

不同沈下を考慮した空港エプロン コンクリート舗装の維持管理計画

加藤 隆¹・下村 泰造²

¹正会員 工修 大成建設株式会社 土木設計部設計計画室 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1)

E-mail:t-katoh@ce.taisei.co.jp

²正会員 工博 大成建設株式会社 土木設計部設計計画室 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1)

E-mail:taizo@ce.taisei.co.jp

東京国際空港国際線地区においては、PFI(Private Finance Initiative)手法を用いてエプロン等の施設を整備し、供用後25.5年間に渡って維持管理する事業が進められている。本事業では、大規模補修工事を含めた維持管理コストを考慮したエプロンコンクリート舗装形式の決定を行っており、大規模補修の容易性から無筋コンクリート(NC)舗装を選定している。

維持管理計画においては、圧密沈下に対する土質定数のばらつきの影響を考慮した不同沈下シミュレーション結果に基づき、勾配の逸脱範囲の特定及び、勾配の逸脱リスクを検討している。

勾配逸脱箇所においては、空港の機能保持の要求事項から、スポット閉鎖してNC舗装版打換えもしくは付着オーバーレイにより対応する箇所と、スポットが閉鎖できず、即日復旧が要求される箇所においてはプレキャスト鉄筋コンクリート(PRC)舗装を採用する計画である。

Key Words : concrete pavement, differential ground settlement, maintenance, PRC pavement

1. はじめに

東京国際空港国際線地区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ほか、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。

一方、我が国では狭隘な国土事情から、人工島や埋立て地に空港が建設される場合が少なくない。このような臨海および海上空港では、地盤沈下の進行により、空港舗装の勾配に関する性能規定が満足されない場合、コンクリート舗装の大規模補修が必要となる。このため、空港舗装のアセットマネジメント戦略を決定する上で、将来発生する地盤沈下から経年毎の舗装勾配を予測することは重要な課題となる。

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、当事業においては施設を閉鎖して大規模補修を実施する範囲および期間が限定されている。

本プロジェクトは、設計、施工のみならず、維持管理までを一括で実施するため、計画・設計段階から、将来における維持管理期間に渡るLCCを考慮し、舗装種別の選定を行うとともに、維持管理期間25.5年間に渡る大規模補修の必要性について検討することが必要であった。しかしながら、過去に地盤沈下が顕著に発生する状況において、50年もの長期にわたっての舗装の使用性を照査した事例は無く、今までの最新の知見を取り入れた舗装の性能設計や、舗装の劣化予測等の手法を確立させる必要があった。

2. 空港エプロン舗装維持管理計画の背景

著者らはまず、既往の空港エプロン舗装の設計年数を調査し、その設計思想の背景を明らかにすることから開始した。空港エプロン舗装の参照基準である空港舗装構

造設計要領¹⁾によれば設計年数は、将来の交通量を推定する対象期間として位置づけられており、10年を標準としている。また、10年以外の設計年数を設定する際は供用後のライフサイクルコストの検討を行う方針としており、中部国際空港においては、20年という設計年数を設定した事例がある。近年の土木構造物の耐用年数に関して言えば、100年というスパンを考慮している事例も多いが、空港エプロン舗装の設計年数を念頭に置いたとき、将来交通量の需要予測の難しさとそれに合致するライフサイクルコストを考慮することが重要であると考えた。本プロジェクトにおいては、設計供用期間50年が要求事項として与えられているが、設計供用期間をそのまま将来の交通量を推定する対象期間として位置づけられている設計年数として定義することは、上記の視点から困難であると判断した。

そこで、設計供用期間50年の内、PFI事業としての維持管理期間である25.5年を設計耐用年数と新たに定義し、設計上構造安定性を確保できる期間とした。つまり、設計耐用年数25.5年においては、空港舗装補修要領(案)²⁾に規定されている「できるだけ早急に補修の必要がある」ひび割れ(11.1cm/m²)が生じないようにコンクリート舗装版厚を設定した。その後、設計供用期間50年に渡っては、同様にコンクリート舗装版の疲労耐久性を照査し、適切な維持管理を実施することで、エプロンコンクリート舗装の健全性を確保できることを確認している。

エプロン舗装の維持管理について言えば、本プロジェクトのような沿岸部に建設される空港では、とりわけ、地盤の不同沈下によるエプロン舗装の勾配補正およびクラックの発生による大規模な補修計画を適切に評価できるかが維持管理上重要であり、コストインパクトも大きい。しかしながら、供用後の大規模補修についても、計画・設計段階において補修範囲や規模を推定した事例はほとんど無く、大規模補修工事が必要な箇所の予測手法の確立が求められた。さらに、大規模補修工事が必要と判断される箇所においては、発注者からの要求水準(業務要求水準書)により、大規模補修工事の制限(1回の工事規模、期間、工事中に閉鎖可能な駐機スポット数)が設けられており、施設の閉鎖の可否を検討し、施設閉鎖が不可能な箇所については、即日復旧により施工可能な工法(PRC舗装版)の採用等を検討する必要があった。以上の観点から、著者らは、従来の空港舗装設計手法のみでは、上記要求事項を実現させるのは困難であり、本プロジェクトの実施に当たっては、コンクリート舗装の性能設計手法や維持管理における劣化予測、大規模補修技術など、空港舗装設計における最新の知見を積極的に取り入れることが必要であると考え、不同沈下に起因する、1) エプロン舗装の構造的損傷、2) エプロン舗装勾配の

