

## 鉄筋コンクリート柱のせん断耐力と変形

京都大学 六車 熙 嵩永 惠 ○旗迎定夫

## 1. 序

曲げモーメントとせん断力を、同時に受ける鉄筋コンクリート（以下、RCと略記）柱の力学的性質は、コンクリートの破壊条件、主筋および帯筋量、主筋の付着特性、軸圧比、シャスパン比％、載荷および変形条件などの諸要因が、複雑にかみあって決まるものと考えられる。

本研究は、軽量RC柱のせん断実験結果にもとづいて、ある仮定のもとで上述の諸要因を定量的に取り入れたモデルを設定し、曲げモーメントとせん断力とを同時に受けるRC柱の耐力および変形に関する解析的手法を確立することを目的としている。その結果、せん断変形と曲げ変形を分離する力学的変形モデルを設定することが有効であると推測された。また、主筋の付着特性、帯筋のせん断力負担機構などに関しても、いくつかの興味ある実験事実が判明した。

## 2. 實驗供試体

## 2-1. 使用材料

コンクリートは、川砂および人工軽量粗骨材を用いた軽量コンクリートで、その重量配合比は、1:2.1:1.43、水セメント比は5%であった。セメントは、宇部普通ポルトランドセメントで、JIS-R5201 に基づき、7および28日曲げ強度は、それぞれ134、214 および  $412 \text{ kg/cm}^2$  であった。粗骨材は、造粒型人工軽量骨材（スチオライト）で最大粒径 20 mm、粗粒率 6.78、細骨材は野州川砂で、最大粒径 5 mm、粗粒率 2.42 であった。

鋼材は軸筋として、DAICON 40 D10 ( $f_y = 48.5 \text{ kg/cm}^2$ )、  
D13 ( $f_y = 45.9 \text{ kg/cm}^2$ ) と F13 D19 ( $f_y = 46.0, 47.2 \text{ kg/cm}^2$ )  
を用いた。また、帯筋として  $\phi 6$  SR24 (0.2% 永久ひず  
み応力  $f_y = 29.1 \text{ kg/cm}^2$ ) を用いた。

## 2-2. 供試体詳細とその製作

供試体の形状および寸法を図・1 に示す。せん断試験用供試体として、シャスパン比  $a/D = 1.0$  および  $Z0$  の Z 種、曲け試験用供試体 1 種の計 3 種であった。各供試体ともに中央試験部分は  $B \times D = 150^{mm} \times 200^{mm}$  の断面を持っており、試験部分の外での破壊を防ぐために、端部はテーパー部分を介して  $B \times D = 200^{mm} \times 200^{mm}$  と断面を拡大してある。全供試体ともに、引張および圧縮側主筋量は同じとした。

帯筋は、溶接により口型に製作したものを供試体巾面上  
下交互に溶接部に配置し、所定の間隔に $\pm$ ネジ鉄線で主筋  
に繋結し、帯筋表面からのねじり厚さを $10\text{ mm}$ とした。

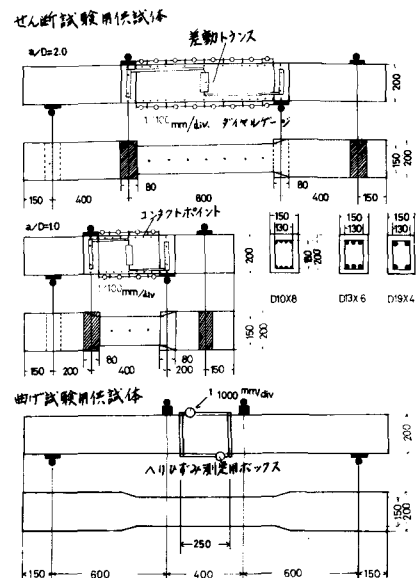


图.1. 実験供試木

一部供試体においては、主筋および帯筋のひずみを測定するために、所定の位置にストレインゲージを貼付し、その上をエポキシ系接着材で固めた。さらに、主筋とコンクリートとの間の緩衝層として、防水をはねてワックスでコーティングした。ゲージは、すべて主筋の側面に貼り、主筋内におけるひずみ勾配の影響を除いた。各供試体ともに、柱軸を水平位置において柱方向と一致するせん断力・載荷方向を鉛直として、コンクリート打設を行ない、それぞれ4週子で湿布養生し、その後実験材料10週子で空気中に放置した。

### 3. 実験計画

表・1. に実験計画の概要を示す。せん断耐力および部材の変形と調べる目的で、シリーズA～シリーズEの計5シリーズを計画した。そのうち、\*印の供試体は主筋の付着特性、帯筋の負担せん断力および変形振巾一定正負くり返し載荷による部材の変形性状を詳細に調べることを目的としており、主筋および帯筋のひずみ測定を行なった。

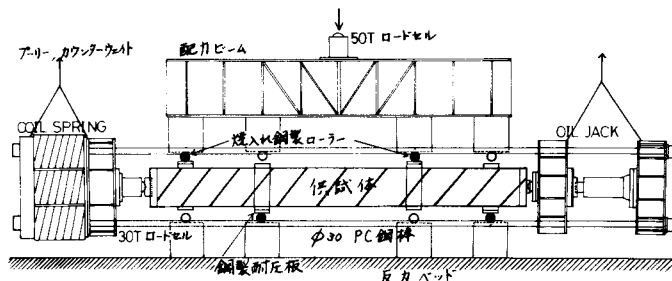
各シリーズともに、主筋とコンクリートとの間の付着特性がRC柱の変形性状に及ぼす影響を考慮して、主筋全周長を一定とした。(片側主筋全周長 $\Sigma\phi = 24\text{cm}$ )

