

V-2

FRP シートを巻き付けた RC 梁の曲げ載荷実験

室蘭工業大学	正 員	岸 徳 光
開発土木研究所	正 員	佐 藤 昌 志
三井建設(株)	正 員	三 上 浩
室蘭工業大学	学生員	栗 橋 祐 介

1. はじめに

平成 7 年 1 月の阪神・淡路大地震以後、道路・鉄道橋脚などの既設コンクリート構造物の耐震補強が盛んに行われている。最近では、施工性に優れた FRP シート巻き付け工法によるせん断補強や靱性補強が実構造物に対して適用されるようになった。FRP シートの巻き付け補強による横拘束効果は、特に橋脚基部の靱性を改善する上で極めて重要である。この場合の横拘束効果は、一般に一軸圧縮応力状態での実験によって検討されている。一方、段落とし部周辺においてせん断補強や靱性補強を行う場合、基部靱性補強と異なり、その効果は曲げ圧縮応力状態で検討すべきとも考えられる。

本研究は、段落し部周辺を FRP シート巻き付け工法でせん断補強あるいは靱性補強する場合を想定し、その効果を FRP シートを巻き付けた両端単純支持 RC 梁で実験的に検討したものである。なお、FRP シート巻き付けによる横拘束効果はシートの材料特性や補強量および補強方法によって変化すると考えられるため、炭素およびアラミド繊維シートを用い、体積補強割合を 3 種類 ($\rho \approx 0.15\%$ 、 0.3% 、 0.6%)、補強方法を 2 種類 (ゼブラ補強、全面補強) として実験を行った。

2. 実験の概要

表-1 に試験体の一覧を示す。試験体は、補強材の種類、補強方法、補強割合を変化させた 7 種、11 体である。なお、補強した 4 種類については各 2 体の実験を行い、実験結果のばらつきを検討している。試験体名のうち、第 1 項は使用した繊維シートの種類 (C: 炭素、A: アラミド) を示し、第 2 項は補強方法と本数 (A: 全面補強、9 または 17 および 17 (2): ゼブラ補強 9 本、または 17 本および 17 本を 2 層)、第 3 項は試験体数 (1: 1 体目、2: 2 体目) を示す。なお、ゼブラ補強 17 本 (2 層) における体積補強割合と全面補強のそれは同一である。

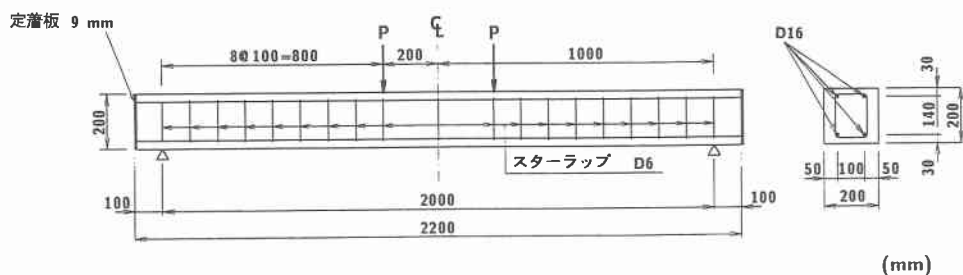
図-1 に試験体の形状寸法と配筋を示す。使用したコンクリートの実験時の材令 35 日における平均圧縮強度は 254 kgf/cm^2 、弾性係数は $2.0 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 、ポアソン比は 0.21 である。また、鉄筋は主筋が D16、スターラップが D6 でともに SD345 を使用した。等曲げモーメント区間の長さは 40 cm で、せん断スパン比 (a/d) は 4.7 である。図-2 に FRP シートの巻き付け概要を示す。シートの巻き付け範囲は梁中央部の 120 cm とした。なお、ゼブラ補強に用いたシートの幅はいずれも 3.75 cm である。表-2 に FRP シートの力学的特性を示す。