経年変化の予測手法を確立し、プロジェクトに反映しなければならなかった。なお、上記の内、不同沈下に起因するエプロン舗装の構造的損傷に関する劣化予測手法については、下村らが力学的劣化予測と統計的劣化予測を融合したハイブリッド劣化予測手法を確立しており、詳細については文献3)、4)を参照されたい。

以下、各章において、エプロン舗装勾配の経年変化の予測手法と維持管理計画について、本プロジェクトで実践した内容の内、1) 舗装種別の選定経緯を説明する。2) モンテカルロシミュレーションを用いた不同沈下解析より、エリア毎のエプロン勾配を算定し、95%上限確率による勾配設定手法を述べ、3) 大規模補修範囲及び年度の特特定とPRC舗装版による補修方法について論じる。

3. 舗装種別の選定経緯^{5), 6)}

エプロン舗装の要求性能として、設計供用期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る。本事業では、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た。以下にエプロン舗装種別・構造形式選定の経緯を示す。

エプロンスポット部の舗装種別は、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した。誘導経路部も、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などから、高い耐流動性が必要となるため、スポット部と同様にコンクリート舗装を適用した。

コンクリート舗装構造形式には、NC(無筋コンクリート)舗装、CRC(連続鉄筋コンクリート)舗装、PC(プレストレストコンクリート)舗装がある。表-1に、NC舗装、CRC舗装、PC舗装について、「構造の安定性」、「勾配修正の容易性・確実性」、「初期コスト」について比較を行った結果を示す。舗装形式選定に当たっては、これらの比較に加えて、大規模補修工事の容易性、確実性についても比較検討した。PC舗装については、リフトアップ工法が確立されており、勾配修正に対して確実に対応が可能であるが、トータルコスト(LCC)の面から、NC舗装もしくは、CRC舗装とした。この背景には、本プロジェクトにおいては、要求事項として、前述した通り大規模補修工事の制限(1回の工事規模、期間、工事中に閉鎖可能な駐機スポット数)が規定されており、あらかじめ地盤沈下シミュレーションを行うことで、沈下範囲を特定し、その範囲を限定できればPC舗装のリフトアップと比較し、大きなコストメリットを期待できるとの考えがあった。そこで、NC舗装、CRC舗装範囲の不同沈下量を軽減するために、造成地盤材料に軽量盛土材料を

表-1 コンクリート舗装構造形式の比較

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 (◎) Δ
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 (○) Δ
PC舗装	プレストレスカにより対応する	<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 (○) Δ

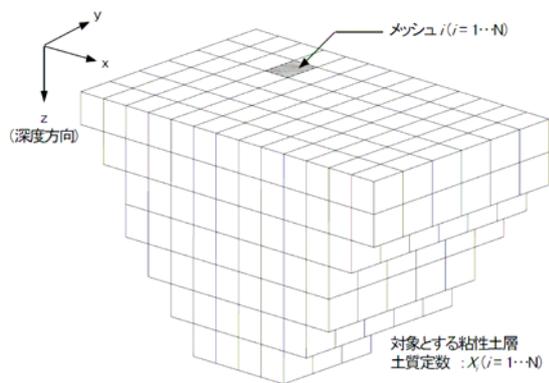


図-1 確率的1次元圧密モデルによる地盤のモデル化

使用するエリアを特定し、疲労耐久性を考慮した舗装版厚算定と軽量盛土エリアを特定した地盤沈下シミュレーションを反復的に検討することで、舗装形式をNC舗装に選定した。NC舗装およびCRC舗装の疲労耐久性については、不同沈下の発生を考慮し、維持管理期間（25.5年間）における疲労耐久性を考慮することにより⁷⁾版厚を設定するが、疲労度設計の結果両者の版厚差に大きな違いが見られず、舗装種別としては、NC舗装を採用することとした。

一方、NC舗装の大規模補修工事範囲における維持管理手法については、打ち換えやオーバーレイ、PRC舗装版による補修等により維持管理が可能である。

4. モンテカルロシミュレーションによる不同沈下予測とエプロン部平面縦横断勾配設計

(1) モンテカルロシミュレーションによる不同沈下予測

当プロジェクトのように軟弱地盤中に建設される空港の舗装においては、不同沈下による影響を設計に盛り込む必要がある。不同沈下の発生原因としては、地盤の層厚や圧密に関する物性値のばらつきや、上乗荷重のばらつき、地盤改良の有無などの要因が挙げられるが、地盤

の圧密定数の物性値のばらつきを適切に表現する手法として、これまで東京国際空港における沈下解析で実績のある土田・小野⁸⁾によるモンテカルロシミュレーションを用いた確率的1次元圧密モデルがある。当プロジェクトにおいては、このモデルを用いて舗装の不同沈下量の予測を行った。本論文においては、不同沈下に伴うエプロン舗装勾配の経年変化を論じるために、不同沈下予測手法を以下に述べるが、詳細は文献3), 8) に譲る。

