

[51] 鋼繊維補強コンクリートの曲げ靱性の評価方法

正会員 ○ 梅 山 和 成 (東京大学大学院)

正会員 岡 村 雄 樹 (日本大学大学院)

正会員 小 林 一 輔 (東京大学生産技術研究所)

1. まえがき

現在、繊維補強コンクリートの曲げ靱性の評価方法として A C I 5 4 4 委員会による Toughness Index 及び他の 2,3 の方法がある。しかし、これらの方法には矛盾や欠点があり靱性評価のための適当な指数とは言えない。そこで本研究では新たな方法としてタフネス指数 (Modulus of Toughness) を提案し、その算出方法、特性ならびに適用性に関する検討を行なった。

2. A C I 5 4 4 委員会による方法とその問題点

(I) Toughness Index の定義： 寸法 $4 \times 4 \times 14$ in. の供試体を用いスパン 12 in. で三等分点二点載荷法によって曲げ試験を行なった時の荷重とたわみとの関係を示したものが図-1である。Toughness Index はたわみが 1.9 mm になるまでの荷重たわみ曲線によって囲まれた面積 ($A_1 + A_2$) の初期ひびわれ時までの面積 (A_1) に対する割合である。初期ひびわれは荷重-たわみ曲線が非線形となる点と決めている。5 4 4 委員会はたわみを 1.9 mm と定めた根拠を明らかにしていないが C.H.Henager²⁾ は、平均的な初期ひびわれ時のたわみ 0.125 mm のおよそ 15 倍に相当する値であると述べている。

(II) Toughness Index の試験における問題点： コンクリートを弾性体 ($E_c = 3 \times 10^5$ Kg/cm²) と仮定し縁応力が 7.5 Kg/cm² の時のたわみを計算すると 0.05 mm となるが、この数値は C.H.Henager の述べた値の $1/2$ 以下である。この違いは測定上のミスによるものと考えられる。そこで本研究では、次のような二種類の方法でたわみを測定した。その一つは、図-2の(1)に示したようにベットと供試体底面との変位を測定する方法であり、もう一つは、図-2の(2)に示した方法である。

同一供試体のたわみをこの二種類の方法によって測定した結果を図-3に示した。方法(2)による曲線は、理論解にはほぼ一致しており、この方法によれば正確なたわみを測定できることがわかる。これに対し方法(1)によって測定されたたわみは真のたわみよりかなり大きく、支点部における供試体の塑性変形等による誤差を含んでいることがわかる。この荷重-たわみ曲線の違いが Toughness Index に及ぼす影響を図-3に示した。方法(2)による Toughness Index は方法(1)による値の約3倍である。これは、両者間で $A_1 + A_2$ の値がほぼ等しいのに対し、 A_1 が異なることによる。以上のことから i) 初期ひびわれ時のたわみは非常に小さいため、これを正確に

