

1. はじめに

コンクリート舗装には、打設後のコンクリートの自己収縮や乾燥収縮、温度変化による膨張、収縮、そり等の変形が生じ、これらの変形がコンクリートにひび割れを発生させる原因となることから、所要の間隔で収縮目地や膨張目地を設ける必要がある。また、施工機械の幅や一日の施工終了などの施工上の都合から、施工目地が設けられる。空港コンクリート舗装では、これらの目地間隔が空港舗装構造設計要領¹⁾で定められており、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 を最大とし、収縮目地は、版厚が 300mm 以下の場合 4.5~6.0m、300mm 以上の場合 5.0~7.5m と経験的に定められている。最近では 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、目地間隔を広げることで、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、自然環境下においては、様々な要因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²⁾ことから、目地間隔を広げた場合、コンクリート版中央部において過大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の版厚設計法では、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、目地間隔を広げた場合、拘束応力が安全率で考慮している範囲を逸脱し、コンクリート舗装のひび割れの原因となることが懸念される。

また、空港コンクリート舗装における目地には、コンクリート版の変形を吸収し、目地からの雨水、土砂の浸入を防ぐ目的で、目地材や目地板などの目地材料が用いられている。これらの目地材料が所要の機能を果たさない場合、具体的には目地材のはみ出し、剥離等が生じた場合や、目地板がコンクリート版の変形を十分に吸収できない場合には、雨水が路盤内に浸入することで路盤が軟弱化したり、ポンピングなどの現象を引き起こす原因となり、コンクリート版自体の破損につながる恐れがある。

目地材料に関する規格は空港土木工事共通仕様書³⁾ (以下、共通仕様書と称する) において定められている

が、試験方法に関する記述が一部不明瞭であること、目地材料の材質によって規格値が大きく異なっていることなどから、目地材料に要求される性能を反映した規格であるとは言い難い。以上のことから、コンクリート舗装の耐久性を向上させ、維持補修コストを削減するためには、長期間の供用を想定した場合にコンクリート舗装の目地材料に必要な性能を考慮した規格が求められる。

そこで、本研究では、空港コンクリート舗装の目地の合理化を目的として、現行の規格よりも目地間隔を広げたコンクリート舗装の可能性、ならびに空港コンクリート舗装の目地に用いられる目地材料に要求される性能について検討した。

目地間隔を広げたコンクリート舗装に関する検討では、まず、目地間隔を現行規格における最大値である 7.5m、これよりも 1m 広げた 8.5m とした二種類のコンクリート舗装を屋外において試験施工した。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観測し、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、三次元有限要素法による解析を行い、目地間隔を広げた場合に必要となるコンクリート版厚について検討した。

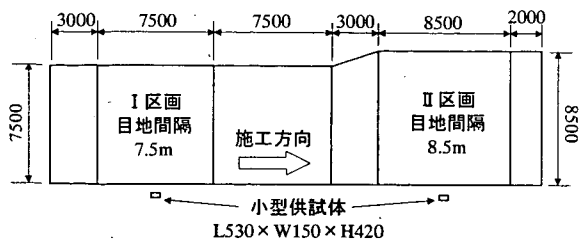
また、目地材料に関する検討では、舗装試験法便覧⁴⁾ や米国規格⁵⁾ において提案されている目地材料の室内試験方法を参考に、標準的な試験条件以外に、目地材料が長期間供用された後を想定した条件でも室内試験を実施し、目地材料に要求される性能について検討した。

2. 空港コンクリート舗装の目地間隔に関する検討

空港コンクリート舗装の目地間隔に関する検討では、目地間隔を現行の規格よりも広げたコンクリート舗装の短期的、長期的な挙動を観測するために製作した試験舗装の概要について記してから、約 1 年間にわたるコンクリート舗装の観測結果、航空機荷重の載荷を想定した三次元有限要素法による解析結果についてまとめる。

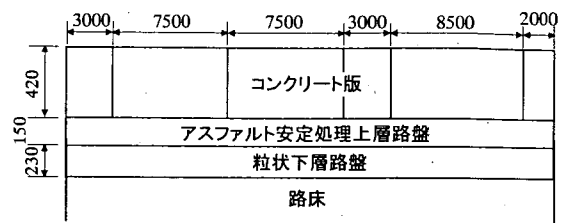
2.1 試験舗装の施工

旧運輸省港湾技術研究所野比実験場において、コンクリート試験舗装を製作した。この試験舗装を製作する目的は、目地間隔を現行で最大とされている 7.5m とした区画と、現行の最大目地間隔より 1m 広げた区画との間で、自然環境要因によるコンクリート版の短期的、長期



(単位：mm)

(a) 平面図



(単位：mm)

(b) 断面図

図-1 試験舗装図

的な挙動を比較検討し、目地間隔に関する現行規格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比較を行っている。

試験舗装の平面図と断面図を図-1に示す。試験区画はI区画とII区画であり、両区画とも目地間隔を除いては同じ条件で製作した。目地間隔は、I区画では現行の規格で最大とされている7.5mとし、II区画では、現在の一般的な施工機械で対応可能な最大施工幅員から、標準の7.5mより1m長い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5.0MPa、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、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。路床土の性状試験結果を表-1に、路床の品質管理試験結果を表-2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。

(2) 下層路盤の施工

下層路盤には粒度調整碎石を用いた。下層路盤材料の性状試験結果を表-3に、下層路盤の品質管理試験結果を表-4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碎石を現場に搬入後、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。

(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。アスファルト安定処理材の性状試験結果は表-5に、上層路盤の品質管理・出来形管理試験結果は表-6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。

(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-7に、試験施工に使用したコンクリートの配合は表-8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-9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均し、インナーパイププレート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簞目を入れ、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

表-1 路床土の性状試験結果

項目	I 区画	II 区画	平均値	規定値
含水比 (%)	7.4	8.1	7.7	—
湿潤密度 (g/cm ³)	1.822	1.845	1.833	—
乾燥密度 (g/cm ³)	1.696	1.707	1.701	—
仕様密度における修正 CBR (%)	16.8	19.1	17.9	10 以上

表-2 路床の品質管理試験結果

項目	I 区画	II 区画	平均値	規定値
含水比 (%)	7.4	8.2	7.8	—
現場密度 (g/cm ³)	1.802	1.834	1.818	—
締固め度 (%)	106.2	108.1	107.1	90 以上
K ₃₀ (MN/m ³)	192	263	227	—
K ₇₅ [*] (MN/m ³)	77	105	91	—

※K₇₅=K₃₀/2.5

表-3 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-4 下層路盤の品質管理試験結果

項目	I 区画	II 区画	平均値	規定値
含水比 (%)	14.6	16.4	15.5	—
現場密度 (g/cm ³)	1.722	1.717	1.719	—
締固め度 (%)	100.4	100.1	100.2	90 以上
K ₃₀ (MN/m ³)	325	303	314	—
K ₇₅ [*] (MN/m ³)	108	101	104	—

※K₇₅=K₃₀/3

表-5 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	100
	19	87.3
	4.75	50.4
	2.36	34.4
	0.075	4.1
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-6 上層路盤の品質管理・出来形管理試験結果

項目	I 区画	II 区画	平均値	規定値
厚さ (cm)	16.0	16.8	16.4	14.6 以上
密度 (g/cm ³)	2.334	2.342	2.338	—
締固め度 [※] (%)	98.6	98.9	98.7	95 以上

※基準密度=2.368 g/cm³

表-7 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
	20 - 05	山口県伊佐産石灰岩
細骨材	砂	千葉県君津産山砂
練混ぜ水	上水道水	—
混和剤	AE 減水剤	リガニルホ酸塩
	空気量調整剤	変性アルキルホ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-8 試験施工に使用したコンクリートの配合

水セメント比 (%)	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/m ³)				混和剤	
					水	セメント	細骨材	粗骨材	AE 減水剤 (C×%)	空気量調整剤 [※]
40	0.71	37.3	5.0	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-9 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

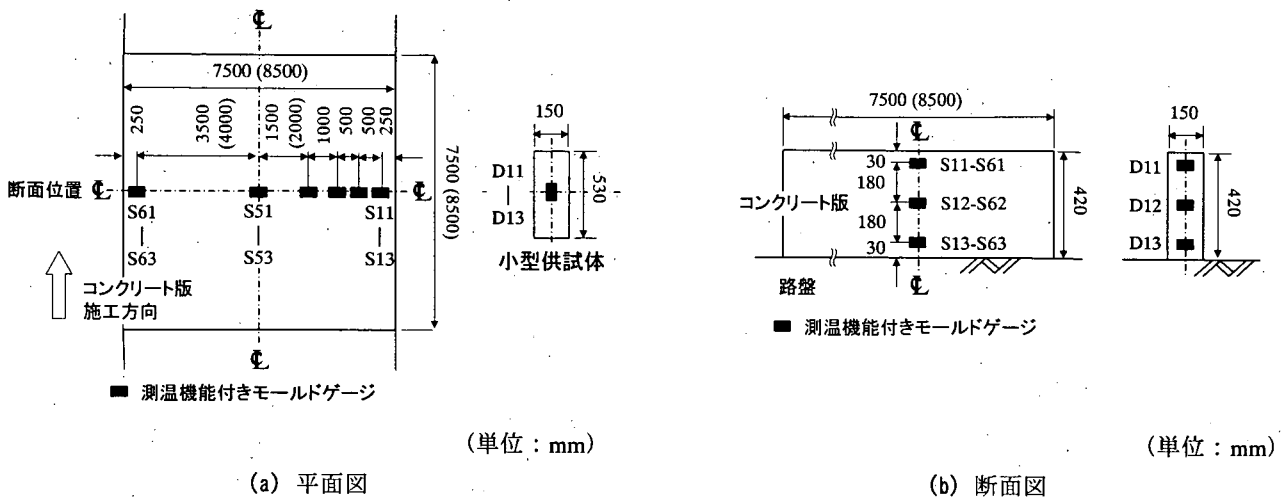


図-2 計器埋設位置

表-10 小型供試体の熱膨張係数

期間	I 区画熱膨張係数 ($1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)			II 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	11.23	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
平均値	9.88			10.06		

日間継続した。なお、両区画とも、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。

2.2 コンクリート版に発生する拘束応力の検討

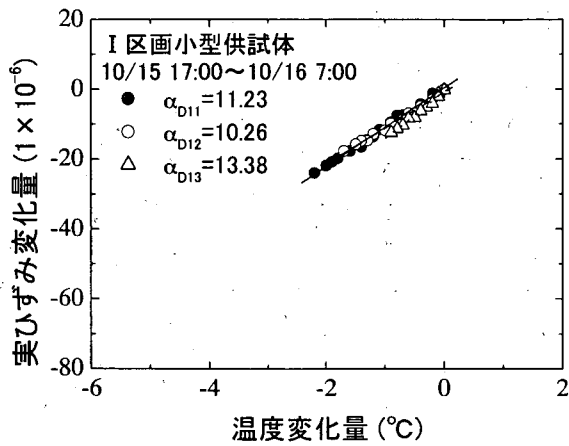
試験舗装の製作が終了した後、自然環境下においてコンクリート版に発生する拘束応力について検討するため

に、コンクリート打設直後からおよそ一年間にわたりコンクリート版内と小型供試体における温度とひずみを計測した。

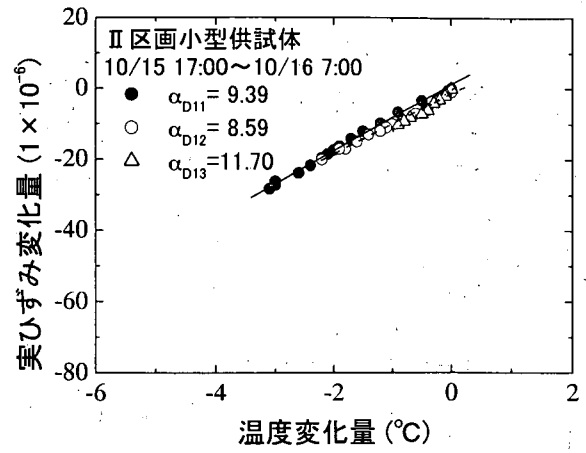
(1) 軸方向拘束応力

コンクリート版は、セメントの水和反応により凝結始発以後に発生する自己収縮、水和反応によって間隙水が消費されて乾燥状態となることで発生する乾燥収縮などにより体積が減少する。またコンクリート版は、年温度変化、日温度変化によっても軸方向に伸縮を繰り返す。しかし、これらの変形がコンクリート版の重量やコンクリート版底面と路盤との摩擦によって拘束されることで、コンクリート版の軸方向には拘束応力が発生する。

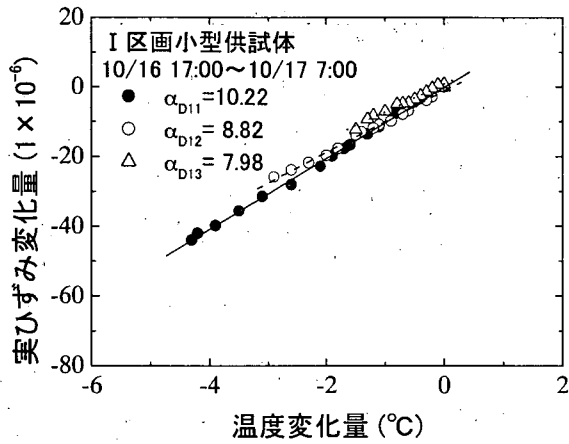
軸方向拘束応力は、コンクリート版の目地間隔を考慮するうえでは、非常に重要な因子となることから、ここではコンクリート版の目地間隔が異なる場合の軸方向拘束応力を、コンクリート版の収縮、年温度変化、日温度変化によるものに分けて検討した。