対象とする空港地盤については、25mピッチの平面メッシュに分割するとともに、各平面メッシュに対して垂直方向にも4m以内にメッシュ分割した3次元地盤モデルを用いる（図-1参照）。3次元地盤モデルより、平面メッシュごとに、地盤沈下量の経年的変化を予測することができる。しかし、地盤条件には多くの不確実性が介在するため、地盤条件をランダムに変化させた1次元圧密沈下モデルを用いて、多数の地盤沈下シナリオを発生させることとする。当プロジェクトにおいては、モンテカルロシミュレーションの試行回数は20回とした。これは、既往の研究⁸⁾において、試行回数を10, 20, 30, 50, 100, 200回と変化させ不同沈下率の期待値を比較した結果、試行回数によって20回以降はあまり変化しないこと、また、本プロジェクトにおいて、試行回数を20回とした場合と50回とした場合について試計算を行った結果、両者にほとんど差異がなかったことに基づいている。このように各メッシュの地盤条件を設定し、モンテカルロシミュレーションの試行を繰返し実施することで、各平面メッシュの経年的な地盤沈下過程や、不同沈下量およびそのばらつきの大きさを予測することができる。

沈下計算においては以下の5つの仮定を設ける。すなわち、1)1次元圧密方程式を用い、圧密沈下は平面メッシュごとに独立に発生する。2)各3次元ブロックごとに載荷重とそれに対する沈下量を算定し、その重ね合わせにより各平面メッシュの沈下量を求める。3)最終沈下量

表-2 確率的1次元圧密モデルに用いる土質定数

圧密係数	c_v	対数正規分布
圧縮指数	C_c	正規分布
圧密降伏応力	p_c	正規分布
初期間隙比	e_0	正規分布

表-3 本プロジェクトで用いた土質定数（一般部）

	C_c		e_0		P_c'		C_v		
	平均値 (kN/m^2)	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	変動係数	平均値 (cm^2/day)	LogCv 標準偏差	
Ac2層上-1	0.45	0.07	1.31	0.18	70	0.35	938	-4.28	0.29
Ac2層上-2	0.43	0.01	1.28	0.02	53	0.05	946	-4.19	0.08
Ac2層下-1	0.69	0.12	1.83	0.22	100	0.50	914	-4.35	0.37
Ac2層下-2	0.81	0.09	2.09	0.17	101	0.31	887	-4.26	0.22
Ac2層下-3	0.74	0.21	1.91	0.39	99	0.44	1103	-4.20	0.26
Asc層	0.37	0.08	1.27	0.21	133	0.05	3162	-3.66	0.10
Dc1層-1	0.46	0.14	1.37	0.31	176	0.77	1859	-3.93	0.18
Dc1層-2	0.60	0.16	1.59	0.22	137	0.57	2019	-4.00	0.35
Dc1層-3	0.64	0.11	1.62	0.16	134	0.68	922	-4.31	0.33
Dc1層-4	0.74	0.22	1.61	0.07	229	0.42	1037	-4.17	0.17

の計算に $e\text{-logp}$ 曲線を用いる。4) 平面メッシュごとに深さ方向に多層地盤となるが、圧密度の計算には換算層厚法を用いる。5) 地中応力の計算には、地盤を弾性体としてブシネスクの式を用いる。表-2は、確率的1次元圧密モデルにおいて考慮する土質定数と分布関数を示している。表-3に本プロジェクトで用いた土質定数を示す。

一般的な土層モデルにおいては、地盤内の土質特性は水平方向、鉛直方向ともほぼ連続的に変化していると考えられるが、臨海部における埋立て空港においては、埋立て土の土質物性のばらつきは少なくない。このため、各平面メッシュの地盤沈下量の間には差異が生じることにより、地盤の不同沈下が発生する可能性が大きい。土田モデルでは、地盤の水平方向の相関性を、土質定数の空間的自己相関係数

$$\tau_{ij} = \exp(-r_{ij}^2 b^2) \quad (1)$$

を用いて評価する。ただし、 r_{ij} : メッシュ*i*, *j*間の距離、 b : 相関距離である。相関距離 b は、単位距離当たりの空間的自己相関性の強さを表すパラメータであり、 b の値が大きいほど広い範囲において空間的相関が大きいことを意味している。水平方向自己相関距離は、東京国際空港沖合展開事業における自己相関性に関する実績に基づき、 $b=100\text{m}$ と設定した。一方、鉛直方向には代表地点で実施したボーリング調査結果に基づいて土質定数を設定する。鉛直方向については、深さ方向の自己相関性が通常4~5m程度であるとされているため⁹⁾、メッシュ幅を4m以内としてモデル化することとした。

