

論文

[2123] 高強度鉄筋を用いてプレストレスを導入した格子状変厚合成スラブの曲げ性状

正会員 鈴木計夫 (大阪大学建築工学科)

正会員 大野義照 (大阪大学建築工学科)

正会員 松谷輝雄 (鴻池組技術研究所)

正会員○太田 寛 (鴻池組設計部)

1. はじめに

従来、プレストレストコンクリートの緊張材にPC鋼材よりも低強度の普通鉄筋を用いることは、コンクリートの乾燥収縮やクリープによる緊張力の損失が大きくなるために、全く考えられなかった。しかし、常時荷重下でひびわれの発生を許容するプレストレスト鉄筋コンクリート(以下、PRCと略記)の出現によって、普通鉄筋を緊張材として用いることも可能となった。すなわち、ひびわれ発生後はコンクリートの乾燥収縮やクリープによる緊張材の応力の減少はなくなるからである。また、プレキャスト部材でひびわれ発生までに長時間経過するような場合でも同じ条件下におかれた無導入の鉄筋コンクリート部材と比較すると鉄筋緊張の効果は確実に残っている⁽¹⁾⁽²⁾。一方、高強度鉄筋は部材耐力の上昇等の点に関しては多くの利点を有しているが、常時荷重下で強度に見合う高応力を許すと過大なひびわれやたわみを生じるという問題があり、その有効利用の範囲が狭められている。

本研究は、高強度鉄筋自身を緊張することでその有効利用を図ることを目的とする研究の一環であり、高強度の普通鉄筋(SD490; $\sigma_y=5000\sim6000\text{kgf/cm}^2$)を緊張してプレテンション方式でプレストレスを導入したプレキャストの格子状変厚板(以下、ハーフスラブという)と、その上に現場打ちコンクリート(以下、トッピングコンクリートと呼ぶ)を打設した合成一体化床板(以下、合成スラブという)の実用性について実験的に研究を行ったものである。

2. 実験計画

2.1 実験概要

高強度鉄筋を主筋に使用し、その鉄筋を緊張したハーフスラブとそれを用いた合成スラブ(図-1)の他に、比較のため高強度鉄筋を無緊張で使用したハーフスラブとそれを用いた合成スラブを製作し曲げ載荷試験を行った。また高強度鉄筋を緊張した合成スラブについては、長期載荷試験を行い長期的な曲げ性状も調べた。

2.2 使用材料

ハーフスラブ、トッピングコンクリート共に早強ポルトランドセメントを用いたレデーミクストコンクリート(スランプ12cm、粗骨材最大粒径20mm)を使用した。呼び強度はそれぞれ350 kgf/cm^2 および210 kgf/cm^2 である。その力学的性質を表-1に示す。鉄筋はハーフスラブ主筋にSD490のD13(降伏点: $\sigma_y=6180\text{kgf/cm}^2$ 、引張強度: $f_t=7800\text{kgf/cm}^2$)、合成スラブ端部上端筋にSD295のD13($\sigma_y=3960\text{kgf/cm}^2$ 、 $f_t=5680\text{kgf/cm}^2$)とD10($\sigma_y=3710$

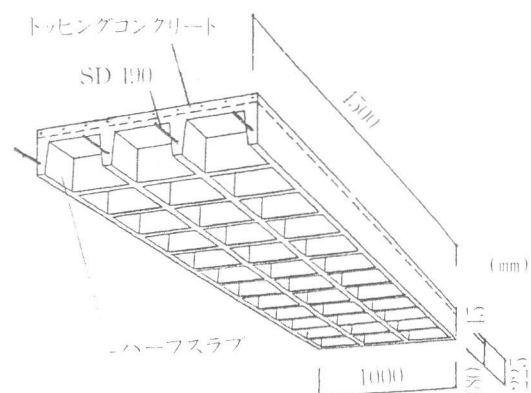


図-1 合成スラブ試験体

kgf/cm²、 $f_t=5190\text{kgf/cm}^2$)を用いた。

2. 3 試験体の種類

試験体の種類とその断面形状を表-2に示す。試験体No.

