床版上舗装構造における管路横断部の 疲労破壊に関する実験的検討

古屋 弘¹·本島 禎二²·野口 孝俊³·齋藤 泰之⁴

1 正会員 工博 (株)大林組生産技術本部 (〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2 品川インターシティーB棟)

²正会員 工修 清水建設(株)土木技術本部 (〒105-8007 東京都港区芝浦1丁目2-3 シーバンスS館)
 ³正会員 国土交通省東京空港整備事務所 (〒144-0041 東京都大田区羽田空港3-3-1)
 ⁴ 国土交通省東京空港整備事務所 (〒144-0041 東京都大田区羽田空港3-3-1)

羽田空港D滑走路は埋立・桟橋組合せ工法で計画され,桟橋部は大型のジャケット構造+床版上に滑走 路が造成される構造である.床版上の舗装は総厚20cmで滑走路として供する設計であり,航空保安施設で ある灯器類を床版上舗装内に配置する必要がある.ここで灯器の管路は剛性の高い床版上に敷設され,舗 装体の比較的浅い部分に埋設されることから,航空機の通過により管路上または周辺部に疲労クラックが 発生することが懸念された.このため,舗装設計において管路部をモデルとした実験,およびこのシミュ レーション解析を実施し,管路部の疲労に対する安全性について検討を実施した.実験および解析の結果, 管路敷設部においても疲労破壊に対して所定の設計耐用年数を満足することを確認した.

Key Words : laboratory test, FEM, simulation, Pavement design, airport pavement, fatigue fracture

1. はじめに

羽田空港D滑走路は、羽田空港の需要増に対応す るために計画され、年間の発着能力を現在の29.6万 回から40.7万回に増強するために新たに4本目の滑 走路を整備する事業であり、構造形式は埋立・桟橋 組合せ工法で設計され,桟橋部は多摩川の流れを阻 害させないために 50ha という広大な面積に杭を海 底下 70m の深さまで地盤に打ち込み、その杭に鋼製 のジャケットを被せ、その上にプレキャストコンク リート版を用いて床版を造り、滑走路・誘導路の舗 装を行う構造となっている.図-1に示す大型のジャ ケット構造+床版上に滑走路が造成される構造の模 式図を示す. 桟橋部の構造上, 航空保安施設である 灯器を床版上舗装内に配置する必要がある. 埋設さ れた灯器の管路は表層より 12cm 下の排水性アスフ アルトコンクリート(以下アスコンと略記)層内に 配置し、その周囲をグースアスファルトで充填する こととなっているが、管路が剛性の高い床版上に敷 設され、舗装体の比較的浅い部分に埋設されること から, 航空機の通過により管路上または周辺部に疲 労クラックが発生することが懸念された.このため,

舗装設計において管路部をモデルとした実験を行い, あわせて FEM 解析を実施し,疲労に対する安全性 について検討を実施した.

本報では舗装構造の概要,管路敷設部の影響を検 討する実験方法,その結果および FEM 解析とその 比較に関して報告する.

2. 床版上舗装の概要

床版上舗装の設計は図-3 に示すフローに従って行い,航空灯火設置要件,路面性状についての要件(すべり抵抗,耐わだち掘れ,遮水,排水機能),および疲労耐久性,層間剥離といった要求事項から設定した図-2 に示す舗装構成とした。¹⁾²⁾³⁾.床板上の舗装構成の設計根拠は以下の通りである.

- 舗装総厚は、舗装内に灯火・基台を埋設することからこの床版上の舗装は、表層より、密粒アスコン(改質II型):5+7cm,排水性アスコン:4cm, 砕石マスチックアスファルト(SMA):4cmの4 層)の20cmとした。
- 2) 表層には空港舗装として一般的に用いられてい る密粒アスコンを用いた.本体部には設計要求水



図-1 滑走路桟橋部概要



| ⊠-2 | 床版. | 上舗装構成 | ; |
|-----|-----|-------|---|
|-----|-----|-------|---|



図-3 設計フロー

準書に規定される動的安定度(2,500回)を確保 するため、バインダーには改質Ⅱ型を用いた.

