

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

IMPACT BEHAVIOR OF CONCRETE SLAB REINFORCED BY BRAIDED AFRP-RODS UNDER HEAVY WEIGHT FALLING

三上 浩* 岸 徳光** 松岡健一*** 能町純雄****

by Hiroshi MIKAMI, Norimitsu KISHI, Ken-ichi G. MATSUOKA and Sumio G. NOMACHI

The discussion in this paper is confined to the dynamic behaviors of concrete slabs reinforced by braided AFRP rods under impact loads. The experiment in impact loading was performed by letting a steel-weight fall on simply supported concrete slabs having a $150\text{cm} \times 150\text{cm} \times 10\text{cm}$ dimension with double reinforcements (approximately 1 % per one level) in both directions. Braided AFRP rods were used for reinforcing concrete slabs with and without adhering sand on the rod surface. A steel weight of 70kgf was dropped freely to generate a maximum velocity of $V=4\text{m/sec}$. The acceleration of the dropped weight and the strains on the reinforcing rods on both levels were recorded by a wide-band data-recorder. The crack pattern at the back of each slab was registered after the impact test.

The dynamic behaviors of concrete slabs reinforced by braided AFRP rods and the relationships between the maximum impact forces and velocities are discussed based on the experimental results. And also the effects of adhering sand with respect to the bonding action are considered.

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アラミド繊維や炭素繊維などの新素材繊維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。鉄筋あるいはPC鋼材と同様に新素材の建設材料としての信頼性を確立するために、素材の加工方法や構造体としての挙動に関する研究が種々行われている。たとえば、素材加工に関しては、繊維を組紐状に編みあげた後、樹脂を含浸してロッドを成形する方法¹⁾、繊維を樹脂に含浸させ縦横交互に積層し、平面あるいは立体の格子状に成形する方法²⁾等が公表され、材料試験^{3)~6)}や補強材として用いた場合の部材の挙動実験が行われている。構造体としての挙動解析には、主としてRC梁の静的な曲げ・せん断特性に関する実験^{7)~11)}やPC梁への適用に関する研究^{12)~17)}が多く行われている。

一方、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、車輻荷重・風荷重による繰

* 工修 三井建設(株) 土木本部土木設計部設計第3課 (101 東京都千代田区岩本町3-10-1)

** 工博 室蘭工業大学助教授 工学部建設システム工学科 (050 室蘭市水元町27-1)

*** 工博 室蘭工業大学教授 工学部建設システム工学科 (050 室蘭市水元町27-1)

**** 工博 日本大学教授 生産工学部土木工学科 (275 習志野市泉町1-2-1)

り返し荷重や地震荷重のような動的荷重下における耐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1つと考えられる。丸山等¹⁸⁾、三上等¹⁹⁾は、繰り返し荷重下の疲労性状に関する検討を既に行っているが、新素材繊維を用いたRC部材の振動特性や衝撃的な荷重載荷に対する挙動解析に関する研究は著者らの知る限りでは見あたらない。

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部材の動的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ロッドで補強されたコンクリートスラブに衝撃的荷重を作用させた場合の動的挙動について実験的に検討を行った。実験は、四辺単純支持されたコンクリートスラブの中央部に重錘を自由落下させることによって衝撃的な荷重を作用させ、重錘の加速度やAFRPロッドの歪波形出力を測定することによって行った。さらに、実験終了後に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を行っている。本論文では、AFRPロッドのコンクリートとの付着性能がコンクリートスラブの衝撃挙動に与える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場合と無処理の場合についてのスラブを製作し、同一パターンの衝撃実験を行い検討を行っている。

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。実験装置の全体図を写真-1に示す。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に2mmのテーパを付けている）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。実験の再現性や偏心載荷を防止するために、リニアウエイユニットを介して重錘を落下させている。実験は四辺単純支持を仮定し、仮定により近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。ここでは貫通や裏面剝離を起こさない程度のコンクリートスラブ構造体としての弾性領域から塑性領域までの挙動を検討することとしているため、重錘の衝突速度を $V=1m/sec \sim 4m/sec$ に限定し試験体中央部に載荷している。

試験体に用いたコンクリートの配合は表-1に示す通りであり、実験時（コンクリート材令28日）のコンクリート圧縮試験強度は $502kgf/cm^2$ 、弾性係数 E が $2.95 \times 10^5 kgf/cm^2$ 、ポアソン比 ν が0.201であった。またAFRPロッドの材料特性は表-2に示す通りである。本研究において用いているロッドは繊維を組紐状に編み上げた後に樹脂を含浸して成形されたもので大きな異方性を示す。このためポアソン比に関しては、ロッド軸方向と軸直角方向に貼付した歪ゲージ出力から算出された見かけの値を用いている。また、ロッドの弾性範囲は $17,000\mu$ 程度以上あり、その領域は鉄筋の10倍程度にまで達する。¹⁴⁾

試験体寸法は $150cm \times 150cm \times 10cm$ である。配筋は衝撃荷重載荷によってスラブ上下面に交番応力が発生するものと考えられるため、ここでは複筋断面とし配筋比をおよそ片側1%としている。AFRPロッドに関してはロッド表面状態がスラブの動的挙動に及ぼす影響を検討するためにロッド表面に5号珪砂を接着させた場合と無処理の場合を

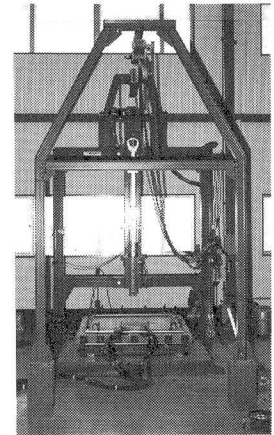


写真-1
落下万能衝撃試験機

表-1 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 (%)	単用量 (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