1、2は幅1m、長さ約4.6m

ハーフスラブ試験体で、No.1

の主筋の目標緊張応力度は

3000kgf/cm²、No.2の主筋は無

緊張である。試験体No.3、4

はそれぞれ試験体No.1、2と

同種のハーフスラブに厚さ

45mmのトッピングコンクリートを打設した合成

スラブ試験体である。またNo.5は長期載荷用の

試験体であり断面は試験体No.3と同じである。

なおハーフスラブ上面にはトッピングコンクリートとの一体性を保つためにシャーコッター

(33×33×12@66mm)を設けた。

2. 4 載荷および測定方法

① 曲げ載荷試験 試験体の端部支持状態は、ハーフスラブ試験体 (No.1, 2) は単純支持、合成スラブ試験体 (No.3, 4) は固定支持とし3等分点載荷を行なった (図-2)。

載荷はハーフスラブ試験体 (No.1, 2) および合成スラブ試験体 (No.3, 4) のそれぞれの設計荷重 $P_d=1.74\text{tonf}$ および 0.74tonf と $1.35P_d$ 、

$1.7P_d$ および主筋SD490の降伏点を 5000kgf/cm^2 として計算される終局曲げモーメントに

相当する荷重 (以下、設計 P_u とする) において荷重を零まで各1回繰返し、その後は

曲げ破壊まで2~3回の繰返し載荷を行った。スラブのたわみはストローク200mm

の摺動型変位計で、ひびわれ幅は検長6cmのコンタクトストレインゲージで、鉄筋ひ

ずみは検長2cmのワイヤストレインゲージで測定した。

② 長期載荷試験 図-3に載荷方法を示す。スパンは曲げ載荷試験と同じく

4.5mとし、両端は鉄筋コンクリートのマッシブなフレームにより固定状態とした。

表-1 コンクリートの力学的性質

試 験 体		材 令 (日)	圧縮強度 (kg f/cm ²)	割裂強度 (kg f/cm ²)	弾性係数 (kg f/cm ²)
ハーフ スラブ	No. 1	7 (導入時)	314	—	2.27×10 ⁵
	No. 2	31 (載荷時)	391	36.0	2.27×10 ⁵
		39 (載荷時)	382	34.1	2.64×10 ⁵
	No. 3 No. 4 No. 5	7 (導入時)	324	—	2.35×10 ⁵
		42	427	—	2.93×10 ⁵
		75 (載荷時)	427	38.6	2.68×10 ⁵
		91 (長期載荷時)	427	—	2.86×10 ⁵
		365	394	—	2.77×10 ⁵
		730	429	33.3	2.94×10 ⁵
トッピング コンクリート		18	234	19.4	2.16×10 ⁵
	28	259	—	2.21×10 ⁵	
	90	288	—	2.42×10 ⁵	
	180	286	—	2.23×10 ⁵	
	365	308	—	2.62×10 ⁵	
	750	283	22.6	2.26×10 ⁵	

表-2 試験体の種類

試験体	断面
ハーフスラブ	No.1 (3000kgf/cm ²) D6@150 D6@100 (端部のみ) D6@100 1-D13 (SD490) [50] 30 150 180 (mm)
	No.2 [無緊張] [50] 30 150 180 (mm)
合成スラブ	No.3及び No.5 (3000kgf/cm ²) D13(端部) D10(中央) D6@150 D6@100 (端部のみ) D6@100 1-D13 (SD490) [50] 30 150 225 (mm)
	No.4 [無緊張] [50] 30 150 225 (mm)

