

# コンクリートの曲げ強度の寸法効果に関する破壊力学的検討

内田裕市\*・六郷恵哲\*\*・小柳 洽\*\*\*

コンクリートの曲げ強度の寸法効果を明らかにすることを目的として、仮想ひびわれモデルを用いて、曲げ供試体の解析を行った。解析結果より、はり高さ、引張強度および特性長さをパラメータとした曲げ強度の推定式を提案した。提案式によって推定された曲げ強度は実験値とよく一致した。さらに、曲げ供試体の荷重変位曲線を、切断法を用いた断面解析によって推定する方法も示した。

**Keywords** : size effect, flexural strength, fracture mechanics, fictitious crack model, characteristic length

## 1. ま え が き

コンクリートあるいは鉄筋コンクリート部材の強度に、寸法効果（寸法の増大にともなって見かけの強度が低下する現象）が存在することは、実験的にはかなり以前から知られていた。そして最近、新たな材料の開発や構造解析ならびに施工技術の目ざましい進歩により、構造材料としてのコンクリートがさらに重要となり、しかも構造物も一段と大型化する傾向にあるため、寸法効果があらためて注目され、その解明の必要性が増してきている。

コンクリート強度の寸法効果の原因としては、強度の確率分布の他に、コンクリート特有の原因として乾燥収縮や材料分離などが考えられてきたが、現状ではそれぞれの原因が定量的にどの程度影響するのかは必ずしも明らかにされてはいない。したがって、設計規準では、寸法効果を経験則として認め、例えば、鉄筋コンクリート部材のせん断強度に関して、現行のコンクリート標準示方書<sup>1)</sup>では寸法効果を考慮した形の算定式になっている。また、CEB-FIP model code 1978<sup>2)</sup>でも、すでに曲げ強度の寸法効果の式が示されていた。

一方、コンクリート強度の寸法効果を定量的に説明し得る有力な理論として、いわゆるコンクリートの破壊力学が最近注目されている。コンクリートでは、巨視的なひびわれが進展する際、その先端に微細なひびわれが発生、累積する破壊進行領域（fracture process zone）が数 cm から数十 cm のオーダーで形成されるとされている。コンクリートの破壊力学は、この破壊進行領域の影響を破壊エネルギーあるいは引張軟化曲線といったパラ

メータを用いてモデル化し、ひびわれの進展をとまなうコンクリートの巨視的な破壊現象を記述しようとするものである。コンクリート強度の寸法効果を説明するための破壊力学的モデルとしては、Hillerborg の仮想ひびわれモデル<sup>3)</sup>、Bazant の寸法効果則<sup>4)</sup>、あるいは Shah の 2 係数モデル<sup>5)</sup> などがある。

ところで、応力拡大係数などを用いた通常の破壊力学は、初期ひびわれ（欠陥）のないものに対しては適用できない。なぜならば、これらの破壊力学はひびわれの存在を前提として、そのひびわれ部での応力やひずみの特殊性を扱うものであるからである。したがって、これらのモデルを巨視的に初期ひびわれのないコンクリートに対して適用するためには、微視的な潜在ひびわれ（たとえばモルタルマトリックスと粗骨材との界面など）を仮定するか、あるいは強度破壊は安定なひびわれがある長さまで進展した後に生じるとして、その安定ひびわれを仮定せざるを得ない。一方、Hillerborg が提案した仮想ひびわれモデルは、ある点の主応力が引張強度に達したら破壊領域（仮想ひびわれ）が発生・進展するとしたモデルであるため、破壊領域が発生する位置は必ずしもひびわれの先端である必要はない。その意味では仮想ひびわれモデルは純粋な破壊力学モデルとは言えないかもしれないが、しかし仮想ひびわれモデルは初期ひびわれのない場合にも適用でき、しかも破壊領域の発生のみならず進展も容易に解析できるのである。

そこで、本研究は切欠き（初期ひびわれ）のないコンクリートの曲げ強度の寸法効果を仮想ひびわれモデルを用いて検討し、曲げ強度の寸法効果を表す簡単な式を提案するものである。なお、鉄筋コンクリート部材の強度設計においては、一般にコンクリートの引張強度は無視され、曲げひびわれの発生が直接部材の破壊に結び付くものでないため、従来は舗装コンクリートを除けば曲げ強度自体はそれほど重要視されてこなかった。しかし、

\* 正会員 工修 岐阜大学助手 工学部土木工学科  
(〒501-11 岐阜市柳戸 1-1)

