論文 ブリーディング層を導入した寸法の異なる円形プレーンコンクリー トの三次元 FEM 解析

吉田 幸夫*1・水野 英二*2・畑中 重光*3

要旨:コンクリートの内部には,打込み高さ方向に異なる圧縮強度の分布があり,その主 な原因としてブリーディングが挙げられる。本報では,コンクリート内部に層状の材料不 整(ここでは,ブリーディング層と呼ぶ)を導入した円柱形コンクリート供試体の一軸圧 縮載荷のシミュレーション解析を行った。その結果,1)ひずみ軟化域のあるレベルまで安 定して解析する手法を提案し,その妥当性を示した。また,2)等価ひずみを指標として内 部性状を評価することで,供試体内部の損傷の進展状況を,ある程度把握できることを示 した。

キーワード : ブリーディング , 強度変動 , 三次元 FEM 解析 , 圧縮 , 応力 - ひずみ , DIANA

1. はじめに

コンクリートの内部には打込み高さ方向に異 なる圧縮強度が分布しており,その主な原因と してブリーディングが挙げられる¹⁾。文献2)お よび3)では,一軸圧縮を受けるプレーンコンク リートの載荷軸方向のひずみ分布を測定した結 果,供試体上半分は軟化挙動を示したが,下半 分ではピーク以後,除荷挙動を示したと報告し ている。

以上のように,コンクリートは不均一な内部 性状を有するが,コンクリート構造物の変形挙 動解析などにこのような不均一性を採り入れた 研究はこれまでに少ない。例えば,小阪ら^{4),5)} は,RC 柱の曲げ解析において材料の不均一性 を考慮し,打ち込み高さ方向に強度分布を設定 することで,解析結果と実験結果との良い一致 を示したと報告している。

筆者らは過去に、ひずみ軟化型構成モデル^{6),7)} を組み込んだ有限要素解析プログラム FEAP⁸⁾ を用い、コンクリート内部に層状の材料不整(こ こでは、ブリーディング層と呼ぶ)を導入した 角形コンクリート供試体の一軸圧縮 FEM 解析 を行っている⁹⁾。しかし、数値計算上の問題か ら,ポストピーク領域までを含む変形挙動を充 分に追跡することが出来ていない。

そこで本報では,FEM 解析コードには汎用有 限要素解析プログラム DIANA¹⁰⁾を,応力-ひず み関係には DIANA 既存のひずみ軟化までを考 慮することができる Drucker-Prager 型構成則¹⁰⁾ を用い,以下の三点を目的とする一連の一軸圧 縮解析を行った。

- 一軸圧縮載荷を受ける供試体について,ひ ずみ軟化域まで安定した計算が可能な解析 手法を提案する。
- 2)供試体寸法および強度の変動が供試体全体 としての圧縮応力 - ひずみ関係に及ぼす影響について定量的に評価する。
- ブリーディング層を導入した円形コンクリ ートの破壊メカニズムを等価ひずみなる指 標を用いて考察する。
 - 2. 解析概要

2.1 供試体および解析モデル概要

供試体の概要を図 - 1 に示す。供試体の形状 は円柱形とし,対称性を考慮し,全体の1/4 の部分をモデル化した。境界条件は,対称面に

- *1三重大学大学院 工学研究科博士後期課程システム工学専攻 工修(正会員)
- * 2 中部大学教授 工学部土木工学科 Ph.D.(正会員)
- * 3 三重大学教授 工学部建築学科 工博(正会員)



図 - 1 供試体概要

おいては直角方向の変位を拘束する。載荷面に おける横拘束は「有る」場合と「無い」場合の 2ケースとした。なお、ここでの「端面拘束有 り」とは端面においてコンクリートが「完全拘 束」されることを意味する。載荷方法は、供試 体上面に軸圧縮ひずみを与える変位制御とし、 2%の平均軸圧縮ひずみまで載荷を行った。

供試体寸法は,図-1(b)に示す直径D=50, 100 および150 mmの3ケースとした。

2.2 構成モデル 破壊基準および要素タイプ

構成モデルおよび破壊基準には,それぞれ DIANA 既存のひずみ軟化を考慮できる Drucker-Prager 型モデル,および同破壊基準¹⁰⁾ を用いる。内部摩擦角および Dilatancy angle は ともに 53°で一定とする。当該角度にすること で,低側圧下(2 MPa 程度)の一軸圧縮の解析 値は実験による最大圧縮応力とほぼ一致する。 詳細については,文献 11)を参照されたい。

