

[190] 単一衝撃を受けるコンクリート版の破壊挙動に関する研究

正会員 藤井 学 (神戸大学工学部)

正会員 宮本 文穂 (神戸大学大学院自然科学研究科)

正会員 ○鮎子多浩一 (神戸大学大学院)

岡 和弘 (鳥取市役所)

1. まえがき

コンクリート構造物の大型化に伴い、その機能を果たすために衝撃作用(船舶・車等の衝突)に耐えることを要求される場合がある。しかし、衝撃作用下における破壊性状や耐荷力の評価・予測のための手法は未だ確立されておらず、また破壊の定義も不明確である。本研究は、普通強度、鋼繊維補強及び高強度コンクリート版について、単一衝撃(1回で破壊)下における破壊領域での挙動を実験的に比較するとともに、有限要素解析でのモデル化を検討し、コンクリート版構造の破壊時衝撃力、破壊形式等の推定を試みたものである。

2. 実験概要

2.1 実験目的

本実験では、種々のコンクリート版を単一衝撃を与えてちょうど破壊させるため、あらかじめF.E.M.解析を適用して重錘の落下高さを推定し、その落下高さに基づきコンクリート版に単一衝撃を与えた。その時起こる破壊付近の挙動の把握と破壊の定義を試み、その妥当性を検討するものである。

2.2 供試体

供試体は普通強度RC版、鋼繊維混入RC版、高強度RC版(以下RC版、FRC版、HRC版と略記)の3種類とし、寸法は全て130×130×13cmで、スパン長120cmの二辺単純支持とした。図1に版の配筋図を示す。各種供試体は静的試験用に各1体、衝撃試験用に各3体ずつの計12体を作製した。鉄筋はD13鉄筋(SD30)、鋼繊維は異形ファイバー($\phi 0.6 \times 50\text{mm}$)をコンクリート体積の1.33%の割合で混入し、コンクリートの高強度化には高強度用混和剤を用いた。なお、FRC版、HRC版には、目標スランプの達成と施工性の改善のために高性能減水剤を使用した。設計基準強度はRC版、FRC版で $\sigma_{ck}=300\text{kg/cm}^2$ 、HRC版で $\sigma_{ck}=900\text{kg/cm}^2$ とした。各種コンクリートの示方配合を表1に示す。

2.3 荷重方法及び測定項目

静的試験では、RC版と門型ラーメン荷重装置の水平材の間にロードセル、油圧ジャッキを設置し、荷重鋼板(15×15×1cm)を介して荷重を与え、破壊に至るまで連続漸増荷重とした。衝撃試験では、大型振り子式衝撃試験装置を使用し、ソフトな衝撃作用とするためにゴム板(15×15×1cm)を、版上面中央に設置した鋼板(15×15×1cm)上に接着させた。衝撃力は、重錘と版が衝撃作用時に接触した状態で挙動するとして、重量500kgfの重錘に取り付けた加速度計の加速度応答より算出した(図3)。荷重は、まず弾性実験として落下高さ1.5cmより荷重した後、所定の落下高さより最初の単一衝撃(破壊近傍と考えられる衝撃)を与え、その後2～4回程度落下高さを変えて重錘を落下させ、破壊に至らせた。測定項目は、図2(a),(b)に示す位置における衝撃試験時の変位、応答加速度、鉄筋ひずみ、また静的試験時の変位と鉄筋ひずみである。

2.4 解析方法及び落下高さ

本研究では、コンクリート版の衝撃挙動解析に二次元平面ひずみによる非線形動的有限要素解析プログラム¹⁾を用いた。実際には幅130cmの版の中央荷重版に部分集中荷重が作用するが、解析モデルでは、はり

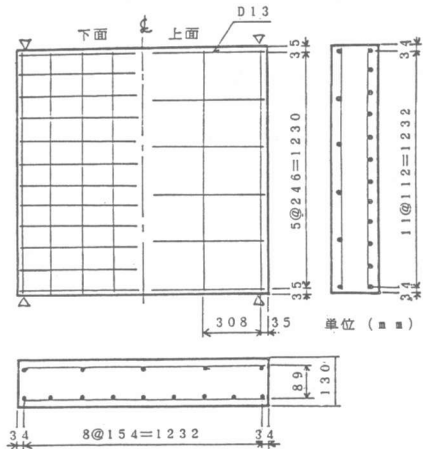


図1 配筋図

表1 コンクリートの示方配合

項目		供試体	RC 版	FRC 版	HRC 版
粗骨材最大寸法 (mm)			25	25	25
スランプ (cm)			9.0	9.0	8.0
空気量 (%)			1.5	2.0	2.0
水セメント比 (%)			58	58	30
細骨材率 (%)			42	48	38
単位 位置 量 (kg/m ³)	セメント		181	181	500
	水		312	312	150
	粗骨材		761	953	609
	粗骨材	1051	870		
	粗骨材 5号				440
	粗骨材 6号				660
	混和剤				50
	減水剤			3.8	5.0

