

## 薄肉鉄筋コンクリート製品の終局曲げ耐力

興建産業(株) 正会員 ○田所雄治、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の中には、土木学会示方書等で対象としていない薄肉断面のものが多数あり、断面耐力算定を精度よく行うことができないという課題があった。本文は、設計断面の減少にともなうコンクリート特性等の円柱供試体との乖離に着目し、薄肉 RC 断面の終局曲げ耐力計算式を提案したものである。

### 2. 曲げ破壊挙動

20mm の粗骨材を使用し、断面の高さを 200～40mm に変化させた板状はりの曲げ試験結果を表-1 に示す。区分 A はコンクリート強度 46MPa、B は 38MPa である。最大圧縮ひずみおよび最大引張ひずみは、それぞれ破壊直前までに測定されたコンクリート上縁および引張鉄

表-1 終局耐力の実験結果

| 区分 | No. | 断面諸元          |               |            |             |      |                         |      |       |                                             |         | 実験結果                             |                               |                              |
|----|-----|---------------|---------------|------------|-------------|------|-------------------------|------|-------|---------------------------------------------|---------|----------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
|    |     | 断面高さ<br>h(mm) | 有効高さ<br>d(mm) | 幅b<br>(mm) | 支間<br>l(mm) | a/d  | E <sub>c</sub><br>(GPa) | n    | 配筋    | 鉄筋量<br>A <sub>s</sub><br>(mm <sup>2</sup> ) | 鉄筋比ρ    | 終局耐力<br>M <sub>u</sub><br>(kN・m) | 最大圧縮歪み<br>ε <sub>cu</sub> (μ) | 最大引張歪み<br>ε <sub>s</sub> (μ) |
| A  | ①   | 200           | 180           | 150        | 1300        | 3.47 | 32.2                    | 6.21 | 2D13  | 253.40                                      | 0.00939 | 16.141                           | >3500                         | 降伏                           |
|    | ②   | 150           | 130           | 150        | 630         | 3.00 | 32.2                    | 6.21 | 2D10  | 142.70                                      | 0.00732 | 6.800                            | >3500                         | 降伏                           |
|    | ③   | 100           | 80            | 150        | 530         | 3.00 | 32.2                    | 6.21 | 2D6   | 63.34                                       | 0.00528 | 2.344                            | >3500                         | 降伏                           |
|    | ④   | 80            | 60            | 150        | 600         | 4.57 | 32.2                    | 6.21 | 2D6   | 63.34                                       | 0.00704 | 1.877                            | >3500                         | 降伏                           |
|    | ⑤   | 60            | 40            | 240        | 300         | 3.13 | 32.2                    | 6.21 | 2φ4.0 | 25.13                                       | 0.00262 | 0.679                            | 181                           | 114                          |
|    | ⑥   | 50            | 30            | 240        | 240         | 3.17 | 32.2                    | 6.21 | 2φ3.2 | 16.08                                       | 0.00223 | 0.535                            | 309                           | 200                          |
|    | ⑦   | 40            | 20            | 240        | 200         | 3.75 | 32.2                    | 6.21 | 2φ3.2 | 16.08                                       | 0.00335 | 0.336                            | 170                           | 11                           |
| B  | ①   | 200           | 180           | 150        | 1300        | 3.47 | 30.3                    | 6.60 | 2D13  | 253.40                                      | 0.00939 | 14.660                           | >3500                         | 降伏                           |
|    | ②   | 150           | 130           | 150        | 630         | 3.00 | 30.3                    | 6.60 | 2D10  | 142.70                                      | 0.00732 | 6.370                            | >3500                         | 降伏                           |
|    | ③   | 100           | 80            | 150        | 530         | 3.00 | 30.3                    | 6.60 | 2D6   | 63.34                                       | 0.00528 | 1.823                            | >3500                         | 降伏                           |
|    | ④   | 80            | 60            | 150        | 600         | 4.57 | 30.3                    | 6.60 | 2D6   | 63.34                                       | 0.00704 | 1.197                            | >3500                         | 降伏                           |
|    | ⑤   | 60            | 40            | 240        | 300         | 3.13 | 30.3                    | 6.60 | 2φ4.0 | 25.13                                       | 0.00262 | 0.735                            | 307                           | 134                          |
|    | ⑥   | 50            | 30            | 240        | 240         | 3.17 | 30.3                    | 6.60 | 2φ3.2 | 16.08                                       | 0.00223 | 0.415                            | 197                           | 43                           |
|    | ⑦   | 40            | 20            | 240        | 200         | 3.75 | 30.3                    | 6.60 | 2φ3.2 | 16.08                                       | 0.00335 | 0.357                            | 217                           | 36                           |