\*\* 正会員 工博 岐阜大学助教授 工学部土木工学科

\*\*\* 正会員 工博 岐阜大学教授 工学部土木工学科

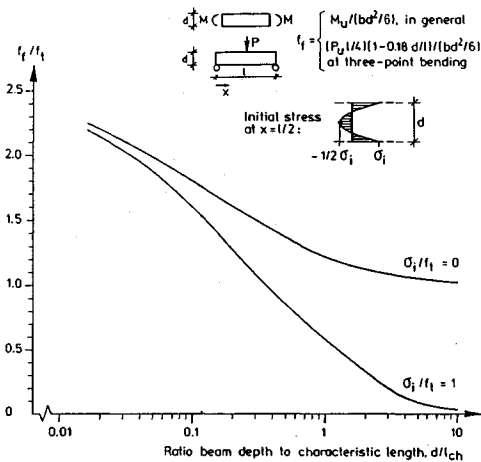


図-1 Gustafsson の解析結果<sup>6)</sup>

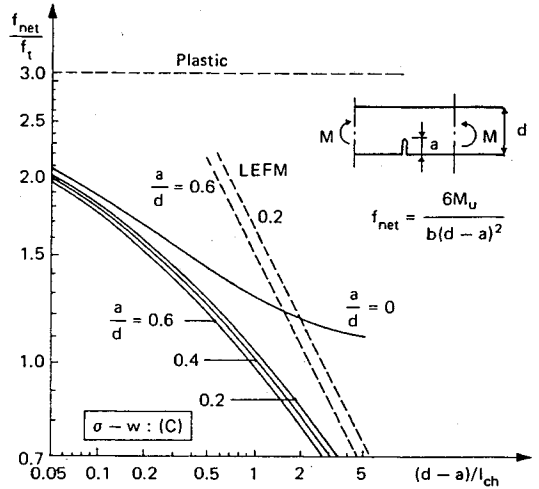


図-2 Hillerborg の解析結果<sup>7)</sup>

最近のように、コンクリート構造物の耐久性あるいは美観が重要視されてくると、一般の鉄筋コンクリート構造物においてもひびわれ発生荷重を精度よく推定することは重要であると考えられる。また、極低鉄筋比の鉄筋コンクリート部材においては、曲げ強度は強度設計上重要な特性であると考えられる。

## 2. 本研究の目的と Gustafsson, Hillerborg らの研究

Gustafsson<sup>6)</sup> はコンクリートの曲げ強度の寸法効果に関して、仮想ひびわれモデルを用いた有限要素法による解析結果をすでに報告している。図-1は Gustafsson によって行われた切欠きのない供試体の3点曲げ試験の解析結果である。図中において、縦軸は一軸引張強度  $f_t$  に対する曲げ強度  $f_f$  の比率であり、横軸は特性長さ  $l_{ch}$  ( $=E_c G_F / f_t^2$ , ここに  $E_c$ : 弾性係数,  $G_F$ : 破壊エネルギー) に対するはり高さ  $d$  の比率である。この図から、曲げ強度は  $d/l_{ch}$  の関数として表すことができ、はり高さ  $d$  が大きくなるにつれて曲げ強度が低下し、一軸引張強度に漸近することがわかる。さらに、乾燥収縮にともなう内部応力 ( $\sigma_i$ ) をモデル化した解析も行っており、曲げ強度が乾燥収縮によって大きな影響を受け、しかもはり高さの大きいほどその影響の割合が大きくなることが示されている。なお、ここで用いられている特性長さ  $l_{ch}$  は  $E_c$ ,  $G_F$  および  $f_t$  の3つの基本的な材料定数から計算されるものであるため、材料特性パラメータではあるが、直接的な物理的意味のないパラメータである。通常のコンクリートの場合、特性長さは20~40 cmであり、脆性的な破壊を生じる材料ほどその値は小さくなる。また、図-1に示されているように、特性長さを用いることで解析結果がうまく表現できることが経験的に知られている。

図-2は Hillerborg<sup>7)</sup> が、切欠きのある供試体の曲げ強度の寸法効果を仮想ひびわれモデルによって解析した結果である。前述のように切欠きのない供試体の曲げ強度は、はり高さが大きくなるにつれて一軸引張強度に漸近するのに対して、切欠きがある場合には、線形破壊力学 (LEFM) による値に漸近していることがわかる。

