

V-366

超高強度コンクリートはり部材の曲げ耐力および靱性率評価

東北大学 学生員 ○今福健一郎
 東北大学 正員 鈴木基行
 東北大学 正員 尾坂芳夫

1. まえがき

現在、圧縮強度が1000kgf/cm²を越える超高強度コンクリートの必要性が高まっているにもかかわらず、高強度コンクリートを用いた構造物を設計する際の設計規定が示されていないのが現状である。そこで、本研究は超高強度コンクリートはり部材について、曲げ耐力と靱性率に対する評価を行うことを目的とする。

2. 実験概要

本実験では圧縮強度 $f'_c=368, 695, 1174, 1047$ kgf/cm²の4種類のコンクリートを用いた。また、本実験で使用した引張鉄筋（SD35, SD50, SD60）の引張試験結果を表1に、供試体の諸元を表2に、載荷方法を図1に示す。

表-1 鉄筋引張試験結果

| 種類 | 降伏強度 f_y (kgf/cm ²) | 降伏歪 ϵ_y (μ) | ヤング係数 E_s (kgf/cm ²) | 歪硬化開始歪 ϵ_{sh} (μ) | |
|------|---|----------------------------------|--|--|-------|
| SD35 | D16 | 3867 | 2067 | 1.86*10 ⁶ | 22900 |
| | D22 | 4017 | 2233 | 1.86*10 ⁶ | 21683 |
| | D25 | 3763 | 2113 | 1.83*10 ⁶ | 14467 |
| SD50 | D16 | 5000 | 2750 | 1.89*10 ⁶ | 25450 |
| | D19 | 5700 | 3050 | 1.87*10 ⁶ | 22667 |
| | D22 | 5333 | 2800 | 1.90*10 ⁶ | 21975 |
| SD60 | D25 | 5317 | 2850 | 1.90*10 ⁶ | 22800 |
| | D16 | 8225 | 4775 | 1.85*10 ⁶ | 6975 |
| | D22 | 7300 | 3867 | 1.91*10 ⁶ | 14875 |
| D25 | 6800 | 3717 | 1.91*10 ⁶ | 19900 | |

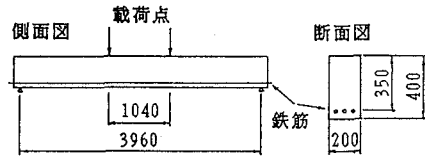


図-1 載荷方法

表-2 供試体諸元および実験結果一覧表

| 供試体 番号 | コンクリート 圧縮強度 f'_c (kgf/cm ²) | 引張主鉄筋 | | 実験結果 | | | | | ρt $\frac{\rho b}{\rho t}$ (%) | 靱性率 μ |
|-----------|--|------------------|---------------------|-----------------|-----------------------|-----------------|------------------------|------------------------------|--|--------------|
| | | 使 用 鉄 筋 | 鉄筋比 ρt (%) | 降伏時 | | 終局時 | | | | |
| | | | | M_y (tf·m) | ϕky (1/m) | M_u (tf·m) | ϕku (1/m) | ϵ_{cu} (μ) | | |
| L-1 | 368 | SD35, 3D16 | 0.85 | 7.17 | 8.6*10 ⁻³ | 8.19 | 7.61*10 ⁻² | 3312 | 17.5 | 8.87 |
| L-2 | 368 | SD50, 3D16 | 0.85 | 9.47 | 11.3*10 ⁻³ | 10.34 | 3.89*10 ⁻² | 2798 | 25.4 | 3.44 |
| L-3 | 368 | SD60, 3D16 | 0.85 | 14.42 | 19.8*10 ⁻³ | 15.99 | 3.99*10 ⁻² | 3618 | 55.5 | 2.02 |
| L-4 | 368 | SD35, 3D25 | 2.17 | 16.23 | 10.2*10 ⁻³ | 17.47 | 3.52*10 ⁻² | 3303 | 43.8 | 3.45 |
| M-1 | 695 | SD35, 3D22 | 1.66 | 14.02 | 8.8*10 ⁻³ | 16.45 | 7.17*10 ⁻² | 3506 | 23.1 | 8.15 |
| M-2 | 695 | SD50, 3D22 | 1.66 | 19.48 | 13.4*10 ⁻³ | 21.96 | 6.30*10 ⁻² | 4420 | 33.7 | 4.70 |
| M-3 | 695 | SD60, 3D22 | 1.66 | 25.35 | 16.1*10 ⁻³ | 26.65 | 4.80*10 ⁻² | 3811 | 53.8 | 2.98 |
| M-4 | 695 | SD35, 3D25 | 2.17 | 17.66 | 10.0*10 ⁻³ | 19.91 | 6.23*10 ⁻² | 4250 | 27.8 | 6.23 |
| H-1 | 1174 | SD35, 3D25 | 2.17 | 17.29 | 9.2*10 ⁻³ | 20.64 | 8.89*10 ⁻² | 3893 | 17.8 | 9.71 |
| H-2 | 1174 | SD50, 3D25 | 2.17 | 24.29 | 12.4*10 ⁻³ | 27.46 | 7.63*10 ⁻² | 3948 | 28.3 | 6.15 |
| H-3 | 1174 | SD60, 3D25 | 2.17 | 30.67 | 16.0*10 ⁻³ | 34.13 | 5.18*10 ⁻² | 3619 | 40.8 | 3.24 |
| H-1D | 1047 | SD50, 3D16 | 0.85 | 9.07 | 11.3*10 ⁻³ | 10.63 | 12.45*10 ⁻² | 3553 | 11.4 | 11.0 |
| H-2D | 1047 | SD50, 3D19 | 1.23 | 15.44 | 14.5*10 ⁻³ | 18.35 | 9.43*10 ⁻² | 3960 | 19.6 | 6.49 |
| H-3D | 1047 | SD50, 3D22 | 1.66 | 19.22 | 12.5*10 ⁻³ | 21.95 | 9.39*10 ⁻² | 3851 | 23.8 | 7.49 |
| H-4D | 1047 | SD50, 3D25 | 2.17 | 24.10 | 13.8*10 ⁻³ | 27.41 | 6.21*10 ⁻² | 4167 | 31.3 | 4.50 |
| H-5D | 1174 | SD60, 3D25 | 2.17 | 30.12 | 16.2*10 ⁻³ | 34.08 | 5.41*10 ⁻² | 3707 | 40.8 | 3.36 |

