

[191] 鋼繊維補強コンクリート床版の衝撃応答特性

正会員 ○ 伊藤 千 浩 (電力中央研究所)
 正会員 大沼 博 志 (電力中央研究所)
 山本 宗 一 (C R S)
 能 町 純 雄 (日本大学生産工学部)

1. はじめに

原子力発電所格納施設は地震荷重や仮想事故時の圧力、温度上昇などの荷重条件を考慮して設計が行われている。当所では、そのような荷重条件下で設計されたコンクリート製格納容器が衝撃荷重に対して保有している安全余裕度を検討するために、これまで鉄筋コンクリート製の梁¹⁾、床版²⁾およびプレストレストコンクリート製の梁³⁾、床版⁴⁾を用いた衝撃実験を行ってきた。

本報告は、これらの実験に引き続き鋼繊維が衝撃特性に与える影響を明らかにするため、鋼繊維により補強された床版を用いた衝撃実験を実施し、衝撃力、破壊形態等についての検討を行った。さらにコンクリート構造物の耐衝撃設計において重要な要因となる裏面剝離限界速度および貫通限界速度に与える鋼繊維の影響について検討を加えた。

2. 実験概要

2.1 衝撃荷重装置

実験装置の概略図を図-1に示す。載荷方法は圧搾N₂ガスによりハンマーを試験体に所定の速度で衝突させて行う。衝突速度はガス圧によって調整し光電管式速度計によって計測する。ハンマーは鋼製の円柱(φ9.8cm)で重量は70kgfである。

2.2 試験体

実験に用いた床版の諸元を表-1に示す。床版の寸法は4種類とも150cm×150cmであり、厚さは20cmとした。鉄筋コンクリート床版と鋼繊維補強鉄筋コンクリート床版の配筋図を図-2に示す。これらの床版は端部を鉄板(幅12.5cm)を介して支持台にボルトによって固定した。

2.3 計測装置

計測のフローを図-3に示す。ハンマーの側面と鉄筋およびコンクリート表面にひずみゲージを貼付し動的ひずみを測定した。測定されたデータは一度データレコーダーに収録した後、オフラインでウェブメモリー(8 bit, 最小サンプリグタイム 1μsec)を用いてAD変換し、シンクロスコープや電磁式オシログラフによって再生した。

3. 実験結果および考察

4種類の床版に対しハンマーの衝突速度を変化させて実験を行った。実験結果の概要を表-2に示す。

3.1 衝撃荷重

ハンマーが試験体に衝突した時に生ずる最大衝撃荷重はハンマーの側面に貼付したひずみゲージより得られるひずみの履歴曲線より求めることとした。すなわち、最大荷重は最大ひずみにハンマーの断面積と鋼の弾性定数をかけて求めた。図-4に衝突速度と最大衝撃荷重との関係を示す。この図に示されているように衝撃荷重と衝突速度の関係は4種の床版ではほぼ同様な関係となっている。衝突速度が10 m/sec以上のところでは、速度の増加にともなって最大衝撃荷重は直線的に増大している。また、衝突速度が10

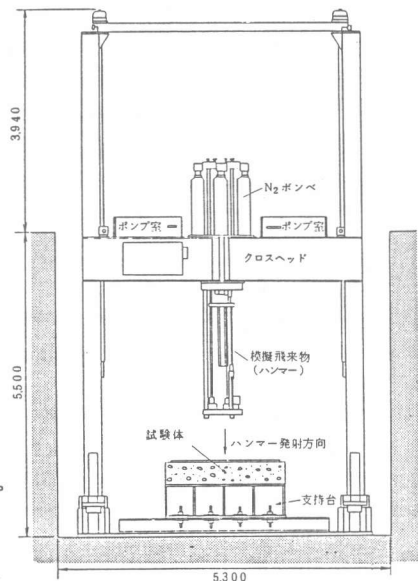


図-1 衝撃荷重装置

m/sec以下の場合については実験結果が少ないため断言は出来ないが、この範囲内ではハンマーと床版には弾性衝突が生じていると考えられ、衝突速度と最大荷重はほぼ直線的な関係にあるものと考えられる。

3.2 破壊形態

衝突速度と破壊形状の関係を表-4に示し、図-5に各床版における代表的な破壊形態を示す。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2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の比較的大きな物体が低速で衝突した時に生じ、構造物全体で衝突のエネルギーを吸収するので、衝突箇所の破壊はわずかであるが、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。

