

国際線エプロンにおける舗装設計の考え方
 ~ 不同沈下を考慮した疲労度設計手法の適用 ~

国際線エプロン JV 下村泰造

キーワード：疲労度設計手法，破壊確率，モンテカルロシミュレーション

1. まえがき

国際線エプロン舗装は，設計供用期間として 50 年間にわたり空港の使用性・安全性を確保することが求められている。この要求性能を満たすように構造物としての耐久性，供用中の勾配変化や補修の容易性，大規模補修計画と維持管理方針を検討し，無筋（NC）コンクリート舗装を採用している。本文は特にエプロン舗装に関する耐久性を照査する疲労度設計手法の適用についてまとめたものである。

2. 舗装種別の選定

2-1 基本方針

エプロン部における舗装種別・構造形式は，国内空港舗装で実績があり安全性が確認されている舗装種別・構造形式の中から要求性能を満足するように，勾配修正の容易性・確実性とコストを考慮して選定した。なお，ここでいう舗装種別とは剛性舗装（コンクリート舗装）とたわみ性舗装（アスファルト舗装）の分類を指し，構造形式とは各舗装種別を細分化した分類，例えばコンクリート舗装であればNC（無筋コンクリート）舗装やPC（プレストレストコンクリート）舗装を指す。

2-2 舗装構造の特徴

エプロン部は，スポット部と誘導経路部に分類される。スポット部は特に高い耐流動性が要求されると共に耐油性も必要であることから，コンクリート舗装を適用する。次に誘導経路部は，スポット部ほどは停止荷重が作用しないものの，プッシュバック時および離陸待ち時に航空機が一定時間停止することや通常の誘導路と比べて走行速度は明らかに遅く，高い耐流動性が必要となる。そこで，スポット部と同様にコンクリート舗装を適用する。エプロンに適用実績のあるコンクリート舗装構造形式としては，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），CRC（連続鉄筋コンクリート）舗装がある。ここで，プレキャスト版（PPC）舗装は実績こそあるものの，原地盤上の新設工事ではコスト・施工性から使用されることはないので除外している。

構造形式を選定するに当たって特に留意すべき点は，「構造の安定性」と「勾配修正の容易性・確実性」にあると考え，1)舗装表面の勾配が使用性を満足すること，2)不同沈下により路盤とコンクリート版との間に生じる空隙によって通常よりも大きな曲げ応力がコンクリート版に発生し版が破壊する恐れがあることに特に留意した。以上の観点から，NC舗装，CRC舗装，PC舗装の特徴を分類し表-1に示す。

表-1 コンクリート舗装構造形式の特徴

構造形式	構造の安定性確保	勾配修正の容易性・確実性	初期コスト
NC舗装	版の増厚により対応するが，施工上問題となる厚さ 50cm 以下にする必要がある	<ul style="list-style-type: none"> ・応急処理として半たわみ性材料によるオーバーレイが考えられるが，恒久的にはコンクリートによるオーバーレイや打ち換えが必要となる ・付着オーバーレイは現時点で実用段階ではない ・オーバーレイや打ち換えには一定期間のクローズが必要となる 	1.00 ()
CRC舗装	収縮クラックにより長手方向の追随性はNC舗装より優れるが，横方向はNC舗装と同じであり，版厚に大きな違いはない	<ul style="list-style-type: none"> ・成田空港では完全付着オーバーレイ工法が開発され，実用されている ・一定期間のクローズが必要となる 	1.05 ()
PC舗装	プレストレス力により対応する	<ul style="list-style-type: none"> ・リフトアップ工法が確立されており，羽田空港・関西空港エプロンで実績がある ・グラウト材料の工夫によりリフトアップコストを低減できる可能性はある 	1.70 ()

2-3 舗装種別の選定

表-1の観点から3種類のコンクリート舗装を集合体として分類したものが図-1である。中心に向かうほど要求性能を満たしていることを表している。また図中点線でしめす矢印は各舗装構造の問題点がどこに位置しているのかを示したものである。NC舗装とCRC舗装とは勾配修正のためには一定期間のクローズが必要である。初期コスト面からNC舗装が有利である。なお、成田空港CRC舗装は複合平板理論による版厚設計により版厚がNC版厚よりも薄い。羽田空港では不同沈下の発生により複合平板モデルを適用できないと考えられる。NC版とCRC版の厚さの相違は、後者が収縮クラックによる不同沈下への追従性を考慮できることによるものであるが、これは計算の結果わずかな量であり、両構造形式の版厚はほとんど同じである。一方、PC舗装は、構造安定性および勾配修正の容易性に優れているが、初期コストの面からは不利となる。そこで、構造形式はPC舗装とNC舗装の比較検討により選定する。

