

I—38

衝撃荷重を受けるRC矩形板の実験的研究

室蘭工業大学	正 員	松 岡 健 一
室蘭工業大学	正 員	岸 徳 光
北海学園大学	正 員	高 橋 義 裕
日本大学	正 員	能 町 純 雄
室蘭工業大学	学生員	佐 藤 匡 之

1. はじめに

衝撃衝突荷重載荷に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欧米各国で行われている。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⁾。

このように、構造物の耐衝撃性に関する研究は数多く行われているが、衝撃荷重に対する構造物の応答性状はい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複合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、実験的研究が世界的に急がれている。

本研究では、このような観点より鉄筋コンクリート床版の耐衝撃性検討に着目し、床板模型による重錘落下衝撃実験を行った。今回の実験は、主に弾性領域の挙動を調べることを目的としているため、衝撃速度を最大4m/secに限定し、衝撃力算定のための重錘加速度と、鉄筋に貼付したゲージにより歪波形を測定することによって、その衝撃特性を調べることとした。

2. 衝撃実験

2.1 衝撃荷重載荷装置

衝撃荷重の載荷については、本学に設置されている落下衝撃万能試験機を用いた。装置の全体図を図-1に示す。衝撃荷重の載荷は、鋼製の円柱であるハンマー($\phi=9.8\text{cm}$, $W=70\text{kgf}$)を所定の高さにセットし、自由落下させることにより行うものである。

本実験では、四辺単純支持された場合について行うこととし、支持条件を単純支持の仮定により近づけるために、RC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、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している。ここでは、主に弾性領域の挙動を検討することとして、重錘の衝突速度を1~4m/secと変化させ、試験体中央に載荷している。

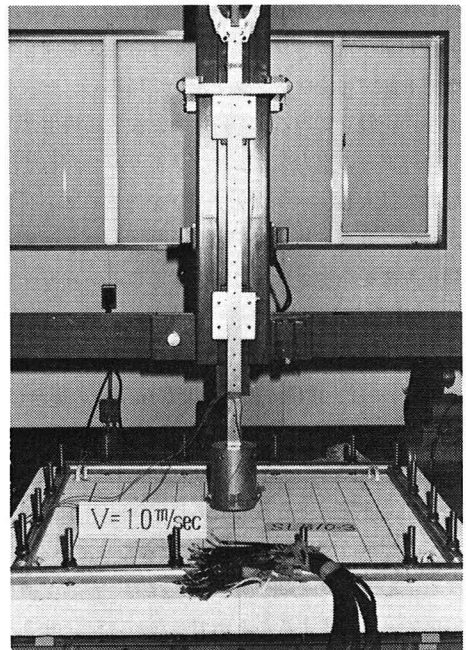


図-1 衝撃荷重載荷装置

Experimental Study of RC Rectangular Plate under the Impact Load
by Ken-ichi MATSUOKA, Norimitsu KISHI, Yoshihiro TAKAHASHI, Sumio NOMACHI and Masayuki SATO

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トコンクリートを使用し、設計基準強度が $240\text{kg}/\text{cm}^2$ 、および $420\text{kg}/\text{cm}^2$ となるように表-1のような配合を定めた。鉄筋については、主鉄筋にR6を、支持辺近傍の補助鉄筋にD13を使用した。

表-1 コンクリート示方配合表

設計基準強度	粗骨材最大寸法	スランプ	空気量	W/C	S/A	C	W	S	G	混和剤
$240\text{kg}/\text{cm}^2$	15mm	18cm	4.0%	52.8%	52.9%	345kg	182kg	949kg	845kg	0.690cc
$420\text{kg}/\text{cm}^2$	15mm	18cm	4.0%	36.6%	46.3%	484kg	177kg	783kg	906kg	0.968cc

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、鉄筋比はおよそ片側1%としてコンクリートの設計基準強度の異なる2種類を、5体製作し実験を行っている。配筋および鉄筋歪測定用ゲージの貼付位置を図-2に示す。

2.3 計測方法

計測システムのフローチャートを図-3に示す。ハンマー側面に加速度計(容量1000G,500G)を取り付け、波形を測定している。さらに、試験体裏面中央にも試験体の動的挙動を検討するために同様の加速度計を取り付けている。また、試験体の鉄筋の歪の時間履歴の測定には歪ゲージ(ゲージ長2mm, ゲージ抵抗120Ω)を用いた。加速度計および歪ゲージはブリッジボックスを通して高周波成分を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、データレコーダーの出力をウェ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より行っている。

