

論文

[1041] コンクリートの非線形破壊に及ぼす 3 軸拘束効果

正会員○前川宏一（東京大学工学部）

正会員 竹村淳一（運輸省港湾局）

正会員 入江正明（日建設計土木部）

1. はじめに

コンクリートの非線形挙動は、塑性変形と微小ひびわれ発生に起因する弾性剛性の低下を意味する破壊（損傷）の 2 者に支配される¹⁾。3 軸応力下における塑性挙動については、多くの工学材料に対して、実験的、ならびに解析的側面から研究が報告されている²⁾。一方、微小ひびわれの導入に伴う弾性剛性の低下は、平面応力下に限れば、定量的にほぼ解明されている¹⁾。しかし、3 軸圧縮拘束下における破壊の進行特性については、岩盤、コンクリート材料共に解明すべき点を多く含んでいる。本研究は 3 軸圧縮応力下におけるコンクリートの非線形な破壊現象を支配する要因を実験的に分析し、3 軸拘束状態の除荷・再載荷挙動の解析精度を向上させるに資する材料を提供することを目的とする。

2. 採用した載荷経路と対象範囲

Mangら³⁾による 3 軸圧縮実験データの整理によれば、応力の平均不変量 $I_1 (= \sigma_{ii}/3)$ が、偏差不変量 $J_2 (= \sqrt{s_{ij} \cdot s_{ij}}/2, s_{ij} \equiv \sigma_{ij} - I_1 \delta_{ij})$ は偏差応力) に比較して非常に大きい領域で、多くの材料実験が今日に至るまで実施されてきたことが図 1 から分かる。偏差応力に比べて大きい圧縮平均応力を受けたコンクリートの除荷時弾性剛性は、応力経路に殆ど依存することなく、一定である。一方、相対的に小さい圧縮拘束力（低い I_1 領域）で載荷を受けるコンクリートは、偏差応力の増加に従って非可逆的に弾性剛性が低下する、即ち破壊が進行することが認められている。弾性剛性の載荷履歴に伴う低下が微小ひびわれ発生と、コンクリート複合体が作用応力に抵抗し得る体積の減少に起因していることを考慮すれば、3 軸拘束力が本研究で指摘する破壊の進行性状に大きく関与していることは明白である。

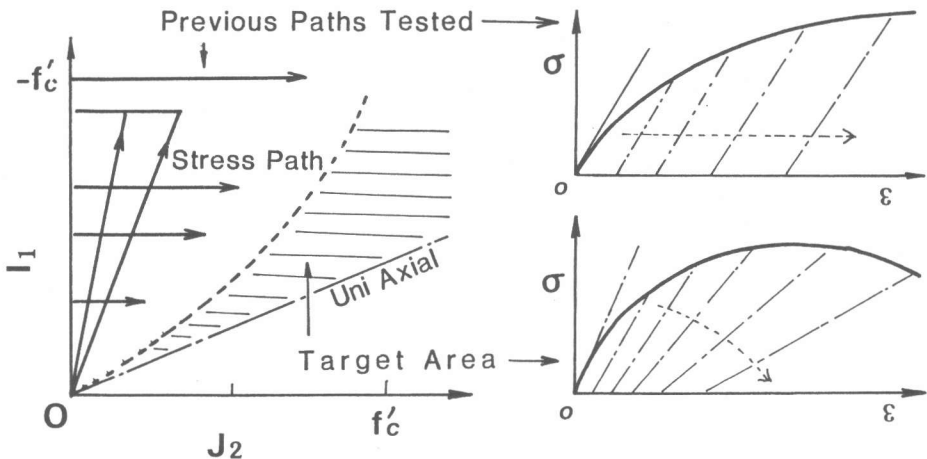


図 1 多軸載荷材料実験における載荷経路と本研究の対象領域

RC柱部材の横拘束筋がコンクリートに与える応力の偏差不変量が小さいという現実を鑑みれば、従来の多軸試験領域から離れて、比較的、拘束応力の小さい3軸状態の破壊現象を定量化することは、構造解析の精度向上に不可欠である。そこで、本研究の対象領域を、工学上、より重要と考えられる低3軸拘束状態のコンクリートの破壊挙動に限定した(図1参照)。実験は、除荷・再載荷経路を含む、鋼製リングを円周方向に取りつけた円柱圧縮試験($f'_c=20\sim 40\text{MPa}$)⁴⁾を用いた。なお、拘束状態の極端なケースとして、2軸圧縮—引張試験結果¹⁾等も用いた。

