

四辺単純支持RC矩形板の重錘落下衝撃実験

EXPERIMENTAL STUDY OF SIMPLY SUPPORTED RECTANGULAR REINFORCED
CONCRETE SLAB UNDER IMPACT LOADING

岸 徳光* 松岡健一** 大沼博志*** 能町純雄****

By Norimitsu KISHI, Kenichi G. MATSUOKA, Hiroshi OHNUMA and Sumio G. NOMACHI

The purpose of this report is to find out the impact behavior of Reinforced Concrete (RC) slab conducting free-drop impact tests. Simply supported rectangular RC slabs having $150\text{cm} \times 150\text{cm} \times 10\text{cm}$ size and double reinforcements in both direction are used. The reinforcement ratio of the slab is approximately 1% per one side. The impact load is applied by free drop of a steel cylinder on the middle point of the slab which is 70kgf in weight and to be generated maximum 4m/sec speed. The acceleration of the dropped cylinder and the strains of reinforcing bars on both sides were measured. The dynamic behavior of the RC slabs and the relationships between the maximum impact forces and velocities are discussed based on the experimental results.

1. はじめに

衝突衝撃荷重対する構造物の耐衝撃性に関する研究は、古くは主に国防上の観点から行われていたようであるが、最近では原子力発電所施設や山岳急峻な道路に設置されるロックシェド等の重要構造物の安全性確保のために行われている。我が国は山岳部が海岸まで迫り、また主要市町村も点在しているために山岳急峻なところにも道路が多く、雪崩、崩落土砂、落石などによる交通障害を防止し、人命を守るために、覆工構造物が主要国道にも多く設けられている。これらの覆工の中で、特に落石の防止を対象とした構造物は衝撃的な荷重が載荷するために、その落石による衝撃力の推定や構造物内の衝撃波動の伝播性状を的確に把握することが設計上重要である。

衝撃に関する研究は、これまで欧米各国に多く見られたが、わが国でも電力中央研究所が鉄筋コンクリート製格納器の耐衝撃性検討のために、鉄筋コンクリート製、プレストレストコンクリート製の梁および床版を用い、主として中高速度で衝突する衝撃に対する実験を行い報告している^{1),2),3)}。また、神戸大学では衝撃荷重に対するスラブの動的挙動について実験的研究を行っており⁴⁾、金沢大学でも大規模な衝撃実験設備を用い落石覆工屋根を対象とした実験および解析結果を発表している^{5),6)}。著者らも、落石による覆工への衝撃力の算定や、覆工敷砂部の衝撃応答などを理論的に解析し報告した^{7),8)}。

* 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)

** 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)

*** 電力中央研究所グループリーダー 原子力総合推進室 (〒100 東京都千代田区大手町1-6-1)

**** 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)

構造物の耐衝撃性に関する研究は以上のように数多く行われており、衝撃力の算定に関しては、ある程度合理的な推定が可能になってきたものと考えられるが、衝撃荷重に対する構造物の応答性状ははまだ解明されていないのが現状である。特に、土木建築構造物において最も多く用いられている鉄筋コンクリート構造は、鉄筋とコンクリートから構成される合成構造体であるためと、衝撃初期のレベルより弾塑性的な挙動を示すために、より複雑な衝撃挙動を示すものと考えられ、構造物の合理的な耐衝撃設計法確立に向け理論的、実験的研究が急がれている。

本研究では、このような観点より鉄筋コンクリート (RC)床板の耐衝撃性の検討のために、床板模型による重錘落下衝撃実験を行った。本実験では、主に弾性および塑性初期の領域の挙動を調べることを目的としているため、衝突速度を最大4m/secに限定し、衝撃力算定のための重錘加速度と、鉄筋に貼付したひずみゲージによりひずみ波形を測定することによって、その衝撃特性を実験的に調べることにした。

2. 衝撃実験

2.1 衝撃荷重載荷装置

衝撃荷重の載荷は、写真-1に示す落錘衝撃万能試験機を用いた。衝撃は、鋼製の円柱であるハンマー（直径15.0cm、質量70kgで底部は片当たりを防止するため2mmのテーパを取り付けている）を所定の高さにセットし、リニアウエイに沿って自由落下させることにより行うもので、本実験では試験体中央に載荷することとした。

