# 論文 内部欠陥を有する角柱コンクリートの有限要素圧縮破壊解析

水野 英二\*1・棚瀬 友則\*2・伊藤 睦\*3・畑中 重光\*4

要旨:本研究では、内部欠陥(ジャンカ)を有する角形コンクリートを対象として三次元 有限要素解析ならびに粒子モデルによる二次元有限要素解析を実施することにより、内部 欠陥の寸法が圧縮挙動に与える影響に関して検証を行った。三次元有限要素解析ではコン クリートにソリッド要素を適用し、一方、二次元粒子モデル解析ではコンクリートに対し て6本のトラス部材から構成される粒子モデルを設定し、内部欠陥の寸法が一軸圧縮強度、 ポストピーク挙動ならびに破壊形態に及ぼす影響について実験結果と比較・考察した。 キーワード:コンクリート、内部欠陥,FEM解析、粒子モデル、一軸圧縮強度

#### 1. はじめに

硬化コンクリートの内部には、大きさおよび 形状の異なる空隙(ジャンカ)が存在する場合 がある。このようなコンクリートの空隙構造と 強度性状の関係については、これまでにも様々 な研究が行われてきている。三上ら<sup>1)</sup>は、コン クリートと内部欠陥の断面積比を用いることで、 コンクリートの圧縮強度を妥当に評価できる回 帰式を提案した。しかしながら、コンクリート のポストピーク領域までをも含んだ軸圧縮特性 と内部欠陥の形状ならびに大きさとの関係につ いては未だ不明な部分が多い。

本研究では、大きさが異なる内部欠陥(ジャ ンカ)を有する角柱コンクリート(形状比:高 さー幅比H/D=2)の一軸圧縮破壊実験を考察 の対象として、汎用有限要素解析プログラム DIANA<sup>3)</sup>ならび二次元粒子モデルを組み込んだ 有限要素プログラムを用いた圧縮破壊解析を実 施し、欠陥寸法および供試体の端面摩擦の有無 などの要因が圧縮強度ならびにポストピーク領 域での破壊形態に与える影響ついて考察した。

#### 2. 実験の概要

#### 2.1 実験供試体

- \*1 中部大学工学部都市建設工学科 教授 Ph.D. (正会員)
- \*2 世紀東急工業株式会社
- \*3 中部大学工学部都市建設工学科 講師 博士 (工学) (正会員)
- \*4 三重大学工学部建築学科 教授 工学博士(正会員)

小池ら(筆者を含む)の実験供試体<sup>3)</sup>の概要 を図-1 に示す。供試体は,形状比(高さ-幅比 H/D) =2の角柱コンクリートで,サイズの異 なる内部欠陥(ジャンカ:1~3 cm)を供試体 中央に配置した。載荷実験の様子を**写真-1**に示 す。



# 2.2 実験結果および考察

小池ら<sup>3)</sup>の実験から得られた供試体の平均軸 応力-ひずみ関係を図-2 に示す。図-2(a)およ び(b)はそれぞれ端面摩擦「あり」および「な し」の場合に対する結果を示す。図-2(a)およ び(b)を比較すると、端面摩擦がある場合の方 が欠陥寸法の増大による最大圧縮応力の低下が 顕著に認められる。応力下降域はほぼ平行して おり、欠陥寸法および端面摩擦の有無による顕 著な違いは認められない。

図-3 は、図-2 の実験結果を基に、供試体強







図-4 投影欠陥断面積



図-3 強度比-投影欠陥断面積(小池)

度比-投影欠陥断面積比の関係を示したもので ある。図中の■印および◇印は「端面摩擦あり」 および「端面摩擦なし」の場合の結果をプロッ トしたものであり,破線は(供試体強度比1.0, 投影欠陥断面積比0%)の点および(供試体強 度比0,投影欠陥断面積比100%)の点を結ぶ直 線である。ここで,供試体強度比とは,(各供 試体の最大圧縮応力)/(無欠陥供試体の最大 圧縮応力)をいい,投影欠陥断面積比とは,供 試体の水平断面への(内部欠陥の投影面積)/