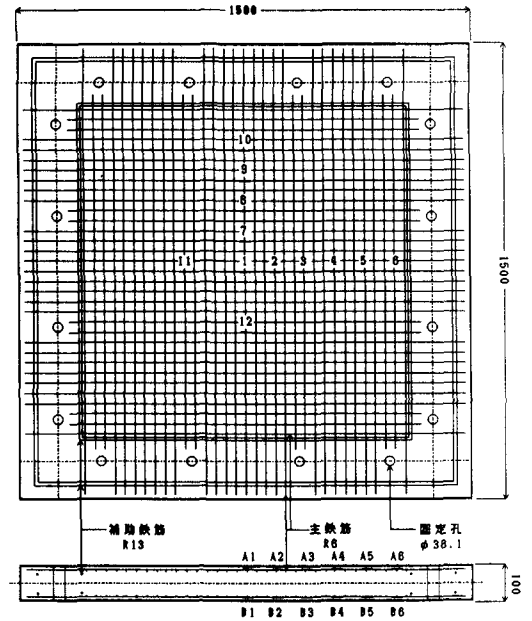


図-2 配筋図およびゲージ配置図

3. 実験結果

3.1 加速度および鉄筋歪の応答波形

図-4には、重錘の衝突速度が $1\text{m}/\text{sec}$ の場合における、加速度および鉄筋歪の応答波形を示した。加速度は重錘(Wac)と床板中央裏面(Bac)に取り付けた加速度計によるものであり、鉄筋歪(1~12)の波形の測定位置は図-2に示したとおりである。なお、A8,B12の応答波形については、測定装置の不良により確認することができなかった。重錘の加速度は最大約980Gで衝撃載荷時間は、約2msec

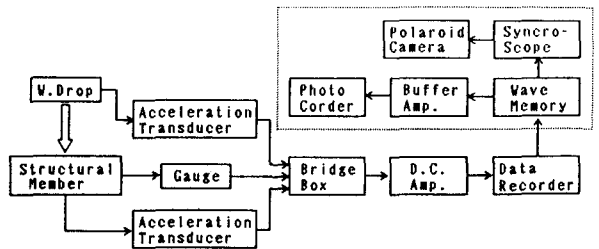


図-3 計測システムのフローチャート

である。床板裏面の加速度は重錘の加速度と同様の変化を示しているが、衝撃的な挙動はごく初期の時のみに現れているようである。鉄筋の歪では、中央点の上側の歪(1実線)が衝撃初期の段階で引張りになっている。この現象は、はっきりしないが重錘が多少偏心して作用したためではないかと思われる。中央から離れた点の中央線上の歪(1~6)

は、いずれも衝撃初期に上側で引っ張り、下側で圧縮歪となっているが、これは衝撃波の伝播にしたがって衝撃波の先端が固定端のように作用するためであると考えられる。その後は、ほぼこの板の自由振動周期4.9msecに近い挙動を示している。直角方向の歪(7~10)については、衝撃初期の歪の符号の逆転が顕著には現れず、応答値は中央線上の歪より多少大きく示されている。点11は点3と点12は点8と対称位置の歪である。かなり似たような挙動を示しているがわずかに差異がみられ、多少ではあるが重錘が偏心して作用しているようである。

3.2 最大衝撃力

ここでは、最大衝撃力について実験値と理論値との検討を行う。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^{6),7)}、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⁸⁾。以下に弾性接触論による衝撃力の算定について説明する。

いま、解析を省略化するために無限スラブを仮定し、载荷点のたわみを w 、飛来物の貫入深さを x とすると、衝撃力 P は、

$$P = -M(\ddot{w} + \ddot{x}) \quad \dots(1)$$

示すことができる。また、弾性接触論より x と P の関係を求めると、 E 、 ν をそれぞれ無限スラブの弾性係数およびポアソン比、円柱飛来物の半径とすると、次式のようになる。

$$P = \frac{2Ea}{1 - \nu^2} x \quad \dots(2)$$

P が作用するときの曲げに対する動的応答微分方程式は、スラブ厚さ h 、曲げ剛性を D 、密度 ρ をとすると、

$$D\Delta^2 w + h\rho\ddot{w} = P \quad \dots(3)$$

(3)式に、 $rJ_0(\xi r)$ を核としてHankel変換し、さらに時間方向についてLaplace変換を施し整理すると、最終的にたわみ w の像関数を得る。

$$L[W_\xi] = \frac{L[P_\xi]}{\left[\xi^4 + \frac{12(1 - \nu^2)\rho}{Eh^2} s^2 \right]} \quad \dots(4)$$