3.2.1 鋼繊維が破壊形状に与える影響

図-5に示したように鋼繊維によって補強された床版と補強されていない床版に対し、ほぼ同じ速度でハンマーを衝突させた場合、鋼繊維によって補強された床版(b),(d)はクラックが生じているもののコンクリートの剥離は鋼繊維によって抑えられている。さらに表-2および表-3に示したように鋼繊維によって補強されたコンクリート床版には、2種類(鋼繊維補強コンクリート、鋼繊維補強鉄筋コンクリート)とも、裏面剥離が生じず、破壊形状は‘ひびわれ’と‘貫通’のみとなる。裏面剥離は衝撃現象に特有の破壊形態で、衝突面に生じた応力波(圧縮波)が表面に到達し引張波となってコンクリートを剥離させる現象である。このとき、衝突面の貫入深さが僅かであっても、裏面側に重要な機器がある場合、それらに損傷を及ぼす危険性がある。今回の実験結果から鋼繊維が裏面剥離防止上、非常に有効であることが明らかとなり、コンクリート構造物そのものの耐衝撃性のみならず、その中に設置されている重要機器の安全性を高める上で有用な結果を得ることが出来た。

3.2.2 貫通限界速度

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適用するためには、任意の重量、形状、速度を持った飛来物が衝突した場合の裏面剥離限界や貫通限界の発生有無を推定することが必要である。3.2.1で、鋼繊維によって裏面剥離が防止されることが明らかとなったので、本報告では貫通限界厚さについて検討を行うこととする。貫通限界厚さとは、ある速度

表-1 試験体の諸元

床版の種類	記号	鉄筋		鋼繊維 (異形加工切断ファイバー)	コンクリート 設計基準強度	試験 体数
		鉄筋径-本数	鉄筋比			
無筋コンクリート床版	PL	無	—	無	240 (kgf/cm ²)	4(体)
鉄筋コンクリート床版	RC	D13-1.5本/10cm	0.95%	無	240 (kgf/cm ²)	9(体)
鋼繊維補強 コンクリート床版	FC	無	—	φ0.6×60mm, 78.5 kgf/m ²	240 (kgf/cm ²)	7(体)
鋼繊維補強 鉄筋コンクリート床版	FR	D13-1.5本/10cm	0.95%	φ0.6×60mm, 78.5 kgf/m ²	240 (kgf/cm ²)	4(体)

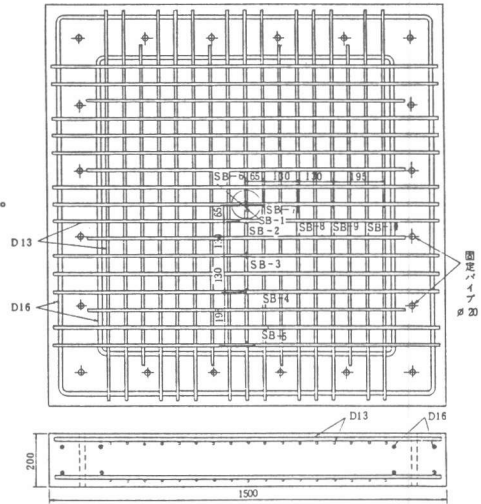


図-2 スラブの配筋図 (SL-20)

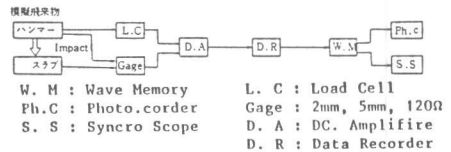


図-3 計測装置

表-2 実験結果の概要

		衝突速度 (m./sec)		最大衝撃荷重 (ton)	貫入量 (cm)	裏面破壊状態
		1	2			
無筋 コンクリート 床版	1	4.6	7.9	0.1	0.1	ひびわれ
	2	11.4	1.38	0.3	0.3	裏面剥離(全体)
	3	13.2	1.40	0.4	0.4	裏面剥離(全体)
	4	19.4	1.84	20.0	20.0	貫通
鉄筋 コンクリート 床版	1	4.6	65	0.1	0.1	ひびわれ
	2	16.8	1.60	0.9	0.9	ひびわれ
	3	20.8	1.54	2.0	2.0	裏面剥離(一部)
	4	27.9	1.90	3.6	3.6	裏面剥離(全体)
	5	32.0	—	7.0	7.0	裏面剥離(全体)
	6	32.0	1.80	7.6	7.6	裏面剥離(全体)
	7	36.8	1.90	10.4	10.4	裏面剥離(全体)
	8	41.8	2.10	18.1	18.1	貫通
鋼繊維補強 コンクリート 床版	1	4.5	72	0.1	0.1	ひびわれ
	2	12.2	1.37	0.3	0.3	ひびわれ
	3	16.4	1.45	0.7	0.7	ひびわれ
	4	16.4	1.53	0.4	0.4	ひびわれ
	5	17.5	1.55	1.0	1.0	ひびわれ
	6	19.8	1.57	6.0	6.0	ひびわれ
	7	22.7	1.73	20.0	20.0	貫通
鋼繊維補強 鉄筋 コンクリート 床版	1	4.5	69	0.0	0.0	ひびわれ
	2	18.6	1.40	1.3	1.3	ひびわれ
	3	21.7	1.67	1.6	1.6	ひびわれ
	4	28.9	1.77	3.1	3.1	ひびわれ
	5	38.17	2.16	20.1	20.1	貫通