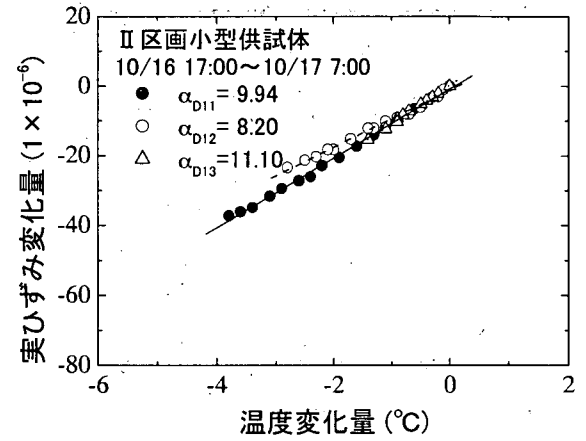
(a) I 区画 10月15日~16日



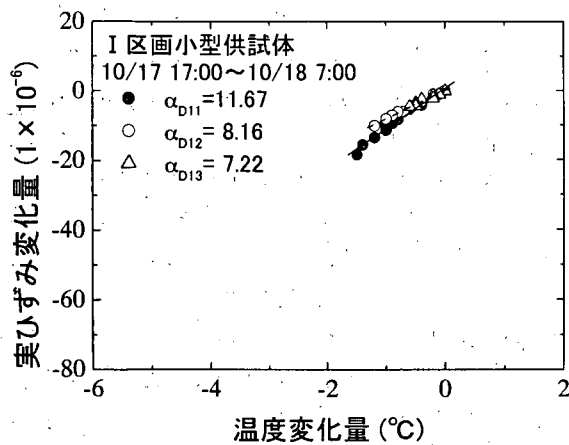
(b) II 区画 10月15日~16日



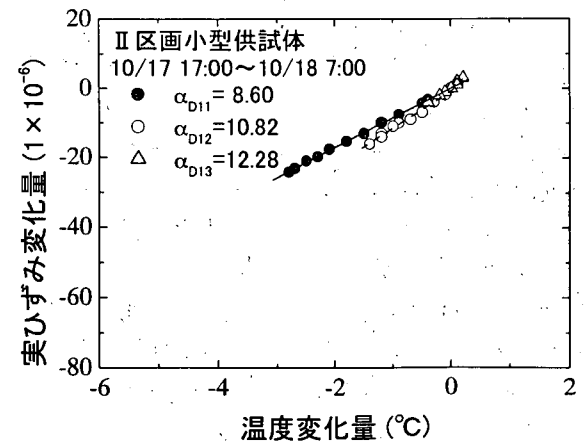
(c) I 区画 10月16日~17日



(d) II 区画 10月16日~17日

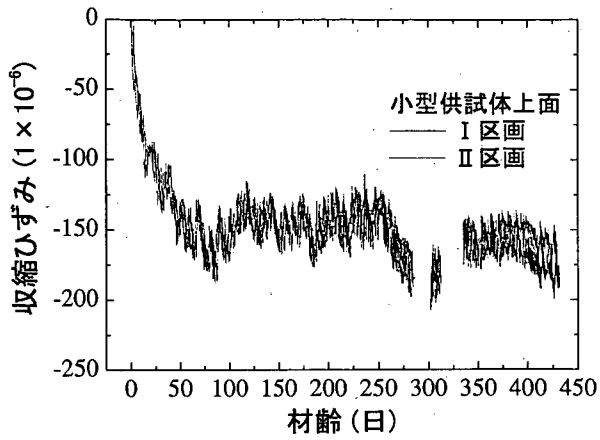


(e) I 区画 10月17日~18日

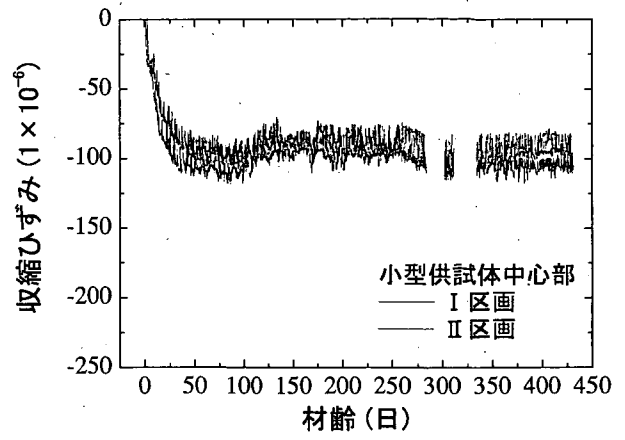


(f) II 区画 10月17日~18日

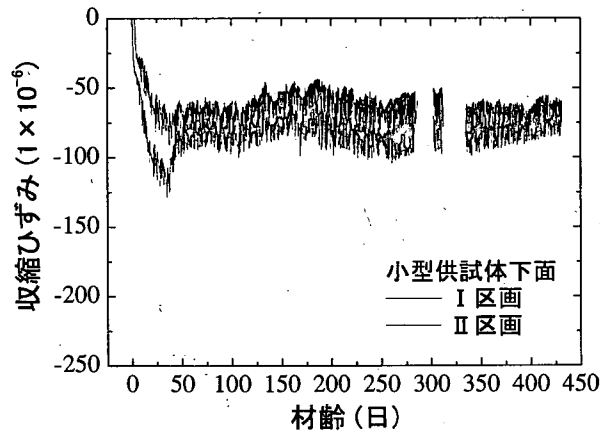
図-3 小型供試体の熱膨張係数



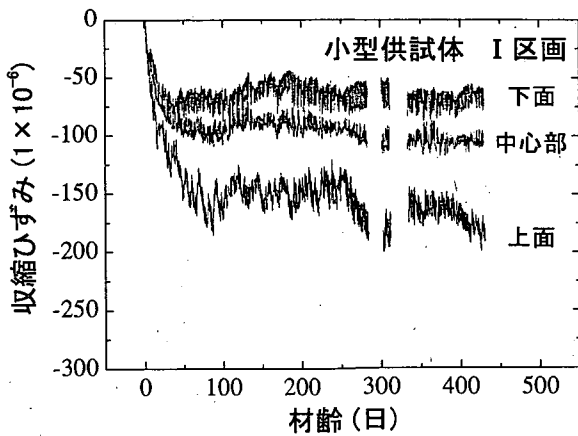
(a) 小型供試体上面



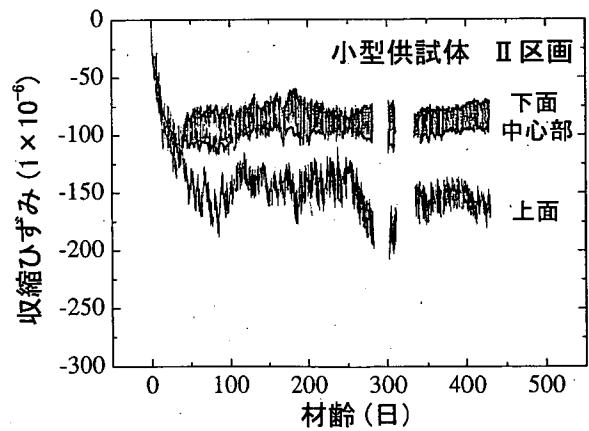
(b) 小型供試体中心部



(c) 小型供試体下面



(d) I 区画小型供試体



(e) II 区画小型供試体

図-4 小型供試体の収縮ひずみ

a) 熱膨張係数

温度変化によるコンクリート版の変形を算出するために必要となるコンクリートの熱膨張係数を、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を用いて算出した。熱膨張係数の算出は、養生期間中のうち、ひずみが安定しているコンクリート版打設の翌々日から3日間のそれぞれ17:00から7:00の間を対象とし、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。図-3にはI区画とII区画の近傍に設置した小型供試体において計測した日ごとの温度変化量と実ひずみ変化量の関係を示した。また表-10には、それらより得られた熱膨張係数をまとめた。両区画ではコンクリートに使用した材料、コンクリートの配合、環境条件が同一であることから、熱膨張係数はI区画とII区画で大差はないことが確認された。

b) 収縮による拘束応力

コンクリートの収縮（乾燥収縮と自己収縮）が拘束されることにより発生する収縮拘束応力について検討した。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、温度変化量と熱膨張係数の積による温度ひずみを引くことで求めた小型供試体の収縮ひずみを図-4に示す。収縮ひずみは具体的には(1)式によって算出される。

$$\varepsilon_{sh} = \varepsilon - \alpha \Delta T \quad (1)$$

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 ($1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)
- ΔT : 小型供試体打設直後の最高温度からの温度差 ($^{\circ}\text{C}$)

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、供試体表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。これは供試体表面が大気に曝されており、間隙の水分が供試体内部よりも早く消散したためと考えられる。

これらの収縮変形が拘束されることにより、コンクリート版に発生する収縮拘束応力を(2)式により算出した。その結果を図-5に示す。(2)式において右辺の値が直接測定できないことから、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、コンクリート版中央部における長期の温度変化による軸方向拘束度を、 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1.5⁶⁾）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。

$$\sigma_{sh} = -R_{Ny} E_e \varepsilon_{sh} \quad (2)$$

ここに、

- σ_{sh} : コンクリート版の収縮拘束応力 (Pa)
- 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、長期温度変化による軸方向拘束度 R_{Ny} が小さいことから、両区画とも非常に小さい引張応力であり、目地間隔が長いII区画でも、I区画より大きくはない。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広げることが、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。

c) 長期温度変化による拘束応力

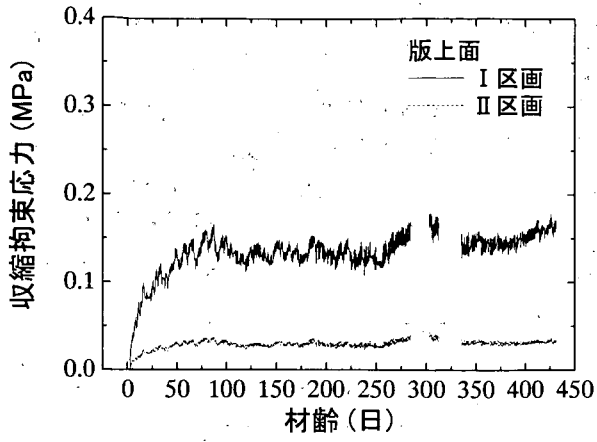
コンクリート版の収縮による変形も含んだ、年温度変化による軸方向の変形が拘束されることによって発生する長期軸方向拘束応力を表-11に示す。長期軸方向拘束応力は、後述の日温度変化による短期軸方向拘束応力、曲げ拘束応力の算定と同一の条件とするために、冬季(2月)から夏季(7月)までの温度上昇期を対象とし、一日のうちで版厚方向の温度差が最大となる時(14:00頃)のコンクリート版の軸方向の実ひずみ変化量(後述するcompensation lineの考え方を適用したときの軸方向成分)に基づいている。具体的には(3)式によって計算される。

$$\sigma_{Ny} = -R_{Ny} E_e \alpha_f \Delta T \quad (3)$$

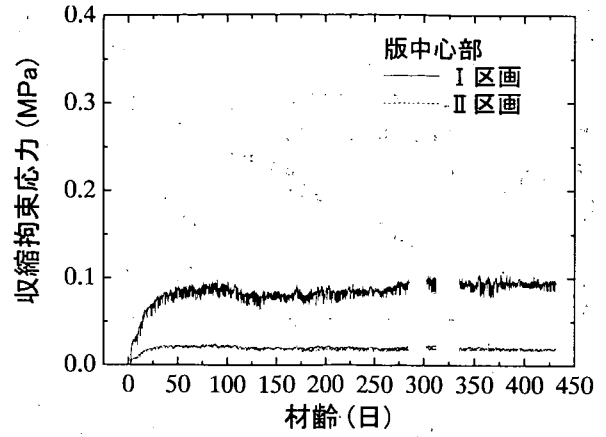
ここに、

- σ_{Ny} : 長期軸方向拘束応力 (Pa)
- 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, $= E/(1+\phi)$)
- 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 ($1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)
- ΔT : 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 ($^{\circ}\text{C}$)

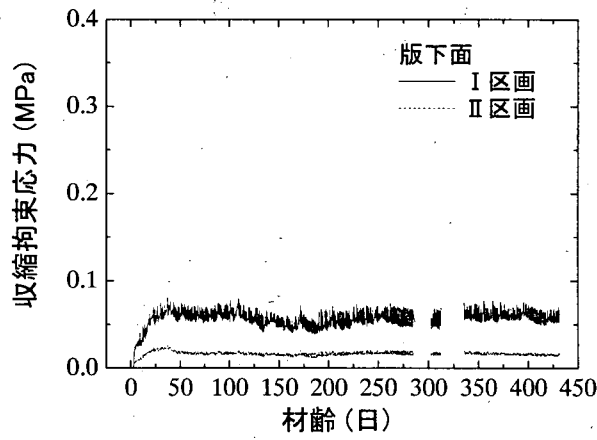
(3)式で使用する長期軸方向拘束度を(4)式により算出



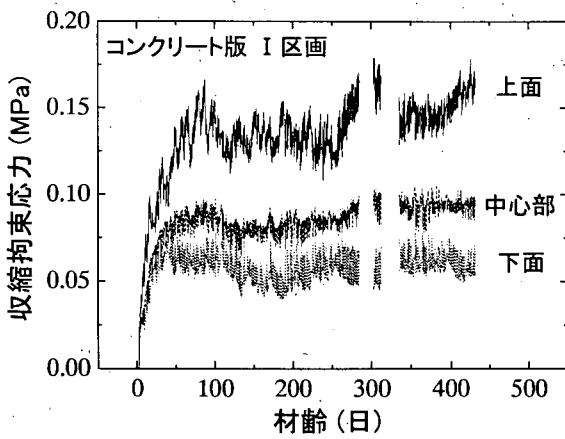
(a) 版上面



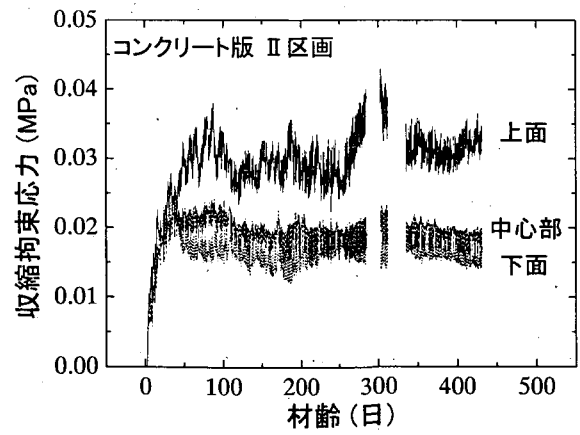
(b) 版中心部



(c) 版下面



(d) I区画



(e) II区画

図-5 コンクリート版の収縮拘束応力と材齢

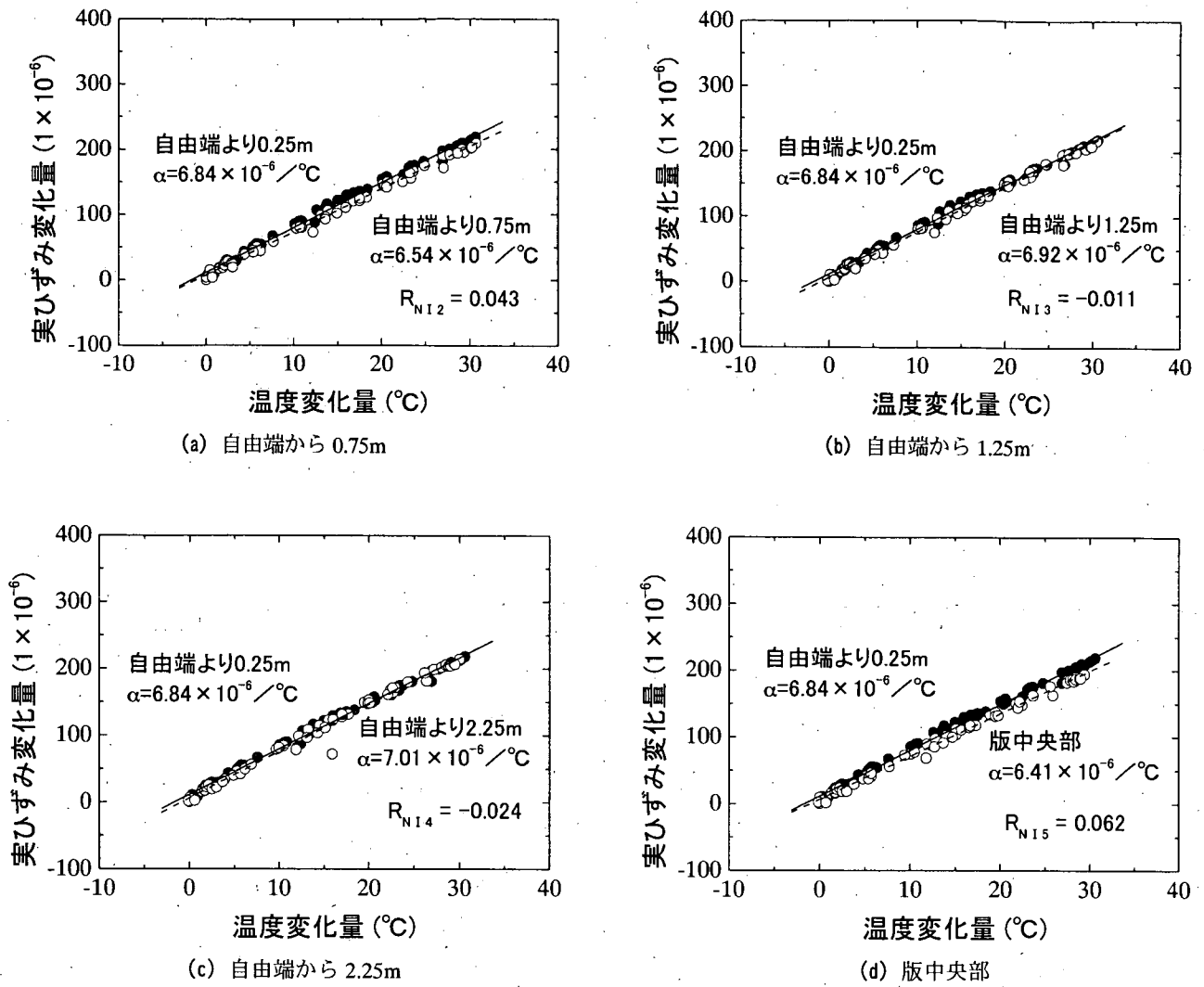
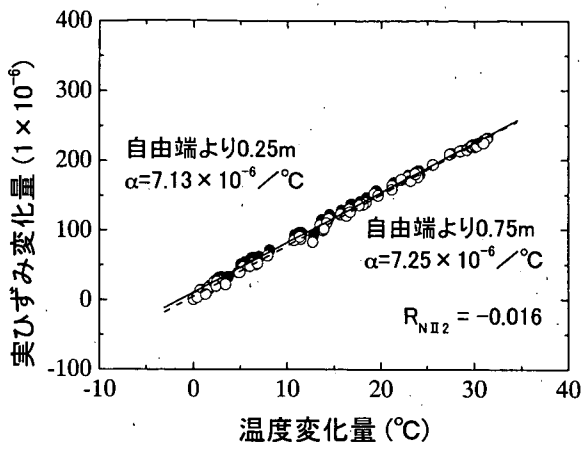
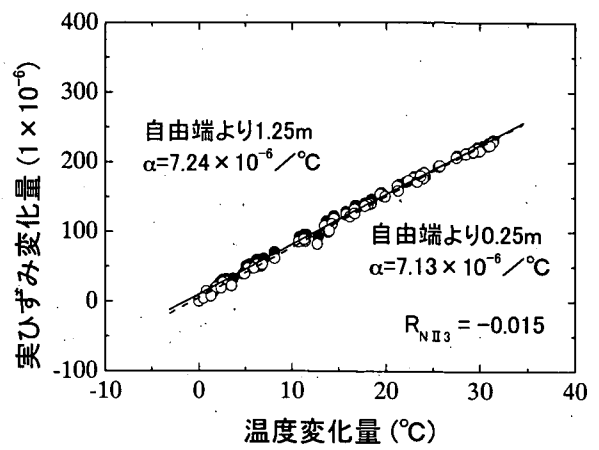


