

I-24 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

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	正員	三 上 浩
三井建設	正員	田 村 富 雄
室蘭工業大学	学生員	佐 藤 匡 之

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、ガラス、アラミド等）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、建設材料としてコンクリートの弱点を補い、そ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、せん断性状に関するもの^{1),2)}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),5)} など多く行われている。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あまりないようである。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力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されたコンクリートスラブの力学的な性状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ロッドで補強されたコンクリートスラブの静的、動的挙動について実験的に検討を行った。

2. 実験概要

実験は2回に分けて行った。その実験ケースについて表-1に示す。本実験では、AFRPロッドとコンクリートとの付着性能がコンクリートスラブの静的、動的性状におよぼす影響を検討するために、AFRPロッド表面に珪砂を接着させたものと無処理のもの2種類のロッドを用いてスラブを製作した。表中のAC-SLB, AsC-SLBは、それぞれ砂を接着させていないロッド、5号珪砂を接着させたロッドを用いたスラブであることを示す。

表-1 実験ケース一覧

試験体名	第1回目		第2回目	
	載荷番号	衝突速度 V (m/sec)	載荷番号	衝突速度 V (m/sec)
AC-SLB-23 AsC-SLB-27	-1	1.0	静的実験	
	-2	1.0		
	-3	2.0		
	-4	3.0		
	-5	4.0		
	-6	4.0		
AC-SLB-25 AsC-SLB-26	-1	2.0	-5	6.0
	-2	4.0	-6	7.0
	-3	4.0	-7	7.7
	-4	4.0	-8	7.7
AC-SLB-24 AsC-SLB-28	-1	3.0	-5	5.0
	-2	3.0	-6	6.0
	-3	4.0	-7	7.0
	-4	4.0	-8	7.7
AC-SLB-29 AsC-SLB-30			静的実験	

2.1. 試験体

試験体に用いたコンクリートの配合、材料特性およびAFRPロッドの材料特性を表-2, 3, 4に示す。試験体寸法は150cm × 150cm × 10cmであり、配筋は複筋断面とし、配筋比をおよそ片側1%としている。図-1にスラブの配筋および歪ゲージの貼付位置を示す。

2.2. 衝撃実験

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。衝撃荷重の載荷は直径15.0cm、重量70kgfの鋼製の円柱からなる重錘を所定の高さにセットし、自由落下させることにより行っている。実験は四辺単純支持を仮定し、仮定により近

Mechanical Behavior of the Concrete Slab Reinforced by AFRP Rods
by Norimitsu KISHI, Ken-ichi MATSUOKA, Hiroshi MIKAMI, Tomio TAMURA and Masayuki SATO

づけるためにコンクリート矩形板の四辺を上下から鋼製ローラーを用いて支持している。本実験では、重錘落下による衝撃力を求めるため重錘に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ている。また、AFRPロッドの歪については、上下各11点にグリッド長1mm、抵抗120Ωの歪ゲージを貼付し、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、オフラインでウェブメモリーを介して設定時間軸に拡大し、シンクロスコープによって再生している。

表一 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)	スラブ (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. 静的実験

静的実験は衝撃実験時と同一の支持条件とするために、衝撃実験装置の支持台、治具を用いて行った。荷重は油圧ジャッキによって与え、また載荷面には、重錘と同一径を有する鋼製円柱をロードセルと試験体の間に挿入して中央一点載荷方式により行った。計測は試験体内の上下ロッドの歪および試験体中央部や支持部の変位の測定を行った。なお、変位については実験装置の構造上、試験体裏面中央の変位を測定することが不可能であったため、荷重の載荷に用いた鋼製円柱の変位を計測することにした。

3. 実験結果

3.1. 衝撃荷重載荷後の静的挙動

衝撃荷重載荷を経験した後におけるスラブの静的挙動を検討するために、落下速度V=1~4m/secまでの衝撃荷重載荷を経験した AC-SLB-23とAsC-SLB-27 のスラブについて静的載荷実験を行った。ここでは紙面の都合により示していないが、最終衝撃実験時の挙動を説明すると、AC-,AsC-SLB いずれも下端筋の歪波形は上端筋のそれよりも大きくかつ、残留歪が発生し、上下端筋の歪成分はほぼそれぞれ圧縮、引張領域のみで変動している。

