

## 論文

## [2147] 高強度材料を用いた RC はりの曲げ挙動に関する研究

坪内幹定<sup>\*1</sup>・上原匠<sup>\*2</sup>・梅原秀哲<sup>\*3</sup>・村山八洲雄<sup>\*4</sup>

## 1. はじめに

近年、土木構造物の大型化に伴い、その使用材料であるコンクリートおよび鉄筋に対して高強度のものが要求されてきている。高強度材料を利用することによる利点としては、橋梁におけるスパンの長大化および部材断面の縮小化により、経済的な部材設計や景観的にも優れた構造物の建設が可能となることが挙げられる。しかし、逆に欠点として、部材断面の縮小化による構造物の安定性の問題や破壊が脆性的になることによる安全性の問題が挙げられるため、曲げ部材の終局耐力について算定方法自体を検討し直す必要性が生じてくる[1]。その中で特に問題となるのが、現在、限界状態設計法において曲げ部材の終局耐力の算定に用いられているストレスブロックの、高強度コンクリートへの適用性である。既往の実験では圧縮強度が800kgf/cm<sup>2</sup>程度までのコンクリートについては、一軸圧縮載荷時の応力下降域を含んだ完全な応力-ひずみ関係が報告されている[2]が、ストレスブロックの適用性についてはほとんど報告されていない。

そこで本研究では、コンクリートの圧縮強度を500, 700, 900kgf/cm<sup>2</sup>とした円柱供試体の一軸圧縮試験から応力下降域を含んだ応力-ひずみ関係を測定し、そのモデル化を行った。さらに、コンクリートの圧縮強度や鉄筋の降伏強度を変化させたRCはりを用いて曲げ破壊実験を行うとともに、応力-ひずみモデルやストレスブロックを用いた数値解析との比較を行い、高強度コンクリートにおけるストレスブロックの適用性について検討した。

## 2. 高強度コンクリートの応力-ひずみ関係

## 2.1 実験概要

供試体はφ10×20cmの円柱供試体を使用した。コンクリートの配合を表-1に示す。結合材としては、普通ポルトランドセメントを使用し、さらにCシリーズには強度増加を期待するためにシリカフュームを併用した。なお、混合比は普通ポルトランドセメント4に対して、シリカフューム1の割合とした。混和剤には水結合材比の低下やシリカフュームの混入によってコンクリートのワーカビリティ

が低下するため、

アミノスルホン酸系

高性能AE減水剤を

使用した。実験は岩

盤試験機を使用し、

載荷は変位制御(載

表-1 コンクリートの配合

| シリーズ | Gmax<br>(mm) | S <sub>ℓ</sub><br>(cm) | Air<br>(%) | W           |     | s/a | 単 位 量 (/m <sup>3</sup> ) |           |            |           |           |             |            |
|------|--------------|------------------------|------------|-------------|-----|-----|--------------------------|-----------|------------|-----------|-----------|-------------|------------|
|      |              |                        |            | C+Si<br>(%) | (%) |     | W<br>(kg)                | C<br>(kg) | Si<br>(kg) | S<br>(kg) | G<br>(kg) | 減水剤<br>(kg) | AE剤<br>(g) |
| A    | 20           | 12                     | 4          | 40          | 43  | 183 | 523                      | 458       | —          | 690       | 954       | 2.29        | 18.3       |
| B    |              |                        |            | 32          | 41  |     |                          | 572       | —          | 620       | 931       | 7.44        | 343        |
| C    |              |                        |            | 28          | 41  |     |                          | 523       | 131        | 593       | 890       | 13.1        | 261        |

\*1 名古屋工業大学大学院 工学研究科社会開発工学専攻(正会員)

\*2 名古屋工業大学講師 工学部社会開発工学科、工博(正会員)

\*3 名古屋工業大学助教授 工学部社会開発工学科、Ph.D.(正会員)

\*4 鹿島建設(株)技術研究所第一研究部第3研究室主管研究員(正会員)

荷速度0.01mm/min)で行った。荷重の検出は岩盤試験機から直接行い、ひずみの検出はコンプレッソメータに取り付けた2個の変位計により行い、その平均値をひずみとした。検長は供試体の中央部100mmとした。

## 2.2 実験結果および考察

各供試体の応力-ひずみ関係を図-1に示す。高強度になるにしたがって最大応力時ひずみが2500 $\mu$ から3000 $\mu$ 近くへと増加していることがわかる。