*M:曲げモーメント、 ϕk :曲部局率、 ϵ_{cu} :終局時コンクリート圧縮縁ひずみ、 ρt :引張主鉄筋比
 ρb :約合鉄筋比、靱性率:終局時曲率/降伏時曲率

3. 実験結果及び考察

実験結果一覧を表2に示す。

3.1 はり部材のコンクリート圧縮縁ひずみ

曲げ区間における終局時の圧縮縁ひずみ ϵ_{cu} とコンクリート強度 f'_c の関係を図2に示す。この図から、終局時の圧縮縁ひずみは3000~4000 μ 前後であり、また、コンクリート強度が大きくなるにつれて圧縮縁コンクリートひずみが大きくなることから分かる。実験値の回帰式として(1)式を得た。

$$\epsilon_{cu} = 0.562f'_c + 3241 \quad (\mu) \quad (1)$$

3. 2 終局曲げモーメント

(1) Hognestadの理論

この理論では、①平面保持の仮定②コンクリートの引張抵抗は無視③応力分布を長方形分布とする、という仮定に基づいて次のような終局曲げモーメント式を算定している。

$$M_u = f_c' b d^2 q (1 - k_2 q / k_1 k_3) \quad \text{ただし、} q = \rho_t f_y / f_c' \quad k_1, k_2, k_3: \text{応力分布係数}$$

(2) 日本土木学会の式

平成3年コンクリート標準示方書によると、コンクリートの圧縮応力分布を等価応力ブロックと仮定して、以下の式で終局時の曲げモーメントを算定するのが一般的な方法としている。

$$M_u = 0.68 f_c' x_c b (d - 0.4 x_c) \quad (2)$$

$$x_c = A_s f_{sy} / k_1 k_3 f_c' b$$

(3) 実験値との比較

実験値とHognestadの式、及び土木学会の式で算定された終局曲げモーメントの値を表3に示す。この結果から、両式共に実験値とほぼ一致しているといえる。

3. 3 靱性率 μ と ρ_t/ρ_b 関係

本実験では降伏時の曲部局率 ϕ_{ky} と終局時の曲部局率 ϕ_{ku} に注目して靱性率 μ を次式で表す。

$$\mu = \phi_{ku} / \phi_{ky}$$

また、図3に靱性率 μ と ρ_t/ρ_b 関係を示す。図3より局部曲率により表現される靱性率 μ は ρ_t/ρ_b のみに支配され、靱性率は ρ_t/ρ_b が小さくなるにつれて加速度的に増加することがわかる。靱性率 μ と ρ_t/ρ_b の関係を回帰式で表現すると、以下に示す反比例式で精度良く実測値と一致した結果が得られた。(Zは定数)