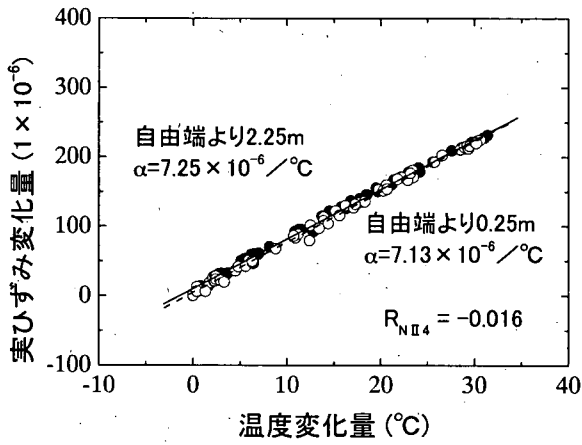
図-6 温度変化量と実ひずみ変化量の関係 (I区画)



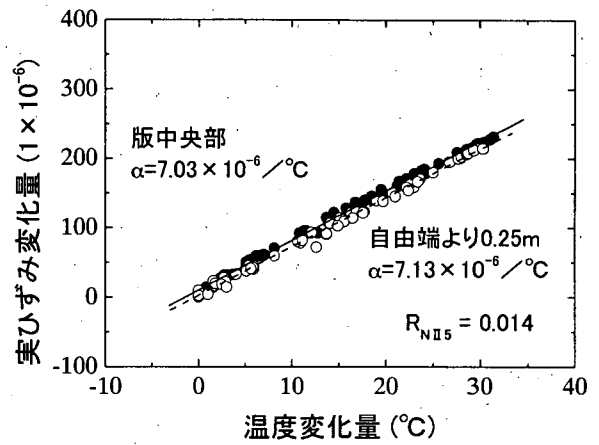
(a) 自由端から 0.75m



(b) 自由端から 1.25m



(c) 自由端から 2.25m

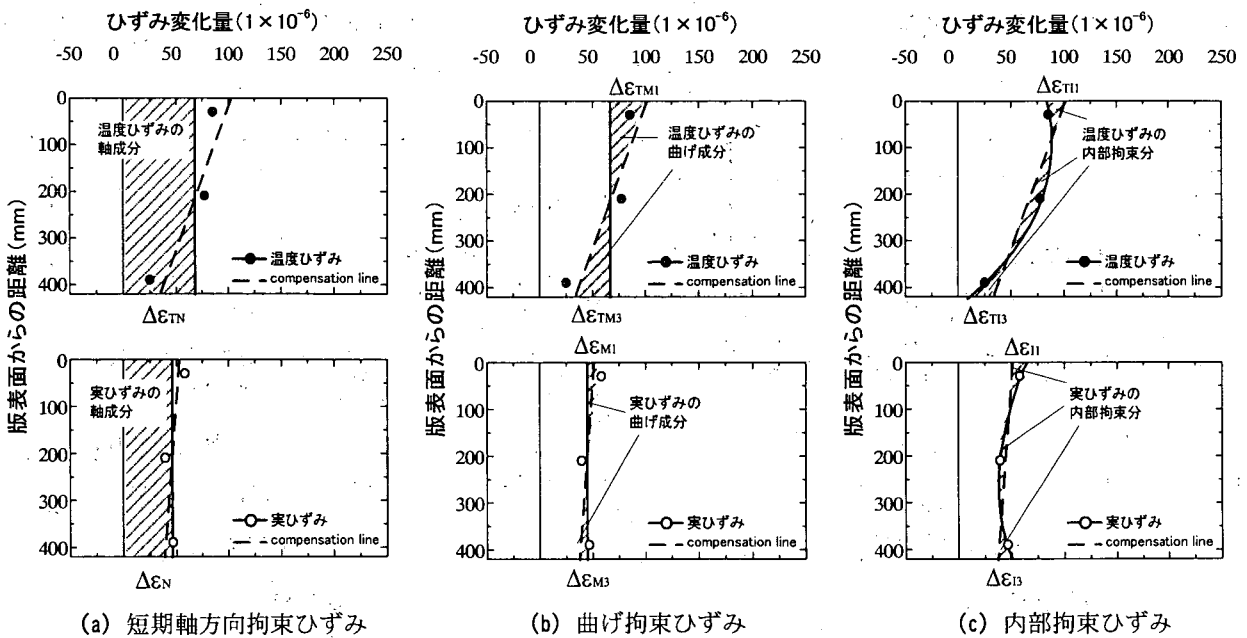


(d) 版中央部

図-7 温度変化量と実ひずみ変化量の関係 (Ⅱ区画)

表-11 長期軸方向拘束応力

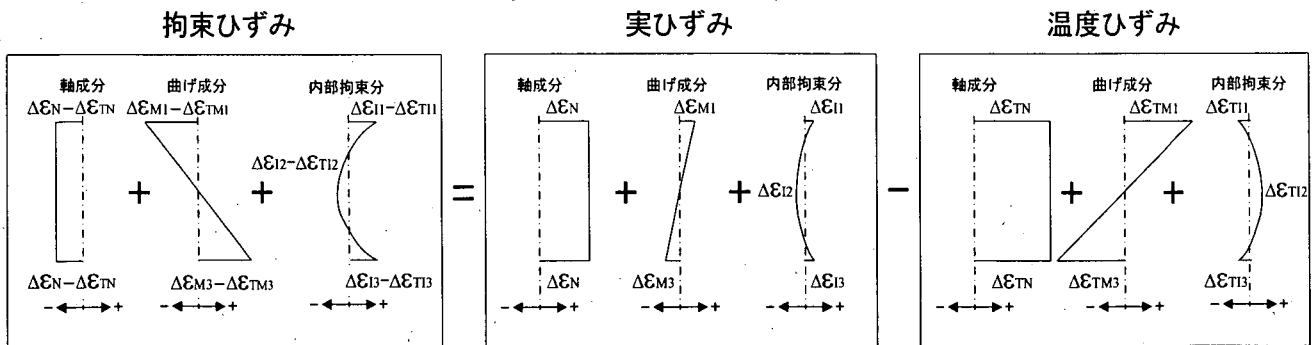
	I 区画	II 区画
2月1日 15:00 温度 (°C)	6.5	6.6
7月1日 14:00 温度 (°C)	33.4	34.2
長期温度変化量 (°C)	26.9	27.6
自由端における見かけの熱膨張係数 ($1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	6.84	7.13
有効弾性係数 (MPa)	14400	14400
長期軸方向拘束度	0.062	0.014
長期軸方向拘束応力 (MPa)	-0.16	-0.04



(a) 短期軸方向拘束ひずみ

(b) 曲げ拘束ひずみ

(c) 内部拘束ひずみ



(d) 拘束ひずみ, 実ひずみ, 温度ひずみの関係

図-8 拘束ひずみの計算方法

した。両区画における長期軸方向拘束度を図-6、図-7に示す。長期軸方向拘束度は、コンクリート版内部において比較的自由に變形すると考えられるコンクリート版端部と、拘束が大きいと考えられるコンクリート版中央部における軸方向の実ひずみ変化量と温度変化量から算出した。収縮による變形を含んだ見かけの熱膨張係数を比較することで算出される。

$$R_{Ny} = \frac{\alpha_f - \alpha_i}{\alpha_f} \quad (4)$$

ここに、

R_{Ny} : 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 ($1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)

α_i : コンクリート版内部における見かけの熱膨張係数 ($1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)

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Ⅱ区画でも、Ⅰ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、同程度の引張応力が発生す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自由な變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。

d) 短期温度変化による拘束応力

日温度変化によるコンクリート版の軸方向の自由な變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について検討した。これは、図-8に示すように、温度ひずみと実ひずみでみた軸方向成分の変化量における差から算出される。この場合のひずみ変化量は、一日のうちでコンクリート版厚方向の温度差が最小となる時(7:00頃)を基準として、温度差が最大となる時(14:00頃)までのコンクリート版の軸方向成分(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。短期軸方向拘束応力は具体的には(5)式より算出した。

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

ここに、

σ_{Nd} : 短期軸方向拘束応力 (Pa)

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})

図-9に短期軸方向拘束応力の日変動とその季節的変化を示す。短期軸方向拘束応力は、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な圧縮応力になること、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。

短期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變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變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非常に小さい。

以上のことから、目地間隔を1m広げることに起因して、短期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

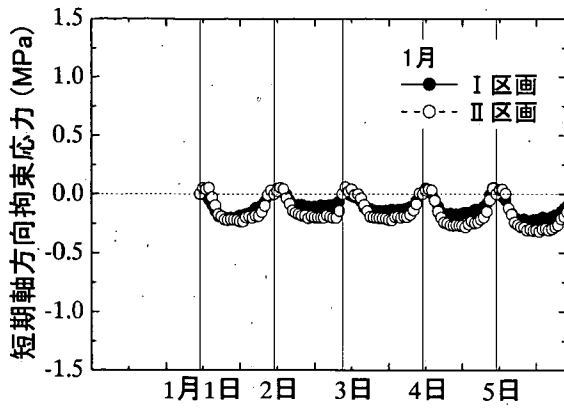
コンクリート版厚方向の温度差によって、コンクリート版には曲げ變形が生じる。この變形はコンクリート版内の温度勾配が正(表面温度>下面温度)の場合には上方にそる變形、温度勾配が負(表面温度<下面温度)の場合には下方にそる變形となる。この變形が外部より拘束された場合には、コンクリート版の温度勾配が正の場合はコンクリート版下面に、コンクリート版の温度勾配が負の場合はコンクリート版上面に引張の曲げ拘束応力が発生することから、目地間隔の違いがコンクリート版に発生する曲げ拘束応力に与える影響を検討した。

図-10に、コンクリート版下面に生じる曲げ拘束応力の日変動とその季節的変化を示す。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。曲げ拘束応力の算出では、版厚方向の温度差が最小となる7:00頃の温度とひずみを基準とした。

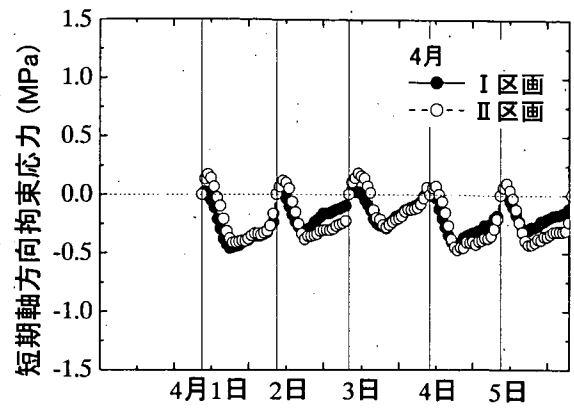
$$\begin{aligned} \sigma_M &= E(\Delta\varepsilon_{M3} - \Delta\varepsilon_{TM3}) \\ &= -E(\Phi_M - \Phi_{TM}) \cdot h/2 \end{aligned} \quad (6)$$

ここに、

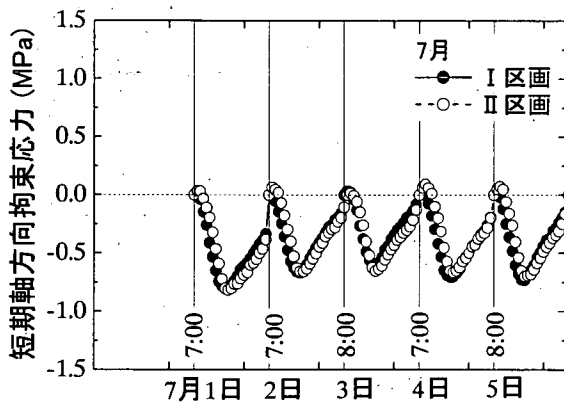
σ_M : 曲げ拘束応力 (Pa)



