

(21) 各種FRPロッドで補強したRC梁の繰返し衝撃荷重載荷実験

室蘭工業大学 松岡 健一
 室蘭工業大学 岸 徳光
 三井建設(株) 三上 浩
 ドービー建設工業(株) ○松岡 篤

1 はじめに

近年、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、一部では実構造物にも適用され始めている。FRP ロッドは軽量かつ高引張強度を有し、また耐蝕性に優れ、非帯磁性であることなど従来の補強材にはない優れた特質を有している。しかしながら FRP ロッドの弾性係数は鋼材よりも低く、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 ロッドをコンクリートの補強材に適用するための従来の研究の多くは、FRP ロッドを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である。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検討は極めて少ないのが現状である。著者らはこれまで FRP ロッドが高い弾性伸び率を有しかつ降伏点がないことに着目して、アラミド繊維製 FRP(AFRP)ロッドで補強した RC 部材の衝撃応答性状や耐衝撃性を検討してきた^{2)~3)}。その結果、補強筋の剛性や付着特性が RC 部材の衝撃応答性状に大きな影響を与え、特にすべり量が小さい領域において、付着強度が高い砂付き AFRP ロッドで補強した部材は異形鉄筋で補強した部材よりも耐衝撃性に優れていることが明らかになった³⁾。

本文は、AFRP ロッドの他、炭素繊維製(CFRP)ロッドおよびビニロン繊維製(VFRP)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った結果を報告するものである。ここでは、特に衝突速度を徐々に上昇させ繰返し落下とすることにより各 FRP ロッドの剛性が梁の変位応答や補強筋の歪み応答等に与える影響に関する検討を行っている。

2 衝撃実験の概要

実験に用いた試験体は表-1に示す6体である。いずれも複筋配置である。補強筋比1%の梁の主筋には公称径9.0mmで表面に5号珪砂を接着させたものを用いた。なお、補強筋比2%の梁に関しては、AsCの場合には太径の12.7mmを、CsC、VsCの場合には9mmの径のものを上下に2本束ねて使用した。本実験に用いた補強筋の材料特性を表-2に示す。各FRPロッドはいずれも繊維材料を組紐機で編み上げた後樹脂を含浸し、硬化する前にロッド表面に珪砂を接着させて成形している。

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2回に分けて打設した。1回目に打設したAsC梁のW/Cは38.0%、単位セメント量は432kgである。また、材令30日におけるコンクリートの圧縮強度および弾性係数は各々514(kgf/cm²)、3.10×10⁵(kgf/cm²)である。2回目に打設を行ったCsC、VsC梁のW/Cは41.0%、単位セメント量は350kgである。また、材令20日におけるコンクリートの圧縮強度および弾性係数は各々425(kgf/cm²)、2.69×10⁵(kgf/cm²)である。なお、衝撃試験時の材令はAsC梁が47~57日、CsC、VsC梁が20~22日である。

表-1 試験体の一覧

試験体名	補強筋の種類	補強筋比(%)
AsC-1%	RA9S	1
AsC-2%	RA13S	2
CsC-1%	RC9S	1
CsC-2%	RC9S	2
VsC-1%	RV9S	1
VsC-2%	RV9S	2

図-1(a) に試験体の形状寸法および補強筋配置(補強筋比 1%)を示す。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に 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剥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(CsC, VsC 梁)を示す。なお、AsC 梁の変位は載荷点から 12.5cm 間隔の 5 点で測定した。本実験における測定点は重錘の両側面に取り付けた容量 1000G の歪ゲージ型加速度変換器 2 点と上端、下端補強筋に取り付けた歪ゲージ 14 点および容量 10mm の渦電流型変位計 6(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 15cm 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。梁の支持部は両端面から 17.5cm の位置で鋼製の治具を用いて上下より締めつけ、できるだけピン支持の条件に近づけるようにした。載荷実験は衝突速度(V)を変化させ、衝撃荷重を繰返し載荷して行った。その方法は、第 1 回目として V=0.5m/sec で載荷した後、2 回目からは 1m/sec から始め 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 破壊形式

表-3 に各試験体の破壊時の衝突速度および破壊形式を示す。表より CsC と VsC は補強筋比が増加することによって破壊時の衝突速度も増加している。このことから補強筋比の大小が耐衝撃性に影響を与えているものと考えられる。梁の破壊形式は、AsC 梁の場合には補強筋比に関わらず圧壊であり、

