

I-21 緊張材の特性と配置位置が PC 梁の耐衝撃挙動に及ぼす影響

室蘭工業大学	正 員	松 岡 健 一
三井建設 (株)	正 員	三 上 浩
三井建設 (株)	正 員	中 島 規 道
北海道大学	正 員	三 上 隆

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ている。FRP ロッドのヤング係数は PC 鋼材と比較して小さいため、特にプレストレストコンクリートの緊張材の代替として用いられることが多く、一部においては実構造物にも適用されている。FRP ロッドは軽量かつ高引張強度を有し、耐蝕性に優れ、非常磁性であるなど従来の PC 鋼材にない優れた特質を有している。また、高い弾性伸び率を有し、降伏点を有しないことは、衝撃力を受けるコンクリートの補強材として有利な特質であると考えられる。しかし、FRP ロッドを緊張材として用いたコンクリートの衝撃挙動に関する研究例は著者らの例以外には極めて少ないのが現状である。一方、従来の PC 鋼材を用いた部材の衝撃挙動に関する研究例も少なく、衝撃挙動におよぼすプレストレスの影響はまだ十分には明らかとなっていない。著者らの AFRP ロッドを緊張材に用いた PC 梁の衝撃挙動に関する研究結果から、緊張材の配置位置は PC 梁の衝撃挙動に大きな影響を与え、上下核点に緊張材を配置した梁が総合的に優れた耐衝撃性を示すことが明らかになっている¹⁾。

本研究では、各種 PC 梁の衝撃挙動を明らかにするために、アラミド繊維を用いた組紐状 FRP (AFRP) ロッドおよび PC 鋼より線を緊張材に用いた PC 梁を製作して重錘落下衝撃試験を行い、PC 梁の衝撃挙動におよぼすプレストレスの影響についての検討を行なった。衝撃挙動におよぼすプレストレスの影響因子として、緊張材の材質、導入プレストレス量、緊張材の配置位置などが考えられるが、本研究では緊張材の材質のほか、総プレストレス量 (断面中心でのプレストレス応力) を一定として緊張材位置を変化させた実験を行い、各々が PC 梁の耐衝撃挙動に与える影響を検討した。

2. 実験の概要

試験体の一覧を表-1に示す。試験体は、同一の緊張材および配置位置を有する試験体を各々3体、合計18体製作した。PC 緊張材として用いた材料は、組紐状 AFRP ロッド FA15 および 7 本より PC 鋼線 T15.2B である。緊張材の力学的特性を表-2に示す。緊張材に AFRP ロッドを用いた F 梁および PC 鋼線を用いた P 梁は、ともにプレテンション方式で製作した。緊張材位置は、(1) 断面下縁近傍位置に 2 本 (A 配置)、(2) 断面下側核点位置に 2 本 (B 配置)、(3) 断面上下の核点位置に 2 本 (C 配置) の 3 種類とした。なお、総プレストレス量はいずれも同一とした。プレストレス応力は断面中央位置で 50 kgf/cm^2 である。コンクリートは 28 日圧縮強度が 770 kgf/cm^2 で、ヤング係数は $3.72 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ である。なお衝撃実験はコンクリート打設後 110~116 日に行い、実験時の材令における圧縮強度は 806 kgf/cm^2 であった。

