

[160] 鉄筋コンクリートスラブの衝撃応答特性について

正会員 ○大沼博志（電力中央研究所）

伊藤千浩（電力中央研究所）

岸徳光（室蘭工業大学）

能町純雄（北海道大学工学部）

1. まえがき

原子力発電所の格納施設建屋の設計は、従来、地震荷重、仮想事故時の圧力上昇、温度上昇等を主要な荷重とし行われてきたが、仮想事故時に再循環ポンプのインペラ破片、低圧タービンの動翼などが飛来物となることが想定され、これらの飛来物に対する耐衝撃性を検討して構造物の安全余裕度を確認しておく必要があると思われる。また、この外にコンクリート構造物が受ける衝撃としては、道路や鉄道におけるロックシェッドへの落石、橋脚、電柱への車の衝突、海洋構造物への船舶の衝突など数多くのものが考えられる。鉄筋コンクリートは、コンクリートと鋼材の複合材料であるため、その衝撃応答は極めて複雑である。また、その設計に際しては、終局耐力を考慮しなければならないので、塑性的挙動や破壊現象が問題となり、解析、数値シミュレーションもまた複雑となる。このため、衝撃荷重を受けるコンクリート構造物の設計方法はいまだ十分に確立されていないのが現状である。

本研究は、これらの鉄筋コンクリート構造物の耐衝撃性を解明し、さらに耐衝撃設計法を確立するための基礎資料を得る目的で、鉄筋コンクリート製スラブによる衝撃実験を実施して、終局耐力、破壊モード、応力波の伝播などについて検討したものである。

2. 実験の概要

(a) 衝撃荷重載荷装置 図-1に示すように、この装置の載荷方式はN₂圧縮ガスを用いて鋼製のハードな模擬飛来物を鉄筋コンクリートスラブに高速で衝突させるものである。模擬飛来物は鋼製の円柱（径9.8cm）であり、衝突速度（最大50M/sec）、重量（最大150kg）、および先端形状は可変であるが、全ての実験を通して、重量を70kg、先端の形状を平担と一定にし、衝突速度を変えて実験を行った。また、模擬飛来物の速度は、N₂ガスの圧力により制御し、光電式速度計によって計測した。

この衝撃試験の支持条件は、試験体の端から12.5cmに鉄板を設置して、支持台とボルトで締めつけて四辺を固定する方法を用いた。

(b) 鉄筋コンクリートスラブ 衝撃実験に用いたスラブの諸元を表-1に示す。スラブの寸法は150cm×150cmであり、厚さは10cm、20cmおよび30cmの3種類とした。配筋はコンクリート製格納容器を対象としているので複鉄筋断面とし、鉄筋比を片側1%とした。このほかに、コンクリート強度の異なるもの1種類と厚さ2.4mmの鋼ライナーを取り付けたものについて実験を行った。コンクリートの配合を表-2に、また、代表的な配筋図を図-2に示す。

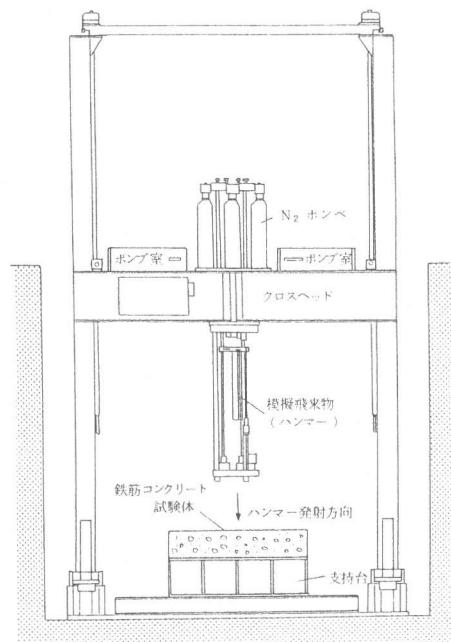


図-1 衝撃荷重載荷装置

表-1 試験体の条件

記号	厚さ	鉄筋		コンクリートの 設計基準強度	鋼ライナー の有無	数量
		鉄筋比-本数	鉄筋比			
SLB-10	10cm	D6-3本/10cm	0.95%	240kg/cm ²		6体
SLB-20	20	D13-1.5	0.95	240		6
SLB-30	30	D16-1.5	0.99	240		4
HiSLB-20	20	D13-1.5	0.95	420		4
LiSLB-20	20	D13-1.5	0.95	240	鋼ライナー (厚さ2.4 mm)	4

