

論文

[2023] 圧縮下のコンクリートの破壊性状とそのモデル化について

畑中 重光\*<sup>1</sup> 水野 英二\*<sup>2</sup> 小池 狭千朗\*<sup>3</sup>

1. はじめに

圧縮下のコンクリートの破壊パターンは、応力条件によって異なる。さらに、実験で観察される破壊は、応力条件の他に試験条件やコンクリート自体の品質にも影響されるため、必ずしも一定の破壊パターンが得られるとは限らない[1]。

近年、一軸圧縮並びに低側圧三軸圧縮下のコンクリートのひずみ軟化域をも含めた破壊挙動を、マクロまたはミクロな立場から数学的に表現するため、種々の力学モデルが提案されている。しかし、上記のような理由により、モデル化の対象としたコンクリートの破壊パターンそのものが研究者によって必ずしも一致していないことから、自ずと提案モデルの適用性には限界が生じる。

本研究の主な目的は、一般に”圧縮下”と呼ばれる条件下でのコンクリートの破壊パターンを整理・分類し、破壊モデルの理解と再構築のための基礎資料を得ることにある。ここでは、圧縮下のコンクリート供試体の破壊パターンについて、破壊面の角度と破壊領域の長さ(幅)という二つの点に着目して考察する。

2. コンクリート供試体の破壊パターン

コンクリートの圧縮破壊過程の概要を図-1に示す[2, 3, 4]。圧縮下のコンクリート供試体は、ピーク応力の直前からひずみが徐々に局所化し(臨界応力以降、顕著になると考えられる。ここで臨界応力とは、応力の増加に伴い、体積ひずみが減少から増加に転じる時点の応力と定義する。)、さらに軟化域のある高ひずみ点に達すると終局破壊面が決定する。その後の供試体の耐荷力は、終局破壊面の形成状況に依存すると考えられる。ここでは、ひずみの局所化から終局破壊面の形成という段階を、破壊領域の形成段階として捉え、その角度および領域の長さ(幅)について考察する。また、圧縮下のコンクリート供試体の典型的な破壊パターンを図-2に示す[1, 2, 5, 6]。以下、特にことわりがない限り、圧縮とは一軸圧縮並びに低側圧三軸圧縮を表すと考えて頂きたい。

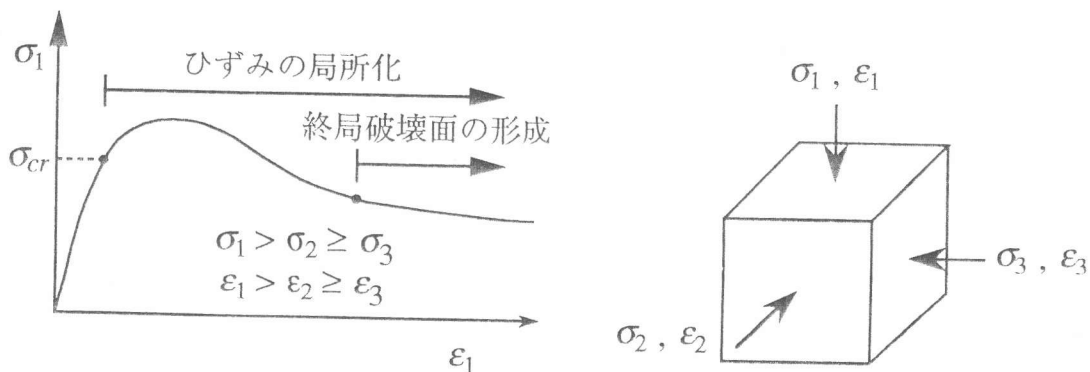


図-1 破壊過程

\*1三重大学助教授 工学部建築学科、工博(正会員)

\*2名古屋大学助教授 工学部土木工学科、Ph.D(正会員)

\*3愛知工業大学助教授 建築学科、工修(正会員)

