

鋼繊維補強コンクリートの曲げタフネス評価方法

—Practical Evaluation of Flexural Toughness of Steel Fiber Reinforced Concrete—

魚本 健人*・小林 一輔*・西村 次男*

Taketo UOMOTO, Kazusuke KOBAYASHI and Tsugio NISHIMURA

1. ま え が き

コンクリートの破壊はぜい性的であるため、その力学的性能としてはもっぱら強度のみが重要視されてきた。しかし、近年、その破壊が延性的傾向を示す鋼繊維補強コンクリートの実用化にともなう、単なる強度のみならず靱性（タフネス）も大きな指標と考えられるようになってきた。

コンクリートのタフネスに関してはすでに種々の検討がなされており、たとえばコンクリートの破壊を内部ひび割れの進展と関連させ、応力拡大係数やJ積分値を求めて破壊靱性を評価しようとする方法などがある。しかし、鋼繊維補強コンクリートのようにひび割れ発生後もかなりの耐力を有する材料を効果的に利用することを目的とする場合には、実用性を考慮したタフネスの評価方法が必要とされる。

そこで、本文では鋼繊維補強コンクリートの特性が良く表れる曲げタフネスの実用的な評価方法を提案することを目的として検討を行った。

2. 実験概要

実験に用いたセメントはすべて普通ポルトランドセメントとし、鋼繊維は長さ 30 mm、アスペクト比約 60 の形状および製造方法の異なる 5 種類の繊維とした。コンクリートの粗骨材は最大寸法 15 mm の碎石（秩父両神産、比重 2.70、吸水率 0.63 %、粗粒率 6.50）を、また細骨材は川砂（富士川産、比重 2.62、吸水率 1.99 %、粗粒率 3.00）を用いた。コンクリートの配合は、スランプを 8 ± 2 cm とし、水セメント比を 50 % および 65 %、鋼繊維量を 0 ~ 2 % に変化させた。

曲げタフネス用供試体としては、供試体の製作および試験が容易に行えることを考慮して 10 × 10 × 40 cm の角柱供試体を用いた。供試体はコンクリート打設後すべて水中養生（20°C）を施し、材令 28 日で載荷した。載荷は打設側面を載荷面とし、3 等分点 2 点載荷（スパン 30 cm）で行った。たわみ量の測定は図-1 に示すように支点沈下の影響を受けぬようロッドを供試体に取り付け、それを基準として求めた。なお、たわみ量の測定位置は図-1 に示すようにスパン中央点ならびに載荷点とした。

* 東京大学生産技術研究所 第 5 部

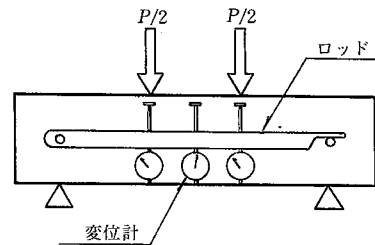
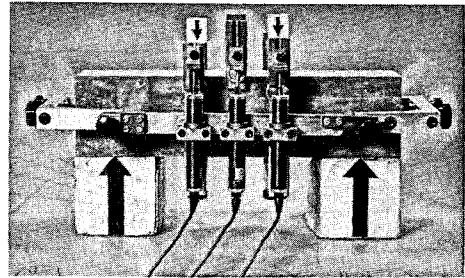


図-1 たわみ量測定方法

載荷試験機としては本来剛性試験機を用いることが望ましいが、実用性を考慮して油圧式載荷試験機（最大使用荷重 30 ton）を用いて試験を行った。載荷速度はひび割れ発生前における縁応力度が 8 ~ 10 kg/cm²/min となるように調節し、その後は油の送りをそのままに保った。荷重-たわみ曲線は X-Y レコーダーで記録すると同時に、たわみ軸とで囲まれる面積を数値積分して求めた。