3) 表層の直下には、舗装表面から浸透水があった場合でも速やかに排水し、舗装体内の滞水を防ぐこと及び床版上面への水の浸入を防ぐことを目的として、排水性アスコン層を設けた.排水性アスコンは排水機能を確保するため空隙率を20%程度とした.



図-5 灯器管路部で懸念される疲労クラック

(4) 床版防水材の上面には、防水材と一体となって防水効果を高めることを目的として、SMA とした.
 その透水係数は 1×10⁻⁷ cm/s 以下である.

3. 管路敷設の影響と実験方法の選定

床版上舗装の設計においては,想定される有害事 象としては前述のように,①わだち掘れ,②層間剥 離,③疲労破壊を想定した.特に疲労破壊に関して は、3次元 FEM 解析により航空機載荷時の舗装内 ひずみを算定し,航空機交通量,疲労破壊曲線(動 的曲げ試験⁴⁾より設定)より疲労耐久性の照査を実 施した.その際,疲労度算定期間は,設計時に設定 した耐用年数(無補修による耐久性保証期間)より, 表層の密粒アスコンが13年,SMA が30年と設定し た.

ここで、床版上舗装内に配置する灯器類は、その 構造上図-4に示すように床版上でかつ表層より比較 的浅い舗装内に配置せざるを得ず、管路(鋼管 SGP-32A)は滑走路を横断する部分も多数あること から、航空機の通過により周辺部との剛性の差によ り管路上または周辺部に図-5に示すような疲労クラ ックが発生することが懸念された.このため、一般 の滑走路・誘導路部の舗装設計解析に加え管路横断 部の実験を行い、破壊挙動の確認と設計に用いた FEM モデルおよび解析の妥当性を併せて検証する こととした.

近年は多層弾性理論とその解析プログラムを用い た設計も行われるようになり、舗装内に発生する応 カやひずみも推定できるようになった.しかし、舗 装内に管路が存在するような場合、そのモデル化が

| 試験方法 | WT 試験 | 航空機荷重対応 WT 試験機 | 繰返し載荷試験 (曲げ試験) | 原型載荷試験 |
|---------|---|--|--|--|
| 概要 | 30×30×15cm(厚さ)に舗装 3/4 モデルを作成し、49kN 複輪荷重 (0.63N/mm ²)を繰返し載荷し、ク ラック発生現象等に関して管路有 /無による比較を行う | 30 × 30 × 30cm(厚さ) に舗装 1/1 モデルを作成し、B-777 輪荷 重(1.5N/mm ²)を繰返し載荷し、 クラック発生現象等に関して管路 有/無による比較を行う | 20cm(厚さ)の舗装 1/1 モデルを 作成し、床版を鋼材で模擬して単 純粱を構成し、B-777 輪荷 (1.5N/mm ²)を繰返し載荷し、ク ラック発生現象等に関して管路有 /無による比較を行う | 床版も考慮した舗装モデルを作 成し、実際の車輪で B-777 輪荷 重(1.5N/mm ²)を繰返し載荷し、 クラック発生現象等に関して管路 有/無による比較を行う |
| 計測可能な項目 | ・表面変位 ・クラック(目視による表面および 断面) ・ひずみ(ひずみゲージの埋設が 必要) | 同左 | ・表面変位 ・クラック(目視による表面および 断面) ・複素弾性率 | ・表面変位 ・クラック(目視による表面および 断面) |
| 利点 | ・試験は比較的簡易 ・車輪の走行による疲労の影響 が実験可能 | ・載荷重を航空機に合わせること が出来るため実際に近い実験が 可能 ・車輪の走行による疲労の影響 が実験可能 | ・土質試験用の大型繰り返し三軸 試験装置にて上記の実験を行え る可能あり ・床版挙動を再現(曲げひずみを 発生)させやすく、クラックの発生 も期待できる | ・実現象を最も再現できる方法で ある ・解析を経なくても直接影響の評 価を行うことが出来る |
| 欠 点 | ・クラックを発生させるためのエ 夫(管路位置、載荷重)が必要 ・下面境界が剛体のため、曲げひ ずみが発生しにくい(床版上舗装 と異なる挙動) ・試験機の物理的制約による繰 返し回数の限界 | ・試験装置の使用の制約から連続載荷が出来ない→繰返し載荷を止めるとひずみが戻る ・下面境界が剛体のため、曲げひずみが発生しにくい(床版上舗装と異なる挙動) | ・試験装置に関して検討が必要 (治具等) ・試験体の大きさ(特にスパン)に て鋼材の断面係数を適切に設定 する必要有り ・管路上載荷においては載荷点の影響(載荷面積)があるので考 察が必要 | ・試験が大規模になる ・試験に時間がかかる(準備等含む) ・試験から得られた情報を解析シミュレーションすることは困難 |
| 判定 | Δ | Δ | 0 | Δ |





