

## 論 文

## [2133] CFRPで補強されたプレキャスト版を永久型枠として用いた梁の曲げ特性

正会員 廣田孝夫((財)沿岸開発技術研究センター)

正会員 大即信明(東京工業大学土木工学科)

正会員○守分敦郎(東亜建設工業技術研究所)

正会員 羽渕貴士(東亜建設工業技術研究所)

## 1. はじめに

海洋環境下における鉄筋コンクリート構造物の塩害対策として、CFRPなどの腐食しない材料を使用することは大変有効な方法と考えられる。しかし、これらの素材はヤング係数や伸び性能などが鉄筋と異なるために、部材の設計上種々の配慮が必要と思われる。

ここでは、構造物の耐久性向上と施工の省力化を目的として、「CFRPを補強材としたプレキャスト型枠」に着目し、この型枠を底面に使用した梁の曲げ特性について実験を行ない検討を加えた結果を報告するものである。

## 2. 実験方法

## 2.1 供試体の種類と形状

供試体の形状を図-1に示す。供試体は、厚さ8cm(ケース3のみ5cm)のプレキャスト型枠を想定した部分と、中詰めコンクリートを想定した部分より構成されている。境界部の付着特性を評価するために、プレキャスト型枠表面は図-2に示すような「網目を付けた場合」と「骨材の洗い出しを行なった場合」の2種類の処理を行なった。また、使用したコンクリートの配合を表-1に示す。中詰めコンクリートは、打設後の乾燥収縮量がプレキャスト型枠に比較して大きくなることが予想されるため、この影響を評価するために「単位水量」や「膨張材の添加量」を変化させた3種類の配合を用いた。これらのコンクリートの力学特性値を表-2に示す。

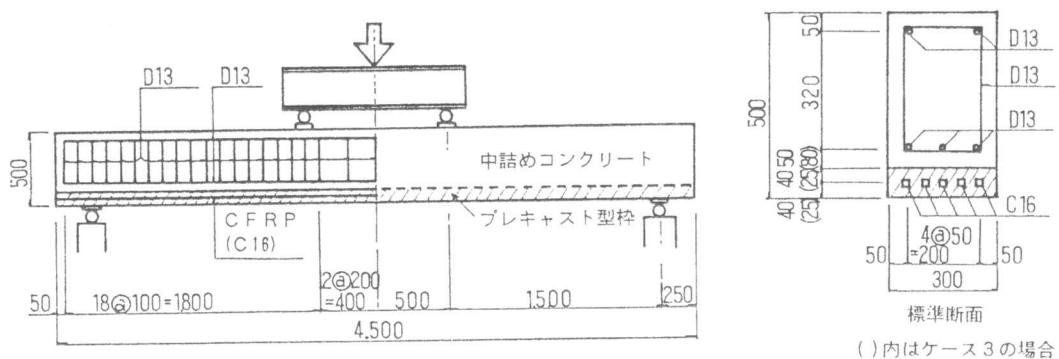


図-1 供試体の形状

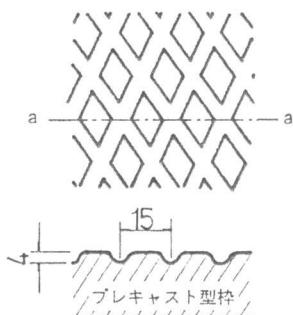


図-2 打継面処理方法(網目状の型)

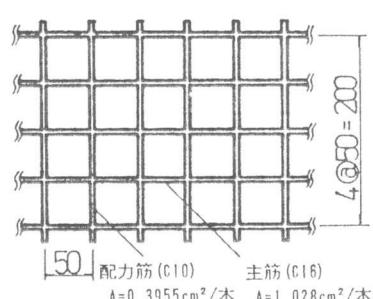


図-3 CFRP の配筋状況

表-1 コンクリートの配合

配合名	粗骨材の最大寸法(mm)	目標スランプ(cm)	目標空気量(%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m³)					
						W	C*	S	G	A d	膨張材
中詰1	20	8	4.0	52	42.4	162	309	769	1060	0.973**	—
中詰2	20	18	4.0	52	46.1	179	341	803	955	0.853**	—
中詰3	20	8	4.0	52	42.3	162	309	769	1060	0.773**	15
プレキャスト	20	8	2.0	41	42.0	164	400	761	1066	4.00***	—