シリーズA、BおよびCは、 $\lambda/D = 1.0$ で、主筋量はおのおの8-D10 (全軸筋比  $P = \frac{\Sigma A_s}{B \times D} = 1.90\%$ )、6-D13 ( $P = 2.54\%$ ) および 4-D19 ( $P = 3.80\%$ ) と変えてある。また、シリーズDおよびEは、 $\lambda/D = 2.0$ で主筋量はおのおの8-D10 ( $P = 1.80\%$ ) および 4-D19 ( $P = 3.80\%$ ) とした。A～Eの各シリーズともに、帯筋面積比  $P_v (= \frac{2A_v}{A_s B})$  が0、0.25% (帯筋間隔  $A_s = 15\text{cm}$ )、0.37% ( $A_s = 10\text{cm}$ )、0.75% ( $A_s = 5\text{cm}$ ) および 1.49% ( $A_s = 2.5\text{cm}$ ) の5種類のせん断実験供試体と  $P_v = 0.37\%$  ( $A_s = 10\text{cm}$ ) の曲げ試験用供試体の計6種類よりなる。

### 4. 載荷および測定方法

図・2. に実験装置の概要を示す。供試体が軸圧力・載荷・フレーム自重のために、非対称荷重を受けたいように、カウンターウェイトによりそのフレーム自重の鉛直方向の平衡を保った。また、供試体軸圧力はコンクリート圧力で $\frac{1}{3}$  (ただし試験時シンタール圧縮強度) とするようになり、実験中一定に維持することを容易にするために6個のコイルスプリング (バネ定数:  $K = 15\text{TON/cm}$ ) を介して、油圧ジャッキにより供試体に加えた。せん断力はアムスラー型300TON長柱試験機にあり、配力ビームおよび焼入鋼製ローラーを通して

図・2. のように加え、中央試験域で逆対称曲げモーメント分布が生じるようにした。載荷荷重階は、曲げ、せん断ひびわれ発生時および最大耐力時付近では細かくとり、各荷重階で送油をほとんど停め変形を測定した後、次の荷重階へ進めた。\*印供試体においては、



図・2. 実験装置概要

表1. 実験計画および結果 (最大モーメント  $M_{SH}$  の列で (—) は純曲げ耐力  $M_{FL}$  を示す)

