

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 の中央部載荷公式を元にした影響図を福手が電算化したプログラム¹⁾が使用されている。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 (PCA) の研究²⁾において、コンクリート版厚を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いわれており、米国陸軍工兵隊の実験等²⁾から、コンクリートの設計基準曲げ強度を、表-1 に示す設計反復作用回数に応じた安全率で割り、荷重応力がその強度を上回らないような版厚を算出している⁴⁾。

さ 20cm と 25cm のコンクリート版の長期観測結果を元に提案した温度応力式が広く用いられているが、空港コンクリート舗装のように厚いコンクリート版の場合、版上下面の温度差発生頻度が道路舗装と異なると考えられることから、そのまま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の長期観測結果についても例がない。

以上の背景から、コンクリート試験舗装の製作ならびに版の温度とひずみの長期観測を実施し、空港コンクリート舗装の設計に適用可能な温度応力式の提案を目的として研究を実施した。

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

表-1 の安全率については、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) を追加した際に、その安全率としては、M 区分の 1.7、N 区分の 2.0 から外挿により 2.2 を設定した経緯がある。しかしながら、昨今の技術基準の性能規定化の流れを考えると、温度応力についても、安全率を用いた方法ではなく、定量的な算出手法により考慮される必要がある。

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や交通量 (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、コンクリート疲労曲線によりコンクリート版の疲労度を照査する理論的設計法が用いられるケースもある。この場合、従来用いられてきた安全率では、疲労の影響や荷重応力以外の応力の影響をまとめて考慮していると考えられることから、理論的設計法を用いる場合には、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。道路コンクリート舗装では、岩間⁵⁾が厚

2. 既往の研究

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、岩間の提案した温度応力式が実際の設計において最も多く使用されていると考えられる。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 に示すように、図解法によりコンペンセーションラインを引き、軸方向拘束応力（端部拘束による応力と版底面摩擦による応力）、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。

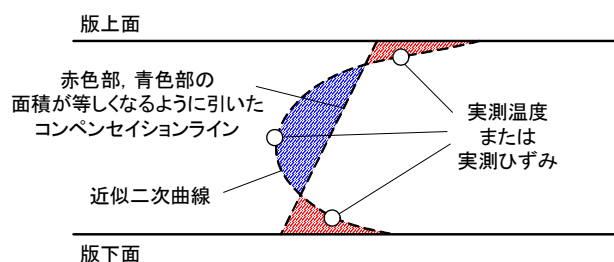


図-1 コンペンセーションライン

- ①軸方向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、比較的大きい圧縮応力となることが多く、また引張応力となる場合は小さいことから、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時頃に最大の引張応力となり、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、コンクリート版に発生する温度応力の算出には(1)式ならびに(2)式が用いられている^{5),6)}。

自由縁部における温度応力式

$$\sigma = 0.35C_w\alpha E\theta' \quad (1)$$

版中央部における温度応力式

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

ここに、

σ : 温度応力 (MPa)

C_w : そり拘束係数

α : コンクリートの熱膨張率 (1/°C)

E : コンクリートの弾性係数 (MPa)

θ' : コンクリート版上下面の温度差 (°C)

また、上記の温度応力式を用いて温度応力を算出するために、表-2 に示す版上下面の温度差頻度分布⁷⁾が提案されている。

空港コンクリート舗装における温度応力式の検討では、版の設計に大きく影響を及ぼすと考えられる曲げ拘束応力と内部拘束応力の和を温度応力とし、軸方向拘束応力については考慮しないこととした。この理由は、岩間も指摘しているように、日中の軸方向拘束応力の原点を何時に設定すればよいか不明確であること、引張応力の値が他の成分と比較して小さいこと、版下面に発生する曲げ拘束応力と内部拘束応力の和は昼間に引張最大応力となる傾向があるが、この時点では、温度上昇による版の膨張変形が路盤との摩擦や隣接版により拘束されることから、軸方向拘束応力は概ね圧縮応力となり、設計上無視しても安全側となると考えられるからである。

表-2 版上下面の版内温度差とその発生頻度⁷⁾

版厚 cm 温度差℃	温度差の小さいところ						温度差の大きいところ					
	15	20	23	25	28	30	15	20	23	25	28	30
19(18~19.9)	0	0	0	0	0	0	0	0	0.002	0.005	0.010	0.012
17(16~17.9)	0	0	0	0	0	0	0	0.005	0.015	0.018	0.018	0.020
15(14~15.9)	0	0	0.001	0.002	0.004	0.007	0.002	0.020	0.028	0.032	0.037	0.038
13(12~13.9)	0.004	0.007	0.012	0.016	0.021	0.025	0.015	0.040	0.040	0.040	0.040	0.040
11(10~11.9)	0.020	0.028	0.032	0.037	0.045	0.053	0.040	0.060	0.050	0.050	0.045	0.045
9(8~9.9)	0.050	0.060	0.075	0.085	0.080	0.080	0.070	0.070	0.075	0.080	0.080	0.080
7(6~7.9)	0.100	0.110	0.110	0.110	0.110	0.115	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.105
5(4~5.9)	0.135	0.140	0.150	0.155	0.150	0.140	0.120	0.120	0.125	0.125	0.125	0.125
3(2~3.9)	0.190	0.195	0.200	0.205	0.210	0.210	0.200	0.195	0.190	0.190	0.190	0.185
1(0~1.9)	0.500	0.460	0.420	0.390	0.380	0.370	0.450	0.390	0.375	0.360	0.355	0.350
-1(-0.1~-2.0)	0.650	0.615	0.610	0.600	0.530	0.480	0.500	0.450	0.420	0.410	0.400	0.390
-3(-2.1~-4.0)	0.350	0.360	0.345	0.335	0.360	0.380	0.340	0.330	0.330	0.320	0.320	0.320
-5(-4.1~-6.0)	0	0.025	0.044	0.063	0.100	0.120	0.150	0.200	0.220	0.220	0.225	0.230
-7(-6.1~-8.0)	0	0	0.001	0.002	0.010	0.020	0	0.020	0.030	0.048	0.052	0.055
-9(-8.1~-10.0)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.002	0.003	0.005

正対
のす
時
る
間
割
に
合

負
対
の
す
時
る
間
割
に
合

3. 試験舗装施工

3.1 設計条件

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。この試験舗装を製作する目的は、コンクリート版内部の温度とひずみの測定である。