(供試体水平断面積)のことをいう。図-4 に投 影欠陥断面積の概要を示す。一方,三上ら<sup>1)</sup>が 実験から得た供試体強度比一投影欠陥断面積比 の関係を図-5 に示す。三上らは,端面摩擦のあ る H/D=2の円柱供試体を用いて,形状および 寸法を変化させた発泡スチロールを内部欠陥と して配置して圧縮試験を行い,供試体強度比一 投影欠陥断面積比の関係として図-5 に示すよう な回帰曲線(球状体欠陥の一例)を得ている。 図-3 および図-5 より,「端面摩擦あり」の場合 の供試体強度比は,投影欠陥断面積比の増大と ともに,下に凸な曲線を描いて低下し,「端面 摩擦なし」の場合の供試体強度比は,投影欠陥 断面積比の増大とともに直線的に低下すること が分かる。

#### 3. 三次元有限要素解析

#### 3.1 解析供試体の概要

図-6 に解析供試体の概要を示す。供試体は、 小池らの実験で用いた,高さH=200 mm,幅D= 100 mm の角柱を対象とした。対称性を考慮し て,供試体の1/8領域を解析範囲とし、5 mm 刻みの欠陥寸法となるため,要素サイズを(5 mm ×5 mm×5 mm)として分割した。なお、内部 欠陥は要素の欠落(空隙)とした。境界条件は、 対称面においてそれぞれ直交方向の変位を拘束 した。「端面摩擦あり」の場合は、供試体端面 は滑らないものと仮定して、供試体上面に位置 する節点の XZ 平面内での変位を拘束した。

載荷方法は,供試体上面に位置する節点に Y 軸圧縮方向のひずみを与える変位制御とした。

#### 3.2 解析要因および水準

表-1 に解析要因と水準を示す。小池らの実験では、欠陥寸法の水準は欠陥寸法 0.3D までで



表−1 解析要因および水準

要因	欠陥寸法	供試体端面 の摩擦	ガウス積分点の 構成モデル
水準	無欠陥, 0.1D, 0.2D, 0.3D, 0.4D, 0.5D, 0.9D	有り無し	ひずみ軟化あり ひずみ軟化なし

あるが、本解析では欠陥の大きさが 0.4D~0.9D までの解析も実施した。

# 3.3 コンクリートの構成モデル,破壊基準, 要素モデルおよび材料定数

コンクリートの構成モデルは Drucker-Prager 型構成モデル,破壊基準は同破壊基準,要素モ デルは、8 節点ソリッド要素(DIANA における 要素名:HX24L)を適用した。コンクリートの 材料定数を表-2 に示す。なお、ダイラタンシー アングルとは塑性ポテンシャル曲面の角度を、 引張吸収エネルギーとは引張軟化領域での吸収 エネルギー(応力×変位)を意味する。

#### 3.4 解析結果および実験との比較

一例として、小池らの無欠陥供試体の実験結 果を基にひずみ軟化挙動を再現できるモデルパ ラメータを用いた解析から得られた、「端面摩 擦あり」および「端面摩擦なし」の供試体の平 均軸応力-ひずみ関係をそれぞれ図-7(a)およ び図-7(b)に示す。各図中の×印は、その時点 で解析計算が不安定となり収束しなかったこと を示す。ただし、「端面摩擦なし」の場合(図-7(b))には、解析計算の安定化のためにコン クリートの G<sub>f</sub>値を 10<sup>4</sup>倍に増加させて計算を行 った。吉田ら<sup>4</sup>は、圧縮解析においては、引張 吸収エネルギーG<sub>f</sub>を増大させることで、平均軸 応力-ひずみ関係に顕著な影響を与えずに安定 した解析が可能であると報告している。





図-7(a)および図-7(b)の解析 結果などを基にした,供試体強 度比-投影欠陥断面積比の関係 を図-8に示す。図-8(a)および(b) から分かるように,構成モデル におけるひずみ軟化の有無は, 供試体強度比-投影欠陥断面積 比の関係に顕著な影響を与えな い。また,「端面摩擦あり」の場 合,実験結果では,供試体強度



比は投影欠陥断面積比の増大に伴い,勾配の強 い低下を示すのに対して,解析結果では,投影 欠陥断面積比の増大に伴い,「端面摩擦なし」 の場合(図-8(b))と同様な勾配で,直線的に 低下している。本論文の三次元有限要素解析で は,「端面摩擦あり」の実験結果から得られる ような下側に凸な供試体強度比-投影欠陥断面 積比の関係を再現できなかった。