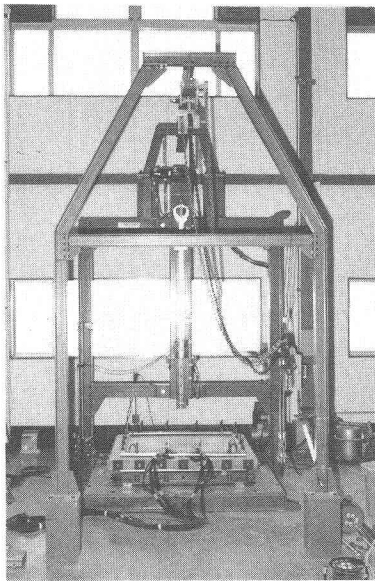


写真-1 落錘衝撃万能試験機

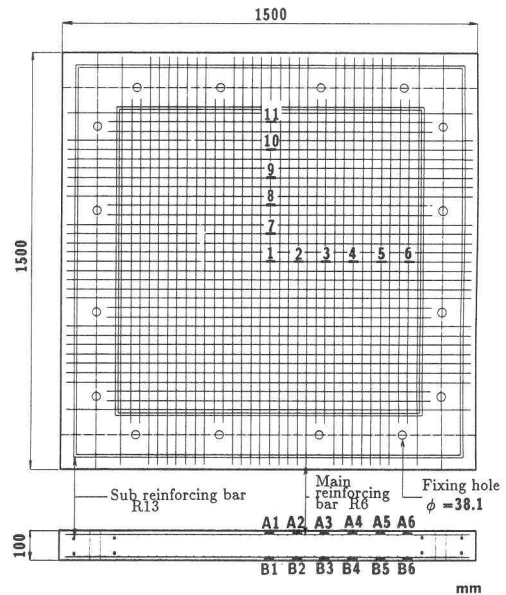


図-1 RC床板の配筋図及びゲージ位置図

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	混和材
400	20	8 ± 2.5	4.5 ± 1.0	35.0	40.3	151	431	721	1069	4.31

RC床板の支持条件は、四辺単純支持とし、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。なお

床板は、はねかえりを防止するために支持用鋼棒を介して、ボルトを用い支持台に固定されている。

2.2 鉄筋コンクリート試験体

試験体の製作には普通ポルトランドセメントを用いたレデーミクスコンクリートを用い、設計基準強度が 400kgf/cm^2 (39.2MPa)となるように表-1に示す配合を定めた。なお、打設4週間後に強度試験を行った結果コンクリート強度は 530kgf/cm^2 (51.94MPa)であり、弾性係数は、 $3.24 \times 10^5\text{kgf/cm}^2$ ($3.18 \times 10^4\text{MPa}$)、ポアソン比は0.2であった。

試験体の寸法は $150\text{cm} \times 150\text{cm} \times 10\text{cm}$ であり、配筋は複鉄筋断面とし、鉄筋比は片側およそ1%として、8体製作したが、ここでは4体の実験結果について述べる。また、鉄筋については、主鉄筋にR6を3.3cm間隔で配筋し、支持辺近傍の補助鉄筋にD13を使用している。さらに、鉄筋ひずみ測定のために中心から10cm間隔にひずみゲージを貼付した。配筋および鉄筋ひずみ測定用ゲージの貼付位置を図-1に示す。なお、製作した試験体は表-2に示すような順序で実験を行った。

表-2 実験種別

試験体名	載荷番号	衝突速度 V (m/sec)
SLB-10-11	-1	1.0
	-2	4.0
	-3	4.0
	-4	4.0
SLB-10-12	-1	2.0
	-2	3.0
	-3	4.0
	-4	4.0
	-5	4.0
SLB-10-13	-1	3.0
	-2	1.0
	-3	1.0
	-4	4.0
SLB-10-14	-1	4.0
	-2	4.0

2.3 計測方法

計測システムのフローチャートを図-2に示す。ハンマー側面にひずみゲージ式の加速度計(容量1000G,500G)を取り付け、波形を測定している。また、試験体の鉄筋のひずみの時間履歴の測定には箔歪ゲージ(ゲージ長2mm, ゲージ抵抗 120Ω)を用いた。加速度計およびひずみゲージはブリッジボックスを通して高周波成分も測定可能なアンプを用いて増幅し、データレコーダーに記録している。記録された波形の再生は、データレコーダーからの出力をウェーブメモリーを介して任意の時間軸に拡大し、バッファアンプを通してフォトコーダーからオシロペーパーに記録したり、シンクロスコープに静止画像を発生させ写真撮影することにより行っている。

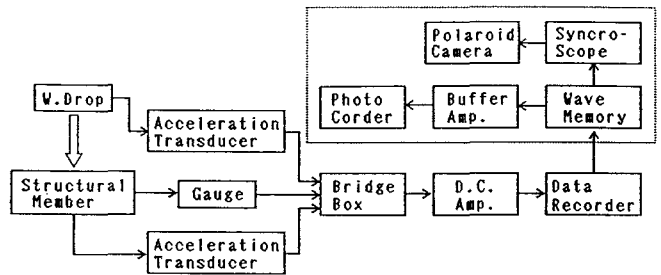


図-2 計測システムのフローチャート

3. 実験結果

3.1 加速度応答波形

図-3に各衝突速度に対する重錘の加速度の応答波形を示した。それぞれ2個の波形は重錘の左右対称位置に設置された加速度波形であり、ほぼ同様の形状を示している。大きさは左右かなり異なるものもあるが、これは床板と重錘の接触面が偏心していたことが考えられる。しかし、各速度に対する平均最大加速度は衝突速度 $1\text{m/sec} \sim 4\text{m/sec}$ に対してそれぞれ約190G, 430G, 660G, 860Gとほぼ比例している。また、波形は周期約0.7msecの

