

# 日温度変化による空港コンクリート舗装の 温度応力に関する研究

坪川将丈<sup>1</sup>・水上純一<sup>2</sup>・八谷好高<sup>3</sup>・亀田昭一<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 国土交通省国土技術政策総合研究所 空港施設研究室（〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1）

<sup>2</sup>正会員 工修 国土交通省国土技術政策総合研究所 空港施設研究室（〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1）

<sup>3</sup>フェロー会員 工博 独立行政法人港湾空港技術研究所 空港研究センター（〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1）

<sup>4</sup>正会員 工修 成田国際空港株式会社 内部監査室（〒286-8601 成田市成田国際空港内 NAA ビル）

空港コンクリート舗装の設計では、航空機荷重による荷重応力と温度変化や収縮等による版の変形が拘束されることによる温度応力を考慮する必要がある。我が国の現行の空港コンクリート舗装設計法では、交通量に応じた安全率を用いて温度応力を考慮しているが、疲労破壊曲線による疲労度の照査の場合には、具体的に温度応力を算出する必要がある。本研究では、道路舗装の設計に用いられている温度応力式を参考に、版が厚い空港コンクリート舗装に適用可能な温度応力式を検討した。その結果、版厚が厚い場合には温度応力は小さくなる傾向を明らかにし、空港コンクリート舗装の温度応力を定式化した。

**Key Word** : thermal stress, warping stress, internal stress, airport concrete pavement

## 1. はじめに

空港コンクリート舗装の設計で考慮すべき応力としては、航空機荷重により発生する荷重応力と、コンクリート版の温度変化や収縮等による自由な変形が版の自重や版と路盤との摩擦により拘束されることで発生する温度応力がある。我が国の現行の空港コンクリート舗装の版厚設計法では、荷重応力の算出については、Westergaard<sup>1)</sup>の中央部載荷公式を元にした影響図<sup>2)</sup>を福手<sup>3)</sup>が電算化したプログラムが用いられている。一方、温度応力については、米国のポルトランドセメント協会の研究<sup>4)</sup>において、最も影響の大きい交通荷重による応力に対して適切な安全率で設計すれば、荷重応力以外の応力に対しても十分安全な範囲であることが示されている。そこで我が国の空港舗装では、米国陸軍工兵隊の実験等<sup>5)</sup>を参考に定めた表-1の安全率でコンクリート設計基準曲げ強度を割り、荷重応力がその強度以下となる版厚を算出している<sup>6)</sup>。

表-1の安全率については、交通量の増大に対応するため、平成2年の空港コンクリート舗装構造設計要領改訂において、設計反復作用回数の区分として新たにO区分（設計反復作用回数40,000回）が追加された際に、その安全率としては、M区分とN区分の設計反復作用回数と安全率の関係から外挿により2.2を設定した経緯がある。

表-1 空港コンクリート舗装における安全率

| 設計反復作用回数       | 設計反復作用回数区分 | 安全率 |
|----------------|------------|-----|
| 3,000 回        | M          | 1.7 |
| 5,000～20,000 回 | N          | 2.0 |
| 40,000 回       | O          | 2.2 |

近年では航空機の大型化や運行の多頻度化が進み、現行の設計法で考慮されていなかった大型航空機荷重や多頻度交通量（反復作用回数）を設計条件として考慮しなければならない場合、荷重応力と温度応力を個別に算出しなければならぬ場合、荷重応力と温度応力を個別に算出し、コンクリート疲労破壊曲線により空港コンクリート舗装の疲労度を照査することもある。この場合には、コンクリート版が曝される気象条件を考慮して、温度応力を算出する必要があるが、現行設計法では、温度応力の影響は安全率により考慮されているため、温度応力を定量的に算出することはしていない。

道路コンクリート舗装では、岩間<sup>7)</sup>が厚さ20cmと25cmのコンクリート版の長期観測結果を元にした温度応力式が用いられているが、空港コンクリート舗装のようにコンクリート版が厚い場合、版内部の温度分布が道路舗装と異なると考えられることから、これを適用できない恐れがある。また、空港コンクリート舗装の温度応力に着目した長期観測結果についても例がない。