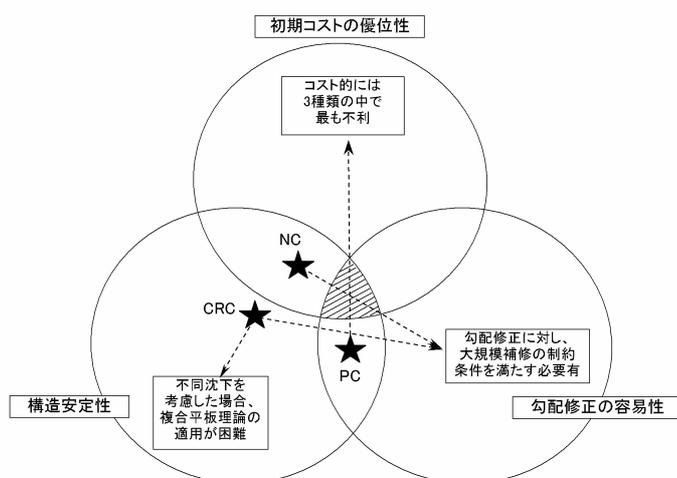


図-1 舗装種別判定集合図

エプロン地区を対象とした不同沈下シミュレーションの結果、設計供用期間内において、不同沈下により勾配が使用限界を超過し、補修が必要となるエリアがあることがわかった。したがって、勾配修正のための補修が必要となり、NC舗装を適用した場合、該当エリアを一定期間クローズにする必要がある。この補修工事の内容が要求水準書の大規模補修工事に制約条件を満足出来ない場合には、PC舗装を適用する必要がある。

このような考え方で不同沈下シミュレーションの結果を用いて、要勾配修正範囲、時期を推定して、NC舗装の適用可否を検討した結果、一部軽量盛土工法を適用することにより、大規模補修工事の制約条件を満たした。また、PC舗装との比較によりコスト的に有利であることがわかったことからエプロン部においては全域NC舗装を適用することとした。

3. 不同沈下を考慮した疲労度設計手法

3-1 設計フロー

今回適用したエプロン舗装の設計手法は、羽田 期の設計の考え方を踏まえ、さらに「舗装設計便覧」に示される理論的設計方法を参照した疲労度設計手法である。そこで、図-2に示す設計フローに従い版厚の設定を行った。基本的な検討手順は、以下の通りである。

- 基本条件の検討 (F E M解析および疲労解析条件の検討・設定)
- F E M解析・疲労解析による版厚と許容不同沈下量の関係を算定
- クラック度解析により対象施設における不同沈下量を算定
- 版厚算定と照査