図-6 繰返し載荷試験機による曲げ試験概要図

| 項目 | | 試験条件 | | |
|----|---------|-------------------------------|--|--|
| 1 | 供試体寸法 | 長400mm×奥150mm×厚130mm | | |
| 2 | スパン長 | 長さ320mm | | |
| з | 載荷方法 | 2点支持, 1点載荷(載荷面積:長50mm×奥150mm) | | |
| 4 | 試験温度* | 10°C | | |
| 5 | 載荷周波数 | 10Hz | | |
| 6 | 載荷荷重の波形 | サイン波 | | |
| 7 | 載荷荷重強度 | 1.5N/mm ² ×1.5倍 | | |
| 8 | 載荷回数※※ | 860,000回 程度(破壊基準線による当初予測) | | |

表-2 繰返し載荷試験概要

※ 試験温度はアスコンの塑性変形(わだち掘れ)を抑制することを考慮して10℃とした.
※※ 10Hzで24時間連続載荷した場合の載荷回数を示した。

困難であり、このため走行載荷試験等による検討を 行った例もある⁵.しかし後述のように大規模な実 験と時間を要するため,限られた設計期間内に実施 することは困難である.よって比較的に簡易な実験 と解析を組み合わせ,設計の妥当性を検証する方法 を検討した.試験方法は,床版上の舗装をモデル化 した上で,航空機が管路部を横断する状態を再現で きる方法を検討し,**表**-1に示す方法の中から試験規 模,試験に要する期日,解析との整合性等を比較検 討の上,繰返し載荷試験装置を用いた繰返し曲げ試 験を実施することとした.

4. 繰返し載荷試験の概要

前述のように、管路上舗装のようなモデル化によ る検討が困難な構造に関しては、実物大舗装に管路 を埋設し、航空機対応WT試験の実施が事象を解明 できることは言うまでもない.しかし表-1に示した ように時間やその他の制約も多いことから今回は繰 返し載荷試験を採用した.要素試験という制約はあ るもののクラックの発生位置等の解明には有用であ り、FEMによるシミュレーション解析と試験結果を 比較し、クラック発生位置およびそのときの繰返し 載荷回数を推測できれば、大規模な実験によらずに 管路上舗装の事象を解明できると考えた.さらに、 要素試験により疲労クラックを再現し、その事象を FEM で再現できれば全体解析による設計検討に信 頼性が得られる点からも有用である.

試験にあたっては、管路部の舗装断面をモデル化 し、実験の成立性(繰返し載荷試験装置の耐久性内 での試験が可能か否か)、および実験から得られるデ



図-7 試験及び解析の概要

表-3 実験結果

| | 破壊回数(万回) | 初期変位(mm) | 備考 |
|-----|----------|----------|-----------|
| A−1 | 179 | 0.0798 | |
| A-2 | 288 | 0.0760 | 破壊モードが異なる |
| A-3 | 223 | 0.0805 | |

ータの有効性を FEM 事前解析にて確認し,図-6 に 示す実験装置にて実験を行うこととした.また予備 試験により実験温度および載荷重等を検討し,表-2 に示す仕様で実験を実施することとした.検討の内 容と結果は以下の通りである.