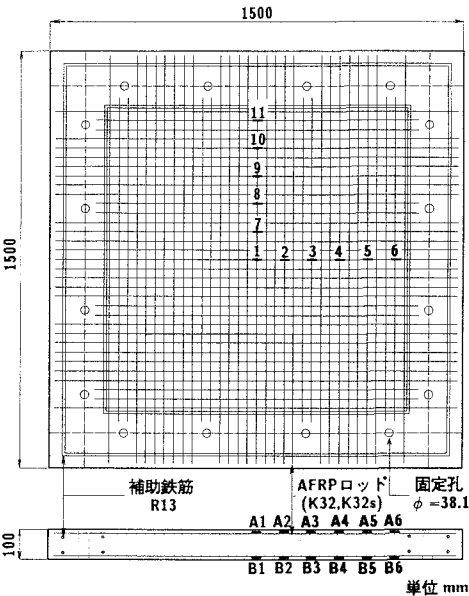
図一2に最終衝撃実験後のスラブ裏面のひび割れ状況を示している。砂無しスラブ(AC-SLB-23)は対角線上にひび割れが発生しているが、砂付きスラブ(AsC-SLB-27)は主としてスラブ中央部に放射線状に発生している。この現象は前者に関しては、衝撃荷重載荷によって低次の振動モードが励起され、等分布荷重載荷のような状態になったものと考えられる。一方、後者の場合は最低次の振動モードに高次の振動モードが重ね合わされたような状態により、主としてスラブ中央部における曲げ変形によって衝撃力に抵抗したのと考えられる。

表二 コンクリートの材料特性

試験体名	σ_{28} (kg/cm ²)	E (kg/cm ²)	ν
-SLB-23~28	502	2.95×10^5	0.201
-SLB-29,30	611	2.98×10^5	0.195

表三 AFRPロッドの材料特性

ロッド呼称	K32	K32s
砂の有無	無	有
公称径	6 mm	7 mm
公称断面積	0.25 cm ²	
密度	1.44 g/cm ³	
引張耐力	2.8 tonf	
弾性係数	6.45×10^5	
破断時伸度	1.74 %	
ポアソン比	0.6	



図一1 スラブ配筋図およびゲージ貼付位置図

このような状態のもとで、静的載荷実験を行った。その結果を図-3、4に示す。それぞれ(a)図は、載荷点近傍におけるAFRPロッドの荷重-歪線図であり、(b)図は各載荷段階におけるAFRPロッドの下縁歪分布図である。なお、各歪成分はいずれも静的載荷開始時の値を基準にしており、衝撃荷重載荷時の歪成分は含まれていない。両者の結果を比較すると、まず耐力力は砂無し、砂付きスラブそれぞれ17.5tonf、18.0tonfで、0.5tonf程度砂付きスラブの方が大きいようであるが、両者ともそれほど

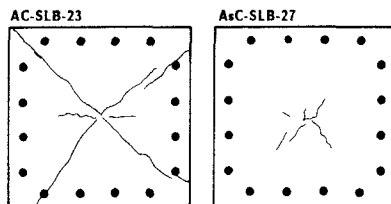
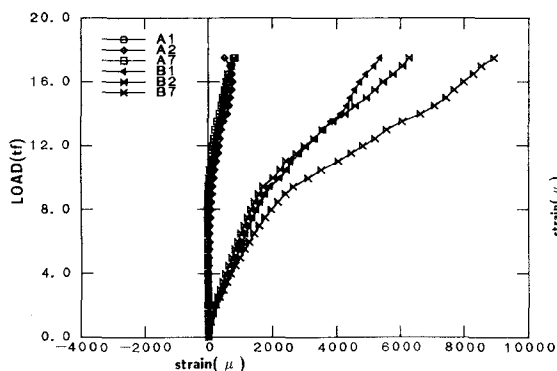
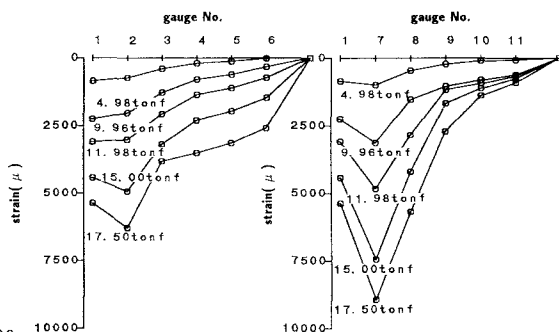


