

疲労度設計法を用いた空港コンクリート舗装 の維持管理手法の検討

下村泰造¹・西澤辰男²・吉永清人³・福岡知久⁴

¹正会員 工修 大成建設株式会社 土木本部土木設計部 (〒160-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1)

²正会員 工博 石川工業高等専門学校教授 環境都市工学科 (〒929-0392 河北郡津幡町北中条タ 1)

³非会員 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正会員 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)

設計供用期間が 50 年にわたる空港コンクリート舗装に対しては、空港の使用性・安全性を確保する設計手法とともに適切な維持管理手法の適用が求められる。そこで、空港コンクリート舗装に対し信頼度の概念を導入し、疲労度設計手法を用いて将来の劣化状態を予測した。本研究においては、ひびわれ度の経時的変化より劣化状態の特定を行い、マクロレベルでの維持管理戦略へ利用する手法を検討した。一方、ミクロレベルでの具体的な維持管理手法として、各劣化状態に対するイベントツリーおよびフォールトツリー手法を用いて各劣化状態のリスク状態を特定する方法を提案する。

Key Words : *fatigue analysis, designed performance curve, event tree- fault tree analysis*

1. はじめに

東京国際空港国際線エプロン等整備等事業（以下、羽田エプロン PFI プロジェクトと称す、PFI : Private Finance Initiative）は、東京国際空港の再拡張事業と国際化との位置づけにおいて、年間概ね 3 万回程度の近距離国際旅客定期便の就航と深夜早朝時間帯を利用した国際貨物便の就航とを目的とし、エプロンを含む基本施設の他、航空保安施設、付帯施設、構内道路・駐車場および緑地の設計、施工から維持管理までを PFI 事業により実施するものである。当事業においては、設計供用期間として 50 年が定められており、空港としての使用性、構造物の安全性、工事の確実性に加え、施設の合理的な維持管理が基本施設に求められている。

一般に、空港施設のアセットマネジメントにおいては、ライフサイクル費用（LCC）の低減化が図れるような最適補修戦略を策定することが重要である。特に、空港の使用性の観点から、施設を長時間にわたり閉鎖して大規模補修を実施することは多大な経済損失を招くため、空港コンクリート舗装の設計にあたっては、長期間にわたって十分な耐久性を有するような舗装構造を確保しつつ、一方では、適切な維持管理を行い、設計供用期間中の耐久性を確保することが求められる。その際、コンクリート舗装のアセットマネジメントを実施する上で、コンクリート舗装の劣化モデルを作成し、ライフサイクル費用

や補修需要を推計することが求められている¹⁾。

維持管理に関しては、PRI (Pavement Rehabilitation Index) を管理指標として、熟練した点検者による目視点検により劣化状況を確認後、状況に合わせた補修対策を実施しているのが現状である。このため、LCC の観点から予防保全による維持管理手法が望まれている。

一方、空港コンクリート舗装の設計に関しては、荷重支持性能、走行安全性の確実な確保に加え、上記の維持管理に関する補修の容易性を考慮して、舗装種別を選定する。近年増加している海上もしくは臨海部における軟弱地盤上の空港においては、地盤の沈下、とりわけ不同沈下が構造的に問題となり、コンクリート舗装の構造設計に大きく影響を及ぼす恐れがある。ここで、舗装の要求性能のひとつである荷重支持性能、とりわけ疲労耐久性については、これまでにいくつかの空港において、疲労度設計法を用いた版厚の設計事例があるが、疲労度設計法を用いてコンクリート舗装の劣化事象を予測し、維持管理戦略へ適用した事例は筆者の知る限りない。また、現実の劣化過程のデータと照らし合わせるほど、上記設計事例の年数が経過していないのが現状である。

以上の問題意識の下に、本研究においては、羽田エプロン PFI プロジェクトを元に、1) 不同沈下を考慮した疲労度設計手法により、コンクリート舗装版の累積疲労度を算定する。その際、疲労度設計手法においては、信頼

表-1 不同沈下シミュレーションにおける地盤物性確率モデル

地盤物性	分布関数	確率変数
圧縮指数	C_c	正規分布 平均値, 標準偏差
初期間隙比	e_0	正規分布 平均値, 標準偏差
圧密降伏応力	P_c	正規分布 平均値, 変動係数
圧密係数	C_v	対数正規分布 平均値, 標準偏差

表-2 試行回数が計算結果に及ぼす影響

試行回数	20 回	50 回
平均沈下量(cm)	23.6	23.7
平均不同沈下率の期待値	0.16	0.16
最大不同沈下率の期待値	0.70	0.71

度を考慮するとともに、版厚の厚い空港コンクリート舗装を考慮した温度応力を適用する²⁾。2) クラック発生モデルにもとづいて経時的なひびわれ度を推定し、マクロレベルにおける維持管理戦略へ利用する。3) これに対し、ミクロレベルにおける具体的な維持管理手法として、起因事象の時系列推移とその原因を特定するイベントツリーおよびフォールトツリー手法を用いた各損傷状態のリスクの特定方法、補修対策について提案する。

