

# 東京国際空港PC舗装リフトアップ試験

八谷 好高\*1・早田 修一\*2・片山 忠\*3

## 1. はじめに

狭隘な国土のわが国では広大な空港用地を都市に近い平野に確保することが難しく、海上の埋立地に建設される場合が多い。そのような地盤は沈下や不同沈下が比較的大きいので、建設された舗装等の施設は建設期間中のみならず完成後もその影響を受けることになる。

運輸省港湾技術研究所では、民間と共同で、プレストレストコンクリート(PC)舗装建設後に沈下が生じた場合の補修工法として、リフトアップ工法を開発した。この工法の開発過程では小規模の試験施工を二度実施しているが、実用性を確かめるために、東京国際空港沖合展開事業第二期工事地区において、実規模大の試験舗装を建設して試験施工を実施した。

## 2. 東京国際空港沖合展開事業

### 2.1 東京国際空港

昭和63年には、航空機の離着陸回数が年間17万回、乗降客数が3000万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。その後、滑走路が3本となったが、近年の急激な航空需要の伸びに対処するために、昭和46

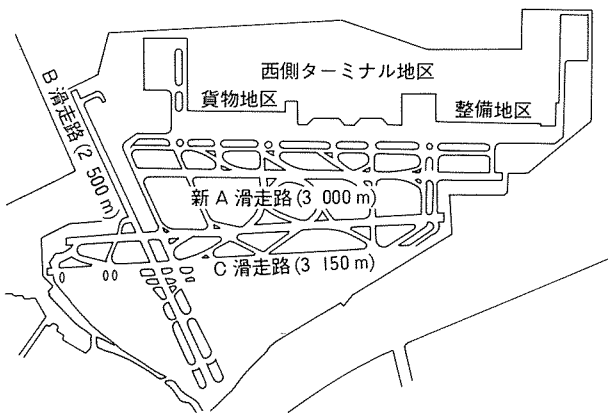


図-1 第二期工事完了時の東京国際空港

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。その第一期分として、昭和63年度に新A滑走路が供用開始され、現在引き続いて第二期工事が行われている。この第二期工事は、西側ターミナル地区の整備が主であり、エプロン舗装、橋梁等が鋭意建設されている。図-1は第二期工事完了時の東京国際空港の平面図である。

### 2.2 沖合展開事業地区の地盤状況

この沖合展開事業は、土砂処分場を利用するものなので、現地の地盤条件は極めて悪い。図-2はターミナルビル建設予定地点の地盤状況であるが、土質は、沖積世以降の土質(AC<sub>1</sub>層、AC<sub>2</sub>層など)と洪積世に堆積した層(DC層)とに分けられる。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。AC<sub>1</sub>層は、最近になって埋め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。

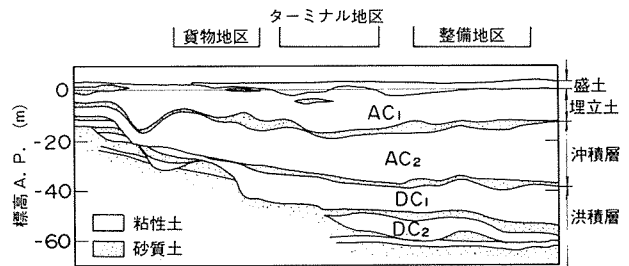


図-2 ターミナルビル建設予定地点の地盤状況

### 2.3 地盤の不同沈下が舗装に及ぼす影響<sup>1)</sup>

一般に、このような地盤上に舗装を建設すると、沈下が大いなるものとなることは避けられないが、しかも、この地盤が自然地盤ではなく、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が予想された。その場合の問題点としては、以下の2点、すなわち、

\*1 Yoshitaka HACHIYA : 運輸省港湾技術研究所

\*2 Shuichi SODA : 運輸省第二港湾建設局東京空港工事事務所

\*3 Tadashi KATAYAMA : 運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所

- ① 舗装表面の凹凸
- ② 舗装の破壊

が考えられる。このうち、前者は、舗装が地盤の不同沈下に十分に追随して沈下した場合に相当し、後者は十分には追随できなくて舗装版と路盤との間に空隙が生ずることによって、版にひびわれが発生する場合である。

PC 舗装は前者のような挙動をとるものと考えられるが、その場合、空港舗装においては表面勾配について航空機の運用上や排水性の面から規定（最小で 0.5 %、最大で 1.0 %）があるので、この基準から逸脱するような不同沈下が生じた場合には、舗装版に破損が生じていなくとも何らかの補修策を講ずることが必要になる。表-1 には、不同沈下が最も大きいと予想される整備地区について、舗装建設後 20 年までに補修が必要となる時期とその範囲を示してある。

表-1 補修工事の時期・範囲

余裕勾配 (%)	補修工事の時期(年)・範囲(%)		
	1 回目	2 回目	3 回目
0.25	5.7	15.8	-
	(2.7)	(14.1)	
0.20	4.6	9.4	17.9
	(5.6)	(10.6)	(12.6)
0.10	3.0	6.6	13.1
	(18.4)	(21.5)	(16.5)