図-2 衝撃実験後のひび割れ状況

差はないようである。(a)図の荷重-歪線図をみると、砂無しスラブの方は載荷荷重が10tonfより歪の増加率が多少大きくなっているが、ほぼ単調に歪が増加し、かつ載荷初期の段階より上端歪成分が引張領域に分布しているようである。一方、砂付きスラブの場合は10tonf近傍より急激に歪増加率が大きくなっており、上端歪成分も初期に圧縮側に分布し単調に増加しているものの、10tonf以上になると特性が逆になり引張領域に向かって歪が増大してくるようである。これより、砂無しスラブの場合は衝撃荷重載荷によって発生したひび割れによって、静的載荷初期より中立軸が上端筋より上に位置しているものと考えられるが、砂付きスラブは衝撃荷重載荷による損傷が小さく静的荷重載荷初期には上下端中間部に位置し、やがて荷重が10tonfに達し、コンクリート部にひび割れが大きく進行すると同時に、徐々に中立軸も上方に移行し砂無しスラブと同様な挙動を示してくるものと考えられる。(b)図と比較すると荷重が10tonf程度では、砂無しスラブはスラブ全体が変形しているのに対し、砂付きスラブの場合は荷重載荷点近傍に変形が集中しているようである。そしてその歪量も砂無しスラブに比べ小さい。

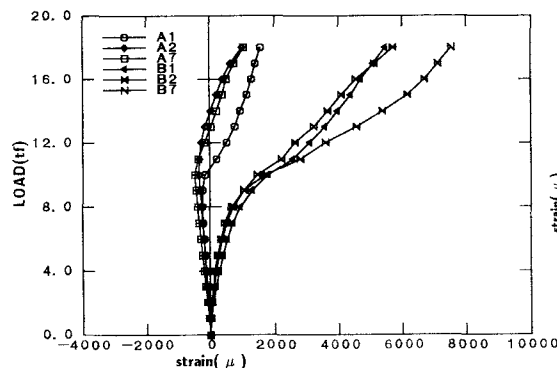


(a) 荷重-歪線図

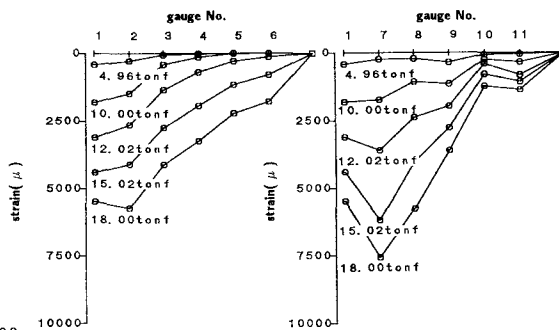


(b) 下縁歪分布

図-3 AC-SLB-23



(a) 荷重-歪線図



(b) 下縁歪分布

図-4 AsC-SLB-27

図-5は荷重-中央部たわみ線図を示している。砂無し、砂付きスラブの挙動は、荷重が10tonf程度では砂付きスラブの方が若干小さな変位を示しているが、10tonf以降は両者ほぼ同様の経路をたどっているようである。

図-6に静的載荷終了後のひび割れおよび破壊モードを示している。図より、砂無しスラブの場合は衝撃荷重載荷終了時と同様のひび割れが5～6本程度増え、さらに中央部押し抜きせん断型の裏面剝離現象が示されている。一方、砂付きスラブの場合は、衝撃荷重載荷終了時のひび割れモードが静的載荷によって伸長している状態、砂無しスラブと同様な数本の対角線上のひび割れパターン、さらに押し抜きせん断型の裏面剝離現象が重ね合わされた状態で示されている。

3.2. 衝撃荷重載荷時と静的荷重載荷時の応答性状

ここでは、衝撃荷重載荷と静的荷重載荷におけるAFRPロッドで補強されたスラブの応答性状や、最終的なそれぞれの静的耐荷力について比較検討を行うこととする。比較は、AC-SLB-23,29,AsC-SLB-27,30の砂無し、砂付きスラブ4枚の実験結果に基づいて行った。

