

鉄筋およびAFRPロッドで補強したRCスラブの 耐衝撃挙動に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON IMPACT BEHAVIORS OF RC SLABS REINFORCED WITH STEEL BARS AND AFRP RODS

田村 富雄* 三上 浩** 岸 徳光*** 松岡 健一****

Tomio TAMURA, Hiroshi MIKAMI, Norimitsu KISHI, Ken-Ichi G. MATSUOKA

In this paper, impact behaviors of RC slabs reinforced with 4 types of reinforcement including the braided AFRP rods are discussed. The reinforcements considered in this study are braided AFRP rods with/without silica sand on the surface, round steel bar and deformed steel bar. The specifications of each slab are 150cm × 150cm × 7cm in dimensions, single reinforcement and simply supported along the four sides. To consider the influences of concrete strength and reinforcement ratio on impact resistance of RC slab, four types of RC slabs having two different concrete strengths (lower and higher strength) and reinforcement ratios (0.5% and 1%) are chosen. Impact load is applied on the center of each RC slab which is generated by free drop of heavy weight with 100kgf.

Based on the experimental results, the influences of each parameter on the impact behaviors of RC slab are shown in further detail in connection with the stiffness of slab, modulus of elasticity and bonding action of reinforcements.

1. はじめに

最近、RC 梁や RC スラブ、ならびに PC、PRC 梁の補強筋や緊張材に連続繊維補強材 (FRP ロッド) を用いる研究が盛んに行われている。また一部では、PC 橋梁の緊張材などとして実構造物にも適用され始めている。FRP ロッドは耐蝕性に優れ鉄筋よりも引張強度が高い。さらに、軽量かつ非帯磁性であることなど、在来の鋼材にない優れた特質を有している。従って FRP ロッドの建設分野における適用範囲は今後大きく広がるものと予想される。FRP ロッドをコンクリートの補強材として適用した既往の研究のなかで、特に研究例が多いのは PC 梁の緊張材に用いた際の耐荷挙動に関するものである^{1)~3)}。これは FRP ロッドのヤング係数が鋼材の 1/2~1/3 程度と低いことを考慮したためと考えられる。すなわち、低ヤング係数の FRP ロッドを鉄筋代替として梁部材 (曲げ部材) に適用すると、変形量が大きくなり許容できない場合も考えられる。一方、荷重の分担領域が梁部材と比べて広がる面部材へ適用することは、変形量が梁部材と比べて小さくなるためより合理的と考えられる。また、既往の研究では静的な荷

* 正会員 三井建設技術研究所 副所長 (〒271-01 流山市駒木518番1号)

** 正会員 工博 三井建設技術研究所 主任研究員 (〒271-01 流山市駒木518番1号)

*** 正会員 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番1号)

**** 正会員 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番1号)

重状態を考慮したものが多く、衝撃荷重などの動的荷重下における研究例は著者らの例を除いては極めて少ないようである⁴⁾。しかし、原子力施設や落石防護施設あるいは危険物の貯蔵施設ならびに高速道路のコンクリート防護柵など、建設分野には衝撃荷重を考慮した設計・施工が望まれる施設が数多く存在している。

このような背景から、著者らは弾性域での伸びが鉄筋と比較して大きくエネルギー吸収性能の良いアラミド繊維を補強筋に用いた RC 梁や RC スラブの衝撃応答特性や耐衝撃性の検討を行ってきた^{5)~8)}。その結果、RC 梁や RC スラブの耐衝撃性や応答特性は補強筋の剛性（以下、補強筋の断面積にヤング係数を乗じたものを剛性と称する）や付着特性に大きく影響されることが判った。本研究では著者らの既往の研究をさらに拡張し、RC スラブの補強筋の剛性や付着特性ならびにコンクリート強度（ヤング係数）と補強筋比が耐衝撃挙動に与える影響を実験的に検討した。

2. 衝撃実験の概要

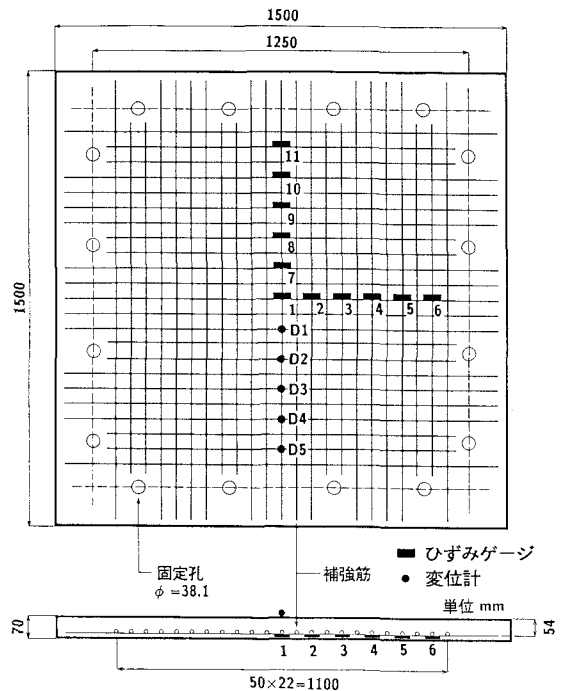
2.1. 試験体の概要

試験体の一覧を表－1 に示す。試験体は補強筋 4 種類、コンクリート強度 2 種類、補強筋比を 2 種類とした合計 12 体である。ここでは試験体数の制約から、コンクリート強度の影響は研究実績の豊富な補強筋比 1% の状態で、補強筋比の影響はその影響が顕著に出現すると予想される低コンクリート強度で検討することとした。ここで試験体の名称の内、AC, AsC, DC, RC は各々補強筋の種類を示し、H または L はコンクリート強度が高い (High)、低い (Low) を示し、末尾の 1 または 5 は補強筋比 (1% または 0.5%) を示す。

補強筋に用いた FRP ロッドはアラミド繊維を組紐状に編み上げた後樹脂を含浸硬化させて成形した組紐状 AFRP ロッドである。また補強筋の付着特性が耐衝撃挙動に与える影響を検討するため、ロッド表面に樹脂が硬化する前に 5 号珪砂（平均粒径 0.3mm）を接着して成形した砂付きロッドと無処理の砂なしロッドの 2 種類を用い

表－1 試験体の一覧

名称	補強筋の種類	コンクリート強度 (kgf/cm ²)	補強筋比 (%)
AC-H1	砂なしAFRPロッド RA5	461	1.0
AsC-H1	砂付きAFRPロッド RA5S	461	1.0
DC-H1	異形鉄筋 D6	461	1.0
RC-H1	丸鋼 R6	461	1.0
AC-L1	砂なしAFRPロッド RA5	171	1.0
AsC-L1	砂付きAFRPロッド RA5S	171	1.0
DC-L1	異形鉄筋 D6	171	1.0
RC-L1	丸鋼 R6	171	1.0
AC-L5	砂なしAFRPロッド RA5	171	0.5
AsC-L5	砂付きAFRPロッド RA5S	171	0.5
DC-L5	異形鉄筋 D6	171	0.5
RC-L5	丸鋼 R6	171	0.5