CsC 梁は補強筋比 2% の場合には圧壊であるが上端筋が部分的に破断していた。これは、CFRP ロッドが他のロッドに比べ脆性的であるためと考えられる。VsC 梁は補強筋比 1% の場合に上下端筋ともに破断して破壊している。これは、VFRP ロッドは他のロッドに比べ引張耐力が 1/5 程度と小さいためと考えられる。これより、梁の耐衝撃性を検討する場合には、破壊時の衝突速度の大小のみならず破壊形式を含めた両者を検討する必要があるものと考えられる。特に、CFRP ロッドの場合には脆性的であることを、VFRP ロッドの場合は引張耐力が小さいことを考慮

表-2 補強筋の材料特性

補強筋名	RA9S	RC9S	RV9S
材質	アラミド繊維	炭素繊維	ビニロン繊維
公称直径 mm	9.0	9.0	9.0
公称断面積 mm ²	63	63	63
密度 g/cm ³	1.30	1.55	1.24
引張耐力 tonf	9.6	10.3	2.2
弾性係数 ×10 ⁶ kgf/cm ²	0.70	1.20	0.12
弾性伸び (%)	2.0	1.2	2.0

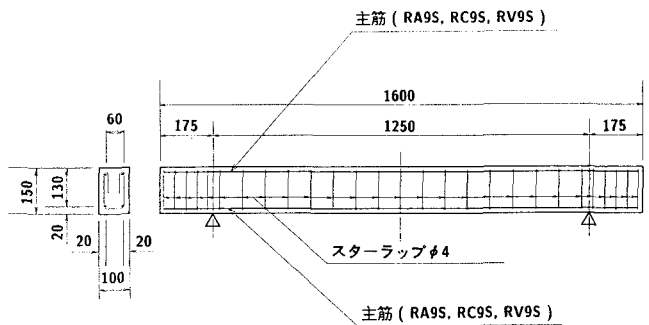


図-1(a) 試験体の形状寸法および補強筋配置 (補強筋比 1% の場合)

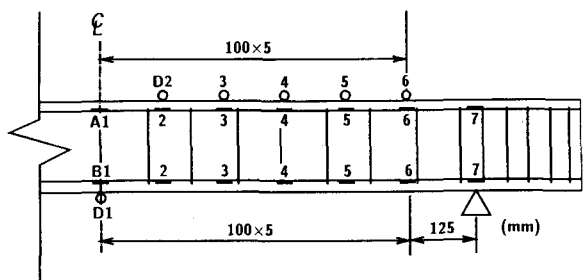


図-1(b) 歪および変位の測定位置

する必要があるものと考えられる。

表-3 破壊時の衝突速度と破壊形式

3.2 最大変位分布

図-2に $V=1\text{m/sec}$ における各試験体の最大変位分布を補強筋比1%の場合について示した。図より載荷点直下および支点周辺を除く軸方向の変位量は VsC が他と比べてかなり大きく、 AsC と CsC の変位差は比較的少ないことがわかる。特にコンクリートの強度や弾性係数が等しい CsC と VsC を比較すると、両者の補強筋の付着特性が等しいものと考えられることより、梁の変形特性には補強筋の弾性係数が影響を与えているものと推察される。その影響は本実験では載荷点より40cmの範囲で示されている。

3.3 繰り返し落下による応答歪波形の推移状況

本実験では衝突速度を段階的に上昇させて繰り返し載荷を行い、破壊した時点で載荷を終了した。本節では、破壊に至る過程を補強筋比2%の試験体の載荷点直下の上下端筋応答歪波形に基づいてその過程として、ここでは特に比較的低衝突速度の $V=1\text{m/sec}$ におけるものと中間的な衝突速度である $V=4\text{m/sec}$ におけるものを取り上げ検討した。以下、各衝突速度毎に検討を行うこととした。

(A) $V=1\text{m/sec}$ 時における応答歪波形

図-3には $V=1\text{m/sec}$ における各梁の測点 A1, B1 の応答歪波形を示している。下端筋の各応答歪波形より主波動の継続時間は AsC, CsC の場合が約14msec、 VsC の場合が約16msecと、 VsC が AsC, CsC より若干長いことがわかる。下端筋歪の最大値の大小関係は $CsC < AsC < VsC$ であり、その比率はほぼ $CsC:AsC:VsC=1:2:3$ となっている。一方、荷重載荷時の上端筋歪の最大値の場合は $VsC < CsC < AsC$ となっている。歪が断面方向に線形変化するものと仮定して下端筋歪の主波動の最大応答時の各梁の中立軸を求めると、下縁からの距離はそれぞれ $CsC:10.10\text{cm}$, $AsC:10.97\text{cm}$, $VsC:12.52\text{cm}$ となっている。いずれの梁の場合も重心軸よりも上方に移動しており、特に VsC の場合には上端筋近傍に位置していることがわかる。また、下端筋歪の主波動は、いずれの梁の場合も正弦半波形状を示しており、その後引張側に中心が移動した状態で減衰自由振動を呈している。それに対して、上端筋歪の波動形状は3梁とも異なった状態を示している。 CsC の場合は下端筋歪波形とほぼ似た分布形状を示している。一方、 AsC の場

