

重錘落下衝撃を受ける単鉄筋RC床板の耐衝撃挙動 に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON IMPACT BEHAVIOR OF SIMPLY SUPPORTED AND SINGLY REINFORCED RC SLAB UNDER IMPACT LOADING

三上敬司* 三上 浩** 松岡健一*** 能町純雄****

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

This paper discussed the dynamic behavior of Reinforced Concrete(RC) slabs under impact loading. The reinforcements considered in this study are round steel bar and deformed steel bar. RC slabs are prepared based on the following specifications: 150cm × 150cm × 7cm in dimensions, and single reinforcement. To consider the influences of concrete strength and reinforcement ratio on impact resistance of RC slab, four types of RC slabs having two kind of concrete strength (lower and higher strength) and reinforcement ratios (0.5% and 1%) are chosen. The heavy weight with 100kgf weight was dropped to the center of slab with the maximum velocity 7m/sec.

Based on the experimental results, the influences of each parameter on the impact behaviors of RC slab are shown in further detail. These parameters are the concrete strength, bonding action of reinforcements and reinforcement ratios.

Key Words: singly reinforced RC slab, dynamic behavior, impact velocity

1. まえがき

我国の土木工学分野における衝撃問題に関する研究において、鉄筋コンクリート(RC)床板に関しては、床板の間にゴムやウレタンを緩衝材として用いたサンドイッチ RC 床板や鋼板を補強材として用いた合成 RC 床板に対して、高速衝撃荷重を作用させた場合の耐衝撃挙動に関する大野等の研究^{1),2)}、大沼と伊藤等による中速度または高速度衝撃荷重を受ける RC 床板の耐衝撃性に関する研究^{3),4)}、RC 床板が静的荷重または低速度衝撃荷重を受けた場合の静のおよび衝撃吸収エネルギーの定量化に関する内田等の研究⁵⁾ などがある。

著者らも、これまでコンクリート部材の耐衝撃性を検討するために、RC 床板およびプレストレストコンクリート(PC)床板や AFRP ロッドを補強筋とするコンクリート床板等の衝撃実験を行ってきた^{6)~8)}。これらの研究成果により衝撃的外力を受ける RC 床板に関しては、衝撃初期における波動伝播や振動の励起によって交番応力が発生することにより複鉄筋断面とすることの意義が認められている。しかしながら、静的外力を受ける RC 部材は、単鉄筋断面として設計することが一般的であることより、単鉄筋断面部材の耐衝撃特性を明らかにすることも重要であるものと考えられる。田村と三上等は、主に AFRP ロッドで補強した単鉄筋 RC 床板の弾性から塑性領域までの耐衝撃挙動に関する実験的研究を行っている⁹⁾。

本研究では、丸鋼および異形鉄筋で補強された単鉄筋 RC 床板について、床板の衝撃挙動に及ぼす鉄筋とコンクリ

* 工修 専修大学北海道短期大学助教授 土木科 (〒079-01 美瑛市光珠内町)

** 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)

*** 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 北海道大学名誉教授

ートの付着特性、鉄筋比、コンクリート強度の影響を検討することを目的として、重錘落下方式による衝撃実験を行い、実験より得られる床板の変位、鉄筋歪、ひび割れ性状などについて検討を行った。

2. 衝撃実験概要

衝撃実験は、室蘭工業大学に設置されている落錘衝撃実験装置を用いて行った。衝撃荷重は円柱状鋼製重錘（ $\phi=15\text{ cm}$ 、 $W=100\text{ kgf}$ ）を所定の高さにセットし、試験体中央に自由落下させることによって発生させている。重錘の底部形状は、片当たりを防止するために高さ2mmの球底としている。また、単純支持の境界条件にできるだけ近づけるために床板の支持辺を上下から鋼製ローラーを介してボルト締めしている。

本研究では単鉄筋 RC 床板の弾塑性状態から破壊に至るまでの過程を検討することを目的としているため、現有の衝撃実験装置で RC 床板を破壊させることが可能のように実験に用いた試験体の形状寸法を $150\text{ cm} \times 150\text{ cm} \times 7\text{ cm}$ 、主鉄筋のかぶりを 1 cm とした。

補強筋として用いた鉄筋には、同一呼び径で付着強度の異なる丸鋼および異形鉄筋の2種類を用いた。鉄筋比は、その大小が床板の衝撃挙動に与える影響を検討するために $p=0.5\%$ 、 1% の2種類を採用した。

図-1 にコンクリート床板の配筋図、歪ゲージおよび変位計設置位置を示す。配筋図の左、右は、鉄筋比がそれぞれ $p=0.5\%$ 、 1% の場合であり、鉄筋間隔がそれぞれ 10 cm 、 5 cm 間隔となっている。本実験に用いた鉄筋の静的引張試験結果を表-1 に示している。表より、各鉄筋の降伏点応力は、丸鋼で $f_y=50.6\text{ kgf/mm}^2$ 、異形鉄筋で $f_y=40.6\text{ kgf/mm}^2$ である。対応する降伏点歪は、それぞれ約 $\epsilon_{ys}=2400$ 、 $1970\text{ }\mu$ となっている。

また、試験体に用いたコンクリートは、目標強度 500 kgf/cm^2 の高強度コンクリートと目標強度 180 kgf/cm^2 の低強度コンクリートの2種類とした。各コンクリートは、粗骨材の最大寸法が 15 mm のレディーミクストコンクリートを用い、高強度の場合は W/C が 38.0% 、単位セメント量が 423 kg であり、低強度の場合は、 W/C が 62.0% 、単位セメント量が 210 kg である。表-2 には、材令28日におけるコンクリートの力学特性を示している。ただし、試験時の材令は、高強度コンクリートで $35 \sim 37$ 日、低強度コンクリートで $49 \sim 54$ 日であった。

試験体一覧を表-3 に示す。各試験体名を簡略化して示すために、補強筋として用いている丸鋼および異形鉄筋の略称を用いてそれぞれ RC、DC とする。また、コンクリート強度に関しては高強度、低強度を H、L、鉄筋比 $p=1\%$ 、 0.5% をそれぞれ 1、5 と記号化して用いることとする。