高周波となっており、主たる衝撃の継続時間は衝突速度に無関係のようであり2msec程度と思われる。

3.2 鉄筋ひずみの応答波形

図-4に衝突速度1m/secのときの鉄筋ひずみの応答波形を示す。Aは上端筋、Bは下端筋の波形であり、図は上側を引張、下側を圧縮として示している。

ひずみの最大値は載荷点直下に生じ、この実験では、上端筋(A1)で約300 μ 、下端

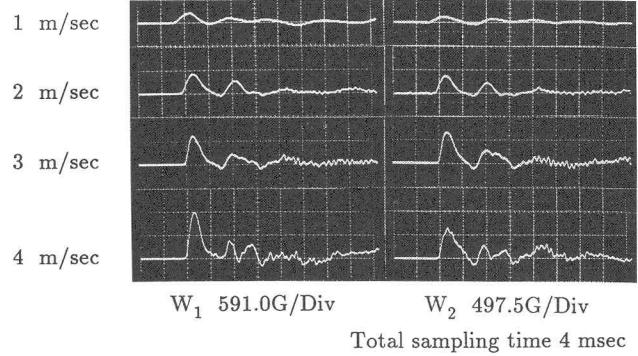


図-3 重錘加速度波形

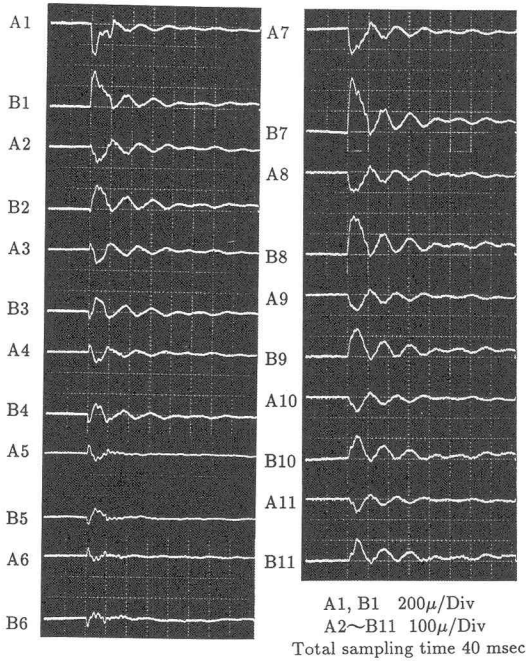


図-4 鉄筋ひずみの応答波形(V=1m/sec)

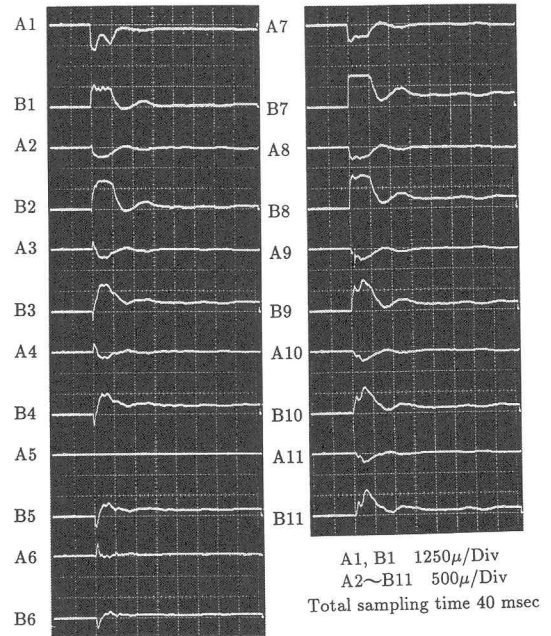


図-5 鉄筋ひずみの応答波形(V=4m/sec)

筋(B1)で約370 μ である。また、A2、B2とA7、B7では方向が90°異なるが、A2、B2はそれぞれ80 μ と110 μ 、A7、B7は120 μ と270 μ であり、A7、B7の方がかなり大きなひずみとなっている。載荷点付近ではこのように上端筋と下端筋のひずみに差があり、また中心部の下端筋には僅かではあるが残留ひずみもみられ、板が局部的に塑性変形をしているものと推察される。局所的なコンクリートのひずみを測定することはかなり困難であり、床板裏面のひび割れ状況も各衝撃回数毎には確認していない(最終衝撃後確認)ので、明らかではないが、鉄筋ひずみから推定すると下縁のコンクリートは、中央部ではコンクリートの曲げ引張り強度を越える応力となり、局部的にひび割れが生じていると思われる、これが塑性変形として現れているものと考えられる。