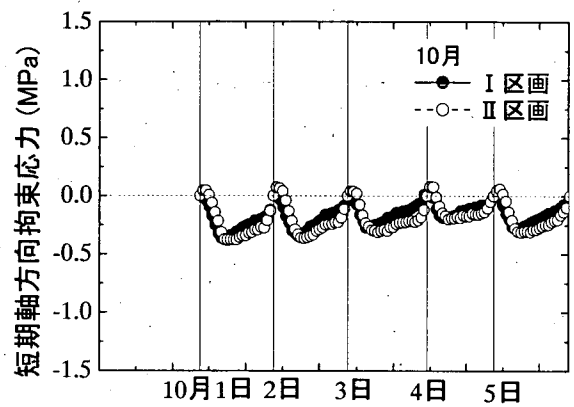
(a) 1月



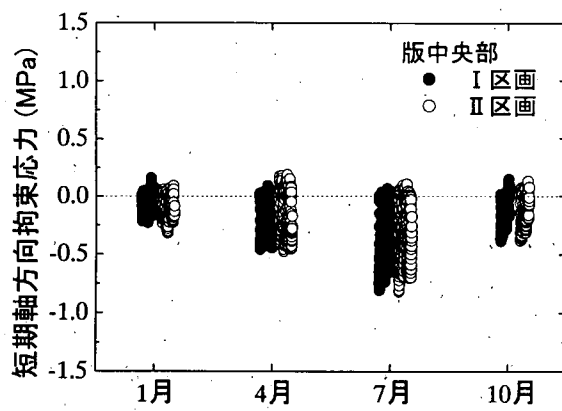
(b) 4月



(c) 7月

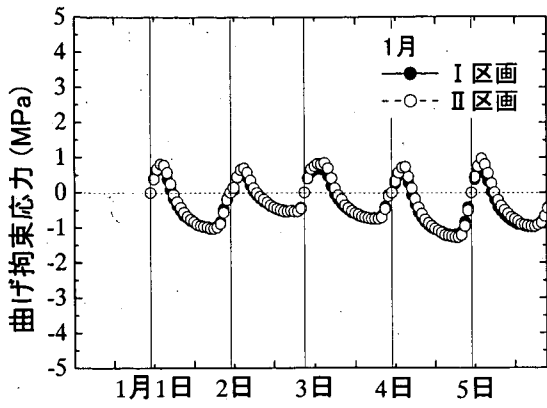


(d) 10月

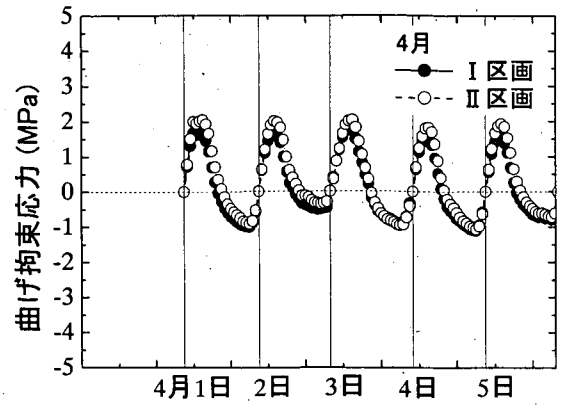


(e) 1月~10月

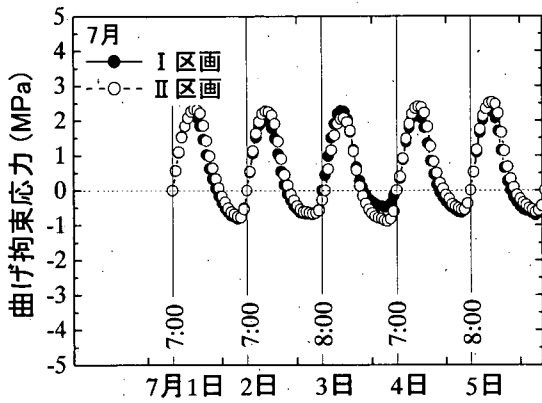
図-9 短期軸方向拘束応力の日変動とその季節的变化



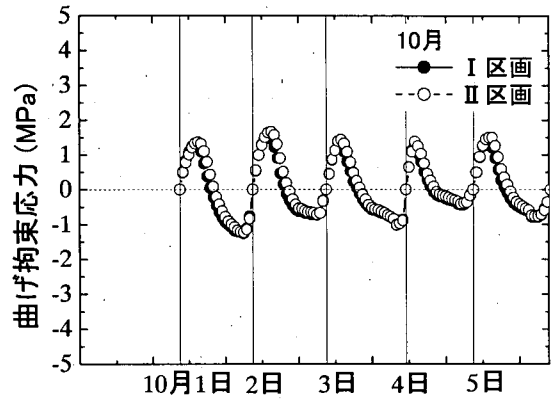
(a) 1月



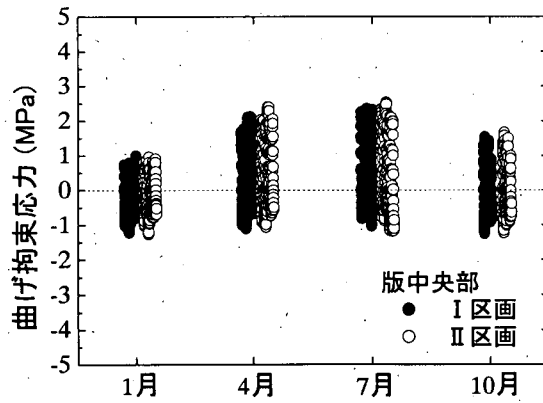
(b) 4月



(c) 7月



(d) 10月



(e) 1月~10月

図-10 曲げ拘束応力の日変動とその季節的变化

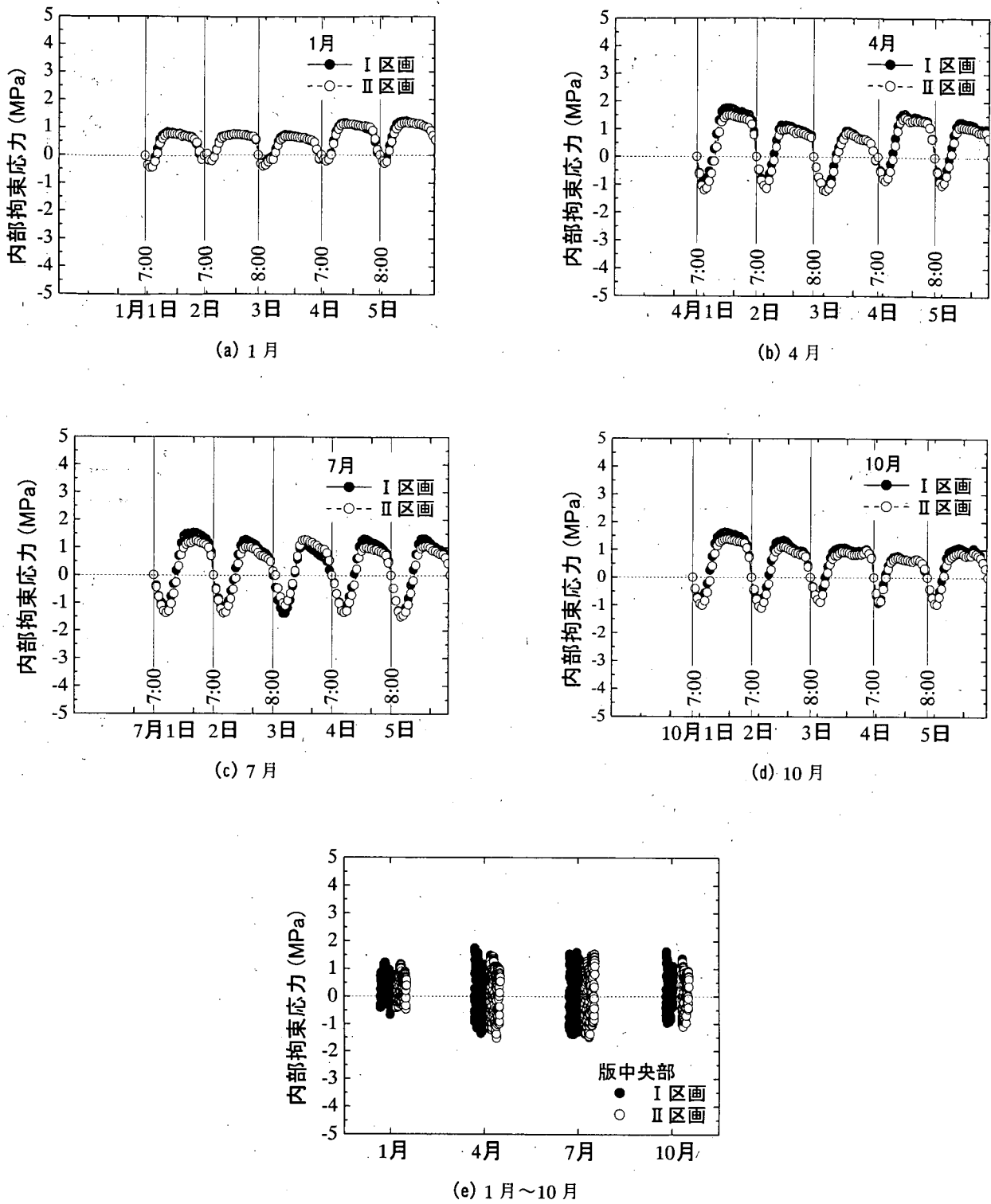
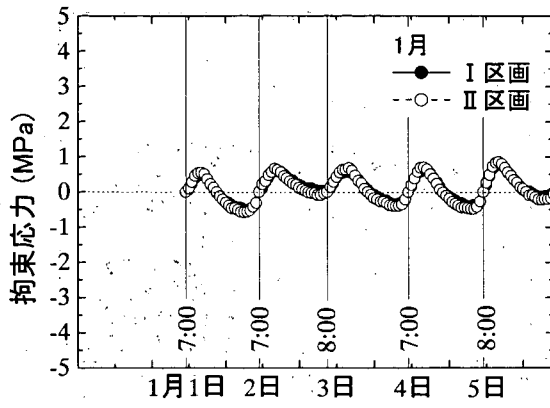
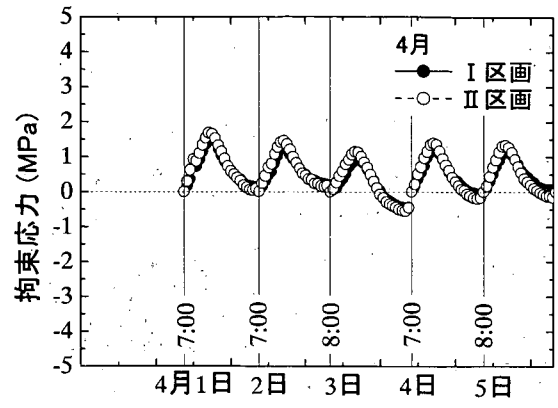


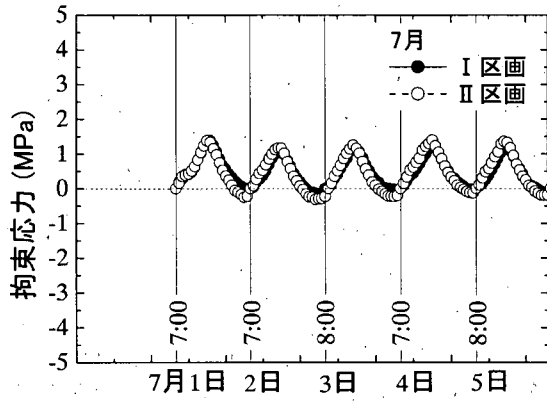
図-11 内部拘束応力の日変動とその季節的变化



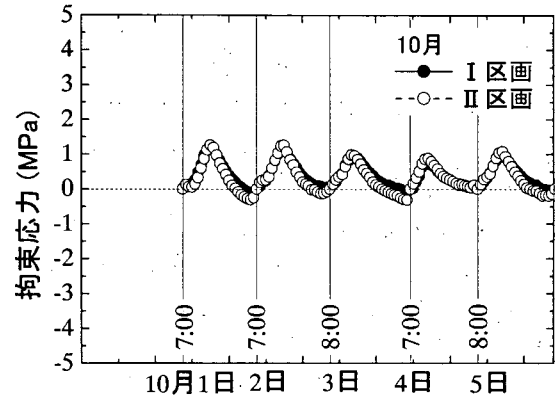
(a) 1月



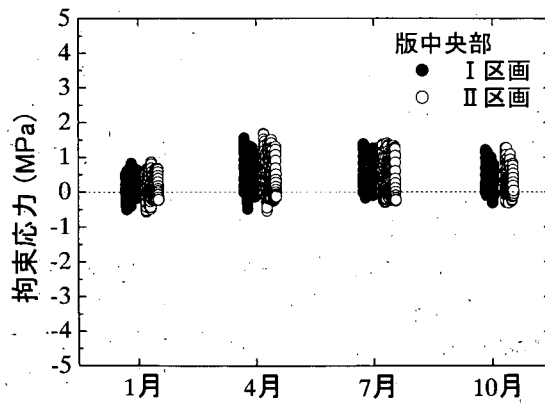
(b) 4月



(c) 7月



(d) 10月



(e) 1月~10月

図-12 全拘束応力の日変動とその季節的変化

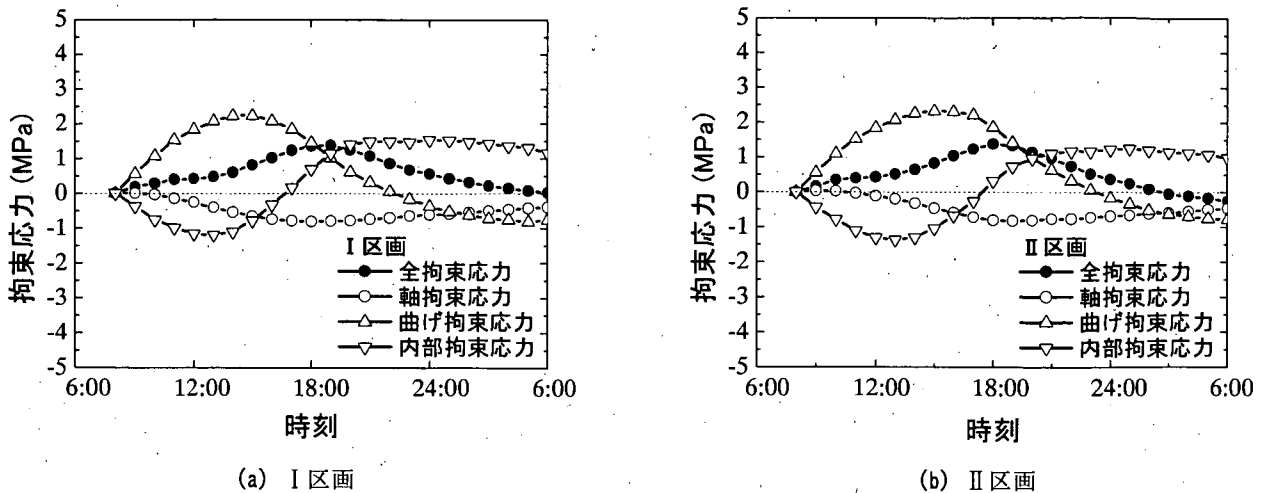


図-13 各拘束応力の日変動

- 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 ($1 \times 10^{-6}/m$)
- 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 ($1 \times 10^{-6}/m$)
- h : コンクリート版厚 (m)

年間を通してみると、コンクリート版下面に発生する曲げ拘束応力は、一日の温度勾配が最大となる夏季に最大の引張応力となっている。また最大引張応力は両区画とも大差がなく、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 (5.0MPa) 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、コンクリート版の上方にそる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、版厚方向の温度差が最大となる 14:00 頃に曲げ拘束応力も最大引張応力となる。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 に広げた場合でも、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 広げ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⁷⁾。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。

$$\begin{aligned} \sigma_I &= E(\Delta\varepsilon_{I3} - \Delta\varepsilon_{TI3}) \\ &= E\{\Delta\varepsilon - (\Delta\varepsilon_N - \Phi_M \cdot h/2)\} \\ &\quad - E\{\Delta\varepsilon_T - (\Delta\varepsilon_{TN} - \Phi_{TM} \cdot h/2)\} \end{aligned} \quad (7)$$

ここに、

- σ_I : 内部拘束応力 (Pa)
- E : コンクリートの弾性係数 (MPa)
- $\Delta\varepsilon_{I3}$: 版下面の実ひずみの内部拘束分 (1×10^{-6})
- $\Delta\varepsilon_{TI3}$: 版下面の温度ひずみの内部拘束分 (1×10^{-6})
- $\Delta\varepsilon$: 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の変化量 (1×10^{-6})
- $\Delta\varepsilon_T$: 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の変化量 (1×10^{-6})

図-11 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 広げ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-12 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、内部拘束応力の和）の季節的変動と日変動を示す。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 広げることによる差は認められない。

図-13 に夏季における各拘束応力の日変動を示す。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 広げることによって拘束応力が増大する可能性は低いと言える。

2.3 コンクリート版に発生する合成応力の検討

前節において、目地間隔を現行の標準である 7.5m から 1m 広げることが、コンクリート試験舗装に発生する拘束応力に与える影響は小さいことが明らかになった。しかし、空港コンクリート舗装への適用を考える上では、前節の検討で考慮した条件に加え、航空機荷重がコンクリート版に載荷された場合を想定する必要がある。そこで、自然環境下におけるコンクリート版の温度条件と航空機荷重条件を想定し、目地間隔が、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、三次元有限要素法による解析で検討した。

(1) 解析手法

解析には市販の有限要素法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-14 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、コンクリート版の上下面に温度差が生じている場合、コンクリート版に曲げ変形が生じ、コンクリート版下面と路盤との間に隙間が生じると考えられることから、コンクリート版下面の節点と支持ばね要素の間には不連続要素を挿入し、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間に設けられる目地に働く力を考慮するために、コンクリート版を構成する節点の中で目地を挟んで向かい合う節点間に、水平な二方向（目地平行方向と目地垂直方向）と鉛直な一方向にそれぞれ独立した目地ばね要素を挿入した。さらに、コンクリート版と路盤との間に働く摩擦力を考慮するために、コンクリート版下面の節点と支持ばね要素の間に水平方向のみに働く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観測結果、室内におけるコンクリートの圧縮試験結果等を参考に、表-12 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、試験舗装の設計において設定した設計路盤支持力係数を採用した。航空機荷重条件としては、図-15 に示すように、B-747 の主脚（複々車輪、910kN）を構成する車輪の中央が、コンクリート版中央部に位置するように設定した。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-16 に示す。この温度分布から、解析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。

(3) 解析に使用するばね係数の決定

解析を行うためには、目地を挟んで向かいあう節点間に挿入された目地ばね要素のばね係数と、コンクリート版下面の節点と支持ばね要素との間に挿入された摩擦ばね要素のばね係数を決定する必要がある。そこで、一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、ばね係数を変化させて三次元有限要素法により解析し、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ばね係数を決定した。

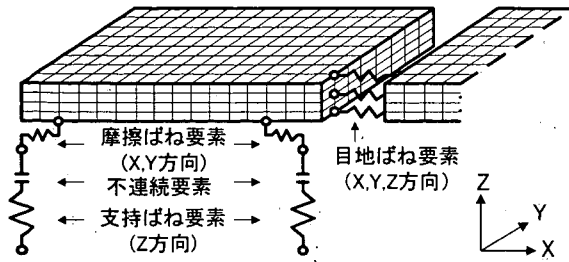
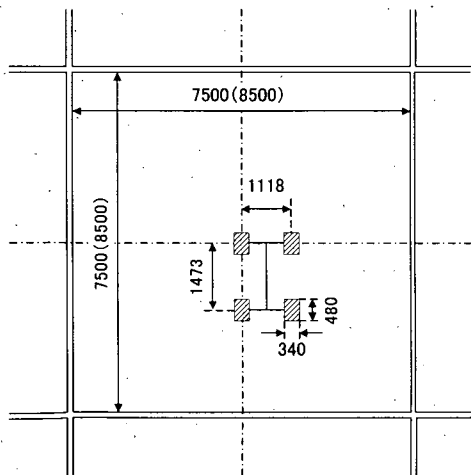


図-14 解析モデル概略図

表-12 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
コンクリート版の目地間隔 (m)	7.5 (I区画) 8.5 (II区画)
コンクリートの熱膨張係数 (1×10 ⁻⁶ /°C)	9.77 (I区画) 10.06 (II区画)
支持ばね要素の単位面積あたりのばね係数 (MN/m ²)	70
軸方向最大温度変化量 (°C)	7.44
版厚方向最大温度勾配 (°C/m)	39.44



(単位：mm)

図-15 解析における航空機脚荷重の配置

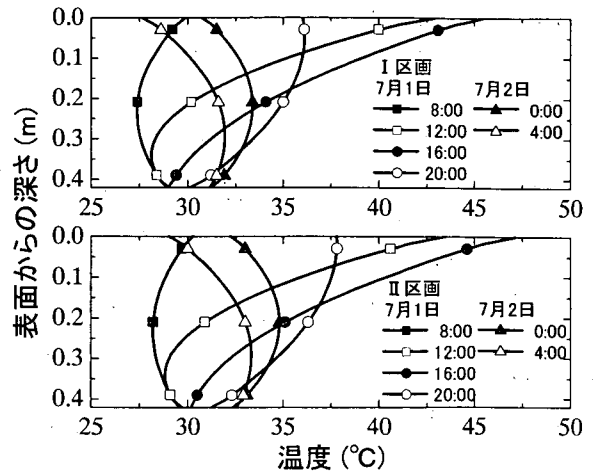


図-16 コンクリート版内部温度の日温度変化

解析では、軸方向拘束応力と曲げ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、目地直角方向に挿入した水平目地ばね要素のばね係数を変化させている。

単位面積あたりのばね係数と拘束応力の関係を図-17に示す。この図における単位面積あたりのばね係数とは、軸方向拘束応力に関しては、コンクリート版下面における単位面積あたりの摩擦ばね要素のばね係数を、曲げ拘束応力に関しては、目地直角方向に挿入した水平目地ばね要素の単位面積あたりのばね係数を示している。軸方向拘束応力、曲げ拘束応力とも、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コンクリート版の温度とひずみの計測値から求めた拘束応力と、解析により求めた拘束応力を比較すると、摩擦ばね要素のばね係数としては $1 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ 程度を、目地直角方向に挿入した水平目地ばね要素のばね係数としては $2 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ 程度を使用すれば良いことがわかる。