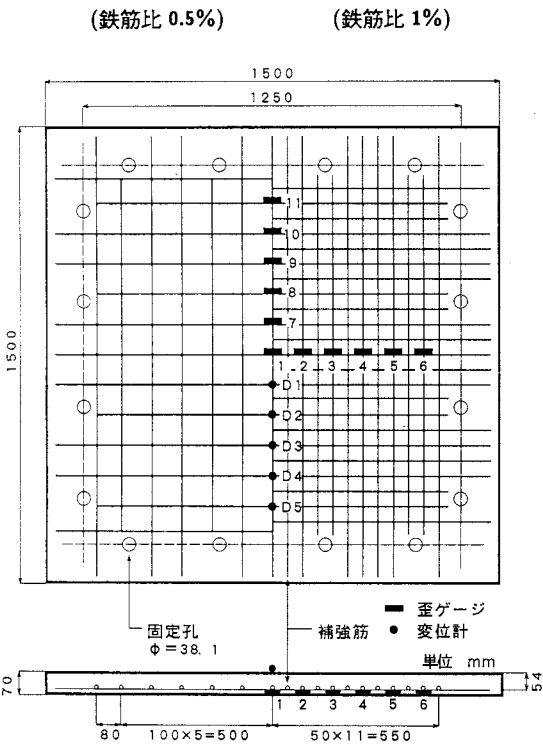


図-1 配筋図、歪ゲージおよび変位計位置

表-1 鉄筋の静的引張試験結果

鉄筋の種類	丸鋼 SR295	異形鉄筋 SD295A
(公称)直径 (mm)	6.00	6.35
(公称)断面積 (mm ²)	28.27	31.67
密度 (g/cm ³)	7.85	7.85
引張荷重 (tf)	1.57	1.67
降伏荷重 (tf)	1.43	1.29
弾性係数 ($\times 10^6\text{ kgf/cm}^2$)	2.10	2.06

なお、本実験は供試体を有効に利用するために衝撃荷重を同一床板に繰り返し載荷している。実験は、床板に対する重錘の貫入や裏面剝離が生じるまで衝突速度を 1m/sec ずつ増加させて行うこととした。各試験体は表-3 に示しているように衝突速度が 6~7m/sec で破壊状態となっている。

本実験では、重錘の加速度、床板の鉄筋歪および変位応答を測定するために、測定用センサーとして歪ゲージ型加速度計、歪ゲージと渦電流型変位計を用いている。測定方法等の詳細については文献 6) と同様であるので本論文では省略する。

3. 実験結果および考察

3.1. 変位および鉄筋歪の応答特性

本研究では、衝撃載荷時の RC 床板の弾性領域から弾塑性領域における変位および鉄筋歪の応答特性に及ぼすコンクリート強度、鉄筋とコンクリートの付着特性、鉄筋比の影響について検討を行うこととする。なお、本研究では、鉄筋の歪速度効果を考慮した鉄筋の応答歪と降伏の関係についても言及している。

3.1.1. 変位応答分布

図-2 には衝突速度 $V=2\text{ m/sec}$ の場合における RC 床板の最大応答変位のスパン方向分布を示している。(a)図は低強度コンクリートの場合である。いずれの床板も載荷点に一番近い測点 (D1) で最大変位量を示している。丸鋼 (RC-L5, RC-L1) を用いる場合には、両者ともほぼ等しい分布形状を示しており、鉄筋比の影響はあまり現れていない。一方、異形鉄筋の場合 (DC-L5, DC-L1) は、鉄筋比の小さい場合 (DC-L5) が大きい場合 (DC-L1) に比較して載荷点から測点 D1~D3 の範囲で約 0.7~0.5 mm 程度大きな変位量を示している。これより、異形鉄筋を用いた RC

表-2 コンクリートの力学特性

強度の種類	単位重量 (tf/m^3)	圧縮強度 (kgf/cm^2)	弾性係数 (kgf/cm^2)	ポアソン比
低強度コンクリート	2.127	171	1.82×10^5	0.230
高強度コンクリート	2.314	461	2.71×10^5	0.195

表-3 試験体一覧

試験体名	鉄筋の種類	鉄筋比 (%)	衝突速度 $V(\text{m/sec})$
RC-L5	丸鋼 (R6)	0.5	1~6
DC-L5	異形鉄筋 (D6)	0.5	1~6
RC-L1	丸鋼 (R6)	1.0	1~6
DC-L1	異形鉄筋 (D6)	1.0	1~7
RC-H5	丸鋼 (R6)	0.5	1~6
DC-H5	異形鉄筋 (D6)	0.5	1~7
RC-H1	丸鋼 (R6)	1.0	1~7
DC-H1	異形鉄筋 (D6)	1.0	1~7

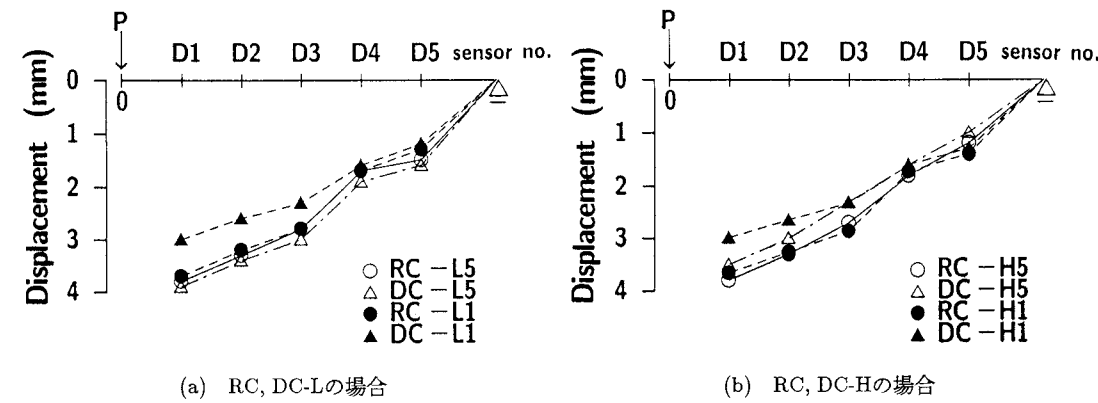


図-2 $V=2\text{ m/sec}$ における変位応答分布

床板は載荷点近傍で鉄筋比の影響を顕著に受けていることがわかる。

(b)図は高強度コンクリートの場合の変位応答である。丸鋼の場合 (RC-H5, RC-H1) は、(a)図の場合と同様に鉄筋比の影響を受けず各測点においてほぼ等しい変位分布を示している。丸鋼の場合は異形鉄筋の場合より大きな変位分布を示している。異形鉄筋の場合のみで比較すると、載荷点近傍でDC-H1はDC-H5より小さい応答値を示していることがわかる。コンクリート強度で比較すると、異形鉄筋で鉄筋比が小さい場合 (DC-L5, DC-H5) の載荷点近傍における変位量は、高強度コンクリートの場合が低強度コンクリートの場合に比較して約 0.3 ～ 0.5 mm 程度小さい値を示している。

