

## 薄肉鉄筋コンクリート製品の曲げひび割れ耐力

千葉窯業(株) 正会員 ○湯浅憲人、コンクリート製品 JIS 協議会 フェロー 國府勝郎  
コンクリート製品 JIS 協議会 正会員 森田秀明、首都大学東京 正会員 宇治公隆

### 1. はじめに

鉄筋コンクリート製品には、土木学会コンクリート標準示方書に規定する破壊エネルギーに基づく曲げひび割れ強度算定式で対象外の薄肉断面(200mm 以下)のものが多数ある。これらの薄肉部材は、設計断面の高さに占める使用骨材寸法の割合が大きく(断面の不均一性)、曲げひび割れの進展にこの影響が卓越することを実験により確かめた。本文は、曲げひび割れ強度の学会式に骨材による断面の不均一性の影響を考慮し、薄肉断面に適用できるように修正した曲げひび割れ耐力式を提案したものである。

### 2. 薄肉断面の曲げひび割れ強度

曲げひび割れ強度の土木学会式に基づく板状はりの曲げひび割れ耐力は、高さ 100mm 程度の断面までは実験結果を近似することができるが、100mm 以下の薄肉断面では精度が悪くなる。この原因は、断面高さに対する骨材寸法の割合が大きくなると断面の不均一性の影響が大きくなり、力学的性能が低下することによると考えられる。この影響を考慮した算定式の構築のため、曲げひび割れ強度のパラメーターとなる破壊エネルギー $G_F$ に対する断面/骨材寸法比の影響を試験した。実験は、100×100mm 角柱供試体の成形時に樹脂製 T 型を挿入し、リガメントの高さを 20mm~90mm に、粗骨材最大寸法を 20、10 および 5mm とした場合の破壊エネルギーを測定した。測定結果を、断面/骨材寸法比( $h/d_{max}$ )で整理して図 1 に示す。破壊エネルギーの学会式は、粗骨材最大寸法と圧縮強度の関数として式(1)で表わされている。

$$G_F = 10 \times f_{ck}^{1/3} \times (d_{max})^{1/3} \cdots (1)$$

破壊エネルギーの試験結果は、全体に学会式よりも大きく得られているが、 $h/d_{max}$  が大きい範囲では骨材寸法が大きいほど値が大きく、 $h/d_{max}$  が小さくなるに従って減少し、断面の不均一性による破壊エネルギーの変化が現われている。一方、モルタル( $d_{max}=5\text{mm}$ )は断面寸法に対し骨材寸法の影響を無視することができ、均一断面と見なせるのでほぼ一定値を示している。

薄肉断面の曲げひび割れ強度の算定に当たっては、100mm 以下(20mm 骨材の場合、 $h/d_{max} \leq 5$ )の断面の破壊エネルギーの減少を表すため、式(1)に式(2)に示す低減係数 $\gamma_h$ を乗じることとした。なお、式の形は高さ 100mm 前後の連続性も考慮し、 $h/d_{max}=6$  で $\gamma_h=1$ としている。また、曲げひび割れ強度式における乾燥や水和熱による影響は、薄肉断面では無視できるとみなし、100mm 以下の断面においては $k_{lb}=1.0$ とした。

$$\gamma_h = \{ -(h/d_{max})^3 + 9(h/d_{max})^2 + 72 \} / 180 \cdots (2)$$

粗骨材の最大寸法 20mm としたときの本提案による曲げひび割れ強度の断面高さによる変化を図 2 に示す。また、図中には 1996 および 2002 年版示方書の曲げ及び曲げひび割れ強度式も示した。

