

論文 偏向部を有する連続繊維マルチ緊張材の引張強度特性に関する 実験的検討

中田 順憲^{*1}・山名 宗之^{*2}・服部 篤史^{*3}・真嶋 光保^{*4}

要旨：本研究では、連続繊維マルチ緊張材による外ケーブルシステムを実用化するにあたり、炭素繊維とアラミド繊維を用いたマルチ緊張材を対象として偏向状態での引張試験を実施し、偏向装置による曲げ上げが連続繊維マルチ緊張材の引張強度特性に与える影響について検討した。実験結果より、曲げ上げられたマルチ緊張材の引張強度は直線配置状態のそれに比べ8~9%程度低下すること、また、強度低下の原因はマルチを構成する各単線間のひずみのばらつき増加と曲げ上げに伴う単線自体の引張強度低下に大別され、両要因が複合して引張強度特性に関与することが明らかとなった。

キーワード：連続繊維マルチ緊張材、外ケーブル、偏向装置、引張強度特性

1. はじめに

連続繊維緊張材をPC構造物の外ケーブルとして用いることは、その高耐食性や軽量である特長を生かし得る有効な利用形態の一つであるといわれている。一般的に外ケーブルには配置上の制約等により比較的大きな緊張能力を要求される場合が多く、近年では外ケーブルとしての適用を前提としたマルチタイプの大容量定着システムが開発の途上にある[1]。

一方、連続繊維緊張材は繊維と結合材から成る一方向強化材料であり、脆性的な破断性状を示すことや力学的異方性を有していることは広く知られるところである。したがって、連続繊維緊張材を用いた外ケーブルシステムの開発には、マルチ構成された緊張材の破断荷重や定着体の性能を確認するばかりでなく、偏向装置の構造や偏向装置による曲げ上げが緊張材の引張強度特性におよぼす影響を網羅した緊張システムとしての体系的な検討が必要とされる。

本研究では、炭素繊維またはアラミド繊維を用いた2種類のマルチ緊張材（以下、それぞれをCFRP、AFRPと称す）について、偏向装置により曲げ上げた状態で静的引張試験および動的疲労試験を行い、得られた結果と直線配置状態での引張試験結果[1]を比較することにより、曲げ上げに伴う引張強度特性の変化とその要因を明らかにすることにした。

2. 実験概要

2.1 試験体

実験に使用した連続繊維マルチ緊張材は、既往の研究[1]において130tf以上の保証荷重を想定した定着体の仕様やマルチ構成に関する実験的検討がなされており、直線配置状態での引張強度や緊張材のひずみ分布が確認されているものである。試験体はCFRP、AFRPともに充填式定着体を用いており、緊張材試験部の長さを3.0mとして製作した。試験体の諸元を表-1に示す。

*1 極東工業(株) 大阪支店設計部(正会員)

*2 阪神高速道路公団 大阪管理部調査設計課

*3 京都大学助手 工学部土木工学科、工修(正会員)

*4 大阪市立大学助教授 工学部土木工学科、工博(正会員)

表-1 連続繊維マルチ緊張材の諸元

種別	緊張材					マルチ定着体			保証荷重
	繊維材	結合材	径	形状	本数	長さ	内径	充填材	
CFRP	PAN系	エポキシ系	12.5mm	より線状	11本	500mm	68mm	エポキシ系樹脂	136tf
AFRP	アラ系	エポキシ系	14.7mm	組み紐状	7本	600mm	60mm	セメント系膨張材	143tf

2.2 試験装置

図-1は荷重装置の外観平面形状を示したものである。試験時の荷重は鋼製フレームを反力台として使用し、静的引張試験、動的疲労試験ともに200tfサーボジャッキを用いて行った。偏向装置の構造は実橋梁への適用を前提として検討を行い、マルチ緊張材を束ねた状態で曲げ上げる集中型構造を採用するとともに、 10° の偏向角度を設定した。曲げ上げ半径は、偏向部の湾曲がマルチを構成する各単線の引張強度におよぼす影響を極力少なくするように配慮し、単線の曲げ引張強度に関する既往の研究[2]を参考にして3.0mとした。偏向装置と緊張材の接触部は、摩擦の低減と腹圧力の緩和を期待すること、疲労試験時の緊張材接触面の磨耗、劣化を防ぐことを目的として保護管および二重の滑動材を装着したすべり構造とした。偏向装置の構造および使用材料を図-2に示す。