本研究では、切欠きのないコンクリートの曲げ強度の寸法効果を研究の対象として、図-1に示した Gustafsson と同様に、仮想ひびわれモデルを用いた解析を行い、その解析結果に基づき、寸法効果を含んだ曲げ強度の推定式を提案する。さらに、その推定式の実験値との適合性も示す。また、曲げ供試体の荷重-変位曲線の概略を、有限要素法等の数値計算によらず、平面保持を仮定したはり断面の曲げ解析によって推定する方法も提案する。

なお、コンクリートの曲げ強度に対して乾燥収縮等による初期応力が大きな影響を与えることは前述の Gustafsson らをはじめ、多くの研究者によって指摘されている。しかしながら、現状では実際のコンクリート内部に生じている初期応力の大きさを精度良く評価することはまだ困難であると考えられる。そのため、本研究では、対象とするすべての供試体には初期応力は存在しないものとする。

## 3. 曲げ強度の寸法効果に関する解析と算定式

引張軟化曲線の形状を変えた場合の曲げ強度の寸法効果を、仮想ひびわれモデルを用いた有限要素法<sup>8)</sup> により解析した。この解析では、ひびわれは節点を分離することでモデル化され、分離された節点に引張軟化曲線から定まるひびわれ間の結合力を等価節点力として作用させるものである。解析はひびわれを1節点ずつ進展させるように制御されているために、最大耐力点以降、snap-

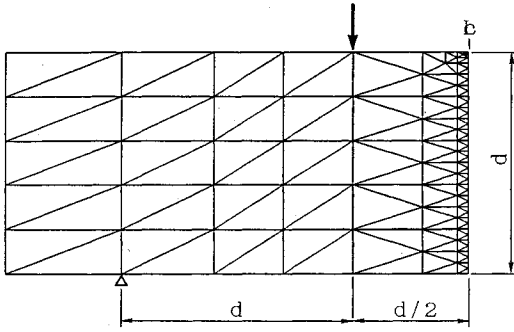


図-3 曲げ供試体の要素分割

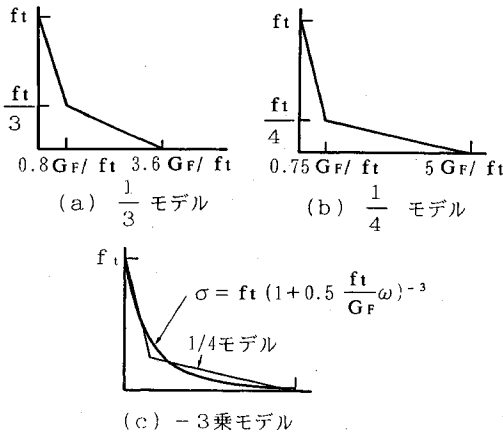


図-4 引張軟化曲線のモデル

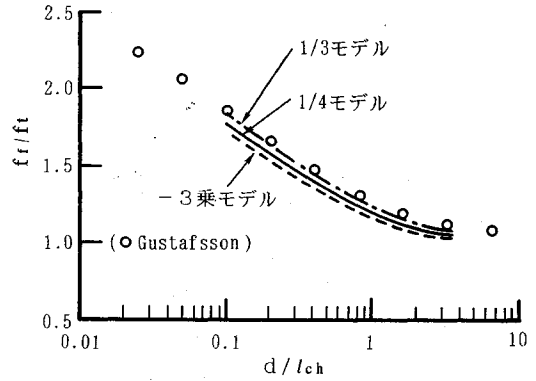


図-5 解析結果

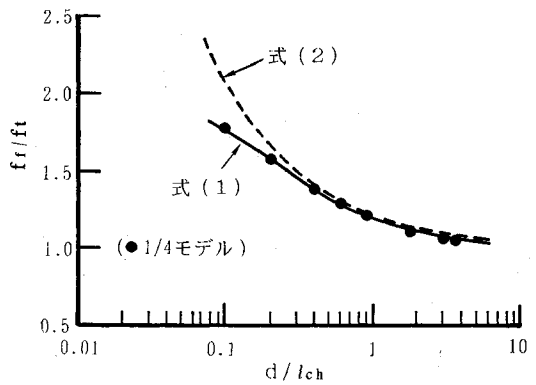


図-6 曲げ強度の推定式

back 現象が生じるような場合でも容易に解析できるのが特徴である。解析方法の詳細については、基本的なプログラムのソースコードが参考文献<sup>9)</sup>に示されているので参照されたい。本研究で解析した供試体は、3等分点荷重を受ける切欠きのない曲げ供試体である。解析に用いた要素分割を図-3に示す。対称性により供試体の半分のみをモデル化し、供試体の中央の引張線から鉛直にひびわれが進展するものとした。

