

原型荷重車走行試験による 空港アスファルト舗装の構造設計

前川 亮太¹・島田 敬²・福岡 知久³

¹正会員 関西国際空港株式会社 二期施設整備部 (〒549-8501 大阪府泉佐野市泉州空港北1番地)

E-mail: a26021@kiac.co.jp

²フェロー会員 関西国際空港株式会社 二期施設整備部 (〒549-8501 大阪府泉佐野市泉州空港北1番地)

³日本工営株式会社 首都圏事業部 交通運輸部 (〒102-8539 東京都千代田区麹町5-4)

関西国際空港2期滑走路・誘導路のアスファルト舗装構造設計には、合理性、経済性を高めるために多層弾性論を用いた理論的設計方法を採用している。本設計法を適用する際の最大の課題は、最大粒径300mmの巨礫を含む路床の弾性係数と破壊規準の設定および徹底した経済性の追求にあった。本検討では、既存資料を参考にして設定した破壊規準等の妥当性の検証および安価な路盤材料を用いた舗装構造の供用性を比較検討するために実規模の試験舗装を構築し、航空機B747-400の1脚の荷重に相当する原型荷重車を用いた走行試験を実施した。それらの結果を踏まえ、空港アスファルト舗装構造設計を行った。

Key Words : airport, asphalt pavement, fatigue failure criterion, test pavements

1. はじめに

関西国際空港2期滑走路ならびに誘導路は平成19年8月の供用開始に向けて整備中であり、平成18年6月時点で舗装工事が概成している。同施設のアスファルト舗装は、合理性・経済性を高めるために多層弾性論を用いた理論的設計方法により構造設計を行ったが、次のような技術的な課題があった。

- ・路床は最大粒径300mmの礫材料を綿密な品質管理の下施工されたが、その品質を適切に評価し、設計弾性係数および破壊規準を設定する必要があった。
- ・舗装構造の安定性の確保を前提に、安価な路盤材料の適用や舗装厚を薄くすることにより徹底したコスト削減を図る必要があった。

これらの課題を解決するために、航空機B747-400(3910kN)の1脚(910kN)と同等の車輪配置を有する原型走行荷重車を用いた実路走行試験を実施し、設計の妥当性を検証することとした。

本報文では、路床の弾性係数と破壊規準の設定方法、水砕スラグによる路床調整層に係る原位置試験および実路走行試験結果を述べ、それらの結果を踏まえて設計した理論的設計方法に基づく舗装構造について報告する。

(1) 路床弾性係数の設定方法

理論的設計方法¹⁾において、一般的に路床の弾性係数は繰返し三軸圧縮試験²⁾結果に基づき設定されるが、当空港の路床材料の最大粒径は300mmであり、室内の要素試験で実地盤における変形特性を再現できるかという疑問があった。そこで、路床の弾性係数は現地盤での繰返し平板載荷試験により求めることを基本とした。しかし、同試験では実際の路床に作用する舗装の自重による拘束圧を考慮できない。礫材料の弾性係数は拘束圧依存性を有し、拘束圧の増加に伴い弾性係数が大きくなる特徴があり、これを設計定数の設定に取り込むことが合理的である。そこで、文献³⁾を参考に図1に示すような埋め込み型繰返し平板載荷試験により舗装の自重による拘束圧を考慮した弾性係数を求めることとした。

