

[50] 衝撃荷重下における鋼繊維補強コンクリート版の破壊機構

正会員 藤井 学 (神戸大学工学部)
 正会員 ○宮本文穂 (神戸大学工学部)
 池尾孝司 (鴻池組土木技術部)
 松帆雄二 (神鋼鋼線)

1. まえがき

鋼繊維補強コンクリートは、ひびわれ拘束性および破壊時の靱性をプレーンコンクリートに比べ、著しく向上させることが可能であることより、特に耐衝撃性の面から各種構造に広く適用することが検討されている。しかし、耐衝撃性の評価は主に、静的荷重下での挙動をもとにしたものがほとんどであり、慣性力等の動的特性を考慮に入れたものは少ない。また、鋼繊維混入による施工性悪化の対策としての単位水量、細骨材率の増大は鋼繊維コンクリート本来の特性を減少させる結果となり得策とは考えられない。

本研究は、鋼繊維補強コンクリートが、その有利性を最大限に発揮できると考えられる版構造を対象とし、高流動化剤の使用による施工性の改善を検討するとともに、静的・衝撃試験を通じて、鋼繊維の衝撃荷重下でのひびわれ拘束機構および破壊機構を主にエネルギー的に検討したものである。

2. 実験の概要

実験要因として、鋼繊維の種類(2種)および鋼繊維混入率(4種)を考え、同一配合に高流動化剤(マイティール)を用い施工性の改善を図った。供試コンクリート版寸法は130×130×13cmで、同一条件で静・衝撃用に同時に1体ずつそれぞれ作製した。表-1, 2, 3はそれぞれ、鋼繊維の形状、寸法、コンクリートの配合表および供試版の種類を示したものである。ここで混入率0.2%の供試版は、プレーンコンクリートとみなし、他と比較した。実験は、静・衝撃試験ともスパン120cmの2辺単純支持とし、静的載荷は門型フレームにより、衝撃載荷は振り式大型衝撃試験機(重錘重量500kg¹⁾)により行った。載荷は両試験とも、15×15×1cmの載荷板を介して行い、初期ひびわれ発生までは静的には荷重を、衝撃では落下高さを漸増させ、目視ひびわれ発生荷重(落下高さ)で繰返し載荷を所定の条件を満足するまで行った。各荷重段階での測定項目は、静的試験の場合、たわみ分布、ひずみ分布およびひびわれ幅であり、中央たわみおよびひずみ～荷重の関係は2X-Yレコーダで連続的に測定した。また衝撃試験の場合は、静的項目に加えて版の応答加速度分布、重錘の加速度、速度の時間的変化をデータレコーダおよびラピコダーに記録し、波形解析装置で解析した。図-1は両試験における供試版の測定位置をまとめて示したものである。なお、衝撃試験においては、重錘と載荷板間にゴム板を設置し、ひびわれ発生までの衝撃荷重作用時間が約0.015secでほぼsin波形となるようにした。

3. 実験結果および考察

3.1 施工性

表-2は施工性の指標となるスランブ試験結果を併記したものである。1%程度の高流動化剤の使用により、鋼繊維混入による施工性の悪化をかなりの程度まで改善

表-1 鋼繊維の形状・寸法

名称	寸法 (mm)	形状	フアット比
波形ファイバー	0.25×0.55×25		60
異形ファイバー	∅0.5×32		64

表-2 配合設計表

項目	供試体						
	IS 0.2	IS 1.0	IS 1.5	IS 2.0	KS 1.0	KS 1.5	KS 1.5
波形ファイバー(%)	0.2	1.0	1.5	2.0			
異形ファイバー(%)					1.0	1.5	
水セメント比(%)	57	57	57	57	57	57	
細骨材率(%)	48	48	48	48	48	48	
粗骨材最大寸法(mm)	25	25	25	25	25	25	
単位重量 kg/m ³	セメント	284	284	284	284	284	284
	水	162	162	162	162	162	162
粗骨材	923	913	905	900	913	905	
	852	842	837	829	842	837	
鋼繊維	15.7	78.5	117.8	157	78.5	117.8	
スランブ (cm)	84.62	1.6	1.3	0.4	3.4	1.9	

* 高流動化剤をセメント重量の1.0%混入した版
 ** " " " " 1.5 %

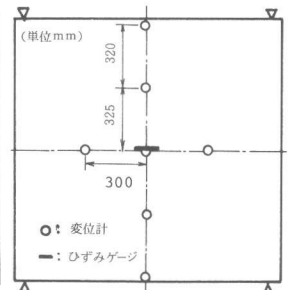


図-1(a) 変形、ひずみ測定位置(静的)

