

論文

[2146] 組紐状AFRPロッドで補強したコンクリートスラブの衝撃特性に関する実験的研究

正会員○三上 浩 (三井建設土木設計部)

正会員 加藤正利 (三井建設土木設計部)

正会員 田村富雄 (三井建設技術開発推進部)

岸 徳光 (室蘭工業大学建設システム工学科)

1. はじめに

最近、軽量で高強度かつ耐蝕性や非帯磁性に優れた各種の新素材繊維（例えば炭素繊維やアラミド繊維）をコンクリートの曲げおよびせん断補強筋あるいはPC、PRC構造体の緊張材として用いる試みがなされている。[1~2] 特に、構造体の挙動検討はRC、PC梁の静的な曲げおよびせん断特性に着目して行なわれているようである。一方、土木構造物への応用を考えると、静的耐荷挙動のみならず動的荷重下における挙動検討も重要であると考えられる。しかし、新素材を用いた構造体の繰り返し疲労荷重や地震荷重下における挙動検討の例はいくつか見られるものの、衝撃荷重下における挙動を検討した例は極めて少ないように思われる。[3]

このような背景から、衝撃荷重下の新素材で補強されたコンクリート部材の挙動を検討することを目的として、組紐状AFRPロッドで補強したコンクリートスラブ中央に鋼製のハンマーを自由落下させて衝撃実験を行なった。また、本研究では組紐状AFRPロッドの付着性能がスラブの衝撃挙動に与える影響を検討するため、表面に珪砂を接着したロッドと無処理のロッドで補強したスラブについて各々実験を行なった。さらに、丸鋼で補強したスラブについても同様な実験を行い、新素材で補強したスラブの衝撃挙動と比較検討した。

2. 試験体の概要

試験体および荷重順序の一覧を表-1に示す。試験体は、補強筋として組紐状AFRPロッド（以後ロッドと称する）の表面に5号珪砂を接着して用いたスラブ（砂付きスラブと称する）が1体、無処理のロッドを用いたスラブ（砂なしスラブと称する）が1体、丸鋼を用いたスラブ（RCスラブと称する）が1体の合計3体である。また、数少ない試験体を有効に利用するために同一スラブで数回の荷重実験を行なった。本実験ではスラブに貫通や裏面剝離が起きない程度の弾性領域から塑性領域までの挙動を検討するため、ハンマーの衝突速度は最大で4m/secとした。

また、砂付き、砂なしスラブの衝撃挙動を直接的に比較するため、両者の荷重履歴は同一とした。コンクリートスラブの寸法は150cm×150cm×10cmで、補強筋は衝撃荷重荷重によってスラブ上下面に交番応力が発生するものと予想されたため複筋の直交配置とした。なお、ロッドと丸鋼を使用したスラブで挙動比較を行なうために、ほぼ同様な断面積の補強筋を33.3mmの同一ピッチで配置した。補強筋比は片側約1%である。

コンクリートの特性を表-2に示す。ロッドと丸鋼を用いたス

表-1 試験体および荷重順序の一覧

試験体名	荷重順序	衝突速度 V(m/sec)
砂付きスラブ	- 1	1.0
	- 2	1.0
	- 3	2.0
	- 4	3.0
砂なしスラブ	- 5	4.0
	- 6	4.0
RCスラブ	- 1	1.0
	- 2	4.0
	- 3	4.0
	- 4	4.0

ラブで特性が異なっているのは材令の他に粗骨材の最大寸法（ロッドを用いたスラブで20mm、RCスラブで15mm）と配合が異なるためである。

なお、衝撃試験時の材令はロッドを用いたスラブで23～24日、RCスラブで72日である。

表-3に補強筋の特性を示す。ロッドは直径12μの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。組紐の凹凸はロッド径の10倍の区間に4回生じ、繊維の重量含有率は約70%である。なお、ロッドの力学的特性は試験片3本の実測値の平均値であり、ロッドは降伏点のない弾性体で弾性伸びは丸鋼の8倍程度にまで達するが弾性係数は丸鋼の1/3程度と低い。なお、丸鋼は材料試験を実施していないので規格値を示した。