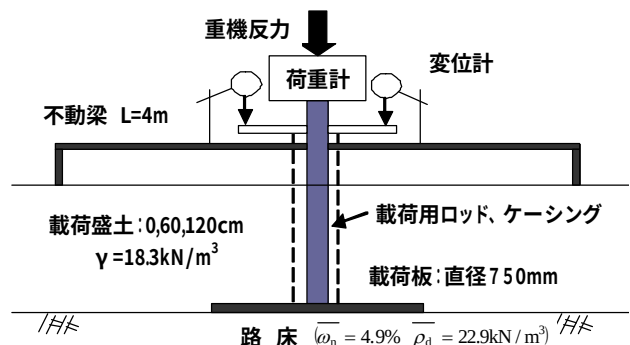


図1 埋め込み型平板載荷試験装置

2. 路床の弾性係数と破壊規準

試験では、盛土厚 0, 60, 120cm の各段階において、40, 80, 160kN/m² の荷重を載荷用ロードを介して路床面に設置した載荷板に繰返し与えた時の沈下量を測定した。なお、路床材の最大粒径 300mm に対して載荷板径は 750mm としたが、これは現空港建設時の調査⁴⁾で行なった直径 1200mm と 750mm での平板載荷試験値に良い相関が認められ、路床の品質管理試験法として採り入れられたためである。20 点での載荷試験で得られた荷重と沈下量の平均値との関係を FEM 解析 (軸対象弾性解析) によりフィッティング解析し、盛土荷重 (= 舗装の自重)、載荷荷重 (= 航空機荷重)、割増係数の関係として図 2 を得た。ここで、割増係数とは、盛土荷重がない状態での弾性係数、つまり、標準の繰返し平板載荷試験で得られる弾性係数に対する拘束圧を考慮した場合の弾性係数の比である。載荷荷重が大きくなると盛土荷重による拘束圧の影響が小さくなり、載荷荷重 160kN/m² では割増係数はほぼ 1 となる。航空機による路床上面での鉛直応力は概ね 90~100kN/m² で、例えば、舗装厚 60cm (= 盛土荷重 12.9kN/m²) の場合には、割増し係数は 1.2 程度となる。

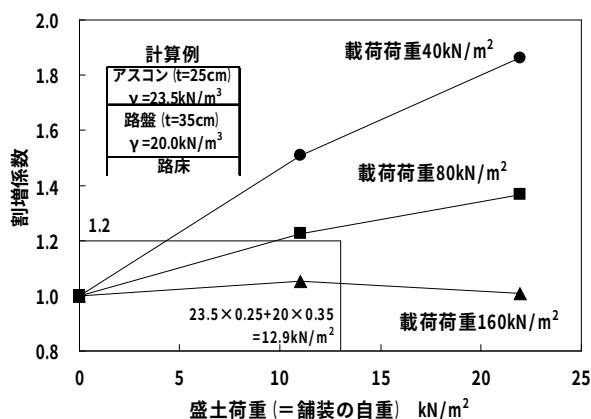


図 2 盛土荷重、載荷荷重と割増係数の関係

(2) 路床破壊規準の設定方法と課題

路床の破壊規準は、舗装設計便覧¹⁾や FAA 指針⁵⁾で基準化されている。しかし、前者は道路舗装に対してのものであること、後者は米国のものでありわが国の土質条件への適用の妥当性に疑問があること、等によりいずれの破壊規準も当空港路床への妥当性が判断できないと考えられた。そこで、路床の破壊規準は、既存資料⁶⁾を参考にして、以下の流れで設定することとした。

- ① 路床弾性係数 (E_{sg}) から CBR を推定 ($CBR = E_{sg}/n$)
- ② 反復作用回数 5,000~40,000 回に対する舗装構造を CBR 設計法による設計要領⁷⁾より設定
- ③ 多層弾性解析により設計航空機荷重 B747-400 を載荷した時の路床上面の鉛直ひずみを算定し、反復作用回数と鉛直ひずみの関係を対数回帰して破壊規準式を設定

このような方法で設定した破壊規準を用いて設定される舗装構造の安定性は、経験的に安定性が実証されている CBR 設計法で設定される断面と等価になると考えられるが、破壊規準は路床弾性係数と CBR の関係により異なることになる。例えば、路床弾性係数を 80MPa とし、路床弾性係数と CBR の関係を $E(\text{Mpa}) = 10 \cdot CBR(\%)$ 、 $5 \cdot CBR(\%)$ の 2 ケースとした場合の破壊規準は図 3 のようになり、係数 n を小さくする方が許容ひずみが大きく、舗装厚を薄くできることになる。既存資料⁶⁾では $E = 10 \cdot CBR$ として構造評価を行うシステムが構築されているが、現空港建設時の調査⁴⁾では、 $E = 5 \cdot CBR$ の関係が得られている。しかし、同調査では繰返し荷重による路床の変形特性が十分に把握できていないことから、安全性を担保した上で出来るだけ薄い断面設計を実現するため、実路走行試験により $E = 5 \cdot CBR$ の関係を用いた破壊規準の検証を行うこととした。

