

運輸省港湾技術研究所

# 港湾技術研究所 報告

---

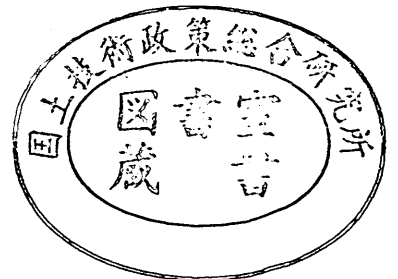
---

REPORT OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH  
INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT

---

VOL. 30      NO. 1      MAR. 1991

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



# 港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I)

第30巻 第1号 (Vol.30, No.1) 1991年3月 (Mar.1991)

## 目次 (CONTENTS)

1. 遠地津波の外洋伝播計算  
.....後藤 智明.....3  
(Numerical Simulation of the Trans-oceanic Propagation of Tsunami  
.....Chiaki GOTO)
2. 碎波および反射を考慮した波浪変形計算  
.....高山 知司・池田 直太・平石 哲也.....21  
(Practical Computation Method of Directional Random Wave Transformation  
.....Tomotsuka TAKAYAMA, Naota IKEDA and Tetsuya HIRAISHI)
3. 多方向不規則波を用いた波浪変形模型実験  
.....高山 知司・池田 直太・小杉 宜史.....69  
(Hydraulic Model Test on Wave Diformation by using Directional Random Waves  
.....Tomotsuka TAKAYAMA, Naota IKEDA and Yoshifumi KOSUGI)
4. 波の連なりを考慮した長周期波の波高の推定  
—波崎海洋研究施設における現地観測における現地観測にもとづく検討—  
.....加藤 一正・中村 聡志・池田 直太.....137  
(Estimation of Infragravity Waves in Consideration of Wave Groups  
—An Examination on Basis of Field Observation at HORF—  
.....Kazumasa KATOH, Satoshi NAKAMURA and Naota IKEDA)
5. 現地データによる移動床模型実験の検証  
—河原子海岸におけるケース・スタディー—  
.....加藤 一正・井上 浩司・柳嶋 慎一.....165  
(Inspection of Movable-bed Model Experiments with Field Data  
—Case Study at Kawarago Beach—  
.....Kazumasa KATOH, Kouji INOUE and Shin-ichi YANAGISHIMA)
6. ヨシ原による水質浄化の特性  
.....細川 恭史・三好 英一・古川 恵太.....205  
(Characteristics of Water Purification in Coastal Reed Field  
.....Yasushi HOSOKAWA, Eiichi MIYOSHI and Keita FURUKAWA)
7. 空港コンクリート舗装の不同沈下管理に関する考察  
.....八谷 好高・横田 弘.....239  
(Differential Settlement Management of Airport Concrete Pavements  
on Reclaimed Ground  
.....Yoshitaka HACHIYA and Hiroshi YOKOTA)

8. 大変形する単杭構造による接岸ドルフィンの残留変位と累積疲労損傷度  
 .....上田 茂・白石 悟.....267  
 (Residual Deflection and Cumulative Fatigue Damage Ratio  
 of Breasting Dolphin by Single Pile Structure  
 .....Shigeru UEDA and Satoru SHIRAISHI)
9. カラーコンクリートの材料特性に関する研究  
 —強度特性, 色彩特性, および耐久性—  
 .....福手 勤・山本 邦夫・濱田 秀則.....313  
 (A Study on the Material Properties of Coloured Concrete  
 —Strength, Colouring, and Durability—  
 .....Tsutomu FUKUTE, kunio YAMAMOTO and Hidenori HAMADA)
10. 捨石による基礎マウンドの形状および力学特性に関する考察  
 .....口田 登・辻垣 武彦・森田 博史.....347  
 (Study on Configuration and Mechanical Properties of Rubble Mounds  
 .....Noboru KUTIDA, Takehiko TSUJIGAKI and Hirohumi MORITA)

## 7. 空港コンクリート舗装の不同沈下管理に関する考察

八谷好高\*・横田 弘\*\*

### 要旨

本研究は、軟弱地盤上に空港コンクリート舗装を建設して運用していく場合のシステムについて考察したものである。

航空機が高速で走行する空港舗装には、高いサービス水準を常時維持することが要求されているが、舗装には施工直後から自然環境や交通荷重の作用により、徐々に破損が生じ始める。それに対処するために実施される舗装の維持・補修の工法ならびにその時期を判断することは、航空機の運航上ならびに工事費用の確保上、非常に重要である。特に、不同沈下が予想される軟弱地盤上に建設される空港コンクリート舗装では、地盤の不同沈下により舗装建設後の維持・補修工事の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不同沈下管理について検討している。対象期間を10年、20年として、舗装の用途地区別に補修時期・範囲を算定したほか、その期間中補修が不要となるような舗装構造についても考慮した。

表面勾配からの逸脱に関しては、特に著しい不同沈下が予想される地区では、20年間で60%程度の範囲で補修が必要になるものと推定された。また、路面性状の規定による補修の必要性に関しては、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。このひびわれの発生については、終局破壊と疲労破壊の2とおりにより検討した。

キーワード：コンクリート舗装，空港，軟弱地盤，不同沈下

---

\* 港湾技術研究所土質部主任研究官

\*\* 第二港湾建設局横浜調査設計事務所次長

## 7. Differential Settlement Management of Airport Concrete Pavements on Reclaimed Ground

Yoshitaka HACHIYA\* · Hiroshi YOKOTA\*\*

### Synopsis

Settlement due to consolidation of reclaimed ground will require some maintenance or rehabilitation works of the airport pavements because many airports have been being constructed on such ground recently in Japan. As the funds which can be used for airport pavements are limited, they have to be used as effectively as possible. In order to accomplish this, so-called Pavement Management System can be adapted. This system is a systematic procedure for scheduling maintenance and rehabilitation activities to maximize benefits to the users and to minimize costs to the agency responsible for the airport pavements.

This paper describes a management system for airport concrete pavements in case that they will be constructed on the reclaimed ground in an expansion project of 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.
- 2) distress appeared on the surface exceeds the criterion as the pavement does not follow the settlement fully.

In the former, rehabilitation works are found to be necessary in 60 % of the whole area at the maximum for 20 years. The management systems for two analytical periods, 10 years and 20 years, are considered in the latter. The structure for each pavement type in which rehabilitation works are not required for these years has been determined.

**Key Words** : Concrete Pavement, Airport, Reclaimed Ground, Differential Settlement

---

\* Senior Research Engineer, Geotechnical Engineering Division

\*\* Deputy Chief, Office of Investigation and Design, Second Port Construction Bureau

# 目 次

要 旨 .....	239
1. はじめに .....	243
2. 東京国際空港の拡張 .....	243
2. 1 東京国際空港の概要 .....	243
2. 2 西側ターミナル地区エプロン舗装 .....	244
3. 不同沈下量の推定 .....	247
3. 1 地盤の概要 .....	247
3. 2 不同沈下量の経年変化 .....	248
4. 舗装の表面勾配に関する検討 .....	250
5. 舗装の破損に関する検討 .....	252
5. 1 解析手法 .....	252
5. 2 破損状態からみた舗装の補修基準 .....	256
5. 3 舗装の種類別の破損 .....	258
6. 不同沈下を考慮した設計法 .....	258
6. 1 検討の基本方針 .....	259
6. 2 破損による補修を不要とする場合 .....	261
6. 3 トータルコストの比較による場合 .....	262
7. 結論 .....	262
8. おわりに .....	262
参考文献 .....	262

## 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。耐久性の優れていることは、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あまり大きくはないという事実から確認できる。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、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は沈下や不同沈下が比較的大きいので、その上に建設される空港舗装は、コンクリート舗装も含めて、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。

したがって、利用者に良好な路面を提供するという舗装の機能を維持するためには、時々、何らかの手当てをしてやる必要がある。舗装が良好な状態を常時維持できるように管理するシステムは舗装マネジメントシステム(Pavement Management System, PMS)といわれ、舗装の分野では世界的にみて大きな研究テーマとなっている。PMSを取り入れることにより、いつ、どのような方法によって維持・補修作業をしてやるかといったことが合理的に決定されることとなる。

PMSは、一般的に、数個のサブシステムが有機的に結合したものであると認識されており、計画、設計、建設、維持・補修、評価、研究についてのサブシステムから構成されているとする例が見られる。<sup>1)</sup>このうち、計画サブシステムでは、プロジェクトの優先度が決定され、設計サブシステムでは、最もよいと思われる設計案が決定される。建設、維持・補修サブシステムでは、工事についての詳しい規定が示されており、評価サブシステムでは、現時点での舗装の評価がなされるだけでなく、将来における舗装の状態についても判断される。研究サブシステムでは、不十分であると認識された事項についての研究が進められている。

本研究は、このような舗装マネジメントシステムの適用例として、不同沈下が予想される軟弱地盤上に空港コンクリート舗装を建設する場合を、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区域を例にとって論じたものである。

本報告では、まず最初に、東京国際空港の拡張計画について概説したあと、舗装が建設される箇所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、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、すなわち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じてしまう場合である。

そして最後に、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マネージメントシステムとして、不同沈下管理について考察している。

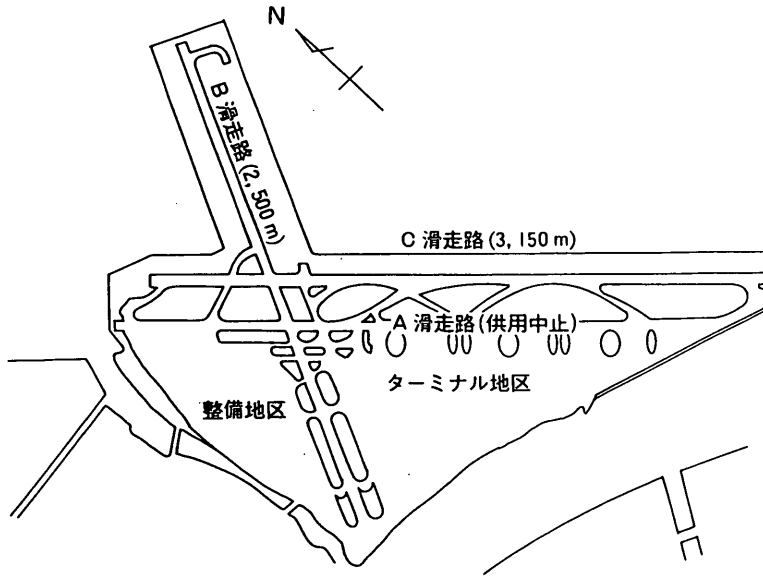
## 2. 東京国際空港の拡張

### 2.1 東京国際空港の概要

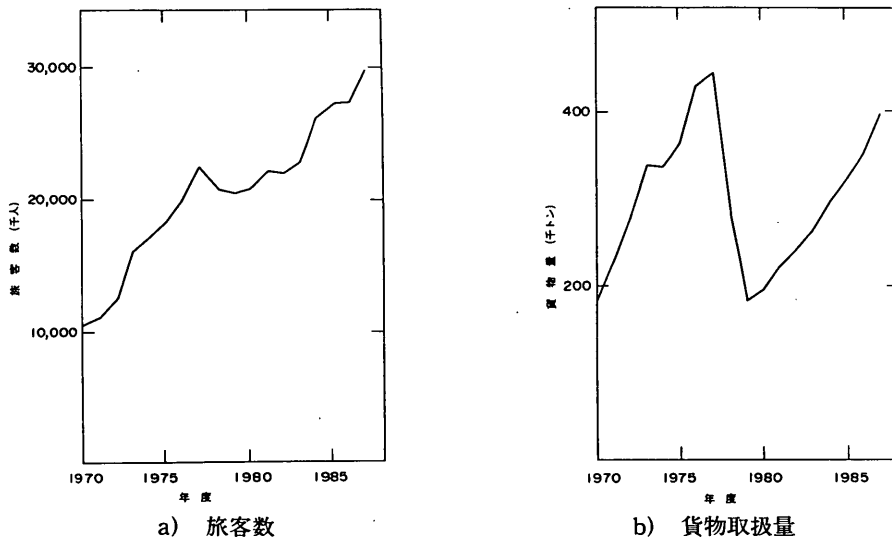
昭和62年には、航空機の離着陸回数が年間16万回、乗降客数が3,000万人に達した東京国際空港は、昭和6年8月の東京飛行場の羽田移転からその歴史が始まっている。当時は総面積52.9haで、滑走路は300mのものが1本であったが、その後米軍による大拡張工事により主滑走路と横風用滑走路が整備された。さらに、昭和39年に主滑走路(現在のC滑走路)が1本追加されて以来、B滑走路の延長が図られたものを除けば、昭和63年に新A滑走路が供用開始されるまで四半世紀の間、基本的な形は変わっていない。図-1には、新A滑走路が供用開始される前の東京国際空港の平面図を示す。面積は408haと昭和6年の開港当初の8倍程度になっているものの、昭和53年以降A滑走路を供用していないこともあって、滑走路の処理能力は、年間約16万回程度にすぎないものとなっていた。