次に、鉛直方向の地表面からの深さに着目する。特に、同一の鉛直方向レベルに属する平面メッシュをとりあげる。対象地盤の一定深度を構成する*N*個の平面メッシュ $i(i=1, \dots, N)$ の土質定数を $x_i(i=1, \dots, N)$ で表す。このとき、各ブロックの土質定数間の空間的相関構造を表す分散・共分散行列を

$$C_x = \begin{pmatrix} \text{Var}[X_1] & \dots & \dots & \text{cov}[X_1, X_N] \\ \text{cov}[X_2, X_1] & \dots & \dots & \text{cov}[X_2, X_N] \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \text{cov}[X_N, X_1] & \dots & \dots & \text{Var}[X_N] \end{pmatrix} \quad (2)$$

と定義する。この行列の各要素は空間的自己相関係数 τ_{ij} を用いれば

$$\text{cov}[X_i, X_j] = \sigma^2 \tau_{ij} \quad (3)$$

と特定化できる。ただし、

$\sigma^2 = \text{Var}[X_i](i=1, \dots, N)$ は、土質定数の分散を表す。分散・共分散行列は、正値対象行列であるため対角

下半行列 C を用いてコレスキー分解 $C_x = CC'$ が可能である。ただし、記号' は転置操作を表す。また、対角下半行列 C は

$$C = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{21} & \dots & 0 \\ C_{21} & C_{22} & \dots & \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{N1} & \dots & \dots & C_{NN} \end{pmatrix} \quad (4)$$

と表される。ここで、各メッシュの土質定数をランダム発生させるために*n*個の正規乱数 $a = (a_1, \dots, a_N)'$ を発生させる。ただし、 a_i は平均0, 分散1の標準正規分布

$N(0,1)$ から抽出した値である。さらに、各メッシュにおける土質定数*X*の期待値ベクトルを

$\mu_x = (\mu_x^1, \dots, \mu_x^N)$ と表す。この時、正規乱数サンプル a に対して土質定数サンプルベクトル X を $X = \mu_x + Ca$ と表すことができる。

(2) エプロン部平面縦横断勾配設計

エプロン部における平面縦横断勾配については、図-2に示す検討フローに従うものとする。不同沈下により、供用期間中に渡り、勾配変化が生じることが懸念されるため、経年変化による各エリアの勾配が管理基準値以内にあるかどうかを判定する。

当プロジェクトにおいては、入札時に提示された「業務要求水準書」に基づいて、勾配の管理基準値 (1.0%) を設定した。供用時の設計勾配については、上記管理基準値が設計供用期間中に満足されることを考慮して、不同沈下による勾配変化を見込んだ勾配とした。

エプロン造成計画高の設定に際しては、エプロン内の雨水排水条件及び、エプロン勾配の要求内容を満足できる造成高を求める。具体的な設定手順としては、まず、造成終了後、エプロン施設が建設され供用が開始される時点を想定し、設定した造成高により航空機の運用およびエプロン内の雨水が流下可能となるような排水の流域区分を満足されるように決定される勾配が、管理基準値を満足するかを反復的に算出する。その後、確率的1次元圧密検討より得られた経年毎の不同沈下量より、各エリアの勾配変化を算出する。当プロジェクトにおいては、圧密検討を行うメッシュ間隔として25mを設定した。従って、25m×25mを1メッシュとする不同沈下量が経年的に得られることとなる。得られた各エリアの勾配経年変化が基準値以内であるか、また排水流域区分を満足する

と地盤の圧密沈下による不同沈下を合算し、それによる勾配変化が照査基準（勾配許容値3.0%以下）を満足することを確認した。

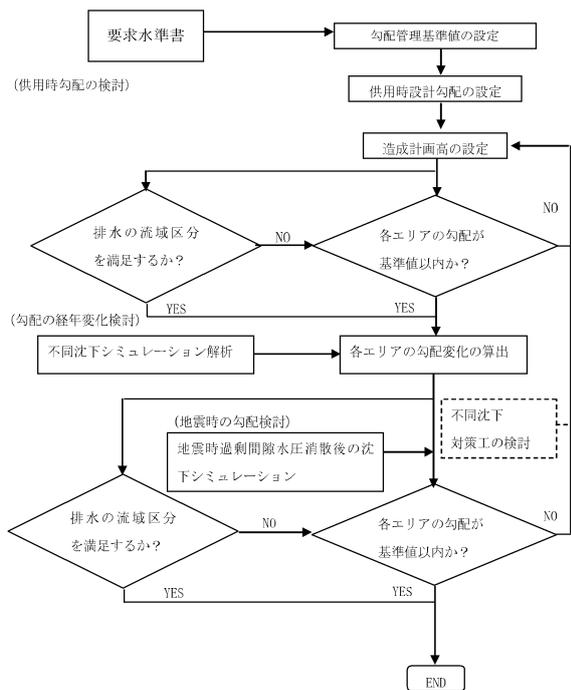


図-2 エプロン部平面縦横断勾配検討フロー

かを判定し、満足しない場合は、初期の造成勾配を見直すか、不同沈下に対する対策工を検討する。本プロジェクトでは、図-2のフローに基づいて要求事項を満足するように初期造成勾配を反復的に試行した上で設定した。

