

PC舗装リフトアップ工法に使用する グラウト材の品質に関する検討

上 菌 晃¹・中島 禎²・宮内 健³・今井 泰男⁴・稲田 雅裕⁵

¹正会員 (財) 沿岸開発技術研究センター 第二調査研究部長 (〒102 東京都千代田区隼町 3-16)

²正会員 (財) 沿岸開発技術研究センター 主任研究員 (〒102 東京都千代田区隼町 3-16)

³正会員 (株) ビー・エス 東京支店土木技術部開発課課長代理 (〒102 東京都千代田区九段北 4-1-3)

⁴正会員 運輸省第二港湾建設局 東京空港工事事務所次長 (〒144 東京都大田区羽田空港 3-3-1)

⁵正会員 工修 運輸省第二港湾建設局 横浜調査設計事務所 第二設計室長 (〒231 神奈川県横浜市中区北仲通 5-57)

大規模なPC舗装のリフトアップを行う場合、リフトアップ後のグラウト注人工は、施工性、経済性等に対して支配的な項目である。空港舗装では、空港施設などの閉鎖時間を出来るだけ短縮する必要がある場合は、急硬性のあるグラウト材が望まれ、それ以外の場合は1日程度の養生で走行荷重が支持できる材料が選定されてきた。PC舗装におけるリフトアップ工法に使用するグラウト材の品質について、施工性向上を目的とした改良、さらにグラウト層の発生応力等を整理し構造の安定を図ることを目的に検討を行った。本論文は、これらの検討の概要と、得られたグラウト材について報告するものである。

Key Words : airport, prestressed concrete pavement, rehabilitation, lift-up method, grout, quality specification

1. はじめに

「東京国際空港沖合展開事業」における舗装構造の種別は、特に、施設の機能、補修上の制約、許容勾配、10年間の平均沈下量等を考慮し検討された。その結果、第II地区の舗装種別は図-1に示すとおりとされた。¹⁾

超過密空港である東京国際空港では昼間に補修工事を行うことは難しく、夜間に補修工事を行う際にも、早朝に供用開始することが必要となる地区もある。プレストレストコンクリート舗装(以下PC舗装)は、このような際に、不同沈下による勾配修正の補修がリフトアップ工法を採用することにより、

夜間のみで行うことが可能である。

西側旅客ターミナル地区エプロンは供用開始後10年間の残留沈下量が大きいと予測され、エプロンの利用頻度も高く、維持補修の際に必要な施設の閉鎖等の制約条件が激しいので、維持管理の際に施設の閉鎖を必ずしも必要としないPC舗装が採用された。また、貨物ターミナル地区、整備地区エプロンでは、アクセス道路トンネル、照明共同溝、環状8号線トンネル等のボックスカルバート部分があり、その部分は周辺と比べて沈下量が小さくなるためと予測されるために不同沈下が生じ、勾配修正のための補修が頻繁に必要となると考えられることより採用された。

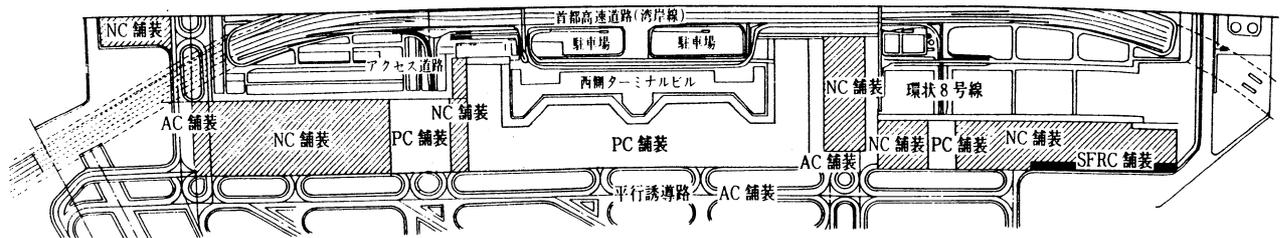


図-1 西側エプロン地区舗装種別

西側エフロン地区は平成5年9月の供用開始から約3年を経過しようとしているが、その残留沈下は当初の予想を上回る早さで出現していることが確認され、特に不同沈下の傾向が大きい箇所の舗装高修正は急務を要する状況といえる。