また、高強度になるにしたがって割線弾性係数が $3.3 \times 10^5 \text{kgf/cm}^2$ から $3.6 \times$

$10^5 \text{kgf/cm}^2$ へと大きくなり、最大応力に達するまで弾性的特性が認められ、逆に塑性的特性を示す領域が狭くなることが言える。さらに最大応力に達した後、直ちに終局に至る傾向がある。これは、高強度になるにしたが

って骨材の強度がモルタル強度と大差なくなるために骨材破壊を起こしやすくなり、最大応力以降の強度低下が大きくなったと考えられる。

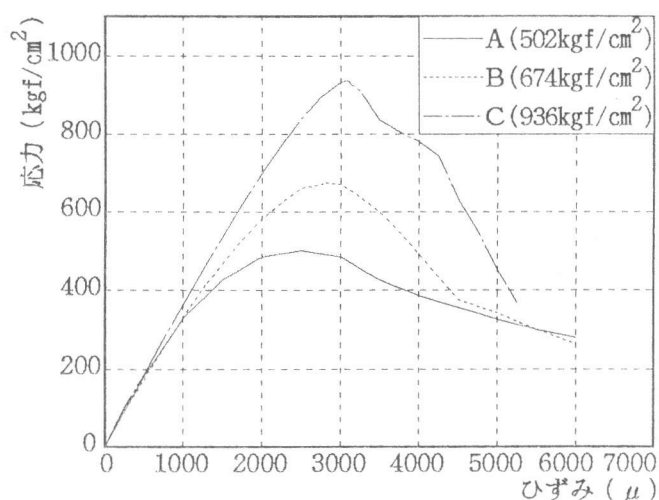
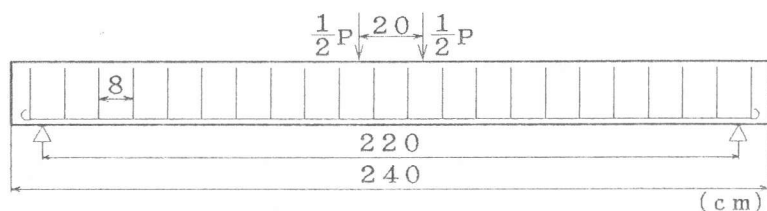


図-1 コンクリートの応力-ひずみ関係



## 3. RCはりの曲げ破壊実験

### 3.1 実験概要

供試体寸法および配筋を図-2に示す。供試体寸法は同一で、断面15×20 cm、有効高さ17 cm、全長240 cmの単鉄筋長方形はりとした。鉄筋比は曲げ引張破壊が生じるように約1%として、全供試体同一とした。また、曲げ破壊以前にせん断破壊を起こさないように、

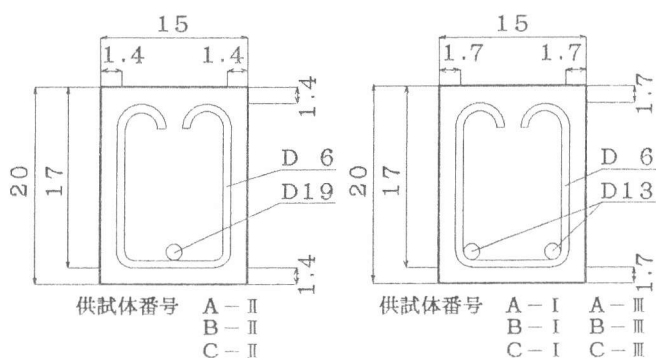


図-2 供試体の寸法および配筋

スターラップを十分に配筋した。実験変数は、コンクリートの圧縮強度 ( $f'_{ck}=400, 600, 800 \text{kgf/cm}^2$ ) と鉄筋の降伏強度 (SD295, SD490, SD785) とした。コンクリートは表-1に示す配合と同一としたが、養生条件の相違から同じ強度が得られなかった。はりの載荷には100tf構造試験機を用いて、支持条件は支点間距離220 cmの両端単純支持とし、純曲げ区間20 cmの2点集中載荷とした。測定項目は圧縮縁でのコンクリートひずみ (載荷点、支点間中央)、鉄筋ひずみ (載荷点、支点間中央)、たわみ、載荷荷重等である。また、載荷は荷重制御によりコンクリートの上縁が圧縮破壊し、作用荷重を保持できなくなるまで行った。なお試験材齢は28日である。