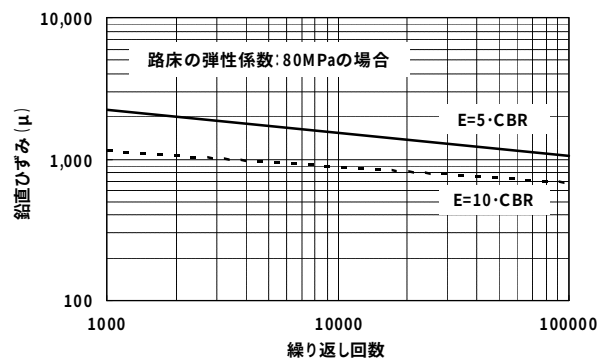


図 3 路床の破壊規準の比較

3. クラッシャーランスラグの上部路床への適用

滑走路舗装の標準横断形状は、図 4 に示すとおりであり、舗装区域の違いによる路床高さの調整が必要となる。加えて、路床は最大粒径 300mm の材料であるため、不陸を整正する必要がある。そこで、路床上に高さ調整の機能を持たせた調整層を設けることとし、材料には環境面および経済性を配慮して CS-30 (クラッシャーラン鉄鋼スラグ 30-0) を用いることとした。しかし、層厚の異なる CS 調整層上面での弾性係数を把握する必要があったため、転圧試験を行った。

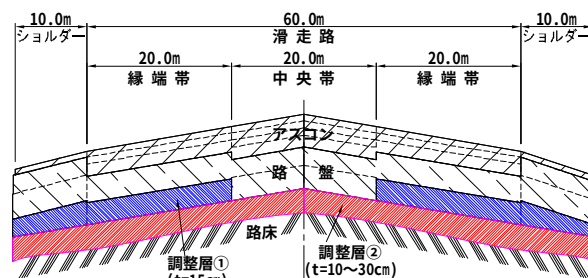


図 4 滑走路横断形状

転圧試験ではCS-30層厚を5,10,20cmの3ケースとして、締固め密度が95%以上となるよう試験ヤードを作成した。試験項目は、路床およびCS層上面での密度試験、繰返し平板載荷試験である。路床およびCS層上面での繰返し平板載荷試験結果より各試験面以深を一様地盤と仮定して求めた面上弾性係数を用いてCS層単体の弾性係数を算定した結果を図5に示す。産地によりばらつきはあるがCS層の弾性係数は200~400MN/m²で、路床よりも大きいことが確認された。したがって、CS材料を用いた調整層の構築は構造設計上問題なく、また、省資源・環境対策にも有益であることから全施設の調整層に用いることとした。図6は実路床工事中において品質管理試験として2,000m²に1点の頻度で実施した繰返し平板載荷試験結果であり、CS調整層の面上弾性係数は路床よりも大きく、かつ、設計値以上の値が得られている。なお、CS調整層により路床強度は増加することになるが、同厚が不陸調整も兼ねており厚さが一定でないため、強度増加は構造設計では考慮していない。