を持った飛来物の貫通を防ぐことの出来る最低の板厚のことである。したがって、この板厚以上では貫通が発生することはない。この限界厚さの評価に関する検討は、1900年代に入って、主に軍事関係の方面⁵⁾から検討されており、近年においては、仏国で国家的なプロジェクトとして貫通限界厚さに対する実験研究が進められている⁶⁾。当所においても、鉄筋コンクリート床版を用いた実験結果をもとに貫通限界厚さを求める評価式を提案した。

$$t_e = 0.90 \left(\frac{V_0}{V} \right)^{0.25} \cdot \left(\frac{M V^2}{d f'_c} \right)^{0.5}$$

- t_e : 貫通限界厚さ (cm)
- V₀ : 基準速度 (60.96m/sec)
- M : ハンマーの質量 (kg·sec²/cm)
- d : ハンマーの直径 (cm)
- f'_c : コンクリート強度 (kg/cm²)
- V : 衝突速度 (cm/sec)

上式において t_e=20cm として衝突速度を求めると、20cmの床版に貫通を生じせしめる最低の速度(貫通限界速度)を与える。このようにして得られ

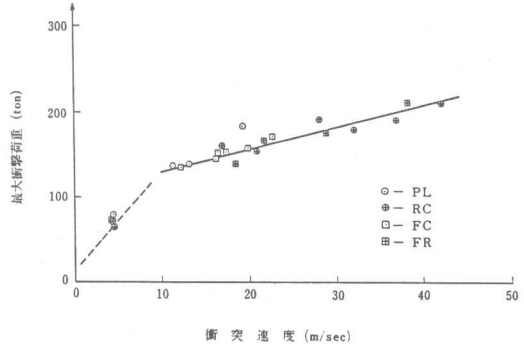


図-4 衝撃力と衝突速度の関係

表-3 衝突速度と破壊状態

無筋 コンクリート床版	○ ● ● ●	○ : ひびわれ ● : 表面剥離
鋼繊維補強 コンクリート床版	○ ○ (X) ○ ●	● : 貫通
鉄筋 コンクリート床版	○ ○ ● ● ● ● ● ●	
鋼繊維補強 鉄筋 コンクリート床版	○ ○ ○ ○ ●	

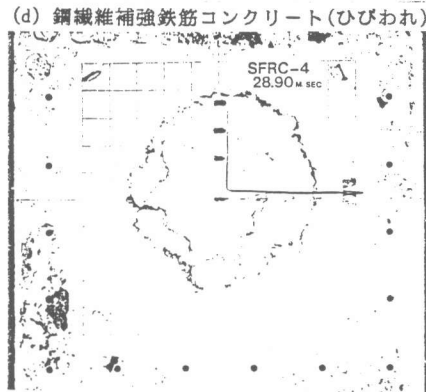
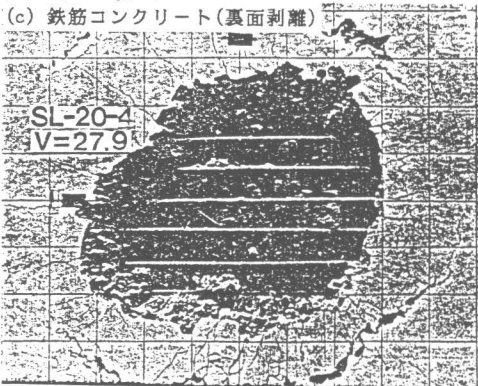
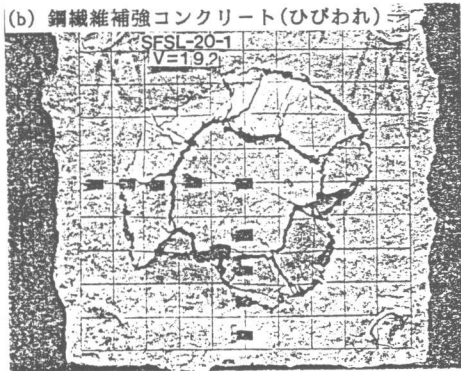
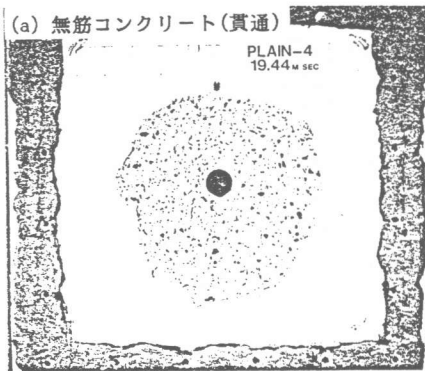