## 3.2 実験結果および考察

### 3.2.1 破壊荷重

表-2 実験結果

| 供試体<br>番号 | コンクリート                        |                                          | 鉄筋       |                |                                           |                        |                              | 曲げ試験結果                      |                      |                      |                                 |                              |                               |
|-----------|-------------------------------|------------------------------------------|----------|----------------|-------------------------------------------|------------------------|------------------------------|-----------------------------|----------------------|----------------------|---------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
|           | 圧縮強度                          | 引張強度                                     | 鉄筋<br>種別 | 径<br>D<br>(mm) | 降伏点<br>強度                                 | 降伏<br>ひずみ              | 鉄筋比<br>P <sub>s</sub><br>(%) | 荷重 (tf)                     |                      |                      | 支点間中央の変位                        |                              | 曲げ破壊<br>モーメント<br>Mu<br>(tf・m) |
|           | f'c<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | f <sub>t</sub><br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) |          |                | f <sub>sy</sub><br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | ε <sub>sy</sub><br>(μ) |                              | ひび割<br>れ<br>P <sub>cr</sub> | 降伏<br>P <sub>y</sub> | 破壊<br>P <sub>u</sub> | ひび割れ<br>(mm)<br>δ <sub>cr</sub> | 降伏<br>(mm)<br>δ <sub>y</sub> |                               |
| A-I       | 363.3                         | 27.1                                     | SD295    | D13            | 3433                                      | 1717                   | 0.99                         | 0.50                        | 2.87                 | 3.07                 | 0.38                            | 6.05                         | 1.54                          |
| A-II      |                               |                                          | SD490    | D19            | 5231                                      | 2753                   | 1.12                         | 0.50                        | 4.75                 | 5.00                 | 0.35                            | 11.02                        | 2.50                          |
| A-III     |                               |                                          | SD785    | D13            | 8372                                      | 4293                   | 0.99                         | 0.50                        | 6.52                 | 6.77                 | 0.38                            | 16.98                        | 3.39                          |
| B-I       | 505.0                         | 37.5                                     | SD295    | D13            | 3433                                      | 1717                   | 0.99                         | 0.75                        | 3.15                 | 3.42                 | 0.57                            | 6.13                         | 1.71                          |
| B-II      |                               |                                          | SD490    | D19            | 5231                                      | 2753                   | 1.12                         | 0.75                        | 5.26                 | 5.50                 | 0.53                            | 10.86                        | 2.75                          |
| B-III     |                               |                                          | SD785    | D13            | 8372                                      | 4293                   | 0.99                         | 0.75                        | 6.50                 | 6.79                 | 0.55                            | 16.10                        | 3.40                          |
| C-I       | 760.9                         | 42.8                                     | SD295    | D13            | 3433                                      | 1717                   | 0.99                         | 1.00                        | 3.00                 | 3.20                 | 0.71                            | 6.29                         | 1.60                          |
| C-II      |                               |                                          | SD490    | D19            | 5231                                      | 2753                   | 1.12                         | 1.00                        | 5.50                 | 5.56                 | 0.68                            | 10.96                        | 2.78                          |
| C-III     |                               |                                          | SD785    | D13            | 8372                                      | 4293                   | 0.99                         | 1.00                        | 7.23                 | 7.27                 | 0.71                            | 16.65                        | 3.64                          |

RCはりの曲げ試験結果を表-2に示す。コンクリート強度別に比較した場合、鉄筋の降伏強度が高くなるにしたがって降伏荷重、破壊荷重はともに約1.5~2.0tf間隔で増加するが、ひび割れ荷重はほぼ同じ値を示す。そして供試体C-IIIが破壊荷重で最大値を示すことから、高強度コンクリートに高強度鉄筋を併用することにより、強度増加が期待できると言える。

### 3.2.2 コンクリートひずみ

荷重とコンクリートの圧縮縁ひずみ（支点間中央での供試体上縁のひずみ）との関係の一例としてCシリーズを図-3に示す。全供試体において荷重-ひずみ関係は、荷重が約1.0tfで傾きを変え、その後一定の割合でひずみが増加している。これは、ひび割れが発生したことによりひずみが増加したものと考えられる。また、鉄筋降伏後は荷重はほとんど増加しないが、逆にひずみは著しく増加している。そして、鉄筋の降伏強度が高いほどコンクリートの圧縮縁ひずみが増加しており、また破壊荷重も増加している。このことから、高強度コンクリートには高強度鉄筋の併用が有効であると言える。なお、他の供試体も同様の傾向が得られた。