砂付きロッドの付着強度は文献[1]より、すべり量が0.2mm程度の小さな領域では異形鉄筋と同等以上である。また、砂なしロッドの付着強度は領域によらず丸鋼よりも高いがすべり量が小さな領域では異形鉄筋よりも低く、すべり量が増えるにしたがい増加する傾向を有している。

3. 衝撃実験の概要

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なった。衝撃荷重は直径15.0cm、重量70kgfの鋼製円柱からなるハンマーを所定の高さにセットした後スラブ中央に自由落下させて載荷した。なお、スラブの支持条件は四辺単純支持を仮定し、仮定により近づけるために四辺を上下から鋼製のローラーを用いて支持した。

計測はハンマー側面に取り付けた容量1000Gのひずみゲージ型加速度変換器2点と上下端補強筋に取り付けたひずみゲージ22点の合計24点で行い、各々加速度およびひずみ波形を出力した。また、実験終了後にスラブ裏面のひびわれ状況を調査しその性状について検討した。

図-1にスラブの配筋およびひずみゲージの取り付け位置を示す。

表-2 コンクリートの特性

試験体名	材料試験材令(日)	圧縮強度(kgf/cm ²)	弾性係数(kgf/cm ²)	ポアソン比	単位重量(tf/m ³)
砂付きスラブ 砂なしスラブ	28	502	2.95×10 ⁵	0.2	2.36
RCスラブ	60	611	3.32×10 ⁵	0.2	2.42

表-3 補強筋の特性

補強筋名	砂付きロッド K32S	砂なしロッド K32	丸鋼 R6
材質	アラミド繊維	アラミド繊維	SR30
公称径(mm)	7.0	6.0	6.0
公称断面積(mm ²)	25.0	同左	28.3
密度(gf/cm ³)	1.30	同左	7.85
引張耐力(tonf)	2.80	同左	1.27以上
降伏耐力(tonf)	—	—	0.85以上
弾性係数(kgf/cm ²)	0.67×10 ⁶	同左	2.10×10 ⁶
弾性伸び(%)	1.67	同左	0.20

