

## Validaiton に向けた曲げ破壊型鉄筋コンクリートはりの 4 点曲げ試験

茨城大学 学生会員 ○羽生 隼輝  
茨城大学 正会員 車谷 麻緒

## 1. はじめに

米国機械学会 (ASME) では, V&V (Verification & Validation) とよばれる数値解析の信頼性を保証するための方法がガイドライン ASME V&V 10 (VV-10) に示されている. とくに Validaiton では, 同条件の実験を複数回実施して, 計算モデルの妥当性を確認することを重要であるとしている<sup>1)</sup>. しかし, 建設分野では ASME V&V 10 に基づいた検討事例は少なく, 鉄筋コンクリート (RC) はりを対象とした基礎的な研究に留まっている.

そこで, 本研究ではコンクリート構造物の非線形有限要素解析に対する V&V のうち, とくに Validation に関する基礎的な研究として, 実験結果の再現性に焦点を当てた実験を実施した. 具体的には曲げ破壊型 RC はりの 4 点曲げ試験を対象として, 同条件の実験を同時期に実施する. 同条件で一斉に実施した実験の不確かさを定量化することを目的とする.

## 2. 鉄筋コンクリートはりの 4 点曲げ試験

この章では, RC はりの挙動のばらつきを調べるために, 4 点曲げ試験を複数回実施した結果を示す.

## 2.1 実験概要

本研究の特徴は, 同条件で一斉に作製した曲げ破壊型 RC はりの実験を同時期に実施し, 実験結果の不確かさを検討することである. 対象とする RC はりの形状, 荷重・境界条件を図-1 に示す. 計 13 体の RC はりと計 45 体のコンクリート円柱供試体を作製した. 载荷の制御方法は手で载荷を行った. 試験体の状況に応じて, 载荷速度を適宜調整した.

## 2.2 実験結果

使用したコンクリートにおける材料のばらつきを評価するために, 計 45 体の円柱供試体に圧縮試験を実施し, 材料特性を調べた. コンクリートの材齢は 30 日とした. 図-2 に圧縮試験結果を示す. 全データにおける圧縮強度の平均値は 31.15 MPa, 標準偏差は 1.518, 変動

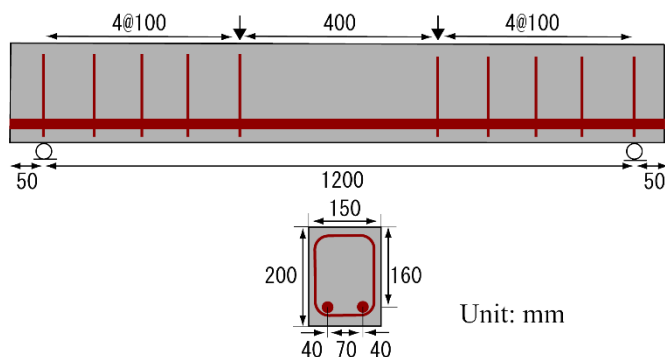


図-1 曲げ破壊型 RC はりの形状, 荷重・境界条件

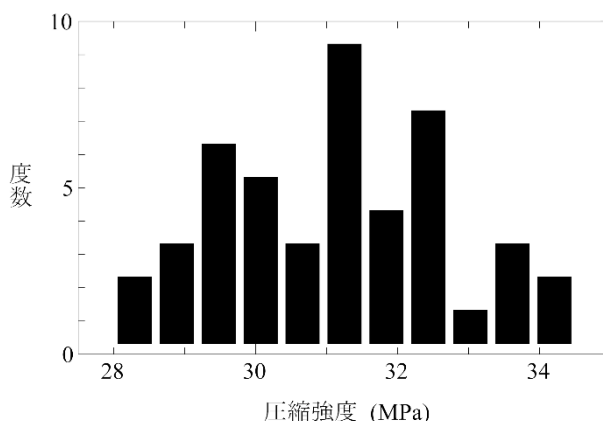
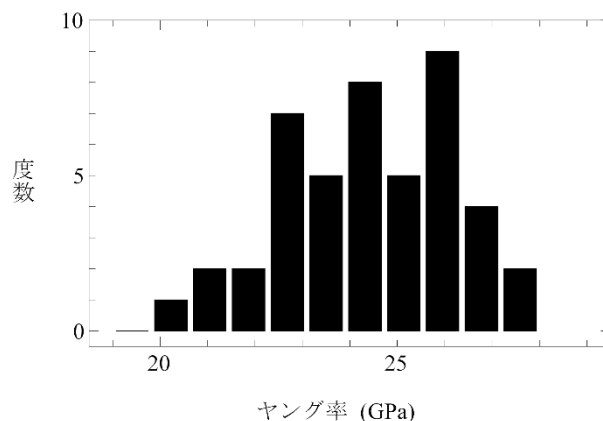


図-3 材料試験の結果

係数は 4.42%であった. 弾性係数の平均均値は 24.40 GPa, 標準偏差は 1.844, 変動係数は 6.66%であった. 鉄筋については, 材料のばらつきは小さいと想定し, RC はりに用いる異形鉄筋 D16 に対して, 6 本の引張試験