注) ( ) 内は範囲

PC 版が地盤に追随しない後者の場合についても、PC 版と路盤との間に空隙が生じている状態で荷重が載った場合の挙動を解析した。

この地区で建設される予定の舗装の設計条件は以下のものであり<sup>2)</sup>、以後の検討はこの条件下で実施した。

- ① 設計対象荷重：LA-1 (B-747 等)
- 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>

PC 版の破壊については、まず、沈下形状が凸状の場合を想定して、コンクリート版上面のひびわれ発生について検討した。これは、空港 PC 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 鋼材の降伏、コンクリート版上面のひびわれ発生といった点に関して検討した。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、PC 版の自重だけでひびわれが開かないかどうかについても検討した。

後述の空港コンクリート舗装構造設計要領に従って設計した PC 舗装（コンクリート版厚 18 cm）について、1 レーンの長さを 100 m として解析を行った結果、いずれの点に関しても問題は無いものと判断された。すなわち、PC 舗装を空港コンクリート舗装構造設計要領に

いうところの第三種 PC 舗装として設計・施工すれば、建設後 10 年間は構造に起因する破壊が生ずる危険性はなく、表面勾配の基準からの逸脱に起因する補修だけを考慮すればいいことがわかった。

### 3. 空港 PC 舗装の設計法の概要<sup>2), 3)</sup>

空港 PC 舗装の設計法は許容応力度法であり、コンクリートの許容圧縮応力度として 175 kgf/cm<sup>2</sup>、PC 鋼材・鉄筋の許容増加応力度として 1 000 kgf/cm<sup>2</sup> を規定している。これは、航空機荷重に対してのもので、航空機荷重と温度の両方を考慮する場合には 15 % の割増しをしている。

有効プレストレス ( $\sigma_{cpe}$ ) は、導入プレストレスから、コンクリートの弾性変形・クリープによる損失、シーす摩擦による損失、PC 鋼材のリラクセーションによる損失を差し引いたものを考えている。

航空機荷重としては 1 脚による荷重のみを考慮して、それによって PC 版下面に生ずる最大応力 ( $\sigma_i$ ) の計算には、次式で示される Westergaard の中央部載荷公式を用いている。

$$\sigma_i = 0.0547 \frac{P_e}{h^2} \left\{ \left( \frac{b}{l} \right)^2 - 10.186 \cdot \log_e \frac{b}{l} + 3.714 \right\}$$

ここに、 $P_e$ ：設計脚荷重と等価な単車輪荷重 (kgf)

$h$ ：PC 版厚 (cm)

$b$ ：荷重接地半径 ( $a$ ) の関数 (cm)

$$= \begin{cases} \left\{ (1.6 a^2 + h^2)^{1/2} - 0.675 h \right\} & (a < 1.724 h) \\ a & (a > 1.724 h) \end{cases}$$

$l$ ：剛比半径

PC 版の温度変化として、

- ① 平均温度の変化
- ② 版厚方向での変化

の 2 種類を考えている。まず、PC 版の平均温度が変化したときには路盤により PC 版の動きが拘束され、その結果 PC 版に摩擦応力が生ずることとなる。温度下降時には摩擦応力が引張側になり、温度上昇時に圧縮側になる。この摩擦応力の大きさとしては、最大応力、すなわち版中間部の応力を採用している。

$$\sigma_f = f \cdot w \cdot L / 2$$

ここに、 $f$ ：路盤摩擦係数

$w$ ：単位重量

$L$ ：版長

PC 版の上下面に温度差が生じている場合に版に生ずるそり拘束応力は、厚さ方向の温度分布を直線と仮定すれば、次式で表わされる。

$$\sigma_t = 0.7 \frac{E_c \alpha \theta}{2(1 - \nu_c)}$$

ここに、 $E_c$ ：コンクリートの弾性係数 (kgf/cm<sup>2</sup>)

◇研究報告◇

- $\nu_c$ : コンクリートのポアソン比
- $\alpha$ : コンクリートの線膨張係数(1/°C)
- $\theta$ : PC版上下面の温度差(°C)

以上より、コンクリートの圧縮応力度 ( $\sigma_c$ ) は以下のようになる。

$$\sigma_c = \sigma_i + \sigma_{cpe} + \sigma_f + \sigma_t \quad (\text{温度上昇時})$$

$$\sigma_c = \sigma_i + \sigma_{cpe} + \sigma_t \quad (\text{温度下降時})$$

下面ひびわれ発生後の PC 鋼材の増加応力度 ( $\Delta\sigma_p$ ) は、PC 版を図-3 のような梁とみなして、応力、ひずみ分布を仮定することによって、次式により得られる。

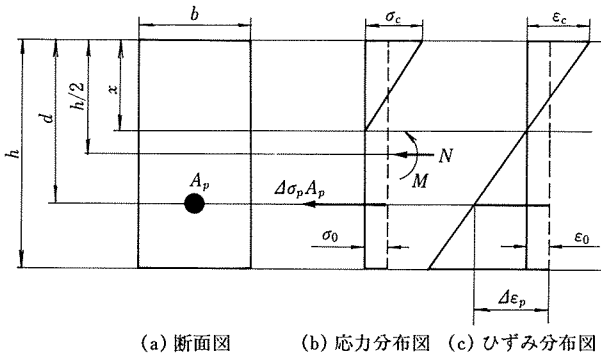
$$\Delta\sigma_p = \frac{x^2 - 2hx + 2hd}{bx^2 + 2nA_p x - 2nA_p d} nb\sigma_0$$

