

[38] 繊維補強コンクリートの耐衝撃性に関する研究

正会員 ○伊藤 利治（東京大学 生産技術研究所）

正会員 小林 一輔（東京大学 生産技術研究所）

今泉 和郎（三井石油化学工業 商品研究部）

1. はしがき

繊維補強コンクリートは、曲げ強度やタフネスなどの諸特性がすぐれていることが明らかにされている。しかし、疲労、耐衝撃性など動的挙動に関する研究結果は比較的少ない。

本研究は、鋼繊維補強コンクリート、ポリエチレン繊維補強コンクリートならびに鋼繊維とポリエチレン繊維による混成補強コンクリートについて、重錘落下曲げ衝撃試験を行い、耐衝撃性に及ぼす繊維の種類、繊維混入率および養生条件の影響について実験的検討を行ったものである。

2. 実験の概要

2.1 使用材料、配合および供試体

鋼繊維はデフォーメーションを有しないせん断ファイバーとインデント加工を行った異形カットワイヤーの2種を使用した。また、ポリエチレン繊維は軸線方向に一定間隔で“コブ状”的突起を有する単繊維である。これら繊維の諸元を表-1に示す。セメントは早強ポルトランドを、粗骨材は最大寸法15mmの秩父両神産の碎石を、細骨材は川砂（富士川産）を使用した。

繊維混入率は2種の鋼繊維補強コンクリートの場合、それぞれ0.5%、1.0%、1.5%および2.0%、ポリエチレン繊維補強コンクリートの場合には、0.5%、1.0%、2.0%、3.0%および4.0%とした。また、混成補強コンクリートの場合には、鋼繊維1%に対してポリエチレン繊維を1%としたものと、3%としたものの2種類を用いた。コンクリートマトリックスの水セメント比は全て50%とし、スランプは5~7cmとした。なお、比較のためプレーンコンクリートについても実験を行った。

供試体は10×10×40cmの角柱体を用い、コンクリートを一層で打設し、振動台を用いて締め固めた。供試体の養生は、試験前日まで水中養生(20±2°C)したものと、試験前に空中(20±2°C、50±5%R.H.)に1週間放置した2種とし、試験は強度が安定したと思われる3ヵ月以上とした。

2.2 衝撃試験機と計測装置

衝撃曲げ試験機は、荷重、変位等の計測やひびわれ等の観察が容易なガイド式重錘落下試験機を使用した。載荷方法はスパン30cmとする3等分点2点載荷とし、供試体の両支点は重錘打撃時における移動を防止するために硬質ゴムを用いて拘束した。衝撃力を与える重錘は3~10kgまで変化させることができ、本実験では8kgと10kgの2種とした。また、衝撃力は重錘が落下して供試体に接触するときの重錘の落下速度、すなわち衝撃速度を6.9~14m/secの範囲で、落下高さを2.4mまで変化させることによりえた。

衝撃荷重の測定はロードセル(50Ton)直流式動ひずみ計(応答周波数、DC~50KHz)を介し、メモリ

種類	長さ (mm)	断面寸法 (mm)	重量 (kg/本)	引張強度 (kg/mm ²)	特徴
鋼繊維(C)	30	0.5×0.5	54	54	ストレート
鋼繊維(D)	30	φ0.5	47	123	異形凸型
ポリエチレン繊維	40	φ0.9	25	26	異形凸型

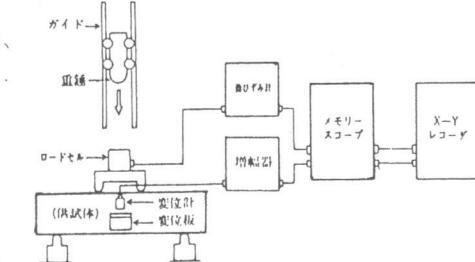
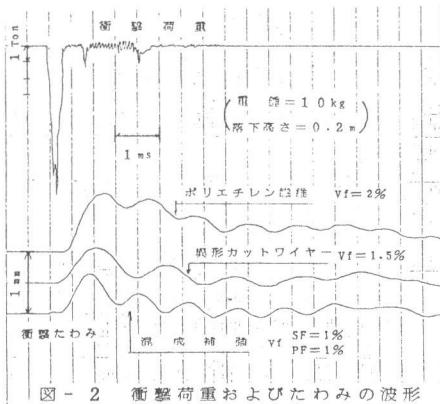