リフトアップ工法の概要は後述するが、PC舗装版のリフトアップ後に注入されるグラウト材は、その施工能率、工事費に大きく関与する。このグラウト材について、施工性の向上を目的とした改良、さらにグラウト層の発生応力等を整理し、構造の安定を図ることを目的に検討を行った。本論文は、これらの検討の概要と、得られたグラウト材について報告するものである。

2. リフトアップ工法の概要

(1) リフトアップ工法について¹⁾

リフトアップ工法は、PC舗装の沈下部分に所定の間隔で電動油圧ジャッキ（以下ジャッキ）を取り付けて、コンピューター制御によりこれらを同時に作動させ、その圧力をPC舗装版と路盤上の反力盤に作用させることにより、所定の高さにPC舗装版を持ち上げ、その後リフトアップしたPC舗装版と路盤との空隙にグラウトを充填して復元するものである（図-2）。

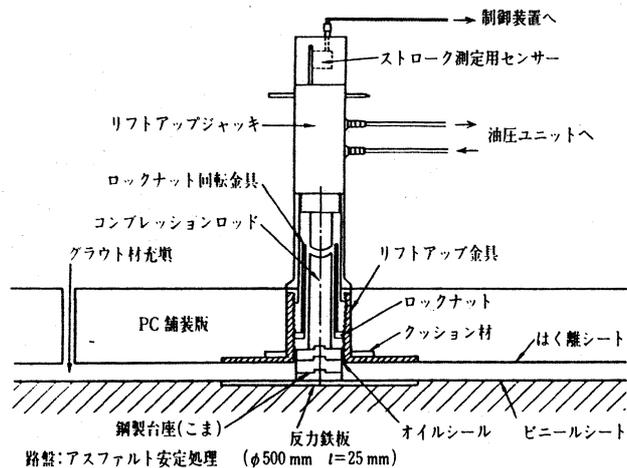


図-2 電動油圧ジャッキ

リフトアップ時には、反力盤の上に設けられた鋼性台座が積み重ねられ、ジャッキの荷重を反力盤に伝達する。所定のリフトアップ終了後、PC舗装版は仮留めされ、ジャッキは次のジャッキアップ地点に移される。

(2) グラウト材選定の経緯

リフトアップされたPC舗装版と路盤との間には、PC舗装版上に開けられたグラウト孔より自然流下方式によるグラウト材の充填が一般的である。材料についての明確な規定はないが、流動性が極めて良い材料であり、空港施設などの閉鎖時間を出来るだけ短縮する必要のある場合には、急硬性のある材料が望まれ、それ以外の場合には1日程度の養生で走行荷重が支持できる材料が選定されてきた。

PC舗装工法開発時には、工法全体について十分な検討がなされたとはいえ、グラウト材については、セメント安定処理路盤としての材料規定が適用されてきた。この規定に従って早い時期に施工された事例の中で、交通荷重の繰り返し作用により、路床・路盤材料が目地やひび割れ部分から舗装表面に吹き出す、いわゆるボンピングの発生が認められた。この事例から、従来の規定下の配合によるグラウト材の耐久性は懸念されていた。調査によると、ボンピング発生箇所の上層路盤には水硬性粒度調整スラグ上層路盤材が用いられており、十分な強度が確認されている。このことから、グラウト材自体が雨水や地下水により水浸した状況下で荷重が繰り返し作用したために起こったものと判断された。

また、試験施工時にグラウト材のブリージングにより舗装版と路盤との間に一部微細な空隙が認められたことから、PC舗装の主たる破損原因は、グラウト材であることが推測された。

PC舗装版下のグラウトは特に厚さが薄い場合、従来のグラウト材では比較的変形係数が高いことと相まって、大きな曲げ作用を受けるとひび割れる可能性がある。その対策として、グラウト材の変形係数を小さくし、破壊ひずみを大きくすることが考えられる。また、路盤の変形係数が設計当初の値が確保出来ている場合には、グラウト材の変形係数が小さい材料を用いることも可能ではあるが、ボンピング防止といった観点から現行のセメント安定処理材程度のもが必要とも考えられ、さらに、路盤の支持力係数が何らかの原因で低下した場合は高変形係数を有する材料選定が必要とも考えられる。³⁾