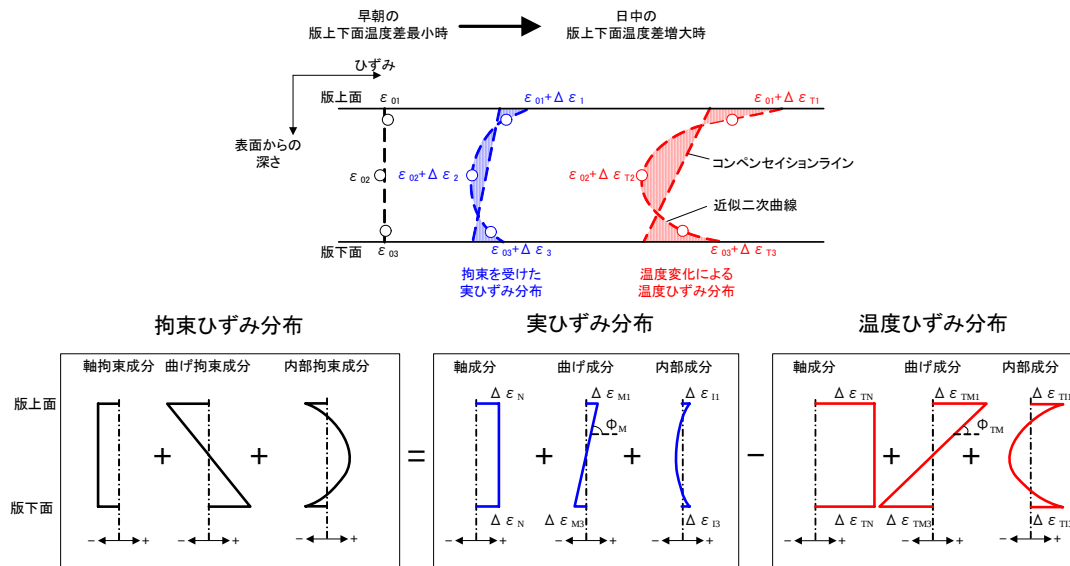


図-1 温度応力概念図

以上の背景から、空港コンクリート舗装の設計に適用可能な温度応力算出方法の定式化を目的として、ひずみ計を埋設したコンクリート試験舗装を製作し、コンクリート版中央部の温度分布と水平ひずみ分布の長期観測を実施した。また、コンクリート版の熱収支解析により版厚および上層路盤材料の違いについて検討した。

## 2. 道路舗装における温度応力式

我が国の道路コンクリート舗装に生じる温度応力の算出方法としては、岩間が提案した温度応力式が実際の設計において使用されている。岩間は、コンクリート版の温度とひずみの長期観測結果から、図-1に示すような図解法により、軸拘束応力、曲げ拘束応力、内部拘束応力の各成分を算出し、その傾向を以下のように明らかにしている。

- ①軸拘束応力については、応力が0となる基準時刻を何時にとるかが問題であるが、いずれにせよ、比較的大きな圧縮応力となることが多く、また引張応力となる場合は少ないことから、この応力は設計上無視しても一般的に安全側となる。
- ②曲げ拘束応力は13時頃に引張最大となり、早朝5時頃に圧縮最大となる。また、曲げ拘束応力はコンクリート版が厚いほど大きいが、厚さには比例せず、厚いほど単位厚さあたりの応力が小さくなる。
- ③内部拘束応力は、曲げ拘束応力が引張応力となる時点では概ね圧縮応力であり、その大きさは曲げ拘束応力の30%を超える日が少なくない。

以上の結論から、コンクリート版中央部に発生する温度応力の算出には、版内温度分布が線形で、且つ版の自由な変形が完全に拘束されたと仮定した場合の

Westergaard による曲げ拘束応力式<sup>9)</sup>に、内部拘束応力による減少分を示す係数を乗じた(1)式が用いられている<sup>9)</sup>。また、(1)式を用いて温度応力を算出するために、版厚別の版上下面温度差頻度分布<sup>10)</sup>が示されている。

$$\sigma = 0.7 \frac{E \alpha \theta'}{2(1-\nu)} \quad (1)$$

ここに、

- $\sigma$  : 温度応力 (MPa)
- $E$  : コンクリートの弾性係数 (MPa)
- $\alpha$  : コンクリートの線膨張係数 (1/°C)
- $\theta'$  : コンクリート版上下面の温度差 (°C)
- $\nu$  : コンクリートのポアソン比

以上を踏まえ、空港コンクリート舗装における温度応力式の検討では、曲げ拘束応力と内部拘束応力の和を温度応力とした。日温度変化による軸拘束応力を考慮しない理由は、軸拘束応力が他の成分と比較して小さいことだけでなく、軸拘束応力について厳密な検討を行うためには、施工直後のひずみを基準とした長期的な温度変化や収縮等の影響についても考慮する必要があると考えられるからである。

## 3. 試験施工

旧運輸省港湾技術研究所野比実験場において、コンクリート版内部の温度とひずみの長期観測を行う目的で、コンクリート試験舗装を製作した。

試験舗装の平面図と断面図を図-2に示す。観測を行った版は図のF区画であり、目地間隔は8.5mである。また、コンクリート材料としては設計基準曲げ強度 5.0MPa の普通コンクリートを使用した。構造的には、設計航空機荷重区分を、B-747-400の航空機脚荷重を代表設計荷重と

表-2 試験施工に使用したコンクリートの配合

| W/C<br>(%) | 単位<br>粗骨材<br>容積<br>(m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ) | 細骨<br>材率<br>(%) | 目標<br>スラ<br>ンプ<br>(cm) | 目標<br>空気量<br>(%) | 単位量 (kg/cm <sup>3</sup> ) |     |     |       | 混和剤                |             |
|------------|------------------------------------------------------|-----------------|------------------------|------------------|---------------------------|-----|-----|-------|--------------------|-------------|
|            |                                                      |                 |                        |                  | W                         | C   | S   | G     | AE<br>減水剤<br>(C×%) | 空気量<br>調整剤* |
| 40         | 0.72                                                 | 36.6            | 5                      | 4.0              | 138                       | 345 | 676 | 1,208 | 1.0                | 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。

する 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 70MN/m<sup>3</sup> (平板直径 750mm による) と設定したので, コンクリート版厚は 42cm となった。

施工に用いたコンクリートの配合を表-2 に示す。材齢 28 日における室内試験の結果, 曲げ強度平均値は 5.55MPa, 静弾性係数平均値は 36,100MPa であった。