できることがわかるが、過度の添加は、材料分離が著しくなるので注意を要する。

3.2 ひびわれおよび破壊性状

表-4は両載荷試験において

得られた主な結果をまとめて示したものである。ここでひびわれ発

生荷重は目視ひびわれに基づくものであり、破壊荷重は最大荷重とした。また、衝撃荷重は重錘加速度の最大値より算出したものである。図-2は静・衝撃荷重下でのひびわれ荷重に及ぼす繊維混入量、繊維の種類の影響を示したもので両荷重下ともほぼ混入量に比例する傾向があり、繊維の種類による差異は明確ではない。破壊形式は鋼繊維の混入によりひびわれが分散する傾向があったものの最終的には版中央に生じた一本の降伏線による破壊であった。

3.3 荷重～変位曲線

図-3は、静・衝撃荷重下での版中央の変位と荷重の関係を包絡線で示したものである。これより、両荷重下ともプレーンに近い混入率0.2%に比べ鋼繊維混入がひびわれ荷重以後の下降曲線の勾配をなだらかにしてありひびわれ拘束性あるいは靱性が著しく増大している。その効果は静的荷重下では異形ファイバーの方が大きい。一方、衝撃荷重下においては特に混入量が少ない場合、ファイバーの種類による効果に

差がなくなる。この理由としては、急速載荷による鋼繊維の引抜き抵抗の増大が、ファイバー形状の影響を上まわっていることも考えられるが、ひびわれ進行に伴う版剛性の低下とともに慣性力の占める割合が大きくなり衝撃力の低下が少ないものと考えられる。静・衝撃荷重下での靱性を定量的に評価するため、繰返し荷重下で連続的に測定された荷重～変位曲線にもとづいたエネルギー的考察を行う。図-4は得られた荷重～変位曲線の模式図を示したものであり、以下の諸量を定義する。Wt:外力によって与えられるエネルギーでOPRTの面積で表わす。Wr:弾性回復エネルギーでSRTの面積で表わす。Wi:散逸エネルギーの和でOPRSの面積で表わす。Wp:任意の繰返し載荷1回当たりの散逸エネルギーでQRSの面積で表わす。Wtp:最大荷重時の点PにおけるWt, Dp:最大荷重時の点Pにおける変位, D:任意の繰返し載荷時における変位。図-5は $\frac{W_t}{W_{tp}}$ と $\frac{D}{D_p}$ の関係を、また図-6はひびわれの伸長と密接な関係があると言われている $\frac{W_t}{W_{tp}}$ とひびわ

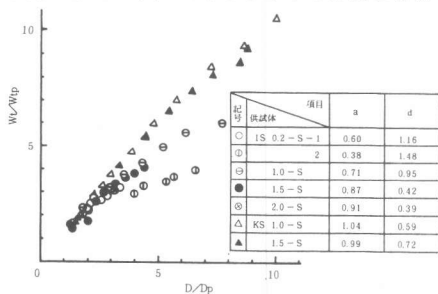


図-5(a) $\frac{W_t}{W_{tp}}$ と $\frac{D}{D_p}$ の関係

表-3 供試体の種類

鋼繊維の種類	混入率 (%)	供試体の名称	
		静的試験	衝撃試験
波形ファイバー	0.2	IS 0.2-S-1	IS 0.2-D
"	0.2	IS 0.2-S-2	
"	1.0	IS 1.0-S	IS 1.0-D
"	1.5	IS 1.5-S	IS 1.5-D
"	2.0	IS 2.0-S	IS 2.0-D
異形ファイバー	1.0	KS 1.0-S	KS 1.0-D
"	1.5	KS 1.5-S	KS 1.5-D

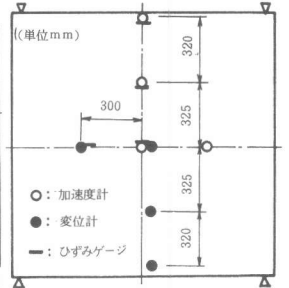


図-1(b) 変位、加速度、ひずみ測定位置 (衝撃)