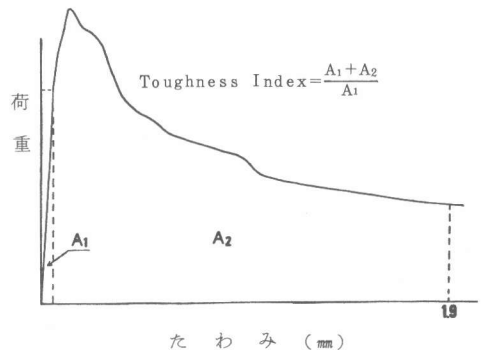


図-1 Toughness Index の定義

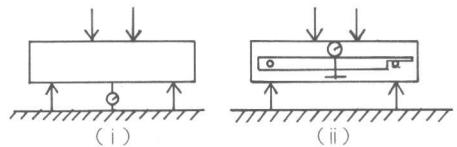


図-2 たわみの測定方法

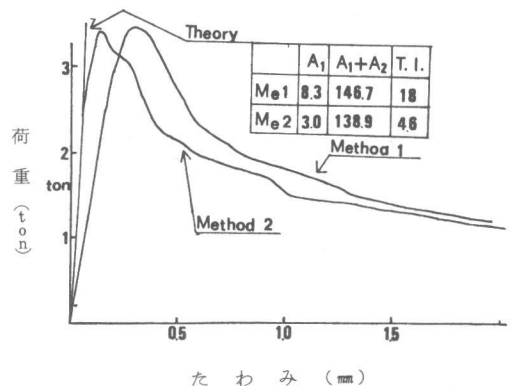


図-3 測定方法と荷重-たわみ曲線との関係

測定することは難しく誤差が入り易いこと、ii) この誤差は Toughness Index に大きな影響を与えるため Toughness Index を正確に求めることは測定上の問題として難しいこと、などがわかる。

(III) 初期ひびわれの判定における問題点

図-3より明らかなように、測定された荷重-たわみ曲線から初期ひびわれ(非線形となる点)を正確に定めることは非常に難しい。そのうえ、(II)の例からもわかるように Toughness Index には初期ひびわれ時のたわみ量によって大きな影響を受けるという特性がある。そのため、たとえ正確な荷重-たわみ曲線を求めることができたとしても得られた Toughness Index の値は、個人誤差を含み十分に信頼性のある数値とは言えない。以上(II)(III)の2つの理由により A C I の提案する Toughness Index は、靱性を評価するのに適切な方法ではないと考える。

3. 本研究の提案するタフネス指数

(1) タフネス指数の定義： 図-4にタフネス指数 (Modulus of Toughness) の定義を示した。この曲線は供試体寸法 $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}$ 、スパン 30 cm とし三等分点二点載荷法によって曲げ試験を行なった場合の荷重-たわみ曲線である。Sの符号の決め方を図-5に示した。タフネス指数を定義した式における100は、数値を大きくしてわかり易くするための定数であり、200はタフネス指数を正数とするためのものである。

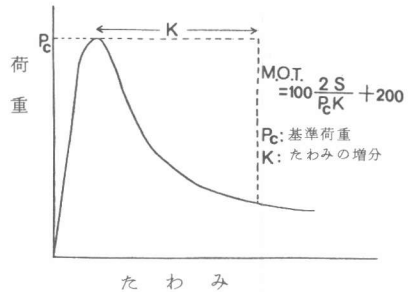


図-4 タフネス指数の定義

(2) タフネス指数の持つ意義： タフネス指数の特性をわかり易くするために荷重-たわみ曲線を模式的に二本の直線で表わしたものが図-6である。これより、タフネス指数の第1項は、 P_c (基準強度)以後たわみの増加分がKになる時の荷重の変化量 ΔP の P_c に対する割合を表すことがわかる。また、第1項は P_c を一定とした場合には傾き m に比例し m を一定にすると $1/P_c$ に比例する。

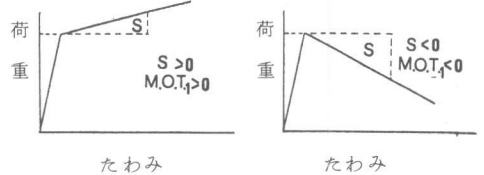


図-5 Sの符号の決め方

4. ひび割れ位置による補正

一般に曲げ破壊は等モーメント区間中の最弱断面で起こるため、その破壊位置は定まっていない。しかし、破壊位置(ひびわれ位置)がどの位置にあっても破壊断面の単軸引張の荷重-変位曲線が同じである場合には、得られる荷重-たわみ曲線ならびにタフネス指数は同じでなければならない。しかし、実際には荷重とスパン中央のたわみ関係ならびにタフネス指数は破壊位置が異なると違ったものになる。ここでは、そのための補正係数を求めた。

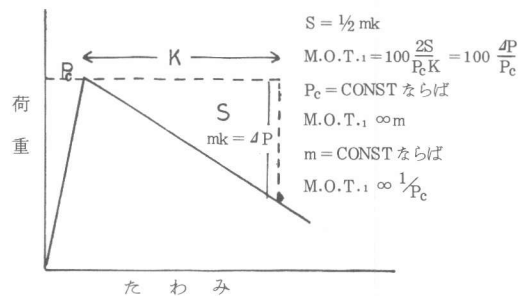
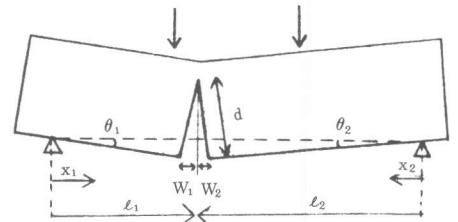


