

## 1. はじめに

空港におけるコンクリート舗装工事の現行の養生方法では、初期養生として希釈した養生剤を舗装表面に塗布し、養生剤が乾燥した後、後期養生として養生マットでコンクリート版表面を覆い、養生マット上に散水を行うことで、所定の期間、コンクリート表面を湿潤状態に保つ散水養生が一般的に行われている。しかし、工事区域周辺を通行する航空機のプラストにより散水マットが飛散して航空機の運行上の支障になったり、普通セメントを用いた場合には、打設後14日間は散水が必要になるなど、作業量・工事費用の点から改善が望まれるところである。

本研究では、従来の初期養生よりも高濃度の被膜養生剤を、打設後のコンクリート舗装表面に塗布することによる、初期・後期一貫養生の空港舗装への適用性を検討した。まず、室内試験によりコンクリートの収縮特性、曲げ強度およびセメントモルタルからの水分損失量を計測し、一貫養生と散水養生の比較を行った。次に、屋外においてコンクリート試験舗装を製作し、一貫養生と散水養生を施した区画において、コンクリート版内のひずみと温度の計測、FWDによるたわみ測定や切取供試体による強度確認試験を行い、一貫養生を適用した場合の自然環境下におけるコンクリート版の変形特性、強度特性について検討した。

## 2. 検討項目

本研究では、空港コンクリート舗装への被膜養生剤による一貫養生の適用性を考える上で、特に重要となる以下の項目について検討した。

### ①短期的・長期的なコンクリートの収縮量

散水養生の場合には、舗装表面に散水マットを敷いて散水を行うことから、養生中は舗装表面が常に湿潤状態に保たれている。しかしながら散水を行わずに被膜養生剤のみを使用した一貫養生の場合には、水分の人為的な供給が無いことにより、舗装表面が乾燥して初期ひび割れが発生し、舗装の使用性および耐久性の低下につながる懸念される<sup>1)</sup>。また、初期の湿潤状態、乾燥開始材齢が長期的な収縮量にも影響を与えることから<sup>2)</sup>、舗装の長期的な耐久性を検討する上では、一貫養生を施した場合の長期的な収縮ひずみの発生量を検討することが必要となる。

そこで、室内にてコンクリート供試体の養生方法を種々に変えて、打設後翌日からの収縮ひずみを観測した。

また、屋外で製作したコンクリート試験舗装において、埋設した熱電対とひずみ計により自然環境下での長期にわたるコンクリート内部の温度とひずみを計測することで、短期的および長期的なコンクリートの収縮量の検証を行った。

### ②曲げ強度

被膜養生剤による一貫養生の場合には、被膜養生剤を塗布することにより、舗装表面への散水を行わないため、初期のコンクリート硬化反応に必要な水分が供給されず、強度の発現に時間を要すること、また長期的に見ても目標強度が達成できないことが考えられる。そこで室内においてコンクリート供試体を作成し、材齢7日、28日、91日における曲げ強度を測定することにより、この点に関する検討を行った。また、試験舗装においても、FWDによるたわみ測定、切取供試体による強度試験により、被膜養生剤を用いた一貫養生の場合でも、所定の強度が得られているかを検討した。

### ③短期的・長期的な温度変化に起因するコンクリート版の拘束応力

散水養生の場合には、養生期間中は散水マットにより舗装表面を覆って散水を行うのが一般的であるが、散水マットは舗装表面を湿潤状態に保つだけでなく、急激な温度変化をできるだけ少なくし、初期ひび割れを防ぐ効果もある。しかしながら被膜養生剤による一貫養生の場合は、散水マットによる被覆を行わず、被膜養生剤を塗布するだけで散水をしないことから、日射や外気温の変化により舗装表面や舗装内部の温度が大きく変動し、材齢初期に版内に過大な応力が生じることが懸念される。

そこで屋外に製作した試験舗装に埋設した温度計、ひずみ計による長期観測を通して、版内の温度変化に起因するコンクリート版の変形が拘束されることで発生する拘束応力について検討した。

## 3. 室内試験

室内試験については、上記の検討項目を明らかにするために実施した試験方法、使用材料について記してから、その結果についてまとめる。

### 3.1 室内試験使用材料および試験方法

#### (1) 使用材料

収縮試験、曲げ強度試験用のコンクリート供試体作成に使用した材料は、粗骨材に栃木県産砕石を使用し、粒径40mm～20mm、20mm～13mm、13mm～5mmをそれぞれ

表-1 配合基準値

設計基準曲げ強度 (N/mm <sup>2</sup> )	最大粗骨材寸法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)
5.0	40	2.5±1.0	4.0±1.0

表-2 コンクリート配合

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				混和剤	
			水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤	空気量調整剤*
47.4	34.5	4.0	135	285	664	1285	0.25%	9A

※1A=C×0.001%(kg)

表-3 室内試験コンクリート性状

28日配合曲げ強度 (N/mm <sup>2</sup> )	スランブ (cm)	空気量 (%)
6.05	2.5	3.7

表-4 養生剤の諸元

	養生剤 A	養生剤 B	養生剤 C	養生剤 D
主要成分	合成樹脂	酢酸ビニル	アクリル	塩化ビニリデン
比重	1.00	1.05	1.05	1.18
色	白色に近い薄黄色	白色	白色	薄黄色
固形分(%)	40	40	43	45

れ 50 : 25 : 25 の質量比で混合したものを使用した。細骨材としては、千葉県産山砂と石灰石砕砂を 60 : 40 の質量比で混合したものを使用した。またセメントは普通ポルトランドセメントを使用した。コンクリートの配合選定に関しては、空港土木工事共通仕様書に従い、設計基準曲げ強度は材齢 28 日において 5N/mm<sup>2</sup> を目標としており、その他の指標に関しては表-1 に示す通りである。試験練りから決定したコンクリート配合を表-2 に、コンクリート性状を表-3 に示す。

水分損失量試験のセメントモルタル供試体作成に使用した材料は、収縮試験、曲げ強度試験に用いた材料と同一である。セメントモルタルの配合に関しては ASTM C156<sup>3)</sup> に準拠し、水セメント比を 40% とした。

供試体の養生に用いた養生剤は、現在市場で入手可能な一般的なものから 4 種類を選択した。使用した養生剤の諸元を表-4 に示す。養生剤は全て被膜型で水を溶媒とする水性系のものであり、浸透型、油性系の養生剤は使用していない。被膜養生剤の塗布濃度は、試験条件に従って変えており、一貫養生の条件で試験を行う供試体には、

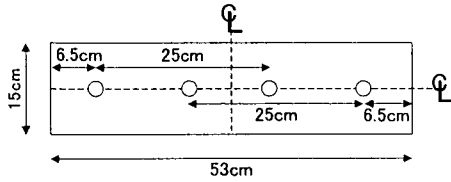
被膜養生剤 A~D を、養生剤製造者が一貫養生の場合に推奨する塗布濃度である 200g/m<sup>2</sup> で塗布を行った。また、散水養生の条件で試験を行う供試体には、初期養生として、舗装で一般的に用いられている被膜養生剤 B を用い、養生剤製造者が初期養生の場合に推奨する一般的な塗布濃度である 60g/m<sup>2</sup> で塗布を行っている。また、一貫養生で塗布濃度を变化させた条件での試験を行う供試体には、舗装で一般的に用いられている被膜養生剤 B を用いて、それぞれ 60, 140, 200g/m<sup>2</sup> 塗布濃度で被膜養生剤の塗布を行っている。

## (2) 試験方法

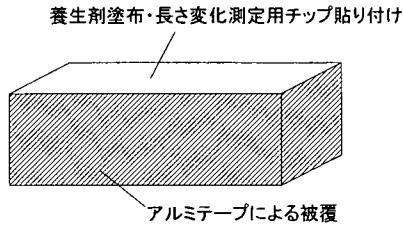
### a) コンクリート収縮試験

コンクリートの収縮に対する養生方法の影響を把握するために、養生方法の異なる供試体を作成して収縮ひずみの計測を実施した。

供試体を作成するためのコンクリートの練混ぜは 100l の二軸強制練りミキサーを用いて、1 バッチの練混ぜ



(a) 供試体上面



(b) 供試体周面

図-1 収縮量測定供試体

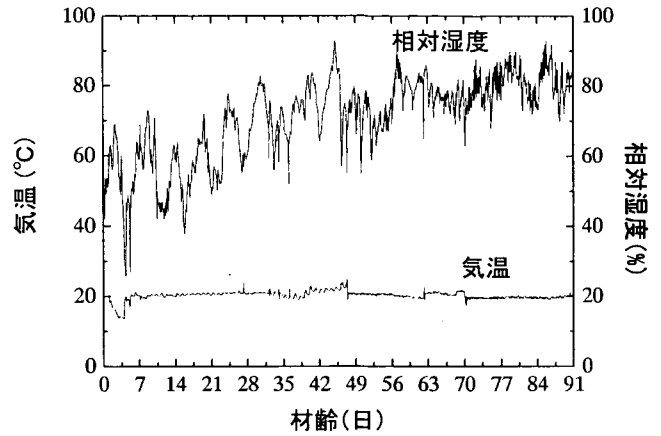


図-2 養生室の気温と湿度

表-5 供試体作成条件

供試体	養生の種類	養生剤種類	養生剤塗布濃度 (g/m <sup>2</sup> )	温度 (°C)	備考
気中	無養生	—	—	20	気中放置
散水	散水養生	養生剤 B	60 (初期養生)		材齢 14 日まで散水
A	一貫養生	養生剤 A	200		気中放置
B		養生剤 B	200		気中放置
B-140		養生剤 B	140		気中放置
B-60		養生剤 B	60		気中放置
C		養生剤 C	200		気中放置
D		養生剤 D	200		気中放置

量を 80l として行った。練り落としたコンクリートを二層に分けて、150×150×530mm の鋼製型枠へ流し込み、バイブレータによる振動締めを行った後に、こてにより打設面の整形を行った。打設面の表面水が消失した後、速やかに各々の供試体の養生を開始した。供試体とその作成条件を表-5 に示す。

被膜養生剤による一貫養生の供試体に関しては、4 種類の被膜養生剤を所定の濃度で、写真-1 のように刷毛により塗布濃度が均一となるように供試体打設面に塗布し、供試体を気中に放置した。

散水養生を行う供試体に関しては、被膜養生剤 B を水で 60g/m<sup>2</sup> の濃度に希釈してから、供試体打設面における濃度が均一となるように刷毛によって塗布した。被膜養生剤が乾燥した後に、散水マットで供試体打設面を覆い、一日一回の散水を 14 日間継続して行った。

この他、被膜養生剤の塗布ならびに散水を行わない気

中養生の供試体は、供試体打設後、被膜養生剤の塗布、散水マットによる被覆、散水を一切行わなかった。

供試体打設後 24 時間が経過してから鋼製型枠を脱型し、打設面以外の 5 面からの水分蒸発を防ぐために、写真-2 に示すようにアルミテープを貼り、図-1、写真-3 に示すように、供試体打設面に収縮ひずみ計用のホイットモアひずみ計用チップを接着剤にて 4 ヶ貼り付けた。

供試体底面の自由な変形が拘束されることを避けるために、直径 2mm のガラスビーズを底に引き詰めたプラスチック製コンテナに供試体を静置した。また散水養生の供試体にも、材齢 14 日に達するまでは、引き続き毎日散水を行い、材齢 14 日以降は散水マットを取り去り気中に放置した。

養生室の気温は 20°C で一定に保持したが、湿度については特に調整していない。養生期間中の温度、湿度の変化を図-2 に示す。

収縮による供試体の長さ変化量の計測は、ガラスビーズを敷き詰めたプラスチック製コンテナに供試体を静置した状態で、約 25cm 離れたチップ間の距離を 1 供試体につき 2 径間、ホイットモアひずみ計で測定した。接着剤が硬化した直後の計測値を基準長として採用し、打設後 1 週間は材齢 3, 5, 7 日において、その後は 91 日まで 1 週間毎に長さ変化量の計測を行った。得られた長さ変化量から算出したひずみをこの条件下におけるコンクリートの収縮ひずみとみなし、同一条件の供試体 3 本で得られた 6 径間における収縮ひずみの平均値を、その条件での収縮ひずみの代表値として採用した。

#### b) 曲げ強度試験

曲げ強度に対する養生方法の影響を把握するために、JIS A 1132 に準拠してコンクリート曲げ強度試験を実施した。供試体の使用材料、作成方法、養生方法は(1)および(2) a) に述べたとおりである。

曲げ強度は材齢 7, 28, 91 日における強度を測定した。本試験において作成した供試体の種類は、表-5 のとおりであり、材齢 7, 28, 91 日が経過した時点で曲げ強度試験を行い、同一条件の供試体 3 本の平均値をその条件での曲げ強度の代表値として採用した。供試体の曲げ強度測定は、被膜養生剤の効果を考え、打設面を引張側としたが<sup>4)</sup>、その他の条件は JIS A 1106 に準拠して行った。

#### c) 水分損失量試験

養生作業は、コンクリートが硬化するのに必要な水分を供給、または水分の蒸発を抑止するために行うものである。養生期間中のコンクリート中の水分損失量は、収縮量、曲げ強度に大きな影響を与えられことから、セメントモルタルからの水分の損失を養生剤が抑制する効果を把握するために、ASTM C156 に準拠して水分損失量試験を実施した。

水分損失量試験では、頂部の寸法が 150×300mm、底部の寸法が 145×295mm、深さが 50mm の金属製箱型容器に、水セメント比を 40% に調整したセメントモルタルを投入した。次に、写真-4 に示すように、金属製容器とモルタルとの境界から水分が蒸発しないよう、シーリング剤により境界を入念にシーリングし、打設面のみに刷毛で養生剤を塗布した。そして供試体を気温 37.8℃、湿度 32% の恒温槽の中に入れて養生を行い、1, 3, 5, 7, 28 日後の質量を測定した。材齢経過後の供試体質量と試験開始前の供試体質量との比較から、打設面からの単位面積当たりの水分損失量を求めた。なお、1 条件につき供試体を 3 本作成し、その平均値を当該条件の水分損失量の代表値とし

て採用している。この試験に使用した養生剤は、コンクリートの収縮試験、曲げ強度試験に用いたものと同種・同濃度である。ただし、散水養生に関しては水分損失量試験を実施していない。

### 3.2 室内試験結果

#### (1) 養生方法が収縮に及ぼす影響

養生方法の違いによる収縮ひずみと材齢の関係を図-3 に示す。散水養生を施した供試体は材齢 7 日において収縮ひずみが最も小さいが、散水が終了した時点（材齢 14 日）から供試体表面が水分の供給が絶たれて乾燥状態に曝されるため、収縮ひずみは急激に増大している。

この収縮ひずみは材齢 28 日の時点では一貫養生を施した供試体と同程度になっており、材齢 91 日の時点では養生を何も施していない気中養生の供試体とも大差がなくなっている。一貫養生を施した供試体は、気中養生の供試体と比較すると収縮ひずみは小さく抑えられているが、材齢の経過に伴い、その差は小さくなる。

図-4 に、散水養生を施した供試体の収縮ひずみを基準として正規化した収縮ひずみと材齢の関係を示す。一貫養生を施した供試体は材齢 7 日の時点で散水養生を施した供試体の 1.5～2.1 倍、材齢 14 日の時点で 1.1～1.5 倍の収縮ひずみを呈しており、両者には材齢 7 日の時点で最大の違いが生じていることがわかる。材齢の経過に伴いひずみの違いが徐々に小さくなり、両者が逆転するに至る傾向が明確であり、材齢 91 日の時点で養生剤 B を除くと、一貫養生を施した供試体の収縮ひずみは、散水養生を施した供試体の 90% 程度になっている。

これらのことから、養生剤を用いた一貫養生による収縮抑制効果は、初期養生期においては気中養生よりも大きいものの、散水養生には及ばず、後期養生終了以降の長期間を考えると、散水養生よりも大きいことがわかった。また、この点について養生剤の種類による違いを見ると、その順序は全期間を通じて変わることはないようである。4 種類の中では養生剤 B の収縮抑制効果は小さいものとなっている。

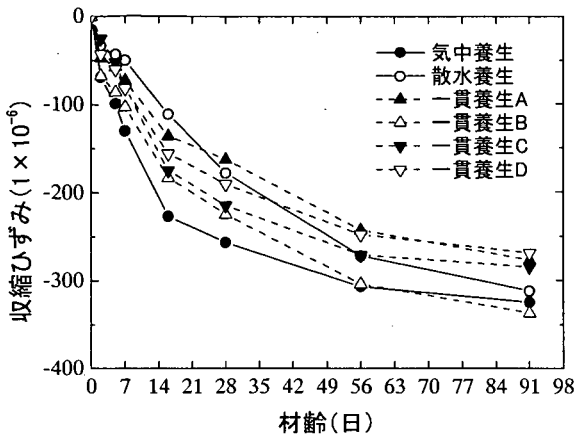


図-3 収縮ひずみと材齢の関係

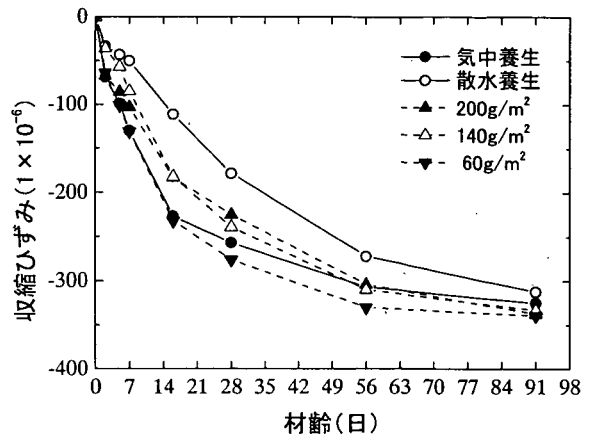


図-5 塗布濃度の違いによる収縮ひずみと材齢の関係

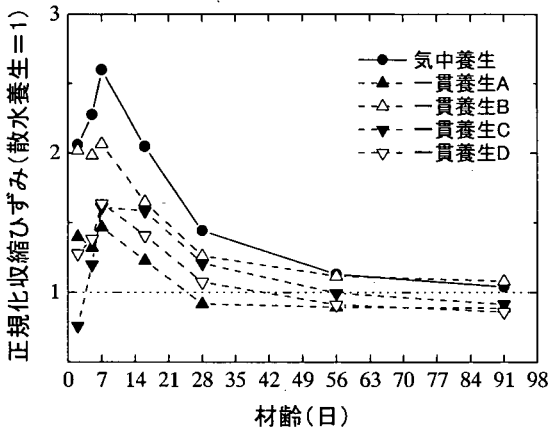


図-4 正規化収縮ひずみと材齢の関係 (散水養生=1)

