

## 論 文

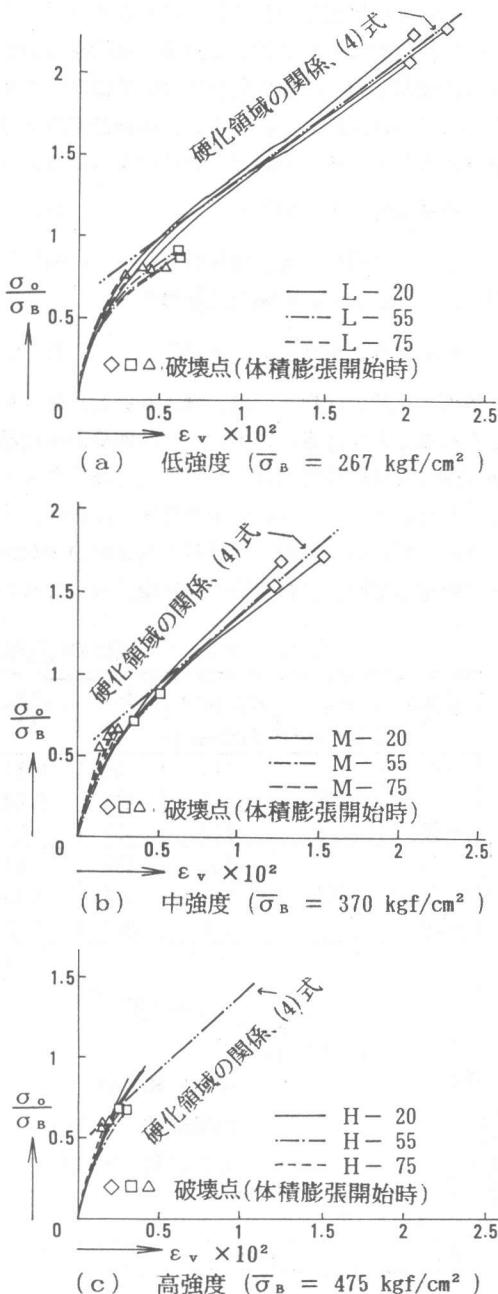
## [2128] コンファインドコンクリートの硬化・滑り領域の構成則の研究

正会員○富井 政英（青木建設研究所）

正会員 肖 岩（同 上）

## 1. まえがき

著者らは、円形鋼管で横補強されたコンクリート円柱の上下端に中心圧縮力を加えることにより、負の仕事をする変動側圧を受けるコンファインドコンクリートについて、変動因子として圧縮強度267、370、475 kgf/cm<sup>2</sup> (L、M、H級)、鋼管の径厚比20、55、75をとり、体積膨張が始まるまでの力学挙動の実験結果と、膨張開始条件に関する体積ひずみ-偏差ひずみ間及び静水圧応力-偏差応力間の各関係式を明らかにした<sup>1)</sup>。その結果、静水圧応力-体積ひずみ関係については、弾性領域から塑性領域に入ると、先ず非線形となり、次いで線形の硬化現象が現れること、また偏差応力-偏差ひずみ関係については、非線形の塑性現象及び線形の硬化現象が順次現れた後、滑り成分が発生、順増することが認められた。また、L、M級のコンクリートを大きな拘束応力が期待できる径厚比20の鋼管で横補強した場合には、鋼管が降伏した以後コンクリートが体積膨張を始めるまで、応力及びひずみがかなり増進することが認められた。ゆえに、限界状態設計法を採用した場合は、コンクリートの応力・ひずみの限界として、体積膨張開始時を破壊点（図-1、6参照）と考え、この時の値を採用するのがよいと考えられる。そこで、本論は、耐震性能が優れた鋼管横補強鉄筋コンクリート柱及び鋼管コンクリート柱の塑性挙動を解明するため、上記の実験結果を解析し、負の仕事をする変動側圧を受けるコンファインドコンクリートについて体積膨張が始まるまでの硬化領域及び滑り領域に関する構成則を提示したものである。

図-1 静水圧応力  $\sigma_0$  - 体積ひずみ  $\varepsilon_v$  関係<sup>1)</sup>

## 2. 記号

紙面の都合で一括提示を割愛する。なお、応力 $\sigma$ は圧縮を、ひずみ $\varepsilon$ は収縮を正とする。

### 3. 硬化領域における、静水圧応力-体積ひずみ関係

静水圧応力 $\sigma$ と体積ひずみ $\varepsilon_v$ の関係は、弾性領域から塑性領域に入ると、まず非線形となり、次いで硬化現象を起し線形となる（図-1著者らの実験の解析結果<sup>11</sup>参照）。