コンクリート版の施工は 10 月に行った。当日の天候は曇り時々小雨, 気温は 18~20°C であった。コンクリート版施工後は, 被膜養生剤を散布した後に散水マットを敷き, 散水養生を 7 日間継続した。施工翌日にカットにより横方向収縮目地を設けたが, 目地にはダウエルバーを設置しなかった。コンクリート版内部には, 深さ方向の温度と水平ひずみ分布を測定するために, コンクリート版中央部の表面から 3cm, 21cm, 39cm の位置に測温機能付きひずみ計を埋設し, 一時間毎に計測を行った。また, コンクリートの自由変形ひずみを測定するために, コンクリート版近傍に小型供試体 (幅 15cm, 長さ 53cm, 高さ 42cm) を作成し, コンクリート版に埋設したのと同じひずみ計を供試体中央部分に長手方向に設置した。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で覆い, 養生方法に関してはコンクリート版と同一とした。

#### 4. コンクリート試験舗装の長期観測

##### (1) コンクリートの線膨張係数

コンクリート版近傍の小型供試体における散水養生中の温度とひずみの関係から, コンクリートの線膨張係数を算出した。その結果, コンクリートの線膨張係数は平均で  $10.06 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  と, 一般的と考えられる値が得られた。以降の温度変化による温度ひずみの算出には, この値を用いることとした。

##### (2) 温度応力の算出手順

12 月から一年間にわたるコンクリート版の温度とひずみの測定値から, 1 時間毎の温度応力を算出した。温度とひずみのデータとしては, 版中央部のものを使用した。算出手順を以下に示す<sup>1)</sup>。

①毎日の早朝および夕方に版上下面温度差  $\theta'$  が最小 (≒ 0) になる時刻を基準時刻として設定し, 基準時刻における温度とひずみをそれぞれ基準温度  $T_0$ , 基準ひずみ  $\varepsilon_0$  とする。このように, 毎日朝夕に基準時刻を設定す

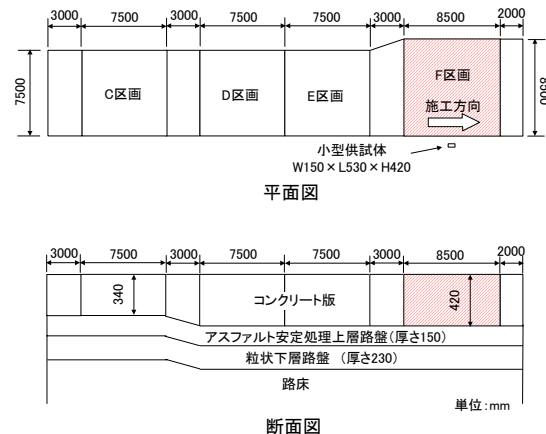


図-2 試験舗装図

ることで, 基準時刻間の収縮ひずみの変化は無視できる程度となり, 日温度変化による温度応力を検証することが可能となる。

- ②版深さ方向の 3 点について, 基準温度  $T_0$  からある時刻における実測温度  $T$  までの温度変化量  $\Delta T$ , 温度ひずみ変化量  $\Delta \varepsilon_T$  を算出する。次に, 図-1 に示すように,  $\Delta \varepsilon_T$  の近似二次曲線とコンペンセーションラインを算出し, 温度ひずみの軸成分  $\Delta \varepsilon_{TN}$ , 曲げ成分  $\Delta \varepsilon_{TM}$ , 内部成分  $\Delta \varepsilon_{TI}$  を算出する。
- ③版深さ方向の 3 点について, 基準ひずみ  $\varepsilon_0$  からある時刻における実測ひずみ  $\varepsilon$  までの実ひずみ変化量  $\Delta \varepsilon$  を算出する。次に, 図-1 に示すように,  $\Delta \varepsilon$  の近似二次曲線とコンペンセーションラインを算出し, 実ひずみの軸成分  $\Delta \varepsilon_N$ , 曲げ成分  $\Delta \varepsilon_M$ , 内部成分  $\Delta \varepsilon_I$  を算出する。
- ④温度ひずみ変化量  $\Delta \varepsilon_T$  と実ひずみ変化量  $\Delta \varepsilon$  の各成分から, (2)~(4)式により, 版下面における軸拘束応力  $\sigma_N$ , 曲げ拘束応力  $\sigma_{M3}$ , 内部拘束応力  $\sigma_{I3}$  を算出する。また, 2 章で述べた理由から, 曲げ拘束応力と内部拘束応力の和を温度応力とする。

$$\sigma_N = E(\Delta \varepsilon_N - \Delta \varepsilon_{TN}) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{M3} &= E(\Delta \varepsilon_{M3} - \Delta \varepsilon_{TM3}) \\ &= -E(\Phi_M - \Phi_{TM}) \cdot h/2 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{I3} &= E(\Delta \varepsilon_{I3} - \Delta \varepsilon_{TI3}) \\ &= E\{\Delta \varepsilon_3 - (\Delta \varepsilon_N - \Phi_M \cdot h/2) \\ &\quad - E\{\Delta \varepsilon_{T3} - (\Delta \varepsilon_{TN} - \Phi_{TM} \cdot h/2)\} \end{aligned} \quad (4)$$

ここに,

$E$  : コンクリートの弾性係数 (MPa)

$h$  : コンクリートの版厚 (m)

$\sigma_N, \sigma_{M3}, \sigma_{I3}$  :

版下面における軸拘束応力, 曲げ拘束応力, 内部拘束応力 (MPa)