| シリーズ | 供試体    | 断面<br>スパン | 主筋        | 帯筋比   | 帯筋間<br>隔 | コンクリート強度<br>kg/cm <sup>2</sup> | 主筋降<br>伏力 | 軸力                       | $T_c$ : kg<br>$\lambda$ : cm<br>kg<br>$\mu$ : cm | 最大せん<br>断力計算<br>値                               | 最大モー<br>メント計算<br>値   | 斜めひび<br>われ荷重          | 最大せん<br>断力 | 最大モー<br>メント          | 最大せん<br>断力<br>時相対た<br>り | M <sub>SH</sub> | M <sub>SH</sub> |      |
|------|--------|-----------|-----------|-------|----------|--------------------------------|-----------|--------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------|-----------------------|------------|----------------------|-------------------------|-----------------|-----------------|------|
|      |        | %         |           | $P_v$ | $a_s$ cm | $f'_c$                         | $f_t$     | $f_y$ kg/cm <sup>2</sup> | N ton                                            |                                                 | Q <sub>cal</sub> ton | M <sub>cal</sub> tonm | Q ton      | Q <sub>max</sub> ton | M <sub>SH</sub> tonm    | M <sub>FL</sub> | M <sub>al</sub> |      |
| A    | NO. 1  | 1.0       | 8-D10     | 0     | 15       | 35.4                           | 28.9      | 4250                     | 20.9                                             | $T_c < 3000$<br>$\lambda = 8.44 \times 10^{-3}$ | 11.38                | 1.42                  | 2.23       | 10.07                | 1.61                    | 0.82            | 0.83            |      |
|      | 2      |           | $P=1.9\%$ | 0.25  | 10       |                                |           |                          |                                                  | 12.75                                           | 2.20                 | 2.43                  | 13.33      | 2.13                 | 1.62                    | 0.57            | 0.97            |      |
|      | 3      |           |           | 0.37  | 5        |                                |           |                          |                                                  | 14.88                                           | 2.38                 | 2.63                  | 13.27      | 2.12                 | 2.07                    | 0.57            | 0.89            |      |
|      | 4      |           | $P=2.4\%$ | 0.25  | 5        |                                |           |                          |                                                  | 18.06                                           | 2.89                 | 3.00                  | 16.63      | 2.66                 | 2.26                    | 0.71            | 0.93            |      |
|      | 5      |           | 1.49      | 0.25  | 2.5      |                                |           |                          |                                                  | $\lambda = 1.38 \times 10^{-4}$                 | 22.67                | 3.63                  | 10.10      | 18.27                | 2.92                    | 3.00            | 0.78            | 0.91 |
|      | 6      |           |           | 0.37  | 10       |                                |           |                          |                                                  | $\mu = 2.23 \times 10^{-3}$                     |                      |                       |            |                      | (3.28)                  | 1.00            |                 |      |
| B    | NO. 7  | 1.0       | 6-D10     | 0     | 15       | 30.8                           | 27.1      | 4550                     | 18.6                                             | $T_c < 4000$<br>$\lambda = 9.5 \times 10^{-3}$  | 10.38                | 1.66                  | 2.87       | 10.53                | 1.69                    | 1.65            | 0.89            | 1.01 |
|      | 8      |           | $P=2.3\%$ | 0.25  | 10       |                                |           |                          |                                                  | 12.31                                           | 1.97                 | 2.87                  | 12.00      | 2.02                 | 2.57                    | 0.98            | 1.06            |      |
|      | 9      |           |           | 0.37  | 5        |                                |           |                          |                                                  | 13.13                                           | 2.10                 | 2.17                  | 12.93      | 2.23                 | 2.86                    | 0.51            | 1.06            |      |
|      | 10     |           | $P=2.4\%$ | 0.25  | 5        |                                |           |                          |                                                  | 15.50                                           | 2.48                 | 2.87                  | 16.53      | 2.65                 | 2.92                    | 0.61            | 1.07            |      |
|      | 11     |           | 1.49      | 0.25  | 2.5      |                                |           |                          |                                                  | $\lambda = 1.04 \times 10^{-4}$                 | 21.14                | 3.09                  | 11.30      | 18.33                | 3.09                    | 2.94            | 0.71            | 0.91 |
|      | 12     |           |           | 0.37  | 10       |                                |           |                          |                                                  | $\mu = 2.23 \times 10^{-3}$                     |                      |                       |            |                      | (4.37)                  | 1.00            |                 |      |
| C    | NO. 13 | 1.0       | 4-D10     | 0     | 15       | 38.3                           | 29.7      | 4220                     | 26.1                                             | $T_c < 5000$<br>$\lambda = 2.96 \times 10^{-3}$ | 12.81                | 2.21                  | 10.00      | 14.93                | 2.39                    | 2.62            | 0.40            | 1.08 |
|      | 14     |           | $P=2.8\%$ | 0.25  | 10       |                                |           |                          |                                                  | 15.31                                           | 2.45                 | 2.80                  | 16.47      | 2.64                 | 2.75                    | 0.44            | 1.08            |      |
|      | 15     |           |           | 0.37  | 5        |                                |           |                          |                                                  | 16.06                                           | 2.87                 | 9.93                  | 16.97      | 2.73                 | 2.87                    | 0.45            | 1.06            |      |
|      | 16     |           |           | 0.25  | 5        |                                |           |                          |                                                  | 18.50                                           | 2.96                 | 9.73                  | 18.83      | 2.69                 | 2.66                    | 0.45            | 0.91            |      |
|      | 17     |           | $P=2.4\%$ | 1.49  | 2.5      |                                |           |                          |                                                  | $\lambda = 6.28 \times 10^{-4}$                 | 23.69                | 3.79                  | 10.97      | 21.77                | 3.48                    | 3.20            | 0.58            | 0.92 |
|      | 18     |           |           | 0.37  | 10       |                                |           |                          |                                                  | $\mu = 1.33 \times 10^{-3}$                     |                      |                       |            |                      | (5.00)                  | 1.00            |                 |      |
| D    | NO. 19 | 2.0       | 8-D10     | 0     | 15       | 34                             | 27.4      | 4850                     | 20.1                                             | $T_c < 3000$<br>$\lambda = 8.99 \times 10^{-3}$ | 8.33                 | 3.00                  | 9.47       | 2.69                 | 2.40                    | 0.70            | 0.50            |      |
|      | 20     |           | $P=1.9\%$ | 0.25  | 10       |                                |           |                          |                                                  | 8.61                                            | 3.10                 | 8.63                  | 2.11       | 2.50                 | 0.81                    | 1.00            |                 |      |
|      | 21     |           |           | 0.37  | 5        |                                |           |                          |                                                  | 9.72                                            | 3.14                 | 10.00                 | 2.60       | 2.60                 | 0.93                    | 1.15            |                 |      |
|      | 22     |           | $P=2.4\%$ | 0.25  | 5        |                                |           |                          |                                                  | 9.03                                            | 3.25                 | 10.87                 | 3.91       | 10.05                | 1.02                    | 1.20            |                 |      |
|      | 23     |           | 1.49      | 0.25  | 2.5      |                                |           |                          |                                                  | $\lambda = 3.10 \times 10^{-4}$                 | 9.28                 | 3.34                  | 10.83      | 3.50                 | 11.68                   | 1.01            | 1.17            |      |
|      | 24     |           |           | 0.37  | 10       |                                |           |                          |                                                  | $\mu = 6.34 \times 10^{-3}$                     |                      |                       |            |                      | (3.86)                  | 1.00            |                 |      |
| E    | NO. 25 | 2.0       | 4-D10     | 0     | 15       | 30.5                           | 28.5      | 4220                     | 26.6                                             | $T_c < 5000$<br>$\lambda = 6.28 \times 10^{-4}$ | 12.22                | 2.40                  | 9.40       | 2.97                 | 2.99                    | 0.54            | 0.66            |      |
|      | 26     |           | $P=3.8\%$ | 0.25  | 10       |                                |           |                          |                                                  | 15.69                                           | 2.23                 | 10.17                 | 2.66       | 2.60                 | 0.67                    | 0.74            |                 |      |
|      | 27     |           |           | 0.37  | 5        |                                |           |                          |                                                  | 18.28                                           | 2.32                 | 10.72                 | 2.80       | 2.73                 | 0.72                    | 0.72            |                 |      |
|      | 28     |           |           | 0.25  | 5        |                                |           |                          |                                                  | 15.69                                           | 2.45                 | 10.70                 | 2.85       | 2.85                 | 0.77                    | 0.79            |                 |      |
|      | 29     |           | $P=2.4\%$ | 1.49  | 2.5      |                                |           |                          |                                                  | $\lambda = 1.54 \times 10^{-4}$                 | 16.39                | 2.50                  | 15.50      | 3.58                 | 3.50                    | 1.06            | 0.85            |      |
|      | 30     |           |           | 0.37  | 10       |                                |           |                          |                                                  | $\mu = 4.44 \times 10^{-3}$                     |                      |                       |            |                      | (5.34)                  | 1.00            |                 |      |
|      | NO. 29 |           |           | 0.37  | 10       | 22.9                           | 26.3      | 4600                     | 22.1                                             |                                                 |                      |                       | 10.97      | 2.85                 | 0.74                    | 0.74            |                 |      |
|      | 30     |           |           | 0.37  | 10       |                                |           |                          |                                                  |                                                 |                      |                       |            | (5.34)               | 1.00                    |                 |                 |      |