考え、試験体をそれぞれ3体ずつ、合計6体製作した。珪砂を接着したロッドは、樹脂硬化前に単位長さあたりに一定量の珪砂が均一にロッドに接着するようにして製作されたものを用いている。その付着強度は、JIS原案

表-2 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 kg/cm ²	
破断時伸度	1.74 %	
見かけのポアソン比	0.6	

「引張試験による鉄筋とコンクリートとの付着強度試験方法(案)」に基づいた試験結果より、端部抜け出し量が0.1mm程度以上であれば一定となり80kg/cm²以上あることが明らかになっている。¹⁴⁾

図-1にスラブの配筋図及びAFRPロッドの歪測定用ゲージの貼付位置を示している。なお、本実験で用いた歪ゲージは、グリット長1mm、抵抗120Ωかつベースがエポキシ系のものであり、組紐の腹部にロッドの軸線と平行に貼付している。

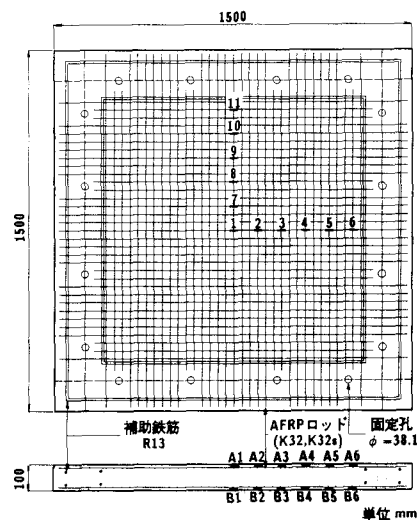


図-1 コンクリートスラブの配筋図及びゲージ添付位置図

3. 計測方法

本実験に用いているセンサーは、重錘に取り付けられている容量1000gの歪ゲージ型加速度変換器3chとAFRPロッドに取り付けられた歪ゲージ22ch、計25chである。なお、歪波形はノイズ発生を抑えるためにキャプタイヤケーブルを用いた3線式1枚

ゲージ法によって測定している。各センサーからの出力は、ブリッジボックスを介して高周波成分まで測定可能な直流増幅器を用いて増幅し、データレコーダーに一括集録している。記録された波形の出力は、ウェーブメモリーを用いて設定時間軸に拡大しその静止画像をシンクロスコープに写真撮影することによって行っている。図-2に本実験において用いた計測のプロ

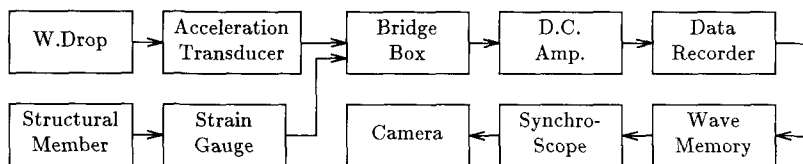


図-2 計測システムのフローチャート

表-3 試験体名及び載荷順序一覧

試験体名	載荷番号	衝突速度 V (m/sec)	試験体名	載荷番号	衝突速度 V (m/sec)
AC-SLB-23	-1	1.0	AsC-SLB-27	-1	1.0
	-2	1.0		-2	1.0
	-3	2.0		-3	2.0
	-4	3.0		-4	3.0
	-5	4.0		-5	4.0
	-6	4.0		-6	4.0
AC-SLB-25	-1	2.0	AsC-SLB-26	-1	2.0
	-2	4.0		-2	4.0
	-3	4.0		-3	4.0
	-4	4.0		-4	4.0
AC-SLB-24	-1	3.0	AsC-SLB-28	-1	3.0
	-2	3.0		-2	3.0
	-3	4.0		-3	4.0
	-4	4.0		-4	4.0

一を示す。

4. 実験結果

実験は少ない試験体を有効に利用するために表-3のように同一スラブを用いて数回の載荷実験を行っている。すなわち、衝突速度が $V=4m/sec$ 以外の $V=1,2,3m/sec$ に関しては必ず処女載荷実験を行うこととし、またひび割れ発生後の衝撃力やスラブ内の歪の応答波形を検討するために各試験体とも $V=4m/sec$ 載荷を2~3回行っている。なお、表中試験体名 $AC-SLB$ 、 $AsC-SLB$ はそれぞれ $AFRP$ ロッド表面に砂を接着させない場合、砂を接着させる場合を意味している。ここでは表に示すように、砂付きと砂無しの場合における衝撃荷重載荷時のコンクリートスラブの挙動を比較するために、スラブ番号23と27、25と26、24と28はそれぞれ載荷履歴を同一としている。

以下、各項目について検討を行うこととする。

4.1. 応答歪波形の概要

写真-2, 3に衝突速度 $V=1m/sec$ における $AFRP$ ロッド表面が無処理の場合と、砂を接着させた場合のスラブ(それぞれの試験体番号は $AC-SLB-23$ 、 $AsC-SLB-27$)の全計測時間 $40msec$ の場合の応答波形を示している。以後この節では $AC-SLB-23$ を砂無しスラブ、 $AsC-SLB-27$ を砂付きスラブと呼ぶこととする。なお、各波形分布において基準軸より上方が引張歪を、下方が圧縮歪を示している。写真-2より、砂無しスラブの場合は載荷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挙動はほぼ対称な分布を示していることがわかる。一方、写真-3の砂付きスラブの場合、載荷点部($A1, B1$)の波形を除いて荷重載荷時の1波目以降は急激に減衰している。また上端筋の波形は下端筋のそれよりも特に衝撃初期において大きな分布性状を示しているようである。ゲージ番号 $A1$ は衝撃荷重載荷後残留歪が発生しており、 $B1$ の波形も初期に引張り領域に分布しているもののその値も小さく固有振動も励起されていないため、他の出力波形と比較してこれらのゲージ点はかぶりが小さくなっているかあるいは偏心載荷の状態になっているものと推察される。