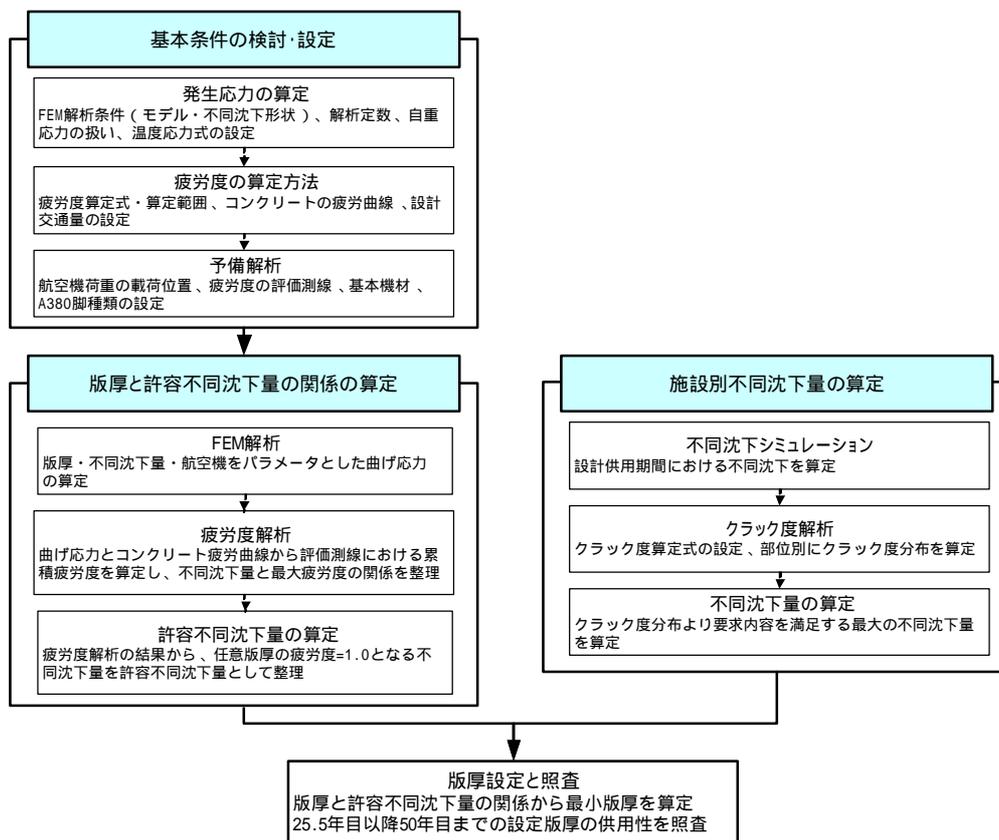


図 2 疲労度設計手法 設計フロー

3.2 不同沈下シミュレーション

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¹⁾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、土田モデルを使用し圧密沈下に関するシミュレーションを行った。表 2 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、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。

表 2 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

3.3 応力算定モデル

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 FEM²⁾を使用して、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温度応力を加算する手法とした。ここで、自重応力の算定においては、羽田・期の設計の考え方を踏襲し、コンクリートのクリープによる影響を考慮して自重応力を 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 30m とした 3 次曲線で不同沈下曲線をモデル化し、2 次元 FEM 解析により応力を算定した。図 3 に、疲労度設計モデルを示す。

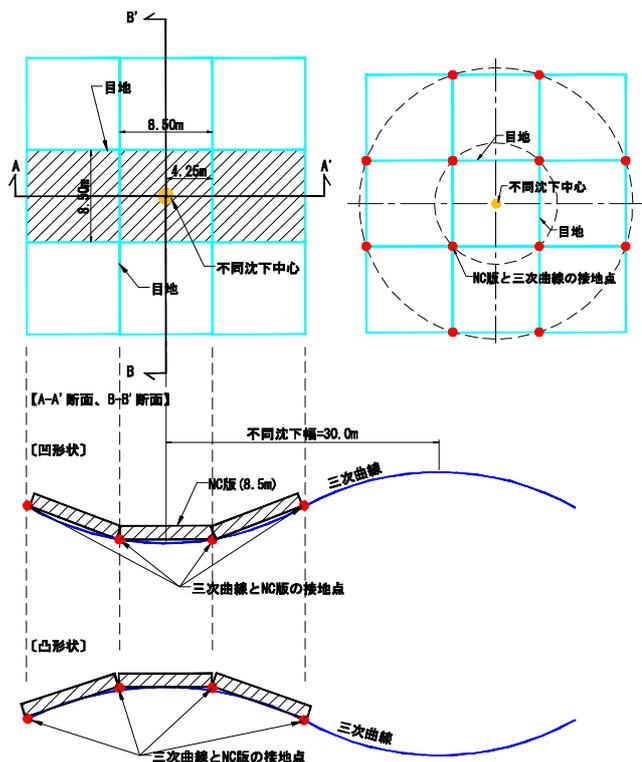


図 3 解析モデル（解析モデルと不同沈下形状の模式図）

本研究においては、1枚が $8.5 \times 8.5\text{m}$ の連続する9枚のNC舗装版下に不同沈下が発生し、版の目地位置を支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。また、各舗装版は目地部における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、目地部の性能が健全とされる荷重伝達率85%以上が確保されることを確認している。

3.4 疲労度解析

3.4.1 疲労度設計手法による信頼性設計

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。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、コンクリートの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³⁾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。このため、空港コンクリート舗装にはより高い信頼性を確保することが望まれる。そこで、式4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設定した。

