

## [35] 鋼纖維補強膨張コンクリートの靭性に関する研究

正会員 ○戸川一夫 (和歌山工業高等専門学校)

正会員 中本純次 (和歌山工業高等専門学校)

### 1. まえがき

鋼纖維補強コンクリートは普通コンクリートとくらべて、引張強度、曲げ強度あるいは靭性等が著しく増大することは周知のことである。膨張コンクリートは普通コンクリートとくらべて乾燥収縮が小さく、クリープが大きく、膨張を拘束するとケミカルプレストレスが導入でき、そのため部材のひびわれ耐力が増大することが明らかにされている。

本研究は上述した両コンクリートのそれぞれの長所に注目して、それらの相乗効果を期待して、鋼纖維と膨張材を混入したコンクリート（以下鋼纖維補強膨張コンクリートという）の力学的特性のうち、靭性に関して基礎的資料を得るとともに、靭性の改善に最適な鋼纖維混入量および膨張材量について究明しようとするものである。<sup>1)</sup>

靭性の評価の指標としては最大耐力点以前については限界J積分<sup>2)</sup>Jc、最大耐力点以後については表面エネルギー<sup>3)</sup>、さらには供試体全体としてのもろさやねばりに関してはToughness Index<sup>4)</sup>あるいはModulus of Toughness (MOT)を選んだ。

### 2. 実験概要

#### 2.1 使用材料および実験計画

セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は川砂（比重2.55、F.M=2.82）、粗骨材は硬質砂岩碎石（最大寸法15mm、比重2.61）をそれぞれ用いた。スチールフアイバーは0.25×0.5×2.5mmのせん断フアイバーを使用した。膨張材はカルシウムサルホアルミニネート系のものである。コンクリートの基準配合条件は単位結合材量(C+E)=450kg/m<sup>3</sup>、水結合材比W/C+E=50%、細骨材率s/a=60%である。ここでEは単位膨張材量を示す。表-1に本実験計画を示す。

#### 2.2 供試体形状および養生方法

J積分による靭性評価を行なうために用いた供試体は10×10×40cmの角柱供試体であり、引張側スパン中央部に図-1に示すように切欠きをついている。切欠きは先端が約30°で厚さ3mmのプラスチック板をコンクリートに埋込み、硬化後取除く方法で加工した。供試体の切欠き深さとしてはH/3～H/2が適当であると報告されている。<sup>5)</sup>本実験ではH/2.5を選び切欠き深さは4cmとした。表面エネルギーあるいはMOT等の算定には切欠きのない10×10×40cmの角柱供試体を用いた。圧縮強度ならびに弾性係数の測定にはØ10×20cmの円柱供試体を用いた。供試体は打込み直後から材令1日まで20±2°Cの空調室で湿布養生し、材令1日で脱型して試験日材令28日まで水中養生(20±2°C)した。

#### 2.3 実験方法

靭性を測定するための載荷試験方法を図-2に示す。荷重

表-1 実験計画

		単位膨張材量 E (kg/m <sup>3</sup> )				
		0	30	50	70	90
鋼纖維混入率(%)	0	●	●	●	●	
	0.5	●	●	●	●	
	1.0	●	●	●	●	
	2.0	●	●	●	●	●

\* 混入率はコンクリート容積割合  
●印の組合せについて実験した

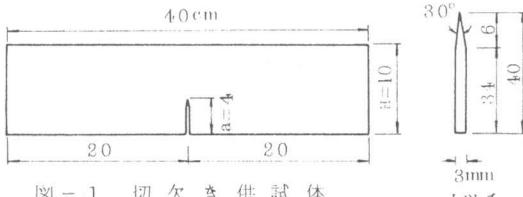


図-1 切欠き供試体

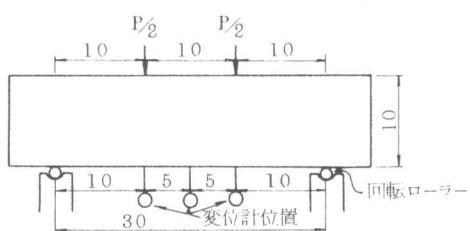


図-2 載荷方法

載荷は三等分点二点載荷方法によつて行なつた。変位の計測は高感度変位計を使用し、荷重-変位曲線はX-Yレコーダによつて記録した。載荷速度はクロスヘッドの速度を毎分0.5mmとした。結果の整理は三本の供試体の平均値を使用した。