図-5 鋼繊維が破壊形状に与える影響

た貫通限界速度を4種類の床版について求めると表-4のようになる。(1)式は鉄筋コンクリート床版に対する衝撃実験より導かれたもので、表-4に示されているように無筋の床版に対しては危険側の値を与えている。一方、剛繊維により補強された鉄筋コンクリートに対しては比較的精度よく貫通速度を推定していることがわかる(図-5参照)。

3.2.3 鉄筋ひずみ衝撃応答

図-7に鉄筋コンクリート床版および鋼繊維補強鉄筋コンクリート床版の下側鉄筋ひずみ および、ハンマー軸方向ひずみの衝突直後における(約2msec)時刻歴波形を示す。この図には、鉄筋ひずみがハンマー衝突部から離れるにしたがって、その立上りに時間遅れが生じ、衝撃力がハンマー衝突部から周辺に向かって伝播している様子が明瞭に示されている。また、両床版の鉄筋ひずみの衝撃応答の定性的傾向はよく一致していることがわかる。しかし、その絶対値についてみると鉄筋コンクリート床版の方が大きくなっており、床版に伝えられた衝撃力の一部が鋼繊維によって負担されていることが示されている。

4. 結論

衝撃応答に与える鋼繊維の影響について以下のことが明らかになった。

- (1) 衝撃力に与える鋼繊維の影響は見られない。
- (2) 鋼繊維はコンクリートの裏面剥離を防ぐ効果がきわめて大きく耐衝撃上有用な材料である。
- (3) 鉄筋コンクリートに対して適用された貫通限界厚さを求める評価式は、鋼繊維により補強された鉄筋コンクリート床版に対しても十分適用が可能である。
- (4) 衝撃を受けた床版の過渡応答において、鋼繊維は、その定性的傾向には影響を及ぼさないが鉄筋に発生するひずみを低減することが示された。

参考文献

- 1) OHNUMA, H., ITO, C., TAKANO, H., and NOMACHI, S.G., "RC Beam Response Due to Impact by Moderate Speed Gun", Theoretical and Applied Mech., Vol.33(1985).
- 2) OHNUMA, H., ITO, C., KISHI, N., and NOMACHI, S.G., "Impact Behaviors of Reinforced Concrete Slabs", Trans. JCI(1984).
- 3) 伊藤, 大沼, 能町, "プレストレストコンクリート梁の衝撃応答", 第35回応用力学連合講演会予稿集
- 4) OHNUMA, H., ITO, C., "Experiment and FEM Analysis of Impact Behavior of Prestressed Concrete Slabs Subjected to a Hard Projectile", Trans. JCI 1985.
- 5) Kennedy, R.P., "A Review of Procedures for the Analysis and Design of Concrete Structures to Resist Missile Impact Effects", Nuclear Engineering and Design 37, (1976).
- 6) Gueraud, R., et al, "Study of the perforation of Reinforced Concrete Slabs by Rigid Missile", Nuclear Engineering and Design 41, 1977.

表-4 貫通限界速度

床版	実験(m/sec)	計算(m/sec)
無筋コンクリート床版	19.4	46.4
鋼繊維補強コンクリート床版	22.7	38.1
鉄筋コンクリート床版	42.2	41.7
鋼繊維補強鉄筋コンクリート床版	38.2	33.1

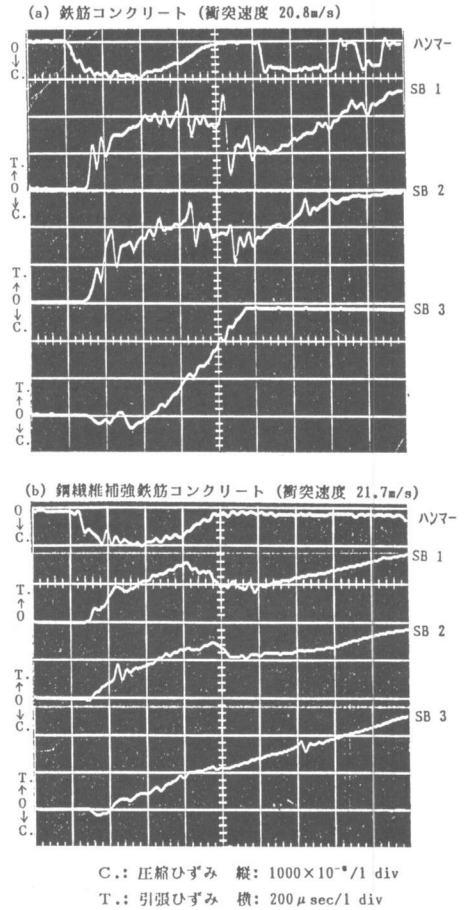


図-6 鉄筋ひずみ衝撃応答