図-7には、AC-SLB-23,AsC-SLB-27の $V=1.0\text{m/sec}$ 落下時の各時間経過における下縁歪分布を示す。また、図-8,9にはAC-SLB-29,AsC-SLB-30について、静的荷重載荷時の荷重-歪線図、および各荷重載荷段階における下縁歪分布について示している。さらに図-10には、4枚のスラブに関する静的荷重載荷時の荷重-変位図を比較して示している。図-7に関しては、

3.1.において各スラブの挙動について言及している故、ここでは省略することとする。

図-8,9の静的載荷実験に関しては、まず荷重-歪線図において、砂無しスラブ(AC-SLB-23)は約6tonfより増加率が增大しているようであり、最終荷重段階ではB1点の歪が約7000 μ 、支点近傍のB6点の歪も1500 μ 以上の値を示している。一方、砂付きスラブ(AsC-SLB-30)の場合、歪増加率が增大する荷重レベルは中央点より離れるにしたがい上昇しているようであり、B1点で約9tonf程度、B4点では15tonfである。また、砂無しスラブと異なり、中央部の歪成分は10000 μ 程度と砂無しスラブのそれに比し、3000 μ ほど大きいのが、B5,B6点での歪成分は終局状態においても2000 μ 以下の値となっており、砂無しスラブと顕著な違いを示している。これより、梁の場合⁵⁾と同様に砂無しスラブの場合には、歪増加率の増大する荷重レベルでAFRPロッドとコンクリートとの付着効果を期待できず、あたかも満載等分布荷重が載荷されたような性状を示し、スラブの対角線上にひび割れが進行していくものと考えられる。

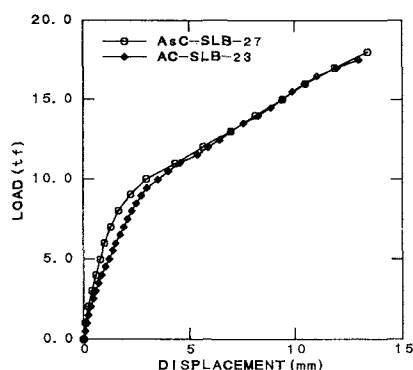


図-5 荷重-変位線図

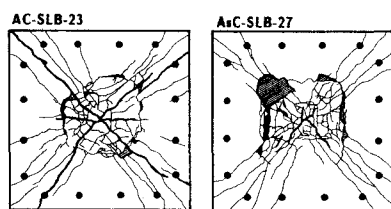
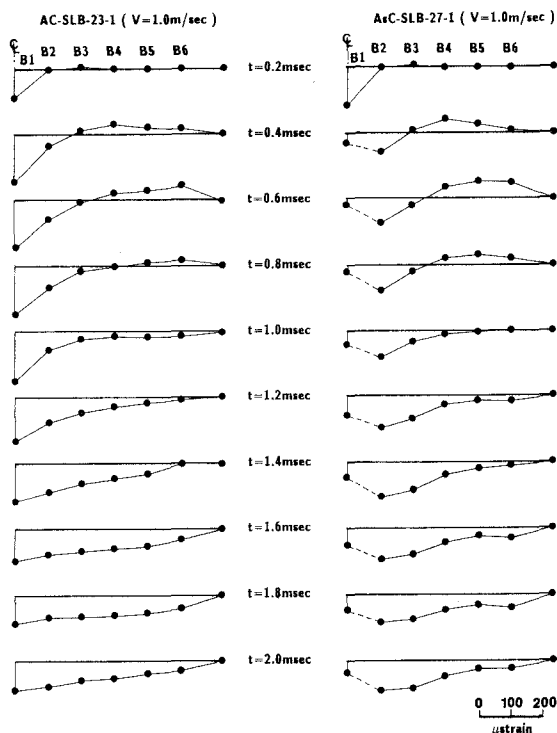


図-6 静的実験後のひび割れ状況



(a) AC-SLB-23

(b) AsC-SLB-27

図-7 衝撃荷重載荷時の下縁歪分布

一方、砂付きスラブの場合は、ある程度の歪量まで AFRP ロッドの付着効果を十分期待できるため、曲げひび割れの状態が荷重の増大とともに、載荷部より支点方向へ向かって、拡大していくものと考えられる。