表-1 試験体の一覧

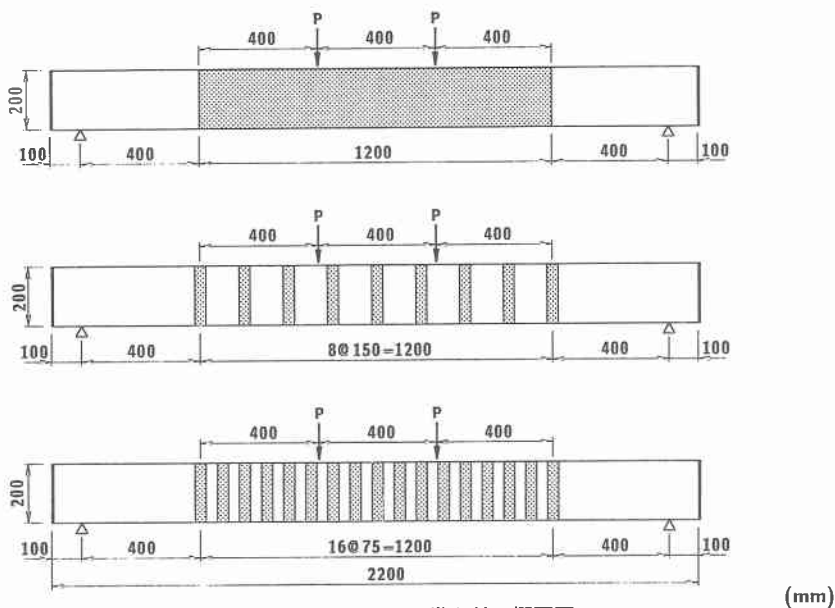
試験体名	補強材	補強方法	体積補強割合 ρ (%)
N	無補強	-	-
C-A-1	カーボン	全面補強	0.33
C-A-2			
C-17		ゼブラ補強 17本	0.16
A-A-1	アラミド	全面補強	0.59
A-A-2			
A-9		ゼブラ補強 9本	0.15
A-17-1		ゼブラ補強 17本	0.29
A-17-2			
A-17(2)-1			
A-17(2)-2		ゼブラ補強 17本 (2層)	0.59

Bending Test on RC Beams Wrapping with FRP Sheets.

by Norimitsu KISHI, Masashi SATO, Hiroshi MIKAMI and Yusuke KURIHASHI



図－１ 試験体の形状寸法および配筋



図－２ FRP シートの巻き付け概要図

表－２ FRP シートの力学的特性

補強材	目付け量 (g/m ²)	厚さ (mm)	弾性係数 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)
アラミドシート	415	0.286	1.29×10^6	25,300
炭素シート	300	0.167	2.35×10^6	41,500

