

I-29

鉄筋および組紐状AFRPロッドで補強したコンクリートスラブの衝撃特性

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

最近、コンクリートの曲げ及びせん断補強材あるいは、*PC,PRC* 構造体の緊張材として各種新素材繊維(炭素繊維、アラミド繊維等)を用いる試みがなされている。これらの新素材繊維は、軽量、高強度で耐蝕性、非帯磁性に優れ、建設材料として鉄筋コンクリートの弱点を補い、コンクリート構造物の用途を広げるものとして注目されている。新素材をコンクリート部材の補強筋に用いる研究は静的荷重下における曲げ性状、せん断性状^{1),2)}に関するものや、繰返し荷重下における疲労性状に関するもの³⁾、さらには*PC*梁への適用に関する研究⁴⁾などが多く行われている。しかしながら、これらの研究は主として梁に関するものであり、板要素に関するものは少ないようである。また、土木建築構造物への応用を考えると、静的荷重に対する耐荷挙動のみならず、地震荷重のような動的荷重下における耐荷挙動や衝撃的な荷重載荷に対する構造物あるいは構造部材の挙動把握も重要な検討事項の一つと考えられる。

本論文では、このような背景のもとに衝撃荷重載荷時の新素材繊維で補強したコンクリートスラブの挙動を検討することを目的として、アラミド繊維を用いた組紐状AFRPロッドで補強したコンクリートスラブ中央に鋼製の重錘を自由落下させて衝撃実験を行った。また、組紐状AFRPロッドの付着性能(付着状態)がスラブの衝撃挙動に与える影響を検討するため、表面に珪砂を接着させ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った。さらに、新素材で補強したスラブの衝撃挙動と鉄筋を用いた場合の挙動を比較するため、丸鋼や異形棒鋼で補強したスラブについても同様な衝撃実験を行った。

2. 実験概要

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。衝撃荷重の載荷は直径15.0cm、重量70kgfの鋼製の円柱からなる重錘(円柱底部は片あたりを防止するため2mmのテーパを付けている)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。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。

供試体、載荷順序の一覧を表-1に示す。供試体の詳細は後で述べるが、本実験では数少ない供試体を有効に利用するために同一スラブで数回の衝撃荷重載荷実験を行った。各種補強筋が衝撃挙動に与える影響を直接的に比較検討するために全ての供試体の載荷履歴を同一とした。また、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重錘の衝突速度を1m/secから最大4m/secまでとした。

表-1 実験ケース一覧

試験体名	載荷番号	衝突速度 V (m/sec)
AC-SLB	-1	1.0
	-2	1.0
AsC-SLB	-3	2.0
RC-SLB	-4	3.0
DC-SLB	-5	4.0
	-6	4.0

計測項目としては、重錘落下による衝撃力を求めるため重錘側面に容量1000Gの歪ゲージ型加速度変換器を取り付けその加速度を測定した。またスラブの動歪挙動を測定するためにスラブ上下端筋において、組紐状AFRPロッドにはグリッド長1mm, 抵抗120Ωの歪ゲージを、鉄筋にはグリッド長2mm, 抵抗120Ωの歪ゲージを取り付け、3線式1枚ゲージ法により測定した。これらの出力はデータレコーダに一括集録した後、オフラインでウェーブメモリーを介して設定時間軸に拡大し、A/D変換した後コンピュータ処理を行っている。実験終了時にはスラブ裏面のひび割れ状況を調べその性状についても検討した。なお、本論文文中で用いている歪の値は全て残留歪を無視したものであり、絶

Characteristics of Dynamic Behavior of RC Slabs Reinforced by Steel Bar and AFRP Rods under Impact Loading
 by Norimitsu KISHI, Ken-ichi MATSUOKA, Hiroshi MIKAMI, and Atsushi MATSUOKA