このようにグラウト材の強度、耐久性、変形係数等の関係が明確にはなっていないのが現状である。

3. 検討概要

(1) 望まれるグラウト材について

施工性より望まれるグラウト材の品質については以下のように整理した。

a) グラウトの注入は充填性から自然流下方式を採用している。このため、施工性から極めて流動性の良いものが望まれる。

b) 夜間施工，昼間解放の設定の場合，望まれるグラウト材は短時間で強度発現するものであり，さらに可使用時間がある程度確保される材料が望まれる。

ポンピング現象が認められていることより，構造性の面から，繰り返し荷重に対しての耐久性についてもグラウト材の品質として望まれる要素である。

(2) 強度設定方法について

従来グラウト層の強度の規定は基本的にセメント安定処理路盤を前提に設定されており，一般的には強度に関する規定は圧縮強度のみとしており，その値についても明確ではなかった，実際にはグラウト層にはその他の応力が発生していることが予測される。これらの発生応力を求めることにより，グラウト材の強度設定をするべく，整理を行った。

発生応力の算出には以下の方法による結果より判断した。

a) 多層弾性版プログラム (BISAR) により，グラウト層の各応力を算出する。

b) 有限要素法 (3次元FEM解析) により，グラウト層の各応力を算出する。

PC舗装版の中央部に航空機荷重を載荷し，グラウト層変形係数を変化させた場合の発生応力を試算しこれを整理・比較した。

(3) 計算条件

設計荷重は，「空港コンクリート舗装構造設計要領」⁴⁾に基づいて設計対象機種をボーイング747-400 1脚4輪とした(図-3)。グラウト層厚は1日の最大リフトアップ量より10cmと設定し，グラウト層の変形係数は1,000, 3,000, 5,000, 10,000, 50,000, 100,000, 200,000kgf/cm² (0.98, 2.9, 4.9, 9.8, 49, 98, 196N/m²)の7種類とした。

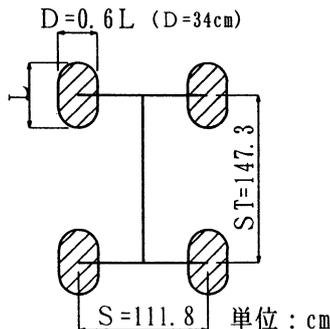


図-3 1主脚車輪の配置型式図

各層の諸元は表-1のとおりとした。

表-1 各層の諸元表

	弾性係数 (kgf/cm ²)	ポアソン比
PC舗装	350,000 (343)*	0.15
グラウト層	変化	0.20
アスファルト安定処理路盤	10,000 (9.8)	0.20
粒状路盤	3,000 (2.9)	0.30
路床	1,000 (0.98)	0.30

*()内、N/m²

(4) 計算手法

a) 多層弾性版理論 (BISAR) による解析

多層弾性版では，表層以下路床までの各層を評価し解析を行った。解析モデルを図-4に示す。

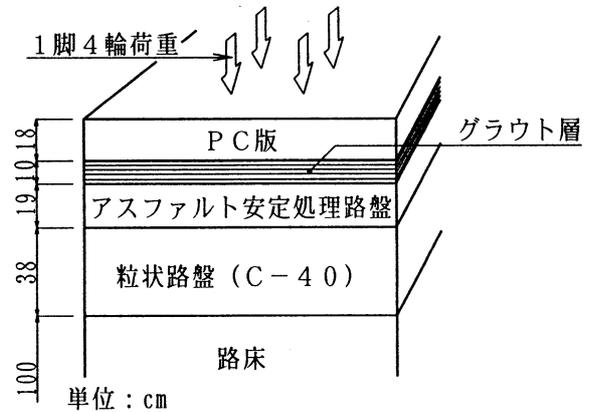


図-4 BISARによる解析モデル図

b) 有限要素法 (3次元FEM) による解析

3次元FEMではバネにて支持された弾性床の上の2層(PC舗装版+グラウト層)の版として解析を行った。この際バネ定数については，路盤以下の各層を評価し，「空港コンクリート舗装構造設計要領」に示される，PC舗装の際に必要なとされる路盤支持力係数 $K_{75}=7\text{kgf/cm}^3$ (68.6N/cm^3)により設定した。解析モデルを図-5に示すが，境界条件として一部水平方向の移動を拘束した。