要素として 20 節点アイソパラメトリック要素(DIANA での要素名: CHX60)を採用する。

2.3 材料定数

表 - 1 にコンクリートに適用する材料定数を 示す。本解析では、ブリーディング層を設定す るため、図 - 1 (c)に示すように層(Y軸方向に 5 cm)ごとに圧縮強度の差 *F*_cを与える。この とき、各層の圧縮強度を平均すると、30 MPa

表 - 1 材料定数

E _c		F_t	\mathcal{G}_{f}	
2.6×10 ⁴	0.2	2.4	9.7 × 10 ⁻²	
「注」F・セング係数(MPa) ・ポアソンH				

F_t:一軸引張強度(MPa), G_f:破壊エネル ギ(N/mm)

表-2 供試体シリーズ概要

供訊1体 シリーズ	F_c (MPa)	_{Gf} の倍率	端面 拘束
D -0.5 MPa	0.5	× 1	右
D -1 MPa	1	× 10 × 100	白细
D -2 MPa	2	× 1000	~~~

[注]例)D -0.5 MPa: には,供試体直径 D(mm)である 50,100 および 150 が入る



となる。供試体シリーズの概要を表 - 2 に示す。

文献 9)において筆者らは、「最大圧縮応力以 降に供試体内部のある要素内でスナップバック 現象(不安定現象)が起き、ピーク以降の応力 - ひずみ関係が一意的に定まらない」と解析上 の問題点を指摘している。ここでは,表-2に 示すように,破壊エネルギ G_f を係数倍するこ とにより,その現象を回避し,ピーク以降も安 定して解が得られるように工夫した。また,破 壊エネルギ Gf を増大させたときの平均軸圧縮 応力 - ひずみ関係を定量的に評価するため,破 壊エネルギ G_fを割り増しする係数を 10~1000 の範囲で変化させた。そのときの平均軸引張応 力 - 変位関係を図 - 2 に示す。FEM 解析では, 引張時においても応力とひずみの関係が使用さ れる。そのため,破壊エネルギ Gf から求まる 平均軸引張応力 - 変位関係から平均軸引張応力 - ひずみ関係を計算する必要がある。詳細につ いては, 文献 10)を参照されたい。

2.4 ブリーディング層の応力 - ひずみ関係 各層の平均軸圧縮応力 - ひずみ関係を,以下 のように設定した。すなわち,図 - 3に示すよ うに,圧縮強度 30 MPa のコンクリートの平均 軸圧縮応力 - ひずみ曲線を基に,ブリーディン グ層の圧縮強度から原点に対して相似な(同図 中において比例倍した)平均軸圧縮応力 - ひず み曲線を用いた。

- 3. 解析結果および考察
- 3.1 平均軸圧縮応力 ひずみ関係



図 - 3 ブリーディング層の平均軸圧縮応力 -ひずみ関係(当該層の圧縮強度 *F_c*が 27 MPa の場合)

図 - 4に,それぞれ端面拘束を「無し」およ び「有り」とした場合のD100-0.5,1および2MPa シリーズにおける平均軸圧縮応力 - ひずみ関係 を示す。ここで,破壊エネルギは表 - 1に示す G_f の値を用いた。これらの図から分かるように, 計算がピーク近傍で不安定となり解が一意的に 求まらない。すなわち,「端面拘束無し」ではピ ーク近傍で,「端面拘束有り」ではピーク直後ま で計算が進むが,それ以降の計算が不安定とな るという傾向は文献9)とほぼ一致している。な お,同図中のPlain (F_c = 30 MPa)の結果は,ブリ ーディングを考慮しない,圧縮強度 F_c 30 MPa の要素のみからなる供試体の解析結果である。

ここで,図-5に,D100-2 MPa シリーズの供 試体について,破壊エネルギ G_fを変化させたと きの平均軸圧縮応力-ひずみ関係を示す。端面 拘束の有無に拘わらず,破壊エネルギ G_fを増 大させることにより(ここでは,1000倍まで計 算),ひずみ軟化域のあるレベルまで解を得るこ とが可能となる。これは,次の理由によると思



図 - 4 平均軸圧縮応力 - ひずみ関係 (D100-0.5,1,2 MPa シリーズ,破壊エネルギ G_f×1)



