

横拘束コンクリート供試体の一軸圧縮挙動に関する一考察

佐藤芳樹¹・高橋良和²・後藤浩之³

¹京都大学大学院工学研究科
(〒615-8530 京都市西京区京都大学桂)

E-mail:ysato@catfish.dpri.kyoto-u.ac.jp

²京都大学防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

E-mail:yos@catfish.dpri.kyoto-u.ac.jp

³京都大学防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

E-mail:goto@catfish.dpri.kyoto-u.ac.jp

横拘束筋を有するコンクリート供試体の一軸圧縮挙動について、マクロ的およびミクロ的観点より検討した。一軸圧縮試験より、上部と下部に鉄筋を巻いたコンクリート供試体の挙動は、無補強コンクリート供試体と類似したものとなり、載荷面の摩擦の影響が大きいことを確認した。三次元有限要素法により、載荷面摩擦を極端に表現した条件の解析を実施し、この摩擦の影響により引張破壊を発生させることが示された。次に横拘束筋の拘束効果について、解析結果をI1-J2応力空間で表現した。破壊までの応力経路は横拘束筋を巻くことで、巻かないものに比べて左側に移動し、コンクリート供試体のせん断耐力が向上することを表現している。最後にX線CT画像を用いて一軸圧縮破壊後の供試体内部情報について考察する。

Key Words : Uniaxial compressive behavior, Confined Concrete, Loading test, 3D finite element analysis, X-ray CT scan

1. はじめに

コンクリート構造物を設計するに際し、道路橋示方書・同解説V耐震設計編¹⁾に示されているコンクリートの応力度-ひずみ曲線が広く用いられている。この式は帯鉄筋体積比をパラメータとして含んでいることから分かるように、コンクリートの構成式ではなく、横拘束されたコンクリート柱の一軸圧縮挙動に関する公称応力-公称ひずみ関係である。つまりこの関係式は、基礎となる実験に大きく依存し²⁾、その適用性について注意が必要となる。本研究では、横拘束されたコンクリート供試体の一軸圧縮挙動について、一軸圧縮実験によりマクロ的評価を、三次元有限要素解析によりミクロ的評価を行うとともに、従来外部の目視より評価せざるを得なかった破壊性状について、X線CT画像を用いて考察を行うものである。

2. 一軸圧縮載荷試験

実験供試体は、高さ200mm、直径100mmの円形断

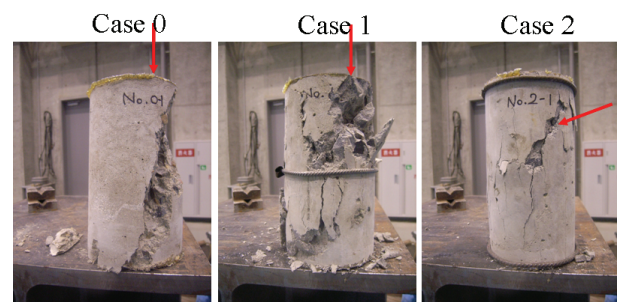


図-1 破壊性状

面を有する圧縮試験用試験体である。実験ケースとして、無補強コンクリート（ケース0）、中央に1本横拘束筋を巻いたもの（ケース1）、上下面に横拘束筋を巻いたもの（ケース2）、上下中央に横拘束筋を巻いたもの（ケース3）、中央に横拘束筋を三本巻いたもの（ケース4）の五種類を用意した。ケース0から2についてはばらつきが大きいと考えられたため、2本ずつ用意した。また載荷面の摩擦が大きいことが予想されたため、実験時にあらかじめグリースを塗り、一般的な一軸圧縮試験よりも摩擦が

