空港コンクリート舗装の目地間隔に関する研究

坪川将丈¹•八谷好高²

¹正会員 工修 国土交通省国土技術政策総合研究所空港研究部空港施設研究室研究官 ²正会員 工博 国土交通省国土技術政策総合研究所空港研究部空港施設研究室長 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

空港コンクリート舗装の目地間隔について検討した.まず,自然環境下におけるコンクリート試験舗装の挙動を約一年間にわたり観測し,測定した温度とひずみから,コンクリート版の拘束応力を算出して目地間隔による影響を評価した.次に3次元 FEM による解析を行い,目地間隔の違いが,拘束応力と荷重応力との合成応力に及ぼす影響を評価した.その結果として,コンクリート版に生じる拘束応力,合成応力は,目地間隔を 8.5 m とした場合でも,標準の 7.5 m の場合と比較して大差はなく,コンクリート版厚の設計には従来の方法を踏襲できることを明らかにした.

Key Word : joint spacings, shrinkage stress, thermal stress, concrete pavement, airport

1.はじめに

空港におけるコンクリート舗装では,目地間隔が 空港舗装構造設計要領¹⁾で定められている 縦方向施 工目地間隔としては,使用する施工機械の施工幅か ら7.5mを標準とし,横方向収縮目地は,版厚300mm 以上の場合は5.0~7.5mと経験的に定められている. 最近は7.5m以上の施工幅に対応できる施工機械も 存在することから,目地間隔を長くすることで,コ ンクリート舗装の構造的弱点である目地を減らし, 維持補修コストの削減ならびに乗り心地の向上を図 ることが可能になると考えられる.

しかしながら,自然環境下では,乾燥収縮や温度 変化によるコンクリート版の自由な変形が,版の重 量や路盤との摩擦により拘束されることで,コンク リート版に拘束応力が発生する.これらの拘束応力 は目地からの距離が長くなるほど大きくなると考え られることから²⁾,目地間隔を長くした場合,コンク リート版中央部において大きな拘束応力が発生する 恐れがある.現行の空港コンクリート舗装設計法で は,航空機荷重によって発生する応力の算定には Westergaard の中央部載荷公式が用いられており,荷 重以外の要因で発生する応力については,設計反復 作用回数に応じた安全率(1.7~2.2)を荷重応力に乗 じることで考慮しているが,目地間隔を長くした場 合,拘束応力が安全率で考慮している範囲を逸脱し, そこで、本論文では、目地間隔を標準より長くしたコンクリート舗装に発生する応力に関して検討した.まず、目地間隔を現行での最大値である7.5m、これよりも1m長い8.5mとした二種類のコンクリート舗装を屋外に製作した.次に、コンクリート舗装内部の温度、ひずみをおよそ一年間計測し、自然環境下においてコンクリート版に発生する各種の拘束応力について検討した.さらに、温度変化に曝されるコンクリート版に航空機脚荷重が載荷された場合に発生する応力に対して、目地間隔が及ぼす影響を明らかにするために3次元FEMによる解析を行い、目地間隔を長くした場合に必要なコンクリート版厚

コンクリート舗装のひび割れの原因となり得る.

2. 試験施工

について検討した.

旧運輸省港湾技術研究所野比実験場において,コ ンクリート試験舗装を製作した.この試験舗装の目 的は,目地間隔として,現行で標準とされている 7.5mを採用した区画と,標準より1m長い8.5mと した区画との間で,自然環境要因によるコンクリー ト版の短期的,長期的な挙動を比較検討し,現行基 準の見直しの可能性について明らかにすることであ る.具体的にはコンクリート版の乾燥収縮や温度変 化に伴う変形が拘束されることで生じる拘束応力の



図 - 1 試験舗装図

比較を行っている.

試験舗装の平面図,断面図を図-1 に示す.試験区 画は 区画, 区画であり,両区画とも幅員方向で 同一の断面である.また,両区画とも目地間隔を除 いては同じ条件で製作した.施工幅員,横方向収縮 目地間隔は, 区画では現在空港舗装で一般的に用 いられている 7.5m とし, 区画では 8.5m とした. 構造的には,コンクリート版の設計基準曲げ強度を 5MPa 設計航空機荷重を B-747 で代表される LA-1, 設計反復作用回数を 20,000 回,路盤の設計支持力係 数を 70MPa/m(平板直径 750mm)としたので,両区 画ともコンクリート版厚は 420mm となった.