これより、衝突速度が $V=2\text{ m/sec}$ で異形鉄筋を用いた床板では、鉄筋比が大きい場合はコンクリート強度による影響が小さいが、鉄筋比が小さい場合はコンクリート強度による影響が現われ応答変位が異なってくる。また、コンクリート強度が同じ場合には、鉄筋比は応答変位に対して大きな影響を与えていることがわかった。これに対し $V=2\text{ m/sec}$ で丸鋼を用いる場合には、コンクリート強度および鉄筋比が変位分布に与える影響は小さいようである。

3.1.2. スパン方向の最大鉄筋歪分布

図-3には衝突速度 $V=2\text{ m/sec}$ の場合における鉄筋の最大応答歪のスパン方向分布を示している。(a)図は低強度コンクリートの場合である。その歪分布は、いずれの場合も載荷点直下で最大応答値を示し、測点2では載荷点直下の応答値の $1/2.5$ 程度に急激に減少した後支点に向かって徐々に減少している。4 ケースについて比較すると、載荷点近傍ではDC-L5が最大歪を、RC-L1が最小歪を示している。その差は、約 380μ である。RC-L5とDC-L1は、いずれも約 1500μ とほぼ等しい応答値を示している。載荷点周辺部から支承部にかけての歪分布性状について考察すると、変位応答分布の場合と異なり鉄筋比が小さい場合 (L5) は鉄筋比が大きい場合と比較して載荷点周辺部の歪値が大きく、さらに支点部付近では丸鋼の方が異形鉄筋より大きな歪分布となっている。これより、鉄筋比が小さい場合は載荷点周辺の歪値も大きく、1次振動モードに酷似した曲げ変形と載荷部の局所的な変形が重ね合わされた挙動を示す傾向にあるものと考えられる。これに対し鉄筋比が大きい場合には剛性が大きいことより載荷点の局所的な応答が卓越する傾向にあるものと考えられる。補強筋の違いによる影響は鉄筋比の差ほど顕著には示されていないが、支点付近では丸鋼を用いる場合の方が歪が大きく付着特性の差が現れている。

(b)図は、高強度コンクリートの場合の結果である。載荷点直下の歪応答値は、(a)図の場合とほぼ等しく約 1200μ 以上となり、測点2では、(a)図と同様に急激に減少している。また、測点4、5、6では、(a)図の4 ケースに比してそれぞれ小さな応答値を示しているようである。(a)図と同様に床板の応答歪特性に対する鉄筋比および補強筋の種類の効果を検討すると、載荷点周辺部における歪分布に関しては、同じ補強筋を用いる場合がお互い類似の分布性状を示している。丸鋼では測点6でほぼ零歪値となっているのに対し異形鉄筋では測点5以後より零歪の分布となっている。

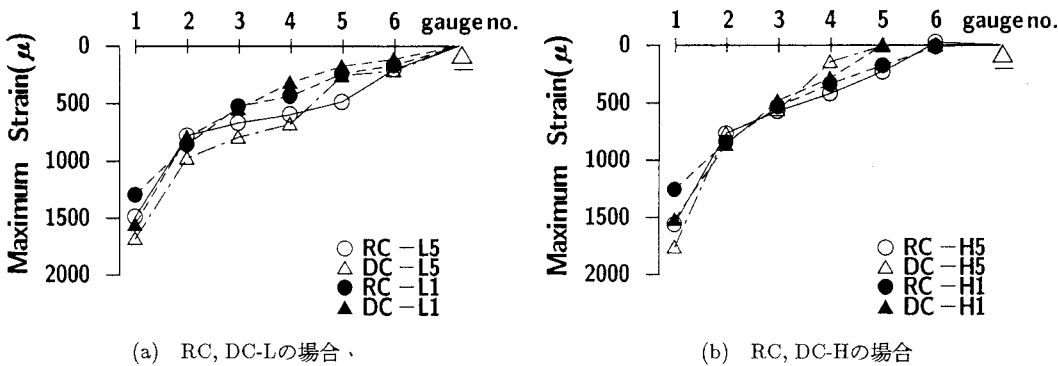


図-3 $V=2\text{ m/sec}$ におけるスパン方向の最大鉄筋歪分布

おり、後者は前者に比較して拘束の程度が大きいためである。従って、(a)図のような鉄筋比の違いによる効果は示されていない。

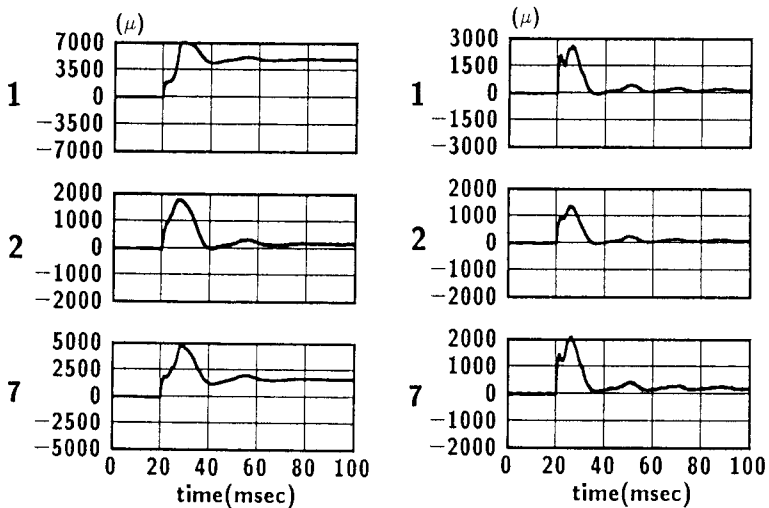
これより、高強度コンクリートを用いる場合には、鉄筋比よりも補強筋とコンクリート間の付着特性が床板の歪応答に大きな影響を与えているものと考えられる。また、(a)、(b)図を比較すると(a)図の場合は前述のように概ね第1次と3次振動の重ね合わせにおいて第1次振動が卓越したようなモードになっているのに対し、(b)図の場合は載荷点部より単調減少しており第3次振動が卓越したようなモード分布となっているようである。