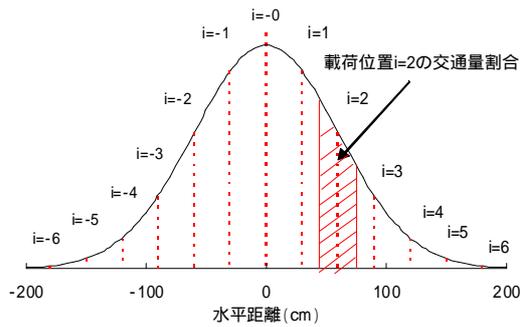


図 4 航空機の横断方向走行分布

$$N_i = 10^{((a-SL)/b)}$$

$$a = 1.11364 + 0.00165 \times P_f \quad (1)$$

$$b = 0.09722 - 0.00021 \times P_f$$

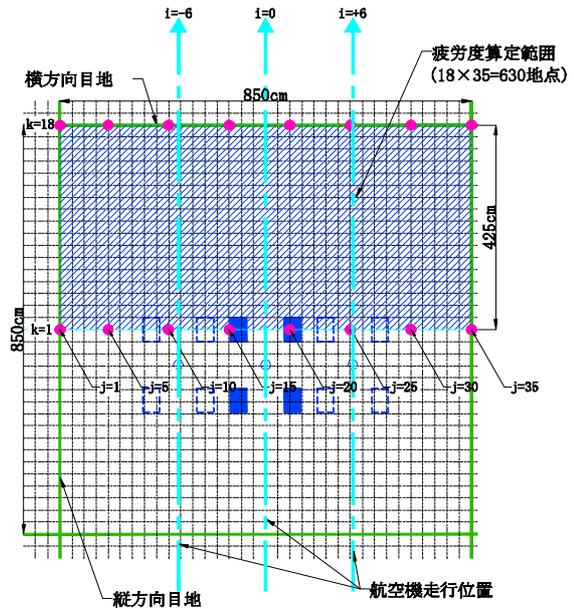


図 5 解析モデルにおける疲労度算定模式図

ここに、 SL ：応力レベル(合成応力 / 設計基準曲げ強度)， N_i ：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 t 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 のときの j 点での温度応力である。

また、式 2 中の脚載荷位置については、式 3 および図 4 で表される航空機の横断方向の走行分布を考慮した。

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

ここに、 $n_{air}(t)$ ：上下面 t 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 を解析モデル上で模式的に表したものが図 5 である。図 5 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が、図 4 に従い $i = -6 \sim 6$ の範囲で航空機荷重位置を移動させた場合に、図中の j 点における応力から疲労度を算出する模式図を示している。

3.4.2 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。

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

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($^\circ\text{C}$)である。

3.4.3 疲労度解析検討結果

図 6 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、疲労度設計においては、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設定した。図 6 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。

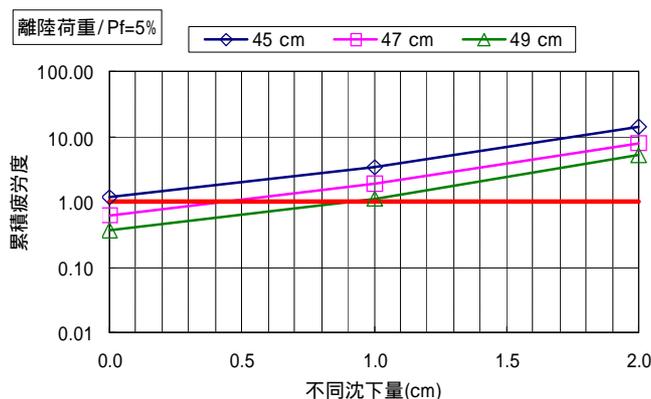


図 6 版厚と不同沈下量との関係

3.4.4 版厚算定方法

今回設計法においても版に発生するクラックを許容する設計手法とし、大規模補修に関する要求水準を満たすように決定する方針とした。以上を踏まえ、まずクラック度の算出方法について述べた後に、エプロン舗装性状に関する要求水準および検討結果を示す。

(1) クラック度の算定方法

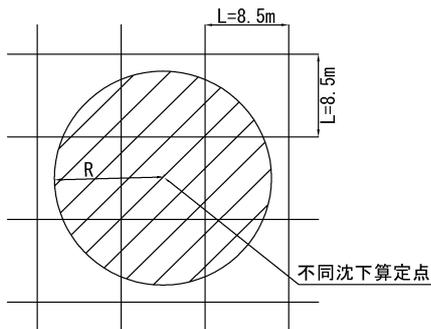
クラック度は式 5 より算定した。

$$\text{クラック度}(\text{cm}/\text{m}^2) = \frac{1 \text{ ユニットのクラック長}(\text{cm})}{\text{単位ユニットの面積}(\text{m}^2)} \quad (5)$$