図-6 タフネス指数の持つ意義

(1) 等モーメント区間中のたわみ分布： 最大荷重以後の曲げ供試体の変形は、ひびわれ部がヒンジとなることによって進行すると考え、図-7に示すような変形機構及びたわみ分布を仮定した。次に、これに基づいて等モーメント区間中のある位置のたわみの実測値から他の位置のたわみの推定を行なった(図-8)。この結果、推定値と実測値とはよく一致しており図-7の仮定は正しいと考えられる。



たわみ分布: $\delta(x_1) = \theta_1 x_1 - (1)$, $\delta(x_2) = \theta_2 x_2 - (2)$

たわみの整合条件: $L_1 \cdot \theta_1 = L_2 \cdot \theta_2$

図-7 たわみ分布

(2) 破壊位置による荷重-たわみ曲線の補正

(A) 基本的な考え方及び仮定： 次のような考え方と仮定の下に補正を行なった。i) 破壊がスパン中央で起こった場合のスパン中央の荷重—たわみ曲線から求めたタフネス指数を基準とする。ii) 破壊が等モーメント区間中のどの位置にあっても供試体底面のひびわれ幅が同じであれば、その破壊断面のモーメント耐荷力は一定となる。iii) 補正は、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 (δ_c) をひびわれ幅を変えず、即ちモーメント耐荷力を変えずにひびわれがスパン中央にあるとした時のスパン中央のたわみ (δ'_c) に補正する。

(B) 補正係数： 具体的には(1)で仮定したたわみ分布を利用し、以下に示す方法によって補正する。(図-7参照)

$$\begin{aligned}
 & < d : \text{ひびわれ高さ}, \ell = \ell_1 + \ell_2 \quad \ell_1 \leq \ell_2, \\
 & \delta_c : \text{補正前のスパン中央のたわみ}, \delta'_c : \text{補正後のスパン中央のたわみ} > \quad w_1 = d\theta_1 - (1), \quad w_2 = d\theta_2 - (2), \\
 & w = w_1 + w_2 = d(\theta_1 + \theta_2) - (3), \quad w = 2d\left(\frac{1}{\ell} + \frac{\ell_2}{\ell\ell_1}\right) \cdot \delta_c = \frac{2d}{\ell_1} \delta_c - (4), \quad \text{ひびわれがスパンの中央にある場合} \\
 & w = 2d/\ell_2 \cdot \delta'_c = \frac{4d}{\ell} \delta'_c - (5) \quad \text{補正係数 } C_0 \text{ (4)(5)より } \frac{2d}{\ell_1} \delta_c = \frac{4d}{\ell} \delta'_c, \quad \delta'_c = \frac{\ell}{2\ell_1} \delta_c, \quad C_0 = \ell/2\ell_1, \\
 & 1.0 \leq C_0 \leq 1.5 - (6)
 \end{aligned}$$

(C) 問題点： ひびわれが1つだけでなくいくつも入る場合には図-7の仮定は成立しない。しかし、一般に破壊は1つのひびわれで決まるためそれ以外のひびわれが小さい場合には(B)で述べた補正方法が適用できる。一方、同程度のひびわれが多数発生する場合には、たわみ補正は行わず実測値をそのまま用いればよい。

(D) タフネス指数の算出方法： 以下のような手順に従って求める。1) 供試体寸法 $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}$ 、スパン 30 cm の曲げ試験を三等分点二点載荷法で行なう。2) たわみはスパン中央で測定する。3) その時、破壊位置を記録する。4) 式(6)の補正係数を用いて最大荷重(または初期ひびわれ荷重)以後のたわみの補正を行い、真の荷重—たわみ曲線を求める。4) 図-4に示した定義に従ってタフネス指数を求める。