2. 空港コンクリート舗装構造と疲労度設計法

(1) 不同沈下を考慮した疲労度設計法

一般に、空港コンクリート舗装の舗装種別としては、NC（無筋コンクリート）舗装、PC（プレストレストコンクリート）舗装、CRC（連続鉄筋コンクリート）舗装、プレキャスト版（PC, PRC）舗装等があり、空港の使用性・安全性・経済性・施工性等の主要因から舗装種別が選定されることになる。本研究においては不同沈下が生じる地盤を対象とするため、特に舗装種別の選定に当たっては、構造の安定性と勾配修正の容易性・確実性に留意する必要がある。つまり、コンクリート版を支持する路床・路盤に不同沈下が生じ、舗装表面の勾配が使用性を超過する恐れがあると同時に、路盤とコンクリート版との間に空隙が生じ、沈下がない状態に比べ大きな応力が発生することにより版が破壊に至る可能性がある。各舗装形式はそれぞれ特徴を有しているが、初期コスト、勾配修正の容易性・確実性、構造安定性、実績等に着目し、比較検討を行い決定する。本研究においては、羽田エプロン PFI プロジェクトで選定された NC 舗装の疲労度設計法を対象とする。

地盤の不同沈下を NC 舗装の構造設計に考慮する場合、特に地盤物性の不確実性に留意する必要がある。土田らは、こうした地盤物性の不確実性について、モンテカルロシミュレーションを用いた解析手法³⁾を提案し、空港コンクリート舗装への適用性について検討している（以下、土田モデルと称す）。本検討においても、土田モデルを使

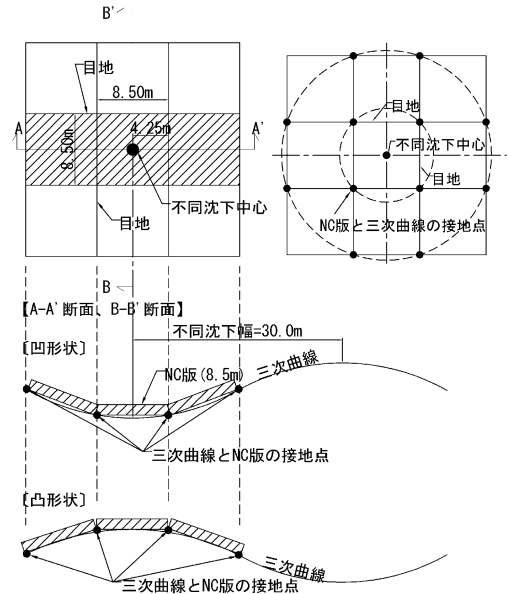


図-1 疲労度設計モデル

用し、圧密沈下に関するシミュレーションを行った。表-1に、圧密沈下に関する地盤物性を確率変数として取り扱った場合の確率モデルについて示す。なお、モンテカルロシミュレーションの試行回数については、表-2に示す事前検討を行い、検討結果に影響を及ぼさない回数として20回とした。ここで、平均不同沈下率とは、全沈下量の平均値に対する不同沈下量の比であり、最大不同沈下率とは、全沈下量の平均値に対する最大不同沈下量の比である。

次に、コンクリート舗装版内に発生する応力については、西澤らによる2次元平板FEM⁴⁾を改良して、航空機の輪荷重による応力、および不同沈下によって生じる版の自重応力を算定後、版上下面の温度差によって生じるそり拘束応力を加算する手法を開発した。改良平板FEMでは、初期条件として不同沈下形状を入力し、その部分の路盤の作用はないと考え路盤反力係数を0にしておく。この際、コンクリート版の剛体運動を考慮し、1枚のコンクリート版ごとの路盤との接触点を計算する。そこに自重や航空機の荷重が作用して変形が沈下量を上回ると再びコンクリート版が路盤と接触し路盤の反力が働くようになる。このような変形後の接触点を確認しながら力学的な平衡状態を繰り返し計算によって求めていく。ここで、自重応力の算定においては、既往の研究⁷⁾よりコンクリートのクリープによる影響を考慮して50%に低減している。また、不同沈下を考慮した版の応力算定にあたっては、不同沈下幅を30m³⁾とした3次曲線で不同沈下曲線をモデル化し、上記2次元FEM解析により応力を算定した。図-1に、疲労度設計モデルを示す。本研究においては、1枚が8.5×8.5mの連続する9枚のNC舗装版下に、不同沈下が発生し、版の目地位置を折点として各版が沈下形状に追随するようにモデル化を行った。基本的な考

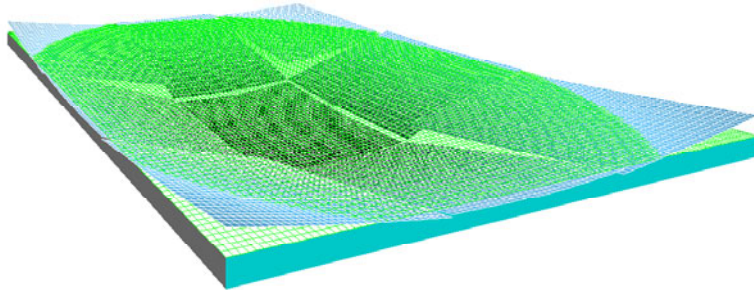


図-2 不同沈下を考慮した平板 FEM 解析結果例

え方はコンクリート版のそり変形を考慮するものと同じであり、そり変形の代わりに不同沈下形状を与え、コンクリート版と路盤との接触状態を調べながら節点の路盤ばね係数を調整して繰り返し計算を行うアルゴリズムを採用している。また、版どうしは荷重伝達効果を見込み、せん断バネ係数、曲げバネ係数、ねじりバネ係数で示される 3 つのバネモデルにより表現し、目地部における荷重伝達率が 85%以上確保されることを確認している。また、図-2 は自重のみが作用した場合の計算結果(変形状態)の例である。この例では、不同沈下にコンクリート版が追従することを確認するために、荷重伝達なしとして、自重のみで変形する様子を解析した。不同沈下形状に合わせてコンクリート版が剛体変形していることがわかる。

