

論文

[2156] 組紐状 AFRP ロッドで補強した RC 梁の耐衝撃挙動

三上 浩*1・田村富雄*2・岸 徳光*3・松岡健一*4

1. はじめに

最近、各種の連続繊維補強材 (FRP ロッド) をコンクリートの補強材として用いる研究が盛んに行われている。また、一部では PC 緊張材の代替などとして実構造物にも適用されている。FRP ロッドは軽量で高引張強度を有し、また耐蝕性に優れ、非帯磁性であるなど従来の補強材にない優れた特質を有している。しかし、FRP ロッドのヤング係数は鋼材の 1/2 から 1/3 程度と低く、またコンクリートとの付着特性は異形鉄筋と大きく異なることや繊維と樹脂の複合材料であることなど、コンクリートの補強材として適用するにあたって留意すべき点もいくつか指摘されている。[1]

FRP ロッドに関する従来の研究には、梁の主筋やせん断補強筋あるいは PC 梁や PRC 梁の緊張材の代替として用いることに関するものが多く見受けられる。また対象とする荷重は静的荷重が多く、動的荷重下における挙動を検討した例は著者らの例を除いては極めて少ないのが現状と思われる。著者らは FRP ロッドが高い弾性伸び率を有しかつ降伏点を持たないことに着目して、FRP ロッドで補強した RC スラブの衝撃応答性状や耐衝撃性を検討してきた。[2] その結果、補強筋の剛性 (ヤング係数に断面積を乗じたもの) や付着特性が RC スラブの衝撃応答性状に大きな影響を与えることが判った。特に、繊維を組紐状に編み上げて成形したロッドの表面に珪砂を接着させた砂付きのアラミド繊維製 FRP (AFRP) ロッドで補強したスラブは、異形鉄筋で補強したスラブよりも耐衝撃性に優れていることが判った。[3]

本文は、異形鉄筋および組紐状の砂付き AFRP ロッドを主筋とする RC 梁を製作し、重錘を梁中央に自由落下させて衝撃実験を行い、各々の挙動を比較検討したのでその結果を報告するものである。ここでは特に、補強筋の配置 (単筋配置と複筋配置) および下端補強筋比 (1% と 2%) が梁の変位応答や補強筋の歪応答ならびに衝撃抵抗強さやひびわれ性状に与える影響を各々の補強筋を用いた梁で比較検討した。

2. 衝撃実験の概要

試験体は表-1 に示す 8 体である。主筋に用いた補強筋は異形鉄筋が D10、D13、砂付きの組紐状 AFRP ロッドは RA9S、RA13S で、ロッド表面に 5 号珪砂 (平均粒径 0.3mm) を接着したものをを用いた。下端補強筋比が 1% と 2% の試験体はそれぞれ細径、太径の補強筋を 2 本用いた。

補強筋の特性を表-2 に示す。なお、AFRP ロッドの特性はカタログ値で、鉄筋の特性は規格値で示した。組紐状 AFRP ロッドはアラミド繊維を組紐機で編み上げた後樹脂を含浸硬化させて成形した。

表-1 試験体の一覧

試験体名	補強筋の種類	下端補強筋比 (%)	補強筋の配置
AsC-S1	RA9S	1	単筋配置
AsC-S2	RA13S	2	〃
AsC-D1	RA9S	1	複筋配置
AsC-D2	RA13S	2	〃
DC-S1	D10	1	単筋配置
DC-S2	D13	2	〃
DC-D1	D10	1	複筋配置
DC-D2	D13	2	〃

*1 三井建設 (株) 技術開発本部技術研究所主任研究員、工博 (正会員)

*2 三井建設 (株) 技術開発本部技術研究所副所長、(正会員)

*3 室蘭工業大学助教授 工学部建設システム工学科、工博 (正会員)

*4 室蘭工業大学教授 工学部建設システム工学科、工博 (正会員)

砂付きのロッドは樹脂が硬化する前にロッド表面に珪砂を接着させて成形した。組紐状 AFRP ロッドのヤング係数は鋼材の約1/3であるが弾性伸び率は鋼材の約 10 倍である。また、引張耐力は同一断面積の異形鉄筋と比べて2.5~3.4倍大きい。