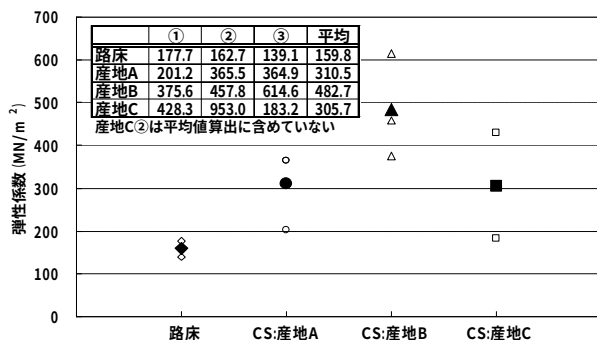


図5 CS層の弾性係数

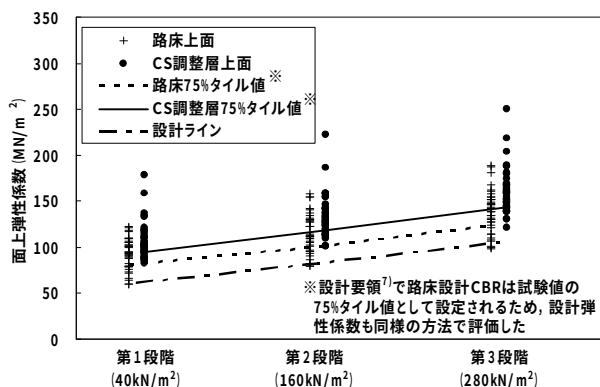


図6 実施工での路床、CS調整層の面上弾性係数

4. 実路走行試験の概要

実路走行試験は、安価な路盤材料を用いた舗装構造比較案の供用性の相対比較および路床破壊規準の検証を目的として実施した。

(1) 試験舗装断面の設定

試験舗装断面は、構造比較検討断面と破壊規準検証断面の2ケースに大別し、以下の考えで設定した。

a) 構造比較検討断面

構造比較検討断面は、1期舗装断面等を参考にして、路盤構造の違いに着目して設定した設計反復作用回数40,000回に対応した5種類の比較案（以下、実施断面案と称す）を基に次のようにして設定した。図7に試験断面を示す。

- ① 路床の想定疲労破壊が15,000回（工期面での制約から設定された試験走行回数上限）以内となるように実施断面案の舗装厚を減厚する。
- ② その際、構造比較検討断面と実施断面案とで、アスコン層、路盤、路床の応力負担割合が等価となるように各層の換算厚($t \times E^{1/3}$)の比が同程度となるようにした。これは、相対剛度が弾性係数比の1/3乗に比例するというバーバーの考え方を準用したものである。

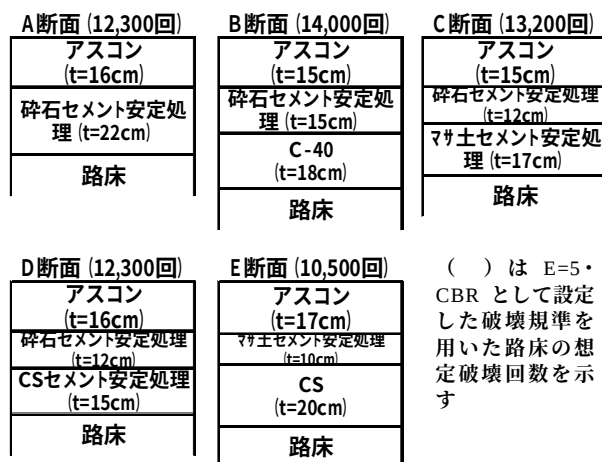


図7 構造比較検討断面

b) 路床の破壊規準検証断面

破壊規準検証断面は、検証精度を高めるために、15,000回の走行試験回数までの範囲内で破壊が均等に分散して生じるように舗装厚を調整した。図8に試験断面を示す。

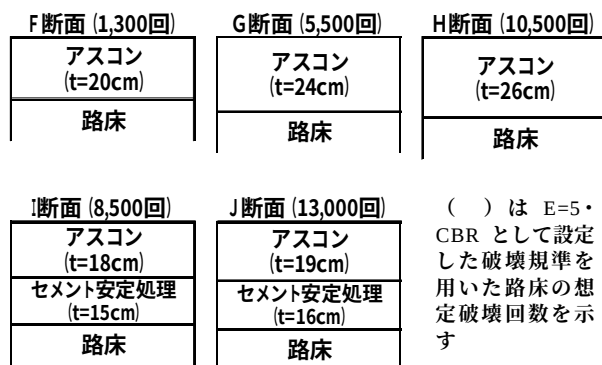


図8 路床の破壊規準検証断面

各舗装断面の平面形状は10m×12mとし、1周約400mの

トラックの直線部に割り付けた。なお、試験舗装の品質は以下のとおりであった。

- ① 試験舗装の路床仕上がり品質は締固め度 96.2%，繰返し平板載荷試験による弾性係数の平均値 82.1MPa，変動係数 27.5%で，実路床の品質とほぼ同等であった。
- ② アスコン層の締固め度は規格値 98%以上を確保しており，変動係数は 0.7%で各断面間でのばらつきは小さい。