\*:早強セメント、\*\*:A E減水剤、\*\*\*:流動化剤

ア)レキャスト型枠部分には、図-3に示すメッシュ状のCFRPが5cm間隔で5本主筋として配置されている。このCFRPは炭素繊維を40%含んでおり、表-3に示す力学特性を有している。

## 2.2 実験ケースと実験方法

表-4に実験ケースを示す。いずれのケースも2回の載荷試験を行ない、変位を制御しながら破壊まで載荷した。計測は、各荷重段階で、供試体の変位、コンクリート表面のひずみ、鉄筋のひずみ、CFRPのひずみ、ひびわれ幅を測定すると共にひびわれパターンを記録した。

## 3. 実験結果

### 3.1 荷重とひびわれパターン

表-5に各供試体の「ひびわれ荷重」、「型枠と中詰めコンクリートの境界にひびわれが発生した荷重」とそのときの

「境界面のせん断応力度(=S/bjd)」、「破壊荷重と破壊形式」を示す。さらに、代表的な供試体のひびわれパターンを図-4に示す。これらの結果より次のことが理解される。

① 供試体にひびわれが発生する荷重は、ケース1~4は「4.0~4.38tf」でありケース5の場合は「3.75tf」であった。これらの荷重は引張限界ひずみを100μと仮定して求めた荷重よ

表-5 実験結果

ケース	1		2		3		4		5		計算値*
	1体目	2体目									
ひびわれ荷重(tf)	4.35	4.40	—	4.00	4.24	4.00	3.75	4.50	3.75	3.75	4.8
	4.38			4.00		4.12		4.13		3.75	
剥離荷重(tf)	20.3	18.7	21.6	25.3	16.0	20.0	20.9	21.0	19.0	26.7	—
	19.5		23.5		18.0		21.0		22.9		
せん断応力(kgf/cm²)	8.41	7.74	8.94	10.5	6.42	8.02	8.65	8.70	7.88	11.1	—
	8.08		9.72		7.22		8.68		9.49		
破壊荷重(tf)	29.2	25.6	29.5	32.0	23.6	21.8	31.8	26.9	31.9	31.8	35.1
形式	剥離	剥離	圧壊	圧壊	剥離	剥離	圧壊	剥離	圧壊	圧壊	—

計算値\*:ひびわれ荷重は、プレキャスト型枠の引張限界ひずみを「100μ」と仮定したときの荷重で、全断面有効として求めた。  
破壊荷重は、圧縮強度コンクリートひずみが「0.0035」となるときの荷重で、材料係数を1.0としてコンクリート標準示方書に示された等価応力グラフ[1]を用いて計算した値。

表-2 コンクリートの力学特性

配合名	圧縮強度(kgf/cm²)		弾性係数E** (kgf/cm²)
	材令7日*	σ**	
中詰1	236	292	2.0×10⁵
中詰2	223	331	2.1×10⁵
中詰3	264	325	2.1×10⁵
プレキャスト	503	562	2.9×10⁵

\*:標準養生 \*\*:試験体と同一の養生条件で  
載荷試験日に測定した値

表-3 主筋方向のCFRPの力学特性

最大荷重(tf)	最大応力度(kgf/cm²)	断面積(mm²)	弾性係数(kgf/cm²)	重量(g/m)	限界ひずみ(%)
12.3	12000	102.8	9.4×10⁵	146	1.2

表-4 実験ケース

ケース	プレキャスト型枠			場所打ちコンクリート		
	厚さ	打撃面処理方法	配合名	スランプ	膨張材	
1	8cm	網目状の型	中詰1	8cm	無	
2	8cm	網目状の型	中詰2	18cm	無	
3	5cm	網目状の型	中詰1	8cm	無	
4	8cm	骨材の洗い出し	中詰1	8cm	無	
5	8cm	網目状の型	中詰3	8cm	添加	

り若干小さい値であった。

② 曲げひびわれは、いずれの位置においても「プレキャスト型枠」から「中詰めコンクリート」に進展しており、比較的初期の荷重段階で中詰めコンクリートに配置されている鉄筋にひびわれが到達しているものと判断される。

③ せん断ひびわれは、供試体により若干異なるが載荷荷重が15.0～17.0tf付近で顕著になり、その後の荷重増加でこのひびわれがプレキャスト型枠と中詰めコンクリートの境界に沿うひびわれに進展していった。