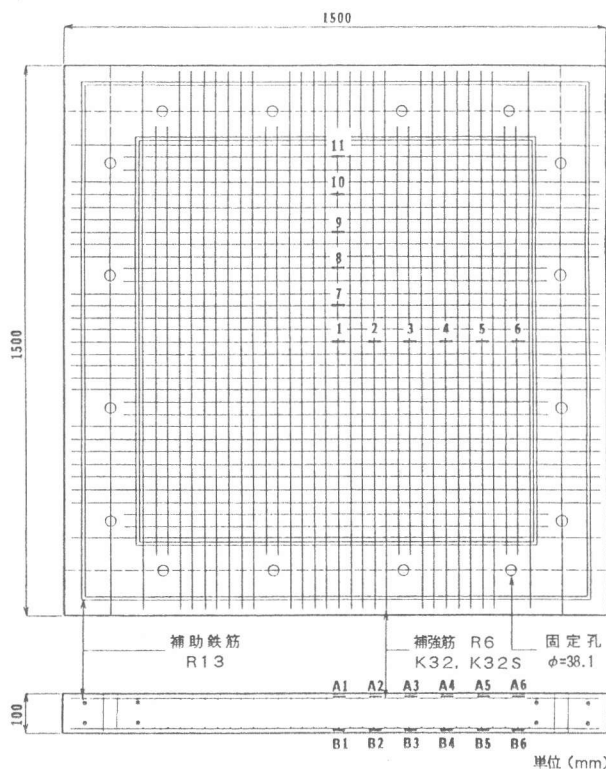


図-1 配筋およびひずみゲージ取り付け位置

4. 実験結果および考察

4. 1 応答ひずみ波形の概要

図-2、3、4に衝突速度 $V=1\text{m/sec}$ における補強筋の全計測時間 40msec での応答ひずみ波形を示す。各波形分布は基準軸より上方が引張ひずみ、下方が圧縮ひずみを示す。図-2の砂なしスラブ-1では荷重初期を除いて全体的にゆるやかな減衰自由振動を示し、各測定位置の上下端筋のひずみは基準軸に対してほぼ対称である。図-3の砂付きスラブ-1では、スラブ中央部(A1、B1)の波形を除いて荷重初期後の1波目以降のひずみが急速に減衰している。また、上端筋のひずみは下端筋よりも特に衝撃荷初期で大きい。なお、A1、B1は他の波形と比較してゲージ位置のかぶりが小さかったか偏心荷の影響を受けたものと推察される。

一方、図-4のRCスラブ-1は荷重初期を除いて全体的にゆるやかな減衰自由振動を示しているが減衰性は砂なしスラブよりも低い。また、荷重点近傍のひずみは砂付きスラブとは反対に上端筋より下端筋が大きく、ひずみ差の少ない砂なしスラブとは異なった性状を示している。しかし、他の測点の上下端筋のひずみは砂なしスラブと同様に基準軸に対してほぼ対称である。スラブの振動減衰性は砂付き、砂なし、RCスラブの順に低く、これは小さなすべり量の領域での補強筋の付着強度の大小に対応するものと考えられる。

