3。
- 7) 阿部，ほか：舗装の非破壊探査機—ダイナフレクター—，舗装，Vol.9，No.8，pp.16～19，1974。
- 8) 佐藤・福手：ダイナフレクトによる空港アスファルト舗装強度評価とかさ上げ厚設計，土木学会論文報告集，No.303，1980.11。
- 9) 達下，ほか：ダイナフレクトによるたわみ測定値の利用に関する2,3の考察，土木学会論文報告集，No.343，1984.3。
- 10) De Jong, D.L. : Bitumen Stress Analysis in Road, Shell Amsterdam Laboratory, 1973.1.
- 11) Williams, R. I. T. : Chapt.5, Cement Stabilized Materials, Development in Highway Pavement Engineering 1, Applied Science Publishers Ltd., 1978.
- 12) Peattie, K. R. : A Fundamental Approach to the Design of Flexible Pavements, International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Proceedings, 1962.
- 13) Shell Pavement Design Manual-asphalt pavement and overlays for road traffic, Shell International Petroleum Company Limited, London, 1978.
- 14) 運輸省航空局：空港コンクリート舗装構造設計要領，1977。
- 15) 土木学会・空港舗装研究委員会：新東京国際空港の舗装に関する研究報告書，pp.134～139，昭和60年1月。
- 16) セメント協会道路対策専門委員会：コンクリートの曲げ疲労強度に関する文献調査，昭和58年5月。

(1986.1.8・受付)