ここに、羽田 1 期 の設計の考え方を踏襲し単位ユニットは不同沈下シミュレーションより 25m×25m で設定し、また、クラックは曲率半径が版の許容曲率半径より小さい範囲において縦および横方向に 1 本ずつ入ると考えた⁴⁾。具体的には、図 7 に示す模式図の円内の面積に相当する 8.5m×8.5m 版の個数を算定し、一枚当たりのクラック長(8.5×2=17m)を乗じることにより、1 ユニット当たりのクラック長を算定した。なお、曲率半径の算定式は図 8 に示すように極値が 1 点および 2 点の場合で区別している。具体的なひびわれ度の算定式を式 6 に示す。

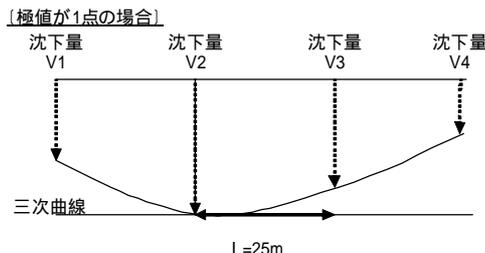
$$\text{クラック度} = \frac{2 \times L \times (S_r / S)}{A} \quad (6)$$

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(m^2)、S: コンクリート版 1 枚の面積(m^2)、A: 検討対象面積(m^2)である。



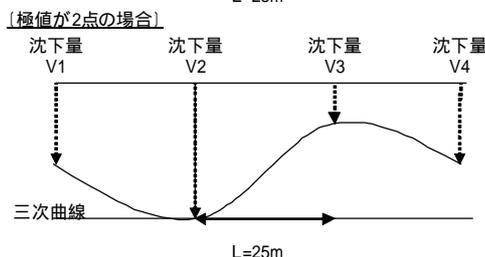
- ・ R : 許容不同沈下を超える範囲
- ・ S_r : Rを半径とする円の面積
- ・ S : コンクリート版1枚の面積 (=L×L)

図 7 クラック度算定方法



V2で凹部 (一般式)

$$\text{曲率半径 } R = \frac{L \times L}{(2V2 - V3 - V1)}$$



V2で凹部 (V3で凸の場合)

$$\text{曲率半径 } R = \frac{L \times L}{6(V2 - V3)}$$

図 8 曲率半径算定方法

(2) コンクリート舗装性状に関する要求水準

要求水準書に規定される要求項目は以下のとおりである。

事業終了時の P R I が A または B ランク以上

1回の工事規模は、3,000~5,000m²とする

エプロンにおいて、1回の工事で閉鎖可能なスポット数は1スポットとする

エプロンにおいて、1回の工事で閉鎖可能な期間は最大4ヶ月とする

以上の観点から、維持管理期間25.5年後において、ひびわれ度がCランクとなるエリアが1スポットとなるように版厚設定を行う方針とした。

3.4.5 版厚算定結果

不同沈下シミュレーション結果および疲労度解析結果より、南側エプロン部におけるコンクリート舗装版厚を検討した。図9および図10に版厚が46cmおよび47cmの場合における維持管理期間25.5年後のひびわれ度分布を示す。