対歪を考える場合はそれまでの歪成分を全て加えなければならない。

2.1. 供試体

補強筋として組紐状AFRPロッドの表面に5号珪砂を接着させて用いたスラブ (AsC-SLB) を1体、無処理のロッドを用いたスラブ (AC-SLB) を1体、丸鋼を用いたスラブ (RC-SLB) を1体、異形棒鋼を用いたスラブ (DC-SLB) を1体の合計4体を製作し実験を行った。

スラブの配筋および歪ゲージ取り付け位置を図-1に示す。コンクリートスラブの寸法は150cm×150cm×10cmである。補強筋の配置は、衝撃荷重載荷によりスラブ上下面に交番応力が発生することが予想されるため、複筋断面の直交配置とした。なお、AFRPロッドと鉄筋を使用したスラブ間の動的挙動比較を行うために、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。

2.2. 補強筋の力学的特性

表-2に補強筋の特性を示す。AFRPロッドは直径12μのア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ものであり、組紐の凹凸はロッド径の10倍の区間内に4個あり、繊維の重量含有率は約70%である。なお、補強筋の特性は試験片3本の実測値の平均値である。AFRPロッドは降伏点のない弾性体で弾性伸びは鉄筋の8倍程度にまで達するが、弾性係数は鉄筋の1/3程度と低い。

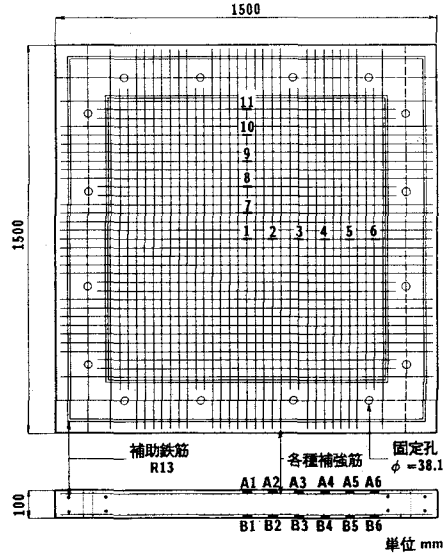


図-1 配筋および歪ゲージ取り付け位置

表-2 補強筋の材料特性

補強筋名	砂無しロッド K32	砂付きロッド K32s	丸鋼 R6	異形棒鋼 D6
材質	アラミド繊維	同左	SR30	SD30A
(公称)直径 (mm)	6	7	5.87	6.35
(公称)断面積 (cm ²)	0.25	同左	0.27	0.32
密度 (g/cm ³)	1.30	同左	7.85	7.85
引張耐力 (tonf)	2.8	同左	1.2	1.1
弾性係数 (×10 ⁶ kgf/cm ²)	0.67	同左	2.10	2.06
ポアソン比	0.60	同左	0.28	0.27

表-3 コンクリートの配合表

設計基準 強度 (kgf/cm ²)	粗骨材 の最大 寸法 (mm)	スラ ンプ (cm)	空気量 (%)	水セメ ント比 W/C (%)	細骨材 率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤
400	15	10±2.5	4.5±1.5	38.0	46.9	164	432	823	916	4.32

2.3. コンクリートの力学的特性

表-3にコンクリートの配合表、表-4にコンクリートの特性を示す。AFRPロッドと鉄筋を用いたスラブの配合は両者全て同じである。また、

表-4 コンクリートの材料特性

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 (tonf/m ³)
AC-SLB AsC-SLB	28	502	2.95×10 ⁵	0.2	2.36
RC-SLB DC-SLB	30	526	2.83×10 ⁵	0.2	2.36

材料試験の材令における両コンクリートの圧縮強度、弾性係数はともにほぼ同様である。なお、衝撃試験時の材令はAFRPロッドを用いたスラブで23-24日、鉄筋を用いたスラブで23日である。