### 3. 破壊面の角度 $\theta$

破壊面の角度は以下の諸要因の影響を受けると考えられる。

#### 3.1 端面摩擦の影響 (図-2(a), (b))

供試体端面と載荷板との間に摩擦が存在するのであれば、それは正しい圧縮載荷とは言えない。しかし、通常の一軸圧縮載荷試験では、端面の摩擦係数 ( $\mu$ ) を減じることが面倒であるなどの理由により、端面摩擦 ( $\mu \approx 0.4$ ) を存在させたまま圧縮試験が行われる。(b)図は  $\mu \approx 0.4$  という条件下での典型的な破壊パターンを模式的に示したものであるが、このケースは、上記のように、純粋な圧縮状態とは考えられないことに注意する必要がある。

#### 3.2 破壊基準の相違 (図-2(a), (c))

図-3は、モール・クーロンの破壊基準を図示したものである。図のように、せん断応力 ( $\tau$ ) と直応力 ( $\sigma$ ) が直線関係であれば、せん断すべり面は側圧に拘らず常に一定の角度 ( $\theta = \pi/4 - \phi/2$ ) となる[7]。コンクリートの破壊基準としてかなり精緻なものまで種々提案されているが、一軸圧縮から低側圧三軸圧縮までの範囲であれば、図-3のように直線で示された破壊基準と大差ない。したがってこの基準、すなわち応力の基準に従えば、破壊面は常に(c)図のようなせん断型となる。

ただし、二方向の側圧が均一(ゼロの場合も含む)であれば、せん断破壊面は最大応力  $\sigma_1$  に対して軸対称に生じるべきである。また、その破壊面は角度  $\theta$  を保持して供試体の任意の位置に(均等に)生じるべきである。この考察は図-1に示したひずみの局所化の開始時点では正しいと推測される。しかしその後は、コンクリートの内部の材料不均質性と応力不均等性によって、い