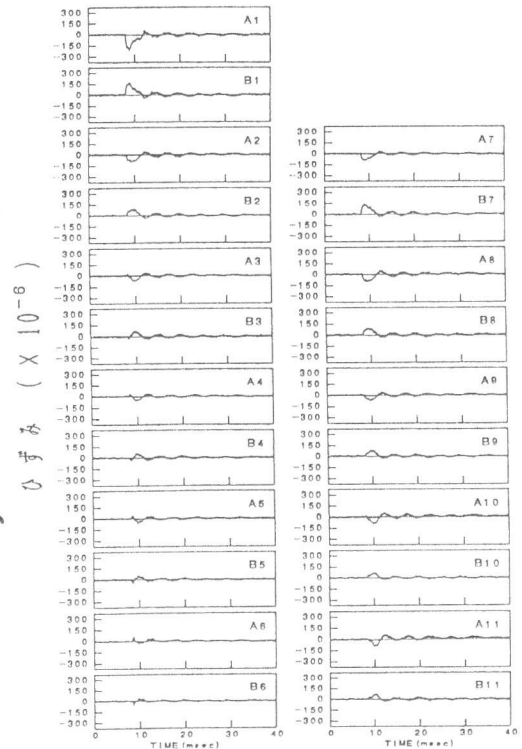


図-2 砂なしスラブ-1の応答

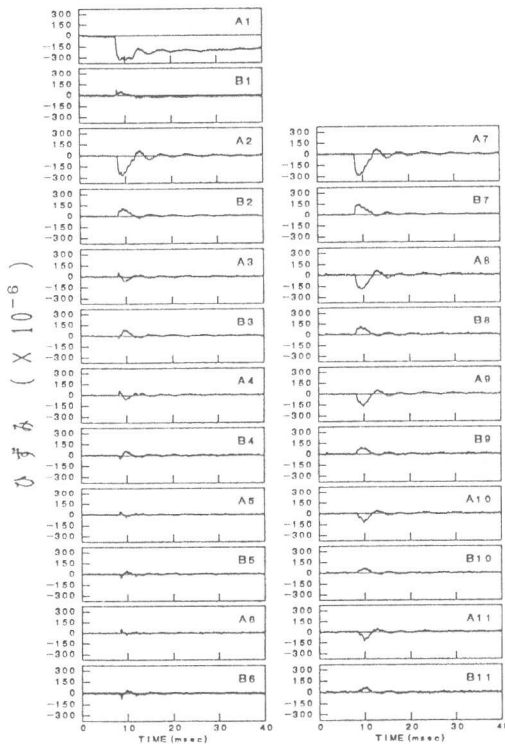


図-3 砂付きスラブ-1の応答

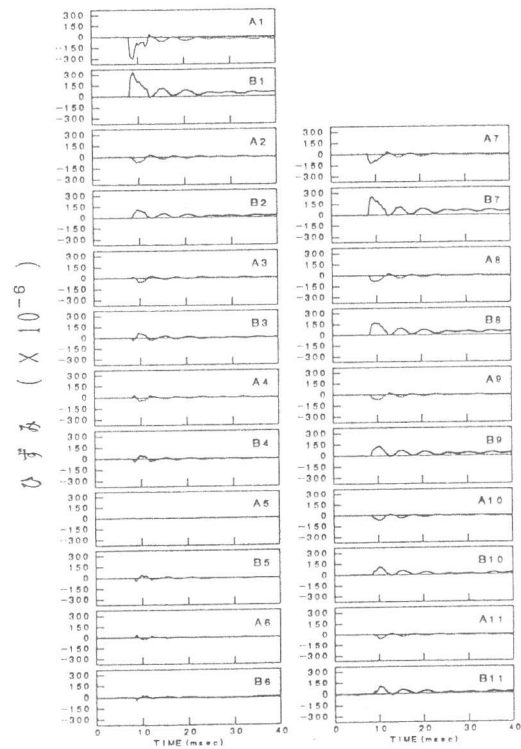


図-4 RCスラブ-1の応答

4. 2下端筋ひずみ分布の経時変化

図-5、6に各試験体の応答開始後の各時間ステップにおけるスラブ下端筋のひずみ分布を衝突速度 $V=1\text{m/sec}$ および 4m/sec について示す。本図では、基準軸より上方が圧縮ひずみ、下方が引張ひずみを示す。これらの図は、主波動がスラブ中央より支点に向かって伝播する状況を明瞭に示している。図-5の $V=1\text{m/sec}$ における砂なしスラブ-1では、 $t=0.4\text{msec}$ でB3と支点間のひずみは圧縮を示していたが時間の経過とともに引張に移行し、 $t=1.6\text{msec}$ 以降ではほぼ最低次の振動状態を示している。砂付きスラブ-1も同様にB3と支点間のひずみは時間経過とともに圧縮から引張へ移行しているが衝撃初期の圧縮ひずみは砂なしスラブよりも多少大きい。また、 $t=1.6\text{msec}$ 以降のひずみは測点B4近傍で変曲点を有し、最低次振動モードに3次の振動モードが重なったような分布性状を示している。一方、RCスラブ-1もロッドを用いたスラブと同様にひずみの移行が見られるがスラブ中央の測点B1のひずみは衝撃初期から 2.0msec まで他の測点のひずみよりもかなり大きく、スラブ中央におけるひずみの集中が他のスラブと比べて顕著である。