3.1.3. 鉄筋歪の時刻歴応答波形

図-4には、異形鉄筋を用いた床板に対して衝突速度 $V=3\text{m/sec}$ における載荷点近傍(測点1, 2, 7)の鉄筋歪波形を示している。なお、全計測時間は100msecであり、波形分布図は、基準軸より上側が引張歪、下側が圧縮歪を示している。

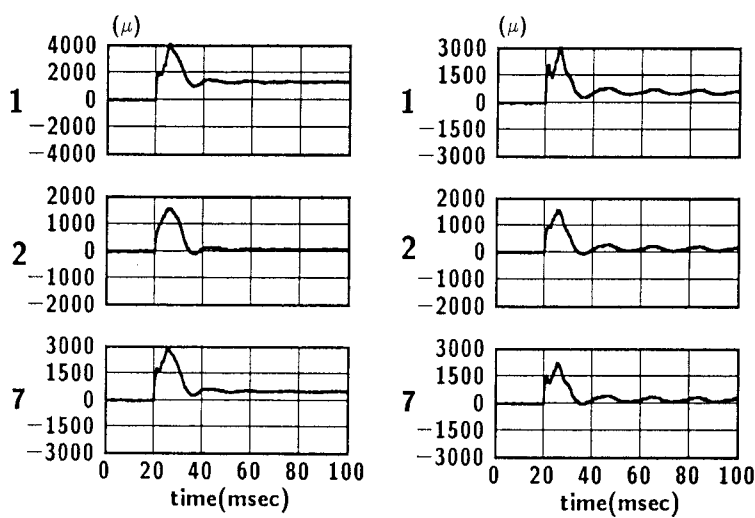
(a)図のDC-L5の歪応答波形をみると、最大応答値は荷重載荷点直下(測点1)に生じ、その値は約7100 μ である。測点2と測点7はお互いに直角方向の歪成分であるが、測点2は約1780 μ 、測点7は約4890 μ であり、軸方向歪成分(主曲げ方向)は軸直角方向成分の約1/2となっている。載荷点直下における歪波形は、最大歪に達した後1~2波程度の減衰自由振動を示し、残留歪値(約5000 μ)に収斂している。また、測点7も、載荷点における歪波形と同様に減衰自由振動を示しながら急激に減衰し、残留歪値(約2000 μ)に収斂している。測点2では未だ降伏点に達していないものの、測点1、7では最大歪が約7100、5000 μ で鉄筋の降伏点を越えていることより、荷重載荷点近傍の床板裏面にはひび割れが発生し剛性もかなり低下しているものと考えられる。

一方、(b)図のDC-L1の場合には、測点1、2、7で最大歪がそれぞれ約2600、1360、2100 μ となっている。測点7では、多少残留歪も発生しているが、その値も小さいことより、これらの点では鉄筋は降伏点に達してい



(a) DC-L5 の場合

(b) DC-L1 の場合



(c) DC-H5 の場合

(d) DC-H1 の場合

図-4 異形鉄筋を用いた場合の衝突速度 $V=3\text{m/sec}$ に対する鉄筋歪波形

ないものと考えられる。歪波形の主波動は最大値を示した後急激に減衰し、約 15 msec 経過した時点で減衰自由振動に移行している。(c)図は DC-H5 の場合である。測点 1、2、7 の最大歪値はそれぞれ約 4180、1600、3000 μ であり、測点 2 以外では鉄筋は降伏点を越えているものと考えられる。また、各歪波形は、(a)図の DC-L5 の場合と同様な傾向にあり、1～2 波程度の減衰自由振動を示して残留歪値に収斂しているが、歪の応答値はかなり小さくなっている。これより、荷重載荷点近傍の床板裏面では、ひび割れが発生して剛性も低下していることが推測される。(d)図は DC-H1 の場合であるが、測点 1、2、7 の最大応答値は、それぞれ約 3040、1580、2240 μ となっている。この場合は測点 1 のみの鉄筋が降伏点を越えているようである。また、歪波形は (b) 図の DC-L1 の場合と同様な傾向にあり、16.5 msec 経過後に減衰自由振動を示しながら残留歪に収斂している。このことより、DC-H1 は、DC-L1 とほぼ同様な挙動を示し、載荷点近傍ではひび割れ発生によって剛性が低下して塑性化が進行しているものの、床板全体としてはほぼ弾性的な状態を保ちながら振動しているものと考えられる。

以上より、異形鉄筋で補強した床板の歪波形は、低強度コンクリートの場合には鉄筋比の影響を大きく受けているようであるが、高強度コンクリートの場合には鉄筋比の影響は低強度コンクリートの場合と比較してそれ程大きく受けていないようである。特に、鉄筋比が大きい場合は小さい場合に比べて歪の応答値が載荷点部で 1000 ～ 4000 μ 程度小さくかつ除荷後も自由振動を示していることより、床板裏面では未だひび割れが著しく進行していない状態であるものと考えられる。

3.1.4. 最大鉄筋歪と衝突速度との関係

鉄筋の降伏状態を検討するために各実験ケースについて鉄筋の歪速度を考慮した降伏点歪を概算した。すなわちここでは、まず各実験ケースごとにそれぞれの鉄筋歪の応答波形記録から最大歪と最大歪に到達する時間より各鉄筋の歪速度を求めた。次に、この歪速度から文献 13) で定式化された次式を用い降伏点応力の算定を行った。

$$\begin{aligned} & d f_{y,u} / s f_{y,u} \\ & = 10^{a_1 \cdot \log \dot{\epsilon} + b_1 + c_1} \end{aligned}$$

ただし、上式に示した記号の $d f_{y,u}$ と $s f_{y,u}$ は、それぞれ高速

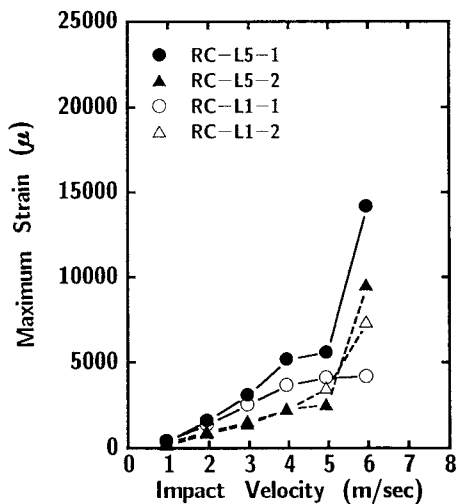
載荷および静的載荷による降伏点応力を、 $\dot{\epsilon}$ は歪速度を表している。なお、各係数の値は、 $a_1=0.380$ 、 $b_1=-0.258$ 、 $c_1=0.993$ である。この降伏点応力をもとに降伏点歪を求めた結果を表－4 に示す。全体の傾向としては衝突速度が大きくなるに従い降伏点歪も大きくなることが示されている。