入力した引張軟化曲線の形状は、図-4に示すように、1/3モデル、1/4モデルおよび-3乗モデルの3種類である。ここで、1/3モデルは図-1および図-2に示したGustafssonやHillerborgの解析で使用されたモデルであり、1/4モデルおよび-3乗モデルは筆者らの研究<sup>10)</sup>において実際に各種のコンクリートで計測された引張軟化曲線によく一致していたモデルである。解析は、 $d$ 、 $G_F$ 、 $f_t$ および $E_c$ をそれぞれ変化させて $d/l_{ch}$ が0.1から3.6の範囲で行った。曲げ強度 $f_r$ は最大曲げモーメントを断面係数で除した値とした。

図-5に解析結果を示す。引張軟化曲線が同一モデルの場合、引張強度に対する曲げ強度の比率 $f_r/f_t$ は $d/l_{ch}$ の関数として表されることがわかる。また、はり高さが

同一の場合、1/3モデル、1/4モデル、-3乗モデルの順に曲げ強度が小さくなっているが、その差はわずかである。こうしたわずかの差は、引張強度 $f_t$ を越えて軟化が開始した直後の引張軟化曲線下の面積の大きさがコンクリートの曲げ強度に影響を及ぼすために生じたものである。なお、1/3モデルを用いた筆者らの解析結果とGustafsson等の結果がわずかに異なるのは、荷重条件(3等分点荷重と中央集中荷重)の違い、および要素分割、使用要素等の違いによる計算誤差であると考えられる。

筆者らの研究<sup>10)</sup>によれば、通常のコンクリートの引張軟化曲線は、今回用いた3種類のモデルと大差はないので、したがって、曲げ強度と $d/l_{ch}$ の関係を1本の曲線で表しても大きな誤差は生じないと考えられる。そこで、曲げ強度と $d/l_{ch}$ の関係式として次式を提案する。

$$\frac{f_r}{f_t} = 1 + \frac{1}{0.85 + 4.5(d/l_{ch})} \dots \dots \dots (1)$$

ただし、 $d/l_{ch} \geq 0.1$

式(1)は、簡単な形の式で表現することを考慮して、いろいろな式の形を検討した後、最小二乗法により係数を求め、さらに係数を簡単な数値にしたものである。図-6は式(1)を示したものであり、図中には1/4モデル

表一 実験結果

はり 高さ 体数 (cm)	曲げ強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )					
	実験値		推定値			
	平均	標準偏差	[a]	[b]	[c]	
5	8	44.4	3.84	49.6 (1.12)	47.5 (1.07)	46.1 (1.04)
10	8	41.2	3.79	43.9 (1.07)	41.7 (1.01)	41.1 (1.00)
20	5	37.3	2.21	38.5 (1.03)	36.7 (0.98)	36.0 (0.97)
30	4	35.3	1.44	35.9 (1.02)	34.5 (0.98)	33.4 (0.95)
40	4	33.6	3.42	34.4 (1.02)	33.2 (0.99)	31.9 (0.95)

[a]  $f_t = f_{SP}$ ,  $G_F = 0.13$  kgf/cm

[b]  $f_t = f_{SP}$ ,  $G_F = 0.10$  kgf/cm

[c]  $f_t = 0.9 \times f_{SP}$ ,  $G_F = 0.13$  kgf/cm

( ) 推定値/実験値

ルによる解析結果を併記してある。なお、本研究では  $d/l_{ch}$  が 0.1 以下の範囲での解析は行っていないので上記のような適用範囲を加えたが、通常のコンクリートおよび通常の供試体あるいは構造部材の寸法を対象とした場合には、この適用範囲を越えることはまずないと考えられる。また、同図には式(2)で表される CEB-FIP model code 1990<sup>11)</sup> の曲げ強度と一軸引張強度の関係も示した。

$$\frac{f_t}{f_i} = \frac{1 + 2.0(d/d_0)^{0.7}}{2.0(d/d_0)^{0.7}} \dots \dots \dots (2)$$