しかし、その間にも、東京国際空港に対する航空需要は増大し続け(図-2)、地方空港の整備が進んで新規路線が開設されるなど、国内航空のネットワークを強化しなければならぬ状況となってきた。しかも、わが国の国内航空輸送形態は、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、<sup>2)</sup>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た。これを実現するために、昭和46年頃から東京国際空港の拡張が検討され始め、昭和59年から東京国際空港沖合展開事業として工事が開始された。

この事業では三期に分けて工事が進められる予定で(図-3)、昭和63年度の新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。第二期工事は、西側ターミナル地区の平成4年度の供用開始に向けて行われており、エプロン舗装、橋梁等



図一 沖合展開事業着手前の東京国際空港の平面図



図二 東京国際空港に対する航空需要

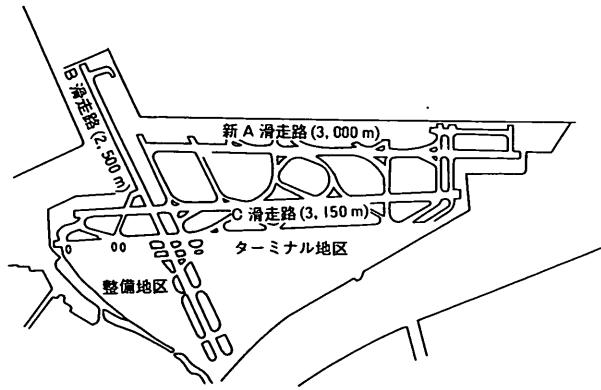
が建設される予定になっている。この後は、第三期工事として新B、新C滑走路と東側ターミナル部分の建設が予定されている。この沖合展開事業が完成すれば、空港面積は約1,100haと事業開始前(408ha)の3倍近くに広がり、空港の離着陸処理能力も事業開始前の1.5倍の23万回程度になる予定である。

## 2.2 西側ターミナル地区エプロン舗装

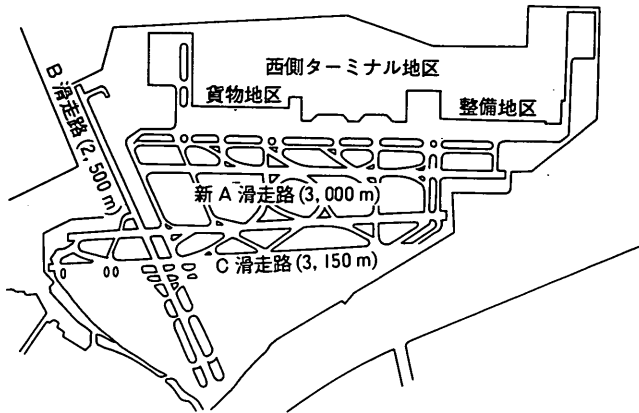
沖合展開事業は、土砂処分場を利用するものなので、地盤条件は極めて悪い。一般に、このような地盤上に施設を建設すると、沈下が大いものとなることは避けられないが、この事業計画では地盤改良を行うための時間的余裕が十分でないので、建設後の沈下を見込んで舗装計画を策定しなければならない。しかも、この地盤が自



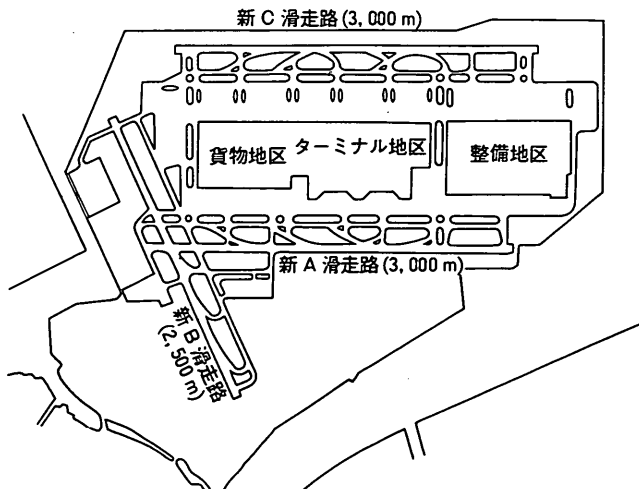
空港コンクリート舗装の不同沈下管理に関する考察



a) 第一期工事完了時



b) 第二期工事完了時



c) 第三期工事完了時

図-3 東京国際空港の沖合展開事業計画

然地盤ではなく、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も推定された。

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多くはないが、空港コンクリート舗装では、新青森空港のエプロンの一部でそのような点を考慮に入れてコンクリート舗装が設計された例がある。これに対して、空港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の報告<sup>3)</sup>があるものの、一般的に、地盤の不同沈下に対する追従性が良好であると認識されているので、不同沈下に対して特別に考慮することはないようである。したがって、東京国際空港の場合も、当初アスファルト舗装を建設しておき、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図-4に示すとおりであり、スポット総数は80で、このうちローディングスポットは66、ナイトステイ専用スポットは10、整備用スポットは4である。それぞれのスポットの施設利用条件は表-1に示すとおりである。この表中の計画勾配とは、エプロン舗装建設時の表面の勾配である。この勾配は、空港土木施設設計基準で、エプロンでは最大1.0%と規定されており、最小で0.5%が望ましいとされている。<sup>4)</sup>

この地区で建設される予定になっているコンクリート舗装の設計条件は以下のものである。<sup>5)</sup>

- ① 設計対象荷重：LA-1
- ② 設計反復作用回数：20,000回
- ③ 路盤支持力係数：7 kgf/cm<sup>3</sup>

また、ここで考慮したコンクリート舗装の種類として

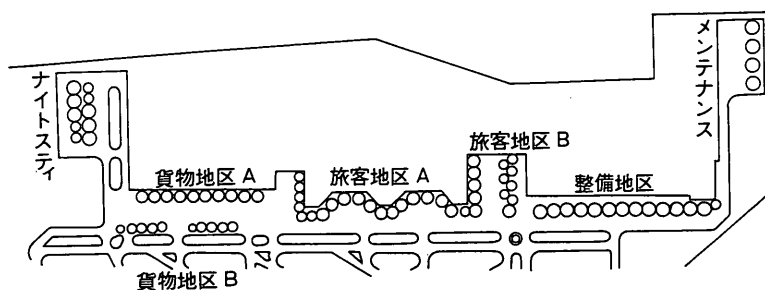


図-4 エプロン舗装の区域

表-1 施設利用条件

地 区	機能・特徴	補修上の制約	計画勾配(%)
貨物地区A (スポット)	旅客便 (1日4便程度)	昼間・夜間ともに	0.6
貨物地区B (暫定スポット)	ナイトステイ	補修工事可能	0.75
旅客地区A (スポット)	旅客便 (1日14便程度) ナイトステイ	全てのスポットを 使用可能な状態に しておくため、補 修工事は夜間のみ	0.6~1.2
旅客地区B (暫定スポット)	旅客便 (1日7便程度) ナイトステイ	昼間・夜間ともに 補修工事可能	0.8~1.2
整備地区 (スポット)	航空機の整備 旅客便 (1日2便程度) ナイトステイ	昼間・夜間ともに 補修工事可能	0.6~0.9
ナイトステイ	ナイトステイ	昼間・夜間ともに 補修工事可能	0.6~0.9
メンテナンス	コンパスチェック等	昼間・夜間ともに 補修工事可能	0.9

は、以下の4種類である。

- ① 無筋コンクリート舗装
- ② 連続鉄筋コンクリート舗装
- ③ プレストレストコンクリート舗装
- ④ 鋼繊維補強コンクリート舗装

### 3. 不同沈下量の推定

#### 3.1 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、沖積世以降の土質(AC<sub>1</sub>層, AS層, AC<sub>2</sub>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。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が投入されている(図-5はターミナル建設予定地点の地盤状況であるが、この図のAC<sub>1</sub>層の上層に当たり、BS層と称される)。AC<sub>1</sub>層は、最近になって埋立てられた東京湾の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、AC<sub>2</sub>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。このように、BS層, AC<sub>1</sub>層が人工的に形成された地盤であるため、かなりの沈下や不同沈下が予想されている。

このような地盤の10年後の不同沈下量については概略以下ようになる。この場合の不同沈下は、AC<sub>1</sub>層とAC<sub>2</sub>層の圧密沈下により生ずるものと考えられる。このうち、AC<sub>1</sub>層のものは二次圧密による沈下であるのに対して、AC<sub>2</sub>層の沈下は一次圧密によるものが主であり、現実的には二次圧密によるものは考えないことにした。これらの不同沈下の要因としては、各層に作用する荷重の違い、層自身の厚さの違い、土質特性の違いが考えられる。表-2は、これまでに実施した土質調査データから推定した、それらのばらつきの程度であるが、これに基づいて算定した、舗装建設後10年間に生ずると予想される不同沈下量は、AC<sub>1</sub>層, AC<sub>2</sub>層のそれぞれで、8 cm, 13 cmとなった。この場合の不同沈下量とは、これらのデータに基づいて計算される沈下量の最大値と最小値の差という意味である。

次に、AC<sub>1</sub>層, AC<sub>2</sub>層で、上記のような不同沈下が生じた場合、それが地盤表面にどのように表れてくるかについて検討する。このとき、以下のような仮定を設けた(図-6)。

- ① AC<sub>1</sub>層, AC<sub>2</sub>層の上面で発生した不同沈下は45°の角度で上方に分散する。
- ② 1個の不同沈下はsin曲線で表される。

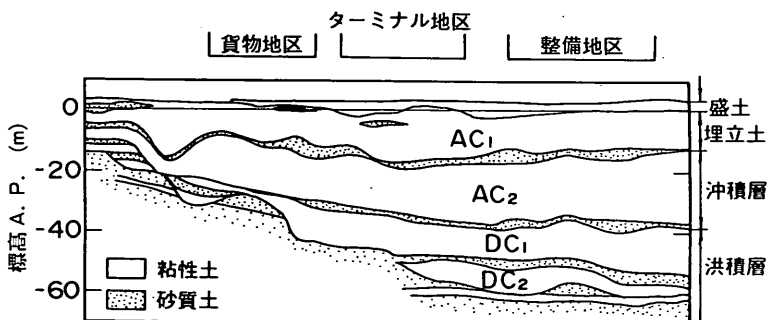
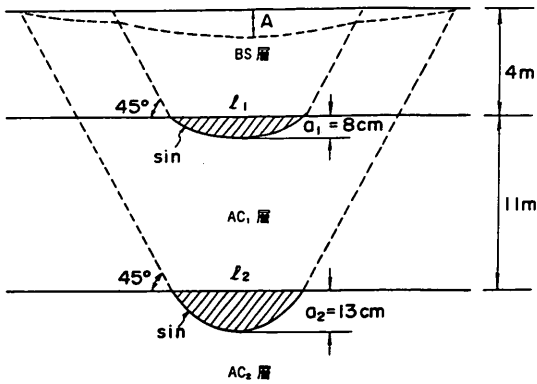


