

# 有限要素解析によるディープビームのせん断破壊評価 に関する基礎検討

Fundamental Study on shear failure assessment of deep beams by the finite element analysis

北海道大学大学院工学院 学生員 ○土田 僚(Ryo Tsuchida)  
北海道大学大学院工学院 学生員 渡辺 亘司(Koji Watanabe)  
北海道大学大学院工学研究院 正 員 佐藤 靖彦(Yasuhiko Sato)

## 1. はじめに

2012年に改訂された土木学会のコンクリート標準示方書[1]（以降「示方書」とする）に、新たに、非線形有限要素解析による照査の標準、そして、その中で、ひずみによる損傷指標が示された。これを契機に、有限要素解析の実務での活用がさらに進むものと思われる。

本研究では、せん断破壊メカニズムを損傷指標という観点から整理することを最終的な目的として、異なる二つの非線形有限要素プログラムを用いて、ディープビームのせん断破壊に関する比較検討を行ったので、その結果を報告する。

## 2. 解析概要

### 2.1 解析プログラム

本解析では二つの鉄筋コンクリート汎用非線形有限要素解析プログラム、WCOMD ver.2.0.0（以降 WCOMD とする）と ATENA 2Dver.4.3.1.0（以降 ATENA とする）を用いて2次元解析をおこなった。

#### 2.1.1 WCOMD の概要

WCOMD は、主に鉄筋コンクリート構造の2次元非線形動的解析・静的解析を扱うプログラムである。ひび割れ発生前のコンクリートの構成則は前川・岡村の弾塑性破壊モデルを採用しており、これにおいては等価応力と等価ひずみの関係が定式化されている。鉄筋コンクリート要素は多方向非直交固定ひび割れ群を含む鉄筋コンクリート領域の構成則に基づいて設定されている。なお、鉄筋破断については考慮されていない。WCOMD では破壊を直ひずみとせん断ひずみにより設定しているが、本研究ではそれらひずみの限界値を大きく設定し、ポストピークまでの計算が進むようにした。

#### 2.1.2 ATENA の概要

ATENA は、鉄筋コンクリートの静的非線形解析専用プログラムであり、コンクリートの圧壊、ひび割れ、鉄筋の降伏などを有限要素法により解析する。本研究では、コンクリートの構成則として等価1軸応力-ひずみ関係

に基づく直行異方性モデルを用いて、引張鉄筋・圧縮鉄筋・せん断補強鉄筋すべてを分散鉄筋モデルで再現した。また、ひび割れには分散固定ひび割れモデルを用いた。

## 2.2 解析諸元

### 2.2.1 解析供試体

本研究では、谷村らが行った4つの鉄筋コンクリートはり解析対象とし、それぞれ No.9, No.10, No.31, No.32（図-1 参照）とする[2]。No.9, No.10 は全長2200mm, No.31, No.32 は2600mmで、すべて300×450mmの矩形断面である。引張鉄筋はD29を4本、圧縮鉄筋はD16を2本配置し、No.10, No.31, No.32にはU形のスターラップを圧縮鉄筋に掛けて配置し、それぞれD6, D10, D13である。コンクリートの圧縮強度はNo.9が22.9N/mm<sup>2</sup>, No.10が22.5N/mm<sup>2</sup>, No.31が26.6N/mm<sup>2</sup>, No.32が27.4N/mm<sup>2</sup>である。

### 2.2.2 要素分割

本解析はすべてコンクリート部を1辺5cmの四角形要素に分割した。また、支点・載荷板には弾性要素を配置した。

## 3. 解析結果と考察

### 3.1 荷重変位関係

解析結果として紙面の都合上、No.32のみの荷重変位曲線を図-2、図-3に示す。また、解析結果と実験結果の最大荷重の比較を表-1に示す。どちらの解析プログラムでも $a/d$ が2.0のNo.31, No.32での精度は高く、実験に近い結果になっている。しかし、WCOMDでは

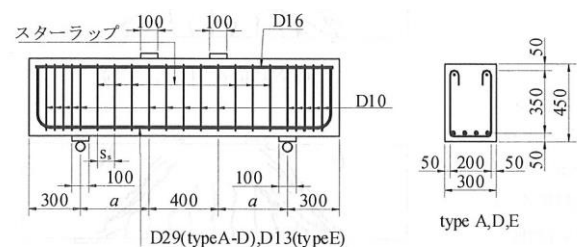
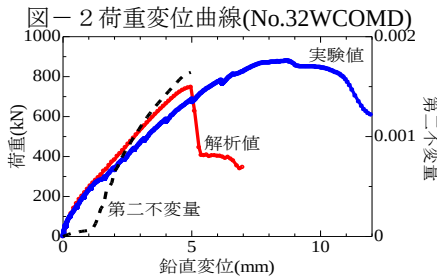
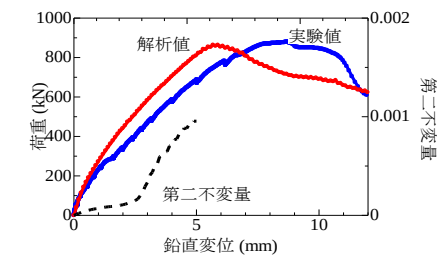


図-1 供試体の形状(mm)[2]