図2. に示すように載荷鋼板の着脱により、正負くり返しせん断力を加えた。

たわみおよびひずみの測定方法を図1. に示す。すなわち、あらわの供試体中央で載荷鋼板側面柱中方向にそれぞれ  $\phi 6$  mm ボルトを埋込み、その両側に計4個のL型グリッスを固定した。供試体片側各一対のグリッス間変位を差動トランスで測定し、供試体両側面の平均値をもって、たわみとした。上へり、およびFへりエングリートひずみは、検長100 mm および40 mm の手持式コンタクトひずみ計により測定した。また、部材軸方向曲率分布を測定するために、供試体上下面柱方向に  $\phi 6$  mm ボルトを上下面を貫通させてあらわの埋込み、これに0.01 mm/div. のダイヤルゲージを取り付けた。これは、曲率分布の部材軸方向積分値としての曲げたわみと、全たわみとの差がせん断たわみとして見出し得ると考えたためである。なお、軸圧力  $N$ 、せん断方向試験機荷重  $P$  の測定は図2. に示すように、2個のロードセルにより行い、試験機のせん断力  $Q = \frac{P}{3}$  は全たわみ  $\Delta$  とともにX-Yレコーダーにより自動記録した。また、米印供試体では同時に静ひずみ計により、主筋および帯筋のひずみを測定した。

## 5. 実験結果

載荷時使用材料の力学的性質および実験結果を表1. に示す。図3. にシリーズA～Eの各せん断供試体ひびわれ図を示す。また、図4～図8にシリーズA～Eの試験機荷重  $P$ —相対たわみ  $\Delta$  曲線と根線を示す。

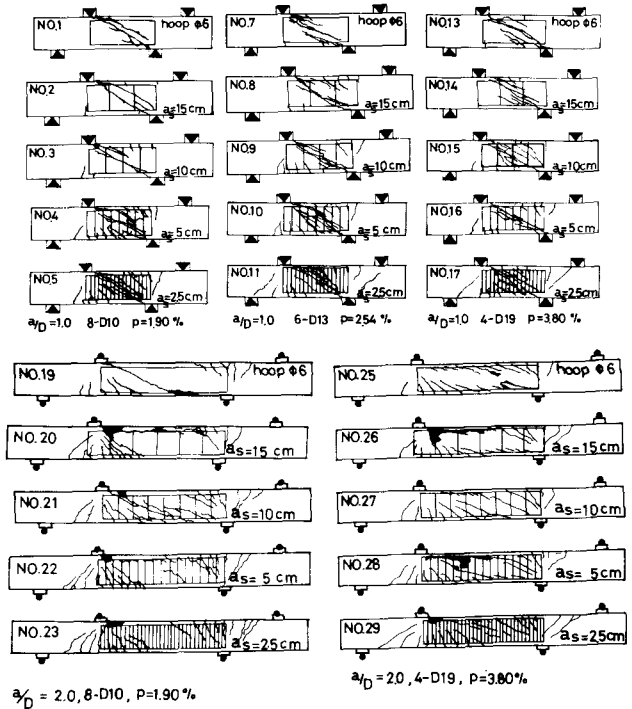
$\rho = 1.0$  の場合は、斜めひびわれの発生を契機として試験機荷重—相対たわみ曲線の勾配が変り、その場合、帯筋量の少ない供試体では瞬間的増加的たわみを生じる。図3に示すように、斜めひび

われは帯筋量の多い程分散して数多く生じる傾向を示した。引張側へりに垂直な曲げひびわれがへりから発達したが、軸筋量による変化は見られたい。最大耐力を過ぎて後は、帯筋量の少ない供試体ほど急激な耐力低下を示したが、多量の帯筋を有するものは、かたなりなじん性を示した。

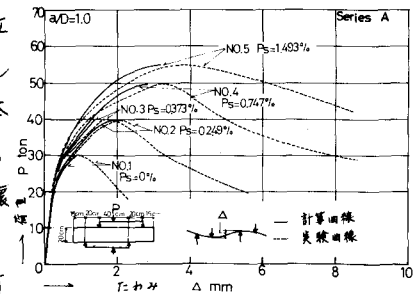
$a/d = 2.0$  の場合、せん断破壊も起こす供試体では、次のような経過をたどって破壊した。まず、引張側コンクリートへりに曲げひびわれが生じ、荷重の増加とともにひびわれが伸び、かつその方向が載荷的圧縮側へ傾斜した。さらに荷重を増すと、曲げひびわれ発生域より内側の供試体中央寄り部分に斜めひびわれが独立して発生した。(図・9参照) 次に、さらに内側の供

試体中央部軸筋位置に相互に独立の微小な斜めひびわれが、次々に生じ、その傾きが水平に近々さつその数が、対称位置載荷角のコンクリート圧縮域にまで広がって行く。そうして最後には、それらのひびわれがすべて相互に連続して一本の Bond shear crack になる。最大耐力に達した後、帯筋のない供試体は、主として斜めひびわれ線に沿う急激なせん断破壊を示すが、その他のものは、かたなりなじん性を示す。