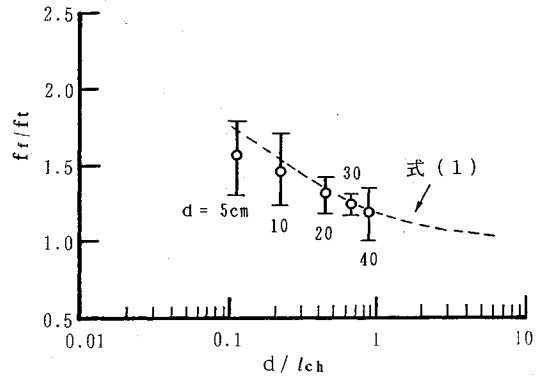
ただし、 $d$ : mm,  $d \geq 50$  mm,  $d_0 = 100$  mm

なお、CEBの式には特性長さ  $l_{ch}$  の項が含まれていないので、ここでは通常のコンクリートを想定して  $l_{ch} = 33.3$  cm ( $E_c = 3.0 \times 10^5$  kgf/cm<sup>2</sup>,  $G_F = 0.1$  kgf/cm,  $f_i = 30.0$  kgf/cm<sup>2</sup>) として示した。式(1)と式(2)は  $d/l_{ch}$  が 0.3 ( $l_{ch} = 33.3$  cm とすれば  $d = 10$  cm) 以上ではほとんど差がないが、0.3 以下になると式(2)は解析結果から徐々に離れてしまうことがわかる。ただし、CEBの式には  $d \geq 50$  mm という制限が設けてあるので、通常のコンクリートを対象とする限り実用上は問題はないと考えられる。

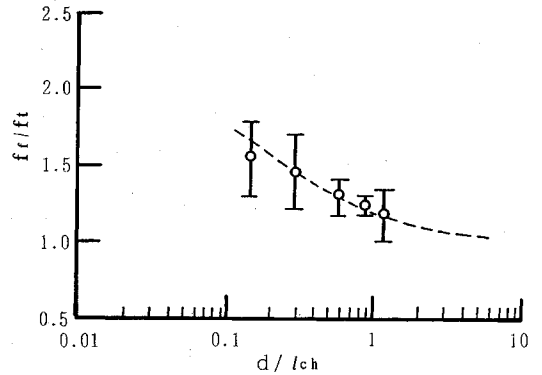
#### 4. 実験結果との比較

式(1)で表される推定式の実験値との適合を調べる目的で、寸法の異なる供試体による曲げ試験を行った。

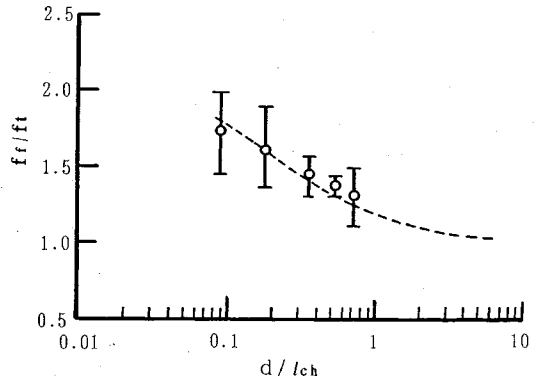
はり高さを5種類(5, 10, 20, 30, 40 cm)に変化させた供試体を作製した。断面は正方形であり、長さははり高さの約4倍とした。コンクリートは最大粗骨材寸法 15 mm, 水セメント比 54.1% のレデーミクストコンクリートを使用し、試験直前まで湿布養生して、できるかぎり乾燥収縮を生じないようにした。供試体数は、経験的に供試体寸法が小さいほど結果のばらつきが大きく



(a)  $f_t = f_{SP}$ ,  $G_F = 0.13$  kgf/cm



(b)  $f_t = f_{SP}$ ,  $G_F = 0.1$  kgf/cm



(c)  $f_t = 0.9 f_{SP}$ ,  $G_F = 0.13$  kgf/cm

図一七 実験結果

なるので、寸法の小さい供試体ほど供試体の数を多くした。曲げ試験は材令 27 日から 30 日で行った。試験時のコンクリートの圧縮強度、弾性係数 ( $\phi 10 \times 20$  cm) および割裂引張強度 ( $\phi 15 \times 15$  cm) はそれぞれ、336 kgf/cm<sup>2</sup>,  $2.8 \times 10^5$  kgf/cm<sup>2</sup>, および 28.5 kgf/cm<sup>2</sup> であった。曲げ載荷は 3 等分点載荷とし、載荷スパンをはり高さの 3 倍として、打設方向に直角に載荷した。水平方向の拘束をなくすために、片側の支点下にローラーを挿入して可動支承とした。載荷速度は約 1 分で最大耐力に達するようにした。