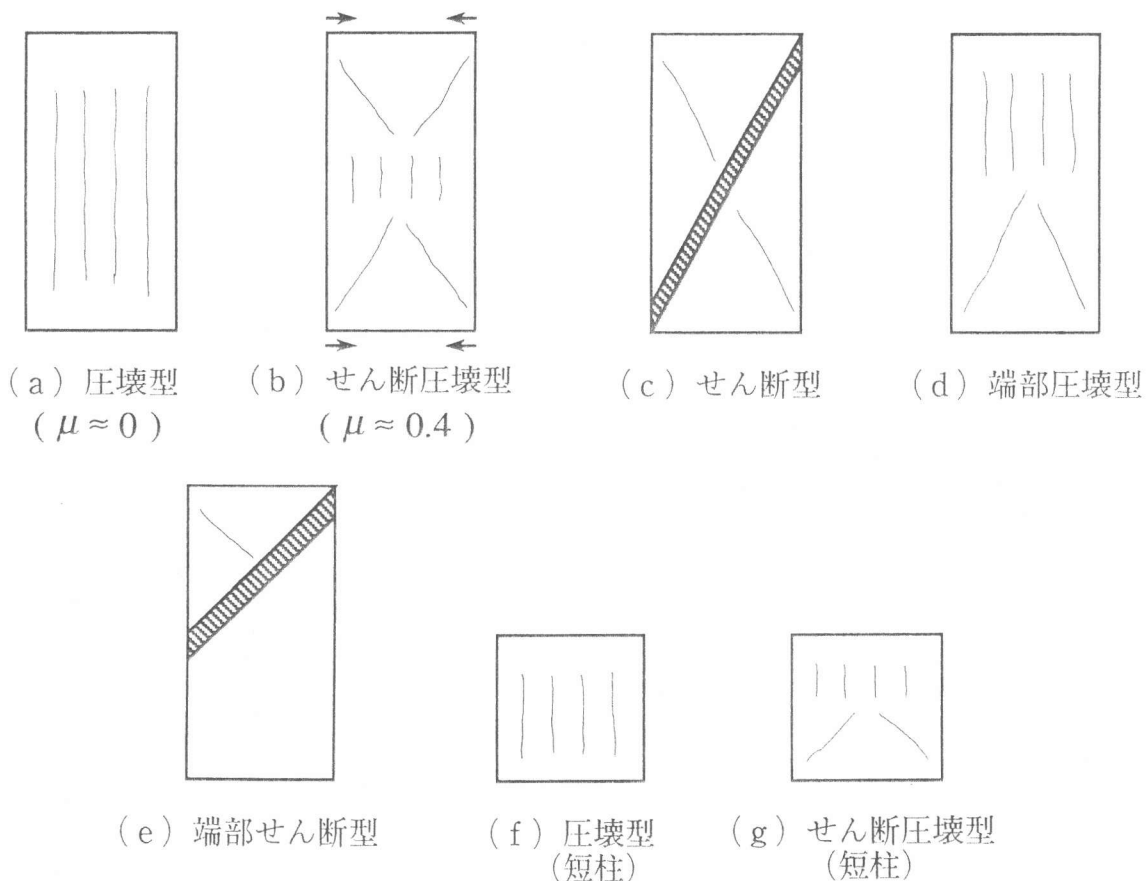


図-2 破壊パターン (縦打ち、 $\mu \approx 0$ )

わゆるひずみの局所化、そして限られた終局破壊面の形成へと進行するものと考えられる。

次に、(a)図について考える。この破壊パターンも明らかに存在するが、図-3のモール・クーロンの破壊基準では説明できないパターンである。Wu (1974) も指摘しているように、この圧縮破壊パターンは、ひび割れ直角方向の引張ひずみの破壊基準に従っていると考えるのが妥当であろう[7]。しかし、残念ながら、このひずみの破壊基準に関しては、これを確立するに足る十分なデータが得られていない。また、(a)図の破壊を、細かいせん断ひび割れの集合と考えられなくもないが、無理があると思われる。

### 3. 3 コンクリート内部の不均質性の影響 (図-2(a), (d), および(c), (e))

コンクリートは、ブリージングや圧密によって、一般に打込み方向（重力方向）と直角方向に層状に不均質な状態で仕上がる。(d)図は供試体上部がブリージング層となり、そこに圧縮破壊が集中した例である。(e)図のようにせん断型で破壊する場合にも、破壊が弱化層に集中することが多い。また、図-2はコンクリートを縦打ちとした場合を対象としたが、横打ちの場合には層が縦方向に生じることになる。この場合には、(d)図の端部圧縮型は(a)図の全体圧縮（へき開）型へ、(e)図の端部せん断型は(c)図の全体せん断型へと移行する。また、層も完全に水平にできている訳ではないので、(a)図のタイプに比べて(c)図のタイプが生じ易くなるようである。

### 3. 4 供試体の細長比 (図-2(a), (f), および(d), (g))

供試体が太短い場合には、ひずみの局所化が相対的に緩和され、(d)図のように供試体全体に破壊が生じ易くなる。しかし、供試体が長くなると、上部のブリージング層で圧壊が生じても、下部の圧密層では破壊が進行せず、上部の破壊を拘束するように挙動するため、(d)図のようなせん断面を伴うことになる。同様な破壊パターンはたとえ短柱であっても生じる（(g)図）。

### 3. 5 総括

以上の考察は、端面摩擦を十分に減じ、載荷荷重のバランスに注意を払って行う圧縮試験であることを前提にしている（ただし、3. 1項を除く）。このような理想に近い圧縮試験であっても、コンクリートの破壊基準を唯一定めて破壊面の角度を予測することは困難である。すなわち供試体の破壊パターンは、コンクリートの二つの破壊条件（応力とひずみ）の遷移、コンクリート内部の（微視的および巨視的）不均質性、境界条件（ここでは、供試体の形状と寸法に相当）などの微妙な関係から決定しているものと考えられる。

また、これらの要因の影響度はひずみのレベルに応じて変化すると考えるのが妥当であろう。すなわち、例えば図-1のひずみの局所化が始まった時点では(a)または(d)タイプの微視的破壊が進行し、ある時点から(c)または(e)タイプの巨視的破壊へと移行し、そして終局破壊面が形成されると考えるのである。

