

メガフロート滑走路に適用される各種舗装材の耐久性評価

Durability Test Results of Some pavements applied to Mega-float Upper Deck

松岡和巳*、由井洋三**、菊竹哲夫***、八谷好高****

Kazumi MATSUOKA, Youzou YUI, Tetsuo KIKUTAKE and Yoshitaka HACHIYA

*工修 新日本製鐵株式会社 鋼構造研究開発センター (〒293-8511 千葉県富津市新富 20-1)

**工修 住友金属工業株式会社 土木・橋梁技術部 (〒100-8113 東京都千代田区大手町 1-1-3)

***工博 メガフロート技術研究組合 (〒105-0014 東京都港区芝 3-3-15 芝 MONT ビル 5F)

****工博 運輸省港湾技術研究所 滑走路研究室 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

Mega-float is a very large floating steel structure. When it is used as an airport, the runway is to be paved with some types of pavement materials. In this study, three types of the pavement materials, that is, asphalt, prestressed concrete slab and concrete pavement were employed, and the real scale test models of the runway were designed referring to the existing standards and manufactured. The durability test was executed using the automatic cyclic running loading system simulating the wheel load of jumbo jet B747-400.

The test result was compared with FEM analysis and the structural models were discussed. It was concluded that the FEM analysis gives us the good estimation using proper analytical models. Moreover, the deterioration of each pavement was evaluated compared with the pavement repair standard of the Ministry of Transport. It was confirmed that each pavement was still in a sound state after cyclic running N=10,000 times.

Key Words: asphalt, prestressed concrete slab, concrete slab, pavement, Mega-float

1. まえがき

メガフロートは、大きさが数キロ規模で、耐用寿命が100年を期待される超大型浮体式海洋構造物のことである。浮体は、その構造特性から水深によるコスト影響が僅かで環境影響も小さく、多くの工場での分割製造が可能であるため工期の短縮が可能等の優れた特性をもち、最近では耐震性が良いことでも注目されている。現在、この用途として、海上空港、ヘリポート、発電所、石油備蓄基地等々が考えられている。

このメガフロートの実現に向けて、1995年4月以降、鉄鋼・造船会社17社でメガフロート技術研究組合を設立し研究開発に取り組んでいる。この研究開発ではメガフロートを空港用途に絞り込み、①メガフロートの設計、施工技術の研究と、②100年耐用を実現する長期耐用技術の研究、③空港としての機能（離発着時の騒音振動、管制機器の精度等）評価に関する研究を主要な課題としている。この研究では、既存の文献調査や各種の要素実験を重ねるとともに、これら一連の課題の実現性を実証するため実海域において長さ300m、幅60m、高さ2m

の浮体モデル（1995年～1997年）、及び長さ1,000m、幅60m、高さ3mの大規模浮体モデル（1998年～2000年）を建設し、航空機の離発着を含めた総合的な実験もおこなってきている。

このメガフロート滑走路に適用される各種舗装の耐久性評価に関する研究は、長期耐用技術研究と空港機能評価研究との共通課題として実施したものである。

メガフロートを空港として使用する場合、滑走路は、従来の地盤上に舗装される場合とは異なり鋼製地盤上に直接舗装が施される。この舗装の構成は、従来の路床がなく、また舗装構造内でも路盤が無い場合のため舗装構造の変形や応力状態は陸上空港の場合とは大きく異なる。したがってメガフロート空港の滑走路の設計にあたっては、新たに設計法を検討する必要がある。そこで、既存の空港関連基準等を参考にしながら、3種類の舗装を選定し実大規模の滑走路モデル試験体を製作し、この耐久性を評価することで設計法の妥当性を確認した。本報告では、この実験結果について報告する。

2. 実験方法

メガフロート滑走路の舗装仕様として、従来から地盤上に建設される空港に使用されているアスファルト舗装、PCプレキャスト床版舗装（以下、PC床版舗装と記す。）、コンクリート舗装を取り上げた。各試験体は、浮体空港滑走路部の上載荷重としてボーイング 747-400 のタイヤ荷重 93tf/脚（911kN/脚）を想定し設計製作した。また、上部デッキの防食措置として、アスファルト舗装、PC床版舗装ではグースアスファルトを、コンクリート舗装では防水シートを施工している。