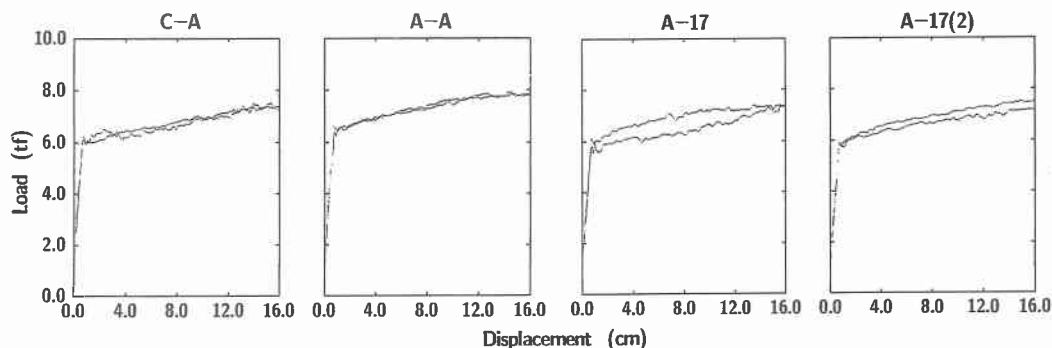
3. 実験結果

3.1 荷重－変位関係

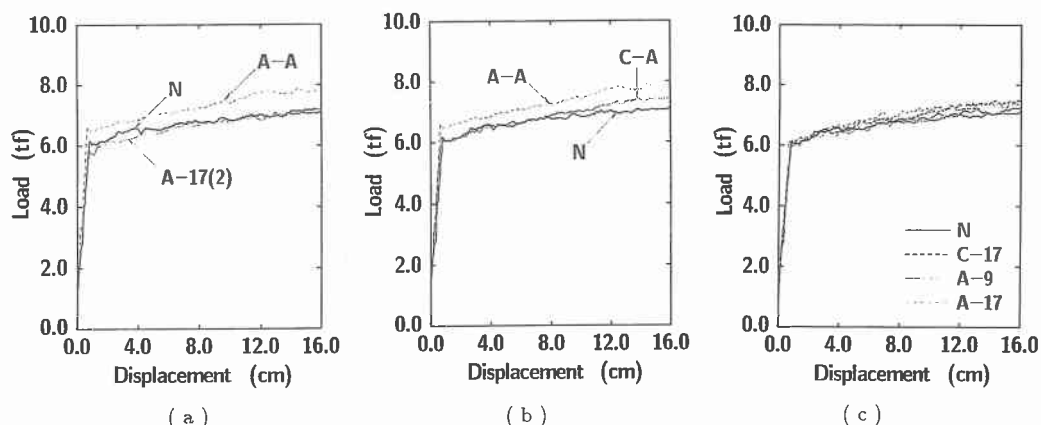
図－３に、各２体の実験を行った４種類の補強方法における荷重－変位関係を

示す。これより、ゼブラ補強を行った A - 17 において若干のばらつきがみられるものの、他はばらつきが少なく、本実験結果の再現性は高いものと考えられる。なお、本実験ではすべての試験体が載荷装置の制約変位 16 cm に達したので、その時点で加力を中止している。

図－４に、－２シリーズの各試験体の荷重－変位関係を示す。(a) はアラミドシート補強した場合の補強方法の違いに着目して整理したもので、体積補強割合は両者で同等の $\rho \approx 0.6\%$ である。これより、同一補強割合でも、全面を巻き付け補強した A - A がゼブラ補強した A - 17 (2) よりも、初期勾配、降伏点荷重、降伏後の第 2 勾配および最大荷重が大きいことが分かる。なお、A - 17 (2) の荷重－変位関係は無補強の場合とほぼ同様である。(b) は、炭素繊維シートとアラミド繊維シートを全面補強した場合の荷重－変位関係を比較したものである。A - A の体積補強割合は C - A の 1.7 倍程度大きいですが、この場合のシートの引張耐力



図－3 荷重－変位関係のばらつき



図－4 各試験体の荷重－変位関係

および軸剛性 $E \cdot A$ （弾性係数 $\times$ 断面積）はほぼ同等である。しかし、初期勾配、降伏点荷重および最大荷重は $A-A$ の方が大きく、降伏後の第 2 勾配は両者でほぼ同等である。(c) は、ゼブラ補強した試験体の荷重－変位関係を比較したもので、繊維シートの種類や補強割合に関わらず明瞭な横拘束効果は表れておらず、ほぼ無補強の試験体と同様な荷重－変位関係を示している。

3.2 横拘束効果

表－3 に実験結果の一覧を示す。ここで、 P_{cr} は曲げひびわれ発生荷重、 P_y は下端筋の降伏荷重、 P_{max} は最大荷重、 ϕ_1 は初期剛性、 ϕ_2 は主筋降伏後の第 2 勾配である。以下に、各項目を 2 種類の体積補強割合 ρ_a 、 ρ_b について整理した。 ρ_a は実体積補強割合であり、 ρ_b は下式によって求められる換算体積補強割合である。

表－3 実験結果の一覧

試験体名	P_{cr} (tf)	P_y (tf)	P_{max} (tf)	ϕ_1 (tf/cm)	ϕ_2 (tf/cm)
N	1.60	6.15	7.10	6.00	0.050
C-A-1	2.35	6.25	7.52	6.50	0.109
C-A-2	2.20	6.20	7.43	6.95	0.103
C-17	0.90	6.10	7.48	6.53	0.097
A-A-1	2.25	6.40	7.91	6.65	0.125
A-A-2	2.60	6.60	7.88	6.50	0.109
A-9	2.60	6.00	7.22	6.15	0.075
A-17-1	1.50	5.80	7.39	6.50	0.100
A-17-2	1.45	6.10	7.40	6.95	0.109
A-17(2)-1	0.90	5.85	7.49	6.80	0.097
A-17(2)-2	0.75	5.90	7.21	6.60	0.100