と考え、その配筋方向の有効幅を土木学会の式より87cmとした。なお、コンクリートと鉄筋の材料一軸特性及び衝撃力～時間関係は、実験より得たものを入力した。

単一衝撃下で破壊する落下高さ推定の際には、衝撃力～時間関係（接触時間 $t_2=16\text{ms}$, 立上がり時間 $t_1=8\text{ms}$ （同一ゴム厚で一定）（図3参照））の最大衝撃力を適時仮定して入力した。

図2破壊は重錘の持つ運動エネルギーが全て、版の破壊エネルギーに変換される時起こると仮定して、解析より得られる衝撃力～中央変位関係より加力エネルギー J （図4参照）を求め、 $J=mgh$ （ J :加力エネルギー, m :重錘重量, h :落下高さ）の関係より落下高さを決定した。ただし、衝撃作用下ではコンクリート版の破壊の定義が確立していないため、ここでは各種3体の衝撃試験用供試体を、それぞれ破壊する少し前(D1)、ちょうど破壊(D2)、激しい破壊(D3)を目標にし、図4に示す点1、点2、点3に相当する加力エネルギーを用いて、落下高さを表2に示すように決定した。

3. 結果と考察

3.1 破壊の定義

ここでは実験結果を用いて、静的荷重及び衝撃作用下における各種版の破壊を以下のように定義する。

1) 静的荷重下において

- ① 完全な押し抜け発生またはコンクリート圧縮部の圧壊
- ② 限界たわみ（ACI-349-76²⁾の回転角制限の規定による）

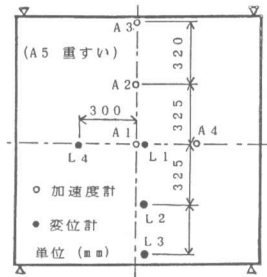
この定義による各種版の破壊荷重の実験値を表3に示す。これらは、ほぼ押し抜きせん断破壊荷重の計算値に対応するものとなっている。

2) 衝撃作用下において

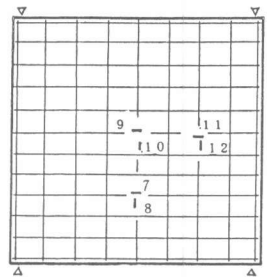
衝撃試験では、表2のように設定した落下高さより最初の単一衝撃を与え、その後2～4回繰り返し載荷を行ったが、繰り返し載荷時の最大衝撃力に着目し、落下高さを上げて初載荷時の衝撃力より確実に小さい場合を破壊と定義する。表4に、各落下時の最大衝撃力とそれに基づく破壊の判定を示す。ここで、RC-D2-40-1とは、RC-D2版における落下高さ40cmでの一回目の衝撃を表す。表4の結果は、最初、解析により落下高さを決定する際に目標とした破壊状況をほぼ満足するものとなっており、各種コンクリート版の破壊挙動の推定が可能となるものと考えられる。

3.2 実験結果

本実験で得られた破壊領域での主な結果を表5に示す。ここで、衝撃破壊試験での破壊形式は、何回か繰り返し衝撃を与えて確認したものである。最大変位は版中央測点のもので、同変位時静的荷重は、衝撃の最大変位と同一変位での静的荷重であり、衝撃/静的はそれらの荷重比である。衝撃力は、落下高さとともに増大するものであるが、D3はD2に比較して最大衝撃力に伸びがなく、また応答加速度も全て小さく



(a) 変位計及び加速度計の位置



(b) 鉄筋ゲージ位置

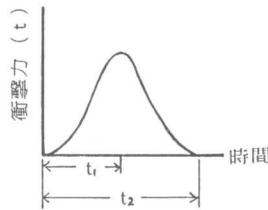


図3 衝撃力～時間関係の模式図

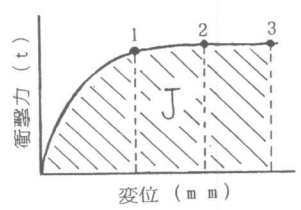


図4 破壊エネルギーの概念の模式図

表2 初載荷時の落下高さ

	RC	FRC	HRC
D1	30	50	40
D2	40	70	60
D3	60	90	80

単位 (cm)