この硬化領域にほぼ達した以後に体積膨張が始まった場合の体積膨張開始時の、静水圧応力 $\sigma_{oB}$ 及び偏差応力 $\tau_{oB}$ 間の条件についてはコンクリートシリンダーの圧縮強度 $\sigma_B$ で除した無次元化応力で（1）式のように、また、体積ひずみ $\varepsilon_{vB}$ 及び偏差ひずみ $\gamma_{oB}$ 間の条件については無次元量であるひずみそのもので（2）式のように与えられる<sup>11</sup>（図-8及び図-9参照）。

$$\frac{\tau_{oB}}{\sigma_B} = 0.31 + 0.62 \frac{\sigma_{oB}}{\sigma_B} \quad (1) \quad \gamma_{oB} = 2.37 \varepsilon_{vB} \quad (2)$$

このことを考慮し、硬化領域の $\sigma_o - \varepsilon_v$ 関係を示す線形の（3）式を、（4）式のように無次元化応力 $\sigma_o / \sigma_B$ と $\varepsilon_v$ の関係に変換する。

$$\sigma_o = a_1 + a_2 \varepsilon_v \times 10^2 \quad (3) \quad \frac{\sigma_o}{\sigma_B} = \frac{a_1}{\sigma_B} + \frac{a_2}{\sigma_B} \varepsilon_v \times 10^2 \quad (4)$$

常数項 $a_1$ 及び係数 $a_2$ は、強さ $\sigma_B$ と、硬さを表す体積弾性係数 $K$ （＝ $\sigma_o / \varepsilon_v$ ）の関数で与えられることを想定し、 $\sigma_o - \varepsilon_v$ 関係の硬化領域が明瞭に求められている中強度（ $\sigma_B = 370$  kgf/cm<sup>2</sup>）及び低強度（ $\sigma_B = 267$  kgf/cm<sup>2</sup>）グループの各3体の試験体について、 $a_1 / \sigma_B$ 及び $a_2 / \sigma_B$ と、 $K / \sigma_B$ の値を表-1に掲げ、その間の関係を図-2及び図-3に示す。高強度（ $\sigma_B = 475$  kgf/cm<sup>2</sup>）の資料を含まない少ない資料ではあるが、いずれも線形関係を有していると仮定して回帰分析を行った結果、 $a_1$ は $K$ の1次関数で、 $a_2$ は $K$ 及び $\sigma_B$ の1次関数で、

表-1  $\sigma_o - \varepsilon_v$  関係の硬化領域が明瞭に求められている試験体の実験値

試験体名	$\sigma_B$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$K \times 10^{-3}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\frac{K}{\sigma_B}$	$\frac{a_1}{\sigma_B}$	$a_1$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\frac{a_2}{\sigma_B}$	$a_2$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_{oB}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\varepsilon_{vB} \times 10^2$
L-20-1		116	430	0.57	154	0.82	221	599	2.02
L-20-2	270	113	418	0.62	167	0.73	197	610	2.23
L-20-3		122	452	0.55	148	0.76	205	557	1.99
M-20-1		141	383	0.52	191	0.79	291	630	1.51
M-20-2	368	142	386	0.45	166	0.98	361	615	1.24
M-20-3		117	318	0.42	154	0.93	342	565	1.21

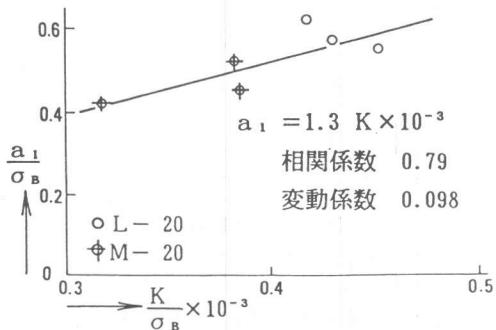


図-2  $\sigma_o - \varepsilon_v$  の線形関係式 ( $\sigma_o = a_1 + a_2 \varepsilon_v$ ) の常数項 $a_1$ に及ぼす $K$ の影響

