

投稿論文 (和文報告)

**TECHNICAL
REPORT**

地盤の不同沈下を考慮した空港コンクリート舗装の構造設計

早田修一*・八谷好高**

不同沈下が予想される軟弱地盤上に建設される舗装では、建設後の維持・補修工事が多くなることが予想される。このような地盤の不同沈下がコンクリート舗装に与える影響として、表面勾配の基準からの逸脱、コンクリート版と路盤の間に空隙が生ずることによる舗装の破損の二つの点を考え、東京国際空港沖合展開事業第二期工事地区を例にとって、軟弱地盤上の空港コンクリート舗装の構造設計について示す。

Keywords : airport pavement, concrete pavement, reclaimed ground, differential settlement

1. はじめに

舗装には、アスファルト舗装とコンクリート舗装があるが、その優れた耐荷性のため、空港ではエプロンを中心にコンクリート舗装が比較的多く用いられている。また、耐久性が優れているということが、舗装建設後の維持・補修の必要性がアスファルト舗装に比較して小さいという事実からも確認できる。しかし、広大な空港用地を都市部に近い平野部に確保することが難しいわが国では、空港が海上の埋立地に建設されることも多くなりつつあり、そのような場合は、供用を開始してからの舗装の維持・補修が重要な問題となってくる。それは、埋立地のような軟弱地盤では沈下や不同沈下が比較的大きいので、コンクリート舗装も含めて、空港舗装は、建設期間中のみならず完成後もその影響を受けるからである。

本報告は、不同沈下が予想される軟弱地盤上の空港用の無筋コンクリート舗装の構造設計法について、東京国際空港沖合展開事業第二期工事地区のエプロン舗装を例にとって論じたものである。まず最初に、東京国際空港の拡張区域の地盤特性について述べる。次に、この地盤特性がコンクリート舗装の挙動に及ぼす影響として、舗装表面の勾配が基準値から逸脱する場合、およびコンクリート版と路盤の間に空隙が生ずることにより舗装が破損する場合について検討する。前者は、舗装が地盤の不同沈下に十分に追従する場合で、舗装表面の形状が地盤の沈下形状と一致する場合である。後者は、コンクリート版の比較的高い剛性のために、舗装表面の形状が地盤の沈下形状と一致せず、コンクリート版と路盤との間に空隙が生じてしまう場合である。

最後に、このような地盤上に空港コンクリート舗装を

建設して供用する場合の構造設計法について考察する。

2. 東京国際空港拡張地域の地盤特性

(1) 東京国際空港の拡張

わが国の航空需要は増加の一途をたどり、しかも、旅客数の半分が第1種空港、特に東京国際空港を利用するという東京集中型であるため、東京国際空港の処理能力を大幅に増強する必要に迫られている。これを実現するために、昭和59年から東京国際空港沖合展開事業として現空港の拡張工事が開始された。

この事業では3期に分けて工事が進められる予定で、昭和63年の新A滑走路の供用をもって第一期工事が完了し、引き続いて第二期工事が行われている。第二期工事では、本報告の対象となっているエプロン舗装を含む西側ターミナル地区が整備されている。この後は、第三期工事として新B、新C滑走路と東側ターミナル地区の建設が予定されている。図-1は第二期工事の計画である。

この沖合展開事業地区の地盤条件は極めて悪い。一般に、このような地盤上に舗装を建設すると、沈下が大いものとなることは避けられないが、特にこの事業では地盤改良を行うための時間を十分確保することができないので、建設後の沈下を見込んで舗装計画を策定しなければならない。しかも、この地盤が自然地盤ではなく、浚渫へどろや建設残土で埋立てられており、層厚や土質定数にはかなりのばらつきがあるので、不同沈下の生ずることが予想される。

空港舗装を建設する際に、このような不同沈下を考慮に入れた事例は少ない。アスファルト舗装は、地盤改良の有無や盛土厚の違いにより地盤の不同沈下が生じ、舗装表面にひびわれが発生したときの報告¹⁾があるものの、一般的には、地盤の不同沈下に対する舗装体の追従性が良好であると認識されているので、不同沈下をあら

* 正会員 運輸省第二港湾建設局東京空港工事事務所長
(〒144 東京都大田区羽田空港 2-7-2)

** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所土質部滑走路研究室長

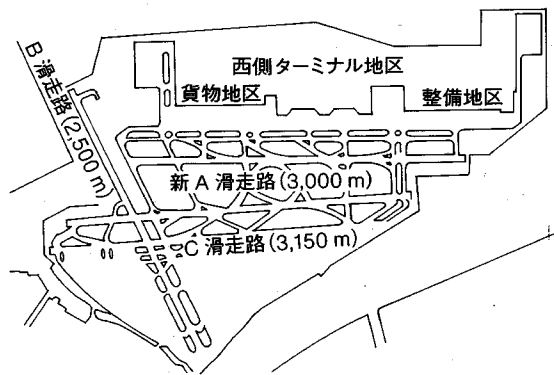


図-1 東京国際空港沖合展開事業第二期工事計画

はじめ考慮して設計することはないようである。コンクリート舗装では、新青森空港のエプロンの一部で、不同沈下を前もって考慮にいった設計法を採用している例がある。東京国際空港の場合も、当初アスファルト塗装を建設しておき、沈下が落ち着いてからコンクリート舗装に打換える方策が考えられたが、ローディングスポット等の施設利用上の制約から現実的ではないと判断された。その結果、当初からコンクリート舗装を建設することが要求されたのである。

第二期工事で建設される予定のエプロン舗装区域は、旅客ターミナル地区、貨物ターミナル地区、航空機整備地区の3種類に分けられ（以後、それぞれ、旅客地区、貨物地区、整備地区と称す）、舗装面積は100 haにも及ぶ。これらのコンクリート舗装の設計条件は以下のものである。

- ① 設計対象航空機：B-747-200 B
(設計脚荷重：82.5 tf (809 kN))
- ② 設計反復作用回数：20 000 回
- ③ 路盤支持力係数 (K_{75})：7 kgf/cm³ (68.6 MN/m³)