図－1 コンクリートスラブの配筋の例

た。一方、鉄筋についてもほぼ同様な断面積を有する丸鋼および異形鉄筋の 2 種類を用いた。

コンクリート強度は各々目標強度が $f'_c = 500\text{kgf/cm}^2$ 、 180kgf/cm^2 のもので、一方はプレストレストコンクリート構造の耐衝撃挙動について将来検討することも考慮した高強度とし、他方は現場打ちの RC を考慮した最も低強度レベルのコンクリートとした。

補強筋比は従来の衝撃荷重を考慮すべきコンクリート構造物の施工実績および研究実績の豊富さなどから $p=1\%$ を基準とし、低補強筋比はこの半分の 0.5% とした。

コンクリートスラブの配筋の一例を図-1 に示す。スラブの寸法は $150\text{cm} \times 150\text{cm} \times 7\text{cm}$ で、既存の衝撃載荷試験装置で破壊に至らしめるために、スラブ厚を薄くし、かつかぶり 1cm の単筋直交配置とした。補強筋のピッチは補強筋比 1% で 5cm 、 0.5% で 10cm である。

2.2. コンクリートおよび補強筋の特性

2.2.1. コンクリートの特性

コンクリートは粗骨材の最大寸法が 15mm のレデーミクストコンクリートで、高強度コンクリートでは W/C が 38.0% 、単位セメント量は 432kg である。低強度コンクリートでは W/C が 62.0% 、単位セメント量は 210kg である。表-2 に材令 28 日におけるコンクリートの力学的特性を示す。衝撃試験時の材令は AC-H1~RC-H1 の 4 体は 35~37 日、AC-L1~RC-L5 の 8 体は 49~54 日である。なお、低強度コンクリートを用いたスラブでは材料試験の材令と衝撃試験の材令が 1 ヶ月程度異なったため、衝撃試験時の材令で圧縮強度のみを確認した結果、圧縮強度は 150kgf/cm^2 程度であり 28 日強度を若干下回る程度であった。これより、今回の実験では材令の差はコンクリートの力学的特性に顕著な影響を与えていないと考えられ、以後の理論計算には表-2 の特性値をそのまま用いることにした。

表-2 コンクリートの力学的特性

試験体名	圧縮強度 (kgf/cm^2)	ヤング係数 (kgf/cm^2)	ポアソン比	単位重量 (tonf/m^3)
AC-H1~RC-H1	461	2.71×10^5	0.195	2.314
AC-L1~RC-L1 AC-L5~RC-L5	171	1.82×10^5	0.230	2.127

表-3 補強筋の特性

補強筋名	砂なしロッド RA5	砂付きロッド RA5S	丸 鋼 R6	異形鉄筋 D6
材 質	アラミド繊維	アラミド繊維	SR30	SD30A
(公称)直径 (mm)	6	7	5.87	5.75
(公称)断面積 (cm^2)	0.25	0.25	0.27	0.26
密 度 (g/cm^3)	1.30	1.30	7.85	7.85
引張耐力 (tonf)	2.8	2.8	1.2	1.1
降伏耐力 (tonf)	—	—	0.81以上	0.78以上
ヤング係数 ($\times 10^6 \text{kgf/cm}^2$)	0.67	0.67	2.10	2.06
弾性伸び率 (%)	1.67	1.67	0.20	0.20
ポアソン比	0.60	0.60	0.28	0.27

2.2.2. 補強筋の特性

表-3 に補強筋の特性を示す。組紐状 AFRP ロッドは基材として直径 $12\mu\text{m}$ のアラミド繊維を用い、それを組紐機で編み上げた後エポキシ樹脂を含浸し、硬化させて成形したものである。この際、アラミド繊維の重量含有率は約 70% である。なお、組紐の凹凸はロッドの直径の 10 倍の区間内に 4 ヶ所ある。補強筋の特性は AFRP ロッドで試験片 3 本、鉄筋で 4 本の実測値の平均値である。なお、鉄筋の降伏耐力および弾性伸び率は規格値を示している。

組紐状 AFRP ロッドは鉄筋の約 $1/6$ の重さであり、ヤング係数は鉄筋の約 $1/3$ 程度と低い引張耐力は鉄筋の $2.3 \sim 2.5$ 倍程度と大きい。AFRP ロッドは破断するまで完全弾性的な挙動を示し、弾性伸び率は鉄筋の 8 倍程度にま

で達している。鉄筋とAFRPロッドの最大弾性伸び率における引張強さを比較するとロッドの方が3.5倍程度大きい。また、弾性範囲内での歪エネルギーを両者で比較すると AFRP ロッドは鉄筋の 9.2~10 倍大きい。

なお、補強筋の付着特性は文献(9)より、砂付きのAFRPロッドではすべり量が 0.2mm 程度の小さな領域では異形鉄筋とほぼ同等であるが、すべり量がそれ以上増加しても付着強度は増加せずほぼ一定値を示す。一方、砂なしロッドの付着強度はすべり量によらず丸鋼よりも高いものの、すべり量が小さな領域では異形鉄筋よりも小さく、すべり量が大きくなるに従い付着強度が増加する傾向を有している。

2.3. 実験方法

2.3.1. 実験装置の概要

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った。衝撃荷重は直径 15cm で重量が 100kgf の鋼製の円柱からなる重錘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。この際実験の再現性を考慮し、偏心載荷を防止するため、重錘はリニアウェイトユニットを介して載荷した。また、重錘は平底の場合には片あたりが懸念されるため、2mm のテーパを設けた球底とした。

スラブの支持方式は矩形版の 4 辺を上下から鋼製のローラーではさむ単純支持方式とした。なお重錘の載荷速度(スラブに衝突する直前における重錘の速度)は $V=1\text{m/sec}$ から 1m/sec 刻みとし、 7m/sec 以上は試験装置の制約から最大で 7.5m/sec とした。

2.3.2. 計測項目および方法

本実験での計測項目および計測点数は重錘の両側面に取り付けた容量 1000G の歪ゲージ型加速度変換器 2 点と補強筋に取り付けた歪ゲージ 11 点の 13 点である。補強筋の歪測定に用いたゲージは歪限界が 5% の一般用歪ゲージである。また、歪ゲージにはシーリングおよび防水処理を施し、組紐状 AFRP ロッドではその腹部に歪ゲージを接着した。なお、低強度コンクリートを用いた 8 体のスラブでは渦電流型の変位計を図-1 に示す位置に 5 点配置して変位応答を測定した。変位計の容量は測点 1~3 で 10mm、測点 4~5 で 2mm である。歪波形はノイズの発生を極力少なくす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た。