ここに、 $n$ : コンクリートと鋼材の弾性係数比

$A_p$ : 鋼材断面積

$\sigma_0$ : 軸力  $N$  による応力度

この式により  $\Delta\sigma_p$  を計算するため必要な版に作用する曲げモーメントとして、全断面有効とみなして計算した荷重による曲げモーメント (設計上安全側になる) を用いている。このほか、Meyerhof による式を用いて、上面ひびわれに対する検討をすることが必要である。



(a) 断面図 (b) 応力分布図 (c) ひずみ分布図  
図-3 下面ひびわれ発生後の断面

4. PC 試験舗装の設計・施工<sup>4)</sup>

東京国際空港沖合展開事業第二期工事地区内に図-4 に示す幅 55.5 m, 長さ 100 m, 厚さ 180 mm の試験舗装を製作した。路盤は、上層路盤として厚さ 150 mm のセメント安定処理層, 下層路盤として 260 mm 厚の切込み砕石層を用いており、上層路盤上での支持力係数 ( $K_{75}$ ) は 7 kgf/cm<sup>3</sup> であった。写真-1 に試験舗装の全景を示す。

この試験舗装では、3. で述べた第Ⅲ種設計法によるもの (B 舗装区域) と、それよりプレストレス量を増加させたもの (A 舗装区域) の 2 種類の PC 舗装を製作した。後者は、プレストレス量を増加することによって、リフトアップ作業時のジャッキ間隔や最大リフトアップ量を増加できるかどうかを調べるために建設した。

PC 鋼材は、19 本より 17.8 mm 径の PC 鋼より線を使用し、縦方向には 30 cm, 横方向には 40 cm 間隔で配置した。そのうち、B 舗装地域について、PC 鋼材の

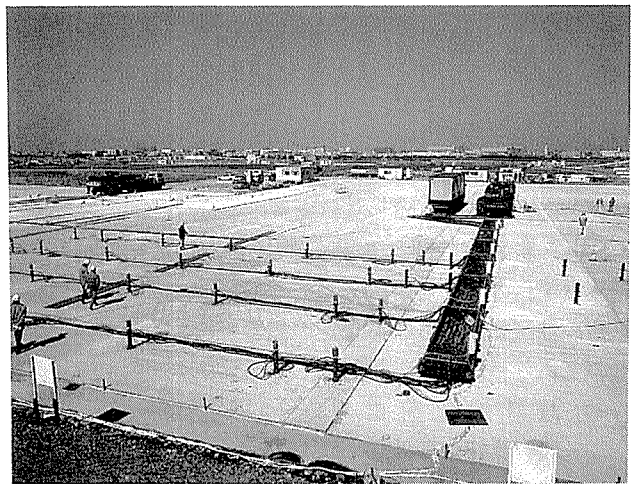


写真-1 試験舗装の全景

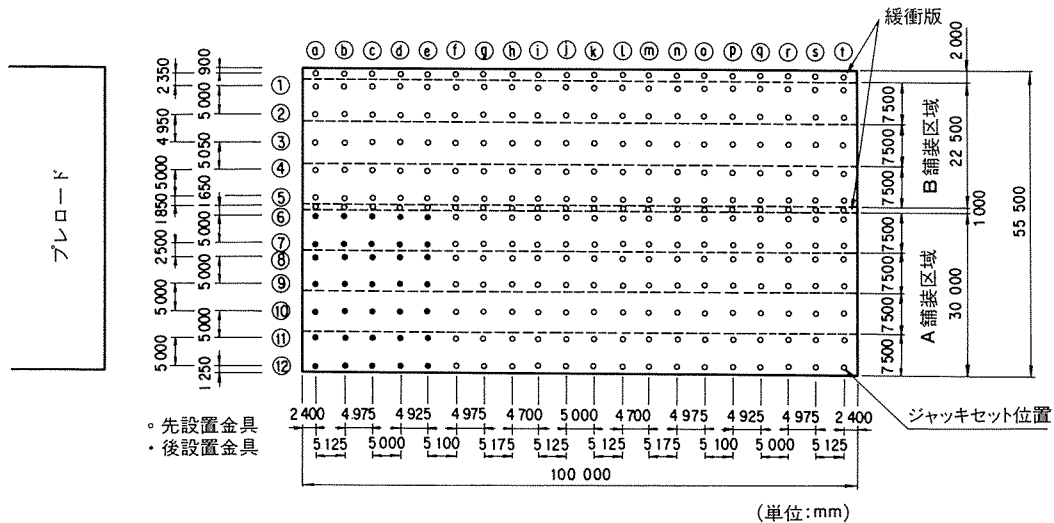


図-4 PC 試験舗装

増加応力度、コンクリートの圧縮応力度を示すと表-2のようになる。

表-2 PC鋼材増加応力度とコンクリート圧縮応力度

種類	PC鋼材		コンクリート	
	縦	横	縦	横
温度上昇時	475	520	136	160
温度下降時	489	417	111	114

(単位: kgf/cm<sup>2</sup>)