④ プレキャスト型枠と中詰めコンクリートの境界に沿うひびわれが見られたのは、せん断スパン部分であり、荷重レベルでは18.0～23.5tfであった。この荷重より境界面のせん断応力度を算出すると7.2～9.7Kgf/cm<sup>2</sup>であった。また、境界面の処理の違いによる影響は明確には見られなかった。

⑤ 破壊形式は大きく2種類に分類された。その1つはプレキャスト型枠と中詰めコンクリートが完全に剥離することによる破壊であった。いずれの供試体も載荷中に、せん断スパン部分で境界に沿うひびわれが見られたが、支点付近でのプレキャスト型枠と中詰めコンクリートの定着が確保されているうちに供試体は破壊に至っていない。しかし、この部分の定着が切れると供試体は急激に破壊し、破壊荷重は限界状態設計法により計算される荷重より小さい値であった。

⑥ 他の破壊形式は、ケース2およびケース5に見られる圧縮側コンクリートの圧壊であった。この様な破壊となるためには、境界部の付着力が圧壊まで確保される必要があり、「コンクリート強度が高く付着力が大きい場合(ケース2)」や「膨張材による乾燥収縮量の低下(ケース5)」などが原因となっている可能性が高い。この場合、破壊荷重は計算値より若干小さいが、その破壊は急激なものではなかった。

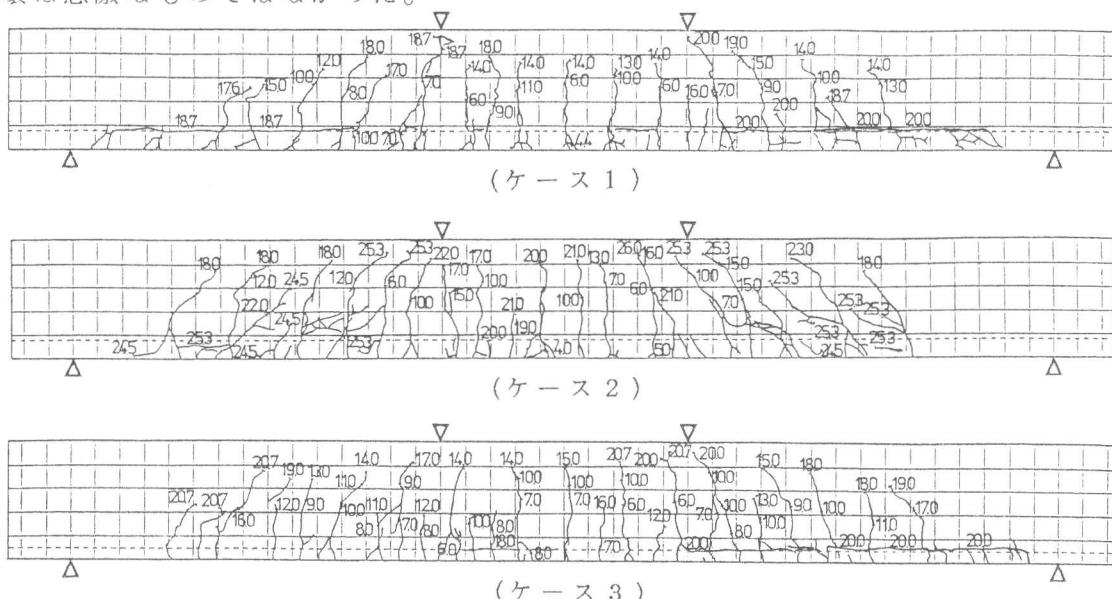


図-4 ひびわれパターン（図中の数字は載荷荷重を示す）

### 3.2 断面内のひずみ分布

断面内のひずみ分布を図-5に示す。同図は「圧縮側コンクリートの圧壊」によって破壊したケース2(2体目)の供試体の場合を例として示したものであるが、他の供試体においても同様であった。この図より次のことが理解される。

① 断面内のひずみ分布は、破壊直前まで平面保持の原則が保たれている。

② 曲げ耐力の算定において仮定されるひずみ分布(図中の破線)を、供試体破壊時のひずみ分布(32.0tfの場合)と比較すると、コンクリートの圧縮ひずみは若干異なっているが、中立軸位置やCFRPのひずみ等は実測値と良く一致している。従って、終局限界状態の検討は、鉄筋コンクリートと同様に行なうことができるものと判断される。