(2) 信頼度の設定と累積疲労度の算定

設計に適用する信頼性については、1)疲労破壊輪数や舗装計画交通量、2)地盤・材料の強度などに信頼度に応じた係数を適用する方法が提案されている⁹⁾。また、求められるサービスレベルの水準により、信頼度を設定することが必要となろう。本設計においては、コンクリート材料の疲労強度に着目し、適切な破壊曲線を設定することで信頼性を確保する方針とした。

小梁川ら⁹⁾は、コンクリート材料の疲労破壊試験より求められる破壊確率 30%の破壊基準を用いて設計した舗装が、疲労度 1.0 となったときに 30%破壊すると報告している。本設計においては、対象とするコンクリート舗装が空港コンクリート舗装であることから以下の点に留意する。

コンクリート舗装の疲労耐久性が損なわれ、サービス水準が低下した場合に、施設を長時間にわたり閉鎖して大規模補修を実施することは多大な経済損失を招く恐れがある。そこで、空港コンクリート舗装により高い信頼性を確保することを目的として、式(1)に示される破壊確率 5%の破壊曲線を設定し、疲労度設計を行うこととした。ただし、この破壊確率は、コンクリートの材料としての疲労破壊確率であり、コンクリート舗装版の疲労破壊確

率ではないことに十分に留意しておく必要がある。現時点においては、蓄積された十分なデータを利用することが困難であるため、より高い信頼性を確保する目的で上記破壊確率曲線を用いる方針とした。

$$\begin{aligned} Ni &= 10^{((a-SL)/b)} \\ a &= 1.11364 + 0.00165 \times P_f \\ b &= 0.09722 - 0.00021 \times P_f \end{aligned} \quad (1)$$

ここに、 SL ：応力レベル(合成応力/設計基準曲げ強度)、 Ni ：合成応力に対する許容繰返し回数、 P_f ：破壊確率(%)である。

次に、疲労度については、マイナー則に従うものとし、式(2)の通り算定した。

$$FD(j) = \sum_{t=-9}^{19} \sum_{i=-6}^6 \frac{n(t,i)}{N(t,i,j)} \quad (2)$$

ここに、 $FD(j)$ ： j 点における疲労度、 $n(t,i)$ ：上下面温度差 $t^{\circ}\text{C}$ のとき i 点を通過する交通量、 $N(t,i,j)$ ：曲げ応力 $\sigma_b(=\sigma_L(i,j)+\sigma_t(j,t))$ での許容繰返し回数、 $\sigma_L(i,j)$ ：脚載荷位置 i の場合の j 点における応力、 $\sigma_t(j,t)$ ：上下面温度差 $t^{\circ}\text{C}$ のときの j 点での温度応力である。ここで、右辺第一総和記号は上下面温度差が $-9\sim 19^{\circ}\text{C}$ を想定した場合の累積疲労度算定の項を表している。

また、式(2)中の脚載荷位置については右辺第二総和記号で表され、式(3)および図-3で表される航空機の横断方向の走行分布を考慮した。

$$n(t,i) = \text{nair}(t) \times \int_{s(i-1/2)}^{s(i+1/2)} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx \quad (3)$$

ここに、 $\text{nair}(t)$ ：上下面温度差 $t^{\circ}\text{C}$ のときの機材別全交通量、 s ：FEM解析における載荷位置のインターバル、 σ ：横断方向標準偏差である。

式(2)における曲げ応力 σ_b を解析モデル上で模式的に表したものが図-4である。図-4では、版中央部に航空機荷重が載荷した場合を一例として示している。図-4の j 点における疲労度を計算するために、図-3に示される横断方向の走行分布に従い $i = -6\sim 6$ の範囲で航空機荷重位