図－5(a)～(d)は、各衝突速度に対する載荷点近傍(測点 1, 2)における鉄筋歪の最大応答値を鉄筋比、鉄筋の種類およびコンクリート強度ごとに示している。なお、歪の最大応答値には、その時点までの残留歪を加算して示している。図中の末尾番号は、図－1 の歪ゲージ位置を示している。

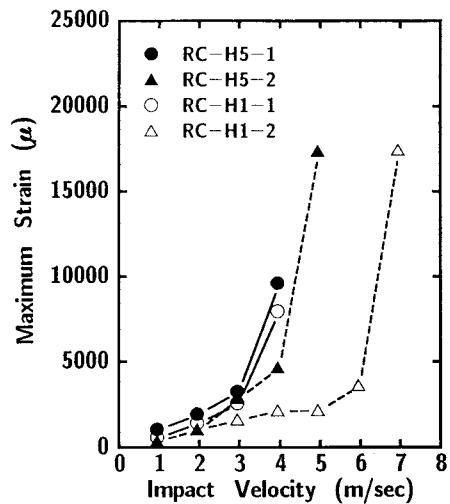
表－4 および図－5 をもとにして載荷点直下の鉄筋 (測点 1) が弾性状態を示す最大衝突速度を一覧にして示すと表－5 のようになる。降伏点歪に達する時の重錘の衝突速度が大きい場合は、小さい場合に比較して、着目点近傍の

表－4 測点 1、2 における各衝突速度ごとの歪速度および降伏点歪

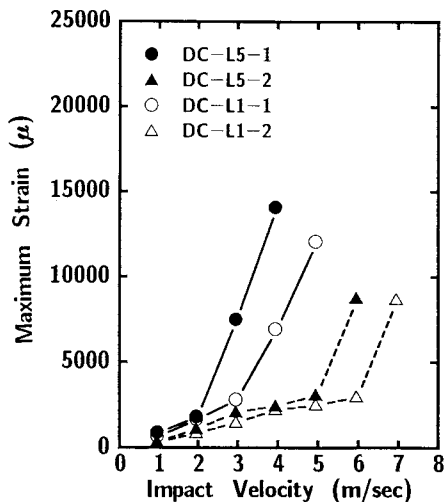
試験体名	測点 番号	V=3m/sec		V=4m/sec		V=5m/sec	
		歪速度 (1/sec)	降伏点 歪(μ)	歪速度 (1/sec)	降伏点 歪(μ)	歪速度 (1/sec)	降伏点 歪(μ)
RC-L5	1	0.42	3336	0.55	3432	0.59	3456
	2	0.19	3088	0.24	3144	0.27	3192
RC-L1	1	0.36	3282	0.48	3384	0.47	3384
	2	0.22	3129	0.29	3216	0.40	3312
RC-H5	1	0.53	3424	0.42	3336	-	-
	2	0.47	3378	0.20	3096	-	-
RC-H1	1	0.42	3336	0.99	3696	2.01	4104
	2	0.26	3168	0.26	3168	0.33	3264
DC-L5	1	0.85	2979	1.35	3172	-	-
	2	0.23	2581	0.23	2581	0.30	2640
DC-L1	1	0.40	2724	0.77	2935	1.02	3054
	2	0.21	2557	0.25	2600	0.21	2561
DC-H5	1	0.68	2896	1.42	3191	-	-
	2	0.28	2620	0.28	2620	0.37	2699
DC-H1	1	0.54	2817	1.15	3113	-	-
	2	0.29	2636	0.32	2650	-	-



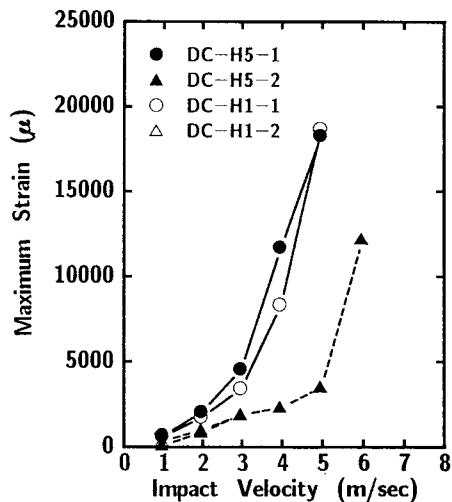
(a) RC-L1, 5 の場合



(b) RC-H1, 5 の場合



(c) DC-L1, 5 の場合



(d) DC-H1, 5 の場合

図-5 最大鉄筋歪と衝突速度との関係

変形曲率が小さいことあるいは曲げ剛性が大きいことを意味しているものと考えられる。表より、低強度コンクリートを用いる場合には、L1がL5よりも、また丸鋼を用いる場合が異形鉄筋を用いる場合よりも衝突速度が大きくなっている。これより、低強度コンクリートを用いる場合には鉄筋比に対応して曲げ剛性が発揮されており、また異形鉄筋を用いる場合が丸鋼を用いる場合よりも載荷点周辺部の拘束度が大きいものと考えられる。一方、高強度コンクリートを用いる場合には、鉄筋比による差が表れず、丸鋼を用いる場合が異形鉄筋を用いる場合よりも衝突速度が大きく示され

表-5 弾性状態を示す最大衝突速度一覧

	L	H
RC- 5	V=3m/sec	V=3m/sec
RC- 1	4	3
DC- 5	2	2
DC- 1	3	2

ている。

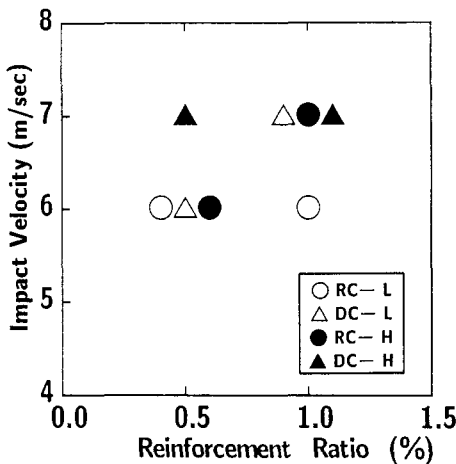
これより、高強度コンクリートを用いる場合には 3.1.2 でも述べたように、鉄筋比の効果よりも鉄筋とコンクリートとの付着特性が顕著に現れているものと考えられる。

