

## [33] 衝撃荷重下のコンクリートの変形と破壊に関するエネルギー的考察

正会員 小 柳 裕 (岐阜大学工学部)

正会員 六 郷 恵 哲 (岐阜大学工学部)

正会員 〇内 田 裕 市 (岐阜大学大学院)

正会員 岩 瀬 裕 之 (岐阜大学大学院)

## 1. まえがき

港湾構造物における船舶の衝突、道路施設や屋内駐車場等における自動車の衝突、あるいは原子力発電所建屋における飛来物の衝突など、衝撃荷重に対して考慮しなければならないコンクリート構造物は少なくない。しかしながら、衝撃荷重を受けるコンクリート構造物の設計方法は今だ十分には確立されていない。これはコンクリートの衝撃破壊性状の解明が十分に行われておらず、またその評価方法も確立されていないためと考えられる。

本研究は、コンクリートの衝撃破壊性状の解明とその評価方法の確立を目的とするものであり、曲げ供試体を対象に、衝撃破壊時のエネルギーの変換過程について実験的に検討したものである。

## 2. 実験方法

(a) 概要 主にモルタル曲げ供試体(M-1, M-2 シリーズ)を対象に、落錘式衝撃試験を行い、供試体のひずみ、加速度、ならびに落錘の加速度を計測することによって、供試体の破壊時のたわみ、ひずみエネルギー、運動エネルギー、吸収エネルギーおよび消散エネルギーを算定した。また、静的曲げ載荷試験もを行い、衝撃破壊時と静的破壊時の消散エネルギーを比較検討した。さらに、比較のために鋼繊維補強コンクリート(Fシリーズ)についても同様の衝撃ならびに静的試験を行った。

(b) 載荷方法 曲げ供試体の寸法はすべて  $7.5 \times 7.5 \times 66.0$  cm とした。載荷スパンは 60 cm とし、中央集中載荷とした。落錘式衝撃試験の概要を図-1 に示す。供試体の両支点上には、衝撃時の供試体の浮上りを防止するため、それぞれ 30 kg の重りを置いた。落錘の質量は M-1 シリーズの場合 5.0 kg、M-2 シリーズでは 2.8 kg、また F シリーズでは 14.1 kg とした。なお、供試体と落錘の間には厚さ 3 mm の硬質ゴム板を置き、落錘と供試体の接触時間を長くした。

本試験は各供試体に衝撃を 1 回だけ加える試験であり、モルタル供試体ではちょうど 1 回の衝撃で供試体が破断する落錘の最小の高さを基準にとり、この高さを変化させて供試体が破壊しない場合および激しく破壊する場合についても計測を行った。また、鋼繊維補強コンクリート供試体については、1 回の衝撃で目視ひびわれが供試体の上縁近くまで達するような破壊を生ずる場合について計測を行った。

落錘に取付けた加速度計(容量: 1000g, 周波数範囲: 0~5000Hz)、供試体下縁スパン中央から 1.0 cm だけ支点側に取付けた加速度計、および供試体上縁に貼付した電気抵抗線ひずみゲージ(ゲージ長: 20 mm)は、ストレインアンプ(周波数範囲: 0~2500 Hz)を介し、デジタルウェーブメモリー(最小サンプリング間隔: 1  $\mu$  sec, サンプリング数: 1024 個)に接続した。なお、電気抵抗線ひずみゲージの貼付位置は、供試体の破壊後も剥離あるいは破断を生じないように、圧縮縁スパン中央から 10 cm 離れたところとした。またウェーブメモリーのサンプリング間隔は、加速度計とストレインアンプの周波数範囲および供試体の破壊時間を考慮して 20  $\mu$  sec とした。ウェーブメモリーに記憶したデータは、一旦 X-Y レコーダに出力させ各波形を確認したのち、マイコンを介してフロッピーディスクに記憶させ、その後の計算処理に用いた。

静的曲げ試験では、載荷スパンを 60 cm とし中央に集中載荷した。供試体が破断するまでの下降域を含めた完全な荷重変位曲線を計測し、これより静的破壊時の消散エネルギーを求めた。