- 実験可能な繰返し回数で破壊に至る(舗装内のひ ずみが大きくなる)ように下記のように実験モデ ルを設定した.
 - ・ 表層(密粒アスコン)の厚さと発生ひずみの関係を解析により想定し、実際よりも70mm 減じた(120mm→50mm).
 - ・ 床版モデル化→ジャケットおよび床版を舗装 下面に鋼板(t=9mm)を接着することでモデル化 した.
 - ・載荷応力の大きさ→想定される最大接地圧 (B-777 輪荷重)の1.5 倍(2.25MPa)にて 10Hz の繰返し載荷とした.なお,この応力は試験温 度を低くしたことにも起因する.





図-10 実験でのクラック発生状況 (A-3)



 ・ 試験体支持条件→ひずみが発生しやすいよう に単純梁形式の供試体とした(長さ400mm×奥 行150mm×厚さ130mm,スパン長320mm).

2) 航空機載荷位置と管路との相対関係

- 種々の位置について予備解析を行い、舗装に発生するひずみが最も大きくなるよう、載荷中心が管路周辺のグースアスファルト端部となる配置とした。
- 3) 試験温度
 - アスコン塑性変形を発生しにくくするため実験温度をできる限り低くした(10℃).なお,設計における他の温度帯の照査は,実験結果のシミュレーションにより,解析の妥当性を確認し検証することとした.

以上の検討結果から試験による検証項目と解析に よる検証項目を定めた.概要を図-7 に示す.なお, 今回の実験では床版上に管路が配置された部分の疲 労クラックの再現とその結果に基づく設計上の問題 を検討することを目的としていたが,実験の事前シ ミュレーション解析を行うことにより,併せて一般 部にも用いている FEM 解析の妥当性の検討も行う こととした.

5. 試験結果

実験は前述の予備解析および予備実験を経て本実 験3ケースを実施した(試験 No.は A-1,A-2,A-3). 各実験の結果を表-3,および図-8,9,10にまとめる.

3ケースの実験のうち A-1 と A-3 は同様の挙動を 示し、A-1 では載荷回数 179 万回にて変位の急増が 見られ、図-8 における①の部分(密粒アスコン)に 疲労破壊と思われるクラックが生じた.その後 ②→⑤の順序でクラックが伝搬し、185 万 6 千回で 試験を終了した.クラックの発生状況、および載荷 回数と変位量の関係は各図を参照されたい.また、 図-10 に示す A-3 では載荷回数 223 万回にて変位の 急増が見られ、A-1 と同じ位置(①の部分:密粒ア スコン)から疲労破壊と思われるクラックが生じ、 その後、②の方向へクラックが伝搬した.

| 表-4 材料物性值(10℃) | | | | | |
|-----------------------|---------|--------------------------------|------------------------------|-------|---------------------------------|
| 4 | 材料 | 単位体積重量 (kN/m ³) | 弾性係数 (kN/m ²) | ポアソン比 | せん断バネ係数 (kN/m ³) |
| | 密粒As | | 1.3×10^{7} | | |
| 舗装 | 排水性As | 22.5 | 6.5×10^{6} | 0.35 | 1.50×10^6 |
| | SMA | | 7.0×10^{6} | | |
| 1 | 鋼 板 | 77.0 | 2.0×10^8 | 0.30 | - |
| | グース | 22.5 | 5.0×10^{6} | 0.35 | 0.555×10^6 |
| | Alt: DA | 77.0 | 0.0 × 108 | 0.00 | |

※せん断バネは各舗装下面の付着抵抗力



一方,図-9に示すA-2ではクラックの発生形態が 異なり,載荷板付近の頂部からクラックが発生し② から①の方向へ進行した.その後③の位置にもクラ ックが発生したが,その位置はA-1,A-3とほぼ同じ 付近であった.この発生原因は疲労破壊ではなく, 表層部にあった骨材と載荷板の接触によるせん断破 壊であると推定した.実際の舗装では表層の密粒が 実験モデルよりも70mm厚いので,このような現象 は起こりにくいものと考える.