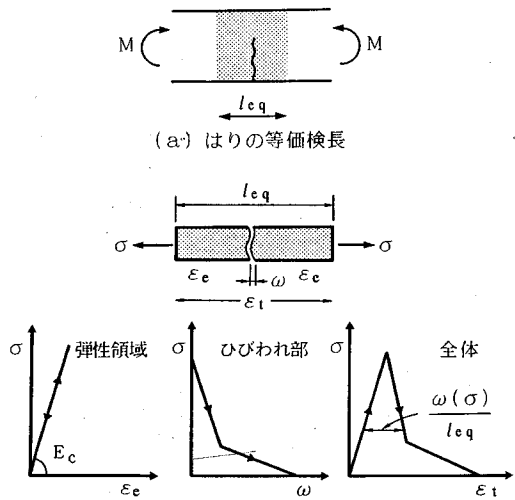
曲げ試験の結果を表-1に示す。曲げ強度の実験値は、自重による曲げモーメントを考慮した最大作用曲げモーメントを断面係数で除した値である。図-7に試験結果と式(1)による推定曲線を示す。破壊エネルギーについては今回は試験を行っていないので、過去のデータを参考にして定めることとした。筆者らのデータ<sup>10)</sup>を参考にすると、本実験で用いたコンクリートの破壊エネルギーは0.15 kgf/cm程度であり、他の研究者のデータ<sup>12)</sup>によれば0.1 kgf/cm程度と判断された。そこで、破壊エネルギーの違いによる影響をみるために、破壊エネルギーを筆者らのデータと他の研究者のデータの間である0.13 kgf/cmと0.1 kgf/cmとを用いて整理した。また、一軸引張強度 $f_t$ については、割裂引張強度 $f_{sp}$ に等しいとした場合と、割裂引張強度 $f_{sp}$ に0.9を乗じた値<sup>11)</sup>とした場合を示した。いずれの整理の仕方によっても、はり高さが10 cm以上では、推定された曲げ強度は実験値によく一致している。したがって、通常のコンクリートの曲げ強度の寸法効果は式(1)で表すことができると考えられる。

### 5. 断面解析による曲げ供試体の荷重-変位曲線の推定

Hillerborg らによって提案された仮想ひびわれモデルを用いた解析は、引張軟化曲線を直接的に解析に組み込むために、有限要素法あるいは境界要素法を用いる必要がある。しかし、解析対象を切欠きのないはり供試体に限れば、コンクリートの軟化域も含めた応力-ひずみ曲線さえ決められれば、平面保持の仮定をすることで、有限要素法等によらなくとも、通常のRCはり断面の曲げ解析によく用いられる切断法 (discrete element technique)<sup>13)</sup>によって、耐力および変形が計算できると考えられる。以下に無筋コンクリートはりの荷重-変位曲線の概形を簡単な断面解析から推定する方法について述べる。

この計算で設ける仮定は以下の5つである。

- (1) ひびわれは最大曲げモーメント作用位置(区間内)に1本のみ発生するとする。
- (2) ひびわれ断面においても断面の平面保持が成り立つとする。
- (3) ひびわれ断面のコンクリートの応力ひずみ関係は以下のとおりとする。
  - a) 圧縮側の応力ひずみ関係は直線とし、弾性係数を $E_c$ とする。
  - b) 引張側の応力ひずみ関係(式(3))は、式(4)で求められる等価検長 $l_{eq}$ を用いて、弾性域の応力ひずみ曲線と引張軟化曲線(1/4モデル)を合成したものとする(図-8参照)。



(b) 等価検長内の応力-ひずみ関係

図-8 等価検長  $l_{eq}$

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_t &= \sigma / E_c & (\epsilon_t \leq f_t / E_c) \\ &= \sigma / E_c + \omega(\sigma) / l_{eq} & (\epsilon_t > f_t / E_c) \end{aligned} \right\} \dots (3)$$

ただし、

$$\frac{l_{eq}}{l_{ch}} = 1 - (1 + 0.5(d/l_{ch}))^{-1.6} \dots (4)$$

ここに、  
 $\sigma$ : 引張応力  
 $\epsilon_t$ : 引張ひずみ  
 $E_c$ : 弾性係数

$\omega(\sigma)$ : 引張軟化曲線の関数

- (4) ひびわれ断面をはさんだ  $\pm l_{eq}/2$  区間内の断面の平均曲率は、上記(2)、(3)の仮定から求められたひびわれ断面の曲率で表されるとする。
- (5) ひびわれ断面をはさんだ  $\pm l_{eq}/2$  区間外の部分は弾性係数 $E_c$ 、ポアソン比一定の弾性はりとする。