われる。すなわち,破壊エネルギ Gfを増大させ たことで,図-5(a)の「端面拘束無し」では下 端面から4層目と3層目において,同図(b)の「端 面拘束有り」では3層目と2層目において,そ れぞれの層の境界面近傍に位置するガウス積分 点での引張挙動における急激な剛性の変化が緩 和されており,その結果,安定して解を求める が出来たと考えられる。

また,図-5によれば,破壊エネルギG_fを変 化させても供試体全体の平均軸圧縮応力-ひず み関係に顕著な相違はみられない。これは,引 張挙動を示す要素が供試体内部のごく一部であ るためと判断できる。ただし,要素の引張挙動 が部材の耐力に影響する解析,例えば梁の曲げ 解析や柱のプッシュオーバー解析などでは,破 壊エネルギG_fの値により解析結果に相違を生 じるものと思われるので,そのような解析ケー スでは本手法の適用に注意を要する。

3.2 強度差 供試体寸法および強度比の関係 供試体寸法の変動による最大圧縮応力 F_c^* の 変化状況を考察するため,図-6に各供試体の 最大圧縮応力 F_c^* とプレーンコンクリートの圧 縮強度 ($F_{cplain} = 30$ MPa)との比を示した。同図 (a)によれば,ブリーディング層間の強度差 F_c および供試体直径Dの増大により,強度比の 低下が顕著となることがわかる。この傾向は, 文献 9)と一致している。一方,同図(b)では, 強度差 F_c の相違による顕著な差は見受けられ ない。これは,供試体寸法 D150 × 300 mm まで は端面拘束の影響が卓越し,供試体寸法の増大





による最大圧縮応力 F_c^* の低下があまり生じなかったことが原因と考えられる。

3.3 等価ひずみ*√_{2ε}*の進展

本節では,偏差ひずみの二次不変量の平方根 である「等価ひずみ $\sqrt{J_{2\varepsilon}}$ 」を指標として,供試 体内部のひずみの集中性を議論する。

図 - 7 および図 - 8 は,それぞれ「端面拘束 無し」および「有り」の供試体について,D100-2 MPa シリーズの破壊エネルギ G_f を1000 倍し た場合の解析結果の一部であり,各ひずみ時点 における断面(Z=0)の等価ひずみ $\sqrt{J_{2\epsilon}}$ の進展 状態,および最終ひずみ時点における変位増分 ベクトル (最終の載 荷ステップでの変位 から,1つ前の載荷 ステップでの変位を 引いたもの)を示し ている。また,同図 中の *p*とは,最大 圧縮応力 *F*^{*}時点で のひずみを示す。

図 - 7 (a)では,供 試体の上半分の等価 ひずみ $\sqrt{J_{2\epsilon}}$ は約 0.01 を示している。30 MPa の強度を持つ プレーンコンクリー トの同ひずみ時点で の等価ひずみ √_{J2ε} は約 0.003 であり, プレーンコンクリー トの解析結果と比較 すると,約3倍の等 価ひずみが供試体上 部に集中しているこ とがわかる。一方, 同図(b)および(c)に おいては,供試体の 2 層および 3 層目の 境界のY軸近傍にお ける等価ひずみ √*J*₂,の進展が他の

部位と比較し,著し



図 - 7 Z = 0 での等価ひずみ √_{2ε}の進展図および変位増分ベクトル図 (D100-2 MPa シリーズ,破壊エネルギ *G_f* × 1000,端面拘束無し)





く進んでいることが分かる。その箇所において 応力状態を調べたところ,引張となっており, さらに局所的に集中していることが原因であっ た。図-7によれば,ブリーディング層を設定 した供試体において,平均軸ひずみが進むに従 い,ピーク時点では,4層から3層目にかけて, 応力下降域では2層および3層目の境界のY軸 近傍にひずみの集中度が増している。この現象 は,端面摩擦を減じてH/D=2の供試体を一軸 圧縮した場合,供試体上部であるH/D=1の領 域に損傷が集中するという破壊性状^{2),3)}と一致 しているといえる。