2.3 試験方法

静的引張試験はCFRP、AFRP各3体の試験体について行った。引張試験においては各単線同士のねじれ・交差が生じていないことを確認しながら徐々に荷重を増加し、破断までの緊張側および固定側の荷重と各単線のひずみを測定した。単線のひずみは図-3に示す各測点にひずみゲージを貼付し計測を行った。

一方、疲労試験はCFRP、AFRP各1体の試験体について行った。荷重条件として下限荷重は表-1に示した保証荷重の60%、荷重振幅は外ケーブル工法を想定した荷重変動の試算等に基づいて5.3%とし、3~5Hzの速度で変位制御による300万回の繰り返し荷重を行った。疲労試験時には偏向部に発生する摩擦熱の影

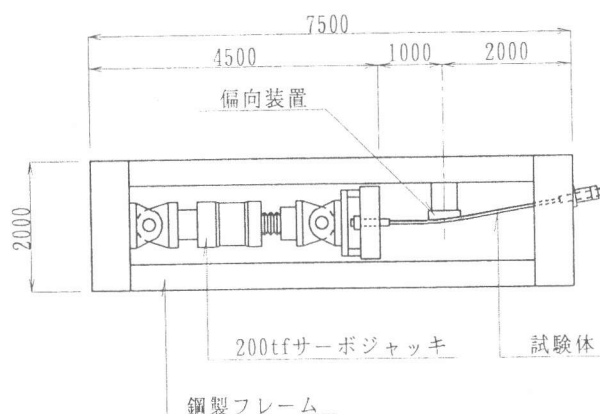


図-1 荷重装置の外観形状

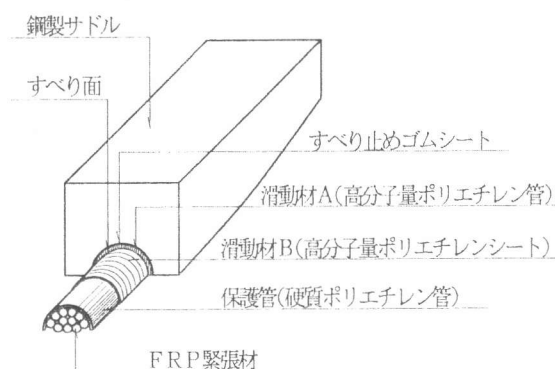


図-2 偏向装置の構造

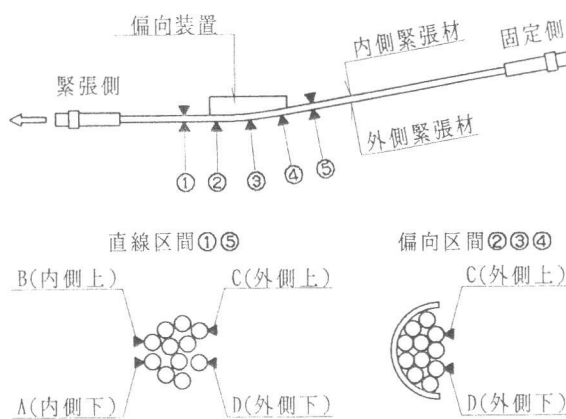


図-3 ひずみの計測箇所

響に配慮して、熱電対により偏向部での緊張材および滑動材の温度を管理した。また、繰り返し载荷終了後に静的引張試験を実施し、残存強度を確認した。

3. 実験結果と考察

3. 1 破断状況と引張強度

写真-1は静的引張試験における緊張材の破断状況の一例を示したものである。CFRPはマルチを構成する単線のうち1本の単線が破断した後に他の単線が連鎖的に破断し緊張材全体の破壊に至っているのに対し、AFRPでは1本の単線のみが破断している。緊張材はCFRPおよびAFRPともに直線区間で破断しており、偏向部での破断や定着体からの抜け出しは生じていない。また、AFRPはいずれの試験体も湾曲の外側に位置する単線が定着体口元において破断しており、このことは緊張材の曲げ上げに伴う局所的な応力変化が偏向部のみならず定着体近傍にまで影響を与えていた可能性を示唆している。