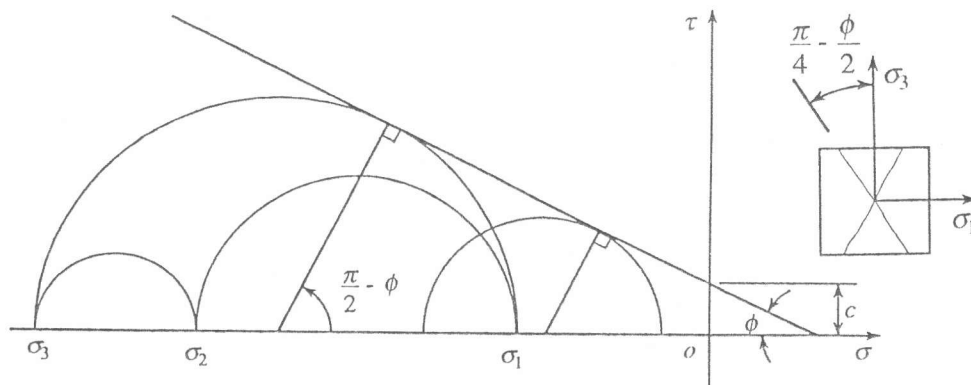


図-3 モール・クーロンの破壊基準とせん断破壊面

#### 4. 破壊領域（面）の取扱い

破壊領域の取扱いは、図-2の破壊パターンに応じて異なるべきであろう。以下、破壊パターンを圧壊型とせん断型に大別して考察する。ここに、3. 節で論じたように、圧壊型とは、引張ひずみが破壊規準に達し、図-2(a)のような縦ひび割れが卓越する破壊タイプであり、せん断型とは、図-3のような応力の破壊規準によって生ずる斜めひび割れが卓越する破壊タイプである。

##### 4. 1 圧壊型

図-4は、端部圧壊型の破壊パターンを示す供試体の各区間の応力-ひずみ関係を模式的に示したものである[2]。ひずみは区間Aの全域と区間Bの一部に集中しており、応力-ひずみ関係は、測定区間の設定位置次第で著しく変動することが予測される。ただ、このタイプの破壊（ $\sigma_1$ 軸に関して軸対称）であれば、ひずみの局所化は供試体の高さ方向で生じていると捉えることができるため、比較的容易に、供試体を破壊の程度に応じた複数領域（例えば、最も簡単な例としては、破壊領域と非破壊領域の2領域）の直列モデルと考えることができる[8]。

##### 4. 2 せん断型

図-2(c)または(e)のようなせん断型の破壊パターンを示す供試体に対しては、図-4のような直列モデルへの置換えは不相当である。このタイプの破壊では、ひずみの局所化が、終局破壊面のごく限られた領域（局所帯）に集中して起こる。したがって、モデル化にあたっては、この局所帯の幅と挙動を精度良く再現することが要点となる。ただし、前節でも述べたように、この局所帯は必ずしもひずみの局所化の開始時点から形成されるものではなく、圧壊および他のせん断ひび割れの進展を伴いながら、最終的に軟化域のある時点に至って、一本の局所帯に破壊が集中した結果、顕在化したものであることを認識しておく必要がある。

図-5は、圧縮強度の異なるコンクリートの応力-ひずみ曲線の間で見られる収束領域の開始点（●）が側圧によってどのように移動するかを示したものである。この時点から供試体の挙動がコンクリート強度に依存しなくなることから、これを近似的に終局破壊面の形成時点であると捉えることができる。図によれば、収束領域の開始点は側圧の増加に伴い、高応力・高ひずみ域に移行している。すなわち、前述した終局破壊面の形成以前に生じる非局所・半局所的な破壊は、側圧の増加に伴い、より高ひずみ域に至るまで継続的に進行することになるのである。