試験舗装の平面図と断面図を図-2に示す。試験区画はA区画とB区画であり、目地間隔は、A区画では7.5mとし、B区画では、現在の空港コンクリート舗装で最大である8.5mとした。また、コンクリート材料としては、A区画では設計基準曲げ強度6.5MPaの高強度コンクリートを、B区画では、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70MN/m³(平板直径750mm)としたので、コンクリート版厚はA区画で340mm、B区画で420mmとなった。

3.2 路床の施工

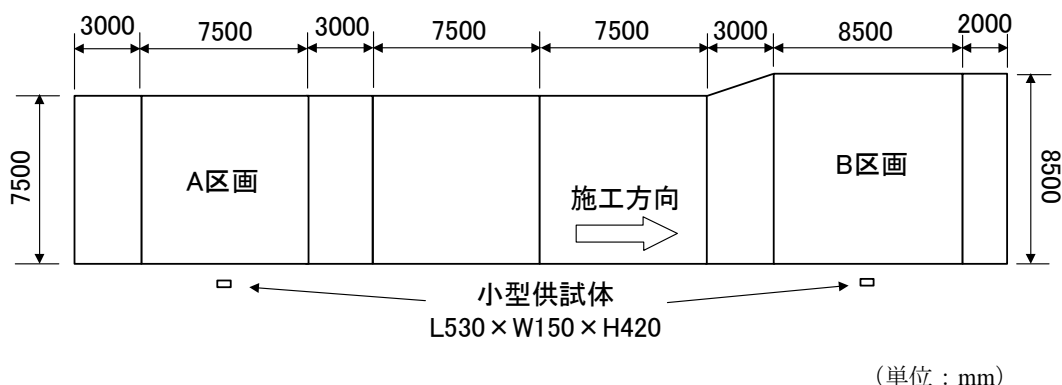
路床の材料は現地の既存土(山砂)をそのまま用いた。路床土の性状試験結果を表-3に、路床の品質管理試験結果を表-4に示す。

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。出来形に関しては両区画とも共通仕様書の規定を満足していた。

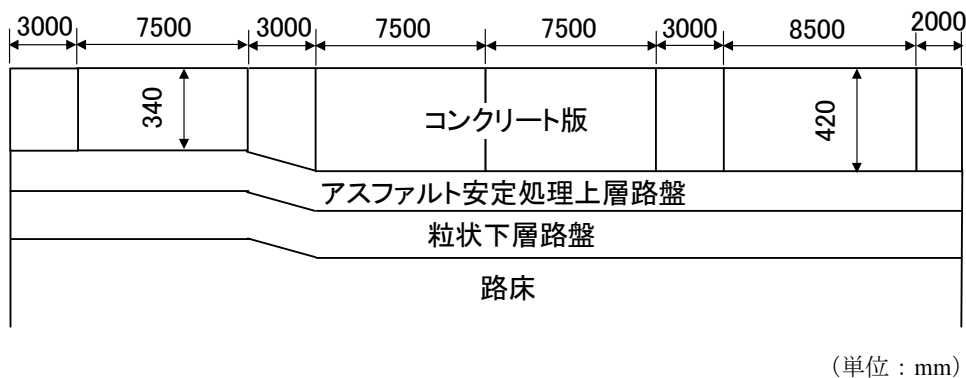
3.3 下層路盤の施工

下層路盤には粒度調整砕石を用いた。下層路盤材料の性状試験結果を表-5に、下層路盤の品質管理試験結果を表-6に示す。

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。出来形に関しては、両区画とも共通仕様書の規定を満足していた。



(a) 平面図



(b) 断面図

図-2 試験舗装図

表-3 路床土の性状試験結果

項目	B 区画	規定値
含水比 (%)	8.1	—
湿潤密度 (g/cm ³)	1.845	—
乾燥密度 (g/cm ³)	1.707	—
仕様密度における 修正 CBR (%)	19.1	10 以上

表-4 路床の品質管理試験結果

項目	A 区画	B 区画	規定値
含水比 (%)	8.6	8.2	—
現場密度 (g/cm ³)	1.816	1.834	—
締固め度 (%)	107.0	108.1	90 以上
K ₃₀ (MN/m ³)	218	263	—
K ₇₅ [*] (MN/m ³)	87	105	—

※K₇₅=K₃₀/2.5

表-5 下層路盤材料の性状試験結果

項目	実測値	規定値	試験法	
通過質量百分率 (%)	粒径 (mm)		JIS A 1102	
	53	100.0		100
	37.5	98.6		95~100
	19	67.0		60~90
	4.75	39.7		30~65
	2.36	28.0		20~50
	0.425	15.5		10~30
0.075	3.7	2~10		
最適含水比 (%)	15.0	—	JIS A 1210 (E 法)	
最大乾燥密度 (g/cm ³)	1.715	—	JIS A 1210 (E 法)	
修正 CBR (%)	91	45 以上	舗装試験法便覧	
塑性指数	NP	6 以下	JIS A 1205	

表-6 下層路盤の品質管理試験結果

項目	A 区画	B 区画	規定値
含水比 (%)	15.1	16.4	—
現場密度 (g/cm ³)	1.710	1.717	—
締固め度 (%)	99.7	100.1	90 以上
K ₃₀ (MN/m ³)	362	303	—
K ₇₅ [*] (MN/m ³)	121	101	—

※K₇₅=K₃₀/3.0

3.4 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。アスファルト安定処理材の性状試験結果は表-7に、上層路盤の品質管理・出来形管理試験結果は表-8に示すとおりである。

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ーにより敷き均し、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。

3.5 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-9に、試験施工に使用したコンクリートの配合は表-10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-11に示すとおりである。コンクリート版の施工は2000年10月12日(A区画)ならびに13日(B区画)に行った。当日の天候は12日が晴れ、気温は25～31℃、13日が曇り時々小雨、気温は18～20℃であった。

コンクリート版は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、インナーバイブ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ーにより締め固めた。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-3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一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340mmならびに420mmとし、長さとは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、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。

表-7 上層路盤材料の性状試験結果

項目	実測値	規定値
通過質量百分率 (%)	粒径 (mm)	
	53	100
	37.5	95～100
	19	50～100
	4.75	—
	2.36	20～60
0.075	0～10	
マーシャル安定度 (kN)	11.94	3.45 以上
フロー値 (1/100cm)	32	10～40
空隙率 (%)	6.5	3～12

表-8 上層路盤の品質管理・出来形管理試験結果

項目	A区画	B区画	規定値
厚さ (cm)	16.9	16.8	14.6 以上
密度 (g/cm ³)	2.355	2.342	—
締固め度* (%)	99.5	98.9	95 以上