筋のひずみである。断面の高さが 200～80mm の供試体では、コンクリート上縁ひずみが示方書に規定している  $3500 \times 10^{-6}$  以上となり、また鉄筋は降伏ひずみに至っている。しかし、断面の高さが 60、50 および 40mm の場合、終局状態直前の荷重においてもコンクリートおよび引張鉄筋ともにひずみが著しく小さい。この理由は、断面の高さが小さくなるとひずみ勾配が大きくなり、コンクリート上縁の圧縮ひずみが、通常想定される限界ひずみ ( $3500 \times 10^{-6}$ ) まで変形することなく圧壊しやすくなることが考えられる。また、圧縮力ー引張力間の抵抗偶力の距離が小さく、引張鉄筋のひずみが増大しにくくなる。このため、コンクリートおよび鉄筋の強度性能が発揮されにくいと考えられる。

### 3. 終局耐力式の誘導

骨材の最大寸法に対するはり高さの比（以下、 $h/d_{\max}$ ）が小さい場合、①はり高さが最大粗骨材寸法にきわめて近いものがあること、②骨材とモルタルとの剛性の相違および骨材界面が脆弱であること、③ひずみ勾配が一般の構造物に比べ著しく大きくなること、④円柱供試体の直径よりも小さいものもある。このようなことから、設計に用いる応力ーひずみ曲線は、最大応力に関する係数  $k_1$  および終局限界ひずみ  $\varepsilon'_{cu}$  を、高強度コンクリートの場合と同様の処理として、設計断面の高さに応じて低減することとした。

終局限界ひずみ  $\varepsilon'_{cu}$  および係数  $k_1$  は、 $h/d_{\max} < 5$  において式(1)、(2)および図-1、2 に示すように仮定する。すなわち、 $h/d_{\max}$  が 5 未満の範囲では、計算に使用するコンクリートの応力ーひずみ曲線は、 $h/d_{\max}$  の減少にしたがって最大応力および終局限界ひずみが低下し、さらに断面高さが小さくなると塑性域まで変形に耐えることができなくなり、S-S 曲線の曲線部分しか現れずにコンクリート上縁が爆発的に破壊する。このように、薄肉断面の終局曲げモーメントの計算に用いる応力ひずみ曲線は、図-3 に示すように、その縮小化によって処理することとした。

$$\varepsilon'_{cu} = (2000 \times 10^{-6} / 3) \{ 1.25(h/d_{\max}) - 1 \} \quad h/d_{\max} < 5 \quad (1)$$

$$k_1 = 0.07(h/d_{\max}) + 0.5 \quad h/d_{\max} < 5 \quad (2)$$

曲げを受けるときのコンクリート圧縮部の合力は、次のように計算される。

キーワード 薄肉断面、最大粗骨材寸法、終局曲げ耐力

連絡先 〒183-0026 東京都府中市南町 5-38-3 TEL042-365-3331

ひずみ分布が  $\varepsilon = 0.002$  となる高さを  $x_1$  とすれば、

$dy = x / \varepsilon'_{cu} d\varepsilon_c$  であるから、

$$\begin{aligned} C' &= \int_0^{x_1} \sigma'_c b dy = \int_0^{x_1} \sigma'_c b dy + \int_{x_1}^x \sigma'_c b dy \\ &= k_1 f'_{cd} b x / (0.002 \varepsilon'_{cu}) \int_0^{0.002} \varepsilon'_c (2 - \varepsilon'_c / 0.002) d\varepsilon'_c \\ &\quad + k_1 f'_{cd} b x / \varepsilon'_{cu} \int_{0.002}^{\varepsilon'_{cu}} d\varepsilon'_c \quad (3) \end{aligned}$$