応答の時間的变化では、初期の約4msecの間で大きく、次第に減衰し、床板の固有周期(約4.9msec)に近い自由振動へ移行している。これらのことから、載荷点直下の下側コンクリートに生じた局所的な塑性変形は、全体的な衝撃応答にはそれほど影響を与えず、ほぼ弾性的に挙動していることがわかる。また、A2、B2からA6、B6まで

のひずみでは、波動の初期に上下筋のひずみに符号の逆転現象がみられ波動の進行に伴い負の曲げモーメントが生じている。これは、波動の先端が固定端のように挙動していることを示しているものと考えられる。

図-5には、衝突速度4m/secの結果を示した。ひずみの最大値は載荷点直下の上端筋(A1)で1500 μ 、下端筋(B1)で1300 μ である。他の点のひずみは A2(250 μ)、B2(700 μ)、A7(450 μ)、B7(800 μ)、A8(350 μ)、B8(800 μ)といずれもかなり大きな値を示している。この結果は、一般的には下端筋ひずみの方が上端筋ひずみに比べかなり大きい。側載荷点直下では、上端筋ひずみが下端筋ひずみよりやや大きくなっており、他の実験結果と異なる傾向を示している。この理由は明確ではないが、他の点のひずみの状況を考え合わせると、何らかの理由で載荷点直下の上端筋のかぶりが少なくなったためではないかと思われる。1m/secの場合と比較すると載荷点では約4倍その他の点では4~6倍くらいであり、ほぼ速度に比例しているようである。波形は衝撃初期の6msecの間で大きく、この場合は自由振動状態へ移行することなく急激に減衰し引張側では残留ひずみも見られ、引張側にかなりのひび割れが生じていることがわかる。また、この場合も衝撃初期ではA2~B6のひずみに符号の逆転現象が現れ波動の先端が固定端のようにになっていることがわかる。

3.3 衝撃履歴の影響

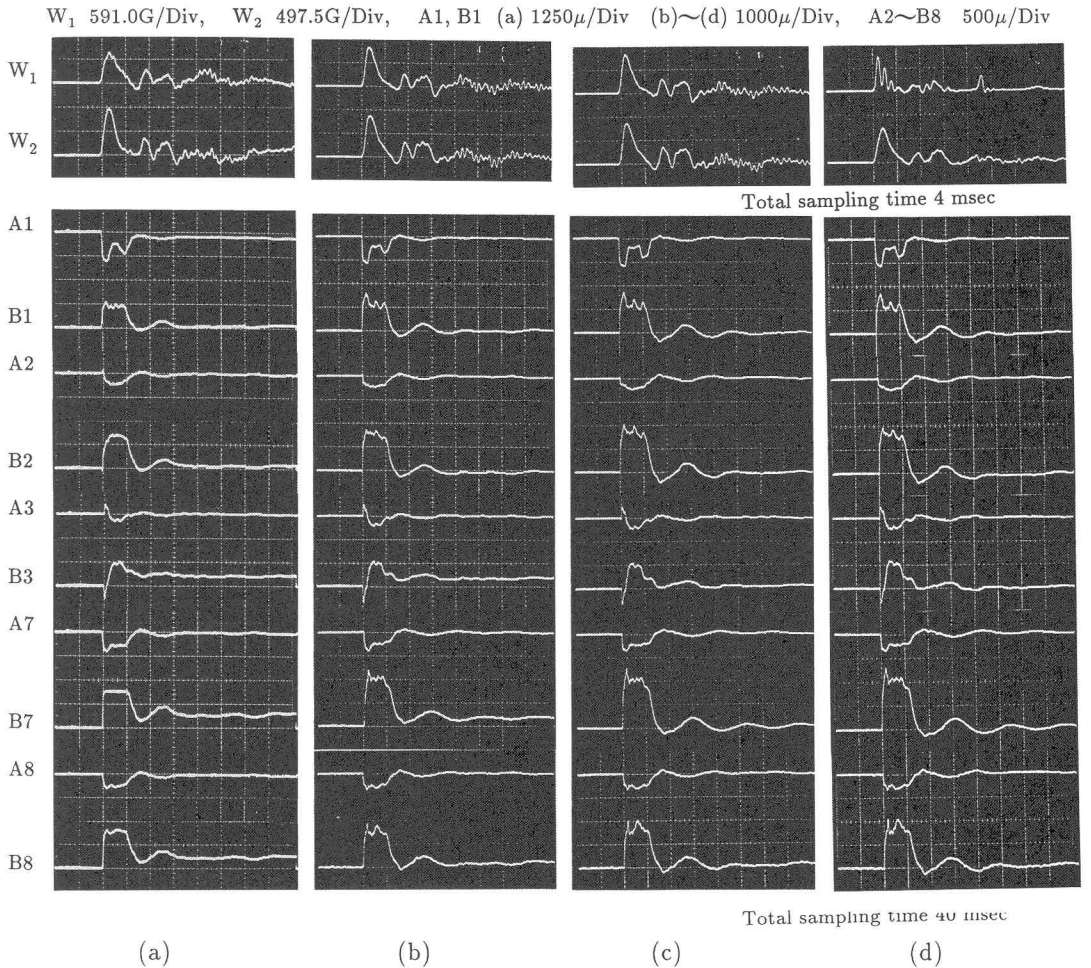


図-6 繰返し衝撃載荷時の重錘加速度及び鉄筋歪応答波形(V=4m/sec)