試験体名	破壊時の衝突速度(m/sec)	破壊形式
AsC-1%	6	圧壊
AsC-2%	6	圧壊
CsC-1%	6	圧壊
CsC-2%	7	圧壊(上端筋が部分的に破断)
VsC-1%	6	上下端筋の破断
VsC-2%	7	圧壊

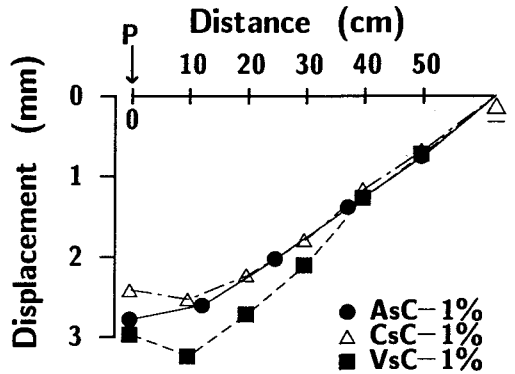


図-2 最大変位分布 ($V=1\text{m/sec}$, 補強筋比1%)

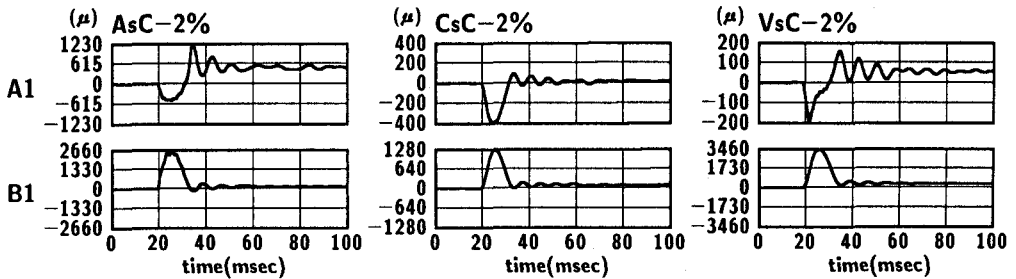


図-3 $V=1\text{m/sec}$ における応答歪波形(A1, B1)

合は荷重除荷後ののはね返りにより衝撃荷重載荷時に最大振幅の2倍以上の引張歪を示し、その後約400 μ の引張歪を中心として減衰自由振動状態となっている。VsC 場合には荷重載荷後ののはね返りによる最大引張歪は約150 μ と AsC 梁よりも小さい値となっており、60~70 μ の引張歪を中心として減衰自由振動状態となっている。

(B) V=4m/sec 時における応答歪波形

図-4には V=4m/sec 時の応答歪波形を示している。3 梁の下端筋歪分布を比較すると、最大値の大小関係やその比もほぼ V=1m/sec の場合と同様である。また、主波動の継続時間は CsC, AsC が 15~16msec、VsC 梁が 24msec である。V=1m/sec の場合と比較すると CsC, AsC の場合は継続時間はそれほど延びていないようであるが、VsC 梁の場合は 8msec も延びていることがわかる。衝撃荷重載荷後の減衰自由振動状態では、V=1m/sec の場合は 3 梁とも周期が 7msec 前後であったが、V=4m/sec の場合には補強材の剛性の大小に対応して最も周期が短い CsC で約 10msec であり、CsC, AsC, VsC の順に振動周期が長くなっている。一方、上端筋歪波形に関して検討を行うと、衝撃荷重除荷後の減衰の程度は CsC, AsC, VsC の順に大きくなっていることがわかる。波形的には AsC と CsC がほぼ類似な分布を呈している。しかしながら、VsC 梁の場合は衝撃荷重載荷時に既に引張歪となっている。これは繰返し落下によって劣化が蓄積され衝撃初期より中立軸が上端筋よりも上方に移動したためと考えられる。その後除荷によるリバウンドによって負曲げの状態となりさらに大きな引張歪が発生したものと考えられる。