図-1、2 に示した関係から、式(3)に用いる応力-ひずみ曲線は、 $h/d_{max} < 3.2$  の条件ではひずみ 0.002 以上の積分範囲がなくなるので、これを境にコンクリート圧縮合力の計算式を誘導する。

#### 1) S-S 曲線の塑性域が現れる範囲の場合 ( $h/d_{max} \geq 3.2$ )

この条件では、圧縮上縁のコンクリートひずみは十分に大きくなることから、式(3)が成立し、

$$C' = k_1 f'_{cd} b x \{1 - 0.002 / (3 \varepsilon'_{cu})\} \quad (4)$$

ここに、 $a = \beta x$  とすると、コンクリートの応力ブロックの高さの係数  $\beta_1$  は、 $\beta_1 = 1 - 0.002 / (3 \varepsilon'_{cu})$  となる。

終局時には鉄筋が降伏状態であることを前提とし、終局曲げ耐力の計算を行うこととする。

#### 2) S-S 曲線の塑性域が現れない範囲の場合 ( $h/d_{max} < 3.2$ )

この条件では、コンクリートの曲げひび割れ発生から以降の耐力の増大が仮定できたとしても、鉄筋コンクリートとしての延性破壊を期待することはできないので、工学的意味は小さい。しかし、このような条件に至る材料および断面条件の判断には意味がある。 $\varepsilon'_c < 0.002$  であるので、式(3)の第一項だけが有効となり、次のように誘導される。

$$C' = k_1 f'_{cd} b x (\varepsilon'_c / 0.002) (1 - \varepsilon'_c / 0.006) \quad (5)$$

コンクリートの応力分布は三角形分布に近いが、応力ブロックを仮定すれば、係数  $\beta_2 = a/x$  は、 $\beta_2 = (\varepsilon'_c / 0.002) / (1 - \varepsilon'_c / 0.006)$  となる。

この条件下で、終局状態が鉄筋の降伏に支配されることを仮定し、終局曲げ耐力の計算値と実際の測定値を比較したものを表-2 に示す。断面高さが  $h/d_{max} < 3.2$  になると、鉄筋が有効に働かなくなる。高さ 50、40mm の終局状態は、コンクリートの曲げひび割れ耐力を維持できず<sup>1)</sup>表-2 に示す精度になる。

#### 4. まとめ

薄肉断面として考える断面骨材寸法比  $h/d_{max} < 5$  の場合は、コンクリートの圧縮終局時の応力ひずみ曲線を  $\varepsilon'_{cu}$  および  $k_1$  により縮小化し、式(4)、(5)による圧縮合力に基づくアーム長を用い、終局曲げ耐力の計算を行うことが妥当と考えられる。

また、 $h/d_{max} < 3.2$  になると、鉄筋コンクリートとしての靱性的破壊性状が損なわれるので、このような断面条件の製品の用途や供用条件を慎重に検討する必要がある。今後、製品の載荷試験結果等の検討により、計算精度をさらに向上させるため、 $h/d_{max}$  の減少にともなう  $\varepsilon'_{cu}$  および  $k_1$  の低減の程度を調整する予定である。