目地ばね要素のうち、鉛直ばね要素と目地平行方向に挿入した水平目地ばね要素のばね係数については、隣接する版同士が、鉛直方向および目地平行方向に互いに同じ変形を示すために、ばね係数が拘束応力に与える影響は小さいと考えられること⁸⁾から一定値を用いた。これらの要素のばね係数の算出では、コンクリート版縁部で FWD により測定した载荷版直下におけるコンクリート版表面の最大たわみと、同条件にて三次元有限要素法に

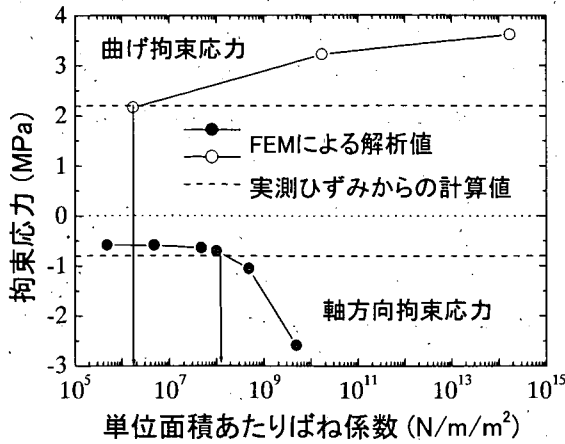


図-17 ばね係数と拘束応力の関係

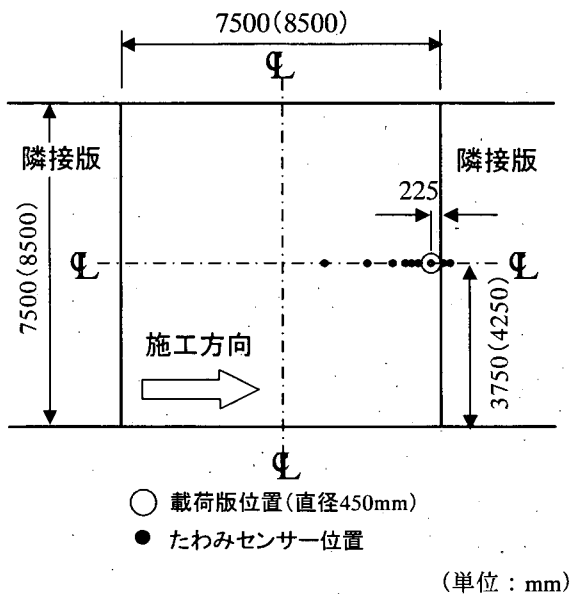


図-18 FWDによるたわみ測定位置

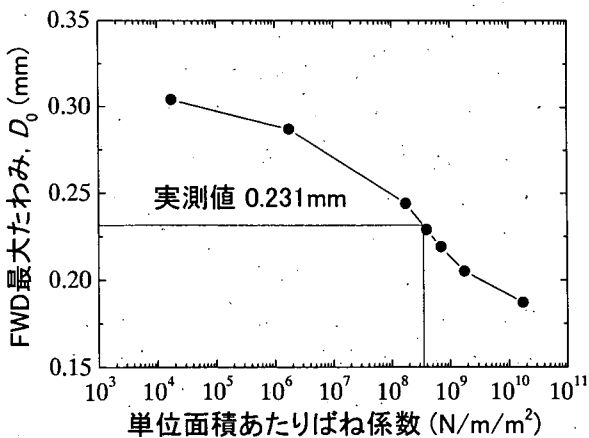


図-19 FWD 最大たわみとばね係数の関係

よる解析から求めた最大たわみが一致するように、ばね係数を変化させて解析を行った。FWDによるたわみ測定は、図-18に示すように、コンクリート版縁部において、直径450mmの載荷版が目地に接するように配置し、最大荷重を200kNとして測定した。解析結果を図-19に示す。この解析結果から、鉛直ばね要素と目地平行方向に挿入した水平目地ばね要素の単位面積あたりのばね係数を $3 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ とした。

(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。

図-20に、コンクリート版下面に発生する応力の解析結果を示す。図には、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和、各々の条件を組み合わせた場合に発生する合成応力をそれぞれ示した。

各々算出した拘束応力と荷重応力との和は、時刻に関わらず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⁹⁾。また、両者の差は温度勾配が大きい日中に大きく、深夜ではほとんど差が生じていないことがわかる。応力が最大となる時刻に関しては、各々算出した応力の和は、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。

しかし合成応力に関しては、目地間隔を1m広げることによる影響は大きくはなく、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。

次に、目地間隔をさらに広げた場合について、有限要素法による解析結果から検討した。コンクリート版厚、各種のばね係数、温度条件、荷重条件を同一とし、目地間隔のみを8.5mよりさらに広げた場合にコンクリート版に発生する応力と変位を算出した。温度条件としては、上記の検討で最大の合成応力が発生している14:00としている。

解析による目地間隔と応力の関係を図-21に示す。拘束応力と荷重応力の和は、目地間隔に比例して増大しているが、合成応力は、目地間隔による変化が小さく、空港コンクリート舗装に用いられるコンクリートの設計基準曲げ強度である5.0MPaに漸近しており、目地間隔を10.5mまで広げた場合でも、設計基準曲げ強度を超える応力は発生していない。

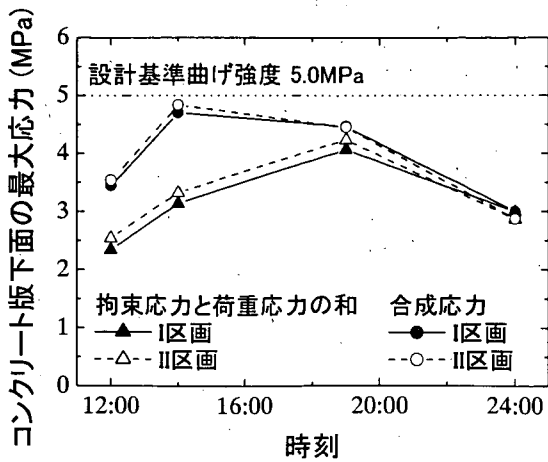


図-20 コンクリート版下面の応力の日変動

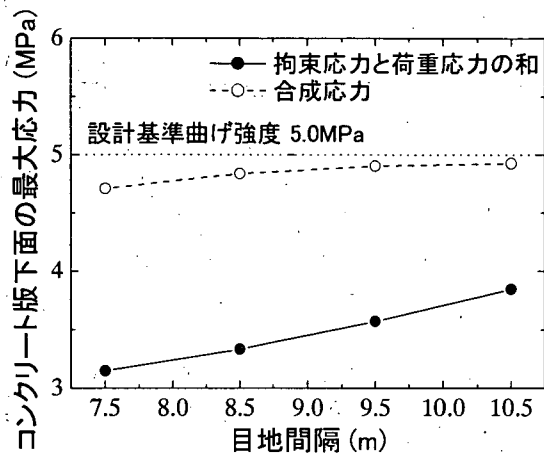


図-21 コンクリート下面の応力と目地間隔の関係

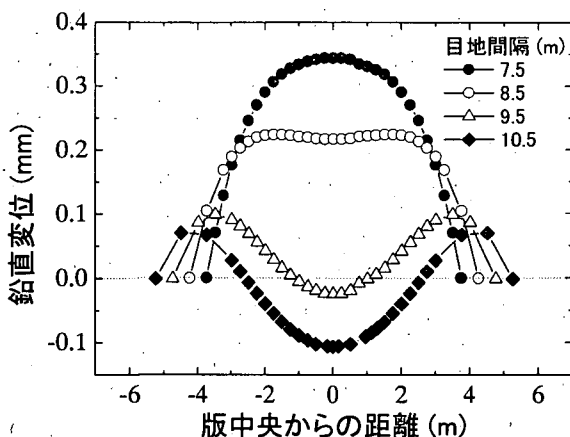


図-22 コンクリート版中央部の鉛直変位

図-22 に、温度条件のみを与え、目地間隔を広げた場合のコンクリート版中央部下面の鉛直変位の解析結果を示す。温度条件は 14:00 の温度を採用しているため、コンクリート版上面の温度が下面の温度よりも高くなっていることから、コンクリート版には上方にそる変形が生じているが、目地間隔が 8.5m を超える場合、コンクリート版中央部は、コンクリート版の自重に影響を受け、大きく下方に変位しており、コンクリート版下面が路盤上面に接触することがわかる。Eisenmann¹⁰⁾は目地間隔が長い場合、コンクリート版にこのようなそり変形が生じることを報告しており、版中央部において、コンクリート版下面が路盤上面に接触する場合の目地間隔を、限界スラブ長としている。この限界スラブ長の考え方を考慮すると、今回の解析における条件では、8.5m 程度が最大目地間隔と考えられる。

2.4 まとめ

試験舗装におけるコンクリート版の挙動観測および有限要素法による解析から、空港コンクリート舗装の目地間隔に関する検討結果をまとめると以下のとおりである。

- 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 に広げた場合でも、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、日中の温度変化で曲げ拘束応力とは逆向きに働いており、目地間隔に関わらず小さく、目地間隔を 8.5m としても、7.5m の場合と大差はない。
- ③ コンクリート版に発生する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、目地間隔による影響は小さい。
- ④ 自然環境下において温度変化に曝され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。
- ⑤ 日中で版厚方向の温度勾配が正である場合、コンクリート版には上方にそる変形が発生するが、目地間隔が 8.5m 以上になると、自重の影響でコンクリート版中央部が路盤と接触すると考えられることから、Eisenmann による限界スラブ長の考え方を考慮すると、8.5m が最大の目地間隔であると考えられる。

3. 目地材料に関する検討

コンクリート舗装の目地には、乾燥収縮や温度変化に起因するコンクリート版の変形を吸収し、目地からの雨水や土砂の浸入を防ぐ目的で、目地材や目地板などの目地材料が用いられている（図-23は空港の場合）。

目地材は施工目地、収縮目地、膨張目地において、土砂や雨水が目地に進入するのを防ぐ目的で用いられ、コンクリート版の膨張収縮に順応すること、コンクリートとよく付着すること、水密性に優れていること、水に溶けないこと、高温時に流れ出さず、低温時にも過度に脆弱にならないこと等が要求される。目地材には主に加熱型注入目地材、常温型注入目地材、成型目地材があるが、空港舗装では上記で挙げた要求項目以外にも、コンクリート舗装上に漏れた航空機燃料に対する耐油性、航空機のプラストに対する耐炎性、夜間から早朝までの短期間での施工に対応できる施工性が要求されることから、非瀝青系である常温型注入目地材が多く用いられている。

目地板は膨張目地に用いられ、コンクリート版の膨張収縮に順応し、膨張時には目地からはみ出さず、収縮時にはコンクリート版との間に隙間を生じないものが求められる。目地板も材質により瀝青系目地板と非瀝青系目地板に分けられるが、目地材と同様に、耐油性、耐炎性の観点から非瀝青系の発泡体系目地板が多く用いられている。

目地材料に関する規格は、共通仕様書において表-13、表-14に示すとおり定められているが、これらの規格では、試験方法に関する記述がなかったり、目地材料の材質により異なる規格値が定められていることなど、不明瞭な点が多いことから、我が国の空港コンクリート舗装の目地に必要な性能を考慮した目地材料の規格について再検討する必要があると考えられる。

以下では、空港コンクリート舗装に使用される目地材料に必要な性能を明らかにすることを目的として、目地材料の耐久性に着目して実施した室内試験について詳細を記し、試験結果について述べた後、目地材料に必要なとされる規格について述べる。

3.1 目地材に関する室内試験

(1) 使用材料

現在、一般的に普及している常温型注入目地材には、シリコン系、ポリサルファイド系、ウレタン系があるが、シリコン系の常温型注入目地材は耐油性が低いことが理由で空港での使用実績がなく、空港コンクリート舗装で

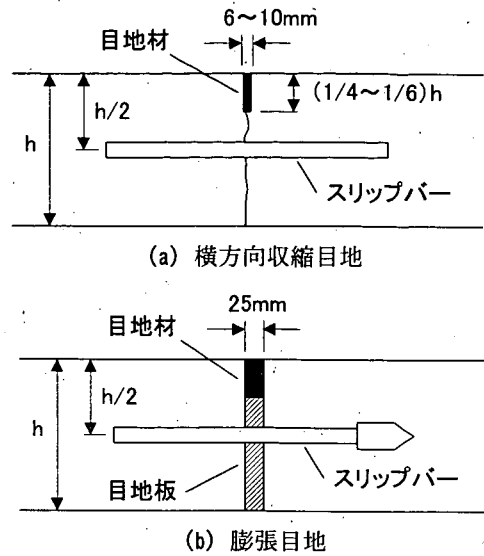


図-23 目地構造例¹⁾

表-13 目地材の材質規定³⁾

項目	規格値
硬化時間	24時間以内
不粘着時間	3時間以内
比重	1.2~1.3
弾性 (%)	75以上
引張強さ (MPa)	0.2~0.5

表-14 目地板の材質規定³⁾

項目	発泡体系	瀝青繊維系
圧縮応力度 (MPa)	0.2~0.5	2.0~9.8
復元率 (%)	95以上	65以上
はみ出し (mm)	4以下	4以下

は一般的にポリサルファイド系およびウレタン系の常温型注入目地材が用いられている。よって、今回実施した室内試験では、上記二種類の目地材を用いて試験を実施した。

(2) 試験方法

常温型注入目地材に関する試験方法は、共通仕様書に具体的な記載がなく、またセメントコンクリート舗装要綱、舗装試験法便覧においても、常温型注入目地材に関する試験方法の記載がないこと、目地材製造者からの聞き取り調査では、米国の連邦調達庁 (General Services Administration) において定められている常温型注入目地材に関する規格 (以下、SS-S-200E と称する) に従って常温型注入目地材の品質確認を行っているとのことから

表-15 注入目地材に関する室内試験条件

試験名	試験項目	試験条件	試験仕様
粘度試験	粘度 (Pa・s)	温度：10, 23, 40℃	SS-S-200E
不粘着時間試験	不粘着時間 (時間)	温度：10, 23, 40℃	SS-S-200E
加熱老化試験	目視による観察	混合前に温度 49℃で 21 日	SS-S-200E
自己水平性試験	A 法：水平	横断方向高低差 (cm)	温度：10, 23, 40℃
	B 法：1.5%傾斜	縦断方向高低差 (cm)	温度：10, 23, 40℃
質量変化試験	質量変化率 (%)	油温 49℃で 24, 72, 168 時間油浸	SS-S-200E
体積変化試験	体積変化率 (%)	温度 70℃で 72, 168, 240 時間	SS-S-200E
針入度試験 および弾性試験	標準条件	針入度 (mm)	温度 23℃で 24 時間
	加熱条件	復元率 (%)	硬化前：温度 49℃で 21 日間 硬化後：温度 70℃で 72, 168, 240 時間
耐候性試験	体積変化率 (%)	光照射：51 分間 散水と光照射：9 分間 全体の暴露：80, 160, 240 時間	SS-S-200E
付着試験	①低温条件	目視による観察	温度 -29℃で 4 時間
	②水浸条件		水温 23℃で 96 時間水浸
	③油浸条件		油温 49℃で 24 時間油浸後 温度 -29℃で 4 時間
耐炎性試験	目視による観察	温度 260℃で 120 秒間	SS-S-200E
流動試験	目視による観察	角度 75 度, 温度 93.3℃で 5 時間	SS-S-200E

※下線は、SS-S-200E において規定されている試験項目、試験条件を表わす。

ここでは SS-S-200E に従って試験を行った。

今回実施した目地材に関する室内試験の条件を表-15 に示す。目地材の耐久性を確認する目的から、SS-S-200E に示されている試験条件以外でも試験を実施した。以下では、SS-S-200E に従い実施した室内試験方法の詳細について述べる。

a) 粘度試験

常温型注入目地材は主剤と硬化剤を混合して用いる。常温型注入目地材は一般に粘性が高いとされており、施工では注入機械を用いられるが、これらの材料の粘性が過度に高い場合、機械施工が困難となることから、回転粘度計により主剤と硬化剤の粘度を測定した。試験温度は SS-S-200E で規定されている 23℃の他に、施工時期による性状の違いを確認するために 10℃、40℃でも試験を実施した。SS-S-200E では、23℃における主剤および硬化剤の粘度を、200Pa・s 以下と規定している。

b) 不粘着時間試験

目地材が硬化する前の目地への異物混入の防止や、早期の交通開放のためには、目地材の硬化時間が重要な

ことから、常温型注入目地材の不粘着時間を測定した。試験温度は SS-S-200E に規定されている 23℃以外に、施工時期による性状の違いを確認するために 10℃、40℃でも試験を実施した。

不粘着時間試験では、まず、主剤と硬化剤を混合した目地材を型枠に流し込んだ後に、へらで成型し、長さ 100mm、幅 38mm、厚さ 6mm の供試体を作成した。供試体を所定の試験温度に曝した後、ポリエチレンフィルムを目地材の上に敷き、その上に鋼板と 30g の分銅を 30 秒間のせた。次に、分銅と鋼板を取り除き、ポリエチレンフィルムを剥がした時に、目地材とポリエチレンフィルムが付着しなくなるまでの時間を測定した。不粘着時間に関しては、SS-S-200E では 23℃において 3 時間以内、共通仕様書では温度に関する記述はないが、同じく 3 時間以内と規定している。

c) 老化促進試験

目地材の主剤と硬化剤が混合前に長時間高温条件下に曝された場合の性状変化を確認するために、老化促進試験を実施した。目地材の主剤と硬化剤を温度 49℃で 21 日間加熱することで老化を促進させ、性状に変化がない