耐久性評価試験は、運輸省港湾技術研究所保有の航空機のタイヤ荷重を模擬した自動走行載荷装置を用いて行った。試験体は載荷実験槽内路盤上に鉄筋コンクリート製基盤を作成し、この上に各試験体を並列設置した。

(1) 試験体仕様

アスファルト舗装、PC床版舗装、コンクリート舗装の各試験体の断面図を図-1 に、平面図、側面図を図-2 に示す。平面図にはタイヤ走行範囲と静的載荷位置を示している。以下、各試験体のデッキを構成する部材でデッキプレートに補強材をロンジ、これに直行して支持する部材はトランスと呼ぶことにする。

①アスファルト舗装試験体は、道路橋示方書¹⁾を参考にデッキプレートのロンジ間の許容撓みを 1/300 として設計した。表層を改質アスコン 50mm、下層をグースアスファルト 50mm の 2層構成とし、試験場所にてローラーによる締固めを行った。

②PC床版舗装試験体は、第三種 PC 部材の設計法²⁾に従った。長さ方向を PC 鋼線 SWPR 7A(T10.8×4 本)を 650mm ピッチ上下 2 段、幅員方向を PC 鋼棒 SBPR 930/1030 (φ23×12 本)を 500mm ピッチ 1 段と鉄筋 D13×200mm ピッチ上下 2 段を配筋し、有効プレストレス量として各々 10.6kgf/cm²、23kgf/cm² を導入した。設計基準強度は $\sigma_{ck} = 400\text{kgf/cm}^2$ とした。予め工場製作した PC 床版を試験場所にてデッキ上にセットし、中央部をホーンジョイントにより接続した。尚、レベル調整はモルタルによりおこなった。

③コンクリート舗装試験体は、セメントコンクリート舗装要領³⁾に従い、疲労を考慮した許容曲げ応力度 (σ_{ba}) を 0.5×曲げ強度 (σ_{bk}) 以下とした。曲げ強度は $\sigma_{bk} = 50\text{kgf/cm}^2$ とした。中央部に目地を設け、コンクリート打設は、デッキに鋼製型枠を取付け試験場所にておこなった。

(2) 載荷方法

自動走行載荷装置を用いた載荷条件は以下の通りである。載荷荷重は、B747-400 の 1脚 4 輪分で P=93tf (自重分 2tf 含む) とした。一輪は、34cm×56.7cm の接地面を有している。この走行区間は、加速区間(3m)+定常走行区間(4m)+減速区間(3m)の合計 10m とし、定常走行速度 5km/hr の往復走行で最終走行回数を $N=10^4$ 回