(c) 計測装置

計測装置の

フロー チャートを図-3に示す。

模擬飛来物の側面と鉄筋には2mmの箔ひずみゲージを、また、コンクリート裏面には5mmの箔ひずみゲージを接着し、入力波、ひずみを測定した。

測定されたデータは一度データレ

コーダに収録した後、オフラインでウェーブメモリー(8bit, 最小サンプリングタイム1μsec)を用いて、フットコーダーやシンクロスコープによって再生した。

なお、応答周波数が極めて高いために、衝撃現象に追従できる高感度の変位計がなかったので、この衝撃実験では、変位の時間履歴は得られていない。

3. 実験結果と考察

(a) 衝撃力

衝撃力を精度良く計測すること

は難かしいが、ここでは模擬飛来物の側面に貼ったひずみゲージより求められる履歴曲線から、衝撃力の最大値はひずみの最大値に鋼の静的ヤング係数と模擬飛来物の断面積をかけて求めたものである。3種の厚さの鉄筋コンクリートスラブで得られた衝撃力と衝突速度の関係を図-4に示す。後述するように、この衝撃実験では、スラブの破壊形態は全て押抜きせん断であり、角田式より算定した静的な押抜きせん断耐力(10cm厚の場合: 26トン、20cm厚の場合: 69トン、30cm厚の場合 117トン)と比較すると、鉄筋コンクリートスラブは相当に大きな衝撃荷重に耐え得ることが明らかにされた。また、衝撃力は衝突速度の増加に伴ってほぼ直線的に増大しており、スラブ厚さごとに得られたこれらの直線はほぼ平行であることが示された。

(b) ひびわれ発生と破壊モード

一般に衝撃

荷重によって構造物に生ずる破壊モードは大きく、二種類に分けて考えられている。1つは局所的破壊といわれるもので、主に硬質な物体が高速で衝突した場合に生じ、衝撃のエネルギーが構造物によって局所的に吸収され、破壊の範囲が衝突部付近に集中する破壊である。もう1つは全体的破壊といわれ、重量が比較的大きな物体が低速で衝突したときに生じ、構造物全体で衝突のエネルギーを吸収するので、衝突個所の破壊はわずかではあるが、構造物全体としての健全性が問題になるような破壊である。図-5にコンクリートスラブにおいてみられる典型的な破壊パターンを示すが、a) b) c)が局所的、d)が全体的破壊に相当するものである。

この衝撃実験における破壊モードは全て押抜きせん断によるものであった。

厚さ10cmと20cmの鉄筋コンクリートスラブの上面は、衝突速度が大きい場合に

表-2 コンクリートの示方配合

種別	設計基準強度	粗骨材の最大寸法(mm)	スランプ(cm)	空気量(%)	W/C	細骨材率S/A(%)	単位量(kg/m³)					使用試験体
							セメントC	水W	細骨材S	細骨材G	混和材(ボルトスケル)G	
A	240	10	18.0	4.0	53.5	52.9	335	179	924	824	0.838	SLB-10
B	240	25	18.0	4.0	51.5	44.8	324	167	797	991	0.810	SLB-20, 30 LiSLB-20
C	420	25	18.0	4.0	37.0	39.6	473	175	656	999	1.183	HiSLB-20