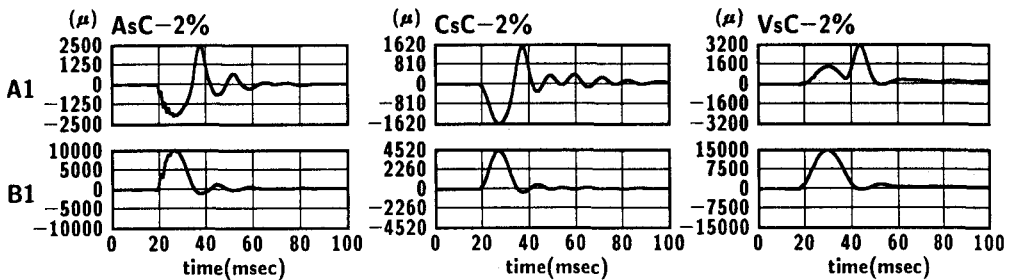


図-4 V=4m/sec における応答歪波形(A1,B1)

3.4 最大歪と衝突速度の関係

図-5には、補強筋比2%の場合における B1 と B4 の最大引張歪と衝突速度の関係を示している。(a), (b)図はそれぞれ B1, B4 に関する結果である。なお、ここでは残留歪を無視して整理している。(a)図より、B1 の最大歪はいずれの試験体においても衝突速度にほぼ比例して増大していることがわかる。また、最大歪は衝突速度に関わらず VsC が最も大きく、次いで AsC, CsC の順になっていることがわかる。これは補強筋の弾性係数の大小関係と一致している。(b)図より、V=3m/sec 程度までは試験体によらずほぼ同程度の最大引張歪を示しているが、それ以後は各梁間で差が生じ、CsC, VsC, AsC の順に大きくなっている。また、CsC と VsC は衝突速度にほぼ比例して最大歪も増加しているのに対し、AsC は V=3, 4, 5m/sec において V=3m/sec 以下の場合よりも増加率が大きくなっている。

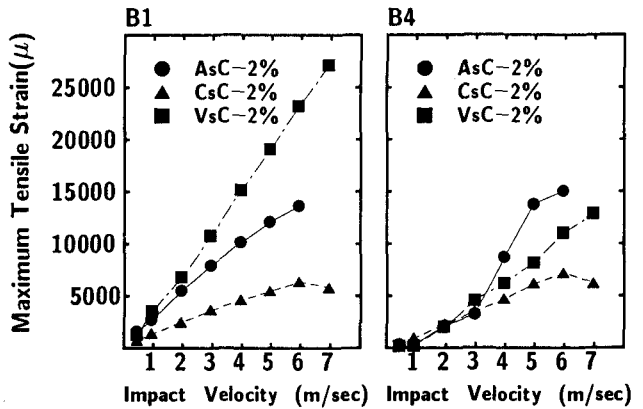
次に(a)図と(b)図の各衝突速度に対する歪がお互いほぼ同一経過時間における値でもあることより、(a)図と(b)図より各梁の歪挙動を検討すると、CsC の場合には B1 と B4 の値がいずれの衝突速度に対してもほぼ同じであることより、CsC は中央点への衝撃荷重載荷に対して中央部 $l/2$ の領域で均等に抵抗しているものと考えられる。一方、VsC の場合にはいずれの衝突速度に対しても B4 の値が B1 の 1/2 以下であり、主に載荷点近傍で衝撃荷重に抵抗していることがわかる。また、AsC の場合には V=3m/sec 以下では VsC と同様に B4 の値が B1 の 1/2 以下で主に載荷点近傍のみ衝撃荷重に抵抗しているようである。しかしながら、V=4m/sec 以上では B1 と B4 がほぼ同一となり、CsC と同様な分布性状を示している。以上の結果はいずれの梁も第1回目載荷時より 500 μ 以上の歪値を示し、

コンクリートにはひびわれが発生していることより各補強筋の弾性係数および弾性伸び率の大小に関係しているものと考えられる。すなわち、VsC の場合は弾性係数が $1.2 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ と小さく脆化性に富むため、載荷点部のコンクリートのひびわれの進行も早く、載荷点部への応力の集中が助長されたものと考えられる。しかしながら最大の弾性伸び率が 2% (20000μ) もあるため $V=7\text{m/sec}$ まで破壊に至らなかったものと考えられる。CsC の場合は弾性係数が $1.2 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ で鉄筋の 1/2 強の剛さであるが、弾性伸び率の限界が 1.2% と鉄筋の 6 倍程度あるため、他の梁に比較して中央部の歪成分も小さく広い領域で荷重に抵抗しているものと考えられる。AsC の場合は弾性係数の大きさが VsC より大きく CsC より小さい。また、弾性歪の限界が VsC と同程度であるため、衝突速度が小さい場合には後述のようにコンクリートのひびわれも中央部に多数発生し、載荷点近傍で衝撃荷重に抵抗しているが、やがてひびわれが梁全体に広がるにつれ膜作用に似た現象により梁の広い領域で衝撃荷重に抵抗するものと考えられる。