当該エプロン地区では種々の構造のコンクリート舗装が計画されているが、この報告では、無筋コンクリート舗装の場合に限定して述べる。

(2) 地盤の概要

東京国際空港沖合展開事業が実施されている埋立地盤の土質は、沖積世以降の土層 (AC₁層, AS層, AC₂層) と洪積世に堆積した層 (DC層, DS層, DG層) の2つに分けられる (図-2はターミナルビル建設予定地点の地盤状況である)。このような地盤上に、東京湾周辺の建設現場から発生した土砂やがれきなどの建設残土が投入されている (BS層)。AC₁層は、最近になって埋立てられた東京湾や浚渫土や上下水道のスラッジ等により構成されているため、非常に軟弱であり、しかもその層厚が場所によって大きく異なったものとなっている。また、AC₂層は、自然に堆積した粘土層であり、AS層は沖積砂層である。

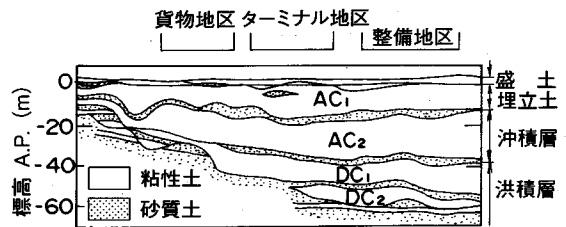


図-2 ターミナルビル建設予定地点の地盤状況

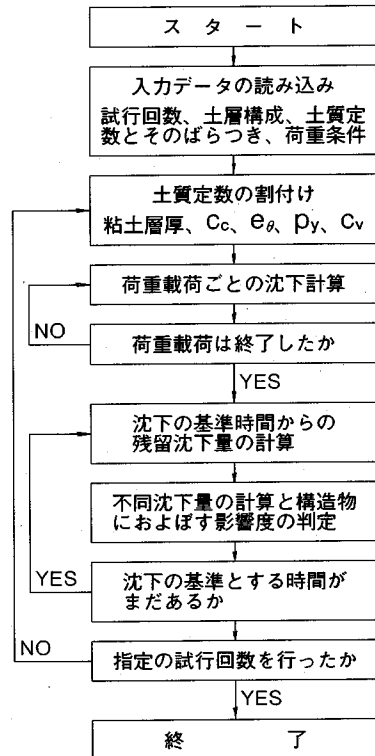


図-3 不同沈下シミュレーションのフローチャート²⁾

この地盤では、AC₁層やAC₂層の圧密に伴う地盤の沈下や不同沈下が予想されている。数多くのボーリング調査の結果に基づいて、この地盤の代表的な構成としてBS層、AC₁層の厚さをそれぞれ4 m、11 mと見なして、AC₁層の厚さの違いやAC₁層やAC₂層の圧密特性のばらつきを考慮に入れて、不同沈下量（ここでは、2点間の沈下量の差と定義し、2点間の距離を沈下幅と称する）の概略を計算したところ、舗装建設後10年で、AC₁層、AC₂層の上面でそれぞれ8、13 cm、地盤表面では14 cm（沈下幅30 m）となることが推定された²⁾。

舗装建設後に生ずる地盤の不同沈下が舗装の挙動に及ぼす影響を検討するためには、舗装供用後の不同沈下の状況を把握しなければならない。具体的には沈下状況の経年変化を予測することが必要となるが、それには土田らが開発した不同沈下のシミュレーション手法²⁾を使用

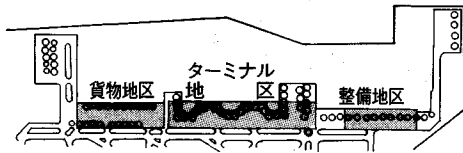


図-4 エプロン舗装の区域

した。これは、埋立地盤のように圧密沈下が大きく、せん断による不同沈下を無視し得る場合に適用可能であり、地盤の不均一性は確立モデルにより表されるとしたモンテカルロシミュレーションである。この場合、圧密現象を支配する定数としては、圧縮係数 (C_c)、圧密係数 (c_v)、圧密降伏圧力 (p_v)、初期間隙比 (e_0)、軟弱層の厚さを考えている。

実際には、地盤を平面的にみてブロックに分割し、それぞれのブロックでは隣接するブロックとは無関係に沈下が生ずるものと考え、各ブロックの土質定数を実際の地盤調査データに基づいて決定された確率モデルに従う確率変数としてランダムに割り付けて、一次元圧密理論により沈下を計算する。また、地盤は鉛直方向にも分割されて、それぞれのブロックには土質定数が割り付けられる。図-3には、このシミュレーションのフローチャートを示してある。

ここでは、図-4に示すように、エプロンを貨物地区 (200m×675m)、ターミナル地区 (200m×1350m)、整備地区 (150m×600m) に分けて、シミュレーション計算を実施した。それぞれの地区では、ボーリング調査実施箇所と計算地点を合致させるために、ブロックの大きさを25m×25mにして、20回の試行を実施している。

不同沈下は、目的に応じた取扱いが容易にできるように、二通りの方法で表現した。一つは、舗装表面の高さや勾配からみたもの、もう一つは舗装構造からみたものである。前者は、ターミナルビル等の構造物との接合、排水、航空機のトーイングといったものに関わっている。ここでは、沈下状況を直線とみなしているが、不同沈下のシミュレーション計算時の隣合う格子の2点間の勾配により不同沈下量を定義した。後者は、コンクリート版と路盤との間に空隙が生じた上に、航空機荷重が載ったときにコンクリート版が破損する場合である。地盤の沈下状況を25m間隔で計算しているが、2地点間の沈下を直線と仮定すれば空隙は生じないこととなるため、地盤の沈下状況は曲線で表せるものと考えた。この曲線は円よりも3次曲線とみなしたほうが設計上安全側となるので、隣接する3点を通る3次曲線により沈下を表した。この場合の不同沈下量は、2地点間の沈下量の差と定義した。