### 3.2.3 鉄筋ひずみ

荷重と載荷点での鉄筋ひずみとの関係の一例としてCシリーズを図-4に示す。全供試

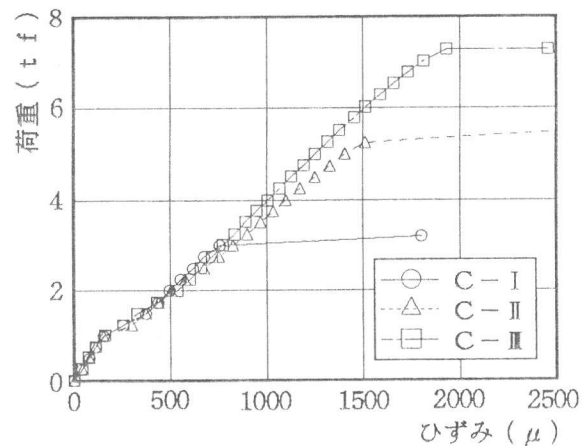


図-3 荷重-コンクリート圧縮縁ひずみ関係 (Cシリーズ)

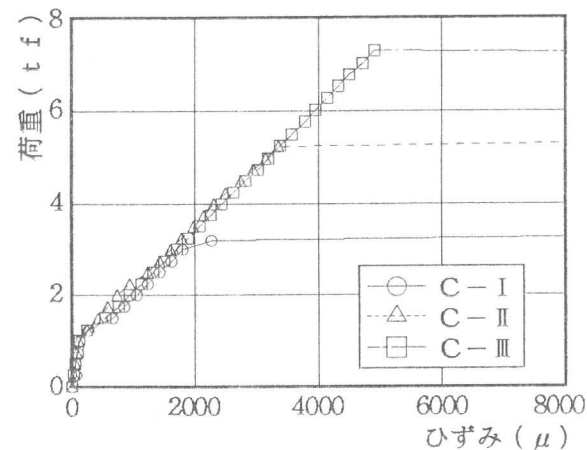


図-4 荷重-鉄筋ひずみ関係 (Cシリーズ)

体において荷重－ひずみ関係は、荷重が約1.0tfで傾きを変え、その後一定の割合でひずみが増加している。これは、ひび割れが生じるまでは、鉄筋とコンクリートとの付着によりコンクリートも引張力を受けているが、約1.0tfで供試体下縁にひび割れが発生した後は、引張力が鉄筋によって受け持たれたためにひずみが増加したものと考えられる。また、表－2に示すように同種類の鉄筋で比較した場合、降伏荷重はA－Iに比べてC－Iは約5%、A－IIに比べてC－IIは約16%、A－IIIに比べてC－IIIは約11%増加しており、コンクリート強度が増加するにしたがって増加している。しかし、コンクリート強度の増加の割合に比較して降伏荷重の増加の割合はかなり小さいと言える。

#### 3.2.4 荷重－変位関係

はりの荷重と支点間中央部の変位との関係の一例としてCシリーズを図－5に、IIIシリーズを図－6に示す。図－5に示すようにコンクリート強度が同一の場合、C－Iに比べてC－IIIの降伏時の変位は約2.7

倍増加しており、鉄筋の降伏強度が増加するにしたがって増加している。なお、A－Iに比べてA－IIIは約2.8倍、B－Iに比べてB－IIIは約2.7倍増加していた。一方、図－6に示すように同種類の鉄筋で比較した場合、コンクリート強度にかかわらず降伏時の変位がほぼ同一であることから、降伏時の変位はコンクリート強度にはほとんど影響を受けず、鉄筋の降伏強度に影響を受けると考えられる。また、コンクリート強度が増加するにしたがって同一荷重時の変位は小さくなっている。