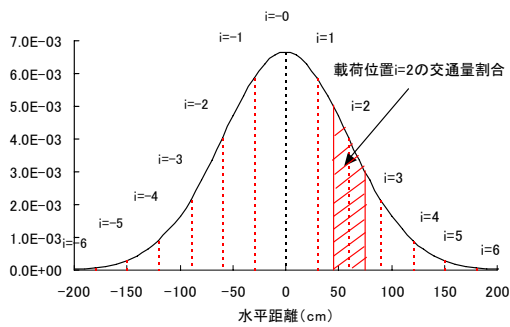


図-3 航空機の横断方向走行分布

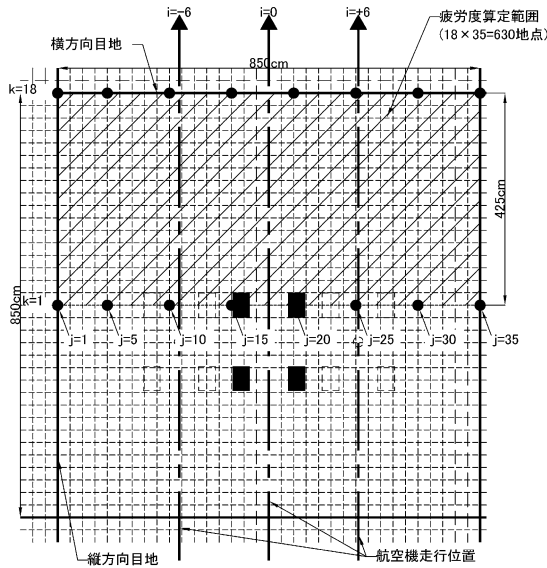


図-4 解析モデルにおける疲労度算定模式図

置を移動させ、 j 点の応力度 $\sigma_L(i, j)$ を FEM 解析により算定する。これに、別途温度応力式から算定した上下面温度差 t (°C) における $\sigma_t(j, t)$ を加え、合成曲げ応力 σ_b を算出する。

(3) 温度応力

コンクリート舗装の設計において、版上下面の温度差によって生じる温度応力が疲労度へ及ぼす影響は大きい。従来コンクリート版に生じる温度応力については岩間の提案式が一般的に用いられてきたが、坪川ら²⁾は、版厚の厚い空港コンクリートの特徴を考慮し、版中央部における温度応力式として、式(4)に示す提案式を提示している。式(4)は、コンクリート版に発生する温度応力を軸方向成分、曲げ成分、内部応力成分に分割した際に、内部応力成分が曲げ成分を打ち消す効果を考慮している。本設計においても、道路舗装コンクリートに比べ空港舗装コンクリートの版厚が厚いことを考慮して、温度応力の算定に式(4)を用いることとした。

$$\sigma_t = 0.53 \frac{E_c \cdot \alpha \cdot \theta}{2(1-\nu)} \quad (4)$$

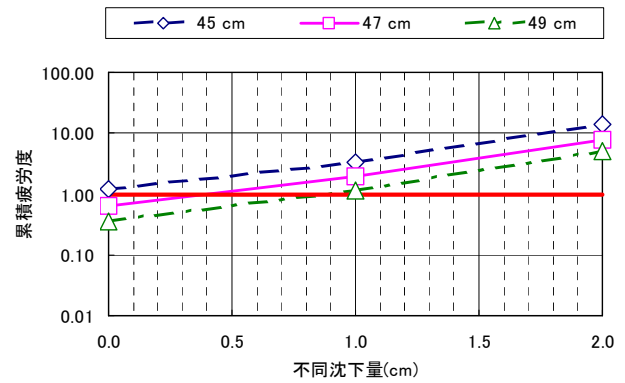


図-5 版厚と不同沈下量との関係

表-3 設計対象航空機と荷重諸元

航空機の種類		A380クラス		Jクラス	Lクラス	Mクラス
		ボディギア	ウィングギア	B747-400	B777-200ER	B767-300ER
脚荷重 (kN)	離陸	1,572	1,048	910	1,368	829
	着陸	1,084	723	657	893	664
輪荷重 (kN)	離陸	262	262	228	228	207
	着陸	181	181	164	149	166
接地圧 (N/cm ²)		150.04	150.04	137.98	150.04	137.88
接地面積 (cm ²)	離陸	1,747	1,747	1,649	1,520	1,503
	着陸	1,204	1,204	1,191	992	1,204
接地幅 (cm)	離陸	34.7	34.7	33.7	32.4	32.2
	着陸	28.8	28.8	28.6	26.1	28.8
接地長 (cm)	離陸	50.4	50.4	48.9	47.0	46.7
	着陸	41.8	41.8	41.6	38.0	41.8
接地半径 (cm)	離陸	23.6	23.6	22.9	22.0	21.9
	着陸	19.6	19.6	19.5	17.8	19.6

表-4 機材別年間設計交通量

カテゴリー	国際線該当機材	荷重区分	年間離陸回数
A380 クラス	A380-800	離陸荷重	3,000
J クラス	B747-400		6,000
L クラス	B777-200ER		3,750
Mクラス	B767-300ER		12,250
計			25,000

ここで、 σ_t : 温度応力 (MPa), E_c , ν : コンクリートの弾性係数, ポアソン比, α : コンクリートの温度膨張係数 ($=1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$), θ : コンクリート版の上下面の温度差 ($^\circ\text{C}$) (θ の発生頻度分布は「舗装設計便覧」に準じた) である。

(4) 検討結果

図-5 に、疲労度設計より求められた版厚毎の不同沈下量と累積疲労度との関係を示す。なお、版内に発生する応力の算定においては、表-3 に示す各航空機材荷重を考慮し、また羽田エプロン PFI プロジェクトにおける維持管理期間である 25.5 年を設計年数として、表-4 に示す機材別年間交通量を基に累積疲労度を算出した。

図-5 より、破壊確率 5% の疲労破壊曲線を用いた場合、版厚 45cm では、不同沈下が生じない (0cm) 場合であったとしても、累積疲労度が 1.0 を超過してしまう結果となっている。また、版厚 47cm および 49cm においては、累積疲労度が 1.0 となる不同沈下量は、それぞれ 0.4cm, 0.9cm であることがわかる。すなわち、25.5 年後において、