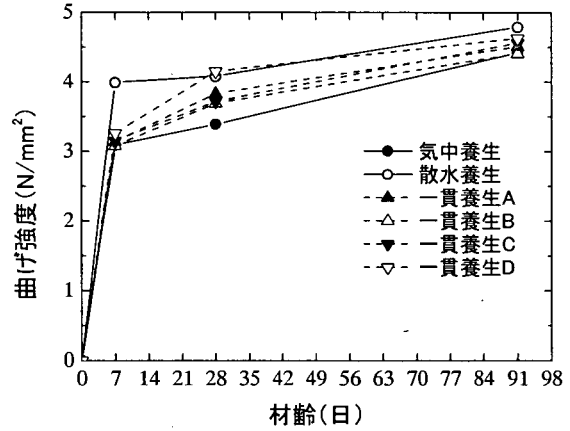


図-6 曲げ強度と材齢の関係

(2) 養生剤塗布濃度が収縮に及ぼす影響

図-5 に、舗装用として一般的に用いられている養生剤 B に関して、塗布濃度を 60, 140, 200g/m<sup>2</sup> と変化させた場合の収縮ひずみの比較を示す。

塗布濃度による違いは材齢初期において顕著に表れており、塗布濃度が 60g/m<sup>2</sup> と低い供試体では、収縮抑制効果が小さく、気中養生の場合と同程度の収縮ひずみとなっている。しかしながら、塗布濃度の違いによる差は、材齢が経過するにつれて明確に見てとることができなくなっている。

(3) 養生方法が曲げ強度に及ぼす影響

養生方法の違いによる曲げ強度と材齢の関係を図-6 に示す。全てのケースにおいて設計基準強度を満足しない結果となったが、今回用いた養生方法では、水中養生のように完全な湿潤状態を保てなかったことが原因と考えられる。材齢 7 日における強度には養生方法による違

いが最も明確に現れており、散水養生を施した供試体では、十分に水分が供給された結果、硬化反応が促進されたことで、高い曲げ強度が発現したものと推測される。

また、一貫養生を適用した場合には、いずれの時点においても気中養生時より強度は大きいものの、散水養生の場合よりも強度が小さいことが認められる。養生期間を目標強度の 70% に到達するまでとすると、一貫養生を適用した場合に必要な養生期間としては、図-6 から、2~3 週間が必要であると考えられ、養生剤の種類によっては、従来の散水養生における標準の養生期間 (2 週間) と同程度でよいことがわかる。

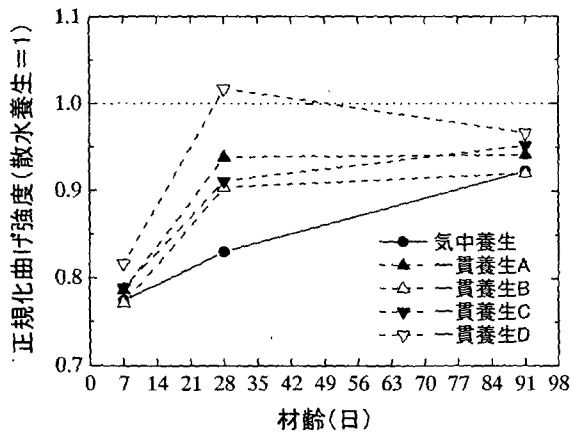


図-7 正規化曲げ強度と材齢の関係 (散水養生=1)

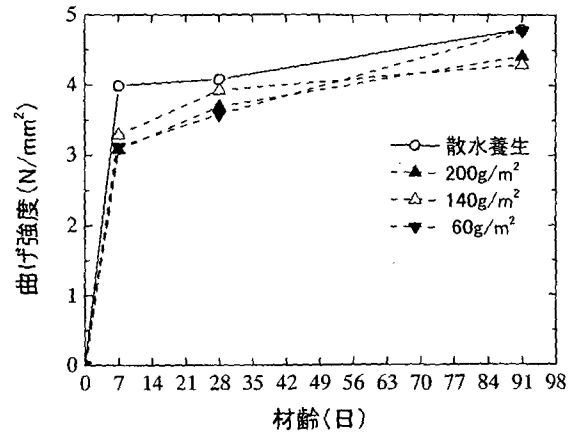


図-9 塗布濃度の違いによる曲げ強度と材齢の関係

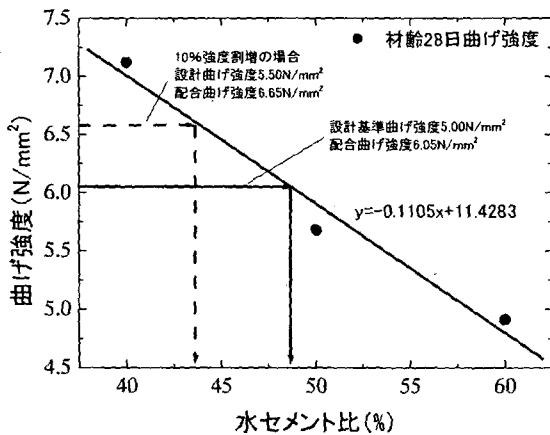


図-8 配合選定における曲げ強度試験結果

図-7に、散水養生を施した供試体の曲げ強度を基準として正規化した曲げ強度と材齢の関係を示す。一貫養生を適用した供試体では、養生剤の種類による差が見られ、散水養生を施した供試体と比較して、7日強度において80%程度、28日強度で90%程度、91日強度においては95%程度の曲げ強度が得られていることが確認できた。

このことから、養生剤による一貫養生を用いたことによる、材齢28日における散水養生との曲げ強度差を補うためには目標強度を10%程度増加させることが必要となる。これを水セメント比を低下することにより対処しようとした場合、供試体作成に用いられたコンクリート配合で考えると、図-8より水セメント比を5%ほど小さくする必要がある。

(4) 養生剤塗布濃度が曲げ強度に及ぼす影響

図-9に、養生剤Bに関して、その塗布濃度を60、140、200g/m<sup>2</sup>と変化させた場合の曲げ強度の比較を示す。

散水養生と比較すると、塗布濃度によらず材齢7日に

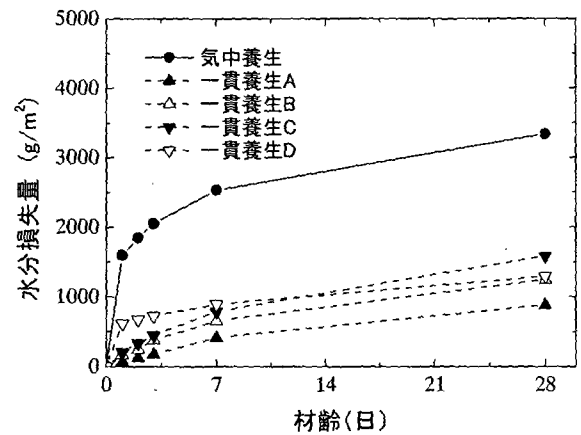


図-10 水分損失量と材齢の関係

における強度で最も大きな差が生じており、その後は徐々に差が小さくなっていることがわかる。この試験結果からは、塗布濃度の違いが曲げ強度に及ぼす影響については明確になっていない。

(5) モルタル水分損失量とコンクリート性状の関係

図-10に、単位面積あたりのモルタルの水分損失量と材齢の関係を示す。養生室内の温度、湿度条件や、材料がモルタルであることがコンクリート供試体の一連の試験と異なっているが、気中養生の供試体と一貫養生を施した供試体とを比較するとその差は明らかであり、また、材齢が経過しても養生剤の効果は継続して発揮されていることがわかる。ASTMの基準では72時間後の水分損失量を550g/m<sup>2</sup>未満と規定しており<sup>6)</sup>、今回の試験結果にこの基準を当てはめると、4種類の養生剤のうちA、B、Cがこれを満足する結果となっている。

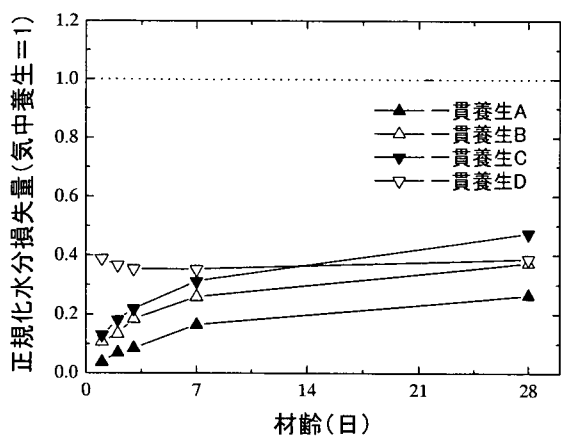


図-11 正規化水分損失量と材齢の関係

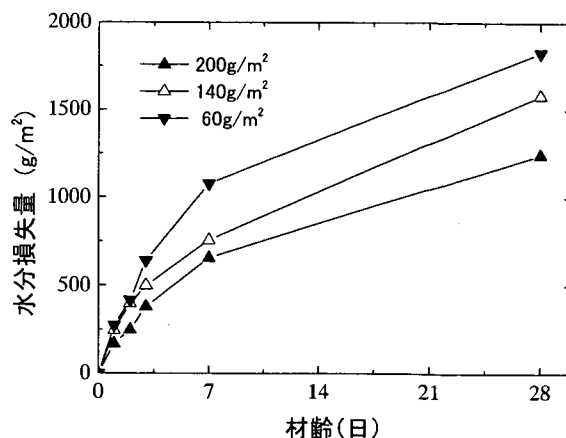
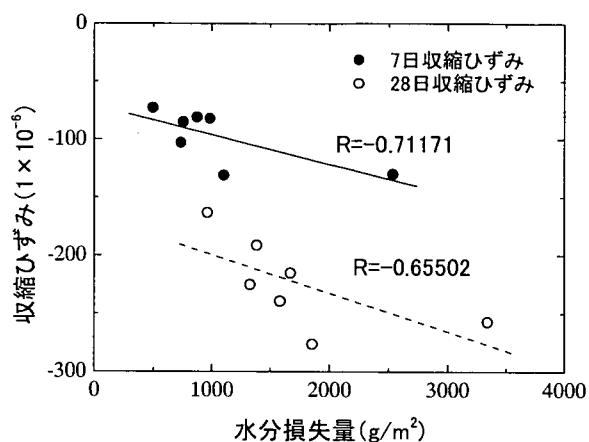
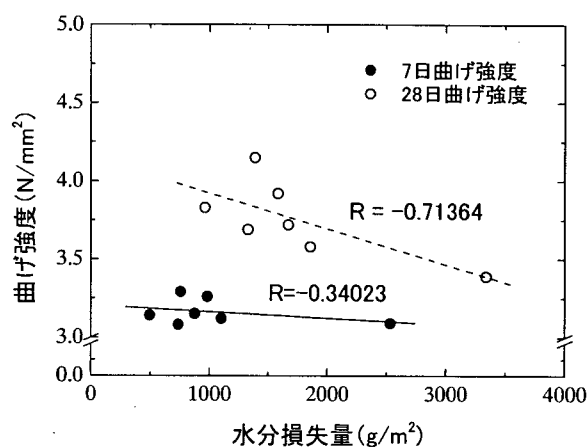


図-12 塗布濃度の違いによる水分損失量と材齢の関係



(a) 収縮ひずみと水分損失量



(b) 曲げ強度と水分損失量

図-13 水分損失量と収縮ひずみ、曲げ強度との相関

図-11 に、気中養生の供試体の水分損失量を基準として正規化した水分損失量と材齢の関係を示す。材齢 28 日までの範囲では養生剤を塗布することにより水分損失量を気中養生の 40%程度に抑えることが可能であることがわかる。特に最も効果が高い養生剤 A の場合では材齢 7 日の時点で 16%、材齢 28 日の時点で 26%となっている。養生剤の効果は養生初期において顕著に表れている。これはコンクリートの収縮試験と同様の傾向となっている。

図-12 に、養生剤 B に関して、塗布濃度を 60, 140, 200g/m<sup>2</sup> と変化させた場合の、水分損失量と材齢の関係を示す。この場合は、塗布濃度の差による影響が明確に現れており、高濃度で塗布を行い、厚い被膜を形成した供試体のほうが水分損失量を減少できることが確認できる。また、塗布濃度が 60g/m<sup>2</sup> の場合は、前述の ASTM の基準を満たしていないことがわかる。

図-13 に、コンクリート供試体の収縮ひずみ、曲げ強度とモルタル供試体の水分損失量との関係を示す（図中

の  $R$  は相関係数）。収縮ひずみと水分損失量に関しては、比較的高い相関が認められ、モルタル供試体による試験の有効性が確認された。一方、曲げ強度と水分損失量との相関は材齢 28 日において多少認められるところであるが、図-9 で示した塗布濃度の違いによる曲げ強度の試験結果も合わせて考えると、必ずしも相関が高いとはいえない。これは、水分損失量がモルタル供試体からの水分蒸発量を示しているのに対し、曲げ強度はモルタル以外の骨材のひび割れに対する抵抗性にも影響されることが原因であろう。

### 3.3 まとめ

室内試験結果をまとめると以下のとおりである。

- ① コンクリートの収縮に関しては、一貫養生を施すことによる収縮抑制効果は、初期養生期においては散水養生には及ばないために注意が必要である。長期間を考えると散水養生よりも効果は大きく、多くの養生剤では、材齢 91 日における収縮量は、散水養生の場合の 90%程度であった。
- ② 曲げ強度に関して、一貫養生を施した供試体は、散水養生を施した供試体と比較すると、材齢 7, 28, 91 日で、それぞれおおよそ 80, 90, 95%となっており、両者の曲げ強度の差は材齢の経過とともに小さくなる傾向にある。
- ③ 養生剤の塗布濃度の違いは、収縮ひずみに対しては影響が明白であり、塗布濃度  $60\text{g/m}^2$  では ASTM の水分損失量の基準を満たさなかった。しかし、曲げ強度に対しては明確には現れていない。
- ④ 収縮ひずみと水分損失量との相関は比較的高いが、曲げ強度と水分損失量との相関は低い。水分損失量がコンクリートモルタルからの水分の蒸発量を示すのに対し、曲げ強度には骨材のひび割れ抵抗性が大きく影響するために、直接的な相関は低いと考えられる。

## 4. 試験施工

室内試験結果から、最も性能の高いと思われる養生剤を 1 種類選定し、試験施工により製作したコンクリート版に対して通常の散水養生を施した区画と、被膜養生剤による一貫養生を施した区画において、コンクリート版の特性を比較することで、被膜養生剤による一貫養生の適用性を検討した。

### 4.1 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。この試験舗装の目的は、同一の材料、寸法によって製作したコンクリート版において、被膜養生剤による一貫養生を施した区画と、一般的な散水養生を施した区画との間で温度変化や日射、風雨等の環境要因によるコンクリート版の短期的、長期的な挙動、コンクリート版の強度特性を比較検討することである。具体的には、コンクリート版に生じる収縮ひずみやコンクリート版内部の温度変化に伴う変形が、コンクリート版の自重や路盤との摩擦によって拘束されることで生じる拘束応力の検討、FWD によるたわみ測定、切取

供試体による強度試験によるコンクリート版の構造強度の確認である。

試験舗装の平面図、断面図は図-14 に示すとおりである。試験区画は I 区画、II 区画であり、両区画とも養生方法を除いては同じ条件で製作した。施工幅員は現在空港舗装で一般的に用いられている 7.5m とし、横方向目地間隔も同様に 7.5m としている。構造的には、コンクリート版の設計基準曲げ強度を  $5\text{N/mm}^2$ 、設計航空機荷重を B-747 で代表される LA-1、設計カバレージを 20,000 回、路盤の設計支持力係数を  $70\text{MN/mm}^3$  (平板直径 750mm) としたため、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。材料の性状を表-6 に、路床の品質管理試験結果を表-7 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DEM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空港土木工事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。材料の性状を表-8 に、下層路盤の品質管理試験結果を表-9 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DEM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DEMローラにて転圧を行った。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は表-10 に、上層路盤の品質管理・出来形管理試験結果は表-11 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により敷き均し、初期転圧を 7t タンDEM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  $160^\circ\text{C}$ 、現場到着時  $158^\circ\text{C}$ 、敷き均し時  $148^\circ\text{C}$  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。