### 3.3 断面剛性

圧縮側のコンクリートひずみ計と引張側のΩゲージの読み値から求めた部材の断面剛性(EI)を図-6に示す。また同図には、コンクリート標準示方書に示された、ひびわれ発生後の換算断面二次モーメント[1]を用いて計算した「供試体の断面剛性」と「同等の曲げ耐力( $M_u=22.5\text{tf}\cdot\text{m}$ )を有する鉄筋コンクリート断面(鉄筋量=14.6cm<sup>2</sup>)の断面剛性」も合せて示してある。この図より次のことが理解される。

① 実測値は計算で得られた供試体の剛性と良く一致しており、換算断面二次モーメントはCFRPを用いた部材にも適用できるものと判断される。

② しかし、同程度の曲げ耐力を有する鉄筋コンクリート断面と比較すると、CFRPを用いた部材の断面剛性が小さくなってしまい(約1/4)、従って同一荷重レベルではCFRPを用いた部材の変位量が鉄筋コンクリートの場合に比較して大きくなる様である。

### 3.4 供試体中央の変位

各ケースの2体目の供試体中央の変位を比較したものを図-7に示す。また、ケース2の供試体について、3.3で得られた断面剛性を用いて梁中央の変位量を計算した結果を図-8に示す。これら図より次のことが理解される。

① 供試体中央の変位量は、プレキャスト型枠と中詰めコンクリートの境界に沿うひびわれが入る荷重(16.0tf)までは、いずれの供試体も同様な変位量を示している。

② しかし、それ以降の荷重においては、ケース1、ケース3、ケース4の変位量が大きく増加しており、これらの供試体はいずれも比較的低い荷重で破壊した。

③ 計算結果と計測値との比較においても(図-8)、プレキャスト型枠と中詰めコンクリートの境界にひびわれが見られた荷重(25.3tf)までは両者は比較的良好く一致しているが、その後の荷重では実測値が計算値を大きく上回っている。これは、プレキャスト型枠と中詰めコンクリート

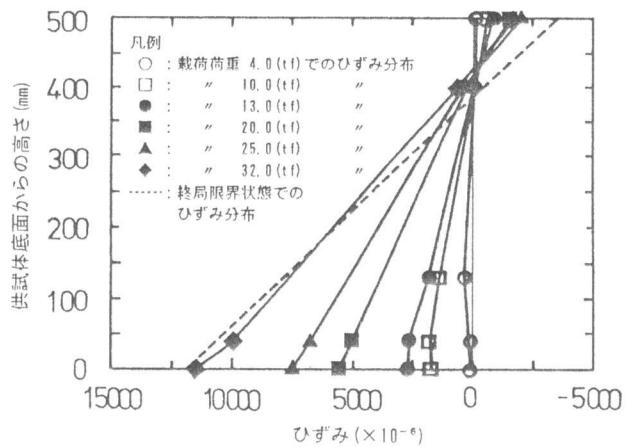


図-5 断面内のひずみ分布

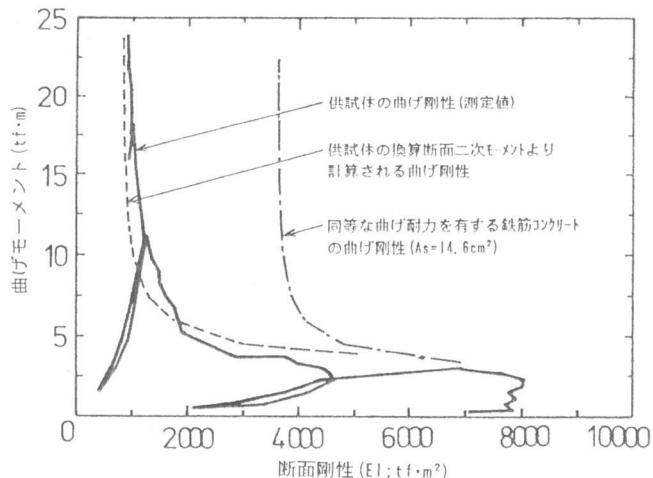


図-6 断面剛性の測定値と計算値の比較

の境界に沿うひびわれが原因と思われる。従って、境界面の付着力は確実なものにする必要があることが理解される。

④ 同様な曲げ耐力を有する鉄筋コンクリート断面の変位量と比較すると、CFRPを用いた断面は変形しやすいことが理解される。従って、許容される変位量が小さい構造物に対しては、CFRPの量を多くするなどの配慮が必要と思われる。