[] 内数値は鉄筋の目標緊張応力度を示す。

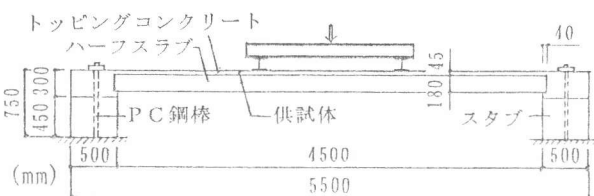


図-2 載荷装置 (合成スラブ)

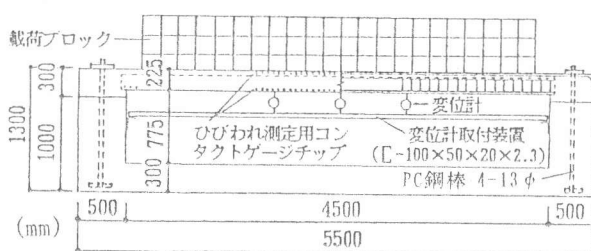


図-3 載荷装置 (長期載荷)

載荷荷重は中央下端の縁応力が支点間長さ10mの住宅に本スラブを使用した場合とほぼ等しくなるように決定し、コンクリートブロック（15.8 kg/個）を3段階

とした（ $w \approx 580 \text{ kgf/m}^2$ ）。なお試験は屋外のテント内にて行った。

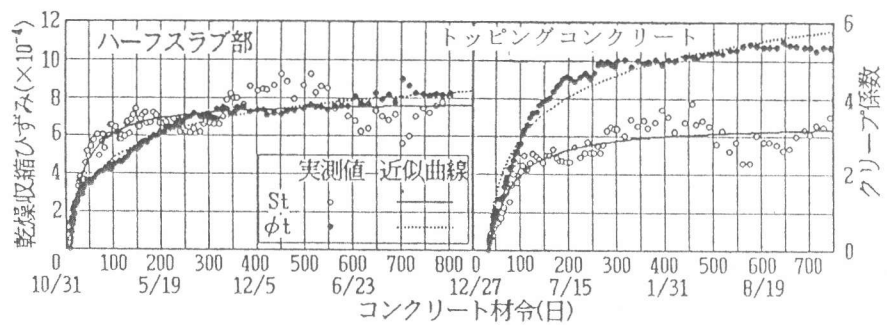


図-4 乾燥収縮とクリープ係数

3. 実験結果と考察

3.1 導入時から載荷時までの有効プレストレス

図-4にハーフスラブのコンクリートとトッピングコンクリートの乾燥収縮およびクリープ係数と材令の関係を示す。また図-5に試験体No.1およびNo.2の載荷時までの鉄筋ひずみ（SD490）の経時変化を、表-3にプレストレスの損失量および有効率を示す。プレストレスを導入した試験体No.1、No.3、No.5は、コンクリートの乾燥収縮とクリープによって時間の経過とともに鉄筋の引張ひ

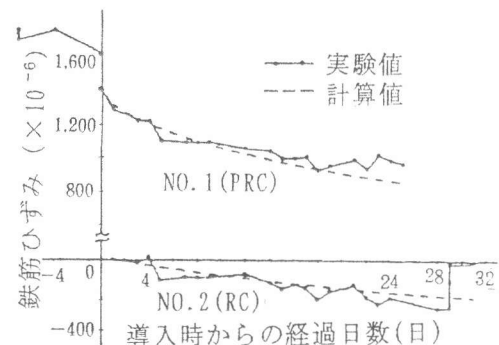


図-5 載荷までの鉄筋ひずみの変化

ずみは減少しプレストレスの損失が生じている。プレストレスを導入していない試験体No.2ではコンクリートの乾燥収縮によって鉄筋に圧縮ひずみが生じ負のプ

表-3 プレストレスの損失量および有効率

試験体	初引張力 (t f)	導入直後の引張力 (t f)	導入～載荷の期間 (日)	載荷時の引張力 (t f)	プレストレスの損失		プレストレス有効率
					測定値 (t f)	計算値 (t f)	
No.1	18.7	15.0	25	10.4	4.6	5.9	0.69(0.56)
No.2	0	0	30	-2.9	-2.9	-2.3	—
No.3	19.9	15.7	80	7.2	8.5	9.8	0.46(0.36)
No.4	0	0	73	— *D	— *D	-3.6	—
No.5	18.1	16.6	84	8.7	7.9	9.8	0.52(0.48)

