# 論文 せん断力を受けるコンファインドコンクリートの抵抗機構

板倉 三奈子\*4・荒木 秀夫\*1・中塚 信\*2・椛山 健二\*3

要旨: せん断力を受けるコンファインドコンクリートの抵抗機構について解明するために, 鉄筋コンクリート小型試験体を用いた静的載荷実験を行った。その結果, せん断力により, コンファインドコンクリートの最大鉛直応力, 最大鉛直応力時の鉛直ひずみは低下するこ とを明らかにし, この低下率を最大鉛直応力時のコンファインドコンクリートに作用する せん断応力, プレーンコンクリートの破壊限界線の最大せん断応力で表す式を提案した。 キーワード: コンファインドコンクリート, せん断力, 横補強筋, 抵抗機構, 静的載荷実験

1. はじめに

鉄筋コンクリート部材において引張鉄筋が降 伏すると、その部材に入力されるせん断力はほ ぼ一定となる。その後も変形を増大させると、 コンクリートの圧縮部分が、圧縮破壊または圧 縮せん断破壊して急激に耐力低下する場合があ る。この圧縮部コンクリートの破壊には、部材 断面の中立軸深さの減少やせん断力が影響する と推測される。図-1にその概念図を示す。

一方、コンクリートは本来、脆性的な材料で あるので、せん断補強筋として横補強筋が用い られるが、横補強筋によって拘束された(コン ファインド)コンクリートは、圧縮強度が増大 するとともに、高い靱性を呈し、圧縮変形性能 が著しく改善されることが明らかになっている。 このため、コンファインドコンクリートに関す る研究が数多く報告されており、その破壊条件 式、構成則および強度推定式が提案されている <sup>1)~4)</sup>。しかしながら、圧縮力と同時にせん断力 を受けるコンファインドコンクリートの抵抗機 構についてはこれまであまり明らかにされてい ない。そこで、本研究は、鉄筋コンクリート小 型試験体を用いた圧縮せん断実験を行い、せん 断応力が部材の一部としてのコンファインドコ



ンクリートの抵抗機構ならびに鉛直応カーひず み関係に及ぼす影響を定性的,定量的に解明し, 鉄筋コンクリート曲げ部材降伏後のせん断破壊 時の変形能力を推定するための基礎データ得る ことを目的とする。

#### 2. 実験概要

#### 2.1 載荷経路

**図**-2に採用した載荷経路A(一軸圧縮試験), B, C および D (圧縮せん断試験)を示す。な お,同図中破壊限界線は、コンクリートの破壊 条件を Mohr の条件として,式(1)で得られる 楕円である<sup>5),6</sup>。

$$(1+\alpha)^2 y^2 + \alpha \left(x - \frac{\alpha - 1}{2\alpha}\right)^2 = 1 + \frac{(\alpha - 1)^2}{4\alpha} \quad (1)$$

\*1 広島大学大学院助教授 工学研究科 工博 (正会員)
\*2 大阪大学大学院助教授 工学研究科 工博 (正会員)
\*3 広島大学大学院助手 工学研究科 博士(工学) (正会員)
\*4 広島大学大学院 工学研究科 社会環境システム専攻 (正会員)

 $\alpha = \sigma_{B} / \sigma_{t}, \quad y = \tau_{xy} / \sigma_{B}, \quad x = \sigma_{t} / \sigma_{B}$ 

 $\sigma_B$ ,  $\sigma_t$ ,  $\tau_{xy}$ : 圧縮, 引張, せん断強度 圧縮せん断試験においては, 引張側となる試 験体側面に曲げひび割れを入れない ( $\tau < \sigma/6$ ) ように, 鉛直応力比 $\sigma/\sigma_B$ とせん断応力比 $\tau/\sigma_B$ が比例関係を保って増加させる。一定せん 断応力領域に達すると鉛直応力比 $\sigma/\sigma_B$ のみ 上昇する載荷経路とした。これは, RC 部材で の降伏後の圧縮部コンクリートを模擬するため である。載荷方法は図-3 に示す逆対称加力装 置を用いる一方向加力とした。