3. 実験結果

3.1. 加速度波形

図-2, 3にそれぞれ衝突速度 1m/sec , 4m/sec の場合における各種スラブの重錘加速度の応答波形を示す。

衝突速度 1m/sec の場合： W_{ac1} , W_{ac2} はそれぞれ重錘の左右側面に取り付けた加速度計の波形であり、全計測時間は 4msec である。衝突速度が小さいため衝突面の状態が応答性状に与える影響は大きいものと考えられるが、実験結果に基づいて考察を行うこととする。各波形を比較すると、最大加速度は W_{ac1} と W_{ac2} で多少異なるものもあるがほぼ同程度の値である。また、 W_{ac1} と W_{ac2} の最大加速度の平均をとった最大平均加速度を考えてみると、RC-SLBで約 160G 、DC-SLBで約 180G 、AC-SLBで約 290G 、AsC-SLBで約 270G となっている。この結果をみると鉄筋を用いたスラブよりはAFRPロッドを用いたスラブの方が大きな加速度値を示すという傾向がうかがえる。さらにRC-SLBとDC-SLB、AC-SLBとAsC-SLBを比べた場合、DC-SLB, AC-SLBの方が大きな値となり、ここでは付着特性が加速度波形に大きな影響を与えるものではないことがわかる。また、波形の立上がりから最大値を示すまでの時間は、鉄筋を用いたスラブよりもAFRPロッドを用いたスラブの方が僅かではあるが短いように思われる。

衝突速度 4m/sec の場合： 図-3に5回目落下の衝突速度 4m/sec の場合における各種スラブの重錘加速度応答波形を示す。この段階までくると W_{ac1} と W_{ac2} とは最大加速度にかなりの差が生じているようである。これは衝突速度の増大とともに衝突加速度も大きくなるため落下誤差(偏心等)が助長されたものと考えられる。平均最大加速度は、衝突速度 4m/sec の場合ではRC-SLBで 970G 、DC-SLBで 1150G 、AC-SLBで 1130G 、AsC-SLBで 1330G である。衝突速度 1m/sec の場合ではAC-SLB>AsC-SLB>DC-SLB>RC-SLBという順だったのに対し、衝突速度 4m/sec の場合ではAsC-SLB>DC-SLB>AC-SLB>RC-SLBの順となり違った結果になった。衝突速度 1m/sec の場合と同様にAFRPロッドを用いたスラブの方が全体的に大きな値を示すが、DC-SLBについてはAC-SLB以上の値であった。付着効果に優れると考えられるスラブの方が平均最大加速度値に関しては大きな値を示すようである。

図-2と図-3を比較すると、主波形の継続時間は補強筋の違いにより多少差はあるものの、いずれのスラブも 1m/sec の場合には約 0.6msec であるのに対し、 4m/sec では約 0.4msec と $2/3$ 程度に短くなっているのがわかる。

3.2. 下端筋歪分布の経時変化

図-4に衝突速度 4m/sec の場合における応答開始後の各時間ステップにおけるスラブ下端筋の歪分布を示す。いずれも見やすくするために支点部を零歪と仮定し各測定結果を細線で結んでいる。ここでは基準軸より下方が引張、上方が圧縮を示す。この図から各スラブの歪の分布性状はその応答値に差があるものの、時間の推移とともに主波動が支点に向かって伝播している状態を示している。

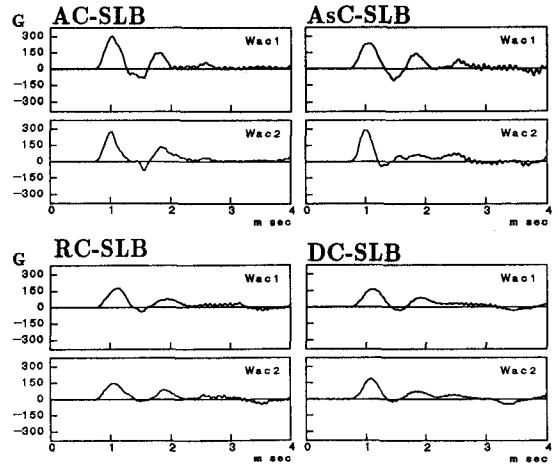


図-2 加速度波形(1m/sec)