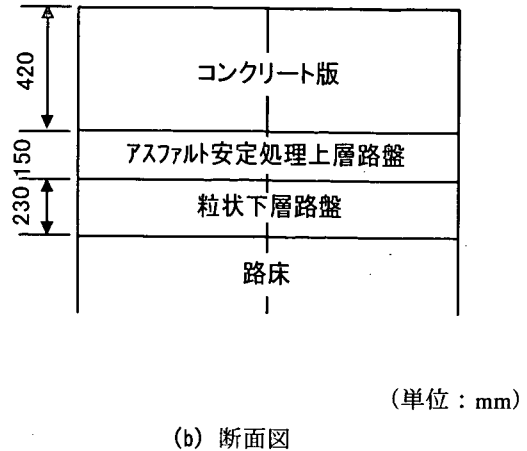
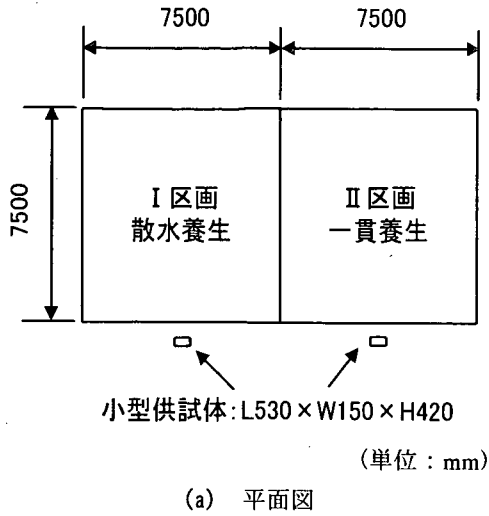


図-14 試験舗装図

表-6 路床土の性状試験結果

項目	I 区画	規定値
含水比 (%)	7.4	—
湿潤密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.822	—
乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.696	—
仕様密度における修正 CBR (%)	16.8	10 以上

表-7 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	7.8	7.6	—
現場密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.802	1.794	1.798	—
締固め度 (%)	106.2	105.7	106.0	90 以上
K <sub>30</sub> (MN/m <sup>3</sup> )	192	261	227	—
K <sub>75</sub> (MN/m <sup>3</sup> )	77	104	91	—

※ K<sub>75</sub>=K<sub>30</sub>/2.5

表-8 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 <sup>3</sup> )	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-9 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	16.7	15.7	—
現場密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.722	1.703	1.713	—
締固め度 (%)	100.4	99.3	99.9	95 以上
K <sub>30</sub> (MN/m <sup>3</sup> )	325	286	306	—
K <sub>75</sub> <sup>*</sup> (MN/m <sup>3</sup> )	108	95	102	—

※K<sub>75</sub>=K<sub>30</sub>/3

表-10 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	95~100
	19	87.3	50~100
	4.75	50.4	—
	2.36	34.4	20~60
	0.075	4.1	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-11 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	15.8	15.9	15-0.4cm 以上
コア密度 (g/cm <sup>3</sup> )	2.334	2.368	2.351	—
締固め度 <sup>*</sup> (%)	98.6	100.0	99.3	95 以上

※基準密度=2.368 g/cm<sup>3</sup>

表-12 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 <sup>3</sup>
粗骨材 <sup>*</sup>	40 - 20	茨城県笠間産硬質砂岩	密度：2.69g/cm <sup>3</sup> 単位容積質量： 1.68kg/l
	20 - 05	山口県伊佐町産石灰岩	
細骨材	砂	千葉県君津産山砂	密度：2.61g/cm <sup>3</sup>
練混ぜ水	上水道水	—	—
混和剤	AE 減水剤	リ'ニル'酸塩	—
	空気量調整剤	変性'ニル'酸化合物系陰イ'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-13 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 <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	細骨材率 (%)	目標スランプ (cm)	目標空気量 (%)	単用量 (kg/m <sup>3</sup> )				混和剤	
					水	セメント	細骨材	粗骨材	AE 減水剤	空気量調整剤 <sup>*</sup>
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-14 試験舗装の養生に用いた養生剤の諸元

	I区画	II区画
養生剤種類	養生剤 B	養生剤 A
塗布濃度 (g/m <sup>2</sup> )	60 (初期養生)	200
主要成分	酢酸ビニル	合成樹脂
比重	1.05	1.00
色	白色	白色に近い薄黄色
固形分 (%)	40	40

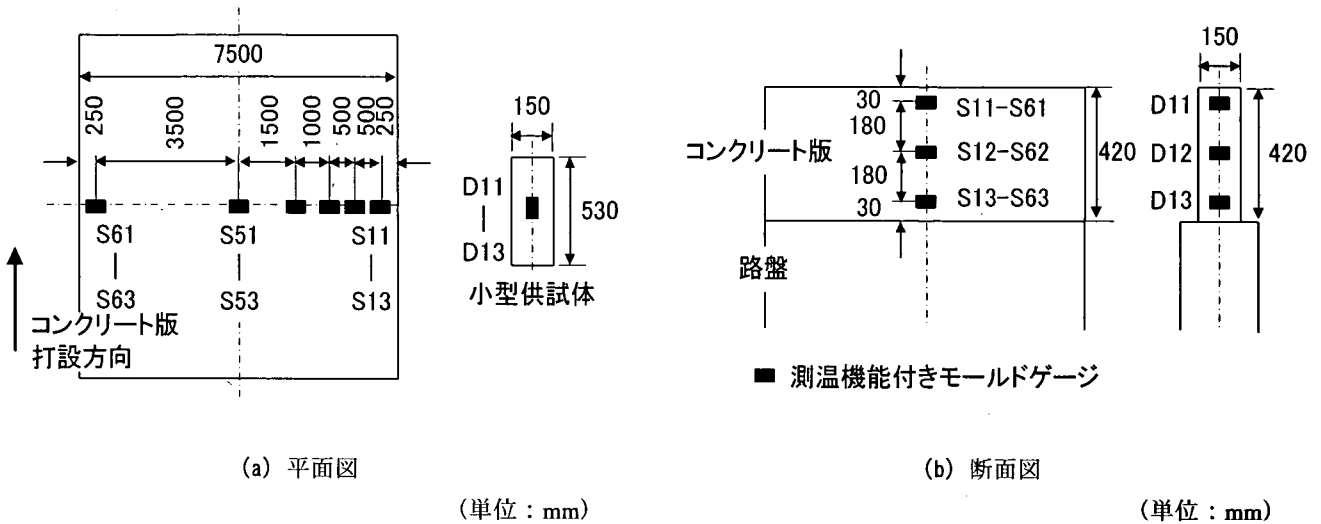


図-15 計器埋設位置

(4) コンクリート版の施工

コンクリート版に使用した材料は表-12 に、コンクリートの配合は表-13 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、外気温は18~20℃であった。

コンクリート版は下層280mm、上層160mmの2層に分けて施工した。下層コンクリートをインナーバイブレータを用いて締め固めた後、鉄網を施設し、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。コンクリートフィニッシャによる締め固め後、コンクリート版表面に箒目を入れ、養生を行った。試験舗装の養生に用いた養生剤の諸元を表-14に示す。

散水養生を行うI区画では、コンクリート版の表面水が消失した後、初期養生として、一般的に用いられている養生剤Bを水で希釈したものをスプレーによって均一に塗布した。また後期養生として、養生剤が乾燥した後に、写真-5のように、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日間継続して行った。

養生剤による一貫養生を行うII区画では、コンクリート版の表面水が消失した後、室内試験結果から最も性能が高いと判断した養生剤Aを原液のまま塗布した。この場合、散水マットによる被覆、散水は行わなかった。

なお両区画とも、施工翌日にカッタによる横方向目地を設けたが、目地にはスリッパーは設置しなかった。

コンクリート版中には、測温機能付きモールドゲージを埋設した。図-15にコンクリート版中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、路盤との摩擦による拘束が無視できる寸法を考慮して<sup>7)</sup>、長さ530mm、幅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断熱材で覆った。養生方法に関してはコンクリート版と同一とした。

表-15 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	7.10	8.08	11.10
10月16日～17日	10.22	8.82	7.98	9.41	8.56	10.98
10月17日～18日	11.67	8.16	7.22	9.80	8.70	14.25
平均値	9.88			9.77		

#### 4.2 環境作用によるコンクリート版の変形

試験舗装の製作が終了した後、環境作用によ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) 軸方向変形の拘束

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、日温度変化、長期温度変化によっても軸方向に伸縮を繰り返す。しかし、この変形がコンクリート版の自重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、コンクリート版には応力（拘束応力）が発生する。軸方向変形の拘束度は、コンクリート版の収縮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養生方法が異なる場合の軸方向拘束度を、コンクリート版の収縮によるものと温度変化によるものとに分けて検討した。

##### a) 熱膨張係数

収縮ひずみ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。図-16には日ごとの温度変化量と実ひずみ変化量を示した。また表-15には、それらより得られた熱膨張係数をまとめた。両区画の熱膨張係数に大きな差はなく、養生方法による違いは生じていないことがわかる。

##### b) 収縮

コンクリートの収縮（乾燥収縮と自己収縮）によるひずみの発生状況について検討した。

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-17に示す。収縮ひずみは具体的には式(1)によって算出される。

$$\epsilon_{sh} = \epsilon - \alpha \Delta T \quad (1)$$

ここに、

$\epsilon_{sh}$  : 小型供試体の収縮ひずみ ( $1 \times 10^{-6}$ )

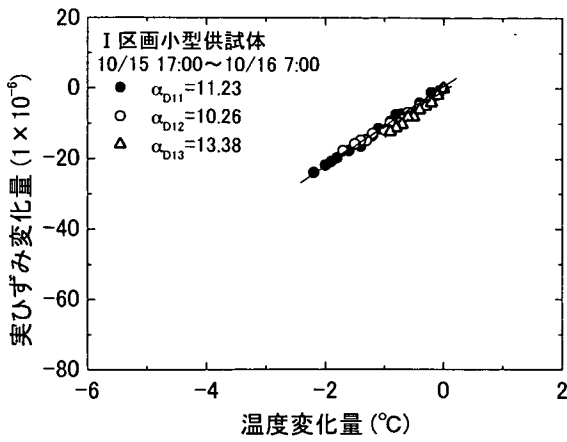
$\epsilon$  : 小型供試体の実ひずみ ( $1 \times 10^{-6}$ )

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

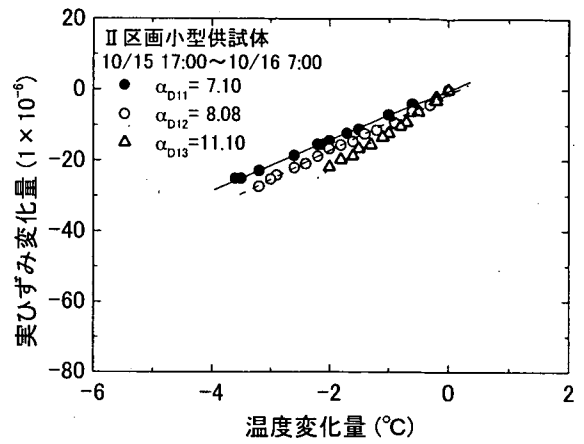
$\Delta T$  : 小型供試体打設後の最高温度からの温度差 ( $^\circ\text{C}$ )

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。これは供試体表面が大気に曝されているために、間隙の水分が供試体内部よりも早く消費されたためと考えられる。

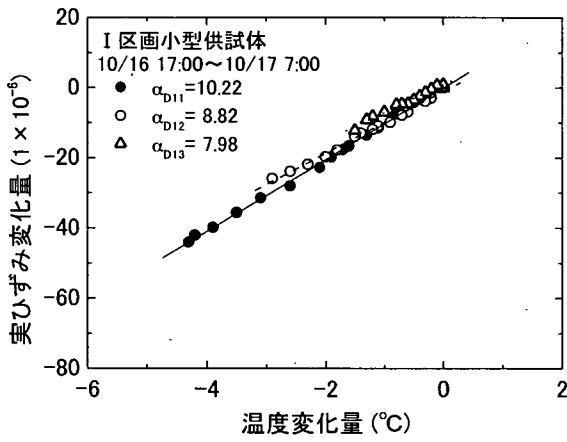
両区画の収縮ひずみを比較すると、養生方法の違いが収縮ひずみに与える影響は、短期的、長期的にもほとんどないといえる。短期的には散水養生のほうが一貫養生よりも収縮を抑制できるという室内試験とは若干異なる結果となった原因としては、供試体寸法の違い、周囲の環境の違いが考えられる。



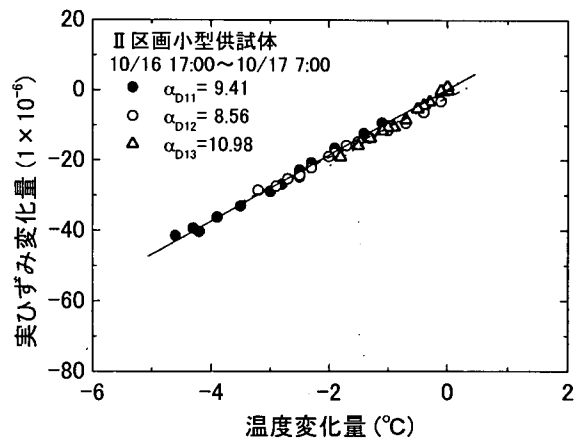
(a) I 区画 10月15日~16日



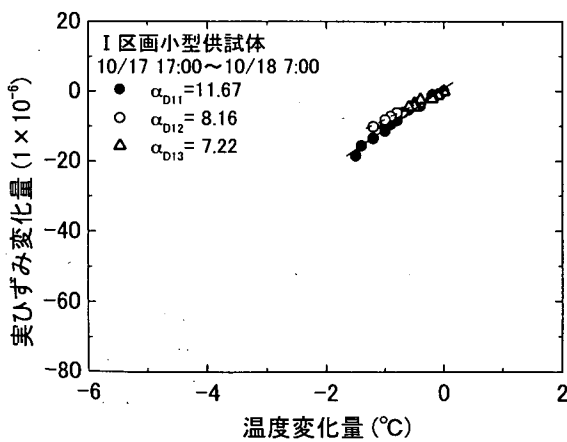
(b) II 区画 10月15日~16日



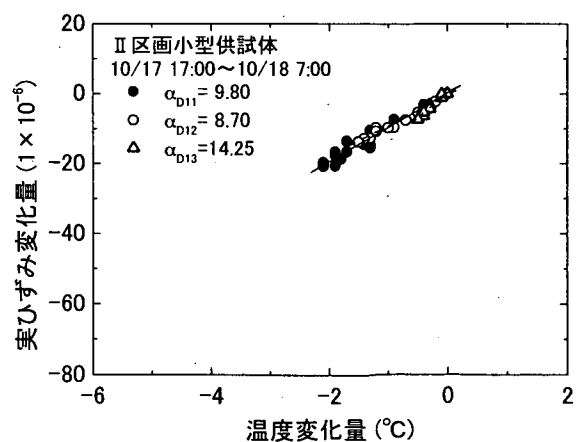
(c) I 区画 10月16日~17日



(d) II 区画 10月16日~17日

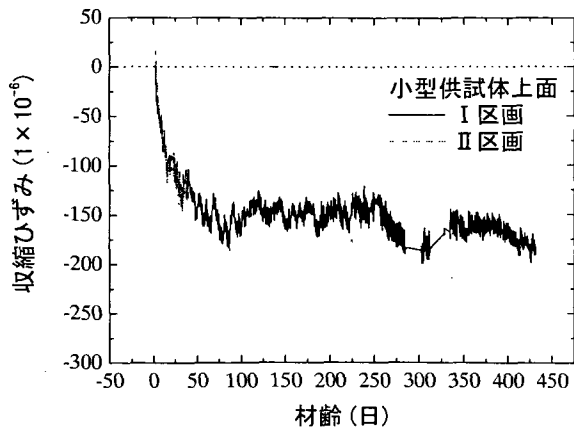


(e) I 区画 10月17日~18日

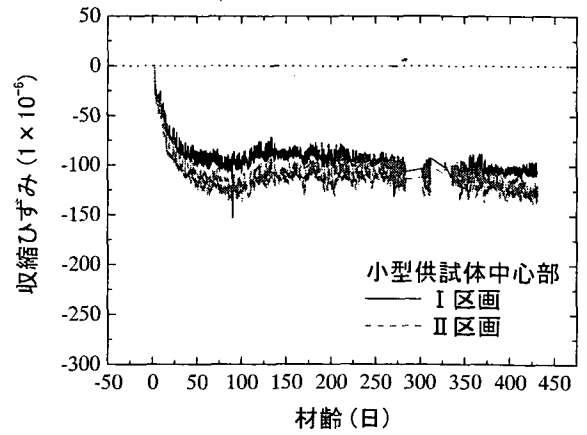


(f) II 区画 10月17日~18日

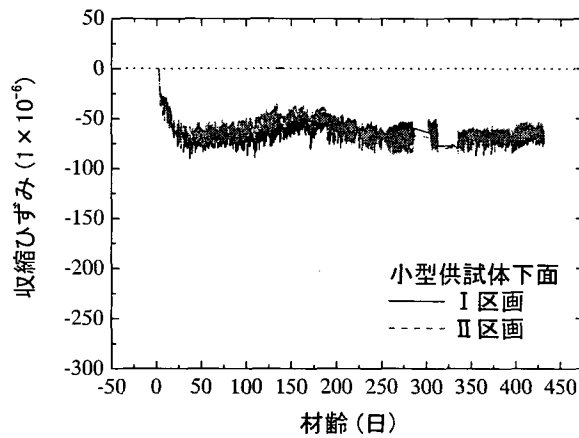
図-16 小型供試体の熱膨張係数



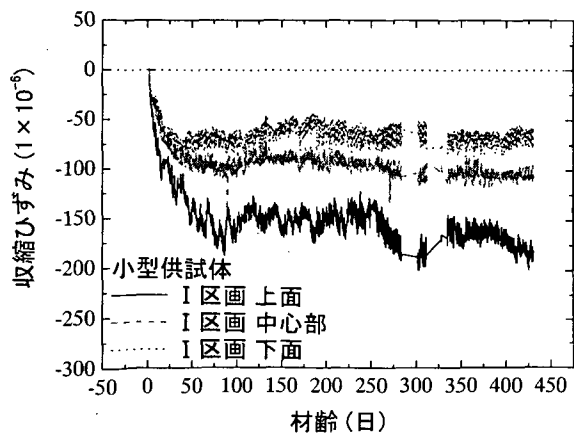
(a) 小型供試体上面



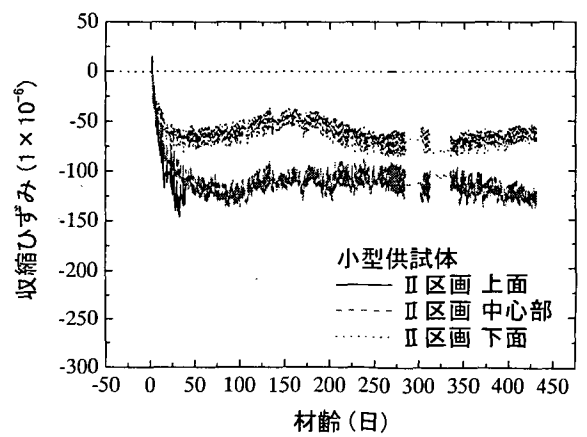
(b) 小型供試体中心部



(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-17 小型供試体の収縮ひずみ

c) 長期温度変化

コンクリート版内の長期温度変化によるコンクリート版の軸方向の変形に関して検討した。長期軸方向拘束度は、後述の日温度変化における軸方向拘束度、曲げ拘束度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とき（15：00頃）のコンクリート版の実ひずみの変化量（後述する compensation line の考え方を適用したときの軸成分）に基づいている。図中の  $\alpha$  は最小二乗法で直線近似した温度変化量に対する実ひずみの変化の割合、すなわち見かけの熱膨張係数を示す。この熱膨張係数を用いて長期軸方向拘束度が式(2)により求められる。

$$R_{Ny} = \frac{\alpha_f - \alpha_i}{\alpha_i} \quad (2)$$

ここに、

$R_{Ny}$  : 長期温度変化による軸方向拘束度

$\alpha_f$  : コンクリート版自由端における見かけの熱膨張係数  
( $1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )

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

図-18、図-19に自由端部（0.25m内側）からの距離による長期軸方向拘束度を示す。冬季から夏季にかけての長期温度変化に対する軸方向拘束度は両区画とも非常に小さいことがわかる。また、版の位置による軸方向拘束度の違いも非常に小さい。このことから、収縮による変形も含んだ長期の温度変化による軸方向拘束度は、養生方法の違いによる影響はあまり大きくないとまとめられる。

d) 日温度変化

日温度変化によるコンクリート版の軸方向の拘束度について検討した。これは、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求められ、具体的には式(3)で算出される。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とき（7：00頃）を基準として、温度差が最大となるとき（15：00頃）までのコンクリート版の軸成分（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。

$$R_{Nd} = \frac{\alpha_t - \alpha_i}{\alpha_t} \quad (3)$$

ここに、

$R_{Nd}$  : 日温度変化による軸方向拘束度

$\alpha_t$  : 温度ひずみ変化量の分布より求めた compensation line による軸ひずみ変化率 ( $1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )

$\alpha_i$  : 実ひずみ変化量の分布より求めた compensation line による軸ひずみ変化率 ( $1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )

図-20に自由端からの距離による軸方向拘束度を、図-21に季節ごとの軸方向拘束度を示す。日温度変化による軸方向拘束度は、自由端からの距離による変動は少ない。一方、季節による変動は版内の位置に関わらず、夏季において最大となっている。夏季における軸方向拘束度は、I区画、II区画ともに最大で0.3程度であり、養生方法の違いが日温度変化による軸方向拘束に与える影響は大きくない。

(2) 曲げ変形の拘束

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変形が生じる。この変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）の場合には上に凸の、温度勾配が負（表面温度 < 下面温度）の場合には下に凸の変形となる。この変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し、ひび割れの原因となることから、養生方法の違いがコンクリート版の曲げ拘束度に与える影響を検討した。

曲げ拘束度は日温度変化による軸方向の拘束度を表わした式(3)と同様に、式(4)により求められる。この式で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とき（7：00頃）のものを基準として、温度差が最大となるとき（15：00頃）までの実ひずみと温度ひずみの変化量を計算し、それらの compensation line の傾きを用いている。

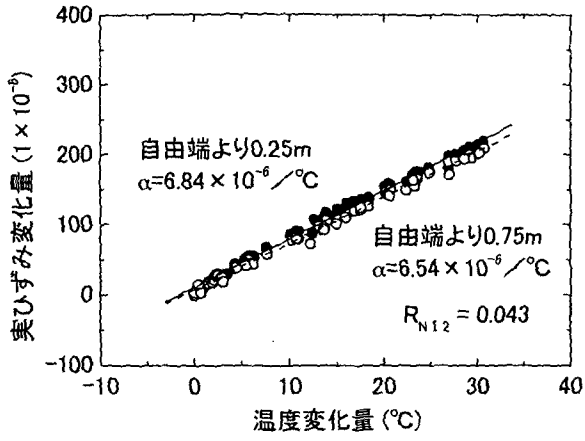
$$R_M = \frac{\Phi_t - \Phi_i}{\Phi_t} \quad (4)$$

ここに、

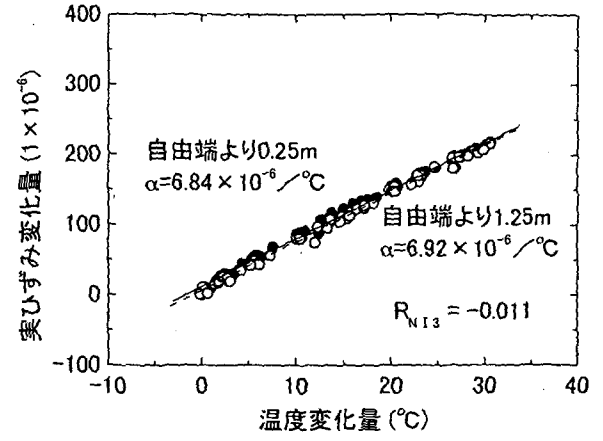
$R_M$  : 日温度変化による軸方向拘束度

$\Phi_t$  : 温度ひずみ変化量の版厚方向分布より求めた compensation line の傾き ( $1 \times 10^{-6}/\text{mm}$ )

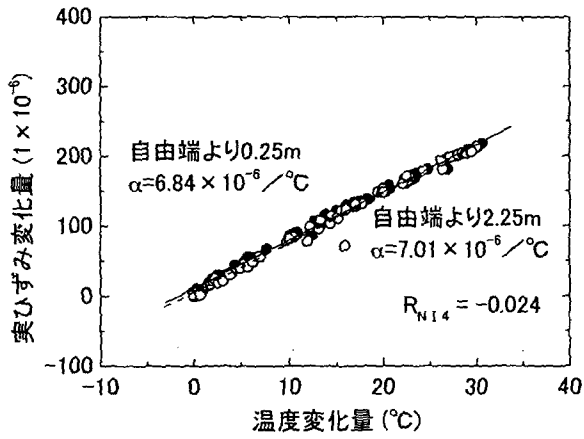
$\Phi_i$  : 実ひずみ変化量の版厚方向分布より求めた compensation line の傾き ( $1 \times 10^{-6}/\text{mm}$ )



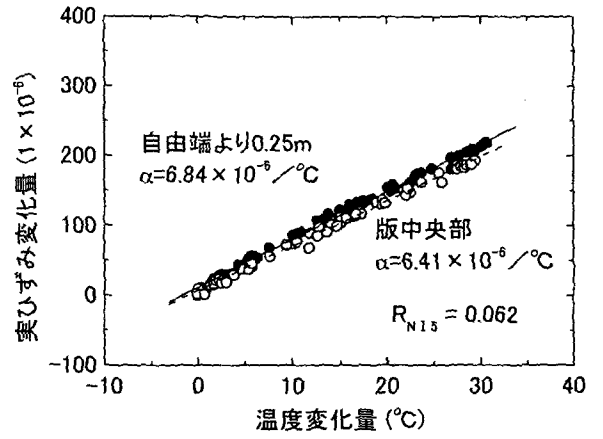
(a) 自由端から 0.75m



(b) 自由端から 1.25m



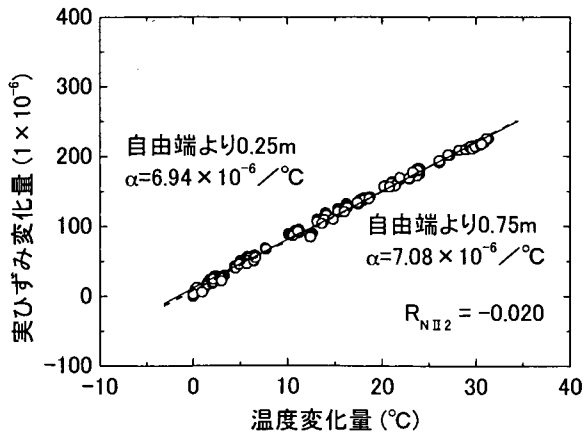
(c) 自由端から 2.25m



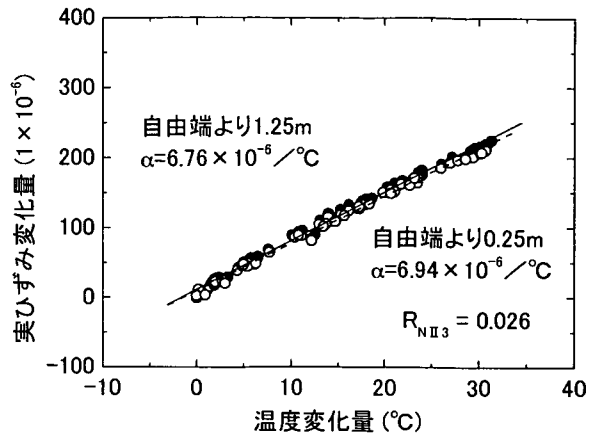
(d) 版中央部

図-18 自由端からの距離と長期軸方向拘束度 (I区画)

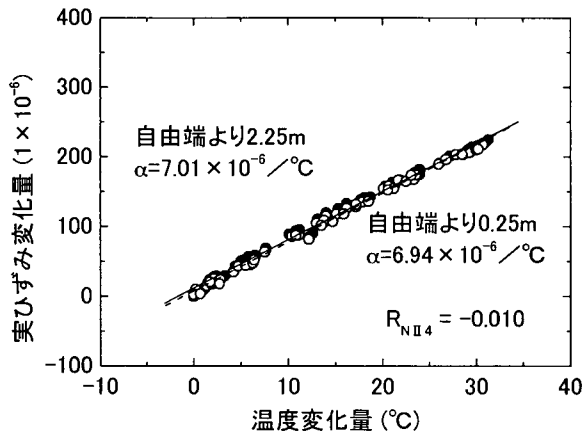




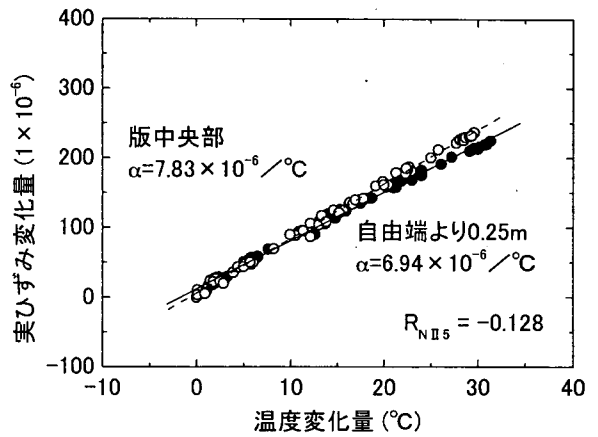
(a) 自由端から 0.75m



(b) 自由端から 1.25m

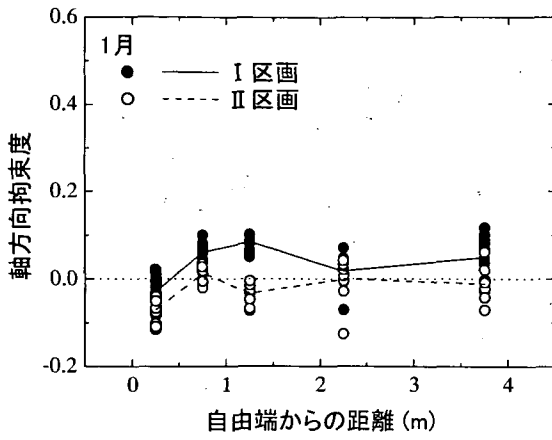


(c) 自由端から 2.25m

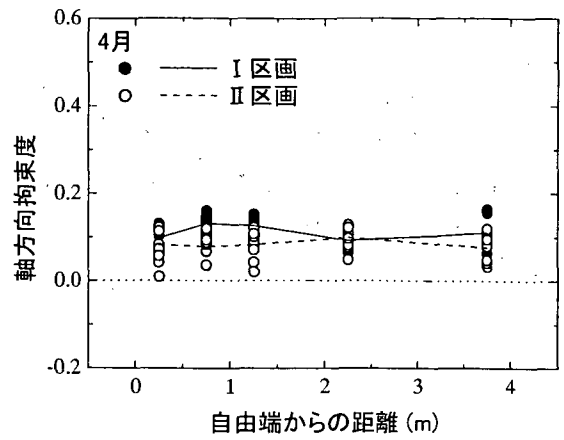


(d) 版中央部

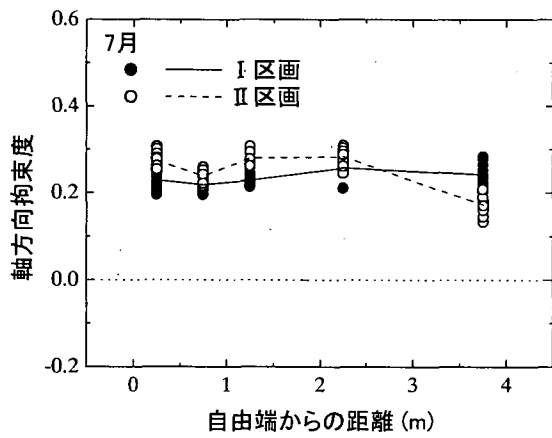
図-19 自由端からの距離と長期軸方向拘束度 (II区画)