(c) たわみ・エネルギー・荷重の算定 予備実験により、今回の実験の範囲内では衝撃時の供試体の軸方向

のひずみ分布は作用曲げモーメントに比例し、静的荷重下の場合と同様であることが認められた。これに基づき、本実験ではスパン中央のたわみを、圧縮縁のひずみをもとに曲げ剛性を一定として算定した。また、供試体下縁の加速度を2回積分することによっても供試体の中央のたわみを算定した。

供試体全体のひずみエネルギーは圧縮縁のひずみをもとに算定した。供試体の運動エネルギーは、供試体のたわみ分布が静的荷重下の場合と同様であり、速度分布がたわみ分布に比例すると仮定し、供試体の加速度を1回積分して得られる速度をもとに求めた。落錘の加速度からは、衝撃時の落錘の運動エネルギーを求め、衝撃後、落錘がはね上がるかどうかを確認した。また落錘の衝撃後のマイナスの加速度に落錘の質量を乗じたもの（供試体からの反力）を供試体への衝撃荷重とした。さらに供試体の衝撃破壊時の吸収エネルギーは、供試体の加速度から得られたたわみで衝撃荷重を積分することによって求めた。なお、M-1シリーズでは落錘の加速度を計測していない。

### 3. 結果と考察

(a) 変形と荷重 図-2に衝撃破壊時の加速度ならびにひずみの実測例を示す。図-3にはそれらのデータを処理した結果を示す。図-4には静的曲げ試験時の荷重変位曲線を示す。なお、コンクリートの静的強度は、モルタルでは圧縮強度 60.8 (MPa) 曲げ強度 7.1 (MPa) であり、鋼繊維補強コンクリートでは圧縮強度 3.41 (MPa), 曲げ強度 8.7 (MPa) であった。表-1に衝撃試験結果をまとめて示す。

モルタル供試体では、供試体の加速度から求めたたわみと、ひずみから求めたたわみとは、立上がりから最大ひずみ点に達するまでよく一致した(図-3(a)(b))。また、破壊を生じず振動をする場合には、最大ひずみ点以後も両者はよく一致していた。このことより、衝撃時の供試体の変位は供試体の加速度を積分することによってもかなりの精度で求められることがわかる。なお、図-3(b)に示すように供試体が破壊する場合には、圧縮縁のひずみは解放されてしまうため、破壊した後の供試体のたわみをひずみから求めることはできない。

鋼繊維補強コンクリートの場合も、立上がりから最大ひずみの1/3程度までは加速度およびひずみから求めたたわみはよく一致していた。しかしその後は両者はかなり異っていた。鋼繊維補強コンクリートの荷重とたわみの関係は衝撃荷重下においても非線形な関係となり、このために曲げ剛性を一定と仮定してひずみから求めた

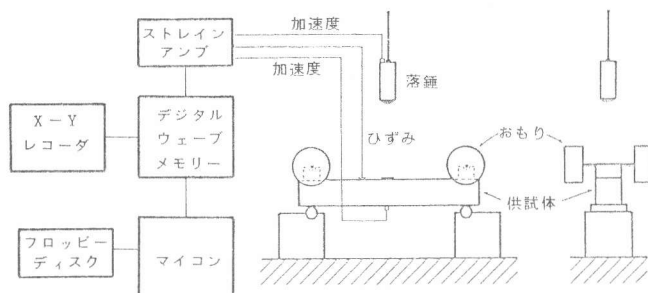


図-1 落錘式衝撃試験

表-1 衝撃試験の結果

供試体名	落錘質量 (kg)	落下高さ (cm)	落錘エネルギー (J)	最大ひずみ時のたわみ (mm)		衝撃時の最大荷重 (N)	破壊状況
				ひずみから求めた値	加速度から求めた値		
M-1-1		2.0	0.98	0.21	0.21	-	破壊しない
M-1-2	5.0	5.0	2.4	0.32	0.32	-	ちょうど破壊
M-1-3		6.5	3.2	0.29	0.25	-	激しく破壊
M-2-1		17.5	4.8	0.28	0.30	3090	破壊しない
M-2-2	2.8	20.0	5.5	0.29	0.29	3410	ちょうど破壊
M-2-3		25.0	6.8	0.28	0.30	3920	ちょうど破壊
M-2-4		35.0	9.6	0.28	0.27	5810	激しく破壊
F-1		14.1	20.0	27.6	0.35	1.54	10400
F-2	20.0	27.6	0.16	1.48	10600		