$\Delta\varepsilon_N, \Delta\varepsilon_{M3}, \Delta\varepsilon_{I3}$  :

実ひずみ変化量の版深さ方向分布から求めたコンペンセーションラインの版下面における軸成分, 曲げ成分, 内部成分 ( $1 \times 10^{-6}$ )

$\Delta\varepsilon_{TN}, \Delta\varepsilon_{TM3}, \Delta\varepsilon_{TI3}$  :

温度ひずみ変化量の版深さ方向分布から求めたコンペンセーションラインの版下面における軸成分, 曲げ成分, 内部成分 ( $1 \times 10^{-6}$ )

$\Delta\varepsilon_3, \Delta\varepsilon_{T3}$  :

版下面における実ひずみ変化量, 温度ひずみ変化量 ( $1 \times 10^{-6}$ )

$\Phi_M, \Phi_{TM}$  :

実ひずみ変化量と温度ひずみ変化量の版深さ方向分布から求めたコンペンセーションラインの傾き (版表面温度 > 版下面温度の場合に正,  $1 \times 10^{-6}/m$ )

### (3) 日温度変化によるコンクリート版の挙動

図-3 に, 実ひずみ変化量と温度ひずみ変化量のコンペンセーションラインの傾きである  $\Phi_M$  と  $\Phi_{TM}$  から算出される版中央部の曲げ拘束度  $R_M$  の度数分布を示す. 曲げ拘束度は(5)式で定義される<sup>11)</sup>.

$$R_M = \frac{\Phi_{TM} - \Phi_M}{\Phi_{TM}} \quad (5)$$

温度応力の引張・圧縮に関わらず, 版中央部の曲げ拘束度は  $0.9 \sim 1.0$  であり, 曲げ変形の拘束は完全拘束に近いことがわかる.

版上下面温度差の度数分布を図-4 に示す. 版上下面温度差は  $-5^\circ\text{C} \sim 0^\circ\text{C}$  となる割合が最も高い. また, 版上下面温度差が正となる時刻の割合は 4 割程度, 負となる時刻の割合は 6 割程度である. しかしながら, 後述するように, 版上下面温度差が正の時刻に必ずしも引張温度応力となるものではないことに留意する必要がある.

版上下面温度差が観測期間中に最も大きかった 8 月のある一日の温度応力と版上下面温度差の日変動を図-5 に示す. 版上下面温度差が最大となる 15 時頃に曲げ拘束応力も最大となるが, 内部拘束応力はこの時点で圧縮応力であり, 両者の和である温度応力としては 17 時頃に最大となっている. 岩間はこのように曲げ拘束応力と内部拘束応力の時間差の存在を指摘しており, 内部拘束応力が曲げ拘束応力の 0.3 倍を超える日も少なくないことから, 温度応力としては曲げ拘束応力の 0.7 倍程度としている.

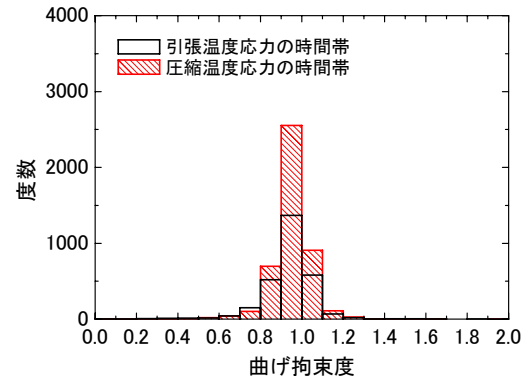


図-3 曲げ拘束度の度数分布

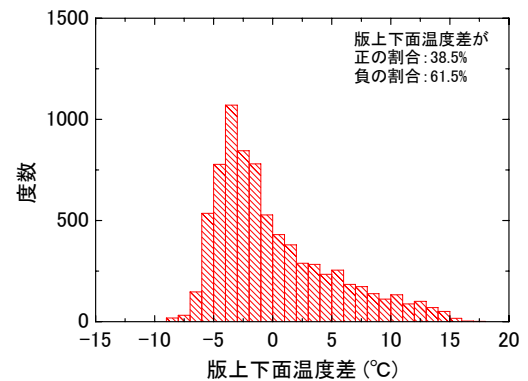


図-4 版上下面温度差の度数分布

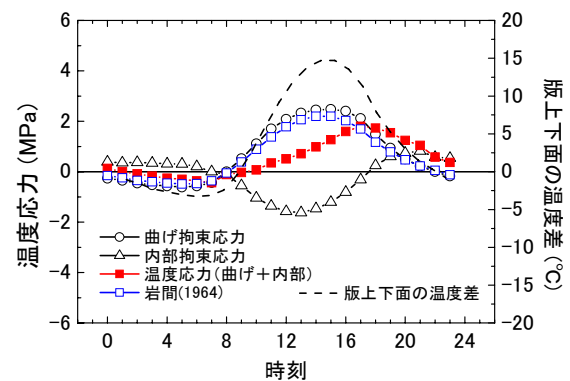


図-5 温度応力の各成分と版上下面温度差の日変動

そこで, 空港コンクリート舗装における曲げ拘束応力と内部拘束応力の割合について検証した. 図-6 に日最大引張曲げ拘束応力が発生する際の, 曲げ拘束応力に対する内部拘束応力の比率の度数分布を示す. 図-5 に示したとおり, 曲げ拘束応力が最大となる時刻では, 内部拘束応力の比は負となる. すなわち, 引張の曲げ拘束応力が発生しているときには, それを低減させる圧縮の内部拘束応力が発生していることがわかる. また, 曲げ拘束応力と内部拘束応力は時刻により大きく変動することから, 両者の比は一定とはならないが, この比率は 0.4 から 0.7 の場合が最も多いことから, 空港コンクリート舗装のように版が厚い場合には, 岩間が指摘しているよりも, 内部拘束応力は曲げ拘束応力に対して大きいと考えられる.