4.2. 下端筋歪分布の変動状態

図-3, 4には応答開始後の各時間ステップにおけるスラブ下端筋軸歪 $B1\sim B6$ の分布について、砂無しスラブ($AC-SLB-23$)と砂付きスラブ($AsC-SLB-27$)を並列して示している。図-3, 4はそれぞれ $V=1m/sec$ 、 $V=4m/sec$ 落下の場合である。いずれも見やすくするために支点部を零歪と仮定し測定値を細線で結んでいる。なお、ここでは基準軸より下方が引張側、上方が圧縮側である。これらの分布図は、主波動が支点に向かって伝播していく状況を写真-2, 3の波形分布よりも明確に示している。図-3より、砂の有無による両者の伝播状況を比較すると砂無しスラブの場合は、 $t=0.4msec$ で $B3$ と支点との間で圧縮歪を示しているが、時間の経過とともに引張領域へ推移していき、 $t=1.6msec$ ではほぼ最低次の振動状態になっている。一方、砂付きの場合は($B1$ の点を除いて考えると)衝撃初期の圧縮領域の歪値が多少砂無しの場合に比べ大きくなっており、 $t\geq 1.6msec$ 以後の分布は $B4$ 近傍で変曲点を有し、最低次モードに三次の振動モードが重なり合ったような分布形状を示している。

図-4は $V=4m/sec$ における歪分布であるが、いずれのケースも $V=1m/sec$ の10倍から最大約30倍程度の大きさに増幅されている。砂無しスラブの場合は後述するように対角線状に大きなひび割れが発生している状態であるのでスラブ中心の歪成分である $B1, B2$ において $2000\sim 3000\mu$ 程度の歪が発生しており $B4\sim B6$ においては測点がひび割れ部より離れているため小さな分布になったものと考えられる。砂付きスラブは $B1$ において 2000μ 程度の歪が発生しひび割れが生じているようであるが、全体的に砂無しスラブよりも小さな値を示し支点方向になめらかな歪分布となっている。これは砂を接着させたことによりコンクリートと $AFRP$ ロッドの付着性能が向上し $AFRP$ が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。