5. タフネス指数の持つ意義と適用

(1) タフネス指数の持つ意義： タフネス指数の定義からも明らかなように P_c は評価領域の左限を、 K は右限を規定する。従って、 P_c と K の値のとり方によって曲線の評価領域を変えることができるが、ここで、 P_c 、 K の値をどのように定めるかが問題となる。筆者は、 P_c (基準荷重) を設計基準荷重に取るのがよいと考える。既に述べたようにタフネス指数は、 P_c 以後たわみ増分が K になるまでの荷重増減の平均的程度を表す。従って、タフネス指数は P_c を設計基準荷重とした場合にその後の変形能によって付加される安全の程度を表すと考えることができる。例として図-9の繊維混入率4%の場合を考える ($P_c = P_k, K = 5 \text{ mm}$; $P_c = P_{max}, K = 5 \text{ mm}$)。それぞれのタフネス指数は表-1より327と144になる。このことは、設計基準荷重を P_k とした方が P_{max} とするよりも付加的安全度が大きいことを意味する。従来、材料の靱性評価には荷重—変位曲線の囲む全面積によって表す全面積法がしばしば用いられてきた。ここで図-10のよ

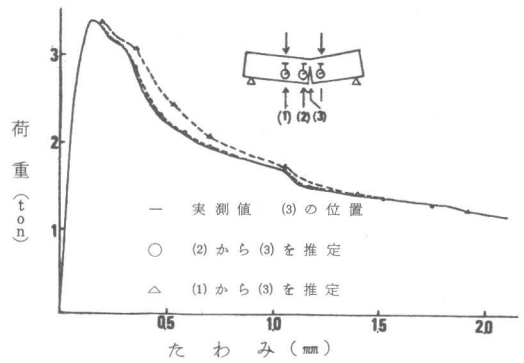


図-8 たわみの推定

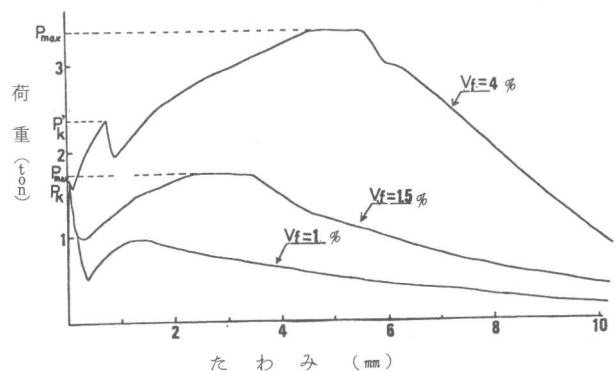


図-9 ポリエチレン繊維補強コンクリートの曲げ特性

表-1 ポリエチレン繊維補強コンクリートのタフネス指数

	V_f	$K=15 \text{ mm}$	$K=10 \text{ mm}$
$P_c = P_k$	$V_f = 1 \%$	86	59
	$V_f = 15 \%$	173	121
	$V_f = 4 \%$	327	300
$P_c = P_{max}$	V_f	$K=15 \text{ mm}$	$K=5 \text{ mm}$
	$V_f = 15 \%$	196	143
	$V_f = 4 \%$	194	144

うな特性を両方法で評価すると相反する結果となる。これは、全面積法が最大荷重の大小を全く考慮していないためであり、タフネス指数の方がより工学的意味を持つことがわかる。

(2) タフネス指数を適用する際に留意すべき点

図-9において、繊維混入率が4%, 1.5%の場合と1%の場合とでは曲線のタイプが異なる。即ち、前者では P_k の後 P_{max} に達するが後者では $P_k = P_{max}$ となる点である。この二つのタイプにおいて $P_o = P_{max}$ としてタフネス指数を求めたとしてもその意味はかなり異なったものであり両者を単純に比較することができない。