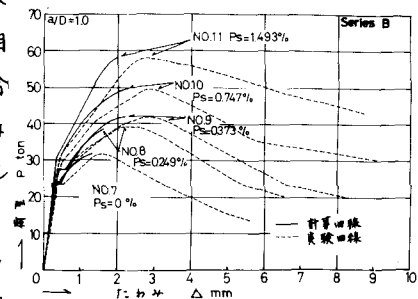
次に、相対たわみにおける曲げ変形とせん断変形を分離するために、供試体上下面埋込みボルトに取り付けたダイヤルゲージによる測定曲率より曲げ変形相当相対たわみ  $\delta_{fl}$  を求め、これを全相対たわみ  $\Delta$  から差し引いてせん断変形相当相対たわみ  $\delta_{sd}$  を求めた。これを  $a/d = 1.0$  および  $2.0$  の場合について図・10、図・11に示す。同図より  $a/d = 1.0$  の場合にはせん断変形が、また  $a/d = 2.0$  の場合には曲げ変形が卓越していることがわかる。図・12、図・13は、\*印供試体 NO.15\*, NO.27\* の試験機荷重—相対たわみ曲線を示す。両供試体ともに最大耐力を過ぎて後、部材角 ( $R = \frac{\Delta}{2\alpha}$ ) 約  $\frac{1}{100}$  にて除荷を行ない、その後正負一定部材角  $\frac{1}{100}$  を振振として、くり返し



図・3. 供試体ひびわれ図



図・4. 試験機荷重—相対たわみ曲線 (シリーズA)



図・5. 試験機荷重—相対たわみ曲線 (シリーズB)

載荷したものである。因中、破線で示すのは、同一の仕様で製作した供試体 NO.15 (シリーズC) および NO.27 (シリーズE) の一方向載荷試験による、試験機荷重 相対たわみ曲線である。 $a/d = 1.0$  の NO.15\* 供試体は、最大荷重を過ぎた後の急速な耐力低下のために部材角  $1/100$  にて除荷ができなかった。オス目以後のくり返し載荷によるループ曲線は、逆S字型となりオス一回載荷時に比べ剛性の低下が著しい。 $a/d = 2.0$  の NO.27\* 供試体は、やはりオス回目以後ループ曲線は逆S字型を示すが、剛性の低下は  $a/d = 1.0$  の場合ほど大きくない。図14、図15にオス一回載荷時における NO.15\*, NO.27\* 供試体の主筋ひずみの変化を示す(軸力のみ加えた状態を0とする)。低荷重時に於いては、部材中央部に主筋応力が引張から圧縮に移りかわるが、荷重の増加とともに引張領域が圧縮領域へと広がって行く。この傾向は  $a/d = 1.0$  の場合のように、定着長が小さい場合について特に著しく、主筋とコンクリートの間の付着の劣化現象を示していると考えられる。図16、図17にオス一回載荷時における NO.15\*, NO.27\* 供試体の帯筋ひずみ分布を示す。 $a/d = 1.0$  の場合は、供試体中央部で最大となる三角形分布を示し、 $a/d = 2.0$  の場合は頂点を2つ持つ三角形分布を示しており、図3に示すひびわれ状態に適合している。

次に、純曲げ耐力とせん断耐力の比較を行うために、最大せん断モーメント  $M_{SH}$  と純曲げ耐力  $M_{FL}$  の比  $M_{SH}/M_{FL}$  を表1および図18に示す。 $a/d = 1.0$  の場合は、かなり多量の帯筋によるせん断補強 ( $a_s = 2.5\text{cm}$   $P_v = 1.5\%$ ) を行っても、純曲げ耐力には到達しない。また、 $a/d = 2.0$  の場合、シリーズD (8-D19,  $P_v = 1.9\%$ ) では

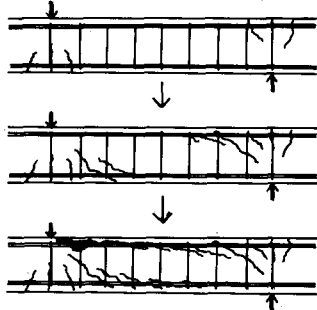


図9. ひびわれ発生過程

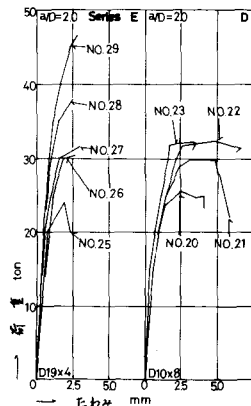


図11. 試験機荷重—せん断変形相当相対たわみ曲線 ( $a/d=2.0$ )

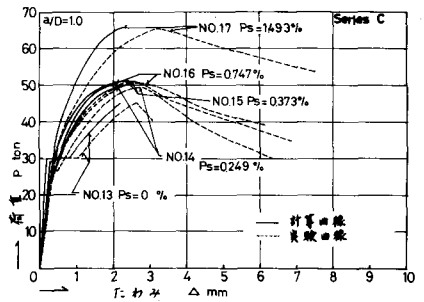


図6. 試験機荷重—相対たわみ曲線(シリーズC)

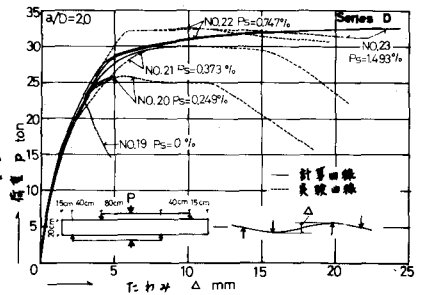


図7. 試験機荷重—相対たわみ曲線(シリーズD)