衝撃荷重を受けひび割れが発生した後のRC板の衝撃に対する挙動を検討するため、繰り返し衝撃を与え加速度、ひずみを測定した。衝突速度4m/secの結果を図-6に示す。図-6(a)は衝撃履歴を受けない場合であり、図-6(b)は2m/secと3m/secの衝撃を受けた後4m/secの衝撃を与えた場合であり、図-6(c)(d)はさらに続けて4m/secの衝撃を与えたものである。図-6(a)と図(b)～(d)とでは試験体が異なるため同一の条件ではないので直接的な比較は困難であるが、全体として波形はほとんど同一であり、大きさも僅かに異なる程度である。

点1,2,7,8の最大ひずみを表-3に示した。特徴的なことは、図(a)の場合初期衝撃後ほとんど振動することなく急激に減衰し下端筋には残留ひずみもかなりの点でみられるのに比べ図(b)～(d)では初期衝撃後僅かではあるが自由振動的挙動を示すようになり残留ひずみも見られなくなる。すなわち、同程度の繰り返し衝撃に対しては、RC床板は引張部にひび割れが生じた状態で安定し、断面全体としてはあたかも弾性体のように挙動しており、いわゆる鉄筋コンクリート構造として衝撃力に抵抗していることがわかる。このことは、衝撃速度4m/secの第1回目の衝撃では衝撃によるエネルギーがひび割れの進展に消費されひずみエネルギーの蓄積にならないため復元力がなく自由振動を起こさないが、第2回目以後では、ひび割れの進展が少なくひずみエネルギーの蓄積が行われ自由振動を起こすためと考えられる。また、図-6(b)～(d)の鉄筋ひずみは1m/secのときのほぼ4倍である。鉄筋ひずみから推定すると圧縮側のコンクリートの応力は最大で300～400kgf/cm²(29.4～39.2 MPa) (衝撃載荷点直下)を生じており、許容応力をはるかに越えていると思われるが数回の衝撃に対しては安定している。これらのことから、衝撃を受ける鉄筋コンクリート板はかなりの応力(圧縮強度付近)まで許容出来ると思われるが、結論を述べるにはより多くの実験が必要である。

表-3 繰り返し衝撃時の各測点の最大鉄筋歪(μ)
(Compression)

Case Gauge	(a)	(b)	(c)	(d)
A1	1500	1200	1200	1200
A2	250	250	250	250
A7	450	450	400	350
A8	350	400	350	350

(Tension)

Case Gauge	(a)	(b)	(c)	(d)
B1	1300	1700	1700	1800
B2	700	850	1000	1000
B7	800	1200	1200	1250
B8	800	1000	1000	1100

3.4 最大衝撃力

落石覆工などの設計に当っては、RC床板の衝撃挙動を明らかにするとともに、衝撃力の算定も重要な問題である。最大衝撃力の算定に関しては、いくつかの理論があげられるが^{7),9)}、本研究では重錘の衝突速度を小さくし弾性理論が適用できる範囲内に限って実験を行っているため弾性接触論に基づいて衝撃力の理論値を求めた^{10),11)}。

結果のみを示せば、最大衝撃力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、減衰項および角速度に対応する β 、 ω はそれぞれ次式のように示される。

$$\beta = \frac{1}{4h^2} \sqrt{\frac{3Ma}{2\rho}} \quad \dots(2)$$

$$\omega = \sqrt{\left(\frac{2Ea}{1-\nu^2}\right) / M} \quad \dots(3)$$

また最大衝撃力を与える時間tは

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

となる。ただし、 V , a , M は飛来物の衝突速度、半径および質量であり、 E , ν , ρ , h は床板の弾性係数、ポアソン比、密度および厚さである。

本研究では、コンクリートの弾性定数は実験から得られた $E=3.24 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2 (3.18 \times 10^4 \text{ MPa})$, $\nu=0.2$ とし、 $a=7.5 \text{ cm}$, 重錘質量 $M=70 \text{ kg}$, 床板の密度 $\gamma=0.0025 \text{ kg/cm}^3$ として理論値を求めた。また、最大衝撃力の実験値は、重錘に取り付けた加速度計より得られる加速度の履歴曲線の最大値に重錘の質量を乗じることより求めている。式(1)から計算される衝撃力の時間分布を $v=1 \text{ m/sec}$ として示せば、図-7のよう