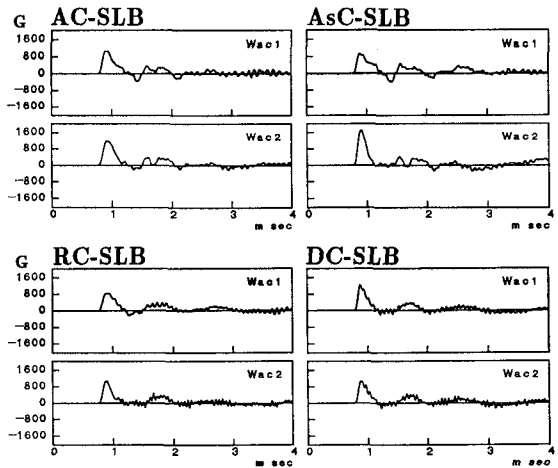


図-3 加速度波形(4m/sec)

衝突速度 1m/sec 時の弾性衝撃においては固定端が支持辺に向かっていくような挙動を示し下端筋歪も圧縮歪を示す場合があるが、衝突速度 4m/sec の場合は図-4のように各スラブとも全て引張の状態となっている。これは、いずれのスラブとも、ひび割れが進行して残留歪が生じ下に凸の塑性変形状態になっていること、これに伴い剛性および復元力が低下したことにより衝撃初期より静的と類似の挙動を示したものと考えられる。各スラブの歪分布の推移について考察すると、AC-SLBの場合はB-8,10を境にして歪分布が急変している。これは後述するようにひび割れが対角線状に入ったために中央部に大きな歪が発生し、ひび割れの影響の小さい支点部が小さくなったものと考えられる。RC-SLBの場合は、時間の経過とともに中央部の歪分布が平均化されているようである。概形的にはAC-SLBとAsC-SLBの中間的な性状を示しているものと考えられる。一方、AsC-SLBの場合は中央に集中した歪が徐々に支持辺に向かって分散している様子が示されており、AC-SLBやRC-SLBと異なり損傷が中央部に集中せず分散の傾向にあるものと推察される。DC-SLBの場合の歪の絶対値は各時間レベルにおいて他3スラブに比して最も小さく、鉄筋歪は全体的に均等に分布しているようである。