コンクリートは粗骨材の最大寸法が 15mm のレデーミクストコンクリートで、W/Cは38.0%、単位セメント量は432kgである。材令 30 日におけるコンクリートの圧縮強度およびヤング係数は各々 514 (kgf/cm²)、 3.10×10^5 (kgf/cm²)である。なお、衝撃試験時の材令は 47 日 ~ 57 日である。

図-1(a)に試験体の形状寸法および補強筋配置の例(複筋配置の場合)を示す。単筋配置の場合は上端筋と同じ位置に歪測定用の丸鋼(φ4mm)を配置した。なお、張出し部の長さは衝撃による張出し部の慣性力の影響を少なくし、かつ補強筋の定着長を確保するため17.5cmとした。また、各試験体には丸鋼(φ4mm)のスターラップを 75mm ピッチで配置し、衝撃による梁側面でのコンクリートの剝落を少なくするようにした。図-1(b)に歪および変位の測定位置を示す。本実験における測定点は重錘の両側面に取付けた容量 1000G の歪ゲージ型加速度変換器 2 点と上端補強筋(または測定用丸鋼)および下端補強筋に取り付けた歪ゲージ 14 点並びに容量 10mm の渦電流型変位計 5 点である。

衝撃実験は室蘭工業大学に設置されている落下衝撃万能試験機を用いて行った。衝撃荷重は直径が 15 cm で重量が 70kgf の鋼製の円柱からなる重錘を所定の高さにセットした後梁中央に自由落下させて載荷した。なお、梁は両端面から 17.5cm の位置で上下を鋼製のピンを用いて支持した。載荷実験は 1 体目の AsC-S2 は載荷速度(重錘が梁に衝突する直前の速度)を 0.5m/sec から 0.5m/sec 刻みで破壊するまで行

表-2 補強筋の材料特性

補強筋名	RA9S	RA13S	D10	D13
材質	アラミド繊維	アラミド繊維	SD30A	SD30A
公称直径 mm	9.0	12.7	9.5	12.7
公称断面積 mm ²	63	127	71	127
密度 g/cm ³	1.30	同左	7.85	同左
引張耐力 tonf	9.6	19.2	3.2 ~4.3	5.7 ~7.7
降伏耐力 tonf	-	-	2.1以上	3.8以上
ヤング係数 $\times 10^6$ kgf/cm ²	0.70	同左	2.10	同左
弾性伸び率 %	2.0	同左	0.2	同左

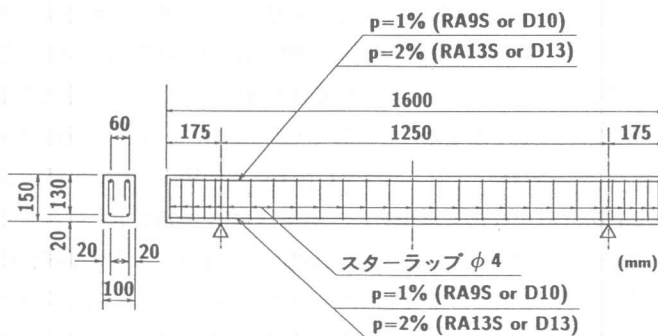


図-1(a) 試験体の形状寸法および補強筋配置の例

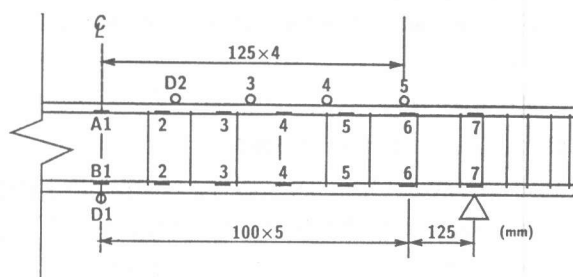


図-1(b) 歪および変位の測定位置

い、その他は 0.5m/sec、1m/sec、以後 1m/sec 刻みで破壊するまで行った。

3. 実験結果および考察

3.1 応答変位の経時変化

図-2に載荷速度が 1m/sec における AsC-D1 と DC-D1 の応答変位分布の経時変化を示した。なお、起点となる時刻は重錘の加速度波形がまさに立ち上がった時刻とした。また、下段には 1m/sec 載荷後のひびわれ図を示した。