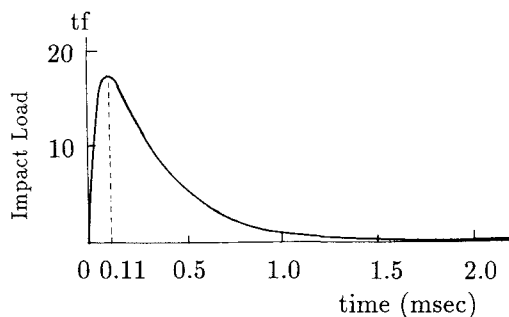


図-7 衝撃力の時間分布($v=1 \text{ m/sec}$)

である。式(4) から得られる最大衝撃力を与える時間は約 $t=0.11 \text{ msec}$ である。また、衝撃の継続時間は式(1) からは厳密には得られないが、ほぼ 2.0 msec と考えられる。これを図-3で示した実験波形と比較すると最大衝撃力を与える時間は実験では約 0.16 msec 位でありやや大きい。衝撃継続時間はほぼ等しいと考えられる。実験波形は理論波形に周期約 0.7 msec の高周波成分が重なっているが、これは重錘自身の自由振動の影響とも考えられるが断定は困難である。図-8に実験および理論より求められた最大衝撃力と衝突速度との関係を示す。実験データ量が十分ではないが、図より本実験の範囲では弾性接触論を用いた理論値と実験値は比較的一致しているものと考えられる。

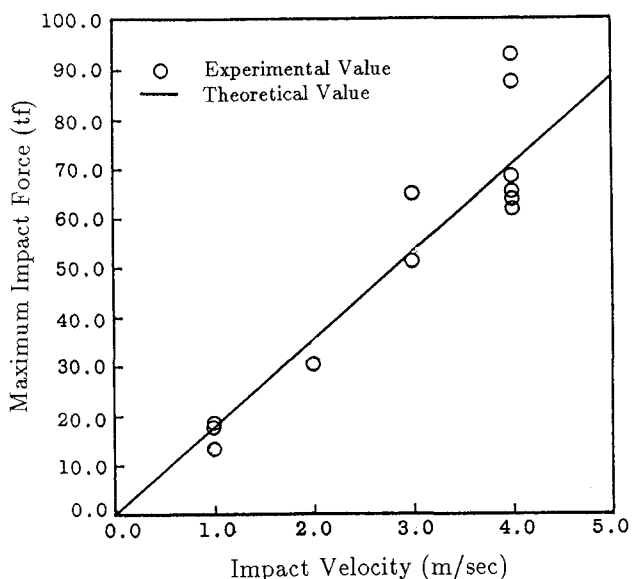


図-8 最大衝撃力と衝突速度との関係

3.5 実験結果と応答解析結果との比較

実験に用いたRC床板を対象として、有限帯板要素法による衝撃応答解析を行い、実験で得られた結果との比較を試みた。解析方法の詳細は文献に譲る¹²⁾。また、衝撃力は、実験で得られたものを用いることとしたが、応答加速度波形から得られる衝撃力をそのまま用いるのではなく上で求めた理論波形を参考として、衝撃時間を 1.5 msec

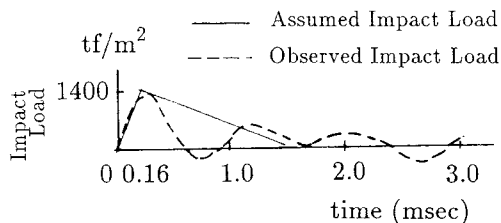


図-9 衝撃波形($V=1 \text{ m/sec}$)

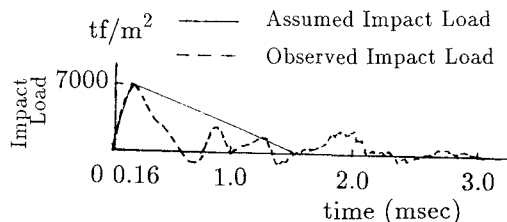


図-10 衝撃波形($V=4 \text{ m/sec}$)

と仮定し、最大衝撃力と結び直線的に単純化した三角波形を用いることとした。

図-9に衝突速度1m/secのときの衝撃力の波形を、また図-10に衝突速度4m/secのときの衝撃力の波形を示した。減衰定数は実験結果を参考に $h=10\%$ としている。