路盤とPC版との摩擦を少なくするために、路盤上に摩擦低減用ビニールフィルムを敷き、さらにその上に剝離シートを敷設した。このシートは、上面でPC版と付着するが、下面はリフトアップ後に施工するグラウト材に付着しないという特殊シートで、上面用の不織布(ラミネートシート)に下面用のポリプロピレン樹脂を溶着した2重構造となっている。この剝離シートによりPC版下面へのグラウト材の付着を防止できるようになり、リフトアップ作業を何度も繰り返して実施することが可能となる。

コンクリートは早強セメントを用い、材令7日で圧縮強度が350 kgf/cm<sup>2</sup>となるように配合した。プレストレスの導入は3段階に分けて実施した。まず、1次緊張として材令1日で最終緊張力の20%を与え、2次緊張として材令4日で50%を与える(縦方向)。そして、すべてのレーンについて2次緊張が終了した段階で、横方向にプレストレスを導入してから、縦方向の最終緊張を行う。有効プレストレス量は、A舗装区域では縦方向46 kgf/cm<sup>2</sup>、横方向38.5 kgf/cm<sup>2</sup>、B舗装区域では縦方向39 kgf/cm<sup>2</sup>、横方向34.5 kgf/cm<sup>2</sup>である。

### 5. PC舗装のリフトアップ工法の概要<sup>5)</sup>

PC舗装を建設した地盤に不同沈下が生じた場合の補修方法として開発した、PC版のリフトアップ工法の概要は以下のようなものである(図-5)。

まず、PC版にコアボーリング機を用いて直径160mmの削孔を施し、その孔から路盤を掘削して(写真-2)、ジャッキ装着金具をその孔にセットする。そして、コンクリートの反力盤を施工し、油圧ジャッキを金具に取り付ける。

舗装版のリフトアップを安全かつ迅速に行うためには、多数のリフトアップ箇所を同時にかつ全体的に管理

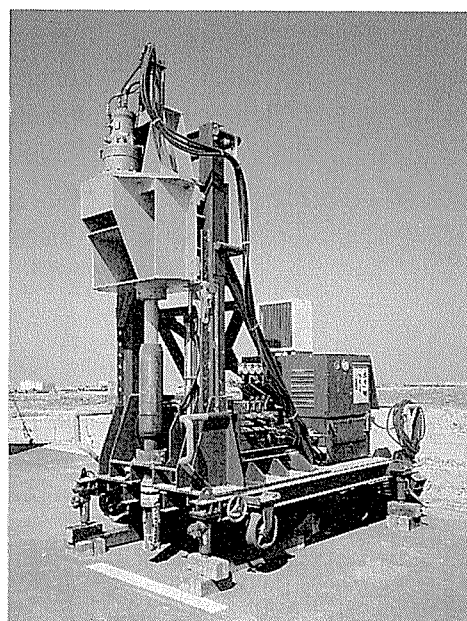


写真-2 路盤ボーリング機

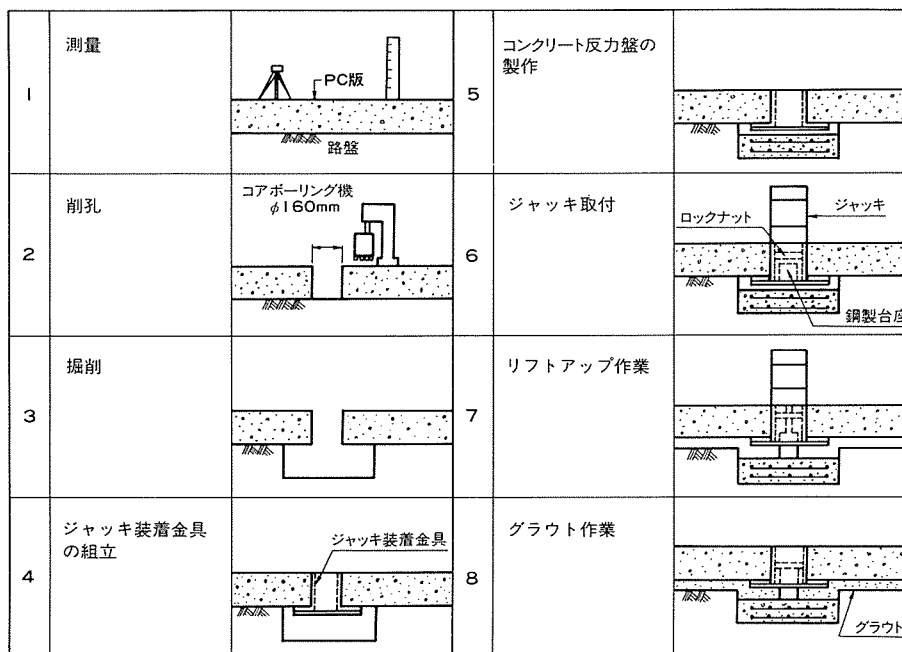


図-5 リフトアップ工法の概要

◇研究報告◇

することが必要なので、電動式油圧ジャッキ(容量 35 tf, 揚程 15 cm)を使用した(図-6)。リフトアップする区域が広い場合には少ない台数のジャッキを移動しながらリフトアップしていかなければならないことを考慮して、このジャッキは移動や舗装版との着脱が容易にできるように工夫されている。