また、地震時においては、業務要求水準書において、「空港土木施設の耐震設計指針」に定める耐震性能により、レベル1およびレベル2地震動に対する被害程度が定義されており、重要度の高い南側エプロンにおいては、レベル2地震動による被害程度として、被害程度Ⅱ（早期復旧可能な程度の残留変形量以下）とすることが求められており、本プロジェクトにおいては、レベル2地震時における液状化後の過剰間隙水圧消散に伴う不同沈下

5. 大規模補修計画と維持管理リスク

本節では、前節の不同沈下シミュレーション結果より算出された20個の勾配算定結果を、大規模補修計画、維持管理リスク算定に用いる手法について述べる。

図-3に確率的1次元圧密検討より得られた供用開始5年後における不同沈下量の算定結果の一例を示す。当プロジェクトにおいては、前述したようにモンテカルロシミュレーションの回数を20回としたことから、図-3のような沈下量結果が各年とも20個算定されることとなる。すなわち、各年とも20個の沈下量データから20通りの縦横断勾配が算出されることとなる。

勾配の算定については、1回のシミュレーション試行から得られた沈下量を用いて、隣り合うメッシュ間での8方向の勾配を算定し、8方向のうち最大（最小）となる勾配をそのメッシュ位置での最大（最小）勾配と定義する。従って、各年、1つのメッシュ毎に20個勾配が算定される。20回の試行回数で得られた勾配が正規分布確率密度関数に従うと仮定し、図-4のように5%信頼上限値および下限値をそれぞれ求める。ここで、勾配の上限値および下限値は互いに独立した確率事象であることから、確率統計における片側検定での有意水準を表す。つまり、不同沈下シミュレーションによって、設計勾配の上限値が管理基準値に近づくと同時に、排水条件より決定される下限勾配の基準値に近づくような事象は発生しないことを示している。



図中の数字は20回試行によって求められた20個の勾配の最大勾配(%)

図-3 不同沈下シミュレーションによるエプロン勾配算定結果の一例（供用開始5年後）

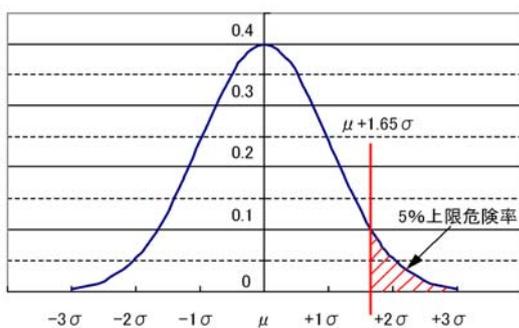
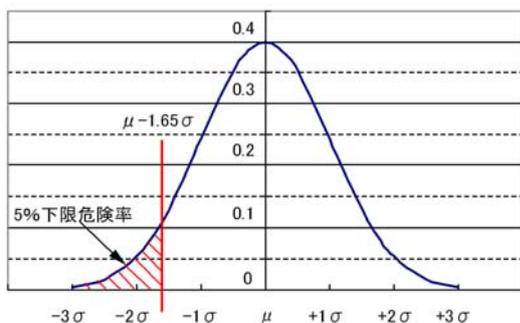


図-4 上限5%, 下限5%勾配の定義

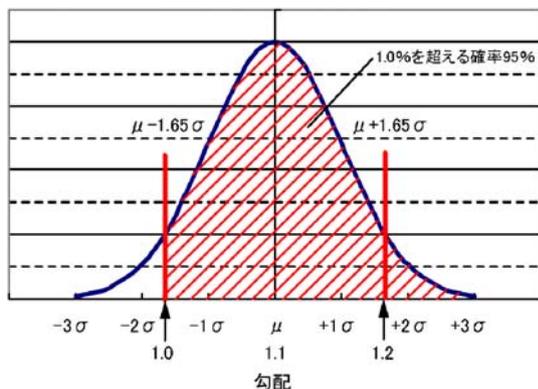


図-5 勾配管理値逸脱の生起確率算定
(設計供用期間終了時勾配 : 1.2%の場合)

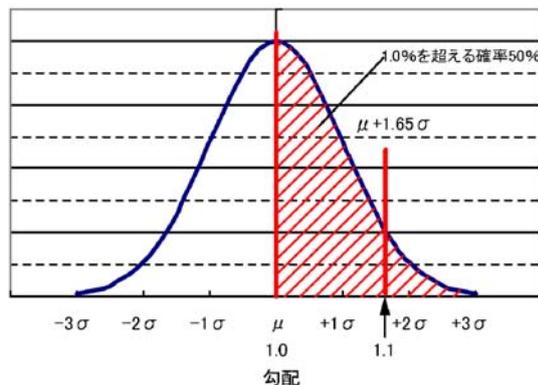


図-6 勾配管理値逸脱の生起確率算定
(設計供用期間終了時勾配 : 1.1%の場合)

本事業の計画・設計段階における大規模補修のリスク算定に当たっては、不同沈下による舗装の勾配の発生量が正規分布に従うと仮定し、不同沈下シミュレーション結果における勾配逸脱量から、実際に勾配が逸脱する事象