(2) 調査内容

走行試験では，表 1 に示す試験・調査を行い，舗装体の基本物性，走行履歴に伴う舗装体の変形や耐久性を把握した。路床の疲労破壊特性を把握する上で重要となる埋設沈下計は，構造比較検討用の各断面では路盤，路床面上に 1 対ずつ，破壊規準検証用の各断面では路床面に 3 箇所，原型荷重車の輪直下に設置した。また，各断面での沈下計設置位置において走行試験終了後に解体調査を行い，路床の変形状態を測定した。

表 1 試験・調査内容

実施時期	試験・測定項目	仕様	試験数
舗装構築中	品質試験	共通仕様書準拠	同左
	繰返し平板載荷試験	φ75cm, 3 荷重段階	3 点 / 工区
	S-FWD 試験	φ45cm, 2 荷重段階	9 点 / 工区
走行試験中	横断形状測定	3m7 口フィルムター	9 測線 / 工区 ¹⁾
	FWD 試験	φ45cm, 20tf	6 点 / 工区 ¹⁾
	セメント安定処理土の室内試験	一軸圧縮試験	5 材令 / 材料 ²⁾
	圧縮量・沈下量	繰返三軸圧縮試験	
	アスコン層の温度	熱電対	
走行試験後	解体調査	層厚測定 びわれ調査	沈下計設置断面 路盤面

1) 0, 100, 400, 1000, 4000, 10000, 15000 回走行時

2) 7, 14, 28, 56, 91 日材令時

5. 走行試験結果

(1) 原型荷重車の走行状況

走行回数は 15,000 回で原型荷重車に取り付けた GPS による走行管理データより平均走行速度は 15.5km/hr，横断方向の走行分布の偏差は 10cm 未満であり，走行回数は反復作用回数 (=カバレージ) に等しいと判断した。したがって，沈下計設置位置には輪荷重による最大ひずみが走行回数分作用したことになる。

図 9 に原型荷重車 (B747 型脚：脚荷重 945kN) の走行状況を示す。

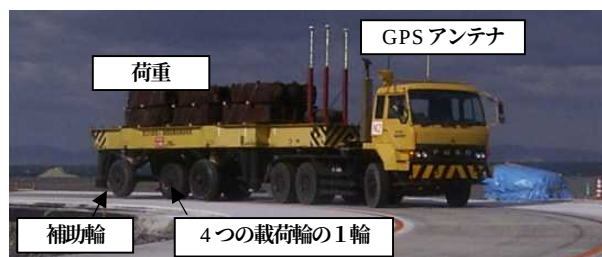


図 9 原型荷重車走行状況

(2) 路面および路床の変形

路面および路床の変形測定例を図 10，図 11 に示す。構造比較検討断面の D 断面の路面変形量は 10mm 未満であるのに対し，破壊規準検証断面の F 断面では最大 40mm もの路面変形が生じている。空港舗装補修要領案⁸⁾によれば滑走路の PRI (Pavement Rehabilitation Index) が C ランク (早期に補修の必要性がある) となるわだち掘れ量は 38mm 以上であり，F 断面では使用限界状態を超過したといえる。路床沈下についても同様の傾向があり，D 断面ではほとんど変形がないのに対して，F 断面では走行履歴に伴い塑性変形が増大している。