図-1 衝撃試験装置ならびに荷重・変位測定システム



ースコープ(2CH、同期周波数、DC～15MHz)に記憶した。また、変位の測定は供試体中央部で非接触型変位計(測定範囲、0～10mm、交流感度、0.1～0.5mV/ μ)、トランスデューサー(応答周波数、DC～20KHz)を介してメモリースコープに入力し、おののの波形はX-Yレコーダーで記録した。なお、くり返し衝撃試験において超音波伝播速度の測定も行った。

図-1には衝撃試験装置の概略を示す。また、図-2に各種繊維補強コンクリートの衝撃荷重とたわみの波形の1例を示した。

繊維補強コンクリートの耐衝撃性は、供試体が1回の落下衝撃で破壊する荷重を求める実験と、繊維を混入しないプレーンコンクリートの衝撃破壊荷重にはほぼ等しい荷重をくり返し載荷し、その破壊までの回数を求める実験を行い、これら結果を総合して評価することとした。

3. 実験結果

3.1 破壊性状

繊維補強コンクリート梁の衝撃曲げ破壊は、いずれの場合もほぼ衝撃載荷点内すなわち等モーメント区間で生じた。

本実験で採用したような3等分点2点載荷方式による衝撃曲げ試験では、衝撃速度によってその破壊性状は変化する。すなわち、繊維補強コンクリートの破壊性状は衝撃速度が大きくなるに従って、その破壊は曲げ破壊からせん断破壊に移行する。この傾向は繊維の種類、繊維混入率に関係なく認められた。写真-1に破壊の一例を示す。

また、くり返し試験における破壊性状とくり返し回数との関係は、ひびわれの発生数により、くり返し回数に大きく影響を及ぼし図-11に示す如く複数のひびわれが生じた場合には、1本のひびわれが発生した供試体に比べくり返し数は増大する。この理由としては繊維の配向と分散が考えられる。

3.2 1回落下衝撃試験

図-3～6は各種の繊維補強コンクリートの衝撃荷重と衝撃たわみとの関係を示したもので、それぞれ繊維混入率が一定の点を3本の直線によって結んでいる。図より明らかのようにこれらの線は、初めの立上りからひびわれが発生するまでの直線部分および降伏荷重以降の直線部からなる折り線となっている。最初の直線部分とたわみの増加率が変化するひびわれ荷重以降たわみが急増する荷重(ここでは降伏荷重)と呼ぶ。

これらの図より、繊維補強コンクリートが衝撃を受けた場合のひびわれ荷重は繊維混入率とともに著しく増大し、また、繊維の混入により降伏荷重時のたわみも大幅に増加してエネルギー吸収能力が著しく改善されること