*D) 試験体No.4は15日以降測定値に異常あり者

レストレスが発生している。プレストレス導入の有無による存置期間の影響の差異を比較すると、導入応力によって生じるクリープの分だけ両試験体のコンクリートに生じた応力差は小さくなるが、最終状態においてもプレストレスの効果は残っている。また実測値とクリープ速度法によって計算した値は良く一致している。

3.2 曲げ載荷挙動

本節以降、本文および図中に示す荷重は、試験体自重、配力梁自重を含まない載荷荷重である。

(1) たわみ性状

① ハーフスラブ試験体 ハーフスラブ試験体の荷重-変形曲線を図-6示す。また表-4にひびわれ荷重（ P_{cr} ）、降伏荷重（ P_y ）、および平均ひびわれ間隔（ L_{av} ）を示す。試験体No.1（PRC）の中央部下端のひびわれ発生荷重は2.3tonfであったのに対し、試験体No.2（RC）では試験体セット時にすでにひびわれが発生していた。設計荷重（載荷荷重で0.78tonfに対応）

付近でのたわみは試験体No.1で2mm程度であるのに対し、試験体No.2では約6mmにまで増大した。載荷時のプレストレス平均導入応力(σ_g)は14kgf/cm²程度であるがたわみ制御にプレストレスが有効に働いていることが確認された。ひびわれ発生以後の挙動は両試験体ともほぼ同じで、5.0tonfで主筋が降伏し、6.0tonfで圧縮側コンクリートの圧壊に至り、終局荷重に達した。

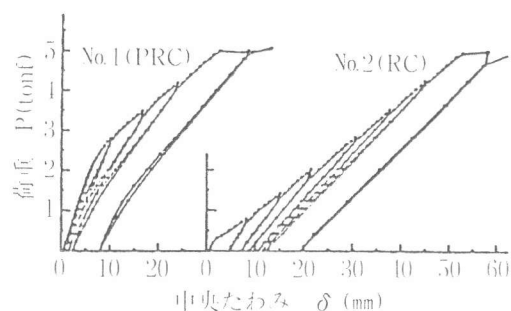


図-6 ハーフスラブのP-δ関係

② 合成スラブ試験体 図-7に合成スラブ試験体の荷重-変形曲線を示す。表-5にひびわれ荷重(P_{cr})、降伏荷重(P_y)、および平均ひびわれ間隔(L_{av})を示す。固定端上端のコンクリートのひびわれ発生荷重は試験体No.3(PRC)が4.4tonf、試験体No.4(RC)が3.0~4.0tonfでNo.3の方が大きく、また固定端上端において急激にひびわれが拡大した荷重についても、試験体No.3の方が試験体No.4に比べて若干大きい値を示した。降伏荷重、最大荷重は両試験体ともほぼ等しく、載荷は固定端下端の隅角部コンクリートの圧壊で終了した。

表-4 ハーフスラブの実験値と計算値

試験体	ひびわれ荷重 P_{cr} (tf)		降伏荷重 P_y (tf)		平均ひびわれ間隔 L_{av} (cm)	
	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値	計算値
No.1	2.3	2.21	4.9	4.71	7.95	7.84
No.2	0.2	<0	5.0	4.71	9.14	7.84