表-5 PRI(Pavement Rehabilitation Index)

項目	A	B	C
CR : ひびわれ度 (cm/m ²)	1.1未満	1.1~11.1	11.1以上
J C : 目地の破損率 (%)	0.1未満	0.1~5.7	5.7以上
S V : 段差 (mm)	5未満	5~14	14以上
P R I	5.7以上	0~5.7	0未満

累積疲労度が 1.0 となる各版厚での許容不同沈下量が算定できる。

3. 維持管理指標と劣化予測

(1) PRI 値とひびわれ度

空港コンクリート舗装に関する維持管理指標として、式(6)で表される PRI 値がある。この PRI 値は、表-5 で表される A, B, C の 3 つのレーティングにより分類され、C ランクになった場合は早急に補修の必要があると判断される。

$$PRI=10-0.290CR-0.296JC-0.535SV \quad (6)$$

ここに、CR : ひびわれ度 (cm/m²)、JC : 目地部の破損率 (%), SV : 段差 (mm) である。

式(6)で表されるように、コンクリート舗装に関する PRI 値は、ひびわれ度 CR, 目地部の破損率 JC, および段差 SV の組合せによって評価されるが、目地破損は維持工事により定期的に補修する方針とし、また段差については、既往調査資料⁷⁾より、エプロン部において平均 5.9mm, 標準偏差 3.26mm という報告がある。そこで、式(6)に、段差の 90% 上限信頼値として、

$$SV = 5.9 + 1.65 \times 3.26 = 11.28(\text{mm})$$

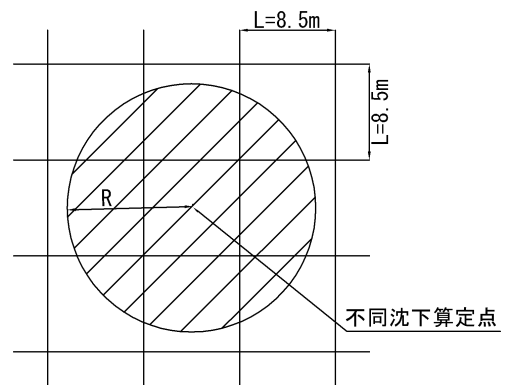
を入力し、PRI が C ランク (PRI=0) となるひびわれ度 CR を算出すると、

$$PRI=0=10-0.290CR-0.535 \times 11.28 \Leftrightarrow CR=137(\text{cm}/\text{m}^2)$$

となり、表-5 に示すひびわれ度単独の規格値(C ランク) 11.1 (cm/m²) よりも大きな値となるため、コンクリート舗装の疲労耐久性を確保する観点から、疲労度設計法においてはひびわれ度に着目し、このひびわれ度が C ランクとならないように、構造検討を行う方針とする。

疲労度設計における信頼度について前述したが、空港コンクリート舗装版自体の破壊確率についての明確な知見は得られていないのが現状である。つまり、材料特性で規定される破壊確率 P_f の疲労破壊曲線を用いて、版厚設計を行った場合に、累積疲労度が 1.0 となった際、何% の版にひび割れがどの程度生じるかを確定的に定めるのは困難である。そこで、本設計においては既往の設計手法⁷⁾を踏襲し、累積疲労度が 1.0 となった場合に、100% の確率で、コンクリート版に縦横に貫通クラックが 2 本発生するものと仮定した。

ここで、不同沈下が生じる場合について考えると、疲労度設計を実施した結果、図-5 に示したように、ある版



- ・ R : 許容不同沈下を超える範囲
- ・ S_r : R を半径とする円の面積
- ・ S : コンクリート版 1 枚の面積 ($=L \times L$)

図-6 ひびわれ度の算定方法

厚において、累積疲労度が 1.0 となる不同沈下量が求められる。この不同沈下量を許容不同沈下量と呼ぶものとする。すなわち、許容不同沈下量以上の不同沈下量の範囲においては累積疲労度が 1.0 を上回るもので、図-6 に示す範囲にひび割れが発生するものと仮定し、ひびわれ度を定義する。具体的なひびわれ度の算定式を式(7)に示す。

$$\text{ひびわれ度} = \frac{2 \times L \times (S_r / S)}{A} \quad (7)$$

ここで、L : 版の目地間隔 (cm), S_r : 許容不同沈下量を上回る範囲 (m²), S : コンクリート版 1 枚の面積 (m²), A : 検討対象面積 (m²) である。

(2) 設計パフォーマンスカーブ

エプロン部のコンクリート舗装を対象として、疲労度設計手法を用いて経年的なひびわれ度の推移を検討することにより、コンクリート舗装の劣化予測を設計的に評価することが可能である。このひびわれ度に関する経年的な劣化傾向を設計パフォーマンスカーブと呼ぶこととする。各経時曲線は、不同沈下の発生部位、年度、計画交通量により規定されることになる。つまり、土田モデルによる不同沈下シミュレーションにおいて 25×25m を 1 エリアとした各エリアにおける不同沈下量を年度毎に算出し、別途 FEM 解析および疲労度解析より得られた年度毎の許容不同沈下量を上回る範囲に対し、式(7)で規定されるひびわれ度を算出するものである。図-7 に、羽田エプロン PFI プロジェクトにおける事例を示す。疲労度設計手法においては、設計年数の間に、ひびわれ度が C ランクとならないように版厚設計を行うため、同図におけるカーブ B のみが設計年数(25.5 年後)に C ランクとなっている。また、カーブ A のように、早期に劣化するもののその後は緩やかに劣化が進行するパターンと、20 年