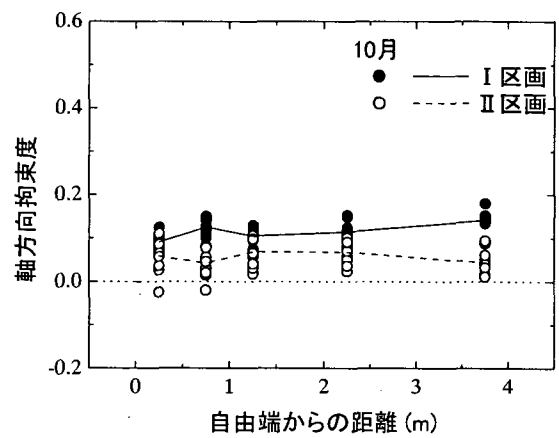
(a) 1月



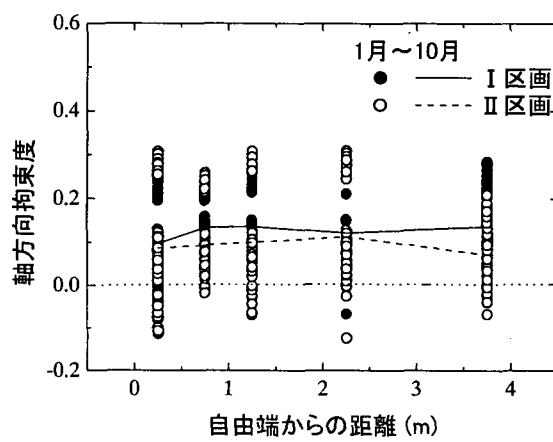
(b) 4月



(c) 7月

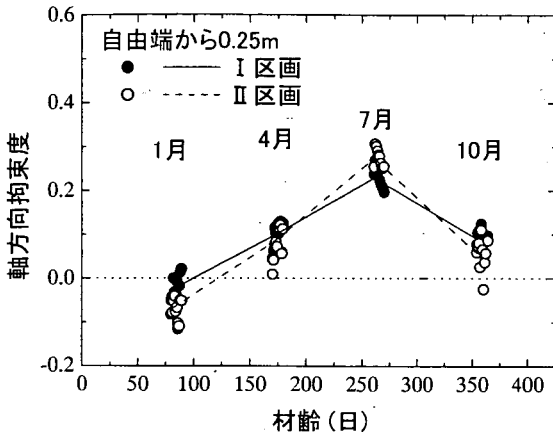


(d) 10月

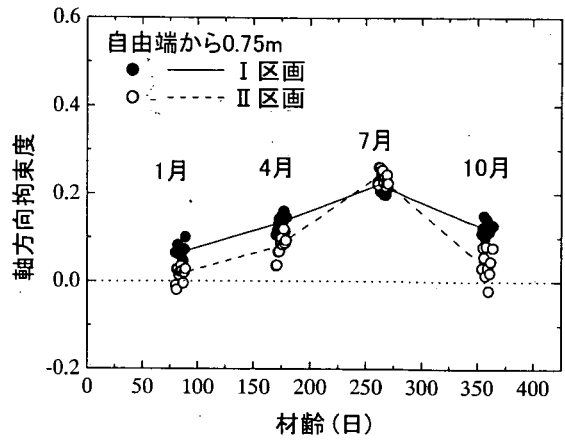


(e) 1月~10月

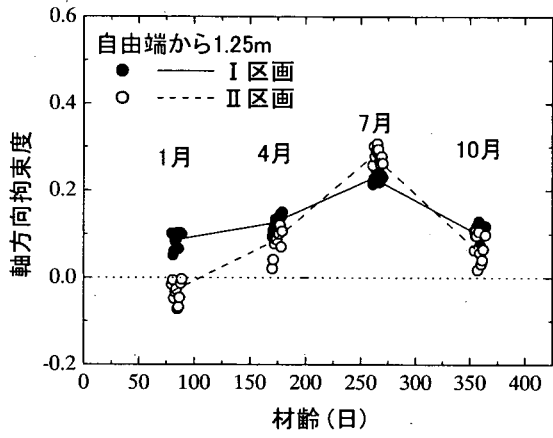
図-20 自由端からの距離と軸方向拘束度の関係



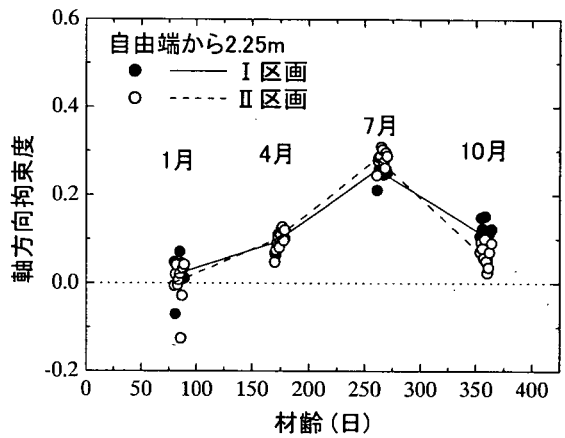
(a) 自由端から0.25m



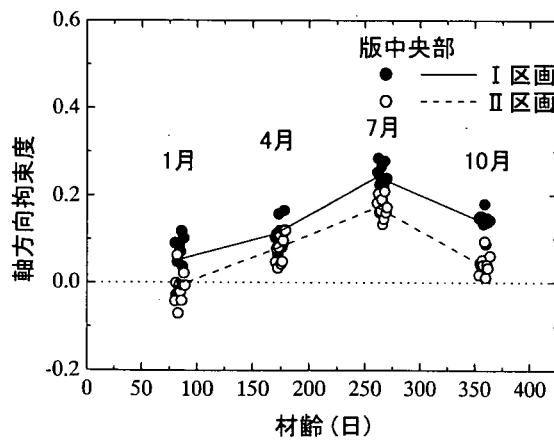
(b) 自由端から0.75m



(c) 自由端から1.25m

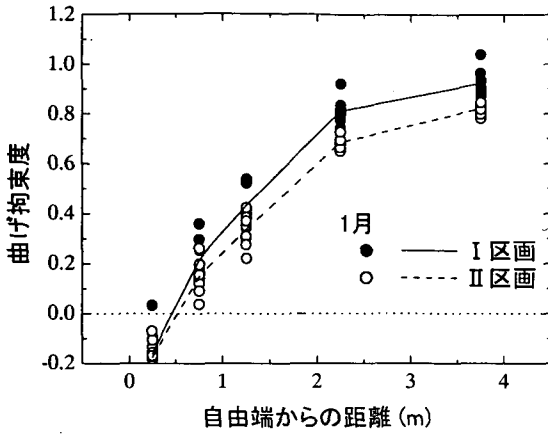


(d) 自由端から2.25m

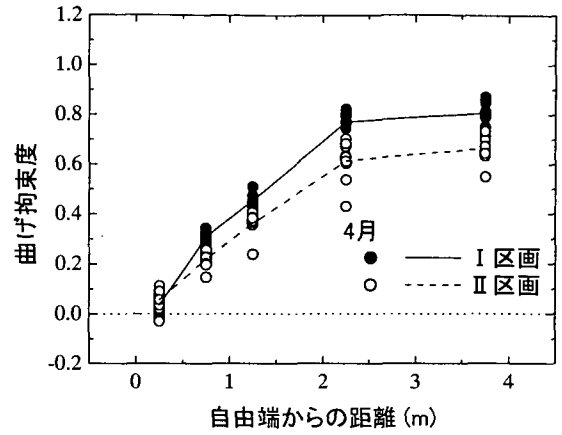


(e) 版中央部

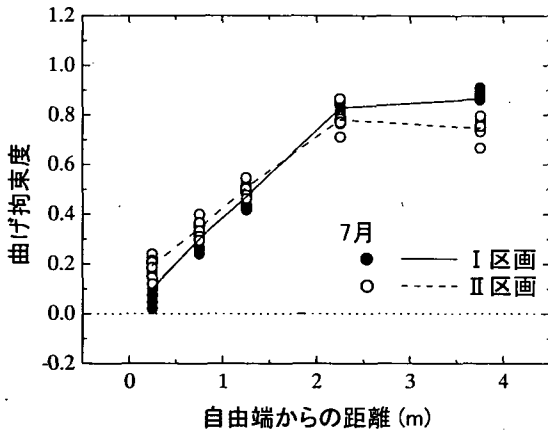
図-21 軸方向拘束度の季節的変動



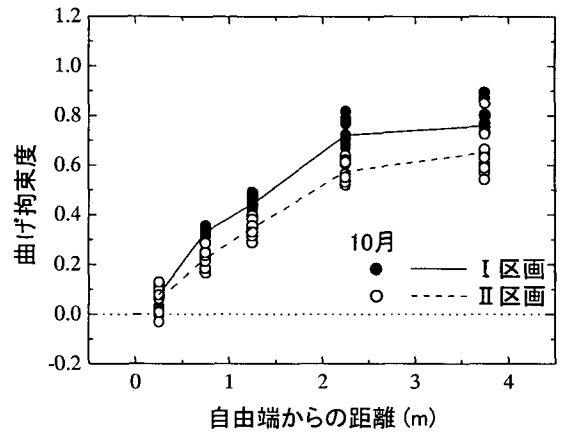
(a) 1月



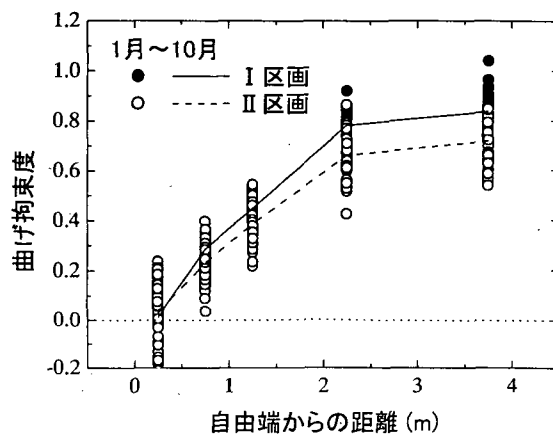
(b) 4月



(c) 7月

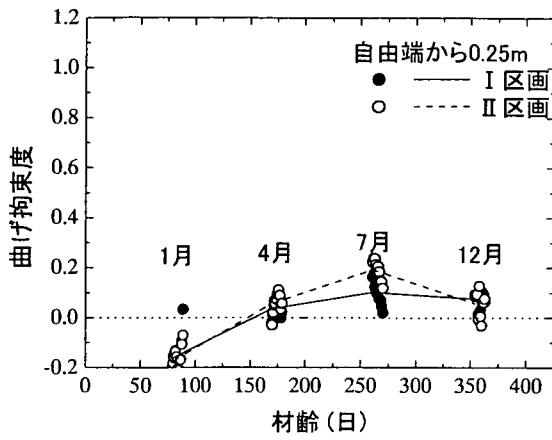


(d) 10月

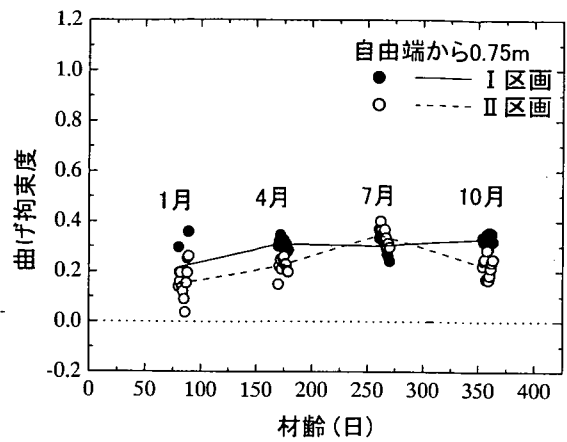


(e) 1月~10月

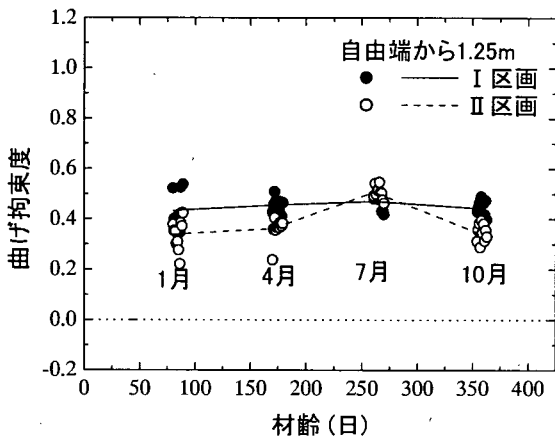
図-22 自由端からの距離と曲げ拘束度の関係



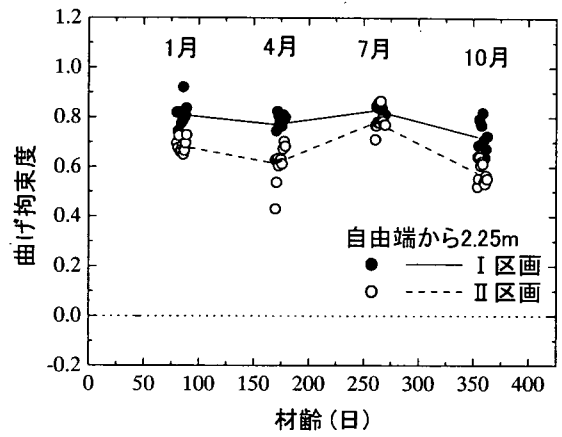
(a) 自由端から 0.25m



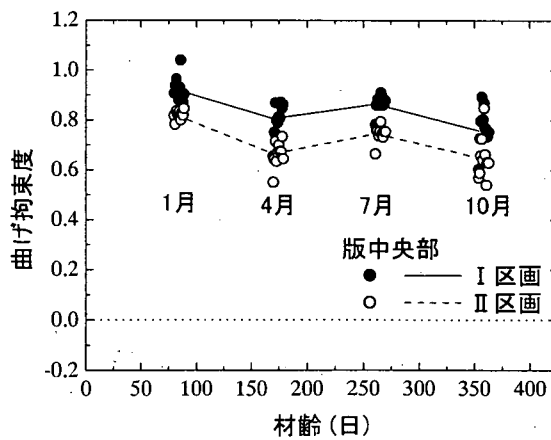
(b) 自由端から 0.75m



(c) 自由端から 1.25m



(d) 自由端から 2.25m



(e) 版中央部

図-23 曲げ拘束度の季節的変動

図-22 に自由端からの距離による曲げ拘束度を、図-23 に季節ごとの曲げ拘束度を示す。曲げ拘束度は自由端からの距離が大きくなるに従って増大し、版中央部において最大の曲げ拘束度となっていることがわかる。また季節ごとの変化では、版の自由端に近い位置では夏季に最大の曲げ拘束を受けるのに対し、版中央部では冬季において最大となっている。年間を通してみると、版中央部において、一貫養生を施したⅡ区画の曲げ拘束度は、散水養生を施したⅠ区画よりも若干小さな曲げ拘束度となっており、一貫養生を適用することが、曲げ拘束度の点では不利に働いていることはない。これは、Ⅰ区画におけるコンクリート版厚方向の温度差が、Ⅱ区画よりも大きかったためと考えられる。

#### 4.3 変形の拘束によるコンクリート版の応力

以上に記したコンクリートの収縮ならびに温度変化によるコンクリート版の変形が拘束されることに起因して発生する応力について試算した。

##### (1) 収縮に起因する応力

コンクリート版の自由な収縮が拘束されることによりコンクリート版内に発生する収縮拘束応力を推定してみる。収縮拘束応力は、式(5)により算出されるが、右辺の値が直接測定できないことから、ここでは  $R_{Ny}$  として式(2)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  $\phi$  を用いた有効弾性係数（クリープ係数  $\phi$  は両区画とも 1.5<sup>8)</sup>）を、 $\epsilon_{sh}$  としては小型供試体の収縮ひずみを用いた。

$$\sigma_{sh} = -R_{Ny} E_e \epsilon_{sh} \quad (5)$$

ここに、

- $\sigma_{sh}$  : コンクリート版の収縮拘束応力 (N/mm<sup>2</sup>)
- $R_{Ny}$  : 長期温度変化による軸方向拘束度 (式(2)より)
- $E_e$  : 有効弾性係数 (N/mm<sup>2</sup>, =  $E/(1+\phi)$ )
- $\epsilon_{sh}$  : 小型供試体の収縮ひずみ ( $1 \times 10^{-6}$ )

区画別、深さ別の収縮拘束応力を図-24 に示す。収縮拘束応力は、長期温度変化による軸方向拘束度が小さいことから、両区画とも非常に小さい圧縮応力となっており、横方向収縮目地間隔に関しては、収縮拘束応力は何ら問題がないものと考えられる。

##### (2) 温度変化に起因する応力

コンクリート版の温度変化によって変形が拘束される際に発生する拘束応力を算出した。拘束応力は、コン

クリート版自体の質量や路盤との間の摩擦力等が原因でコンクリート版が拘束されることによって発生する外部拘束応力（軸方向拘束応力、曲げ拘束応力）と、コンクリート版厚方向の温度分布の非線形性によって発生する内部拘束応力に分けられる。具体的には軸方向拘束応力を長期と短期に分け、長期軸方向拘束応力では冬季（2月）から夏季（7月）までの温度変化量と長期軸方向拘束度に着目して計算を行い、短期軸方向拘束応力、曲げ拘束応力、内部拘束応力で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とき（7:00頃）から最大となるとき（15:00頃）までのひずみ変化量に対して、図-25のように計算される拘束ひずみに弾性係数（長期の場合はクリープ係数を考慮した有効弾性係数）を乗じることで拘束応力を算出した<sup>9)</sup>。

##### a) 軸拘束応力

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を図-26 に示す。短期軸方向拘束応力は版下面において式(6)より算出した。

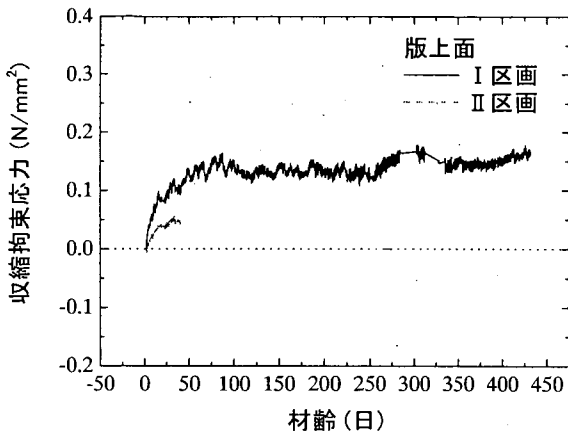
$$\sigma_{Nd} = E(\Delta\epsilon_N - \Delta\epsilon_{TN}) \quad (6)$$

ここに、

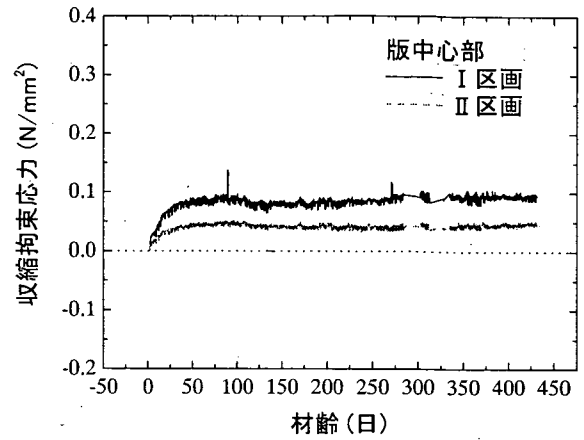
- $\sigma_{Nd}$  : 短期軸方向拘束応力 (N/mm<sup>2</sup>)
- $E$  : 弾性係数 (N/mm<sup>2</sup>)
- $\Delta\epsilon_N$  : 実ひずみ変化量の版厚方向分布により求めた compensation line の軸成分 ( $1 \times 10^{-6}$ )
- $\Delta\epsilon_{TN}$  : 温度ひずみ変化量の版厚方向分布により求めた compensation line の軸成分 ( $1 \times 10^{-6}$ )

短期軸方向拘束応力は、一日を通してみると、コンクリート版内の平均温度が上昇する日中にかけては、Ⅰ区画で最大 0.8N/mm<sup>2</sup>、Ⅱ区画で最大 0.6N/mm<sup>2</sup> の圧縮応力となっている。逆にコンクリート版内の平均温度が下降する深夜から早朝にかけて引張応力となるが、その値は非常に小さい。後述する曲げ拘束応力、内部拘束応力が版下面において引張側で卓越する日中にかけては、短期軸方向拘束応力は圧縮応力の蓄積となるために、ひび割れ発生の観点からは特に問題とはならないと考えられる。

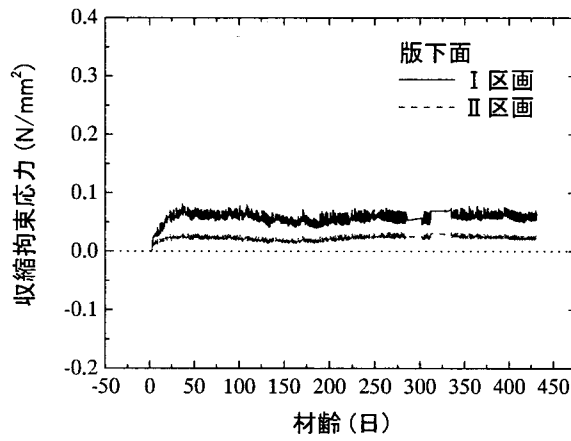
次に、コンクリート版の収縮による変形も含んだ、長期温度変化による軸方向の変形が拘束されることによって発生する長期軸方向拘束応力を算定した。具体的には式(7)によって計算される。