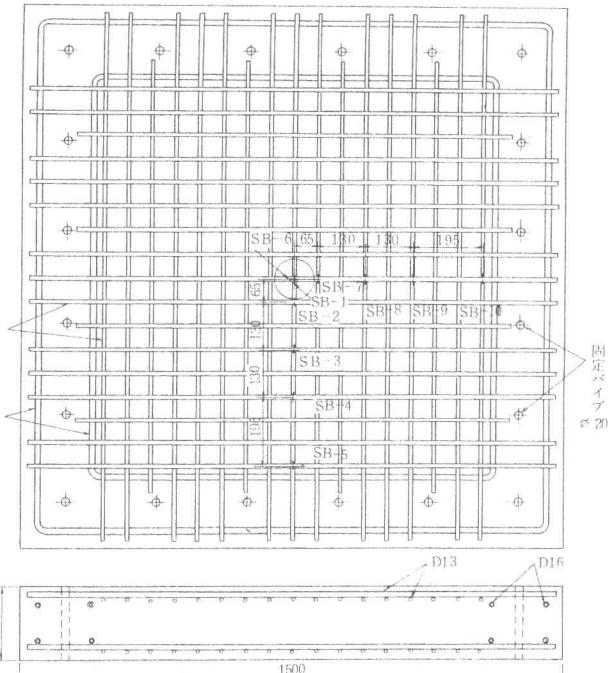


図-2 スラブの配筋図(SL-20)

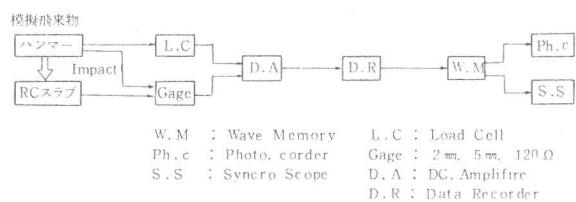
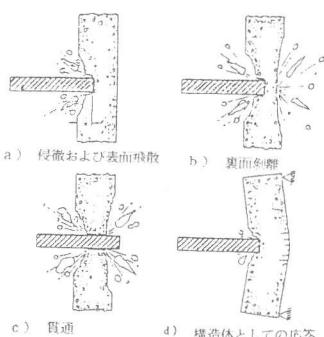


図-3 計測装置



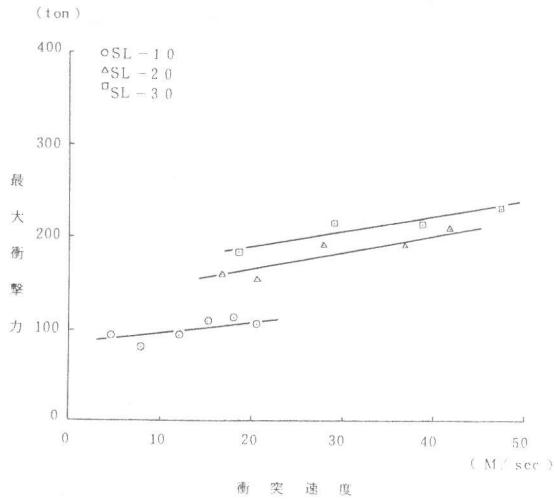


図-4 最大衝撃力と衝突速度の関係

は、放射状のひびわれがわずかに発生することもあるが衝突面以外はほとんど損傷を受けない。一方、厚さ30cmで速度30M/sec以上の場合には表面飛散が見られた。スラブの裏面は速度の小さい場合でも押抜きせん断によるクラックが円周状と放射状に発生し、速度が大きくなると裏面剥離が起り、さらに速くなると貫通するという現象が表われた(写真-1)。裏面剥離の形状は鉄筋が曲がることによる影響を受け、例えば厚さ10cmのスラブの場合には最下面に配置した鉄筋の方向に大きな裏面剥離が生じた(写真-2)。