3. 曲げタフネスの各種評価方法

曲げタフネスを実用的な観点から評価する場合に問題となる事項としては、①試験が容易に行えること、②得られる値がばらつきにくいこと、③得られた値が有効に利用できることなどがあげられる。なかでも③は重要で、曲げタフネスをどのように定義するかということのみならず、鋼繊維量等が異なる場合に得られる値がどのように変化し、構造物のどのような性能と関係するかが問題となる。

曲げタフネスの実用的な評価方法の 1 つに A.C.I. 544 委員会が提案されたタフネスインデックスがある。¹⁾しかし、この方法はすでに小林・梅山が指摘したように、²⁾たわみ量の測定方法やひび割れ発生時期の判定方法に問題があるばかりでなく、得られる値がばらつき易いなど

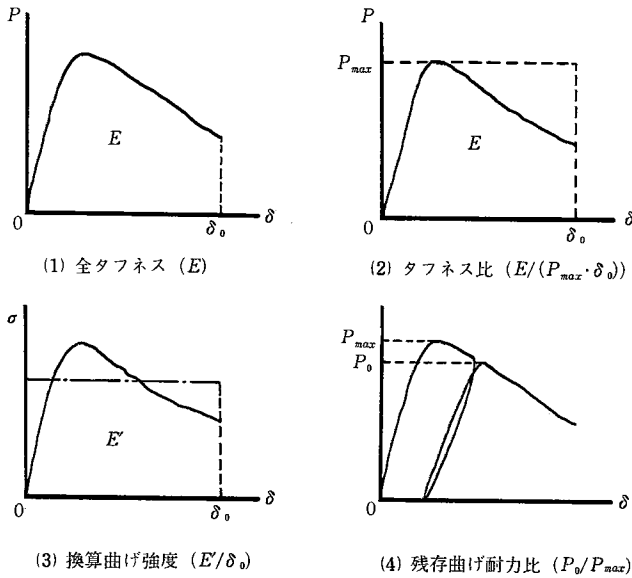


図-2 曲げタフネスの各種評価方法

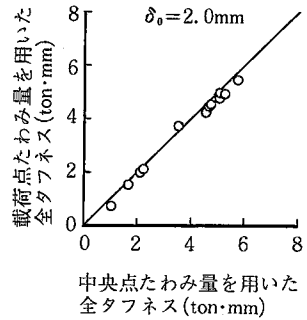


図-4 中央点たわみ量と載荷点たわみ量を用いた場合の全タフネスの比較 (基準たわみ量: 2 mm)

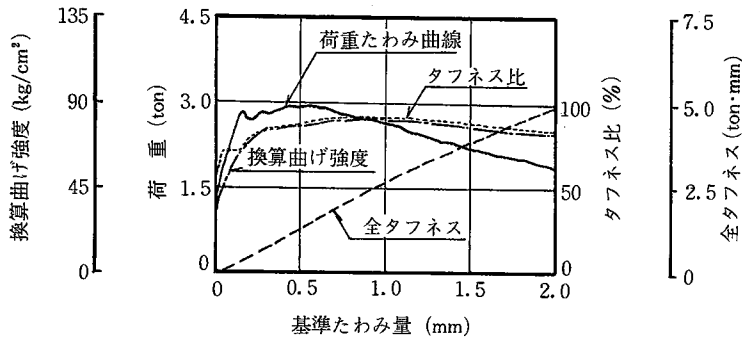


図-3 基準たわみ量が各種タフネスの評価に及ぼす影響

の問題点がある。また、得られた値の利用方法が明確でなく、相対評価の目安でしかない。

以上のことを考慮し、本文では図-2(1)~(4)に示す4種類の評価方法について検討を行うことにした。

図-2(1)~(3)に示された3種類の方法は、供試体が基準たわみ量 δ_0 に到達するまでに吸収するエネルギーを評価の基本とするもので、図-2(1)に示す全タフネス (E) が基準となっている。すなわち、荷重-たわみ曲線を $P=f(\delta)$ とした場合、 $E = \int_0^{\delta_0} f(\delta) d\delta$ で表示される値をそのまま利用する方法である。図-2(2)はこの値 E を最大荷重 P_{max} および δ_0 の積で除したタフネス比で表示する方法である。また図-2(3)は、 E を δ_0 で除して得られた平均耐力を曲げ強度に換算した換算曲げ強度で表示する方法である。