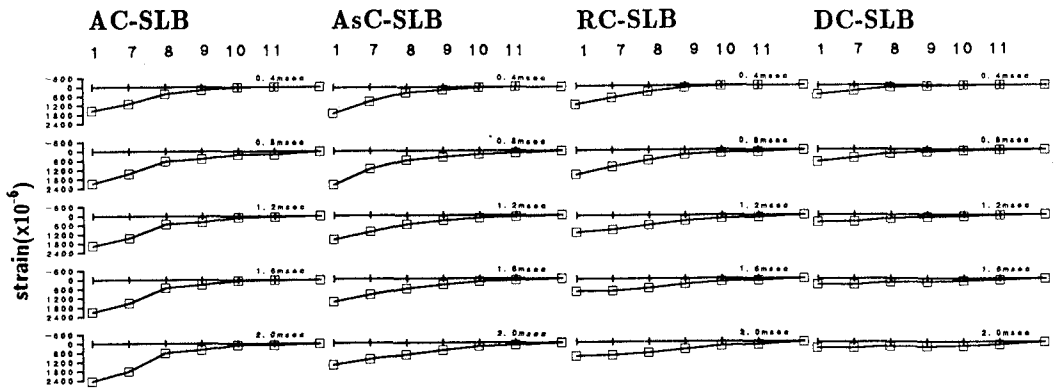


図-4 下端筋歪分布

3.3. 最大歪と衝突速度の関係

図-5(a),(b)に上端筋の測点A1,A9における衝突速度と最大圧縮歪の関係を示す。(a)図より、鉄筋を用いたスラブの載荷点直下における衝突速度と圧縮歪の関係はほぼ線形的であることがわかる。圧縮歪はDC-SLBがRC-SLBの2倍程度大きく、衝突速度と圧縮歪のなす勾配はDC-SLBの方が大きい。一方、AFRPロッドで補強したスラブでは、衝突速度 4m/sec における圧縮歪は 3m/sec に比べて顕著には増加せず、衝突速度 3m/sec で明確な変曲点が見られる。これは下端筋に用いたAFRPロッドが高い伸び性能を有するため、スラブの中立軸が上昇することに関連するものと考えられる。なお、圧縮歪は全体的にAsC-SLBがAC-SLBよりも1.5倍程度大きい。(b)図より、載荷点と支点のほぼ中央に位置する測点A9の圧縮歪も(a)図と同様な衝突速度と圧縮歪の関係の有していることがわかる。また、歪の大小についてもDC-SLB>RC-SLB,AsC-SLB>AC-SLBとなっている。ただし、鉄筋を用いたスラブでは(a)図ほど鉄筋の種類による歪の差は現れていない。

図-5(c),(d)に下端筋の測点B1,B9における衝突速度と最大引張歪の関係を示す。(c)図より、AFRPロッドを用いたスラブでは衝突速度 2m/sec において変曲点が見られるが、それ以後の衝突速度における引張歪の関係はほぼ線形的である。これはAFRPロッドの軸剛性が小さいため、衝突速度 2m/sec での明瞭なひび割れの発生によって、下端AFRPロッドが大きく応力を分担したためと考えられる。なお、AC-SLB,AsC-SLBでは顕著な差異は生じていない。一方、鉄筋を用いたスラブでは衝突速度 1m/sec から 4m/sec まで衝突速度と引張歪の関係はほぼ線形的であり、RC-SLBとDC-SLBでほぼ同様な歪レベルとなっている。衝突速度 3m/sec までは鉄筋で補強したスラブとAFRPロッドで補強したスラブの歪レベルに大きな差は生じていない。しかし、 4m/sec では軸剛性の小さなAFRPロッドの歪は鉄筋の1.5倍~2倍程度に大きくなっている。(d)図より、載荷点と支点のほぼ中間における下端筋の衝突速度と引張歪の関係は、4体のスラブで比較的類似していることがわかる。すなわち、AC-SLBの衝突速度 3m/sec の値を除いて、衝

突速度が大きくなるに従い引張歪も増加し、単位衝突速度の増加に対応する引張歪の増加は衝突速度の増大とともに大きくなり、その性状は双曲線的なものとなっている。これは、衝突速度の増大に対応してひび割れが載荷点から支点方向に進展していくことを示しているものと考えられる。

3.4. スラブ裏面のひびわれ性状

図-6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。*AC-SLB*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に現れている。図-4の*AC-SLB*下端筋歪分布において載荷点付近に歪が集中していることはこの事実を裏付けている。*AsC-SLB*では*AC-SLB*に比べ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示されているが、これは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させることにより付着性能が向上し、衝撃荷重載荷によるスラブの剛性低下が見か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-SLB*のひび割れ状況は*AsC-SLB*とよく類似しているようである。これは図-4でも示されているように*RC-SLB*と*AsC-SLB*の歪分布が多少値が異なるものの類似の分布性状を示していることから理解できる。*DC-SLB*のひび割れは*RC-SLB*をさらに拡張させたような形状である。図-4を見ると衝撃荷重載荷後2.0msecでは載荷点から支点までほぼ同程度の歪量を示しており、応力が効率よく分散され、従ってひび割れも広く分布したものと考えられる。鉄筋を用いたスラブはAFRPロッドを用いたスラブほどはひび割れ形状に大きな違いはないようであり、本実験の範囲内では*AsC-SLB*のひび割れ性状は鉄筋を用いたスラブと同程度であることがわかる。