図-2 に本実験における計測システムのフローチャートを示す。各計測機器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、データレコーダに一括集録した。記録した波形の出力はウェーブメモリーを介して A/D 変換し、それをパーソナルコンピュータを介してワークステーションに収積して適宜処理した。なお、シンクロ스코ープは波形の確認のために用いている。

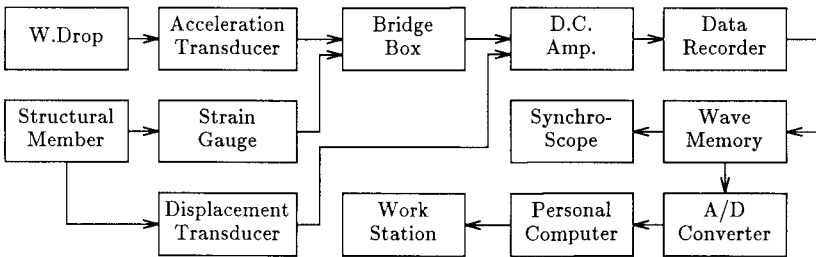


図-2 計測システムのフローチャート

3. 衝撃応答特性

3.1. 変位分布からみた応答特性

RC スラブの衝撃破壊時における特性を検討する上で、破壊前の載荷速度における応答特性を検討することも極めて重要であると考えられる。そこで本文では、破壊前の載荷速度におけるスラブの応答変位分布から、本実験で用いたスラブが衝撃力にどのように抵抗しているかの全般的な傾向を検討することにする。

図-3 に、コンクリート強度 $f'_c=171\text{kgf/cm}^2$ 、補強筋比 $p=1\%$ における各スラブ (-L1) の載荷速度 $V=2\text{m/sec}$ における各測定点の最大変位の分布を示した。この図から、AFRP ロッドを用いたスラブは鉄筋を用いた場合よりも測定点 1 の変位が他の測定点に比べて大きくなる傾向にあることが判る。また、AC-L1 と AsC-L1、RC-L1 と DC-L1 の比較より、同じ剛性の補強筋を用いたスラブでも付着強度の高い補強筋を用いた方が最大変位量が小さくなる傾向にあることが判る。これらは弾性から塑性状態に変化したスラブの載荷点近傍の変位応答値が補強筋の剛性および付着特性に影響されることを示すものである。すなわち、 $p=1\%$ では補強筋の剛性が低く付着強度の低いもののほど載荷点近傍の最大応答変位量は大きくなると思われる。

図-4 にコンクリート強度 $f'_c=171\text{kgf/cm}^2$ 、補強筋比 $p=0.5\%$ における各スラブ (-L5) の、載荷速度 $V=2\text{m/sec}$ での各測定点の最大変位の分布を示した。これより、スラブの全測定点での変位は AFRP ロッドを用いた方が鉄筋を用いた場合よりも大きく、この傾向は特に砂付きの AFRP ロッドを用いたスラブで顕著であることが判る。また、 $p=1\%$ の場合と異なり同じ剛性の補強筋を用いたスラブでは、付着強度の高い補強筋を用いた方が最大変位が大きくなっていることが判る。これは、低補強筋比の場合はより小さな載荷速度から補強筋に大きな応力が作用し、補強筋の剛性が低く、付着強度の高いもののほど変形によって衝撃エネルギーを吸収するためと考えられる。一方、高補強筋比の場合は付着強度の高いもののほどひびわれは広域的に分散するため⁸⁾、載荷点周辺の変位が付着強度の低い補強筋を用いたスラブに比べて小さくなるものと考えられる。なお $p=0.5\%$ と 1% で測定点 1 の変位量を比較すると、AFRP ロッド、鉄筋ともに平均的に 0.5% の方が 1% よりも 1.2 倍程度大きくなっている。このように、低強度コンクリートを用いたスラブの変位応答特性は、補強筋の剛性や付着特性と補強筋比の大小に大きく影響される。

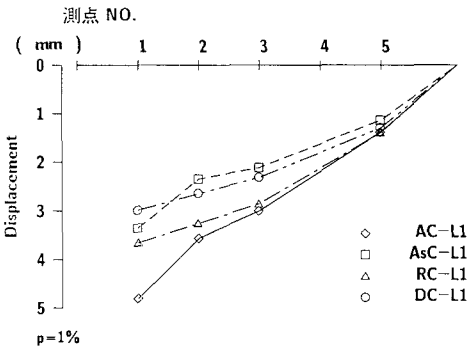


図-3 V=2m/sec における
各点の最大応答変位分布
(補強筋比 1%)

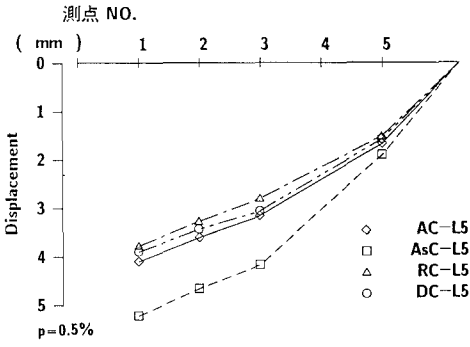
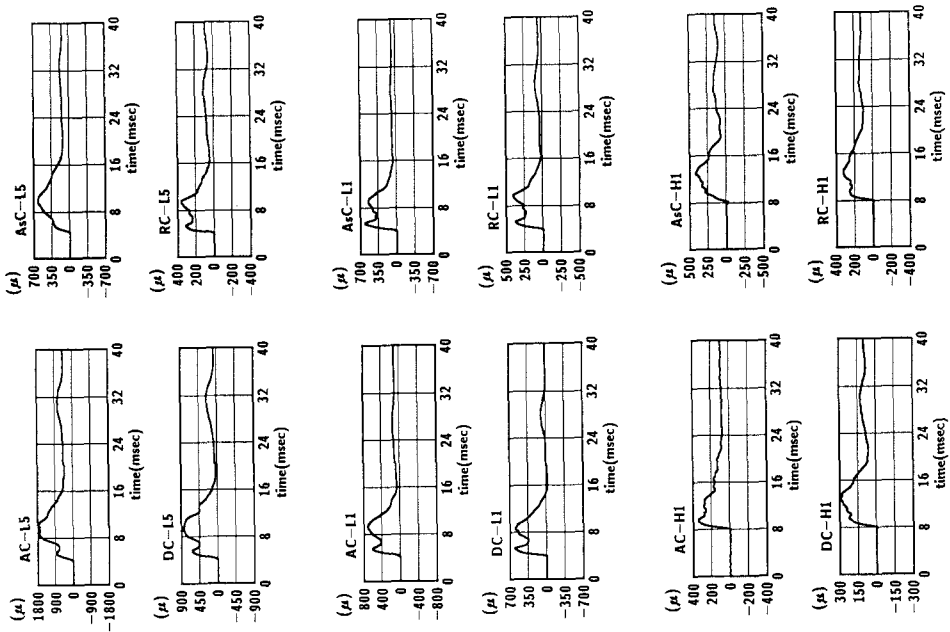