3.2. 衝撃破壊状況

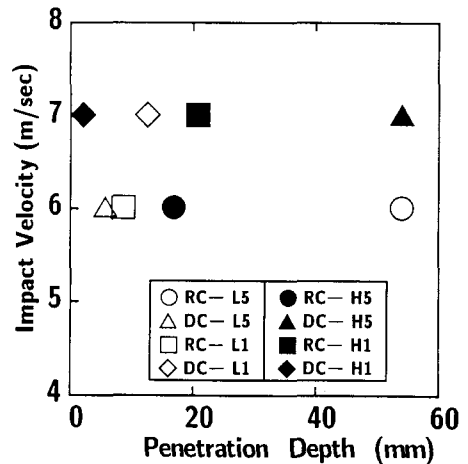
3.2.1. 破壊時の衝突速度と鉄筋比および貫入量との関係

図-6 には、それぞれ破壊時における衝突速度と鉄筋比および押し抜け部貫入量との関係を示している。低強度コンクリートで鉄筋比が小さくかつ付着性能が劣る RC-L5 では、破壊時の衝突速度が $V=6\text{m/sec}$ で貫入量も約 54mm となり、他の低強度コンクリートに比べて破壊時の損傷が非常に大きくなっている。また、低強度コンクリートで鉄筋比が大きいかつ付着性能が良い DC-L1 は、破壊時の衝突速度が $V=7\text{m/sec}$ と他の低強度コンクリートの場合に比べて大きく、かつ貫入量もそれ程大きくないことがわかる。一方、RC-H5 は破壊時の衝突速度が $V=6\text{m/sec}$ で貫入量が約 20mm、DC-H5 は破壊時の衝突速度が $V=7\text{m/sec}$ で、貫入量が約 54mm となっており、高強度コンクリートを用いる場合ではいずれの場合も破壊時の衝突速度が大きくなることより破壊時の損傷も大きくなっている。しかしながら高強度コンクリートで、付着性能が良くかつ鉄筋比が大きい DC-H1 は、破壊時の衝突速度が $V=7\text{m/sec}$ で貫入量が極く僅かとなり、他の床板に比べて破壊時の損傷がかなり小さいことがわかる。

以上のことから、破壊時の衝突速度と貫入量を総合的に考察すると、高強度コンクリートを用い鉄筋比が大きく付着性能に優れている補強筋を用いた床板は耐衝撃性により優れていることがわかる。



(a) 衝突速度と鉄筋比



(b) 衝突速度と貫入量

図-6 破壊時における衝突速度と鉄筋比および貫入量との関係

3.2.2. ひび割れ性状

図-7 は、DC-L5、-L1、-H5、-H1 の床板表面および床板裏面のひび割れ状況を示したものである。床板表面のひび割れ状況は各衝突速度ごとに観察が可能であるため、各衝突速度ごとに示しているが、裏面ひび割れは最終破壊後しか観察ができないので破壊後におけるひび割れ状況のみを示した。低強度コンクリートの場合、DC-L5では衝突速度 $V=3\text{m/sec}$ で周辺部分の表面にひび割れが発生しおり、DC-L1でも極く僅かではあるが周辺部分の表面にひび割れが発生している。さらに、 $V=4\text{m/sec}$ ではいずれの床板も円周状にひび割れが発生している。 $V=5\text{m/sec}$ におけるひび割れ状況は、内側へ同心円状にさらに支点部分へ向って放射状に発生し、 $V=6\text{m/sec}$ ではより密にひび割れが発生