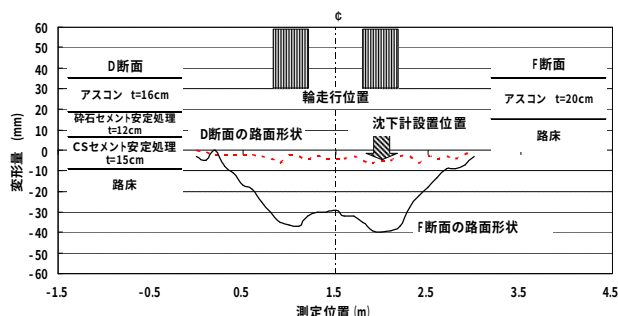


図 10 15,000 回走行後の路面変形量

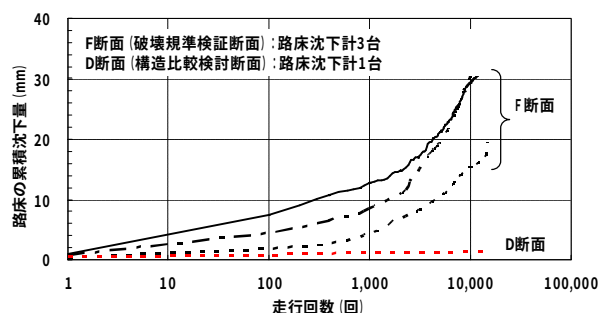


図 11 路床沈下量の経時変化

路面沈下と路床沈下の関係は図 12 に示すとおりで，路面沈下のほとんどを路床沈下が占めていることがわかる。これは図 13 に示す走行試験終了時の舗装断面形状からもわかるように試験施工を冬期に実施したため，アスコン層の流動に伴う変形量がほとんどなかったためであり，路床の塑性変形が舗装のわだち掘れとなって表れることが再確認された。

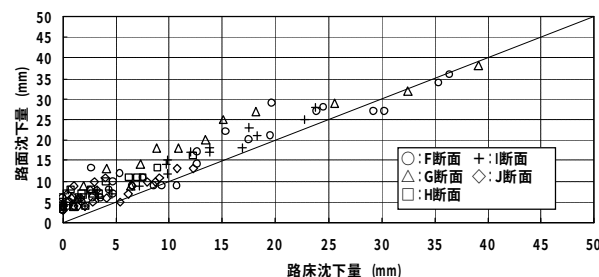


図 12 路床沈下量と路面沈下量の関係

なお、路面沈下と路床沈下の差は路盤やアスコン層の圧縮量であるが、解体調査によりアスコンおよび路盤の圧縮量と路床沈下量の合計は路面沈下とほぼ一致していた。

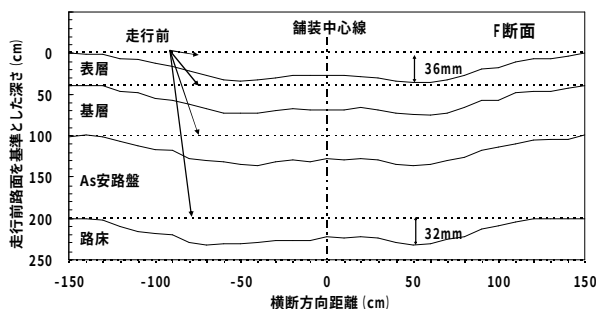


図 13 走行試験終了後の舗装断面形状

(3) 構造比較検討断面の総合評価

路面及び路床の変形量、解体調査によるクラック発生状況および FWD 試験結果による構造比較検討断面の評価一覧を表 2 に示す。計 5 断面の相対順位は次のとおりとなった。

$$A \text{ 断面} \geq D \text{ 断面} \gg C > E > B$$

D 断面は A 断面よりも構造安定性は若干劣るものの、要求性能は十分に満足しており、コストは D 断面の方が安価である。そこで、標準構成としては D 断面を採用することとした。なお、原型荷重車の走行速度は、実際の航空機よりも遅いが、舗装構造の相対順位への影響はないと考えられる。

表 2 構造比較検討断面の試験結果総括表

項目	調査結果の概要
横断形状	B,C 断面で 16~17mm 程度、E 断面で 12mm 程度のわだち掘れが生じている。A,D 断面では 5mm 程度以下と小さい。
路床の累積沈下	B,C 断面で 10mm を超える沈下が生じているが、A,D 断面ではほとんど変化がない。
路面性状	B 断面では、走行 10,000 回程度で走行中心線にクラックが生じた。
FWD	走行回数に伴い D_0 たわみが大きくなっており、特に B,C,E 断面で顕著である。