図-5 ターミナル建設予定地点の地盤状況

表-2 不同沈下の要因

土層	ばらつきの要因	ばらつきの程度
AC <sub>1</sub> 層	層厚	隣接する2点間の層厚差: 3m
	圧密荷重・圧密特性	二次圧密係数: 0.3~1.0% (圧密荷重のばらつきも入れて)
AC <sub>2</sub> 層	層厚	なし
	圧密荷重	隣接する2点間の圧密荷重の差: 2.4tf/m <sup>2</sup>
	圧密特性	e~log p曲線における圧縮ひずみのばらつき: ±30%



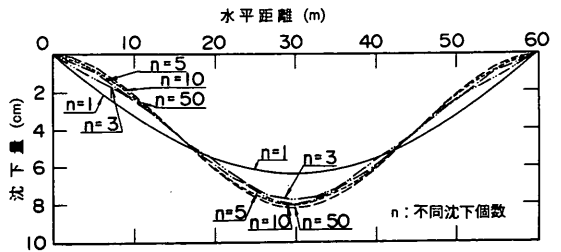
図一六 不同沈下の伝播の模式図

③ 各層上面で生じた沈下量(面積)は、地盤表面のものと同じ。

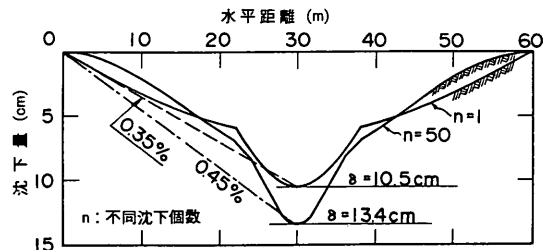
このような条件で解析したところ、まず、地盤表面における不同沈下の勾配が最大になるような各層上面における不同沈下の幅は、層上面から地盤表面までの距離の2倍であることがわかった( $l=2H$ ,  $l$ : 軟弱粘土層上面における沈下幅,  $H$ : 軟弱粘土層上面から地盤表面までの距離)。次に、不同沈下が連続して発生した場合は、地盤表面の沈下形状にも影響することが想定されるので、各層上面で想定した沈下幅の範囲で複数個の不同沈下が発生した状況を考えて。軟弱粘土層で生ずる不同沈下の個数が増加するにつれて、地盤表面に生ずる不同沈下量も大きくなることがわかる(図一七)。地盤表面に現れてくる不同沈下は、軟弱粘土層であるAC<sub>1</sub>層とAC<sub>2</sub>層に起因する沈下を重ね合わせたものであるので、図一八に示すように、沈下幅30mで最大沈下量が14cmと推定される。

### 3.2 不同沈下量の経年変化

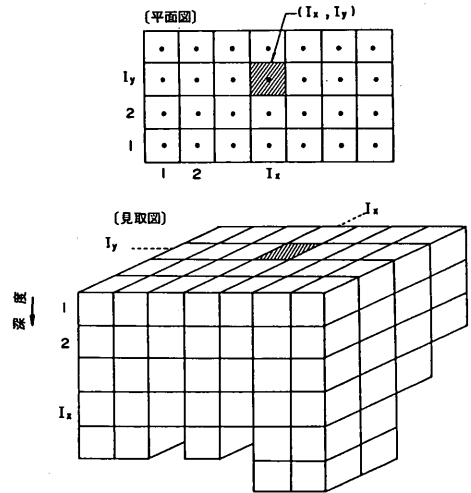
舗装建設後に生ずる地盤の不同沈下が舗装の挙動に及ぼす影響を検討するためには、舗装の設計期間中の不同沈下の状況を把握しなければならない。具体的には沈下状況の経年変化といったことであるが、これは3.1で述べた手法では扱えないので、土田らが開発した不同沈下のシミュレーションモデル<sup>6)</sup>を使用した。これは、地盤を図一九に示すブロックに分割し、それぞれのブロックでは隣接するメッシュとは無関係に沈下が生ずるものとして、次元圧密理論により計算する手法である。各ブロックの土質定数は、それぞれある確率モデルに従う確率変数としてランダムに割り付けられる。この確率モデルは、実際の地盤調査データに基づいて決定される。



図一七 軟弱粘土層上面での不同沈下の個数が地盤表面の沈下形状に及ぼす影響



図一八 地盤表面における不同沈下の形状



図一九 地盤の分割<sup>6)</sup>

この不同沈下のシミュレーションは、図一十に示すように、エプロンを貨物地区(200m×675m)、ターミナル地区(200m×1,350m)、整備地区(150m×600m)に分けて実施した。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、メッシュの大きさを25m×25mにして20回の試行を行った。それぞれの地区の

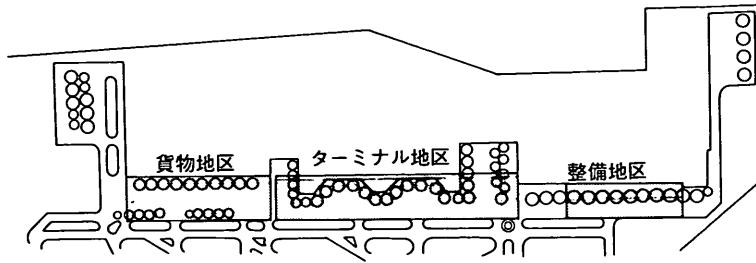


図-10 シミュレーションにおけるエプロン地区の分割

平均沈下量を図-11に示す。この図から、地区によって沈下量が異なり、整備地区が最も大きく、次にターミナル地区、貨物地区となっていることがわかる。

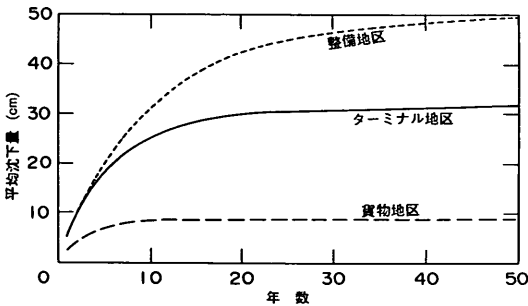


図-11 平均沈下量の経年変化

不同沈下は文字どおり不均一な沈下を意味するが、ここでは目的に応じて、二とおりに数値で表現した。一つは、舗装表面のレベル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、他の構造物との接合、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、沈下の状況を直線とみなし、2地点間の勾配により不同沈下量を定義した。後者では、コンクリート版と路盤との間に空隙ができることにより、航空機荷重が載った場合に破損すると考えられる。この空隙は、地盤の沈下状況を曲線とみなすことによって生ずることとなるが、その形状を3次曲線とみなした場合の2地点間の沈下量の差を不同沈下量と定義した。

図-12~14は、沈下を直線とみなした場合の勾配変化の頻度を表している(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していき、勾配変化の著しいものが増加してくる。地

区別では、整備地区で最も勾配変化が大きく、次にターミナル地区、貨物地区となっている。

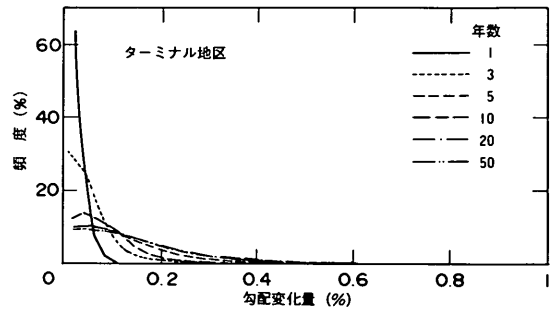


図-12 勾配変化の頻度 (ターミナル地区)

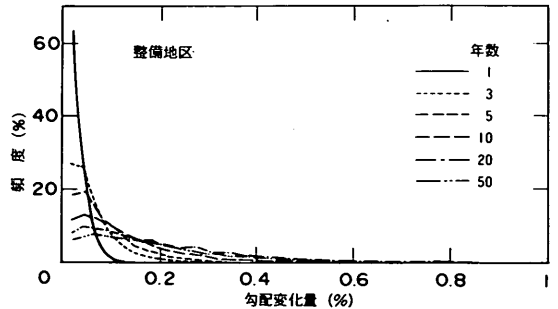


図-13 勾配変化の頻度 (整備地区)

図-15~17は、沈下を3次曲線とみなした場合の不同沈下量の頻度を表している。これらの図は、各地区毎のデータであり、各々、凹状沈下の場合、凸状沈下の場合に分けて示してある(頻度は1 cmごとに集計した)。沈下を3次曲線とみなす場合は、直線とみなす場合に比べて、コンクリート版と路盤との間に空隙が生じて構造上問題となるものは少ないようであるが、沈下の傾向は類似している。すなわち、舗装建設後、年数が経過するに

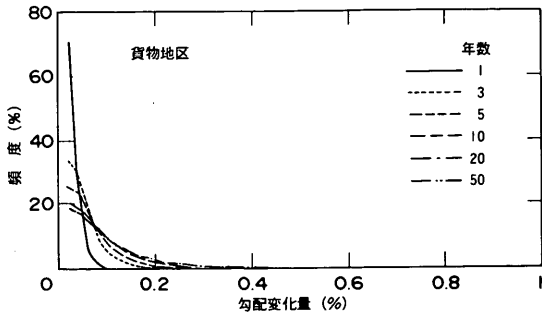
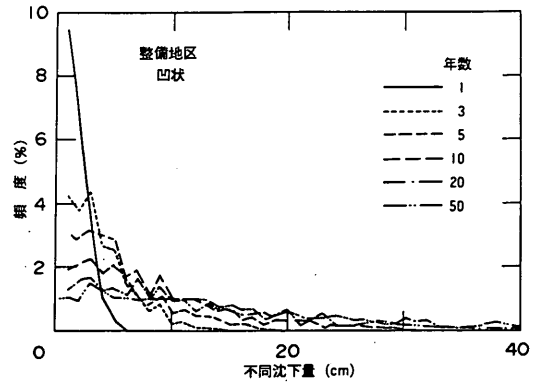
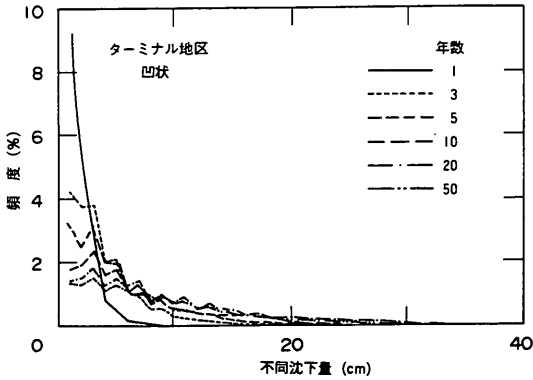


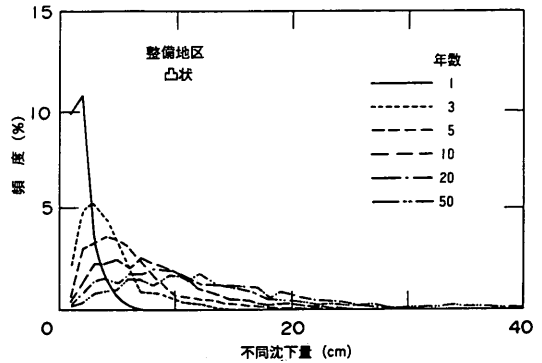
図-14 勾配変化の頻度 (貨物地区)