一方、図-2(4)はたわみ量を測定せずに、最大荷重以降の残存耐力を求める方法である。すなわち、供試体が

最大荷重 (P_{max}) に到達したあと、載荷荷重がその β 倍 ($0 < \beta < 1$) に減少した時点で除荷し、再度載荷したときに得られる最大荷重 (P_0) との比 (P_0/P_{max}) で示す方法である。

これらの方法はいずれも一長一短を有するが、短所としては図-2(1)~(3)に示す方法ではたわみ量の測定ならびに値の算出が容易でないことがあげられる。また、図-2(4)に示す方法では最大荷重到達後、荷重が急激に減少する場合の載荷試験機の操作に個人差が入り易いことがあげられる。

4. 基準たわみ量と除荷時荷重

(1) 基準たわみ量

荷重-たわみ曲線を用いて曲げタフネスを評価する全タフネス、タフネス比および換算曲げ強度を求める方法で問題となる点は、基準たわみ量 δ_0 をどのように定めるかである。一般に δ_0 が小さく、最大荷重時たわみ量に近

研究速報

いほど繊維量等による差が表れにくく、 δ_0 が大きくなるほどその差は明確となるが、試験に要する時間が大きく増大する。そこで、鋼繊維量を变化させ、基準たわみ量 δ_0 を变化させた場合に上記評価値がどのように変化するかを調べた。その結果の 1 例を図-3 に示した。

この図から明らかなように、繊維量が 1% 以上になると全タフネスは基準たわみ量が 2 mm までの範囲では基準たわみ量が増大するに従い増加する。しかしタフネス比および換算曲げ強度はその値が約 1 mm で最大となり、その後減少する。なお、全タフネスはたとえ基準たわみ量を大きくしても減少することがないことは明らかである。一方、鋼繊維が混入されていない普通コンクリートの場合にも同様な試験を行うと、載荷速度にも依存するがひび割れ発生後も見かけ上耐力を有することがある。これは支点の回転摩擦の影響やひび割れ進展速度と載荷速度の違いによる影響が原因で生じるものである。そこで実際の構造物に適用した場合のひびわれ幅を考慮して鋼繊維補強コンクリートの特徴が明瞭に表れ、かつ試験に要する時間が 30 分程度となるよう基準たわみ量 δ_0 を 2 mm とした。

たわみ量の測定位置については、3. で述べたように供試体の吸収エネルギーを基本とするのであれば載荷点位置で行なわなければならない。しかし、その場合図-1 に示すように供試体側面で計測すると計 4 ヲ所のたわみ量を求めることが必要となり、試験も繁雑となる。そこで載荷点で求めたたわみ量を用いた場合と中央点で求めたたわみ量を用いた場合に得られる全タフネスがどのようになるかを調べたものを図-4 に示す。なお、基準たわみ量 δ_0 は 2 mm である。

この図から明らかなように、ひび割れ発生位置にもよるが中央点のたわみ量を用いた方が得られる値は若干大きくなる。しかし、その差は約 5% であり、中央点のたわみ量でこれらの値を求めても実用上は大きな問題とはならないものと考えられる。

(2) 除荷時荷重

残存曲げ耐力比を測定する場合に特に問題となる点は除荷時荷重を最大荷重の何%とするかである。その値が小さいと繊維量の多い場合には試験の所要時間が長くなり、その値が大きいと繊維量等の差が明確にならない。そこで、実際の実験結果を考慮して本研究ではその値を 90% とした。なお、繊維量が 0% もしくはそれに近い場合には 90% といえどもその荷重まで維持させることが不可能に近いので、その場合には残存曲げ耐力比を 0 としても矛盾しないものと考えられる。