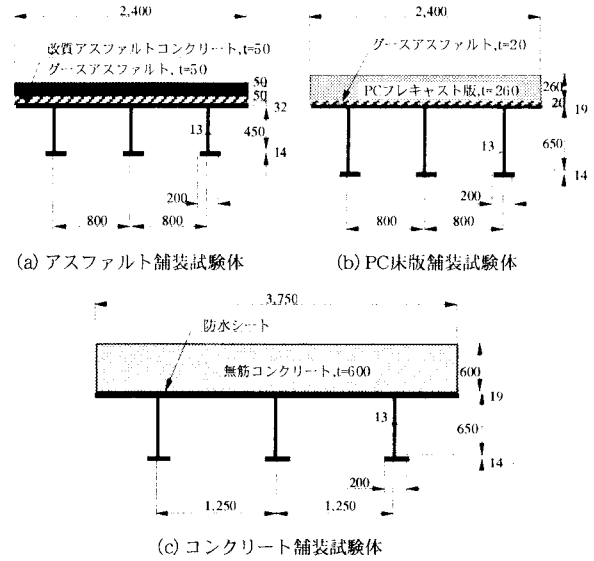


図-1 試験体の断面図

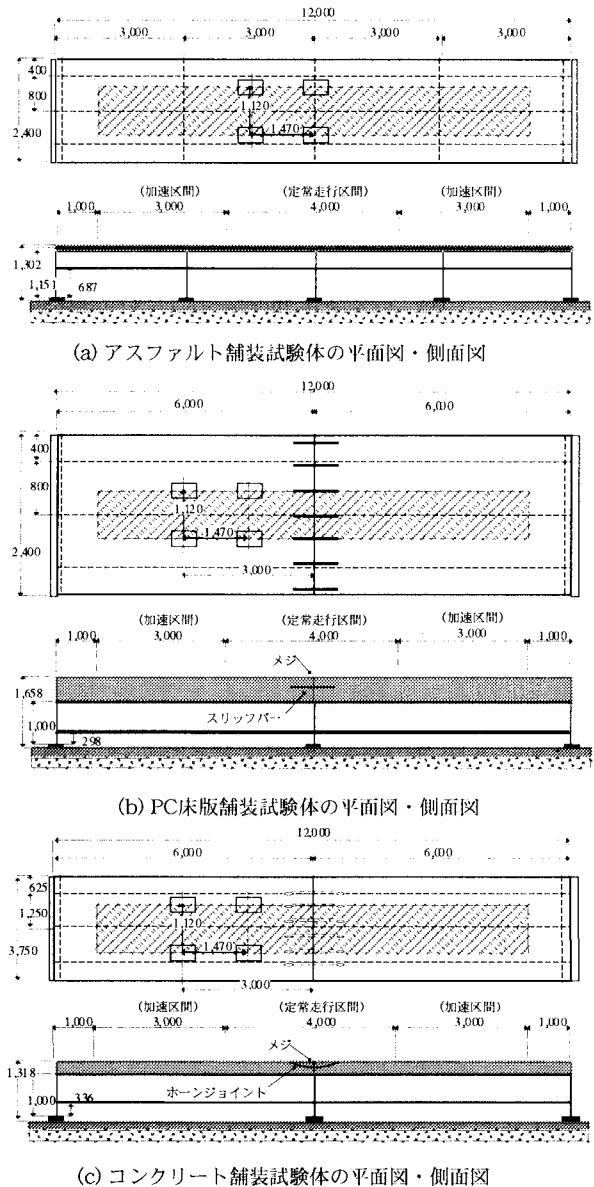


図-2 試験体の平面図、側面図

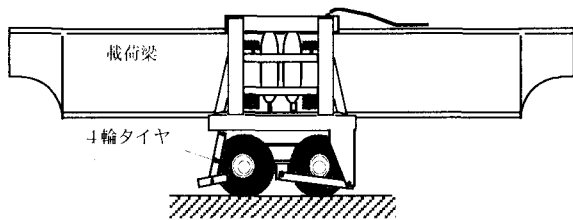


図-3 自動走行載荷装置

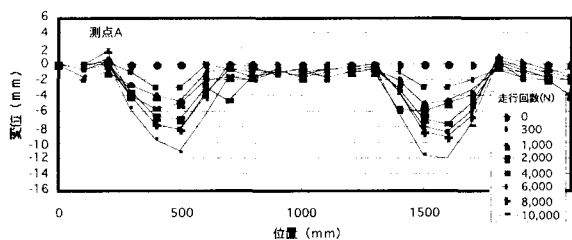


図-4 アスファルト舗装のわだち形状

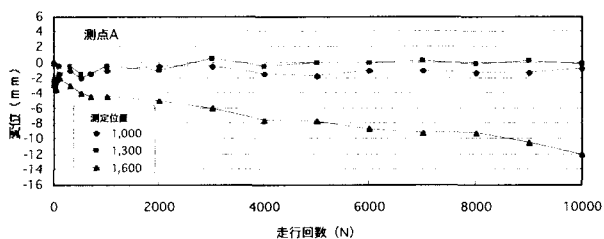


図-5 アスファルト舗装のわだち変化

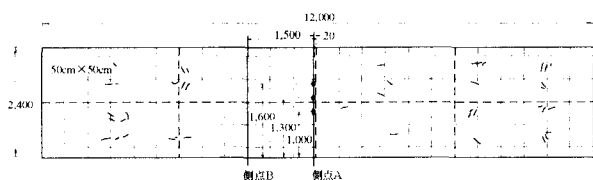


図-6 アスファルト舗装のクラック分布

とした。静的荷荷は、各舗装体の応力が設計上クリティカルとなる位置にておこなった。

(3)計測項目

各計測は、所定の走行回数後、定位置に固定し静的荷荷中におこなった。計測項目は、舗装、デッキの各部位のたわみ、ひずみ、わだち形状、目地の段差、室温、供試体温度を計測した。観察項目として、試験中の表面ひびわれ、試験終了後に舗装を切断し内部の状況を観察した。尚、たわみ、ひずみの計測では、荷荷装置の自重 2tf をかけた状態をゼロとした。