(c) 侵徹深さ

侵徹深さと衝突速度との関係を図-6に示す。この図から侵徹深さはほぼ速度の2乗、すなわち運動エネルギーに比例する。従って、衝撃荷重によって生じる塑性変形はエネルギー的な観点からアプローチすることが有効であると思われる。厚さ10cmおよび20cmのスラブの貫通速度はそれぞれおよそ20M/secおよび40M/secであった。一方、厚さ30cmの場合には、約50M/secの衝突速度に対して、裏面剥離や貫通が生じなかった。また、コンクリート強度が高いほど、侵徹深さは小さくなるが、裏面剥離しやすい傾向にあることが明らかにされた。ライナーを有するスラブの場合には、ライナ・面を衝突面とする場合と裏面とする場合の2種類に対して衝撃実験を行った。ライナ・面を衝突面とする場合には侵徹深さが減少し、また、裏面とする場合には裏面剥離が抑制されるという利点のあることが示された。

コンクリート構造物の耐衝撃性を評価し、それを耐衝撃設計に活用するためには、任意の重量、形状、速度の飛来物が衝突した場合の侵徹深さ、裏面剥離や貫通の限界を推定することが必要である。これまでの研究で、最も有効であるといわれているのは修正NDRC式であり、侵徹深さ(x)は次式によって与えられる。²⁾また、侵徹深さの関数で裏面剥離と貫通の限界壁厚が与えられている。

$$G(x/d) = KNd^{0.2} D(V/1000)^{1.8}$$

ここで、 d 、 D および V はそれぞれ飛来物の直径、口径密度、および衝突速度である。また、 K はコンクリート

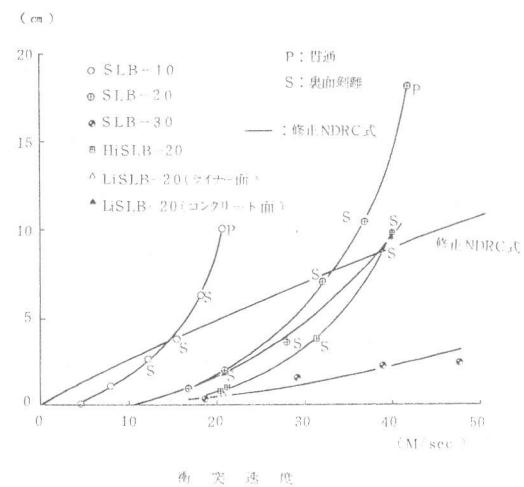


図-6 侵徹深さと衝突速度の関係

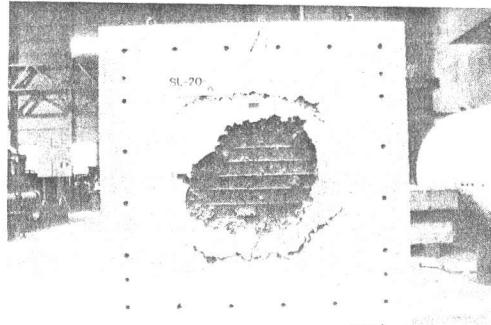


写真-1 裏面剥離の状況 (SL-20)

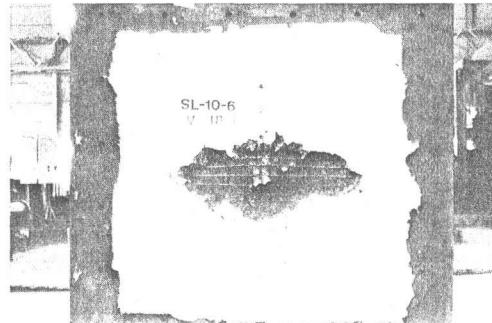


写真-2 裏面剥離の状況 (SL-10)

の圧縮強度に依存する係数であり、 N は飛来物先端の形状係数である。コンクリートの圧縮強度を 300 kg/cm^2 とした場合、修正 NDRC 式による算定値は図-6 に示す通りである。裏面剥離や貫通を生じない状態においては、修正 NDRC 式は控え目の算定値を与えることがわかる。これは修正 NDRC 式が鉄筋の影響を全く無視したことと、本実験よりも高速度の飛来物を対象としていることによるものと思われる。