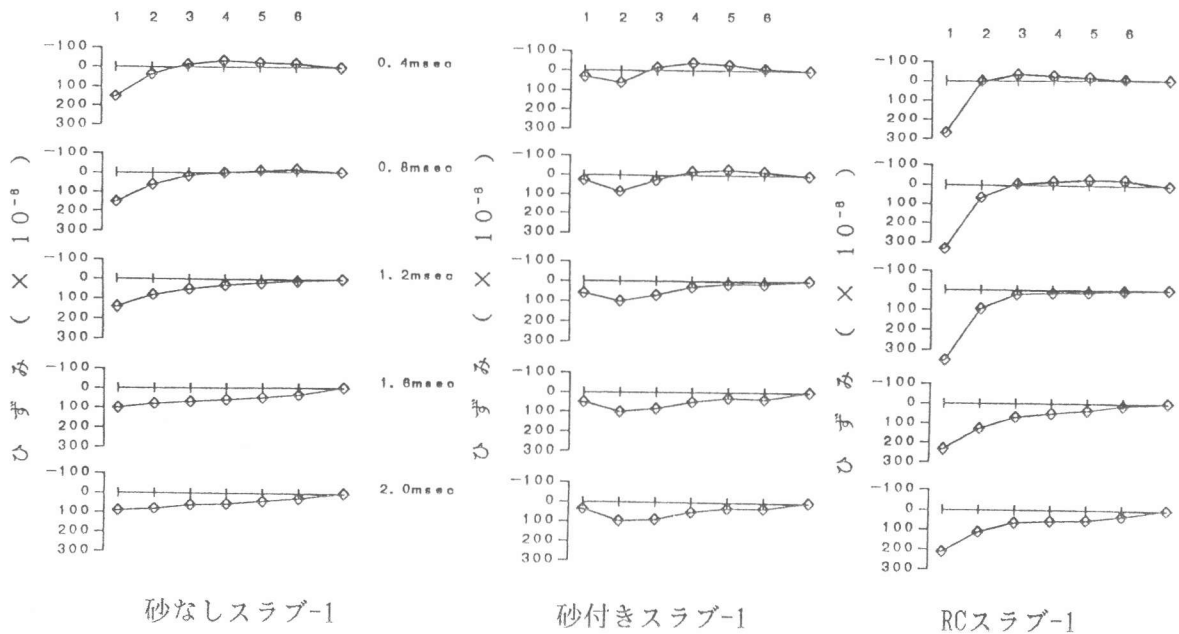


図-5 $V=1\text{m/sec}$ におけるひずみの経時変化

図-6から、 $V=4\text{m/sec}$ におけるスラブ中央のひずみは、砂なしスラブで $V=1\text{m/sec}$ の25倍程度、丸鋼を用いたスラブでは5倍程度にまで増加していることが判る。砂なしスラブ-5では後述するように降伏線理論から推定される対角線状のひびわれが発生したため、スラブ中央部の測点B1、B2のひずみは $2500\sim 1500\mu$ 程度と大きいと測点B3~B6はひびわれ位置から離れているため小さなひずみになったと考えられる。砂付きスラブ-5では測点B1のひずみが 1500μ 程度を示し、スラブ中央部にはひびわれが発生していると推察されるが、ひずみは全体的に砂なしスラブよりも小さく支点方向になめらかな分布を示している。これらは、砂なしと砂付きスラブでロッドの付着性能が異なるためにひびわれ性状も異なり、砂付きロッドは付着性能が高いために広範囲にコンクリートを補強していることを示すものと考えられる。

一方、 $V=4\text{m/sec}$ におけるRCスラブ-2のひずみ分布性状は $V=1\text{m/sec}$ における性状と比較的類似し

ているが、測点B1でのひずみの集中はB2より支点側のひずみが時間経過とともに増加するため顕著ではなくなり、 $V=1\text{m/sec}$ における砂なしスラブと同様にほぼ最低次の振動状態を示している。このように、ロッドを用いたスラブに比べて広域的にひずみが発生するのは丸鋼の付着強度が低いことや弾性係数がロッドよりも高いことに関連すると推察される。