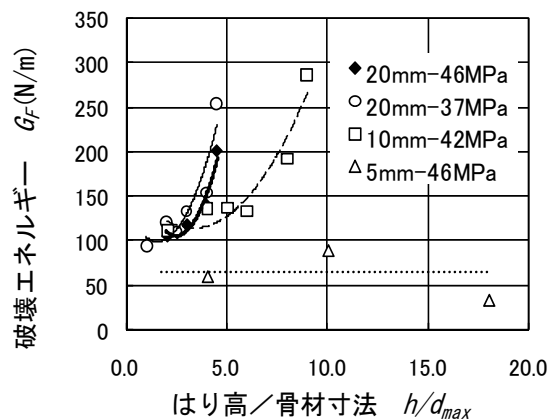


図1 破壊エネルギーの  
断面/骨材寸法比による変化

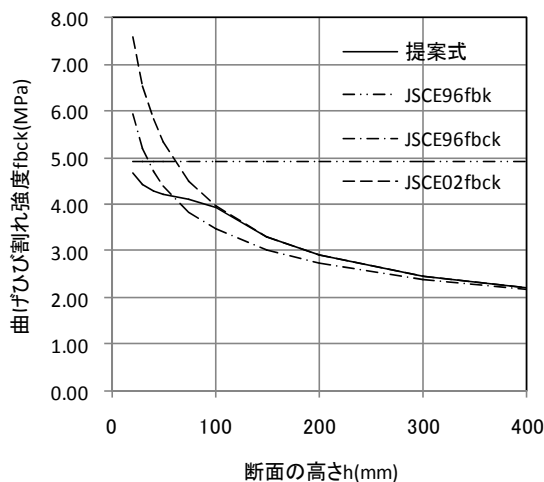


図2 提案式および学会式による  
曲げひび割れ強度の比較

キーワード 薄肉断面、破壊エネルギー、曲げひび割れ強度、曲げひび割れ耐力

連絡先 〒260-8666 千葉県千葉市中央区市場町 3-1 TEL 043-221-3471

### 3. 薄肉断面の曲げひび割れ耐力

単鉄筋長方形断面が曲げを受ける場合の曲げひび割れ強度は、02年版示方書の曲げひび割れ強度式に、断面の不均一性による破壊エネルギーの低下を考慮する。また、コンクリートの引張に関する応力-ひずみ関係は、曲げひび割れ強度に達した時に塑性化するバイリニア型に仮定する。このとき応力分布は図3に示すように圧縮側が三角形、引張側が台形となる。また、合力は図3で示すように表わされ、軸方向力の釣合、断面の抵抗偶力と外力モーメントの釣合からひび割れ耐力算定式は以下のように誘導される。

$\varepsilon_{te}/t = \varepsilon_{tu}/(h-x)$ から、

$$t = (\varepsilon_{te}/\varepsilon_{tu}) \cdot (h-x) \quad (3)$$

ここに、 $\varepsilon_{te}$ ：曲げひび割れ強度の弾性ひずみ  
( $=f_{bck}/E_c$ )、 $\varepsilon_{tu}$ ：コンクリートの引張限界ひずみ

コンクリートの引張限界ひずみは、断面寸法が小さくなるに従い減少する傾向がうかがえることから、式(4)により、断面寸法の減少に伴う引張限界ひずみの低減を表すこととした。

$$\varepsilon_{tu} = 20 \{ 5 + (h/d_{max}) \} \times 10^{-6} \cdot \cdot \cdot (4)$$

ただし、 $h/d_{max} < 5$ に適用し、 $h/d_{max} \geq 5$ (20mm 骨材の場合、 $h \geq 100\text{mm}$ )では  $200 \times 10^{-6}$  とする。

図3より断面の合力は、

$$C_c = bx\sigma/2 = bx^2 f_{bck}/2t$$

$$T_{c1} = btf_{bck}/2$$

$$T_{c2} = b(h-x-t)f_{bck}$$

$$T_s = \varepsilon_s E_s A_s = np(d-x)bdf_{bck}/t$$

$\sum H=0$  および作用曲げモーメント  $M$  と断面の抵抗偶力の釣合関係より、 $k = \varepsilon_{te}/\varepsilon_{tu}$  とおくと、

$$\therefore x = \frac{I}{(1-k)^2} \left[ -\{npd + (2-k)kh\} + \sqrt{\{npd + (2-k)kh\}^2 + (1-k)^2 \{2npd^2 + (2-k)kh^2\}} \right]$$