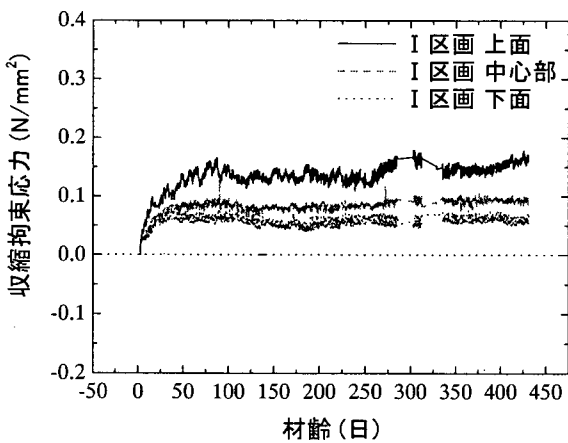
(a) 版上面



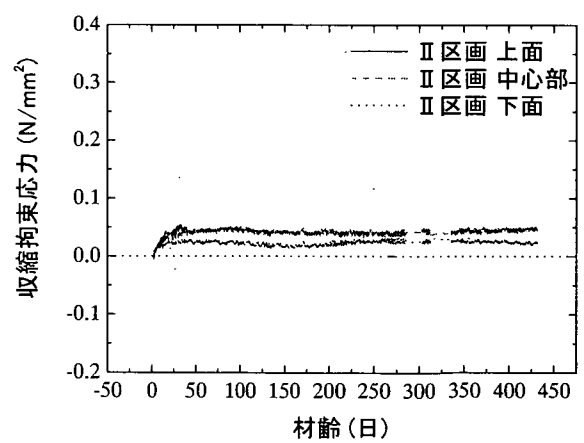
(b) 版中心部



(c) 版下面



(d) I 区画



(e) II 区画

図-24 コンクリート版の収縮拘束応力

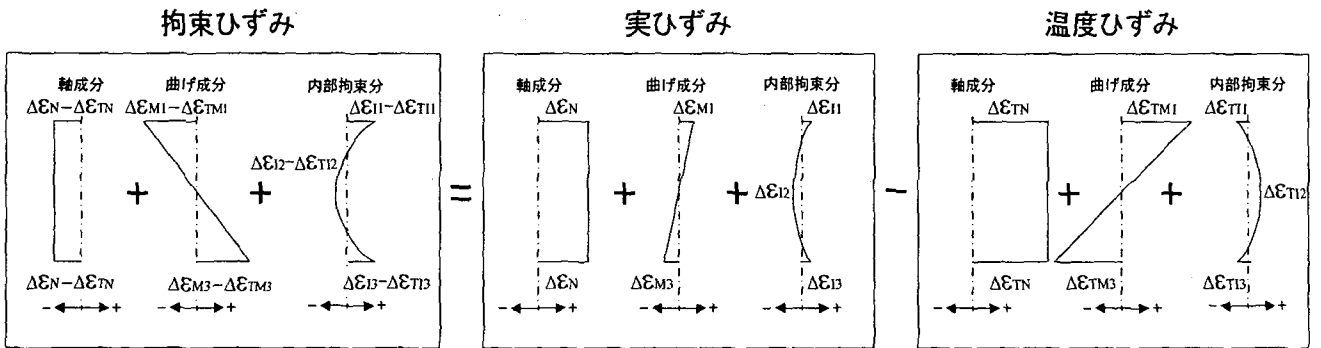
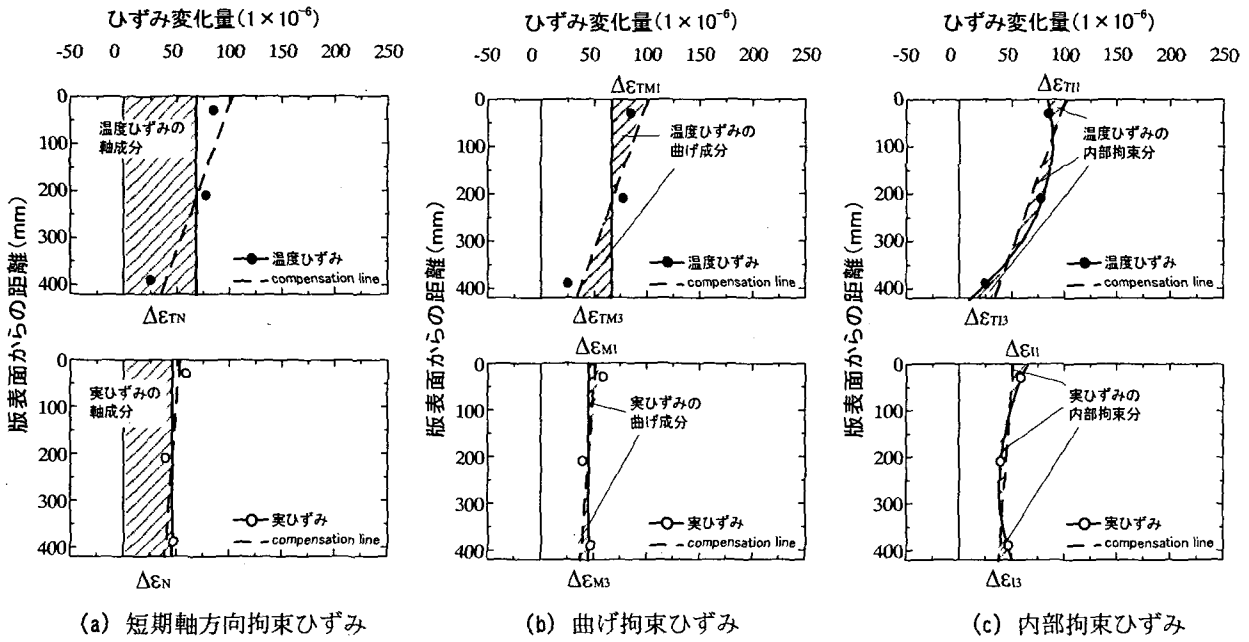
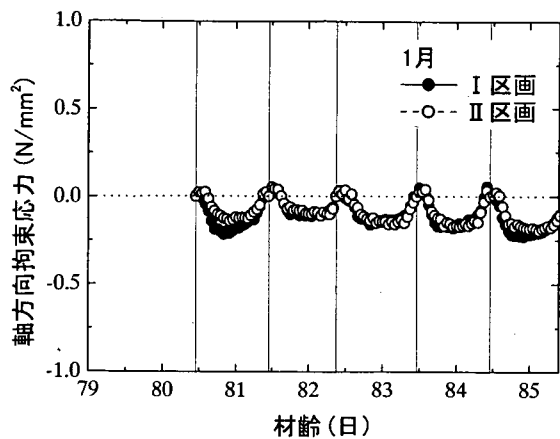


図-25 拘束ひずみ, 拘束応力の計算方法

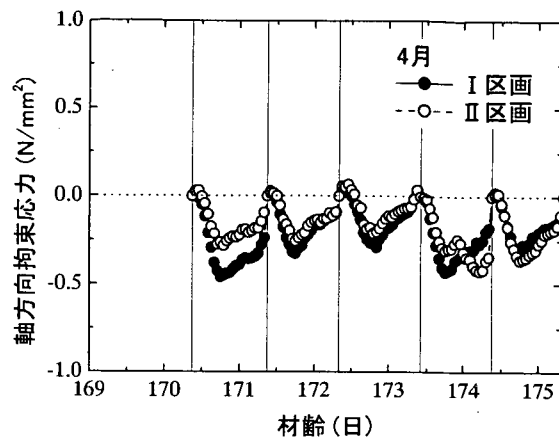
表-16 長期軸方向拘束応力

	I 区画	II 区画
2月1日 15:00 温度 (°C)	6.5	7.5
7月1日 14:00 温度 (°C)	33.4	33.3
長期温度変化量 (°C)	26.9	25.8
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	6.94
有効弾性係数 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	14400	14400
長期軸方向拘束度	0.062	0.026
長期軸方向拘束応力 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	-0.16	-0.07

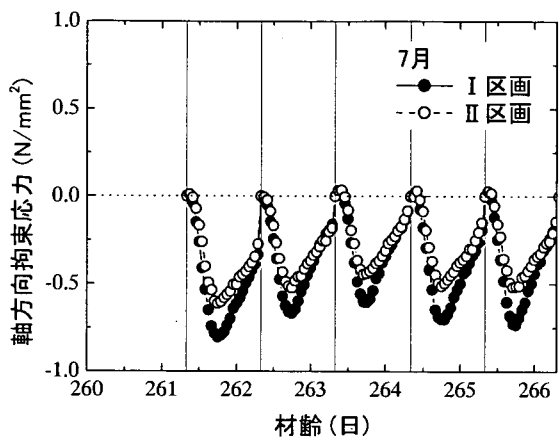




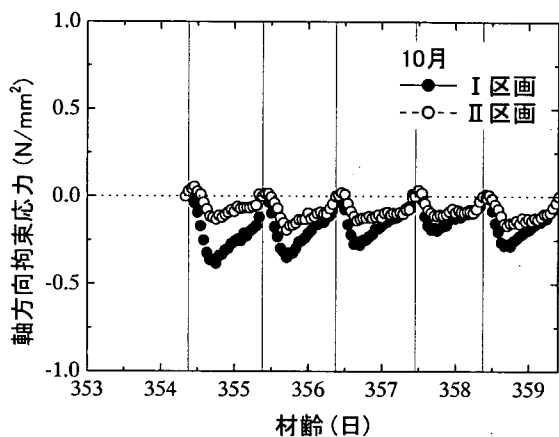
(a) 1月



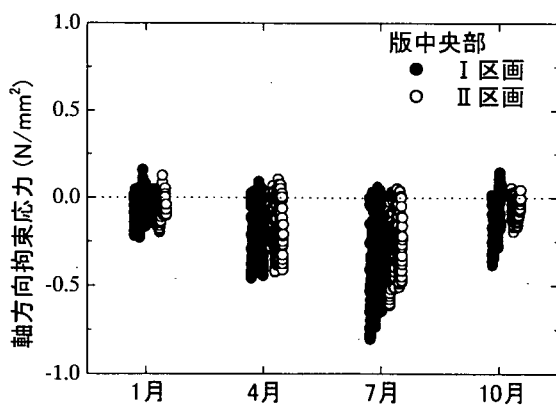
(b) 4月



(c) 7月



(d) 10月



(e) 1月~10月

図-26 短期軸方向拘束応力の季節的変動

$$\sigma_{Ny} = -R_{Ny} E_e \alpha_f \Delta T \quad (7)$$

ここに、

- $\sigma_{Ny}$  : 長期軸方向拘束応力 (N/mm<sup>2</sup>)
- $R_{Ny}$  : 長期温度変化による軸方向拘束度 ((2)式より)
- $E_e$  : 有効弾性係数 (N/mm<sup>2</sup>,  $= E/(1+\phi)$ )
- $\alpha_f$  : コンクリート版自由端における見かけの熱膨張係数 ( $1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )
- $\Delta T$  : 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 ( $^{\circ}\text{C}$ )

計算条件と計算結果を表-16 に示す。長期軸方向拘束応力は、Ⅰ区画においてⅡ区画の2倍程度の長期軸方向拘束応力が発生しているが、その値はコンクリートの強度と比べて非常に小さいことから、短期軸方向拘束応力と同様に、温度変化によって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は、ひび割れ発生観点からは特に問題にならないと考えられる。

b) 曲げ拘束応力

図-27 に、コンクリート版下面に生じる曲げ拘束応力の日中の変動、季節ごとの変動を示す。コンクリート版面に生じる曲げ拘束応力は式(8)において計算される。

$$\begin{aligned} \sigma_M &= E(\Delta\varepsilon_{M3} - \Delta\varepsilon_{TM3}) \\ &= -E(\Phi_M - \Phi_{TM}) \cdot h/2 \quad (8) \end{aligned}$$

ここに、

- $\sigma_M$  : 曲げ拘束応力 (N/mm<sup>2</sup>)
- $E$  : 弾性係数 (N/mm<sup>2</sup>)
- $\Delta\varepsilon_{M3}$  : 実ひずみの曲げ成分 ( $1 \times 10^{-6}$ )
- $\Delta\varepsilon_{TM3}$  : 温度ひずみの曲げ成分 ( $1 \times 10^{-6}$ )
- $\Phi_M$  : 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 ( $1 \times 10^{-6}/\text{mm}$ )
- $\Phi_{TM}$  : 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 ( $1 \times 10^{-6}/\text{mm}$ )
- $h$  : コンクリート版厚 (mm)

コンクリート版下面に発生する曲げ拘束応力は、版厚方向の温度差が増大する朝から午後にかけて、コンクリート版内の温度勾配が正(上面温度>下面温度)となり、コンクリート版の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いる。また、温度差が減少する夜から深夜にかけては、コンクリート版内の温度勾配が負(上面温度<下面温度)となり、コンクリート版の下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圧縮応力が発生している。年間を通

してみると、Ⅰ区画、Ⅱ区画とも一日の版厚方向の温度差が大きくなる夏季において曲げ拘束応力が最大となり、Ⅰ区画で2.3N/mm<sup>2</sup>、Ⅱ区画で2.2N/mm<sup>2</sup>と、コンクリート版の設計基準曲げ強度(5N/mm<sup>2</sup>)と比較しても、非常に大きな引張応力が生じている。しかしながら両区画の差は0.1N/mm<sup>2</sup>程度であることから、養生方法の違いが、コンクリート版に発生する曲げ拘束応力に及ぼす影響は小さいと考えられる。

c) 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分布が非線形分布となることにより、コンクリート版内に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ことから<sup>9)</sup>、温度応力によるひび割れの原因となりうる。ここでは養生方法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。

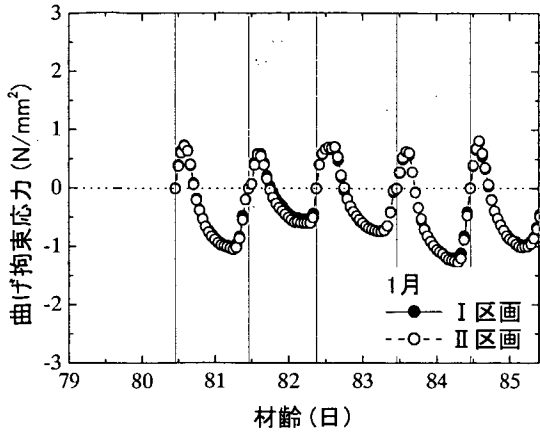
コンクリート版下面に生じる内部拘束応力は具体的には式(9)によって計算される。

$$\begin{aligned} \sigma_I &= E(\Delta\varepsilon_{I3} - \Delta\varepsilon_{TI3}) \\ &= E\{\Delta\varepsilon - (\Delta\varepsilon_N - \Phi_M \cdot h/2)\} \\ &\quad - E\{\Delta\varepsilon_T - (\Delta\varepsilon_{TN} - \Phi_{TM} \cdot h/2)\} \quad (9) \end{aligned}$$

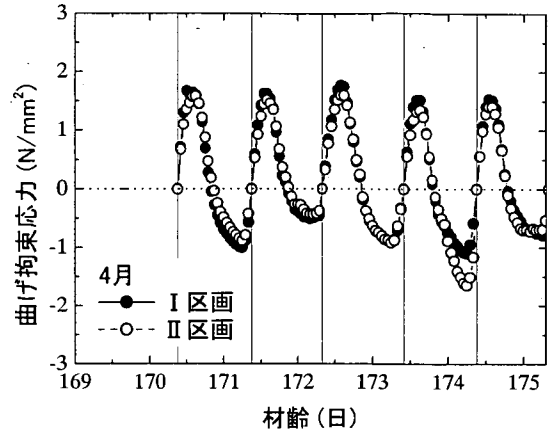
ここに、

- $\sigma_I$  : 内部拘束応力 (N/mm<sup>2</sup>)
- $\Delta\varepsilon_{I3}$  : 実ひずみの内部拘束分 ( $1 \times 10^{-6}$ )
- $\Delta\varepsilon_{TI3}$  : 温度ひずみ内部拘束分 ( $1 \times 10^{-6}$ )
- $\Delta\varepsilon$  : 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 ( $1 \times 10^{-6}$ )
- $\Delta\varepsilon_T$  : 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 ( $1 \times 10^{-6}$ )

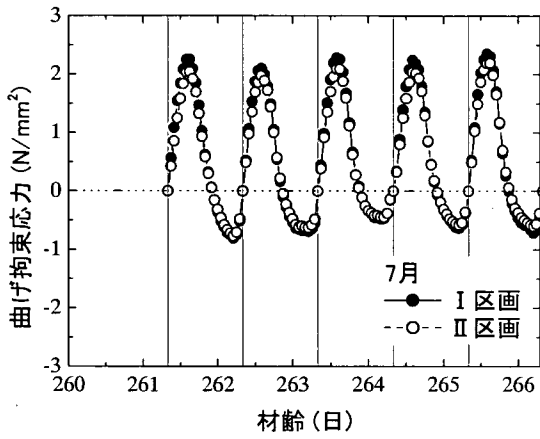
図-28 にコンクリート版下面に生じる内部拘束応力の日中の変動、季節ごとの変動を示す。コンクリート版下面に発生する内部拘束応力は、版表面の温度が上昇する朝から午後にかけて圧縮応力となり、版表面の温度が下降する夕方から深夜にかけては引張応力となる傾向にある。年間を通してみると、Ⅰ区画、Ⅱ区画とも春季において内部拘束応力が最大となり、Ⅰ区画、Ⅱ区画とも最大1.8N/mm<sup>2</sup>と同程度であるが、夏季、秋季においては若干Ⅰ区画の方に大きな内部拘束応力が発生している。これは、Ⅰ区画のコンクリート版厚方向の温度差がⅡ区画よりも若干大きく、版厚方向の温度ひずみ分布と実ひずみ分布の非線形性が大きくなっていることが原因と考えられる。