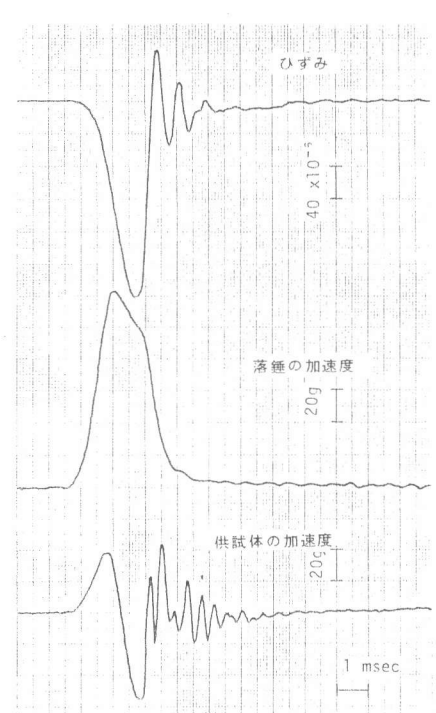


図-2 加速度とひずみの実測例(M-2-2)

わみは加速度から求めた 実際のたわみよりかなり小さくなったものと考えられる。

衝撃荷重下において 供試体が破壊する場合、ひずみが最大となる ときの加速度から求めたたわみは、モルタル、鋼繊維補強コンクリートのいずれの場合も、静的曲げ試験時の最大耐力点に対応するたわみ（モルタルの場合：0.20 mm、鋼繊維補強コンクリートの場合：0.73 mm）の1.5～2 倍となった。

落錘の加速度から求めた 供試体の衝撃破壊時の最大荷重は、静的試験時の最大荷重より大きく、衝撃速度が大きくなるに従って増加する 傾向を示した。しかし、M-2-2、M-2-3の供試体のようにちょうど1 回の衝撃で破断する場合には静的試験時の最大荷重と大差はなかった。また荷重が供試体に加わっている時間を破壊時間とすると、モルタル供試体の場合には破壊時間は3～4 m sec であり、鋼繊維補強コンクリートでは約1.0 m secであった。

(b)破壊時のエネルギー変換 コンクリートの衝撃破壊過程は、吸収エネルギーが供試体の運動エネルギーと供試体内部の回復性のひずみエネルギーおよび非回復性の消散エネルギーとに変換されるエネルギー変換過程としてとらえることができる。

図-3は、ちょうど1 回の衝撃で供試体が破断した場合の計測例であるが、供試体の破断と同時にひずみエネルギー（図-3(c)）が解放されるとともに運動エネルギー（図-3(d)）もなくなっている。すなわち、吸収エネルギーはすべて消散エネルギーに変換され、破壊後には運動エネルギーとひずみエネルギーは残っていない。