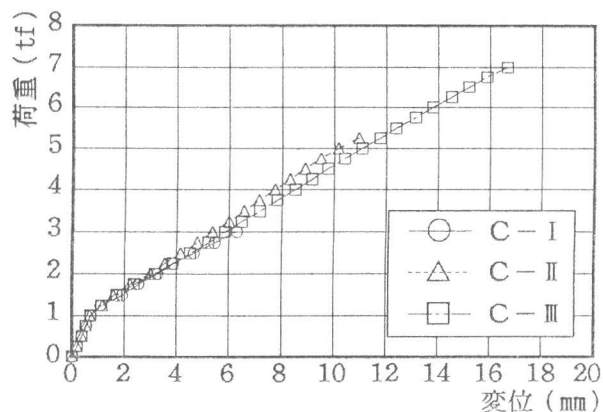
#### 3.2.5 破壊状況

表－2に示すように、供試体によって多少の違いはあるものの最大荷重の約10～35%の荷重で曲げひび割れが発生し、約90～95%の荷重で鉄筋が降伏した。そして、いずれの供試体も曲げひび割れが進展し、鉄筋が降伏した後、コンクリート上縁部分の圧縮破壊が生じた。

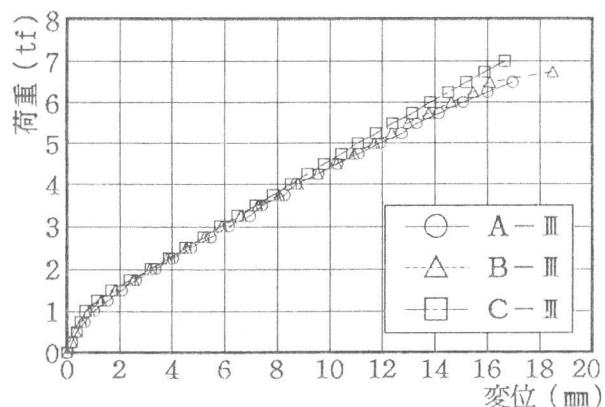
### 4. はりの解析

#### 4.1 解析概要

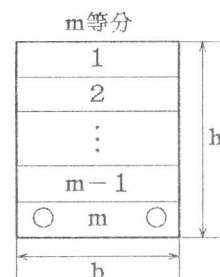
本解析は、佐藤らの作成した解析プログラムを用いて行った[3]。このプログラムは図－7に示すように、はり断面を要素分割することによって各要素のコンクリートおよび鉄筋のひずみを求め、さらにコンクリートお



図－5 荷重－支点間中央での変位関係  
(Cシリーズ)



図－6 荷重－支点間中央での変位関係  
(IIIシリーズ)



図－7 解析  
モデル

よび鉄筋の応力-ひずみ関係を導入することによって、RCはり部材の曲げ破壊モーメントを解析することができる。

#### 4.2 モデルの選定

解析に用いた応力-ひずみ関係のモデルを図-8に示す。コンクリートは、図-1に示す応力-ひずみ関係の結果に基づいて、A、Bシリーズでは図-8(a)に示す土木学会のモデルを、Cシリーズでは図-8(b)に示すモデルを選定した[4]。鉄筋は図-8(c)に示すように、降伏後の応力が一定ではなく、ひずみの増加とともに徐々に増加するモデルを選定した。

#### 4.3 実験結果と解析結果の比較

鉄筋ひずみにおける実測値と解析値の比較の一例として供試体C-Ⅲを図-9に示し、曲げ破壊モーメントの比較を表-3に示す。図-9に示すように鉄筋ひずみについては、実測値と解析値はよく一致することが明らかとなった。また、表-3に示すように解析で得られた曲げ破壊モーメントは実測値によく適合しており、本解析プログラムが有効であると言える。

#### 4.4 ストレスブロックの評価

図-1に示す応力-ひずみ関係を基に、破壊ひずみを0.0035とした時のモデルを図-10に示し、応力-ひずみモデルを用いて算定した曲げ破壊モーメントの値を表-3に示す。ここで応力-ひずみ関係は、A、Bシリーズでは土木学会で提案されているストレスブ