作用曲げモーメント  $M$  と断面の抵抗偶力の釣合関係から、曲げひび割れ耐力を計算する。

$$\therefore M_{crd} = \left\{ \frac{1}{2}h^2 - \frac{1}{6}t^2 - \frac{1}{3}(h+t)x - \frac{1}{6}x^2 + (d^2 - \frac{4}{3}dx + \frac{1}{3}x^2) \frac{npd}{t} \right\} b f_{bck}$$

なお、無筋コンクリートの場合は  $p=0$  として計算すればよい。

表1に曲げひび割れ発生モーメントの目視による値と本提案式から求まる値、および計算式を支配する中立軸位置  $x$  と引張の弾性領域  $t$  の値を示す。計算結果は、断面80~100mmで過大となっているが、これら以外では目視のひび割れ耐力の0.85~1.0程度の範囲にある。また、曲げひび割れ発生時の中立軸位置  $x$  は断面高さ中央付近に位置し、断面高さが小さくなると、式(4)による引張限界ひずみの低減により、引張塑性領域  $(h-x-t)$  が減少している。なお、引張限界ひずみをより大きく評価すると  $x+t > h$  となることもあり不合理な結果を与える。表1に示すように、提案式による結果は概ね試験結果を近似しているといえる。

### 4. まとめ

提案式は一部に過大な結果を与えているが、全体としては薄肉断面の曲げひび割れ耐力を近似している。破壊エネルギーおよび引張限界ひずみの断面高さおよび断面の不均一性による低減の程度は、製品試験結果の蓄積によって今後さらに検討する予定である。

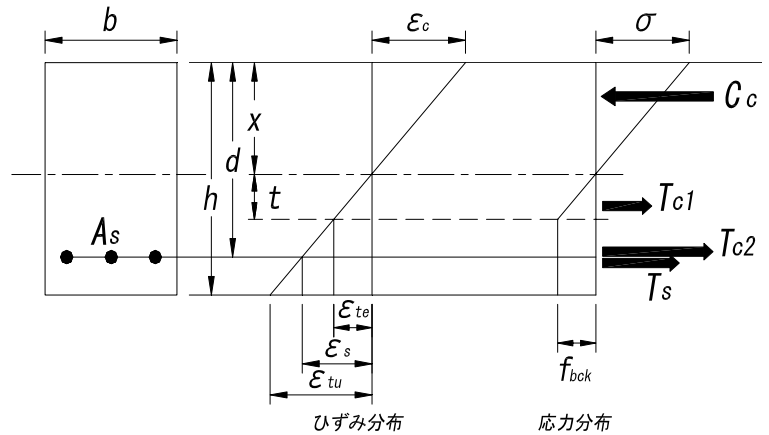


図3 曲げひび割れ発生時のひずみおよび応力分布

表1 曲げひび割れ耐力の試験結果と計算値

| 断面<br>(mm) | 曲げひび割れ耐力(kN・m) |       | 位置(mm) |      | 精度    |
|------------|----------------|-------|--------|------|-------|
|            | 目視             | 計算値   | x      | t    |       |
| 40         | 0.336          | 0.288 | 20.0   | 19.7 | 0.858 |
| 50         | 0.535          | 0.483 | 25.0   | 22.3 | 0.902 |
| 60         | 0.679          | 0.735 | 29.9   | 24.7 | 1.083 |
| 80         | 0.788          | 0.915 | 39.9   | 29.1 | 1.162 |
| 100        | 1.150          | 1.506 | 49.3   | 33.6 | 1.309 |
| 150        | 3.350          | 3.308 | 73.3   | 42.5 | 0.987 |
| 200        | 6.510          | 5.872 | 97.5   | 50.3 | 0.902 |