##### 4. 3 既往のモデル

ここでは、取り扱った破壊領域（面）の角度 $\theta$ （図-3参照）に応じて、既往の研究を表-1のように分類した（文献は表-1参照）。

角度 $\theta = 0^\circ$ 、すなわち図-4の直列モデルを考えた場合の破壊領域長さ $L_p$ の値は、粗骨材最大

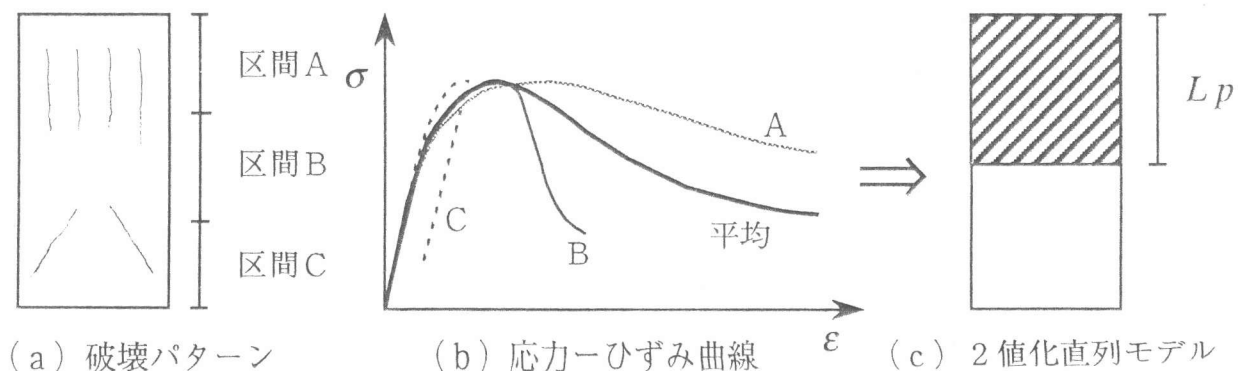


図-4 端部圧壊型供試体の各区間の応力-ひずみ曲線

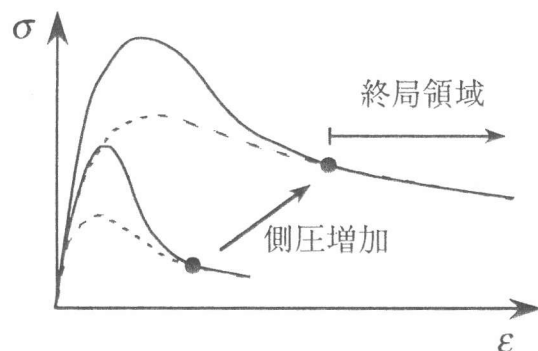


図-5 側圧増加に伴う収束領域開始点の移動

寸法または供試体幅の関数として与えられている。前者は（幾何学的）材料特性、後者は境界条件（本論文では、供試体の寸法に相当する）の関数と捉えることができるが、両者とも一長一短がある。すなわち、逆に前者では境界条件、後者では材料特性の影響を考慮できない。また、構造体の有限要素解析では、必ず問題となると思われる内部応力の分布状態（応力・ひずみの境界条件）と破壊領域の広がりとの関係についても、両式からただちに予測することはできない。

角度  $\theta = 20^\circ \sim 30^\circ$ 、すなわち、せん断型の破壊面は、一軸圧縮下のプレーンコンクリートのみならず、一軸圧縮下のコンファインドコンクリート、鋼管コンクリート、低側圧三軸圧縮下のプレーンコンクリート、などにおいても確認され、終局変形域に至るまでのモデル化の試みも精力的になされている。

また、一軸圧縮下および低側圧三軸圧縮下のプレーンコンクリートに対し、破壊面の角度  $\theta$  に拘らず、供試体全体の軸応力-軸ひずみ関係を、 $L_p = nD$  (表-1参照)としてほぼ表し得るとの報告もある。ただし、この捉え方はあくまで供試体のトータルの変形量を比較したものであり、破壊パターンとは無縁の議論である。

#### 4. 4 総括

破壊領域（面）は、破壊パターンが圧壊型かせん断型かでその取扱いが自ずと異なる。前節で述べたように、破壊パターンを特定することは甚だ困難であるため、各破壊パターンに対してモデルを作成することが望ましい。その際、圧壊型からせん断型への移行など、支配的破壊形態の遷移についても留意する必要がある。また、一軸圧縮や低側圧三軸圧縮下のように限られた応力条件のもとであれば、破壊パターンに捕らわれずに供試体全体の軸変形量を統一的に概算できる可能性がある。

表-1 破壊領域（面）の取扱い

$\theta$	モデル化の概要	文献
$0^\circ$	・破壊領域長さ $L_p$ を与える。 $L_p = \begin{cases} nG & (G: \text{粗骨材最大寸法}) \\ nD & (D: \text{供試体幅}) \end{cases}$	[9], [10] [6], [11]
$20^\circ \sim 30^\circ$	・破壊面の応力 ( $\tau_t, \sigma_n$ ) の伝達をモール・クーロン則で与える。 $\tau_t = C + \mu \sigma_n$ $C$ : 粘着力, $\mu$ : 摩擦係数	[3], [12] [13], [14]
任意	・ $\theta$ に拘らず $L_p$ を表示 ( $\theta = 0^\circ$ と仮定)。	[5], [6]