AC-SLB-23-1
V=1.0m/sec

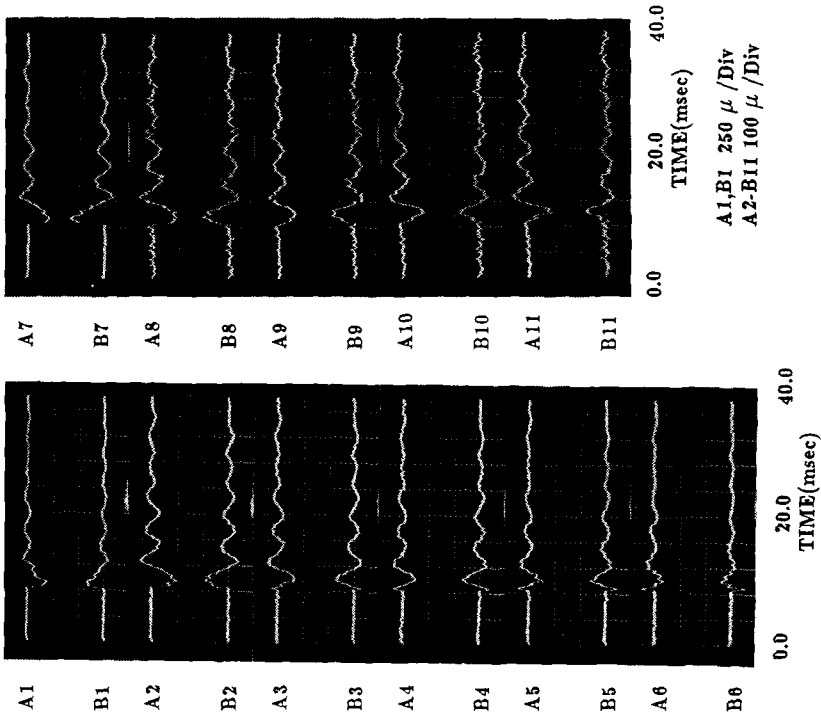


写真-2 AC-SLB-23-1 におけるAFRPロッドの歪波形分布図

AsC-SLB-27-1
V=1.0m/sec

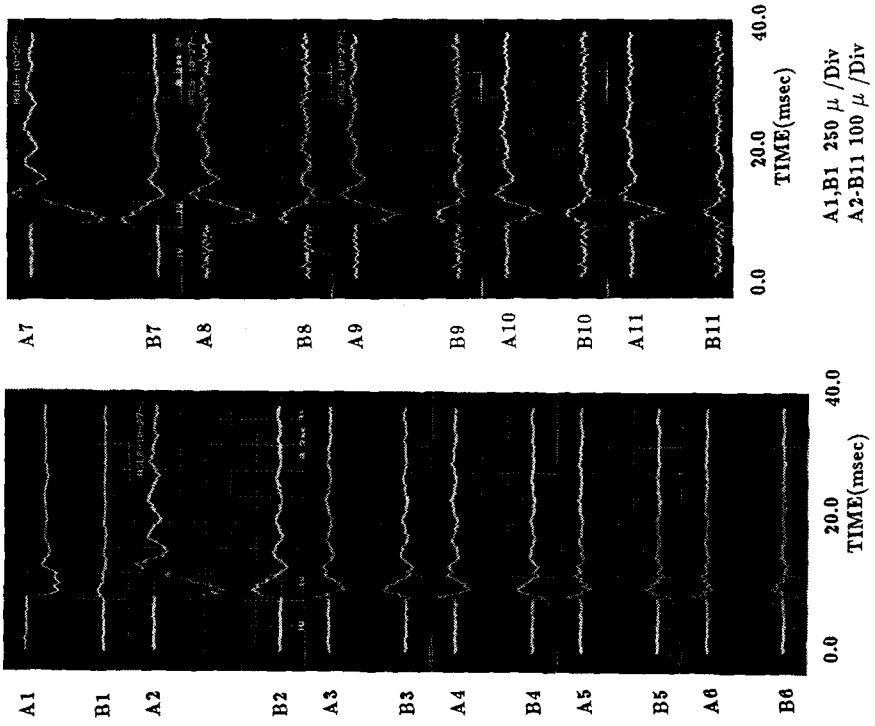


写真-3 AsC-SLB-27-1 におけるAFRPロッドの歪波形分布図