### 3. 実験結果と考察

実験結果を表-2に示す。

#### 3.1 最大耐力以前の靭性

最大耐力点までの荷重変位関係が、非線形となる場合には非線形破壊力学に基づく限界J積分 $J_c$ は靭性評価の指標として有用であると報告されている。 $J_c$ はひびわれ発生に対する抵抗性を表わす指標である。本実験では $J_c$ の算定<sup>1)</sup>はRiceらの提案式によつた。

$$J_c = \frac{2W_n}{Bb} = \frac{2(W_t - W_u)}{Bb}$$

ここで $W_n$ はボテンシャルエネルギー $-W_t$ のうち切欠きの存在に起因する成分であり、 $b$ は供試体高さ $H$ から切欠き深さ $a$ を差引いた残りである。切欠きの存在に起因しない成分 $W_u (=W_t - W_n)$ は無切欠き供試体の荷重変位曲線から定量化する。 $B$ は供試体幅である。

図-3は普通コンクリート、膨張コ

ンクリート、鋼纖維補強コンクリートおよび鋼纖維補強膨張コンクリートの切欠き供試体について得られた荷重変位曲線の数例を示す。変位は載荷点直下で計測したものであり、2点の変位の平均値である。鋼纖維さらには膨張材を混入することによつて靭性は増大することがわかる。図-4は種々のコンクリートの $J_c$ 値をプロットしたものである。実験結果より鋼纖維量の増加とともに $J_c$ 値は増加することは明らかである。この傾向は六郷らの研究結果と同様である。また、膨張材は鋼纖維補強コンクリートの $J_c$ 値を増加させる効果があることが認められる。そして $J_c$ 値が最大になる単位膨張材量が存在し、この場合は $50\text{kg}/\text{m}^3$ である。 $J_c$ 値に関して、普通コンクリートは $0.9\text{kgf}/\text{m}$ である。鋼纖維2%混入コンクリートは $10.7\text{kgf}/\text{m}$ 、鋼纖維2%膨張材 $50\text{kg}/\text{m}^3$ 混入コンクリートは $22.4\text{kgf}/\text{m}$ であり、 $J_c$ 値について普通コンクリートと比較すると前者は12倍、後者は25倍である。すなわち、コンクリートの最大耐力点以前の靭性の改善に関して膨張材は単独では効果を発揮しないが、鋼纖維と複合することによつて著しい効果を発揮するようになる。これは膨張コンクリートの膨張が鋼纖維によつて三次元的に拘束されてケミカルプレストレスが導入され、これがコンクリートのひびわれ発生抵抗を増大させることになると考えられる。<sup>5)</sup>