が生起する確率を算定し、生起確率を考慮した大規模補修工事の発生予測を行った。この考え方をライフサイクルコストの算定手法に取り入れた。

不同沈下シミュレーションの結果、羽田エプロンPFIの全エリアにおいて、各エリアの20回分の試行で得られる20個の勾配データの標準偏差 σ を算出すると、0.06%となる。不同沈下シミュレーションによる各試行の勾配は、標準偏差0.06%の正規分布に従うと仮定すると、5%信頼上限値は、標準偏差の1.65倍(0.1%)となる。すなわち、20個の不同沈下シミュレーション結果勾配データの最大値(5%信頼上限値)が許容勾配をどの程度逸脱するかによって、生起確率を算定することが可能である。

例えば、エプロン誘導経路部のあるスポットにおいて、設計供用期間終了時(50年後)に20個の勾配データの最大値が1.2%と算定されたとすると、図-5に示すように、勾配の管理値(1.0%)を超過する事象が生起する確率は95%と求められる。また、別のスポットにおいて同様に勾配データの最大値が1.1%と算定された場合は、勾配管理値を超過する確率は図-6に示すとおり50%となる。

このように、勾配の逸脱量から、管理値を逸脱する事象の生起確率を算出することにより、維持管理段階における大規模補修工事の発生リスクを定量的に把握することが可能となる。このことにより、大規模補修費用にその事象の生起確率を乗じることで、維持管理期間中における大規模補修コストの期待値を算出することが可能となる。

6. 空港運用を考慮した大規模補修計画

本節においては、不同沈下シミュレーションの結果得られた勾配の逸脱箇所において、空港の運用を考慮した大規模補修工事計画の実例について示す。

不同沈下シミュレーションの結果、供用開始3年後に図-7に示すように舗装最大勾配(不同沈下シミュレーション20回試行の最大値)が舗装の管理基準値である1.0%を逸脱し、1.06%となるエリアが発生する。図-8にこのエリアの実際の勾配変化状況を示す。このエリアでは、不同沈下の発生により造成勾配が最大1.06%となるが、将来にわたって造成勾配が1.0%を超過しないように、勾配を0.9%に変更する大規模補修工事を計画する。図-8に示すように、造成高を最大7.8cm嵩上げし、擦り付け範囲を含めて66.0mの範囲を勾配修正する計画とした。

次に、上記で計画した大規模補修工事の範囲を、エプロンを一時的にクローズ可能な範囲と即日復旧が必要な範囲に区分する手法を述べる。図-8に示す大規模補修範

囲を実際のエプロンNC舗装版の目地割（図中の格子）に重ね合わせ、大規模補修が必要な舗装版の範囲を図-9に示す25.5m×71.1mと求めた。このエリアは、108番駐機スポット（航空機が入っているスポット）と109番スポットの中間であり、一部がエプロン誘導経路上に位置している。

大規模補修工法としては、エプロン舗装を一時的にクローズすることが可能な範囲に関しては、無筋コンクリート舗装を取り壊して路盤を整正し、その上で新たな舗装版を設置するか、NC舗装版の付着オーバーレイにより施工する計画である。但し、空港の機能保持に必要な性能として、閉鎖可能な駐機スポットは1スポット以内とすることが求められており、一定期間クローズできない箇所に関しては、夜間作業により、即日復旧が可能なプレキャスト鉄筋コンクリート舗装版（PRC版）を用いる計画である。エプロンの閉鎖可能範囲とPRC版を用いた即日復旧範囲の区別は、航空機の軌跡図を作成することにより実施する。本節で例示した大規模補修範囲においては、駐機スポットを1スポット（109番スポット）閉鎖した上で、隣接する108番スポットの運用に支障をきたさない範囲を航空機の軌跡図から算出し、閉鎖可能範囲を求め、それ以外の箇所は即日復旧が必要（PRC版の施工が必要）な範囲とした。

なお、図-7で示した勾配逸脱範囲の最大勾配は、大規模補修工事を実施しなかった場合においては、設計供用期間終了後（50年後）において、1.1%となる。このエリアにおいては、すなわち、設計供用期間内に勾配の管理値（1.0%）を超過する事象が生起する確率は、図-6により50%と求められる。このことから、図-7～図-9に示すような大規模補修工事が設計供用期間内に必要となる確率は50%と仮定することで、大規模補修コストをこれらのリスク評価に基づき設定している。