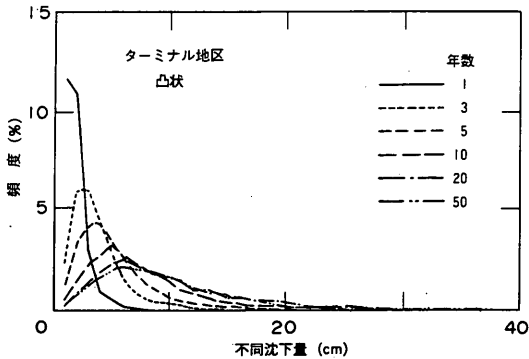
a) 凹状沈下



a) 凹状沈下



b) 凸状沈下



b) 凸状沈下

図-15 不同沈下量の頻度 (ターミナル地区)

図-16 不同沈下量の頻度 (整備地区)

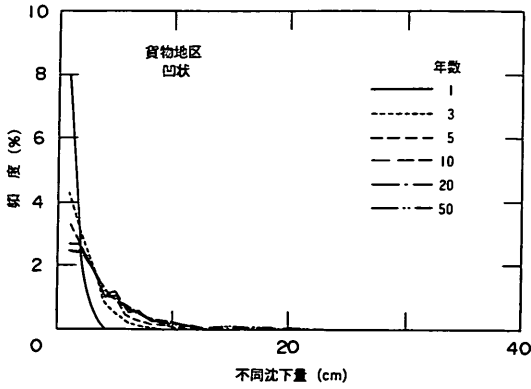
つれて、不同沈下量はばらついたものとなり、大きなものも増えてくるのがわかる。

#### 4. 舗装の表面勾配に関する検討

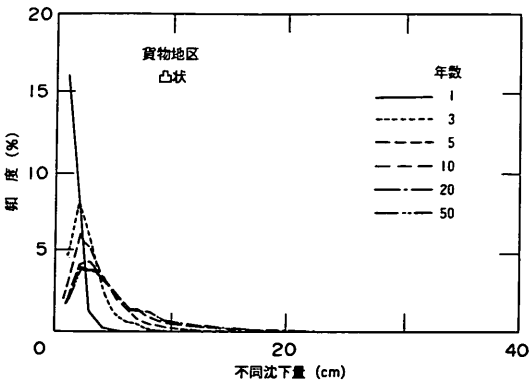
地盤中の軟弱粘土層の圧密により地表面には不同沈下が生ずることはすでに述べた。このような不同沈下に舗装が十分に追従して沈下した場合、舗装表面にも同程度

の不陸が生ずることとなるが、この舗装表面の勾配については、前述のように、航空機の運用上や排水性の面から規定がなされており(基準勾配と称す)、最小で0.5%、最大で1.0%となっている。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が、ここではそれを補修必要率と定義する。舗装表面の勾配は、舗装の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、ここでは勾配変化許容値( $\alpha_a$ )と称することにする(厳密に言えば、これは地盤面の沈下形状に関してのものであり、舗装表面のものとは異なる)。

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-18~20である。この図から、 $\alpha_a$ 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り、

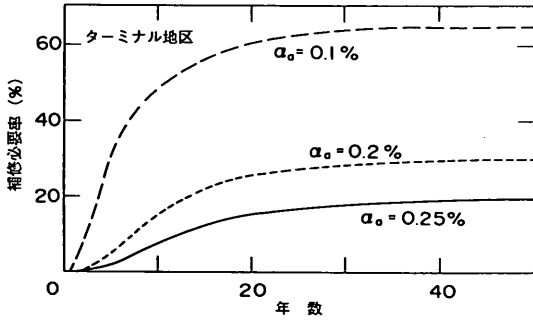


a) 凹状沈下



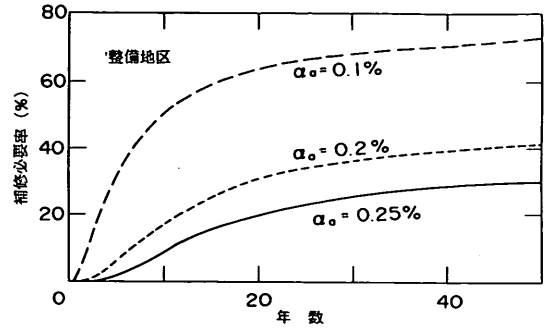
b) 凸状沈下

図一七 不同沈下量の頻度 (貨物地区)

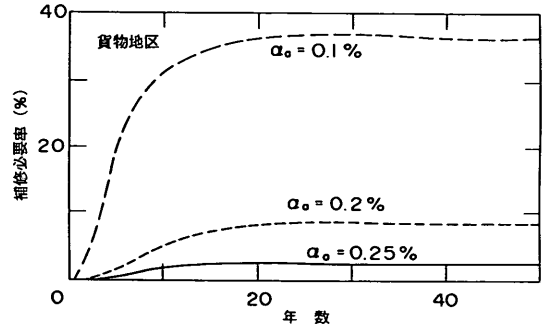


図一八 補修必要率の経年変化 (ターミナル地区)

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、 $\alpha_0=0.1, 0.2, 0.25\%$ 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。



図一九 補修必要率の経年変化 (整備地区)



図二〇 補修必要率の経年変化 (貨物地区)

以上の議論は、表面勾配の基準を厳密に適用した場合のものであるが、この基準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い。言い換えれば、表面勾配がこの基準値を超えて、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初めて補修が要請されることとなろう。機能上の問題としては、勾配が大きくなれば航空機の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と考えられる。前者については1.2%程度までが運用可能と推定され、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。まず、前述のように、不同沈下のシミュレーションが地盤を25m×25mのメッシュに分割して20回の試行を実施したのもので、これにより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た。

そして、勾配変化率の累積頻度が0.15%となるときのものを最大勾配変化量とし、これと  $\alpha_a$  の和を最大勾配とした。この累積頻度が0.15%という値は、言うまでもなく、平均値と標準偏差の3倍の和を意味している。

この最大勾配変化量の状況を図-21に示すが、各地区とも、建設後当初は勾配の変化が著しいが、年数の経過につれて変化が小さくなっていくことがわかる。地区別で見ると、整備地区で勾配変化が最も著しく、次にターミナル地区、貨物地区の順となっている。この図を用いて、地区ごと、各勾配変化許容値ごとに最大勾配が限界勾配を超過する時期、すなわち補修工事を実際に行うべき時期がわかる。それを舗装建設後20年まで示したものが表-3である。

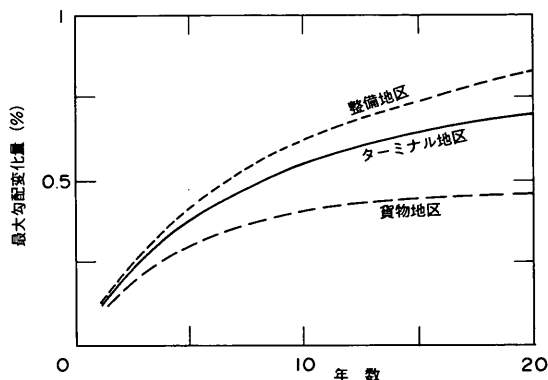


図-21 最大勾配変化量の経年変化

表-3 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	—
	0.2	5.5	11.9	—
	0.1	3.4	7.7	19.1
整備	0.25	5.7	15.8	—
	0.2	4.6	9.4	17.9
	0.1	3.0	6.6	13.1
貨物	0.25	16.4	—	—
	0.2	9.1	—	—
	0.1	4.9	—	—

次に、この工事の範囲であるが、補修工事後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-18~20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-4である。

表-4 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)	—
	0.2	5.6	18.5(12.9)	—
	0.1	18.0	43.6(25.6)	60.1(16.5)
整備	0.25	2.7	16.8(14.1)	—
	0.2	5.6	16.2(10.6)	28.8(12.6)
	0.1	18.4	39.9(21.5)	56.4(16.5)
貨物	0.25	2.4	—	—
	0.2	4.3	—	—
	0.1	18.1	—	—

注) 2回目、3回目て( )内の数字は新規工事分

以上、本節で論じたものは、舗装が地盤の不同沈下に十分に追随する、すなわち、舗装表面の変形は地盤の変形そのものであるとみなしている。したがって、舗装の種類によらず適用できるものである。

### 5. 舗装の破損に関する検討

4.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。そこで、ここでは、舗装が建設された地盤に不同沈下が生じて、舗装は必ずしも十分には追随しない、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挙動を解析した。この場合、空隙の大きさがコンクリート版に及ぼす影響は、舗装の種類によって異なってくると思われるので、ここでは2.で示した4種類の舗装別に検討する。

#### 5.1 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、荷重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プバーもしくはその周囲のコンクリートに生ずる応力が、それぞれ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、まず最初に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にする。

(1) 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 支承上の板の有限要素法を使用した。<sup>7)</sup> 計算条件としては、支持力係数が  $7 \text{ kgf/cm}^3$  である路盤上に、縦、横方向とも目地間隔が  $7.5\text{m}$  のコンクリート版 (弾性係数  $350,000\text{kgf/cm}^2$ 、ポアソン比  $0.15$ ) があるもの考えた。地盤の不同沈下は、3. で論じたように、沈下幅が  $30\text{m}$  のものとしたが、このような沈下が生じた場合、コンクリート舗装は、図-22のように地盤に追従するものと考えられた。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従するかを検討した結果に基づくものである。ここでは、 $7.5\text{m} \times 7.5\text{m}$  のコンクリート版9枚からなる舗装の場合で、沈下幅  $30\text{m}$  で  $20\text{cm}$  の不同沈下が生じたものを検討したが、それぞれのコンクリート版は少なくとも隅角の4点で路盤に支持されることがわかった。

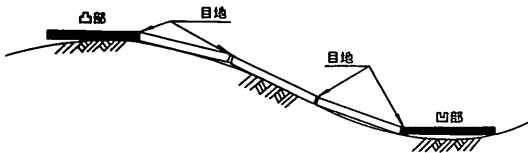
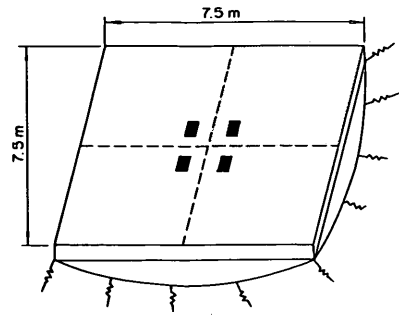
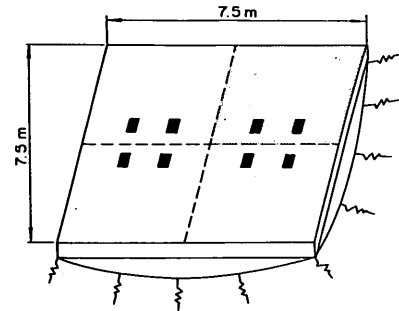


図-22 地盤の沈下に対するコンクリート版の追従性

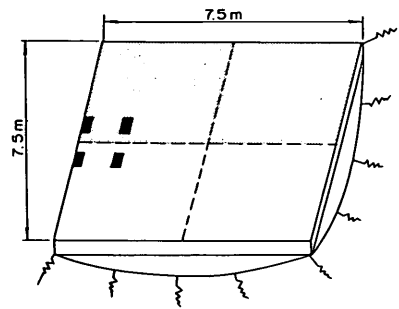
したがって、コンクリート版にとって最も厳しい載荷状態になるのは、沈下形状における2つの頂点(凹部、凸部)の部分に航空機が載った場合であると推定されたので、荷重応力の計算は、1枚のコンクリート版が4点で支持されたモデルによった。この場合、航空機の載荷状態としては、設計対象航空機である B-747-200B の1脚もしくは2脚が、版中央部あるいは目地部に載る場合を想定した。すなわち、凹状の沈下に対しては図-23に示す4ケースを考え、凸状の沈下に対しては図-24に示すもの考えた。