図 - 8 (b)および(c)を見ると,平均軸ひずみ が応力下降域にある場合,供試体中央およびそ の周辺に等価ひずみ $\sqrt{J_{2\varepsilon}}$ の高い領域が進展し ており,ほぼ供試体の中央部である H/D=1の 領域に高い等価ひずみ $\sqrt{J_{2\varepsilon}}$ が生じている。また, 供試体上層および下層において高い値を示す等 価ひずみ√J_{2e}が斜め方向に見受けられる。これ は端面拘束により,供試体の端部近傍でせん断 破壊を示しているものと思われる。同図(d)より, 当該箇所では変位増分ベクトルが斜め方向に向 いており,せん断変位の卓越したことが原因と 判断できる。この結果は,既によく知られてい るように,端面摩擦を減じない場合のH/D=2 のプレーンコンクリートの破壊性状と良い対応 を示している。

4. まとめ

本解析結果より,以下の知見を得た。

- コンクリート要素の破壊エネルギを変化さ せることで,供試体全体の平均軸圧縮応力-ひずみ関係に顕著な影響を与えず,ひずみ軟 化域のある程度まで安定した解を得られるこ とを示した。ただし,この手法は供試体中の ごく一部の要素でのみ引張挙動を示す解析ケ ースにおいて適用可能であることを付記する。
- 2)「端面拘束無し」の場合,等価ひずみの高 い領域は,供試体上部から下方へと進み,最 終的にほぼ供試体の上半分に集中する。この 傾向は,既往の実験での破壊性状とほぼ一致 しているものと思われる。
- 3)「端面拘束有り」の場合,等価ひずみの高 い領域は,供試体中心部からその周辺へと進 み,ほぼ供試体の中央部であるH/D=1の領 域に集中する。この傾向は,既往の実験での 破壊性状とほぼ一致しているものと思われる。

謝辞:本研究費の一部は,平成 12-13 年度文部 科学省研究費補助金(基盤研究 C,研究代表者: 畑中重光),平成 14-15 年度文部科学省研究費補 助金(基盤研究 C,研究代表者:水野英二),文 部科学省ハイテクリサーチ構想による研究費 (中部大学),および平成 14 年度竹中育英会建 築研究助成金によった。記して謝意を表す。 引用文献

- 1)畑中重光,和藤浩,三島直生,村松昭夫:真空脱水工法によるコンクリート床スラブの表層および内部強度性状改善に関する実験的研究,日本建築学会構造系論文集,第 558 号, pp.7-14,2002.8
- 2)小阪義夫,谷川恭雄,畑中重光:低側圧3軸 圧縮下のコンクリートの塑性変形挙動,材料, 第34巻,第376号,pp.19-25,1985.1
- 3)T. Lertsrisakulrat, K. Watanabe, M. Matsuo and J. Niwa: Localization Effects and Fracture Mechanics of Concrete in Compression, Proceeding of Japan Concrete Institute, Vol.22, No.3, pp.145-150, 2000
- 4)小阪義夫,谷川恭雄,山田和夫:エンドクロニック理論による鉄筋コンクリートの非弾性解析 第1報 解析方法,日本建築学会論文報告集,第326号,pp.78-90,1983.4
- 5)小阪義夫,谷川恭雄,山田和夫:エンドクロ ニック理論による鉄筋コンクリートの非弾性 解析 第2報 本解析手法の特徴および解析 結果と実験結果との比較検討,日本建築学 会論文報告集,第330号,pp.9-23,1983.8
- 6)水野英二,畑中重光:塑性理論によるコンク リートの圧縮軟化特性のモデル化,コンクリ ート工学論文集,Vol.2,No.2,pp.85-95,1991.
 7
- 7)水野英二,畑中重光:塑性理論によるコンク リートの載荷経路依存型圧縮軟化特性のモデ ル化,コンクリート工学論文集,Vol.3,No.2, pp. 1-13, 1992.7
- 8)Zienkiewicz, O. C.: The Finite Element Method, Third Ed., (吉識・山田監訳:マトリックス有 限要素法), 培風館, pp. 672-796, 1984
- 9)森本康介,長尾哲英,畑中重光,水野英二: ブリーディング層を考慮したコンクリート供 試体の寸法効果に関する三次元有限要素解析, コンクリート工学年次論文報告集,Vol.21, No.3, pp.91-96,1999
- 10)DIANA Foundation Expertise Center for Computational Mechanics: DIANA Finite Analysis User's Manual, TNO Building and Construction Research., 1999
- 11)吉田幸夫,水野英二,畑中重光:境界要素の 影響を考慮した円形コンファインドコンクリ ートの圧縮破壊 FEM 解析,日本建築学会構造 系論文集,No.563, pp.169-176, 2003.1