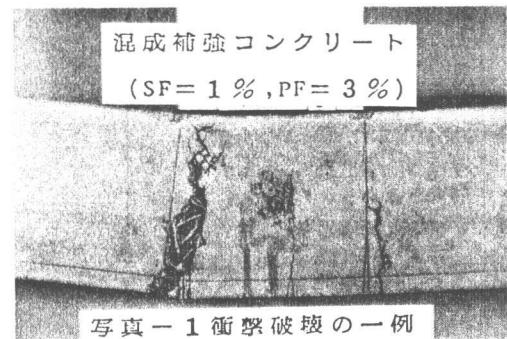


写真-1 衝撃破壊の一例

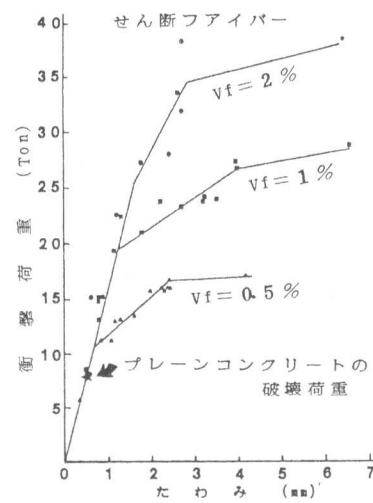


図-3 衝撃荷重とたわみ

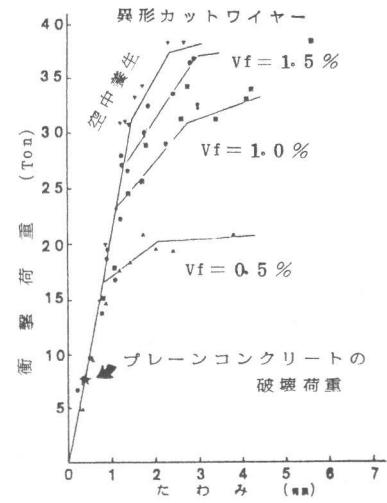


図-4 衝撃荷重とたわみ

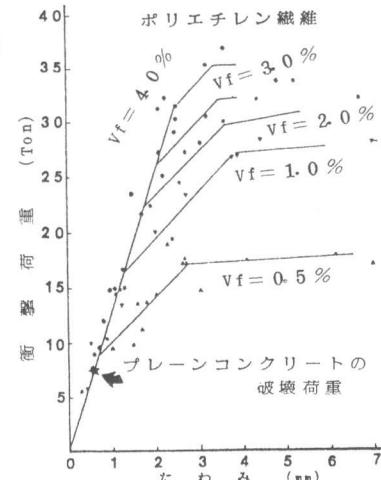


図-5 衝撃荷重とたわみ

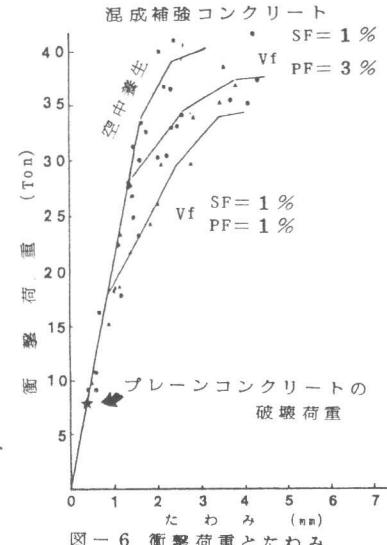


図-6 衝撃荷重とたわみ

がわかる。しかし、これらの傾向をより詳細に検討すると、繊維の種類と形状により次のように差異が認められる。すなわち、鋼繊維ではせん断ファイバーに比べ付着力のすぐれた異形カットワイヤーの方が耐衝撃性が大きい。

一方、鋼繊維とポリエチレン繊維の耐衝撃性を比較すると、後者は付着力が鋼繊維に比較して大きいが、ヤング率が著しく小さいため耐衝撃性に影響を及ぼしたものと思われる。また、同一繊維混入率の場合前者に比してひびわれ荷重、降伏荷重はやや小さく降伏荷重時のたわみも大きくなっている。

図-6に示した鋼繊維とポリエチレン繊維を併用した混成補強コンクリートの場合には、ひびわれ荷重以降において2つの特異点、すなわち、一次降伏と二次降伏現象が認められた。この理由としては、ヤング率の著しく異なる2種の繊維を混合して使用したためと考えられる。

また、図-7は各種の繊維補強コンクリートの繊維混入率と降伏荷重との関係について示したものである。この図より、繊維補強コンクリートの降伏荷重は、繊維混入率とともに増加しているが、その程度は繊維の種類、形状によって異なることが明らかである。

3.3 くり返し衝撃試験

図-8および図-9は、ブレーンコンクリートの破壊荷

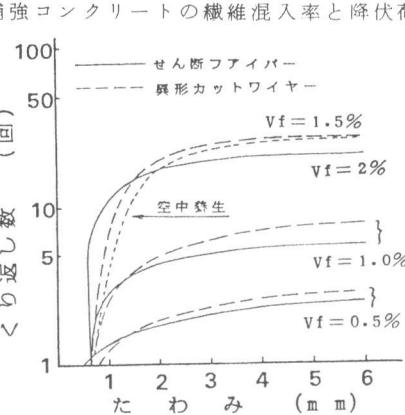


図-8 くり返し数とたわみとの関係

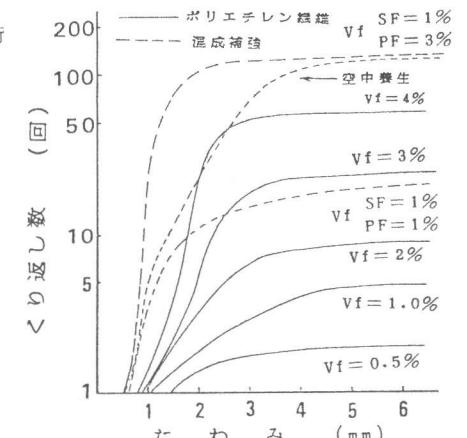


図-9 くり返し数とたわみとの関係

重に相当する衝撃荷重（重錘：10 Kg、落下高さ：0.2 m）をくり返し載荷した場合のくり返し回数とたわみとの関係を示したものである。

また、図-10は同様な荷重を加えた場合の繊維混入率と破壊までのくり返し回数との関係について示した。図-10より明らかなように、繊維補強コンクリートの破壊までのくり返し数は、繊維混入率とともに直線的に増大しているが、繊維の種類、形状によって差異が認められる。