これより、AsC-D1では 7.5msec 経過後まではスパン全域で応答変位が増加していたが 10msec 以後は減少し、17.5msec 程度経過した時にはスパン全域の変位がほぼ零にまで復元していることが判る。また、変位分布は短い経過時間の段階から、測点 D2 で変曲点を有する下に凸の分布となり、載荷点直下の測点 D1 と測点 D2 の変位差は少ない。これは、ひびわれ図からも判るように

D1、D2 周辺に何本かの短いひびわれが発生したためと考えられる。

一方、DC-D1 では 5msec 経過後までは応答変位が増加しているが、それ以後は時間経過と共に徐々に減少している。すなわち、第 1 波目(変位零から次の変位零まで)の応答継続時間は AFRP ロッドで補強した梁の方が鉄筋で補強した梁よりも長いことが判る。なお、10msec 経過後までの変位分布の傾向は AsC-D1 と異なり、載荷点から支点までほぼ直線的である。これは、ひびわれ図からも判るように、載荷点付近のひびわれが梁高中心以上の高さまで上昇して、載荷点を中心として角折れの様状態になったためと考えられる。また、20msec 経過後の応答変位分布より、DC-D1 では支点を除く梁の全域が衝撃の反動で上方に振動しているが、この傾向は低剛性の補強筋を用いた AsC-D1 では顕著でないことが判る。

3.2 最大応答変位分布

図-3(a)、(b)に載荷速度が 1m/sec における最大応答変位の分布を補強筋比が 1% ($p=1\%$) と 2% ($p=2\%$) の梁に分けて示した。 $p=1\%$ の場合には、梁のほぼスパン全長にわたり AFRP ロッドを用いた梁の変位が鉄筋を用いた梁に比べて大きく、補強筋の剛性が応答変位量に影響を与えていることが判る。また、AFRP ロッドを用いた梁の側点 D1、D2 の変位量の差は補強筋の配置方法に関わらず少なく、ともに下に凸の変位分布を示している。これに対して異形鉄筋を用いた梁では載荷点直下から支点までほぼ直線的な変位分布を示している。

一方、図-3(b)の $p=2\%$ の場合でも、ほぼスパン全域にわたって AFRP ロッドを用いた梁の変位量が鉄筋を用いた梁の変位量よりも大きいことが判る。また、鉄筋を用いた梁の変位分布は、 $p=1\%$ の梁よりも $p=2\%$ のほうが直線性に乏しいが、AFRP ロッドを用いた梁と比較するとその変位分布はより直線的

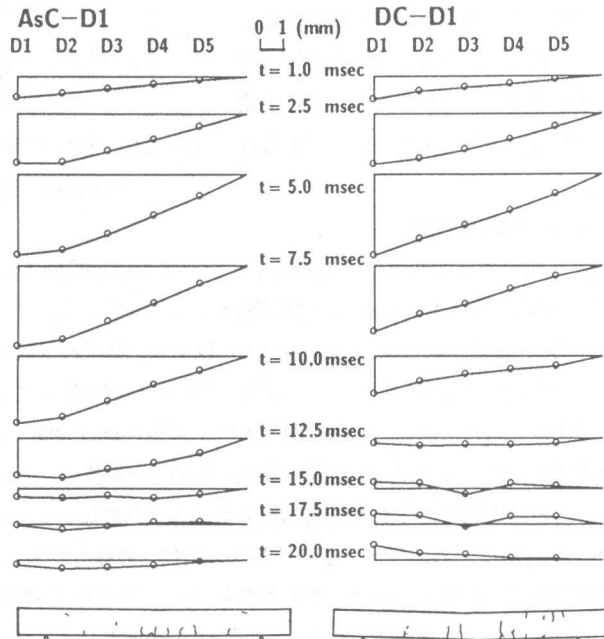


図-2 応答変位分布の経時変化 (1m/sec)

である。これは、AFRPロッドで補強した梁ではスパン全域に小さなひびわれが発生し、梁全体で衝撃力に抵抗し、かつ衝撃力を吸収しているのに対し、異形鉄筋で補強した梁では衝撃荷重によって載荷点近傍のひびわれが梁上部にまで進展し、角折れの前兆を示す状態となったことを示すものと考えられる。

