

I-34

鉄筋およびAFRPロッドを用いたRC梁の衝撃応答性状

室蘭工業大学 正 員 岸 徳 光
 室蘭工業大学 正 員 松 岡 健 一
 三井建設(株) 正 員 三 上 浩
 室蘭工業大学 学生員 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、非常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著者らの研究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が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、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った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)ならびに補強筋比(1% と 2%)が梁の変位応答や補強筋の歪み応答ならびに耐衝撃性に与える影響を各々の補強筋を用いた梁で比較検討することとした。

2. 衝撃実験の概要

実験に用いた試験体は表-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(公称径 9.0mm, 12.7mm)で、ロッド表面に 5 号珪砂を接着したものをを用いた。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 本用いて製作した。本実験に用いた補強筋の特性を表-2に示す。なお、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。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 ロッドの弾性係数は鋼材の約

1/3 であるが弾性伸び率は鋼材の 0.2% に比べて約 10 倍も大きい。また、引張耐力は異形鉄筋の 2 ～ 3 倍高い。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

表-1 試験体の一覧

試験体名	補強筋の種類	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	〃

Dynamic Response Behavior of RC Beams Reinforced with Steel Bars and AFRP Rods under Impact Load.
 by Norimitsu KISHI, Ken-ichi MATSUOKA, Hiroshi MIKAMI and Atsushi MATSUOKA

び弾性係数は各々514(kgf/cm²)、
3.10×10⁵ (kgf/cm²)である。な
お、衝撃試験時の材令は 47 日
～ 57 日である。

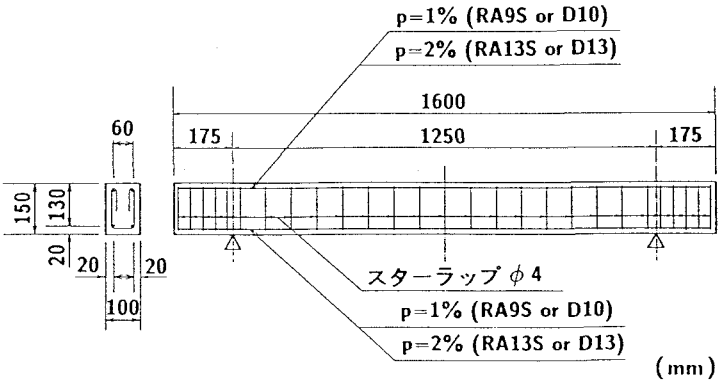
図－1 (a) に試験体の形状寸
法および補強筋配置の例 (複筋
配置の場合)を示す。単筋配置
の場合は上端筋と同じ位置に歪
測定用の丸鋼(φ4mm)を配置
した。なお、張出し部の長さは
衝撃による張出し部の慣性力の
影響を少なくし、かつ補強筋の
定着長を確保するため 17.5cm
とした。また、各試験体には丸
鋼 (φ4mm)のスターラップを
75 mm ピッチで配置し、衝撃
による梁側面でのコンクリートの
剥落を少なくするようにした。

図－1 (b) に歪および変位の測
定位置を示す。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 5 点である。

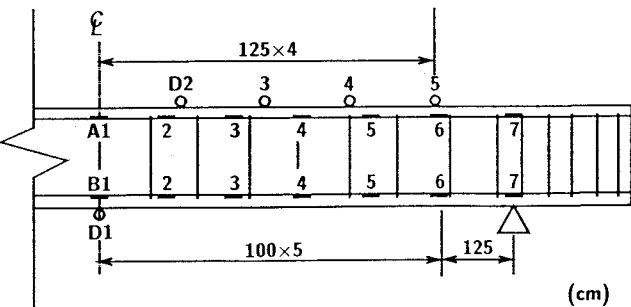
衝撃実験は室蘭工業大学に設
置されている落下衝撃万能試験
機を用いて行った。衝撃荷重は
直径が 15cm で重量が 70kgf の
鋼製の円柱からなる重錘を所定
の高さにセットした後梁中央に
自由落下させて载荷した。なお、
梁は両端面から 17.5cm の位置
で上下を鋼製のピンを用いて支
持した。载荷実験は 1 体目の
AsC-S2 は载荷速度を 0.5m/sec
から 0.5m/sec 刻みで破壊する
まで行い、その他は 0.5m/sec、
1.0m/sec、以後 1.0m/sec 刻みで破壊するまで行った。衝撃実験の概観を写真－1 に示す。