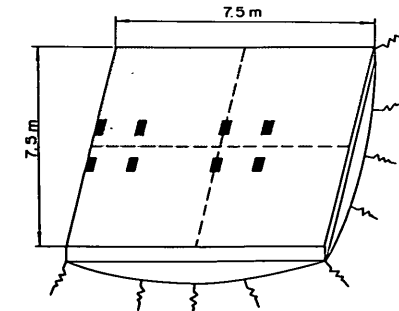
a) 中央部1脚載荷



b) 中央部2脚載荷



c) 目地部1脚載荷



d) 目地部2脚載荷

図-23 凹状沈下の場合の計算

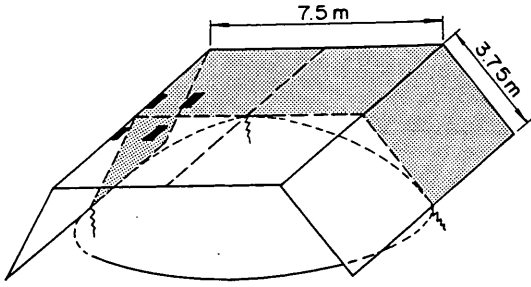


図-24 凸状沈下の場合の計算

地盤の不同沈下には路床・路盤は追従するものと考えたので、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的な挙動を考慮する必要があると考えた。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1/2とする方法の2種類について検討した。前者の場合、ステップ1で使用する有効弾性係数としては、 $E_c^* (= E_c / (1 + \phi_c))$ 、 $E_c$ ：コンクリートの弾性係数で350,000kgf/cm<sup>2</sup>、 $\phi_c$ ：コンクリートのクリープ係数で2.0)を用いた。ステップ2は短時間荷重なので、コンクリートの弾性係数として350,000kgf/cm<sup>2</sup>を使用した。そして、ステップ1と2で得られた応力の和が荷重による応力ということになる。

図-25は、2つの方法による荷重応力を示したものである(コンクリート版厚：38cm)。有効弾性係数によるものは、自重による応力を1/2とするものよりも1割程度応力が小さく計算されるようである。これらの2方法は、どちらも舗装の設計に使用された例はなく、後者の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大きいと考えて、それを使用することとした。

コンクリート舗装には目地が存在するため、荷重が載荷されたときにコンクリート版に発生する応力の大きさは、荷重位置によって異なったものとなる。<sup>7)</sup> 地盤の不同沈下がない場合には、目地部に載荷された場合にコンクリート版に生ずる応力は最大となるが、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

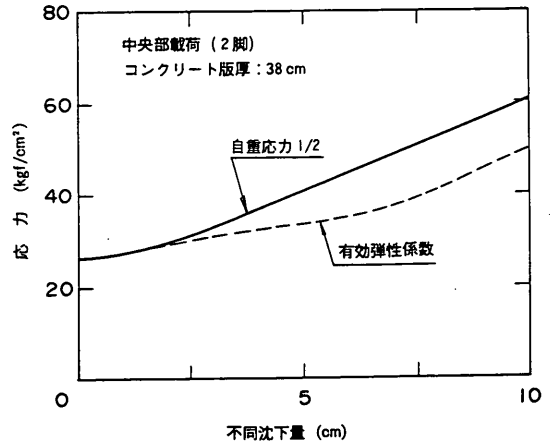


図-25 計算方法の違いによる荷重応力

ことが想定されたので、目地部荷重と中央部荷重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<sup>8)</sup>によるものと同様に、縁部荷重時の応力の75%とした。これは、目地の荷重伝達率として90%程度を見込んでいるが<sup>3, 7)</sup>ここでは各目地にスリップバーを設けることとしたので、その程度の荷重伝達機能は維持できると考えた。図-26には、中央部荷重と目地部荷重の場合のコンクリート版の荷重応力を、種々の不同沈下量に対して示した。これは、版厚が38cmで、凹状の沈下が生じた場合であるが、不同沈下が比較的小さい間は目地部荷重時のほうが応力が大きいものの、沈下の進行につれて中央部荷重のほうが大きい値を示すようになることがわかる。

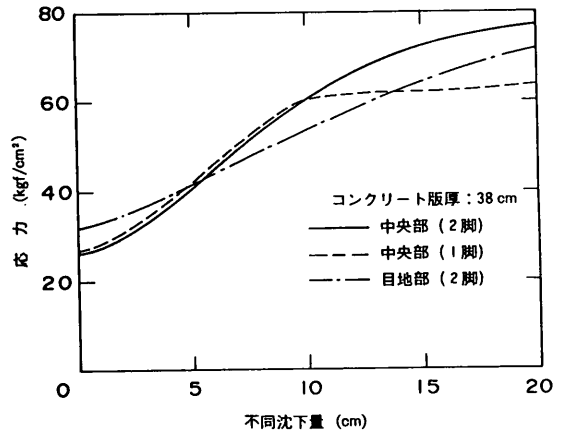


図-26 荷重位置の違いによる荷重応力

図-27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ようである。凸状沈下の場合はコンクリート版表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、コンクリート版厚が38cmの場合であるが、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では不十分となることがわかる。

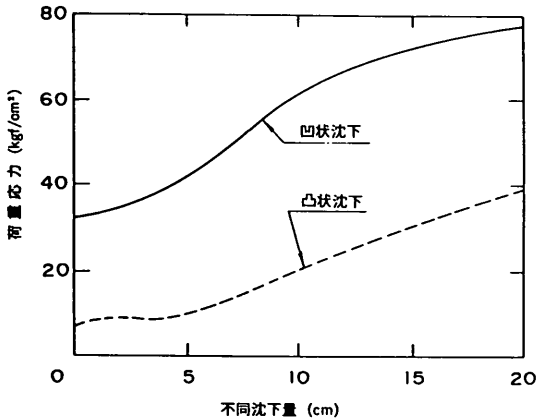


図-27 コンクリート版の応力に及ぼす不同沈下の影響

(2) コンクリート版の終局破壊

前述のように、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ずる。このうち、荷重による応力は、(1)に示した方法により計算する。また、温度応力( $\sigma_t$ )の算定には、次式で表される岩間による方法<sup>9),10)</sup>を用いた。

$$\sigma_t = 0.35 \cdot C_w \cdot \alpha \cdot E \cdot \theta \quad (1)$$

ここに、 $C_w$ ：そり拘束係数 (表-5 参照)，

$\alpha$ ：コンクリートの線膨張係数 ( $1 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ )，

$E$ ：コンクリートの弾性係数 ( $350,000 \text{ kgf/cm}^2$ )，

$\theta$ ：コンクリート版上下面の温度差 (図-28<sup>11)</sup>に示した港湾技術研究所野比実験場での実測値等を参考にして、上面が下面より高い場合、低い場合で、それぞれ、 $15^{\circ}\text{C}$ 、 $8^{\circ}\text{C}$ とした)。

表-5 そり拘束係数<sup>10)</sup>

収縮目地間隔(m)	5.0	6.0	7.5	8.0	10.0	12.5	15.0	
拘束係数 $C_w$	正	0.85	0.91	0.95	0.95	0.96	0.97	0.98
	負	0.40	0.55	0.73	0.78	0.90	0.93	0.95

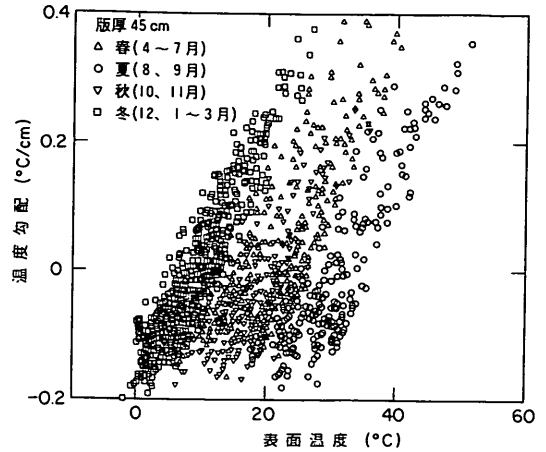


図-28 表面温度と温度勾配の関係<sup>11)</sup>

(3) コンクリート版の疲労破壊

疲労を表す尺度となるマイナー則は次式で表される。

$$\text{疲労度}(f) = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} \quad (2)$$

ここに、 $m$ ：コンクリート版に発生する応力の区分数、  
 $n_i$ ： $i$ 番目の区分に入る応力が発生する回数、  
 $N_i$ ： $i$ 番目の区分に入る応力に対する疲労破壊回数。

ここでは、疲労度( $f$ )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。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、不同沈下量に応じた大きさの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(模式的には図-29に示すようになる)、これを考慮に入れてコンクリートの疲労曲線を修正した(図-30、NC：無筋コンクリート舗装、SFRC：鋼繊維補強コンクリート舗装)<sup>10),12)</sup>。具体的には、参考文献12)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した。

(4) 目地部の破損

目地としてはスリップバー目地を用いるのを標準と考えたので、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プバーの折れ曲がり可能角度を

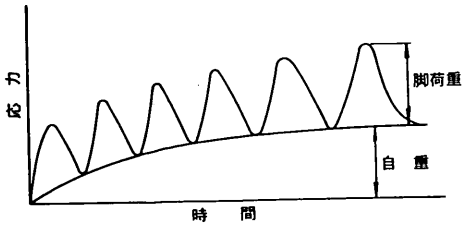


図-29 沈下にもなう荷重応力の変化

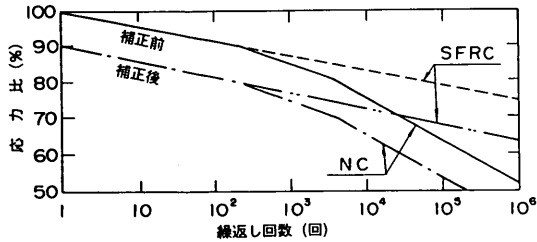


図-30 修正したコンクリートの疲労曲線

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、スリッパー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ーに加わったと考えることによって算出できる。その方法は、図-31に示したように、スリッパーをWinkler支承上のはりとして解析するものである。<sup>13)</sup> 具体的には、まず、空港コンクリート舗装構造設計要領<sup>9)</sup>の方法に従って、スリッパーの設計を行う。次に、鉄筋の許容引張応力とコンクリートの許容支圧応力としてそれぞれの降伏点強度を用いて、スリッパー1本当たりの伝達可能荷重を算定する。そして、たわみを求めて、スリッパーの折れ曲がり角を算定し、沈下幅30mの不同沈下量(または地盤の沈下形状の曲率半径)に換算すればよい。

目地幅を3mmとして計算した結果、コンクリート版厚38cmの場合のスリッパーの折れ曲がり可能角度は、17°となった。これを不同沈下量に換算すると18cm(沈下幅30m)となった。

### 5. 2 破損状態からみた舗装の補修基準

5. 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たが、ここでは3. 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。そして、舗装の種類別の補修基準について言及する。