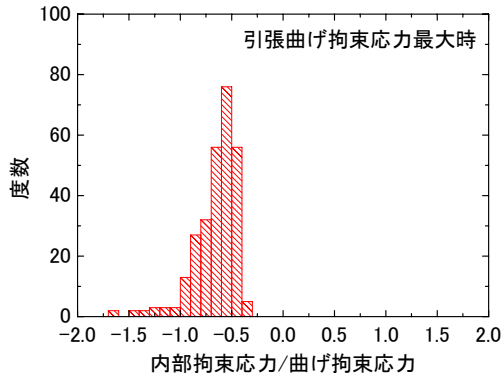


図-6 曲げ拘束応力に対する内部拘束応力の比の度数分布

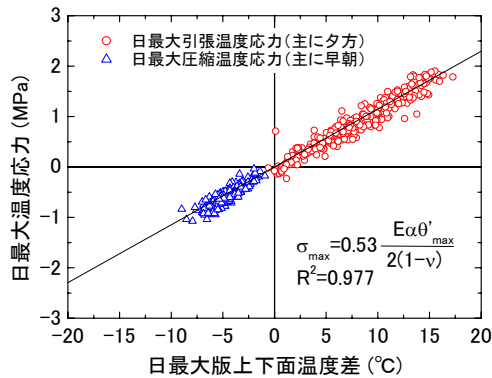


図-7 日最大温度応力と日最大版上下面温度差の関係

#### (4) 温度応力式の検討

コンクリート版中央部における一年間の温度とひずみの測定結果による、日最大版上下面温度差（夕方に発生する正の最大値と早朝に発生する負の最大値）と日最大温度応力（夕方に発生する引張応力の最大値と早朝に発生する圧縮応力の最大値）との関係を図-7に示す。図-5に示したとおり、版上下面の温度差が最大となる時刻に温度応力は最大にはならないが、日最大温度応力と日最大版上下面温度差との間には非常に強い相関があり、日最大温度応力は日最大版上下面温度差を説明変数とする一次式で近似できることがわかる。この近似式を、岩間が提案したコンクリート版中央部の温度応力式と同様の形で表したのが(6)式である。

$$\sigma_{\max} = 0.53 \frac{E\alpha\theta'_{\max}}{2(1-\nu)} \quad (6)$$

(6)式からわかるとおり、厚さ 42cm の空港コンクリート舗装の版中央部における温度応力は、岩間の温度応力式により算出したものよりも 25%程度小さいことがわかる。これは前述したように、コンクリート版が厚い場合、特に引張の曲げ拘束応力が大きくなる午後では、圧縮の内部拘束応力が大きくなることにより、引張の温度応力が低減されるためと考えられる。

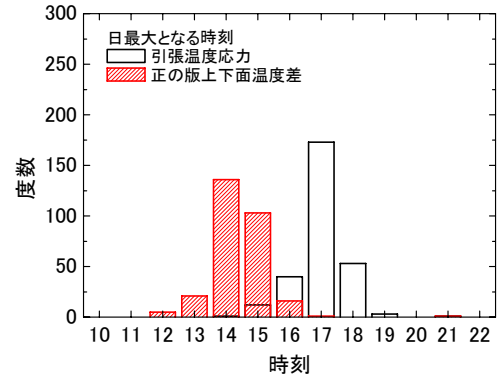


図-8 引張温度応力および正の版上下面温度差が最大となる時刻の度数分布

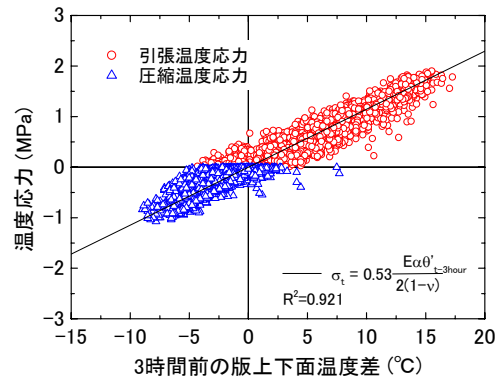


図-9 毎時の温度応力とその3時間前の版上下面温度差の関係

#### (5) 版上下面温度差と温度応力の時間差

荷重応力と日温度変化に起因する温度応力を考慮して空港コンクリート舗装の疲労度照査を行う場合、昼夜の交通量の違いを考慮して、ある時刻に発生する荷重応力と温度応力の大きさ・頻度を正確に考慮できることが望ましい。(6)式は日最大温度応力と日最大版上下面温度差との相関から導いた温度応力式であるが、前述したように、温度応力と版上下面温度差がそれぞれ最大となる時刻には時間差がある。従って、ある時刻に版に発生する温度応力を推定する場合、同時刻の版上下面温度差を(6)式に入力することは適切ではない。そこで、温度応力と版上下面温度差がそれぞれ最大となる時刻について検討した。