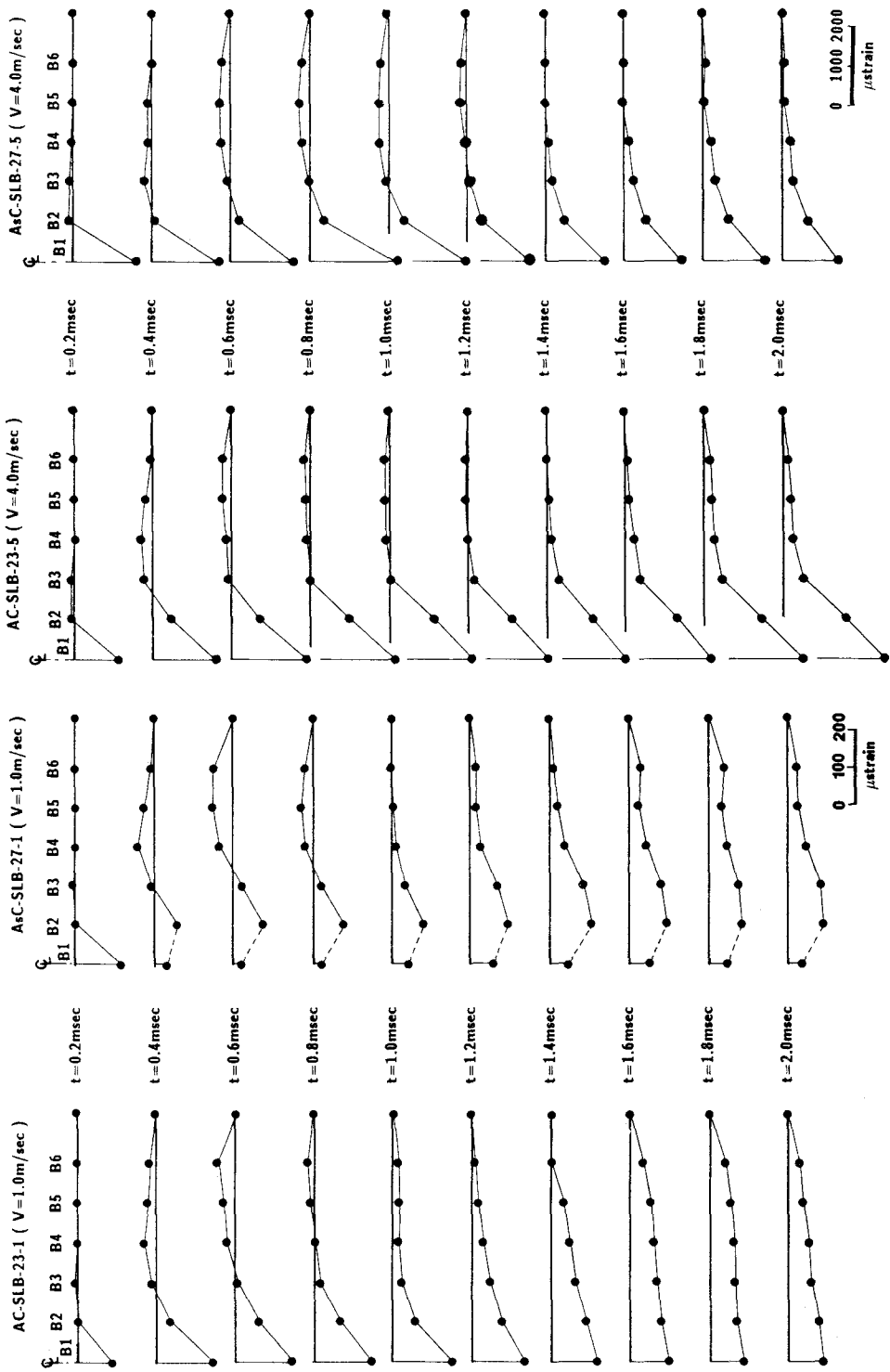


図-3 V=1m/sec落下時の下端筋歪分布図

図-4 V=4m/sec落下時の下端筋歪分布図

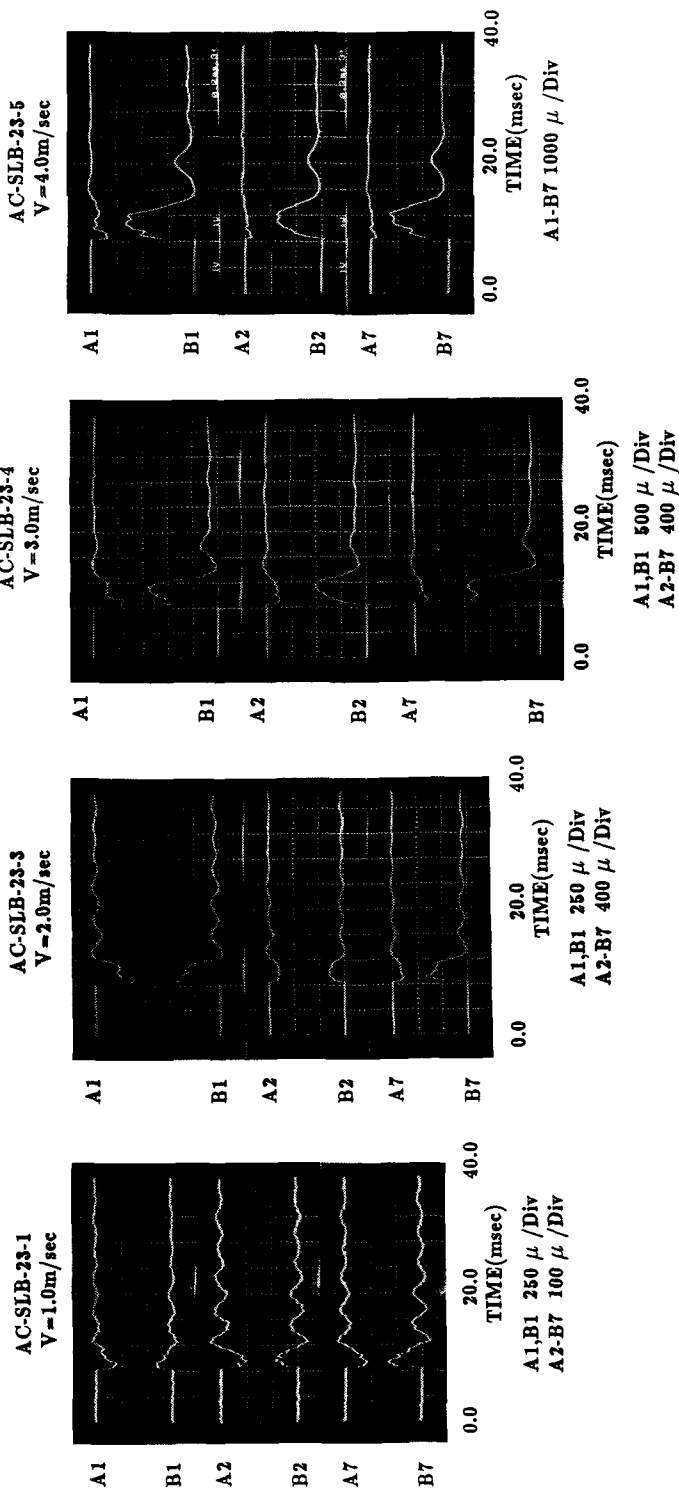
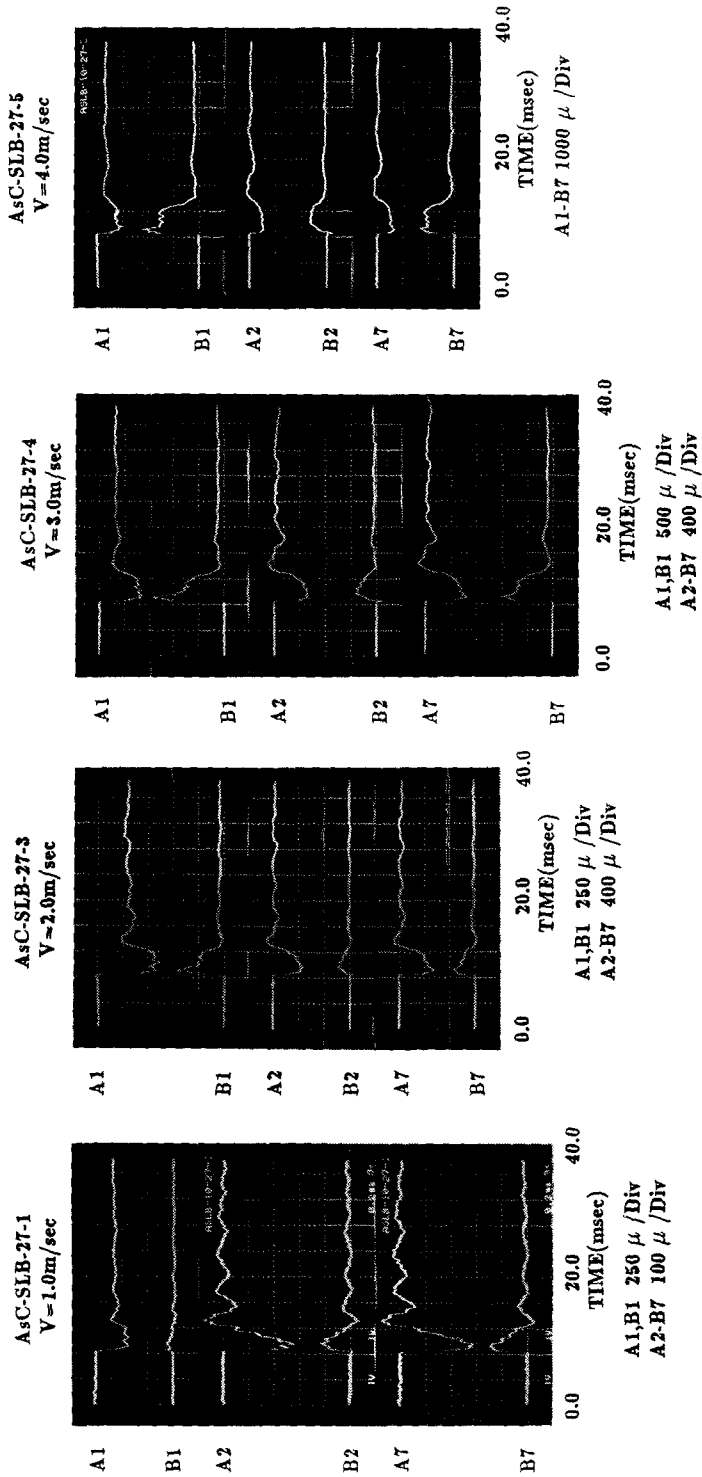