表3 静的破壊荷重

供試体	定義 圧壊 (t)	①押し抜け・②たわみ (t)
RC-S	25.1	24.7
FRC-S	29.3	26.5
HRC-S	29.4	27.3

表4 衝撃破壊荷重

供試体	項目	最大衝撃力 (t)	破壊判定
RC-D1-30	1	19.8	未破壊
	35	21.1	
	2	22.3	未破壊
	50	21.1	
	2	22.7	破壊
RC-D2-40-1	1	26.9	
	2	24.9	破壊
	3	22.4	
	2	30.8	未破壊
	60	29.7	
FRC-D1-50-1	1	35.1	破壊
	2	31.3	
	80-1	31.6	破壊
	2	30.8	
	2	36.7	破壊
D3-90-1	1	32.3	
	2	32.8	破壊
	100-1	31.1	
	2	24.0	未破壊
	50-1	19.5	
HRC-D1-40-1	1	22.6	破壊
	2	23.3	
	2	36.9	破壊
	70-1	32.2	
	2	33.3	破壊
D3-80-1	1	35.0	
	2	30.7	破壊
	90-1	33.4	
	2	32.0	破壊
	2	32.0	

表5 破壊実験結果

項目 供試体	弾性係数 (kg/cm ²)	圧縮強度 (kg/cm ²)	ひびわれ 荷重 (t)	最大荷重 (t)	最大変位 (mm)	同変位時 静的荷重 (t)	衝撃 荷重 (t)	最大応答加速度 (G)								破壊 形式				
								A1				A2					A3		A4	
								+	-	+	-	+	-	+	-					
RC-S	2.88	3.81	2.6	2.51	1.5.9			1.17	4.7	7.3	5.6	7.9	7.9	7.6	3.3	せん断				
RC-D1				1.9.8	7.9	2.3.7	0.8.4	8.9	4.1	7.7	8.1	7.1	10.0	6.6	7.6	せん断				
D2				2.2.3	8.7	2.4.0	0.9.3													
D3	2.7.6	3.5.2		2.6.9	1.0.6	2.4.6	1.0.9	1.7.5	2.9	1.0.0	7.2	1.3.9	9.9	1.3.3	7.8					
FRC-S	2.6.2	4.9.1	2.7	2.9.3	4.5.6											曲げ				
FRC-D1				3.0.8	1.0.3	2.4.4	1.2.6	1.9.5	-	-	-	1.6.3	1.0.9	1.3.0	6.0					
D2				3.5.1	1.1.9	2.5.5	1.3.8	2.4.8	5.6	1.4.9	9.0	2.0.6	1.2.7	1.9.3	4.9	曲げ				
D3	2.3.9	4.3.7		3.6.7	1.2.5	2.5.7	1.4.3	1.2.4	8.3	1.2.1	6.9	1.3.8	7.7	9.3	1.0.9					
HRC-S			3.7	2.9.4	3.0.3											曲げ				
HRC-D1	3.6.8	8.4.5		2.4.0	8.1	2.3.9	1.0.0	8.3	4.2	7.7	5.8	9.0	8.7	6.3	4.8					
D2				3.6.9	1.0.4	2.4.4	1.5.1	2.7.3	5.2	1.5.6	7.9	1.6.9	1.2.8	1.3.2	6.9	曲げ				
D3	3.4.8	7.8.9		3.5.0	1.2.6	2.4.9	1.4.1	1.3.7	5.8	1.0.1	7.2	1.4.5	1.0.8	1.0.7	7.0					

なっている。これより、D3の版がかなり激しく破壊しているものと考えられる。

3.3 破壊状況

静的試験 (S) においては全ての版に降伏線が形成され、FRC版では降伏線を中心に折れ曲がるように変形して上面コンクリートが圧壊した。RC版は、比較的少ない変位で押し抜きせん断したが、HRC版ではかなり曲げ変形した後、最終的にはせん断破壊した。衝撃試験においては、ほぼ静的試験と同様の傾向を示すが、RC、HRC版では落下高さを上げると、版全体に降伏線と放射状のひびわれの発生が見られるような特徴がある。コンクリートの飛び散りに関しては、RC版よりFRC版、HRC版の方が少なく、特にFRC版においてその効果が顕著である。図5に各版の静的荷重及び衝撃作用下における最終破壊状況を比較したものを示す。衝撃作用下では静的荷重下と違い、主筋方向にもひびわれが入るのが特徴である。

