

三井建設(株)	正員	三上 浩
室蘭工業大学	正員	岸 徳光
開発土木研究所	正員	佐藤 昌志
室蘭工業大学	学生員	亀石 暁

1. はじめに

落石から道路及び交通車両を防護する落石覆工は、一般に山岳急峻な地域や海岸地域などの景勝地に建設されることが多く、片側面に大きな開口部を有している。従って、落石による衝撃力が作用した場合には、覆工頂版に作用した衝撃荷重の一部は開口部間の柱部に伝達される。そのため、柱部には衝撃的な曲げモーメントや軸圧縮力及びせん断力が組み合わさって作用することとなる。一方で、既存の落石覆工の柱部の帯鉄筋量は、一般的に衝撃荷重を静的荷重に置き換えて算定しており、帯鉄筋比は 0.1 % 程度であることが多い。従って、RC 覆工をより安全性に優れた構造物にするためには、覆工の RC 柱の耐衝撃性や補強工法の検討が極めて重要であると考えられるが、研究例は著者らの例^{1),2)}を除いて少ないのが現状である。

著者らの既往の研究¹⁾から、軸衝撃力を受ける RC 柱の耐衝撃性は、コンクリート強度及び帯鉄筋量に大きく影響されることが明らかになっている。また、著者らはアラミド繊維製のテープを巻き付ける工法を提案し、その補強効果を定性的に検討した²⁾。その結果、アラミドテープを密な間隔で巻き付けるほど耐衝撃性は向上し、軽微な損傷を受けた後にアラミドテープを巻き付けた場合でも補強効果が期待できることなどが明らかとなっている。

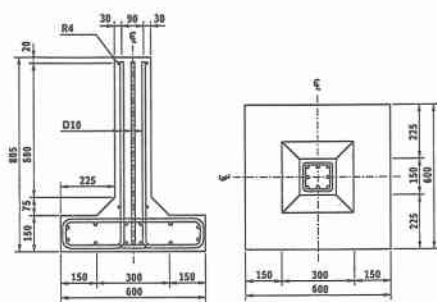
本研究は、橋脚や建物等の耐震補強工法として実績のある鋼板接着工法ならびに FRP テープ巻き付け工法を軸衝撃力を受ける RC 柱模型に適用した際の補強効果を定量的に検討したものである。FRP テープには、耐食性に優れ、軽量で高強度な炭素繊維ならびにアラミド繊維製のテープを用い、これと鋼板を用いた実験結果を比較して、補強材料の特質と補強効果の関係を検討した。また、巻き付け補強材の層数や厚さならびに補強間隔を変化させた実験を行い、各々が補強効果に与える影響を検討した。なお、RC 柱への衝撃荷重の載荷は重錘の自由落下衝撃によって行った。用いた試験体の形状寸法および配筋量は既存の落石覆工での実績を基にモデル化している。本研究では特に、ひずみゲージ式のロードセルを内蔵した重錘の衝撃力特性を基に、最大重錘衝撃力と破壊するまでの重錘の累積運動エネルギーに着目して補強効果を検討し、材料特性に対応した補強効果の算定式を提案した。また、実験終了後のひびわれ性状についてもあわせて検討している。

2. 実験の概要

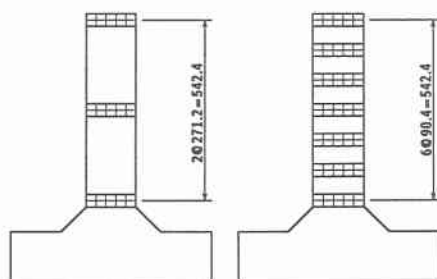
実験に用いた試験体は表-1に示す15体である。試験体名のうち、A,S,Cは補強材料を示し、各々アラミドテープ、鋼板、炭素テープを用いたことを示す。第2項の-3および-7は巻き付け段数を示し、末尾の-1,2,3は巻き付け層数または厚さを示している。

衝撃荷重の載荷は繰り返し載荷で行い、重錘の載荷速度(重錘がRC柱に衝突する直前の速度)を $v = 1$ m/sec から 1 m/sec 刻みで最大 $v = 6.5$ m/sec まで行った。 $v = 6.5$ m/sec 載荷でも損傷が軽微なものは同載荷速度で繰り返し載荷を行った。重錘は鋼製で、重量が 200 kgf、直径が 15 cm であり、所定の高さから柱の軸心に自由落下させている。