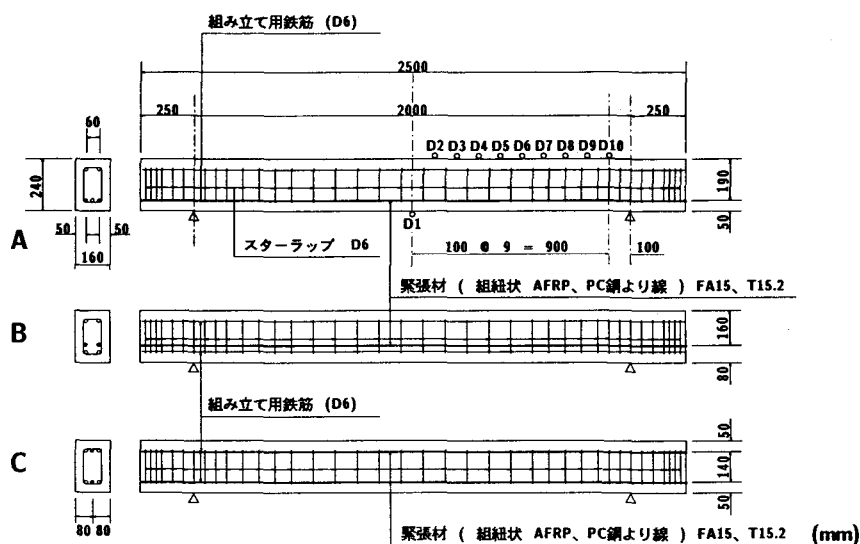
図-1に試験体の形状寸法と緊張材の配置位置および変位計の位置を示す。なお、PC 梁の張り出し部の長さは衝撃による張り出し部の慣性力の影響を少なくし、かつ緊張材の定着長を十分に確保するため 25 cm とした。また、衝撃による梁側面でのコンクリートの剝落を少なくするため、各試験体にはスターラップ (異形鉄筋、径 6 mm) を 100 mm ピッチで配置した。衝撃荷重は直径 15 cm、重量 200 kgf の円柱状の鋼製重錘を所定の高さにセットした後、梁中央部に自由落下させて載荷した。重錘には衝突時の加速度を測定するために容量 1,000 G の歪ゲージ型加速度変換器を両側に 2 個設置した。梁の支持方式は、試験体両端面

表－１ 試験体の一覧

試験体名	緊張材の種類	緊張材位置	載荷速度 (m/sec)
F-A-5	AFRP ロッド	A	5
F-A-6			6
F-A-7			7
F-B-5	AFRP ロッド	B	5
F-B-6			6
F-B-7			7
F-C-5	AFRP ロッド	C	5
F-C-6			6
F-C-7			7
P-A-5	PC 鋼より線	A	5
P-A-6			6
P-A-7			7
P-B-5	PC 鋼より線	B	5
P-B-6			6
P-B-7			7
P-C-5	PC 鋼より線	C	5
P-C-6			6
P-C-7			7

表－２ 緊張材の力学的特性

緊張材名称	AFRP ロッド FA15	PC鋼より線 T15.2B
材 質	アラミド繊維	SWPR7B
公称直径 (mm)	14.7	15.2
公称断面積 (mm ²)	170.0	138.7
密度 (g/cm ³)	1.30	7.85
引張耐力 (tonf)	24.0	26.6
降伏耐力 (tonf)	—	22.6
ヤング係数 ($\times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$)	0.70	2.0
弾性伸び率 (%)	2.00	0.15~0.20



図－１ 試験体の形状寸法と緊張材の位置および変位計の位置

から25 cm の位置で跳ね上がりを防止するために、梁の上下を鋼製の治具を用いて固定している。その治具全体は梁の回転を拘束しないように工夫されており、ピン支持の条件に近いものとなっている。なお、支点部には応答特性の優れたロードセルを設置し、支点反力の測定を行った。さらに、梁の中央から10cm 間隔で非接触型の変位計（容量80mm）を設置して梁の応答変位を測定した。また、衝撃実験終了後にはひびわれの発生状況を観察した。載荷荷重は重錘が梁に衝突する直前の速度を載荷速度として、 $V=5\text{ m/sec}$ 、 6 m/sec および 7 m/sec の3 ケースを考え各試験体に1 回のみ載荷した。

3. 実験結果および考察

3. 1 応答変位波形

載荷速度が $V=7\text{ m/sec}$ における各試験体中央（測点 D1）の応答変位波形を図－2 に示す。F 梁における下向き応答変位（+ 変位）を緊張材の配置位置と比較すると、C タイプが最も応答変位量が大きく、

C>B>A の順序で小さくなっていることが分かる。

応答変位は各タイプともに下向き変位からリバウンドによる上向き変位に移行している。上向き変位量は下向き変位とは逆に A タイプが最も大きく、 $A>B>C$ の順序に小さくなっている。特に A タイプでは下向き最大変位量の 70 % 程度の値を示しており、跳ね返り現象が著しいことが分かる。これらは緊張材の配置位置の違いおよびそれともなう断面下縁の導入プレストレス量が異なるためと考えられる。また、主波動の正弦半波（載荷初期から次の変位 0 まで）の継続時間は、A タイプが最も短く $A<B<C$ の順に長くなっている。すなわち、緊張材の配置位置は主波動の継続時間にも影響を与えていることが分かる。