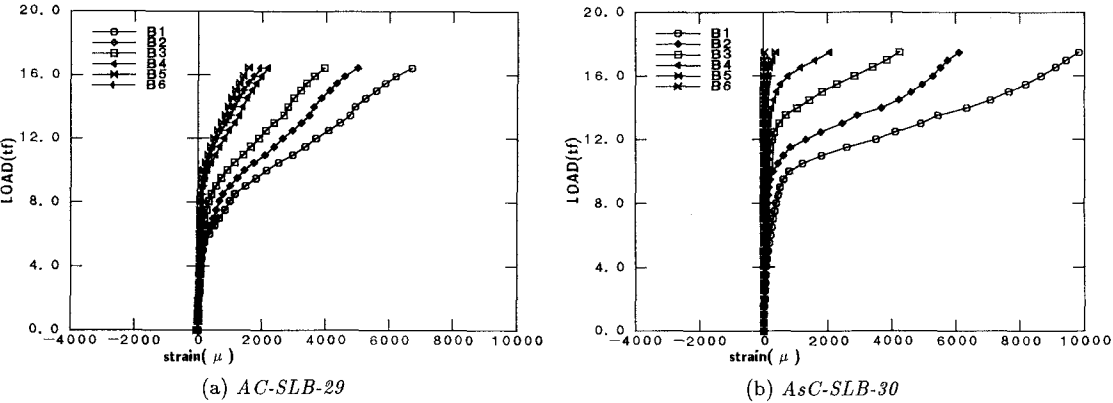


図-8 荷重～歪線図

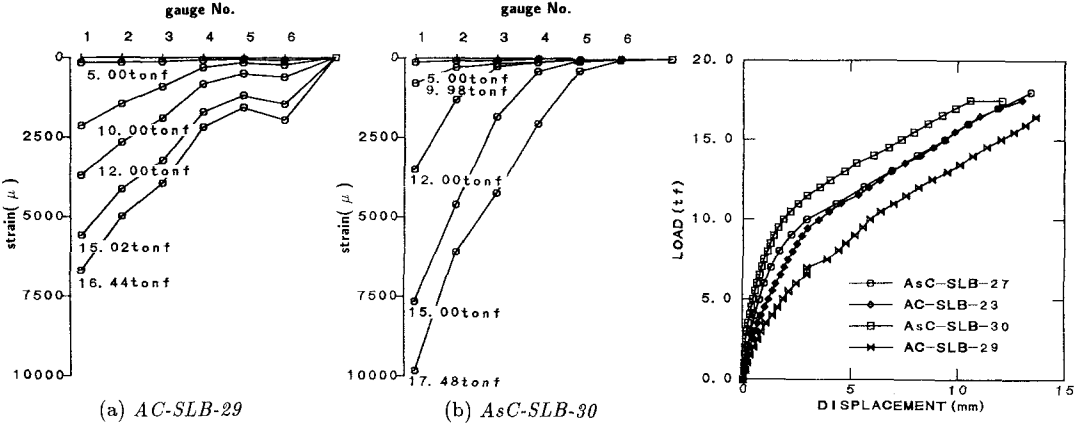


図-9 下縁歪分布図

図-10 荷重～変位線図

また、荷重～変位線図（図-10）をみると、AC-SLB-29、衝撃荷重を経験したスラブ（AC-SLB-23,AsC-SLB-27）、AsC-SLB-30の順に変形量大きいことがわかる。静的荷重載荷のみのスラブに関する性状は図-9より類推することができる。一方、衝撃荷重載荷によって劣化が進行していると考えられるスラブが、静的載荷のみのスラブの中間的な位置に分布することは興味深い。図-7の動的な歪分布はその大きさも小さく、弾性限度内の挙動であると考えられるが、AC-SLB-23の $t>1.6\text{msec}$ 、AsC-SLB-27の $t>1.0\text{msec}$ の歪分布はそれぞれ図-9(a),(b)と類似の性状を示しており、砂の有無によるスラブの挙動は動的、静的載荷に関わらず同様な性状を示すことが明らかになった。