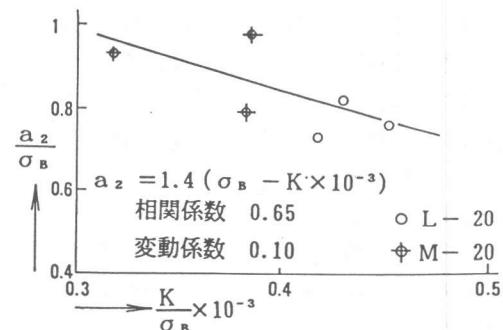


図-3  $\sigma_o - \varepsilon_v$  の線形関係式 ( $\sigma_o = a_1 + a_2 \varepsilon_v$ ) の係数 $a_2$ に及ぼす $\sigma_B$ 及び $K$ の影響

それぞれ (5)式及び (6)式で与えられることが認められた。

$$a_1 = 1.3 K \times 10^{-3} \quad (5) \quad a_2 = 1.4 (\sigma_B - K \times 10^{-3}) \quad (6)$$

Kは、ヤング係数E及びポアソン比νが分れば、(7)式で算定できる。

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad (7)$$

日本建築学会鉄筋コンクリート構造計算規準では、E及びνを (8)式及び (9)式のように定めている<sup>2)</sup>。

$$E = 2.1 \times 10^5 \times \left( \frac{\gamma}{2.3} \right)^{1.5} \times \sqrt{\frac{\sigma_B}{200}} \quad (8), \quad \nu = \frac{1}{6} \quad (9)$$

K - σ<sub>B</sub> 関係に関する著者らの実験結果と、

コンクリートの単位容積重量γ = 2.3 ton/m<sup>3</sup>を代入した (8)式のE及び (9)式のν = 1/6 を(7)式に代入して得られる学会規準式を図-4に示す。また参考までに、(10)式で与えられるせん断弾性係数Gとσ<sub>B</sub>の関係についても、著者らの実験結果と、γ = 2.3を代入した (8)式のE及び (9)式のν = 1/6 を(10)式に代入して得られる学会規準式を図-5に示す。K及びGは、いずれも学会規準式で精度よく評価できる。

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (10)$$

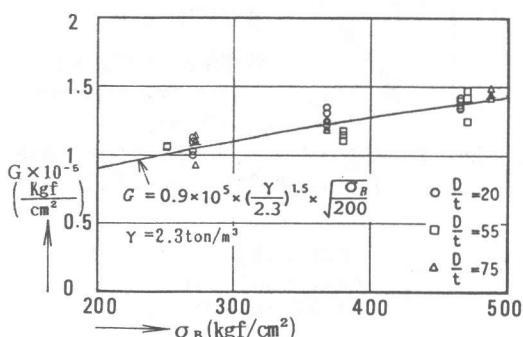
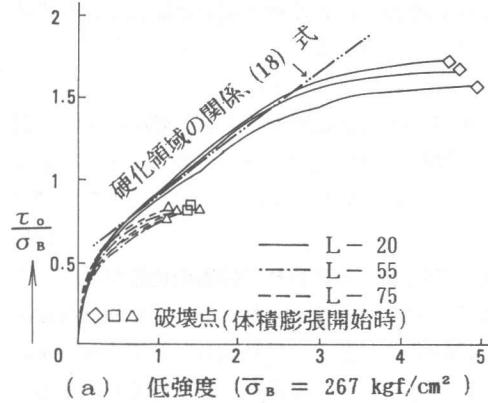


図-4 体積弾性係数Kとσ<sub>B</sub>の関係

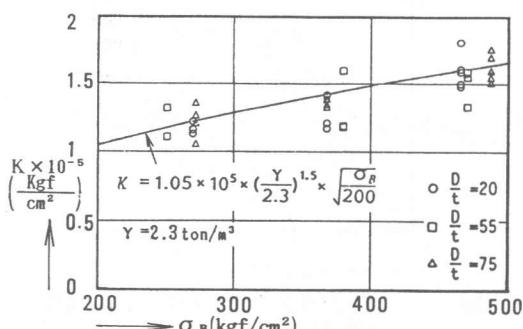
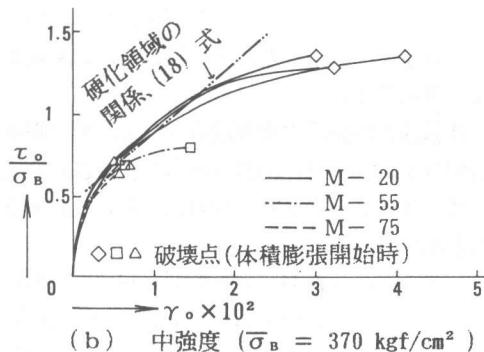