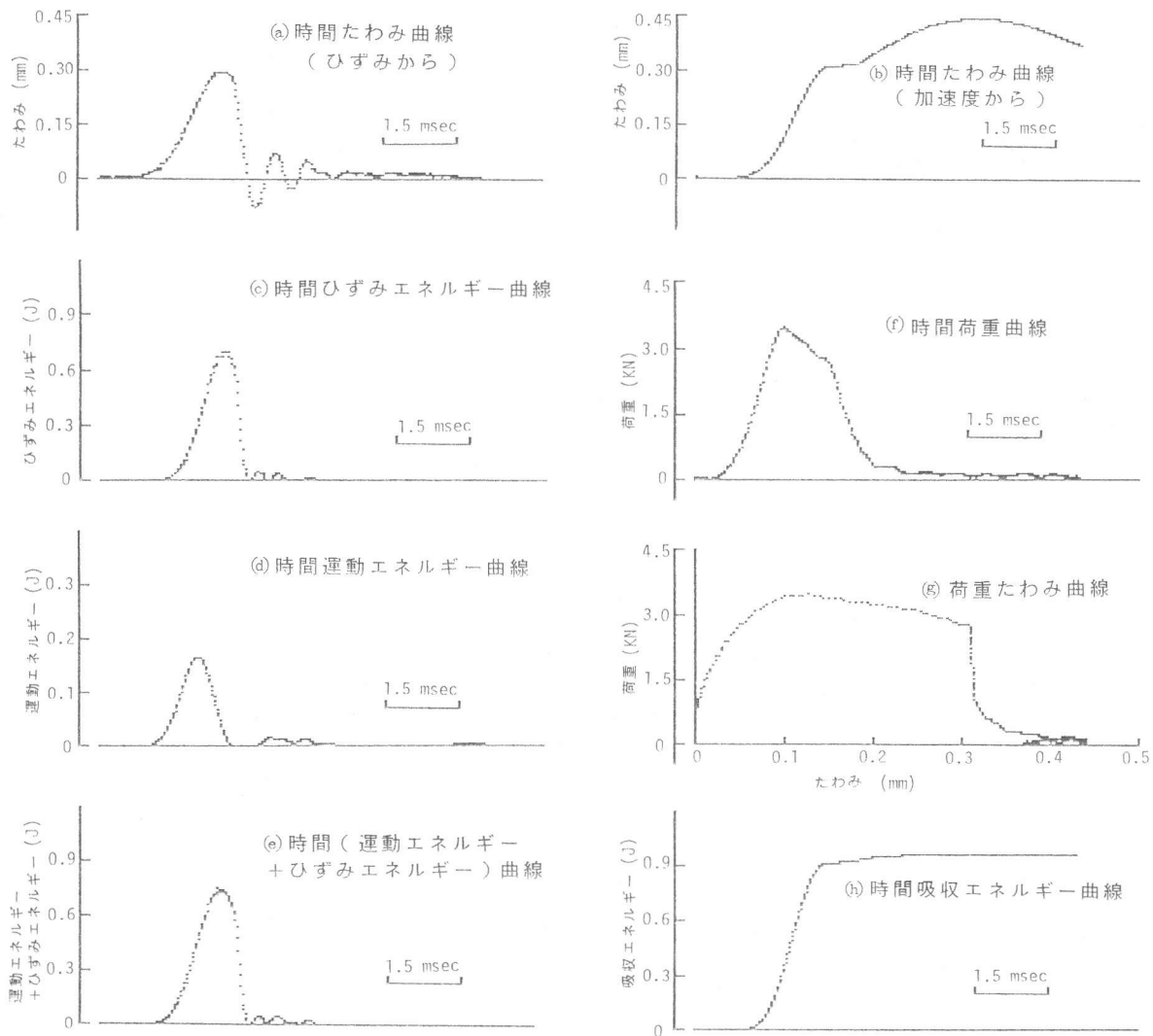


図-3 モルタル曲げ供試体の破壊時のたわみ・エネルギー・荷重(M-2-2)

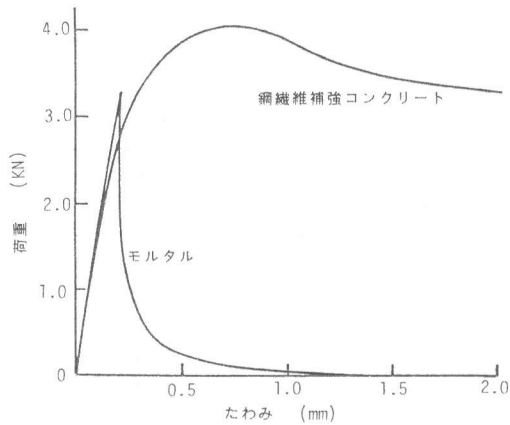


図-4 静的荷重下の荷重たわみ曲線

図-5には、破壊エネルギーよりも大きな落錘エネルギーが供試体に加わった場合の計測例を示す。図-5(a)ではひずみエネルギーが解放された後も運動エネルギーが残っている。非常にはげしい破壊を生じた図-5(b)の例では、加えられたエネルギーの一部は消散エネルギーに変換されるものの、さらに破断後もエネルギーが加えられたため、破断後に非常に大きな運動エネルギーが生じている。