(1) 路床の施工

路床の材料は現地の既存土(山砂)をそのまま用 いた.路床の施工は,所定深さ近くまでバックホウ で掘削を行い,7t タンデムローラで仮転圧を行った 後,出来形の計測を行った.路床材料の品質,出来 形に関しては両区画とも空港土木工事共通仕様書の 規定を満足していることを確認した.

(2) 下層路盤の施工

下層路盤には粒度調整砕石を用いた.下層路盤の施工は,ダンプトラックにより粒度調整砕石を現場に搬入後,ブルドーザ,バックホウにより1層目を敷き均し,7tタンデムローラで仮転圧を行った.その後,出来形の計測を行い,高さの微調整を行った後,7tタンデムローラにて転圧を行った.下層路盤材料の品質,出来形に関しては,両区画とも空港土木工事共通仕様書の規定を満足するものであった.

(3) 上層路盤の施工

上層路盤にはアスファルト安定処理材を用いた. 上層路盤の施工は、ダンプトラックによりアスファ ルト安定処理材を現場に搬入後、アスファルトフィ ニッシャにより敷き均し、初期転圧を7tタンデムロ ーラ、二次転圧を15tタイヤローラにより行った. アスファルト安定処理材の施工時の温度は、出荷時 160 ,現場到着時158 ,敷き均し時148 であり、 規格を満足するものであった.また,抜き取ったコ アによる出来形管理試験では,厚さ,締固め度とも に規格を満足するものであった.

(4) コンクリート版の施工

コンクリートに使用した材料は表-1 に,コンクリ ートの配合は表-2 に,試験施工前に実施したコンク リートの室内試験結果は表-3 に示すとおりである. コンクリート版の施工は2000年10月13日に行った. 当日の天候は曇り時々小雨,気温は18~20 であった.

コンクリート版は下層 280mm,上層 140mm の 2 層に分けて施工した.下層コンクリートはスプレッ ダで敷き均し,インナーバイプレータを用いて締め 固めた後,直径 6.35mm の再生異形棒鋼を 150mm×150mm の格子状に組み上げて製作した鉄網 を敷設した.上層コンクリートは 80cm/分の速度で コンクリートフィニッシャにより締め固めた.そし て,コンクリート版表面に箒目を入れ,養生を行っ た.養生は被膜養生剤を散布した後に,散水マット でコンクリート版表面を覆い,一日一回の散水を 7 日間継続した.なお,両区画とも,施工翌日にカッ タにより横方向収縮目地を設けたが,目地にはスリ ップバーを設置しなかった.

コンクリート版内部には,測温機能付きモールド ゲージを埋設した.図-2にコンクリート版内部のモ ールドゲージ埋設位置を示す.モールドゲージは版 自由端からの距離とコンクリート版の変形拘束度と の関係を確認するために,版施工方向に直角に配置 した.また,コンクリート版の自由変形ひずみを計 測するために,コンクリート版に埋設したものと同 じモールドゲージを埋め込んだ小型供試体を,コン クリート版近傍に作成した.小型供試体の厚さはコ ンクリート版と同じく420mmとし,長さと幅は路盤 との摩擦による拘束が無視できる寸法を考慮して²⁾, それぞれ530mm,150mmとして作成した.小型供試 体の周囲は,断熱のためにアルミテープを貼ってか ら発泡スチロール板で覆った.養生方法に関しては コンクリート版と同一とした.

| 使用材料 | | 種類または産地 | 物性値 | | |
|---------------|---------|--------------------------|----------------------------|--|--|
| セメント | | 普通ポルトランドセメント | 密度: 3.16 g/cm ³ | | |
| *日日++ 40 - 20 | | 茨城県笠間産硬質砂岩 | 密度: 2.69 g/cm ³ | | |
| 租育的 | 20 - 05 | 山口県伊佐町産石灰岩 | 単位容積質量:1.68 kg/l | | |
| 細骨材 | 砂 | 千葉県君津産山砂 | 密度: 2.61 g/cm ³ | | |
| 練混ぜ水 | 上水道水 | - | - | | |
| 混和剤 | AE 減水剤 | リグニンスルホン酸塩 | - | | |
| | 空気量調整剤 | 変性アルキルカルポン酸化合物系陰イオン界面活性剤 | - | | |

表-1 コンクリート材料

粗骨材は,40-20と20-05を等量混合して使用した.