また、ジャッキ孔周囲のコンクリート版にひびわれが生ずる危険性を小さくするために、荷重をジャッキ孔周囲にも分担させる構造のジャッキ装着金具を用いた。荷重は、直径が 43 cm の鋼製円板により PC 版に伝達されるが、この円板は 6 分割して舗装版の孔から挿入し、舗装版の下で組み立てることができるようになっている。

PC 版は、油圧ジャッキの荷重を鋼製台座を通して反力盤で受けることによって、リフトアップされる。所定のリフトアップが行われると、舗装版はロックナットに

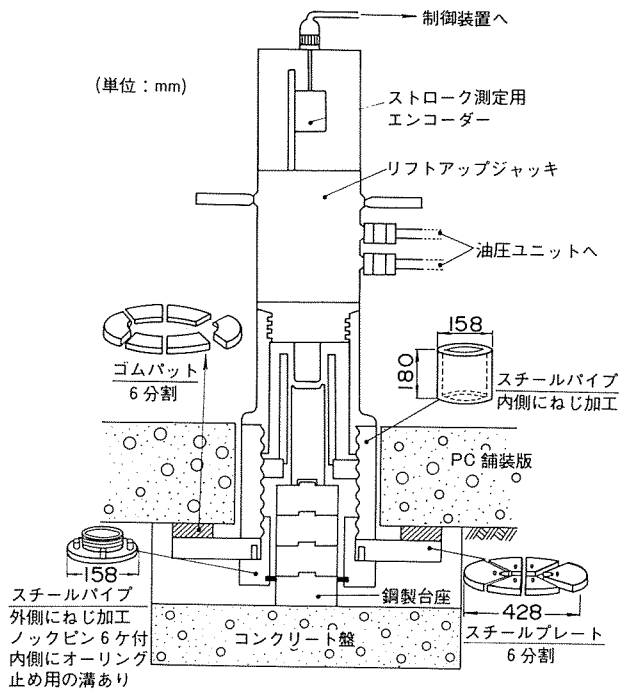


図-6 油圧ジャッキ, ジャッキ装着金具, 反力盤

よってその状態で仮留めされ、ジャッキは装着金具から取り外され、次のリフトアップ点に移される。鋼製台座はそのまま残して、将来、この上に新たに台座を追加することによって、再度リフトアップが可能となるように考えた。

リフトアップ作業は、ジャッキ圧力とリフトアップ量を自動制御装置により管理することによって、正確かつ迅速に、そして安全に実施できる。そのシステム図を図-7 に示す。このリフトアップ作業では、各ジャッキのストローク量が自動制御装置によりモニターされ、事前に設定したストローク量と一致するように所定のリフトアップが行われるようになっている。

PC 版をリフトアップした後、PC 版と路盤の間でできた隙間はセメントミルクによりグラウトする。この場合の空隙量は数十 mm にも上るため、大量のグラウト作業が必要となる。

以上が、今回開発した PC 舗装のリフトアップ工法の概要であるが、施工性の観点からあらかじめ反力盤を設けておく方法も考えている。これは、PC 版打設時に図-8 に示すようなジャッキ装着金具と反力板を据え付けておく方法であり、将来の沈下が確実に予想される区域においては必要となる方法であろう。今回の試験では、この方法(先設置型)を多く用いている。

試験舗装では、リフトアップ用ジャッキを、図-4 に示すように、原則的に 5 m ごとに設置した。ジャッキ装着用装置は全体で 280 箇所であり、先設置型は 245 箇所、後設置型は 35 箇所である。