図-8に引張温度応力と正の版上下面温度差がそれぞれ最大となる時刻の頻度分布を示す。今回測定した厚さ 42cm のコンクリート版では、14 時頃に版上下面温度差が最大となり、温度応力はその 3 時間後の 17 時頃に最大となる傾向があることがわかる。ある時刻の温度応力と、その 2, 3, 4 時間前の版上下面温度差との相関は、決定係数がそれぞれ 0.90, 0.92, 0.82 となり、温度応力と 3 時間前の版上下面温度差との相関が最も高い。

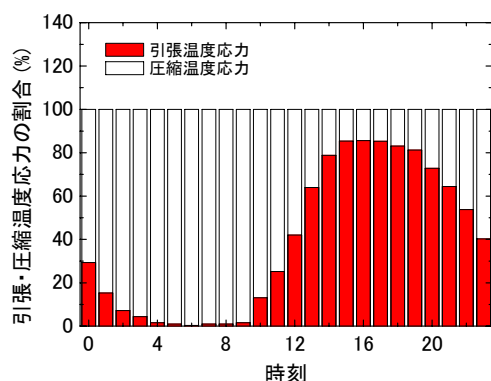


図-10 時刻別の引張・圧縮温度応力の割合

以上のことから、42cm 厚のコンクリート版における一年間の毎時間の温度応力と、その 3 時間前の版上下面温度差との関係を示したのが図-9 である。これによると、日最大温度応力と日最大版上下面温度差の関係から求めた(6)式に 3 時間前の版上下面温度差を入力することにより、毎日の最大温度応力のみならず、毎時間の温度応力を精度良く推定できることがわかる。

図-10 に時刻別の引張温度応力と圧縮温度応力の割合を示す。昼間に負の温度勾配となる日もあること、昼間に内部拘束応力が曲げ拘束応力より大きくなる日もあることから、圧縮応力が発生する場合もあるが、引張温度応力が発生するのは、概ね 10 時から深夜 1 時までであることがわかる。このことから、42cm 程度の厚さのコンクリート版に対して疲労度の照査を行う場合は、概ね 10 時から深夜 1 時の間に引張温度応力が発生すると仮定し、この時間帯の温度応力の値を(6)式から算出する場合には、その 3 時間前の概ね 7 時から 22 時までの版上下面温度差の頻度分布を使用することで、精度良く温度応力を算出することが可能であると考えられる。

## 5. 温度応力の解析的検討

前章において、空港コンクリート舗装のように版が厚い場合には、内部拘束応力が大きいと考えられることから温度応力が小さくなることを示した。しかしながら、アスファルト安定処理上層路盤上にある版厚が 42cm のコンクリート版に対してのみの検討であることから、版厚や上層路盤材料が異なる場合について検討するため、熱伝導、熱伝達、放射を考慮した有限要素法による熱収支解析を実施し、コンクリート版内温度分布および温度応力を検討した。

### (1) 解析手法

図-11 に解析モデルを示す。モデルは二次元モデルとし、コンクリート版の厚さは 26～58cm とした。下層路盤材料と路床材料の熱特性はほぼ同一であることから、計算の簡略化のため、深さ 250cm までを粒状下層路盤材とした。

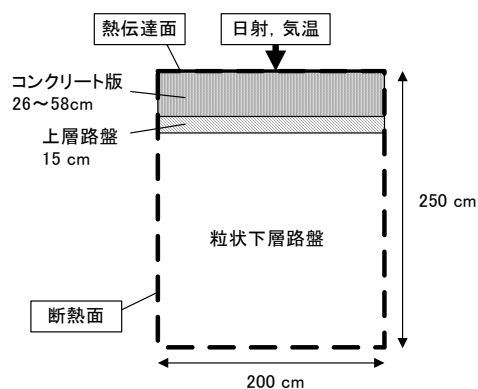


図-11 熱収支解析モデル図

表-3 解析に用いた熱特性値

| 項 目           |                              | 設定値   |
|---------------|------------------------------|-------|
| コンクリート        | 比熱 (J/(kg・K))                | 1,050 |
|               | 熱伝導率 (W/(m・K))               | 2.7   |
|               | 熱伝達率 (W/(m <sup>2</sup> ・K)) | 12    |
|               | 密度 (t/m <sup>3</sup> )       | 2.4   |
|               | 日射吸収率                        | 0.6   |
| アスファルト<br>混合物 | 比熱 (J/(kg・K))                | 890   |
|               | 熱伝導率 (W/(m・K))               | 1.1   |
|               | 密度 (t/m <sup>3</sup> )       | 2.35  |
| 粒状路盤<br>材料    | 比熱 (J/(kg・K))                | 840   |
|               | 熱伝導率 (W/(m・K))               | 2.5   |
|               | 密度 (t/m <sup>3</sup> )       | 2.0   |

有限要素法による熱収支解析では、舗装内部の熱の流れを熱伝導方程式で、舗装表面における顕熱をコンクリート舗装表面と空気との間の熱伝達で、日射の影響はコンクリートの日射吸収率と熱伝達係数から等価外気温を算出する方法<sup>12)</sup>でそれぞれ考慮した。入力する気象条件としては、試験舗装の長期観測を行った際に、温度応力が最も大きくなった夏季の 1 日の気象条件を用いた。気温については試験舗装近傍で測定した 1 時間毎の気温を使用し、風速と日射量については、気象庁の AMeDAS データから同日の 1 時間毎のデータを参照した。また、時系列解析の基準時刻としては、同日のコンクリート版内温度分布の実測値から、温度勾配が最小(≒0)である朝 8:00 とし、この時刻におけるコンクリート版の初期温度は深さによらず一様に 33℃ と設定した。