表-2は本試験で確認されたマルチ緊張材の破断荷重と直線配置時の破断荷重[1]を比較したものである。マルチ緊張材に作用する引張力は偏向部の摩擦により緊張側と固定側とで差異が生じるため、ここでは破断時の緊張側引張力をマルチ緊張材の破断荷重として定義した。表-2に示すとおり、曲げ上げ時の破断荷重は直線配置時に比べその平均値においてCFRPで8%、AFRPで9%減少しており、明らかに曲げ上げに伴う引張強度の低下が生じていることがわかる。なお、偏向部の摩擦による緊張力の損失は、破断直前の载荷状態においてCFRPで6~8%、AFRPで4~7%であった。

一方、疲労試験終了後の残存引張強度は、表-2に併記するようにCFRP、AFRPともに静的引張強度とほぼ同等であった。このことから、マルチ緊張材の引張強度特性は、用いた偏向装置により曲げ上げ配置された場合でも繰り返し载荷による疲労の影響はほとんど受けないことが明らかとなった。なお、疲労試験後の目視調査では緊張材の偏向部での磨耗等は認められなかった。また、疲労試験時における緊張材偏向部の表面温度は、試験開始時で20~25℃、最高時で40~50℃であり、偏向部の摩擦による温度上昇は緊張材の引張強度特性に対し特に影響を与えていない。これらのことから、偏向装置のすべり構造が有効に機能していたことが確認された。

3. 2 緊張材のひずみ分布

図-4は緊張側測点①における荷重と各単線のひずみの関係を示したものである。荷重~ひずみ曲線は若干下に凸の傾向が現れているものの、ほぼ直線形状を保ったまま破断点まで達してい

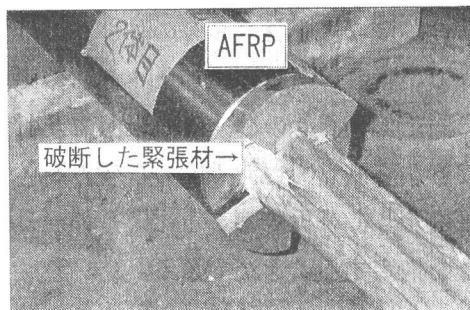
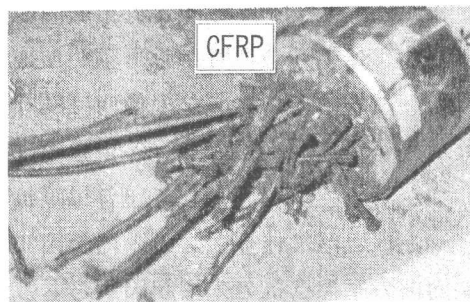


写真-1 緊張材の破断状況

表-2 緊張材の破断荷重

		単位:tf			
状態	試験体 NO.	CFRP	AFRP		
直線配置時	静的引張試験	NO. 1	179	160	
		NO. 2	170	166	
		NO. 3	165	169	
		NO. 4	180	178	
		NO. 5	169	175	
		平均値 A	173	170	
曲げ上げ時	静的引張試験	NO. 1	151	154	
		NO. 2	164	152	
		NO. 3	163	155	
		平均値 B	159	154	
	疲労残存強度		160	160	
荷重比率 B/A			0.92	0.91	

る。また、マルチを構成する各単線間のひずみのばらつきは初期荷重時から荷重が増加するにしたがい漸増しており、この傾向はCFRPの方がAFRPより顕著に現れている。各単線のひずみをばらつかせる主な要因として、各単線毎の製作誤差や曲げ上げに伴う張力の差に起因するものと偏向部の摩擦抵抗の差に起因するものとが考えられる。これらの要因の影響は、前者は初期荷重の段階で緊張材全長分の伸び量のばらつきとして、後者は荷重の増加とともに緊張側測点①と固定側測点⑤のひずみ差として現れる。このことから測点①と測点⑤のひずみを各単線毎に平均化して分析することにより伸び量のばらつきを推定することができる。

図-5は各マルチ緊張材の緊張側の荷重と上述した平均ひずみの関係を、曲げ上げの外側と内側とで分類して示したものである。これらの図から、初期荷重時の平均ひずみはCFRP、AFRPともに曲げ上げ半径差により外側の方が内側に比べて大きくなるのがわかる。また、外側と内側のひずみ差は、CFRPでは荷重の増加にかかわらずほぼ一定値を保っているのに対し、AFRPでは荷重の増加に伴いひずみの大小関係が逆転する傾向を示している。AFRPがこのような性状を示すのは、荷重の増加とともに各単線の分担引張力に応じた定着体内部の付着切れが進行することにより、ひずみが均等化されるためであると推察される。既往の研究[3]においても定着用膨張材を用いたマルチ定着体の口元付近で緊張材が抜け出すことにより各単線の張力が均等化される傾向を示すことが確認されている。このことから、定着体の付着性状はひずみのばらつき度に影響を与える一要因であるといえる。