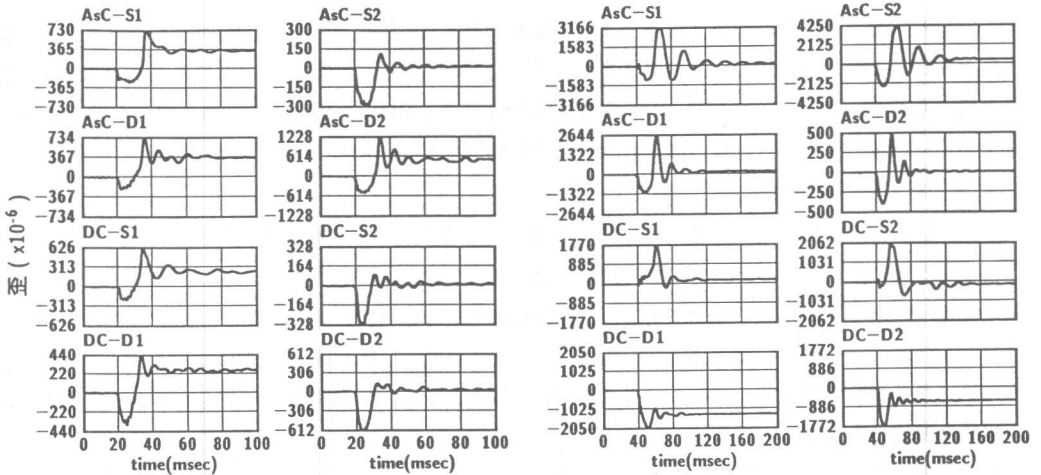
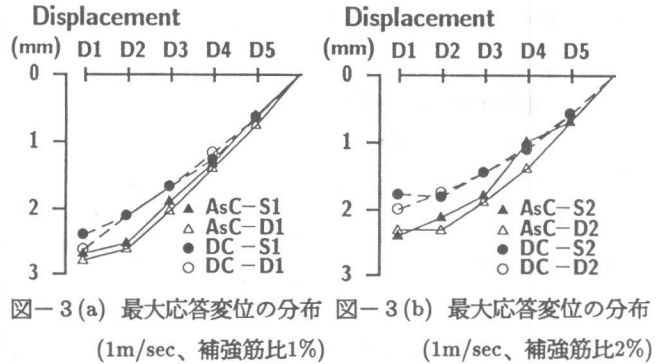
3.3 応答歪波形

図-4(a)に載荷速度が 1m/sec、4m/sec における載荷点直下の上端筋の測点 A1 における応答歪波形を計測の開始時刻を起点として全試験体について示した。

1m/sec 載荷で $p=1\%$ の梁について比較する。いずれも載荷初期には圧縮歪を示し、その後時間経過とともに引張領域に移行している。また、ひびわれが発生して 200μ 以上の歪が残留している。補強筋の剛性で比較すると、単筋、複筋配置ともに 1 波目の継続時間（歪 0 から最大引張歪まで）は AFRP ロッドで補強した梁のほうが異形鉄筋で補強した梁よりも長いことが判る。また、補強筋配置で比較すると両者ともに複筋配置のほうが 1 波目以後の振動の周期が短いようである。

一方、 $p=2\%$ の梁でも、歪の圧縮から引張への移行が $p=1\%$ の梁と同様に見受けられる。しかし、異形鉄筋を用いた梁と AsC-S2 梁の引張歪は $p=1\%$ の場合と異なり 150μ 以下であり、残留する歪が小さくなっている。すなわち、補強筋比の応答歪性状（残留歪の大小）に与える影響は特に異形鉄筋で補強した梁で顕著であることが判る。なお、 $p=1\%$ の梁と同様に、補強筋の剛性は 1 波目の継続時間に影響を与え、 $p=2\%$ でも AFRP ロッドで補強した梁のほうが長い。なお、 $p=2\%$ では 1 波目以後の振動の周期は両補強筋とも補強筋の配置方法には顕著に影響されていないようである。

4m/sec 載荷で比較すると、 $p=1\%$ の梁のうち、DC-S1 では載荷初期に圧縮歪が発生せず、DC-D1 では歪が圧縮から引張に移行せずに圧縮の領域でのみ応答していることが判る。またその値は 1000μ 程度



載荷速度 1m/sec

載荷速度 4m/sec

図-4(a) A1の応答歪波形 (1m/sec,4m/sec)