表-3 に使用した熱特性の諸係数を示す。アスファルト混合物については、室内試験における密粒度アスファルト混合物による実測値を使用し、コンクリートと粒状路盤材料については文献<sup>13), 14), 15), 16)</sup>を参考にした。図-12 に版厚 42cm における実測値と解析値を示す。実測値と解析値は完全には一致しないが、再現精度は非常に高く、温度応力が最大となる夕方において温度分布がほぼ一致している。

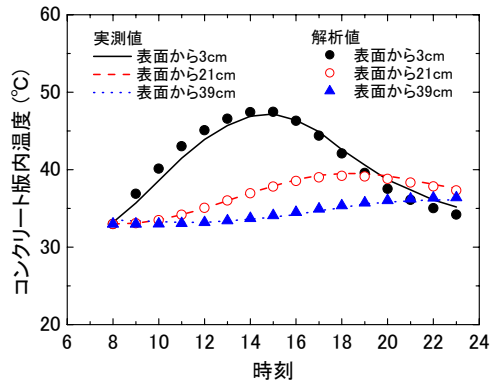


図-12 版厚 42cm におけるコンクリート版内部温度の実測値と解析値

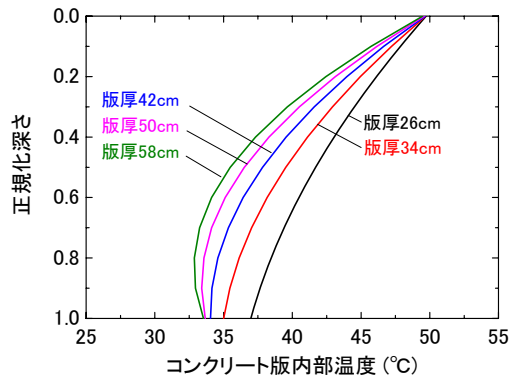


図-13 コンクリート版内部温度分布

熱収支解析によるコンクリート版内温度分布から温度応力を算出するためには、温度ひずみと拘束を受けた実ひずみが必要であるが、実ひずみは不明である。そこで図-3の実測結果では曲げ拘束度が0.9～1.0を中心として分布していることから、曲げ拘束度を  $0.95 \pm 0.15$  (0.80, 0.95, 1.10) と仮定し、熱収支解析結果によるコンクリート版内温度分布から温度応力を算出した。

## (2) 温度応力に対する版厚・上層路盤材料の影響

試験舗装と同様に上層路盤をアスファルト安定処理材としたモデルにおいて、版厚を変えた場合の温度分布を熱収支解析結果から算出した。図-13に15時時点のコンクリート版内温度分布を示す。版上下面温度差は、版厚が42cm程度までは版厚につれて大きくなるが、それよりも厚くなるとほとんど変化しないことがわかる。また、コンクリート版が厚くなるほど版内の温度分布は非線形となることから、内部拘束応力が大きくなると考えられる。図-14に曲げ拘束度を0.95と仮定した場合の、コンクリート版厚と日最大温度応力ならびに各拘束応力成分の関係を示す。版厚が変化した場合でも、曲げ拘束応力はあまり変化していないが、内部拘束応力は版が厚くなるほど大きくなるため、両者の和である温度応力は、版が厚くなるほど小さくなることをわかる。

図-15に、コンクリート版厚  $h$  と温度応力式の係数  $\beta$

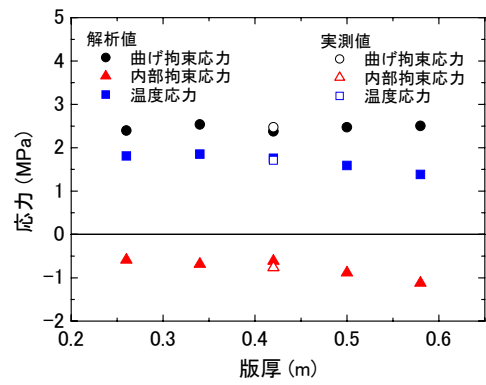


図-14 版厚と温度応力の関係 (曲げ拘束度=0.95)

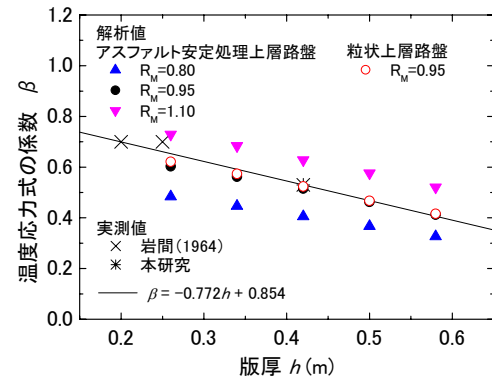


図-15 版厚と温度応力式の係数の関係

との関係を示す。 $\beta$ は(7)式に示すとおり、Westergaardによる版中央部の曲げ拘束応力式に対する係数であり、岩間による(1)式では0.7、本研究による(6)式では0.53である。