※基準密度=2.368 g/cm³

表-9 コンクリート材料

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
粗骨材*	40 - 20	茨城県笠間産硬質砂岩	密度：2.69g/cm ³ 単位容積質量：1.68kg/l
	20 - 05	山口県伊佐産石灰岩	
細骨材	砂	千葉県君津産山砂	密度：2.61g/cm ³
練混ぜ水	上水道水	—	—
混和剤	高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸系水溶性ビニル共重合体	—
	凝結遅延材	メチルカルボン酸塩とその塩の誘導体	—
	AE 減水剤	リグニンスルホン酸塩	—
	空気量調整剤	変性アルキルカルボン酸化合物系陰イオン界面活性剤	—

※粗骨材は、40-20 と 20-05 を等量混合して使用した。

表-10 試験施工に使用したコンクリートの配合

区画	W/C (%)	単位粗骨材容積 (m ³ /m ³)	細骨材率 (%)	目標スランプ (cm)	目標空気量 (%)	単位量 (kg/cm ³)				混和剤			
						W	C	S	G	高性能 AE 減水剤 (C×%)	凝結遅延剤 (C×%)	AE 減水剤 (C×%)	空気量調整剤*
A	30	0.70	35.5	8	4.5	135	450	627	1,176	1.0	0.3		5A
B	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。

表-11 コンクリートの室内試験結果 (材齢 28 日)

	A 区画	B 区画
曲げ強度 (MPa)	7.71	5.55
圧縮強度 (MPa)	60.6	36.4
静弾性係数 (MPa)	41,800	36,100

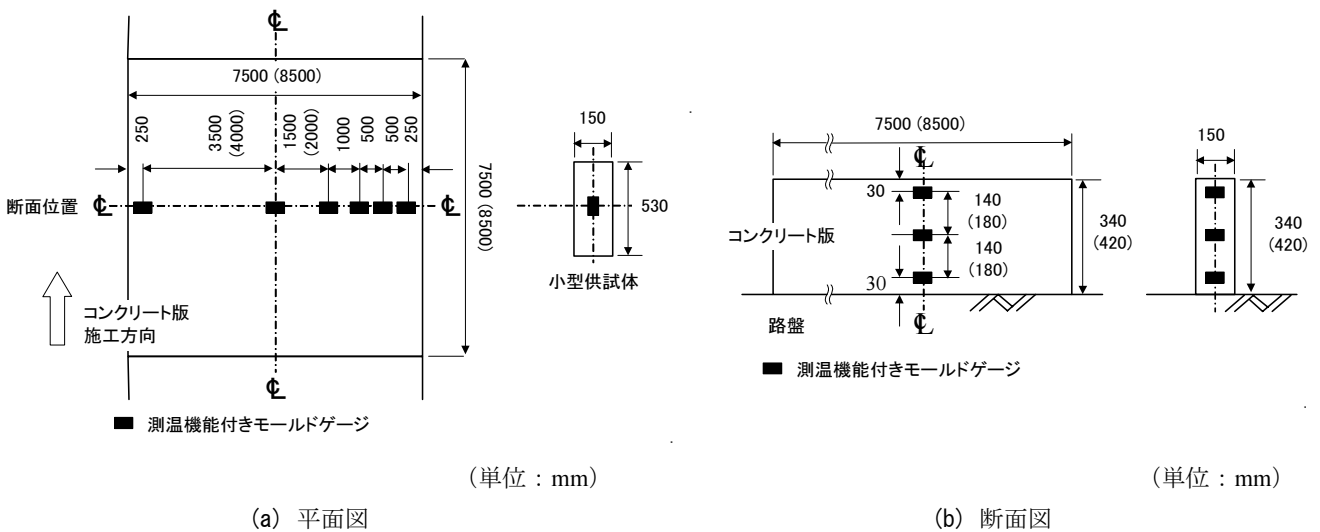


図-3 計器埋設位置

表-12 小型供試体の熱膨張係数

期間	A 区画熱膨張係数 ($1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)			B 区画熱膨張係数 ($1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)		
	上面	中心部	下面	上面	中心部	下面
10月15日～16日	11.58	10.24	9.63			
10月15日～16日	9.39	11.67	15.13	9.39	8.59	11.70
10月16日～17日	12.35	10.61	13.35	9.94	8.20	11.10
10月17日～18日				8.60	10.82	12.28
平均値	11.55			10.06		