かを目視により確認した。SS-S-200E では、加熱後の主剤と硬化剤に対して簡単な攪拌を行っても均質な液体に戻らないような沈殿、分離、硬化の兆候が生じていないこと、厚さ 1.6mm 以上の膜が材料の表面に生成されないことを規定している。

d) 自己水平性試験

自己水平性試験では、水平な目地に目地材を注入した場合の仕上がり性を評価する A 法と、傾斜のある目地に目地材を注入した場合の仕上がり性を評価する B 法の二種類の試験を実施した。試験温度は SS-S-200E で規定されている 23℃ 以外に、10℃、40℃ でも試験を実施した。A 法、B 法ともに、長さ 305mm、幅 12.7mm、深さ 25mm の型枠を水平に置いた状態で、主剤と硬化剤を混合した目地材を流し込み、供試体を作成した。

A 法では、供試体を所定の温度で 24 時間養生した後、型枠の両端部からおよそ 76mm 離れた二点において、目地材の仕上がり面の位置を測定し、二点間の仕上がり面の高低差を算出した。

B 法では、供試体を 1.5% の勾配を持つ傾斜面に静置した状態で、所定の温度にて 24 時間養生した後、型枠の端部における目地材の仕上がり面の位置を測定し、初期状態からの仕上がり面の高低差を算出した。

SS-S-200E に定められている自己水平性の規格では、温度 23℃ の条件で、A 法における仕上がり面の高低差を 3.2mm 以下、B 法における仕上がり面の高低差を 1.6mm 以下と規定している。

e) 質量変化試験

目地材の耐油性を確認するために、油浸した目地材の質量変化率を測定した。供試体は直径 54mm、深さ 35mm の円筒型の型枠に目地材を流し込み、温度 23℃ で 24 時間養生して作成した。供試体の初期質量を計測した後、供試体を温度 49℃ の燃料油に 24、72、168 時間油浸させ、温度 49℃ のオープンの中で 1 時間乾燥させてから、油浸後の質量を測定した。質量変化率は油浸前と油浸後の質量を比較して算出した。SS-S-200E では、標準の油浸時間を 24 時間としており、この場合の質量変化率を ±2% 以内と規定している。

f) 体積変化試験

高温条件下に曝された際の目地材の体積変化を確認するために、体積変化試験を実施した。供試体は直径 38mm、深さ 36mm の円筒型の型枠に目地材を流し込み作成した。初期体積を測定した供試体を、温度 70℃ で 72、

168、240 時間加熱し、室温で 1 時間冷却させ、さらに 25℃ の水槽で 1 時間水浸した後に体積を測定した。SS-S-200E では、標準の加熱時間を 168 時間としており、この場合の体積変化率を ±5% 以内と規定している。

g) 針入度試験および弾性試験

目地材の硬さや復元性能を確認するために、目地材の針入度と復元率を測定した。SS-S-200E では、温度 23℃ において 24 時間養生した供試体に対して試験を実施するよう規定されているが、今回の室内試験では、これらの条件に加え、老化促進試験で加熱した主剤と硬化剤を混合して供試体を作成し、養生後に温度 70℃ で 72、168、240 時間加熱した供試体に対する試験も実施した。

供試体の作成に用いる主剤と硬化剤は、加熱条件で試験を行う供試体を作成する場合のみ、混合前に温度 49℃ で 21 日間加熱した主剤と硬化剤を使用した。主剤と硬化剤を混合した後、直径 70mm、深さ 48mm の円筒型の型枠に目地材を流し込み、温度 23℃ で 24 時間養生することで供試体を作成した。養生終了後に、加熱条件で試験を行う供試体については、温度 70℃ で所定の時間加熱した後に室温で冷却した。

上記の手順で作成した供試体を、25℃ の水に 1 時間水浸した後に、針入度と復元率の測定を実施した。SS-S-200E では、標準条件における目地材の針入度を 0.05 ~ 0.2cm、復元率を 75% 以上と規定している。また、共通仕様書では、試験条件は明らかでないが、目地材の復元率を 75% 以上と規定している。

h) 耐候性試験

目地材を自然環境下に近い条件に暴露した際の、供試体の体積変化率の測定および目視による性状変化観察を実施した。体積変化率の測定用供試体としては、前述した体積変化試験に使用したものと同じ寸法の供試体を、また目視観測用供試体としては、不粘着試験に使用したものと同じ寸法の供試体を作成した。次に、試験機内で供試体に 51 分間光を照射し、さらに降雨を想定して、供試体を散水と光照射の条件に 9 分間暴露した。この合計 1 時間の暴露を 1 サイクルとして、一日に最低 20 サイクル実施した。SS-S-200E では、供試体の暴露時間を合計で 160 時間とした供試体に対して体積変化率の測定および目視による観察を実施するように規定されているが、今回は、その他にも合計の暴露時間を 80、240 時間とした供試体に対する試験も実施した。なお、耐候性試験における 160 時間の暴露は、実際の自然環境下で 1 年間暴露を実施することに相当するとされている。

i) 付着試験

目地材に要求される性能の一つとして、コンクリートの膨張、収縮に追従し、コンクリートと良く付着することが求められることから、コンクリートと目地材の付着を確認するために、付着試験を実施した。

付着試験では、まず、長さ 75mm、幅 50mm、厚さ 25mm のコンクリート版を二枚作成し、75mm×50mm の面にプライマを塗布する。次に、二枚のコンクリート版を、プライマを塗布した面が向かい合うように 12.7mm 離して並べ、余分な空間を埋めるためのスペーサーをコンクリート版間に挿入し、コンクリート版とスペーサーに囲まれた長さ 50mm、幅 50mm、厚さ 12.7mm の空間に目地材を注入して養生を行うことで、コンクリート版間に目地材が注入された供試体を作成した。

供試体を室温にて 24 時間養生した後、低温条件、水浸条件、油浸条件の三種類の条件下に暴露した。低温条件では温度 -29℃ で 4 時間、水浸条件では温度 23℃ の水槽で 96 時間、供試体を暴露した。また油浸条件では 49℃ の燃料油に 24 時間浸した後、低温条件と同じ気温 -29℃ で 4 時間暴露した。各条件下において暴露された供試体を、目地材の厚さが 1.5 倍になるまで、コンクリート版を 12.7mm/s の速度で伸張し、その後、供試体を静置して目地材を元の厚さに戻すまでの過程を 1 サイクルとした。1 つの供試体につき、伸張および復元を合計 3 サイクル繰り返した後、目視により供試体に以上がないかを確認した。SS-S-200E では、3 サイクルの伸張および復元を繰り返した供試体の表面に、ひび割れや剥離が生じないことを規定している。

j) 耐炎性試験

航空機のプラストが目地材に与える影響を検討するために、耐炎性試験を行った。この試験では、接着試験の場合と同じ方法で作成した供試体をバーナーにより 260℃ で 120 秒加熱し、その後室温まで冷却した後、目視により供試体を観察した。SS-S-200E では、供試体に燃焼、硬化、流動、剥離が生じないことを規定している。

k) 流動試験

夏季の高温時における目地材の流動性を評価するために、硬化後の目地材に対して流動試験を実施した。試験では、まずガラス板の上に設置した型枠に目地材を流し込み、へらで成型を行い、長さ 60mm、幅 40mm、厚さ 3.2mm の供試体を作成し、供試体を室温にて 24 時間養生した後、型枠を取り除いた。次に、温度 93.3℃ のオーブンの中で、供試体が載せられたガラス板を供試体の

長軸が水平面と 75℃ の角度になるように傾けた状態で 5 時間暴露し、目視による供試体の確認を行った。流動性に関して、SS-S-200E では、供試体の表面にひび割れや垂れ、寸法変化のないことを規定している。

(3) 室内試験結果および考察

a) 粘度試験

混合前の主剤と硬化剤の粘度と温度の関係を図-24 に示す。ポリサルファイド系、ウレタン系とも、温度 23℃ においては SS-S-200E の規格を満たしているが、温度が低下すると粘度が高くなっており、特にウレタン系の硬化剤ではその傾向が顕著であることがわかる。一般に粘度が高くなると機械施工が困難になるといわれていることから、標準温度では粘度が低い目地材であっても、低温下での施工には注意する必要があるといえる。

b) 不粘着時間試験

硬化前の目地材の不粘着時間と温度の関係を図-25 に示す。ポリサルファイド系、ウレタン系ともに、不粘着時間は温度が低下すると長くなる傾向が確認できる。特にウレタン系目地材では、温度 23℃ では不粘着時間が 3 時間以下であるのに対し、温度 10℃ では不粘着時間が 10 時間に増大している。以上の結果から、標準温度における不粘着時間が短い目地材であっても、低温下における施工では、目地材が硬化するまでに時間がかかると考えられることから、目地材の硬化が不十分なことによる目地への異物の混入や、目地材が十分に硬化する前にコンクリート版が変形する可能性があり、目地部におけるひび割れの原因となりうる。

c) 老化促進試験

混合前に加熱した主剤と硬化剤を目視により観測した結果、材料の分離、沈殿や、材料の表面に膜が張るなどの異常は確認されなかった。加熱した主剤と硬化剤を混合して作成した目地材の性状については、後述する針入度試験および弾性試験の試験結果で述べる。

d) 自己水平性試験

図-26 に目地材の仕上がり高さや温度の関係を示す。水平な目地における施工を想定した A 法の場合、温度が低いほど、目地材の仕上がり面に高低差が大きくなっている。これは、前述の通り、低温下では目地材の粘度が高いことから、自己水平性が低くなったものと考えられる。しかしながら、ポリサルファイド系、ウレタン系ともに

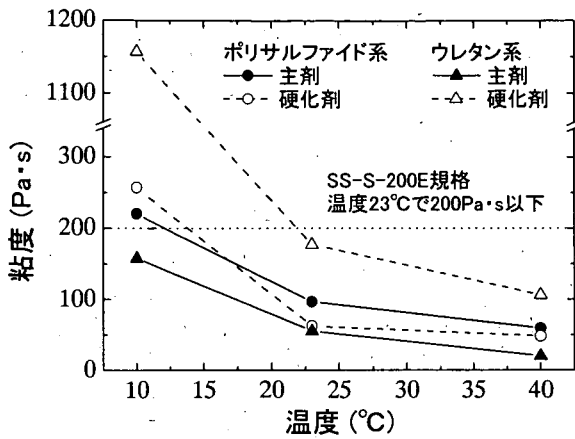


図-24 粘度と温度の関係

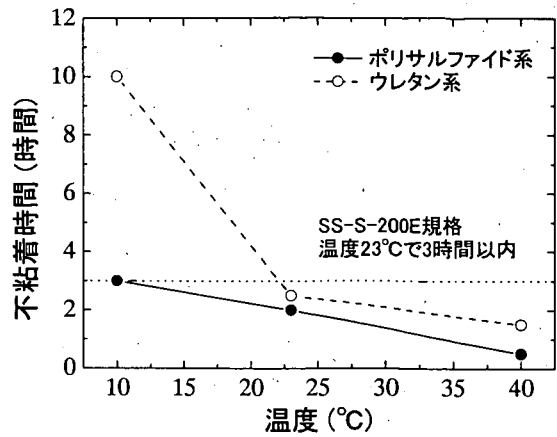
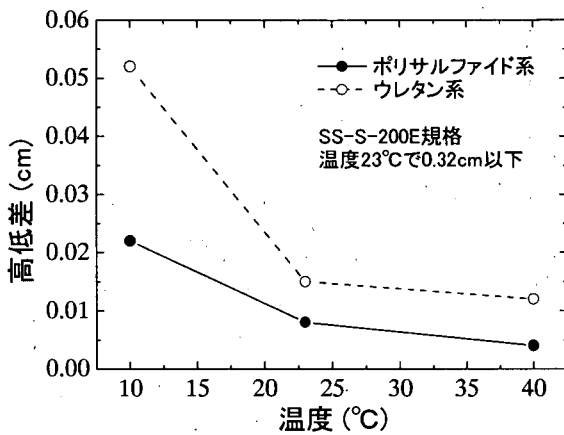
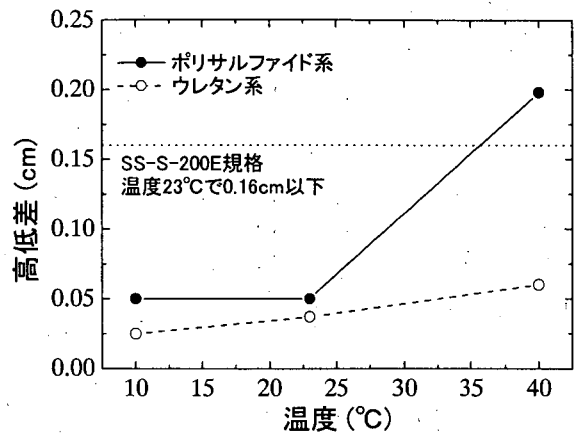


図-25 不粘着時間と温度の関係



(a) A 法



(b) B 法

図-26 仕上り高低差と温度の関係

SS-S-200E で示されている規格を温度に関わらず満たしていること、一般的な目地材の注入深さ (2cm もしくは版厚の 1/4~1/6) と比較すると、室内試験で確認された仕上り高低差は小さいことから、問題ない程度と考えられる。

一方、傾斜した目地における施工を想定した B 法の場合、高温下で目地材の粘度が低い場合は流動性が大きくなり、仕上がり面に生じる高低差が大きくなっていることがわかる。特にポリサルファイド系の場合は、40°Cにおける仕上がり面の高低差が著しく大きくなっており、標準状態における規格値は満たしているものの、高温下における施工では、注入後の目地材が硬化前に流動し、目地材が過度に厚くなり目地からはみ出したり、逆に目地材の厚さが不足する箇所が生じるなどの問題が懸念されることから、施工温度には十分に注意する必要がある。

e) 質量変化試験

図-27 に質量変化試験の結果を示す。油浸時間の増加とともに、ポリサルファイド系目地材では質量減少、ウレタン系目地材では質量増加の傾向を示している。また、今回の試験ではウレタン系目地材の質量変化率の方が大きい結果となった。SS-S-200E の規格では、油浸 24 時間における質量変化率を±2%以内と定めており、この規格と比較すると、両者とも油浸 24 時間の時点では規格を満足するものの、油浸時間の増加に伴い質量変化率は大きくなる傾向にあり、油浸時間が 168 時間になると規格値以上の質量変化が生じていることがわかる。以上の結果から、エプロン舗装における航空機燃料の給油作業等に伴い、燃料油が舗装表面にこぼれるような事が想定される箇所については、燃料油漏れの規模を想定した規格化が必要であると考えられる。