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
弾性係数 ×10 ⁶ kgf/cm ²	0.70	同左	2.10	同左
弾性伸び (%)	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

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す。また、下段には 1m/sec 載荷後のひびわれ図および載荷点直下の測点 D1 の応答変位波形を示す。これより、AsC-D1 では 7.5msec まではスパン全域にわたり応答変位が増加しているが 10msec 以後は減少し、17.5msec 程度ではスパン全域で変位が零レベルまで戻っていることが判る。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 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徐々に減少している。すなわち、応答変位波形の比較からも判るように、第 1 波目（変位 0 から次の変位 0 まで）の応答継続時間は AFRP ロッドで補強した梁のほうがより長いことが判る。10msec 経過時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、載荷点直下にひびわれが集中してそ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ような状態になったためと考えられる。なお、20msec 経過時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% と 2% の梁に分けて示した。1% の場合には、AFRP ロッドを用いた梁の変位は鉄筋を用いた梁に比べて梁のほぼスパン全長にわたり大きく、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。

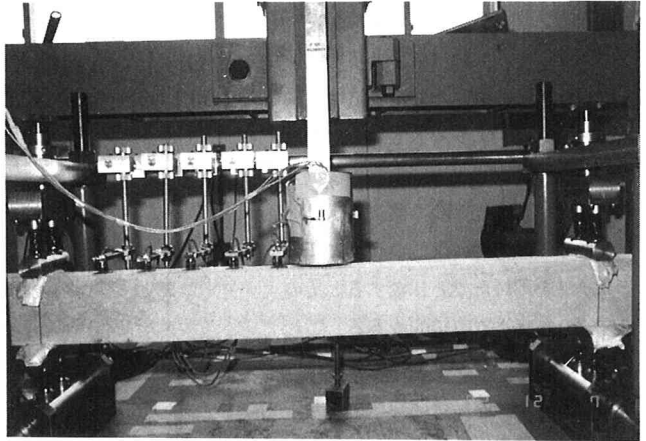


写真-1 衝撃実験の概観

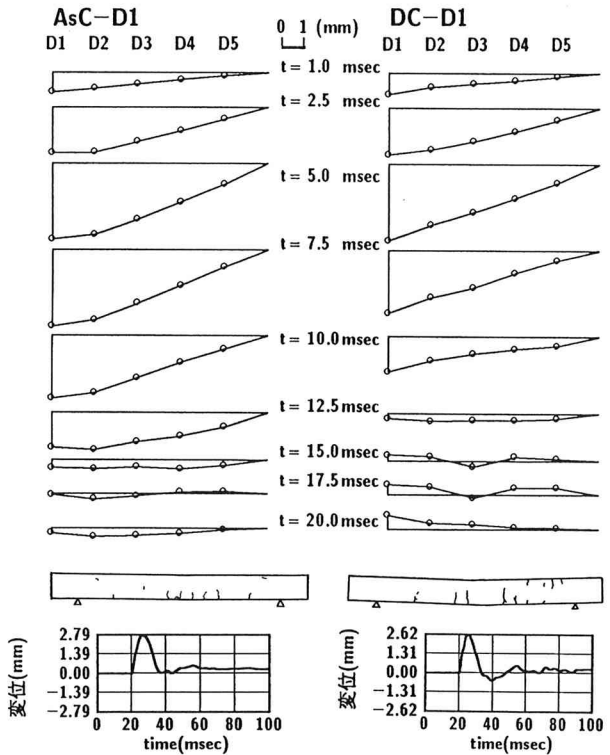


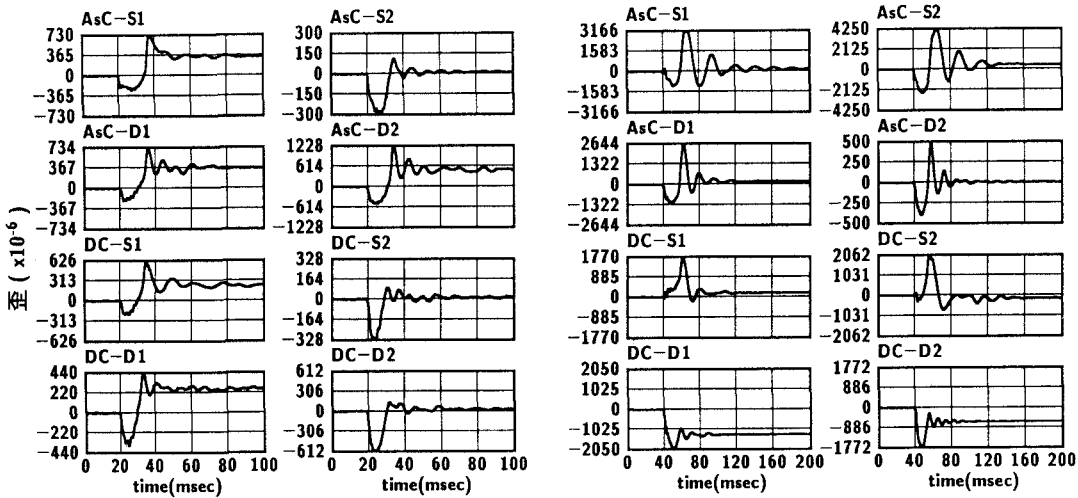
図-2 応答変位分布の経時変化

一方、図-3(b)の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、補強筋比1%の梁よりも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である。これは、AFRP ロッドで補強した梁の場合には梁全体にひびわれが入り梁全体で衝撃力に抵抗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の場合には衝撃荷重によっ

て載荷点近傍が他に比較してより大きな損傷を受け角折れの状態になっていることを意味しており主に載荷点部近傍で衝撃力に抵抗していることを示していると考えられる。

3.3. 応答歪波形