図-13 解析結果(発生ひずみとクラックの予測位置)



図-14 密粒アスコンおよび SMA 疲労破壊曲線(10Hz): 実験式と実験結果による加筆

6. FEM による実験シミュレーション

管路上の舗装内に発生する疲労クラックの再現実 験に伴い,図-7に示す手順でFEMによる実験シミ ュレーションを事前に実施した.解析に先立ち,3 次元と2次元のモデル解析による発生応力および変 位の比較を行ったが,10℃における双方の発生応力 および変位の差は2%程度であったため2次元解析 によるシミュレーションを行うこととした.解析モ デルを図-11に,解析に用いた物性値は試験値から表 -4のように設定した.以下,解析結果に関してまと める.

(1) 変位

FEM 解析結果と繰り返し載荷試験の初期変位(載荷1波目)の比較を図-12 に示す.図中には予備試験の位置づけで行った 20℃管路無しの実測値もあわせて記すが,それぞれ解析値と実測値はよい一致をしているといえる.このことから,FEM 解析結果は舗装の状況をシミュレートできていると考えられ,舗装内のひずみ等に関しても解析結果から推定が出来るものと考えた.また,10℃の解析値において管路有りと管路無しを比較すると,管路無しのほうが載荷位置において10%程度変位が小さいため,試験モデルの剛性は管路による断面欠損がない管路無しのほうが大きいことが確認できた.

(2) クラック発生位置

図-13 に FEM 解析による舗装内発生ひずみと疲労 破壊位置の予測を示す. なお, 図中には主ひずみベ クトルと各舗装材料内に発生する最大主ひずみの値, および事前に破壊領域が現れると予想していた部位 のひずみ値を示している. 疲労破壊は密粒アスコン および SMA 内の最大ひずみ発生位置で発生するも のと想定し,特に表層の密粒アスコンでは舗装内の 最大ひずみ発生位置から表層部に向かうクラックを 予想した.この密粒アスコン層のクラック予想線は 密粒アスコン内の最大主ひずみ発生位置から各要素 の主ひずみベクトルの直行方向を結ぶことにより想 定した.解析から想定したこのクラックの予想領域 と前述の実測値はほぼ一致し,FEM 解析は疲労破壊 を予測することが出来たと言える.

(3) 設計疲労破壊曲線との比較

図-14 に動的曲げ試験により求めた密粒アスコン および SMA の疲労破壊曲線を示す. 図中には今回 の試験結果(疲労破壊回数)とその時の FEM 解析 から求めた最大主ひずみ値を加筆している.ここで, 設計に用いた破壊基準線は各材料の 500 μ および 800 μ の載荷回数の平均値を結んで設定したもので あるが,図-14 ではその試験結果(3供試体)のば らつきを考慮し,領域として示している.

実験の結果,図-14 左の密粒アスコンの疲労破壊 については,破壊回数は設計時の破壊基準線による 予測よりもやや危険側の結果となったが,上記のば らつきを考慮した場合,疲労破壊曲線領域とほぼ一 致し,実験精度の確認と共に,疲労破壊曲線を適切 に設定することにより,解析を用いた疲労破壊の予 測が可能であることが確認できた.なお,今回の実 験により,累積疲労度(設計交通量はB777 はじめ8 機種,代表温度10~40℃の4温度にて算定)は管路 無しの最大値052 に対して管路部は0.65 となり,疲 労耐久性に対して十分余裕があることが解った. 図-14 右の SMA に関しては,当初設定した破壊基準 では50 万回程度の繰返し載荷にて破壊の兆候が現 れるものと想定していたが,実験では図中の 179~ 223 万回でも疲労破壊は認められなかった.この実 験における密粒アスコンの疲労破壊回数を便宜的に SMA の破壊時とした場合,設計疲労破壊曲線は上方 に移動し,疲労度は設計時の算定(0.65)よりも大幅に 安全側の結果となった.