3. 実験結果およびその評価

各試験体の試験結果を図-4 以降に示す。これら試験結果は、ANSYS Ver 5.1 による F.E.M.弾性解析と比較検討を行った。この解析では、デッキプレート、ロンジ、

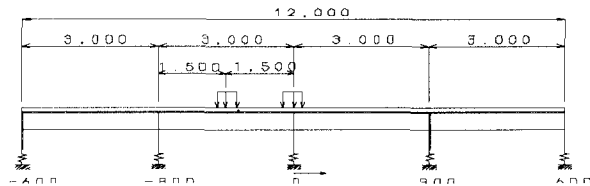


図-7 アスファルト舗装試験体の荷荷位置

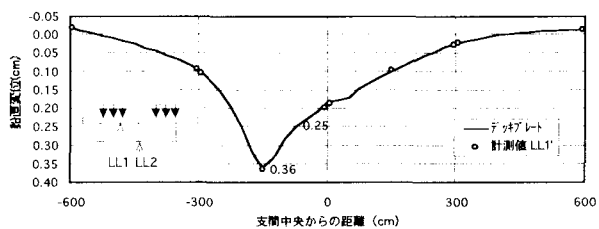


図-8 アスファルト舗装試験体のデッキプレートたわみ

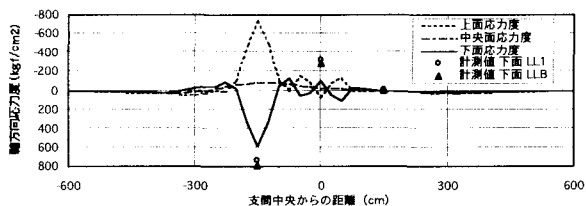


図-9 アスファルト舗装試験体のデッキプレート軸方向応力

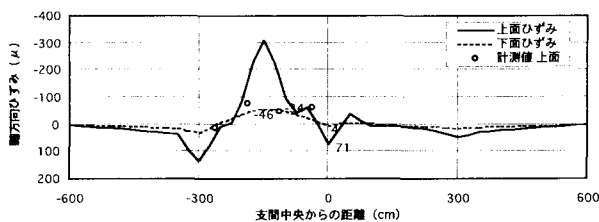


図-10 アスファルト舗装試験体の舗装軸方向ひずみ

トランス部材はシェル要素(SHELL43)により、舗装部はソリッド要素(SOLID45)によりモデル化を行い、表-1 に示す定数を用いた。尚、アスファルトのヤング率は、試験期間中の温度 27~33℃を考慮した材料試験により決定した。PC 床版舗装、及びコンクリート舗装供試体の断面はいずれも全断面有効とした。尚、以下の考察では走行方向を軸方向、走行直角方向を軸直角方向と呼ぶことにする。

表-1 解析に用いた定数

材 料	ヤング率 E(kgf/cm ²)	剪断弾性係数 G(kgf/cm ²)	ポアソン比
アスファルト	1,000	435	0.167
コンクリート	330,000	143,000	0.167
鋼 材	2,100,000	810,000	0.3