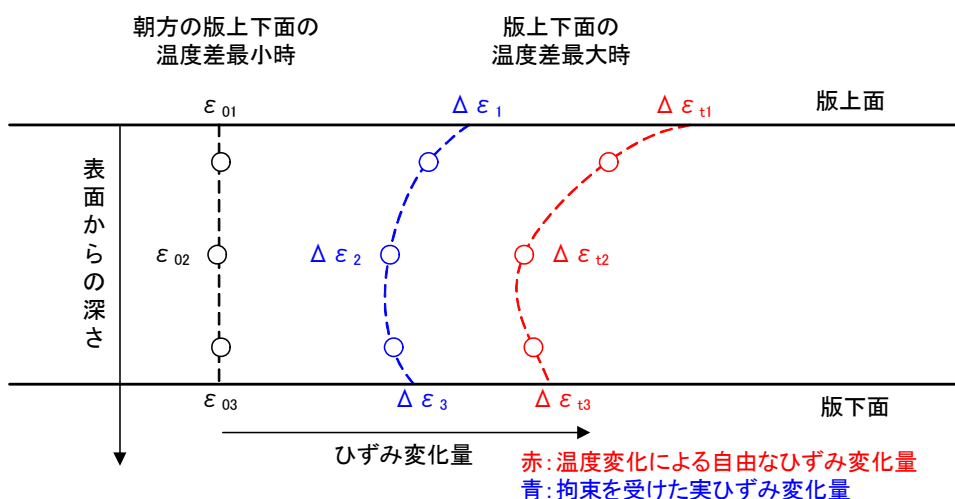


図-4 ひずみ変化量

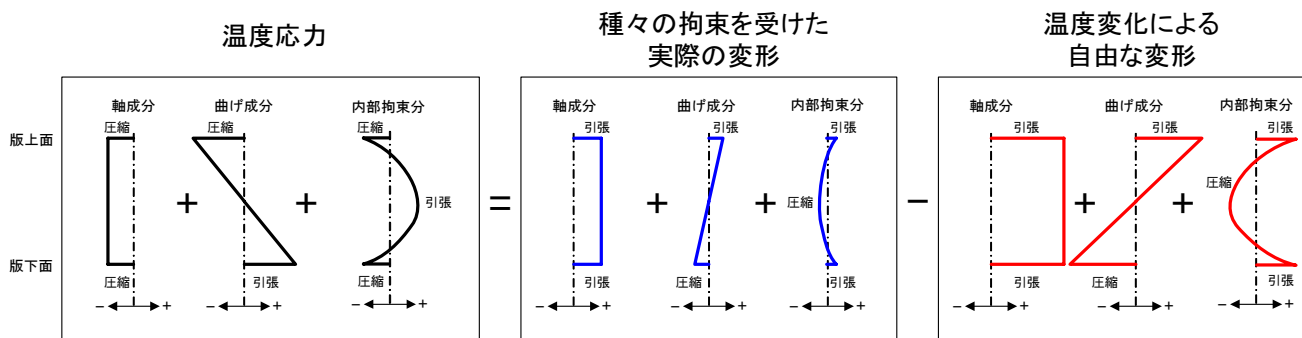


図-5 拘束応力の概念図

4. 温度応力の検討

4.1 コンクリートの熱膨張係数

コンクリート舗装の施工中から、コンクリート版内部に埋設したモールドゲージにより、版の温度とひずみを1時間に1回測定した。

版に発生する温度応力を検討する前に、コンクリートの熱膨張係数を決定する必要があることから、コンクリート版の自由変形ひずみを計測するために試験舗装横に製作した小型供試体の、散水養生中の温度とひずみを

用いて熱膨張係数を算出した。表-12にその結果を示す。コンクリートの熱膨張係数は概ね $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 程度であり、一般的な値と考えられる。以降の検討では、表-12の値を用いることとした。

4.2 温度応力の算出

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

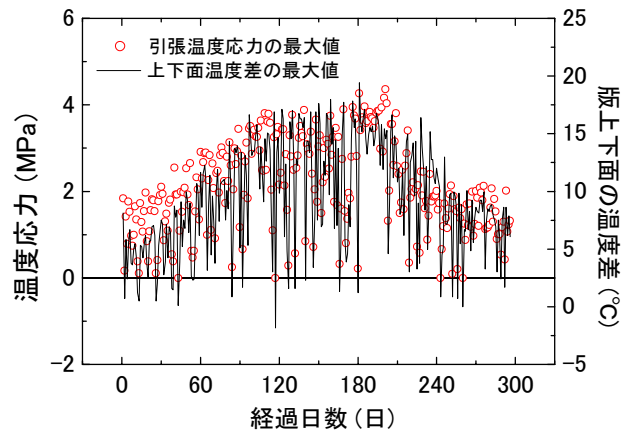
手順を以下に示す⁸⁾。

- ① 一日の中で、朝方あるいは夕方頃において版上下面温度差 θ' が最小(≈ 0)になる時刻をその日の基準時刻として設定し、各位置の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 ε_0 とする。
- ② 基準温度 t_0 とある時刻における実測温度 t から各位置における温度変化量 Δt を算出し、版深さ方向の3点の温度変化量から近似二次曲線を算出する。次に、版上面、版中心、版下面の3点においてこの温度変化量に熱膨張係数 α を乗じて、各位置における拘束を受けない場合の自由ひずみ $\Delta \varepsilon_t$ 算出する。
- ③ 基準ひずみ ε_0 とある時刻における実測ひずみ ε からひずみ変化量 $\Delta \varepsilon$ を算出し、版深さ方向の3点のひずみ変化量から近似二次曲線を算出する。次に、②で算出した自由ひずみ $\Delta \varepsilon_t$ の差を、軸方向拘束ひずみ $\Delta \varepsilon_N$ 、曲げ拘束ひずみ $\Delta \varepsilon_M$ 、内部拘束ひずみ $\Delta \varepsilon_I$ に分解し、各々の拘束ひずみ成分に弾性係数を乗じて軸方向拘束応力 σ_N 、曲げ拘束応力 σ_M 、内部拘束応力 σ_I を算出する。また、2章で述べた理由から、軸方向拘束応力は考慮せず、曲げ拘束応力 σ_M と内部拘束応力 σ_I の和を温度応力 σ とする。

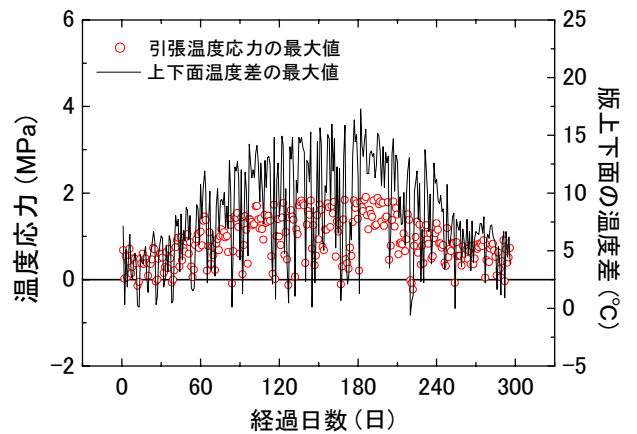
4.3 温度応力の季節的変動

A区画(高強度コンクリート、版厚42cm)とB区画(普通コンクリート使用、版厚42cm)の中央部における日中の温度応力の最大値(引張応力)と版上下面温度差(版上面温度-版下面温度)の最大値との関係を図-4に示す。温度応力は版上下面温度差が大きくなる春から秋にかけて大きくなっていることから、以降では、版上下面温度差と温度応力との関係を用いて、温度応力を推定することとした。

A区画とB区画における版上下面温度差の度数分布を図-5に示す。両区画とも版上下面温度差が $-5^{\circ}\text{C} \sim 0^{\circ}\text{C}$ となる割合が最も高い。また、版厚が34cmであるA区画のほうが、版厚が42cmであるB区画よりも、版上下面温度差は大きく、また版上下面温度差が正となる割合が高いことがわかる。

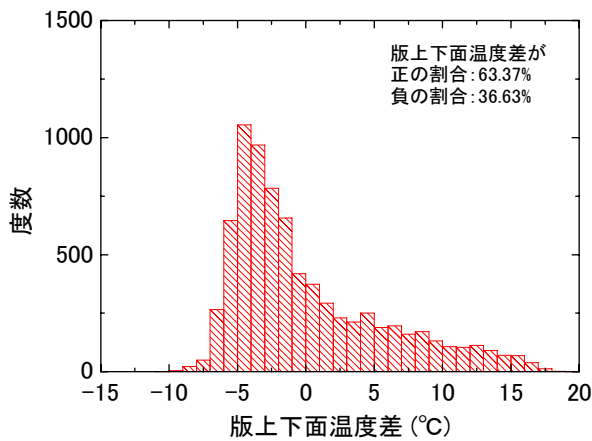


(a) A区画(版厚34cm)