ただし、 W_ξ, P_ξ は、Hankel変換の像関数である。上式をLaplace変換の逆変換をし、さらにHankel変換の逆変換を施して(1)式を用い、载荷点の貫入深さ x について整理すると、

$$x = V \frac{e^{-\beta\omega t}}{\omega\sqrt{1-\beta^2}} \sin \omega\sqrt{1-\beta^2} t \quad \dots(5)$$

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。

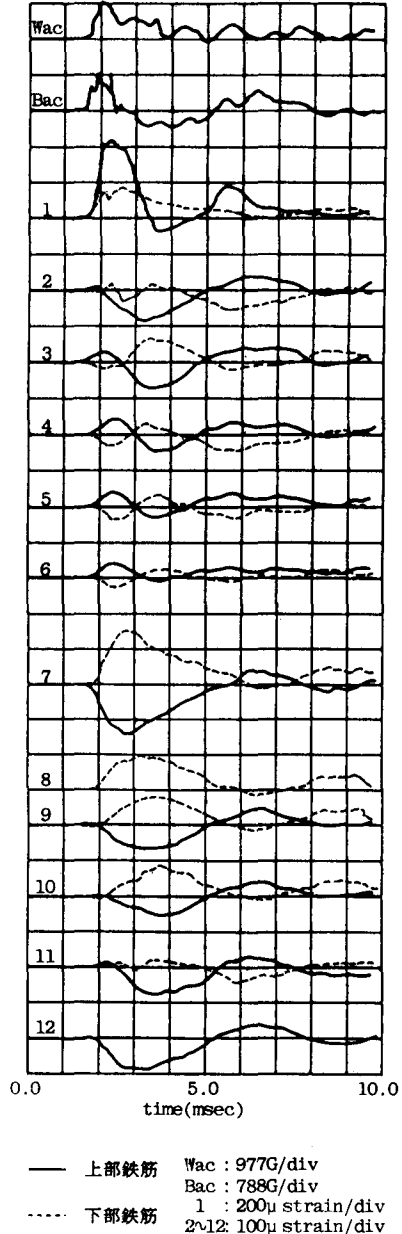


図-4 加速度および歪の応答波形図

$$\beta = \frac{1}{4h^2} \sqrt{\frac{3Ma}{2\rho}} \quad \dots(6)$$

$$\omega = \sqrt{\left(\frac{2Ea}{1-\nu^2}\right) / M} \quad \dots(7)$$

ただし、Vは飛来物の衝突速度

(2)式より衝撃力はxに比例することが明かである。(5)式よりXが最大となる時間(衝撃力最大) t を求めると、(8)式のように示される。最大衝撃力は、(5)式を(2)式に代入することより求めることができる。

$$t = \frac{1}{\omega \sqrt{1-\beta^2}} \tan^{-1} \frac{\sqrt{1-\beta^2}}{\beta} \quad \dots(8)$$

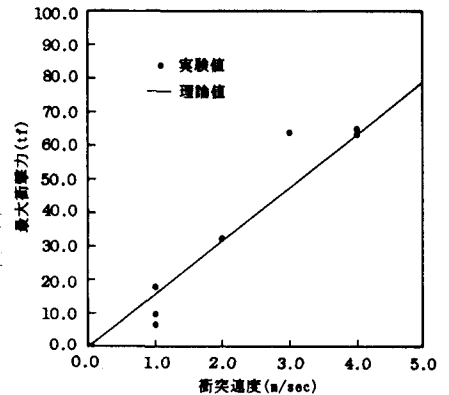


図-5 最大衝撃力と衝突速度の関係図

本研究では、 $E=300000\text{kg/cm}^2$, $\nu=0.2$, $a=4.9\text{cm}$, 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。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。図-4 に実験値および理論値における最大衝撃力と衝突速度との関係を示す。実験データ量が不足しているが、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。

4 まとめ

鉄筋コンクリート構造物の耐衝撃性検討の1つとして、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。

重錘の加速度や鉄筋部の歪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、また衝撃力の算定を行った。特に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ようである。

今後はさらに実験を重ね、種々の理論解析と比較検討を行う予定である。

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 Rainforced 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). 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.
- 5). 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.
- 6). 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.
- 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). 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.