これは、タフネス指数が P_o 以前の挙動を全く考慮していないためである。これを模式的に表したものが図-11である。この問題点は、繊維混入率が4%, 1.5%のポリエチレン繊維補強コンクリートと鋼繊維補強コンクリート(図-12)において $P_o = P_{max}$ としてタフネス指数を求め比較しようとする場合にもあてはまる。次に、鋼繊維補強コンクリートと繊維混入率1%のポリエチレン繊維補強コンクリートの引張靱性の比較にタフネス指数の適用を試みる。 $P_o = P_{max}$ としてタフネス指数を求めることによって最大荷重以降の挙動を比較することができる。しかし、鋼繊維補強コンクリートの場合には初期ひびわれ以後最大荷重に達するのに対し、ポリエチレン繊維補強コンクリートの場合には初期ひびわれ時に最大荷重となるという違いがある。そのため、両者とも設計基準荷重を

P_{max} としているが、それ以前の挙動はポリエチレン繊維補強コンクリートの方が安定している点を考慮しておかなければならない。又、この両者の場合、最大荷重以降の変形機構が異なっている点にも留意しておかなければならない。即ち、鋼繊維補強コンクリートの変形が鋼繊維の引き抜けによるものであるのに対しポリエチレン繊維補強コンクリートの場合には主として、繊維の引張変形によることである。以上のことから、タフネス指数の適用にあたっては、変形曲線の特性を十分考慮しておくべきであって、機械的にタフネス指数を用いるべきでない。

(3) 鋼繊維補強コンクリートならびにポリエチレン繊維補強コンクリートへの適用

図-12に6種類の鋼繊維を用いた場合の曲げ変形特性を示した。この図より、たわみが1mmを越えると遷移領域から安定した領域へ移行することがわかる。従って、これら2つの領域を評価するために $K = 1.5mm$ とし、 $P_o = P_{max}$ とするのがよいと考える。一方、ポリエチレン繊維補強コンクリートの場合、繊維混入率が1.5%と4%のタイプに属する曲線の比較では、 $P_o = P_{max}$, $K = 5mm$ と $P_o = P_k$, $K = 10mm$ の2種のタフネス指数を用いる。又、すべてのタイプのポリエチレン繊維補強コンクリートを比較する場合には、 $P_o = P_k$ とし $K = 10mm$ とするのがよいと考える。

参考文献

- 1) Reported by ACI Committee 544: Measurement of Properties of fiber reinforced concrete, ACI Journal, Vol.75, No.7 July 1978
- 2) C.H.Henager: A TOUGHNESS INDEX FOR FIBROUS CONCRETE, Fibere Symposium April, 1978, sheffield, England.

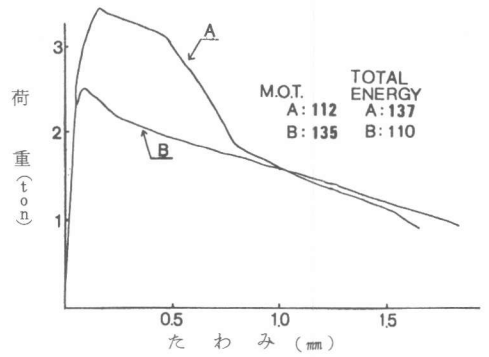


図-10 タフネス指数の工学的意味

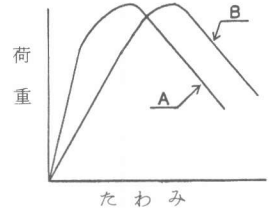


図-11 タフネス指数の欠点

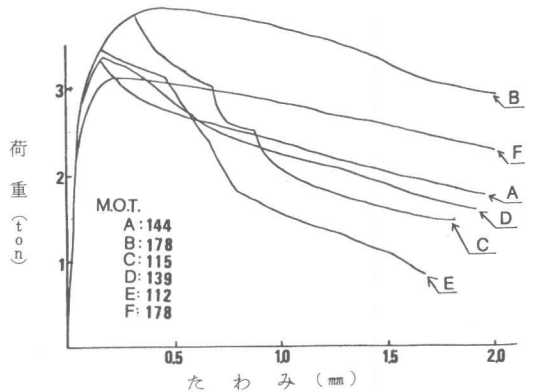


図-12 鋼繊維補強コンクリートの荷重-たわみ曲線