図-5は、沈下を直線とみなした場合の勾配変化の頻

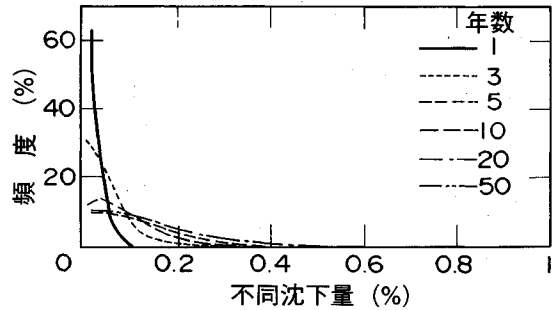


図-5 不同沈下量の頻度 (直線勾配, ターミナル地区)

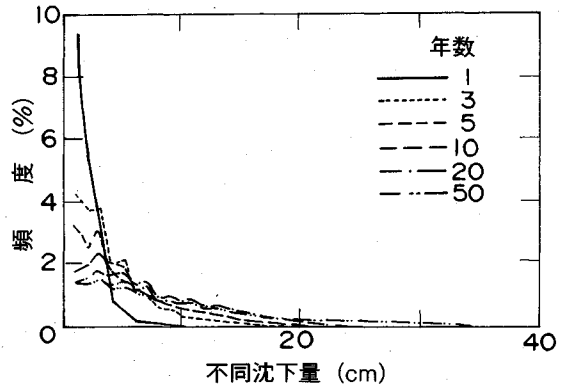


図-6 不同沈下量の頻度 (曲線勾配, ターミナル地区, 凹状沈下)

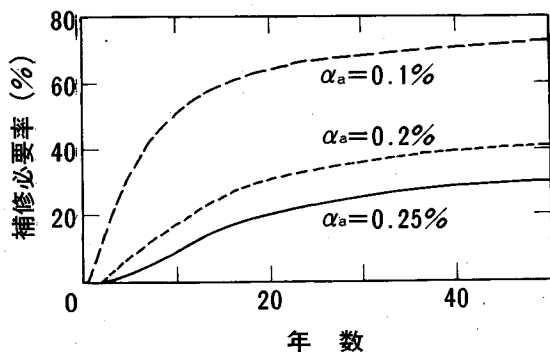
度を表している (沈下幅25mで、0.02%ごとに頻度を集計している)。各地区とも、舗装の建設当初は勾配変化がかなり小さいほうに集中しているものの、年数の経過につれて分散する傾向がみられ、勾配変化の大きいものが増加してくる。

図-6は、沈下を3次曲線とみなした場合の不同沈下量の頻度の例である (沈下幅25mで、頻度は1cmごとに集計している)。沈下を3次曲線とみなす場合も、直線とみなす場合と同様な沈下の傾向を示している。すなわち、舗装建設後、年数が経過するにつれて、不同沈下量はばらついたものとなり、大きなものも増えてくることになる。

これらの沈下状況を地区別にみると、整備地区で最も不同沈下が著しく、次にターミナル地区、貨物地区となっていることがわかった。

3. 舗装の表面勾配に関する検討

地盤中の軟弱粘土層の圧密により不同沈下が生ずることはすでに述べた。このような不同沈下に舗装が十分に追従して沈下した場合、舗装表面にも同程度の不陸が生ずることとなる。この舗装表面の勾配については、航空機の運用上から規定がなされており、最大で1.0%と



図—7 補修必要率の経年変化（整備地区）

なっている³⁾。また、一般的に排水性の面からみて最小勾配として0.5%は必要とされている。いま、これらの0.5%、1.0%を基準勾配と称することにする。地盤の不同沈下が生ずることにより、舗装表面の勾配がこの0.5~1.0%の勾配規定から逸脱する場合には、何らかの補修が必要になる。ここでは、対象とする舗装の全体面積に対する補修が必要とされる面積の比を補修必要率と定義する。舗装の表面勾配は、計画時から同一地区内でも一定ではないため、基準勾配に達するまでの余裕代も同一とはなっていない。この余裕代は、基準上限値または基準下限値までの余裕代のうち小さいほうであり、勾配変化許容値(α_a)と称する。

この補修必要率の経年変化の状況を勾配変化許容値別に示したものが図—7である(整備地区)。この図から、α_aの大小により補修必要率が大幅に異なってくるのがわかる。不同沈下が著しいと予想される整備地区で、舗装建設後10年経過時の補修必要率をみると、α_a=0.1、0.2、0.25%の場合で、それぞれ、50、20、10%程度となっている。これに対して、貨物地区は補修必要率が最も小さく、舗装建設後10年経過時で30%程度となっている(α_a=0.1%の場合)。

この議論は、表面勾配の基準を厳密に適用した場合のものであるが、規定勾配から逸脱すればただちに補修が行われるとするのはあまり現実的ではなく、補修工事量がある程度まとまったときに初めて補修が実行されることとなろう。その場合の判断基準としては、表面勾配が規定を大幅に逸脱して、エプロンとしての機能を果たすことが困難となった箇所が生じたときに、勾配規定から逸脱している範囲をすべて補修することを考えた。

この機能上の問題としては、勾配が大きくなれば航空機トーイングに問題が生じ、勾配が小さくなれば排水機能が低下することである。前者については勾配が1.2%程度までが運用可能と今回想定し、後者では0.3%の設計例があることから、エプロンとしての機能を果たすことのできる限界勾配を0.3%と1.2%と設定して、これ

表—1 補修工事の時期

地区	許容勾配 (%)	補修工事の時期 (年)		
		1回目	2回目	3回目
ターミナル	0.25	7.0	10.4	—
	0.20	5.5	11.9	—
	0.10	3.4	7.7	19.1
整備	0.25	5.7	15.8	—
	0.20	4.6	9.4	17.9
	0.10	3.0	6.6	13.1
貨物	0.25	16.4	—	—
	0.20	9.1	—	—
	0.10	4.9	—	—