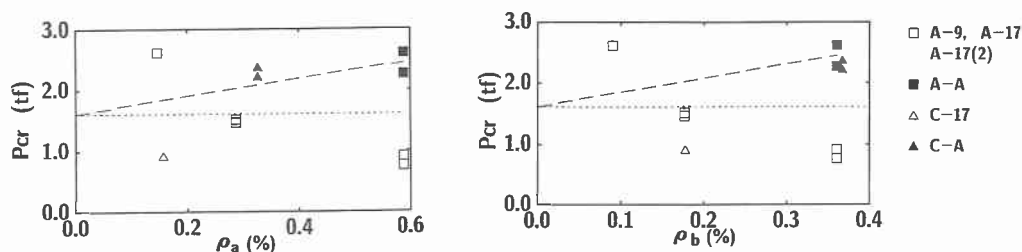


図-5 P_{cr} と ρ_a 、 ρ_b の関係

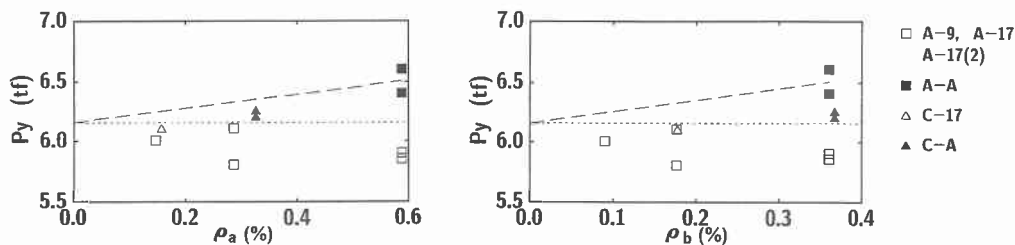


図-6 P_y と ρ_a 、 ρ_b の関係

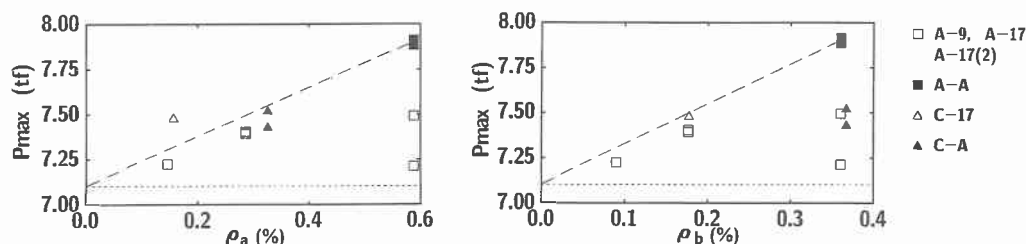


図-7 P_{max} と ρ_a 、 ρ_b の関係

$$\rho_b = \rho_a \times \text{FRP シートの弾性係数} / \text{鋼材の弾性係数}$$

図-5 に P_{cr} と ρ_a 、 ρ_b の関係を示す。図中、太破線は A - A 2 体の平均値と無補強における値を結んだ直線である（以後、図-6～9 で同様）。 P_{cr} と ρ_a の関係から、繊維シートの違いに関わらず全面補強の場合は無補強（図中破線、以後図-6～9 で同様）の場合よりも P_{cr} が大きいことが分かる。また、アラミドシートをゼブラ補強した場合は、補強量が大きくなるにつれて P_{cr} は低下し、 $\rho_a=0.6\%$ では無補強よりも小さくなっている。これは、ゼブラ補強することで曲げひびわれを誘発しているためと推察される。なお、この傾向は炭素シートのゼブラ補強にも表れている。一方、 P_{cr} と ρ_b の関係から、アラミド繊維および炭素繊維で全面補強した場合の P_{cr} はほぼ同等となり、 P_{cr} は FRP シートの剛性に強く影響されることが分かる。

図-6 に P_y と ρ_a 、 ρ_b の関係を示す。 P_y と ρ_a の関係から、ゼブラ補強した試験体の P_y は、FRP シートの種類や補強量に関わらず無補強と同等程度以下であることが分かる。一方、全面補強した場合でも、炭素シートの P_y 向上効果は少なく、体積補強割合が最大のアラミドシート補強で無補強の 1 割程度の増加である。また、 P_y と ρ_b の関係から、 ρ_b がほぼ同等のアラミドおよび炭素シート全面補強の場合、アラミドシート補強の方が P_y を増加させる効果が高いことが分かる。すなわち、 P_y はゼブラ補強では向上せず、また、同じ ρ_b でもアラミドシート全面補強の方が炭素シート補強よりも高いことから、 P_y にはシートの剛性以外の因子が強く影響しているものと考えられる。