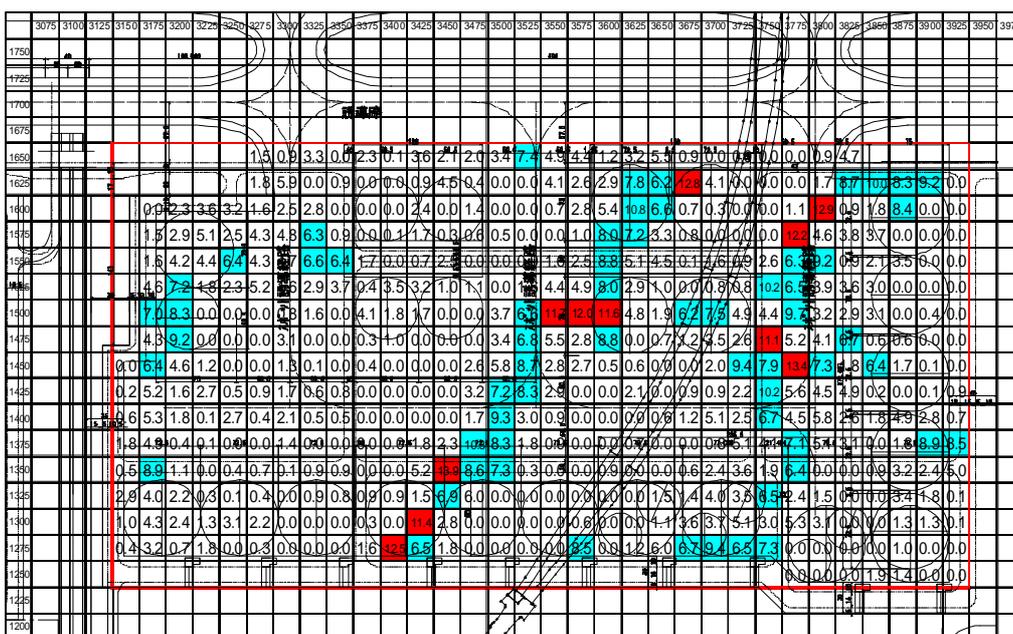


図 9 ひびわれ度分布 (南側エプロン, 版厚 46cm の場合)

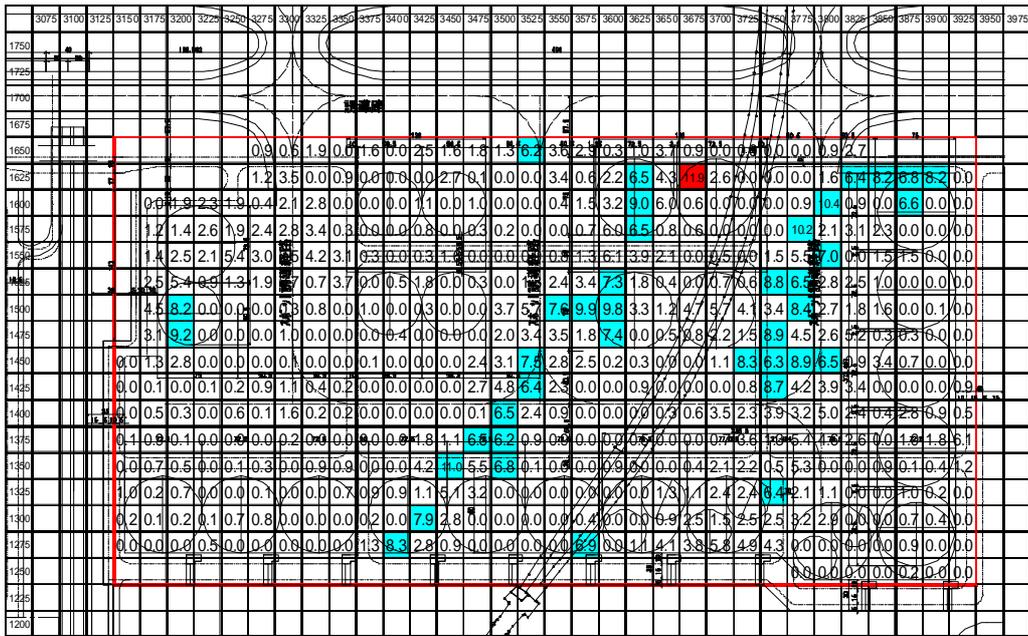


図-10 ひびわれ度分布（南側エプロン，版厚47cmの場合）

図-9および図-10より，版厚46cmの場合は，維持管理期間25.5年後において，ひびわれ度がCとなるエリアが南側エプロンにおいて11箇所となり，要求水準を満たすことができない．これに対し，版厚47cmの場合，維持管理期間25.5年後において，ひびわれ度がCランクとなるエリアは，1エリアのみ（確率論的には1/503エリア）である．つまり，維持管理期間25.5年後においてはじめてひびわれ度がCランクとなるエリアが1エリア存在することを示しており，要求水準で求められる性能を有していることがわかる．以上より，エプロンコンクリート舗装の版厚を47cmと設定した．