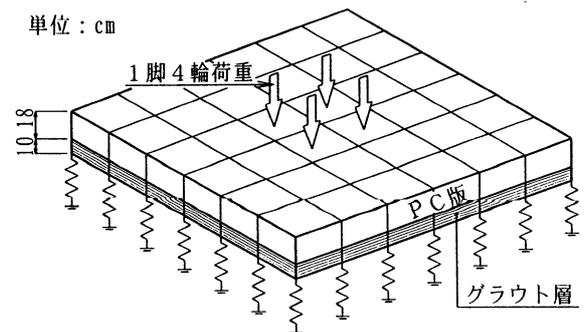


図-5 3次元FEMによる解析モデル図

(5) 解析結果

a) 多層弾性版理論 (BISAR) による解析結果

解析結果は変形係数毎の応力度の変化として図-6に示すが、発生応力は圧縮、引張とも変形係数が大きくなるに従い増加する傾向となった。圧縮応力はグラウト層上縁に発生する鉛直方向圧縮応力度が支配的であり、変形係数 $200,000\text{kgf/cm}^2$ (196N/m^2) で応力度は 5.2kgf/cm^2 (0.51N/mm^2) となった。水平方向に関しては、変形係数の小さい場合に微小に発生するものの、支配的ではなくグラウト材の変形係数が大きくなるに従い消散する。引張応力は変形係数 $3,000\text{kgf/cm}^2$ (29N/m^2) 程度から水平方向に発生し、 $200,000\text{kgf/cm}^2$ (196N/m^2) で応力度は 28kgf/cm^2 (2.7N/mm^2) 程度となる。

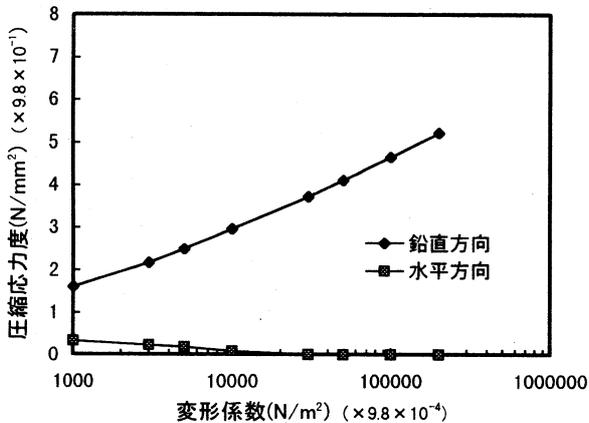


図-6 (1) BISAR による解析結果 (圧縮応力度)

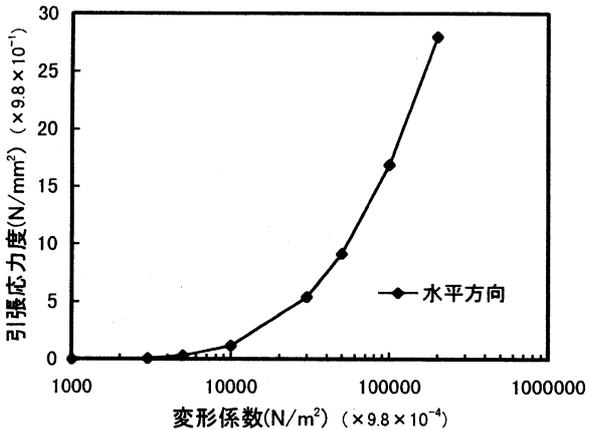


図-6 (2) BISAR による解析結果 (引張応力度)

b) 有限要素法 (3次元FEM) による解析結果

結果的にはBISARによるものと同じような値を示した。ただし、BISARでは見られなかった水平方向の応力が発生し、圧縮応力は、水平方向応力度が変形係数 $30,000\text{kgf/cm}^2$ (29N/m^2) 以上で鉛直方向応力度と交叉し支配的となる。引張応力は鉛直方向に一定した微小な応力が得られたが、水平方向の応力度はBISARによるものと極めて同じような傾