#### 2.2 試験体

表-1に試験体一覧,図-4に試験体形状と配 筋を示す。試験体は、プレーンコンクリート試 験体2体(同表中PL)およびコンファインドコ ンクリート試験体8体(同表中D6〇50,各2 体)とし、一定せん断応力比を実験変数とした。 試験体形状は200mm×200mm×400mm、コンク リートの設計基準強度は27N/mm<sup>2</sup>で、全試験体 とも共通である。コンファインドコンクリート において、縦筋は組立用のごく軽微なものとし 構造的には考慮せず、横補強筋は体積比を 1.24%とした。かぶりは無しとしているため、 全断面積がコア断面積となっている。表-2、表 -3に使用材料の力学的特性を示す。

試験体名	圧縮強度 σ <sub>B</sub> (N/mm²)	引張強度 σ <sub>t</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 E <sub>c</sub> (×10 <sup>4</sup> N/mm <sup>2</sup> )	
PL-A	25.7	2.03	1.94	
PL-C	25.9	2.41	1.80	
D6A50-1	26.9	2.31	1.93	
D6A50-2	25.7	2.03	1.94	
D6B50-1	26.5	2.56	2.38	
D6B50-2	25.0	2.40	1.86	
D6C50-1	25.8	3.05	2.38	
D6C50-2	26.3	2.53	1.87	
D6D50-1	25.6	3.13	2.46	
D6D50-2	25.3	2.45	1.82	

表-2	コンクリー	トの力学的特性
-----	-------	---------

鉄筋	降伏強度 σ <sub>sy</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 σ <sub>su</sub> (N/mm²)	ヤング係数 E <sub>s</sub> (×10 <sup>5</sup> N/mm <sup>2</sup> )
D6-1	337	565	1.75
D6-2	305	450	1.69



図-2 載荷経路



表-1 試験体一覧

試験体名	横補強筋体積比 pb (%)	載荷 経路	一定 せん断応力比 て/のB
PL-A	0	А	0.000
PL-C	0	С	0.100
D6A50	1.24	А	0.000
D6B50		В	0.052
D6C50		С	0.100
D6D50		D	0.130



#### 実験結果および考察

### 3.1 ひび割れ性状

最大鉛直応力時までの各荷重段階では顕著な ひび割れは見られないが,同応力時近傍で図-5 に例示するようなひび割れが急激に生じ,荷重 を保持できず終局状態となった。一軸圧縮の PL-A と D6A50-2 では縦ひび割れが,また,せ ん断力を載荷した試験体では,対角部分のコン クリートが圧壊し,対角方向の斜めひび割れが 観察された。

## 3.2 応力-ひずみ関係

図-6, 図-7にそれぞれプレーンコンクリートの鉛直応力比( $\sigma/\sigma'$ ) 一鉛直ひずみ比( $\epsilon/\epsilon_B$ )関係, コンファインドコンクリートの鉛直応力比( $\sigma/\sigma'$ ) 一鉛直ひずみ比( $\epsilon/\epsilon_B$ ) 一横補強筋分担力(Qr)関係を示す。鉛直応力は, 部材に作用する曲げモーメントの影響により断面内で一様ではないが, 平均値として, 鉛直力をコア断面積で除した値を採用する。横補強筋分担力は, 各横補強筋のひずみから算定した軸力の総和として求めた。ここで鉛直応力の基準化に用いた補正圧縮強度 $\sigma$ , は, (2) 式で表す



ものである。

 $\sigma' = 0.812 \cdot \sigma_{\rm B} \tag{2}$ 

ー般に、コンクリートの圧縮強度は、構成材 料が同じであっても試験体の形状や寸法によっ て相違する<sup>7)</sup>。本論文ではこれらの影響を表す ために補正係数 0.812 を用いた。この補正係数 は円柱テストピース( $\phi$ 100mm×h200mm)の 圧縮強度  $\sigma_{\rm B}$ に対する無筋試験体 PL-A(200mm ×200mm×400mm)の最大鉛直応力の比で、実 験的に求めた値である。また、鉛直ひずみの基





準化に用いた  $\varepsilon_B$  は、テストピースの圧縮強度 時鉛直ひずみである。

図-7 をみると、コンファインドコンクリー トは、図-6 のプレーンコンクリートと比較す ると最大鉛直応力時の鉛直ひずみ比が約2倍に 増加しており、既往の研究<sup>8)</sup>と比べて、妥当な 値が得られた。プレーンコンクリート、コンフ ァインドコンクリートとも、せん断応力比が大 きくなるほど最大鉛直応力時の鉛直ひずみ比が 小さくなり、また、コンファインドコンクリー トの横補強筋分担力も小さくなることが分かる。