表—2 補修工事の範囲

地区	許容勾配 (%)	補修工事の範囲 (%)		
		1回目	2回目	3回目
ターミナル	0.25	4.5	8.3(3.8)	—
	0.20	5.6	18.5(12.9)	—
	0.10	18.0	43.6(25.6)	60.1(16.5)
整備	0.25	2.7	16.8(14.1)	—
	0.20	5.6	16.2(10.6)	28.8(12.6)
	0.10	18.4	39.9(21.5)	56.4(16.5)
貨物	0.25	2.4	—	—
	0.20	4.3	—	—
	0.10	18.1	—	—

注) 2回目、3回目で()内の数字は新規工事分

を超えるものが発生した時点で基準勾配から逸脱した範囲(勾配が0.5%より小さいものと1.0%より大きいもの)を一括して補修することとした。

そのような判定をするときに用いる勾配を次のように定義した。シミュレーションの結果として得られた勾配変化率のデータは、全体として正規分布をなすと仮定して、最大勾配変化量(Δ_{max})を勾配変化率の平均値(μ)と標準偏差(σ)の3倍の値の和とみなして算出する。そして、これとα_aの和あるいは差を、最大勾配あるいは最小勾配とし、それぞれの勾配が限界勾配から逸脱する時期を補修工事を実際に行うべき時期と考えた。具体的には、次のような場合である。

$$\alpha_a + \Delta_{\max} = \alpha_a + (\mu + 3\sigma) > 1.0\%$$

または、

$$\alpha_a - \Delta_{\max} = \alpha_a - (\mu + 3\sigma) < 0.5\%$$

このような設計方針により求めた、舗装建設後20年間の補修時期について示したものが表—1である。

次に、補修工事の範囲であるが、工事後別な地区で新たに補修が必要となるものについては、この表と補修必要率を表した図(図—7など)から求められる。しかし、地盤の沈下はそれ以降も継続するので、以前の工事で補修された箇所も、補修時に修正した勾配によっては、再び許容勾配を超えることも考えられる。ここでは、極端な場合として、補修工事は新たな箇所で行わないとするものと、以前実施した箇所も再び実施するものを考

えた。これらを表にまとめたものが表-2である。

4. 舗装の破損に関する検討

3. では、コンクリート版が地盤の不同沈下に十分に追随するものとして解析を進めたが、軟弱地盤上のコンクリート舗装の挙動について報告された事例もあまり見あたらないこともあって、その点については必ずしも確認されてはいない^{4),5)}。Wilk は、軟弱地盤上に建設されたコンクリート舗装の経年変化について調べているが、コンクリート版が地盤沈下に十分に追随しているかどうかについては言及していない。そこで、本章では、地盤に不同沈下が生じても、舗装は必ずしも十分には追随しない場合、すなわち、コンクリート版と路盤との間に空隙が生ずる場合の舗装の挙動を解析する。

(1) 解析手法

コンクリート舗装が建設された地盤に不同沈下が生じた場合の舗装の挙動を調べるために、以下に示す3種類の検討を行った。

- ① コンクリート版の終局破壊
- ② コンクリート版の疲労破壊
- ③ 目地部の破損

コンクリート版の終局破壊の検討には、荷重応力と温度応力の合力がコンクリートの曲げ強度を上回ったときを破壊と定義した。コンクリート版の疲労破壊の検討には、各荷重レベルによる応力を計算してマイナー則を適用した。目地部の破損に対しては、コンクリート舗装が目地部で折れ曲がる状態を想定して、不同沈下によりスリッパーに生ずる応力が、その強度を上回る場合を破壊と考えた。このうち、①と②では、コンクリート版に生ずる応力を算定するものであるから、以下では、まずその手法について述べる。そして、上記の①、②、③について論ずることとする。

a) 荷重応力の算定

地盤に不同沈下が生じたコンクリート舗装に航空機荷重が載荷された場合の挙動を調べるために、Winkler 支承上の版の有限要素法による解析を実施した⁶⁾。計算条件としては、支持力係数が 7 kgf/cm^2 (68.6 MN/m^3) である路盤上の、縦、横方向とも目地間隔が 7.5 m のコンクリート版 (弾性係数 $350\,000 \text{ kgf/cm}^2$ (34.3 GPa), ポアソン比 0.15) を考えた。地盤に不同沈下が生じた場合、コンクリート舗装は、図-8 のように沈下に追随するものとする。これは、地盤の不同沈下に対して、コンクリート版が自重だけでどのように追随するかを検討した結果に基づくものである。ここでは、2.(2) で示したように、 30 m 離れた2点間の沈下の差を不同沈下量と考えて、 20 cm の不同沈下が生じた場合を検討した。具体的には、 $7.5 \text{ m} \times 7.5 \text{ m}$ のコンクリート版16枚からなる舗装 ($30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ の広さ) を解析したが、そ

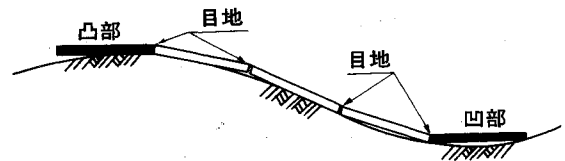


図-8 地盤の沈下に対するコンクリート版の追随性

れぞれのコンクリート版は少なくとも隅角部もしくは版中央部で路盤に支持されることがわかった。

したがって、コンクリート版にとって最も厳しい載荷状態になるのは、沈下形状における2つの頂点 (凹部、凸部) の部分に航空機が載った場合である。荷重応力の計算は、凹部の場合、1枚のコンクリート版が4点で支持されたモデルを、凸部の場合には3枚のコンクリート版が地盤に支持されているモデルを考えて、実施した。この場合、航空機の載荷状態としては、設計対象航空機の1脚もしくは2脚が、版中央部あるいは目地部に載る場合を想定した。また、地盤の不同沈下は 30 m 離れた地点間の沈下量の差とみなして計算を進めた。