#### (1)舗装の破損による補修基準

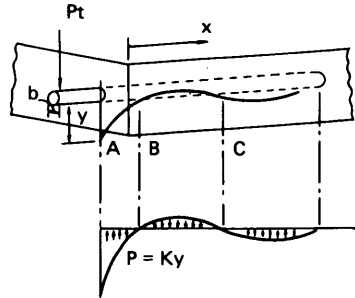


図-31 スリッパーの挙動

5. 1で述べたように、コンクリート版のひびわれと目地部の破損は、地盤の不同沈下と関係づけられる。地盤の不同沈下の経年変化は、3. で示したように把握できているので、これら舗装の破損の経年的な変化状況についても把握することが可能である。舗装が航空機の運航上の規定である表面勾配を逸脱するような状況になった場合には、それは必ず補修しなければならず、4. で示した手法により補修がなされると考えた。これに対して、ここで考えている舗装の破損の場合には、空港舗装補修要領(案)<sup>14)</sup>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としてよかろう。この方法では、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。ただしここでは、地盤を25m×25mの大きさのメッシュ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ず、空港舗装補修要領(案)のものとは若干大きさが異なったものとなっている。このように、ユニットの大きさが違っているため、厳密さに欠ける恐れはあるが、補修の必要性は、空港舗装補修要領(案)に示した基準(表-6)を採用することにした。この表では、補修が早急に必要であると評価される破損状態は、ひびわれ度と目地部破損のそれぞれで11.1cm/m<sup>2</sup>、5.7%となっている。

#### (2) ひびわれ度の算定

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して、ひびわれ度を求めればよい。破

表一六 路面性状による補修基準<sup>14)</sup>

項目	舗装区域	評価の境界	
		AとB	BとC
ひびわれ度 (cm/m <sup>2</sup> )	滑走路	0.2	5.6
	誘導路	0.6	7.6
	エプロン	1.1	11.1
目地部の 破損率(%)	滑走路	0.1	1.3
	誘導路	0.1	3.2
	エプロン	0.1	5.7
段差 (mm)	滑走路	5	10
	誘導路	5	12
	エプロン	6	14

注) A: 補修は必要ない  
 B: 近いうちの補修が望ましい  
 C: 早急に補修の必要がある

壊曲率を超える範囲は、曲率の計算を縦・横2方向に行き、そのうち広くなるほうを半径とする円で囲まれる範囲として計算した(図-32)。ひびわれ長は、次式によって計算されると考えたが、ここでは、コンクリート版には縦・横2方向にひびわれが入るものとして計算した。

$$\text{ひびわれ長} = 2 \cdot L \cdot (S_r/S) \quad (3)$$

ここに、L: コンクリート版の1辺の長さ、  
 S<sub>r</sub>: 許容勾配を上回る範囲、  
 S: コンクリート版1枚の面積。

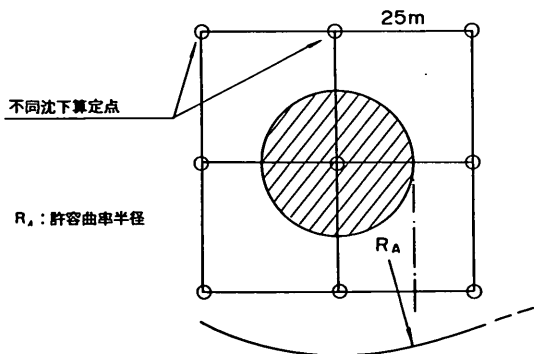
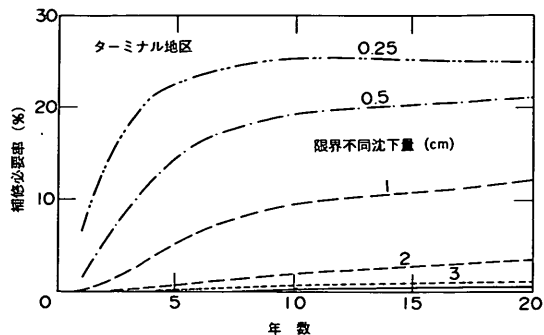


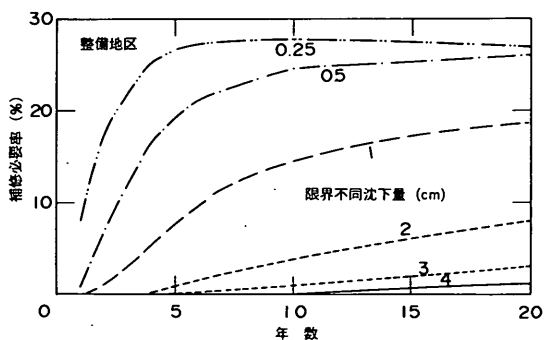
図-32 設定した曲率を超える範囲の計算法

これに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。表一六に示した基準により早急に補修が必要と判断される値(11.1cm/m<sup>2</sup>)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)を地区別に示したものが図-33である。当然ではあるが、補修必要率は、

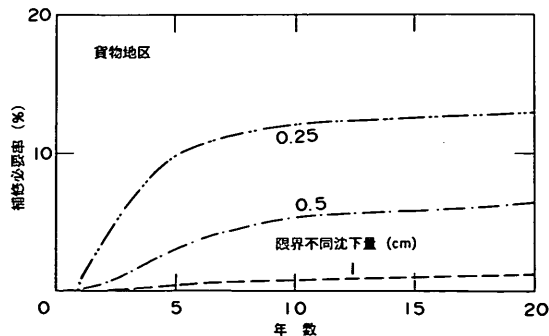
舗装建設後の年数の経過につれて増加する。なお、不同沈下量がどの程度になればひびわれが発生するかといった点については後述するが、この図では任意に想定した限界不同沈下量(それ以下ではひびわれでは発生しない不同沈下量)別に補修必要率を示している。



a) ターミナル地区



b) 整備地区



c) 貨物地区

図-33 早急に補修が必要とされるユニット数

(3) 目地部破損率の算定

目地部の破損率の算定方法は(2)のものと同様であるが、目地部の破損長さは、設計条件から定まる値を上回るような不同沈下が生じた範囲のコンクリート版の周囲の目地部には破損が生ずるものとして計算した。目地部の破損長さは、次式のように表される。

$$\text{目地部破損長さ} = 4 \cdot L \cdot (S_r/S) \quad (4)$$

コンクリート版厚が38cmの場合には、前述のように、不同沈下量が18cm(沈下幅30m)に達すると目地部の破損が生ずることとなった。3. 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年までの間はこの18cmを超えるような不同沈下は生じないようである。

5. 3 舗装の種類別の破損

4. では、基準勾配からの逸脱に対する補修の範囲を示すことが可能であったが、これは、コンクリート舗装の種類や、コンクリート版厚の違いを考慮せずに、地盤の沈下形状だけに着目したためであった。しかし、ここで論じているコンクリート舗装版の破損については、これらの要因が大きく影響するので、舗装の種類ごとに以下で論ずることとする。

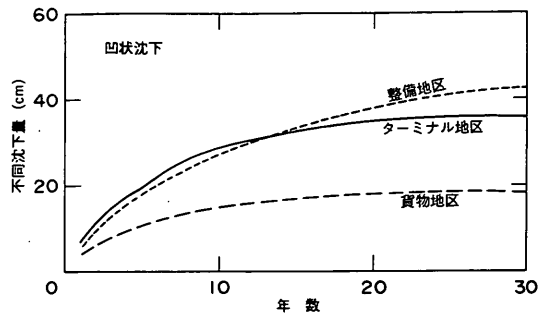
(1) 無筋コンクリート舗装

無筋コンクリート舗装に終局破壊をもたらすような不同沈下量は、版厚によって異なり、表一七に示すようになる。この表と前掲の破損範囲の経年変化を示した図一33と併せて、補修時期とその範囲が定められる。

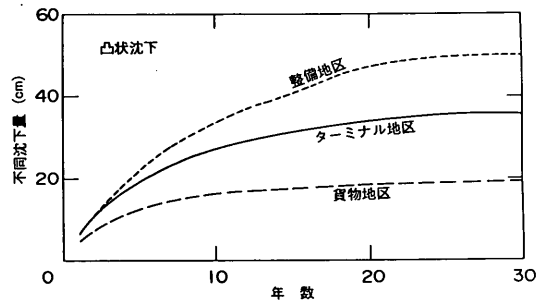
表一七 終局破壊時の不同沈下量

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

コンクリート版が疲労破壊を起こすような場合も、終局破壊の場合と同様な手法で、補修時期と範囲が算定可能である。まず、疲労破壊を起こすような不同沈下量を求める必要がある。図一34は4. で示したものと同様に、累積頻度が0.15%となるときの不同沈下量の経年変化を、地区別、沈下形状別に示してある。この図を参考にして、任意の地点の不同沈下は放物線状に経年的に変化すると



a) 凹状沈下の場合



b) 凸状沈下の場合

図一34 不同沈下量の経年変化

みなして、疲労破壊時の沈下量を算定した。図一35には、1日当たり10, 14, 20便の航空機がスポットを使用するとして計算した結果である。最も使用頻度の高いと考えられているスポットでも1日14便なので、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が0.8cmであったことを考え併せると、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よう。

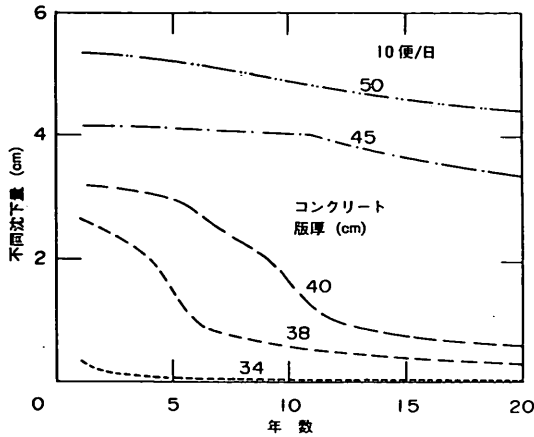
(2) 鋼繊維補強コンクリート舗装

鋼繊維補強コンクリート舗装の場合と同じものであるが、鋼繊維補強コンクリートの強度は鋼繊維混入量によって変化するので、ここではコンクリート版厚を38cmとしたまま、60kgf/cm<sup>2</sup>, 70kgf/cm<sup>2</sup>として計算を進めた。(1)で示した無筋コンクリート舗装の場合と同様に、それぞれの終局破壊時の不同沈下量は表一八のようになる。

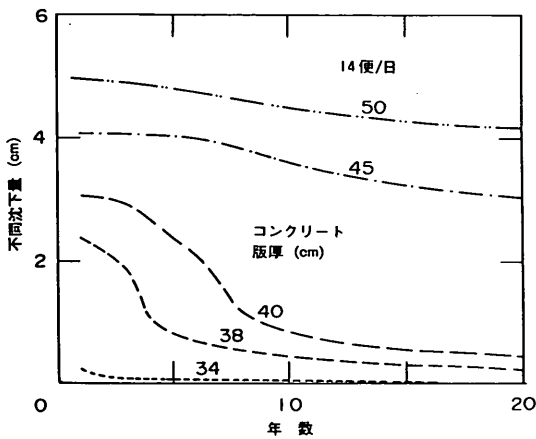
疲労破壊については、疲労曲線が無筋コンクリートの場合と若干異なるが、基本的には無筋コンクリートの場合と同様な手法により検討可能である。図一36には、1日当たりの便数別に疲労破壊時の不同沈下量を示してあ

表-8 終局破壊時の不同沈下量

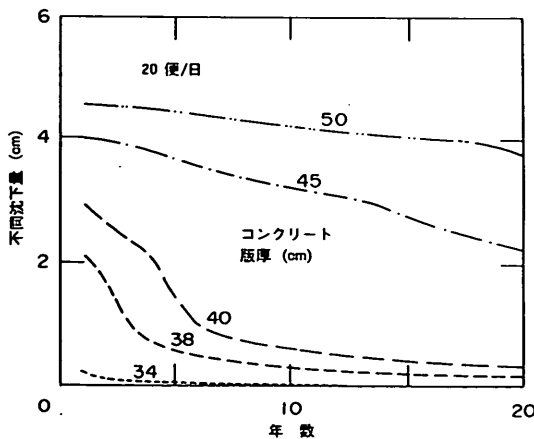
コンクリートの曲げ強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	不同沈下量 (cm)
50	0.8
60	5.3
70	7.8



a) 1日当たりの便数が10便の場合



b) 1日当たりの便数が14便の場合



c) 1日当たりの便数が20便の場合

図-35 疲労破壊時の不同沈下量

る(それぞれ、曲げ強度が60kgf/cm<sup>2</sup>、70kgf/cm<sup>2</sup>)。鋼繊維補強コンクリートの場合、疲労破壊を起こすような不同沈下量は年数によってもあまり変化なく、1日当たりの便数を14便とした場合、疲労破壊を起こすときの不同沈下量は、それぞれの曲げ強度に対して、5.5cm、7.5cm程度となっている。