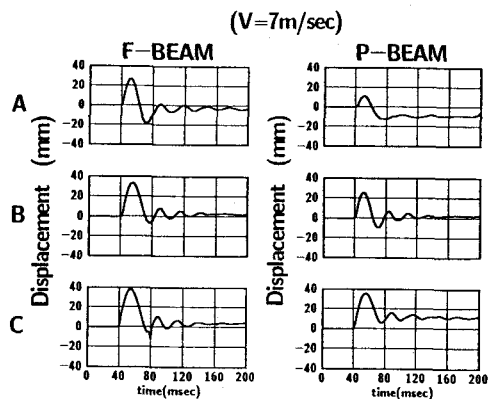


図-2 測点 D1 の応答変位波形

一方、P 梁の各配置位置における下向き変位および上向き変位の大小関係は F 梁と同様であった。しかし、いずれの P 梁も同一緊張材配置の F 梁に比べて最大応答変位量が小さい。これは P 梁の緊張材の剛性が大きいためと考えられる。また、衝撃初期の応答変位の継続時間は P 梁の方が F 梁に比べて短い。

自由振動に移行した後の残留変位に着目すると、P 梁の A タイプでは上向きに変位が残留し、B および C タイプでは下向きに変位が残留している。特に C タイプでは上向きの変位が発生せず、下向きの変位のみで応答している。また、A タイプでは下向き変位から上向き変位に移行した後変位が残留し、自由振動をほとんど示していない。このような変位の残留傾向は F 梁においても同様に認められるが、いずれの F 梁もその残留変位量は P 梁に比べて小さい。すなわち、残留変位の方向は緊張材の配置位置の影響を大きく受け、残留変位の大きさは緊張材の剛性に影響されることが分かる。残留変位を小さくするという観点から考えると、いずれの配置位置においても P 梁よりも F 梁の方が望ましいと言える。

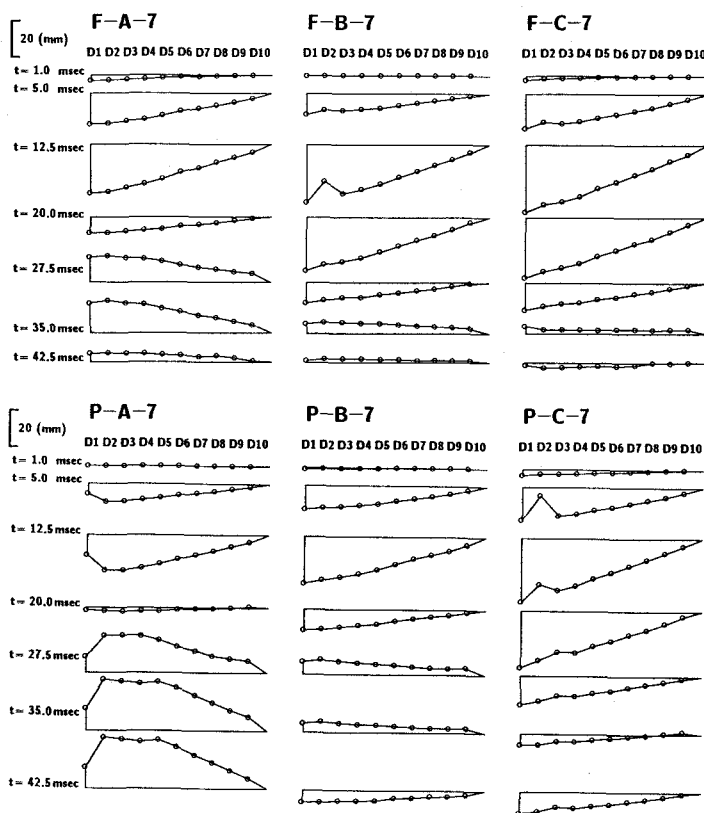


図-3 各試験体の応答変位分布の経時変化

3. 2 応答変位分布の経時変化

図-3 に載荷速度 $V=7$ m/sec における各試験体の応答変位分布の経時変化を示す。F-A 梁の応答変位分布は軸方向に緩やかな曲線状を示し、梁全長にわたって連続的な変形状を示している。B タイプの梁