向を示した (図-7)。

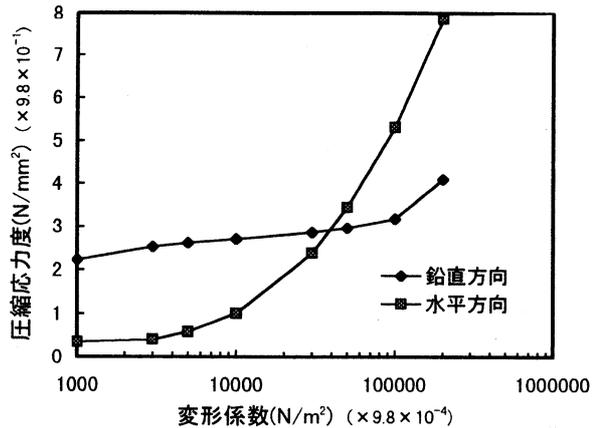


図-7 (1) 3次元FEMによる解析結果 (圧縮応力度)

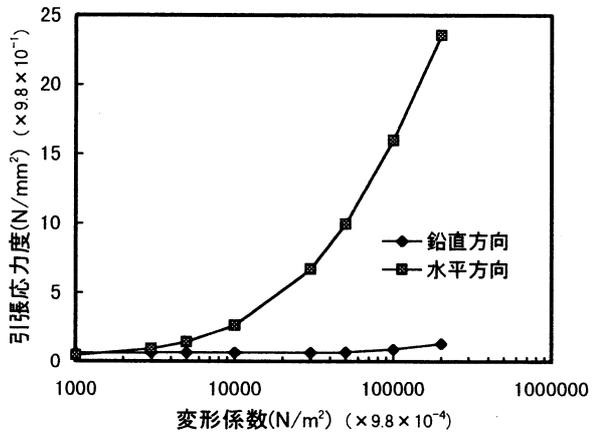


図-7 (2) 3次元FEMによる解析結果 (引張応力度)

(6) 解析結果のスペックへの反映

前述の解析結果を得て、求められるグラウト材のスペックについて検討を行った。スペックは、施工パターンにより強度発現材齢を2種類に大別した。昼・夜間にて施工可能な状況においては強度発現時期を24時間とした。夜間施工のみに限定される場合については、1サイクルの最終グラウト注入後、すぐに供用開始することを考慮し、急速な強度発現が必要となる、このため発現時期を2時間とした。

所要強度の設定に関して、まず、圧縮強度については、昼・夜間施工可能な場合、および夜間施工のみの場合の各々の発現時期での強度規定を、2手法の解析結果より得られた、変形係数-圧縮応力度のグラフの大きい部分を取り、図-8を作成し、この範囲内に入る材料とした。また、長期材令強度(7日)としては、施工パターンにかかわらずPC舗装の設計思想を確保することを考慮し、上層路盤材としてのセメント安定処理材の一軸圧縮強度である値、 20kgf/cm^2 (1.96N/mm^2) 以上とした。