図-6は破断直前における緊張材軸方向のひずみ分布を示したものである。外側の単線に着目した場合、測点②③④においてひずみの乱れが生じており、これは偏向装置による腹圧力や単線同士の干渉により局所的な曲率変化または摩擦抵抗が生じることに起因しているものと考えられる。ただし、偏向部での破断は生じてい

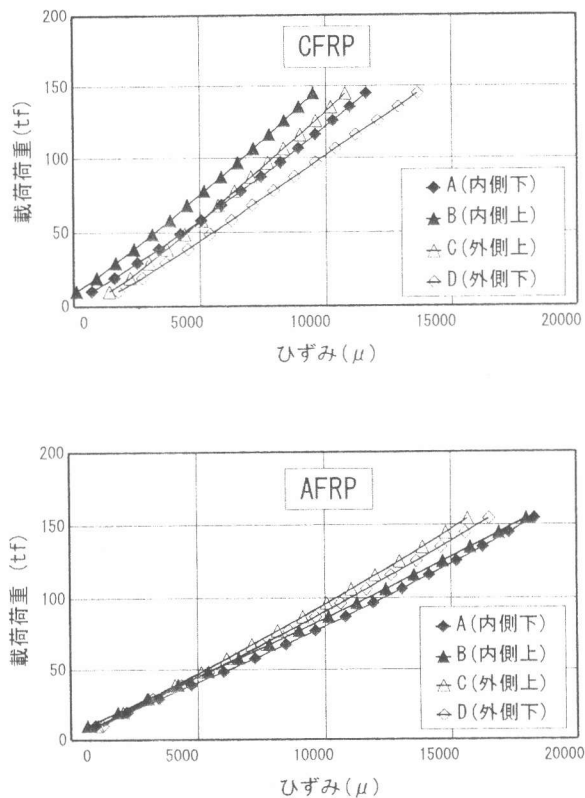


図-4 荷重とひずみの関係

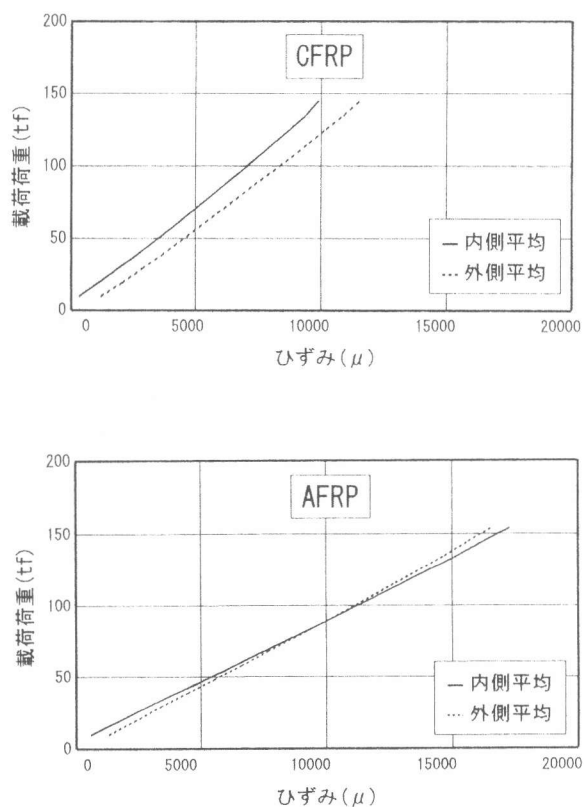


図-5 荷重と平均ひずみの関係

ないため、ひずみの乱れは強度低下に対し直接関与していないものと考えられる。また、緊張側測点①と固定側測点⑤のひずみ差は各単線で異なっており、偏向部の摩擦抵抗の差や腹圧等によりひずみのばらつき様子がうかがえる。