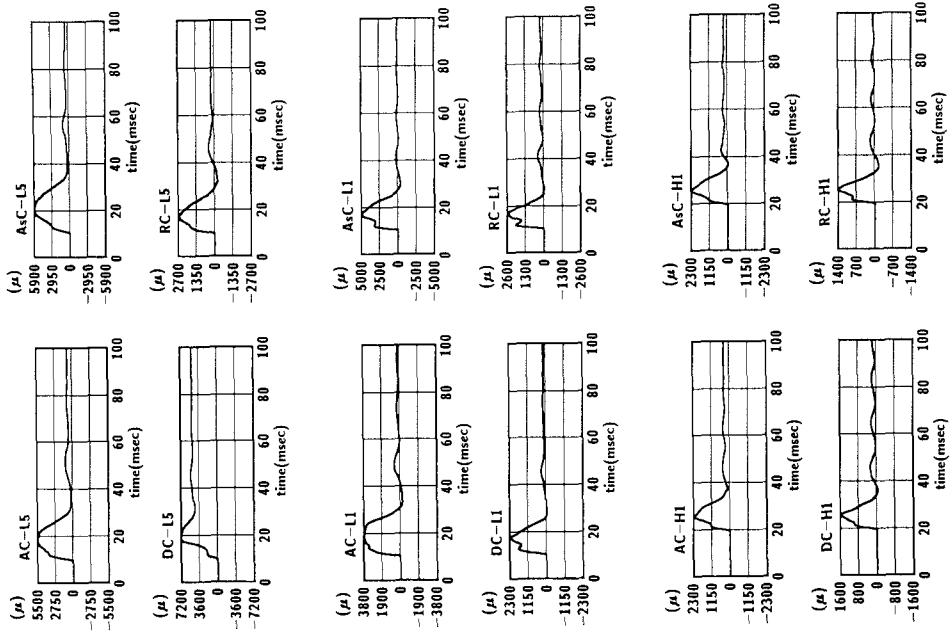
図-4 V=2m/sec における
各点の最大応答変位分布
(補強筋比 0.5%)

3.2. 補強筋の歪波形からみた応答特性

前述した変位分布の応答特性より、載荷点周辺における応答変位量に各スラブで顕著な差異が生じていることが判った。また、後述するように本実験でのスラブの破壊形式は重錘のスラブ表面への貫入破壊であったため、本節では載荷点直下の補強筋歪の応答特性を検討する。



図一5 V=1m/sec における測点1の歪波形
(ただし AsC-L5は測点2)



図一6 V=3m/sec における測点1の歪波形
(ただし AsC-L5は測点2)

図－5 に載荷速度が $V=1\text{m/sec}$ における測点 1 (AsC-L5のみ測点 2) の歪波形を 12 体のスラブについて示した。サンプリングタイムは全て 40msec であり、サンプリング間隔は $20\mu\text{sec}$ である。ここで AFRP ロッドと鉄筋を用いたスラブの歪波形を比較すると、AFRP を用いた場合は鉄筋を用いた場合よりも減衰の程度が大きいようである。また、荷重載荷時の主波動の継続時間は低強度コンクリートの場合には $p=1\%$ の方が 0.5% の場合より短い。その現象は AsC スラブの場合が顕著である。なお、残留歪は低強度コンクリートを用いたスラブでは AFRP ロッドの方が鉄筋に比べて大きい。低強度コンクリートで補強筋比が $p=0.5\%$ の AFRP ロッドを用いたスラブでは、鉄筋を用いたスラブと比べて歪波形の 1 波目と 2 波目の境界が明確でない。しかし、 $p=1\%$ では 4 体のスラブの歪波形の概観は極めて類似している。一方、コンクリート強度で比較すると、 $f'_c=461\text{kgf/cm}^2$ では 171kgf/cm^2 と異なり、AFRP も鉄筋もほぼ同程度に歪が残留していることが判る。なお、AC-H1 スラブの波形は他の 3 スラブと大きく異なり荷重除荷後急激に減衰し残留歪値に達している。

図－6 に載荷速度が $V=3\text{m/sec}$ における測点 1 (AsC-L5のみ測点 2) の歪波形を 12 体のスラブについて示した。サンプリングタイムは全て 100msec であり、サンプリング間隔は $50\mu\text{sec}$ である。-L5 で 4 体のスラブを比較すると $V=1\text{m/sec}$ と異なり、DC-L5 の歪の残留が顕著であり異形鉄筋が 3m/sec 載荷で降伏したことを示している。 $V=3\text{m/sec}$ と 1m/sec で歪の継続時間を比較すると 3m/sec 載荷の方が約 2 倍長くなっている。次に -L1 で 4 体を比較すると RC-L1 は減衰自由振動を示しているのに対して、AsC-L1 は減衰が大きく、ほとんど自由振動を示していないことが判る。歪の継続時間を $V=3\text{m/sec}$ と 1m/sec で比較すると、 $p=0.5\%$ とは異なり、両者はほぼ同様である。一方、-H1 で 4 体を比較すると、AFRP ロッドを用いた場合は除荷後急激に減衰しているが、鉄筋を用いた場合は減衰自由振動を示している。ただし、歪の主波動の概観や継続時間は 4 体のスラブでほぼ同様である。

以上の結果を要約すると、(1)剛性の高い補強筋を用いるとスラブは減衰自由振動を示す。この傾向は載荷速度が大きく、コンクリート強度が高い場合に顕著である。(2)剛性が低く、付着強度の高い補強筋を用いたスラブでは、補強筋比が大きくなるとより減衰が大きくなる。(3)歪の残留する傾向は低強度コンクリートでは AFRP ロッドを用いたスラブで顕著であるが、高強度コンクリートでは補強筋の剛性によらずほぼ同様である。(4)補強筋比が低い場合は、いずれの剛性の補強筋でも載荷速度が大きくなるとともに歪の継続時間が大きく異なる。

4. 衝撃破壊特性

4.1. RC スラブの衝撃破壊特性検討の指標

RC 構造物の衝撃破壊特性は RC がコンクリートと補強筋の複合構造物であることから、コンクリート、補強筋およびこれらが複合されたものとしての広範囲な視点から検討する必要がある。なお、本実験ではスラブの衝撃破壊をスラブ表面に押抜け部が形成され、目視で貫入が確認された状況と定義した。