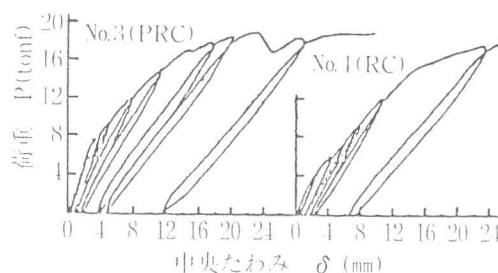


図-7 合成スラブのP-δ関係

(2) ひびわれ性状

① ハーフスラブ試験体 図-8に荷重-最大ひびわれ幅関係を示す。除荷時に試験体No.1のひびわれはプレストレスの効果で完全に閉じるのに対し、試験体No.2では0.1mm程度の

表-5 合成スラブの実験値と計算値

試験体	ひびわれ荷重 P_{cr} (tf)				降伏荷重 P_y (tf)				平均ひびわれ間隔 L_{av} (cm)	
	端部		中央部		端部		中央部		実験値	計算値
	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値	計算値		
No.3	4.4	2.64	8.2	6.19	16.5	9.92	18.6	14.9	9.90	7.84
No.4	3.0 4.0	2.64	0.8	<0	15.0 15.4	9.92	19.0	14.9	8.90	7.84

の残留ひびわれが生じた。図-9に荷重-平均ひびわれ幅関係を示す。試験体No.1とNo.2のひびわれ幅はプレストレス導入の有無によるひびわれ荷重の差をほぼ維持し、直線的に増大した。