コンクリートおよび巻き付け補強材の力学的特性を表-2、-3に示す。アラミドテープは1層の厚さが



a) 試験体の形状寸法と配筋 (mm)



b) 補強の概要 (mm)

図-1 試験体の概要

表-1 試験体の一覧

試験体名	補強材料	巻き付け 段数 (段)	巻き付け 層数または厚さ	載荷速度 (m/sec)	体積補強 割合 (%)
A-3-1	アラミド	3	1層	1~6	0.15
A-7-1		7		1~6.5	0.35
A-3-2		3	2層	1~6	0.30
A-7-2		7		1~6.5×3	0.71
A-3-3		3	3層	1~6.5	0.45
A-7-3		7		1~6.5×10	1.06
S-3-1	鋼板	3	1.2mm	1~6.5	0.62
S-7-1		7		1~6.5	1.45
S-3-2		3	2.3mm	1~6.5	1.19
S-7-2		7		1~6.5×3	2.78
S-3-3		3	3.2mm	1~6	1.66
S-7-3		7		1~6.5×5	3.86
C-3-1	カーボン	3	1層	1~5	0.09
C-7-1		7		1~6	0.20
N	無補強	-	-	1~5	-

表-2 コンクリートの力学的特性

実験時の 材令	圧縮強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)	ポアソン比 ν
46~102日	254~343 (平均 296)	$1.87 \times 10^5 \sim 2.31 \times 10^5$ (平均 2.15×10^5)	0.161~0.238 (平均 0.19)

0.293 mm、炭素テープは 0.167 mm の製品を用いた。なお、テープの弾性係数および引張強度は FRP 化（樹脂を含浸硬化させること）したテープで引張試験を行い、試験結果を繊維のみの断面積で評価した値である。弾性係数および引張強度は引張試験の平均値である。なお、鋼板については規格値を示した。

図-1 に試験体の形状寸法および配筋と補強の概要を示す。試験体の底部にはテーパを設け、応力の集中による破壊を防止した。また、柱の隅角部では 10 mm の面取りを行っている。フーチングは 4 本のアンカーによって剛な鋼板と緊結し、上下、左右の移動を防止した。補強筋は軸方向筋が D10（8 本）で補強筋比は約 2.5 %、帯鉄筋は柱頭部と下部の 2 ヶ所だけに配筋し、巻き付け材料の補強効果を検討できるようにしている。なお、鋼板は角部で溶接しロの字に成形したが溶接部の引張強度が母材強度以上であることを実験で確認している。本実験での計測項目は、重錘に内蔵したひずみゲージ式の衝撃荷重測定用に開発したロードセル（以下、重錘ロードセル）による重錘衝撃力である。また、実験終了後に試験体のひびわれをスケッチし、ひびわれ性状および破壊性状を検討した。

3. 実験結果および考察

3.1 耐衝撃性

図-2 に全試験体の最大重錘衝撃力と重錘の累積運動エネルギーを示す。一般的に重錘衝撃力が大きいほど、また、破壊に至るまでの重錘の累積運動エネルギーが大きいほど RC 柱の耐衝撃性は優れていると考えられる。なお、本実験では目視によって以下の項目に着目して破壊を定義した。①巻き付け補強材料が破断した状態。②補強材は破断しないものの、柱上面（載荷面）に重錘が貫没し、損傷が激しくなった状態。

表-3 巻き付け補強材の力学的特性

補強材	目付け量 (g/m ²)	幅 (mm)	厚さ (mm)	弾性係数 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)
アラミドテープ	425	37.5	0.293	1.29×10^5	25,300
カーボンテープ	300		0.167	2.35×10^5	41,500
鋼板 (SS400)	-		1.2, 2.3, 3.2	2.10×10^5	2,500*

※ 降伏強度

この図から、A-7-3 および S-7 シリーズと C-7-1 の最大重錘衝撃力が他と比べて相対的に大きいことがわかる。すなわち、巻き付け材料の中でも弾性係数の大きい材料を用いた方が最大重錘衝撃力は大きくなる傾向にある。また、弾性係数の低いアラミドテープを用いた場合には、7 段 3 層のように体積補強割合が高