#### 4. 粒子モデルによる二次元圧縮破壊解析

前章と同様な角形コンクリートに対して,粒 子モデルによる二次元圧縮破壊解析を試みた。

### 4.1 粒子モデルの概要

図-9 に示すように、二次元粒子モデル<sup>5)</sup>は 水平材、鉛直材ならびに斜材の計 6 本のトラス 部材から構成されるユニットモデル(トラス構 造体)である。本ユニットモデルは、トラス部 材の微視(仮想)的な材料定数ならびに諸元を 同定したモデルであり、その大きさ(縦、横お よび奥行き)は単位長さ1を基本とする。本解 析では、ユニットモデルの長さは、解析対象と なるコンクリート供試体寸法(縦 20 cm×横 10 cm)に対して0.5 cm(奥行き1 cm)とした。

コンクリートの弾性定数および圧縮強度は小 池らの実験結果<sup>3)</sup>を用いた。コンクリートの引 張強度は圧縮強度の 1/10 と設定した。コンクリ ート供試体の圧縮特性を再現できるように粒子 モデルを構成するトラス部材の仮想的な材料定 数ならびに諸元を同定した(材料強度の設定方 法については文献5)を参照されたい)。

#### 4.2 解析モデル

図-10 に示すように、本解析モデルは計 800 個(=40×20)のユニットモデルにより構成さ れ、軸圧縮力(強制変位)を作用させた際、均 一材料のコンクリート供試体では、原則として、 変形が左右対称に生ずるように境界条件を設定 した。なお、図は「端面摩擦なし」のローラー 支持の境界条件を表す。

本解析における二次元粒子モデルでは、欠陥 部分を含む奥行き 10 cm 部分の解析的な取り扱 い方として、以下の解析条件を考慮した。すな わち,解析条件1:粒子モデルを構成する6部 材の材料強度(圧縮ならびに引張強度)を、例 えば、1 cm の欠陥の場合には 0.9 倍に低減させ る方法,解析条件2:それら6本のトラス部材 の断面積を低減させる(例えば, 2 cm の欠陥の 場合には、0.8 倍に低減させる)方法、である。 また、欠陥部分と周囲のコンクリート部分との 境界における「異種の材料により合成された界 面部材」, すなわち, 水平材および鉛直材の界 面強度は、コンクリート部分の部材強度を基準 として算定した界面部材の強度を「最大界面強 度」, 欠陥部分の部材強度を基準として算定し た界面部材の強度を「最小界面強度」と定義し た(強度の設定は文献5)を参照されたい)。

#### 4.3 解析結果

### 4.3.1 平均応カーひずみ曲線

最小界面強度を用いた解析

一例として, 粒子モデルにひずみ軟化型の応



図-12 強度比-断面積比関係(解析結果と実験結果との比較)

カーひずみ関係を用いて,無欠陥供試体ならび に欠陥供試体(1 cm~9 cmの大きさの欠陥を有 する供試体)の端部を「端面摩擦あり(ヒンジ 支持)」として圧縮破壊解析(解析条件 1:強度 低減を考慮)した応力–ひずみ曲線を図–11(a) に示す。図より,欠陥寸法が大きくなるに伴い 最大圧縮強度が低減してゆく傾向が分かる。な お,図中の〇印は,無欠陥供試体に対する実験 結果である。

#### 最大界面強度+最小界面強度を用いた解析

界面強度として両界面部材の強度(コンクリ ート強度および欠陥部分の強度を足し合わせた 強度)を用いて,無欠陥供試体および欠陥供試 体の端部を「端面摩擦なし(ローラー支持)」 として圧縮破壊解析(解析条件 2:面積低減を 考慮)した応力-ひずみ曲線を図-11(b)に示す。 この場合も,欠陥寸法が大きくなるに伴い最大 圧縮強度が低減してゆくが,「端面摩擦あり」 の場合と比較して,低減はそれ程大きくはない。

なお、本論文では、「端面摩擦あり・なし」 の解析モデルが無欠陥供試体の応力--ひずみ曲 線に与える影響については言及していない。

#### 4.3.2 強度比一断面積比関係

#### 最小界面強度を用いた解析

「端面摩擦あり」の解析結果に対する強度比

-断面積比を図-12(a)に示す。図から分かるように,解析条件1(強度低減を考慮)および解析条件2(面積低減を考慮)の場合とも,小池らによる実験結果<sup>3)</sup>の低減ほどではないが,最大圧縮強度は三上ら<sup>1)</sup>の提案した回帰曲線の近傍に位置して低減している。なお,小池らの実験結果の低減を再現するためには,界面強度を本解析で用いた界面強度より半分程度まで低下させる必要があることが解析から分かった。