写真-4 AC-SLB-23の載荷点近傍におけるAFRPロッドの歪波形推移状況



写真一5 AsC-SLB-27の載荷点近傍におけるAFRPロッドの歪波形推移状況

4.3. 繰り返し载荷による歪波形の変動状態

写真-4, 5には前記AC-SLB-23, AsC-SLB-27の各衝突速度における载荷点近傍の歪波形の推移について示している。歪の正負に関しては写真-2, 3と同様である。また、これらの結果は各実験毎に生じる残留歪を無視したものである。従って、絶対歪を考える場合には考えている実験結果にそれまでに発生した残留歪をすべて総和しなければならぬ。

写真-4の砂無しスラブの場合、 $V=1m/sec$ の場合は残留歪も発生せず衝撃荷重終了後に低次の固有振動状態となっている。 $V=2m/sec$ では前者と同様の振動状態を示しているが、下端筋に多少の残留歪が発生しているようである。また、この範囲内ではいまだ上下端筋の歪は対称な分布形状を示している。その後、 $V=3m/sec$, $V=4m/sec$ と衝突速度を上げると、重錘衝突時の波形を含め2波程度の波動が発生するだけで、その後大きな変動がないようである。いずれの場合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、また上下端筋の歪成分はほぼそれぞれ圧縮、引張り領域内のみで変動しているようである。これは、衝撃荷重載荷時にAFRPロッドに $2000\sim 3000\mu$ の歪が発生し、スラブ裏面にひび割れが発生しかつその幅が拡大されるが、いまだAFRPロッドが弾性領域にあるためそのロッドやスラブ圧縮領域の復元力により衝撃荷重載荷終了とともに振動状態を呈する。しかしながら、ひび割れ等によるスラブ全体の復元力低下により負のたわみ変形を示すことができず、同一の領域内におけるヒステリシスループを描き静止したものと考えられる。

一方、写真-5の砂付きスラブの場合は砂無しスラブの場合に比べ全体的に減衰性が大きく、特に $V=2m/sec$ 以降は衝撃荷重除荷後の歪変動が著しく減少している。さらに $V=3, 4m/sec$ の場合における応答波形に注目すると、砂無しスラブの場合には下端筋の歪の絶対値は上端筋のそれに比し4~10倍程度の大きさになっているのに対し、砂付きスラブの場合1~3倍程度とその差が小さく、また最大歪も砂無しスラブよりも小さな値となっている。これよりAFRPロッド表面に接着された砂はコンクリートとAFRPロッドとの付着性能を向上し、スラブ裏面に発生したひび割れの幅や長さの増加を静的荷重載荷¹²⁾同様衝撃荷重載荷時においても抑制しているものと推察される。

4.4. スラブ裏面のひび割れ性状

図-5には全実験ケース終了後のスラブ裏面のひび割れ状態について示している。AC-SLBは砂無しスラブである。-25はやや複雑なひび割れパターンを示しているが、他-23, 24はスラブの対角線状にひび割れが発生している。これは図-3の下端筋の歪分布に示されているように、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ためと考えられる。一方、砂付きスラブの場合は、図-4に示されるように最低時の振動モードと3次のモードが重ね合わされたような歪分布となり、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、ひび割れがスラブ中央部に放射状に分散して発生したものと推察される。この現象は、AFRPロッドに砂を接着させることによりコンクリートとAFRPロッドとの付着性能が向上し、スラブの曲げ剛性低下が抑制されていることを示すものと考えられる。

4.5. 最大衝撃力

重錘による衝撃力は、重錘に取り付けた加速度計より得られる加速度に重錘の質量を乗じることにより求めている。写真-6に衝撃速度 $V=2m/sec$ におけるAC-SLB-25, AsC-SLB-26の加速度波形を

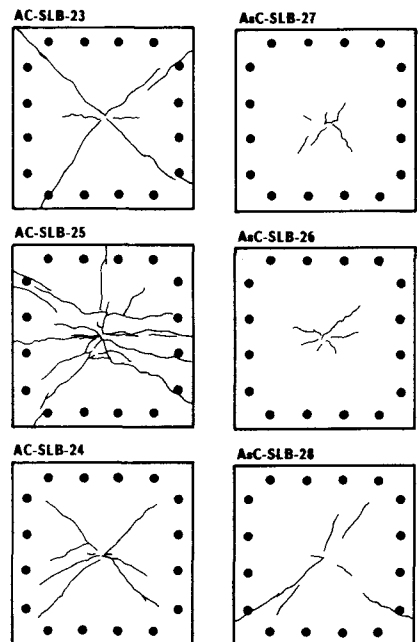


図-5
実験終了後の各試験体裏面のひび割れ図

示す。加速度計は重錘の両側面 (W_{ac1}, W_{ac2}) と上面 (W_{ac3}) にとりつけている。(a) は砂なしスラブ (AC-SLB-25)、(b) は砂付きスラブ (AsC-SLB-26) のものであるがどちらもほぼ類似の応答波形を示しており、全衝撃時間は約 1.2msec、最大加速度は約 500g である。また、最大衝撃力が発生する時間は $t=160\sim 190\mu\text{sec}$ 経過後のようである。なお、スラブ上面衝突部の凹凸により若干の偏心が生ずる場合もあるため、衝撃力

