鉄筋コンクリートの Validation における非線形力学挙動のばらつきに関する基礎的検討

茨城大学　学生会員　○小林 樹人
茨城大学　学生会員　龍頭 正幸
茨城大学　正会員　車谷 麻緒

1. はじめに

近年，数値シミュレーションの品質と信頼性を保証する取り組みが重要視されている．米国機械学会（ASME） では，V&V（Verification&Validation：検証と妥当性確認）と呼ばれる数値シミュレーションの品質と信頼性を保証するための方法をガイドラインとしてまとめている[1]．V&V は，モデルの実装に誤りがないことや解析精度を検証する Verification と実験結果と解析結果を比較し，実現象の再現性を検証する Validation から構成されている．中でも Validation では，実験結果と解析結果に含まれる不確かさを定量化し，妥当性確認を行うことの重要性が示されている．しかし，通常使用されるシミュレーションには実験におけるばらつきが考慮されていないため，Validation の要件が満たされていない場合がある．

そこで本研究では，鉄筋コンクリートはりの非線形力学挙動に含まれる不確かさを検討するために，不確かさを定量化するための実験を行い，ばらつきの要因について実験的および解析的に検討することを目的とする．

2. 実験概要および実験結果

2.1 試験体概要

試験体の寸法と実験の条件を**図-1** に示す．本研究では，粗骨材の影響を排除するためにモルタルを使用し，検討対象をせん断補強筋のない鉄筋モルタルはりとした．異形鉄筋には D6（SD345）を用いた．3 日間に分けて計 9 体の試験体と計 8 体のモルタルの円柱供試体を作成した．モルタルの配合は，水セメント比（W/C）を 0.6，砂セメント比（S/C）を 1 とした．試験体内部におけるばらつきを極力小さくするために，細骨材を 2.36 mm のふるいにかけ，モルタルは供試体側面から打設した．蒸気養生を行い，材齢 14 日で万

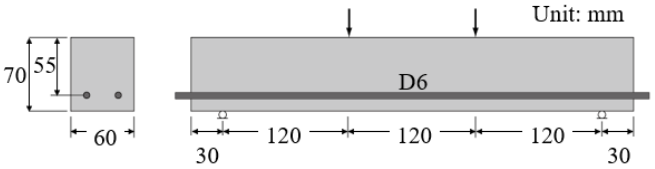

図-1 モルタルはりの 4 点曲げ試験概要

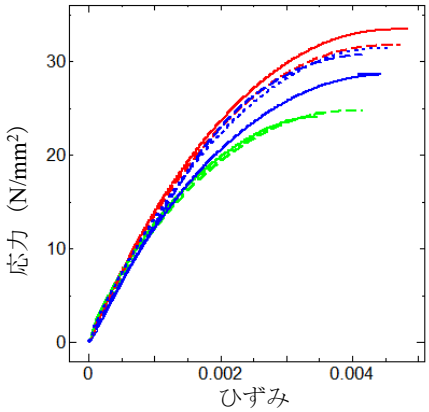

図-2 モルタル圧縮試験結果

能試験機による荷重制御 0.5 kN/min で 4 点曲げ載荷実験を実施した．

2.2 実験結果

モルタルのばらつきを調べるために計 8 体の円柱供試体を用い材料特性を調べた．**図-2** にモルタルの円柱供試体の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 28.72 MPa，標準偏差は 3.48 MPa，変動係数は 12.11 %であった．弾性係数の平均値は 13.56 GPa，標準偏差は 0.65 GPa，変動係数は 4.8 %であった．異形鉄筋 D6 は引張試験を 2 度行ったが，実験結果にばらつきはほとんどなかった．

モルタルはりの実験により得られた荷重−変位関係を**図-3** に示す．紙面の都合上，解析結果とともに記載しているが，解析条件などは以降で詳しく説明する．図中の白丸はそれぞれの実験結果のひび割れ発生荷重を示している．結果より，ひび割れ発生荷重，ポストピーク挙動についてはほぼ同様の結果が得られてい

キーワード　Verification & Validation，不確かさ，ばらつき，鉄筋コンクリートはり
連絡先　〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1 茨城大学工学部　TEL：0294-38-5162　FAX：0294-38-5268

