[90]　鉄筋コンクリートはり・スラブの衝撃じん性

正会員　小　柳　　治（岐阜大学工学部）
正会員　六　郷　恵　哲（岐阜大学工学部）
正会員　○内　田　裕　市（岐阜大学大学院）
　　諸　永　康　浩（岐阜大学工学部）

1.　まえがき

道路，橋梁施設あるいは海洋構造物などにおいて，衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリート（ＲＣ）部材の耐衝撃性の評価が必要とされることも少なくない。しかし，ＲＣ部材の衝撃破壊性状は，破壊機構の複雑さや実験方法の困難さなどのため，静的破壊性状ほどには解明されておらず，衝撃破壊性状の評価や予測のための手法も未だ十分には確立されていない。

本研究においては、ＲＣはりならびにＲＣスラブを対象とし，破壊時の吸収エネルギーに注目してこれらのＲＣ部材の衝撃破壊性状と静的破壊性状とを比較し、静的破壊性状をもとに衝撃破壊性状を予測することの可能性について検討した。

2.　実験方法

2.1　概要

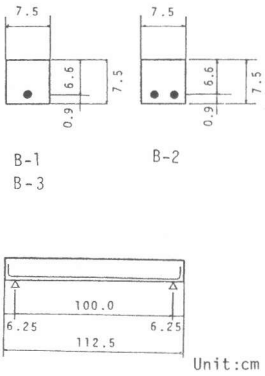
鉄筋比もしくはコンクリートの種別の異なる３シリーズのはり供試体（Ｂ－1，Ｂ－2，Ｂ－3とする）と、鉄筋比の異なる２シリーズのスラブ供試体（Ｓ－1，Ｓ－2シリーズとする）について静的載荷試験ならびに衝撃載荷試験を行い，同一残留変位もしくは同様の破壊状況を生じる際の供試体の吸収エネルギーを両試験条件下で計測した。

2.2　供試体

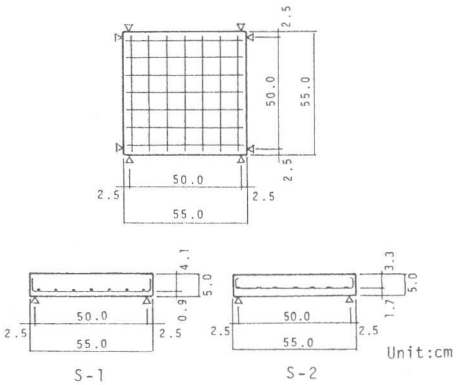
はり供試体の寸法はすべて7.5×7.5×112.5㎝とした。鉄筋はＤ６異形鉄筋（σ_{sy}＝3550Kg/㎠）を用いた。Ｂ－１シリーズおよびＢ－２シリーズはモルタルを使用し、鉄筋比をそれぞれ0.65％（1D6）および1.30％（2D6）とした。Ｂ－3シリーズでは鉄筋比を0.65％（1D6）とし鋼繊維補強コンクリートを用いた。図－１ａに配筋を示す。

スラブ供試体の寸法は5.0×55.0×55.0㎝とした。Ｓ－1，Ｓ－2シリーズともにモルタルを使用した。Ｓ－1シリーズは主方向鉄筋比を0.98％としＤ６異形鉄筋を等方に配筋した。Ｓ－２シリーズは主方向鉄筋比を0.69％とし断面1.6×14.0㎜（厚さ×幅）の鋼板（σ_{sy}＝2540Kg/㎠）を等方に配筋した。スラブ供試体の配筋図を図－1bに示す。

各シリーズの供試体の概要を表－１に示す。なお、モルタルの配合は、Ｂ－1およびＢ－2シリーズではＣ（セメント）：Ｓ（細骨材）：Ｗ（水）＝１：３：0.50，Ｓ－1シリーズではＣ：Ｓ：Ｗ＝１：３：0.60，Ｓ－2シリーズではＣ：Ｓ：Ｗ＝１：３：0.55とした。Ｓ－3シリーズの鋼繊維補強コンクリートでは，Ｃ：Ｓ：Ｇ（粗骨材）：Ｗ＝１：２：２：0.55とし



図－1a　はり供試体の配筋



図－1b　スラブ供試体の配筋

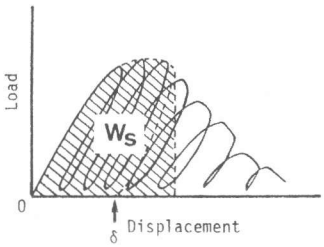
鋼繊維（異形カットワイヤー，寸法：φ0.5×30㎜）を2 vol %混入した。粗骨材の最大寸法は15㎜とした。