地盤の不同沈下に路床・路盤は追随し、コンクリート版と路盤の間に空隙がある状態から計算を始めた。この計算は2つのステップからなる。ステップ1では、まず自重を荷重としてコンクリート版の沈下に対する挙動を解析する。ステップ2は、ステップ1が終了した状態で、航空機荷重が載った場合の挙動を解析するものである。ステップ1では、地盤の不同沈下が長期間継続するものであることから、コンクリート版のクリープを考慮する必要がある。この点についての解析手法は現時点では確立していないと思われるので、有効弾性係数の概念を導入してコンクリートの弾性係数として見かけ上小さいものを使用する方法と、コンクリートの弾性係数をそのままにして計算された応力を低減する (50%) 方法⁷⁾ の2種類について検討した。これらの方法は、どちらも舗装の設計に使用された例はなく、図-9 に示した予備検討の結果、後者を用いたほうが安全側になることから、現段階では後者のほうが適用性が高いと考えて、それを使用することとした。

地盤の不同沈下がない場合には、版中央部よりも目地部に載荷されたほうがコンクリート版に生ずる応力は大きくなるが、今回のように地盤の不同沈下がある場合には、必ずしもそうならないことが想定されたので、前述のように、目地部載荷と中央部載荷の両方による応力を計算した。このときの目地部での応力は、米国連邦航空局 (FAA) の設計法⁸⁾ によるものと同様に、縁部載荷時の応力の75%とした。これは、目地の荷重伝達率として90%程度を見込んでいたものであるが⁹⁾、ここでは各目地にスリッパーを設けるので、その程度の荷重伝達機能は維持できると考えた。この仮定の妥当性につ

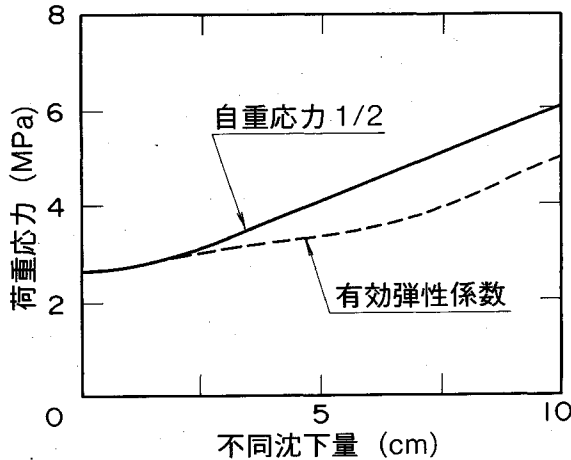


図-9 計算方法による荷重応力の違い

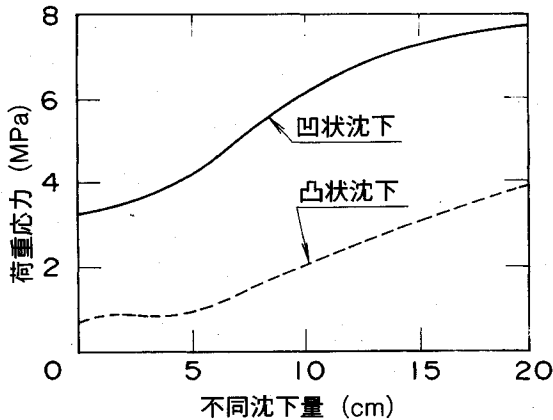


図-10 コンクリート版の応力に及ぼす不同沈下の影響

いては、供用中の空港コンクリート舗装での実測結果から裏付けられている⁹⁾。

計算の結果、図-10に示すように、不同沈下の進行につれて、コンクリート版に発生する応力は大きくなるが、沈下形状としては凹状のほうがコンクリート版にとっては厳しいものとなるのがわかった。凸状沈下の場合ではコンクリート版表面(上面あるいは下面)に生ずる引張応力を示したものであるが、不同沈下量が比較的小さい間はコンクリート版下面に引張応力が生ずるものの、不同沈下が進行するにつれてコンクリート版表面に引張応力が発生するようになる。この図は、前述の設計条件に対して空港舗装構造設計要領から得られるコンクリート版厚が38 cmの場合であるが¹⁰⁾、地盤に不同沈下が発生すると、現行の設計法によるコンクリート版厚は不十分となるのがわかる。

b) コンクリート版の終局破壊

コンクリート版の終局破壊では、荷重応力と温度応力の和がコンクリートの曲げ強度を上回るときに破壊が生

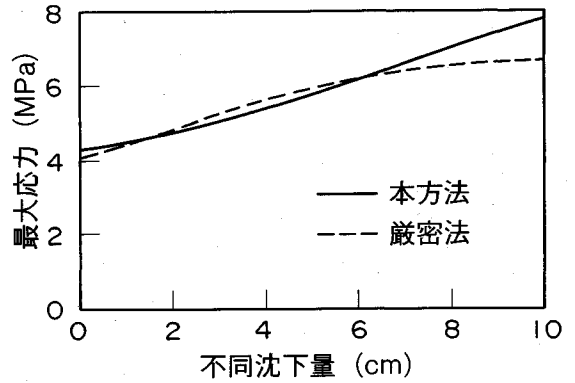


図-11 計算方法による最大応力の違い

ずると考えた。このうち、荷重による応力は、a)に示した方法により計算する。また、温度応力(σ_t)の算定には、岩間による方法^{11),12)}を用いた(コンクリートの線膨張係数としては $1 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 、コンクリート版上下面の温度差としては、運輸省港湾技術研究所野比実験場での実測値等に基づいて、上面が下面より高い場合、低い場合で、それぞれ、 15°C 、 8°C を採用した)。

