

清水建設株式会社 正員 大島 正康
 東京大学大学院 学生員 橋本 親典

1. まえがき

近年、有限要素法によるコンクリート構造物の挙動追跡が数多く行われてきており、それに伴いコンクリートの構成材料特性の解明が必要となってきている。その1つに、拘束されたコンクリートの応力-ひずみ関係等の力学的特性がある。現在まで、横方向から拘束されたコンクリートに関して、圧縮強度の増加、靱性の増加が部材レベルの実験結果として報告されている。しかし、拘束下のコンクリートの上記のような特性は、部材レベルとしてよりも部材を構成している要素レベルの実験結果、すなわち、本質的には構成方程式から導かれるものである。

そこで、本研究は、軸対称3軸圧縮応力下のコンクリートの構成方程式の定式化を目的とし、通常の圧縮強度試験に用いる円柱供試体の円周方向に鋼製のリングを取り付け、横方向に均一な拘束応力を作用させ、実験的に検討したものである。

2. 実験概要

図1に実験装置(例;リング6個)を、表1にコンクリートの配合を示す。実験に用いた円柱供試体寸法は、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ であり、リング寸法は、厚さ2.0mm、高さ1.5cm、外径10cmである。リングは、コンクリート打設時に型枠にあらかじめ等間隔に取り付けておき、横方向の拘束圧は、リングの円周方向のひずみを測定することにより求めた。端面の摩擦を除去するために、上下コンクリート面にシリコングリースを塗布した厚さ0.1mmのテフロンシートを挿入した。

荷重方法は、最大応力まで単調に応力を増加させ、最大応力に達した後、応力が0になるまで除荷させ、再び応力を加え以後はひずみ制御とした。また、拘束圧の変化はリング個数(0, 4, 6, 8, 10個)によって制御した。

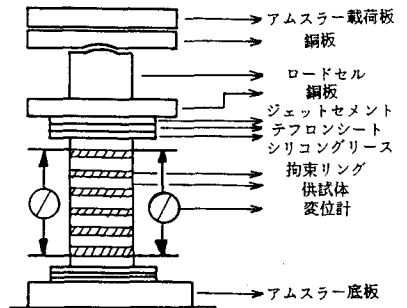


図1 実験装置(例;リング6個)

表1 コンクリートの配合

M.S. (mm)	W/C (%)	S/A (%)	単位量 (kg/cf)				混和剤
			W	C	S	G	
20	65	41	150	231	793	1150	Na70

3. 実験結果

図2に軸方向の応力-ひずみ関係の実験結果を示す。これから、リング個数の増加つまり拘束力が増加するに従ってコンクリート強度が増加し、応力が一定でひずみが急速に進化する領域が大きくなることわかる。

4. 考察(構成方程式の定式化)

基本的には、前川が提案している弾塑性破壊モデル(1)を用いた。このモデルに基づくコンクリートの1軸圧縮応力下の構成則は、次の①, ②, 及び③式で表わせる。

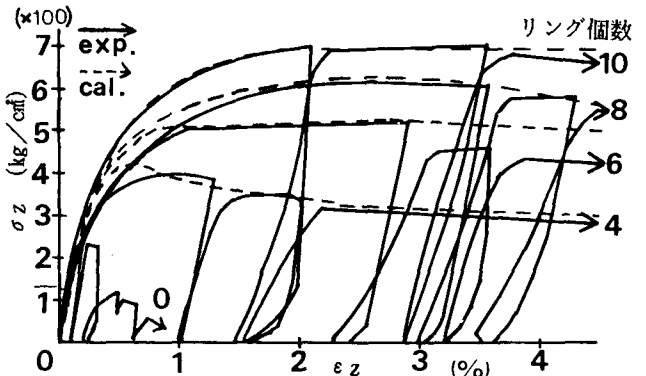


図2 軸方向の応力-ひずみ関係

$$\sigma_z / \sigma_c' = E_0 \cdot K_0 \cdot (\epsilon_z / \epsilon_c' - \epsilon_{pl} / \epsilon_c') \quad \text{-----①}$$

$$K_0 = \exp \left(-0.73 \cdot \epsilon_{z, \max} / \epsilon_c' \cdot (1 - \exp(-1.25 \cdot \epsilon_{z, \max} / \epsilon_c')) \right) \quad \text{-----②}$$

$$\epsilon_{pl} / \epsilon_c' = \epsilon_{z, \max} / \epsilon_c' - 20/7 \cdot (1 - \exp(-0.35 \cdot \epsilon_{z, \max} / \epsilon_c')) \quad \text{-----③}$$

ただし、 σ_z , ϵ_z ; Z軸方向の圧縮応力 (kg/cm²) とひずみ (圧縮が負), K_0 ; 破壊パラメータ

σ_c' , ε_c' ; コンクリートの1軸圧縮強度 (kg/cm²) とそれに対するひずみ, ε_{pl} ; 塑性ひずみ

E_o ; 正規化した初期剛性 (=2.0), $\varepsilon_{z,max}$; 過去に受けた最大のひずみ

なお, 座標系は円筒座標系とし, 高さ方向をZ方向, 断面円周方向を θ 方向, 半径方向をr方向として表わす。

本実験において除荷時に測定される $\varepsilon_{pl} / \varepsilon_c'$ と $\varepsilon_{z,max} / \varepsilon_c'$ の関係と③式の曲線を図3に示す。これから, ε_{pl} と $\varepsilon_{z,max}$ はリング個数によらず③式の曲線とはほぼ一致していることがわかる。よって, $\varepsilon_{pl} / \varepsilon_c'$ と $\varepsilon_{z,max} / \varepsilon_c'$ の関係は, 軸対称3軸圧縮応力下の場合も③式が成り立つとした。