4. 羽田 ・ 期の設計の考え方との関連性

今回の設計手法は，羽田 ・ 期の設計の考え方（以下， ・ 期設計法と称す）を踏まえ，さらに「舗装設計便覧」に示される理論的設計方法を参照した疲労度設計手法であるが，詳細設計段階において， ・ 期設計法と十分に関連性が保たれていることを確認している．本節においては，南側エプロンを対象とし，得られた不同沈下シミュレーション結果を用いて ・ 期設計法を適用した場合にコンクリート舗装版厚がどのように決定されるかを考察し，今回の設計手法と比較する．また，最後に今回設計手法の相違点をまとめるとともに関連性を検討した．

4.1 羽田 ・ 期の設計の考え方検討フロー

空港舗装構造設計要領による設計手法においては，地盤の不同沈下が考慮されていない．もし地盤の不同沈下が生じた場合，路盤とコンクリート版下面との間に空隙が生じ，航空機荷重荷時にコンクリート版に大きな曲げ応力が発生することになる．こうした問題点を解決するために， ・ 期設計法においては空港舗装のライフサイクルに着目し，部分的なクラックなどの発生は許容し，供用開始10年間において版の構造破壊に起因する補修が不要な断面を標準構造とすることを基本概念としている．図-11に ・ 期設計法の検討フロー図を示す．

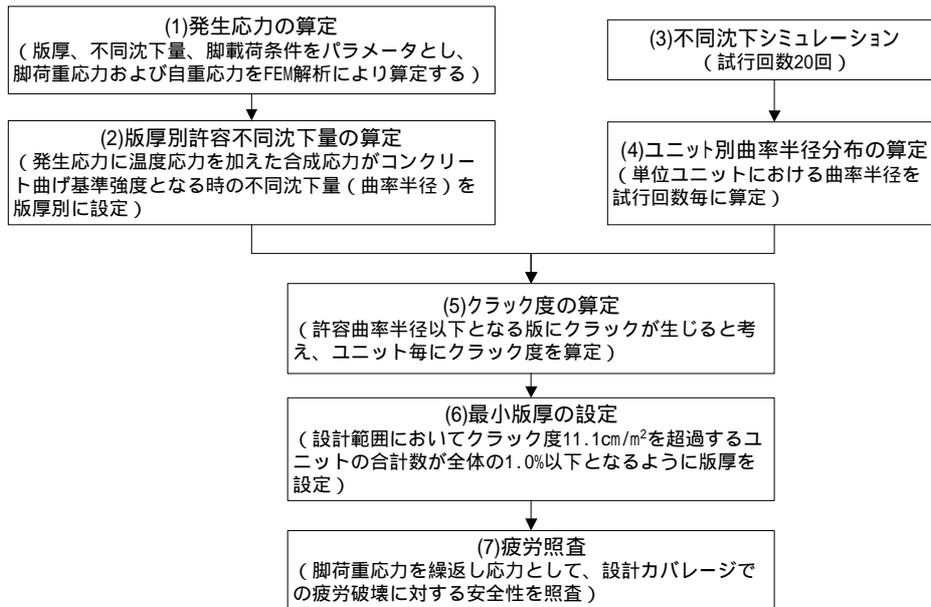


図 -11 ・ 期設計法による検討フロー

4 2 ・ 期設計法における疲労照査

図 -11 に示したように、期設計法においては部分的なクラックなどの発生は許容し、供用開始 10 年間に於いて版の構造破壊に起因する補修が不要な断面を決定するために、設計範囲におけるクラック度が $11.1\text{cm}/\text{m}^2$ を超過するユニット数が全体の 1.0% 以下となるように版厚を設定している。その後、疲労照査を行うこととなるが、疲労照査に関しては図 -12 に示すフローに従い実施する。