表-2 試験施工に使用したコンクリートの配合

| ** | 畄位知母材容積 | 细母材家 | 日栖フランプ | 日栖空气景 | 単位量 (kg/m ³) | | 混和剤 | | | |
|-----|--|---------|-----------------------------------|-------|--------------------------|-----|-----|--------|------------|----|
| (%) | ギロ相目初谷禎 (m ³ /m ³) | ミング (%) | 日际スフノフ 日际 王 八里 (cm) (%) | 水 | セメ ント | 細骨材 | 粗骨材 | AE 減水剤 | 空気量 調整剤 | |
| 40 | 0.71 | 37.3 | 5 | 4.5 | 138 | 345 | 690 | 1193 | 0.4 | 4A |

セメント 1kg に対して空気量調整剤 1%水溶液を 2cc 添加した場合を 1A とした.

表-3 コンクリートの室内試験結果

| | 材齢7日 | 材齢 28日 | | | |
|-------------|-------|--------|--|--|--|
| 曲げ強度 (MPa) | 5.34 | 5.55 | | | |
| 圧縮強度 (MPa) | 31.3 | 36.4 | | | |
| 静弾性係数 (MPa) | 35600 | 36100 | | | |





図 - 3 小型供試体の収縮ひずみ

| 田門 | 区画熱膨張係数 (1×10 ⁻⁶ /) | | | 区画熱膨張係数 (1×10 ^{-6/}) | | | |
|------------|---------------------------------|-------|-------|--------------------------------|-------|-------|--|
| 舟川町 | 上面 | 中心部 | 下面 | 上面 | 中心部 | 下面 | |
| 10月15日~16日 | 11.23 | 10.26 | 13.38 | 9.39 | 8.59 | 11.70 | |
| 10月16日~17日 | 10.22 | 8.82 | 7.98 | 9.94 | 8.20 | 11.10 | |
| 10月17日~18日 | 11.67 | 8.16 | 7.22 | 8.60 | 10.82 | 12.28 | |
| 平均值 | | 9.88 | | | 10.06 | | |

表 - 4 小型供試体の熱膨張係数

4. 自然環境下におけるコンクリート版の拘束応力

試験舗装の製作が終了した後,自然環境下におけるコンクリート版の変形を調べるために,およそ一年間にわたりコンクリート版内部と小型供試体内部における温度とひずみを計測した.

(1) 軸方向拘束応力

コンクリート版に発生する乾燥収縮や,版内部の 年温度変化,日温度変化によって,コンクリート版 は軸方向に伸縮を繰り返す.しかし,この変形が拘 束されることで,コンクリート版には応力(拘束応 力)が発生する.軸方向拘束応力は,コンクリート 版の目地間隔を考慮するうえでは,非常に重要な因 子となることから,ここではコンクリート版の目地 間隔が異なる場合の軸方向拘束応力を,コンクリー ト版の収縮,年温度変化,日温度変化によるものに 分けて検討した.

a) 収縮による拘束応力

コンクリート版の収縮(乾燥収縮と自己収縮)に よる収縮ひずみ,および収縮拘束応力の発生状況に ついて検討した.

まず,外部拘束が極めて小さいと考えられる小型 供試体のひずみから,(1)式により算出した収縮ひず みを図-3に示す(材齢300日前後でデータが欠損し ている期間がある).収縮ひずみの算定に用いた小型 供試体の熱膨張係数αは,養生期間中のうち,小型 供試体のひずみが比較的安定していた,コンクリー ト版打設の翌々日から3日間の17:00から7:00を対 象とし,温度変化量と実ひずみ変化量の関係を深さ ごと,日ごとに最小二乗法で直線近似したときの傾 きの平均値を採用した.表-4には,それらより得ら れた熱膨張係数をまとめた.

$$\varepsilon_{sh} = \varepsilon - \alpha \Delta T \tag{1}$$

ここに,

ε_{sh}:小型供試体の収縮ひずみ(1×10⁻⁶)

ε :小型供試体の実ひずみ(1×10⁻⁶)

- α : 養生期間中の小型供試体のひずみ変化量か
 ら算出した熱膨張係数(1×10⁻⁶/)
- △T :小型供試体打設直後の最高温度からの温度
 差())

収縮ひずみは両区画とも,供試体上面において最 大となっており,供試体上面から位置が深くなるほ ど収縮ひずみは小さくなることが確認された.