(3) 連続鉄筋コンクリート舗装

連続鉄筋コンクリート舗装は基本的には横目地を省略したものであるため、ここでは、縦・横方向別に検討した。

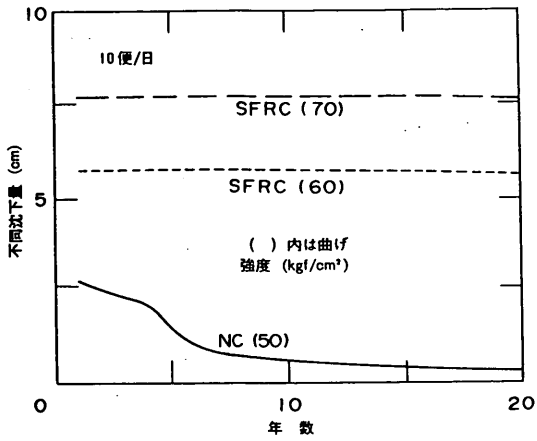
縦方向にはひびわれ部でコンクリート版が折れ曲がると思った。コンクリート版厚が38cmの場合、鉄筋によるひびわれ制御式<sup>15)</sup>によれば、最大ひびわれ間隔が160cm、ひびわれ幅が0.28mmとなった。これから折れ曲がり可能角度が算定できるが、不同沈下量で7cm(沈下幅30m)、曲率半径で2,200mになる。これを超えるような沈下が発生すると、ひびわれ部の破損が生ずることとなるが、この場合の補修基準は無筋コンクリート舗装の場合の目地部破損のものに準ずればよい(ただし、破損率は式(4)によるものの1/2となる)。

横方向には、地盤の不同沈下によりコンクリート版にひびわれが縦方向に入る場合と目地部での折れ曲がり注目した。ひびわれ度の算定方法は無筋コンクリート舗装の場合を踏襲すればよい。ただし、連続鉄筋コンクリート舗装の場合、ひびわれは1方向のみに入ると考えるので、ひびわれ度の頻度分布の場合の1/2になる。また、目地部の折れ曲がりについては無筋コンクリート舗装の場合と同様である。

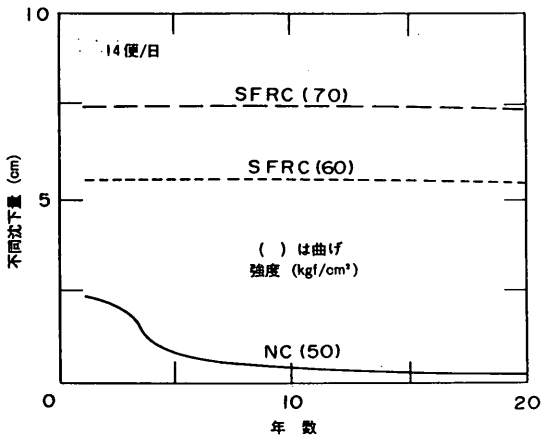
(4) プレストレストコンクリート舗装

プレストレストコンクリート舗装の破壊については、(1)~(3)の場合と異なり、以下の点について考察することが必要となる。

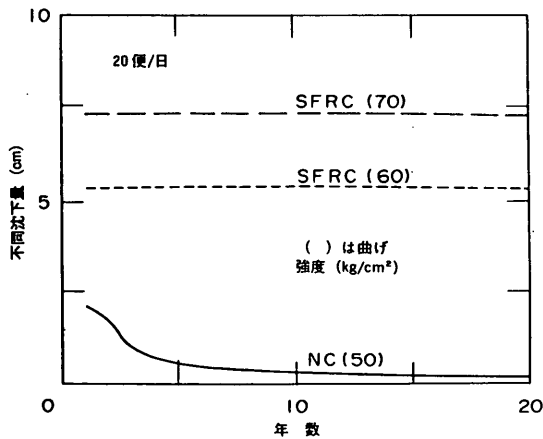
まず、地盤が凸状に沈下した場合は、コンクリート版上面に曲げひびわれが発生しないかどうか調べなければならない。これは、プレストレストコンクリート舗装では版下面のひびわれは許容しても、上面のものについては許容していないからである。また、地盤が凹状に沈下した場合には、コンクリート版上面の圧縮破壊、PC鋼材



a) 1日当たりの便数が10便の場合



b) 1日当たりの便数が14便の場合



c) 1日当たりの便数が20便の場合

図-36 疲労破壊時の不同沈下量

の降伏、コンクリート版上面の曲げひびわれ発生といった点に関する検討が必要である。さらに、コンクリート版下面にひびわれを許容しているといっても、それは載荷時だけであるので、地盤の不同沈下にコンクリート版が追随することによって、自重だけでひびわれが開口しないかどうか、検討しなければならない。

## 6. 不同沈下を考慮した設計法

本章では、前章までに実施してきた地盤の不同沈下量の経年変化、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、メンテナンスシステムの策定について論ずる。まず、6.1では、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、舗装のトータルコストの算定方法について述べる。次に、6.2として、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。そして、6.3では、路面性状の規定による補修工事も実施することが可能であるとして、解析期間中のトータルコストを考慮に入れたマネジメントシステムの策定について論ずる。

### 6.1 検討の基本方針

#### (1) 補修工事の実施時期

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、マネジメント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、あるいは早急に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は規定は設けられていない。このうち、前者については運航面を考慮して許容勾配 $\pm 0.2\%$  ( $0.3\sim 1.2\%$ )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。路面性状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 $70\text{m}\times 190\text{m}$ 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、この内の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。



(2) 舗装のトータルコストの算定法

舗装の経済性については、初期コストだけに目が向けられる傾向が強い。しかし、10年を設計期間として、計画・設計されているわが国の空港舗装は、ある程度の確実性をもって交通量の予測が可能な期間が10年であるというだけであって、それは舗装の寿命を意味しているわけではない。交通量の急激な増加といったことばかりではなく、ここで対象としているような軟弱地盤の不同沈下等にも対応して、舗装の寿命をいかに延ばしていくかという問題は、非常に重要なものであり、経済分析は、それらの意志決定をする上での基礎的資料として位置づけられる。

一般的に、舗装の経済性を評価する場合には、費用(管理者側、利用者側)と便益とを算出して、総合的になさなければならない。その方法には数種類あるが、解析期間、割引率(将来の費用、便益を現在価値に換算するときに使用)、残存価値といったものを考える点では同じである。空港の場合は、便益を定量化することは難しいので、ここでは、費用、それも管理者のもののみを考えることにし、手法としては現在価値法によることとする。これは、実用に供されている例も多いとされる手法であり、その概要は以下のようなものである。"

$$TPWC_{x,n} = (ICC)_x + \sum_{i=0}^n pwf_{i,t} \{ (CC)_{x,t} + (MO)_{x,t} + (UC)_{x,t} \} - (SV)_{x,n} pwf_{i,t} \quad (5)$$

ここに、 $TPWC_{x,n}$  : 解析期間  $n$  年における設計案  $x$  についての費用の現在価値、

$(ICC)_x$  : 設計案  $x$  についての初期建設費、

$(CC)_{x,t}$  :  $t$  年における設計案  $x$  についての建設費、

$(MO)_{x,t}$  :  $t$  年における設計案  $x$  に関する維持費と作業費の合計、

$(UC)_{x,t}$  :  $t$  年における設計案  $x$  に関する利用者費用、

$(SV)_{x,n}$  : 解析期間  $n$  年における設計案  $x$  の残存価値、

$pwf_{i,t}$  :  $i$  と  $t$  に対する現在価値係数 ( $= 1 / (1+i)^t$ )、

$i$  : 割引率、

$n$  : 年数。

6. 2 破損による補修を不要とする場合

今回対象としている舗装区域は、表-1に示したように、運用上工事可能時間に制約が設けられている。しか

し、ローディングスポット数の絶対的な不足から、昼夜工事可能となっている区域においても昼間はローディングスポットとして使用しなければならない状況となることも想定しておく必要がある。この場合、工事が可能なのは夜間だけとなるが、このような状況下では、補修工事を実施する回数を極力抑えることが必要となろう。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。これに対して、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、解析期間中は補修工事が不要とできよう。そこで、本節では、解析期間を空港コンクリート舗装要領で規定している設計期間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マネジメントシステムについて述べる。なお、ここでは、舗装の種類ごとにコンクリート版の厚さを決定する手法を論ずることに重点を置く。

(1) 無筋コンクリート舗装

解析期間を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、前掲の図-33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。これに対応するものを、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-7から読みとると、それぞれ、38cm, 39cm, 38cmとなる。これに対して、疲労破壊に関する基準では、コンクリート版厚を38cm、スポット使用便数を1日14便とすると、10年後では0.5cmとなることがわかる。終局破壊に関する基準のうちでは、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、40cm, 41cmとなることがわかる。

以上は、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に工事を実施すること、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、計算された結果である。しかし、より現実在即した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、ターミナル地区では1日14便でいいものの、整備地区、貨物地区では、それぞれ、1日2便、1日4便となっている。また、ユニット全体の1%で破損が生じた場合に、

補修をした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70m×190m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箇所ですら早急に補修が必要と判定される場合である。その箇所ですら工事が実施されている間は、従来は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、43cm、43cm、38cmのコンクリート版厚が必要となることがわかった。

## (2) 鋼繊維補強コンクリート舗装

鋼繊維補強コンクリート舗装の場合、表一8に示したように、終局破壊もしくは疲労破壊を起こす場合の不同沈下量は、曲げ強度が60kgf/cm<sup>2</sup>、70kgf/cm<sup>2</sup>の場合で、それぞれ、5.3cm、7.5cmであることがわかっている。(1)で示したように、ユニット全体のうち10%で破損が生じたときに工事を実施し、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便であるとの条件では、ひびわれ度の基準から補修が必要となるときの不同沈下量は最大で1.0cmであることがわかっている。したがって、この程度の強度を有する鋼繊維補強コンクリートを使用すれば少なくとも10年間は補修が必要とはならないことがわかる。

次に、(1)で実施したものと同様に、各地区ごとの計画便数を考慮し、ユニット全体の1%で破損が生じた場合に補修をするものとしても、最も不同沈下の著しい整備地区でも3cmまでに補修範囲が拡大されるだけで、上述の鋼繊維補強コンクリートの限界不同沈下量にはかなり余裕があるものとなっている。そこで、鋼繊維の混入率をどの程度まで下げれば、10年間でちょうど補修が必要となる状況となるのか検討してみた。その点について示したものが図-37である(便数が1日14便の場合)。曲げ強度が54kgf/cm<sup>2</sup>、57kgf/cm<sup>2</sup>の場合に、終局破壊が生ずることとなる不同沈下量は、それぞれ、3.1cm、4.2cmである。また、疲労破壊が生ずる場合には、1日14便を想定しても、前者で4.2cm、後方で5.1cmとなっている。これは上記の3cmよりも大きい値であり、鋼繊維補強コンクリートの曲げ強度を54kgf/cm<sup>2</sup>としても、10年間は補修が必要ではないことが認められよう。