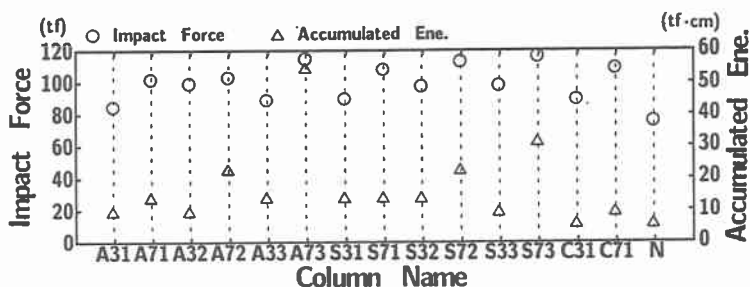


図 - 2 最大重錘衝撃力と重錘の累積運動エネルギー

くなければ最大重錘衝撃力は大きくならない。一方、A-7-2, 7-3 と S-7-2, 7-3 の累積エネルギーは他と比べて相対的に大きい。これに対して、最大重錘衝撃力が比較的大きい C-7-1 の累積エネルギーはそれほど大きくない。これは、C-7-1 が低載荷速度でテープが破断して破壊したためである。

以上から、重錘衝撃力と累積エネルギーをバランス良く向上させるためには、鋼板またはアラミドテープを密な間隔でより多量に配置することが有効であると考えられる。なお、炭素テープは、少量の補強で重錘衝撃力が大きくなる一方で累積エネルギーが増加しにくいことに留意する必要がある。

3.2 体積補強割合と耐衝撃性

最大重錘衝撃力と破断に至るまでの重錘の累積運動エネルギーを耐衝撃性を示す因子と考え、これらと補強材の体積補強割合の関係を検討した。図 - 3 に巻き付け補強材の体積補強割合と最大重錘衝撃力の関係を示す。ここでは、以下の 2 つの体積補強割合を用いて検討を行った。

- ① 補強材の量に基づく実体積補強割合。 ρ_a
- ② 実体積補強割合に鋼板との弾性係数比を乗じた体積補強割合。 ρ_b すなわち、

$$\rho_b = \text{実体積補強割合 } \rho_a \times \frac{\text{補強材料の弾性係数}}{\text{鋼板の弾性係数}}$$

図 - 3 a) より、FRP テープ補強の場合には少ない体積補強割合で鋼板と同等以上の最大重錘衝撃力が励起され、巻き付け補強材の特性が最大重錘衝撃力からみた補強効果に大きく影響していることが分かる。鋼板補強の場合には、3 段と 7 段で衝撃力のレベルが大きく異なるが、いずれの段数でも体積補強割合の増加による最大重錘衝撃力の増加はさほど顕著ではなく、7 段では $P = 115 \text{ tf}$ 程度、3 段では $P = 100 \text{ tf}$ 程度に収束するようである(図中、①、②参照)。7 段配置のように適切な間隔で鋼板が配置された場合の最大重錘衝撃力の増加と補強割合の関係は図中①で表わされ、これを定式化すると

$$\left. \begin{aligned} \frac{f_{cc}}{f_{co}} &= 0.3 \times \rho_a + 1 \\ (0 < \rho_a \leq 1.45 \%) \\ \frac{f_{cc}}{f_{co}} &= 0.045 \times \rho_a + 1.37 \\ (1.45 \leq \rho_a < 3.86 \%) \end{aligned} \right\} \dots (1) \quad \begin{aligned} &\text{ここに、} \\ &f_{cc}: \text{鋼板接着後の軸圧縮耐力} \\ &f_{co}: \text{鋼板接着前の軸圧縮耐力} \\ &\rho_a: \text{鋼板の実体積補強割合} (\%) \end{aligned}$$

図中、A - および S - 試験体において体積補強割合が増加しているにも関わらず衝撃力が減少しているのは、体積補強割合の他に段数が衝撃力に大きな影響を与えることを示している。少ない段数で層数(厚さ)を多くして補強割合を大きくしてもその効果は A, S - 試験体ともに顕著には出現しない。すなわち、段数を多くする(補強材を密な間隔で配置する)方が最大重錘衝撃力を効率的に大きくし、耐衝撃性を向上させる。なお、アラミドテープ補強が 115 tf 程度を示す補強割合は約 1% であり、鋼板が 4% 程度であることから、FRP の必要補強割合は鋼板の約 $1/4$ である。また、アラミドテープ補強の場合も 7 段の 1~3 層で重錘

