

[47] 二軸応力下のコンクリートの構成方程式

正会員 ○前川 宏一 (東京大学大学院)
 正会員 上迫田 和人 (東京大学工学部)
 正会員 岡村 甫 (東京大学工学部)

1. まえがき

二次元RC部材の内部応力状態は大部分が圧縮引張り応力下にあり、部材の最終耐力も高圧縮引張り応力下のコンクリート要素の破壊に依存する場合が多い。⁽¹⁾しかし従来の多軸応力下のコンクリートの挙動についての研究は、二軸三軸圧縮応力下に主眼が置かれているものが多く、引張り応力存在下のコンクリートの変形挙動についての基礎データの蓄積は十分とはいえず、よって有限要素法等による多次元解析の精度もまた十分とはいえない。

本研究では特に高圧縮引張り応力下のコンクリートの挙動に注目し、実験を行い二軸応力下の構成方程式の確立を目標としたものである。

2. 実験の概要

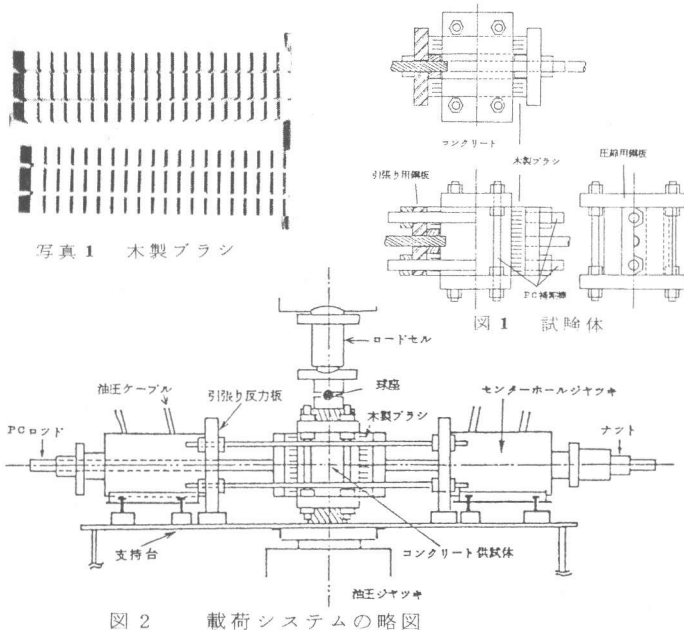
図1に示すように2枚のコンクリート板(20×20×5cm)を平行に配置し、鋼板を用いて圧縮及び引張り応力を加えた。端面摩擦を除去するためシリコングリースを塗付した0.5mm、0.1mmのテフロンシートを重ねて鋼板とコンクリートの間に設置し圧縮応力を加えた。引張り応力は写真1に示す木製ブラシを介してコンクリートに伝達された。木製ブラシはエポキシ系接着剤によりコンクリート面に接着され、ブラシの歯の中に圧入されたエポキシはヘラによって除去した。この木製ブラシは検証実験において圧縮ひずみで4000μまでコンクリートに影響を及ぼすことなく変形に追従できることが確認された。歪は主応力二方向にワイヤーストレインゲージ及びパイ形変位計を接着し測定を行ない、載荷応力はロードセルの出力と供試体断面積より換算して求めた。載荷は歪制御とし、マイクロコンピュータで実験条件の管理を行なった。図3に全体の載荷システムの概略を示す。なお主応力二方向の試験機の剛性を高めるため補剛材を取りつけた。コンクリート供試体は $1/400$ 精度の型枠で成形され、引張り応力の加わる面は研磨を行ないブリージング層を除き骨材とモルタル両者に応力が伝達されるようにした。圧縮応力を受ける面はパラフィンを含浸させシリコングリースの圧入を防止した。

3. 載荷経路

(A)圧縮応力一定下で引張り応力を変化させる方法と、(B)引張り応力一定下で圧縮応力を変化させる方法の2タイプを組み合わせることで応力経路を与えた。また応力経路の中に、完全除荷の経路を含め塑性ひずみの測定を行なった。なお、最大主応力方向は常に一定の条件下にある。本論文での応力、歪はすべて一軸単調圧縮応力下のピーク応力 F_1 とピーク歪 E_{pu} で正規化したものを使用している。

4. 二軸応力下の塑性破壊モデル

コンクリートは外力(応力あるいは歪)を受けることで内部構造が刻々と変化し、塑性変形とともにマイクロクラック進行に伴う微小内部構造の破壊(局部座屈)をおこす材料である。



そこで、二軸応力下のコンクリートの挙動を以下の簡単なモデルに置き換え表現した。

- (A) コンクリートは図4に示すような弾塑性挙動を示す微小な構成要素が並列に集合している合成材料である。
- (B) 個々の微小構成要素は、過去に受けた最大応力レベルを越えたとき塑性進行する歪硬化体である。あるいは過去最大の変形を越えたとき塑性流れを生じ、それ以外は線形挙動を示す材料である。
- (C) 微小構成要素はある応力に達したとき完全に耐荷力を失い、以後耐荷力を回復しない。これはコンクリート内部のマイクロクラックにとまらう局部組成の座屈による非可逆過程をあらわしている。
- (D) 微小構成要素の破壊強度は図3のような確率密度分布を持つ。これはコンクリート内部組成の強度のばらつきを表わしている。