3.5. 最大衝撃力

図-7には、表-1に示される全ての衝撃荷重載荷実験より求められる最大衝撃力について、衝突速度を横軸にとり整理している。最大衝撃力は重錘に取り付けた二点の加速度計の最大加速度の平均値に重錘重量を乗じることにより求めている。また、今回の実験では衝突速度を最大4m/secに限定しスラブ裏面にひび割れが生じる程度までの挙

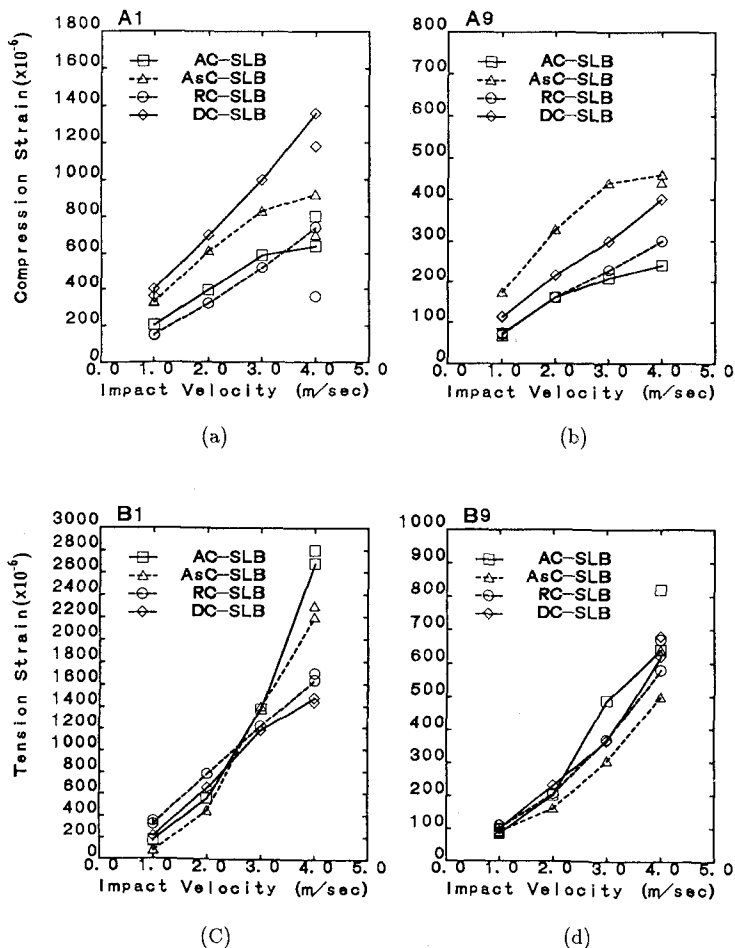


図-5 各測点における衝突速度と最大歪の推移状況

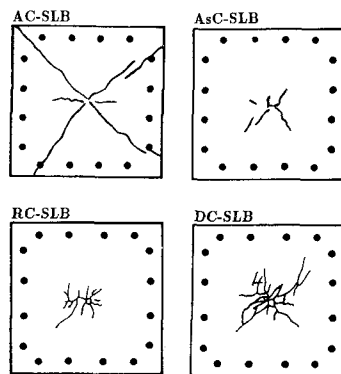


図-6 全実験終了後のひび割れ状況

動に着目したので弾性接触論に基づいた衝撃力算定式より求まる理論値と実験値との比較を行った。

衝突速度 3m/sec まではいずれのスラブも理論結果とほぼ類似の値を示しているが、 4m/sec の場合は各スラブとも実験値は理論値より大きめの値となっている。一般的にひび割れが進行している場合には最大衝撃力は弾性理論結果より小さい値を示すものと考えられるが、結果は理論値が下限値を示すような結果となっている。これよりスラブ全体としては塑性化が進行しているものと考えられるが、載荷面コンクリート部が未だ過度のひび割れや圧壊状態に達していないこと、最大応答時には主振動が支持境界に達していないこと等により載荷点近傍のスラブは無限平板的な挙動を示しているものと考えられる。これより、AFRPロッドを用いる場合や鉄筋を用いる場合にも比較的高い衝突速度では割増係数を導入することにより、弾性接触論に基づいた衝撃力算定式を用いて評価することが可能と考えられる。