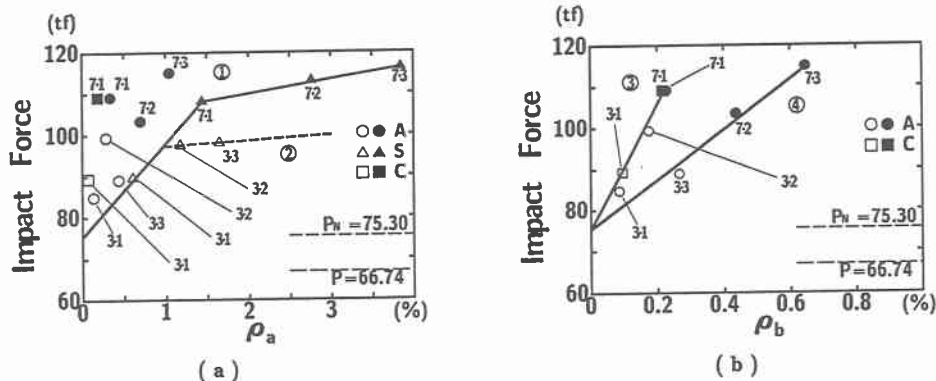


図 - 3 体積補強割合と最大重錘衝撃力の関係

衝撃力の増加は顕著ではなく、最大重錘衝撃力 $P = 115$ tf 程度は、本実験における最大重錘衝撃力の上限值と思われる。図中の $P = 66.74$ tf はコンクリートの平均圧縮強度に断面積を乗じて求めた計算耐力であり、 $P_N = 75.30$ tf は無補強の柱の最大重錘衝撃力の実測値である。これから、無補強における計算耐力と実測耐力の比は 1.13 倍程度であり、軸衝撃力を受ける柱の耐力は静的軸圧縮耐力とほぼ同程度と考えることは安全側であることが分かる。一方、補強後の柱の最大重錘衝撃力の上限值は 115 tf 程度であり、最大で $115 / 75.3 = 1.5$ 倍程度耐力が増加するものと考えられる。

図 - 3 b) で鋼板との弾性係数比を各 FRP テープの実体積補強割合に乗じて補強効果を検討した。その結果、炭素テープ補強の軸圧縮耐力向上効果は、アラミドテープの効果の上限值に相当することが明らかになった。図中の③、④の線は各々補強効果の上限值および下限値を示し、以下のように定式化できる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{f_{cc}}{f_{co}} &= 2.0 \times \rho_b + 1.0 && \text{(上限値)} \\ &(0 < \rho_b < 0.23 \%) \\ \frac{f_{cc}}{f_{co}} &= 0.8 \times \rho_b + 1.0 && \text{(下限値)} \\ &(0 < \rho_b < 0.65 \%) \end{aligned} \right\} \cdots (2)$$

ここに、

f_{cc} : FRP テープ補強後の軸圧縮耐力

f_{co} : FRP テープ補強前の軸圧縮耐力

ρ_b : FRP テープの補正体積補強割合 (%)

なお、FRP テープ補強の場合には実験値にばらつきが多く、鋼板補強でみられた段数の影響や耐力向上効果が収束する傾向が明瞭でないため、補強効果を上・下限値で評価することとした。今後、データ数を増やして詳細に検討する必要がある。

図 - 4 に体積補強割合と重錘の累積運動エネルギーの関係を示す。図 - 4 a) より、鋼板で補強した場合の累積エネルギーは、S-3-3 を除きほぼ体積補強割合の増加に対応して直線的に増加することが分かる。図中 E_N は無補強の試験体の累積エネルギーであり、これを基準に⑤の関係を定式化すると、

$$\frac{E_S}{E_N} = 1.09 \rho_a + 1.0 \quad \cdots (3)$$

$$(0 < \rho_a < 3.86 \%)$$

ここに、

E_S : 鋼板接着後の累積エネルギー

E_N : 鋼板接着前の累積エネルギー

ρ_a : 鋼板の実体積補強割合 (%)

一方、FRP テープ補強の場合は鋼板との弾性係数比を乗じて検討すると、図 - 4 b) から、炭素補強はアラミド補強のほぼ下限値に相当することが分かる。図 - 4 b) における⑥の関係を定式化すると、

$$\frac{E_F}{E_N} = 19.48 \rho_b^2 + 1.0 \quad \cdots (4)$$

$$(0 < \rho_b < 0.65 \%)$$

ここに、

E_F : FRP テープ補強後の累積エネルギー

E_N : FRP テープ補強前の累積エネルギー

ρ_b : FRP テープの補正体積補強割合 (%)