2.3 載荷方法

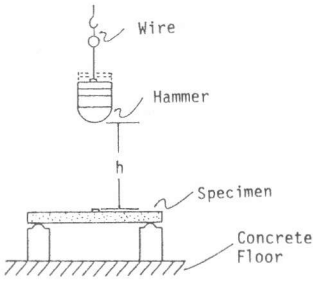
(1) 静的載荷試験　はり供試体は載荷スパン長を100㎝とし，2.0×7.5×2.0㎝（厚さ×幅×長さ，載荷面積15㎠）の載荷板を介して中央に集中載荷を行った。スラブ供試体はスパン長50㎝の4辺単純支持として2.0×6.0×6.0㎝（載荷面積36㎠）の載荷板を介して中央に載荷した。静的載荷試験では破壊進展の各段階での残留変位量を計測するために，適時載荷除荷を繰返した。また荷重と載荷点直下の変位の関係はX－Yレコーダに記録した。得られた荷重変位曲線から，衝撃荷重下で生じた残留変位と同一量の残留変位を静的荷重下で生じさせるのに必要な加力エネルギー（図－2の斜線部）を定量化した。以下これを静的吸収エネルギーW_sと呼ぶ。

表－1　供試体の概要

Series	Type of Specimen	Concrete	Reinforcement Ratio (%)	Specimen Size (Span) (cm)
B-1	Beam	Mortar	0.65	7.5x7.5x112.5(100)
B-2	Beam	Mortar	1.30	7.5x7.5x112.5(100)
B-3	Beam	Fiber rein.	0.65	7.5x7.5x112.5(100)
S-1	Slab	Mortar	0.98	5.0x55.0x55.0(50)
S-2	Slab	Mortar	0.69	5.0x55.0x55.0(50)



図－2　静的吸収エネルギー



図－3　衝撃載荷試験装置

(2) 衝撃載荷試験　重錘落下方式による衝撃載荷試験の概要を図－3に示す。重錘は衝撃部，おもり，軸棒からなり，おもりの増減によって重錘の重量を変えることができる。本実験に用いた重錘の重量は，はり供試体の全シリーズおよびスラブのS－2シリーズの場合には61.0㎏とし，スラブのS－1シリーズでは44.0㎏とした。はり供試体とスラブ供試体のいずれの場合にも，載荷板，載荷位置，支持方法およびスパン長をすべて静的載荷試験の場合と同一とした。重錘をワイヤーで滑車にかけ，所定の落下高さhまで上げた後，このワイヤーを切断し自由落下させた。なお，落下高さhは，各シリーズごとに4段階ないし3段階に変化させた。各供試体にはただ一度だけの衝撃力を作用させ，その時の載荷点直下の残留変位δを計測した。衝撃吸収エネルギーW_iを重錘重量と落下距離（h＋δ）の積と定義した。

3. 結果と考察

3.1 はり供試体

(1) 破壊状況　本実験で用いたはりは静的および衝撃載荷試験のいずれの場合もすべて曲げタイプの破壊を生じた。

衝撃載荷試験では鉄筋比が0.65%のB－1（モルタル）およびB－3（鋼繊維補強コンクリート）で最終的（重錘の落下高

表－2　はり供試体の実験結果

	STATIC LOADING				IMPACT LOADING			
Series	Strength of Concrete kg/cm²	Number of Specimens	Static Absorbed Energy W_s,kg·m	Residual Displacement δ,cm	Impact Absorbed Energy W_i,kg·m	Height of Fall h,cm	Number of Specimens	W_i/W_s
B-1	σ_c= 318 σ_b= 61.6	3	- 28.0 22.8 13.7	ruptured 6.3 5.1 3.0	- 34.4 27.6 17.0	75 50 40 25	2 3 1 2	 1.23 1.21 1.24
B-2	σ_c= 501 σ_b= 61.8	5	50.1 27.6 17.8 7.4	7.9 3.7 2.3 0.8	53.6 38.9 25.8 12.7	80 60 40 20	2 2 2 1	1.07 1.41 1.45 1.72
B-3	σ_c= 435 σ_b= 92.0	3	35.7 32.5 27.7 16.1 8.6	ruptured 6.3 5.2 2.7 1.3	- 40.4 33.7 23.0 13.0	80 60 50 35 20	2 3 1 1 1	 1.24 1.22 1.43 1.51