式(4)の等価検長 $l_{eq}$ は、引張軟化曲線で表される仮想ひびわれのひびわれ幅をひずみに換算するために導入したもので、この方法で計算される曲げ強度が式(1)で推定される曲げ強度に等しくなるように、数値計算により定めたものである。

(1)~(3)の仮定により、ひびわれ断面において任意の圧縮線のひずみに対して切断法により中立軸位置、抵抗曲げモーメント、および載荷荷重を求めることができる。さらに、(4)、(5)の仮定により、ひびわれをはさんだ等価検長区間内およびそれ以外の弾性はりの部分の断面の曲率が求められ、弾性荷重法によりたわみが計算される。なお、せん断力によるたわみは、ひびわれの影響を無視して弾性はりとして計算することとする。

図-9は特性長さ $l_{ch}$ を33.3 cmとして、はり高さ $d$

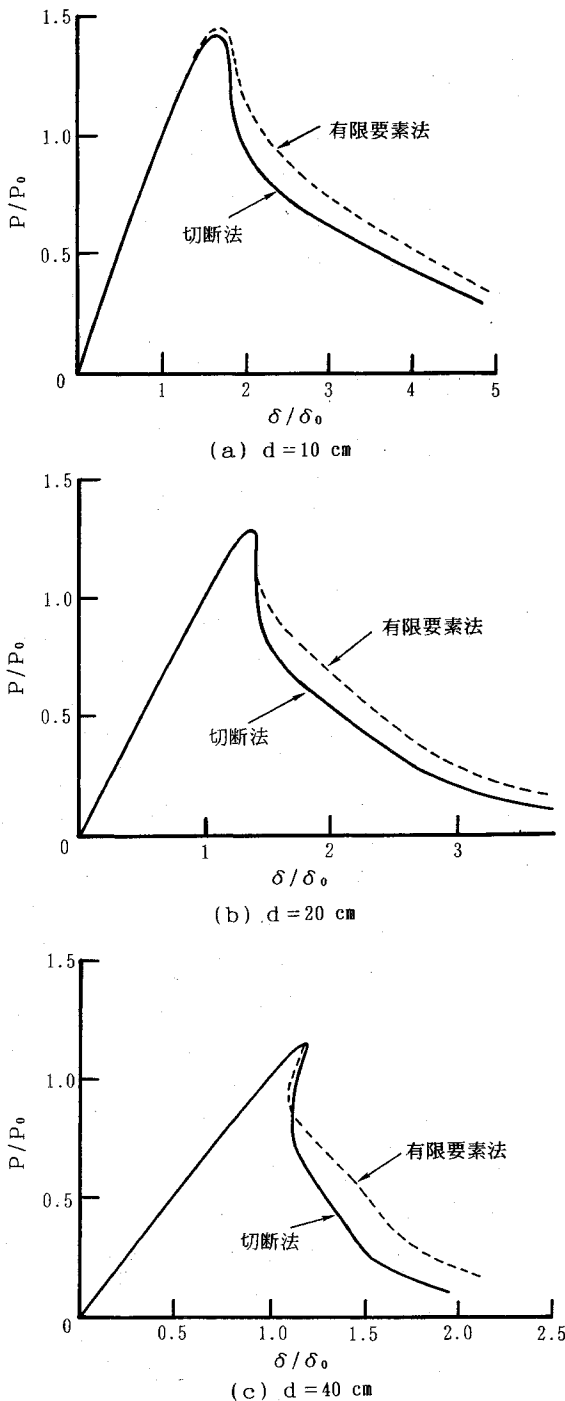


図-9 曲げ供試体の荷重-変位曲線の推定結果

を 10 cm, 20 cm, および 40 cm とした 3 等分点载荷を受ける曲げ供試体の荷重-変位曲線を、ここで述べた断面解析と仮想ひびわれモデルを用いた有限要素法とで求めた結果を比較したものである。結果は、はり下縁の応力が引張強度に達したときの荷重 ( $P_0$ ) と変位 ( $\delta_0$ ) で

無次元化してある。いずれのはり高さにおいても、最大荷重点までの荷重-変位曲線は両方法でよく一致している。また、最大荷重以降は有限要素法による結果の方が荷重が高くなっているが、曲線の概形は類似している。したがって、曲げ供試体の最大耐力のみならず荷重-変位曲線の概形をも、有限要素法等の数値計算を用いなくとも、ここで述べた方法により推定できると考えられ、本章で提案した手法は鉄筋コンクリートはりのひびわれ荷重を計算する場合などに役立つものと思われる。