### 3.3 最大鉛直応力

図-8 に各試験体が最大鉛直応力に達したと きの応力状態および破壊限界線を示す。縦軸, 横軸は,それぞれ鉛直応力σ,せん断応力τを 補正圧縮強度σ'で基準化した。せん断力がな いと鉛直応力は 1.2 程度になるが,せん断応力 比が大きくなるほど鉛直応力比が小さくなる。

## 3.4 横補強筋の曲げモーメントー軸力関係

コンクリートは圧縮力を受けると、横方向に 膨張するため,角形横補強筋には鉄筋軸方向と 直交する力によって両端固定梁のような端部と 中央部とで方向が逆になる曲げモーメントと鉄 筋軸と平行方向の力によって中央部が端部より 大きくなる引張軸力が生じる <sup>9), 10)</sup>。そこで,横 補強筋の内側と外側にゲージを貼付し各荷重段 階での横補強筋の曲げモーメントー軸力関係を 線を示す。縦軸,横軸はそれぞれ軸力N,曲げ モーメント M を横補強筋径 b の乗数 b<sup>2</sup>, b<sup>3</sup> で除 した値である。横補強筋の応力ーひずみ関係を 完全弾塑性体と仮定し、曲げによる応力と軸力 求めた。図-9 に横補強筋に発生する曲げモー メントと軸力の関係および鉄筋の降伏, 塑性曲 による応力の和が降伏強度に達する時を降伏曲 線、全断面が降伏するときを塑性曲線とした。 D6A50 では、端部の横補強筋が降伏曲線に達し、 その後,曲げモーメントが減少,軸力が増大し, 塑性曲線に達して終局破壊に至る。また、端部 と中央部で曲げモーメントの向きが逆になるこ とを実験的に確認した。D6B50-2は一軸圧縮に



近いので、横補強筋がせん断抵抗よりも試験体 断面の横方向に膨張して拘束筋の役割を果たし つつ降伏する (ゲージ 1~6)。D6C50-2 は, 試 験体中央部ではせん断力と平行な方向のずれ変 形で伸びることによりせん断抵抗する(ゲージ 1) が, 端部に近くなると拘束筋の役割を発揮す るようになる (ゲージ 5, 6)。D6D50-2 の中央 部ではせん断力と平行な横補強筋の軸力のみが 増加している。それ以外の鉄筋は応力をあまり 負担していない。また,他3体が圧縮部コンク リートの破壊であるのに対し、本試験体は圧縮 部破壊以前の斜張力破壊であることが推測され る。高さ方向の横補強筋位置により比較すると, D6A50-2 では、ほぼ同一の性状を示しているが、 試験体中央部の軸力が若干大きくなる。 D6B50-2 では、スタブに近い横補強筋は、スタ ブの拘束を受けていることが推測される。すな わち, せん断ひび割れが貫通するゲージ 1,4 は降伏曲線に達しているが、せん断ひび割れが 貫通しないゲージ7は、降伏曲線に達していな い。D6C50-2の柱中央部 (ゲージ2,3)では, 降伏に至っていないが,応力の大きい柱端部(ゲ ージ5, 6) では, 降伏している。D6D50-2 にお いて柱中央部以外の横補強筋が応力を殆ど負担 しないのは、ひび割れが貫通せず、かつ鉛直圧 縮応力レベルが低いためと考えられる。