さが十分高い場合）には鉄筋が破断した。載荷除荷を繰返した静的載荷試験では最終的（変位が十分大きい場合）にはB－1シリーズ3体のうち1本とB－3シリーズ3体のすべてにおいて鉄筋が破断した。静的，衝撃両載荷試験において鉄筋が破断した供試体では，破断部以外の場所に入ったひびわれの数が少なく，かつそのひびわれ幅も微細であった。とくに鋼繊維補強コンクリートのB－3シリーズでは，載荷点直下の主ひびわれ以外のひびわれはごくわずかであった。

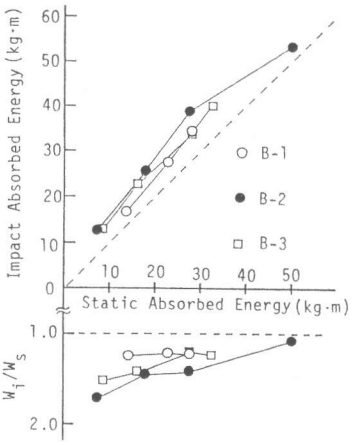
(2) 吸収エネルギー　はり供試体の静的載荷試験と衝撃載荷試験の試験条件と，衝撃試験時の残留変位に対応する静的吸収エネルギーW_sおよび衝撃吸収エネルギーW_iを表－2に示す。図－4はこの表をもとに各シリーズごとに同じ残留変位に対応するW_iとW_sの関係およびそのときのエネルギー比W_i/W_sを示したものである。各シリーズともW_sの増加とともにW_iが増大する。また本実験の範囲内ではW_iとW_sの差はほぼ一定となっている。このためW_sあるいはW_iが大きくなるにつれてエネルギー比W_i/W_sは1.0に近づいてくる。これはW_iは供試体の破壊に消費されるエネルギーの他に供試体が支点の振動あるいは重錘のバウンドなど供試体の破壊以外で消費されるエネルギーを含んでいるが，W_iが大きくなるにつれてその中に占められる供試体の破壊に消費されるエネルギー量の絶対値が大きくなり，供試体の破壊以外に消費されるエネルギー量が相対的に小さくなるためと考えられる。

図－5は残留変位と両吸収エネルギーの関係を示したものである。いずれのシリーズにおいても残留変位δとW_s，δとW_iの間にはほぼ直線的な関係が存在している。図－5において各破線の縦軸方向の差は，吸収エネルギー量における鉄筋1本分の効果（B－2とB－1の差）あるいは鋼繊維補強コンクリートの効果（B－3とB－1の差）を表わしているものとも考えられる。同一の残留変位に対応するW_sは鉄筋比が2倍になると1.5倍に，モルタルに代って鋼繊維補強コンクリートを用いると1.2倍程度になっており，W_iの場合にもほぼ同様の傾向が認められる。

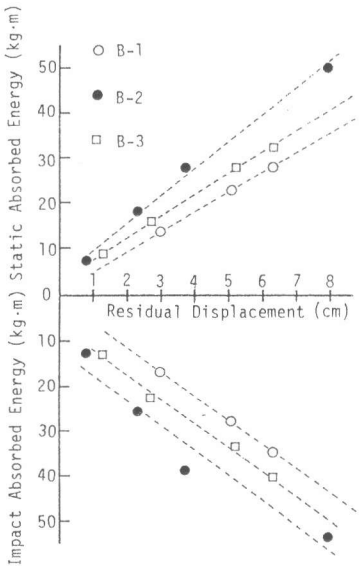
3.2　スラブ供試体

(1) 破壊状況　スラブ供試体は静的，衝撃いずれの荷重下においても放射状に曲げひびわれが発生し，最終的にはすべて押抜きせん断破壊を生じた。静的載荷試験ではS－1シリーズは6㎜程度の変位で押抜きせん断破壊を生じたのに対し，S－2シリーズは13㎜程度まで曲げ変形が進行した後に押抜けた。両シリーズの荷重変位曲線を図－6に示す。

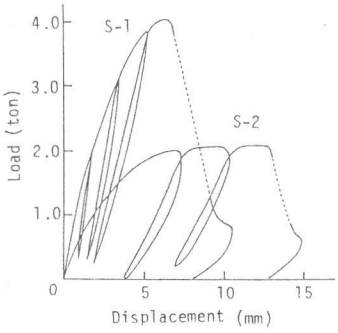
S－1，S－2いずれのシリーズにおいても押抜けた底面の大きさは衝撃荷重下の方が静的荷重下より小さかった。しかしS－1とS－2のシリーズ間では押抜けた底面の大きさにとくに差違は認められなかった。放射状に入った曲げひびわれの数やひびわれ幅には荷重の種別による差はなかったが，S－2シリーズの方がS－1シリーズよりも数が少なく，ひびわれ幅が大きかった。