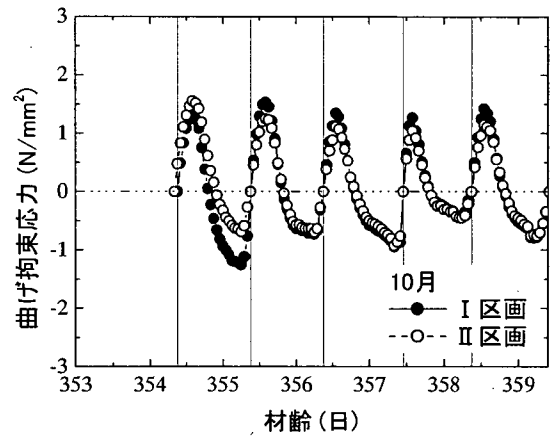
(a) 1月



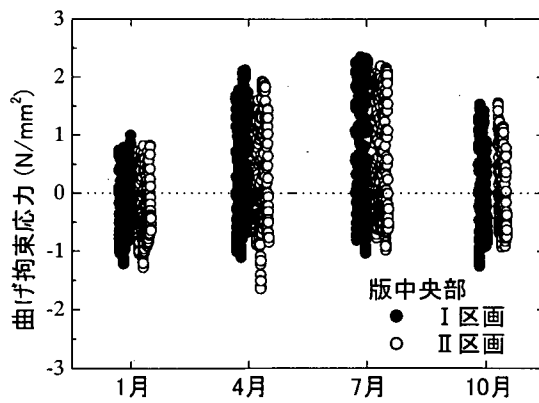
(b) 4月



(c) 7月

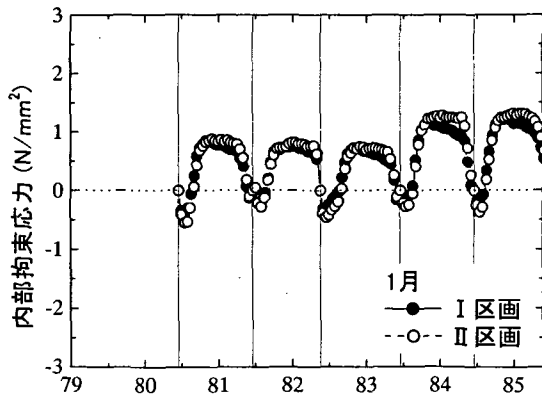


(d) 10月

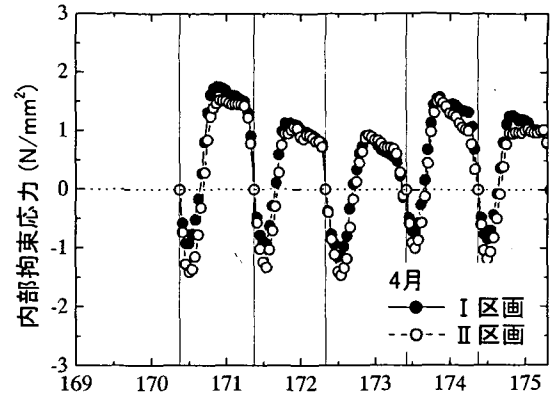


(e) 1月~10月

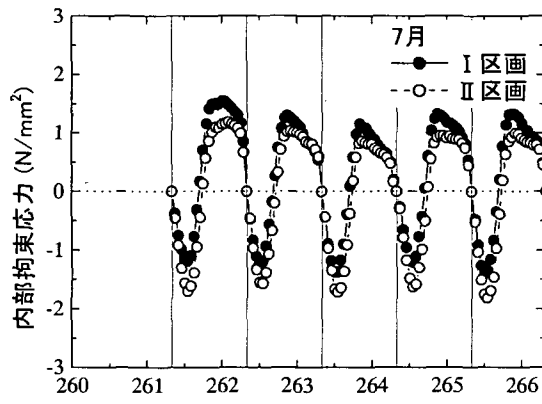
図-27 曲げ拘束応力の季節的変動



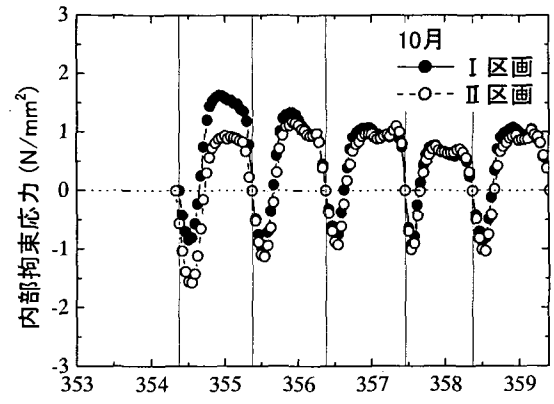
(a) 1月



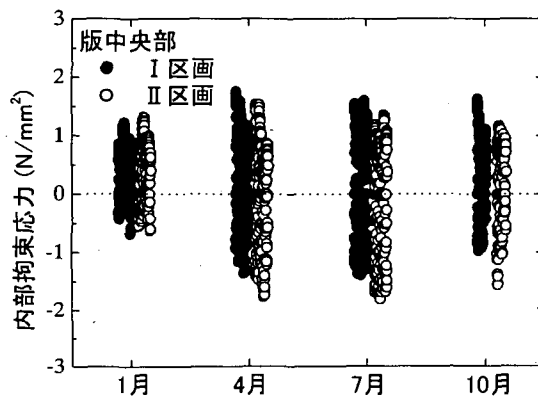
(b) 4月



(c) 7月

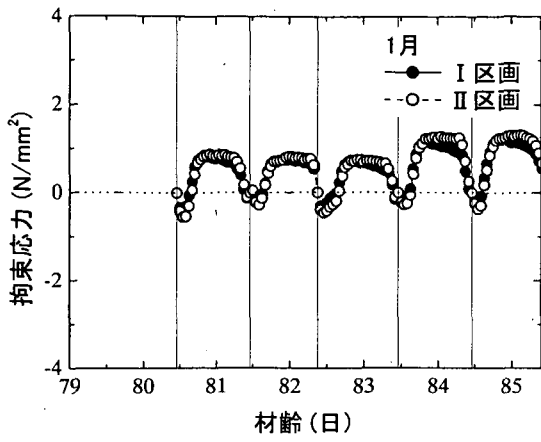


(d) 10月

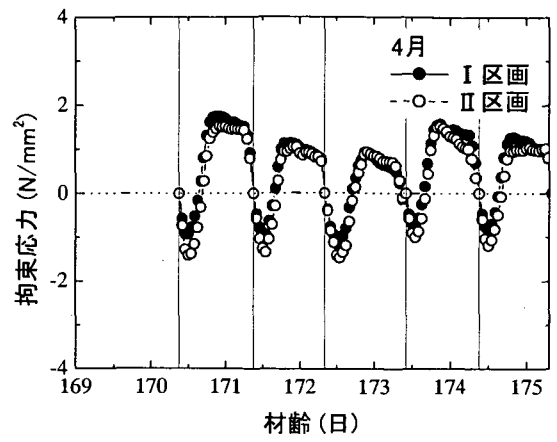


(e) 1月~10月

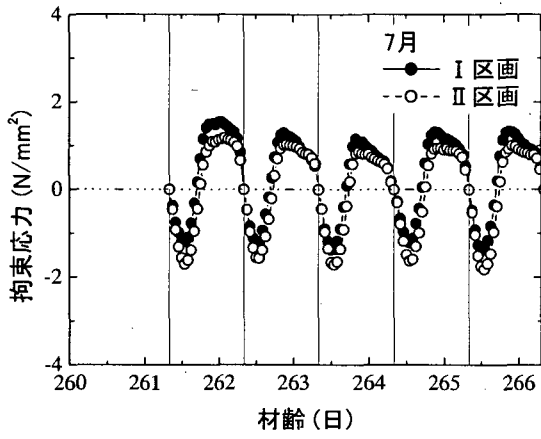
図-28 内部拘束応力の季節的変動



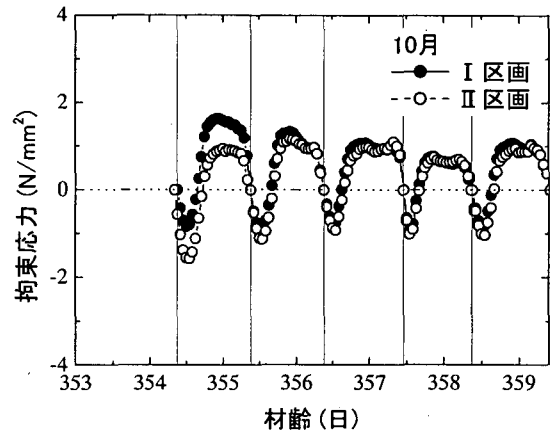
(a) 1月



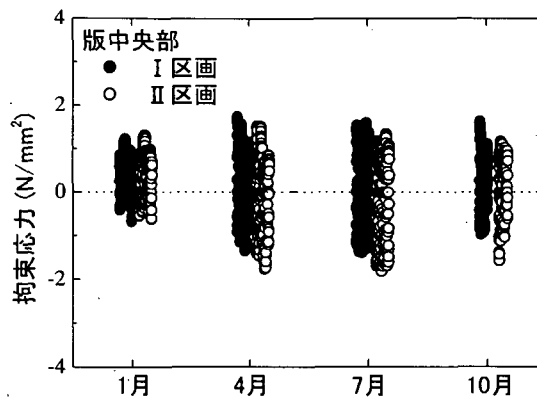
(b) 4月



(c) 7月

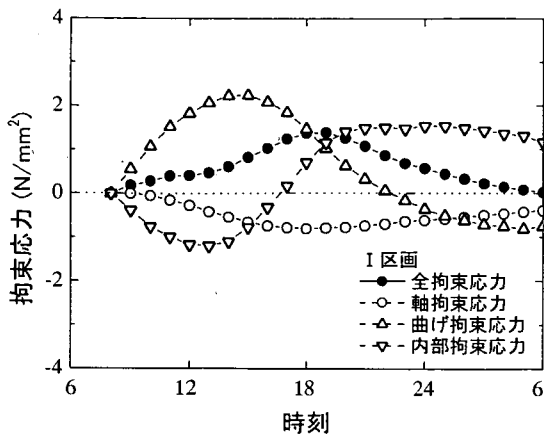


(d) 10月

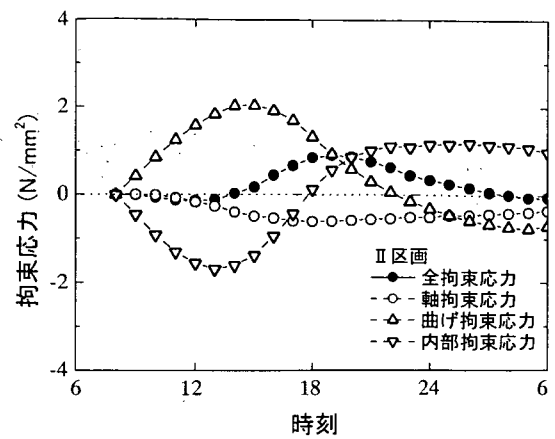


(e) 1月~10月

図-29 拘束応力の季節的変動



(a) I区画



(b) II区画

図-30 各拘束応力の日変動

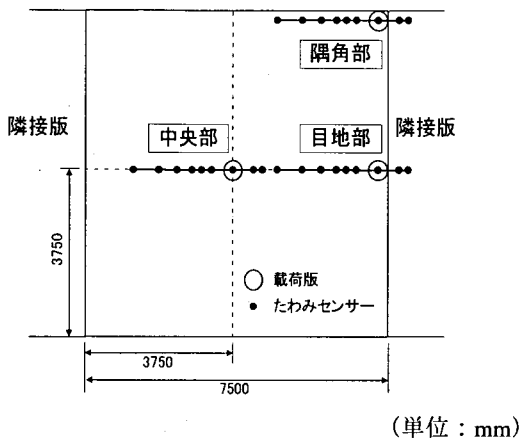


図-31 FWDによるたわみ測定位置

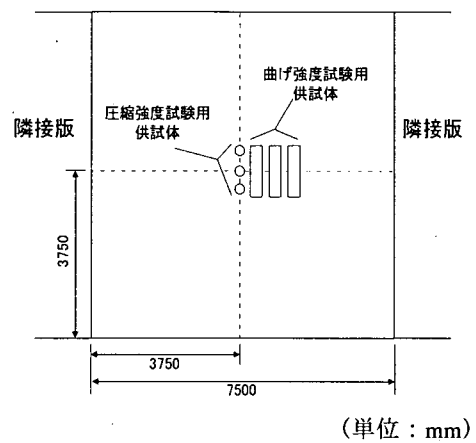


図-32 供試体切取位置

d) 全拘束応力

図-29 に日温度変化によって版下面に発生する拘束応力 (短期軸方向拘束応力, 曲げ拘束応力, 内部拘束応力) の季節的変動を, 図-30 に拘束応力の夏季における日変動を示す。

季節別に見ると, 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。また, 季節によらず, 両区画には同等の拘束応力が発生していることがわかる。

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, 日中の温度上昇時には曲げ拘束応力の絶対値が大きく, 結果として温度上昇時の拘束応力は引張応力となる。拘束応力は夕方になり, I区画, II区画とも  $1.5\text{N/mm}^2$  程度の拘束応力が発生していることがわかる。このことから, 両区画に働く拘束応力にはほとんど差がない。

被膜養生剤による一貫養生を施すことに起因して, 散

水養生を施した場合よりも大きな拘束応力が発生するには至っていないことから, コンクリートの版厚, 横方向目地間隔に関しては, 一般のコンクリート舗装に適用されている現行のものをそのまま適用しても問題ないと考えられる。

4.3 コンクリート版の構造評価

(1) FWDによるたわみ測定

I区画, II区画の舗装の構造強度を評価するために, 施工後約一年が経過した時点で, FWDによるたわみ測定を実施し, コンクリート版のたわみを測定した。図-31に示すように, コンクリート版の中央部, 目地部, 隅角部の3箇所において, FWDの最大荷重を200kNに設定し, 同一箇所でも4回のたわみ測定を行い, 1回目のものを棄却した残りの3回のたわみデータを採用した。

FWDによるたわみ測定結果として, 表-17にFWDの

$D_0$  たわみと目地部、隅角部における荷重伝達率  $E_{ff}'$  を示す。荷重伝達率は式(10)により計算される。

$$E_{ff}' = \frac{D_{45}}{(D_0 + D_{45})/2} \times 100 \quad (10)$$

ここに、 $D_0$ 、 $D_{45}$  は、それぞれ、載荷版（直径 45cm）を目地近傍に設置したときの載荷版中心、目地（縁部）をはさんで載荷版中心から 45cm 離れた点のたわみである。

両区画では  $D_0$  の値、荷重伝達率ともにほとんど差がなく、目地部、隅角部における荷重伝達率も良好であることから、養生方法の違いがコンクリート舗装の構造強度に及ぼす影響はほとんどないものと考えられる。

表-17 FWD によるたわみ測定結果

区画	載荷位置	$D_0$ (mm)	$E_{ff}'$ (%)	表面温度 ( $^{\circ}$ C)	気温 ( $^{\circ}$ C)
I	中央部	0.176	—	19.9	23.8
	目地部	0.231	91	19.6	25.0
	隅角部	0.422	78	20.3	25.6
II	中央部	0.174	—	19.4	19.6
	目地部	0.230	92	20.1	19.8
	隅角部	0.443	78	19.8	20.3

(2) 切取供試体による強度試験

FWD によるたわみ計測と同時期に I、II 両区画の中央部から曲げ強度試験用供試体と圧縮強度試験用供試体をそれぞれ 3 本ずつ採取し、強度試験を行った。供試体採取位置を図-32 に示す。両区画のコンクリート版には鉄網が設置されていることから、供試体は鉄網の上部と下部の部分を使用して整形した。

a) 圧縮強度

圧縮試験用供試体の端面はダイヤモンドカッターで研磨し、JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に従って強度を測定した。この場合、供試体の直径に対する高さの比が 1 以上である場合には、JIS A 1107「コンクリートからのコア及びはりの切取り方法並びに強度試験方法」の補正方法に従ったが、1 以下である場合は参考文献<sup>10)</sup>の補正方法に従った。

試験結果を表-18 に示す。両区画ともコンクリート版上部よりも下部の供試体のほうが強度が高いものの、両区画における圧縮強度の差はほとんどなく、被膜養生剤を用いた一貫養生の場合でも、十分な強度が発現していることが確認された。

b) 曲げ強度

曲げ強度試験結果を表-19 に示す。曲げ強度試験用供試体は施工面を側方にした状態で実施した。両区画とも版上部に比べて、版中心部、版下部において採取した供試体のほうが曲げ強度が高いことがわかる。これは、版上部のほうが大気に曝されているために、養生中の水分蒸発量が大きく、版中心部以深よりも強度発現が不十分であった可能性がある。しかしながら、コンクリート版表面からの深さに関わらず、両区画とも設計基準曲げ強度を十分に満たしていることが確認された。

両区画の曲げ強度は、全体的に II 区画のほうが I 区画よりも大きく、平均値では II 区画のほうが 7% 程度高い曲げ強度であった。これは図-6 に示した室内試験結果からもわかるように、散水養生の場合、散水を終了した以降は乾燥状態に曝されるのに対し、被膜養生剤による一貫養生の場合は、施工直後より継続してコンクリート版の乾燥を防ぐ働きがあるために、長期的には II 区画のほうが曲げ強度が高くなったものと考えられる。