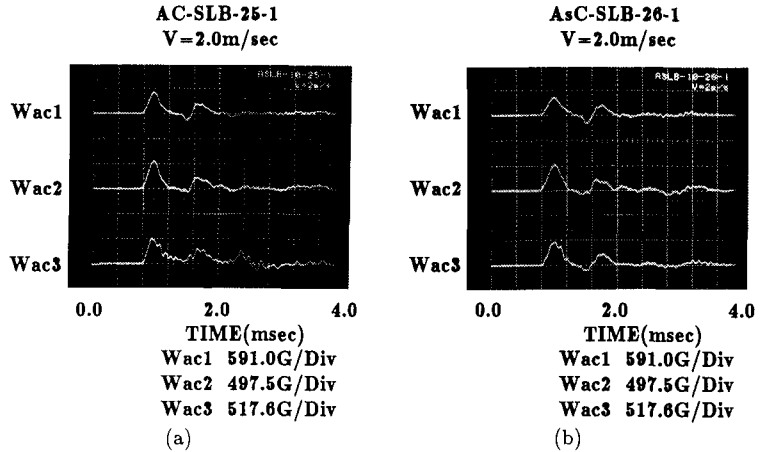


写真-6 重錘加速度の応答波形

は重錘両側面の加速度のみを用い、それを平均して算定している。本研究では、重錘の衝突速度を小さくしてスラブ裏面にひび割れが生じる程度までの実験を行っているので、弾性接触論に基づいた衝撃力算定式²⁰⁾を用い実験結果との比較を行うこととした。

算定式を示すと、コンクリートの弾性係数、ポアソン比をそれぞれ E, ν 、重錘の半径、質量、衝突速度を a, M, V 、平板の質量、厚さを ρ, h とすれば、衝撃力 P は、

$$P = \frac{2Ea}{1-\nu^2} V \frac{e^{-\beta\omega t}}{\omega\sqrt{1-\beta^2}} \sin\omega\sqrt{1-\beta^2} t \quad \dots(1)$$

ここで

$$\beta = \frac{1}{4h^2} \sqrt{\frac{3Ma}{2\rho}}, \quad \omega = \sqrt{\left(\frac{2Ea}{1-\nu^2}\right)/M} \quad \dots(2),(3)$$

また最大衝撃力を与える時間 t は

$$t = \frac{1}{\omega\sqrt{1-\beta^2}} \tan^{-1} \frac{\sqrt{1-\beta^2}}{\beta} \quad \dots(4)$$

である。本実験では、 $E=2.95 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $\nu=0.20$ 、 $a=7.5 \text{ cm}$ 、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。本実験の場合は、(1),(4)式中の平方根が負の値となるため (1)式は過減衰状態を示す。(4)式より最大衝撃力が発生する時間を求めると、 $t=109\mu\text{sec}$ 経過後となり、上述の実験結果より若干早めの時間を示している。

図-6 に各衝撃実験で求められた最大加速度に重錘の質量を乗じて得られる最大衝撃力 (実験値) と、理論値との比較を示している。(a) は砂無しスラブ (AC-SLB)、(b) は砂付きスラブ (AsC-SLB) に対する結果である。図の中に示されている番号は各スラブの載荷実験の順番を示す。図より、実験結果は砂無し、砂付きスラブのいずれに関しても、 $V=2\text{m/sec}$ 以下の場合には理論値とほぼ同様の値を示し、 $V=3\text{m/sec}$ 以上の場合には理論値と同様あるいはそれ以上の値となっている。一般に載荷点近傍が圧壊状態にある場合やスラブ上面から裏面への貫通ひび割れが発生している場合には、最大衝撃力は弾性理論結果より小さい値を示すものと推察されるが、比較図は上述のように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の、載荷面コンクリート部が未だひび割れや圧壊状態に達していないこと、最大衝撃力発生時に主波動が支持境界に達していないこと等により、載荷点近傍部のスラブは無限弾性平板的な挙動をしているものと考えられる。

以上の結果、この程度の衝突速度であれば、AFRPロッドを用いたコンクリートスラブの重錘落下による最大衝撃力は弾性接触論を用いて評価することが出来るものと考えられる。

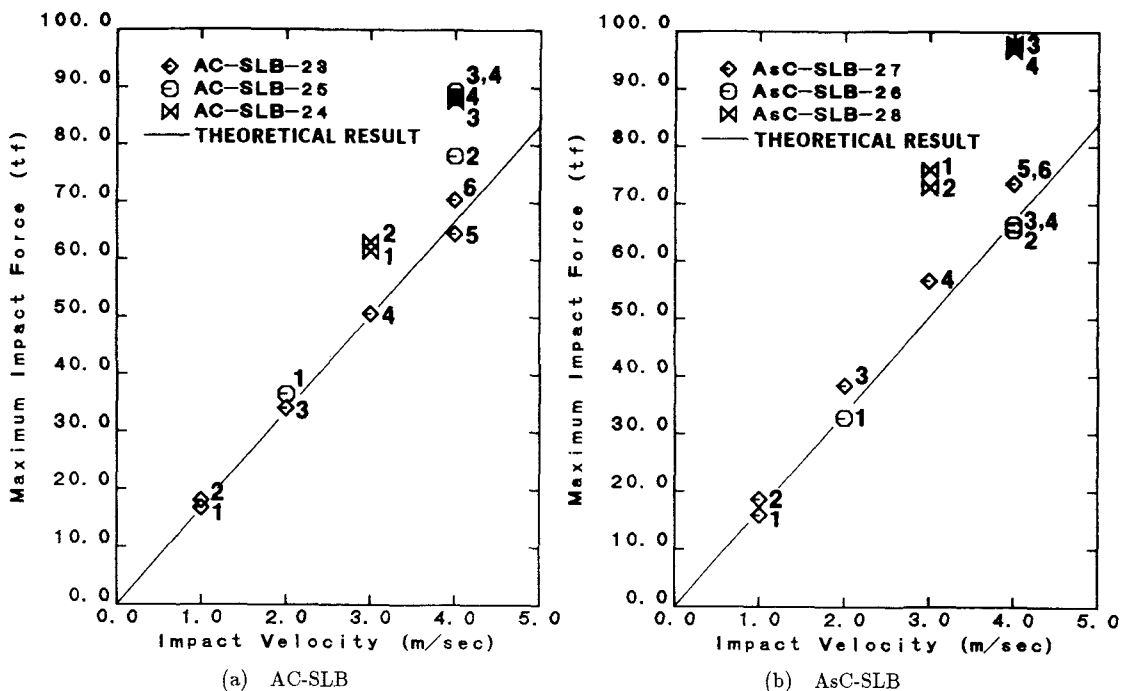


図-6 最大衝撃力と衝突速度との関係図

5. まとめ

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部材の動的挙動の一検討として、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に重錘落下衝撃を作用させ、衝撃加速度やロッド内歪波形の計測を行った。実験は、主として弾性状態からスラブ裏面にひび割れが生じる程度の塑性状態までの挙動に注目するために衝突速度を $V=1\sim 4\text{m/sec}$ に限定し、衝撃力やAFRPロッドの歪応答性状などについて、ロッド表面の処理の影響も含め詳細な検討を行った。