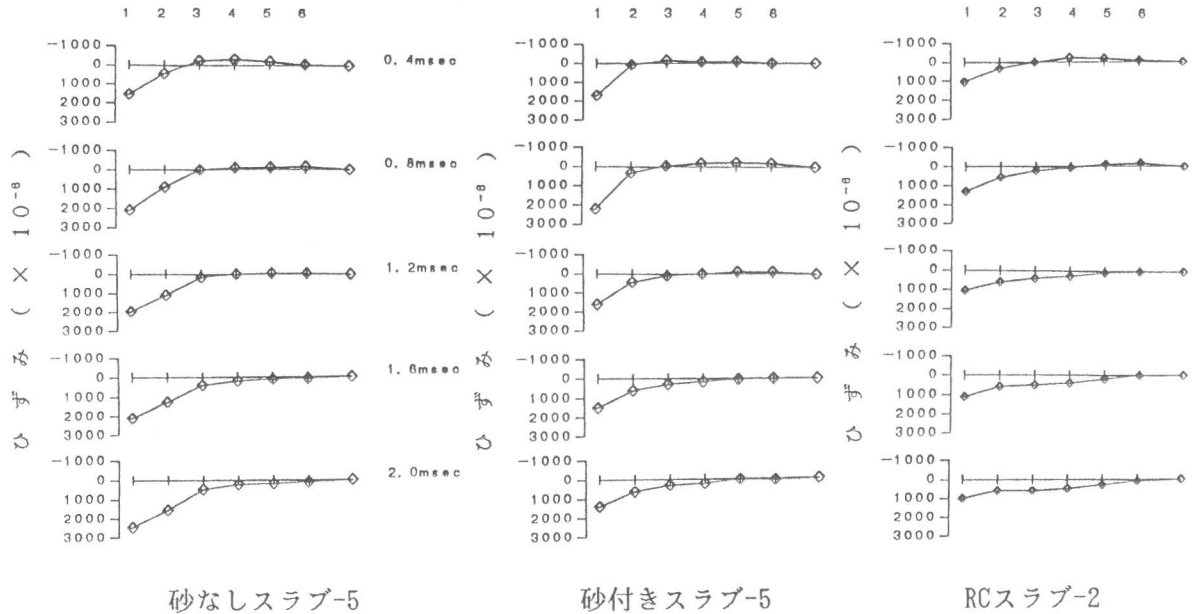


図-6 $V=4\text{m/sec}$ におけるひずみの経時変化

4. 3スラブ裏面のひびわれ性状

図-7に全実験を終了した後のスラブ裏面のひびわれ性状を示す。砂なしスラブは降伏線理論から予想される対角線状のひびわれが顕著である。これは4.2の $V=1\text{m/sec}$ における下端筋のひずみ分布に示されているように、衝撃荷重载荷によって最低次の振動モードが励起され等分布荷重が载荷されたような状態になったためと考えられる。砂付きスラブではスラブ中央に発生した局部的な放射状の曲げひびわれが顕著であるが、これは前述した下端筋のひずみ分布から予想されるように、主としてスラブ中央部における曲げ変形で衝撃力に抵抗したためと考えられる。このようなひびわれ性状の差は、ロッドに珪砂を接着することで付着性能が向上し、衝撃荷重载荷によるスラブの剛性低下が見掛け上抑制されていることを示すものと考えられる。

一方、RCスラブでは下端筋のひずみ分布に対応して無数の放射状および円周状のひびわれが载荷点近傍に集中して発生し、裏面剝離の前兆と思われる性状を示している。これらから、補強筋の付着性能と弾性係数の両者がひびわれ性状に影響を与えられられるが、本実験では個々の影響を分離してとらえることはできず、今後は異形鉄筋を用いたスラブの挙動を加えて相互比較を行なう必要が考えられる。

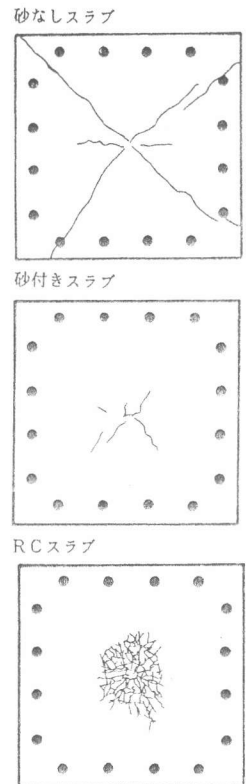


図-7 ひびわれ性状

4. 4 最大衝撃力の比較検討

本研究ではハンマーの衝突速度を最大4m/secに限定し、スラブ裏面にひびわれが生じる程度までの動的挙動に着目したので弾性接触論に基づいた衝撃力算定式〔4〕より求まる理論値と実験値との比較を行なった。最大衝撃力の実験値は2点の加速度計の最大加速度の平均値にハンマーの質量を乗じて求めた。理論計算式は紙面の都合で文献〔4〕にゆずるが、計算に用いた定数のうちロッドと丸鋼を用いたスラブで異なるのは表-2に示すコンクリートの特性のみで他は同様とした。