本文では以下の実験量を衝撃破壊特性を検討する上での指標とした。(1)破壊時の載荷速度：載荷ルールを全く同様として各スラブの破壊時における載荷速度を比較することで、補強筋比やコンクリート強度（あるいはヤング係数）の与える影響を補強筋剛性および付着特性に関連づけて検討するため。(2)押抜け部貫入量：最大載荷速度での各スラブの損傷度合いを比較し、損傷度合いに与える補強筋比およびコンクリート強度の影響を比較検討するため。(3)破壊時の補強筋歪：スラブが衝撃破壊する際に補強筋の歪レベルが静的な状態での終局歪に対してどの程度であるかを把握し、適切な補強筋の種類や補強筋比などを検討するため。(4)ひびわれ性状：衝撃載荷によってスラブの表・裏面にはひびわれが発生する。これらのひびわれの発生状況を比較検討し、補強筋比およびコンクリート強度のひびわれ性状（衝撃応答特性ならびに衝撃破壊特性）に与える影響を検討するため。(5)最大衝撃力と載荷速度の関係：重錘加速度から求めた最大衝撃力と載荷速度の関係を理論値と比較し、この関係が補強筋の特性やコンクリート強度によってどの様に変化するかを検討するためである。以下、各々について検討を行う。

4.2. 載荷速度からみた衝撃破壊特性

図-7に破壊時の載荷速度と補強筋比の関係、図-8に載荷速度とコンクリート強度の関係を示す。図-7より、付着強度の高い補強筋（砂付き AFRP ロッド、異形鉄筋）を用いたスラブでは補強筋比が増加することで破壊時における載荷速度も増加することが判る。一方、付着強度の低い補強筋（砂なし AFRP ロッド、丸鋼）を用いたスラブでは補強筋比は破壊時における載荷速度の大きさに顕著な影響を与えていない。次に、図-8の補強筋比が $p=1\%$ の場合では、付着強度の高い補強筋を用いたスラブはコンクリート強度によらずほぼ一定の最大載荷速度を示している。しかし、付着強度の低い補強筋を用いたスラブではコンクリート強度が増加することで最大載荷速度も増加している。これは、付着強度の低い補強筋を用いた場合には破壊時における載荷速度は主としてコンクリート強度に支配される傾向が強く、他方、付着強度の高い補強筋を用いた場合には破壊時における載荷速度は補強筋比に支配される傾向が強いことを示すものと考えられる。このように、補強筋比やコンクリート強度がスラブの載荷速度の大きさからみた耐衝撃性に与える影響は、補強筋の剛性よりも補強筋の付着特性に密接に関連している。

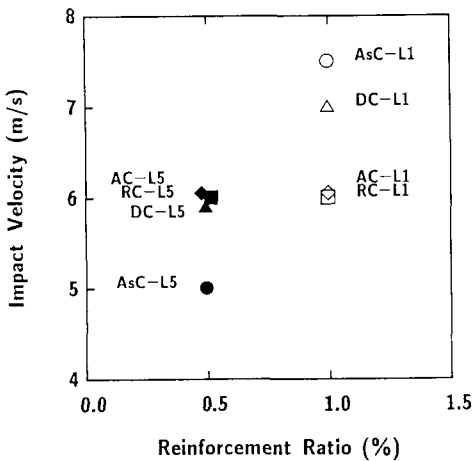


図-7 載荷速度と補強筋比の関係

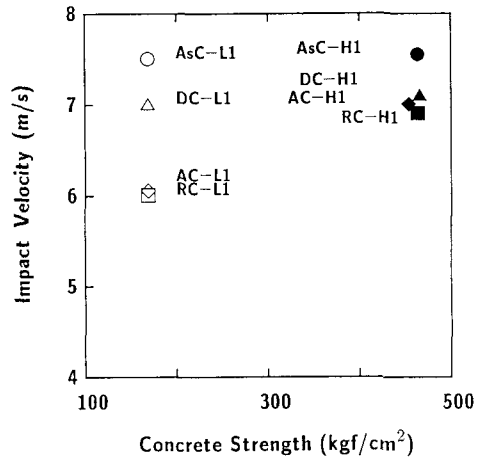


図-8 載荷速度とコンクリート強度の関係

4.3. 押抜け部貫入量からみた衝撃破壊特性

図-9に押抜け部貫入量と補強筋比の関係、図-10に貫入量とコンクリート強度の関係を示した。図-7より、付着強度の高い補強筋は補強筋比が増加することで最大載荷速度が増加することが判ったが、これに対応して図-9より、押抜け部貫入量も増加していることが判る。一方、付着強度の低い補強筋を用いた際の最大載荷速度は補強筋比によらずほぼ一定であったが、補強筋比が増加することで押抜け部貫入量は減少することが判る。 $p=1\%$ の時には、付着強度の高い補強筋はコンクリート強度によらずほぼ一定の最大載荷速度を示したが、図-10よりコンクリート強度が増加することで押抜け部貫入量は減少していることが判る。一方、付着強度が低い補強筋を用いたスラブではコンクリート強度の増加にともなって最大載荷速度が増加したが押抜け部貫入量もほぼ同様にあるいは増加している。このように、補強筋比やコンクリート強度の増加が最大載荷速度を増加させる場合は、押抜け部貫入量も大きくなるが、最大載荷速度が変わらない場合は押抜け部貫入量を減少させる。

図-11、12に最大載荷速度と押抜け部貫入量との関係を各々補強筋比とコンクリート強度に着目して示した。付着強度が低い補強筋で低コンクリート強度、低補強筋比の場合は破壊時の載荷速度が他と比べて小さいにも関わらず押抜け部貫入量が大きくなることが判る。また、 $p=1\%$ で付着強度が高い補強筋を用いた場合でも低コンクリート強度の場合はAsC-L1の様に大きな載荷速度まで耐えられるものの破壊時の損傷が大きくなることが判る。以上から、