2. 平均応力—平均弾性ひずみ関係に現れる破壊と3軸拘束効果

図2は本研究で実施した、鋼リング付き供試体(10mmφ x 20mm)の軸圧縮応力—軸圧縮ひずみ関係を示したものである。リング降伏時の平均側圧 P_y は0~12MPaであった。リング拘束方向のひずみと応力は、リングのひずみ測定値より算出した。弾性ひずみ $\epsilon_{e,ij}$ は、応力を完全に除荷した場合の回復ひずみ成分と定義する。ここで、低拘束下での応力の平均不変量 I_1 と弾性ひずみの平均不変量 $I_{e,1}$ ($=\epsilon_{e,11}/3$)の関係を、図2の実験結果と既往の実験結果³⁾から描いたものが図3である。両者の関係はほぼ線形であり、注目すべきは、拘束状態の大幅に異なる実験載荷経路においても、その関係は影響を受けていないことである。図3には、偏差応力が全く作用していない完全3軸拘束状態でのNewmannら⁶⁾の実験結果、逆に引張応力を作用させた前川らの2軸実験結果¹⁾(低拘束実験)が含まれている。両者は拘束状態として極端なケースであり、コンクリートに導入される微小ひびわれの密度も、後者が前者に比較して当然多い。低3軸圧縮応力下での挙動は、両者の間に位置すると考えられる。

図3に示した I_1 と $I_{e,1}$ の関係が囲む領域は、微小ひびわれを含むコンクリート複合体の持つ、平均弾性ひずみエネルギーを示す。偏差応力経路が様々で、微小ひびわれの状態が異なるにもかかわらず、 I_1 と $I_{e,1}$ の関係は拘束状態に依存することなく、一定であることが認められた。この関係が拘束の大小に依存しないことは、平均応力に対するひずみエネルギーの蓄積能力が微小ひびわれの状態如何にかかわらず一定で、何ら力学的に損傷を受けないことを意味する。換言すれば、平均応力に対して、コンクリートは全体積が弾性ひずみエネルギーを蓄積する能力を有するのである。この結論は直観的にも理解し易い。したがって、任意3軸応力経路に対する平均応力—弾性ひずみに関する一般化構成式は、式(1)の弾性構成式と同一形式で表記される。

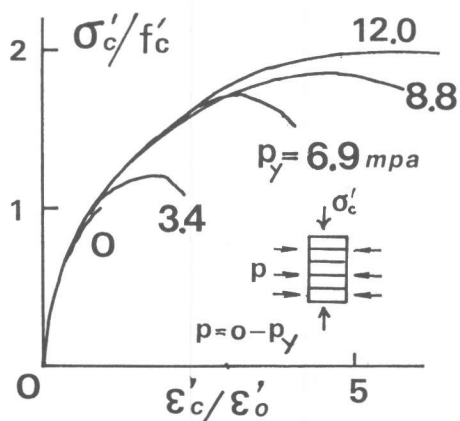


図2 拘束コンクリートの応力ひずみ関係
(リング降伏強度 $f_y=300\text{MPa}$)

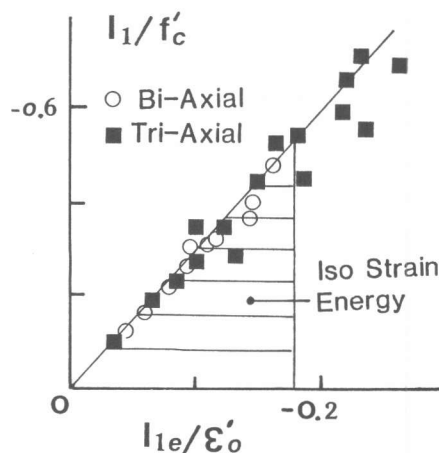


図3 平均応力—平均弾性ひずみ関係