図-5 せん断弾性係数Gとσ<sub>B</sub>の関係

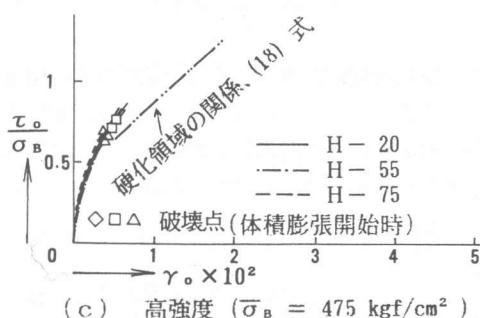


図-6 偏差応力τ₀ - 偏差ひずみγ₀の関係<sup>1)</sup>

まず  $\sigma_B = \bar{\sigma}_B$  、  $\gamma = 2.3$  と置いて (8) 式で学会規準値の E を求め、ついでこの E と (9) 式の学会規準値  $\nu = 1/6$  を (7) 式に代入して求めた K を使って (5) 式及び (6) 式より  $a_1$  及び  $a_2$  を求め、(4) 式で与えられる  $(\sigma_o / \sigma_B) - \varepsilon_v$  関係を図-1 に 2 点鎖線で示す。

#### 4. 偏差ひずみの滑り成分及び弾塑性成分と、ひずみの関係

偏差応力  $\tau_o$  と偏差ひずみ  $\gamma_o$  の関係は、弾性領域から塑性領域に入ると、先ず非線形となり、次いで硬化現象を起こし線形となるが、体積ひずみが膨張に転ずるまでに滑り現象を起こすことが、著者らの実験の解析結果<sup>1)</sup> (図-6 参照) から認められる。

硬化領域の  $\tau_o - \gamma_o$  に関する線形関係式に滑り領域の  $\tau_o$  を代入して算定される  $\gamma_{o(ep)}$  を滑り領域の  $\gamma_o$  の弾塑性成分と定義し、その残余の成分として、 $\gamma_o$  の滑り成分  $\gamma_{o(s)}$  を (11) 式のように定義する。

$$\gamma_{o(s)} = \gamma_o - \gamma_{o(ep)} \quad (11)$$

著者らの実験結果を検討した結果、 $\gamma_{o(s)}$  は、 $\sigma_B$  及び K とは関係がなく、 $\varepsilon_v$  と  $\gamma_o$  だけの 1 次関数で (12) 式により表されることが究明できた。

$$\gamma_{o(s)} = 0.83(\gamma_o - \varepsilon_v) - 0.37 \times 10^{-2} \quad (12)$$

図-7 に示す計算値と実験値の比較から分るように、(12) 式で算定される  $\gamma_{o(s)}$  の精度は極めて良いことが分る。(11) 式と (12) 式より、 $\gamma_o$  を  $\varepsilon_v$  と  $\gamma_o$  で表示した (13) 式が求まる。

$$\gamma_{o(ep)} = 0.17\gamma_o + 0.83\varepsilon_v + 0.37 \times 10^{-2} \quad (13)$$

$\gamma_{o(s)}$  及び  $\gamma_{o(ep)}$  と、 $\varepsilon_v$  及び  $\gamma_o$  の関係を図-8 に示す。

体積膨張開始時の滑り成分  $\gamma_{oB(s)}$  及び弾塑性成分  $\gamma_{oB(ep)}$  は、(2) 式を (12) 式及び (13) 式に代入することにより、(14) 式～(17) 式のように求められる。

$$\gamma_{oB(s)} = 0.48\gamma_{oB} - 0.37 \times 10^{-2} \quad (14)$$

$$= 1.14\varepsilon_{vB} - 0.37 \times 10^{-2} \quad (15)$$

$$\gamma_{oB(ep)} = 0.52\gamma_{oB} + 0.37 \times 10^{-2} \quad (16)$$

$$= 1.23\varepsilon_{vB} + 0.37 \times 10^{-2} \quad (17)$$

#### 5. 硬化領域における、応力-偏差ひずみ関係

(1) 式と、 $\sigma_o = \sigma_{oB}$ 、 $\varepsilon_v = \varepsilon_{vB}$  と置いた (3) 式より  $\sigma_{oB}$  を消去して求めた  $\varepsilon_{vB}$  を (17) 式に代入すると、(18) 式が得られる。

$$\frac{\tau_{oB}}{\sigma_B} = 0.50 \frac{a_2}{\sigma_B} \gamma_{oB(ep)} \times 10^2 + 0.31 + 0.62 \frac{a_1}{\sigma_B} - 0.19 \frac{a_2}{\sigma_B} \quad (18)$$