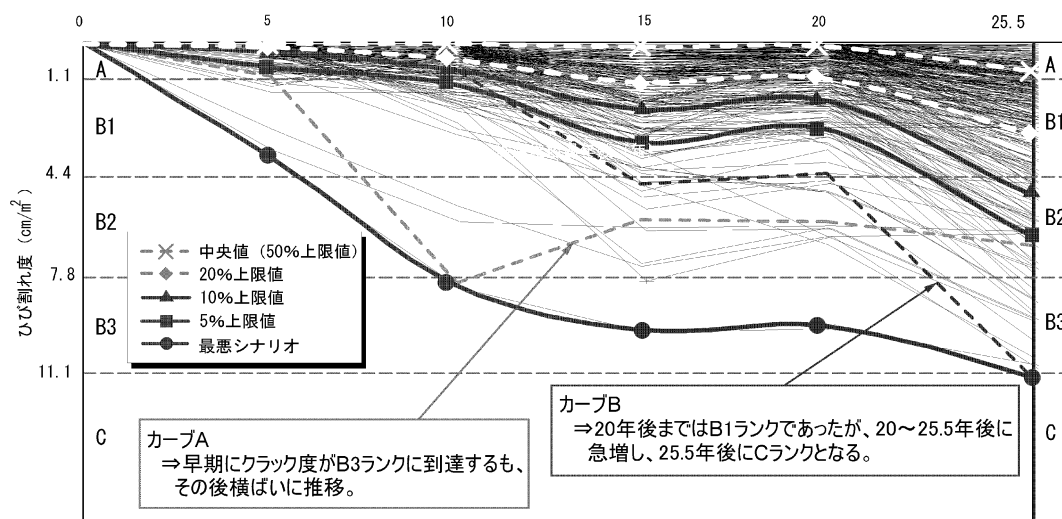


図-7 ひびわれ度の経年変化（設計パフォーマンスカーブ）

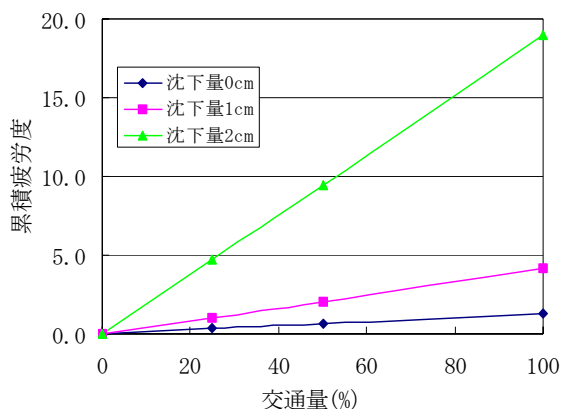


図-8 交通量と累積疲労度との関係

後から急激に劣化が進行するカーブ B のパターンが特異的だが、全体的には経年的に劣化の進行が進んでいく様子がわかる。

図-8 に、不同沈下量をパラメータとした疲労度設計法における交通量と累積疲労度との関係を示す。横軸の交通量は表-4 に示す機材別年間交通量を 50 年間考慮した場合を 100%と定義している。つまり、25.5 年間の設計年数に対しては 51%の交通量に相当している。同図より、交通量と累積疲労度とは線形関係にあるが、交通量の増加に比べ、不同沈下量の増加が累積疲労度へ及ぼす影響が大きいことがわかる。つまり、局所的に不同沈下量の大きなエリアが存在する場合、カーブ A やカーブ B のように、ある年度で急激な累積疲労度の増加を引き起こすこととなる。しかしながら、空港施設のアセットマネジメントをマクロレベルである戦略レベルとしてとらえるとき、個別の推移パターンよりも平均値もしくは 90%信頼上限・下限値等を指標とした方が便利な場合が多い。そこで、平均値について見れば、設計年数 25.5 年後にお