これらの収縮変形が拘束されることにより,コン クリート版には拘束応力が発生する.(2)式により算 出したコンクリート版内部の収縮拘束応力を図-4 に示す(材齢300日前後でデータが欠損している期 間がある).(2)式において右辺の値が直接測定でき



図-4 コンクリート版の収縮拘束応力

| | 区画 | 国 |
|--|--------|--------|
| 2月1日 15:00 温度 () | 6.5 | 6.6 |
| 7月1日14:00温度() | 33.4 | 34.2 |
| 長期温度変化量() | 26.9 | 27.6 |
| 自由端における見かけの熱膨張係数 (1×10 ⁻⁶ /) | 6.84 | 7.13 |
| 有効弾性係数 (MPa) | 14400 | 14400 |
| 長期軸方向拘束度 | 0.062 | 0.014 |
| 長期軸方向拘束応力 (MPa) | - 0.16 | - 0.04 |

表 - 5 年温度変化による長期軸方向拘束応力

ないことから,ここでは R_{Ny} として(4)式で表わされ る収縮による変形を含んだ長期の温度変化による軸 方向拘束度の最大値を, E_e としてクリープ係数 ϕ を 用いた有効弾性係数(クリープ係数 ϕ は 1.5^{3})を, ε_{sh} としては(1)式で算出した小型供試体の収縮ひずみを 用いた.

$$\sigma_{sh} = -R_{Ny}E_e\varepsilon_{sh} \tag{2}$$

$$\sigma_{sh}$$
 :コンクリート版の収縮拘束応力(MPa)

- *R_{Ny}*:長期温度変化による軸方向拘束度 ((4)式より)
- E_e : コンクリートの有効弾性係数 (MPa, = $E/(1+\phi)$)
- *ε_{sh}*:小型供試体の収縮ひずみ(1×10⁻⁶)

収縮拘束応力は,目地間隔の長い 区画の方が, 目地間隔の短い 区画に比べてやや小さい結果が得 られた.また,長期温度変化による軸方向拘束度*R_{Ny}* が小さいこと(表-5)から,収縮拘束応力は両区画 とも非常に小さい引張応力であることがわかった. このことから,現行で標準として用いられている目 地間隔を 1m 長くすることが,コンクリート版の収 縮拘束応力に与える影響は小さいものと考えられる. b) 年温度変化による拘束応力

コンクリート版の収縮による変形も含んだ,年温 度変化による軸方向の変形が拘束されることによっ て発生する長期軸方向拘束応力を表-5に示す.具体 的には(3)式によって計算される.

$$\sigma_{Nv} = -R_{Nv}E_e\alpha_f\Delta T \tag{3}$$

ここに,

- σ_{Nv} :長期軸方向拘束応力(MPa)
- R_{Ny}: 長期温度変化による軸方向拘束度 ((4)式より)
- *E_e* : コンクリートの有効弾性係数
 (MPa, = *E*/(1+φ))
- △T : コンクリート版の長期における版厚方向平 均温度変化量())



(3)式における右辺の長期軸方向拘束度は式(4)に より求められる.

$$R_{Ny} = \frac{\alpha_f - \alpha_i}{\alpha_f} \tag{4}$$

ここに,

- *R_{Nv}* :長期温度変化による軸方向拘束度
- α_f : コンクリート版自由端における見かけの熱
 膨張係数(1×10⁻⁶/)
- α_i : コンクリート版内部における見かけの熱膨
 張係数(1×10⁻⁶/)

冬季から夏季にかけての温度変化による長期軸方 向拘束応力は,収縮拘束応力と同様に軸方向拘束度 が非常に小さいことから,両区画とも非常に小さい 圧縮応力であり,目地間隔が長い 区画でも, 区 画より大きくはない.夏季から冬季にかけての温度 低下期には,同程度の引張応力となることが予想さ れるが,コンクリートの強度と比較して非常に小さ いと考えられる.このことから,収縮拘束応力と同 様に,長期の温度変化によるコンクリート版の軸方 向の変形が拘束されて発生する軸方向拘束応力に対 しては,目地間隔による影響は小さいものと考えら れる.

c) 日温度変化による拘束応力

日温度変化に起因するコンクリート版の軸方向の 変形が拘束されることによって発生する短期軸方向 拘束応力は(5)式より算出した.