以下に試験結果の考察を記す。

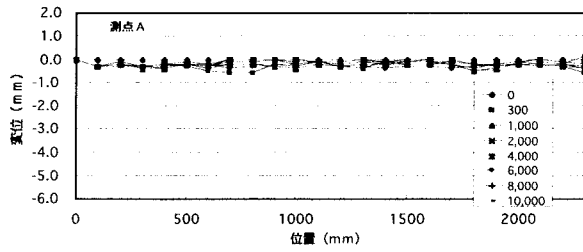


図-11 PC床版舗装のわだち形状

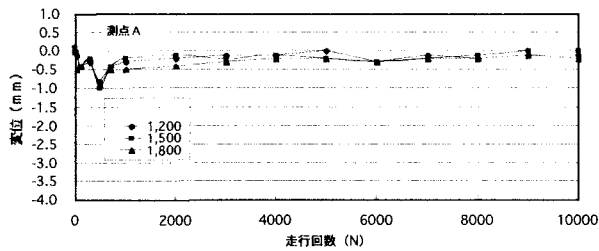


図-12 PC床版舗装のわだち変化

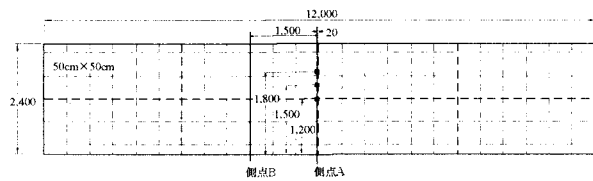


図-13 PC床版舗装表面のクラック分布

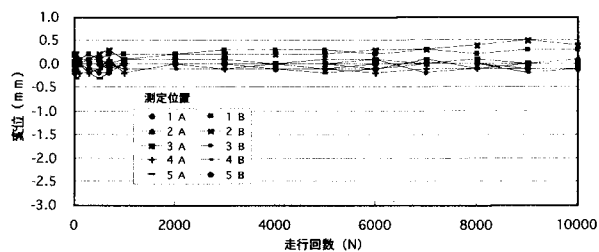


図-14 PC床版舗装の目地段差変化

(1) アスファルト舗装

① 舗装の補修評価に関して

床版中央の側点 A におけるわだちの形状を図-4 に、走行回数(N)によるわだちの進行状況を図-5 に示す。タイヤ走行位置にわだちが集中し進行していることがわかる。試験終了後のアスファルト表面のクラック状況を図-6 に示す。主なクラック発生位置はタイヤ走行の加速・減速区間であり、この原因は加速減速による摩擦力の作用が主因であると考えられる。N=10⁴回走行後のクラック率は0.104%、わだちばれは測点A,Bで各最大12mm、10mm、平坦性はほぼ0mmであった。これらを福手ら⁴⁾の手法にしたがって補修性を評価すると、補修評価指数PRI=9.4となる。この値は補修の必要なしの評価Aに分類され、依然十分な耐久性があると判断される。