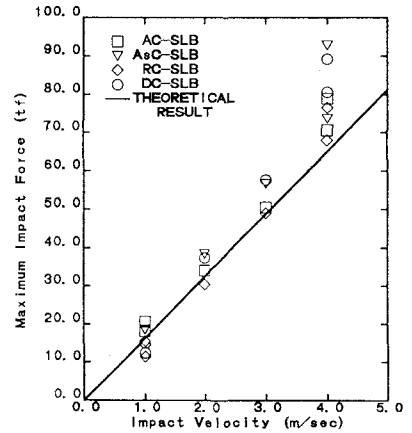


図-7 最大衝撃力-衝突速度関係図

4. まとめ

新素材をコンクリート部材の補強筋に用いる研究の一貫として、本論文ではアラミド繊維で補強された組紐状AFRPロッドを用いたコンクリートスラブを取り上げ、その動的挙動について実験的に検討を行った。実験は重錘を用いた衝撃荷重載荷の場合における挙動に着目し、砂付き、砂無しロッドを用いた場合の特性について丸鋼、異形棒鋼を用いた場合と比較する形で検討を行った。

本実験から得られた結論を要約すると、

- 1) 加速度波形に関して、その最大値は衝突速度 1m/sec では鉄筋で補強したスラブよりもAFRPロッドで補強したスラブの方が大きい。一方、衝突速度 4m/sec では補強筋による明瞭な差は見られないようであるが、付着効果に優れるスラブの方が大きな加速度を示す。
- 2) 下端筋歪分布に関しては、鉄筋およびAFRPロッドで補強したスラブ両者ともに、付着効果に優れるスラブの方が広範囲にコンクリートを補強しているようである。また、補強筋の剛性が歪の大きさに影響を与えている。
- 3) 上端筋の最大圧縮歪は鉄筋使用時にはほぼ衝突速度と線形の関係にある。AFRPロッド使用時には中立軸が上昇しやすいため、衝突速度 $3\sim 4\text{m/sec}$ で圧縮歪は顕著には増加しなくなる。下端筋の最大引張歪は鉄筋使用時にはほぼ衝突速度と線形関係にある。AFRPロッド使用時には衝突速度 2m/sec で変曲点を示しているが以後は線形的である。
- 4) 本実験の範囲内で、AsC-SLBのひび割れ性状は鉄筋を用いたスラブとほぼ同様である。
- 5) 重錘加速度から算定した最大衝撃力は、補強筋の種類によらずほぼ一様で、衝突速度に比例して増大する。弾性接触論に基づく衝撃力算定式はこれらの値の下限値を与えていることが明かになった。

等が挙げられる。

参考文献

1. 三上 浩、加藤正利、竹内 光、田村富雄、(1989), "組紐状FRPロッドによるスパイラル筋を用いたRC梁の曲げ・せん断性状" 第11回コンクリート工学年次論文報告集, 813-818.
2. 木村耕三、小畠克郎、岡野素之、(1990), "炭素繊維およびアラミド繊維を補強筋としたはり部材のせん断実験" 第12回コンクリート工学年次論文報告集, 1135-1140.
3. 丸山武彦、伊藤幸雄、西山啓伸、(1990), "CFRPおよびAFRPロッドを用いたPCはりの曲げ疲労特性" 第12回コンクリート工学年次論文報告集, 1081-1086.
4. 三上 浩、加藤正利、田村富雄、能町純雄、(1990), "組紐状FRP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, 1191-1202.