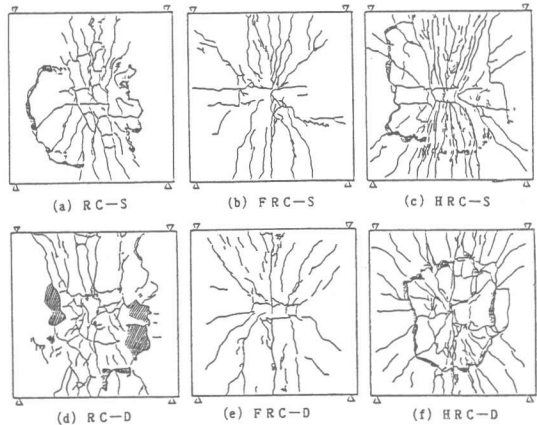


図5 ひびわれ図

3.4 変位

衝撃力～変位関係の解析結果との比較を、弾性実験におけるFRC版については図6に、また、破壊実験における各種版については図7に示す。ここで、実験結果はスパン中央配筋方向のたわみ分布を有効幅87cmで平均したものであり、解析値はスパン中央変位である。これより、弾性範囲内では実験値及び解析値は比較的一致しており、有効幅はほぼ87cmで妥当であると考えられるが、破壊近傍では全体的に解析値の方が同一衝撃力に対する変位が小さく、有効幅を小さくする必要があると思われる。図8(a)、(b)、(c)は、各落下高さでの衝撃試験における最大変位時のたわみ分布と静的荷重下でのたわみ分布を比較したものである。これよりFRC版、HRC版において、衝撃作用下では静的荷重下に比べ同一変位を生じるためにはかなり高い衝撃力が必要となるようである。衝撃作用下において、版の劣化の程度を変位の大小に関連づけられるとすると、FRC版、HRC版はかなり大きな衝撃力に耐えることがわかる。表5の衝撃/静的荷重比は、落下高さの増大とともに増加する。これより、同変位における静的荷重に対する衝撃力の大きさは、落下高さが上がるにつれて大きくなるが、破壊がかなり進むとこの傾向は鈍ってくる。

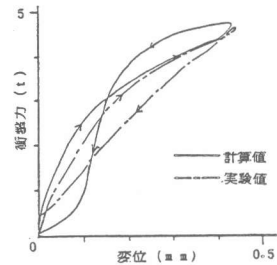


図6 衝撃力～変位関係 (弾性)

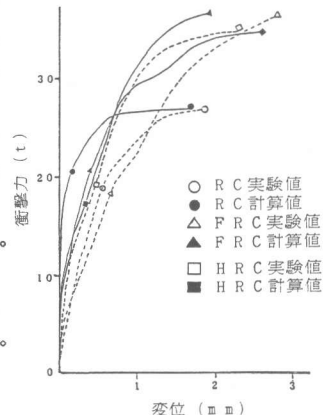


図7 衝撃力～変位関係 (破壊)

表6は、衝撃試験における最大変位までの全エネルギーと、それと同一変位での静的荷重下の全エネルギーとの比較を示したものである。これより破壊程度が大きくなる(落下高さが大きくなる)と、静的荷重下と

同一変位を生じさせるのに必要なエネルギーは衝撃作用下の方が大きくなることわかる。なお、全エネルギーは衝撃力(荷重)～変位曲線で囲まれる面積から算出した。表7

は繰り返し载荷を含めた各衝撃における全エネルギー比と重錘の持つ位置エネルギー($m g H$)に対する初載荷時の全エネルギー比を示したものである。これより、劣化が進むと同じエネルギーを与えても変位が大きくなり、吸収エネルギーは増えるが、D3のように劣化が激しくなり過ぎるとエネルギー吸収能力が低下してくるようである。また、重錘の持つ位置エネルギーとの比がRC版で小さいのは、破壊形式で見てみると、FRC版、HRC版は曲げ破壊を生ずるのでエネルギー吸収が大きく、RC版はせん断破壊を起こすためエネルギー吸収が少ないものと考えられる。