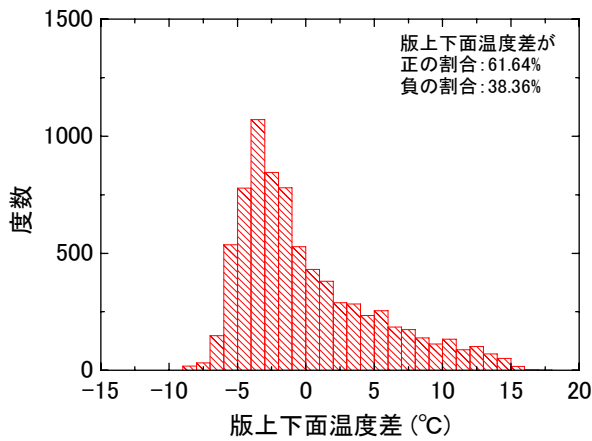


(b) B区画(版厚42cm)

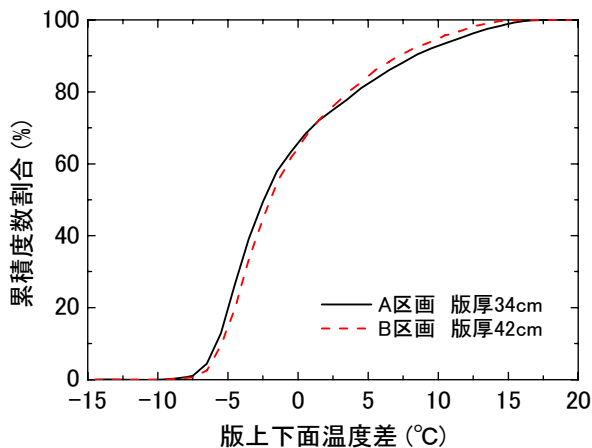
図-4 温度応力の季節的変動(12月19日から)



(a) A区画 (版厚 34cm)



(b) B区画 (版厚 42cm)



(c) 累積度数

図-5 版上下面温度差の発生頻度

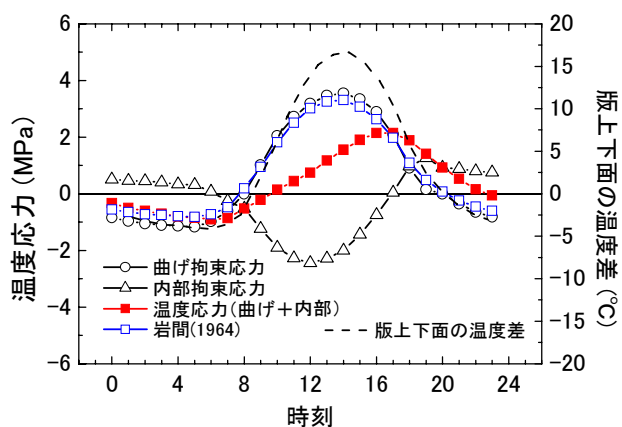
4.4 温度応力の日変動

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-6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は最大となるが、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。岩間はこのような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いるが、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。

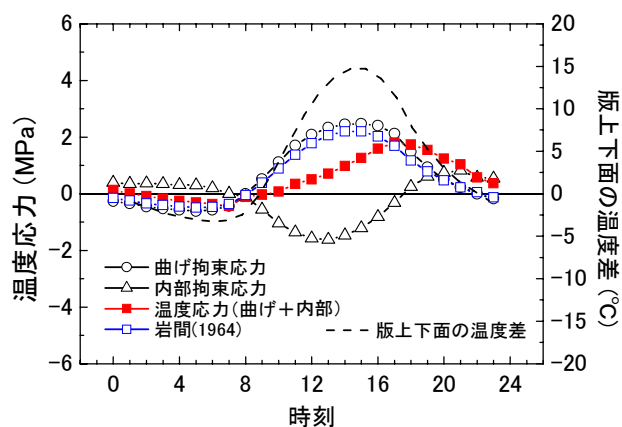
そこで、空港コンクリート舗装における曲げ拘束応力と内部拘束応力の割合について検証した。図-7に一年間の曲げ拘束応力に対する内部拘束応力の比の発生頻度分布を、図-8に内部拘束応力と曲げ拘束応力の関係を示す。曲げ拘束応力に対する内部拘束応力の割合は、A区画では-0.2から-0.3、B区画では-0.3から-0.4の場合が最も多く、曲げ拘束応力と内部拘束応力の相関を見ると、その割合はA区画で-0.43、B区画で-0.46であり、版厚が厚いB区画のほうが曲げ拘束応力に対して内部拘束応力が若干大きいことがわかる。

以上のことから、空港コンクリート舗装のようにコンクリート版厚が厚い場合には、曲げ拘束応力に対して内部拘束応力が大きくなると考えられ、曲げ拘束応力と内部拘束応力の和である温度応力としては、岩間が示した温度応力式によるものよりも小さいことが推測される。

なお、図-6において、A区画の温度応力がB区画に比べて大きいのは、表-11に示したとおり、A区画に用いた高強度コンクリートの弾性係数が、B区画に用いた普通コンクリートの弾性係数よりも大きいためと考えられる。

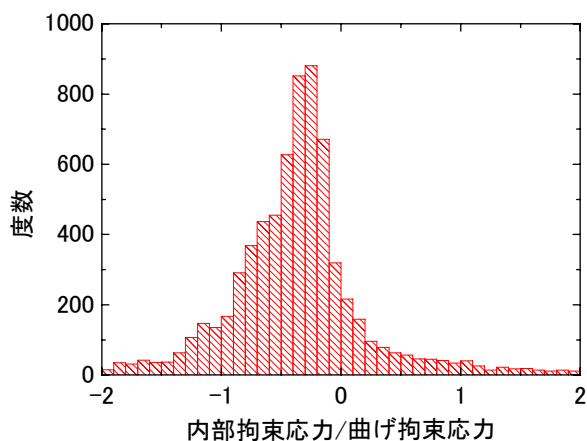


(a) A 区画 (版厚 34cm)