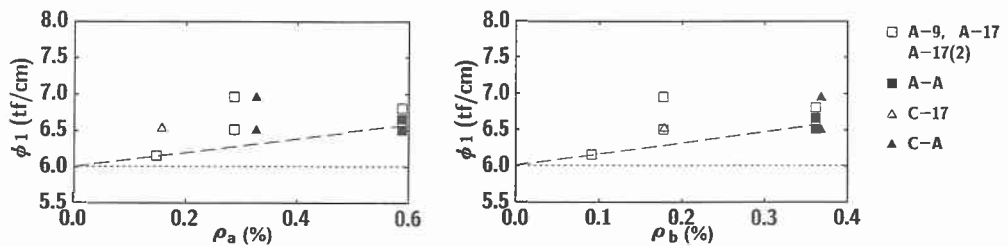


図-8 ϕ_1 と ρ_a 、 ρ_b の関係

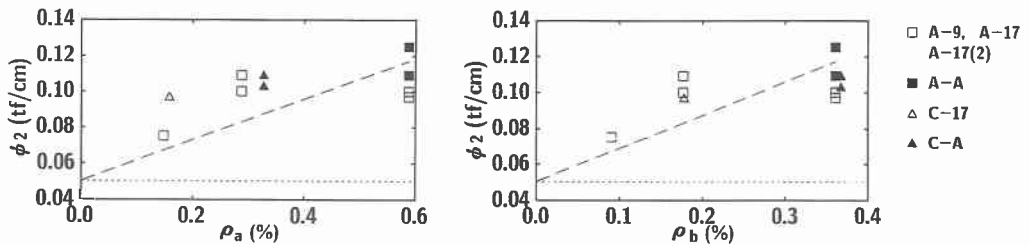


図-9 ϕ_2 と ρ_a 、 ρ_b の関係

図-7 に P_{max} と ρ_a 、 ρ_b の関係を示す。 P_{max} と ρ_a の関係から、炭素シート補強の場合は、シートの補強量や補強方法の違いに関わらず、耐力増加は 5 % 程度であることが分かる。一方、アラミドシート補強の場合は、ゼブラ補強では補強量が増加しても耐力の向上は炭素シート補強と同様に顕著ではないが、全面補強した場合は明らかな耐力向上効果がうかがえる。 P_{max} と ρ_b の関係から、同等な ρ_b および補強方法でも、アラミドシートを全面補強した場合の耐力向上効果が著しいことが分かる。すなわち、FRP シートを巻き付け補強する場合、曲げ圧縮状態の横拘束効果には、シートの軸剛性や引張耐力以外に支配的な要因があると推察される。

図-8 に主筋降伏前の荷重-変位曲線の勾配 ϕ_1 と ρ_a 、 ρ_b の関係を示す。 ϕ_1 と ρ_a の関係から、補強割合が増加することで ϕ_1 は無補強の試験体よりも増大するが、 $\rho_a \geq 0.3\%$ 以上ではシートの種類や補強方法の違いに関わらず ϕ_1 は増加せず、ほぼ一定値を示すことが分かる。また、 ϕ_1 と ρ_b の関係も ϕ_1 と ρ_a の関係と同様であり、 ϕ_1 はシートの種類や補強方法に関わらず、シート補強によって 10 ~ 15 % 程度増加するものと考えられる。図-9 に主筋降伏後の荷重-変位曲線の勾配 ϕ_2 と ρ_a 、 ρ_b の関係を示す。 ρ_a と ϕ_2 の関係から、 ϕ_1 と同様にシート補強によって無補強よりも ϕ_2 は向上するが、 $\rho_a \geq 0.3\%$ 以上ではシートの種類や補強方法の違いに関わらず ϕ_2 はさして増加せず、ほぼ一定値を示すことが分かる。一方、 ϕ_2 と ρ_b の関係からもシートの種類や補強方法に関わらず、同等な ρ_b であれば同等程度の ϕ_2 の向上効果を期待できることが分かる。