$$\sigma = \beta \frac{E\alpha\theta'}{2(1-\nu)} \quad (7)$$

これによると、曲げ拘束度が0.95の場合、版厚が26cmでは岩間が示した値 ( $\beta=0.7$ ) に近く、版厚が42cmでは本研究における(6)式の値 ( $\beta=0.53$ ) に近く、係数  $\beta$  は版厚  $h$  に比例して小さくなっていることがわかる。この解析結果から、係数  $\beta$  は版厚  $h$  に比例すると仮定し、試験舗装における長期観測結果から岩間が示した(1)式と本研究で示した(6)式を考慮すると、係数  $\beta$  と版厚  $h$  の関係は(8)式により表すことができると考えられる。また、曲げ拘束度を0.80、1.10とした場合の解析結果による係数  $\beta$  は、(8)式を中心としてそれぞれ下側、上側に分布していることから、(8)式により一年間の曲げ拘束度の頻度分布を考慮した平均的な値が得られるものと考えられる。

$$\beta = -0.772h + 0.854 \quad (8)$$

ここに、

$h$  : コンクリート版厚 (m)

また、上層路盤にアスファルト安定処理材と粒状路盤

材を用いた際の温度応力の違いについても検証したが、  
図-15 に示すとおり、上層路盤材料の違いはほとんど無い  
ことがわかる。

## 6. 結論

空港コンクリート舗装に適用可能な温度応力式について  
検討した結果は、以下のようにまとめられる。

- (1) コンクリート版が厚くなるほど内部温度分布は非線  
形となり、曲げ拘束応力に対して内部拘束応力が大き  
い。また、温度応力は版上下面温度差を説明変数とす  
る一次式により精度良く推定できる。
- (2) 版厚が 42cm の場合、温度応力が最大となるのは、日  
最大版上下面温度差が発生してから概ね 3 時間後であ  
る。このため、ある時刻に 42cm 厚の空港コンクリ  
ート舗装に発生する温度応力を推定するには、提案した  
温度応力式に 3 時間前の版上下面温度差を入力するこ  
とで、毎時間の温度応力を精度良く推定できる。
- (3) コンクリート版に生じる温度応力に対して、上層路盤  
材料の違いによる影響は小さい。一方、版厚の影響は  
大きく、温度応力式における係数は版厚に比例して小  
さくなる。

## 7. おわりに

本研究では、版厚を考慮した温度応力式について検討  
した。版厚が異なる場合の温度応力と版上下面温度差と  
の時間差や、時間帯別の版上下面温度差の頻度分布につ  
いては、今後、観測を行い明らかにしていく所存である。

**謝辞：**解析的検討の実施にあたり、国土技術政策総合研  
究所山根隆行副所長より有益な助言を頂いた。ここに記  
して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) Westergaard, H. M. : New Formulas for Stresses in Concrete

- Pavements of Airfields, Transactions of ASCE, Vol. 113, pp.  
425-444, 1948.
- 2) Picket, G and G. K. Ray : Influence Charts for Concrete Pavements,  
Transactions of ASCE, Vol. 116, pp. 49-73, 1951.
- 3) 福手勤：空港コンクリート舗装厚設計への電算プログラムの  
応用，港湾技研資料，No. 262，1977.
- 4) Portland Cement Association : Design of Concrete Airport Pavements,  
1973.
- 5) U.S. Army : Rigid Airfield Pavement, Air Force, TM5-824-3, 1958.
- 6) 国土交通省航空局監修：空港舗装構造設計要領，pp.40-41，  
1999.
- 7) 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，No. 111，pp. 16-46，1964.
- 8) Westergaard, H. M. : Analysis of Stresses in Concrete Roads Caused  
by Variation of Temperature, Proceedings of the annual meeting,  
Highway Research Board, pp. 201-215, 1926.
- 9) 土木学会舗装工学委員会：舗装標準示方書，(社) 土木学会，  
pp. 151 - 152，2007.
- 10) 日本道路協会：舗装設計施工指針，(社) 日本道路協会，p.  
219，2001.
- 11) セメント協会重交通専門委員会：重交通専門委員会報告書，  
(社) セメント協会，pp.251-272，1995.
- 12) セメント協会重交通専門委員会：重交通専門委員会報告書，  
(社) セメント協会，221p.，1995.
- 13) 土木学会舗装工学委員会：舗装標準示方書，(社) 土木学会，  
35p.，2007.
- 14) 土木学会コンクリート委員会：2002 年制定コンクリート標  
準示方書（施工編），(社) 土木学会，pp.44-47，2002.
- 15) セメント協会重交通専門委員会：重交通専門委員会報告書，  
(社) セメント協会，pp. 225-227，1995.
- 16) 椎名貴快，松井邦人，Smith T.F.：地上気象観測データを用い  
たアスファルト舗装の内部温度推定，土木学会舗装工学論  
文集，第 2 巻，pp.105-112，1997.

## STUDY ON THERMAL STRESS DUE TO DAILY TEMPERATURE CHANGE OF AIRPORT CONCRETE PAVEMENT

Yukitomo TSUBOKAWA, Junichi MIZUKAMI,  
Yoshitaka HACHIYA and Shoichi KAMETA

It is needed to consider both loading stress due to aircraft load on concrete slab and thermal stress due to temperature change of concrete slab in design of airport concrete pavements. However, thermal stress is just considered by safety factor in present empirical concrete design method. For the purpose of clarifying thermal stress of airport concrete pavements, experimental pavement was constructed, and then, strain and temperature in concrete pavement were measured. As a result, it was clarified that thermal stress of airport concrete pavement was smaller than that of road concrete pavement, and thermal stress formula for airport concrete pavement was proposed