(4) 破壊規準の検証

走行試験で得られた破壊回数と走行荷重車による路床の鉛直ひずみを対数回帰すれば破壊規準を得ることができる。しかし、試験路床の弾性係数は、 $70 \sim 150 \text{ MN/m}^2$ のばらつきがあったため、これを無視して上記の方法で破壊規準を設定することは適切でないと考えた。そこで、「2. 路床の弾性係数と破壊基準」で述べた方法で設定される規準の検証を行うこととした。

a) 破壊回数の算定

路床の破壊は、以下の理由により試験舗装各断面での路面沈下量が補修要領案に示される補修要否の評価値に至った時点と定義した。

- ・路床の永久変形は舗装表面にわだち掘れという損傷となって表われるものであること
- ・今回の計測では路面沈下量とわだち掘れ量はほぼ同等であったこと
- ・路面沈下量の大半は路床の沈下であること

破壊回数は、各断面において、図 14 に示すように路面沈下量が補修要領案に定める「補修が望ましい」とされる B ランクの下限值 (10mm) となった時点の走行回数とした。ここで、B ランクは 10mm~24mm の範囲であるが、今回の路面沈下にはアスコンの塑性変形がほとんど含まれていないことから B ランクの下限値を採用している。

b) 鉛直ひずみの算定

荷重車載荷時に沈下計設置位置の路床上面に作用していた鉛直ひずみを多層弾性解析により算定した。その際、アスコンやセメント安定処理材の弾性係数は走行試験中の温度、走行速度および材令を考慮して設定した。

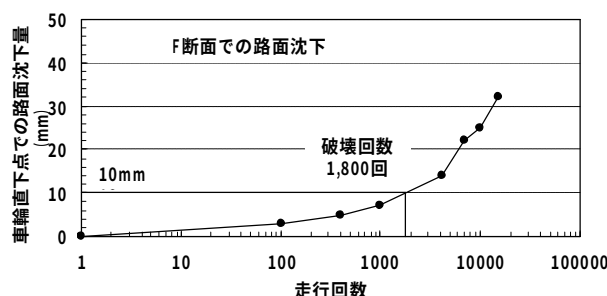


図 14 破壊回数の算定方法

c) 破壊規準の検証結果

$E \text{ (MPa)} = 4 \cdot \text{CBR}$, $5 \cdot \text{CBR}$ とした場合の破壊規準の検証結果は図 15 に示すとおりで、 $4 \cdot \text{CBR}$ とした場合には非超過データ数が多い。E=5・CBR の場合、非超過データが 2 点あるが、破壊回数が 2,000 回未満の小さい領域であり、設計反復作用回数が 40,000 回であるため、路床の破壊規準としては、E=5・CBR として算定される破壊規準を用いることが妥当であると判断した。

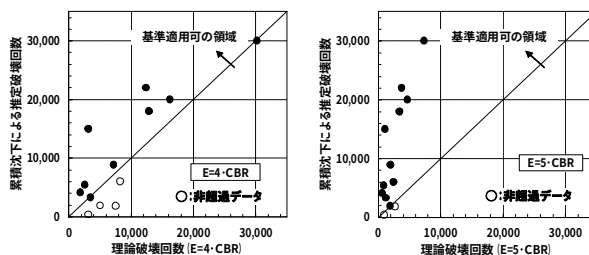


図 15 路床破壊規準の検証結果

6. 実施断面の設定

試験舗装より基本構成は、図 7 に示した D 案が適切で

あること、路床の破壊規準は $E=5 \cdot \text{CBR}$ とした規準が妥当であることがわかった。そこで、これらの結果を用いて理論的設計方法により断面設計を行った。

設定した滑走路標準構造を図 16 に示し、以下に特徴を整理する。

- ① 路床の累積疲労度が 1.0 以下となるように下層路盤厚を設定
- ② アスコン層の疲労照査結果に基づき、設計要領のアスコン層厚に対して中央帯では 31cm を 26cm に、縁端帯では 29cm を 20cm に減厚した。
- ③ 交通量荷重がほとんど作用しない縁端帯は FAA の指針を参照して中央帯より 6cm (基層一層分) 減厚した。