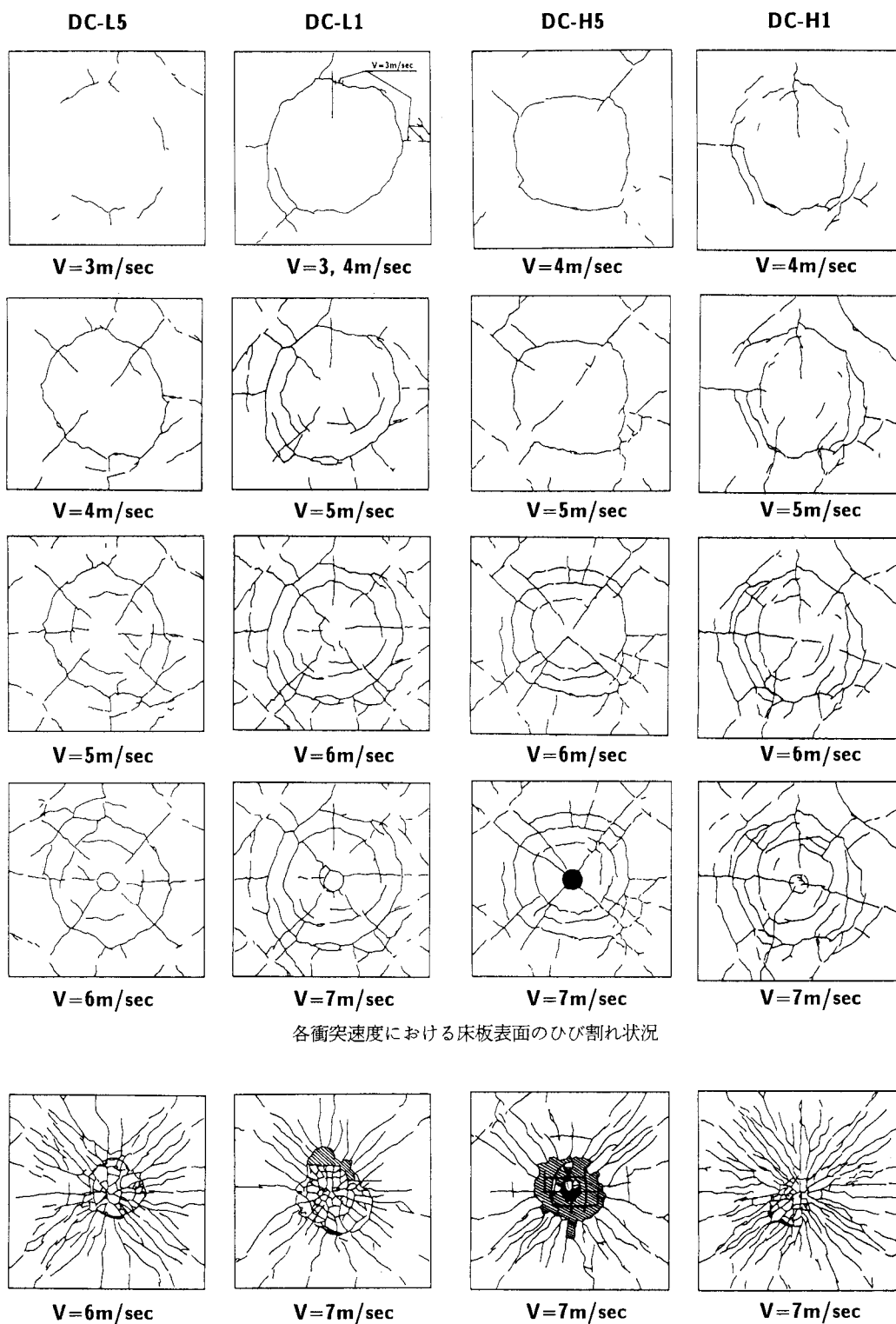


図-7 各衝突速度における床板表裏面のひび割れ状況

している。DC-L5ではこの時点で重錘が床板に貫入し破壊に至っている。また、DC-L1では、 $V=7\text{m/sec}$ で破壊に至っている。鉄筋比が大きい場合には、低速度におけるひび割れの数はいくつか少ないが、高速度になるにつれてひび割れの数が増える傾向にある。一方、裏面のひび割れは、表面のひび割れの状況とは異なり、円周状に発生し、かつ四隅に向って放射状に発生しているようである。DC-L1では僅かにスキッピングも発生している。

高強度コンクリートの DC-H5 では、衝突速度 $V=4\text{m/sec}$ で床板の表面に円周状および四隅に向うひび割れが発生し、 $V=5\text{m/sec}$ でさらに多くのひび割れが放射状に発生している。 $V=6\text{m/sec}$ では低強度コンクリートの場合と同様に内側に向って同心円状にひび割れが発生し、 $V=7\text{m/sec}$ では重錘が床板に貫入し破壊に至っている。一方、DC-H1 では、衝突速度 $V=4\text{m/sec}$ で床板の表面に円周状、上中央部の縦方向および左横方向にひび割れが発生し、 $V=5\text{m/sec}$ で円周状および上下左右に四分割するようにひび割れが広がっている。 $V=6\text{m/sec}$ では、蜘蛛の巣状にひび割れが発達し、 $V=7\text{m/sec}$ で重錘が床板に貫入して破壊に至っている。DC-H1の床板裏面では、放射状にひび割れの数が多く発生しているものの裏面剝離がほとんど生じていない。しかし、DC-H5 では図-7(b) で示したように重錘が貫通していないものの貫入量がかなり多く、さらに裏面剝離が生じて鉄筋が剥き出しとなって破壊している。

異形鉄筋を用いた床板は、低強度コンクリートの場合ではひび割れ状況にも鉄筋比の影響が大きく現れている。一方、高強度コンクリートの場合ではいずれの鉄筋比でも破壊時の衝突速度は同一であるが、破壊時の損傷は鉄筋比によって異なることから鉄筋比の影響が顕著に現れていることがわかる。また、鉄筋比によるひび割れ性状を比較すると、鉄筋比が大きい場合にはコンクリート強度による影響が小さく、鉄筋比が小さい場合はコンクリート強度の影響が大きいものと考えられる。

3.2.3. 最大衝撃力

本研究における最大衝撃力に関して、弾性接触論に基づいた衝撃力算定式を用いて実験結果との比較検討を試みることにした。解析式および解法については、文献 7～9)、14) に詳細に述べられているので省略することにする。なお、本研究では弾性係数 E およびポアソン比 ν について表-2 の値を適用し、また、重錘の半径 $a=7.5\text{ cm}$ 、板厚 $h=7\text{ cm}$ 、重錘重量 $W=100\text{ kgf}$ 、床板の単位体積重量 $\gamma=2.5\text{ tf/m}^3$ として理論値を求めた。

図-8(a)、(b) には、コンクリート強度ごとに弾性接触論より求めた衝撃力と、各衝撃実験で得られた最大加速度に重錘の質量を乗じて求められる値を比較して示している。(a)図から明らかなように、DC-L5 では他の実験値の下

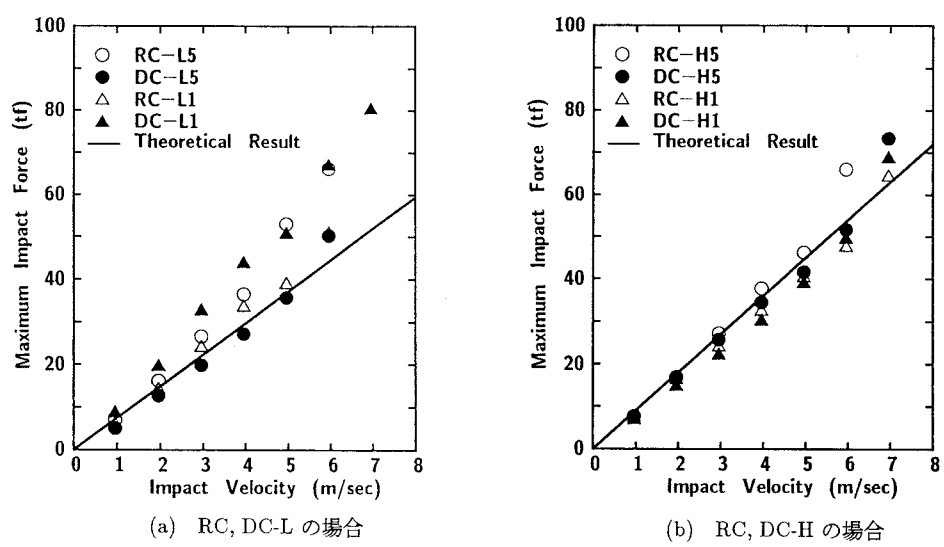


図-8 最大衝撃力と衝突速度との関係

限值を、また DC-L1 は上限値を示している。理論値は、 $V=1\sim5\text{m/sec}$ まで DC-L5 と RC-L1 の実験値とのほぼ中間値を示し、 $V>5\text{m/sec}$ の場合ではいずれの実験値も理論値より大きな衝撃力となっている。一方、(b)図の高強度コンクリートにおいて、理論値はそれぞれ破壊する前まで DC-H5 と RC-H5 との実験値のほぼ中間値を示しているが、他の実験値は理論値より多少小さくなっている。DC-H1 は実験値の下限値を、また RC-H5 は上限値を示している。また、本実験の範囲では落下回数による衝撃力の低下は見られないようである。