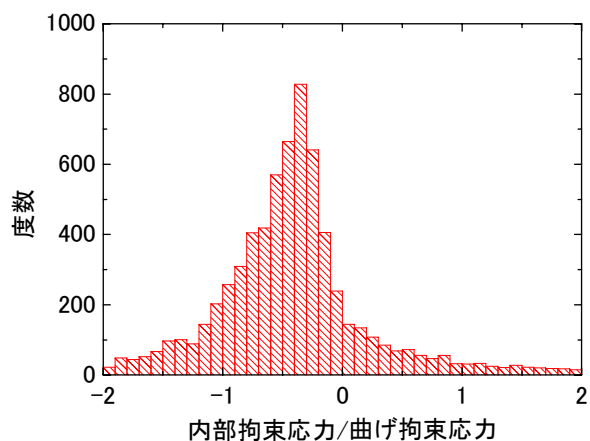


(b) B 区画 (版厚 42cm)

図-6 版上下面温度差と温度応力の日変動

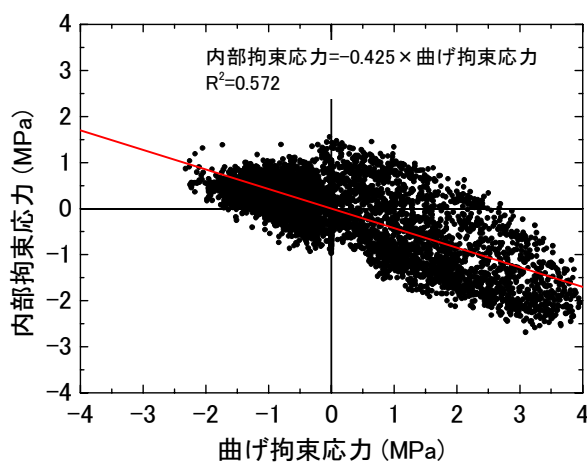


(a) A 区画 (版厚 34cm)

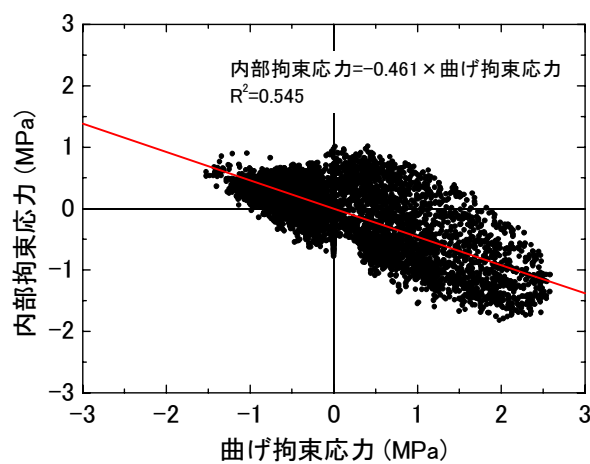


(b) B 区画 (版厚 42cm)

図-7 内部拘束応力と曲げ拘束応力の割合の発生頻度



(a) A 区画 (版厚 34cm)



(b) B 区画 (版厚 42cm)

図-8 内部拘束応力と曲げ拘束応力の関係

4.5 温度応力式の検討

A区画ならびにB区画の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、毎日の版上下面の最大温度差（正の最大値と負の最大値）と最大温度応力（引張応力の最大値と圧縮応力の最大値）との関係を図-10に示す。図-6に示したとおり、版上下面の温度差が最大となる時刻には温度応力は最大にはならないが、最大温度応力と版上下面最大温度差との間には非常に強い相関があり、最大温度応力は版上下面最大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、岩間が提案した温度応力式と同様の形に改めたのが、(3)式、(4)式である。

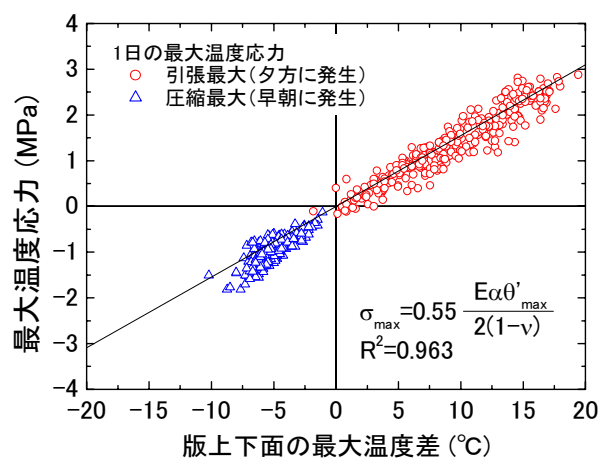
版厚 34cm の場合

$$\sigma = 0.55 \frac{E\alpha\theta'}{2(1-\nu)} \quad (3)$$

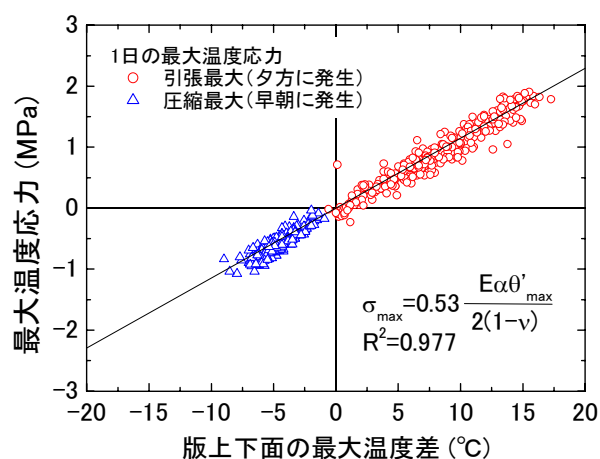
版厚 42cm の場合

$$\sigma = 0.53 \frac{E\alpha\theta'}{2(1-\nu)} \quad (4)$$

(2)式、(3)式、(4)式からわかるとおり、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。また、版厚の厚いB区画のデータから算出した(4)式のほうがA区画のデータから算出した(3)式よりも温度応力式の係数が小さい。これは、図-8に示したとおり、版厚が厚い場合、特に曲げ拘束応力が大きくなる午後では、内部拘束応力が圧縮側に大きくなるのが原因で、引張曲げ拘束応力が低減されるためと考えられる。



(a) A区画（版厚 34cm）



(b) B区画（版厚 42cm）

図-10 最大温度応力と版上下面最大温度差の関係

4.6 版上下面温度差と温度応力の時間差

コンクリート舗装の理論的設計を行う場合、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その頻度、ある時刻に発生する温度応力とその頻度を正確に考慮できることが望ましい。(3)式あるいは(4)式は、一日の最大温度応力と版上下面の最大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、その時刻に発生する版上下面温度差を(3)式あるいは(4)式に入力することは適切ではない。このことから、温度応力と版上下面温度差が最大となる時間差について検討した。