5. 繊維量および繊維種類と曲げタフネス

図-5 は、繊維量 (V_f) を 0% から 2% まで变化させた

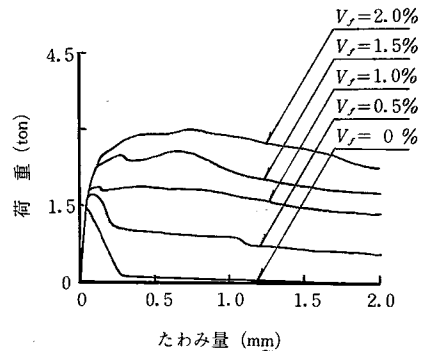


図-5 繊維量を変化させた場合の荷重-中央たわみ曲線 (鋼繊維 A 使用)

場合の荷重-中央たわみ曲線の 1 例を示したものである。なお、使用した鋼繊維は繊維 A である。

この図から明らかなように、繊維量が大きくなるほど最大荷重は増大し、また繊維量 1% 以上では最大荷重以降の荷重低下率は小さい。

そこで、水セメント比 50% および 65% の場合について鋼繊維量を 0% から 2% まで变化させた場合の全タフネス、タフネス比、換算曲げ強度および残存曲げ耐力比を図-6 に示す。なお、残存曲げ耐力比は最大荷重の 90% に荷重が低下したときに除荷した後再載荷する方法で求めた。

図-6 より次のことが明らかである。

- 1) 全タフネスおよび換算曲げ強度は全く同じ傾向を示し、繊維量が増加するにつれ増大する。
- 2) タフネス比および残存曲げ耐力比は繊維量が 1% 以上になるとほぼ一定の値となる。

以上の結果より、全タフネスおよび換算曲げ強度はいずれもほぼ同じ情報を与えており、また、タフネス比および残存曲げ耐力比もほぼ同じ情報を与えている。曲げタフネスの求め方からも明らかなように、たとえば換算曲げ強度と曲げ強度との比はタフネス比と一致することから、換算曲げ強度と曲げ強度を求めれば上記各種評価方法で得られる情報はほぼ網羅されると考えられる。なお、上記の結果から明らかなように、繊維量を増大させると供試体の吸収エネルギーは増加するが、繊維量 1% 以上では繊維によるタフネスの改善効果はほぼ一定になると考えられる。

一方、繊維種類を変えた場合に鋼繊維補強コンクリートのタフネスがどのように変化するかを調べるために、水セメント比を 50% と一定にし、繊維長さ 30 mm の各種繊維を繊維量 1% および 2% 混入させた場合についてタフネスの比較を行った。図-7 に荷重-中央たわみ曲線の 1 例を示す。

この図から明らかなように、水セメント比や繊維量が

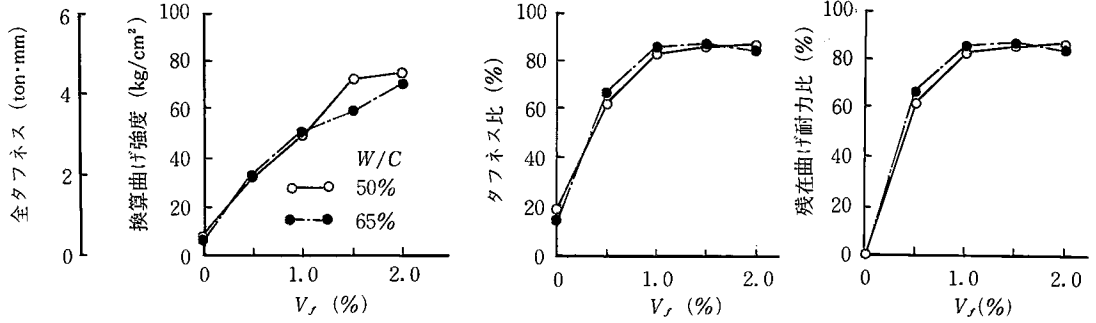


図-6 繊維量 (V_f) が各種タフネスの評価に及ぼす影響(鋼繊維 A 使用)