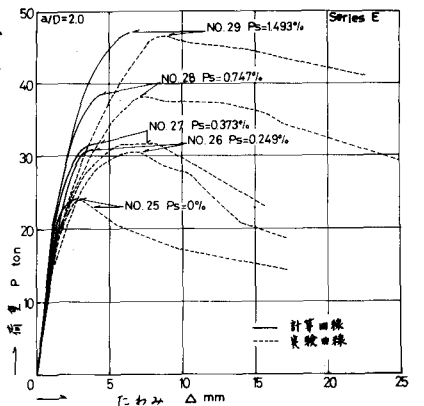


図8. 試験機荷重—相対たわみ曲線(シリーズE)

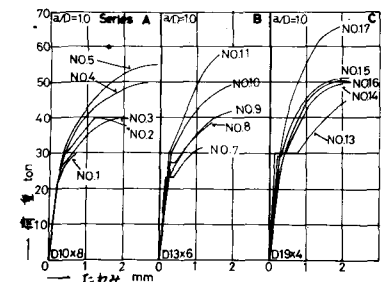


図10. 試験機荷重—せん断変形相当相対たわみ曲線 ( $a/d=1.0$ )

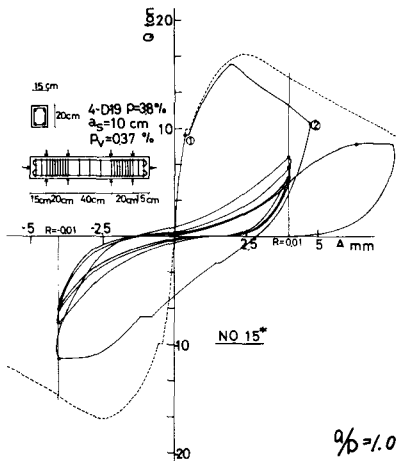


図12. NO.15\*供試体せん断力-相対ひずみ曲線

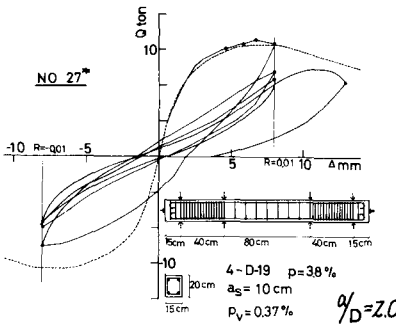


図13. NO.27\*供試体せん断力-相対ひずみ曲線

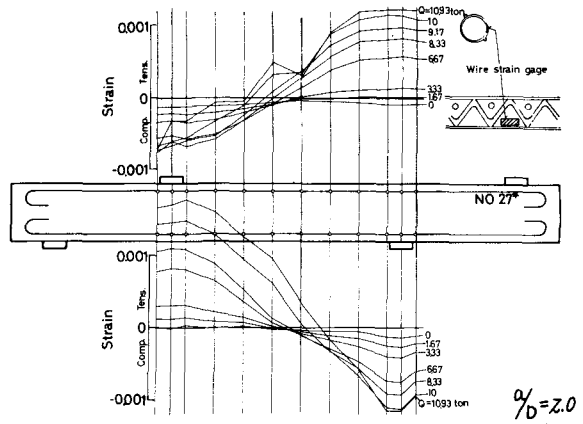


図15. NO.27\*供試体主筋ひずみ分布の推移

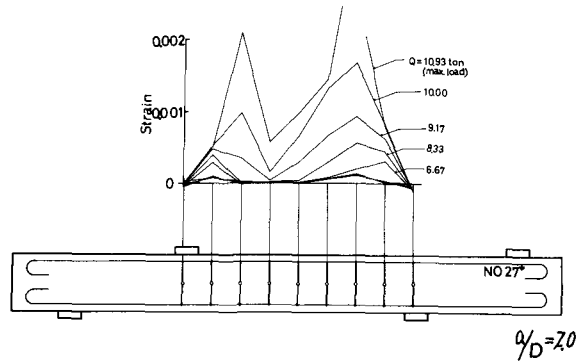


図17. NO.27\*供試体帯筋ひずみ分布の推移

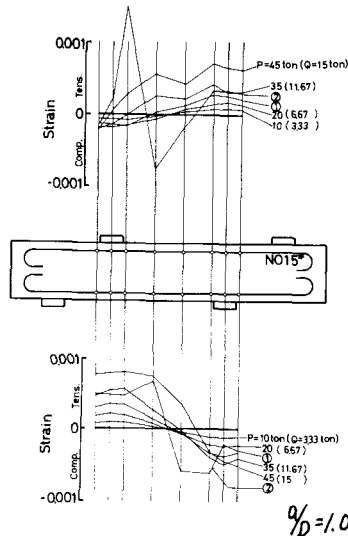


図14. NO.15\*供試体主筋ひずみ分布の推移

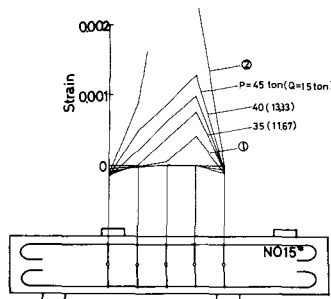


図16. NO.15\*供試体帯筋ひずみ分布の推移

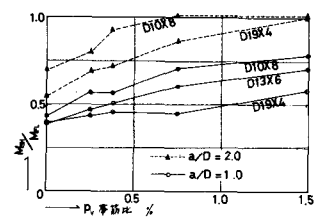


図18. 最大せん断モーメントMshと純曲げ耐力MFLの比較

|                          |                           |
|--------------------------|---------------------------|
| Δ 全相対ひずみ                 | P 試験機荷重                   |
| δ <sub>tl</sub> 曲げ相対ひずみ  | Q せん断力                    |
| δ <sub>sh</sub> せん断相対ひずみ | M <sub>sh</sub> 最大モーメント   |
| N 軸力                     | M <sub>FL</sub> 純曲げ耐力     |
| λ, T 変数                  | E <sub>s</sub> 鋼材の弾性係数    |
| E <sub>max</sub> 純曲げ耐力   | d <sub>c</sub> 主筋の中心からの距離 |