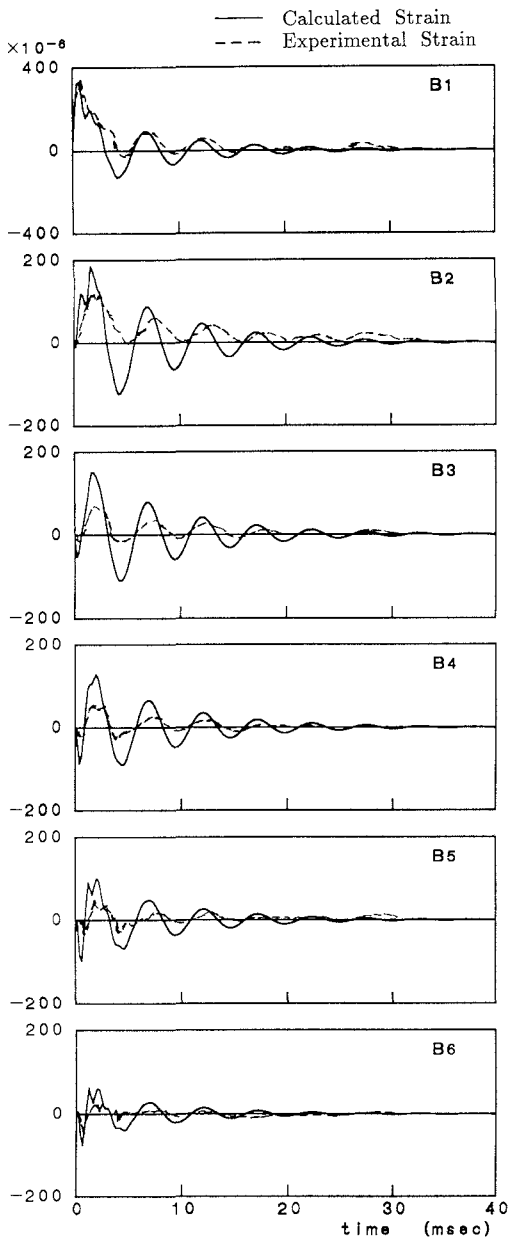


図-11 歪の理論値と実験値の比較($V=1\text{m/sec}$)

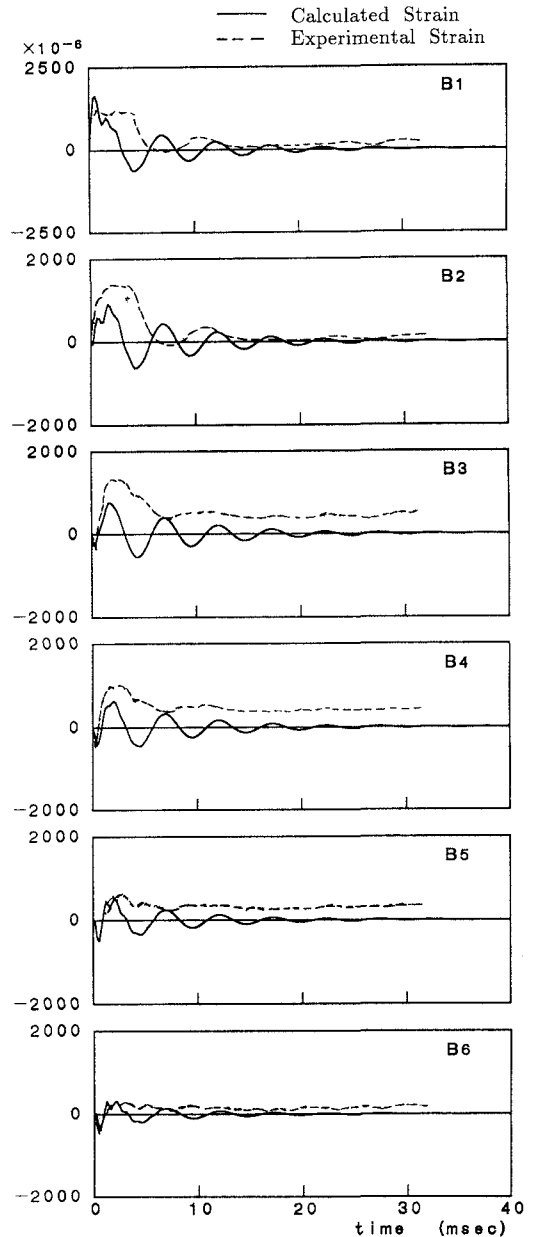


図-12 歪の理論値と実験値の比較($V=4\text{m/sec}$)

図-11に衝突速度 $V=1\text{m/sec}$ としたときの下端筋ひずみの応答波形の計算結果と実験結果とを併せて示した。計算結果は中央点以外の点の応答波形では多少大きな値となっているものの中央点ではかなり良く合っている。また、衝撃初期の挙動や衝撃後の自由振動への移行の様子など実験結果を説明するものとなっており、この例のような弾性範囲内の衝撃挙動は、有限帯板法で十分解析できることがわかる。なお、この場合の最大衝撃力と同じ大き

さの荷重が、同じ分布面積で静的に載荷したとすれば、この時の鉄筋ひずみの最大値は、平板の弾性解析¹³⁾から、約 400μ となり、本実験及び応答解析から得られる最大ひずみ $330\sim 370\mu$ と比べるとやや大きい値となった。