次に, 破壊パラメータKについて考える。図4に, ①式において K_o (無拘束下) = K (拘束下) として本実験から求めたKと $\varepsilon_{z,max} / \varepsilon_c'$ の関係と②式の曲線を示す。図4より, 同一 $\varepsilon_{z,max} / \varepsilon_c'$ において $K - K_o$ の増加分は拘束力によるものと考えられる。従って, Kは, K_o (②式) と拘束力の影響による K' (実験結果より近似) の和であるとし, 次の④式が成り立つとした。

$$K = K_o + K' \quad \text{----- ④}$$

$$K' = K'_{max} (\exp(-\varepsilon_r / 50 \varepsilon_{sy}) - \exp(-\varepsilon_r / 0.4 \varepsilon_{sy}))$$

$$K'_{max} = (1 - S/L) \cdot 4.0 \times 10^{-2} \times \sqrt{\sigma_{r,max}}$$

ただし, ε_r ; 半径方向のひずみ, ε_{sy} ; 拘束リングの降伏ひずみ

S/L ; リング間隔 (cm) / 供試体高さ (cm)

$\sigma_{r,max}$: 最大拘束応力 (kg/cm²)

次に, コンクリートの異方性について考える。図5に, 本実験で測定された $\varepsilon_r / \varepsilon_z$ と ε_z の関係を示す。これから, 拘束下におけるコンクリートの半径方向のひずみと軸方向のひずみの比が破壊の進行とともに0.5に収束していることがわかる。そこで, 1軸圧縮応力下の構成則の結果よりポアソン比 ν を図6に示すようにモデル化した。この ν と拘束下の体積ひずみ ε_v と無拘束の体積ひずみ ε_{vo} を用いて拘束下の ε_r , ε_z は⑤式で表わすことができる。

$$\varepsilon_r = (-2\nu \cdot \varepsilon_z + (\varepsilon_v - \varepsilon_{vo})) / 2 \quad \text{----- ⑤}$$

図7に, 本実験から求められた $(\varepsilon_v - \varepsilon_{vo}) / \sigma_r$ とKの関係を示す。これから, $\varepsilon_v - \varepsilon_{vo}$ は⑥式で近似した。

$$\varepsilon_v - \varepsilon_{vo} = 300 \cdot K^2 \cdot \sigma_r \quad \text{----- ⑥}$$

よって, ①~⑥式を用いることにより軸対称3軸圧縮応力下における応力-ひずみ関係が求められる。図2に以上の構成方程式を解くことにより求めた軸方向の応力-ひずみ関係を破線で示す。

5. あとがき

本研究は, 軸対称3軸圧縮応力下におけるコンクリートの挙動を破壊パラメータKを用いた弾塑性破壊モデルにより定式化した。今後, 一般的な3軸圧縮応力下における実験, 解析方法や, らせん鉄筋拘束等の現実的問題への適用方法を考えていく必要がある。

〔参考文献〕(1)前川宏一“弾塑性破壊モデルに基づくコンクリートの構成則”第2回RC構造せん断コロキウム論文集, 1983年10月

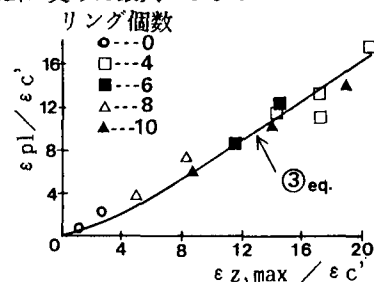


図3 ε_{pl} と $\varepsilon_{z,max}$ の関係

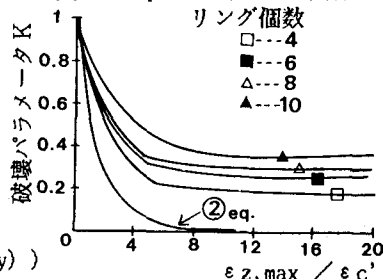


図4 K と $\varepsilon_{z,max}$ の関係

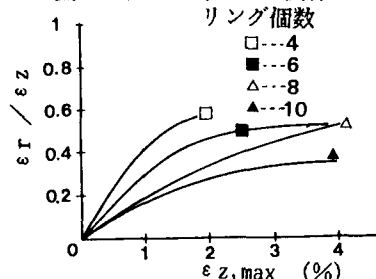


図5 $\varepsilon_r / \varepsilon_z$ と ε_z の関係

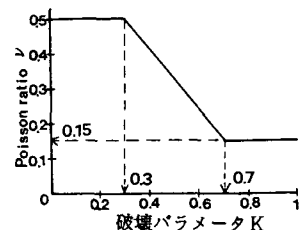


図6 ポアソン比のモデル化

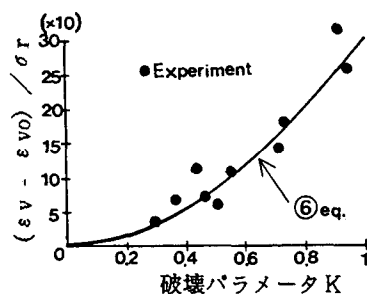


図7 $(\varepsilon_v - \varepsilon_{vo}) / \sigma_r$ と K の関係