4.4 まとめ

試験施工における試験結果をまとめると以下のとおりである。

- ① 自然環境下における小型供試体の収縮ひずみでは、養生方法の違いによる影響は、短期的、長期的にもほとんど現れていない。また、自由な収縮が阻害されることでコンクリート版に発生する収縮拘束応力は両区画において非常に小さいことから、横方向収縮目地間隔に関しては、一般の空港コンクリート舗装で用いられているものを適用可能であると考えられる。
- ② 一貫養生を施した区画における、コンクリート版内の日温度変化によって発生する短期軸方向拘束応力は、コンクリート版下面における曲げ拘束応力、内部拘束応力が最大となる日中には圧縮応力となる。また、深夜にかけては引張応力となるが、その応力は非常に小さい。また、長期温度変化によって発生する長期軸拘束応力も非常に小さいことから、ひび割れ発生の観点からは、一貫養生を適用した場合でも、横方向収縮目地間隔としては、一般の空港コンクリート舗装で用いられているものを適用可能であると考えられる。
- ③ コンクリート版下面に発生する曲げ拘束応力は、両区画とも、版厚方向の温度差が大きくなる夏季の日中に最大の引張応力となっている。また、一貫養生を施した区画においても、散水養生を施した区画と

表-18 圧縮強度試験結果

区画	採取位置	番号	高さ (mm)	補正係数	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )			
					(補正前)	(補正後)	平均	全平均
I	上	1	103.8	0.80	61.8	49.6	48.5	58.5
		2	107.3	0.81	60.2	48.8		
		3	108.8	0.81	57.9	47.1		
	下	1	177.9	0.94	69.9	65.8	68.4	
		2	178.1	0.94	69.6	65.6		
		3	178.7	0.94	78.3	73.9		
II	上	1	122.2	0.84	49.5	41.5	48.0	55.7
		2	120.7	0.84	59.7	49.9		
		3	115.9	0.83	63.5	52.5		
	下	1	179.9	0.95	75.9	71.8	63.5	
		2	180.9	0.95	61.3	58.1		
		3	180.9	0.95	63.9	60.6		

表-19 曲げ強度試験結果

区画	採取位置	番号	幅 (mm)	高さ (mm)	曲げ強度 (N/mm <sup>2</sup> )		
					測定値	平均	全平均
I	上	1	103.20	149.40	5.45	5.96	6.69
		2	107.52	149.71	5.58		
		3	122.99	149.35	6.84		
	中	1	151.87	147.73	7.37	7.13	
		2	151.88	149.95	7.70		
		3	149.76	151.75	6.32		
	下	1	113.13	149.62	6.65	6.99	
		2	109.00	150.25	8.30		
		3	100.92	148.12	6.02		
II	上	1	119.12	150.22	6.73	6.40	7.16
		2	107.92	149.18	5.77		
		3	117.17	149.57	6.71		
	中	1	154.16	150.52	7.40	7.52	
		2	154	146.92	7.99		
		3	150.07	151.78	7.16		
	下	1	106.56	150.55	7.34	7.57	
		2	93.4	147.79	7.83		
		3	86.08	150.93	7.53		



比較して、曲げ拘束応力は同程度である。

- ④ 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、版厚方向の温度ひずみ分布、実ひずみ分布の非線形性が大きくなる春季の夕方に最大の引張応力となっている。また夏季と秋季では、一貫養生を施した区画においては、散水養生を施した区画よりも内部拘束応力は小さい。
- ⑤ コンクリート版下面に発生する全拘束応力は、夏季には一貫養生を施した区画のほうが、散水養生を施した区画よりも若干小さい。このことから、航空機荷重による応力を考慮しても、版厚の設計法としては現行のものを適用可能であると考えられる。
- ⑥ FWDによるたわみ測定では、養生方法の違いによる差は認められない。また、コンクリート版から採取した供試体による強度試験結果から、長期的な曲げ強度は、一貫養生を施した区画のほうが、散水養生を施した区画よりも7%程度大きくなっていることが確認された。

## 5. 結論

空港コンクリート舗装における被膜養生剤の適用性に関しては、次のようにまとめられる。

- ① 室内でのコンクリート収縮試験から、一貫養生を適用した場合の初期収縮ひずみは、散水養生を適用した場合よりも大きい。しかしながらその差は材齢の経過とともに小さくなり、養生剤の選択によっては、一貫養生を施した場合の収縮ひずみが、散水養生を施した場合の90%程度に抑えられることがわかった。
- ② 室内での曲げ強度試験から、一貫養生を適用した場合は、材齢28日強度は、散水養生を適用した場合よりも10%程度低い曲げ強度となっているが、材齢91日では、その差は非常に小さくなることがわかった。
- ③ コンクリートの収縮量に関しては、水分損失量との相関が高いことから、養生剤、塗布濃度の決定に際しては、水分損失量試験を用いることが有効であることがわかった。
- ④ 一貫養生を適用した場合の、コンクリート版の軸方向拘束応力に関しては、試験舗装での観測から、短期的、長期的温度変化のいずれに対しても、軸方向拘束応力は非常に小さいことがわかった。
- ⑤ コンクリート版の日温度変化に起因する版厚方向の拘束応力に関しては、試験舗装での観測から、一貫養生を適用した場合でも、散水養生を適用した場合より大きな拘束応力は発生していないことがわかった。

た。

- ⑥ コンクリート版の長期的な曲げ強度に関しては、試験舗装からの切取供試体に対する強度試験から、一貫養生を適用した場合でも十分な強度が得られていることがわかった。また、試験舗装におけるFWDによるたわみ測定から、コンクリート舗装の構造強度は、一貫養生を適用した場合でも、散水養生を適用した場合と同等であることがわかった。
- ⑦ 試験舗装における長期の温度とひずみの観測から、コンクリート版に発生する拘束応力は、一貫養生を適用した場合でも、散水養生を適用した場合と大差がないことがわかった。このことから、コンクリート版に設ける横方向収縮目地の間隔、コンクリート版厚としては、一般のコンクリート舗装における現行のものをそのまま適用可能であると考えられる。

## 6. おわりに

本研究では、空港コンクリート舗装施工に関わる作業量、工事費用の観点から、養生工における被膜養生剤を用いた一貫養生の適用性を検討した。

コンクリート舗装の施工では、施工直後のコンクリート強度が十分発現していない時期に、コンクリートの自己収縮や乾燥収縮による収縮ひずみが増大することから、施工直後にひび割れが生じる恐れがあるものと思われる。このことから、適切な養生によって水分の急激な蒸発を抑え、収縮を抑制することが非常に重要となる。初期の収縮に関する室内試験結果からは、一貫養生を施した場合、散水養生を施した場合よりも大きな収縮ひずみが発生すること、養生剤の塗布濃度が低い場合は、濃度が高い場合と比較して収縮ひずみが大きくなることが明らかになっており、一貫養生を適用する場合には、使用する養生剤、塗布濃度、養生開始時期には注意が必要である。

コンクリート版厚の設計法では、航空機荷重によって発生する荷重応力だけでなく、温度変化によって発生する拘束応力を考慮する必要がある。今回製作した試験舗装での長期観測から、温度変化によって発生する拘束応力は、一貫養生を適用した場合でも、散水養生を適用した場合と比較して大きくないことがわかった。このことから、空港舗装構造設計要領において、設計反復作用回数に従って示されているコンクリートの安全率としては、現行のものをそのまま適用できると考えられ、一貫養生を適用した場合でも、版厚設計法としては、従来のものを適用可能であると考えられる。

コンクリート版の強度に関して、今回行った室内試験

では、一貫養生を適用した場合、材齢 28 日強度は散水養生の場合と比較して若干低くなるが、材齢が経過すると散水養生を適用した場合の強度との差が小さくなることがわかった。

このことから、コンクリート版新設工事に一貫養生を適用する場合、施工後から交通開放までの間に十分な期間が確保できるならば、材齢 28 日曲げ強度が若干低くても、材齢経過による強度の増加が見込めるために、版厚、設計基準曲げ強度は従来のものをそのまま適用できる可能性があり、今後、実証試験を経て規準化する所存である。

また、既存のコンクリート版の補修工事では早期の交通開放が望まれることから、一貫養生を用いた場合でも散水養生を用いた場合と同等の材齢 28 日曲げ強度を確保する必要がある。今回行った室内実験における曲げ強度試験結果からは、材齢 28 日において散水養生における強度の 90%程度となっていることから、現時点では、一貫養生を適用する場合には、水セメント比を低減することによって、設計基準曲げ強度を 10%程度高く設定することが必要になると考えられる。しかし、水セメント比を低減することで、コンクリートの自己収縮が大きく発現する可能性もあるために、今後、実証試験によって詳細に検討する必要がある。

なお、参考として、一貫養生を適用した場合と散水養生を適用した場合のコンクリート舗装工事費を試算し、比較を行った。使用材料、コンクリート配合、施工幅、コンクリート版厚、路盤厚等の設計条件は今回の試験施工と同一とした。この試算では、一貫養生を適用した場合では、散水養生を適用した場合に必要となる養生マット敷設作業、14 日間の散水にかかる人件費等が削減できることから、全体の工事費を 2%程度削減できるという結果となった。

本研究の成果を活用することにより、現行の基準では散水による後期養生を行うことと規定されている養生工の省力化を図ることが可能であると考えられる。

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。

(2003 年 2 月 14 日受付)

#### 参考文献

- 1) 土木学会コンクリート委員会：コンクリートの力学特性に関する調査研究報告，コンクリートライブラリーNo.69，社団法人土木学会，p79，1991
- 2) 土木学会コンクリート委員会：コンクリート構造の時間依存性変形・ひび割れ評価－現状と今後の課題－，コンクリート技術シリーズ No.38，社団法人土木学会，pp44-47，2000
- 3) Standard Test Method for Water Retention by Concrete Curing Materials, Standard No. C156, ASTM, 1977
- 4) セメント協会舗装技術専門委員会：養生剤を用いたコンクリート舗装の養生合理化に関する調査・研究，社団法人セメント協会，pp17，2001
- 5) 潮先正博，片脇清士，小林茂敏：コンクリート用被膜養生剤の評価，コンクリート工学年次論文報告集，pp1005-1008，1990
- 6) Standard Specification for Liquid Membrane-Forming Compounds for Curing Concrete, Standard No. C309, ASTM, 1982
- 7) 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，pp251-278，1995
- 8) 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，pp134，1996
- 9) 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，1964
- 10) 社団法人セメント協会：コア供試体の圧縮強度におよぼす各種要因の影響

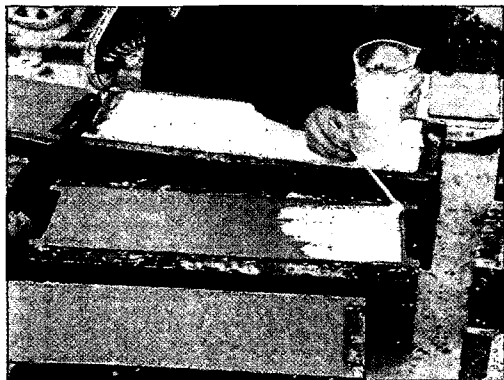
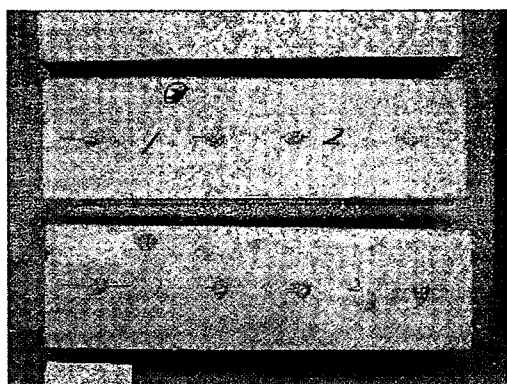


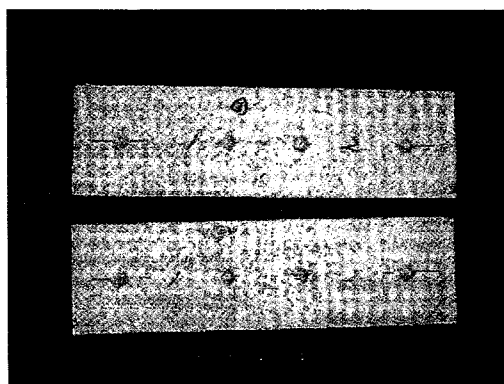
写真-1 供試体打設面への養生剤塗布



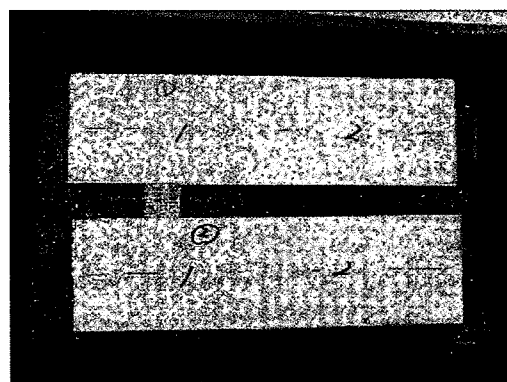
写真-2 アルミテープによる供試体周面の被覆



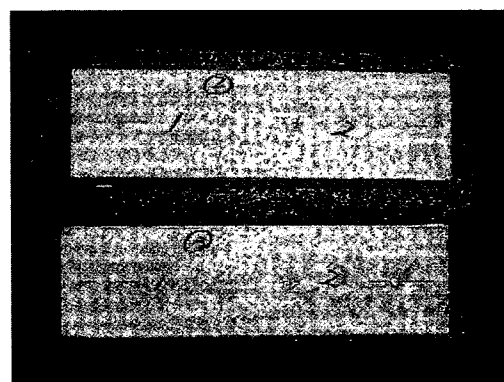
(a) 養生剤 A



(b) 養生剤 B

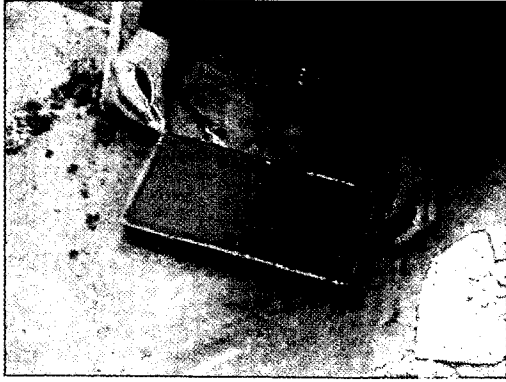


(c) 養生剤 C

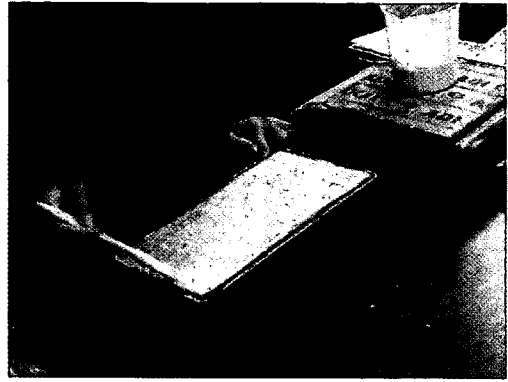


(d) 養生剤 D

写真-3 一貫養生を施したコンクリート収縮試験用供試体

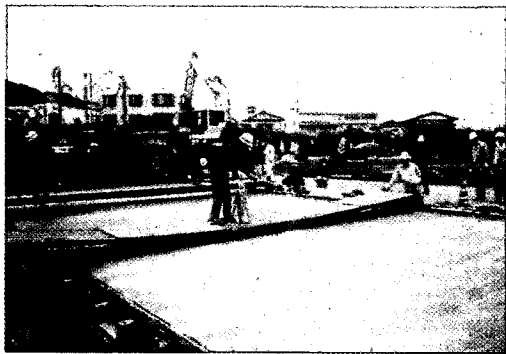


(a) 供試体境界のシール状況

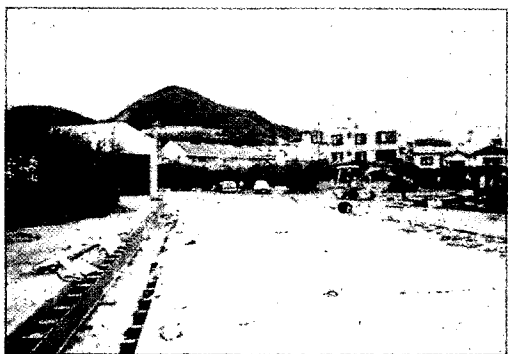


(b) 養生剤の塗布

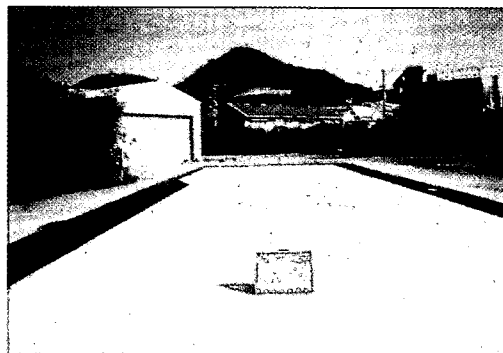
写真-4 水分損失量試験用供試体の作成



(a) 被膜養生剤の塗布（Ⅱ区画）



(b) 養生マットの敷設（Ⅰ区画）



(c) 完成後の舗装表面（最手前-Ⅰ区画，奥-Ⅱ区画，最奥-その他の区画）

写真-5 試験施工の養生作業

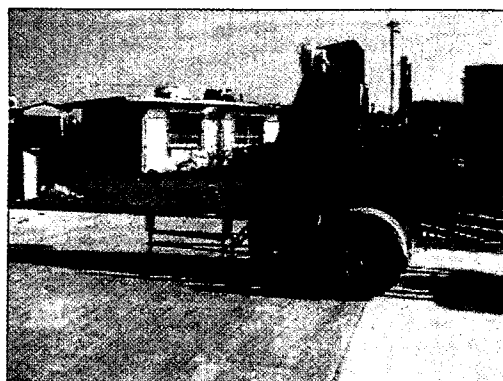


写真-6 FWDによるたわみ計測（Ⅱ区画目地部）