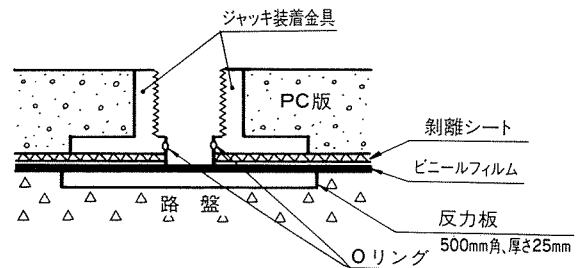


図-8 先設置型ジャッキ装着金具と反力板

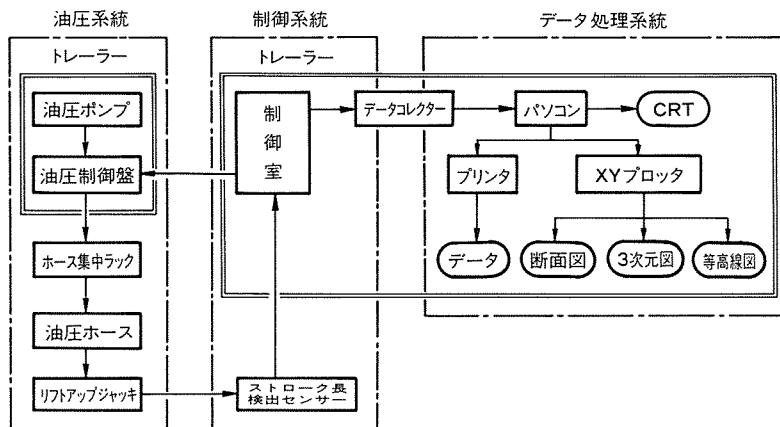


図-7 リフトアップ作業のシステム

## 6. リフトアップ試験<sup>4)</sup>

今回のリフトアップ試験では、現場実証試験として以下のような3種類の試験を行った。

- ① 大規模リフトアップ試験
- ② 施工性試験
- ③ 限界変形量試験

①では、大規模なPC版のリフトアップを行い、その速度、精度、リフトアップ荷重を確認した。②では、舗装表面高さの測量からグラウトまでの一連の作業を繰り返して行い、リフトアップ作業全体の施工速度、施工精度を確認した。また、グラウトシステムの妥当性を検討した。③では、PC版をひびわれ発生まで段階的にリフトアップし、PC版の限界変形量を確認した。

### 6.1 大規模リフトアップ試験

この試験では、PC版端部より約35m区間を、横方向は全幅(55.5m)にわたり平行に保ったまま、図-9に示すように、全体的に50mmリフトアップした。

舗装版全体を同時にリフトアップ可能とするためには

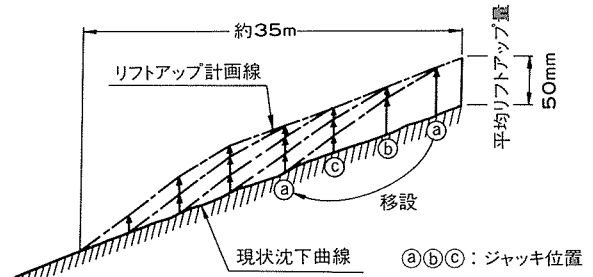


図-9 大規模試験におけるリフトアップ

多数のジャッキが必要となるが、経済性を考慮して、ジャッキを移動しながら舗装版全体をリフトアップしていく方法を採用した。したがって、あるジャッキ列のリフトアップ量が所定量(50mm)に達すると、ジャッキを別の列に移動していくこととなるが、それに要した時間(ジャッキ1列14台の移動時間)は30分程度であった。

図-10に示すように、リフトアップ作業終了時のPC版高さのリフトアップ計画高に対する誤差は、ほぼ数mm以内におさまっている。また、図-11は、有限要

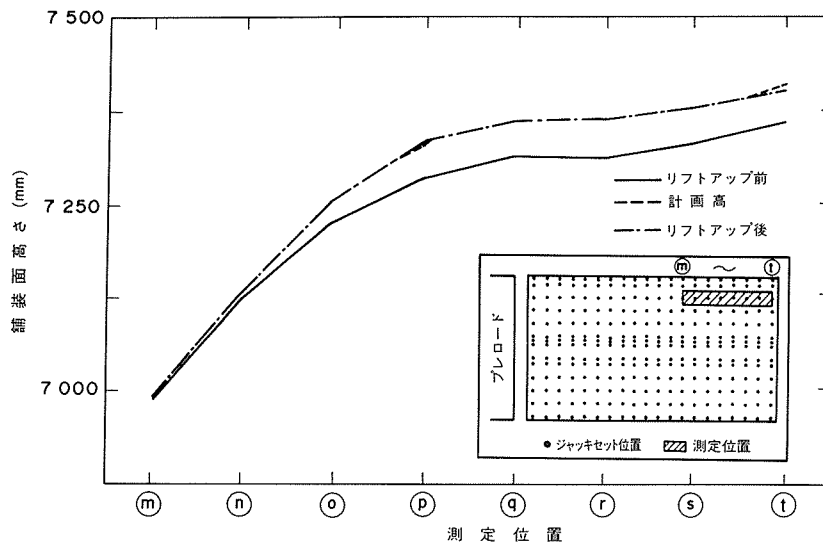


図-10 リフトアップ作業の精度

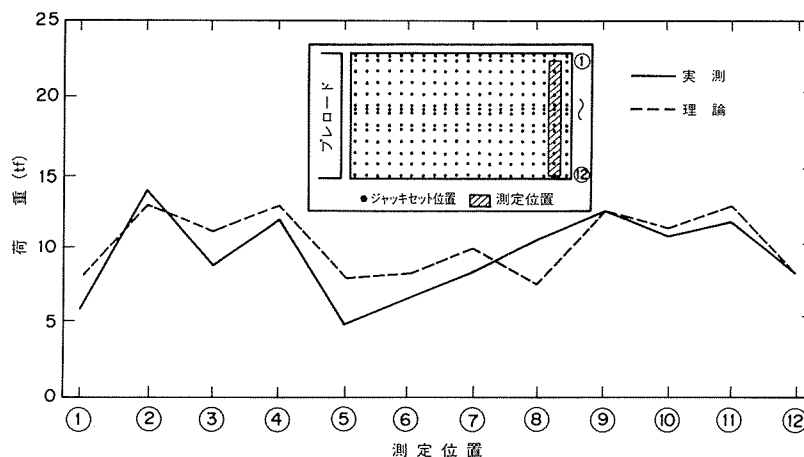


図-11 ジャッキ荷重の実測値と計算値

◇研究報告◇

素解析により得られた理論荷重と実測荷重を比較したものであるが、最大で3tf程度の差がみられる。しかし、ジャッキ荷重により反力盤が下がることを考えれば、両者はよく一致していると判断され、有限要素法をリフトアップ量の管理に用いていくことの有効性が確認された。