#### 3.2 最大耐力点以降の靭性

##### 1) Modulus of Toughness(MOT) および Toughness Index

最大耐力点以降、耐力の減少が急激なほどもろく、耐力の減少が緩慢なほどねばりがあると定義できる。この

表-2 実験結果

単張 位材 膨 量 (kg/m <sup>3</sup> )	纖 維 量 (%)	圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	曲げ強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	静弾性係数 $10^6$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$J_c$ 値 (kgf/m)	Toughness Index (ACI法)	MOT値 (梅山法)	表面エネルギー $\delta$ (kgf/m)
0	0	380	5.3	2.3	0.9 (64)	2.8 (21)	0.6 (2)	1.8 (23)
	0.5	363	5.4	2.3	1.3 (32)	35.9 (55)	39.0 (8)	25.4 (5)
	1.0	375	6.2	2.4	4.0 (48)	49.0 (8)	79.0 (8.5)	49.9 (10)
	2.0	378	7.4	2.4	10.7 (4)	67.3 (14)	107.0 (2)	93.2 (14)
30	0	368	5.5	2.3	1.0 (37)	1.9 (21)	0.7 (3)	2.5 (27)
	0.5	355	5.5	2.3	3.8 (59)	41.3 (39)	68.5 (36)	46.3 (33)
	1.0	369	7.0	2.4	5.0 (41)	75.5 (25)	106.6 (22)	95.5 (30)
	2.0	368	7.7	2.7	13.7 (14)	61.4 (22)	122.0 (25)	129.5 (42)
50	0	363	5.4	2.3	0.9 (60)	1.6 (6.3)	0.6 (6)	2.4 (5)
	0.5	356	5.8	2.3	4.5 (52)	22.1 (22)	41.2 (10)	27.2 (8)
	1.0	358	7.1	2.3	13.1 (36)	69.2 (10)	80.1 (4)	72.8 (8)
	2.0	353	8.0	2.3	22.4 (30)	60.6 (23)	104.8 (9)	105.3 (18)
70	0	176	4.0	1.6	0.5 (73)	1.6 (6)	0.9 (42)	1.9 (10)
	0.5	258	4.9	1.7	1.3 (19)	34.1 (35)	51.8 (9)	32.1 (15)
	1.0	259	6.2	1.8	9.8 (58)	50.6 (42)	92.1 (7)	78.0 (18)
	2.0	324	7.0	1.7	18.1 (30)	70.7 (28)	106.3 (20)	111.2 (21)
90	2.0	157	5.7	1.4	12.2 (89)	60.8 (20)	107.2 (7)	83.9 (12)

( )内 変動係数

もろさやねばりは供試体が完全に破断するのに必要とされるエネルギーと最大耐力に達するまでに外力によつて加えられるエネルギーとの比を指標として評価できると報告されている。<sup>2)</sup>

ここでは A C I で提案されている Toughness Index と梅山<sup>4)</sup>らが提案した M O T (タフネス指数) を韌性の指標とし選びそれらの適否を比較検討する。M O T による場合、基準強度  $P_c = P_{max}$  (最大荷重) とし、 $P_c$ 以後のたわみ分  $K = 1.5$  mm とした。

図-5 は切欠きのない供試体から得られた荷重変位曲線の数例を示している。変位はスパン中央の変位である。実線は実測値である。破線は供試体がスパン中央以外で破壊した時のスパン中央のたわみの測定値をひびわれが中央にあるとした時のスパン中央のたわみに補正した値を示す。図より鋼纖維を混入することにより、さらに膨張材を混入することにより最大耐力点以降の韌性は著しく改善されることがわかる。

図-6 と図-7 はそれぞれ A C I 法と梅山法によつて得られた結果を示している。A C I 法と梅山法による実測値のバラツキを比較すると、表-2 に示しているとおり、前者は後者よりバラツキは大きいことがわかる。また、A C I 法では初期ひびわれ発生荷重を正確に測定する必要があるが、このことはかなり難しいことが本実験を通じて明らかになつた。これらのことから A C I 法は韌性評価の指標として必ずしも適切でないようと思われる。また、図-6 に示しているように A C I 法では韌性改善に関する鋼纖維混入の効果を適切に評価しない場合もあることがわかる。したがつて、本実験では M O T によつて韌性を検討する。図-7 から、鋼纖維量の増加とともに最大耐力点以降の韌性は大幅に増大することがわかる。この傾向はこれまでの研究結果と同様である。また、膨張材は鋼纖維補強コンクリートの韌性の改善に効果があると言える。M O T 値が最大になる単位膨張材量が存在し、この場合は  $30 \text{ kg/m}^3$  であり、最大耐力点以前の Jc 値の場合 ( $50 \text{ kg/m}^3$ ) と相違している。したがつて最大耐力以前の韌性が高ければ以降の韌性も大きくなるとは言えないようである。このことは最大耐力以前の韌性が高いと、以降の耐力の減少が急激になる場合のあることを示唆している。M O T 値に関して、普通コンクリートは 0.6 である。鋼纖維 2 % 混入コンクリートは 107.0、鋼纖維 2 %、膨張材  $30 \text{ kg/m}^3$  混入コンクリートは 122.0 であり、普通コンクリートの 178 倍および 203 倍で