$$\sigma_{Nd} = E(\Delta \varepsilon_N - \Delta \varepsilon_{TN}) \tag{5}$$

ここに,

 σ_{Nd} :短期軸方向拘束応力(MPa)

E : コンクリートの弾性係数 (MPa)

 $\Delta \varepsilon_N$:実ひずみ変化量の版厚方向分布により求め た compensation line の軸成分 (1×10^{-6})

 $\Delta \varepsilon_{TN}$:温度ひずみ変化量の版厚方向分布により求 めた compensation line の軸成分 (1×10^{-6})

この場合のひずみ変化量は,コンクリート版の温 度が上昇し始める段階で,版厚方向の温度差が最小 となるとき(7:00頃)の温度と実ひずみを基準と して求めた,コンクリート版の軸変形成分 (compensation line の考え方を適合して算出)の変化 量である.本来は温度差がないときのものを基準と すべきであるが,それが困難なことから,上述のよ うな方法によった.

図-5 に軸方向拘束応力の季節的変動と日変動を示 す.軸方向拘束応力は,両区画とも日温度変化が最 大となる夏季において最も大きくなること,一年を 通して,目地間隔の違いによる影響は非常に小さい ことがわかる.

軸方向拘束応力の日変動を見ると,両区画とも温度が上昇する日中には,コンクリート版の膨張変形が拘束されることで圧縮応力が発生し,早朝には温度低下による収縮変形が拘束され引張応力が発生している.また,日温度変化が最大となる夏季においても,両区画の拘束応力は-0.8~0.1MPa程度であり,コンクリートの強度と比較して小さい.

以上のことから,目地間隔を 1m 長くすることに 起因して,軸方向拘束応力が増大する可能性は低い と考えられる.

(2) 曲げ拘束応力

日温度変化によるコンクリート版厚方向の温度差 による変形が外部より拘束されることにより,コン クリート版には曲げ拘束応力が発生する.ここでは, 目地間隔の違いがコンクリート版に発生する曲げ拘



束応力に与える影響を検討した.

図-6 に,コンクリート版下面に生じる曲げ拘束応 力の季節的変動と日変動を示す.コンクリート版下 面に生じる曲げ拘束応力は(6)式において計算される. この場合のひずみ変化量は,短期軸方向拘束応力を 算出した場合と同様に,版厚方向温度差が最小とな る7:00頃の温度とひずみを基準として算出した.

$$\sigma_M = E(\Delta \varepsilon_{M3} - \Delta \varepsilon_{TM3})$$
$$= -E(\Phi_M - \Phi_{TM}) \cdot h/2$$
(6)

ここに,

 σ_M : 曲げ拘束応力(MPa)E: コンクリートの弾性係数(MPa) $\Delta \varepsilon_{M3}$: 版下面の実ひずみの曲げ成分(1×10⁻⁶) $\Delta \varepsilon_{TM3}$: 版下面の温度ひずみの曲げ成分(1×10⁻⁶) Φ_M : 実ひずみ変化量の版厚方向分布により求め
た compensation line の傾き(1×10⁻⁶/m) Φ_{TM} : 温度ひずみ変化量の版厚方向分布により求

めた compensation line の傾き(1×10⁻⁶/m)

h : コンクリート版厚(m)

年間を通してみると,曲げ拘束応力は一日の温度 勾配が最大となる夏季に,両区画とも最大 2.5MPa 程度であることがわかる.これはコンクリート版の 設計基準曲げ強度(5MPa)のおよそ 50%に相当する ことから,荷重応力と同程度であり,コンクリート 版に及ぼす影響が非常に大きい応力であると言える.

曲げ拘束応力の日変動を見ると,版厚方向の温度 差が増大する朝から午後にかけて,コンクリート版 に発生する上に凸の変形が拘束されることで,コン クリート版下面には引張応力が発生しており,14:00 頃に最大となる.また,版厚方向の温度差が減少す る夕方から早朝にかけては,逆に圧縮応力が発生し ており,一日のうちで,軸方向拘束応力とは反対に 働いていることがわかる.この傾向は両区画におい て大差はない.

以上のことから,目地間隔を8.5mとした場合でも, 目地間隔が7.5m である場合と比較して曲げ拘束応 力には大差がなく,目地間隔を1m長くすることに 起因して曲げ拘束応力が増大する可能性は低いと考 えられる.