本実験の範囲内で得られた結果を整理すると、

- (1) $V=1\text{m/sec}$ 程度の低速度衝突の場合には、載荷点近傍を除き上下筋の歪波形はほぼ対称な応答性状を示している。
- (2) スラブ下端筋の歪分布の検討により、ロッド内を伝わる主波動が支点に向かって伝播していく状況を明確に示すことが出来た。また、主波動が支点に到達後砂無しスラブ（ロッド表面無処理の場合）は最低時の固有振動状態に、砂付きスラブ（ロッド表面に砂を接着させた場合）は最低次モードに三次の振動モードが重ね合わされた分布形状を示していることが明らかになった。
- (3) スラブ裏面にひび割れが発生した後における衝撃荷重載荷の場合は、スラブ全体の復元力低下のため負のたわみ変形を示すことが出来ず、同一の歪領域内で減衰振動を呈するようである。
- (4) スラブ裏面のひび割れ性状に関しては、砂無しの場合は対角線状にひび割れが発生し、砂付きの場合はスラブ中央部に放射線状に分散して発生しているようである。特に砂付きの場合はAFRPロッドとコンクリートの付着性能が向上し、見かけ上スラブの剛性低下が抑制されているものと考えられる。
- (5) 最大衝撃力は、重錘加速度を用いて算定しているが、実験結果は弾性接触論による衝撃力と同等あるいはそれ以

上の値を示し、またロッドの表面処理の影響も少ないようである。

以上、本実験結果の範囲内では組紐状AFRPロッドで補強されたコンクリート構造は衝撃荷重に対して十分耐力を有しているものと推察されるが、今後、より高速の衝撃速度に対する検討を進めるとともに、静的載荷時における破壊性状や、鉄筋コンクリートスラブを用いた場合における結果との比較検討を行い、新素材繊維を用いて補強したコンクリート構造の設計法確立のための基礎資料を提供したいと考えている。

(参考文献)

1. 岡本 直、田村富雄、松原澄行、谷垣正治、(1988)、“アラミド繊維による組紐状棒材の基本的性状”、第10回コンクリート工学年次論文報告集、659-664。
2. 平賀寿雄、(1986)、“新しいコンクリート補強材 タフティワインド・ニューファイバーメッシュ (NFM)” 強化プラスチック、Vol.32, No.10
3. 丸山武彦、本間雅人、岡村 甫、(1989)、“各種FRPロッドの斜め引張特性に関する実験的研究” 第11回コンクリート工学年次論文報告集、771-776。
4. 宮田尚彦、鳥取誠一、寺田年夫、関島謙蔵、(1989)、“曲げ加工したFRP筋の引張耐力に関する実験的研究” 第11回コンクリート工学年次論文報告集、789-794。
5. 古川 茂、辻 幸和、大谷杉郎、小島 昭、(1990)、“CFRCロッドの引張強度試験方法” 第12回コンクリート工学年次論文報告集、1009-1014。
6. 小林克巳、藤崎忠志、林 英樹、(1990)、“格子状繊維強化複合材料の引張・圧縮特性”、第12回コンクリート工学年次論文報告集、1031-1036。
7. 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。
8. 古川 茂、辻 幸和、大谷杉郎、小島 昭、(1989)、“CFRCロッドで補強したコンクリートはりの曲げおよびせん断性状” 第11回コンクリート工学年次論文報告集、849-854。
9. 秋山 暉、天野玲子、奥村一正、(1990)、“板状のFRPロッドを用いたコンクリートはりの曲げ性状” 第12回コンクリート工学年次論文報告集、1099-1104。
10. 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。
11. 涌井 一、鳥取誠一、(1990)、“FRP棒材をらせん状せん断補強筋として用いた場合のコンクリートはりのせん断補強効果” 第12回コンクリート工学年次論文報告集、1141-1146。
12. 三上 浩、林 寿夫、加藤正利、田村富雄、“アラミド繊維による組紐状棒材を用いたPCばりの静的耐荷挙動” 第10回コンクリート工学年次論文報告集、665-670。
13. 三上 浩、林 寿夫、田村富雄、(1988)、“組紐状AFRPロッドのPCプレテンション部材への適用に関する基礎的研究” プレストレストコンクリート、Vol.30, No.5, Sept, 35-40。
14. 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。
15. 片脇清士、西崎 到、(1990)、“CFRP緊張材を用いて製作したプレストレストコンクリート桁の製作試験” 第12回コンクリート工学年次論文報告集、1075-1080。
16. 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。
17. 丸山武彦、本間雅人、小沢一雅、(1990)、“CFRPロッドを用いたPCはりの繰返し載荷による付着性状に関する一実験” 第12回コンクリート工学年次論文報告集、1147-1152。
18. 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。
19. 三上 浩、加藤正利、田村富雄、石橋一彦、(1990)、“組紐状AFRPロッドで補強したコンクリート梁の疲労性状” 第12回コンクリート工学年次論文報告集、1153-1158。
20. 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

(1990年10月12日受付)