(A)-(D)のモデルを応力-歪の関係に結びつけた概念図を図4に示す。図中の $\bar{\epsilon}$ 、 $\bar{\epsilon}_{pl}$ 、 $\bar{\epsilon}_{el}$ 、 $\bar{\sigma}$ は全歪、塑性歪、弾性歪及び応力のレベルを表わす。全歪レベルの小さい(I)の場合、塑性、破壊の進行は小さく応力-歪の関係は線形に近い。 $\bar{\epsilon}$ が増加し構成要素応力 $E_0(\bar{\epsilon} - \bar{\epsilon}_{pl})$ が上昇すると塑性流れの進行と共に破壊強度に達する構成要素が増加し除荷剛性は点線で示されるように低下する。ここで耐荷力を保持している構成要素の生存率をKと定義すると、Kは強度確率密度分布関数Pと次のような関係が成立する。

$$K = 1 - \int_0^f P(\ell) d\ell \quad ; \quad f = E_0(\bar{\epsilon}_{max} - \bar{\epsilon}_{pl}) \quad \text{ただし } \bar{\epsilon}_{max} \text{ は過去最大の全歪レベル} \quad \dots\dots\dots (1)$$

さらに変形が進行すると構成要素の破壊が急速に進行し、遂に歪硬化にとまらう構成要素の応力上昇を打消し、見かけ上のコンクリート合成体としての全応力が減少に向かい歪軟化性状をあらわす。以上のモデルを基本概念式として表現する。微小構成要素一個当りの応力 S_i は仮定(A)、(B)より以下のように表わせる。

$$S_i = E_0(\bar{\epsilon} - \bar{\epsilon}_{pl}) \quad E_0: \text{構成要素の平均弾性係数} \quad \dots\dots\dots (2)$$

コンクリート合成体としての応力Sは仮定(B)、(C)、(D)より以下のように表わせる。

$$S = \sum_i S_i = E_0(1 - \int_0^f P(\ell) d\ell)(\bar{\epsilon} - \bar{\epsilon}_{pl}) = E_0 K(\bar{\epsilon} - \bar{\epsilon}_{pl}) \quad \dots\dots\dots (3)$$

(3)はモデル(A)-(D)に等価であり塑性・破壊の進行する非可逆過程と塑性・破壊進行のない過程を同時に表現している。よって履歴を含む解析では、(3)式により応力歪の包絡線と除荷曲線を同時に扱うことができ、解析が極めて簡略化される利点をもつ。なお定義より、K及び $\bar{\epsilon}_{pl}$ は最大ひずみレベル $\bar{\epsilon}_{max}$ の関数として表わせるコンクリート合成体の状態量であり、非回復な性格をもつ。以下に本概念を二軸応力状態に拡張し適用する。

5. 等価応力

二軸応力状態は応力テンソル σ_{ij} の不変量である以下に定義される平均応力成分 $\bar{\sigma}$ と偏差応力成分 $\bar{\tau}$ の2つのスカラー量によって記述できると考えられる。

$$\bar{\sigma} = \sqrt{2 \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \right)^2} \quad \dots\dots\dots (4) \quad \bar{\tau} = \sqrt{2 \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \right)^2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ただし σ_i は F_1 で正規化した応力テンソルの主値を表わす。ここで $\bar{\tau} = 0$ の等方応力状態を想定すると、一軸応力状態からの自然な拡張として、応力レベルSは $\bar{\sigma}$ に比例すると定義する。

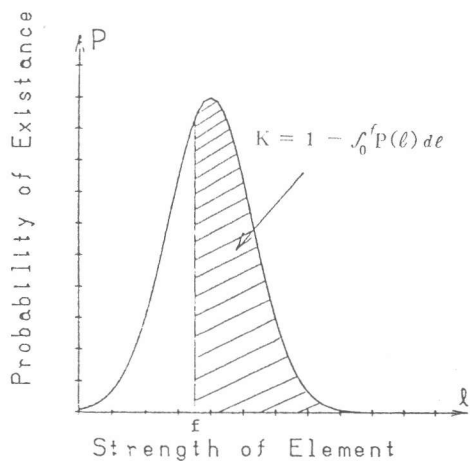


図3 強度分布密度の概念とK値

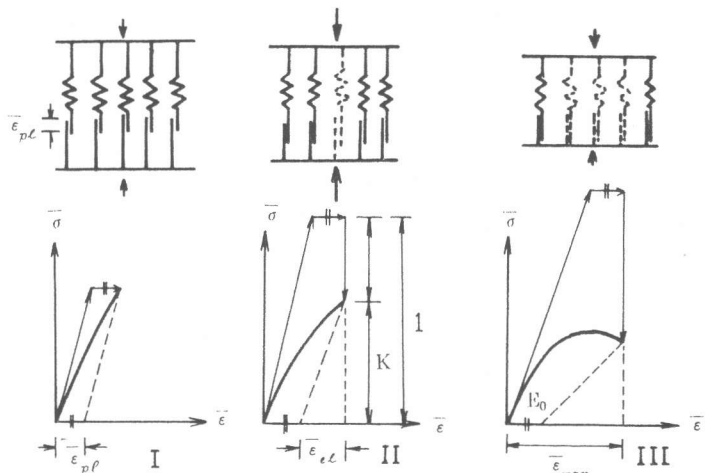


図4 コンクリートの塑性・破壊のモデルの基本概念