破壊時の損傷を小さくしかつ大きな載荷速度まで耐えられる RC スラブを構築するためには、高強度のコンクリートを用いることが最も効果的であることが判る。

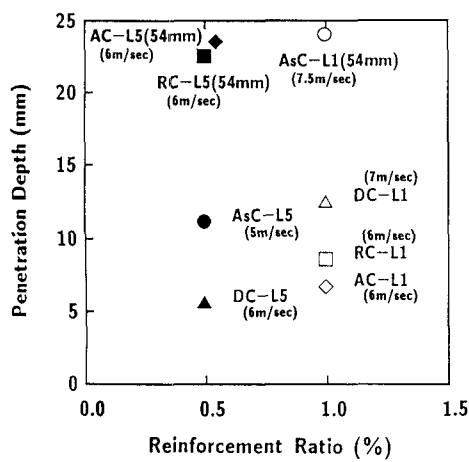


図- 9 貫入量と補強筋比の関係

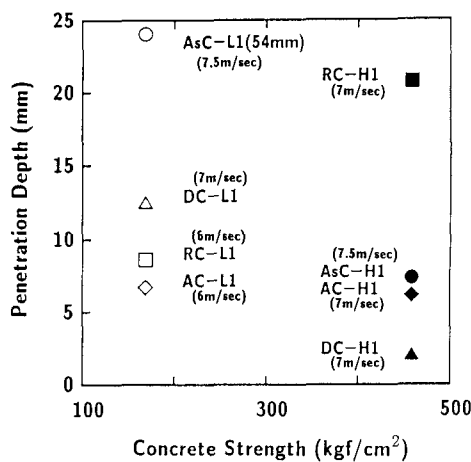


図- 1 0 貫入量とコンクリート強度との関係

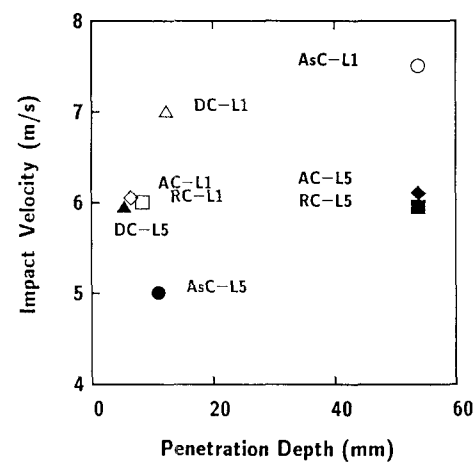


図- 1 1 載荷速度と貫入量の関係
(補強筋比)

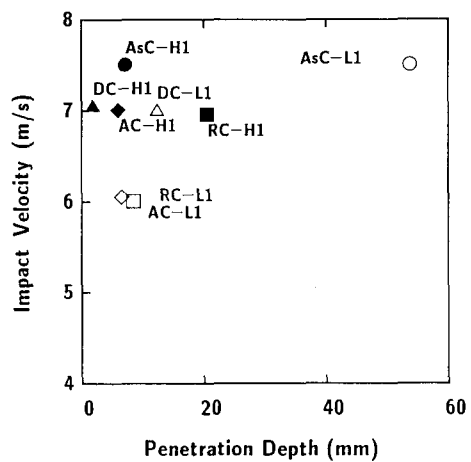


図- 1 2 載荷速度と貫入量の関係
(コンクリート強度)

4.4. 補強筋歪からみた衝撃破壊特性

図- 1 3 にスラブ破壊時あるいは破壊直前での載荷速度における補強筋の歪を測点 1 または 2 について、それ以前の載荷速度で発生した残留歪も全て加算してコンクリート強度ごとに比較した。これから、AFRP ロッドで補強したスラブの最大歪はコンクリート強度によらずほぼ 10000 μ 程度であることが判る。一方、鉄筋を用いたスラブではコンクリート強度が大きいほど最大歪も大きくなり、 $f'_c=171\text{kgf/cm}^2$ コンクリートで 3000~5000 μ が $f'_c=461\text{kgf/cm}^2$ コンクリートでは 8000 μ 以上であり、ともに鉄筋は完全に降伏していることが判る。図- 1 4 に低強度

コンクリートを用いたスラブの補強筋比と測点 2 の終局付近の載荷速度における最大歪の関係を示した。これによると、鉄筋を用いたスラブでは補強筋比に関わらずほぼ 3000~4000 μ 程度である。一方、AFRP ロッドで補強したスラブでは高補強比ほど最大歪が大きくなり、この傾向は特に砂付きの AFRP ロッドで補強したスラブで顕著である。これは、砂付きのロッドで補強したスラブでは補強筋比によって最大載荷速度も大きくなり、ロッドが未だ弾性伸び範囲にあるため最大歪も大きくなったものと考えられる。

このように、補強筋の最大歪に与える補強筋比とコンクリート強度の影響は、低剛性の補強筋を用いた場合は補強筋比の方が、高剛性の補強筋を用いた場合はコンクリート強度の方が支配的であることが判る。これは低剛性かつ弾性伸び率の大きい補強筋を用いたスラブでは、主としてスラブのたわみ性で衝撃力に抵抗し、そのたわみ性が補強筋比によって変化するためと考えられる。一方、高剛性かつ弾性伸び率の小さい補強筋を用いたスラブでは、補強筋比が 1% 程度では降伏してしまい、補強筋がそれ以上の応力を負担できない。反面、コンクリートの衝撃に抵抗する寄与度が増加するため、コンクリート強度（あるいはヤング係数）の影響が支配的になると考えられる。

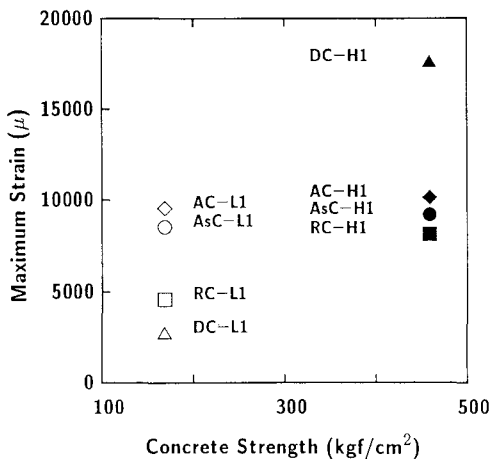


図-1 3 補強筋歪とコンクリート強度の関係

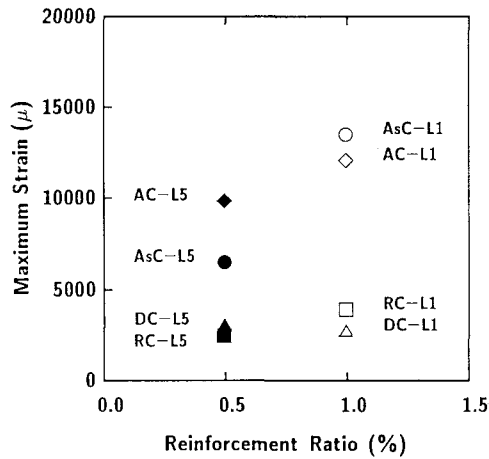


図-1 4 補強筋歪と補強筋比の関係

4.5. ひびわれからみた衝撃破壊特性

4.5.1. スラブ裏面のひびわれ性状

図-1 5 にスラブ裏面のひびわれ性状を示した。各補強筋の剛性および付着特性がひびわれ性状に与える影響は文献(8)に詳述されているので、ここでは主として補強筋比とコンクリート強度の影響を検討する。先ず補強筋比の影響を検討すると、全スラブで補強筋比の高いものほど放射状のひびわれが密に多数発生することが判る。特に付着強度の低い補強筋を用いた場合にこの傾向は顕著である。また、低強度コンクリートを用いた場合、裏面剝離部分の外側の円周状のひびわれは砂付きの AFRP ロッドを用いたスラブにのみ発生しているが、これも補強筋比が高いほど密に発生している。