なお、(4) 式を定めるにあたり、炭素テープ補強の場合は体積補強割合が少ないこともあり、10 tf・cm を大きく上回る累積エネルギーの実測値が得られていないことから、今後は体積補強割合の大きな試験体を用いて (4) 式の炭素テープ補強の場合の適用性を検討する必要がある。

3.3 補強材の破断状況とひびわれ性状

表 - 4 に巻き付け補強した試験体の補強材の破断状況を示す。アラミドテープ補強の場合、柱の破壊は最終載荷までテープが破断しない A-7-3 を除き、1 段目のみもしくは 1、2 段目のテープの破断によって生じている。テープの破断位置は隅角部のほか断面中央の場合もあり、破断の方向も縦方向のみならず縦・横方向の場合もみられる。

一方、鋼板補強した柱の破壊は、S-3-2 のみが柱頭部のコンクリートの破壊によって生じたが、他は全て隅角部において鋼板が縦方向に破断して生じている。S-7-1 および -2 は 1 段目の鋼板は破断せず、2 段目のみが破断している。

炭素テープで補強した柱の破壊は、アラミドテープ補強と同様に 1 段目のみもしくは 1、2 段目のテープの破断によって生じている。テープの破断位置は隅角部および断面中央の場合があるが、破断の方向は全て縦方向であり、アラミドテープでみられた横方向の破断はみられない。

本実験では鋼板補強の破断がすべて隅角部の鋼板の縦われによって生じており、これは特に隅角部での鋼板の処理が重要であることを示唆している。一方、炭素テープ補強の場合には極めて低い載荷速度でテープが破断しており、体積補強割合を大きくする必要性が考えられる。

図 - 5 に最終載荷後のひびわれ性状を示す。無補強の N 試験体では、柱頭部から底部にかけて断面中央に縦ひびわれが発生し、柱頭部ではコンクリートが剝落して軸方向筋が座屈していることが分かる。C-3-1 では、無補強と同じ載荷速度で、全体的な損傷は極めて軽微であったにもかかわらず上段の炭素テープが破断して破壊している。なお、N 試験体でみられた断面中央の縦ひびわれは 2 段目のテープで止まっている。S-3 試験体では、S-3-2 を除いて上段の鋼板が破断し、2 段目の鋼板までの広い範囲でコンクリートが大きく剝落している。なお、S-3-1、-2 では上記範囲で鉄筋が座屈しているが、-3 では座屈は生じていないようである。

A-3 試験体では、全て上段のアラミドテープが破断し、2 段目までの範囲でコンクリートの一部が剝落しているが、剝落の状況は A-3-1 の方が 3-2 よりも激しい。なお、3-3 の損傷も顕著であるが、これは他よりも大きな載荷速度で載荷しているためである。

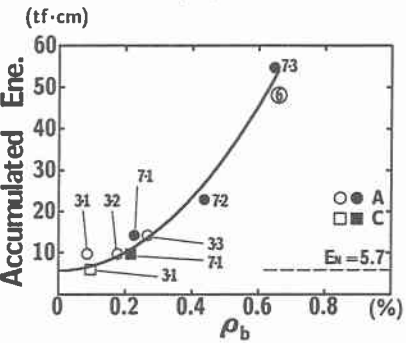
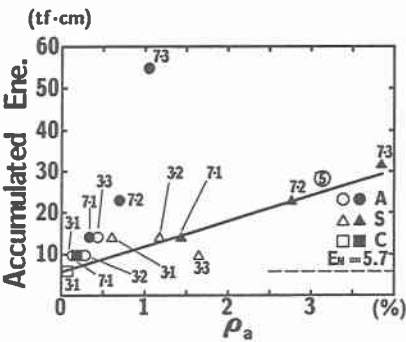


図 - 4 体積補強割合と累積運動エネルギーの関係

表 - 4 補強材の破断状況

試験体名	破断位置		載荷速度 (m/sec)
	段目	場所, 方向	
A - 3 - 1	1	中心, 縦	6
A - 7 - 1	1	角, 縦横	6.5
	2	中心, 縦	
A - 3 - 2	1	角, 縦横	6
A - 7 - 2	1	角, 縦	6.5 × 3
	2	角, 縦	
A - 3 - 3	1	角, 縦横	6.5
A - 7 - 3	切れず	—	(6.5 × 10)
S - 3 - 1	1	角, 縦	6.5
S - 7 - 1	2	角, 縦	6.5
S - 3 - 2	切れず	コンクリートの破壊	6.5
S - 7 - 2	2	角, 縦	6.5 × 3
S - 3 - 3	1	角, 縦	6
S - 7 - 3	1	角, 縦	6.5 × 5
	2	角, 縦	
C - 3 - 1	1	角, 縦	5
C - 7 - 1	1	中心, 縦	6
	2	角, 縦	