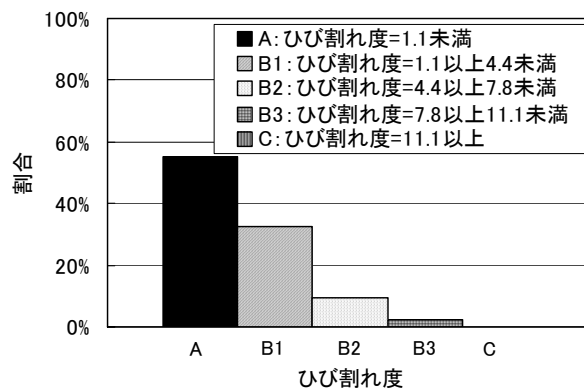


図-9 25.5 年後におけるひびわれ度の分布

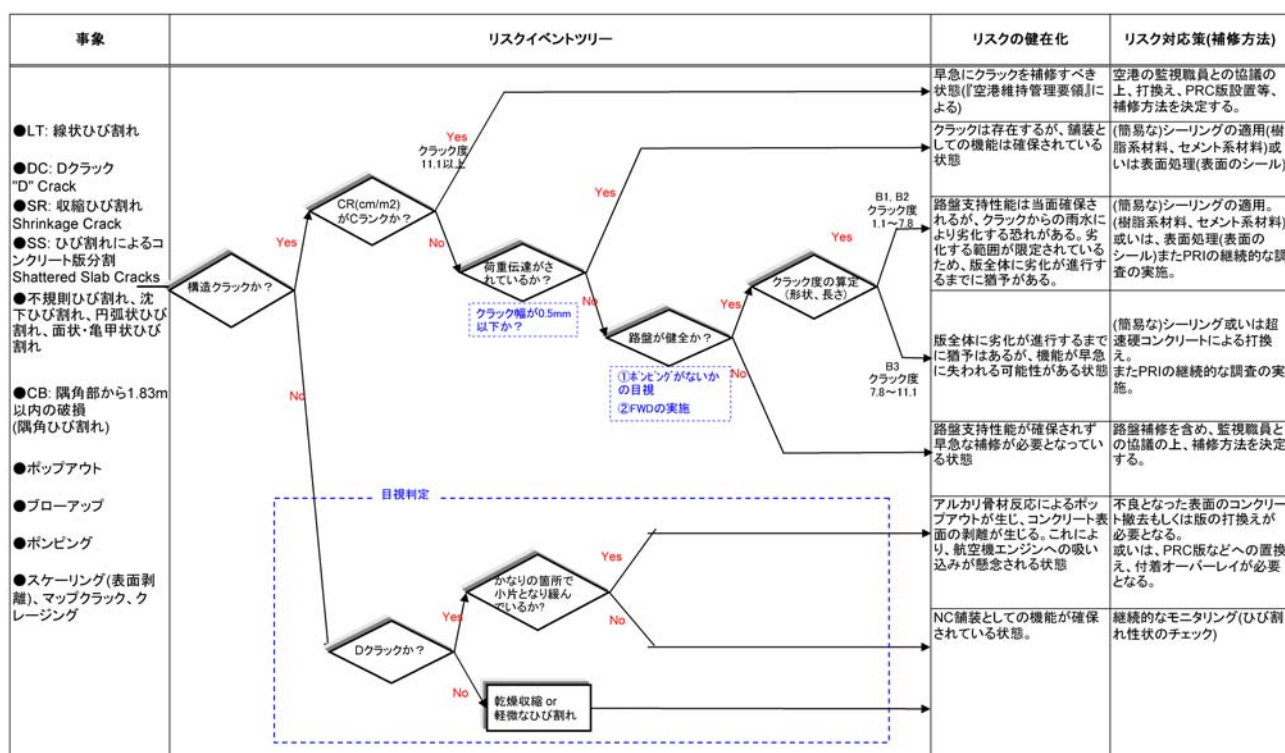
表-6 ひびわれ度レーティング分布の経年変化

ひびわれ度(cm/m ²)	累積年度(年)					
	0	5	10	15	20	25.5
A(1.1未満)	100.0%	98.2%	92.1%	75.0%	80.0%	55.0%
B1(1.1以上4.4未満)	0.0%	1.8%	7.2%	22.4%	17.3%	32.7%
B2(4.4以上7.0未満)	0.0%	0.0%	0.4%	2.2%	2.6%	9.6%
B3(7.0以上11.1未満)	0.0%	0.0%	0.4%	0.4%	0.2%	2.6%
C(11.1以上)	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.2%

いて全体の 50%にあたるコンクリート舗装版の健全度は A ランクに位置しており、5%上限値（90%信頼上限値）においても B ランクの中程度であることがわかる。この設計パフォーマンスカーブにより、経年的なひびわれ度の傾向を設計的に予測することができ維持補修戦略を組み立てる手段として利用することが可能である。

(3) ひびわれ度に関する考察

表-6 に、ひびわれ度のレーティング分布を 5 年毎に整理した。また、図-9 は、25.5 年目におけるひびわれ度のレーティング分布を示している。ここで、ひびわれ度については、より詳細に推移現象を捉えるために、B ラン



[用語解説]

- 1) LT: Longitudinal & Transverse Cracking (線状ひび割れ): 重交通荷重の繰り返し、路盤の支持力の低下、温度や湿度の変化による応力の組み合わせにより引き起こされるひび割れのこと。
- 2) DC: "D" Cracking(Dクラック): 三日月形の緊結した無数のヘアクラックによるもので、横もしくは縦目地や、コンクリート表面に現れるひび割れのことをいう。
- 3) ポップアウト: 凍結融解作用、膨張性の骨材及び耐久性のない物質によってコンクリートの小片が表面から剥がれる事象。
- 4) ブローアップ: 寒い時期に非圧縮性の物質が目地やひび割れに入り、暑い時期になって高い圧縮力が働いた場合、コンクリート版の局部的なせり上りや破壊が目地及びひび割れで発生する事象。

図-10 維持管理リスクツリーの例

クを均等に3等分し、B1、B2、B3のレーティングを設定し評価している。表-6より、10年後におけるレーティング分布は90%以上がAランクであり、20年後まで徐々に減少し、25.5年後に55%まで低下することがわかる。ただし、25.5年後においてもB3ランク以下の占める割合は、全体の5%以下であり、Cランク予備軍として重点的に管理する戦略等に利用できる。