|                            |                               |
|----------------------------|-------------------------------|
| B 柱中                       | A <sub>st</sub> 引張筋断面積        |
| D 柱径                       | P 全筋断面積                       |
| a せん断スパン                   | a <sub>s</sub> 帯筋間隔           |
| A <sub>sc</sub> 圧縮筋断面積     | A <sub>v</sub> 帯筋断面積          |
| f <sub>cc</sub> コンクリート強度   | P <sub>v</sub> 帯筋比            |
| f <sub>yk</sub> 鋼材引張強度     | E コンクリートの弾性係数                 |
| f <sub>ck</sub> 鋼材圧縮強度     | M 中立軸位置                       |
| T <sub>c</sub> 圧縮筋力        | B <sub>c</sub> 破壊時のコンクリート圧縮強度 |
| A <sub>top</sub> 圧縮側集束筋    | G <sub>sv</sub> 帯筋力           |
| Δ <sub>bottom</sub> 引張側集束筋 |                               |

$P_v = 0.7\%$ 、シリーズF (4-D19,  $P = 3.8\%$ ) では  $P_v = 1.5\%$  の帯筋に  
よるせん断補強に依り、純曲げ耐力に到達した。また  $g_b = 1.0$  および  $g_c = 2.0$  の両方の場合ともに、主筋量の増加によつて  $M_{sh}/M_{FL}$  の値は小さくなり、主筋量の増加による曲げ耐力の上昇に比べて、せん断力の上昇の小さいことがわかる。

## 6. 解析手法および結果

せん断力を受けるRC柱の力学的性質を表現するために図19に示すように、曲げ変形を局所的に集中変位を生じる剛体回転で表わし、その等価曲げ変形状態を仮定してせん断変形を生じるとして解析モデルを設定した。圧縮側集中変位  $\Delta_{top}$  および引張側のそれ  $\Delta_{bottom}$  は、圧縮側コンクリートおよび引張鉄筋のひずみと材軸方向に積分することによつて得られる。圧縮側コンクリートのひずみ分布は、実験結果を基にして、供試体中央部で零となる直線分布と仮定した。また、引張鉄筋の引張力  $T_t$  と  $\Delta_{bottom}$  の関係は、図20に示すようにコンクリートに鉄筋を埋設した複合引張部材の軸引張試験より得た  $T_t$  と材長にわたる平均ひずみの関係を単純化し、これを積分したものも等価に  $T_t$ -linear 特性に置換した。この場合、積分範囲は米印供試体より得られたひずみ分布を参考として、その最も基礎的な場合を考へるものとして、0から  $Q$  までとした。

$$\Delta_{top} = \int_0^a \epsilon_c(x) dx \quad \text{--- ①} \quad \Delta_{bottom} = \lambda T_t + \mu \quad \text{--- ②}$$

ここで集中変位を生じている断面でのコンクリート圧縮応力  $\sigma_c$ 、せん断力  $\tau_c$  は一様分布とする。破壊時のコンクリートへりひずみ  $\epsilon_c$  と圧縮応力  $\sigma_c$  の関係を次式のごとく仮定した。<sup>1)</sup> ( $\epsilon_{max} = 0.003$  と仮定)

$$\epsilon_c = \epsilon_{max} \cdot \left( \frac{\sigma_c}{f'_c} \right)^2 \quad \text{--- ③}$$

変形の適合条件より、

$$\frac{\Delta_{top}}{\Delta_{bottom}} = \frac{\int_0^a \epsilon_c(x) dx}{\lambda T_t + \mu} = \frac{n}{D - n - d_c} \quad \text{--- ④} \quad T_t = \frac{n - d_c}{n} \epsilon_c E_s A_{sc} \quad \text{--- ⑤}$$

軸方向力、モーメントおよびせん断力の釣合より、

$$T_t + G_c n B - T_t = N \quad \text{--- ⑥} \quad T_t \left( \frac{D}{2} - d_c \right) + n B G_c \left( \frac{D}{2} - \frac{n}{2} \right) + T_t \left( \frac{D}{2} - d_c \right) = Q \cdot a \quad \text{--- ⑦}$$

$$Q = T_t B \cdot n + \sum \sigma_{sv} \cdot Z A_v \quad \text{--- ⑧}$$

曲げ変形によるたわみ  $\delta_{fl}$  とせん断変形によるたわみ  $\delta_{sh}$  の和として全たわみ  $\Delta$  を表わす。

$$\Delta = \delta_{fl} + \delta_{sh} = \frac{\Delta_{top}}{n} \cdot Z a + \gamma(Q) \cdot Z a \quad \text{--- ⑨}$$