今回の走行実験は、完全に同一の軌跡を走行するものであり、現実的な供用との比較では、アスファルト舗装にとってかなり厳しい実験条件であったと考えられる。

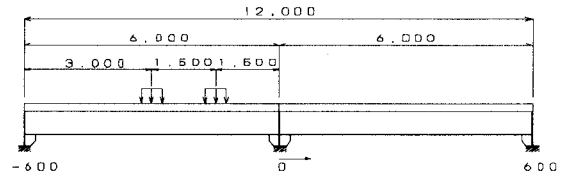


図-15 PC床版舗装試験体の荷重位置

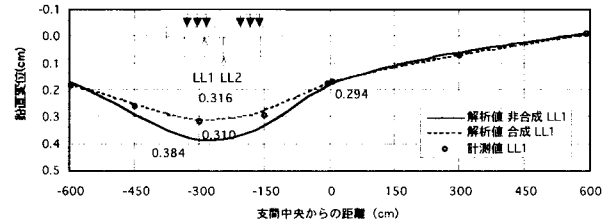


図-16 PC床版試験体のデッキプレートたわみ

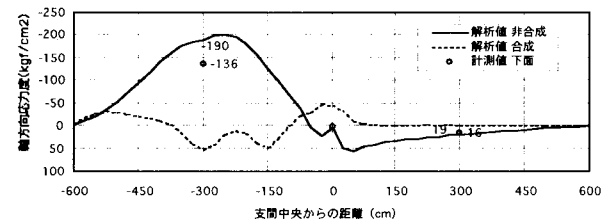


図-17 PC床版試験体のデッキプレート軸方向応力

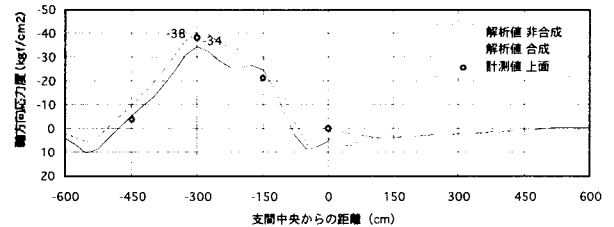


図-18 PC床版試験体の舗装上面軸方向応力

② 鋼床版との付着について

試験終了後の建研式引張り試験の結果では、非走行箇所で13kgf/cm²程度、走行箇所で16kgf/cm²程度となっており走行による締固め効果があったと思われる。いずれの値も10kgf/cm²以上となっており、一般的な付着力としては十分と判断される。したがってアスファルト舗装体と鋼床版は合成状態であったと判断される。

③ 解析モデルに関して

図-8から図-10にN=1,000回の時点での試験結果と解析結果との比較を示す。図-8,図-9が示す通り鋼部については、良好な一致が見られる。図-10は、アスファルトの軸方向応力と解析結果との比較を示している。軸方向については良好な一致が見られるが、軸直角方向は傾向のみが一致した。この原因は、締固め及びわだち進行により剛性の変化が生じたためであると考えられる。アスファルトのひずみは、走行回数とともに残留成分が

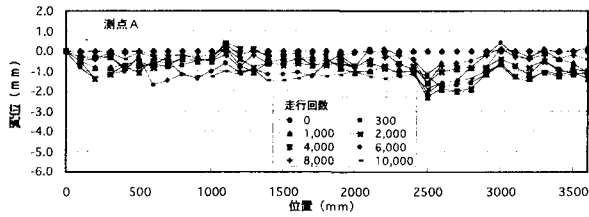


図-19 コンクリート舗装試験体のわだち形状

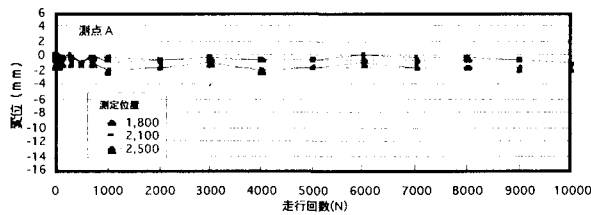


図-20 コンクリート舗装試験体のわだち形状

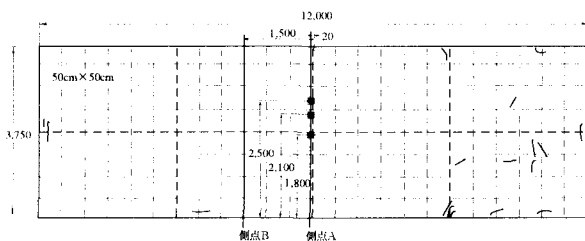


図-21 コンクリート舗装表面のクラック分布

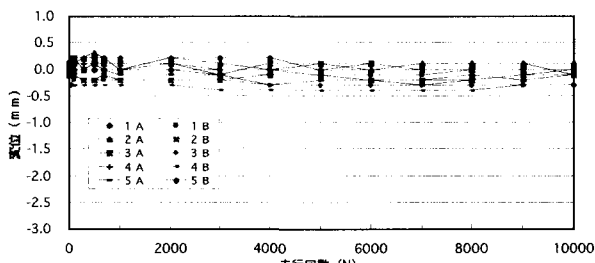


図-22 コンクリート舗装の目地段差の変化

増加し数千μに達する個所もあったが、適切な剛性評価を行った解析を行えば、弾性成分については比較的良好な一致が得られるものと思われる。

(2) PC床版舗装

①舗装の補修性評価に関して

図-11,図-12にわだちの形状と進行状況を示す。ほとんど沈下はなく最大で0.7mmであった。クラックは、図-13に示す通り $N=10^4$ 回走行後も全く観察されなかった。また目地部段差は、図-14に示す通り $-0.2\text{mm} \sim +0.5\text{mm}$ で計測誤差の範囲内であり、解体後の調査でも損傷も全く見られなかった。これらの結果を先のアスファルト舗装と同様に福手ら¹⁾の手法に従って補修性を評価すると補修評価指数 $\text{PRI}=10$ となる。これも補修の