は A タイプに比べて比較的直線的な分布となっている。C タイプの分布形状は B タイプよりもさらに直線的となっている。これより、C タイプでは梁中央部において角折れ状態になっていることが予想される。これらの配置位置の違いによる変位分布の差異は、後述するひびわれ発生状況と密接に関連していると思われる。ひびわれの集中あるいは分散の程度および載荷点付近に発生したひびわれの方向や進展高さの影響などを受けていると考えられる。A タイプは 27.5 msec 経過時点で梁全体が大きくリバウンドしている。一方、B および C タイプは 35 msec 経過時点でリバウンド変位が発生し、変位量は A タイプに比べてかなり少ないことが分かる。

P 梁も F 梁と類似した変位分布の経時変化を示しているが、A タイプの中央における変位は隣接する測点に比べて小さな値を示している。A タイプは 27.5 msec 経過時点で大きなリバウンド変位を示しているがこの傾向は B タイプにも現れている。しかし、C タイプではリバウンドの傾向は見られず、P 梁は F 梁よりも緊張材の配置の影響が顕著に出現していることが分かる。

3. 3 ひびわれ発生状況

全試験体のひびわれ発生状況を図-4 に示す。載荷速度が 5 m/sec では、いずれの試験体にも大きな損傷は見られない。F-A 梁は F 梁の中で最もひびわれの分散性が良いが、跳ね返りによる梁上部のひびわれや上下に貫通しているひびわれも多い。B タイプは C タイプに比べてひびわれが載荷点直下近傍に集中し、C タイプには見られない支点付近のひびわれが顕著に認められる。P-B 梁は梁上部から進展するひびわれ

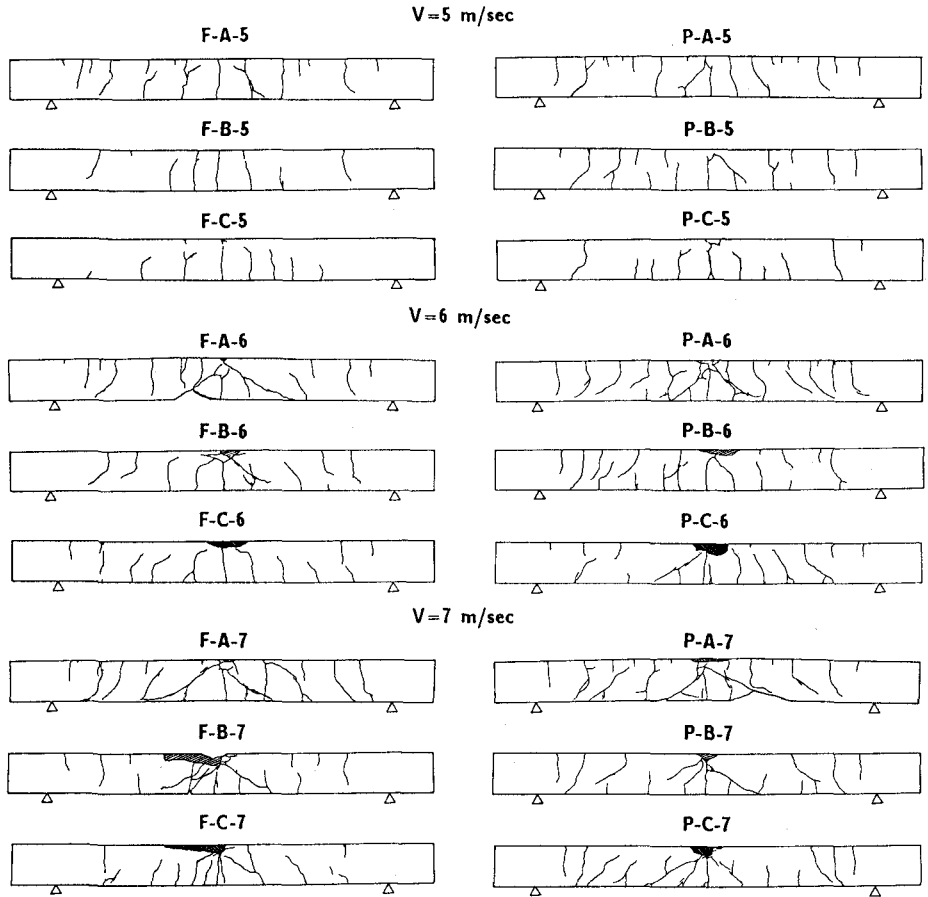


図-4 ひびわれ発生状況

の本数が F-B 梁に比べて多く、載荷点直下の片側で斜めひびわれが認められる。また、P 梁は F 梁に比べて全般的にひびわれの分散性が高く、緊張材の付着性状および剛性の影響を受けているものと考えられる。この傾向は、 $V=6$ m/sec および 7 m/sec 載荷においても同様に見られる。