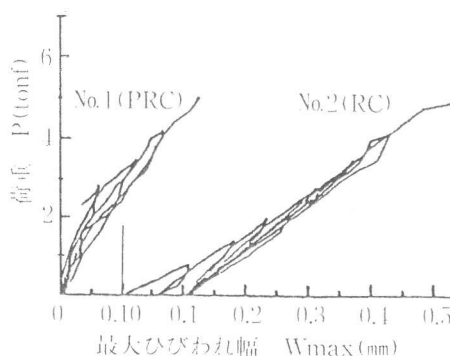


図-8 P-Wmax関係

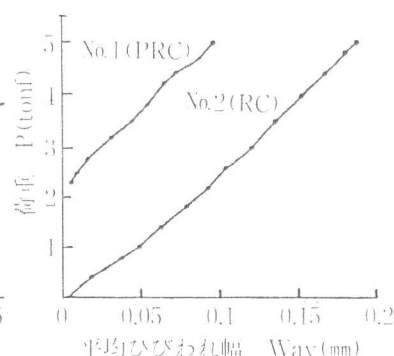


図-9 P-Wav関係

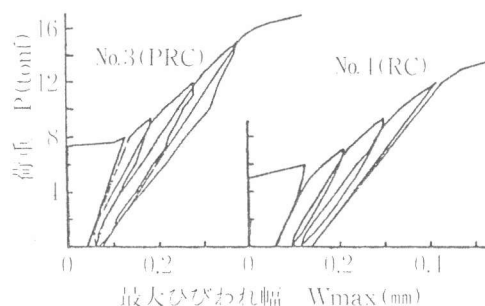
② 合成スラブ試験体 図-10に固定端上端

の荷重－最大ひびわれ幅関係を、図－11、12に中央部等曲げ区間の荷重－最大ひびわれ幅関係と荷重－平均ひびわれ幅関係を示す。プレストレスの有無によりひびわれ発生および拡大荷重と除荷時の残留ひびわれ幅に大きな差が生じた。試験体No. 4は0.8tonfで中央部下端にひびわれが発生し、その後固定端上端にひびわれが発生(3.0~4.0tonf)後、端部の鉄筋ひずみの増大によってそのひびわれが拡大(5.0tonf)した。一方、試験体No. 3は固定端上端にひびわれが発生(4.0tonf)後、そのひびわれが拡大(7.3tonf)し、8.2tonfで中央部下端にひびわれが発生した。試験体No. 3ではプレストレスによってハーフスラブのひびわれが制御され、No. 4より大きな断面の剛性を保持できたため固定端のひびわれの拡大も制御できた。試験体No. 3とNo. 4の中央部の最大および平均ひびわれ幅はともに両試験体のひびわれ荷重の差によるひびわれ幅を維持して増大し、No. 3では除荷時にプレストレスによるひびわれの閉合も認められた。図－13に最終ひびわれ状況を示す。中央部では試験体No. 4はNo. 3に比べてひびわれの発生箇所が広範囲にわたり、また比較的早い荷重段階で側面上部にまで達している。打継部に沿うひびわれは固定端上端に発生したひびわれが打継部に達した後、四隅の端部側面のうち1ヶ所において、試験体No. 3 (PRC)では荷重約10tonf、試験体No. 4 (RC)では約12tonfで観察されたが、中央部のたわみの増大や鉄筋応力の増加といった現象は認められず、曲げ終局状態まで一体性は保たれていた。

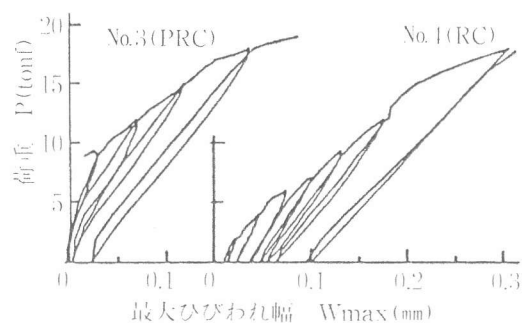
3. 3 長期曲げ載荷挙動

(1) たわみ性状

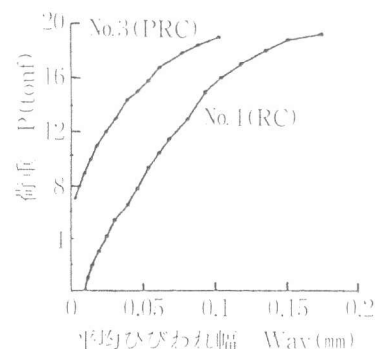
ブロック積置き完了時の中央たわみは0.49mmで両端固定として計算した弾性たわみ0.46mmとほぼ一致した。図－14に載荷からの日数と中央3点のたわみの関係を示す。たわみの増加量は載荷後92日までは、0.77mmと緩やかであったが、その後後述のような端部上端におけるひびわれの発生にともなう固定支持端からの鉄筋の抜け出しや固定度の低下によって、92日から211日までの119日間で2.67mm急増した。なお、両端における0.1mmの鉄筋の抜け出しによる中央たわみの増加は、約0.7mmとなる。その後の増加は僅かであり、709日目では中央たわみは4.21mmとなり、実測の弾性たわみの8.57倍となった。



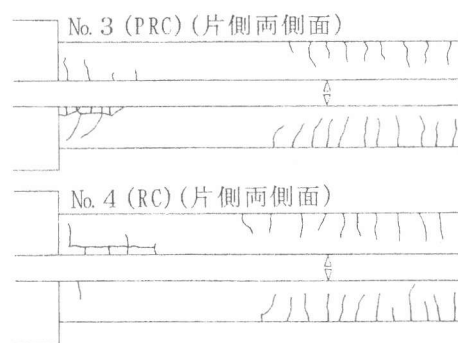
図－10 P－ W_{max} 関係（端部）



図－11 P－ W_{max} 関係（中央）



図－12 P－ W_{av} 関係（中央）



図－13 ひびわれ状況図（最終状況）

(2) ひびわれ性状

図-15にひびわれ状況図を示す。中央部下端、端部上端とも载荷による初期ひびわれは生じなかった。中央部下端については、その後709日を経過した時点においてもひびわれは発生していないが端部上端においては载荷後3日でひびわれが発生した。ひびわれは四隅ともスラブとスタブの付け根から発生し徐々に内側に進展していった。弾性計算では固定端上端の縁応力度はコンクリートの引張強度以下であるので、これはコンクリートの乾燥収縮による合成スラブの軸縮みが反力フレームに拘束されて引張応力が生じたことによるものと考えられる。なお、打ち継ぎ面にズレ、ヒラキ等のひびわれは生じていない。図-16に端部上端ひびわれ幅の経時変化を示す。材令75日からA端のひびわれ幅の急激な増加があり、たわみの進展の原因となっていることが分かる。211日以降はひびわれ幅の増加は収まり709日で最大ひびわれ幅は0.28mmであった。