7. まとめ

今回の実験の結果と考察を以下にまとめる.

- (1) 実験により図-8~10のような疲労クラックが 生じ、3供試体のうち2つで同様な傾向が観 察された.いずれも管路頂部からクラックが 表層部(密粒アスコン)に向けて進行した.
- (2) 実験と FEM 解析の供試体変位量を比較した 結果良い一致を示し,解析モデルおよび手法 の妥当性が確認された.
- (3) 管路の埋設部は,解析結果の変位量を基に断 面剛性を考えた場合15%程度の剛性低下と推 定された(変位量:管路無し/管路有り= 0.063(mm)/0.075(mm)=0.84=84%).
- (4) 疲労破壊を想定した解析結果より、事前に幾つかの破壊パターンを想定し実験との照合を行った。今回の実験において発生した密粒部の疲労クラック位置を解析により推定することができ、さた密粒アスコンにおける疲労破壊を疲労破壊曲線から推定することができた。この結果から解析の妥当性を証明した。
- (5) ただし、当初の想定では SMA 内に疲労破壊 が発生するものと想定していたが、実験では 管路頂部 (密粒部)からクラックが発生した. これは SMA の疲労破壊曲線が動的曲げ試験 の結果にて安全側に設定されていたためで、

今回の実験より図-14 のような疲労破壊曲線 が想定された.床版上舗装における疲労度は, 密粒部および SMA にて十分な余裕を有して おり,設計に対する問題はないと考えた.

舗装設計において,管路部をモデルとした実験, およびこのシミュレーション解析を実施し,管路部 の疲労に対する安全性について検討を実施した.実 験および解析の結果,管路敷設部においても疲労破 壊に対して所定の設計耐用年数を満足することを確 認した.

なお、本報告は東京国際空港D滑走路建設工事の 設計業務の一環として実施した成果の一部である. 実験にあたりご指導および助言を頂いた方々に感謝 いたします.

参考文献

- 空港舗装構造設計要領:(財)港湾空港建設技術 サービスセンター,平成11年4月
- 舗装設計便覧 平成 18 年版:(社)日本道路協会, 2006年2月
- 防水システム 設計・施工マニュアル(案):日本 道路公団試験研究所,平成13年6月
- 4) 舗装調査・試験法便覧 [第3分冊]: (社)日本道路 協会, pp.166-175, 平成 19 年 6 月
- 5) 江崎徹:融雪装置を導入した空港アスファルト舗 装の耐荷性能,平成17年度国土交通省国土技術 研究会,平成17年10月
- 6) 空港舗装構造設計要領:(財)港湾空港建設技術
 サービスセンター,平成11年4月
- 舗装設計便覧 平成 18 年版:(社)日本道路協会, 2006 年 2 月

A STUDY ABOUT FATIGUE FRACTURE OF PAVEMENT ON CONDUIT CONSTRUCTED ON CONCRETE SLAB

Hiroshi FURUYA, Teiji MOTOJIMA, Takatoshi NOGUCHI and Yasuyuki SAITO

The D runway in the Tokyo International Airport is planned to be constructed on a reclamation area and the concrete slabs on the pier. The asphalt pavement on the slab for runway is designed with a total thickness of 20cm because it is necessary to accommodate various airport facilities in it like light devices and their pipe conduit. Since the pipe conduit of light devices is installed on the hard slab and it is embedded in comparatively upper part of the pavement, it was feared that fatigue cracks would be generated in the pavement around or on the conduit due to heavy aircraft gear loads. Therefore, authors executed experiment and FEM simulation which modeled the pipe conduit section to examine the safety for the fatigue of the pavement around or on the pipe conduit section for pavement design life. As a result of the experiment and analysis, it was confirmed the safety of the pavement for the fatigue cracking over the design period.