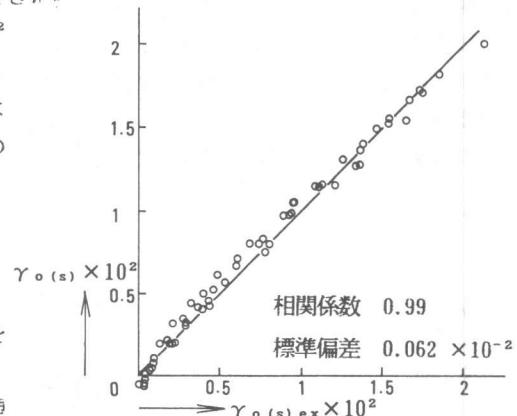


図-7 偏差ひずみ  $\gamma_o$  の滑り成分の計算値  $\gamma_{o(s)}$  と実験値  $\gamma_{o(s) ex}$  の比較

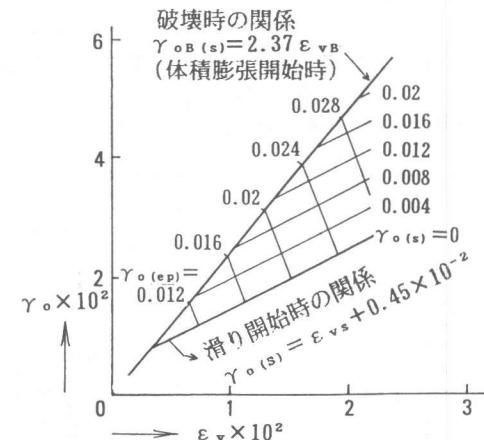


図-8 偏差ひずみの滑り成分  $\gamma_{o(s)}$  及び弾塑性成分  $\gamma_{o(ep)}$  と、 $\varepsilon_v$  及び  $\gamma_o$  の関係

(18)式は、体積膨張開始時の  $\tau_{oB} - \gamma_{oB}$  (<sub>ep</sub>) 関係で、(5)式及び(6)式で  $a_1$  及び  $a_2$  が  $\sigma_B$  及び  $K$  の関数として与えられる事から、線形となっている。 $\gamma_{oB}$  (<sub>ep</sub>) の定義から、(18)式は、 $\tau_{oB}$  を  $\tau$  に、また  $\gamma_{oB}$  (<sub>ep</sub>) を  $\gamma_o$  にそれぞれ読み替える事で、 $\tau_o - \gamma_o$  関係の硬化領域における関係式に該当する。Kを日本建築学会規準のE及びvで求めた場合の  $(\tau_o / \sigma_B) - \gamma_o$  関係を図-6に2点鎖線で示す。その結果、(18)式は著者の実験の解析結果<sup>1)</sup>の  $(\tau_o / \sigma_B) - \gamma_o$  (<sub>ep</sub>) 関係をほぼ適切に評価できることが認められた。