(c)消散エネルギー 衝撃荷重をうけてある変形状態となったコンクリート供試体を考える。このとき、その状態に達するまでに消散エネルギーとして供試体内部で消費されたエネルギーは、その時点までに供試体が吸収したエネルギーから、その時点で供試体のもつひずみエネルギーと運動エネルギーを差引くことによって与えられる。表-2には衝撃破壊時および静的破壊時の消散エネルギーを示した。モルタルの場合には破断時の消散エネルギーを、鋼繊維補強コンクリート

の場合にはたわみが 1.0, 2.0, 3.0 mm に達した時点における消散エネルギーを示した。吸収エネルギーは、静的ならびに衝撃破壊時のいずれの場合も破壊時の荷重変位関係から求めた。モルタルならびに鋼繊維補強コンクリートのいずれの場合も、衝撃消散エネルギーは静的消散エネルギーのほぼ 1.5 倍となった。また、モルタルではちょうど破壊した場合も激しく破壊した場合も衝撃破壊時の消散エネルギーはほぼ一定となった。

4. 結論

衝撃曲げ荷重下のコンクリートの変形と破壊についてエネルギー量をもとに検討し、次の結果を得た。

- (1) 衝撃曲げ荷重下でのコンクリートの消散エネルギーは、破壊時の供試体のひずみと加速度および衝撃体の加速度を計測することによって求めることが可能であることが示された。
- (2) ちょうど1回の衝撃によって供試体が破断する場合には、吸収エネルギーはすべて消散エネルギーに変換され、破壊後には運動エネルギーもひずみエネルギーも残らないことが実験的に明らかとなった。
- (3) 本実験の範囲内では、モルタルならびに鋼繊維補強コンクリートのいずれの場合にも衝撃消散エネルギーは静的消散エネルギーのほぼ 1.5 倍となった。

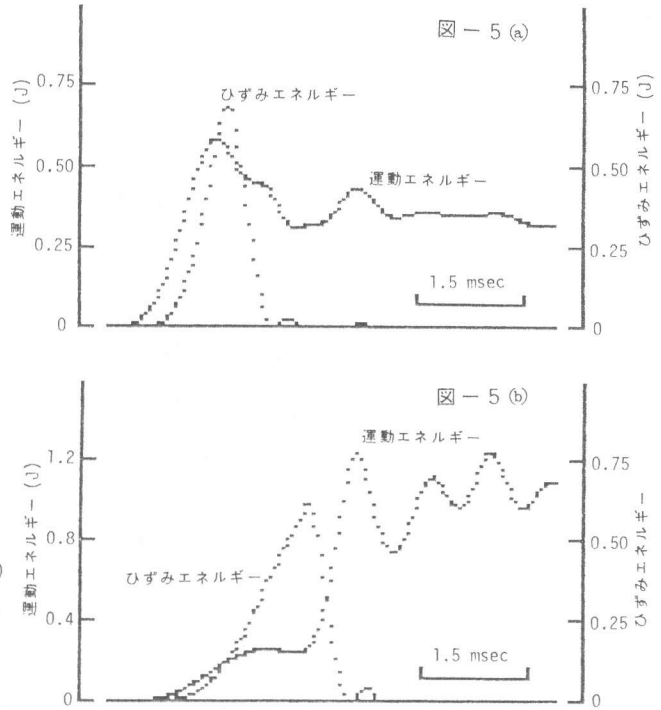


図-5 モルタル曲げ供試体の運動エネルギー

表-2 破壊時のエネルギー比較

供試体名	衝 撃				静的 消散 エネルギー (J)	静的なら びに衝撃 破壊時の 状況
	吸収 エネルギー (J)	ひずみ エネルギー (J)	運動 エネルギー (J)	消散 エネルギー (J)		
M-2-2	0.94	0	0.015	0.92		
M-2-3	0.91	0	0.011	0.90	0.58	破断
M-2-4	2.11	0	1.17	0.94		
F-1	7.13	0.82	2.49	3.82		たわみ 1 mm
F-2	6.36	1.54	1.73	3.10	2.70	
F-1	11.0	0.63	0.99	9.39		たわみ 2 mm
F-2	12.0	1.68	0.97	9.34	6.34	
F-1	15.1	0.35	0.28	14.5		たわみ 3 mm
F-2	15.5	1.03	0.042	14.4	9.36	