図-4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全試験体について示した。1m/sec 載荷で補強筋比が1%の梁について比較すると、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おり、ひびわれが発生し200 μ 以上の歪が残留していることが判る。一方、これらを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。



載荷速度 1m/sec

載荷速度 4m/sec

図-4 応答歪波形 (1m/sec, 4m/sec)

一方、補強筋比が 2% の梁と比較すると、歪の圧縮から引張への移行は 1% の梁と同様に見受けられるが、AsC-D2 を除いて引張歪は 150μ 以下であり残留する歪は小さい。これより、補強筋比の応答歪性状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、補強筋比が 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、2% の梁でも AFRP ロッドで補強した梁のほうが長い。一方、2% では 1 波目以後の振動の周期は両補強筋とも補強筋配置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、補強筋比が 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しないで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 2000μ 程度と極めて大きい。一方、AFRP ロッドで補強した梁では 1m/sec 載荷と同様に歪が圧縮から引張に移行している。すなわち、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ため、補強筋の配置方法で歪の応答性状が極端に異なるが、AFRP ロッドで補強した梁ではロッドの弾性伸び範囲および弾性強度も大きいため未だ下端筋も降伏せず、1m/sec 載荷と同様に圧縮から引張への歪の移行が見受けられるものと考えられる。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、この傾向は補強筋比が 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 載荷時ほどは顕著でないようである。

3.4. 梁の耐衝撃性

梁の耐衝撃性の観点から、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 に示す。なお、本実験における梁の破壊は全ての試験体で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、補強筋比 2% のほうが 1% よりも破壊時の載荷速度が大きい。(2) AFRP ロッドで補強した梁は補強筋比 1%、2% に関わらず、複筋配置のほうが単筋配置よりも破壊時の載荷速度が大きい。(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の載荷速度が大きい。これらは、補強筋の剛性によって補強筋比や補強筋配置の耐衝撃性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。