(3) 内部拘束応力

日温度変化によるコンクリート版厚方向の温度変



化量の分布が非線形であることに起因して,コンク リート版内には内部拘束応力が発生する.内部拘束 応力は曲げ拘束応力とともに,拘束応力全体に占め る割合が比較的大きい⁴⁾.ここでは目地間隔の違いが コンクリート版の内部拘束応力へ与える影響を検討 した.コンクリート版下面に生じる内部拘束応力は 具体的には(7)式によって計算される.この場合のひ ずみ変化量は,短期軸方向拘束応力,曲げ拘束応力 を算出した場合と同様に,版厚方向温度差が最小と なる7:00頃の温度とひずみを基準として算出した.

$$\sigma_{I} = E(\Delta \varepsilon_{I3} - \Delta \varepsilon_{TI3})$$

= $E\{\Delta \varepsilon - (\Delta \varepsilon_{N} - \Phi_{M} \cdot h/2)\}$
 $-E\{\Delta \varepsilon_{T} - (\Delta \varepsilon_{TN} - \Phi_{TM} \cdot h/2)\}$ (7)

ここに ,

- σ_I :内部拘束応力(MPa)
- $\Delta \varepsilon_{I3}$:版下面の実ひずみの内部拘束成分(1×10^{-6})
- $\Delta \varepsilon_{TI3}$:版下面の温度ひずみの内部拘束成分(1×10^{-6})
- △ε :実ひずみ変化量の版厚方向分布に対する近 似二次曲線によるひずみ変化量(1×10⁻⁶)
- △*ε_T* : 温度ひずみ変化量の版厚方向分布に対する 近似二次曲線によるひずみ変化量(1×10⁻⁶)

図-7 にコンクリート版下面に生じる内部拘束応力 の季節的変動と日変動を示す.年間を通してみると, コンクリート版下面に発生する内部拘束応力は,両 区画とも春季,夏季において最大となるが,目地間 隔が内部拘束応力に与える影響は大きくない.

夏季における内部拘束応力の日変動を見ると,両 区画ともコンクリート版の温度が上昇する朝から午 後にかけて圧縮応力となり,温度が下降する夕方か ら早朝にかけては引張応力となる傾向にある.版下 面では,深夜に最大1.8MPaの引張応力が発生してい ることから,設計基準曲げ強度と比較して,曲げ拘 束応力と同様に,大きな応力であるといえるが,一 日のうちでは曲げ拘束応力とは反対に働き,この傾 向は両区画で大差がないことがわかる.

以上のことから,現行で標準として用いられてい る目地間隔を 1m 長くすることが内部拘束応力に与 える影響は非常に小さいと考えられる.

(4) 全拘束応力

図-8に日温度変化によって版下面に発生する全拘 束応力(短期軸方向拘束応力,曲げ拘束応力,内部 拘束応力)の季節的変動,夏季における日変動を示 す.年間を通して見ると,拘束応力は両区画とも春 季において最大となっているが,夏季,秋季においても春季と同等の拘束応力が発生している.両区画とも最大で1.8MPa程度の拘束応力であり,目地間隔が1m異なることによる差は認められない.

一日を通してみると,曲げ拘束応力と内部拘束応 力は互いに相殺する向きに働くが,日中には曲げ拘 束応力の絶対値が大きく,結果として日中の拘束応 力は引張応力となる.この傾向は両区画とも大差は なく,拘束応力は夕方に最大となっていることがわ かる.

以上のことから,両区画に発生する全拘束応力に 差がなく,現行で用いられている目地間隔を 1m 長 くすることに起因して拘束応力が増大し,ひび割れ が発生する可能性は低いと言える.

4. コンクリート版に生じる合成応力の検討

自然環境下におけるコンクリート版の温度条件, 荷重条件を想定し,目地間隔の違いが,温度変化に よる拘束応力と航空機脚荷重による荷重応力との合 成応力に与える影響を,3次元 FEM による解析で検 討した.

(1) 解析手法

解析には市販の汎用 FEM アプリケーションを用 いた.使用した解析モデルの概略図を図-9 に示す. コンクリート版は 8 節点のソリッド要素によってモ デル化し,路盤以下の構造は支持ばね要素による Winkler 基礎とした.ただし,コンクリート版下面 と支持ばね要素の間には不連続要素を挿入し,コン クリート版と路盤との間に隙間が生じている箇所で は,路盤反力が生じないようにした.また,隣接す るコンクリート版との目地には,コンクリート版断 面に平行な二方向と垂直な一方向にそれぞれ独立し た目地ばね要素を,コンクリート版と路盤との間に は,水平方向に摩擦ばね要素を挿入した.