3.5 ひびわれ性状

図-6 に各衝突速度毎のひびわれ状況を補強筋比1%の場合について示した。図よりひびわれの発生過程がわかる。ひびわれは、まず下縁に発生した後上下方向に全体的に広がり、その後斜め方向にも発生し最終的には水平方向にも発生する。まず VsC 梁について見ると、ひびわれは AsC や CsC よりも少なく、主に鉛直方向に発生していることがわかる。これまでの検討から、VsC は最も変形量が多いと考えられるが、ひびわれ性状から判断しても応力が載荷点付近に集中しやすいためひびわれが少なくなり、ひびわれ幅が大きくなったものと考えられる。

AsC と CsC を比較すると、破壊付近のひびわれ性状を見ると前述のように衝突速度が大きい場合には両者の応力



(a) 測点 B1

(b) 測点 B4

図-5 最大引張歪と衝突速度の関係

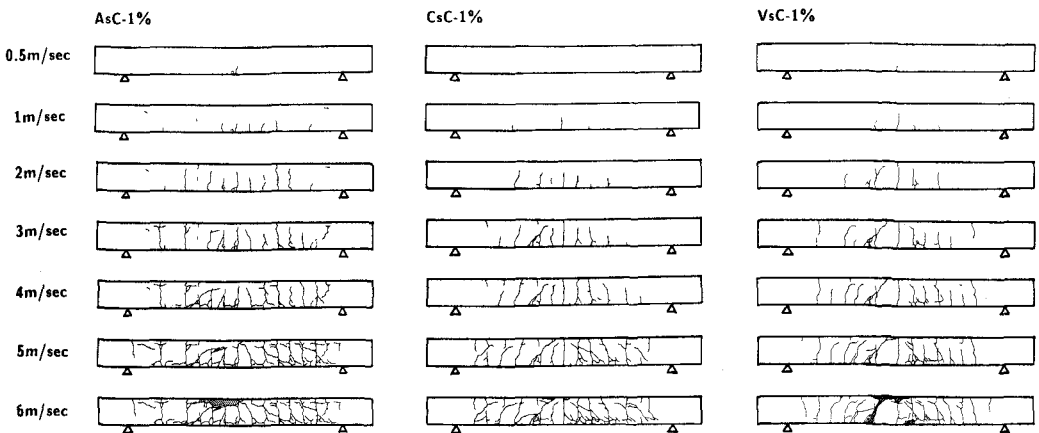


図-6 ひびわれ性状

の分散性は同じような特徴を有していることがわかる。また、AsC は CsC に比べ衝突速度の低い段階からひびわれが発生し、破壊時には下端筋のほかに上端筋に沿うひびわれも多数発生している。これは、前述のように補強筋の弾性係数の差が顕著に現れた結果と考えられる。

4 まとめ

各種連続繊維で補強した RC 梁の衝撃応答特性を重錘を自由落下させる室内実験により検討した。本実験の範囲内で得られた結果を要約すると、

- 1) 梁の耐衝撃性を考える上で破壊時の衝突速度と破壊形式の両者を検討する必要がある。特に、CFRP ロッドを補強筋に用いた場合はロッドが脆性的であることを、VFRP ロッドを補強筋に用いた場合は引張耐力が小さいことを考慮する必要があるものと考えられる。
- 2) 補強筋の剛性の低い梁ほど低衝突速度の段階から最大変位分布に剛性の影響が現れ始める。また、衝突速度が上昇するにつれその傾向が顕著になる。
- 3) 繰返し載荷時には補強筋の剛性が低いほど減衰の程度が大きくなり振動周期も延びる。
- 4) 下端筋の最大引張歪と衝突速度の関係から、CsC は比較的広範囲に応力が分散し、AsC の場合においても衝突速度が大きくなると比較的分散性が良くなるが、VsC は載荷点近傍に応力が集中しやすい。
- 5) ひびわれ性状から、AsC と CsC の応力の分散性は同程度であり、VsC は多少劣るものと考えられる。また、AsC と CsC の比較から、低剛性の AsC では低衝突速度の段階からひびわれが発生し、最終的には上下端筋に沿うひびわれもCsCに比べて多く発生する。

参考文献

- (1)三上、武富、石橋、能町「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、1991.3. PP85-94
- (2)三上、岸、松岡、能町「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,1991.3,pp1591-1602
- (3)三上、加藤、田村、岸「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.2,1992,pp661-666