#### 4. 考察

実験の結果「CFRPの応力-ひずみ関係」や、「フレキシット型枠との付着特性」などが部材全体の力学特性に大きな影響を与えることが理解される。従って、ここで用いた供試体を例に取ると、図-9～図-13に示す限界状態を通過して破壊に至ったものと判断される。各限界状態は以下の様に考えられる。

Ⅰ；ひびわれ発生から評価される限界状態(フレキシット型枠にひびわれが発生する状態)

Ⅱ；ひびわれ幅から評価される限界状態(中詰めコンクリート中の鉄筋が耐久性上許容されるひびわれ幅に達したときの状態で、ここではフレキシット型枠と中詰めコンクリートの境界面での許容ひびわれ幅を0.2mmとした)

Ⅲ；部材の変位量から評価される限界状態(変位量が使用限界に達したときの状態で、変位量の制限値が使用条件によって異なるため、ここでは変位量をスパン長/600と仮定した)

Ⅳ；鉄筋の応力度から評価される限界状態(中詰めコンクリート中の鉄筋が初めて降伏点( $f_y = 3500 \text{ kgf/cm}^2$ )に達した状態)

Ⅴ；合成度から評価される限界状態(フレキシット型枠と中詰めコンクリートの付

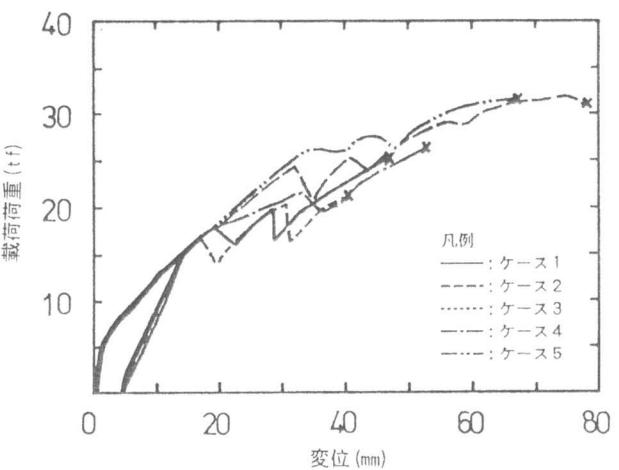


図-7 各ケースの供試体中央の変位

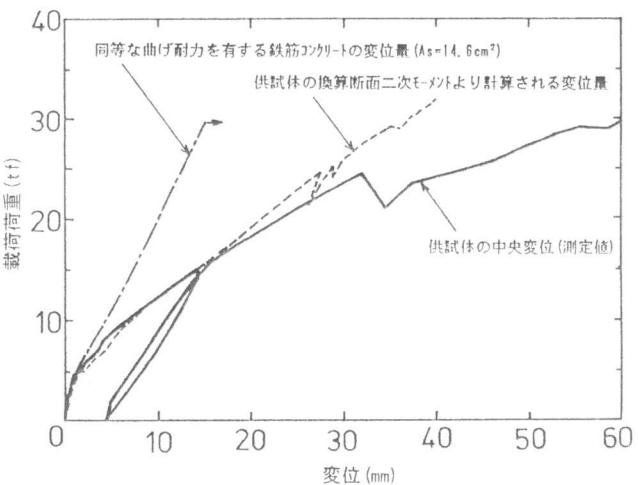


図-8 供試体中央変位の  
測定値と計算値の比較

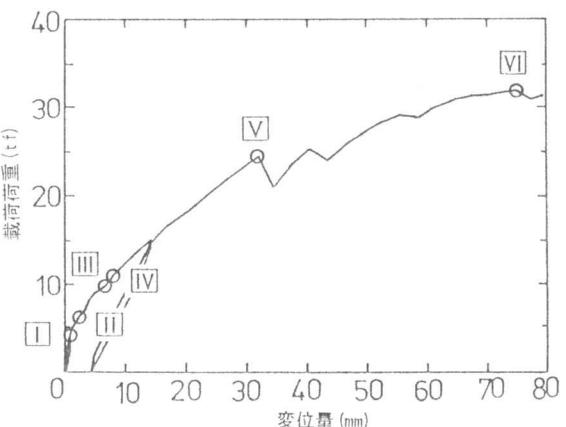


図-9 供試体中央変位と各限界状態

着応力が限界値に達した状態で、境界面にひびわれが見られたときの状態)  
VI; コンクリートの応力度から評価される限界状態(圧縮縁コンクリートのひずみが限界値( $\varepsilon_{cu} = 0.0035$ )に達したときの状態)