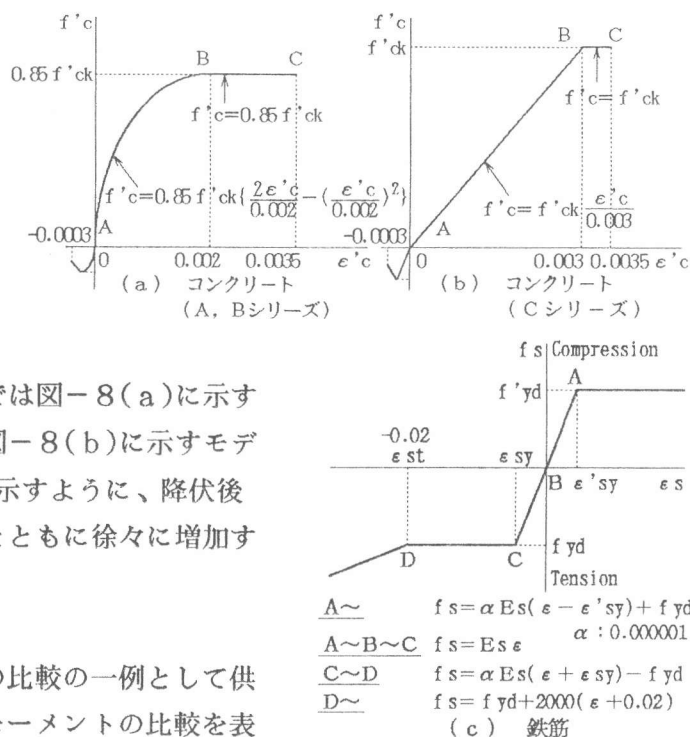


図-8 応力-ひずみモデル

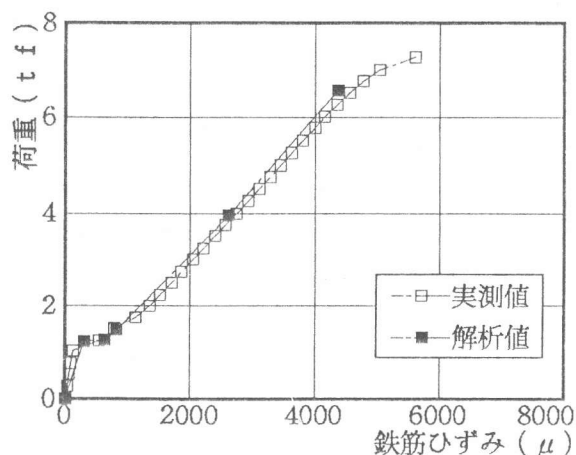


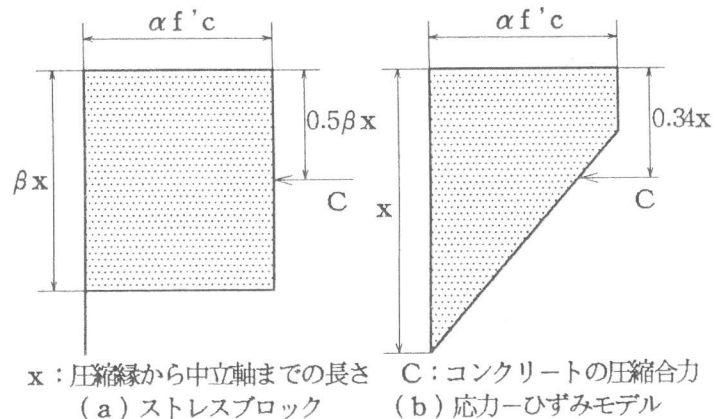
図-9 実測値と解析値の比較 (C-Ⅲ)