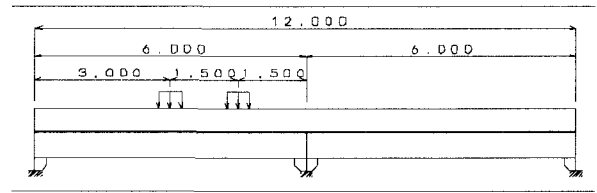


図-23 コンクリート舗装試験体の荷重位置

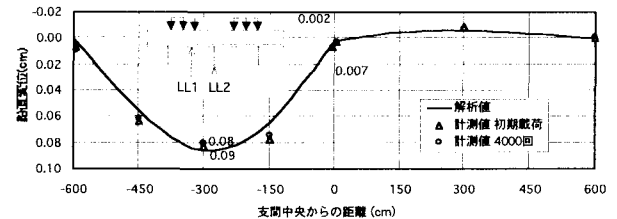


図-24 コンクリート舗装試験体のデッキプレートたわみ

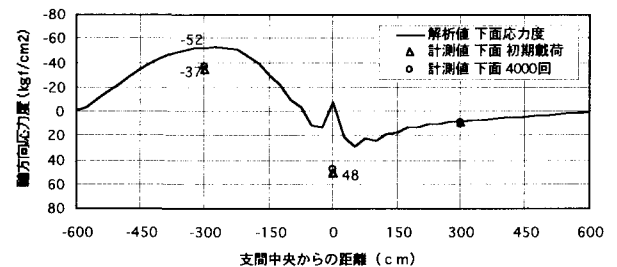


図-24 コンクリート舗装試験体のデッキプレート応力

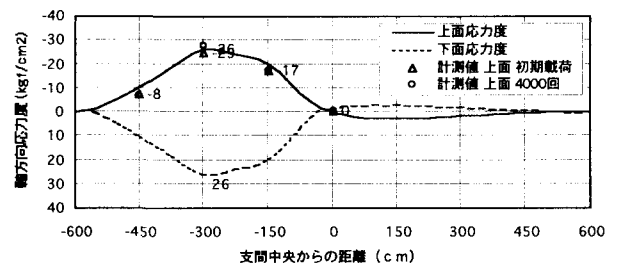


図-26 コンクリート舗装の軸方向応力

必要なしとの評価Aに分類され、依然十分な耐久性を保持していると判断される。

②舗装材の発生応力について

非合成の解析結果では、PC床版上面の軸方向最大応力は、スパン中央の中央ロンジ上で、 -34kgf/cm^2 (実験値: -38kgf/cm^2)、下面の軸方向最大応力は、スパン中央の荷点近傍で、 42kgf/cm^2 (実験値: 27kgf/cm^2) であった。また、試験終了後の解体調査でひびわれ等の損傷は確認されなかった。これは、有効プレストレス量 10.6kgf/cm^2 を考慮した応力値が、解析値で各々 -44.6kgf/cm^2 、 31.4kgf/cm^2 となり、コンクリート強度に対して安全側の値であったと言える。したがってPC床版は、全断面有効な第Ⅱ種PC部材として挙動したことになる。

③解析モデルに関して

PC床版舗装試験体の解析では、コンクリート断面を全断面有効とし、PC床版と鋼部とを合成、非合成とした2ケースで比較を行った。比較では、N=4,000時の実験値を用いた。たわみに関して、図-16にデッキプレートにおける比較を示している。この結果では、実験値は合成断面の解析値に近い値を示しているが、図-17、図-18の応力値での比較では非合成に近い挙動をしている。その他部位との比較を含めて総合的に判断すれば、非合成断面の挙動に近い挙動をしているものと判断される。