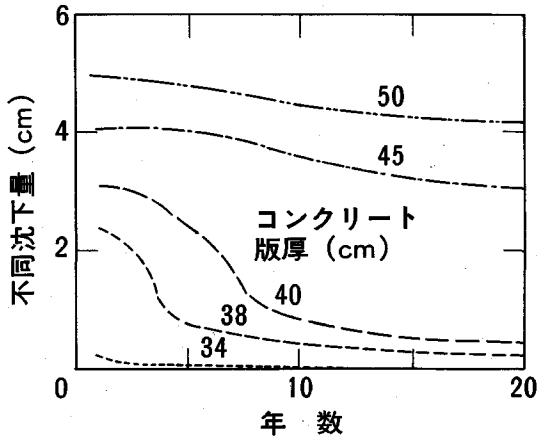
今回のようにコンクリート版と路盤の間に空隙が存在する場合についても、コンクリート版には温度変化に起因する応力(温度応力)が生ずると考えた。ここでは、簡単のためにコンクリート版の断面方向に温度勾配がある場合のみを対象としている。まず、自由変形状態を仮定するとコンクリート版は球状に変形するので¹³⁾、これによる空隙に地盤沈下によるものを加えた状態で、自重ならびに荷重作用下の応力を計算した。その結果、不同沈下が小さい間は自重のみが加わった場合でもコンクリート版に路盤に接地するが、沈下量の増加につれて接地しなくなる部分が次第に増加し、さらには荷重が載った場合でも接地しない状況となることがわかった。これを定量化することは非常に煩雑となるため、不同沈下のみが生じた場合の自重・荷重応力を計算し、別途計算した温度応力を加える方法を採用することによって、設計への温度応力の取り込み方法を一元的なものとした。図-11は、今回用いた簡易法と厳密法の二種類の方法による計算結果を示している(中央部載荷、コンクリート版厚38 cm)。

c) コンクリート版の疲労破壊

前述のように、疲労破壊の基準としてはマイナー則を用いることとしたが、疲労度が1.0になるとコンクリート版は疲労により破壊するものと考えている。今回のような不同沈下の予想される地盤上のコンクリート舗装では、自重による応力がコンクリート版に継続して生じたままになっているので、この点と温度応力を考慮に入れてコンクリートの疲労曲線を修正した^{12),14)}。具体的には、

表—3 終局破壊時の不同沈下量

コンクリート版厚 (cm)	不同沈下量 (cm)
30	—
34	—
38	0.8
40	2.0
45	3.2
50	3.8



図—12 疲労破壊時の不同沈下量

参考文献14)に示された設計疲労強度の考え方を踏襲して、1割ほど疲労強度が低下するものと設計上みなしている。

d) 目地部の破損

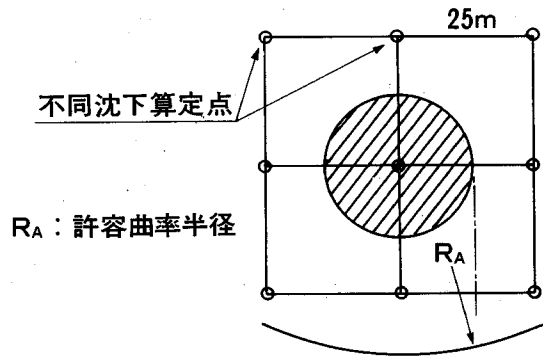
目地としてはスリッパ目地を用いることを標準と考えるので、目地部の破損は、コンクリート版の目地部の折れ曲がり角度がスリッパの折れ曲がり可能角度を上回る状態になったときに起こると考えた。目地部の折れ曲がり可能角度は、スリッパ1本当たりの伝達可能荷重を算定して、その荷重がスリッパに加わったと考えることによって算出できる。目地幅を、今回の設計条件下で最も厳しいと考えられる3mmとして計算した結果、今回の設計条件に対しては、スリッパの折れ曲がり可能角度が0.17°Cとなることがわかった。

(2) 破損状態からみた舗装の補修基準

(1)に示したように、コンクリート版の破損として、コンクリート版のひびわれと目地部の破損を考えが、ここでは2.で述べた不同沈下シミュレーション結果に基づき、それらの経年変化について示す。

a) 舗装の破損による補修基準

(1)で述べたように、地盤の不同沈下は、コンクリート版のひびわれと目地部の破損を引き起こすと考えられる。その場合、空港舗装補修要領(案)¹⁵⁾に示された評価基準に従って補修の必要性が判断される。この方法で



図—13 設定した曲率を超える範囲の計算法

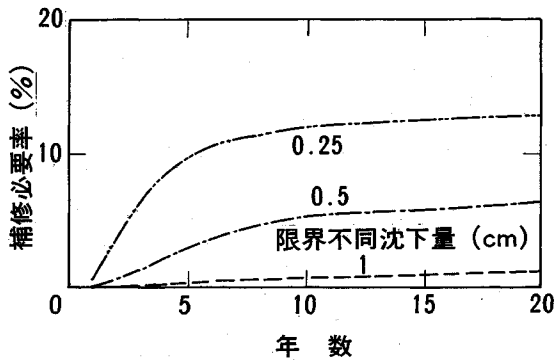
は、舗装区域を小さなユニットに分けてそれぞれの破損状態によって評価するので、ここでも対象となる地区を小さなユニットに分けてそれぞれのユニットごとに評価しなければならない。

ここでは地盤を25m×25mの大きさのブロックに分けて地盤の不同沈下量の計算を行っているので、この大きさの区画を1ユニットとしなければならないが、空港舗装補修要領(案)のもの(630m²)とほぼ同じ面積である。ひびわれ、目地部破損に関する評価基準では、補修が早急に必要であるとみなされる値が、11.1cm/m²(ひびわれ度)、5.7%(目地部破損)となっている。

b) ひびわれによる補修

(1)で示した手法によってコンクリート版に終局破壊が生ずるときの不同沈下量を求めたものが表—3である。また、疲労破壊の場合についても図—12に示した。これは、1日当たり14便の航空機がローディングスポットを使用するとして計算した結果である(ターミナル地区の計画では1日に14便の航空機が同一スポットを使用する)。コンクリート版厚が38cmの場合を考えると、疲労破壊時の不同沈下量は供用年数が5年で0.8cm、10年で0.5cmとなっている。これと終局破壊時の不同沈下量(0.8cm)を考え併せることによって、不同沈下の進行程度によってどちらにより破壊が生ずるかが判断できる。

不同沈下がこのような値に到達して、さらに進行することによって、ひびわれが発生して補修基準を超えるようになれば補修が必要と判断される。補修基準であるひびわれ度の算定方法は次のようなものである。まず、不同沈下シミュレーションに用いた点ごとに、その点を含めた周囲の表面形状の曲率を算出する。そして、コンクリート版に破損が生ずるとされた曲率の値(破壊曲率)を超える曲率となる範囲を求め、その範囲内に含まれるひびわれ長を計算することによって、ひびわれ度を求める。破壊曲率を超える範囲は、曲率の計算を縦・横2方向に行って、そのうち広くなるほうを半径とする円で囲