コンクリート強度でひびわれ性状を比較すると、全スラブとも高強度コンクリートを用いた方が放射状のひびわれが密に多数発生していることが判る。一方、円周状のひびわれは低強度コンクリートでは砂付きの AFRP ロッドを用いた場合にのみ発生していたが高強度コンクリートを用いた場合は丸鋼および砂なしの AFRP ロッドを用いた場合にも発生している。このように補強筋比やコンクリート強度はスラブ裏面のひびわれ性状に大きな影響を与えている。さらに、これらの影響度合いは補強筋の剛性や付着特性に関連して変化することが判る。

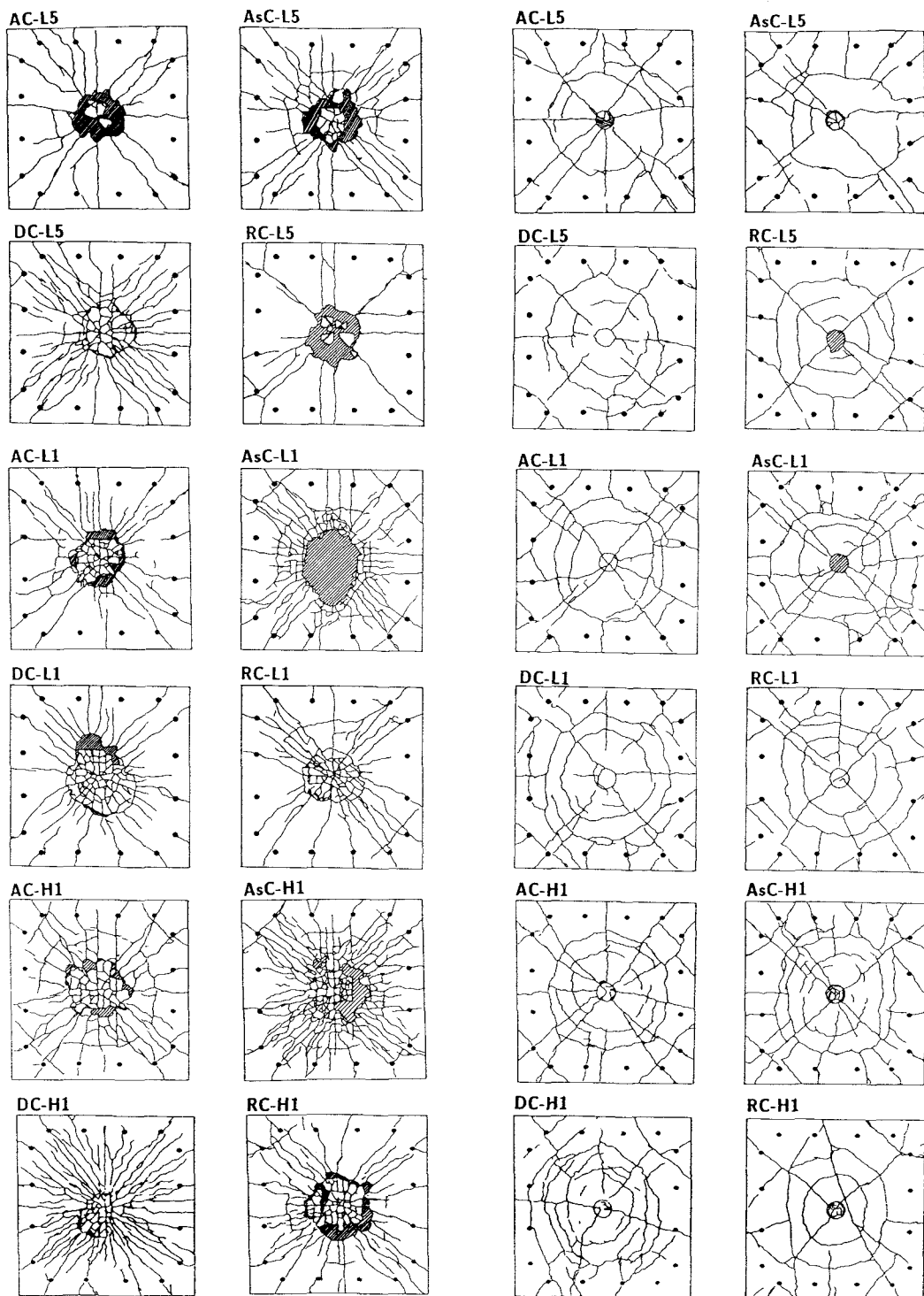


図-15 スラブ裏面のひびわれ性状

図-16 スラブ表面のひびわれ性状

4.5.2. スラブ表面のひびわれ性状

図－1 6 にスラブ表面のひびわれ性状を示した。スラブ裏面のひびわれと同様、補強筋の剛性や付着特性の影響は文献(8)に詳述されているので、ここでは補強筋比とコンクリート強度で比較する。補強筋比で比較すると 4 体のスラブともに放射状と円周状のひびわれは補強筋比の高いものほど密に多数発生していることが判る。特に円周状のひびわれは補強筋比が高くなるほど密にかつスラブ表面に広範囲に発生することが判る。

一方、コンクリート強度で比較すると、コンクリート強度が高い場合は放射状のひびわれよりも円周状のひびわれが特に密に多数発生することが判り、この傾向は補強筋比の場合よりも顕著である。このようにスラブ表面のひびわれは補強筋比とコンクリート強度の増加が円周状のひびわれを分散させている点で特徴的である。なお、スラブ表面のひびわれは裏面のひびわれと異なり、補強筋比やコンクリート強度と剛性および付着特性の関連が顕著に現れていない。これは、実験に用いたスラブの補強筋の配置が単筋配置であることに関連するものと思われる。

4.6. 最大衝撃力と載荷速度の関係からみた衝撃破壊特性

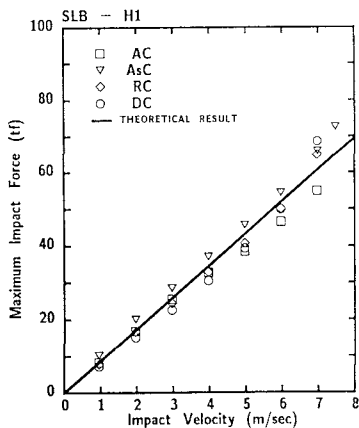
図－1 7 に高強度コンクリートで $p=1\%$ のスラブの最大衝撃力と載荷速度の関係を示した。この図で、直線は文献(10)を参考に弾性接触論に基づいて誘導した下記理論式を用いて算出した計算値である。コンクリートのヤング係数、ポアソン比をそれぞれ E 、 ν 、重錘の半径、質量、載荷速度を a 、 M 、 V 、平板の質量、厚さを ρ 、 h とすれば、衝撃力 P は、