鋼繊維の混入率をあまり少なくすることは、出来上がったコンクリートの品質にばらつきが生ずるので得策とはいえず、ここでは0.5%を最低としている。この混入率のとき、鋼繊維補強コンクリートの曲げ強度は、最低で

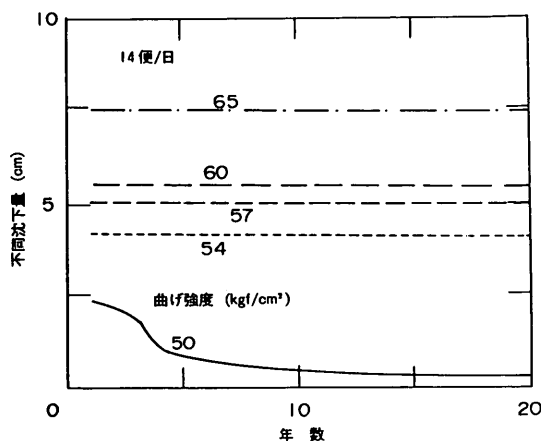


図-37 疲労破壊時の不同沈下量

も54kgf/cm<sup>2</sup>(ベースコンクリートの強度を50kgf/cm<sup>2</sup>として)が確保されていることがわかっている。<sup>16)</sup>したがって、鋼繊維の混入率を0.5%としても、10年間はひびわれ度の規定による補修は必要ないことがわかる。

## (3) 連続鉄筋コンクリート舗装

5. で述べたように、ひびわれ長さは無筋コンクリート舗装や鋼繊維補強コンクリート舗装の場合の1/2であるから、早急に補修が必要とされる範囲も無筋コンクリート舗装の場合とは異なったものとなる。ここでは、最も不同沈下が激しい整備地区で、全体の1%で破損が認められたときに補修を行うとしたときの不同沈下量を算定することにする。その場合の補修範囲の経年変化は、図-38に示すようなものとなり、これから、補修範囲が1%とした場合の不同沈下量は、2.4cmとなることがわかる。これは、前述の3cmを下回っており、連続鉄筋コンクリート舗装においてはひびわれに基づく補修は必要ないことがわかる。

## (4) プレストレストコンクリート舗装

プレストレストコンクリート舗装は、載荷時にはコンクリート版下面にひびわれの発生を許す第III種設計法によるものに限定した。地盤の不同沈下を考慮しない場合、今回の設計条件に対してはコンクリート版厚が18cm、有効プレストレスが33.5kgf/cm<sup>2</sup>となる。

施工条件に合わせて、1レーンの長さが100mのプレストレストコンクリート版について解析を行った結果、コンクリート版下面、上面に発生する最大応力は、それぞれ、116kgf/cm<sup>2</sup>、44.5kgf/cm<sup>2</sup>となることがわかった。また、温度応力は、コンクリート版上下面の温度差として10℃を考慮して、12.25kgf/cm<sup>2</sup>となった。

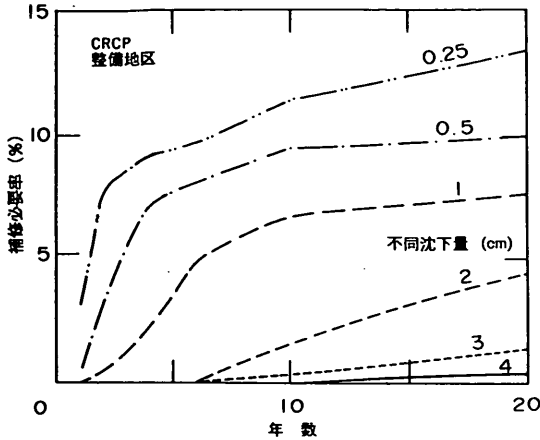


図-38 補修範囲の経年変化

プレストレストコンクリート舗装の破壊については、5.で述べた点について考察したが、どの点に関しても問題はないものと判断された。すなわち、ここで示した形式の舗装によれば10年間は構造破壊に起因する補修は必要ないことが認められた。

6. 3 トータルコストの比較による場合

6.2では、10年の設計期間の間、ひびわれ度の規定に基づく補修を行わなくともいようなコンクリート版の厚さを、コンクリート舗装の種類ごとに決定した。舗装マネジメントシステムは、一般には、設計期間中の補修の頻度等を考慮にいて、最も経済的効果の大きい舗装を選択するものである。これを実際の舗装計画に対して実施することは非常に煩雑となるので、6.2ではその点に関しては言及しなかった。しかし、舗装マネジメントシステムの策定にあたっては、この点に関する論述を避けるわけにいかないで、以下の条件に限定して経済効果を考えて舗装マネジメントシステムの策定について論ずることとする。

- ① 対象地区はターミナル地区
- ② 解析期間は20年とする
- ③ 無筋コンクリート舗装を建設する
- ④ 初期建設時のコンクリート版厚は38cmを確保する
- ⑤ ひびわれによる破損が生じたときにはコンクリートにて打ち換える

なお、ここでは、4.で述べた舗装表面の許容勾配からの逸脱に基づくものは含まれていない。これは、建設される舗装は無筋コンクリート舗装であり、許容勾配からの逸脱による補修工事はコンクリート版厚の違いには

よらないからである。

解析期間を20年としたので、初期建設時のコンクリート舗装として以下に示す3種類を考えた。

- ① 空港コンクリート舗装構造設計要領に示されているもの
- ② 建設後10年間はひびわれ度の規定に基づく補修はないもの
- ③ 建設後20年間はひびわれ度の規定に基づく補修はないもの

②の場合は、6.2での検討により、所要コンクリート版厚が43cmとなることがわかっている。これを算定した手法と同じものを③の場合にも適用すると、45cmとなった。この38cm、43cm、45cmについて、終局破壊について示した表-7、疲労破壊について示した図-35、ひびわれ度が11.1cm/m<sup>2</sup>を超える範囲を示した図-33から、舗装建設後20年間に必要となる補修工事を求めると表-9のようになる。コンクリート版厚が43cmのものは20年間に3回の補修工事(それぞれ1%の面積ずつ)を実施するだけでいいのに対し、コンクリート版厚38cmのものは建設後5年目から補修が必要となり、20年経過するまでに全体の26%で補修が必要となることがわかる。

表-9 補修の頻度と範囲

舗装建設後の 経過年数	補修の範囲 (%)		
	38	43	45
1	—	—	—
2	—	—	—
3	—	—	—
4	—	—	—
5	2	—	—
6	8	—	—
7	4	—	—
8	2	—	—
9	2	—	—
10	2	—	—
11	2	1	—
12	—	—	—
13	1	—	—
14	—	—	—
15	1	1	—
16	—	—	—
17	1	—	—
18	—	—	—
19	1	—	—
20	—	1	—

注) 38、43、45は、コンクリート版厚 (cm)

初期建設費はコンクリート版厚によって変わるが、コンクリート版厚38、43、45cmのそれぞれの場合で、舗装

面積 1 m<sup>2</sup>当たり13,400, 15,200, 15,500円として、エプロン1スポット(70m×190mの大きさ)の舗装をつくる場合の計算をする。6.1で述べたように、現在価値法によってこれらの経済性を比較することにするが、ここでは、最も簡単に、管理者側の費用のみを扱うことにする。それは、上述のように、補修工事を実施している期間は、ほかのスポットを流用することなどによって、航空機の運航に支障を与えないことが可能であるためである。

舗装の初期建設費は、コンクリート版厚38, 43, 45cmのそれぞれの場合で、178, 202, 206百万円となる。次に、表一9に従って補修を実施する場合のトータルコストを算出する(ただし、ここでは舗装の解体費は考慮していない)。コンクリート版厚38, 43, 45cmのそれぞれの場合で、割引率を考慮しないと225, 208, 206百万円となるが、割引率6%として考えれば、現在価値で207, 205, 206百万円となる。

厳密に言えば、式(5)にも示したように、舗装の経済性についての検討を行うためには、ここで考えた建設費といった費用のほかに、利用者の便益や舗装の残存価値といったことも考えなければならない。これは、補修工事を行うことにより旅客の乗降・貨物の積み降ろしがスムーズにできなくなることや、閉鎖スポット数が増加すれば航空機の着陸料等の収入が減少することといった点を考慮にいれなければならないことを意味する。しかし、これらについては現時点では不明確な点も多いので、ここでは建設費のみを考えてきた。その結果、3種類の舗装建設・補修計画によっても現在価値により経済性の比較を行うとほとんど差はないこととなる。このような場合には、予算の獲得具合、航空機の取り回しやすさ、補修の確実性といった点を総合的に判断して、最適な計画を策定することが必要となろう。

## 7. 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不同沈下管理について論じた。得られた知見をまとめると以下ようになる。

- (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、舗装の表面勾配の基準からの逸脱であり、もう一つは、コンクリート版と路盤の間に空隙が生ずることにより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別に

補修時期・範囲を算定した。著しい不同沈下が予想される地区では、20年間で60%程度の範囲で補修が必要になるものと推定された。

- (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。
- (4) ひびわれの発生は、終局破壊と疲労破壊の二つにより検討した。地区別、交通量別にひびわれの規定による補修頻度を算定した。各舗装種別毎にも補修頻度を算定した。
- (5) 解析期間を10年、20年とした場合の、空港コンクリート舗装の不同沈下管理について論じた。解析期間が10年の場合には、その期間中補修が不要となるように舗装を設計し、20年の場合には、補修も可能だとして経済性も考慮に入れてマネジメントシステムについて考察した。

## 8. おわりに

本研究により、海上埋立地のような軟弱地盤上にコンクリートを建設して、維持・補修しながら使用していく場合の方針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ろう。

本研究は、八谷が主として第二港湾建設局横浜調査設計事務所併任中に実施したものである。また、財団法人沿岸開発技術研究センターに設置した東京国際空港エプロン舗装構造研究会(奥村樹郎委員長)で専門家のご意見を承っている。関係各位に対して感謝申し上げる。

## 参考文献

- 1) Haas,R., W.R.Hudson : *Pavement Management Systems*, McGraw-Hill Inc., 457p., 1978.
- 2) 運輸省航空局監修 : 数字でみる航空1990, 航空振興財団, 264p., 1990.
- 3) 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回土質工学研究発表会講演集,

- pp.1489—1490, 1984.
- 4) 運輸省航空局：空港土木施設設計基準, 1989.
  - 5) 運輸省航空局：空港コンクリート舗装構造設計要領, 105p., 1977.
  - 6) 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.
  - 7) 福手 勤, 八谷好高, 山崎英男：コンクリート舗装の目地部における荷重伝達機能, 港湾技術研究所報告, 第21巻, 第2号, pp.207-236, 1982.
  - 8) Federal Aviation Administration : *FAA Advisory Circular*, AC150/5230-6C, 159p., 1978.
  - 9) 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.
  - 10) 日本道路協会：セメントコンクリート舗装要綱, 275 p., 1984.
  - 11) 八谷好高, 佐藤勝久, 田中孝士：コンクリート舗装構造の非破壊評価法の開発—フォーリングウェイトデフレクトメーターによる, 港湾技術研究所報告, 第26巻, 第2号, pp.465-492, 1987.
  - 12) 土木学会：コンクリート標準示方書（設計編）, 200 p., 1986.
  - 13) Yorder, E.J., M.W.Witczak : *Principles of Pavement Design*, Second Edition, John Wiler & Sons, pp.81-126, 1975.
  - 14) 運輸省航空局：空港舗装補修要領（案）, 95p., 1984.
  - 15) Ryoichi Sato, Yoshitaka Hachiya, Atsuhito Kawakami : Development of New Design Method for Control of Cracking in Continuously Reinforced Concrete Pavement, *Proceedings*, 4th International Conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation, pp.431-443, 1989.
  - 16) 土木学会：鋼繊維補強コンクリート設計施工指針（案）, コンクリートライブラリー第50号, 183p., 1983.