4. まとめ

(1) ハーフスラブにおいて、高強度鉄筋 (SD490) を緊張してプレストレスを導入することの、たわみやひびわれ幅の制御に対する優れた効果が確認された。

(2) 合成スラブにおいて、高強度鉄筋 (SD490) を緊張したハーフスラブを用いることにより、たわみや中央下端のひびわれ幅が制御されるとともに固定端上端のひびわれ拡大が制御された。

長期载荷試験では初期にたわみの急激な変化があったがその後は安定し、弾性たわみの8.57倍の4.21mmのたわみとなった。またいずれの試験においても合成スラブとして一体の挙動を示した。

〔謝辞〕 本実験を実施するにあたり大阪大学大学院生堀裕弘氏、技官中川隆夫氏に多大な協力をいただいた。また本研究は住友金属工業(株)、東急建設(株)、フドウ建研(株)との共同研究の一環として行ったものであり、ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 鈴木計夫、大野義照、白井敏彦：高強度鉄筋を用いてプレストレスを導入したPRCはりの曲げ性状、コンクリート工学年次論文報告集、vol.9、pp.489-494、1987.6
- 2) 鈴木計夫、大野義照、白井敏彦：高強度鉄筋を用いてプレストレスを導入したPRCはりの持続荷重下における曲げ性状、コンクリート工学年次論文報告集、vol.12、pp.173-178、1990.6

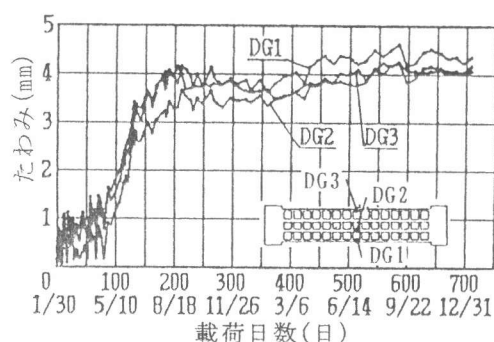


図-14 中央たわみの経時変化

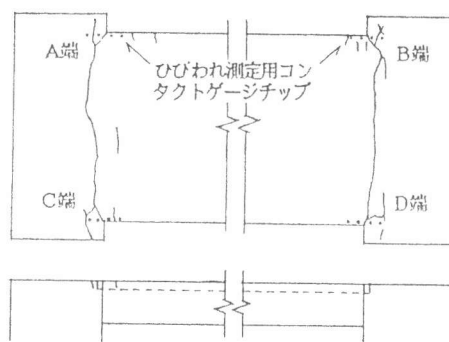


図-15 ひびわれ状況図

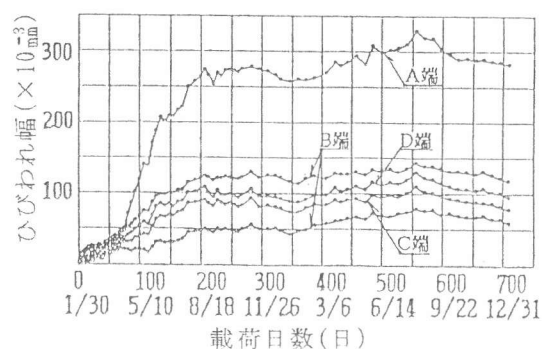


図-16 ひびわれ幅の経時変化