図—14 早急に補修が必要とされるユニット数 (貨物地区)

まれる範囲を採用した (図—13)。この範囲内では、まず最大応力方向にひびわれが発生し、次にこれに直角方向に入るまでを想定しているが、これが空港舗装で一般的に見られるひびわれの形態である。ひびわれの長さは、1枚のコンクリート版につき2本のひびわれが生ずると考えて (2L)、それに面積の比率を乗ずるとした次式によって計算できる。

$$\text{ひびわれ長} = 2 \cdot L \cdot (S_r/S) \dots\dots\dots (1)$$

ここに、L:コンクリート版の1辺の長さ、

S_r:許容勾配を上回る範囲の面積、

S:コンクリート版1枚の面積。

これより得られるひびわれ長を用いてひびわれ度が計算できる。上記の基準に従って、早急に補修が必要と判断される値を越えるひびわれ度となるユニット数の割合 (補修必要率) を示したものが図—14である。当然ではあるが、補修必要率は、舗装建設後の年数の経過につれて増加する。この図を用いて補修時期と範囲を設計することにより、前掲の表—3、図—12からコンクリート版厚が決定できる。また、逆にコンクリート版厚を設定してから、補修時期・範囲を計算することも可能である。

c) 目地部の破損による補修

2. で述べた不同沈下のシミュレーションの結果によれば、各地区とも舗装を建設してから20年までの間は、b) で述べたような折れ曲がり角度となるような不同沈下は生じない。

5. 不同沈下を考慮した構造設計

本章では、前章までに実施してきた地盤の不同沈下の経年変化、舗装表面の勾配の規定ならびに舗装の路面性状の規定からの補修の頻度に関する考察結果に基づき、東京国際空港沖合展開事業第二期工事地区のエプロン区域にコンクリート舗装を建設する場合について論ずる。まず、実際に補修工事を行う時期についての考え方を示してから、設計期間中は舗装の路面性状の規定による補修が必要とはならないような構造の舗装を建設する場合

について考察する。

実際の補修工事をどの時点で実施するかといった問題は、舗装運用システムの策定に際して非常に重要な事項である。これは、1ユニットでも早急に補修が必要と判断されるような状態となったときに直ちにその部分を補修してしまうか、あるいは補修が必要と判定される範囲がある程度まで増加した時点で一括して補修するか、といった問題である。補修の必要性については、舗装表面の勾配に関わる規定ならびに路面性状に関わる規定を用いたが、両者とも、補修を実施する時期についての規定は設けられていない。

3. に示した舗装の表面勾配に関する検討では、運航面を考慮して許容勾配±0.2% (0.3~1.2%) を超えるような沈下が生じたときに、許容勾配を上回っている範囲をすべて補修することとしたが、これはいうまでもなく、後者の立場である。舗装の破損に関する規定に対しても、その立場を踏襲することにし、補修が必要となる範囲がある程度まで増加した時点で工事を行うこととする。ここでは、その基準値を、空港アスファルト舗装の補修に関する基準などを参考にして、10%と規定して解析を進めた。これは、一般的な大型航空機用スポットの大きさが70m×190mであり、路面性状の評価を行うユニット数でいえば30程度となるので、このうちの3ユニットで補修が必要となったときに、スポットを閉鎖して、その部分を補修することを意味している。

運航回数の増加によって、ローディングスポット数が不足する状況を想定すれば、補修工事を実施する回数を極力抑えることが必要となる。前章までに述べたように、地盤に不同沈下が生じたために舗装の補修が必要となるのは、二つおりの場合がある。一つ目の舗装の表面勾配に関する規定から逸脱するような状況となった場合には、必ず補修工事を実施しなければならないのに対して、二つ目のひびわれ度や目地部の破損といった路面性状の規定から必要とされる補修工事は、たとえば版厚を大きくするといった工夫により、設計期間中は不要となる。そこで、ここでは、設計期間を空港コンクリート舗装構造設計要領で規定している10年として、その間補修工事は表面勾配に関する基準から逸脱したときだけであるとした場合の運用システムについて述べる。

設計期間を10年として、舗装建設後10年間はひびわれ度の基準に基づく補修を行わないもの、すなわち、10年経過時に直ちに補修を行わなければならないものは、前掲の図—10等から、ターミナル地区、整備地区、貨物地区のそれぞれで、0.8cm、1.0cm、0.3cm程度の不同沈下に耐えられるものとなる。したがって、前掲のコンクリート版厚と終局破壊時の不同沈下の関係を示した表—3から、整備地区は38cmの版厚では不十分で、1cmの増厚が必要となることがわかる。これに対して、

疲労破壊に関しては、コンクリート版厚を 38 cm、スポット使用便数を 1 日 14 便とすると、10 年後では 0.5 cm までの不同沈下に耐えられるため、貨物地区だけが疲労破壊の心配はないことがわかる。ターミナル地区、整備地区では、疲労破壊によりコンクリート版厚が規定されることになり、それぞれ、40 cm, 41 cm が必要となることがわかる。

以上は、スポット使用便数がこのエプロン地区で想定されている最も頻度の高い 1 日 14 便であることを条件に、補修工事を実施する時期をユニット全体のうち 10% で破損が生じたときと想定した計算結果である。しかし、より条件の厳しい場合についても検討しておく必要がある。まず、便数については、各地区で 1 日 14 便を考え、ユニット全体の 1% で破損が生じたときに補修する場合を考えることにする。これは、前述のようにスポットの大きさが 70 m×190 m なので、3 スポットに含まれるユニット (95 ユニット) の内、ほぼ 1 箇所ですぐに補修が必要と判定される場合である。その箇所ですぐに実施されている間は、従来の 3 スポットを使用していた航空機を 2 つのスポットで運用することを意味するが、使用時間の調整が可能ならば 1 スポット当たり 1 日 20 便程度運用した実績があるので、このようなことも可能となろう。以上の議論に基づいて検討した結果、ターミナル地区、整備地区、貨物地区のそれぞれで、43 cm, 43 cm, 38 cm のコンクリート版厚が必要となることがわかった。