コンクリートのせん断一直線応力座標上で、一軸引張強度  $\sigma_{t0}$  とその頂点とし、一軸圧縮破壊応力  $\sigma_{c0}$  に

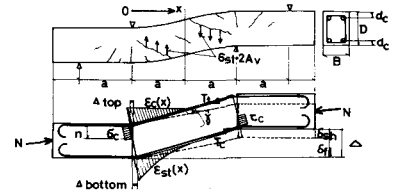


図19. 力学的変形モデル

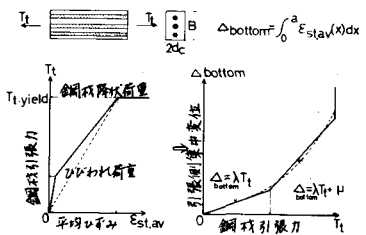


図20.  $\Delta_{bottom} - T_t$  関係の仮定

接する放物線を表わした破壊条件は次式で示される。<sup>2)</sup>

$$\begin{aligned} \sigma_3 \leq \sigma_R \quad \frac{T_c}{f_c} &= \sqrt{1 + \frac{\sigma_c}{f_c} \cdot \frac{1}{k} \cdot R} \quad \text{--- ⑩} \quad \sigma_3 > \sigma_R \quad \frac{T_c}{f_c} = \frac{1}{2} \sqrt{-\left(\frac{\sigma_c}{f_c}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_c}{f_c} \cdot \frac{a}{f_c}\right) + \left(\frac{b}{f_c}\right)^2} \quad \text{--- ⑪} \\ R &= \frac{f_c}{f_c}, \frac{\sigma_c}{f_c} = \left(\frac{a}{k} + 1 - 2\sqrt{\frac{a}{k} + 1}\right) R \quad \frac{a}{k} = 2\left(\frac{1}{k} + 2 - 2\sqrt{\frac{a}{k} + 1}\right) R \quad \left(\frac{b}{f_c}\right)^2 = \left\{4\sqrt{\frac{a}{k} + 1} - \left(\frac{a}{k} + 4\right)\right\} R. \end{aligned}$$

③～⑧式およびコンクリートの破壊条件式⑩、⑪式を用いて、RC柱のせん断耐力を計算できる。計算時において載荷英中立軸位置 $\eta$ より、斜め引張主応力の角度 $(31^\circ 29')$ に従って仮定した斜めひびわれを横切る帯筋の本数と、帯筋がすべて降伏していると仮定することにより帯筋の負担せん断力を決定した。\*印供試体の帯筋の実測ひびきみ分布からこの仮定は *over estimate* と考えられるが、主筋のジベル作用、斜めひびわれ面の機械的摩擦<sup>1)</sup>などを考慮してこのように仮定したものである。計算値と実験値の比較を表1に示す。次に、③～⑦式により曲げ変形相当たわみ $\delta_{fl}$ を求めこれに図10、11に示すせん断変形相当たわみ $\delta_R$ を加えて全たわみ $\Delta$ を計算した。この計算結果を図4～8に実験で示すべ、実験曲線と計算曲線はある程度の一致を示す。しかし、曲げ変形相当たわみの測定法にも問題があり、図10、11に示すせん断変形相当たわみの物理的意味づけ、すなわち帯筋、載荷英近傍の主筋ジベル作用、斜めひびわれ面における機械的摩擦<sup>1)</sup>によるせん断力負担機構の解明および $\Delta_{bottom}$ — $T_c$ 関係の実測データによる評価<sup>1)</sup>など、今後さらに研究を進めて行く必要がある。

## 7. 結論

本研究の実験、解析および考察により次の結論が得られた。

1. 帯筋によるせん断補強は、 $\alpha_D = 1.0$  および  $2.0$  の両方の場合ともに、RC柱のせん断耐力、およびじん性の増大に有効である。
2.  $\alpha_D = 1.0$  の場合、かなり多量の帯筋によるせん断補強を行っても、曲げ耐力を発揮しないが、 $\alpha_D = 2.0$  の場合には、軸筋比  $P = 1.90\%$  ( $8-D10$ ) に対して  $P_v = 0.7\%$ 、軸筋比  $P = 3.80\%$  ( $4-D19$ ) に対しては  $P_v = 1.5\%$  の帯筋使用で曲げ耐力に達する。また、主筋量の増加によるせん断力の増加は、それによる曲げ耐力の増加に比べて、かなり小さいと考えられる。
3. せん断圧縮理論と変形条件を考慮した本解析法によりRC柱のせん断耐力と推定できる。
4. 曲げ変形とせん断変形を分離することにより、せん断力を受けるRC柱の変形特性を求める解析的手法が得られ、複雑な支配要因の相互関係を明らかにする一手法<sup>3)</sup>を見出し得たと確信する。

本研究は、実験事実にもとづいて、RC柱の変形モデルを剛体変形とせん断変形からなるものと仮定したのであるが、各種定数の決定、せん断変形 $\gamma(Q)$ の決定<sup>1)</sup>など今後の課題である。特に、\*印供試体による実験結果において明らかにしたように、主筋の付着特性が、せん断力を受けるRC柱の力学的性質に大きな影響を及ぼすと考えられ、帯筋によるせん断力負担機構と共に、今後、実験的に明らかにして行く必要があると考える。

1) R. Walter "Über die Berechnung der Schubtragfähigkeit von Stahlspannbetonbalken-Schubbruchtheorie" *Beton und Stahlbetonbau* 11/1962

2) H. Weigler und G. Becker "Zur Frage der Schubdruckfestigkeit von Beton" *Beton und Stahlbetonbau* 5/1964

3) 六連、高木、渡辺、軽量RC柱のせん断破壊実験と2,3の考察、セメント技術年報 1971