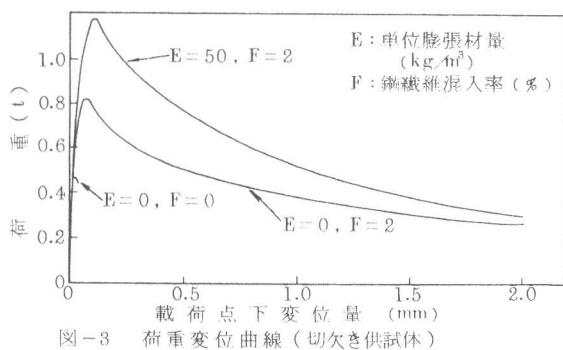


図-3 荷重変位曲線(切欠き供試体)

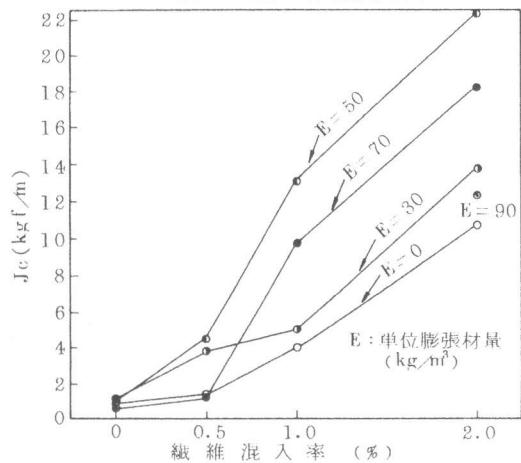


図-4 Jc に関する実験結果

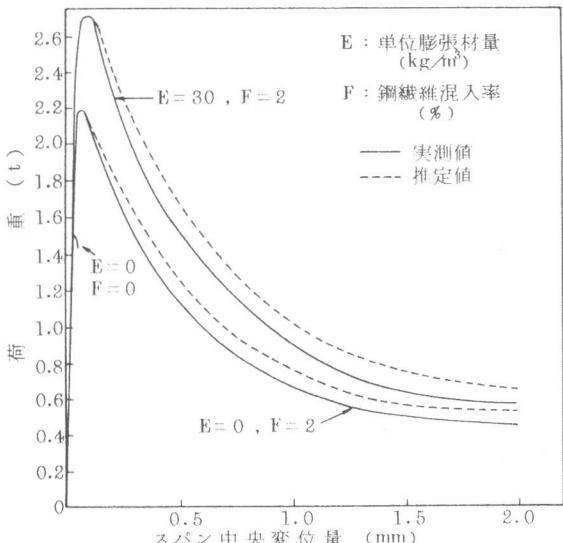


図-5 荷重変位曲線(切欠きなし供試体)

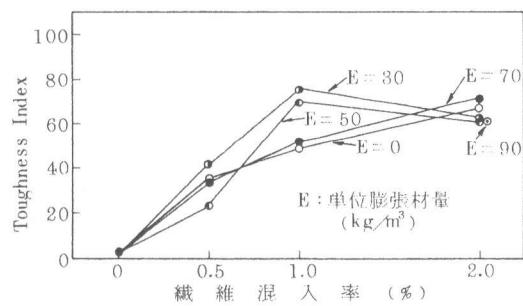


図-6 Toughness Index に関する実験結果

ある。

## 2) 表面エネルギー

曲げ供試体が完全に破断するまでの荷重変位曲線を計測し、全エネルギーを破断面のみかけの表面積で除した値を表面エネルギー<sup>2)</sup>とした場合、<sup>2)</sup>は破断時のエネルギー吸収能力を表わす。最大耐力点と同じでもそれ以降の曲線の異なる場合にその違いを表わすことができる。図-8は各種コンクリートの表面エネルギー<sup>2)</sup>の値を示している。なお本実験では変位が2mmになるまでの荷重変位曲線から表面エネルギーを求めている。<sup>2)</sup>は鋼纖維混入量が増加するとともに増大することがわかる。また、膨張材も表面エネルギーの増大に効果があり、単位膨張材量30kg/m<sup>3</sup>のときが最も効果がある。この傾向はMOT値の場合と同様である。