以上により、弾性接触論から求められる衝撃力の算定式は、本実験の範囲において低強度コンクリート床板の衝撃力の下限値に、また高強度コンクリート床板の衝撃力の上限値にほぼ一致しているようである。

4. あとがき

本研究では、衝撃荷重載荷によるコンクリート床板の弾塑性状態から破壊に至る性状を明らかにするために、 $150\text{cm}\times150\text{cm}\times7\text{cm}$ の単鉄筋 RC 床板を用いた衝撃実験を行い、鉄筋の種類、コンクリート強度、鉄筋比を変化させた場合の RC 床板の変位分布、歪の時刻歴応答、スパン方向の鉄筋歪分布、床板表裏面のひび割れ性状、最大衝撃力について検討した。本実験より得られた結果を要約すると以下ようになる。

- 1) 衝突速度 $V=2\text{ m/sec}$ の場合の載荷点近傍における最大変位応答より、丸鋼 (RC) を用いた床板では応答変位に及ぼす鉄筋比およびコンクリート強度の影響が小さい。異形鉄筋 (DC) を用いた床板では鉄筋比が大きい場合にはコンクリート強度による影響は少ないが、鉄筋比が小さい場合にはコンクリート強度により応答変位が異なる。また、コンクリート強度が同じ場合には、鉄筋比は応答変位に対して大きな影響を与えていることが明らかになった。
- 2) 衝突速度 $V=2\text{ m/sec}$ におけるスパン方向の最大鉄筋歪分布より、低強度コンクリート床板では付着特性より鉄筋比が歪分布に、高強度コンクリート床板では鉄筋比より付着特性が歪応答に大きな影響を及ぼしていることが明らかになった。
- 3) 衝突速度 $V=3\text{ m/sec}$ の鉄筋歪の時刻歴波形より、異形鉄筋で補強した RC 床板の鉄筋歪波形は低強度コンクリート床板の場合には鉄筋比の影響を大きく受け、高強度コンクリート床板の場合には鉄筋比の影響をそれ程大きく受けていないことが明らかになった。
- 4) 載荷点直下の鉄筋の降伏状態から、低強度コンクリート床板では鉄筋比や鉄筋の付着特性の影響が大きく、高強度コンクリート床板では鉄筋比よりも付着特性の影響が大きいことが明らかになった。このことは、2)、3) の結果とも符合している。
- 5) 高強度コンクリートで、異形鉄筋を用いかつ鉄筋比が大きい場合の床板は、破壊時の損傷がかなり少ないことが明かになった。
- 6) 異形鉄筋の各衝突速度におけるコンクリート表面のひび割れ状況および破壊時の裏面ひび割れ状況より、低強度コンクリートの場合にはひび割れ状況にも鉄筋比の影響が大きく現れている。一方、高強度コンクリートの場合にはいずれの鉄筋比の場合でも破壊時の衝突速度は同一であるが、破壊時の損傷は鉄筋比によって異なることより、鉄筋比の影響が顕著に現れていることが明らかになった。
- 7) 弾性接触論で得られた最大衝撃力は、低強度コンクリート床板の衝撃力の下限値に、また高強度コンクリート床板の衝撃力の上限値にほぼ一致しているようである。

最後に、本研究に当たり室蘭工業大学工学部建設システム工学科岸徳光助教授には多大な御指導並びに御助言を戴いたことを記しここに深く感謝の意を表すものであります。

参 考 文 献

- 1) 小暮幹太・大野友則・河西良幸・坪田張二・内田 孝：鋼板で補強された RC 板の耐衝撃性と補強鋼板の等価コンクリート厚の推定，構造工学論文集，pp.1599-1608，1993.3.

- 2) 北川 真・大野友則・内田 孝・井元勝慶：高速飛来物の衝突を受ける 2 重 RC 板局部損傷と耐衝撃性，構造工学論文集，pp.1609-1619，1993.3.
- 3) Ohnuma, H. , Ito, C. and Nomachi, S. G. : Dynamic response and local rupture of reinforced concrete beams and slabs under impact loading, Trans. 8th SMIRT , Vol. J, Aug. , 1985.
- 4) 伊藤千浩・大沼博志・白井孝治・能町純雄：飛来物の衝突に対するコンクリート構造物の設計手法，JCI コロキウム RC 構造のせん断設計法に関する解析的研究，pp.227-234，1989.
- 5) Uchida, T. , Tsubota, H. and Yamada, T. : Experimental investigations on reinforced concrete slabs subjected to impact loading, Trans. 8th SMIRT , Vol. J, Aug. , pp.173-178 , 1985.
- 6) 三上 浩・岸 徳光・松岡健一・能町純雄：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.1591-1602，1991.2.
- 7) 岸 徳光・松岡健一・大沼博志・能町純雄：四辺単純支持 RC 矩形板の重錘落下衝撃実験，構造工学論文集，Vol. 38A，pp.1587-1596，1992.3.
- 8) 三上敬司・岸 徳光・松岡健一・能町純雄：四辺単純支持 PC 矩形板の衝撃載荷実験，構造工学論文集，Vol. 39A，pp.1621-1630，1993.3.
- 9) 田村富雄・三上 浩・岸 徳光・松岡健一：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，構造工学論文集，Vol. 39A，pp.1631-1644，1993.3.
- 10) Lindholm, U.S. and Bessey, R.L. : A survey of rate dependent strength properties of metals, Technical Report AFML-TR-69-119 , april, 1969.
- 11) 岩井 哲・吉田 望・中村 武・若林 實：構造部材の挙動に及ぼす載荷速度の影響に関する実験的研究，日本建築学会論文報告集，第 314 号，pp.102-11，昭和 57.4.
- 12) 睦好宏史・町田篤彦：動的外力を受ける鉄筋コンクリート部材の力学的特性に関する研究，土木学会論文集，第 354 号/V-2，pp.81-90，1985.2.
- 13) 高橋芳彦・大野友則・太田俊昭・日野伸一：衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリートはりの弾塑性挙動に及ぼす材料のひずみ速度効果，構造工学論文集，Vol. 37A，pp.1567-1580，1993.3.
- 14) 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.

(1993年9月16日受付)