引張強度については、初期材齢で変形係数の小さい材料については引張強度の測定方法等に問題があ

るため、長期材齢強度（7日）のみの規定とし、これに対しても、解析結果のグラフから圧縮強度と同様に図-9の範囲内にあることとした。

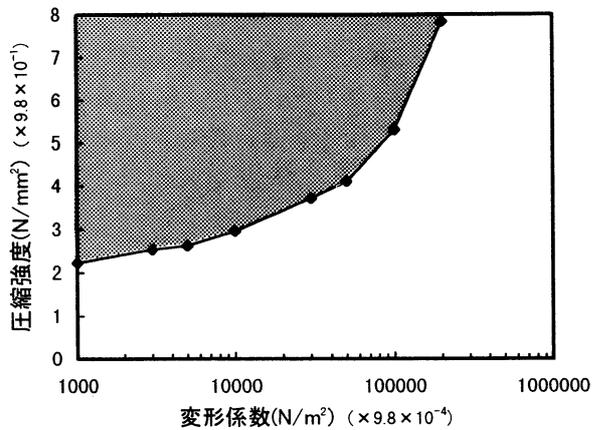


図-8 変形係数-圧縮強度図

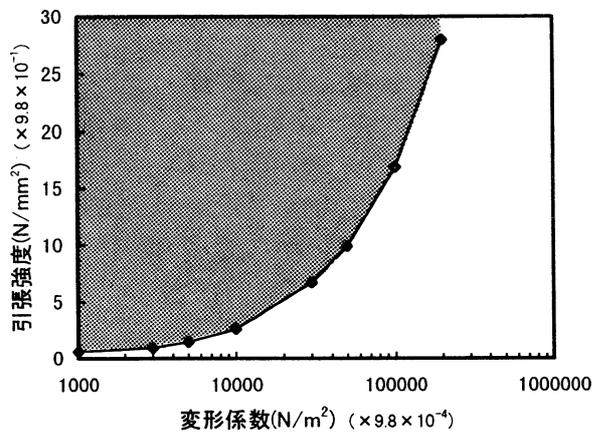


図-9 変形係数-引張強度図

グラウトの充填は、自然流下方式で行われるため、グラウト材は極めて流動性がよく、さらに可使時間については長い方がよいと考えられる。1回での充填量と充填時間の関係から可使時間を設定し、流動性に関しては、流下時間の規定を設定した（表-2）。

表-2 施工性に関するスペック表

可使時間	40分以上
流下試験 ^{*1}	練混ぜ直後：14 ± 3 秒 40分（可使時間）後：20秒以下

^{*1} J A ロートによる

尚、ブリージング率は1.0%以下としたが、ブリージングによる空隙の可能性を考え、基本的には認められないことが望ましいとの注釈を加え規定した。また、耐久性を確認するため、「繰返し荷重に対する安全性確認試験」として、応力レベルを解析結果より求められた、その材料の変形係数に対する発生応力とし、水浸状態で繰返し回数10万回として目視による破壊が認められないこととして規定した。以上の条件をもとに材料の抽出を行った。

4. グラウト材料について

前出のスペックに適合すると考えられる材料の試験結果の一例を表-3に示す。得られた材料はA、Bについては、耐久性等を考慮し、特殊な無機質ファイラー（粉体）を骨材としたモルタル系グラウト材であり、材料Cについてはアスファルト乳剤を結合

表-3 (1) グラウト材試験結果一覧表（昼・夜間施工の場合）

	強度 (N/mm ²) (×9.8 × 10 ⁻¹)		引張強度	施工性		分離抵抗性 (%)		変形係数 (N/m ²) (×9.8 × 10 ⁻⁴)	
	圧縮強度			可 使 間 時 間 (min.)	流 下 時 間 (sec.)	水・結 合 材 比 *2	ブリージ ング率	24 時間	7 日
	24 時間	7 日							
A	16 ~ 70	66 ~ 90	22.4 ~ 24.2	60	11.5 ~ 13.8	50.7	0.8 以下	12,000	10,500 ~ 14,200

表-3 (2) グラウト材試験結果一覧表（夜間施工の場合）

	強度 (N/mm ²) (×9.8 × 10 ⁻¹)		引張強度	施工性		分離抵抗性 (%)		変形係数 (N/m ²) (×9.8 × 10 ⁻⁴)	
	圧縮強度			可 使 間 時 間 (min.)	流 下 時 間 (sec.)	水・結 合 材 比 *2	ブリージ ング率	2 時間	7 日
	2 時間	7 日							
B	10 ~ 30	40 ~ 50	17.5 ~ 19.8	42	11.8 ~ 13.7	58.1	0	3,000	6,600 ~ 7,900
C	13.8	63.5	28.1	50	11.8	50	0	4,100	11,300