## 6. まとめ

コンクリートの曲げ強度の寸法効果に関して破壊力学的な手法により検討し、以下のような結論を得た。

(1) 仮想ひびわれモデルを用いた数値解析の結果に基づき、寸法効果を含んだ曲げ強度の推定式として、はり高さ、引張強度、および特性長さをパラメータとした簡単な式を提案した。

(2) 本研究で提案した式による曲げ強度の推定値は、はり高さを 10 cm から 40 cm に変化させた供試体から得られた実験値とよく一致した。

(3) 曲げ供試体の荷重-変位曲線を切断法により求める方法を提案した。同方法によって求めた荷重-変位曲線は、有限要素法により求められたものと、最大荷重点まではよく一致し、それ以降も、曲線の概形は類似した。

最後に、本研究で示した曲げ強度の寸法効果は、実際の寸法効果の現象のうち、破壊力学的なモデルにより説明できる部分のみを表したものであり、今後、強度の確率分布、乾燥収縮、あるいは材料分離等の他の要因がどの程度影響するかを明らかにする必要があると考えられる。また、提案式の適合性を調べるために用いたデータは、供試体寸法のみをパラメータとした実験データであるので今後、材料特性の異なるコンクリートの実験データとの照合が必要である。さらに、本研究では、一軸引張強度と特性長さ（弾性係数、破壊エネルギーを含む）は、寸法効果のない材料定数として扱ったが、この仮定の妥当性については、今後の研究課題としたい。

## 参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書[設計編]，1986。
- 2) CEB-FIP：CEB-FIP Model Code for Concrete 1978。
- 3) Hillerborg, A.: A Model for Fracture Analysis, Report TVBM-3005, Division of Building Materials, Lund Institute of Technology, Sweden, 1978。
- 4) Bazant, Z.P.: Crack Band Theory for Fracture of Concrete, Materials and Structures, Vol.16, No.93, pp.157~177, 1983。
- 5) Jenq, Y.S. and Shah, S.P.: Two-parameter Fracture Model for Concrete, J. Eng. Mech., ASCE, Vol.111, pp.1227~1241, 1985。

- 6) Gustafsson, P.J. : Fracture Mechanics Studies of Non-Yielding Materials Like Concrete—Modeling of Tensile Fracture and Applied Strength Analyses—, Report TVBM-1007, Division of Building Materials, Lund Institute of Technology, Sweden, 1985.
- 7) Hillerborg, A. : Numerical Methods to Simulate Softening and Fracture of Concrete, Fracture Mechanics of Concrete (G.C. Sih, A. DiTommaso Ed.), Martinus Nijhoff Publishers, pp.141~170, 1985.
- 8) Modeer, M. : A fracture mechanics approach to failure analysis of concrete material, Report TVBM-1001, Division of Building Materials, University of Lund, Sweden, 1979.
- 9) コンクリートの破壊力学研究委員会：コンクリート構造の破壊力学に関するコロキウム，第1部・委員会報告，日本コンクリート工学協会，JCI-C19, 1990.
- 10) 内田裕市・六郷恵哲・小柳 治：曲げ試験に基づく引張軟化曲線の推定と計測，土木学会論文集，第426号/V-14, pp.203~212, 1991.
- 11) CEB-FIP : CEB-FIP Model Code for Concrete 1990.
- 12) Elfgrén, L. (edited) : Fracture Mechanics of Concrete Structures — from Theory and Applications, RILEM Report, Chapman and Hall, p.407, 1989.
- 13) Park, R. and Paulay, T. : Reinforced Concrete Structures, John Wiley & Sons, pp.257~258, 1975. (1991.4.1 受付)

## APPLICATION OF FRACTURE MECHANICS TO SIZE EFFECT ON FLEXURAL STRENGTH OF CONCRETE

Yuichi UCHIDA, Keitetsu ROKUGO and Wataru KOYANAGI

The size effect on the flexural strength of concrete is investigated through the finite element analysis with the fictitious crack model. Based on the numerical results, an equation to estimate flexural strength of concrete beams with different depths is proposed. The depth of specimens as well as the tensile strength and the characteristic length of concrete are the factors in the proposed equation. The estimated flexural strengths through the proposed equation are in good accordance with experimental results. A practical method is also proposed, which is convenient to the so-called discrete element technique to calculate the complete load-deflection curves of concrete beams in bending.