3.3 ひびわれ性状

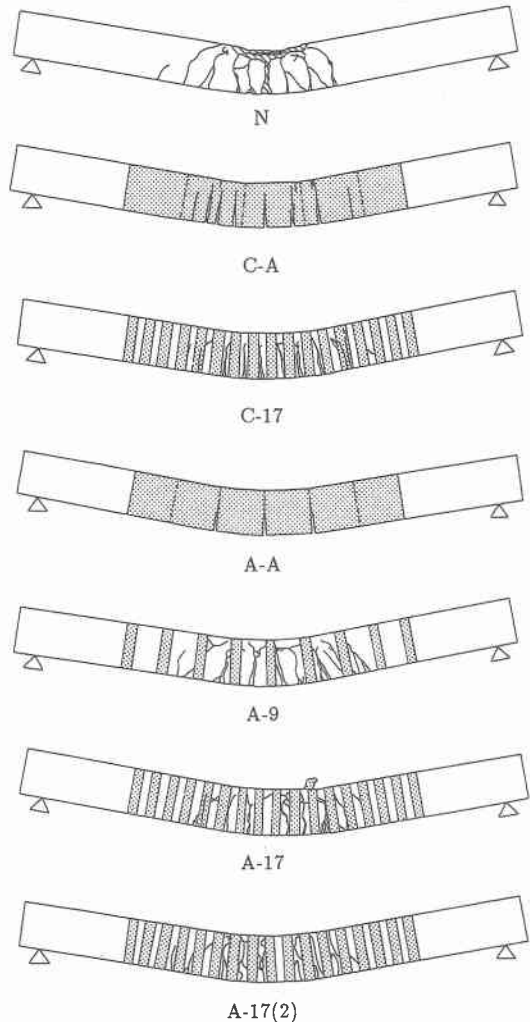
図-10 に -2 シリーズの 7 体のひびわれ性状を示す。炭素繊維シートを全面に巻き付けた C-A では、試験体長さ方向の継ぎ目部分には曲げひびわれは発生せず、巻き付けたシートが弱軸方向（繊維強化方向と直交する方向）の 8 ヶ所で破断した。破断間隔は 10 ~ 15 cm 程度である。シート破断後、荷重の増加とともにその部分のひびわれ幅が徐々に拡大した。すなわち、炭素繊維シート全面補強の場合は、載荷途中からあたかもゼブラ補強した試験体のような状況となっている。一方、アラミドシートを全面に巻き付けた A-A では、巻き付けたシートの弱軸方向には破断がみられず、ひびわれはシートの試験体長さ方向の継ぎ目（継

ぎ目間隔 20 cm) に集中した。なお、硬化したエポキシ樹脂にはひびわれが密な間隔で多数発生し、試験体自身には C - A よりも密な間隔で多数のひびわれが入っていたと考えられる。ゼブラ補強した試験体の曲げひびわれはいずれも巻き付けたシート間に発生し、ひびわれの性状は FRP シートの特性や補強量に顕著には影響されていない。なお、A - 17 ではアラミドシートの 1 本が载荷途中で破断している。本実験においては、同等の ρ_b においてもアラミドシートの全面補強の効果が他に比べて優れていた。理由としては、ゼブラ補強ではシートとシート間に密な間隔で曲げひびわれを誘発することとなり横拘束効果が発揮されにくいものに対して、アラミドシートの全面補強では曲げひびわれが拡大するのは継ぎ目間隔 20 cm であり、よりひびわれ間隔が広いために横拘束効果が大きく出現したものと考えられる。一方、炭素繊維シートを全面補強した場合は、弱軸方向に密な間隔でシートが破断し、結果としてゼブラ補強を行ったものと同様な状況になったためと考えられる。従って、炭素繊維シートを大きな曲率変化が生じる部分に巻き付け補強する場合は、シートを縦貼りして曲率変化を低下させるか、あるいは、2 方向強化繊維シートを用いることが有効であると考えられる。

4. まとめ

橋脚の段落し部周辺のせん断補強や靱性補強を想定して RC 梁に FRP シートを巻き付けた試験体を製作し、両端単純支持状態で耐力性状を検討した。検討は主として、FRP シートの材料特性、補強方法、補強量に着目して行った。本実験の範囲内で得られた結論を要約すると、

- (1) 同等の ρ_b では、アラミド繊維シートを全面補強した方が炭素繊維シートを全面補強した試験体よりも横拘束効果が大きい。
- (2) 体積補強割合が同じ場合、ゼブラ補強の横拘束効果は全面補強に比べて低い。
- (3) FRP シートによる曲げ圧縮状態での横拘束効果には、繊維強化方向と直交する方向のシートの破断が影響を与える。そのため、特に炭素繊維のシートを用いる場合には、2 方向強化型繊維シートにすることが有効であると考えられる。



図一 10 ひびわれ性状