6. 結 論

本研究では、東京国際空港の沖合展開事業第二期工事を例にとり、軟弱地盤上に空港コンクリート舗装を建設する場合の構造設計について述べた。得られた知見をまとめると以下になる。

- (1) 地盤の不同沈下のシミュレーション結果を舗装の設計に反映させた。地盤の不同沈下は二つの点で舗装の補修時期・範囲に影響を与える。一つは、舗装の表面勾配が規定から逸脱することであり、もう一つは、コンクリート版と路盤の間に空隙が生ずるためにコンクリート舗装に破損が生ずることである。
- (2) 表面勾配からの逸脱については、2 点間の勾配を直線とみなして検討した。エプロン区域の用途地区ごとに、設計時の表面勾配別に舗装建設後 20 年までの期間における補修時期・範囲を算定した。補修は勾配が 0.3~1.2% から逸脱したときに実行することとしたが、最も不同沈下が著しいと予想される整備地区では、20 年間に 3 回、面積では最大 60% 程度で補修が必要とされる。これに対して、沈下が比較的小さい貨物地区では

20 年間で 1 回、最大 20% 程度の範囲で補修が必要となることがわかった。

- (3) 路面性状の規定による補修の必要性については、地盤の沈下を 3 次曲線とみなして検討した。舗装の破損として生ずることが予想されるものはひびわれであることがわかったので、その程度を舗装建設後 20 年までの期間で、地区別、交通量別に終局破壊と疲労破壊の二つにより計算した。ひびわれ度が 11.1 cm/m² を超えたときを破壊とみなしたが、終局破壊が生ずるような不同沈下量は版厚によって異なり、版厚 38 cm の場合で 0.8 cm, 50 cm としても 3.8 cm であることがわかった。また、疲労破壊時の不同沈下については、版厚 38 cm で、5, 10 年間供用とした場合、それぞれ 0.8, 0.5 cm であることがわかった。
- (4) 設計期間を 10 年として、その期間中路面性状の規定から補修が不要となるような舗装構成を算定した。施設の運用条件を厳しく考えた場合、不同沈下が比較的小さいと予想される貨物地区では 38 cm のままでよいものの、他の地区では 5 cm の増厚が必要とされることがわかった。

7. おわりに

本研究により、海上埋地のような軟弱地盤上にコンクリートを建設する場合の構造設計方法の考え方が整理できたものと認識している。不同沈下がコンクリート舗装に及ぼす影響として、舗装表面の基準勾配からの逸脱と路面性状に基づく供用性低下の二つを想定したが、それぞれ独立したものとして考えざるを得なかった。それは、前者は、コンクリート版が路盤以下の沈下に十分に追随する場合であり、後者はコンクリート版の有する剛性のためにコンクリート版と路盤との間に空隙が生ずる場合だからである。両者のような状況が同時に起こることはありえないので、補修の頻度と範囲は、最大に見積もってこの両者を重ね合わせたもの、最小の場合でどちらか一方ということになる。

本構造設計法の開発過程では、財団法人沿岸開発技術研究センター東京国際空港エプロン舗装構造研究会の委員の皆様、特に宇都宮大学佐藤良一助教授からは数々の助言をいただきました。深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 林 洋介・佐藤勝久：地盤の不同沈下による空港舗装の破損，第 19 回土質光学研究発表会講演集，pp. 1489~1490, 1984.
- 2) 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，pp. 123~200, 1988.
- 3) 運輸省航空局：空港土木施設設計基準，1989.

- 4) Wilk, W. : Cement Concrete Pavements on Soft Soils Sensitive to Differential Settlements, 2nd Int. Conf. on Concrete Pavement Design, pp.201~210, 1981.
- 5) Vos, E. : Thickness Design of Plain Cement Concrete Pavements on Soils Sensitive to Differential Settlements, 3rd Int. Conf. on Concrete Pavement Design, pp.245~251, 1985.
- 6) 福手 勤・八谷好高：コンクリート舗装の目地部における荷重伝達機能，土木学会論文集，第343号，pp.239~246，1984.
- 7) 日本道路協会：道路橋示方書（Ⅰ共通編・Ⅲコンクリート橋編），326 p.，1990.
- 8) Federal Aviation Administration : FAA Advisory Circular, AC 150/5230-6 C, 159 p., 1978.
- 9) 八谷好高・上中正志：空港コンクリート舗装目地・ひびわれ部の挙動，港研資料，No.710，1991.
- 10) 運輸省航空局：空港コンクリート舗装構造設計要領，105 p.，1977.
- 11) 岩間 滋：コンクリート舗装の構造設計に関する実験的研究，土木学会論文集，第111号，pp.16~46，1964.
- 12) 日本道路協会：セメントコンクリート舗装要綱，275 p.，1984.
- 13) Timoshenko, S. and Woinowski-Krieger, S. : Theory of Plates and Shells, McGraw-Hill Book Company, Inc., 580 p., 1959.
- 14) 土木学会：コンクリート標準示方書（設計編），200 p.，1986.
- 15) 運輸省航空局：空港舗装補修要領（案），95 p.，1984. (1991.8.27 受付)

STRUCTURAL DESIGN OF AIRPORT CONCRETE PAVEMENT ON SOFT GROUND WITH DIFFERENTIAL SETTLEMENT

Shuichi SODA and Yoshitaka HACHIYA

This paper describes a structural design procedure for airport concrete pavements in case that they will be constructed on the reclaimed ground in an expansion project of the Tokyo International Airport. Both the amount of rehabilitation works and their schedules are calculated in two ways. The settlement is considered to affect the behaviors of the pavement as follows : 1) a gradient of the pavement surface deviates from the criterion as the pavement is considered to follow the settlement fully ; and 2) distress appeared on the surface exceeds the criterion as the pavement does not follow the settlement fully. In the former, rehabilitation work is found to be three times and in 60% of the whole area at the maximum during 20 years. In the latter, the pavement structures for design periods of 10 years have been determined.