図-7 不同沈下シミュレーションによる勾配算定結果（3年後）における勾配逸脱範囲の一例

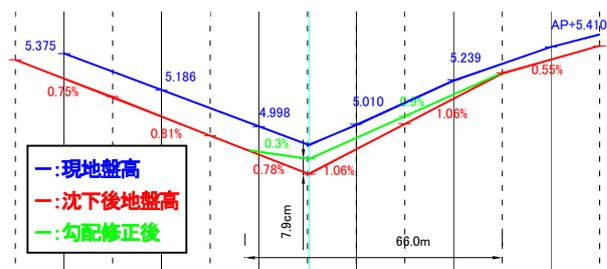


図-8 勾配逸脱箇所における勾配修正計画の一例

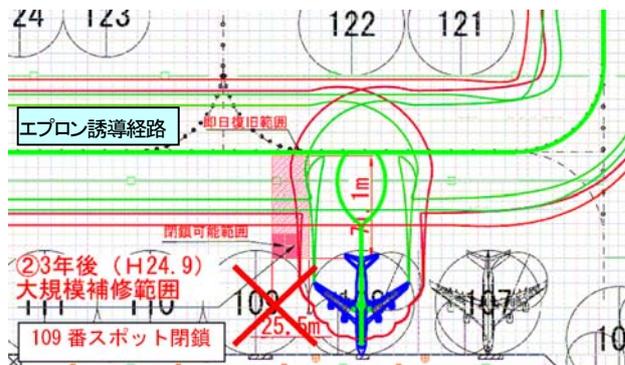


図-9 閉鎖可能範囲と即日復旧範囲の区分

7. おわりに

本論文では、不同沈下の発生が予想される埋立地、臨海部の空港において、エプロン舗装に要求される性能の一つであるエプロン舗装の勾配に着目し、土質定数のばらつき等も適切に考慮された圧密計算手法による不同沈下シミュレーションを用いて不同沈下量を予測し、供用開始後のエプロン舗装の時系列的な勾配変化の予測を確率的に推定する手法を示した。この手法を用いて大規模補修が必要な範囲を求め、空港機能上の要請から、即日復旧が必要な範囲と閉鎖可能範囲に区分し、それぞれの箇所においての大規模補修計画を立案した。また、不同沈下シミュレーション結果の勾配逸脱量の大小から、勾配が管理基準値を逸脱し、大規模補修の施工が必要となる事象の生起確率を算定し、これを大規模補修コストに乗じることにより、大規模補修リスクを算定する手法について論じた。これらの手法を採用することにより、供用後の維持管理段階における大規模補修工事まで考慮した舗装種別の選定が可能となり、最適な舗装構造の選定が可能である。

大規模補修工事の手法としては、空港の運用上一定期間のクローズが出来ない範囲に関しては、PRC版構造を採用し、夜間工事による即日復旧で対応する計画である。なお、PRC版については、従来の設計手法⁹⁾では考慮されていなかった、不同沈下を考慮した設計、6車輪荷重となる大型航空機（A380, B777等）に対応した設計、疲労耐久性を考慮した設計を行い、これらの要求事項に対応

できる仕様を決定している¹⁰⁾。また、航空灯火が存在する箇所でも確実に施工が可能なことを試験施工により事前に確認しており¹¹⁾、羽田空港で用いるのに十分満足できる機能を有した舗装構造であることを確認している。

本プロジェクトにおいては、圧密による不同沈下の発生という不確実な事象が発生する中で、設計供用期間中に航空機の運用及び排水の要求事項を満足させることを求められており、さらには大規模補修リスクの定量化、また、供用後に要求事項を満足する大規模補修技術の開発等を行うことにより、供用後の維持管理段階における大規模補修工事まで考慮した舗装構造の選定を行うことができた。

羽田エプロンPFI事業は、2009年9月にエプロンの施工が完了し、維持管理業務が順次開始されている。エプロン舗装の沈下量としては、図-10に示すような実測データが報告されている¹²⁾。地盤改良等を施工していない一般部においては、概ね当初の地盤沈下シミュレーション結果と実測値が一致する結果となっている。また、近接構造物対策や軟弱地盤対策のために実施した各種地盤改良を施工した範囲においては、予測値よりもやや小さい沈下量が得られている。これらの実測値を蓄積することにより、より精度の高い大規模補修コストの算定が可能となることが考えられる。また、維持管理においては、舗装の勾配の逸脱や、NCコンクリート版のひび割れ発生等の事象をリスクツリー・イベントツリー法によって整理する手法を用いる計画¹³⁾である。

本プロジェクトにおいては、設計・計画段階において維持管理リスクを定量化し、LCCを考慮した舗装および造成勾配の設計を行ったが、設計・計画を行うに当たって、少ない実測データからどのように大規模補修リスクを定量化するかが設計・計画段階の課題点であった。著者らは、設計・計画段階で想定しうる大規模補修リスクを設計上求められる数値をもとに定量化し、維持管理計画に反映させた。非常に限られた実測データをもとに維持管理計画を策定しているため、今後は実測データに基づいた維持管理計画の修正が課題となる。従って、維持管理段階においては、実測データを適切に評価し、どのようにして維持管理計画へフィードバックさせるかを継続的に検討していく必要があると考えており、実測データを今後収集、蓄積していく計画である。本プロジェクトで著者らが実践した、新たな考え方による空港舗装の設計・施工・維持管理計画手法及び今後の実測データやそれに基づく維持管理計画への反映方法が、空港舗装コンクリートのライフサイクルの考え方の一助として貢献できれば幸いである。