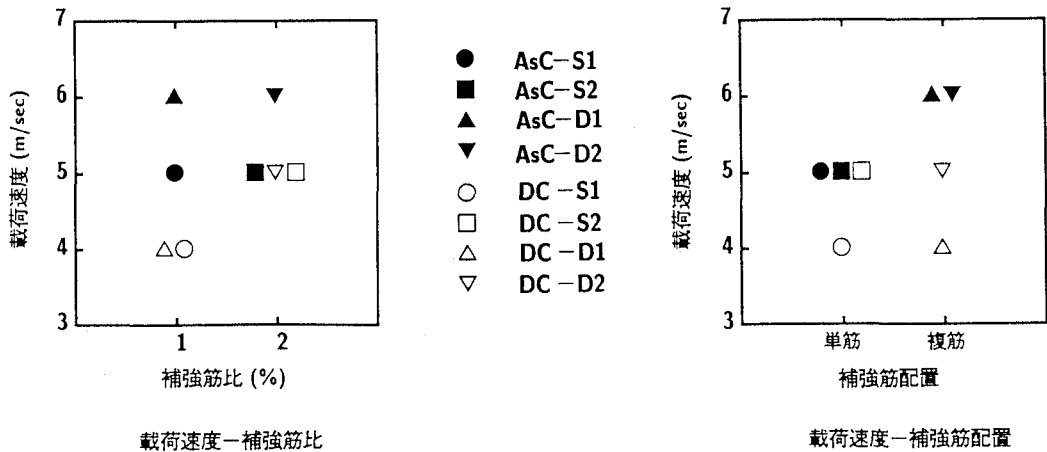


図-5 梁の耐衝撃性

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する。すなわち、異形鉄筋を用いた梁では応力が載荷点直下に集中し、鉄筋が降伏するなどして局所的な変形が顕著となる。これに対して、砂付きの組紐状 AFRP ロッドは弾性伸び範囲が鉄筋の 10 倍程度も高く、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 梁の衝撃応答性状および耐衝撃性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。本実験から得られた結果を要約すると、

- (1)低載荷速度における応答変位性状は梁破壊時における変位性状と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や弾性伸び率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。また、載荷速度が大きくなると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。これは下端筋が降伏するか否かが上端筋の歪応答性状に大きな影響を与えるためであり、同時に補強筋比が歪の応答性状に大きな影響を与えることを示している。
- (4)耐衝撃性はAFRPロッドを複筋で配置した梁が最も優れていたが、異形鉄筋を用いた梁では補強筋比、AFRPロッドを用いた梁では補強筋配置が耐衝撃性に与える影響度合いが高い。
- (5)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。

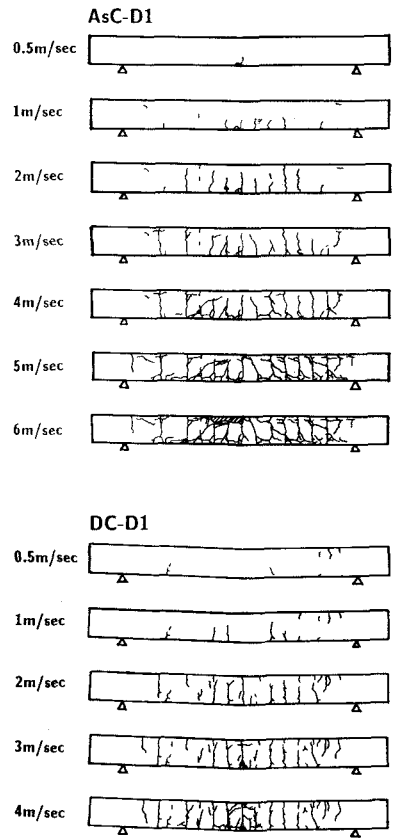


図-6 ひびわれ性状

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