一方、混成補強コンクリートの場合についてみると、鋼繊維1%とポリエチレン繊維3%を組み合わせた場合には破壊までのくり返し回数が著しく増大し、いわゆる混成効果を生じたことがわかる。

つぎに図-11は繊維補強コンクリートのくり返し載荷による損傷の進行状況を調べる目的で、超音波パルスによる伝播速度の結果の1例を示したものである。図より明らかなように、超音波伝播速度はくり返し載荷の初期で約9.2%に低下するがそのまま非常にゆるやかに低下した後、また急激に低下し供試体は破壊に至る。しかし、この傾向は供試体に生ずるひびわれ発生状況（供試体表面の可視クラック）により異なり、複数のひびわれが生じた場合には連続的に伝播速度は低下している。さらに、くり返し載荷試験による破壊までのくり返し回数は、ひびわれ本数が少ない程小さくなる傾向が認められた。このことは、衝撃による応力が分散せず1点に集中し、繊維の引き抜けや破断が生ずるためと考えられる。

3.4 養生条件の影響

図-12および図-13は供試体を載荷前1週間空中放置した場合の1回落下衝撃試験とくり返し載荷試験の結果

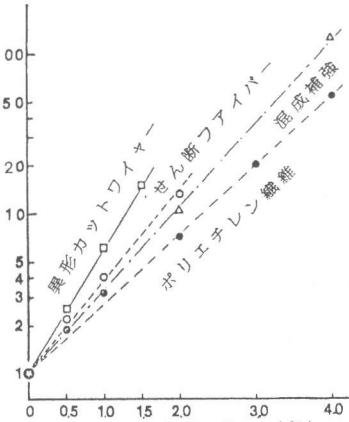


図-10 繊維混入率と破壊までのくり返し数

を水中養生を行った場合の結果と比較して示したものである。図-12より、空中養生された繊維補強コンクリートの降伏荷重は水中養生した場合に比べやや増大している。この傾向はプレーンコンクリートの場合とほぼ一致している（表-2参照）。この理由としては、乾燥によるコンクリート中の自由水の蒸発（重量減少率 1.1～1.4%）により静水圧が減少することや、マトリックスの繊維に及ぼす拘束力が増大し付着力が増すこと等によるものと考えられる。

一方、くり返し載荷に与える養生条件の影響は、くり返し一たわみ曲線からも明らかのように同じくり返し時の変形量が水中養生した場合に比較してやや大きくなるが、破壊に至るまでのくり返し数はほとんど変わらない。この理由としては、衝撃速度が1回落下に比べ非常に小さく、くり返し載荷による永久変形の増加などが考えられる。

3.5 各種コンクリートの耐衝撃性

表-2は各種コンクリート

の衝撃破壊荷重と静的破壊荷重について示した。

プレーンコンクリートの衝撃破壊荷重は静的破壊荷重に比較して約4倍であるが、繊維を0.5%混入した場合でその値は約8～9倍となる。

さらに繊維混入率を増加するにつれ、その値は約9～14倍となり、繊維補強コンクリートの耐衝撃性が他の諸特性に比べて著しくすぐれていることがわかる。

4. 結論

繊維補強コンクリートの衝撃試験を実施した。主な結果を要約すると以下のようになる。

- 1) 繊維補強コンクリートの破壊性状は、衝撃速度 ($1.4 \sim 6.9 \text{ m/sec}$) が大きくなる程、曲げ破壊からせん断破壊に移行する。
- 2) 繊維混入率の影響は、一回落下試験の降伏荷重およびくり返し試験のくり返し数のいずれの場合にも認められ、混入率の増加とともにその値は増大する。
- 3) 繊維の種類が一回落下およびくり返し載荷試験におよぼす影響は、混入率の増加とともに顕著に認められ、繊維の形状、引張強度、ヤング率などに起因するものと考える。
- 4) 供試体の乾湿の状態の影響は、湿潤状態に比べ乾燥されたコンクリートの方が耐衝撃性は大きい。