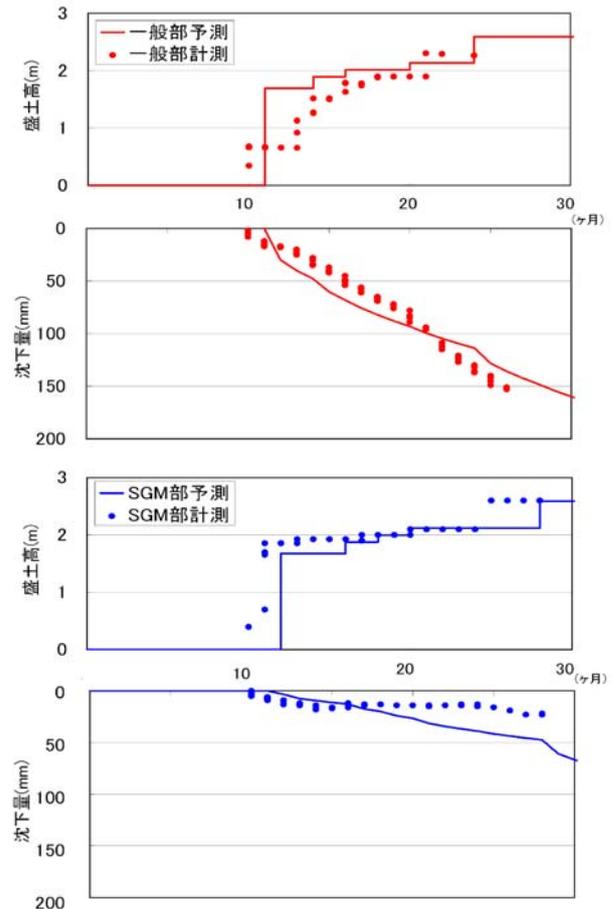


図-10 不同沈下シミュレーション結果と実測値との比較¹²⁾
(上:一般部, 下:SGM(軽量盛土部))

参考文献

- 1) (財) 港湾空港建設技術サービスセンター：空港舗装構造設計要領, 1999.
- 2) 国土交通省航空局：空港舗装補修要領（案）, 1999.
- 3) 下村 泰造, 小濱 健吾, 貝戸 清之, 小林 潔司：空港舗装アセットマネジメントのためのハイブリッド型地盤沈下モデル, 土木学会論文集F, Vol.64 No.4, pp463-482, 2008.
- 4) 下村 泰造, 小林 潔司, 貝戸 清之, 小濱 健吾：空港コンクリート舗装のハイブリッド劣化モデル, 土木計画学研究・論文集, Vol.26, No.1, pp.47-58, 2009.
- 5) 加藤 隆, 尾関 孝人, 下村 泰造, 一戸 秀久：東京国際空港国際線エプロンにおけるコンクリート舗装設計, 舗装, Vol. 44, No. 8, pp.14-20, 2009.
- 6) 下村 泰造：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～, 東京国際空港再拡張事業建設工事 技術報告会（第3回）, 2007.
- 7) 下村 泰造, 西澤 辰男, 吉永 清人, 福岡 和久：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, 土木学会舗装工学論文集, Vol. 12, pp.211-218, 2007.
- 8) 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, Vol. 27, No. 4, pp.123-200, 1988.
- 9) 国土交通省国土技術政策総合研究所：共同研究報告書 空港舗装における高強度 RC プレキャスト舗装版に関する研究, 2004.
- 10) 加藤 隆, 尾関 孝人, 加藤 浩司：東京国際空港国際線エプロンにおけるプレキャスト鉄筋コンクリート舗装設計手法について, 土木学会第 63 回年次学術講演会, 6-349, pp.697-698, 2008.
- 11) 伊藤 彰彦, 岡本 達也, 田中 秀樹, 鈴木 夏雄：空港舗装における PRC 舗装版の適用に関する検討, 土木学会第 63 回年次学術講演会, 6-353, pp.705-706, 2008.
- 12) 土方 遍, 廻田 貴志, 天野 喜勝：不同沈下シミュレーションを用いた羽田空港国際線エプロン舗装の沈下対策設計, 第 54 回地盤工学シンポジウム, 地盤工学会, 2009.
- 13) 下村 泰造, 加藤 隆, 竹田 康雄：東京国際空港国際線地区における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, 土木学会第 63 回年次学術講演会, 6-351, pp.701-702, 2008.

(2009.10.30受付)

Maintenance Plan for Airport Apron Concrete Pavement Considering Differential Ground Settlement

Takashi KATO and Taizo SHIMOMURA

The PFI (Private Finance Initiative) project, which builds new facilities for Apron and will maintain them over 25.5 years since the completion of the constructions, has been developed at a new international district in Tokyo International Airport. From the LCC (Life Cycle Cost) point of view for Apron concrete pavement, Non-reinforced concrete (NC) pavement is adopted, that takes into account the cost of the maintenance including large scaled repair work over the 25.5 years.

Regarding maintenance programs, Apron area, where the gradient overruns the acceptable value, is simulated based on a differential ground settlement methodology. Thus, the risk for the overrun of the Apron gradient is identified. Against the gradient overruns, basically the area such as Apron spots is closed and NC pavement will be replaced or overlaid by adhesion overlay method. On the other hand, if the area is not to be closed, PRC (Precast Reinforced Concrete) pavement is adopted to open the area by next operational day.