と極めて大きい。一方、AFRP ロッドで補強した梁では、1m/sec 載荷と同様に歪が明瞭に圧縮から引張に移行している。これらの傾向はほぼ同様に $p=2\%$ でもうかがわれる。これより、載荷速度が増加すると異形鉄筋で補強した梁では下端筋が降伏して中立軸が上昇する等により、補強筋の配置方法が歪の応答性状に顕著な影響を与えるものと考えられる。これはまた、補強筋比も歪応答に影響を与える可能性があることを示している。AFRP ロッドで補強した梁では 1m/sec 載荷と同様に 4m/sec 載荷でも圧縮から引張への歪の移行が見受けられるが、これはAFRPの弾性伸び率および引張耐力が鉄筋と比較して大きく下端筋が降伏（破断）しないためと考えられる。なお、AFRP ロッドを用いた梁の補強筋配置の影響を比較すると、複筋配置のほうが1波目の継続時間が短く、この傾向は $p=1\%$ の梁よりも 2% の梁で顕著である。なお、4m/sec 載荷における AFRP ロッドで補強した梁の応答歪性状に与える補強筋比の影響は 1m/sec 載荷時と同様に特に顕著ではないようである。

図-4(b)に載荷速度が 1m/sec における下端筋の測点 B1 の応答歪波形を異形鉄筋で補強した梁についてのみ示す。DC-S1 では既に 1m/sec の低載荷速度で鉄筋に 4000μ 程度の大きな歪が発生し残留歪が大きいことが判る。また、他の試験体でも残留歪は小さいものの 1000μ 程度の大きな歪が生じている。なお、4m/sec 載荷では鉄筋を使用した梁の下端筋の測点 B1 の歪は全て測定不能であり、載荷点近傍の下端鉄筋は完全に降伏しているものと考えられる。

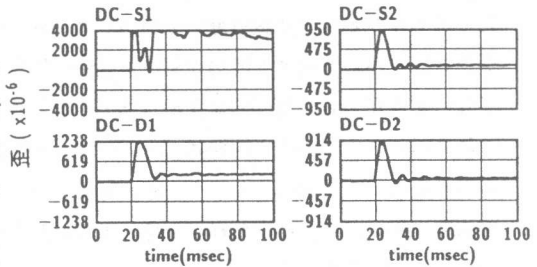


図-4(b) B1の応答歪波形 (1m/sec)

3.4 梁の衝撃抵抗強さ

梁の衝撃抵抗強さの観点から、梁破壊時における重錘の載荷速度と補強筋比および補強筋配置との関係を図-5に示した。なお、本実験における梁の破壊は全ての試験体で梁中央の上部圧縮縁が破壊する圧縮破壊であった。図から、以下のことが判る。(1) 異形鉄筋で補強した梁は補強筋配置に関わらず、 $p=2\%$ のほうが 1% よりも破壊時における載荷速度が大きい。(2) AFRP ロッドで補強した梁は補強筋比に関わらず、複筋配置のほうが単筋配置よりも破壊時における載荷速度が大きい。(3) AFRP ロッドを複筋配置にした梁はいずれの補強筋比でも異形鉄筋で補強したどの梁よりも破壊時における載荷速度が大きい。これらは、補強筋の剛性によって下端補強筋比や補強筋配置の衝撃抵抗強さに与える影響度合いが大きく異なることを示していると考えられる。

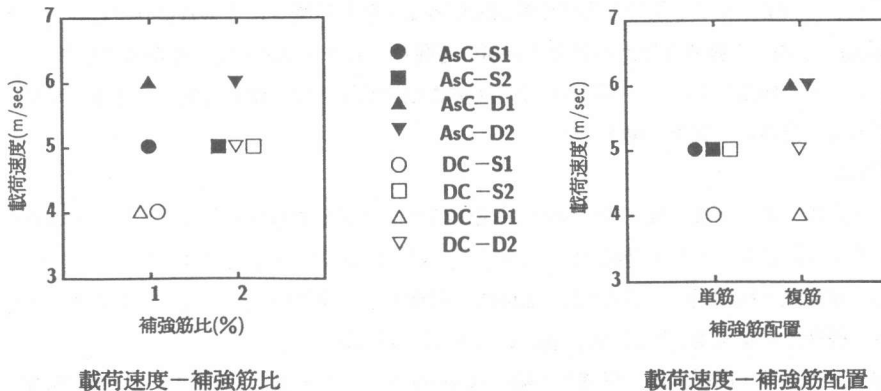


図-5 梁の衝撃抵抗強さ

3.5 梁のひびわれ性状

図-6に AsC-D1 と DC-D1 のひびわれ性状を各載荷速度ごとに示した。異形鉄筋で補強した梁の破壊領域（梁上部側面のコンクリートの剝落）は AFRP ロッドで補強した梁に比べて極端に小さい。ともに、2m/sec 程度から梁の上下を貫通するひびわれが発生し、DC 梁では載荷点直下で角折れが生じ、破壊に到るまでのひびわれの大部分は梁の上下方向のものである。