# 最小界面強度+最大界面強度を用いた解析

「端面摩擦なし」の場合に対して,両界面部 材の強度を用いて解析した結果を図-12(b)に示 す。解析条件 1(強度低減を考慮)の解析結果 では,欠陥寸法が小さいとき(3 cm まで)には, 前章の三次元有限要素解析から得られたような 直線(右斜め 45°の直線)に沿った低減を示す が,欠陥寸法が大きくなるに従い直線から離れ て低減状態が徐々に大きくなる傾向にある。一 方,解析条件 2(面積低減を考慮)の場合には, 最大圧縮強度は,三次元有限要素解析から得ら れたような直線的な低減を呈する。

以上の解析結果を考察すると,「端面摩擦あ り」の場合には,供試体の上下端部から中央部 分まで横方向からある程度の拘束力を受けるた め,内部欠陥が存在すると供試体の圧縮強度の



図-13 変形図(3 cm 欠陥:ポストピーク領域)

低減率は、「端面摩擦なし」の場合と比べて大 きくなると推察される。一方、「端面摩擦なし」 の場合には、内部欠陥を有する供試体側面には 拘束力が作用しないため、圧縮強度は欠陥断面 積比の増大に比例して低減するものと推察され る。ここで、粒子モデルによる解析結果を要約 すれば、界面強度の大きさが内部欠陥を有する コンクリートの最大圧縮強度の低減具合を大き く左右すると結論付けることができる。

#### 4.3.3 変形図

一例として、欠陥寸法 0.3D(3 cm)の空隙を 有する供試体に対する圧縮破壊解析(解析条件 1)から得られたポストピーク時での変形を図-13に示す。図-13(a)および(b)は、それぞれ(a) 端面摩擦あり+最小界面強度とする解析,(b) 端面摩擦なし+最大および最小界面強度を合計 した量を界面強度とする解析から得られた変形 図である。「端面摩擦あり」の変形は、対称的 な円錐状のせん断破壊(図-13(a))を、「端面 摩擦なし」の変形は、内部欠陥の寸法が大きく なると非対称なせん断破壊面を伴う中央部分か ら左右対称な割裂破壊(図-13(b))を呈する。

## 5. まとめ

 三次元有限要素解析では、「端面摩擦あり」 および「端面摩擦なし」の両解析結果とも、 内部欠陥の大きさに伴う最大圧縮強度の低 減は、小池らが行った「端面摩擦なし」の 実験結果に一致する結果となった。

- 2) 二次元粒子モデルによる圧縮解析では、界面部材に最小強度(弱い材料の強度)を採り入れることにより、「端面摩擦あり」および「端面摩擦なし」の場合とも、三上らによる提案曲線に類似した強度低減を呈する。
- 3)界面部材の強度として最大強度および最小 強度の両者を用いると、小池らが行った「端 面摩擦なし」の実験結果と一致した傾向が 粒子モデルによる解析結果から得られた。
- 4) 粒子モデルを用いた結論として、界面強度 を調整することにより、小池らの行った「端 面摩擦あり」および「端面摩擦なし」の場 合の実験結果を再現できることが分かった。

#### 謝辞

本研究費の一部は,平成 17-18 年度文部科 学省研究費補助金(基盤研究 B,研究代表者: 水野英二)によった。記して謝意を表す。

#### 参考文献

- 三上貴正,上沢聡史,坂井映二:コンクリートの強度に及ぼす空隙欠陥の影響に関する考察,日本建築学会構造系論文集,第 504号, pp.1-6, 1998.2
- 2) DIANA Foundation Expertise Center for Computational Mechanics: DIANA Finite Analysis User's Manual, TNO Building and Construction Research. 1999
- 3)小池狭千朗,畑中重光,吉田幸夫,水野英 二:内部に欠陥を有するプレーンコンクリ ートの圧縮特性における寸法効果,日本建 築学会大会学術講演梗概集 pp.17-18,2002.8
- 4) 吉田幸夫,水野英二,畑中重光: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,コン クリート工学年次論文集, Vol.25, No.2, pp.55 -60, 2003
- 5) 水野英二,伊藤睦,久保田浩,青木健:コ ンクリート材料に対する粒子モデルの開発 ならびにそれの圧縮破壊解析への応用,コ ンクリート工学年次論文報告集, Vol. 27, No. 2, pp. 151-156, 2005 年 6 月