表面エネルギーは普通コンクリートで1.8kgf/mである。鋼纖維2%混入コンクリートは93.1kgf/m、鋼纖維2%，膨張材30kg/m<sup>3</sup>混入コンクリートで129.5kgf/mであり、普通コンクリートとくらべて前者は52倍、後者は72倍となつてゐる。

## 4. まとめ

本研究は鋼纖維補強膨張コンクリートの韌性に関して実験的に検討したものである。本実験から、鋼纖維補強コンクリートに膨張材を混入することによつて韌性はさらに増大することが明らかになつた。以下に本実験結果を要約して結論とする。

1) 最大耐力点以前の韌性Jc値は鋼纖維量の増加とともに増大する。また膨張材は鋼纖維補強コンクリートの韌性の増大に効果があり、韌性の増大に最適な単位膨張材量は50kg/m<sup>3</sup>程度である。鋼纖維2%，膨張材50kg/m<sup>3</sup>混入したコンクリートの韌性は普通コンクリートの25倍であり、また鋼纖維2%混入コンクリートの約2倍である。

2) 最大耐力点以後の韌性(MOT値および表面エネルギー<sup>2)</sup>)は鋼纖維量の増加とともに増大する。また膨張材は鋼纖維補強コンクリートの韌性の増大に効果があり、韌性の増大に最適な単位膨張材量は30kg/m<sup>3</sup>程度である。鋼纖維2%，膨張材30kg/m<sup>3</sup>混入コンクリートのMOT値および表面エネルギー<sup>2)</sup>は普通コンクリートのそれぞれ203倍および72倍であり、また鋼纖維2%混入コンクリートの1.1倍および1.4倍である。

3) 膨張材が鋼纖維補強コンクリートの韌性を増大させる効果は最大耐力点以前の方が以降より大きい。また、最大耐力点以前と以降では鋼纖維補強コンクリートの韌性の増大に最適な膨張材量は異なる。

## 参考文献

- 1) Rice, J.R., Paris, P.C. and Merkle, J.G.: Progress in Flaw Growth and Fracture Toughness Testing, STP 538, ASTM, 1973
- 2) 内田, 六郷, 小柳: 韌性パラメタとコンクリートへの適用, 土木学会第36回年次学術講演集, V, 1981
- 3) ACI Committee 544: Measurement of Properties of fiber reinforced Concrete, Jour. of ACI, July, 1978
- 4) 梶山, 岡村, 小林: 鋼纖維補強コンクリートの曲げ韌性の評価方法, 第2回コンクリート工学年次講演論文集, 1980
- 5) 六郷, kesler, C.E. and Lawrence, F.V.: J積分によるコンクリートの破壊韌性の評価, 第2回コンクリート工学年次講演論文集, 1980

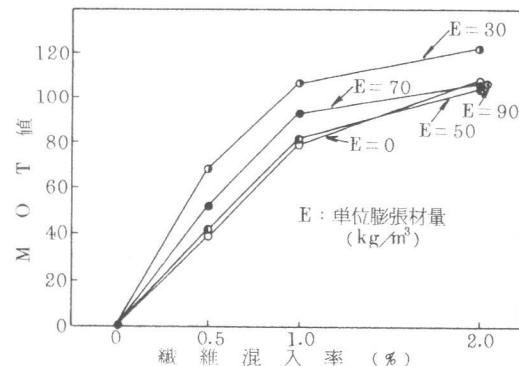


図-7 MOT値に関する実験結果

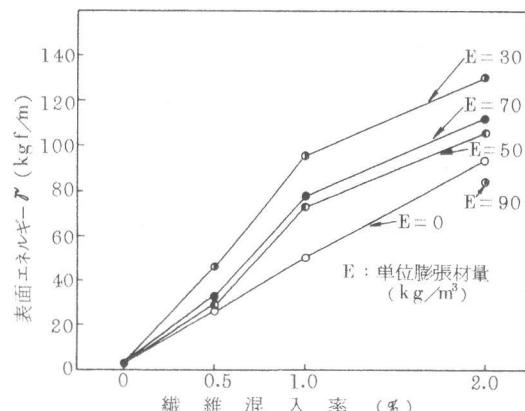


図-8 表面エネルギー<sup>2)</sup>に関する実験結果