設計時には、使用条件を考慮してそれぞれの限界状態を検討する必要がある。使用限界状態としては一般的に「II~IVの状態」を考慮する必要があると思われる。この場合、IIの状態に対応するために「型枠にプレストレスを導入する」「CFRPの量を増加する」などの対策が必要となる。また、終局限界状態の検討においても、Vの状態に対応するために、境界面の付着力を増し、Vの状態がVIの状態と同程度の信頼性を持つ様な設計を配慮する必要がある。

### 5. おわりに

本検討の結果、CFRPで補強されたプレキャスト版を用いた梁の曲げ特性を確認することができた。本検討は、静的載荷試験による検討であり、今後疲労特性についても確認する必要がある。

謝辞：本試験は「繊維系素材(FRP)を用いた港湾構造物の研究開発に関する研究会」(運輸省港湾技術研究所、運輸省第四港湾建設局、(財)沿岸開発技術研究センター、東洋建設(株)、東亜建設工業(株)、五洋建設(株)、ヒューエスコンクリート(株)、オリエンタル建設(株)、富士ヒューエスコンクリート(株)、トービー建設工業(株))の共同研究の一環として行なったものであり、多大の御協力と御指導を賜わった早稲田大学閔教授をはじめとする関係者の方々に感謝の意を表します。

### 参考文献

- [1] 土木学会：昭和61年制定コンクリート標準示方書 設計編，1986

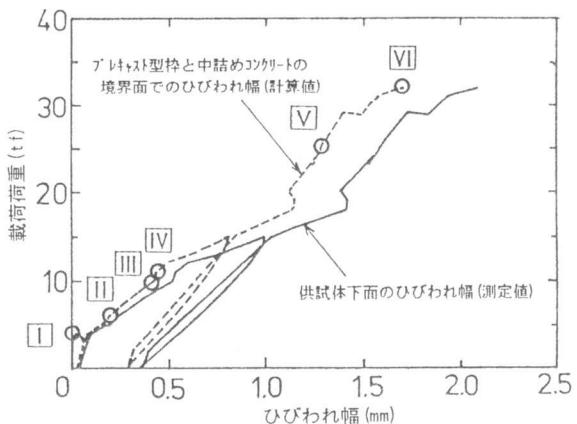


図-10 ひびわれ幅と各限界状態

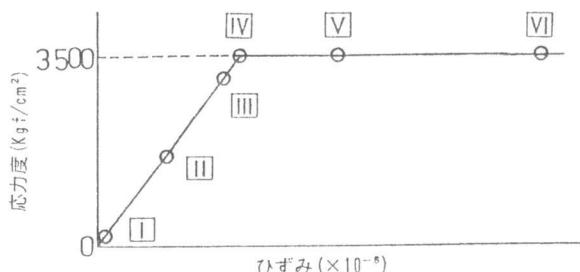


図-11 鉄筋のひずみと各限界状態

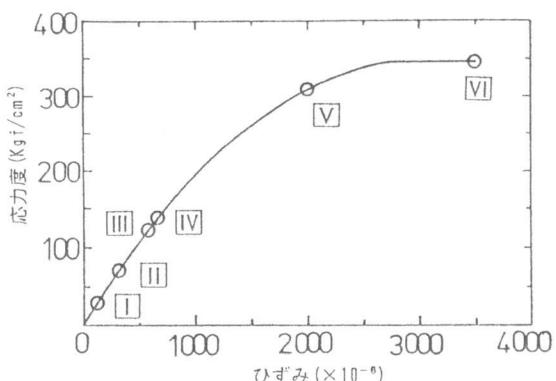


図-12 圧縮縁コンクリートのひずみと各限界状態

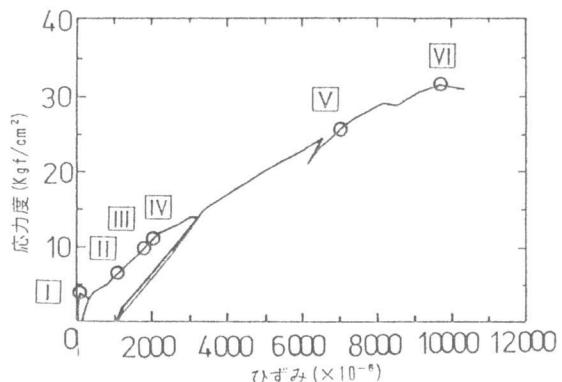


図-13 CFRPのひずみと各限界状態