次に、7 段補強の試験体のひびわれ性状を検討する。アラミドテープ補強では、重錘の累積エネルギーが各試験体で大きく異なるため同一の尺度では比較できないが、7-1、-2 の損傷は上から 3 段目のテープまでの範囲で顕著である。一方、7-3 のように累積エネルギーが極めて大きい試験体では、損傷範囲が上から 4 段目までに広がり、かつ柱底部にもコンクリートが剥落するなど損傷が見受けられる。鋼板補強の場合の損傷範囲は、上段から 3 段目までであるが、累積エネルギーの大きな S-7-3 では、A-7-3 と同様に柱底部に損傷が見受けられる。炭素テープ補強の場合は、3 段と同様に小さな累積エネルギーでテープ破断で破壊したため、柱頭部の損傷はさして顕著とはなっていない。

4. まとめ

各種巻き付け材料による軸衝撃力を受ける RC 柱の補強効果を主として重錘衝撃力を基に検討した。用いた材料は鋼板とアラミドおよび炭素テープの 3 種類で、補強間隔や補強材厚などを変化させてこれらの影響もあわせて検討した。本実験の範囲内で得られた結論を要約すると、

- (1) 重錘衝撃力と累積運動エネルギーをバランス良く向上させるためには、鋼板またはアラミドテープを密な間隔で厚く配置することが有効である。
- (2) 炭素テープ補強は少量で軸圧縮耐力を増加させるものの低累積エネルギーで破壊しやすい。
- (3) 鋼板接着と FRP テープ補強の効果（軸圧縮耐力の向上および累積運動エネルギーの増大）を算定する式を提案した。

本研究を行うにあたりショーボンド建設（株）に多大なる御支援を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 佐藤昌志、岸徳光、三上浩、西弘明：RC 柱の耐衝撃性に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.17、No.2、pp.369-374、1995。
- 2) 三上浩、岸徳光、佐藤昌志、田村富雄：アラミド繊維を巻き付けた RC 柱の耐衝撃挙動に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.17、No.2、pp.935-940、1995。

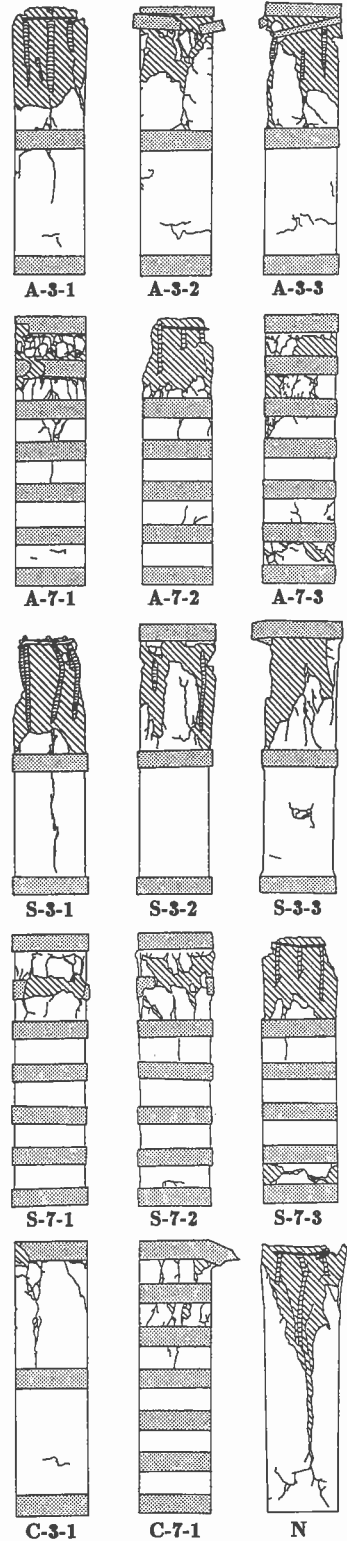


図 - 5 ひびわれ性状