3.3 曲げ上げに伴う強度低下の要因

連続繊維マルチ緊張材の引張強度は、緊張材がもつ脆性的な強度特性から、マルチを構成する個々の単線の分担引張力と引張強度の相互関係により変動する。これら引張強度特性を支配する各要因の曲げ上げに伴う性状変化を明らかにするため、破断時の緊張材のひずみとそのばらつきについて分析を行った。図-7は破断直前に計測された単線間のひずみ分布状況を直線配置時と曲げ上げ時(測点①)とで比較したものである。なお、図中の横線は一つの試験体におけるひずみのばらつき幅を表している。CFRP緊張材では、曲げ上げ時においてひずみのばらつき幅が直線配置時に比べ明らかに増加しており、マルチ緊張材全体の引張荷重が小さいにもかかわらず一部の単線ひずみが直線配置時と同レベルまで達していることがわかる。これに対してAFRP緊張材では、曲げ上げに伴うひずみのばらつき増加はCFRP緊張材ほど顕著ではなく、曲げ上げ時のひずみの最大値は直線配置時に比べ小さいことがわかる。

一方、図-8は既往の研究[1]により得られた30個の単線破断ひずみに関する度数分布図に、マルチ緊張材の破断時に最大となる単線のひずみの分布を重ねたものである。マルチ緊張材の破断時最大単線ひずみはCFRP、AFRPともに直線配置時では概ね単線破断ひずみの標準偏差程度の変動範囲で分布しているのに対し、曲げ上げ時では単線破断ひずみの平均値より下側の領域に分布している。特にAFRPではいづれの試験体ともに低ひずみ状態で破断が生じており、曲げ上げの影響が単線自体の引張強度低下として現れていることがわかる。AFRPの破断状況から、このような単線の強度低下は定着体近傍で局部的に生じたものと考えられ、曲げ上げに起因する緊張材と定着体口元の接触が引張強度に対し何らかの影響を与えている可能性がある。例えば、定着体で保持された各単線が、偏向部で集中して束ねられることにより微小な軸線のずれを生じ、定着体口元において角当たりすることも接触要素の一つであると考えられる。

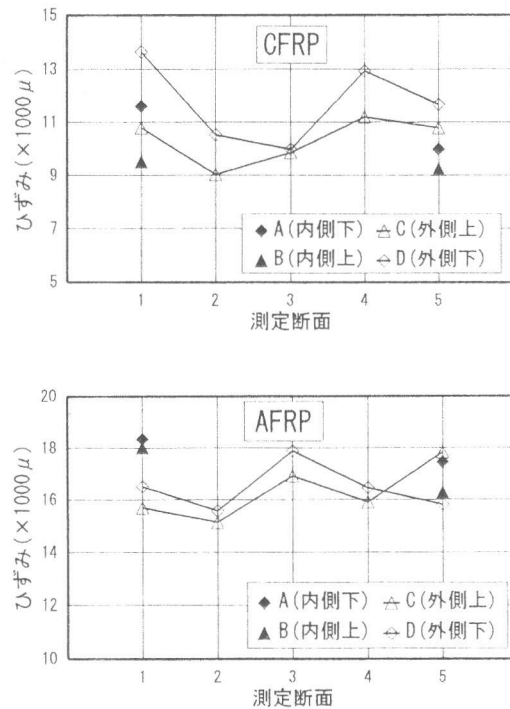


図-6 緊張材のひずみ分布

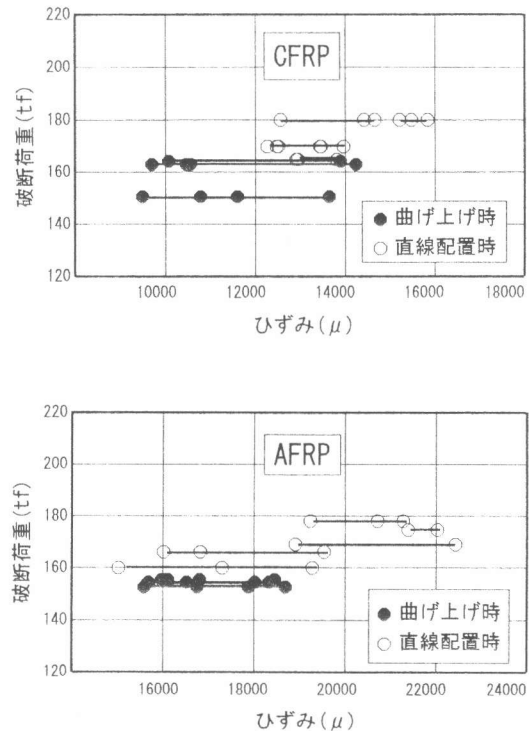


図-7 破断時のひずみのばらつき

以上のことから、連続繊維マルチ緊張材の曲げ上げに伴う引張強度低下は、内・外側の違いや偏向部の摩擦抵抗差により各単線のひずみあるいは分担引張力のばらつきが発生・増加する要因と、定着体近傍で単線自体の引張強度が低下する要因とが複合して生じるものと考えられる。また、各要因の影響度はCFRPとAFRPで異なり、CFRPではひずみのばらつき増加要因が、AFRPでは単線の強度低下要因が卓越して引張強度の低下に関与しているといえる。