(3)コンクリート舗装

①舗装の補修性評価に関して

走行実験後、コンクリート舗装表面の観察の結果、図-21に示す個所でヘアクラックが観察された。周囲に発生したクラックは、現場コンクリート打設のために設置した型枠固定用のアングル材によりコンクリートの変形が拘束されたことで発生したものと判断された。また、中央部に発生したものは、コンクリート表面のレイタンス分の収縮によるものであると判断された。これらはいずれも、深さの計測できるレベルのものではなく、したがって補修評価の対象外であるとした。目地段差は、N=10⁴回走行で最大0.4mm程度であり計測誤差の範囲内であった。また、試験終了後の解体調査の結果、目地部の破損は全く見られなかった。これらの結果を先のコンクリート舗装と同様に福手ら⁴⁾の手法に従って補修性を評価すると補修評価指数PRI=10となる。これも補修の必要なしとの評価Aに分類され、依然十分な耐久性を保持していると判断される。一方、解体調査でその他問題となる損傷は見られなかった。

②舗装材の発生応力について

非合成断面の解析によれば、コンクリート舗装表面における最大応力は、スパン中央の中央ロンジ上で、-26kgf/cm² (近傍実験値：-28kgf/cm²)、下面の最大応力は、同位置で26kgf/cm²程度 (近傍実験値：17kgf/cm²)であった。下面の最大応力は、許容曲げ応力 $\sigma_{bs}=25\text{kgf/cm}^2$ にほぼ近い値であり、コンクリート舗装体は疲労破壊に対して十分安全であったと判断される。

③解析モデルに関して

この解析では、コンクリート舗装を全断面有効として鋼部と非合成としたモデルを採用した。比較では、N=4,000時の実験値を用いた。図-24にデッキプレートのたわみ、図-25にデッキプレート下面の軸方向応力、図-26にコンクリート舗装表面の軸方向応力を示しているが、非合成モデルと良く一致していると判断される。

4. まとめ

以上、試験の結果をまとめると次の通りである。

- (1) メガフロートの上部デッキの舗装として設計されたアスファルト舗装、PC床版舗装、コンクリート舗

装は、何れもボーイング747-400の輪荷重に対してN=10⁴回程度の走行に対して、問題なく耐えられるものと考えられる。

- (2) 浮体の上部デッキおよびその上に施工される舗装部の挙動を評価する解析モデルとして、アスファルト舗装では合成断面、PC床版舗装とコンクリート舗装では非合成断面とした解析モデルが適当であると考えられる。

付録： 本実験の舗装評価に用いた舗装補修指数PRI (pavement rehabilitation index)¹⁾を参考として以下に記す。

1) アスファルト舗装の舗装補修指数：

$$PRI=10-0.450CR-0.0511RD-0.655SV \quad (1)$$

ここにCR:クラック率(%) (=ひびわれ面積/調査面積)

RD:わだちばれ(mm)

SV:平坦度(mm) (縦断方向の凹凸の標準偏差)

表-2 PRIの評価

舗装区域	評 価		
	A	B	C
滑走路	8.0以上	3.8以上 8.0未満	3.8未満
誘導路	6.9以上	3.0以上 6.9未満	3.0未満
エプロン	5.9以上	0.以上 5.9未満	0未満

A:補修の必要なし, B:近いうちの補修が望ましい, C:できるだけ早急の補修が必要である。

2) コンクリート舗装の舗装補修指数：

$$PRI=10-0.290CR-0.296JC-0.535SV \quad (2)$$

ここに、CR:クラック度(cm/m²)

JC:目地部の破損率(%)

SV:段差最大値(mm)

表-3 PRIの評価

舗装区域	評 価		
	A	B	C
滑走路	7.0以上	3.7以上 7.0未満	3.7未満
誘導路	6.4以上	2.3以上 6.4未満	2.3未満
エプロン	5.7以上	0.以上 5.7未満	0未満

A:補修の必要なし, B:近いうちの補修が望ましい, C:できるだけ早急の補修が必要である。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会「道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編」,p237,1994.
- 2) 福手 勤,佐藤勝久,犬養晴雄:下面ひびわれを許すプレレストレストコンクリート版の空港舗装への適用,土木学会論文報告集,第343pp199-207,1984.3.
- 3) (社)日本道路協会,セメントコンクリート舗装要領,p223,1983
- 4) 福手 勤, 佐藤勝久, 八谷好高, 山崎英男:路面性状による空港舗装の供用性評価, 港湾技研資料, No.414, 20pp., 1982.