一方、AFRP ロッドを用いた梁では載荷速度が大きくなるにしたがい、上端、下端筋に沿った水平方向のひびわれや斜めひびわれが多数分散して発生している。すなわち、異形鉄筋を用いた梁では応力が載荷点近傍に集中し、鉄筋が降伏するなどして局部的な変形（損傷）が顕著となる。これに対して、砂付きの組紐状 AFRP ロッドは弾性伸び率が鉄筋の 10 倍程度も大きく、降伏現象がないことや付着強度も高いため、ひびわれが分散して全体変形を示しやすいものと考えられる。

4. まとめ

異形鉄筋および組紐状 AFRP ロッドで補強した RC 梁の耐衝撃挙動を補強筋比および補強筋配置に着目して室内実験によって明らかにした。本実験より得られた結果を要約すると、

- (1) 応答変位性状とひびわれ性状は密接に関連している。
- (2) 最大応答変位量や変位分布性状は補強筋の剛性に顕著に影響される。
- (3) 補強筋の剛性は主たる応答歪波形の継続時間に影響を与える。
- (4) 載荷速度が大きい場合、異形鉄筋で補強した梁では補強筋配置が歪の応答性状に大きな影響を与える。すなわち、下端補強筋比も歪応答に影響を与える可能性がある。
- (5) AFRP ロッドを複筋で配置した梁が最も衝撃抵抗強さに優れていたが、異形鉄筋を用いた梁では下端補強筋比、AFRP ロッドを用いた梁では補強筋配置が衝撃抵抗強さに与える影響度合いが大きい。
- (6) 異形鉄筋で補強した梁のひびわれは上下方向に進展し、スパン中央で角折れが生じやすい。一方、AFRP ロッドで補強した梁のひびわれは上下方向の他に水平方向、斜め方向にも分散して多数発生し、梁部材として全体的な変形挙動を示す。

参考文献

- 1) 三上浩・武富幸朗・石橋一彦・能町純雄：組紐状 AFRP ロッドで補強したコンクリートはりの疲労特性に関する実験的研究、土木学会論文集、第427号/VI-14、pp. 85-94、1991.3
- 2) 三上浩・岸徳光・松岡健一・能町純雄：組紐状 AFRP ロッドを用いたコンクリートスラブの重錘落下衝撃挙動、構造工学論文集、Vol.37A、pp. 1591-1602、1991.3
- 3) 三上浩・加藤正利・田村富雄・岸徳光：組紐状 AFRP ロッドで補強した RC スラブの耐衝撃性に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.14、No.2、pp. 661-666、1992

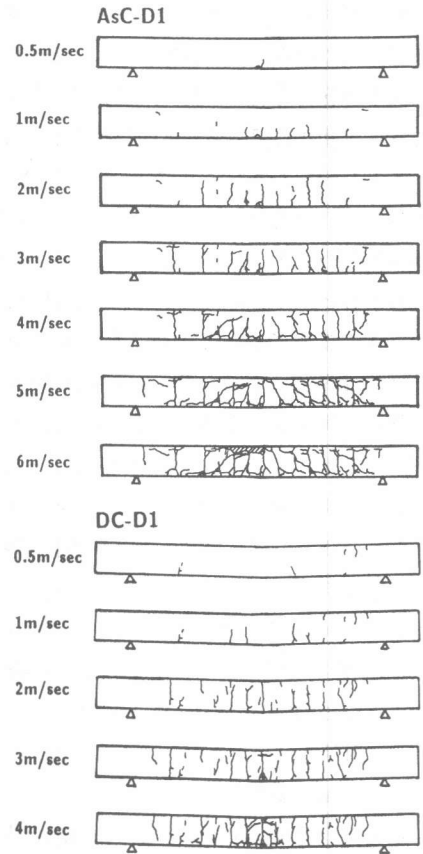


図-6 ひびわれ性状