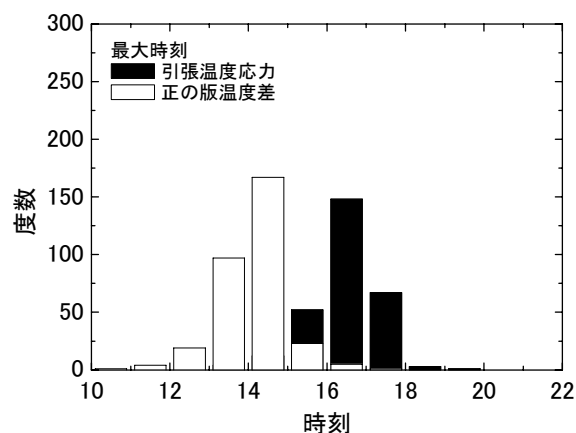
図-11 に引張温度応力と版上下面温度差が最大となる時刻の頻度分布を示す。版厚が34cmであるA区画では、14時頃に版上下面温度差が最大となり、引張温度応力はその2時間後の16時頃に最大となる傾向があるのがわかる。また、版厚が42cmであるB区画では、14時頃に版上下面温度差が最大となり、引張温度応力はその3時間後の17時頃に最大となる傾向があり、版厚の厚いほうが、版上下面温度差と引張温度応力が最大となる時間差が大きいことがわかる。

以上のことから、ある時刻における温度応力は、その2時間前、あるいは3時間前の版上下面温度差との相関が高いと推定されることから、両者の関係を示したのが図-12である。A区画については2時間前の版上下面温度差、B区画については3時間前の版上下面温度差を用いた。これによると、ある時刻に版に生じる温度応力は、その2、3時間前の版上下面温度差との相関が高く、(3)式、(4)式により、一日の最大温度応力だけでなく、各時刻の温度応力を精度良く推定できることがわかる。

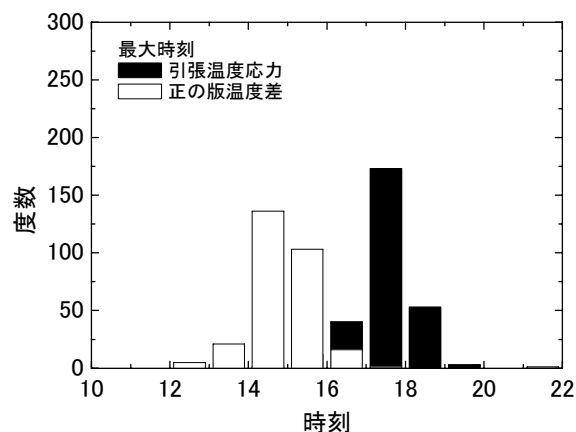
図-13 に引張温度応力と正の版上下面温度差が発生する時刻の頻度分布を示す。引張温度応力が発生するのはA区画で概ね9時から23時まで、B区画で概ね10時から25時までであることがわかる。このことから、空港コンクリート舗装の理論的設計を行う際は、版厚42cm程度の場合は概ね10時から25時の間に引張温度応力が発生すると仮定し、この間の温度応力の値を(4)式から算出する場合には、その3時間前の概ね7時から22時までの版上下面温度差の頻度分布を使用することで、精度良く温度応力を算出することが可能である。

以上の考え方から、一年間の版上下面温度差の発生頻度をまとめたのが表-13、表-14である。これらの表の中で「温度応力が正の時間帯用」の版上下面温度差であっても、負の温度差になる場合があるのは、例えばB区画

の場合は10時から25時までを「温度応力が正」と仮定しているため、その3時間前の7時から22時の間には温度差が負となる場合もあるからである。



(a) A区画 (版厚 34cm)



(b) B区画 (版厚 42cm)