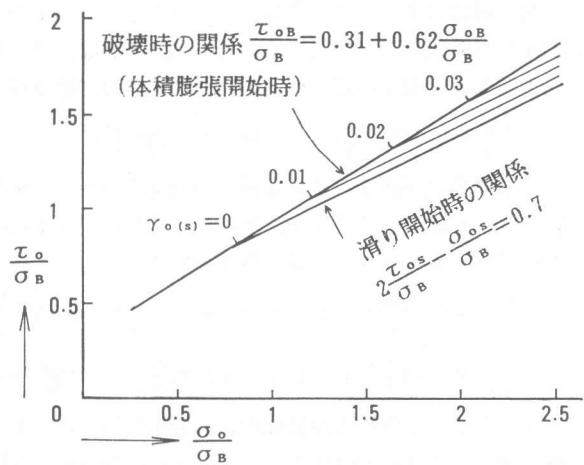


図-9 偏差ひずみの滑り成分  $\gamma_{o(s)}$  と、  $\sigma_o$  及び  $\tau_o$  の関係

## 6. 偏差ひずみの滑り成分と応力の関係

$\gamma_o = \gamma_{o(ep)} + \gamma_{o(s)}$  を代入した(12)式、及び  $\tau_{oB}, \gamma_{oB(ep)}$  を  $\tau_o, \gamma_{o(ep)}$  に読み替え(18)式より、 $\gamma_{o(ep)}$  を消去し、(3)式を使って  $\varepsilon_v = (\sigma_o - a_1) \times 10^{-2} / a_2$  と置けば、 $\gamma_{o(s)}$  を  $\sigma_o$  と  $\tau_o$  の関数で(19)式のように表すことができる。

$$\gamma_{o(s)} = \left( 10 \frac{\tau_o}{\sigma_B} - 5 \frac{\sigma_o}{\sigma_B} - 3.1 - 1.2 \frac{a_1}{\sigma_B} - 0.3 \frac{a_2}{\sigma_B} \right) \frac{\sigma_B}{a_2} \times 10^{-2} \quad (19)$$

$\sigma_B = 360 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $\gamma = 2.3$  の場合について、(7)式及び(8)式でKを求め、次いで(5)式及び(6)式で  $a_1$  及び  $a_2$  を求め、(19)式の関係を図-9に示す。

## 7. 滑り開始時のひずみ条件及び応力条件

(12)式に  $\gamma_{o(s)} = 0$  と置けば、滑り開始時のひずみ  $\gamma_{os} - \varepsilon_{vs}$  条件が(20)式で与えられる。

$$\gamma_{os} = \varepsilon_{vs} + 0.45 \times 10^{-2} \quad (20)$$

(19)式に  $\gamma_{o(s)} = 0$  と置けば、滑り開始時の応力  $\tau_{os} - \sigma_{os}$  条件が(21)式で与えられる。

$$2 \frac{\tau_{os}}{\sigma_B} - \frac{\sigma_{os}}{\sigma_B} = 0.62 + 0.24 \frac{a_1}{\sigma_B} - 0.06 \frac{a_2}{\sigma_B} \approx 0.7 \quad (21)$$

$a_1$  が(5)式によりKの関数で(図-2参照)、また  $a_2$  が(6)式により  $\sigma_B$  及び Kの関数で(図-3参照)、それぞれ与えられるが、(21)式の右辺の値は、変動が少ないので、近似的に定数と置ける。

(20)式を図-8に、(21)式を図-9に示した。

## 8. 硬化領域及び滑り領域の応力-ひずみ関係

$\sigma_o - \varepsilon_v$  関係及び  $\tau_o - \gamma_o$  関係がいずれも硬化領域にある場合を硬化領域の関係、また  $\sigma_o - \varepsilon_v$  関係は硬化領域にあるが、 $\tau_o - \gamma_o$  関係は滑り領域にある場合を滑り領域の関係と呼ぶ。硬化領域及び滑り領域の  $\sigma_o - \varepsilon_v$  関係は、(3)式または(4)式で与えられる。

硬化領域の  $\tau_o - \gamma_o$  関係は、5項で述べたように、(18)式の  $\tau_{oB}$  を  $\tau_o$  に、また  $\gamma_{oB(ep)}$  を  $\gamma_o$  に読み替えた式で与えられる。

滑り領域の $\tau_0 - \gamma_0$ 関係は、 $\tau_{0B}$ を $\tau_0$ に、また $\tau_{0B(ep)}$ を $\gamma_{0(ep)} = \gamma_0 - \gamma_{0(s)}$ に置き換えた(18)式に、(19)式の $\gamma_{0(s)}$ を代入すれば、(22)式のように $\sigma$ の関数で与えられる。(3)式の関係を考慮すれば、 $\sigma$ の替りに $\varepsilon_v$ の関数で与えられるとも云える。

$$\frac{\tau_0}{\sigma_B} = 0.083 \frac{a_2}{\sigma_B} \gamma_0 \times 10^{-2} + 0.42 \frac{\sigma_0}{\sigma_B} + 0.31 + 0.20 \frac{a_1}{\sigma_B} - 0.06 \frac{a_2}{\sigma_B} \quad (22)$$