(2) 計算条件

計算条件としては,試験舗装におけるコンクリート版内部の温度とひずみの実測結果,室内における コンクリートの室内試験結果等を参考に,表-6に示 す計算条件を設定した.支持ばね要素のばね係数と しては,設計路盤支持力係数を採用した.また温度 条件は,およそ1年間にわたる観測期間中で温度勾 配が最も大きかった7月1日のコンクリート版内部 温度分布を参考にした.この日の両区画の温度分布 を図-10に示す.この温度分布から,各種拘束応力 の算定に使用する温度条件を compensation line の 考え方を適用して設定した.



図 - 9 解析モデル概略図

表 - 6 計算条件

| 項目 | 数値 | | |
|--------------------------------------|---------|-----|--|
| コンクリートの弾性係数 (MPa) | 36100 | | |
| コンクリートのポアソン比 | 0.15 | | |
| コンクリートの密度 (g/cm ³) | 2.4 | | |
| コンクリート版厚 (m) | 0.42 | | |
| | 7.5 (| 区画) | |
| コンシュード版の自地间隔(III) | 8.5 (| 区画) | |
| コンクリートの執影で低数 (1×10 ^{-6/)}) | 9.77 (| 区画) | |
| | 10.06 (| 区画) | |
| 支持ばね要素の | 70 | | |
| 単位面積あたりのばね係数 (MN/m ³) | 70 | | |
| 軸方向最大温度変化量() | 7.44 | | |
| 版厚方向最大温度勾配 (/m) | 39.44 | | |

(3) ばね係数の決定

-日の温度変化によって,コンクリート版に発生 する拘束応力を3次元 FEM により解析し,その結果 が温度とひずみの実測値から算出した拘束応力と一 致するように,解析モデルで使用する目地ばね要素, 摩擦ばね要素のばね係数を決定した.ここでは,そ れぞれの拘束応力の値に大きく影響すると考えられ る要素のばね係数を変化させて解析を行った、すな わち,軸方向拘束応力に関してはコンクリート版と 路盤との間に挿入した摩擦ばね要素のばね係数を, 曲げ拘束応力については,隣接するコンクリート版 との目地に挿入した断面垂直方向の目地ばね要素の ばね係数を変化させている.目地ばね要素のうち, 版断面に平行な方向に挿入した要素のばね係数につ いては,隣接する版同士が断面に平行な方向に互い に同じ変形を示すために,拘束応力に与える影響は 小さいこと5)から一定値を用いた.具体的には,コン クリート版縁部で FWD により計測したコンクリー ト表面の最大たわみと,同条件にて FEM による解 析から求めた最大たわみが一致するよう,目地平行 方向のばね係数を変化させて解析を行い,単位面積 あたりのばね係数を 1×10⁸N/m³とした.

単位面積あたりのばね係数と拘束応力の関係を図 -11 に示す.ばね係数が大きくなるほど,拘束応力 が大きくなっているのがわかる.これは,ばね係数



図 - 12 コンクリート版下面における応力の日変動

の増大に伴い,温度変化によるコンクリート版の自 由な変形が大きく拘束されるためと考えられる.自 然環境下における温度とひずみの計測値から求めた 拘束応力と比較すると,摩擦ばね要素のばね係数と しては,1×10⁸N/m³程度を,目地ばね要素のばね係数 としては,2×10⁶N/m³程度を使用すれば良いことがわ かる.目地ばね要素のばね係数が比較的小さいのは, 隣接するコンクリート版との目地には荷重伝達装置 を何ら用いていないことから,曲げモーメントの伝 達が小さいためと考えられる.

(4) 目地間隔が合成応力に及ぼす影響

(3)で決定したばね係数を使用して,温度変化に曝 されるコンクリート版に航空機脚荷重が載荷された 場合の合成応力を算出し,目地間隔が合成応力に及 ぼす影響を検討した.荷重条件としては B-747 の脚 荷重(複々車輪,910kN)を,コンクリート版中央部 と車輪一つの中央とが一致するように設定した.