## 4. 最大鉛直応力, ひずみの低下率の提案

図-10, 図-11 にせん断力と最大鉛直応力, 最大鉛直応力時の鉛直ひずみの関係を基準化し て表す。縦軸は各試験体の最大鉛直応力比 $\sigma_0/\sigma'$  $\sigma' を D6A50 の最大鉛直応力比<math>\sigma_0/\sigma'$  で除し た値,各試験体の最大鉛直応力時の鉛直ひずみ 比 $\epsilon_0/\epsilon_B を D6A50$ の最大鉛直応力時の鉛直ひ ずみ比 $\epsilon_0/\epsilon_B$ で除した値であり,横軸は各試験 体の最大鉛直応力時のせん断応力比 $\tau_0/\sigma'$  を プレーンコンクリートの破壊限界線の最大せん 断応力比(τ/σ<sub>B</sub>)max=0.158 で除した値である。 せん断力が増加するとコンファインドコンクリ ートの最大鉛直応力,最大鉛直応力時の鉛直ひ ずみが低下する。最大鉛直応力比は曲線を描き, 最大鉛直応力時の鉛直ひずみ比は直線的に低下 する傾向にあり,最小自乗法により回帰曲線お よび回帰直線を求めた。本研究ではこの曲線お よび直線式をせん断力による最大鉛直応力比, 最大鉛直応力時の鉛直ひずみ比の低下率とし, 式(3),式(4)をそれぞれ提案する。

$$k_{1} = \sqrt{1 - \left(\frac{\tau_{0} / \sigma'}{(\tau / \sigma_{B})_{max}}{1.305}\right)^{2}}$$
(3)

$$k_{2} = 1 - 0.465 \frac{\tau_{0} / \sigma'}{(\tau / \sigma_{B})_{max}}$$
(4)

- k1:最大鉛直応力比の低下率
- k<sub>2</sub>:最大鉛直応力時の鉛直ひずみ比の低 下率
- τ<sub>0</sub>/σ':最大鉛直応力時のせん断応力比
   (τ/σ<sub>B</sub>)<sub>max</sub>: プレーンコンクリートの破 壊限界線の最大せん断応力比

## 5. まとめ

本研究より、以下の知見が得られた。



(1) 一軸圧縮では、横補強筋が試験体断面の横 方向に膨張する力にのみ抵抗するが、せん断力 を受ける場合は、せん断力が大きくなるほど、 せん断力と平行な方向のずれ変形で伸びること によって応力に抵抗する。

(2) せん断力が増加するとコンファインドコン クリートの最大鉛直応力,最大鉛直応力時の鉛 直ひずみが低下する。この低下率を最大鉛直応 力時のコンファインドコンクリートに作用する せん断応力,プレーンコンクリートの破壊限界 線の最大せん断応力の関数として定式化した。

#### 謝辞

本研究の一部は文部省科学研究補助金基盤研究 C(課題番号 13650630 代表研究者:中塚佶)の援助を受けた。また、実験実施にあたっては広島大学大学院耐震工学研究室の皆様,論文作成にあたっては同研究室室,杉山絵美氏(現,防衛庁),夏目晃宏氏(現,広島大学大学院)の多大なる協力を得た。ここに併せて感謝の意を表する。

#### 参考文献

- 前川 宏一,竹村 淳一,入江 正明:コン クリート非線形破壊に及ぼす三軸拘束効果, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.11, No.1, pp.253-258, 1989
- 2) 吉川 弘道 ほか:中心軸圧縮を受ける鉄筋 コンクリート柱の非線形モデル、コンクリ ート工学年次論文報告集, Vol.12, No.2, pp.417-420, 1990
- 3) 屈中 重光 ほか:コンファインドコンクリ ートの圧縮靱性とその評価、コンクリート構 造物の靱性と配筋方法に関するシンポジウ ム論文集、日本コンクリート工学協会、 pp.1-20、1990
- 中塚 佶,阪井由尚,中川裕史:コンファインドコンクリートの強度・変形特性推定式,日本建築学会構造系論文集,505 号,pp.93-99,1998.3
- 5) 増田 森治, 室田 忠雄: 改訂 工業塑性力 学, 養賢堂, 1989.1
- 6) 山田 嘉明: 塑性力学, 日刊工業新聞, 1959.12
- 7) コンクリート便覧, 日本コンクリート工学協 会, pp.1033-1034, 1976.2
- 8) 田辺 忠顕: コンクリート力学特性に関する 調査研究報告, 土木学会, 第2章, 1991.7
- 9) 鈴木 計夫, 中塚 佶, 菅田 昌宏: 角形横 補強筋によるコンファインドコンクリート の拘束機構と強度・変形特性, コンクリート 工学年次論文報告集, pp.449-454, 1989
- 10) 中塚 佶, 阪井由尚, 菅田昌広, 齋藤駿三, 鈴木計夫: コンファインドコンクリートにお ける角形横補強筋の拘束機構, 日本建築学会 構造系論文集, 第 492 号, pp.61-68, 1997.2