表-1 最大荷重比較

| 供試体名  | $a/d$ | せん断補強筋比 | 実験値     | WCOMD<br>解析値 | ATENA<br>解析値 | WCOMD 解析値<br>／実験値 | ATENA 解析値<br>／実験値 |
|-------|-------|---------|---------|--------------|--------------|-------------------|-------------------|
| No.9  | 1.5   | 0.00%   | 567.2kN | 715.1kN      | 568.8kN      | 126.1%            | 100.3%            |
| No.10 | 1.5   | 0.21%   | 927.3kN | 753.8kN      | 728.3kN      | 81.3%             | 78.5%             |
| No.31 | 2.0   | 0.48%   | 831.0kN | 786.5kN      | 742.4kN      | 94.6%             | 89.3%             |
| No.32 | 2.0   | 0.84%   | 879.7kN | 863.6kN      | 747.4kN      | 98.2%             | 85.0%             |



図－3 荷重変位曲線(No.32ATENA)

No.9, ATENA では No.10 の試体での精度があまり良くない。a/d が 1.5 と非常に小さいディープビームだと解実現象を上手く再現できていないことがわかる。これは解析プログラムのせん断の構成則が実際のせん断破壊を精度よく捉えられていないことが原因と考えられる。今後、検討を深めたい。

### 3. 2 ひび割れ性状

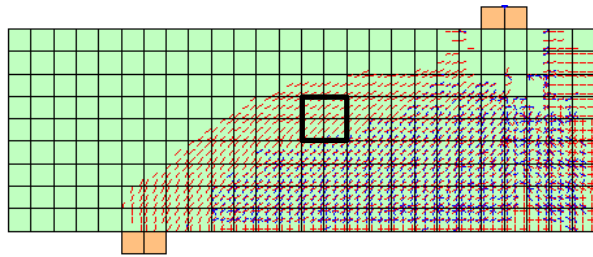
終局時のひび割れ性状の例として No.32 のひび割れ図を図－4、図－5に示す。どの供試体も、曲げひび割れが最初に発生し、その後せん断スパン全体にせん断斜めひび割れが発生し、そのせん断斜めひび割れが卓越してせん断破壊に至るという過程をたどっている。

### 3. 3 損傷指標の比較

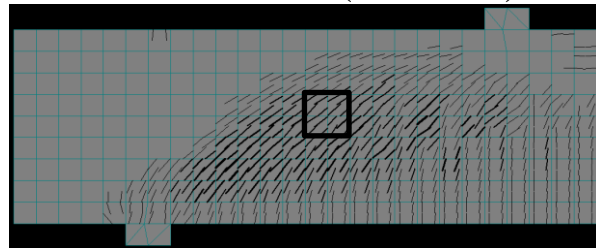
示方書に新たに非線形有限要素解析による照査であるひずみによる損傷指標の項目の一つで、斜めひび割れ発生の指標として偏差ひずみ第二不変量（以降「第二不変量」とする）が定義されている[1]。

本研究ではこの第二不変量の変化と、より単純なせん断ひずみ、引張主ひずみ、圧縮主ひずみの変化の比較をする。今回は簡易化のために示方書では円形で平均化している第二不変量をせん断スパン・高さ方向中央の4要素を取り出し平均化した（図－4、図－5参照）。第二不変量と荷重変位曲線を重ねて図－2、図－3に示す。第二不変量は斜めひび割れの発生指標になっているように、解析結果の荷重変位曲線のひび割れ発生地点と第二不変量が大きく増加し始める場所は概ね一致しているが、WCOMD では 1.5mm 程度で少し増加し、2.5mm 程度で急激に増加していて、ATENA では 1.3mm 程度で急激に増加している。

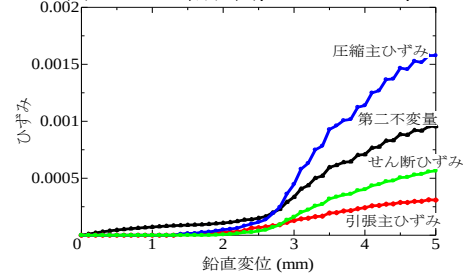
次に平均引張主ひずみ、平均圧縮主ひずみ、平均せん断ひずみを第二不変量と比較する(図－6、図－7参照)。平均する範囲は第二不変量の平均と同じ要素を用いて、絶対値を取っている。値の大小があり二つの解析プログラムで値の大きい順番が異なっているが、斜めひび割れが発生付近の変位ですべての指標が大きく上昇している。今回の解析からはすべてのひずみが斜めひび割れの発生の捉えることができると言える。



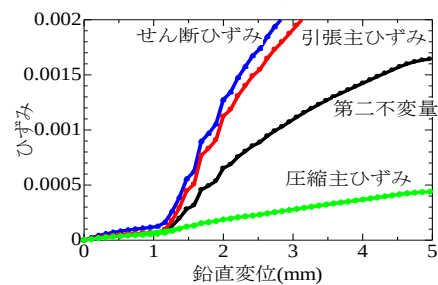
図－4 ひび割れ図(No.32WCOMD)



図－5 ひび割れ図(No.32ATENA)



図－6 損傷指標比較(No.32WCOMD)



図－7 損傷指標比較(No.32ATENA)

## 4. まとめ

本研究ではせん断破壊がするディープビームの力学的挙動のシミュレーションと実験結果との比較を行い、a/d が 2.0 の供試体では精度よく解析できているのに対して、a/d が 1.5 と非常に小さいディープビームでは精度が下がることが確認された。

損傷指標に関しては示方書の提案する第二不変量を用いた時と同程度の精度で評価できることから、平均せん断ひずみ等を用いることができることを示した。

## 謝辞

本研究にあたって、公益財団法人鉄道総合技術研究所の谷村幸裕氏、田所敏弥氏に実験データの提供をしていただきました。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- [1]土木学会：コンクリート標準示方書 2012 年改訂，2013.3
- [2]谷村幸裕，佐藤勉，渡邊忠朋，松岡茂：スターラップを有するディープビームのせん断耐力に関する研究，2004.5