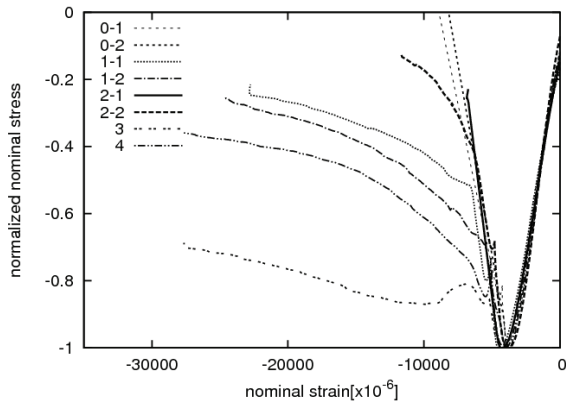


図-2 正規化公称応力-公称ひずみ関係

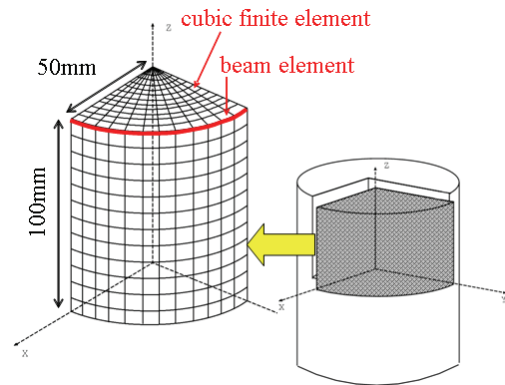


図-4 有限要素解析モデル

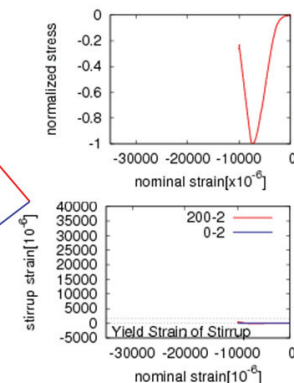
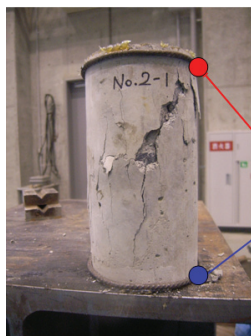
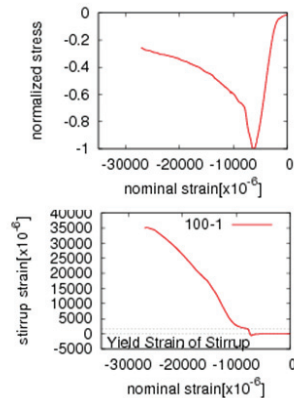


図-3 公称応力-公称ひずみ関係と鉄筋の真ひずみ

小さくなるよう配慮した。実験は変位制御による一軸圧縮荷重を行い、計測項目は荷重荷重、荷重面間変位、横拘束筋のひずみである。荷重面間変位を試験体高さで除することにより公称ひずみを、荷重荷重を断面積で除し、さらに最大値で除することにより正規化公称応力を算出する。

実験後の破壊性状を図-1に示す。ケース0では供試体天端の一面側から斜めにひび割れが発生、進展して、垂直に割れる破壊が生じ、また応力がすぐに0になり、ぜい性的な挙動を示した。ケース1では中央に横拘束筋を巻くことでケース0のような高さ方向全域に及ぶようなひび割れは抑制され、中規模なひび割れがたくさん確認された。ケース2ではケー

ス1のような緩やかな挙動を示さず、比較的ケース0に似た挙動を示した。

正規化公称応力-公称ひずみ関係を図-2に示す。横拘束鉄筋を中央に配置したケース1, 3, 4は応力降下が緩やかである。一方、同じ横拘束筋量を有するケース2とケース4は大きく挙動がことなり、ケース2はケース0とほぼ同じ挙動をしている。次にケース1と2について、破壊性状、正規化公称応力-公称ひずみ関係、横拘束筋のひずみを図-3に示す。これよりケース2では横拘束筋は降伏していないことが分かる。これより、摩擦の影響が大きいいためケース0においても両端で拘束されており、横拘束筋の影響が実験結果に大きく表れなかったと考えられる。また、図-1のようにひび割れが天端からではなく側面から発達していた。したがって、コンクリート供試体は横拘束筋の巻き数、位置など条件によってさまざまな破壊性状を示すことが分かる。

3. 三次元有限要素解析

(1) モデル化

コンクリートがわずかな要因でその挙動や破壊のメカニズムが大きく左右されてしまうことを弾塑性理論に基づき3次元非線形有限要素法を用いて検討した。コンクリート供試体を図-4のように3次元8節点立方体有限要素に分解し、対象性を考慮して全体の1/8の部分をモデル化した。境界条件は対称面においては直角方向に変位を拘束し、荷重面における横拘束、すなわちx, y方向の変位の拘束はないものとした。本解析を行うに際して圧縮を負として定義することにした。

降伏関数には以下に示すDrucker-Prager型降伏関数を用いた。また、関連流れ則を用い、塑性ポテンシャルは降伏関数と同じ形とする。

$$f = -\alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k \quad (1)$$

本研究では、定数 α , k として以下を用いている。

$$\alpha = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3(3 - \sin \phi)}}$$

$$k = \frac{6 \cos \phi}{\sqrt{3(3 - \sin \phi)}} \cdot \frac{1 - \sin \phi}{2 \cos \phi} F_c \quad (2)$$

ここに、 α は材料定数、 k はせん断降伏応力、 I_1 は応力テンソルの第1不変量、 J_2 は偏差応力テンソルの第2不変量、 F_c はコンクリートの円柱供試体強度 (N/mm^2)、 ϕ は内部摩擦角である。