表-3 ストレスブロック係数および曲げ破壊モーメントの比較

| 供試体<br>番号 | 提案モデル    |         |      | 土木学会     |         |      | A C I    |         |      | 解析値<br>MuK | 実測値<br>Mu | Mu<br>MuT | Mu<br>MuD | Mu<br>MuA | Mu<br>MuK |
|-----------|----------|---------|------|----------|---------|------|----------|---------|------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|           | $\alpha$ | $\beta$ | MuT  | $\alpha$ | $\beta$ | MuD  | $\alpha$ | $\beta$ | MuA  |            |           |           |           |           |           |
| A-I       |          |         | 1.40 |          |         | 1.40 |          |         | 1.40 | 1.43       | 1.54      | 1.10      | 1.10      | 1.10      | 1.08      |
| A-II      | 0.85     | 0.80    | 2.23 | 0.85     | 0.80    | 2.23 | 0.85     | 0.79    | 2.23 | 2.30       | 2.50      | 1.12      | 1.12      | 1.12      | 1.09      |
| A-III     |          |         | 3.03 |          |         | 3.03 |          |         | 3.02 | 3.14       | 3.39      | 1.12      | 1.12      | 1.12      | 1.08      |
| B-I       |          |         | 1.43 |          |         | 1.43 |          |         | 1.42 | 1.52       | 1.71      | 1.20      | 1.20      | 1.20      | 1.13      |
| B-II      | 0.85     | 0.80    | 2.32 | 0.85     | 0.80    | 2.32 | 0.85     | 0.69    | 2.28 | 2.43       | 2.75      | 1.19      | 1.19      | 1.21      | 1.13      |
| B-III     |          |         | 3.21 |          |         | 3.21 |          |         | 3.13 | 3.29       | 3.40      | 1.06      | 1.06      | 1.09      | 1.03      |
| C-I       |          |         | 1.46 |          |         | 1.46 |          |         | 1.45 | 1.60       | 1.60      | 1.10      | 1.10      | 1.10      | 1.00      |
| C-II      | 0.85     | —       | 2.40 | 0.85     | 0.80    | 2.39 | 0.85     | 0.65    | 2.36 | 2.56       | 2.78      | 1.16      | 1.16      | 1.18      | 1.09      |
| C-III     |          |         | 3.38 |          |         | 3.36 |          |         | 3.29 | 3.42       | 3.64      | 1.08      | 1.08      | 1.11      | 1.06      |

ックを用いたが、Cシリーズでは解析で精度良く評価できた図-8(b)に示す台形モデルを用いて、土木学会モデル、ACIモデルとの比較を行った[5]。表-3に示すように、A、Bシリーズでは土木学会モデルが、Cシリーズでは台形モデルがそれぞれ他の提案モデルよりもやや精度良く評価できたが、特に大きな差は見られなかった。この結果から、コンクリー

トの圧縮強度が $800\text{kgf/cm}^2$ 程度の範囲内であれば、応力-ひずみモデルやストレスブロックが多少異なっても曲げ部材の終局耐力に及ぼす影響はほとんど無く、実用上はどのモデルを用いてもあまり問題にならないことが明らかとなった。しかし、図-1に示すようにコンクリートの圧縮強度が $900\text{kgf/cm}^2$ 以上の応力-ひずみ関係は弾性的特性が顕著に認められ、最大応力時のひずみが $3000\mu$ 程度であることから、応力-ひずみモデルを台形モデルまたは三角形モデルとした方が曲げ破壊モーメントを精度良く評価できると考えられる。



## 5. まとめ

本研究で得られた結果を要約すると、以下ようになる。

- (1) コンクリートの応力-ひずみ関係は、高強度になるにしたがって割線弾性係数が大きくなり、最大応力に達するまで弾性的特性が認められ、逆に塑性的特性を示す領域が狭くなることが確認された。さらに最大応力に達した後、直ちに終局に至る傾向があることが確認された。
- (2) RCはりの曲げ試験結果から、同一鉄筋比の場合、高強度コンクリートと高強度鉄筋の併用が有効であることが明らかとなった。
- (3) 本解析プログラムを用いることによって、RCはり部材の曲げ破壊モーメント、鉄筋ひずみを精度良く評価できることが明らかとなった。
- (4) 今回の実験の範囲では、コンクリートの圧縮強度が $800\text{kgf/cm}^2$ 程度の範囲内であれば、応力-ひずみモデルやストレスブロックが多少異なっても曲げ部材の終局耐力に及ぼす影響はほとんど無く、実用上はどのモデルを用いてもあまり問題にならないことが明らかとなった。

## 【参考文献】

- 1) 鈴木基行・尾坂芳夫：超高強度コンクリートはり部材の曲げ挙動に関する研究，「シリカフェームを用いたコンクリート」に関するシンポジウム講演論文報告集，PP.109-116，1993.11
- 2) 岡本伸・柳下文夫：高強度コンクリートの応力-ひずみ特性，コンクリート工学，Vol.14，No.3，1976.3
- 3) 佐藤正俊・奈良井哲人：RC梁の振動特性を用いた健全性評価に関する研究，名古屋工業大学卒業論文
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書(設計編)，PP.21-22，1991.10
- 5) Breen, J.E., et al.: Building Code Requirements for Reinforced Concrete And Commentary, ACI Committee 318, pp.108-109, Nov. 1989