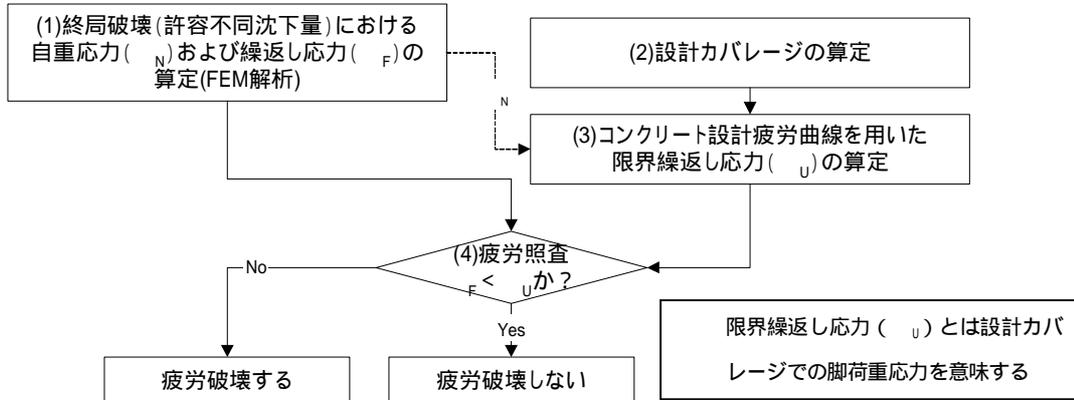


図 -12 ・ 期設計法における疲労照査フロー

つまり、終局破壊における繰返し応力 σ_F が限界繰返し応力 σ_U よりも小さければ、終局破壊により版が破壊し疲労破壊しないことを確認している。

4 3 ・ 期設計法と今回設計手法との比較

表 3 に今回の国際線エプロン地区のコンクリート舗装について、期設計法、今回設計法および設計要領を用いて版厚設計を行った結果を示す。

表 3 設計版厚の結果

設計供用期間	10 年		
検討項目	期設計法	今回設計手法	設計要領
国際線地区エプロン	43cm	44cm	45cm

本設計法の版厚は南側エプロンを代表として記載した

今回設計手法と 〃 期設計法を比較した場合、設計年数 10 年ではほぼ同等の設計版厚となり、 〃 期設計法で 43cm、今回設計手法で 44cm という結果となっている。この 2 手法はひび割れを許容した設計手法であるが、全くひび割れを許容しなかった場合、設計要領によると版厚は 45cm となる。しかしながら、設計要領の考え方に踏襲して設定した版厚はコンクリート安全率を外挿により算定して求めたものであり、版厚の性能は保証されていないことに留意する必要がある。また、表 4 に設計法の対比についてまとめた。

表 4 設計法の対比

項目		〃 期設計法	本設計手法
基本概念		従来の許容応力度設計法ではなく、NC 版に使用限界を超過しない範囲でのクラックを許容する。	不同沈下による応力増加分を考慮した疲労設計法を採用
応力算定方法	脚荷重応力	設計対象機種を B747 とし、不同沈下（空隙）発生時の曲げ応力を FEM 解析により算定	設計対象機種は全就航機材とし、不同沈下（空隙）発生時の曲げ応力を FEM 解析により算定
	温度応力	版上下面の温度差 15 に相当する岩間の縁部応力式より算定	コンクリート上下面温度差とその頻度分布を考慮し、航空機載荷時の温度応力を個別に算定する。応力式は岩間の中央応力式を用いる
疲労照査方法		設計された版厚に対して、繰返し応力を脚荷重応力として疲労照査。繰返し回数は最大 4 万回	マイナー則に基づき、全就航機材・交通量による疲労度を累積
コンクリートの疲労曲線		コンクリート標準示方書をベースにして永続荷重分を補正	舗装設計施工指針の 40% 確率の疲労曲線を採用
版厚評価方法		合成応力（脚荷重 + 温度 + 自重）がコンクリート曲げ強度を超過した時にクラックが生じるとして、そのクラック率が PRI の C ランク（11.1cm/m ² ）を超過するユニットが設計範囲の 1% を超えないこと	疲労度が 1.0 を超過した範囲の版は 100% クラックが生じると仮定して、クラック率が PRI の C ランク（11.1cm/m ² ）を超過しないようには版厚を設定

5. あとがき

本文では、羽田エプロン P F I プロジェクトにおける基本施設の一つであるエプロンのコンクリート舗装に関する信頼性設計手法についてその概要を述べた。今回の設計手法は、不同沈下を考慮した 〃 期設計法との関連性を十分に考慮し、維持管理期間 25.5 年間にわたる疲労耐久性を設計的に規定しようとするものである。疲労度設計手法を用いた信頼性設計については、破壊確率の問題等今後確認すべき問題点もある。モニタリングを実施することにより、関係各位のご指導、ご協力を頂き、疲労度設計による結果を十分に維持管理へ反映できるよう努力していきたいと考えている。

（参考文献）

- 1) 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.
- 2) 西澤辰男, 松野三朗: コンクリート舗装の構造解析における有限要素法の適用性について, 土木学会論文報告集 第 338 号, pp.207-215, 1983.
- 3) 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.
- 4) 東京国際空港沖合展開事業技術総録 (財)沿岸開発技術研究センター pp9-35, 2000.