6.2 施工性試験

この試験では、PC版端部から約30m区間を、A舗装区域、B舗装区域に分けてリフトアップした。最大リフトアップ量を約150mmと想定したが、PC版の最大リフトアップ量は事前検討の結果50mmとなっているので、図-12のように3ステップに分けてリフトアップ作業を実施した。各ステップでは、PC版の端部が50mmずつ持ち上がるようにリフトアップした後、グラウトを施工した。

グラウトを実施するために、グラウト材の製造能力が1時間当たり20m<sup>3</sup>の可搬式プラントを使用した。ミキサーより排出されたグラウト材は一時アジテーターに貯留し、大型ポンプにより充填箇所近くに置かれたグラウトタンクへ圧送された。そして、グラウトタンクから水中ポンプを用いて充填位置の注入ルートまで圧送し、自然流下方式により充填された。写真-3にグラウト注入ルートを示す。

グラウト材の注入は、図-13に示したように、注入ルートを使用して自然流下方式により行い（ステージ1）、グラウトが落ちつくまでグラウトを補充し（ステー

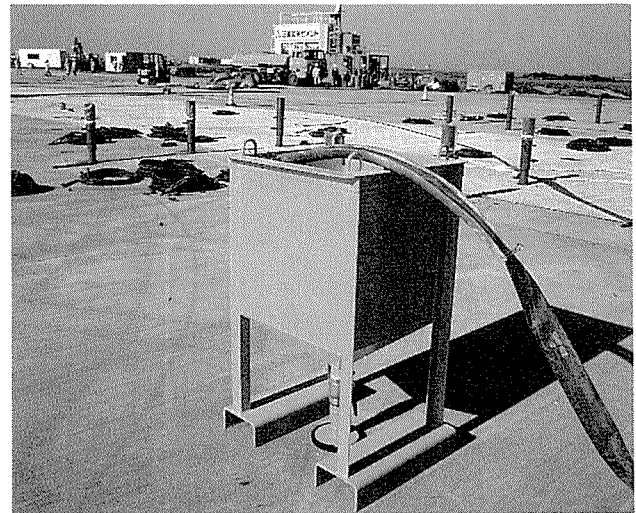


写真-3 グラウト注入ルート

ジ2)、それが落ちついた後、ロートをビニール管のブリージングロートに換えた（ステージ3）。充填の確認はブリージングロート内のグラウト材を観察することによって行った。また、リフトアップ後の測量結果をもとに算出した所要グラウト量と、実際に使用したグラウト量を比較することによっても充填状況を確認した。