4. 維持管理リスクツリー

(1) イベントツリー・フォールトツリー手法

前節までに、疲労度設計法にもとづいた劣化予測手法を用いてマクロレベルにおける維持管理手法について説明したが、ミクロレベルにおける戦術レベルとして図-10に示す維持管理リスクツリー手法を提案する。一般的に、イベントツリーは起因事象を出発点としてどのような事象推移により最終状態に至るかを時系列的に解析していく論理構造図であり、一方、フォールトツリーは、対象とするシステムとその故障との関連をイベントツリーとの対応に基づき明確にし、原因を順次摘出する手法である⁸⁾。

図-10は、空港コンクリート舗装のひび割れ発生事象を対象に、イベントツリーおよびフォールトツリーの手法

を用いて順次原因を特定し、劣化事象のリスクの顕在化および対策としての補修方法を特定するツリーである。実際に運用が開始され、空港コンクリート舗装にひび割れ等の劣化現象が発生した場合、すべての劣化事象が構造的な要因に起因しているとは考えられない。すなわち、ひびわれ事象について考察した場合についても様々な原因が考えられるのである。そこで、維持管理リスクツリー手法を用いることによって、個々のひび割れ等の劣化事象に対し、原因の特定を行い、補修箇所の特定制および要否を判断することができる。

5. まとめ

本研究では、空港コンクリート舗装のアセットマネジメントを適用することを目的に、疲労度設計手法を用いた劣化予測手法をマクロ的な維持管理戦略へ利用する方法を検討した。また、個々の劣化事象に対し、戦術レベルでの維持管理手法としてイベントツリー・フォールトツリー手法を用いた維持管理リスクツリーを提案した。

本研究で得られた主な知見をまとめると次のとおりである。

- (a) 不同沈下の影響を考慮してコンクリート舗装の応力解析を行うための平板FEMを開発した

- (b) マイナー則を用いた疲労度設計手法および不同沈下予測を組合せ、空港 NC コンクリート舗装の劣化予測を実施した。劣化予測では空港コンクリート舗装のひびわれ度を指標とし、その経時変化および分布を推定した
- (c) 不同沈下を考慮した疲労度設計手法においては交通量に比べ不同沈下量が累積疲労度へ及ぼす影響が大きいことが分かった。このため、局所的に不同沈下量が大きくなるエリアが存在する場合、急激なひびわれ度の増加現象が生じることがある。また、ひびわれ度を中心としたパフォーマンスカーブを求める方法を提案した
- (d) ひびわれ度の平均値もしくは 90% 上下限信頼値を用いることでマクロレベルの維持管理戦略を合理的に検討する手法を提案した
- (e) マクロレベルとして上記疲労度設計法を維持管理戦略に利用するとともに、ミクロレベルとしてイベントツリー・フォールトツリー手法を用いた維持管理リスクツリーを導入し、劣化事象の原因特定および補修の要否・方法等を判断する手法を提案した

参考文献

- 1) 福手 勤：社会資本のアセットマネジメントの実用化に向けた取り組みと課題，港湾空港技術振興会，第 17 回特別講演会 講演録，2005.
- 2) 坪川将丈，水上純一，江崎 徹，八谷好高：空港コンクリート舗装の温度応力に関する研究，国土技術政策総合研究所資料，No.341，2006.
- 3) 土田 孝，小野憲司：数値シミュレーションによる不同沈下の予測とその空港舗装設計への適用，港湾技術研究所報告，第 27 巻，第 4 号，pp123-200，1988.
- 4) 西澤辰男，蛭川 明，福田 正：FEM 解析に基づくコンクリート舗装版横目地のそり応力式，土木学会論文集，No.532/V-30，pp.89-96，1996.
- 5) 社団法人 日本道路協会：舗装設計施工指針（平成 18 年版），2006.
- 6) 小梁川雅，野田悦郎，伊藤正秀：供用履歴を受けたコンクリート舗装の疲労特性に関する研究，土木学会舗装工学論文集，第 9 巻，pp.149-156，2004.
- 7) 八谷好高：空港コンクリート舗装のマネジメントシステムに関する研究，港湾技研資料，No.698，1991.
- 8) 高田洋祐：PSA（確率論的安全性評価）の一般産業への展開，日本原子力学会 関東・甲越支部若手研究者研究発表討論会，2002

A STUDY ON AIRFIELD PAVEMENT MANAGEMENT METHODOLOGY BASED ON FATIGUE ANALYSIS

Taizo SHIMOMURA, Tatsuo NISHIZAWA, Kiyoto YOSHINAGA
and Tomohisa FUKUOKA

In this research, a pavement management methodology based on fatigue analysis was discussed. The feature points of this research are as follows. 1) The fatigue analysis of pavement design takes into consideration of ground unequal settlement. 2) The concrete pavement is designed by fatigue analysis in consideration of material fatigue reliability. 3) Aging analysis of crack index, which is derived from fatigue analysis, helps to make a strategy of pavement maintenance. 4) As for tactics for maintenance methodology of individual pavement, maintenance risk tree, which is developed by event and fault tree analysis, is useful in assessing deterioration.