図-11 引張温度応力と正の版上下面温度差が最大となる時刻の頻度分布

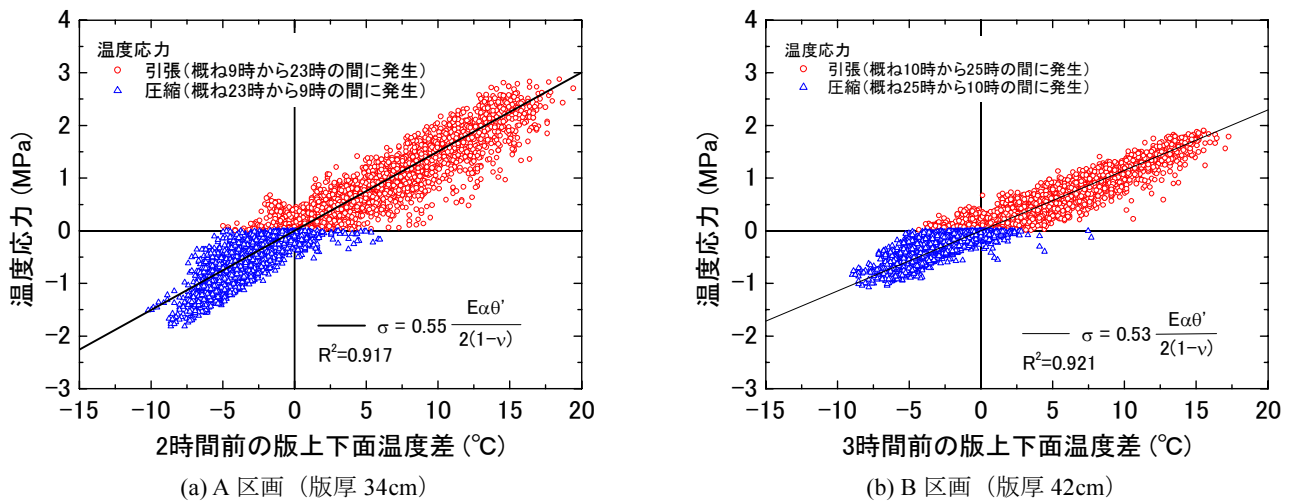


図-12 温度応力と数時間前の版上下面温度差の関係

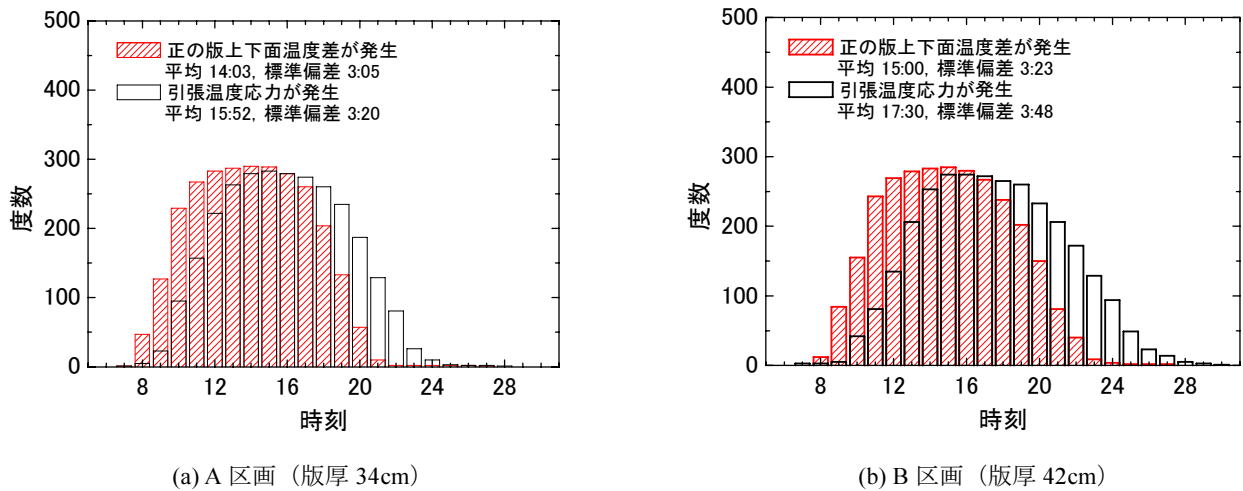


図-13 温度応力と版上下面温度差が正になる時刻の頻度分布

表-12 A区画（版厚 34cm）における版上下面温度差の発生頻度

版上下面 温度差（℃）	版上下面温度差の発生割合	
	温度応力が正の時間帯用	温度応力が負の時間帯用
19（18～18.9）	0.0008	-
17（16～17.9）	0.0111	-
15（14～15.9）	0.0336	-
13（12～13.9）	0.0460	-
11（10～11.9）	0.0472	-
9（8～9.9）	0.0655	-
7（6～7.9）	0.0718	-
5（4～5.9）	0.0924	-
3（2～3.9）	0.0902	-
1（0～1.9）	0.1323	0.0040
-1（-2～-0.1）	0.1665	0.0812
-3（-4～-2.1）	0.1566	0.3334
-5（-6～-4.1）	0.0717	0.4700
-7（-8～-6.1）	0.0135	0.0942
-9（-10～-8.1）	0.0009	0.0172
-11（-12～-10.1）	-	0.0011

表-13 B区画（版厚 42cm）における版上下面温度差の発生頻度

版上下面 温度差（℃）	版上下面温度差の発生割合	
	温度応力が正の時間帯用	温度応力が負の時間帯用
17（16～17.9）	0.0011	-
15（14～15.9）	0.0123	-
13（12～13.9）	0.0392	-
11（10～11.9）	0.0467	-
9（8～9.9）	0.0518	-
7（6～7.9）	0.0724	-
5（4～5.9）	0.0948	-
3（2～3.9）	0.1109	-
1（0～1.9）	0.1411	0.0067
-1（-2～-0.1）	0.1879	0.1448
-3（-4～-2.1）	0.1516	0.4345
-5（-6～-4.1）	0.0766	0.3521
-7（-8～-6.1）	0.0133	0.0478
-9（-10～-8.1）	0.0003	0.0140

5. 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、以下のようにまとめられる。

- (1) 空港コンクリート舗装のように版厚が厚い場合は、曲げ拘束応力に対して内部拘束応力が大きく、温度応力が低減する傾向がある。
- (2) 最大温度応力と最大版上下面温度差の関係から、最大温度応力は最大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可能である。また、版厚が厚いほうが温度応力は若干小さい傾向がある。
- (3) 温度応力が最大となるのは、版上下面温度差が発生してから2, 3時間後であり、ある時刻に版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2, 3時間前の版上下面温度差を入力することで、精度良く推定できる。

6. おわりに

本研究では、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結果、道路舗装よりも厚いコンクリート版の温度応力を精度良く推定可能な温度応力式を提案した。今回は版厚34cmおよび42cmの2種類のコンクリート版において温度応力の検討を行ったが、版厚の厚い場合には内部拘束応力が曲げ拘束応力に対して大きくなる傾向があることから、結果として、温度応力は若干小さくなることが明らかになった。このことから、今回検討した中で最大の42cmよりも厚いコンクリート舗装の温度応力は、提案した温度応力式により算出する温度応力よりも幾分小さいと想像される。

今回提案した温度応力式を用いることにより、より高い精度で空港コンクリート舗装の理論的設計が可能となり、性能規定化の流れに対応した設計が可能になると考えられる。付録では、ある仮定の設計条件の基で、理論的設計法によるコンクリート版厚の試算を行い、現行設計法による版厚との比較を行っている。この試算では、理論的設計法による版厚は現行設計法による版厚よりも薄くなる結果となった。しかしながら、「設計年数の10年を超過しても疲労による構造的な破損の報告が皆無である現行設計法による版厚」と「ある破壊確率における疲労曲線を用いた照査で、設計年数の10年が経過した時点で疲労度が1.0に達する理論的設計法による版厚」を単純に比較して、理論的設計法による版厚のほうが薄くなると理解してはならない。コンクリート舗装が用いられる誘導路やエプロンでは、これらの施設を閉鎖し補修を行うことが非常に困難であることから、現行設計法で一般的に考えられている10年という設計年数の

設定についても議論する必要がある。また、理論的設計法を用いた場合、同じ設計反復作用回数であっても、機材別交通量条件やエプロン舗装等における運行形態等の条件により結果が大きく異なることに注意されたい。

最後に、コンクリート試験舗装の長期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。

(2006年8月31日受付)

参考文献

- 1) 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.
- 2) U.S. Army : Rigid Airfield Pavement, Air Force, TM5-824-3, 1958.
- 3) Portland Cement Association : Design of Concrete Airport Pavements, 1973.
- 4) 国土交通省航空局監修 : 空港舗装構造設計要領, pp.40-41, 1999.
- 5) 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.
- 6) 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)土木学会, pp. 44-45, 2002.
- 7) (社)日本道路協会: 舗装設計施工指針, (社)日本道路協会, p. 219, 2001.
- 8) 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.
- 9) 八谷好高, 梅野修一: 航空機走行位置分布の実態と舗装構造への影響, 港湾技研資料, No. 757, 9p., 1993.
- 10) 国土交通省航空局監修: 空港舗装構造設計要領, 83p., 1999.