表-4 試験結果の一覧

項目	圧縮強度 (kg/cm ²)	引張強度 (kg/cm ²)	弾性係数 ×10 ³ (kg/cm ²)	試験材令 (日)	ひびわれ高さ (cm)	ひびわれ長さ (cm)	最大荷重 (t)
IS 0.2-S-1	291	29.4	2.50	59	4.6	4.6	4.6
D-1	42	4.8	1.5	4.8	4.8	4.8	4.8
IS 0.2-S	285	25.5	2.71	34	4.4	4.4	4.4
IS 1.0-S	301	44.1	3.47	40	6.3	6.3	6.3
D	56	8.3	4.0	8.3	8.3	8.3	8.3
IS 1.5-S	395	50.9	2.87	60	7.8	8.2	8.2
D	44	8.1	3.5	8.1	8.1	8.1	8.1
IS 2.0-S	395	57.3	2.53	52	6.7	9.3	9.3
D	64	14.1	4.5	14.1	14.1	14.1	14.1
KS 1.0-S	370	47.1	3.17	44	6.3	7.5	7.5
D	29	7.1	3.0	7.1	7.1	7.1	7.1
KS 1.5-S	342	47.2	2.34	33	6.9	7.3	7.3
D	48	8.6	4.5	9.1	9.1	9.1	9.1

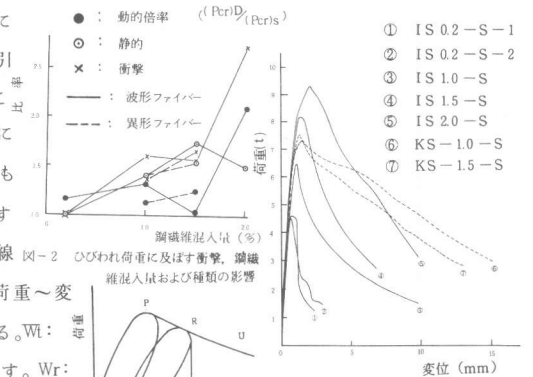


図-3(a) 荷重と変位の関係

図-4 荷重～変位関係の模式図

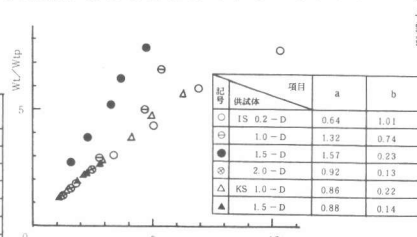


図-5(b) $\frac{W_t}{W_{tp}}$ と $\frac{D}{D_p}$ の関係

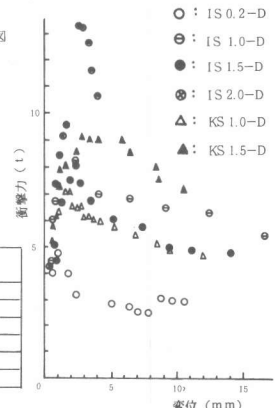


図-3(b) 衝撃力と変位の関係

れ幅との関係を静・衝撃荷重でそれぞれ示したものである。これらの図より、両者の間にはほぼ直線関係が認められ、外力によるエネルギーおよび散逸エネルギーの増加による変位およびひびわれ幅の増加程度が、静・衝撃荷重下でのひびわれ拘束性能および靱性評価に有効であることがわかる。これらの関係を最小自乗法により直線近似し、

その勾配 a および切片 b を求めたものが、それぞれの図中に示してある。これより、静的荷重下では直線の傾きが波形ファイバーでは鋼繊維混入率とともに増大しており、異形ファイバーでは混入率による差異はあまり認められないが、ともに同一混入率の波形ファイバーより大きい

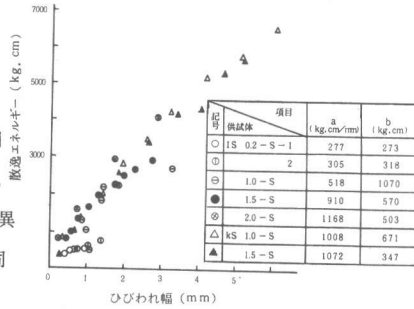


図-6(a) 散逸エネルギーとひびわれ幅の関係(静的)

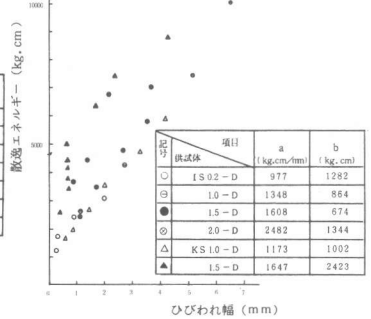


図-6(b) 散逸エネルギーとひびわれ幅の関係(衝撃)