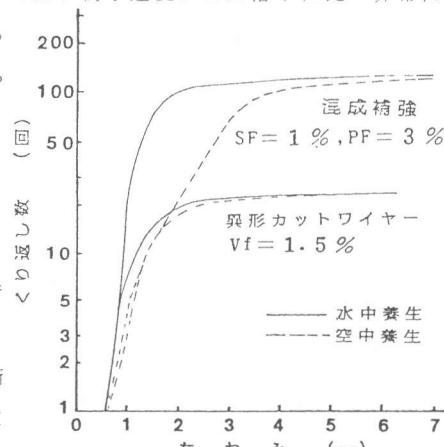


図-13 养生条件とくり返し一たわみ曲線

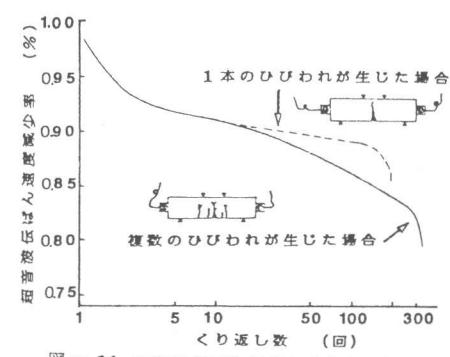


図-11 超音波伝ばん速度とくり返し数

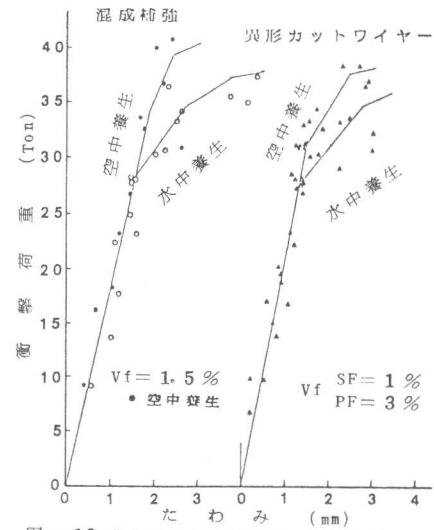


図-12 养生条件と衝撃荷重一たわみ曲線

表-2 各種コンクリートの耐衝撃性

コンクリートの種類	繊維 (%)	Vf (%)	養生	Pst (ton)	耐衝撃荷重 (ton)		荷重比				
					Pcr	Py	Py'	Fy/Pst	Pcy/Po	Py/Po	Py'/Po
繊維補強コンクリート (C) I	せん断ファイバ	0.5	水中	2.0	1.06	1.68	—	8.4	1.8	2.1	—
	せん断ファイバ	1.0		2.5	1.95	2.66	—	10.6	2.4	3.8	—
	せん断ファイバ	2.0		3.1	2.54	3.45	—	11.1	3.2	4.8	—
	異形カットワイヤ	0.5	水中	2.2	1.66	2.03	—	8.2	2.1	2.5	—
	異形カットワイヤ	1.0		3.2	2.82	3.08	—	9.6	2.9	3.9	—
	異形カットワイヤ	1.5		3.2	2.70	3.70	—	11.6	3.4	4.6	—
ポリエチレン繊維 (P) I	繊維	1.5	空中	3.3	3.10	3.80	—	11.5	2.9	4.1	—
	ポリエチレン繊維	0.5	水中	2.0	0.88	1.70	—	8.5	1.1	2.1	—
	ポリエチレン繊維	1.0		2.1	1.65	2.74	—	13.0	2.1	3.4	—
	ポリエチレン繊維	2.0		2.8	2.24	2.95	—	12.8	2.8	3.7	—
	ポリエチレン繊維	3.0		2.3	2.60	3.20	—	13.9	3.3	4.0	—
	ポリエチレン繊維	4.0		2.9	3.15	3.50	—	8.6	3.9	4.4	—
混成コンクリート	D	1:1	水中	2.8	1.80	2.93	3.40	10.5	3.7	3.7	4.8
	D	1:2		3.2	2.80	3.42	3.78	10.7	3.5	4.8	4.7
	P	1:3	空中	3.1	3.38	3.90	4.00	12.6	3.7	4.2	4.8
プレーンコンクリート	0	水中	2.0	—	8.0	—	4.0	—	—	1.0	—
	0	空中	2.1	—	9.2	—	4.4	—	—	1.0	—

Pst: 静的曲げ荷重

Pcr: ひびわれ荷重

Pcy: 二次降伏荷重

Po: プレーンコンクリートの破壊荷重