^{*2} 結合材とはセメント、混和剤、石粉、ファイラー、アスファルト乳剤等を含んだものとする

材とした、セメントアスファルトペーストである。

圧縮強度に多少のばらつきがあったものの、その変形係数は、いずれもさほど高いものではなく、強度に関してもスペックを満足するものであった。また、繰り返し荷重に対する安全性確認試験は、応力レベルが低いため試験が困難な材料もあり、明確な結果は得られなかったのが現状である。

5. おわりに

グラウト層に発生する応力は、BISARと3次元FEMの2つの手法により求めたが、結果は概ね同様の傾向を示した。解析結果を基に設定したグラウト材のスペックに対して、得られた材料はセメント系グラウト材がほとんどであり、その特性に大差なはかったが、流動性がよく低弾性で所要の強度を有する材料は得られたと考える。

今回、グラウト層応力度の算出は荷重載荷位置をPC舗装版中央としたが、版端部は版厚が25cmに増厚されており、さらに枕版（コンクリート製で幅1m、厚さ18cm）にて支持されているとはいえ、特にPC舗装版縁部、隅角部、および枕版境界位置等に荷重が載荷された場合は、局部的に応力が発生していることは予測でき、整理される必要がある。この際、応力算出手法が明確ではないが、3次元FEMによる解析が考えられる。試算では隅角部載荷を想定した場合、中央部載荷解析時の3次元FEMと同様なモデルで解析を行うと（枕版の効果を考慮し、路盤支持力係数は 20kgf/cm^3 (196N/cm^3)相当とした）、隅角部載荷時は中央部載荷時に比べ、約2～6倍の圧縮応力度を示した。八谷等³⁾によると、Westergaard公式と有限要素法によるグラウト材強度の検証の中で、隅角部載荷時は中央部の約5倍の応力を示しており、発生頻度は低いものの、隅角部

載荷時に大きな応力が発生するものと考えられる。ただし、得られた材料に関しては、隅角部載荷時の試算結果に対しても概ね満足するものであった。

確立された解析手法がない現状では3次元FEMによる解析結果についての検証は十分な検討を要するものと思われる。また、グラウト材のスペックに関しても、実証試験の必要性を感じるのである。

謝辞：グラウト材の調査にあたっては（社）セメント協会のご協力を得た。さらに、PC舗装のリフトアップ工法の施工性向上に関しては、「東京国際空港エプロン舗装勾配修正調査検討委員会（委員長：佐藤勝久長岡工業高等専門学校教授）」の中でご審議頂いた。委員長をはじめ、各委員の皆様方に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 常陸壮介, 塩見雅樹, 池田直太, 梅野修一: 東京国際空港におけるプレストレストコンクリート(PC)舗装のリフトアップ工法, 土と基礎, Vol.43, No.2, Ser.No.445, PP.28-31, 1995.2.
- 2) 佐藤勝久, 八谷好高, 上中正志, 犬飼晴雄, 川本幸広, 塚田悟: 沈下したプレストレスト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, 1989.6.
- 3) 八谷好高, 福手勤, 梅野修一, 田中順: コンクリート舗装用グラウト材の品質, 港湾技研資料, No.818, PP.1-27, 1995.12.
- 4) 運輸省航空局: 空港コンクリート舗装構造設計要領, (財)航空振興財団, 1990.

STUDY ON QUALITY OF GROUT MATERIALS FOR PC PAVEMENT LIFT-UP METHOD

Akira UEZONO, Tadashi NAKASIMA, Takeshi MIYAUCHI,
Yasuo IMAI and Masahiro INADA

ABSTRACT: In case of lifting up a large scale PC pavement, grout injection is an important factor for construction and economy. In case that it is necessary that shorten closing time of airport facilities as it is possible, high-early-strength materials were hoped, and without that case grout materials that can support with 1day curing was selected. For a lift-up method construction at PC pavement, we reviewed about a quality of grout materials for a purpose that considers improvement of construction and arranges stress of grout layer to stabilize of structure. This paper reports summary of examinations about grout materials.