値を示している。このことはひびわれ発生後 W_t/W_{tp} の値が等しいエネルギーが与えられた場合、たわみ制御の効果および、同一ひびわれ幅に達するまでに必要な吸収エネルギーは鋼繊維混入量の増加とともに増大し、また異形ファイバーの方が顕著であることを示すものである。一方衝撃荷重下では静的荷重下と異なりたわみ制御は波形ファイバーの方がむしろ大となっており、ひびわれ吸収エネルギーも両ファイバー間で差異はみられず波形ファイバーの効果が向上する結果となっている。図-7は繰返し載荷(剛性低下)に伴う散逸エネルギー比 $W_{Dp}/(W_{Dp}+W_t)$ をプロットしたものである。これによると静的荷重下では、散逸エネルギー比はある程度の剛性低下までは、ほぼ一定値を示し破壊近傍でその比が急増する。これに対し、衝撃荷重下ではひびわれ初期から散逸エネルギー比は大きく、破壊まではほぼ一定値を示している。このことは衝撃荷重下では静的荷重下に比べひびわれ初期より塑性的挙動を示し、吸収エネルギーが大きくなることを示すものと考えられる。表-5は各版における最大荷重の8割まで残留耐荷力が下がったところまでに吸収されたエネルギーを静・衝撃荷重下と比較したもので、靱性の評価が可能と考える。ここでIS-1.0-D 供試版は落下高ピッチが他と異なり、またひびわれの発見も遅れたため他の値より大きくなっている。これによると靱性は両荷重下とも鋼繊維混入量の増加に伴って増加しており、鋼繊維の種類では異形ファイバーの方が効果は大きいことがわかる。

表-5 残留耐荷力が80%になるまでの吸収エネルギー

項目	静的試験 (kg·cm)		衝撃試験 (kg·cm)	
	値	比	値	比
IS 0.2	316	1.00	520	1.00
IS 1.0	786	2.49	5033	9.68
IS 1.5	1394	4.41	2450	4.71
IS 2.0	2884	9.13	4802	9.23
KS 1.0	3688	11.67	3228	6.20
KS 1.5	2900	9.18	7453	14.33

3.4 落下高さおよび衝撃力積

図-8は重錘落下高さおよび衝撃力の最大値および衝撃力をその作用時間によって積分した力積との関係を代表的なものについて示したものである。また表-6は繰返し回数と衝撃力作用時間を示したものである。これよりひびわれ発生までは落下高さにはほぼ比例して衝撃力および力積は増大し、ひびわれ発生後は異形ファイバーは衝撃力の低下に対応して力積も下がるが、波形ファイバーの場合、衝撃力の低下にかかわらず、一定となる傾向がある。これらの差異は作用時間にもあらわれており、衝撃荷重下での補強機構が両繊維で異なることを示しているものと考えられる。

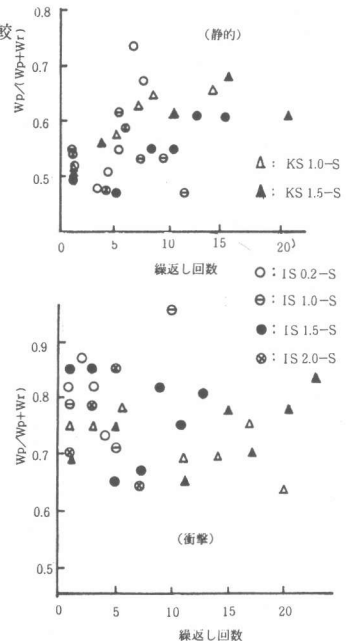


図-7 繰返し回数と $W_{Dp}/(W_{Dp}+W_t)$ の関係

3.5 変位分布

図-9は衝撃荷重下における各測点の変位を落下高さとともに代表的な版について示したものである。これより、各版ともひびわれ発生までは各測点で差異はなく版全体で荷重に抵抗しているが、波形ファイバーでは、ひびわれ発生と同時に、また異形ファイバーでは2~3回の繰返し後に中央線に沿うたわみが急増して破壊に至っていることがわかる。

3.6 剛性低下

応答加速度波形より得られる版の固有振動数に基づく版剛性の低下を繰返し数とともに示すと図-10のようになる。

これによると波形ファイバーの版剛性低下率は異形ファイバーに比べ著しく大きくなっていることがわかる。また 図中の表は衝撃力作用時間が約0.025secとなる時の固有振動数を求めたものであるが同一の作用時間に対する版剛性はほぼ等しく鋼繊維混入量および種類に影響されないことがわかる。