図-12には、衝撃速度 4m/sec の場合の応答解析結果を示した。実験結果は先に述べたように引張り側コンクリートにひび割れが生じ塑性状態になっている。従ってここで用いた弾性解析では、十分実験結果に合う解析結果とはならないものの、衝撃初期の挙動については中央点や支点付近での最大値を含め、ひずみの逆転現象などよく説明していると思われる。

4. まとめ

鉄筋コンクリート構造物の耐衝撃性を検討するため、本論文では、 $150\text{cm}\times 150\text{cm}\times 10\text{cm}$ の鉄筋コンクリート床板を作製し主に弾性領域の挙動を調べることを目的として、衝撃速度を最大 4m/sec に限定し重錘落下衝撃実験を行った。

実験では重錘の加速度や鉄筋部のひずみ波形を測定することにより、最低次固有振動状態に移行するまでの過渡的な応答状態の把握、および衝撃力の算定を行った。この結果、次のことが明らかとなった。

- 1) 各点のひずみの応答波形から、波動の進行方向のひずみは、衝撃の極く初期の段階では床板の上側で引張り下側で圧縮となり、波動の先端部が固定端のように挙動し、衝撃波が伝播していることがわかる。
- 2) 本実験での落錘による衝撃の継続時間は衝撃速度によらずほぼ 2msec のようである。
- 3) RC板では下側の鉄筋ひずみが大きく本実験では、衝撃速度 4m/sec 程度でもコンクリートにかなりひび割れが入り、残留ひずみも大きい。
- 4) 弾性接触論から導かれる最大衝撃力と実験から得られた最大衝撃力は比較的一致している。
- 5) 応答解析を行う場合の衝撃波形は最大衝撃力と継続時間 1.5msec で与えられる三角形分布としてほぼ与えることができる。
- 6) 1m/sec 程度の低速度の落下衝撃の場合、弾性理論に基づく有限帯要素法による衝撃応答解析は、実験から得られたRC床板の衝撃挙動をかなりよく説明できる。

今後は、より高速度の落錘による衝撃実験を行い、弾性範囲を僅かに越えた場合のRC床板の衝撃挙動を検討し、設計計算のための資料としたい。なお、本研究に対して室蘭工業大学建設システム工学科の田中技官をはじめ元大学院生の佐藤匡之、現大学院生の西弘明両君の協力を頂いた。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1). Ohnuma H., C. Ito, H. Takano and S.G. Nomachi : RC Beam Response Due to Impact by Moderate Speed Gun, Theoretical and Applied Mechanics, Vol.33,1984.
- 2). Ohnuma, H., C. Ito, N. kishi and S.G. Nomachi : On the Impact Behavior of Reinforced Slab, Transactions of the Japan Concrete Institute, 1984.
- 3). Ohnuma H., C. Ito : Experiment and FEM Analysis of Impact Behavior of Prestressed Concrete Slabs Subjected to a Hard Projectile, Transactions of the Japan Concrete Institute, 1985.
- 4). 藤井 学, 宮本文穂 : 衝撃荷重下におけるコンクリート構造物の挙動, コンクリート工学, Vol.21 No9, 1983.9.
- 5). 吉田 博, 榎谷 浩, 鈴木哲次 : 敷砂上の落石の衝撃加速度と衝撃土圧に関する実験的研究, 土木学会論文集, 第352号, 1984.12.
- 6). 吉田博, 榎谷浩, 岡衛 : 落石覆工屋根上への落石による衝撃荷重特性について, 土木学会論文集, 第362号, PP.461-470, 1985.10.

- 7). 三上敬司, 能町純雄, 松岡健一, 岸徳光 : 落石による落石覆工への衝撃力に関する評価, 構造工学論文集, Vol.33A, 1987.3.
- 8). 岸徳光, 吉田紘一, 松岡健一, 能町純雄 : 層状弾性体にモデル化した覆工敷砂部の衝撃応答解析, 構造工学論文集, vol34A, PP.817-826, 1988.3.
- 9). 芳村 仁, 三上 隆, 運上茂樹, 若林学 : ロックシェッドに作用する落石の衝撃力, 土木学会北海道支部論文報告集, 第42号, 1986.2.
- 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, 1984.9.
- 11). 松岡健一, 岸徳光, 高橋義裕, 能町純雄, 佐藤匡之 : 衝撃荷重を受けるRC矩形板の実験的研究, 土木学会北海道支部論文報告集, 第46号, PP.177-180, 1990.2.
- 12). 中村秀治 : 断面変形を考慮した薄肉ばりの振動解析, 土木学会論文報告集, 第223号, pp.11-22, 1974.3.
- 13). Timoshenko S. P. and S. Woinowsky-Krieger : THEORY OF PLATES AND SHELLS, 2nd Edition, McGraw-Hill, p.147, 1968.

(1 9 9 1 年 9 月 3 0 日)