載荷速度が $V=6$ m/sec では、F 梁および P 梁ともに A タイプで載荷点直下近傍に斜めひびわれが明瞭に発生している。特に F 梁については緊張材に沿ってコンクリートの剝離が生じているが、これは他のタイプに比べて緊張材のかぶりが小さいことや大きな緊張力が導入されていることなどに関連するものと考えられる。F-B と P-C 梁では、梁中央の片側に斜めひびわれが発生しているが、全体的には上下に進展するひびわれが支配的である。また、F-C と P-C 梁では上部コンクリートの圧壊が他に比べて顕著であり、斜めひびわれは A タイプに比べて顕著ではない。これは、断面下縁のプレストレス応力および緊張材量が C タイプで最も少ないことに関連しているものと考えられる。

載荷速度 $V=7$ m/sec においては、いずれの梁においても斜めひびわれが明瞭に認められる。斜めひびわれの発生角度は緊張材の配置方法によって異なり、A タイプが最も緩やかな角度であり、A、B、C の順序で発生角度が鉛直に近くなることが分かる。

以上を要約すると、斜めひびわれは載荷速度が大きいほど発生しやすく、緊張材の配置方法としては B および C タイプよりも A タイプで発生しやすい。また緊張材の材質では、F 梁よりも P 梁において発生しやすいようである。斜めひびわれの発生と梁の破壊は密接に関連していると考えられ、耐衝撃性の観点からは、斜めひびわれが発生しにくい配置方法および緊張材を選定すべきであると考えられる。この観点から、配置方法としては上下 2 段の核点に配置した C タイプ、緊張材としては AFRP ロッドを使用した F 梁が優れているものと考えられる。

3. 4 載荷速度と重錘衝撃力および支点反力の関係

重錘落下衝撃試験では衝撃力の評価が重要な問題である。本実験においては直接的な方法として重錘の加速度より求めた重錘衝撃力と、間接的な方法として支点反力の 2 つの方法により評価した。なお、支点反力は左右のロードセルで得られた反力を加算したものである。

図-5 に $V=7$ m/sec 載荷における支点反力の応答波形を示す。F 梁における支点反力の応答性状の概観は緊張材の配置位置に関わらずほぼ同様である。しかし、1 波目の継続時間を比較すると A タイプが最も短く、B、C の順に長くなることが分かる。P 梁の応答波形の概観は F 梁と類似しており、緊張材の配置位置によって支点反力の応答性状が顕著には変わらないことが分かる。

しかし、F 梁と同様に 1 波目の継続時間は A タイプが最も短く、B、C の順に長くなっている。1 波目の継続時間を同一の緊張材位置で P 梁と F 梁と比較すると、P 梁の方が F 梁よりも継続時間が短いことが分かる。これら、支点反力の 1 波目の継続時間に与える緊張材の配置および材質の影響は、応答変位波形の継続時間に与える影響と良く合致している。すなわち、緊張材の剛性が高いほど、梁下縁の導入プレストレス応力が大きいほど見かけ上梁の曲げ剛性が大きくなり、継続時間が短くなるものと考えられる。

図-6 に載荷速度と重錘衝撃力および支点反力の関係を示す。なお、重錘衝撃力は重錘の最大加速度に重錘重量を乗じて求めた。F 梁の支点反力は緊張材の配置位置に関わらず $10\sim15$ tf 程度であり、載荷速度が増加しても支点反力は顕著には増加していない。一方、重錘衝撃力は載荷速度 5 m/sec では支点反力とほぼ等しいが、載荷速度の増加にともない重錘衝撃力は明瞭に増加している。特に C タイプは増加が著しく、