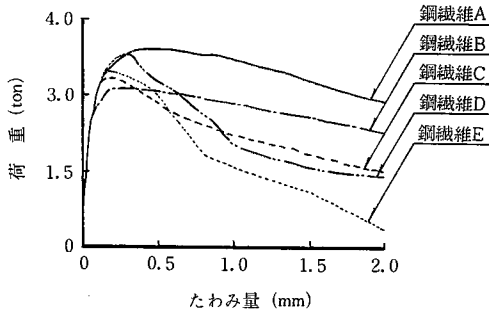


図-7 使用鋼繊維が異なる場合の荷重-中央たわみ曲線 ($W/C=50\%$, $V_f=2\%$)

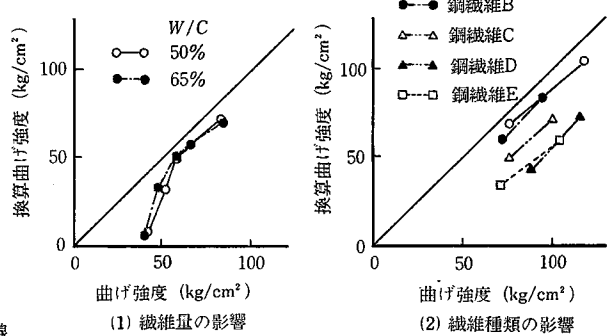


図-8 曲げ強度と換算曲げ強度の関係

一定であっても繊維種類が異なると、荷重-たわみ曲線は大きく変化する。そこで、この違いを明らかにするために上記の結果を考慮して曲げ強度と換算曲げ強度との関係を調べた。なお、参考のために図-6 に示した結果も同様な形で処理し、図-8 にまとめて示す。

これらの図より次の傾向が認められる。

- 1) 換算曲げ強度と曲げ強度との関係は繊維種類によって異なり、図-7 に示した荷重-たわみ曲線の最大荷重到達以降の荷重低下の小さい鋼繊維ほど換算曲げ強度と曲げ強度は近い値となる。
- 2) 同じ換算曲げ強度を行ふことのできる曲げ強度は繊維種類によって異なり、最大荷重以降の荷重低下の著しいものほど高い曲げ強度を必要とする。
- 3) 同じ鋼繊維を用いても、繊維量が1%未満では換算曲げ強度は曲げ強度に比べかなり小さなものとなる。

以上のことから、たとえ同じ繊維量の場合でも繊維種類によって供試体の吸収エネルギーは異なり、本実験の範囲では鋼繊維 A が最も高い吸収エネルギーをもち、鋼繊維 D および鋼繊維 E のほぼ2倍である。すなわち、もし同じエネルギー吸収能力が必要であれば鋼繊維 A は鋼繊維 D および E の約1/2の繊維量で十分であることを意味する。なお、換算曲げ強度が曲げ強度よりもかなり

小さい鋼繊維 D および E の場合には繊維量を増大させてもタフネス比はあまり増加しないと推定されるため曲げ強度に比し高い換算曲げ強度は得られないものと考えられる。

6. タフネスの利用方法

上記の結果から、換算曲げ強度が曲げ強度に近いものほど、またその値が大きなものほどタフネスは大きいと判断される。このことを利用すれば、繊維量、繊維種類等の選定に役立てられるばかりでなく、許容応力度法で構造物を設計する場合の許容曲げ引張応力度の設定にも利用可能である。しかし、その場合には施工等を含めたバラツキを考慮しなければならない。

7. あとがき

本文では鋼繊維補強コンクリートの曲げタフネス評価方法について、実用的見地から評価方法を提案した。今後、圧縮タフネスについても検討を行う予定である。なお、本研究で用いたたわみ量測定用治具の作成に関しては(有)慧和工業の大田信隆氏にご協力いただいたことを付記し、謝意を表す。

(1982年9月2日受理)

参考文献

- 1) A.C.I Committee 544: A.C.I. Journal, July, 1978
- 2) K. Kobayashi and K. Umeyama: SEISAN-KEN-KYU, Vol. 32, No. 5, 1980. 5