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

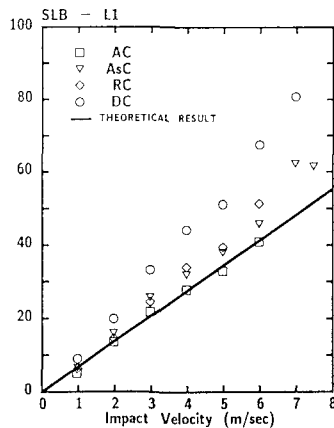
ここで

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

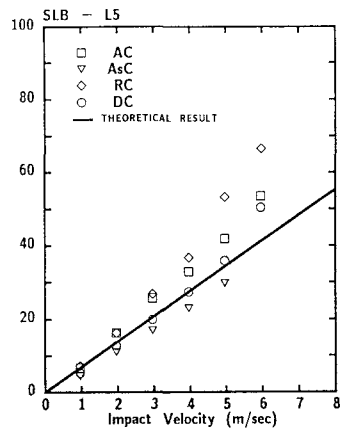
である。なお、本理論式では補強筋の特性や配置方法を評価することはできないが、低、高強度コンクリートの特性は、各々表－2 に示すヤング係数および単位重量を用いて評価した。また、実験値は重錘の最大加速度に重錘重量を



図－1 7 衝撃力と載荷速度
(高強度, $p=1\%$)



図－1 8 衝撃力と載荷速度
(低強度, $p=1\%$)



図－1 9 衝撃力と載荷速度
(低強度, $p=0.5\%$)

乗じて求めた。この図から明らかな様に、計算値と実験値は極めて良く合致し、補強筋の種類が最大衝撃力と載荷速度の関係に大きな影響は与えていないことが判る。

図-18に低強度コンクリートで $p=1\%$ における両者の関係を示した。計算値は概ね実験値の下限値を与えているが、載荷速度が大きくなるに従い計算値と実験値の差は大きくなっている。特に異形鉄筋を用いた場合には、最大衝撃力が理論値に比べてかなり大きくなる傾向にあることが判る。

一方、図-19に $p=0.5\%$ における両者の関係を示した。計算値は概ね実験値の下限値を与えている様であるが、 $p=1\%$ と同様に載荷速度が大きくなると最大衝撃力が大きくなる傾向を示している。また、この傾向は付着強度の低い丸鋼および砂なしの AFRP ロッドを用いた場合に顕著であることが判る。また、 $p=1\%$ でコンクリート強度の影響を比較すると、DC の場合を除いて理論計算結果と同様に高強度（高ヤング係数）コンクリートの方が最大衝撃力は大きくなっている。

以上の結果を要約すると、(1)補強筋の剛性や補強筋の付着特性が最大衝撃力と載荷速度の関係に影響を与えるのは低コンクリート強度の場合である。(2)補強筋比が大きい場合は高剛性で高付着強度の補強筋を用いると 3.1 で述べた様に変位量が小さくなり、最大衝撃力は大きくなる。(3)補強筋比が小さい場合は低付着強度の補強筋を用いると 3.1 で述べた様に変位量は小さくなり、最大衝撃力は大きくなると考えられる。

5. まとめ

RC スラブの補強筋の剛性や付着特性並びにコンクリート強度（ヤング係数）と補強筋比がスラブの耐衝撃挙動に与える影響を重錘の自由落下衝撃試験によって実験的に検討した。本実験で得られた結果を以下に要約すると、

- (1) 低強度コンクリートを用いたスラブの応答変位量の大小は補強筋の付着特性に影響されるが、補強筋比の大小によってその影響の仕方は全く異なる。
- (2) 最大衝撃力の大きさは、補強筋の付着特性と補強筋比に大きく影響され、これは変位応答特性と密接に関連している。
- (3) 剛性の高い補強筋を用いたスラブは減衰自由振動しやすく、この傾向はコンクリート強度が高いと顕著である。
- (4) 歪の継続時間は補強筋比に影響され補強筋比が大きいとより短くなるが、剛性が低く付着強度の高い補強筋を用いたスラブでこの傾向が顕著である。
- (5) 補強筋の最大歪に与える補強筋比とコンクリート強度の影響は、低剛性の補強筋を用いた場合は補強筋比、高剛性の補強筋を用いた場合はコンクリート強度が支配的である。
- (6) 破壊時の載荷速度からみた耐衝撃性は、付着強度の低い補強筋を用いた場合は主としてコンクリート強度に支配され、付着強度の高い補強筋を用いた場合は補強筋比が支配的である。
- (7) 破壊時の損傷を小さくし、かつ大きな載荷速度に耐え得る RC スラブを製作するには、高強度のコンクリートを用いることが最も効果的である。
- (8) 補強筋比とコンクリート強度は共にスラブ表裏面のひびわれ性状に影響を与え、高補強筋比、高強度では放射状及び円周状のひびわれがいっそう密に多数分散して発生する。
- (9) 補強筋の剛性や補強筋比と付着特性が最大衝撃力と載荷速度の関係に与える影響はコンクリート強度が低い場合に顕著である。

最後に本研究を行うにあたり、室蘭工業大学建設システム工学科大学院生の松岡篤君に多大なるご支援を戴きました。ここに深大なる謝意を表するものであります。

参考文献

- 1) 三上、加藤、田村、能町：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, pp. 1191-1202, 1990. 3.
- 2) 三上、武富、石橋、能町：組紐状 AFRP ロッドで補強したコンクリートはりの疲労特性に関する実験的研究，土木学会論文集，第 427 号/ VI-14, pp. 85-94, 1991. 3.
- 3) 辻、石田、橋本、丸岡：FRP 緊張材を用いた PC はりの曲げ耐力および破壊形式，コンクリート工学年次論文報告集，第 14 巻，第 2 号，pp. 673-678, 1992.
- 4) 宮本、King、石橋、三戸：連続繊維補強筋を用いた RC 版の衝撃破壊挙動解析と耐衝撃性評価，コンクリート工学年次論文報告集，第 14 巻，第 2 号，pp. 643-648, 1992.
- 5) 三上、岸、松岡、能町：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，構造工学論文集， vol. 37A, pp. 1591-1602, 1991.3.
- 6) Mikami, H. , Kishi, N. , Matsuoka, K. G. and Nomachi, S. G. : Dynamic Behavior of Concrete Slabs Reinforced by Braided AFRP Rods under Impact Loads, SMiRT 11, Transactions, vol. J03/2, pp. 45-50, 1991.8.
- 7) 岸、中野、三上、松岡：組紐状 AFRP ロッドで補強した RC スラブを用いた大型緩衝構造の衝撃吸収性能，コンクリート工学年次論文報告集，第 14 巻，第 2 号，pp. 655-660, 1992.
- 8) 三上、加藤、田村、岸：組紐状 AFRP ロッドで補強した RC スラブの耐衝撃性に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，第 14 巻，第 2 号，pp. 661-666, 1992.
- 9) 三上 浩：組紐状 FRP ロッドのコンクリート補強材への適用に関する研究，日本大学学位論文，1992.
- 10) 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.

(1992年9月21日受付)