(2) 無補強コンクリート

検討に先立って、コンクリート供試体上面に摩擦を考慮しない場合について解析を行うと 応力空間で全ての節点において I_1 が負の領域で降伏関数に重なり、圧縮応力によるせん断破壊しか見られなかった。しかし摩擦がないというのは理想的な条件であり、実際には実験結果などを見ても摩擦は働いていると考えられる。

摩擦を考慮するために極端な例として天面にある1個の節点（解析結果を示す要素の1個の節点とした）の変位の x , y 成分を固定する条件を加えて解析を行うと 応力空間において 図-5 のように I_1 が正の領域で降伏関数に重なる要素が存在し、引張応力による破壊が発生していることを示している。ただし、コンクリートが引張応力により塑性域に入る場合、本来は I_1 の正の領域で DP 型ではなく半円状であると考えられるため、このモデルでは I_1 が正で降伏した場合、以後の解析に信頼性はない。

初期不整を考慮するために天面の要素（解析結果を示す要素の隣の要素とした）のヤング率を大きくした条件を加えた解析を行うと 図-6 のように载荷当初は引張領域に大きく進むことはなかったが、ある時点から急速に引張領域に進み、引張応力で破壊する要素が存在した。

以上2つの条件についての解析を見ても分かるとおり、コンクリートはその挙動や破壊性状が初期不整などのわずかな要因によって巨視的な耐力が大きく左右されてしまうことが分かる。これはケース0の実験においてぜい性的に破壊したという実験結果と一致する。

(3) 横拘束コンクリート

横拘束筋による一軸圧縮挙動への影響を確認するために、摩擦の条件に横拘束筋を天面に梁要素としてモデル化して導入し解析を行った。梁要素は立方体有限要素と x , y , z の並進方向の自由度を一致させている。その結果は 図-7 のように I_1 が負の方向に寄るなどの横拘束筋による効果は表れなかった。この解析条件に対応するケース0とケース2の実験結果を比較すると破壊性状が異なっており、いずれかの解析結果が実験結果を反映していない可能性がある。その原因として横拘束筋を入れない解析において降伏後の挙動が引張領域で DP 型の直線上に拘束され

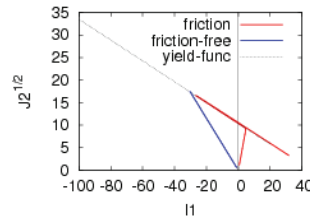


図-5 摩擦

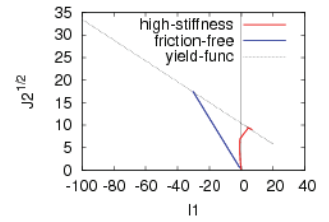


図-6 初期不整

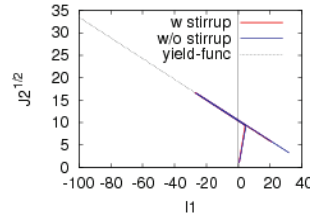


図-7 摩擦+横拘束筋

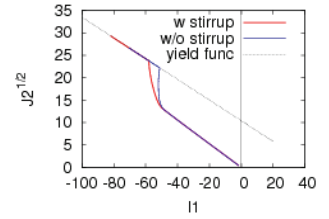


図-8 横拘束筋(中央)

ることにより、横拘束筋がないにも関わらず引張応

力により拘束されていた可能性などが考えられる。

次に、実験ケース0とケース1を対象とした解析を行った。本解析では上面の摩擦を考慮して上面の円周上以外の点の変位の x , y 成分を拘束してモデル化した。図-8 のように横拘束筋を入れることにより 応力空間において左側に移動した。これにより左上がりの降伏関数に当たりにくくなり、引張応力による破壊が生じる可能性を下げるだけではなく、 I_1 の絶対値を大きくしてせん断降伏応力を上げる拘束効果が確認できる。

4. 供試体内部情報

一軸圧縮载荷試験で用いたケース2の供試体について東芝ITコントロールシステム社製マイクロフォーカスX線CT装置TOSCANER-32250 μ hdkを用いたX線CT画像が撮影されている³⁾。CT画像から供試体内部のひび割れの三次元情報を抽出し、供試体内部での破壊性状について考察する。

図-9に、供試体内部のひび割れ情報を示す。若木らの研究により、供試体を1ボクセル $60.83 \mu m \times 60.83 \mu m \times 400 \mu m$ の集合体として、密度と関連が深いCT値情報を有している。ひび割れは空間として認識することができ、これらは供試体に比べて密度が極めて小さいため、閾値処理によりひび割れを認識をしている。撮影原画像の1ボクセルは扁平な直方体であったため、 xy 方向に関しては6つ間隔ずつに間引きして画素を立方体に近づけて表現している。図では、見易さを考えて xy 平面に関して中心から半径方向に赤から青のグラデーションをつけて表示している。更に、(c) 内部クラックでは中心から x , y 方向に半径の25%の厚さ分だけを表示している。これを見ると、上下の面近傍では層状に破壊しているようになっているが、これは鉄筋がこの位置にあるためであり、鉄筋をX線が透過せず画素値が