(d) 鉄筋ひずみの衝撃応答 図-7 に下端の鉄筋ひずみ (SB) および、模擬飛来物の側面より得られたひずみ (GM) の衝撃直後における (1 m sec) 時間履歴を示す。GM は、衝突後 $100 \mu\text{sec}$ 付近で最大値を示し、約 $500 \mu\text{sec}$ 後にゼロとなる。一方、この間の鉄筋ひずみの履歴から衝撃直後における RC スラブの過渡応答が明瞭に示されている。各々の鉄筋ひずみは立ち上がり時間の遅れを生じており、衝撃応力波が衝突面から周辺に向って伝播している様子が解かる。また、ひずみの最大値から応力波は周間に伝播するに従って、次第に減衰することが示されている。SB 2, SB 3 の波形は衝突面に近いために多少複雑であるが、衝撃力が作用した直後に圧縮ひずみが生じてから、その後引張ひずみに変化している。このように下端の鉄筋に圧縮力が発生することは静的試験では普通みられないことであり、衝撃応答に特有の現象であると考えられる。³⁾ この現象は RC はりの衝撃試験でも表われており、これは応力波の伝播速度が有限であるので、衝撃直後においては RC スラブ中に応力波が伝播している部分と、まだ伝播していない部分が生じ、後者がそれ自身の慣性抵抗によって、その境界に固定端を生じるために下端の鉄筋に圧縮力が作用するものと考えられる。

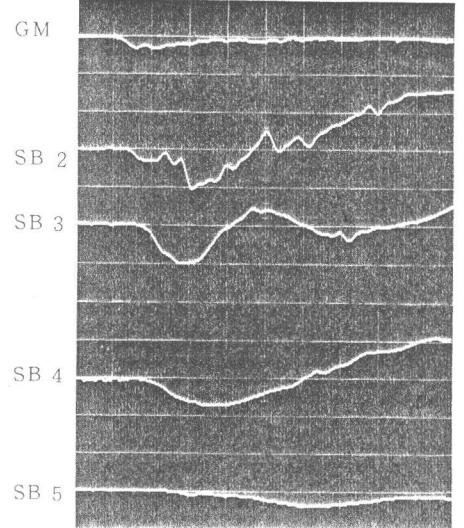
4. 結論

重量 70 kg 、衝突速度 50 m/sec 以下のハードな模擬飛来物を用いた鉄筋コンクリートスラブの衝撃実験から次の結論が得られた。

- (1) 鉄筋コンクリートスラブにハードな模擬飛来物を衝突させる場合には、スラブは押抜きせん断によって破壊し、また予想されたように最大衝撃力は静的な押抜きせん断耐力よりも相当に大きいことが示された。
- (2) 鉄筋コンクリートスラブの侵徹深さは衝突速度の 2 乗、すなわち運動エネルギーに比例することが明らかにされた。また、侵徹深さの算定に従来よく用いられてきた修正 NDRC 式は本実験結果よりも著しく控え目の算定値を与えることが示された。従って、鉄筋の影響を考慮に入れた算定式が必要であると考えられる。
- (3) スラブ下端の鉄筋ひずみは、衝突直後に圧縮ひずみが生じるなど衝撃に特有な応答履歴が得られた。この現象は応力波の伝播から定性的に説明することができた。

参考文献

- 1) 角田、井藤、藤田、"鉄筋コンクリートスラブの押抜きせん断耐力に関する実験的研究", 土木学会論文報告集 第 22 号, 1974 年 8 月
- 2) R.P., Kennedy, "A Review of Procedures for the Analysis and Design of Concrete Structures to Resist Missile Impact Effects", Nuclear Engineering and Design 37, (1976)
- 3) 伊藤、大沼、佐藤、高野、"衝撃荷重による鉄筋コンクリート梁部材の動的応答", 電研報告, 1984



ひずみスケール：
GM: $2500 \mu\text{e}/1\text{ワード}$
SB 1~5: $1000 \mu\text{e}/1\text{ワード}$

時間スケール：
 $100 \mu\text{sec}/1\text{ワード}$

図-7 ひずみの応答履歴