$$\mu = Z / (\rho_t / \rho_b) - (Z / 100 - 1) \quad (3)$$

ここで、本実験では(4)式が得られた。

$$\mu = 161 / (\rho_t / \rho_b) - 0.61 \quad (4)$$

4. 結論

(1) コンクリート強度が増加するにともない塑性域が小さくなるが、曲げ部材の終局時における圧縮縁コンクリートひずみは大きくなること確認された。

(2) Hognestad理論による曲げ耐力算定方法、土木学会の設計式でも十分に超高強度コンクリート部材の曲げ耐力の実測値と適合していた。

(3) ρ_t/ρ_b により靱性率を決定できることが確認された。

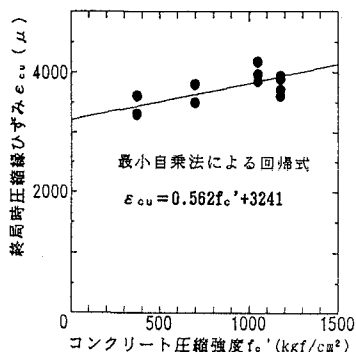


図-2 $\epsilon_{cu} - f'_c$ 関係

表-3 Hognestadの式および土木学会の式による計算値と実験結果の比較

| 供試体番号 | Hognestad | | | | 土木学会 | | 実験値 | | M_{uT} / M_{uN} | M_{uD} / M_{uD} |
|-------|-----------|-------|---------------------------|-----------------|-----------------|---------------------------|-----------------|------|-------------------|-------------------|
| | $k_1 k_3$ | k_2 | ϵ_{cu} (μ) | M_{uH} (tf·m) | M_{uD} (tf·m) | ϵ_{cu} (μ) | M_{uT} (tf·m) | | | |
| L-1 | 0.75 | 0.43 | 3422 | 7.65 | 7.64 | 3312 | 8.19 | 1.07 | 1.07 | |
| L-2 | 0.75 | 0.43 | 3422 | 9.73 | 9.72 | 2798 | 10.34 | 1.06 | 1.06 | |
| L-3 | 0.75 | 0.43 | 3422 | 15.28 | 15.23 | 3618 | 15.99 | 1.05 | 1.05 | |
| L-4 | 0.75 | 0.43 | 3422 | 17.41 | 17.41 | 3303 | 17.47 | 1.00 | 1.00 | |
| M-1 | 0.70 | 0.41 | 4006 | 15.41 | 15.41 | 3506 | 16.45 | 1.07 | 1.07 | |
| M-2 | 0.70 | 0.41 | 4006 | 20.06 | 20.05 | 4420 | 21.96 | 1.09 | 1.10 | |
| M-3 | 0.70 | 0.41 | 4006 | 26.63 | 26.63 | 3811 | 26.65 | 1.00 | 1.00 | |
| M-4 | 0.70 | 0.41 | 4006 | 18.64 | 18.64 | 4250 | 19.91 | 1.07 | 1.07 | |
| H-1 | 0.64 | 0.39 | 3972 | 19.17 | 19.20 | 3893 | 20.64 | 1.08 | 1.08 | |
| H-2 | 0.64 | 0.39 | 3972 | 26.58 | 26.65 | 3948 | 27.46 | 1.03 | 1.03 | |
| H-3 | 0.64 | 0.39 | 3972 | 33.39 | 33.50 | 3619 | 34.13 | 1.02 | 1.02 | |
| H-1D | 0.64 | 0.39 | 3972 | 9.99 | 10.00 | 3553 | 10.63 | 1.06 | 1.06 | |
| H-2D | 0.64 | 0.39 | 3972 | 16.20 | 16.23 | 3960 | 18.35 | 1.13 | 1.13 | |
| H-3D | 0.64 | 0.39 | 3972 | 20.24 | 20.29 | 3851 | 21.95 | 1.08 | 1.08 | |
| H-4D | 0.64 | 0.39 | 3972 | 25.97 | 25.89 | 4167 | 27.41 | 1.06 | 1.06 | |
| H-5D | 0.64 | 0.39 | 3972 | 33.08 | 32.87 | 3707 | 34.08 | 1.03 | 1.04 | |

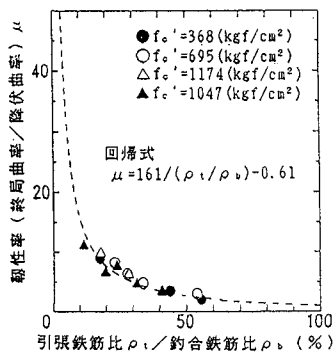


図-3 $\mu - \rho_b / \rho_t$ 関係