図-12 に,夏季にコンクリート版下面に発生する 応力の日変動を示す.図には,温度変化による拘束 応力 σ_{temp} と航空機脚荷重による荷重応力 σ_{load} との 和 $\sigma_{temp} + \sigma_{load}$,各々の条件を組み合わせた場合に発 生する合成応力 $\sigma_{temp+load}$ を示した.

時刻によらず,各々算出した拘束応力と荷重応力 との和は合成応力よりも小さく,この傾向は既往の 研究結果と一致する⁶⁾.また,応力が最大となる時刻 に関しては,各々の応力の和は,拘束応力が最も大 きくなる19:00頃に最大となっているが,合成応力 は,温度勾配が最大となる14:00頃に最大となって いる.また,各々の応力の和と合成応力との比較で は,温度勾配が大きい日中において差が大きく,深 夜ではほとんど差が生じていない.

しかし合成応力に関しては,目地間隔が1m 長い ことによる影響はほとんど見られず,目地間隔が 8.5mの場合でもコンクリートの設計基準曲げ強度を 超える応力は発生していないことから,目地間隔が 8.5mの場合でも,従来の版厚設計法を踏襲すること ができると考えられる.

5.結論

空港コンクリート舗装における目地間隔について, 屋外での試験舗装の挙動観測, FEM による解析の結 果から以下に示す結論が得られた.

- (1) コンクリート版に発生する収縮拘束応力と長期 軸方向拘束応力は,目地間隔に関わらず非常に 小さな応力であり,目地間隔を8.5mとした場合 でも,7.5mの場合と比較して大きくはない.
- (2) 日温度変化による軸方向拘束応力は,目地間隔に関わらず小さい応力であり,日中の温度変化で曲げ拘束応力とは逆向きに働くために,目地間隔を8.5mとしても,ひび割れの原因となる可能性は小さい.
- (3) 曲げ拘束応力と内部拘束応力は,荷重応力に匹 敵するほどの大きな成分であるが,目地間隔の 違いによる影響は小さい.
- (4) 温度変化が生じているコンクリート版に航空機 荷重が載荷された場合でも,目地間隔の違いが 合成応力に与える影響は小さく,従来の目地間 隔の場合と同様の版厚設計法を踏襲できる.

6.おわりに

従来の 7.5m から 8.5m へと目地間隔を長くした場 合にコンクリート版に発生する応力を検討した.今 回の検討結果では,目地間隔が従来より 1m 長いこ とに起因する応力の増加は非常に小さく,8.5m 程度 の目地間隔であれば,供用中でも何ら問題は生じな いものと考えられる.しかし,コンクリートの乾燥 収縮量や温度変化量が今回の環境下におけるものよ りも大きくなる場合には注意する必要がある.

最後に,試験舗装の挙動観測においては,独立行 政法人港湾空港技術研究所に協力頂いたことを記し, 謝意を表します.

参考文献

 (1) 運輸省航空局:空港舗装構造設計要領,財団法人港湾 空港建設技術サービスセンター,pp.42-46,1999.

- (2) セメント協会重交通舗装専門委員会:重交通舗装専門 委員会報告書,社団法人セメント協会,pp.251-291, 1995.
- (3) 土木学会コンクリート委員会:コンクリート標準示方 書舗装編,社団法人土木学会,134p,1996.
- (4) 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.
- (5) 西澤辰男,村田芳樹,中川達裕:薄層ホワイトトッピング工法におけるコンクリート版のそり応力,土木学会論文集第6巻,pp.176-185,2001.
- (6) Mirambell, E. : Temperature and Stress Distributions in Plain Concrete Pavements under Thermal and Mechanical Loads, Proceedings of 2nd International Workshop on the Theoretical Design of Concrete Pavements, pp.121-135, 1990.

Study on Joint Spacings of Airport Concrete Pavements

Yukitomo TSUBOKAWA and Yoshitaka HACHIYA

This paper describes the possibility of elongation of joint spacings in airport concrete pavements. First, experimental pavements of which joint spacings were 7.5 m and 8.5 m (conventional and longer) were constructed, and strain and temperature in concrete pavements were measured to study the influence of joint spacings on shrinkage stress and thermal stress. Then, the influence of joint spacings on stress due to both load and temperature change were analyzed by using finite element method. As a result, it was found that the differences of stresses due to both load and temperature change were negligible between two joint spacings, and the current design method of the slab thickness was also applicable in the case of longer joint spacings.