3.7 最大加速度

図-11は版の応答加速度の最大値の落下高さおよび繰返しの影響を代表的な例について示したものであるが、鋼繊維の種類によらず、混入量1.0%と1.5%で繰返し時の挙動が異なっている。最大加速度は振幅より振動数により敏感な量であり、混入量1.5%の場合、高次の振動が1.0%に比べ大きいことが考えられる。

4. 結論

本研究は、鋼繊維補強コンクリート版の衝撃荷重下でのひびわれ発生後の挙動を主にエネルギー的に検討し、静的荷重下での挙動とも比較したものである。その結果鋼繊維混入量およびファイバーの種類によるエネルギー吸収機構、ひびわれ拘束機構等に静的荷重とは異なる結果がみられ今後、種々の衝撃荷重下での研究が望まれる。

参考文献

- 1) 藤井学, 宮本文穂, 尾形龍夫: “鉄筋コンクリート版の耐衝撃性向上に関する基礎的研究” セメント技術年報34, 1980
- 2) ROKUGO Keitetsu: “Energy Approach to the Failure of Concrete and Concrete Members” 京大博士論文, 1979

表-6 繰返し載荷による衝撃力作用時間の変化 (ms)

供試体	項目	繰返し回数 (回)													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
IS 0.2-D	1	18	29	37	36	47	41	45							
	2	18	25	29	36										
1.5-D	1	16	21	25	25	31	34	39							
	2	23	19	21	24	29	34								
KS 1.0-D	1	16	17	18	19	19	20	20	22	25	25				
	2	18	20	19	20	20	20	20	21	18	21	23	22	25	25

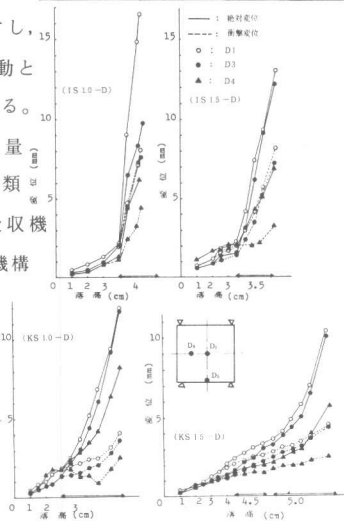


図-9 衝撃荷重下における変位分布

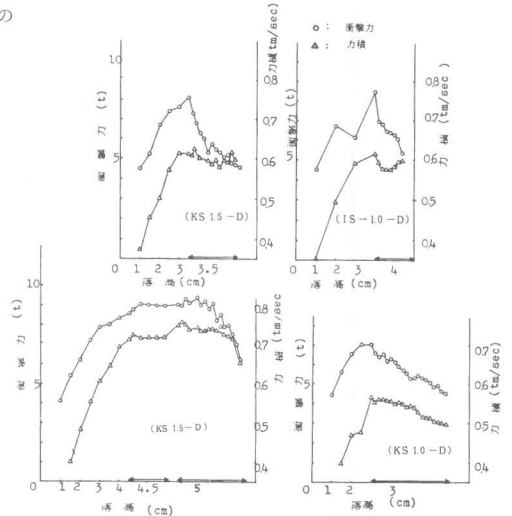


図-8 衝撃力, 力積と落下高さの関係

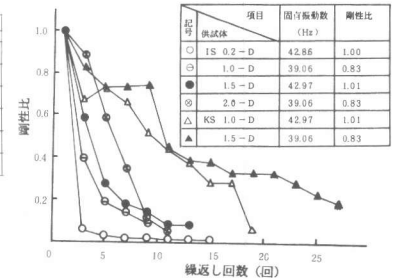


図-10 繰返し載荷による剛性低下

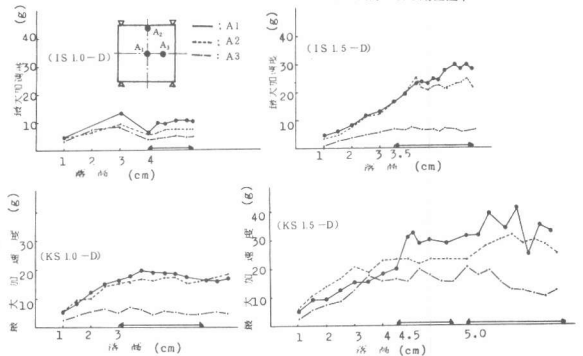


図-11 応答最大加速度におよぼす落下高さおよび繰返しの影響