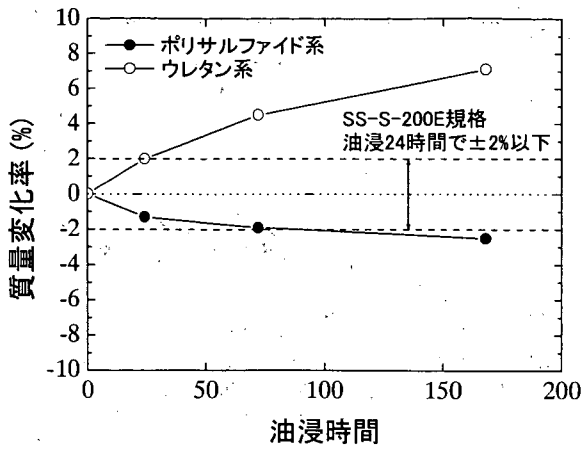


図-27 油浸時間と質量変化率の関係

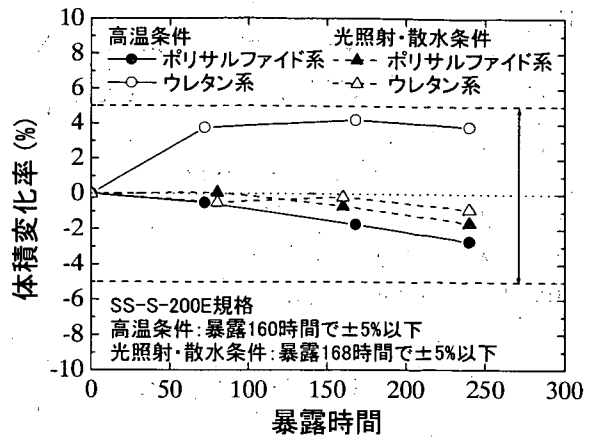


図-28 暴露時間と体積変化率の関係

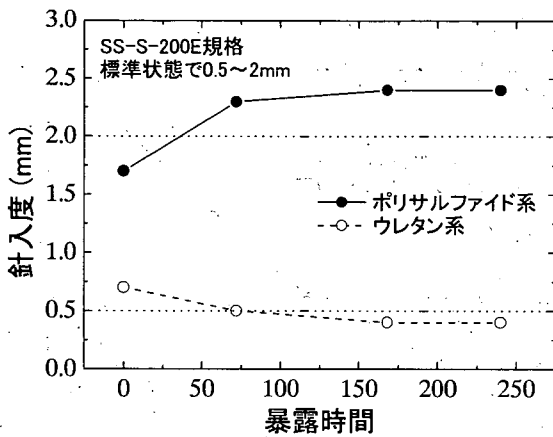


図-29 暴露時間と針入度の関係

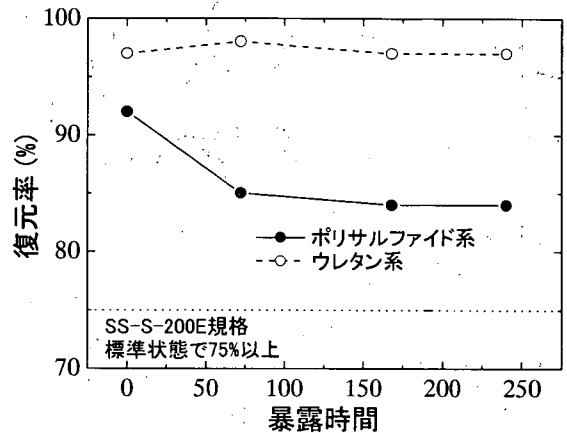


図-30 暴露時間と復元率の関係

f) 体積変化試験, 耐候性試験

体積変化試験, 耐候性試験において測定した目地材の体積変化率を図-28に示す。高温条件下において実施した体積変化試験では, ポリサルファイド系目地材の体積は増加, ウレタン系目地材の体積は減少し, 今回の試験ではポリサルファイド系目地材の方が体積変化率が大きかった。また, 自然環境に近い条件において実施した耐候性試験では, 両者とも体積が減少する傾向を示しているが, 高温条件の場合よりも体積変化は小さくなっている。SS-S-200Eに示されている規格では, 高温条件の場合は暴露168時間において, 光照射と散水条件の場合は暴露160時間において, それぞれ許容される体積変化率が $\pm 5\%$ 以内と定められているが, 今回の試験結果では, 暴露時間が規定時間以上であっても, この規格を満足している。

しかしながら, 高温条件下のウレタン系目地材では暴露時間が短いにも関わらず急激に体積が増加したり, 高

温条件下のポリサルファイド系目地材や光照射・散水条件下の両目地材では暴露時間の増加に伴う体積減少が収束する傾向は確認できない。目地材の体積が大きく変化した場合には, 体積膨張により目地からはみ出した目地材が元に戻らずに剥離したり, 体積収縮により目地材とコンクリートとの付着が切断され, 雨水や異物の目地への浸入に繋がる恐れがある。目地材が自然環境下で長期間にわたり性能を維持するためには, 長期間供用された場合でも, 体積変化の小さい材料であることが望ましいといえる。

g) 針入度試験および弾性試験

図-29に標準状態および加熱後における目地材の針入度を示す。ポリサルファイド系目地材, ウレタン系目地材ともに, 標準状態ではSS-S-200Eの規格を満足する結果となっている。しかしながら, 加熱処理を施した目地材では, 標準状態における試験結果と比較すると, ポリ

サルファイド系目地材では針入度が増加、ウレタン系では針入度が減少しており、SS-S-200Eで規定されている規格を満足しない結果となった。しかしながら、両目地材とも加熱時間が240時間に達すると針入度の増加および減少が収束する傾向にあることが確認できる。

図-30に標準状態および加熱後における目地材の復元率を示す。ウレタン系目地材では加熱した場合でも、標準状態における復元率と大差がないのに対し、ポリサルファイド系目地材では、標準状態において90%以上あった復元率が、加熱処理により72時間暴露した時点で85%程度まで低下していることがわかる。しかしながら、暴露時間が増加した場合の復元率は収束する傾向にあり、加熱時間を増加しても復元率はこれ以上低下していないようである。

以上の試験結果から、目地材が高温条件下に曝された場合、ポリサルファイド系の目地材は軟化し、復元性能が低下するのに対し、ウレタン系の目地材は硬化するものの、復元性能には大きな変化がないことが明らかとなった。

h) 付着試験

付着試験では、供試体を低温条件、水浸条件、油浸条件の三種類の条件下に暴露した後、目地材を伸張および復元させ、目視による供試体の確認を実施したが、目地材にはひび割れが生じることもなく、またコンクリート版との剥離なども生じていなかったことから、今回試験を行った暴露条件においては、コンクリートと目地材の付着性能の低下は確認されなかった。

しかしながら、目地材とコンクリートとの付着性は、目地材に求められる性能の中でも非常に重要であること、この試験では目地材に対して3サイクルの伸縮を繰り返すだけであることなどから、実際のコンクリート舗装の目地の挙動を勘案した条件において、付着性が定量的に評価できる試験方法が必要であると考えられる。

i) 耐炎性試験、流動性試験

硬化後の目地材に対して実施した流動性試験では、目視による観察では供試体のひび割れ、目地材の流動、寸法変化等の異常は確認されなかった。また、耐炎性試験でも、目視による観察では目地材の燃焼、硬化、流動、剥離等の異常は確認されなかった。以上のことから、今回試験に供した目地材では、夏季温度条件における流動、航空機のプラスト等に曝されることによる燃焼などの問題は無いものと考えられる。

(4) 目地材に関する室内試験結果のまとめ

二種類の常温型注入目地材に対して実施した室内試験結果をまとめると以下の通りである。

- ① 目地材の粘度、不粘着時間、自己水平性に関しては、SS-S-200Eで定められている標準温度において規格値を満たしている場合でも、温度条件により大きく変動することが明らかになった。このことから、これらの項目に対して、目地材を施工する際の温度範囲を考慮した規格化が必要であると考えられる。
- ② 硬化した後の目地材の硬さ、復元性能に関しては、標準温度条件ではSS-S-200Eの規格を満足するものの、高温条件下に曝されると性能は大きく低下することがわかった。このことから、コンクリート舗装が曝される温度条件を考慮し、高温条件下に一定時間曝された場合の目地材の針入度、復元率に関しても規格化を行う必要があると考えられる。
- ③ 種々の環境下に曝した供試体で測定した目地材の質量変化率、体積変化率は、SS-S-200Eの規格値を満足するものの、暴露時間の増大とともに質量変化率および体積変化率が增大する傾向にあることから、コンクリート舗装が実際に曝される環境を考慮して、規格化を行う必要があると考えられる。
- ④ 目地材の付着性、流動性、耐炎性に関しては、目視による観察では特に異常は見当たらなかった。コンクリートと目地材の付着性は、目地材に求められる性能の中で最も重要なものの一つであると考えられるが、共通仕様書に記載されている引張強さの項目は試験方法が明確ではない。SS-S-200Eに記載されている試験法では、目視による観測による確認が規定されているが、付着性を定量的に評価できる試験方法が必要であると考えられる。

3.2 目地板に関する室内試験

(1) 使用材料

目地板に関する室内試験では、これまでに我が国の空港で使用実績のある非瀝青系のゴム発泡体系目地板および樹脂発泡体系目地板を使用した。空港での仕様実績がない瀝青系目地板、および空港での使用実績の少ない木材系目地板は使用しなかった。

(2) 試験方法

目地板に関する試験方法は、舗装試験法便覧に記載されている方法に従った。表-16に室内試験条件を示す。目地板の基本的な性能を把握する目的から、標準状態に

表-16 目地板に関する室内試験条件

	試験項目	試験条件	試験仕様
吸水試験	吸水率 (%)	温度 60℃で 24 時間乾燥後 温度 23℃で 24 時間水浸	舗装試験法便覧
圧縮および復元試験	1/2 圧縮応力度 (MPa) 復元率 (%)	温度：23℃，圧縮速度：0.01mm/sec 繰返し圧縮回数：3 回	舗装試験法便覧
はみ出し試験	はみ出し量 (mm)	温度：23℃，圧縮速度：0.01mm/sec	舗装試験法便覧
繰返し圧縮 および復元試験	1/2 圧縮応力度 (MPa) 復元率 (%)	温度：23℃，圧縮速度：5mm/min 繰返し圧縮回数：30，60，90 回	
加熱老化試験	1/2 圧縮応力度 (MPa) 復元率 (%)	温度 70℃で 96 時間加熱	
耐候性試験	寸法変化率 (%)	光照射：51 分間 散水と光照射：9 分間 全体の暴露：80，160，240 時間	目地材の米国規格 (SS-S-200E)

※下線は舗装試験法便覧において規定されている試験項目，試験条件を表わす。

おける吸水率，1/2 圧縮応力度，復元率，はみ出し量の各項目を計測した。さらに，目地板の耐久性を確認する目的から，目地板に繰返し圧縮，加熱老化，光照射および散水の各条件下に曝した際の 1/2 圧縮応力度，復元率，寸法変化率の計測を行った。以下ではそれぞれの試験方法について詳細を述べる。

a) 吸水試験

目地板が長時間水浸した場合の目地板の吸水率を，舗装試験法便覧に示されている目地板の試験方法に従って測定した。供試体には，幅 100mm，長さ 100mm，厚さ 25mm に成形した目地板を使用した。供試体を 60℃の恒温槽で 24 時間乾燥させた後，室温で冷却した後に初期質量を測定した。次に供試体を温度 23℃の水槽に 24 時間浸し，表面水をふき取った後の供試体の質量を測定し，水浸前後の質量変化から吸水率を算出した。

b) 圧縮及び復元試験，はみ出し試験

目地板が圧縮を受けた場合に目地板に生じる応力と，圧縮を受けた後の目地板の復元性能を確認するために，舗装試験法便覧に示されている目地板の試験方法に従って，圧縮および復元試験を実施した。供試体には吸水試験に用いたものと同寸法に成形した目地板を使用した。供試体が有する六断面のうち 100mm×25mm の一断面のみが自由に変形できるように製作された治具に供試体を置き，0.01mm/sec の速度で，目地板の厚さが半分になるまで圧縮を三回繰り返した。その後，目地板が半分の厚さになるまで圧縮したときの荷重値を読み取り，それを目地板の面積で除したものを 1/2 圧縮応力度とした。また，その際に治具からはみ出した目地板の長さをはみ出

し量として測定した。復元率の測定は，上記の手順で試験を実施した後に，目地板を復元させるために 1 時間放置した後の供試体の厚さを測定し，初期厚さと比較することで復元率を算出した。試験は 23℃の室内において実施した。

c) 繰返し圧縮および復元試験

自然環境下においては，年温度変化，日温度変化に起因するコンクリート版の膨張・収縮により，目地部に挿入された目地板は圧縮と復元を繰り返すことから，圧縮及び復元試験と同様の手法で，5mm/min の圧縮速度で所定の回数の圧縮を繰返し実施した目地板に対して，圧縮および復元試験を実施した。繰返し回数は 30，60，90 回の三条件とし，所定の回数の圧縮および復元が終了した時点で，1/2 圧縮応力度と復元率を計測した。試験は 23℃の室内で実施した。

d) 加熱老化試験

一定時間加熱した目地板に対して，圧縮および復元試験を行うことで，目地板の 1/2 圧縮応力度および復元率に対する加熱による劣化の影響を検討した。試験前に供試体を 70℃で 96 時間加熱し，室温で冷却した後に圧縮および復元試験を実施し，1/2 圧縮応力度および復元率を計測した。圧縮速度は 0.01mm/sec として実施した。

e) 耐候性試験

目地板を自然環境下に近い条件に暴露した際の，供試体の寸法変化率を測定した。試験方法は目地材に関する米国規格 (SS-S-200E) における耐候性試験方法に準じて実

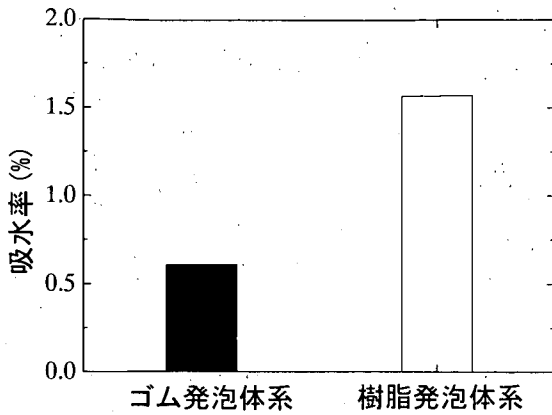


図-31 目地板の吸水率

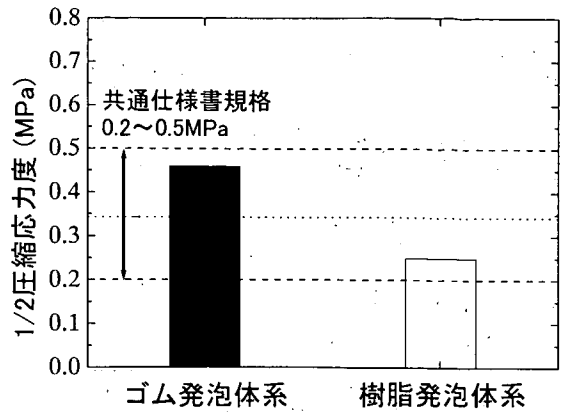


図-32 目地板の 1/2 圧縮応力度

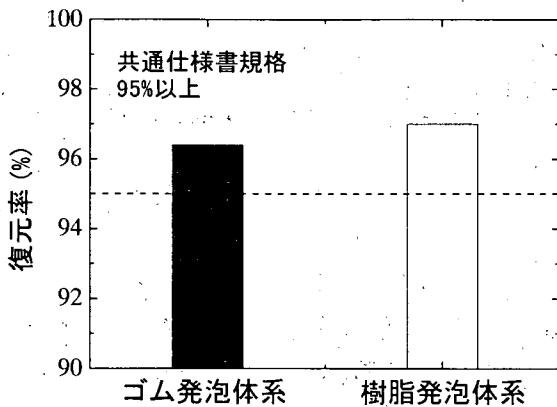


図-33 目地板の復元率

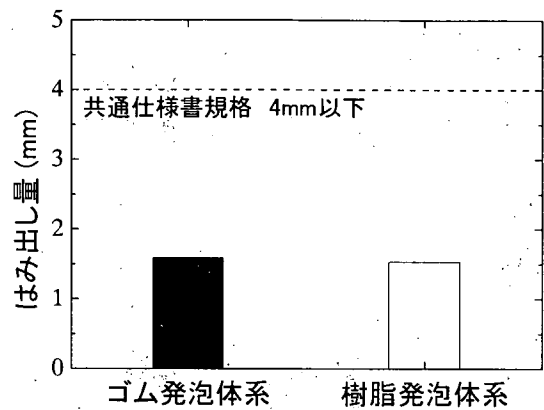


図-34 目地板のはみ出し量

施した。まず、供試体の初期寸法を測定した後に、供試体に51分間光を照射した。さらに降雨を想定して、散水と光照射の条件に9分間曝した。この60分間の暴露を1サイクルとして、一日に最低20サイクルを繰り返した。全体の暴露が80, 160, 240時間に達した供試体に対して、供試体寸法を測定し、暴露前と暴露後の供試体寸法を比較することで、寸法変化率を算出した。

(3) 室内試験結果および考察

a) 吸水試験

図-31に試験に使用した二種類の目地板の吸水率を示す。共通仕様書、舗装試験法便覧では吸水率に関する規格は示されていないが、ASTMでは瀝青系目地板の吸水率が15%未満と規定されていること、舗装試験法便覧では、吸水率が50%を超える場合は、圧縮および復元試験を行う際に、水浸した供試体を使用して試験を行うことと規定されていることを考えると、ゴム発泡体系目地板、樹脂発泡体系目地板ともに吸水率は非常に小さいと言え

る。これらの結果から、両者とも水浸することによる性能の劣化は考えにくく、寒冷地においても凍結融解が発生しにくい材料であると推測される。

b) 圧縮および復元試験、はみ出し試験

圧縮および復元試験により測定した目地板の1/2圧縮応力度を図-32に、目地板の復元率を図-33に示す。1/2圧縮応力度はゴム発泡体系目地板のほうが樹脂発泡体系目地板よりも若干大きな値となったが、両者とも共通仕様書で定められている規格(0.2~0.5MPa)を満たしていることがわかる。また、復元率は、目地板の材質が異なった場合でも大差がなく、共通仕様書で定められている規格(95%以上)を満足する結果となった。

図-34に、供試体の厚さが半分になるまで圧縮した際のはみ出し量を示す。目地板のはみ出し量は、目地板の材質が異なった場合でも大差はなく、共通仕様書で定められている規格における上限値(4mm)の半分以下であり、規格を十分に満足していることがわかる。