写真-4にはリフトアップしたあとのPC版の状況を示してある。表-3は、一連の作業の概略所要時間であ

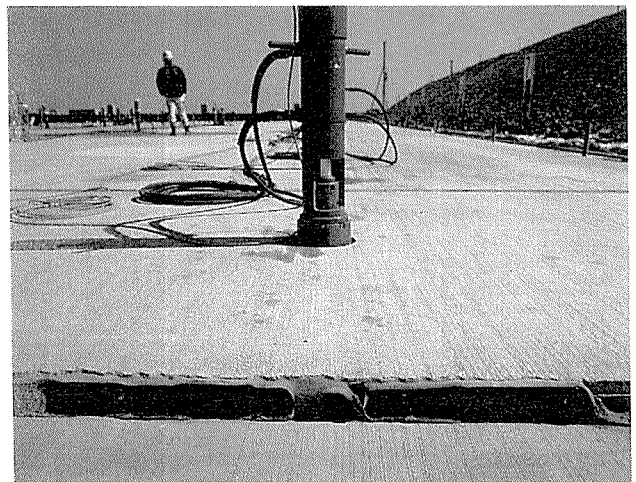


写真-4 リフトアップの状況

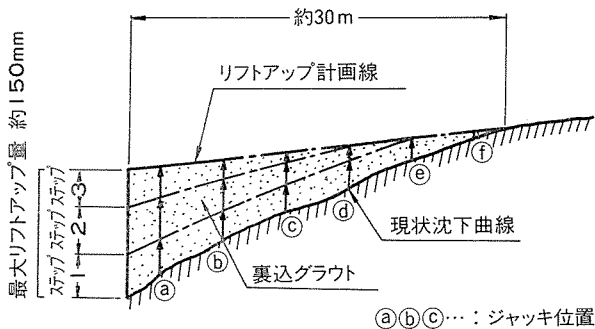


図-12 施工性試験におけるリフトアップ

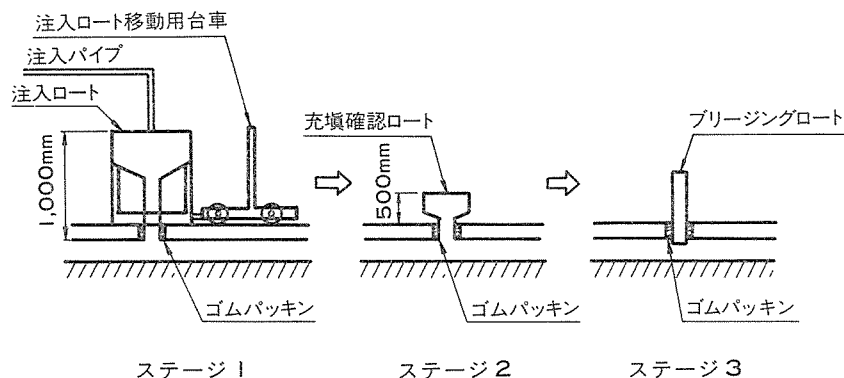


図-13 グラウト材の注入

表-3 リフトアップ作業の施工時間

作業内容	作業時間・量
ジャッキセットアップ	約 80 分 (作業員 15 名, ジャッキ台数 42 台)
リフトアップ	約 10 分 (ジャッキ台数, リフトアップ量によらず)
グラウト	10.5 m <sup>3</sup> /時間

注) 900 m<sup>2</sup> あたりの所要時間

るが、リフトアップ作業の施工時間のほとんどはジャッキのセットに要するものであり、リフトアップそのものの時間はそれほど必要とはならない。したがって、作業員の習熟により施工時間がさらに短縮される可能性もある。

この試験においては、PC 版のリフトアップから PC 版下面へのグラウト施工までを 3 度繰り返したが、2 回目、3 回目でも PC 版下面へのグラウト材の付着が見られなかったことが試験終了時に採取したコアにより確認できた。このことから今回採用した剝離シートの有効性が確認できたものと思われる。

### 6.3 限界変形量試験

PC 版端部より約 25 m の区域で、PC 版をひびわれ発生まで段階的にリフトアップして、限界変形量について調べた。この試験は、プレストレス量の異なる A 舗装区域、B 舗装区域についてそれぞれ行った。

PC 版の端部が、プレストレス量の多い A 舗装区域では 99 mm、Ⅲ種設計法による B 舗装区域では 90 mm になるように、図-14 に示すような形状で PC 版をリフトアップしたときに、ジャッキ周辺部には幅 0.1 mm

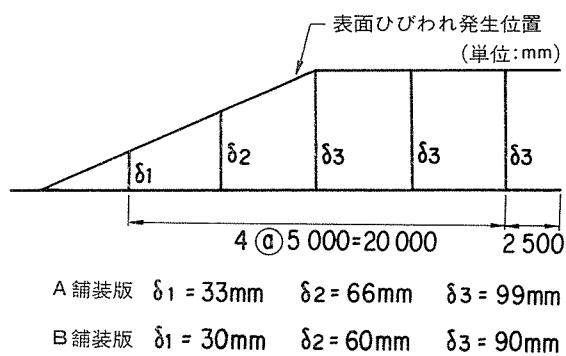


図-14 限界変形量試験におけるリフトアップ

程度のひびわれが発生した。しかし、PC 版表面のひずみ分布からみると、このジャッキ孔周囲を除けばひびわれの発生する危険性は小さいものと思われる。

この試験を行う前に行った別な形状へのリフトアップ試験 (PC 版端部のリフトアップ量は 100 mm) の結果では、ジャッキ孔周囲にはひびわれの発生は認められなかったことから、リフトアップの形状によっては、100 mm 程度までは PC 版を 1 度に持ち上げることも考えられる。このことから、プレストレス量を増加することについては、リフトアップ量を増加してもひびわれの発生する危険性が小さくなるという点で、有利であることが確認された。

## 7. おわりに

今回の試験施工により、軟弱地盤上に建設した PC 舗装に沈下が生じた場合の補修方法として、オーバーレイといった従来工法によらない、リフトアップ工法の実用性が確かめられたものと考えている。

この工法を可能とするためには薄い PC 版を用いなければならないが、空港舗装は PC 版の下の路床・路盤も含めて航空機荷重の繰返し走行に耐えなければならないので、路床・路盤は過大な変形を強いられることとなる。今後は、その点についても十分に検討して、リフトアップ工法のみならず空港 PC 舗装の設計・施工法を確立したいと思っている。

## 参考文献

- 1) 八谷好高ほか：空港コンクリート舗装の不同沈下管理に関する考察，港湾技術研究所報告，第 30 巻，第 1 号，pp. 239-265, 1991.
- 2) 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.
- 3) 福手勤ほか：第Ⅲ種設計法による PC スラブの空港舗装への適用性に関する研究，港湾技術研究所報告，第 18 巻，第 3 号，pp. 37-63, 1979.
- 4) 八谷好高ほか：PC 舗装のリフトアップ工法の現場実証試験，港湾技研資料，No. 689, 19 p., 1990.
- 5) 佐藤勝久ほか：沈下したプレストレスコンクリート舗装版のリフトアップ工法の開発，港湾技術研究所報告，第 28 巻，第 2 号，pp. 49-76, 1989.

【1991 年 12 月 25 日受付】