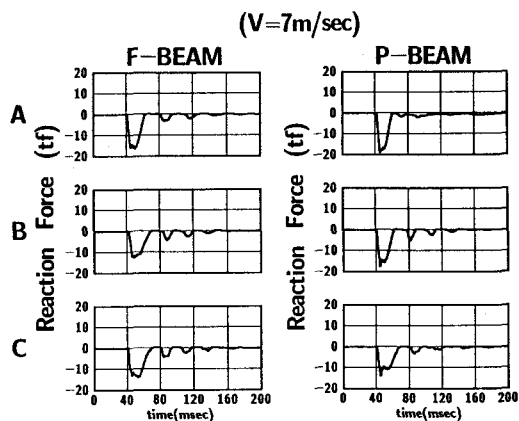
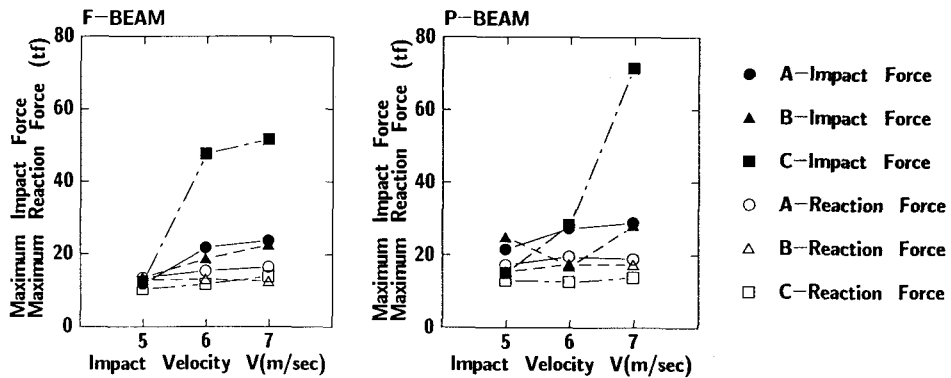


図-5 支点反力の応答波形



図—6 載荷速度と重錘衝撃力および支点反力の関係

50 tf 以上の値を示している。

P 梁の支点反力は F 梁同様載荷速度によって大きな影響を受けずば 13~18 tf 程度となっている。また、緊張材の配置方法による差異も F 梁と同様に顕著ではない。一方、重錘衝撃力は支点反力よりも全体的に大きな値を示しているが、F 梁と同様に C タイプの衝撃力が 7 m/sec 載荷で極めて大きな値を示している。緊張材の剛性に着目すると、重錘衝撃力および支点反力ともに剛性の小さい AFRP ロッドを用いた F 梁の方が P 梁よりも小さい。

4. まとめ

PC 梁の重錘落下衝撃試験を行い、耐衝撃性状におよぼす緊張材の材質および配置位置の影響を検討した。本実験の範囲内で得られた結果を要約すると、

- (1) いずれの緊張材を用いても、下向きの最大応答変位量は上下の核点に緊張材を配置した C タイプで最も大きく、 $C > B > A$ である。一方、リバウンドによる上向きの最大応答変位量は断面下縁近傍に緊張材を配置した A 梁で最も大きく、下向き変位とは逆に $A > B > C$ である。
- (2) 最大応答変位量は剛性の小さい AFRP ロッドを緊張材に用いた梁が PC 鋼より線を用いた梁よりも大きい。一方、載荷初期における応答変位波形の主波動の継続時間は AFRP ロッドを用いた梁の方が長い。
- (3) 残留変位の方向は緊張材の配置位置の影響を受け、その傾向は剛性の高い緊張材を用いた場合に顕著であり、残留変位の大きさは剛性が高いほど大きい。
- (4) 断面下縁近傍に緊張材を配置した A タイプの梁は、リバウンドによる上面からのひびわれが多く、また、低い載荷速度から載荷点直下近傍に斜めひびわれが発生しやすい。
- (5) 斜めひびわれの発生角度は A が最も緩く、C が最も鉛直に近い。
- (6) 重錘衝撃力および支点反力の大きさは緊張材の剛性を受け、緊張材の剛性が低いほど小さい。
- (7) PC 梁の耐衝撃性の観点から総合的に判断すると、緊張材の配置位置としては断面の上下核点が優れ、緊張材の特性は剛性が低く弾性伸び量の大きなものが優れていると考えられる。

参考文献

- (1) 三上浩、田村富雄、岸徳光、松岡健一：組紐状 AFRP ロッドで補強した RC 梁の耐衝撃挙動、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.15、No.2、pp.923-928、1993
- (2) 田村富雄、三上浩、岸徳光、松岡健一：AFRP ロッドを緊張材に用いた PC 梁の衝撃挙動に及ぼす緊張材位置の影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.15、No.2、pp.929-934、1993