低くなってしまったためである。

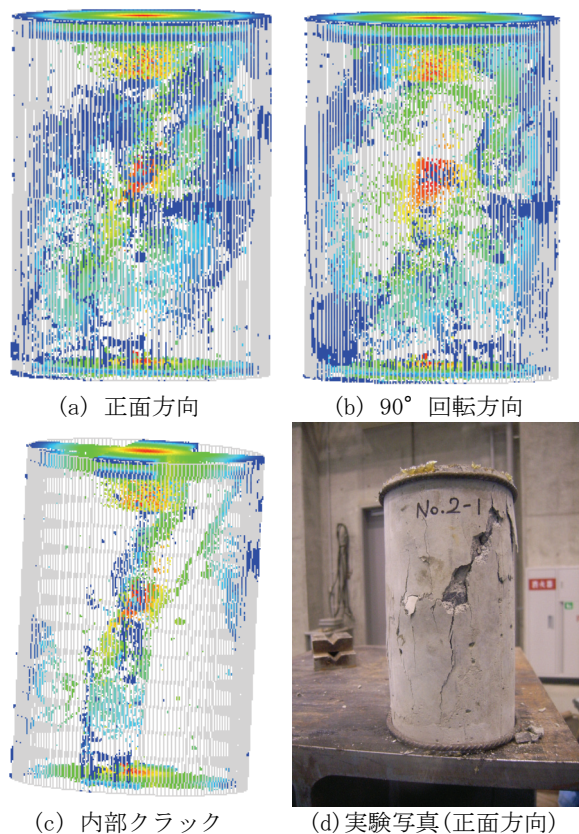


図-9 X線CT画像によるひび割れ抽出

ケース2に関する目視による破壊性状判定では、他

のケースのようなコンクリートの剥離は見られず、内部にひび割れがどのように生じているか確認することができなかった。図-9より外側から確認できる側面のひび割れが内部に斜めに進展していることが確認できる。これはケース0のひび割れの進展の様子と似た結果となっている。この結果は両ケースの正規化公称応力-公称ひずみ関係が似た挙動を示しているという実験結果とも一致する。

5. まとめ

実験より載荷面の摩擦の拘束の影響が大きく、上下面の横拘束筋の影響は実験結果に大きく表れないことが分かった。また、横拘束筋が公称応力-ひずみ関係の軟化挙動に影響を与えていることが分かった。解析からコンクリートはその挙動や破壊性状が初期不整などのわずかな要因によって巨視的な耐力が大きく左右されてしまうことが分かった。また、横拘束筋を入れることにより応力空間において左側に移動させることができることが分かった。これにより左上がりの降伏関数に当たりにくくなり、引張応力による破壊が生じる可能性を下げるだけではなく、IIの絶対値を大きくしてせん断降伏応力を上げる効果がある。X線CT内部画像から公称応力-公称ひずみ関係が似た挙動を示している供試体について内部情報が分からない供試体に関しても同じようなひび割れが生じていることが確認できた。

謝辞：本研究は文部科学省科学研究費補助金（若手研究(S)19676004番，代表：高橋良和）の助成を受けて実施したものである。X線CT装置による撮影に際し，京都大学工学研究科社会基盤工学専攻岡二三生教授，肥後陽介助教のご支援，ご助力を得た。ここに厚くお礼申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，2002。
- 2) 建設省土木研究所地震防災部耐震研究室：鉄筋コンクリート橋脚のじん性率算定に及ぼす拘束の影響に関する研究（その1）小型拘束コンクリート柱の圧縮載荷試験実験，土木研究所資料第3208号，1993
- 3) 若木伸也，高橋良和，澤田純男：X線CT法を用いたコンクリート円柱供試体の内部構成情報の抽出，第30回地震工学研究発表会論文集，2009

Study on uniaxial compression behavior of the confined concrete specimen

Yoshiki SATO and Yoshikazu TAKAHASHI and Hiroyuki GOTO

The uniaxial compression behavior of concrete specimen is searched from the aspect of the macro and micro. The experiments show that the behavior of the concrete with stirrups on the top and bottom is similar with one of the plain concrete. The simulation with the extreme friction case presents that the tensile failure occurs. The plain concrete is shown from the experiment and the simulation to be significantly affected by a small trigger such as the friction. The confined effects of stirrups are checked in the stress field of I1-J2. The stress path in case with the stirrup is located in left hand side of the case without the stirrup. It means that the shear strength of the concrete specimen will be improved. At last, the inside view of the specimen with the fracture is shown by X-ray computed tomography scanner.