4. まとめ

炭素繊維あるいはアラミド繊維を用いた2種類のマルチ緊張材を対象として曲げ上げた状態で引張試験を実施し、破断荷重や緊張材ひずみの発生状況について考察した結果、以下に示す知見を得た。

- 1) 角度 10° ・半径3.0mで曲げ上げられたマルチ緊張材の破断荷重は、直線配置時に比べ、CFRPで8%、AFRPで9%減少することが判明した。
- 2) マルチを構成する各単線のひずみは単線間の張力差と偏向部の摩擦抵抗差によりばらつきが生じるが、AFRPでは定着体の付着特性がひずみの均等化に寄与することによりばらつきの程度がCFRPに比べ小さくなる傾向が認められた。
- 3) 連続繊維マルチ緊張材の曲げ上げに伴う強度低下は、上述した単線間のひずみのばらつき増加要因と、定着体近傍における単線自体の強度低下要因が複合して生じており、前者はCFRPに、後者はAFRPにおいてその影響が顕著に現れる。
- 4) CFRP、AFRPともに疲労試験後の残存強度は静的引張強度と同等であり、引張強度特性は偏向状態での繰り返し载荷の影響を受けないこと、偏向部の耐磨耗性に問題はないことが確認された。

以上のように本研究で対象とした連続繊維マルチ緊張材は、曲げ上げられた状態でも概ね安定した引張強度特性を示しており、外ケーブルとして実用に供し得る可能性を有しているといえる。

なお、本研究は、阪神高速道路公団「コンクリート構造物の耐久性に関する調査研究委員会」の研究業務の一環として行われたものであり、同委員会各位には多大な御指導をいただいた。また、本研究を遂行するにあたり、東京製綱(株)ならびに神鋼鋼線工業(株)には多大な協力をいただいた。ここに記して謹んで謝意を表します。

【参考文献】

- [1] PC構造物の補修・補強法に関する検討業務報告書、阪神高速道路公団、1995.3
- [2] 例えば、榎本剛、山藤紀彦：CFRPストランドの曲げ引張耐力に関する実験的研究、土木学会第46回年次学術講演概要集第5部、pp.232-233、1991
- [3] 原田哲夫、ミヨーキン、樋野勝巳、徳光卓：定着用膨張材を用いた連続繊維緊張材マルチケーブルの定着法、プレストレストコンクリート技術協会第3回シンポジウム論文集、pp.285-290、1992

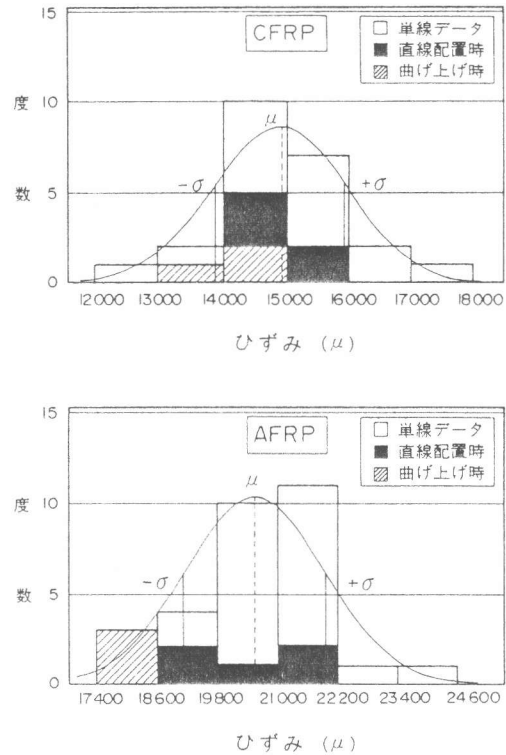


図-8 破断ひずみの分布