文献 1) 湯浅他：薄肉鉄筋コンクリートの曲げひび割れ耐力，第 63 回 年次学術講演会概要集第 5 部門，2008

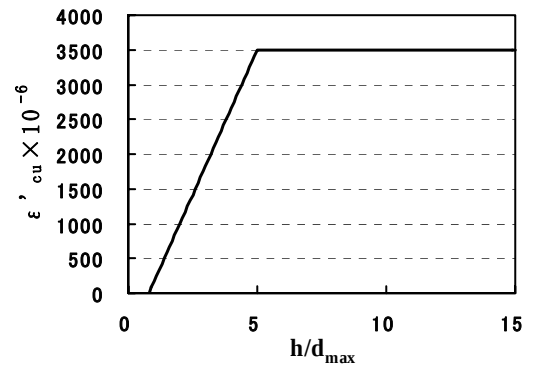


図-1  $\varepsilon'_{cu}$  の  $h/d_{max}$  による変化

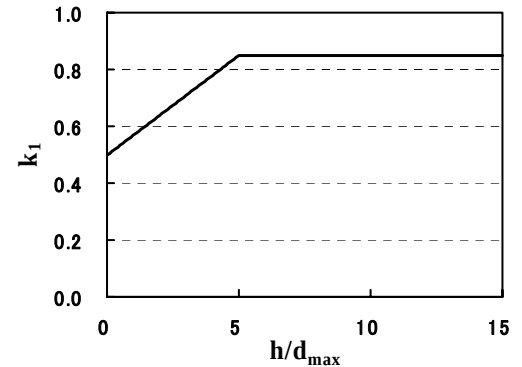


図-2  $k_1$  の  $h/d_{max}$  による変化

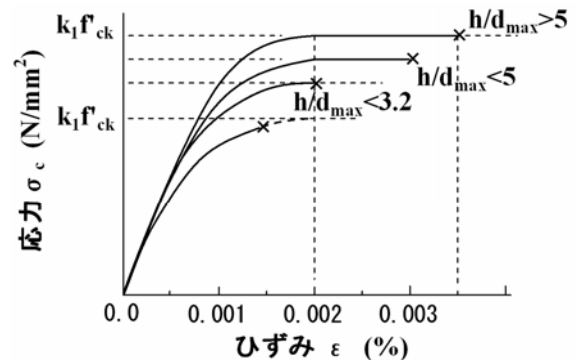


図-3 コンクリートの応力ひずみ曲線

表-2 終局曲げ耐力の計算値と測定値の比較

| 区分 | No. | 高さ<br>h<br>(mm) | 断面骨<br>材寸法<br>比<br>h/d <sub>max</sub> | 降伏点<br>f <sub>yd</sub><br>(MPa) | 計算結果                       |                           | 測定値/計算精度                  |           |
|----|-----|-----------------|---------------------------------------|---------------------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------|
|    |     |                 |                                       |                                 | 終局時<br>の中立<br>軸位置<br>x(mm) | 終局曲<br>げ耐力<br>Mu<br>(kNm) | 終局曲<br>げ耐力<br>Mu<br>(kNm) | 計算/<br>測定 |
| A  | ①   | 200             | 10.00                                 | 362                             | 19.3                       | 15.796                    | 16.141                    | 0.98      |
|    | ②   | 150             | 7.50                                  | 370                             | 11.1                       | 6.627                     | 6.800                     | 0.97      |
|    | ③   | 100             | 5.00                                  | 334                             | 4.4                        | 1.654                     | 2.344                     | 0.71      |
|    | ④   | 80              | 4.00                                  | 334                             | 5.2                        | 1.228                     | 1.877                     | 0.65      |
|    | ⑤   | 60              | 3.00                                  | 438                             | 4.0                        | 0.775                     | 0.679                     | 1.14      |
|    | ⑥   | 50              | 2.50                                  | 496                             | 3.0                        | 0.354                     | 0.535                     | 0.66      |
|    | ⑦   | 40              | 2.00                                  | 496                             | 2.0                        | 0.116                     | 0.336                     | 0.34      |
| B  | ①   | 200             | 10.00                                 | 355                             | 23.1                       | 15.350                    | 14.661                    | 1.05      |
|    | ②   | 150             | 7.50                                  | 353                             | 12.9                       | 6.285                     | 6.370                     | 0.99      |
|    | ③   | 100             | 5.00                                  | 330                             | 5.4                        | 1.627                     | 1.823                     | 0.89      |
|    | ④   | 80              | 4.00                                  | 330                             | 6.3                        | 1.205                     | 1.197                     | 1.01      |
|    | ⑤   | 60              | 3.00                                  | 440                             | 4.0                        | 0.633                     | 0.735                     | 0.86      |
|    | ⑥   | 50              | 2.50                                  | 505                             | 3.0                        | 0.289                     | 0.415                     | 0.70      |
|    | ⑦   | 40              | 2.00                                  | 505                             | 2.0                        | 0.095                     | 0.357                     | 0.26      |