キーワード V&V 妥当性確認 不確かさ 非線形有限要素解析 鉄筋コンクリート

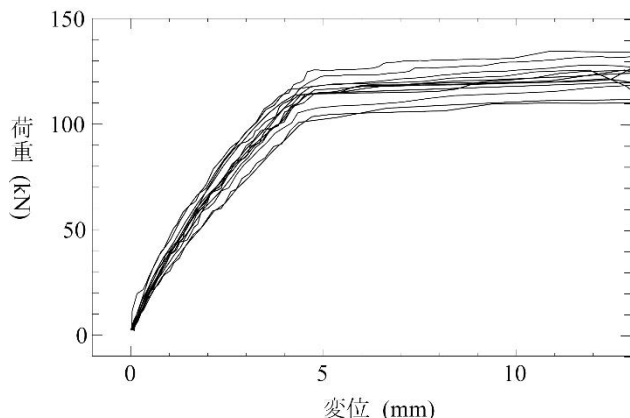


図-3 実験における荷重-変位関係

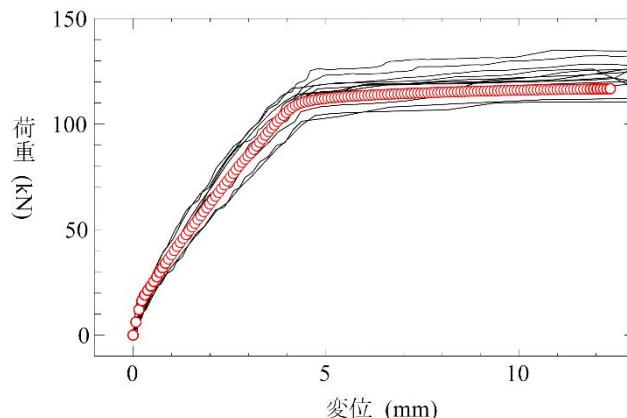


図-4 実験と解析における荷重-変位関係の比較

を実施した．鉄筋の挙動はほぼ一致しており，鉄筋の材料特性のばらつきは非常に小さいことを確認した．計13体のRCはりの4点曲げ試験については，試験体は同一条件で作製したが，実験結果からは挙動のばらつきが確認できた．図-3に得られた荷重-変位関係を示す．試験体の寸法誤差については，断面の幅，断面の高さ，長さ，有効高さの変動係数は，それぞれ0.09%，1.04%，0.68%，0.99%と非常に小さいため，実験における主な不確かさはコンクリートの材料特性のばらつきと判断できる．

### 3. 実験結果の再現性

本研究では，損傷モデル<sup>2)</sup>による非線形有限要素解析を計算モデルに用いる．

#### 3.1 計算モデル

コンクリートの構成モデルには損傷モデルを適用する．等価ひずみ $\varepsilon_e$ は次式で表される．

$$\varepsilon_e = \frac{k-1}{2k(1-2\nu)} I_1' + \frac{1}{2k} \sqrt{\left(\frac{k-1}{1-2\nu} I_1'\right)^2 + \frac{12k}{(1+\nu)^2} J_2'} \quad (1)$$

ここで， $\nu$ はポアソン比， $k$ は圧縮引張強度比， $I_1'$ は微小ひずみテンソルの第1不変量， $J_2'$ は偏差ひずみテンソル第2不変量である．応力とひずみの関係は次のように表される．

$$\boldsymbol{\sigma} = (1 - D(\varepsilon_e)) \mathbf{c} : \boldsymbol{\varepsilon} \quad (2)$$

$$D(\varepsilon_e) = 1 - \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_e} \exp\left\{-\frac{E\varepsilon_0 h_e}{G_f} (\varepsilon_e - \varepsilon_0)\right\} \quad (3)$$

ここで， $\mathbf{c}$ は弾性係数テンソル， $\boldsymbol{\varepsilon}$ はひずみテンソル， $E$ はヤング率， $\varepsilon_0$ は破壊発生ひずみ， $G_f$ は破壊エネルギー， $h_e$ は損傷を評価する領域長さである．鉄筋の構成モデルには von-Mises 塑性モデルを適用する．

### 3.2 非線形有限要素解析による実験結果の再現

非線形有限要素解析には，四面体1次要素を用いて，鉄筋の幾何形状を反映した3次元有限要素モデルを用いる．材料パラメータは，圧縮試験からコンクリートのヤング率 $E$ を25 GPa，ポアソン比 $\nu$ は一般的な値である0.2とした．その他のパラメータは試験結果から決定することが困難なため，コンクリートのとり得る範囲と試験結果から破壊発生ひずみ $\varepsilon_0$ は0.0009，圧縮引張強度比 $k$ は14，破壊エネルギー $G_f$ は0.1 N/mmとした．RCはりの4点曲げ試験の数値解析を行った．荷重-変位関係を比較した結果を図-4に示す．解析結果は実験結果を再現できていることが確認できる．

### 4. 今後の展望

本研究では，VV-10に基づいて，曲げ破壊型RCはりの4点曲げ試験を複数回実施した．実験における不確かさの検討を行い，主な不確かさはコンクリートの材料特性のばらつきとした．

VV-10に基づき，曲げ破壊型RCはりに対する計算モデルのV&Vを実施することを今後の展望とする．

### 参考文献

- 1) An Illustration of the Concepts of Verification and Validation in Computational Solid Mechanics: ASME V&V 10.1-2012, The American Society for Mechanical Engineers, 2012.
- 2) 相馬悠人，車谷麻緒：破壊力学に基づく損傷モデルによるRC部材の大規模破壊シミュレーションに関する基礎的検討，土木学会論文集 A2 (応用力学)，Vol.73, pp.I 263-I 271, 2018.