中央帯	縁端帯
密・粗粒アスコン t=16cm	密・粗粒アスコン t=10cm
アスファルト安定処理 t=10cm	アスファルト安定処理 t=10cm
砕石セメント安定処理 t=15cm	砕石セメント安定処理 t=22cm
CSセメント安定処理 t=19cm	
路床 (E=80MPa)	路床 (E=80MPa)

中央帯：滑走路幅 60m の中央 20m の範囲
縁端帯：中央帯の両側 20m の範囲

図 16 滑走路の標準構造

7. まとめ

本検討の成果を以下にまとめる。

- ① 巨礫を含む路床土の強度特性を原位置での埋込み型繰返し平板載荷試験により把握し、応力依存性を考慮した設計弾性係数を設定した。
- ② 路床調整層として CS-30 の妥当性を実証した。
- ③ 路床の破壊規準を走行試験に基づき設定した。
- ④ 上記の結果を基に、理論設計法よりアスファルト舗装構造を設定し、1 期舗装構造に対してコスト縮減を図った。

8. おわりに

今後、設計は性能規定化に進み、舗装設計においても理論的設計方法の活用は高まるものと考えられ、本検討

において空港舗装の設計体系として一定の構築がなされたいと思われる。しかし、この設計法では取り扱っていない破損形態があること、今回の設計断面の実際の供用性をモニタリングしていく必要があること、さらに、1 期施設も含めたライフサイクルコストの低減、資産価値の向上を図る必要があることから、関西国際空港の PMS (Pavement Management System) の構築を検討中である。

謝辞： 本論文は平成 16 年度の舗装構造検討会の検討資料をとりまとめたものである。ここに、東洋大学 福手教授、立命館大学 建山教授、関係各位に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 社団法人 日本道路協会：舗装設計便覧，平成 18 年 2 月
- 2) 社団法人 日本道路協会：舗装試験法便覧別冊（暫定試験方法），平成 8 年 10 月
- 3) N・C・ヤン原著：舗装新設計法，森北出版株式会社
- 4) Federal Aviation Administration：Advisory Circular AC150/5320-6D，2004/4/30
- 5) 関西国際空港株式会社 関西国際空港における舗装構造の検討（その 2），平成元年 3 月
- 6) 八谷，若月，大野：FWD による空港アスファルト舗装の構造評価システム，土木学会舗装工学論文集，第 3 巻，pp.57-66，1998
- 7) 運輸省航空局：空港舗装構造設計要領，平成 11 年 4 月
- 8) 運輸省航空局：空港舗装補修要領（案），平成 11 年 4 月
- 9) 吉見，福田，福岡：原型荷重走行車を用いた空港アスファルト舗装の実路走行試験の計画，土木学会第 61 回年次学術講演会講演概要集，2006.9
- 10) 福田，吉見，福岡：原型荷重走行車の実路走行試験に基づく空港アスファルト舗装の設計，土木学会第 61 回年次学術講演会講演概要集，2006.9
- 11) 島田，小杉，松下：滑走路舗装(上部路床)への鉄鋼スラグ(CS 材)の適用，土木学会第 61 回年次学術講演会講演概要集，2006.9

THE DESIGN OF THE 2ND RUNWAY ASPHALT PAVEMENT WITH ON-SITE TEST USING THE LOADING VEHICLE

Ryota MAEKAWA, Takashi SHIMADA and Tomohisa FUKUOKA

Kansai International Airport Co., Ltd. has introduced the multi elastic layer analysis method to the design of the 2nd runway asphalt pavement. The cost reduction of the asphalt pavement can be realized by the appropriate estimation of reclamation land strength and by the reduction of pavement thickness. The technical issue is the determination of the elastic coefficient and the fatigue failure criterion of the subgrade that include D300 m/m rocks in the maximum. The economical structural design of the new runway pavement has been made based on the result of the on-site test using the loading vehicle(B747).