図－4　静的吸収エネルギーと衝撃吸収エネルギー



図－5　残留変位と吸収エネルギー



図－6　スラブ供試体の荷重変位曲線

(2) 吸収エネルギー

表－3はスラブ供試体の静的載荷試験と衝撃載荷試験の試験条件ならびに結果を示したものである。

表－3　スラブ供試体の実験結果

	STATIC LOADING				IMPACT LOADING				
Series	Strength of Concrete kg/cm²	Number of Specimens	Static Absorbed Energy W_s, kg·m	Residual Displacement δ, mm	Impact Absored Energy W_i, kg·m	Height of Fall h, cm	Failure Mode	Number of Specimens	W_i/W_s
S-1	σ_c = 319	3	-	8.0	40.4	90	punching shear	1	-
			-	3.9	35.4	80	punching shear	2	-
	σ_b = 46.2		17.8	2.2	30.9	70	crack	2	1.74
			13.0	1.5	26.4	60	crack	1	2.03
S-2	σ_c = 267	2	-	23.6	50.2	80	punching shear	1	-
			-	11.5	31.2	50	punching shear	1	-
	σ_b = 28.3		15.2	5.8	24.8	40	punching shear	1	1.63
			10.8	3.8	21.6	35	crack	1	2.00
			4.9	1.8	14.4	30	crack	1	3.67

表－4　押抜きせん断破壊時の吸収エネルギー

	Mode	S-1		S-2	
		Height of Fall h, cm	Energy kg·m	Height of Fall h, cm	Energy kg·m
IMPACT LOADING	after failure	80	35.4	40	24.8
	before failure	70	30.9	35	21.6
	punching shear	75	W_i = 33.2	38	W_i = 23.3
STATIC LOADING	punching shear		W_s = 25.8		W_s = 24.4
W_i/W_s		1.28		0.95	

同一残留変位に対応するエネルギー比W_i/W_sはどちらのシリーズも，はり供試体の場合に比べて大きくなっており，とくに残留変位が小さい領域では顕著である。この理由として，第1に吸収エネルギーの絶対値が小さいため相対的に誤差が大きくなっていることが考えられる。第2の理由として，静的，衝撃両荷重下において同一の残留変位が生じたとしてもその時点での破壊の進展の度合が両荷重下で異なっているということが考えられる。この根拠として，S－1シリーズの場合，押抜きせん断破壊を生じた直後の残留変位は静的荷重下では約8㎜であるのに対し，衝撃荷重下では4㎜であり，またS－2シリーズにおいても押抜きせん断破壊直後の残留変位が静的荷重下では約13㎜であるのに対し，衝撃荷重下では5.8㎜であることが上げられる。つまり，両荷重下において同一の残留変位を生じた状態では，衝撃荷重下の方が静的荷重下より破壊が進んでおり，そのため同一の残留変位に対応する吸収エネルギーは衝撃吸収エネルギーの方が静的吸収エネルギーより大きくなっていると考えられる。一方，表－4に示すようにちょうど押抜きせん断破壊を生じた点に対応するW_iとW_sの比W_i/W_sは，S－1シリーズでは1.28，S－2シリーズでは0.95となり，ちょうど押抜きせん断破壊を生ずるまでに吸収されるエネルギーは静的荷重下と衝撃荷重下とでは大きな差はみられない。なお，ちょうど押抜きせん断破壊を生じた点のW_iは，押抜きせん断破壊が生じないときの衝撃吸収エネルギーの最大値と押抜きせん断破壊を生じるときの衝撃吸収エネルギーの最小値との中間として求めた。

4. 結論

本実験で得られた結果を要約すると以下のようになる。

(1) はり供試体のように，塑性変形が非常に大きい場合には，同量の変位を生じさせるのに必要とされるエネルギーは静的荷重下と衝撃荷重下とでほぼ等しい。

(2) スラブ供試体のように破壊時の変位が比較的小さく，押抜きせん断破壊のような急激な破壊を生ずる場合には，同量の変位を生じさせるのに必要とされるエネルギーは衝撃荷重下の方が静的荷重下よりはるかに大きい。しかし，ちょうど押抜きせん断破壊が生ずるのに必要とされるエネルギーは，静的荷重下と衝撃荷重下とでは大きな差はなかった。

以上より，吸収エネルギー量をもとにRC部材の衝撃破壊性状を静的破壊性状から予測することが基本的には可能であると考えられる。