図-8で最大衝撃力の実験値と理論値を比較した。両者は各スラブで衝突速度に関わらず比較的良く一致している。これから、最大衝撃力はこの程度の衝突速度であれば補強筋の付着性能や材質には顕著に影響されず、弾性接触論を用いて評価することが可能と考えられる。

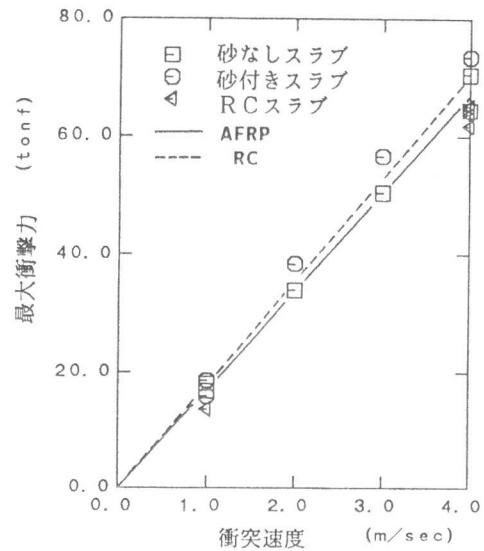


図-8 最大衝撃力の比較

5. まとめ

- (1) 低衝突速度における上下端ロッドの応答ひずみ波形より、振動の減衰性は砂付き、砂なし、RCスラブの順に低くなり、これは補強筋の付着強度の大小に対応すると考えられた。
- (2) スラブ下端筋のひずみ分布の経時変化から、下端筋内を伝わる主波動が荷点より支点方向に伝播する状況を明瞭に確認できた。また、下端筋のひずみ分布の経時変化は衝突速度および補強筋の付着性能により変化することが考えられた。
- (3) スラブ裏面のひびわれは砂なしスラブでは対角線状に発生し、砂付きスラブではスラブ中央に分散して放射状に発生した。丸鋼を用いたスラブは荷点近傍に集中して放射状および円周状のひびわれが発生し、補強筋の弾性係数もひびわれ性状に影響を与えたと考えられた。
- (4) 最大衝撃力の理論値は各スラブで衝突速度に関わらず実験値と比較的良く一致し、補強筋の付着性能や材質が最大衝撃力に与える影響は本実験の範囲内では顕著ではなかった。

以上、組紐状AFRPロッドで補強したコンクリートスラブは衝撃荷重に対して丸鋼で補強したスラブと同等以上の性能を有しているものと推察されるが、今後はより高速の衝撃荷重における検討および異形鉄筋を用いたスラブとの挙動比較を行なう必要がある。

参考文献

- 1) 岡本直ほか：アラミド繊維による組紐状棒材の研究（その3. 付着性状I引抜き試験結果）、日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）、pp829-830、1988.10
- 2) 三上浩ほか：組紐状AFRPロッドのPC緊張材としての定着および付着特性に関する実験的研究、構造工学論文集、Vol.36A、pp1191-1202、1990.3
- 3) 岸徳光ほか：組紐状AFRPロッドを用いたコンクリート床板の力学的性状、土木学会北海道支部論文報告集第47号、pp125-130、1991.2
- 4) 大沼博志：コンクリート構造物の高温クリープと衝撃応答特性に関する研究、北海道大学学位論文、1984