円柱座標系に変換すると、半径方向拘束応力 $\sigma_r$ （または半径方向ひずみ $\varepsilon_r$ ）の関数で軸方向応力 $\sigma_z$ －軸方向ひずみ $\varepsilon_z$ 関係が<sup>3</sup>、また $\sigma_z$ （または $\varepsilon_z$ ）の関数で $\sigma_r - \varepsilon_r$ 関係が<sup>3</sup>、それぞれ(23)式及び(24)式で与えられる。

$$\frac{\sigma_z}{\sigma_B} = 0.34 \frac{a_2}{\sigma_B} - \varepsilon_z \times 10^2 + 2.1 \frac{\sigma_r}{\sigma_B} + 0.69 \frac{a_1}{\sigma_B} - 0.06 \frac{a_2}{\sigma_B} + 0.90 \quad (23)$$

$$\frac{\sigma_r}{\sigma_B} = 0.29 \frac{a_2}{\sigma_B} \varepsilon_r \times 10^2 + 0.28 \frac{\sigma_z}{\sigma_B} - 0.15 \frac{a_1}{\sigma_B} + 0.02 \frac{a_2}{\sigma_B} - 0.39 \quad (24)$$

コンクリート円柱の横補強鋼管の拘束特性 $\sigma_r - \varepsilon_r$ 関係が与えられれば、例えば 鋼管降伏時の拘束応力 $\sigma_{ry}$ とひずみ $\varepsilon_{ry}$ を与えれば(24)式から降伏時の軸方向支持力 $\sigma_{zy}$ が求まり、 $\sigma_{ry}$ と $\sigma_{zy}$ を使って(23)式より降伏時の軸方向ひずみ $\varepsilon_{zy}$ が求まることになる。

## 9. まとめ

円形鋼管で横補強されたコンファインドコンクリートに関し、静水圧応力 $\sigma_0$ －体積ひずみ $\varepsilon_v$ 関係の硬化領域における線形関係式〔(3)式、(5)式、(6)式〕、及び偏差ひずみ $\gamma_0$ の滑り成分 $\gamma_{0(s)}$ と $\varepsilon_v$ 及び $\gamma_0$ の関係が簡単な1次式で表せること〔(12)式〕を、著者らの中心圧縮実験結果の解析から明らかにした。

その結果、本論で明らかにしたこの2つの関係式と、著者らが別論<sup>1)</sup>で明らかにした体積膨張開始時のひずみ間及び応力間の各関係式〔(2)式、(1)式〕を使うことにより、コンファインドコンクリートの硬化領域及び体積膨張が始まるまでの滑り領域の構成則が、体積弾性係数Kと圧縮強度 $\sigma_B$ が与えられれば、8面体応力 $\sigma_0$ 、 $\tau_0$ 及び8面体ひずみ $\varepsilon_v$ 、 $\gamma_0$ を使った簡単な1次式で提示できた。

これにより、横補強円形鋼管の半径方向拘束応力 $\sigma_r$ －半径方向ひずみ $\varepsilon_r$ 関係が既知の場合、横補強されたコンファインドコンクリートの軸方向応力 $\sigma_z$ 及び軸方向ひずみ $\varepsilon_z$ が求められることになった（8項参照）。

体積弾性係数K及びせん断弾性係数Gは、日本建築学会鉄筋コンクリート構造計算規準のヤン係数E及びボアソン比 $\nu=1/6$ を使って評価できることを明らかにした。その結果、弾性領域から使用限界と考えられる体積膨張開始時までの、 $\sigma_0 - \varepsilon_v$ 関係を折線で、 $\tau_0 - \gamma_0$ 関係を折線と滑り成分 $\gamma_{0(s)}$ で表すことにより、負の仕事をする変動側圧を受けるコンファインドコンクリートについて、体積膨張を起こさない場合の構成則を近似的に定義できるようになった。今後の研究課題としては、弾性領域と硬化領域の間の非線形塑性領域の構成則の数式化が残されているほか、振動解析に必要な繰返し荷重を受けた場合の挙動の究明、使用限界を決める上で必要な劣化現象、残留変形及びクリープ現象の究明などがある。

## 参考文献

- 1) 肖 岩、富井政英、崎野健治：コンファインドコンクリートの三軸圧縮挙動に関する実験的研究、コンクリート工学論文集、第2巻第1号、1990、応募中
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準（1988）・同解説、丸善、1988、P.6