## 5. まとめ

本報では、圧縮下のコンクリートの破壊性状について検討した。その内容は以下のようにまとめられる。

- (1) 既往の実験結果に基づき、圧縮下のコンクリート供試体の典型的な破壊パターンを示した(図-2)。
- (2) 圧縮下のコンクリートの破壊条件として、応力およびひずみの二つの破壊基準を考える必要がある。
- (3) 応力の破壊基準はせん断型、ひずみの破壊基準は圧壊型の破壊面を与えられられる。
- (4) 圧壊型の破壊とせん断型の破壊は、コンクリートのひずみレベルに応じて遷移し、そのひずみレベルは、コンクリート内部の不均質性、境界条件などに影響されられると考えられる。
- (5) 破壊領域(面)の挙動に関する解析上の取扱い方法について、破壊パターンの分類を踏まえて検討した(表-1)。

[謝辞] 本研究は、筆者らの一人が1993年J C I寸法効果ワークショップ(仙台)にて、コンクリートの破壊片モデルを発表した際、武蔵工業大学吉川弘道先生より大変有益なご指摘を頂いたことに端を発している。また、文献を参照させて頂いた方々、および本論文の作成に際しご助力を得た黒田洋子さん(三重大学大学院)に深謝致します。なお、本研究の一部は文部省科学研究費総合研究(A)(研究代表者:千葉大学・野口博教授)によったことを付記する。

## [引用文献]

- [1] J C I破壊力学の応用研究委員会報告書-3. 3節:コンクリートの圧縮破壊性状の寸法効果・形状効果、日本コンクリート工学協会、pp.226-237、1993.10.
- [2] 小阪、谷川、畑中:一軸圧縮下のコンクリートの応力-ひずみ関係に関する研究、セメント技術年報、Vol.37、pp.279-282、1983.
- [3] 西野、村上、大谷、窪田:低側圧3軸圧縮応力を受けるプレーンコンクリートの最大応力以後の破壊性状に関する実験、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.15、No.2、pp.51-56、1993.
- [4] Manojya, P. T.: Efficiency of Lateral Reinforcement on Capacity of Core Concrete in Compression, Dissertation to Univ. of Tokyo, 1993.8.
- [5] 小柳、六郷、内田:コンクリートの圧縮靱性、セメント技術年報、Vol.37、pp.268-271、1983.
- [6] 小阪、谷川、畑中:低側圧三軸圧縮下のコンクリートの塑性変形挙動、材料、Vol.34、No.376、pp.19-25、1985。(建築学会論文報告集、No377、1987.も同じモデル、破壊片の写真あり)
- [7] W. F. Chen: Plasticity in Reinforced Concrete、丸善、第5章、コンクリートの破壊基準、497pp.、1985.7.
- [8] 岩瀬、六郷、小柳:コンクリートの破壊における硬化と軟化、セメント・コンクリート論文集、No.47、pp.390-395、1993.
- [9] Bazant, Z. P.: Identification of Strain-Softening Constitutive Relation from Uniaxial Test by Series Coupling Model for Localization, Cement and Concrete Research, Vol.19, No.6, pp.973-977、1989.
- [10] 服部、吉川:コンクリートのひずみの局所化と安定/不安定条件に関する解析的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.15、No.2、pp.63-68、1993.
- [11] 加藤、羽廣:鉄筋コンクリート造角柱体の軸方向圧縮実験の評価に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.11-2、pp.287-292、1989.
- [12] Kato, K., Kato, N., and Iwasaka, N.: Loading Capacity of RC Column Considering Complex Shear Strength of Concrete and High-Strength Shear Reinforcement, Proc. of the 34th Japan Congress on Materials Research, pp.177-184、1991.3.
- [13] 村上、大谷、西野、窪田:低側圧3軸圧縮下で生じたひび割れ面のせん断伝達劣化機構のモデル化、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.15、No.2、pp.57-62、1993.
- [14] 佐藤:円形断面の充填鋼管コンクリート構造におけるコンファインド硬化のメカニズムとそのモデル化、日本建築学会構造系論文報告集、第452号、pp.149-158、1993.10.