3.5 応答加速度

弾性実験では負の加速度が正の加速度より大きい、破壊実験では逆の結果となっている(表5)。これは破壊実験では版が劣化し、復元力が小さくなるからであろう。また、全ての版において、測点A2での正の加速度が他の測点より小さいのは、測点A2付近が節となるような振動が卓越している事を示していると考えられる。表5よりFRC版、HRC版のD3の応答加速度の値はD2のそれより小さくなっている。これは、最終的な破壊がRC版では押し抜きせん断を示し、他の版は曲げ破壊であったことより、単一衝撃下での破壊の挙動が著しくなると、降伏線でのエネルギー吸収が大きくなり応答加速度が小さくなったものと考えられる。

3.6 鉄筋ひずみ

図9は衝撃試験、静的試験における衝撃力(荷重)～鉄筋ひずみ関係の比較を示している。これより衝撃作用下では、ひずみの立上りが急である事や、引張側鉄筋である測点8が最大荷重付近まで圧縮ひずみを生じるなど、衝撃特有の現象が見られる。

4. 結論

本研究より得られた主な結果をまとめると以下のようになる。

1) 弾性実験においては、版の有効幅を考えた解析結果と実験結果がほぼ一致するが、破壊実験においては、実験結果の方が変位が大きく、解析において有効幅をさらに小さくとる必要がある。

2) 単一衝撃を受ける各種コンクリート版の破壊は、2次元有限要素法による衝撃力～変位関係によるエネルギーでほぼ推定可能である。参考文献 1) 藤井 学, 他: 鉄筋コンクリートはりの衝撃挙動の解析に関する基礎的研究, コンクリート工学年次講演会論文集, 1985

2) ACI Code Requirements for Nuclear Safety Related Concrete Structures, 1977

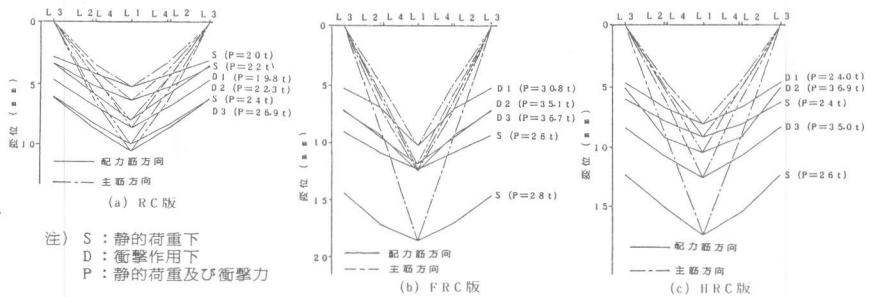


図8 たわみ分布

表6 衝撃作用下での最大変位で比較した全エネルギー比

項目 供試体	衝撃 (kg·cm)	静的 (kg·cm)	衝撃 静的
RC-D1	11264	12662	0.89
D2	12790	14547	0.88
D3	20748	19163	1.08
FRC-D1	21068	18986	1.11
D2	29366	23003	1.28
D3	37226	24518	1.52
HRC-D1	13710	13923	0.98
D2	24550	19203	1.28
D3	30038	25359	1.18

表7 全エネルギー比及び位置エネルギー比

項目 供試体	全エネルギー (kg·m)	エネルギー比	位置エネルギー 比の比
RC-D1-30	11264	1.00	0.75
25	12493	1.11	
D2-40-1	12790	1.00	0.64
2	14102	1.10	
50	15714	1.23	
D3-60-1	20748	1.00	0.68
2	20924	1.01	
3	20006	0.96	
FRC-D1-50-1	21068	1.00	0.84
2			
50	22288	1.06	
D2-70-1	29366	1.00	0.84
2	27100	0.92	
30-1	29060	0.98	
2	30174	1.03	
D3-90-1	37226	1.00	0.83
2	30432	0.82	
100-1	33748	0.90	
2	32952	0.89	
HRC-D1-40-1	13710	1.00	0.69
2	12168*	0.89	
50-1	14632	1.07	
2	15444	1.13	
D2-50-1	24550	1.00	0.92
2	24756	1.04	
70-1	25424	1.04	
2	23736	0.97	
D3-80-1	30038	1.00	0.75
2	25602*	0.85	
90-1	28682	0.95	
2	29428	0.98	

米: 変位が1回目より小さい

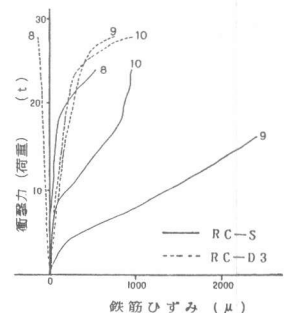


図9 衝撃力(荷重)～鉄筋ひずみ関係