以上の試験結果から、今回試験に用いた目地板の、標

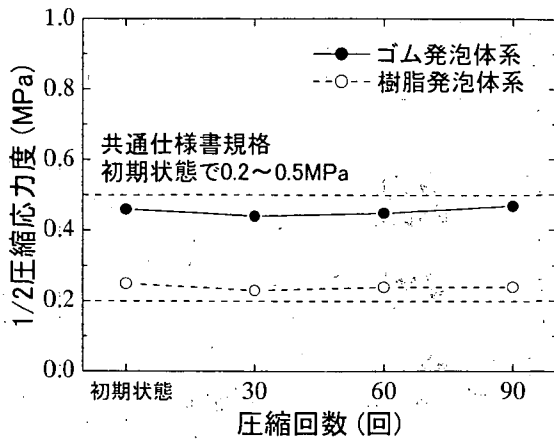


図-35 圧縮回数と 1/2 圧縮応力度の関係

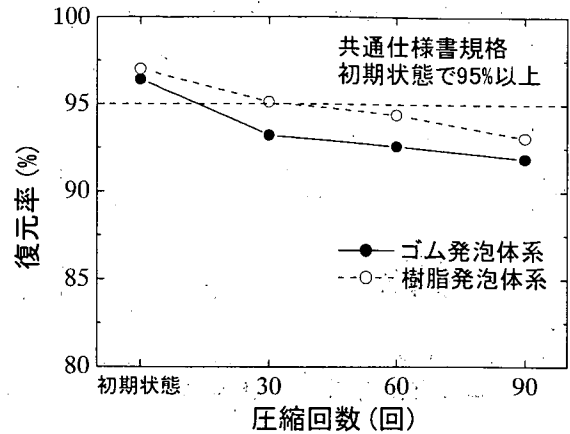


図-36 圧縮回数と復元率の関係

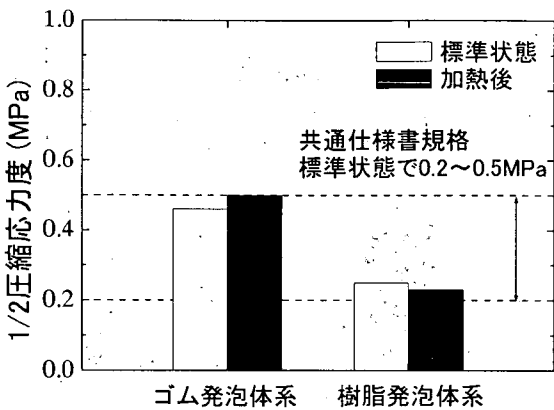


図-37 加熱前後における目地板の 1/2 圧縮応力度

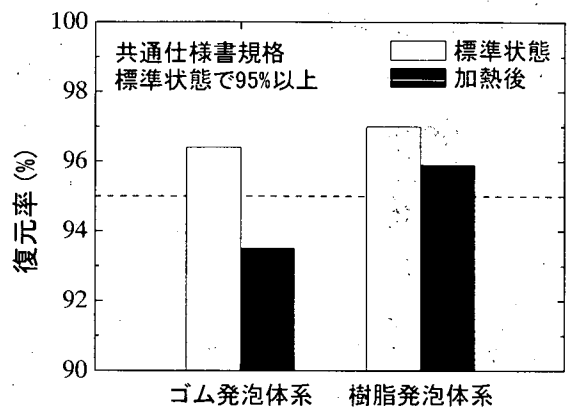


図-38 加熱前後における目地板の復元率

準状態における 1/2 圧縮応力度、復元率、はみ出し量は、目地板の材質による差はほとんどなく、また共通仕様書で定められている規格を満足するものであることが確認された。

c) 繰返し圧縮および復元試験

繰返し圧縮および復元試験において計測した目地板の 1/2 圧縮応力度を図-35 に、復元率を図-36 に示す。前述した初期状態における試験結果も併せて示している。目地板の 1/2 圧縮応力度は、繰返し圧縮を目地板に与えても大きく変化しておらず、圧縮回数に関わらず、共通仕様書で示されている初期状態における規格を満足していることがわかる。

一方、目地板の復元率は、ゴム発泡体系目地板および樹脂発泡体系目地板ともに繰返し圧縮を 30 回与えた時点で共通仕様書の規格を下回り、さらに圧縮回数の増加とともに復元率は低下する傾向にあること、復元率の低下は収束する傾向が見られないことが明らかになった。

以上の結果から、目地板が繰返し圧縮に曝されることによる影響は、目地板の 1/2 圧縮応力度に対しては非常に小さいと考えられるが、目地板の復元率に対しては大きいようである。以上の試験結果から、現行の規格では標準状態における規格値しか示されていないが、長期の供用を想定して、繰返し圧縮を受けた目地板に対する規格が必要になると考えられる。

d) 加熱老化試験

目地板を長時間加熱した後に実施した圧縮および復元試験による 1/2 圧縮応力度を図-37 に、復元率を図-38 に示す。

標準状態における試験結果と比較すると、加熱処理を施した目地板の 1/2 圧縮応力度は、ゴム発泡体系目地板では若干大きくなり、樹脂発泡体系目地板では若干小さくなる傾向が確認できるが、どちらの目地板でも標準状態における試験結果と大差はなく、加熱後の目地板でも共通仕様書の規格を満足していることから、目地板は高

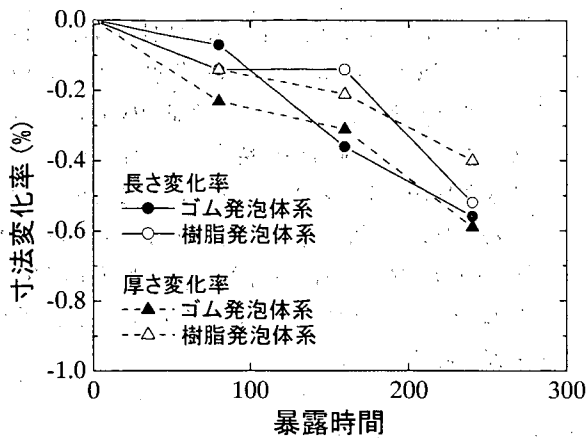


図-39 耐候性試験における目地板の寸法変化率

温度下に曝された場合でも、硬化する傾向は小さいと言える。

一方、加熱処理を施した目地板の復元率は、標準状態における試験結果と比較すると、目地板の材質に関わらず復元率が低下する傾向が確認された。特にゴム発泡体系目地板では、標準状態では共通仕様書で示されている規格を満足しているものの、加熱後では規格を下回る結果となっている。

以上の試験結果から、目地板が高温度下に曝されることによる影響は、目地板の 1/2 圧縮応力度に対しては小さいと考えられるが、目地板の復元率に対しては大きいようである。実際のコンクリート舗装では、夏季には温度が高くなり、またコンクリート版の日温度変化量も大きくなることから、目地板は高温度下においてコンクリート版の大きな伸縮変形に曝される事になることが想定される。共通仕様書の現行の規格では、標準状態における性能しか規定されていないことから、高温度下に曝された条件を考慮した規格化が必要と考えられる。

e) 耐候性試験

耐候性試験において測定した目地板の寸法変化率を図-39 に示す。耐候性試験での 160 時間の曝露が自然環境下での 1 年の曝露に相当することを考えると、1 年後でも最大 0.4% と非常に小さな寸法変化であること、膨張目地では目地板の上部には目地材が施工されているために、目地材が正常に機能していれば、目地板は常に日射と雨水に曝される環境にはないことを考えると、自然環境下における実際の目地板の寸法変化は小さいと推測される。しかしながら、目地板の収縮量は曝露時間の増加に伴い増大する傾向が確認されることから、実際に目地板が曝される環境を考慮した条件で試験を行うことが必

要であると考えられる。

(4) 目地板に関する室内試験結果のまとめ

二種類の目地板に対して実施した室内試験結果をまとめると以下の通りである。

- ① 目地板が繰返し圧縮を受けることで、目地板の 1/2 圧縮応力度は大きく変化しないが、復元率は早期に低下する場合がある。目地板は施工直後からコンクリート版の繰返し変形に曝される事から、初期状態の性能だけではなく、繰返し圧縮に曝された状態での目地板に関する規格も必要であると考えられる。
- ② 目地板が高温度下に曝される事で、目地板の 1/2 圧縮応力度は大きく変化しないが、復元率は低下することがわかった。夏季には目地板が高温度下において大きな変形に曝される事ことから、初期状態のみならず、高温度下に曝された後の目地板に関する規格が必要であると考えられる。
- ③ 自然環境を想定した環境に曝した目地板は、材質に関わらず収縮するが、その収縮量は非常に小さいことが明らかとなった。しかしながら、目地板の収縮量は曝露時間の増加に伴い増大する傾向があることから、実際に目地板が曝される環境を考慮した条件で試験を行うことが必要であると考えられる。

3.3 まとめ

目地材料に関する室内試験結果をまとめると、以下の通りである。

- ① 硬化する前の常温型注入目地材は、温度により性質が大きく変化することから、温度が目地材の施工性に与える影響は大きいと考えられる。共通仕様書で定められている不粘着時間に関しては、温度の影響を考慮して性能を規定する必要がある。また、共通仕様書には記載がない目地材の粘度、自己水平性に関しても、温度による影響を考慮した規格化が必要であると考えられる。
- ② 硬化した後の常温型注入目地材の性能に関しては、高温条件下に曝されることにより、目地材の針入度、復元率が大きく変化することが明らかとなった。高温条件下ではコンクリート版に大きな変形が生じ、目地材が大きく圧縮されることが想定されることから、温度を考慮して性能を規定する必要がある。
- ③ 自然環境を想定した条件や油浸条件に曝された目地材は、曝露時間の増加に伴い、体積変化、質量変化が大きくなる傾向が明らかとなった。共通仕様書においては、これらの条件下における性能が規定され

ていないことから、実際の目地における環境を考慮した規格化が必要であると考えられる。

- ④ コンクリートと目地材の付着性は、目地に求められる性能の中でも特に重要であると考えられることから、実際のコンクリート舗装の目地の挙動を考慮し、定量的に評価ができる試験方法が必要であると考えられる。
- ⑤ 目地材の性能は繰返し圧縮を受けることで、目地材の復元率は早期に低下する恐れがあることが明らかとなった。目地材は施工直後からコンクリート版の繰返し変形に曝される事から、初期状態の性能だけではなく、繰返し伸縮の影響を考慮した目地材の規格が必要であると考えられる。
- ⑥ 目地材は高温下に長時間曝される事で、目地材の復元率は大きく低下することが明らかとなった。夏季には目地材が高温下において大きな変形に曝される事から、初期状態のみならず、温度を考慮した性能を規定する必要がある。
- ⑦ 自然環境を想定した環境に曝した目地材は、材質に関わらず収縮するが、その収縮量は非常に小さいことが明らかとなった。しかしながら、目地材の収縮量は暴露時間の増加に伴い増大する傾向があることから、実際に目地材が曝される環境を考慮した条件で試験を行うことが必要であると考えられる。

4. 結論

空港コンクリート舗装の目地の合理化を目的として、目地間隔および目地材料の規格に関して検討した結果、以下のようにまとめられる。

① 目地間隔に関する検討

試験舗装における長期の観測結果から、目地間隔を現行における最大目地間隔の7.5mから8.5mへ広げた場合でも、自然環境下においてコンクリート版に発生する応力に大差はないことが明らかとなった。航空機荷重を考慮した有限要素法による解析では、目地間隔を8.5mに広げた場合でも、コンクリート版に生じる応力は増加しないことから、版厚設計に関しても現行の方法を踏襲できると考えられる。また、試験舗装で観測されたコンクリート版の温度分布を用いて、8.5m以上の目地間隔を有するコンクリート版の有限要素法による解析を実施したが、コンクリート版にはEisenmannが提案している限界スラブ長の場合の変形が確認でき、応力が増加することから、許容される最大目地間隔は8.5m程度と考えられる。

② 目地材料に関する検討

目地材料に関する室内試験から、目地材料の性能は、温度条件、環境条件、繰返し圧縮の影響により大きく変化することが明らかとなった。共通仕様書における現行の規格では、目地材料が標準的な条件にある場合に限定した性能に関するものが主であることから、長期間にわたり目地材料の機能を維持するためには、コンクリート舗装の目地に使用される目地材料が曝される環境を考慮した試験方法および規格が必要であると考えられる。

目地材料の規格を再検討する際には、以下の点を考慮する必要があると考えられる。

目地材に関しては、共通仕様書に試験方法が記載されていないことから、SS-S-200Eで定められている試験方法が参考になると考えられる。しかし、共通仕様書で規定されている規格のうち、目地材の比重は性能には直接影響しないと考えられることから、水浸した場合を考慮して、水の比重よりも大きい比重であれば問題ないものと考えられる。

目地材の施工性に関しては、共通仕様書に記載されている不粘着時間以外にも、目地材の粘度や自己水平性などが施工性を表わす指標として有効であると考えられるが、これらの指標に対しては、温度の影響が大きいことから、SS-S-200Eにおいて規定されている標準温度条件以外にも、施工温度条件を考慮してこれらの規格を規定する必要がある。また、共通仕様書で規定されている規格のうち、硬化時間に関しては、その定義や試験方法が明確でないことから、共通仕様書ならびにSS-S-200Eで規定されている不粘着時間により施工性を評価すればよいと考えられる。

硬化した後の目地材の性能に関しては、目地材の針入度、復元率、耐候性、耐炎性、耐油性、目地材とコンクリートの付着性が重要であると考えられる。目地材の針入度や復元率は温度による変化が大きいことが室内試験で明らかになったが、耐候性試験による自然環境を想定した条件下や油浸条件下に暴露した後の目地材の針入度、復元率の規定も必要であると考えられる。目地材とコンクリートの付着性については、SS-S-200Eの付着試験で繰返し伸縮を受けた目地材の目視による観察が規定されているが、定量的に評価できる試験方法が必要であると考えられる。共通仕様書には引張強さの規格があるが、試験方法が明らかでないため、SS-S-200Eにおける付着試験方法を参考に、試験方法および規格を新たに規定する必要があると考えられる。

目地板に関しては、共通仕様書において圧縮応力度、復元率、はみ出し量についての規格が記載されている。これらの試験方法では、目地板を初期厚さの半分になるまで圧縮する条件で試験を行っているが、実際の空港コンクリート舗装では、施工時に目地幅が25mmであった膨張目地が、初期目地幅の半分以下である11mm程度まで圧縮した事例¹¹⁾も報告されていることから、実際のコンクリート舗装の目地の挙動を考慮して、試験における圧縮量を考える必要がある。

また、今回の試験結果から、繰返し圧縮、高温下における暴露、自然環境を想定した条件下における暴露が、目地板の性能に影響することが明らかになったことから、これらの条件下に曝した後の目地板の圧縮応力度、復元率、はみ出し量についても考慮する必要があると考えられる。さらに、目地材とコンクリート版が剥離した場合には、目地材の下に挿入されている目地板が燃料油に曝される可能性があることから、目地板の耐油性についても考慮する必要がある。

5. おわりに

本研究では、空港コンクリート舗装の合理化を目的として、コンクリート舗装の目地間隔、目地に使用される目地材料の規格に関して検討した。

コンクリート舗装の目地間隔について、今回実施した試験舗装の製作、自然環境下におけるコンクリート試験舗装の挙動観測、航空機荷重を想定した三次元有限要素法による解析から、目地間隔を8.5mまで広げた場合でも、現行における最大目地間隔である7.5mの場合と比較して、コンクリート版に生じる応力には大差がないことを示した。しかしながら、気象条件、使用するコンクリート材料の種類や養生方法によっては、コンクリート版に過大な拘束応力が発生する事などの可能性があることから、施工条件、供用条件を考慮して目地間隔を決定する必要がある。

なお、参考として、縦方向および横方向目地間隔として8.5mを採用した場合の試算では、従来の目地間隔である7.5mを採用した場合と比較して、同一面積における目地の総延長が11%程度削減できるという結果となった。このことから、目地間隔を広げることでコンクリート舗装の構造的な弱点である目地を減らすことが可能であり、施工費用、維持補修費の削減が期待できる。

目地材料に関する検討では、目地材料の性能が温度条

件、環境条件、繰返し圧縮等の影響により大きく変化することが明らかとなった。今回検討した結果から、目地材料の現行の規格を再検討する際には、実際のコンクリート舗装が曝される条件を考慮した試験方法および規格が必要であると考えられる。

最後に、自然環境下におけるコンクリート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。

(2003年9月1日受付)

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，1999年。
- 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，1995年。
- 3) 運輸省航空局：空港土木工事共通仕様書，財団法人港湾空港建設技術サービスセンター，1999年。
- 4) 社団法人日本道路協会：舗装試験法便覧，pp.815-819，1988年。
- 5) General Services Administration, U.S.A : Federal Specification SS-S-200E Amendment 2 - Sealants, Joint, Two-Component, Jet-Blast-Resistant, Cold-Applied, for Portland Cement Concrete Pavement, 1993.
- 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，社団法人土木学会，p.134，1996年。
- 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，土木学会論文集第111号，pp.16-47，1964年。
- 8) 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，土木学会舗装工学論文集第6巻，pp.176-185，2001年。
- 9) 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.
- 10) Ytterberg, R.F. : Shrinkage and Curling of Slabs on Grade, *Concrete International*, 1987.
- 11) 深沢勝一，野上富治，當真正典，浜昌志：空港舗装における無筋コンクリートの温度応力挙動について（その1），土木学会第54回年次学術講演会講演概要集，第V部，pp.228-229，1999年。