また、耐荷力について言及すると、静的載荷の場合は砂無しスラブ（AC-SLB-29）、砂付きスラブ（AsC-SLB-30）それぞれ16.44tonf,17.48tonfと、1tonf程度砂付きスラブの方が大きいようであるが、衝撃荷重載荷後のスラブに関しては、砂無しスラブ、砂付きスラブそれぞれ17.5tonf,18.0tonfとなっている。実験結果より耐荷力は、砂付きスラブおよび、衝撃荷重載荷経験後の場合の方が多少大きく示されている。これより、衝撃荷重載荷によって劣化が進行していると考えられるスラブは砂の有無に関わらず、衝撃荷重載荷を経験しないスラブと同等の耐荷力を有しているようであり、静的耐荷力に関して、必ずしも単純に衝撃荷重載荷によって生じた劣化が、蓄積されるものではないことが明らかとなった。

3.3. 最大衝撃力

図-11には、表-1に示される全ての衝撃荷重実験より求められる最大衝撃力について、落下速度 V を横軸にとり整理している。なお、最大衝撃力は重錘に取り付けた加速度に重錘質量を乗じることにより求めている。図中の実線は弾性接触論に基づく算定式⁶⁾による理論値を示している。本実験では、 $E=2.95 \times 10^5$ kgf/cm^2 , $\nu=0.20$, 重錘半径 $a=7.5\text{cm}$, 重錘重量 $W=70\text{kgf}$, スラブの単位体積重量 $\gamma=2.5\text{tf/m}^3$ として理論値を求めた。

理論値は実験結果の下限値を与えているようである。本実験の場合は、試験体を有効に利用するために同一スラブに数回の重錘落下を行っており、スラブは落下実験ごとにひび割れが発生し劣化が進行するため、衝撃力は低下するものと考えられるが、図は逆の結果を示している。実験終了時におけるスラブの重錘衝突面は1mm程度侵徹し、さらに放射線状にひび割れが発生しているものの、いまだ圧壊のような現象は発生せず、平滑化された状態となっている。そのため上記のような結果になったものと推察される。

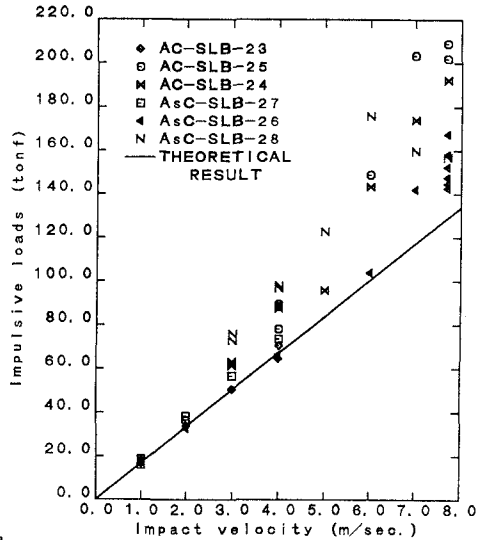


図-11 最大衝撃力-衝突速度関係図

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床板を取り上げ、その動的、静的挙動について実験的に検討を行った。実験は動的には重錘を用いた衝撃荷重実験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検討を行った。

本実験から得られた結論を要約すると、

- 1) 静的、動的荷重載荷に関わらず砂付きスラブの場合は砂無しスラブに比べ、付着性能が向上する。
- 2) 静的耐荷力に関しては多少の差があるものの、砂付き、砂無し両者はほとんど同程度である。
- 3) 衝撃荷重載荷による劣化は静的耐荷力に影響を与えず、静的載荷の場合と同程度である。
- 4) 重錘加速度から算定した最大衝撃力は、弾性接触論から得られた値を下限値としている。

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、小島克郎、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. 岡野素之、小島克郎、木村耕三, (1990), "炭素繊維を緊張材に用いたプレストレストコンクリートはりの曲げ実験" 第12回コンクリート工学年次論文報告集, 1111-1116.
5. 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.
6. 大沼博志, (1984), "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
7. 三上 浩、岸 徳光、松岡健一、能町純雄, (1990), "組紐状AFRPロッドを用いたコンクリート床板の衝撃挙動" 土木学会第45回年次学術講演会講演概要集, V-152, 330-331.