表-1 4 点曲げ試験の解析で使用するパラメータ

	E (GPa)	ν	k	G_f (N/mm)	ε_0	μ
モルタル	13	0.2	15	0.05	0.00008	—
界面	0.3	0.2	15	0.4	0.004	0.2

	E (GPa)	ν	σ_y(MPa)	Q (MPa)	b
鉄筋	200	0.3	440	250	40

る．一方で，ひび割れ発生後の挙動や最大荷重，最大荷重時変位についてはばらつきの大きい結果となった．ひび割れ発生後の挙動がばらつく要因として，モルタルの弾性係数やひび割れ後の剛性のばらつきが考えられる．また，最大荷重がばらつく要因としてはモルタルの圧縮強度のばらつきなどが考えられる．以上より，モルタルの材料特性のばらつきが実験結果に大きく影響すると考えられる．

3. 数値シミュレーションによる再現

破壊シミュレーション手法として，既往の研究で提案されている破壊面の摩擦接触を考慮した損傷モデル[2)]を適用する．試験体の対称性を考慮した 1/4 モデルを作成し，有限要素には四面体 1 次要素を使用した．節点数 44366，要素数 242645 である．また，鉄筋の表面に 0.5 mm の界面相を作成した．**表-1** にモルタルと界面，鉄筋の材料パラメータを示す．強制変位 3 mm を 240 step で与え，変位制御により解析を行った．

図-3 に解析における鉄筋モルタルはりの荷重－変位関係を示す．図中の赤の三角で表した点は解析結果におけるひび割れ発生点を表している．解析結果と実験結果を比較すると，実験結果の挙動を同様に再現できており，初期剛性以外については実験の中間的な値になることが確認できた．また，ひび割れ発生荷重についても実験値の方が解析結果より低い値となっているが，おおよそ再現できていることが見て取れる．

図-4 に実験と解析におけるひび割れ分布を示す．黒の実線がモルタルはり 9 体分の実験結果のひび割れ，カラーコンターは解析結果のひび割れを示している．解析結果は等価ひずみを用いて可視化した．ひび割れ分布についても，斜めひび割れや中央付近のひび割れなどおおよそ再現できていることが見て取れる．

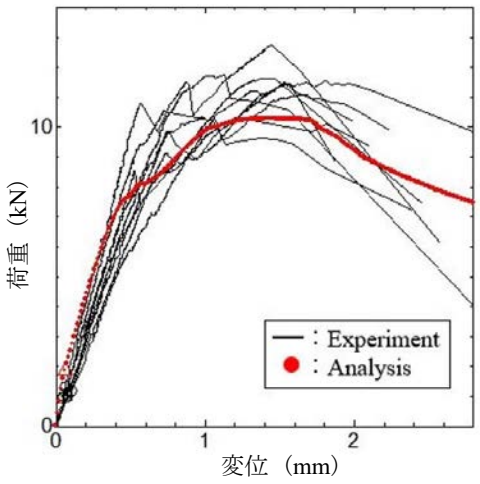

図-3 実験と解析における荷重−変位関係

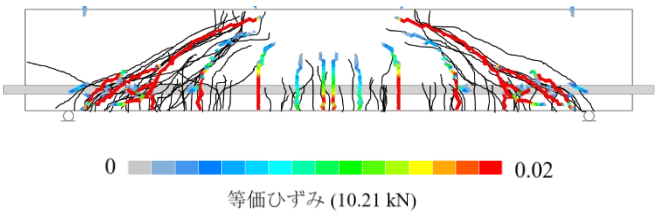

図-4 実験と解析における表面のひび割れ分布

4. おわりに

鉄筋コンクリートはりの非線形力学挙動に含まれる不確かさを検討するために，せん断補強筋のない鉄筋モルタルはりの実験を行い，実験のばらつきの要因について考察した．さらに実験結果と解析結果を比較することによって解析結果の再現性について考察した．

今後は，モルタルの材料特性のばらつきを評価するために，解析の各種のパラメータを変更し検討を進めていく．具体的には，モルタルの材料特性のばらつきを考慮し，材料パラメータの破壊発生ひずみやヤング率を変更した解析を複数回行うことによって実験のばらつきの要因について詳しく検討していく予定である．

参考文献

1) The American Society of Mechanical Engineers: ASME V&V 10-2006 Guide for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics, ASME, New York, NY, USA, 2006.

2) 相馬 悠人，車谷 麻緒：界面の摩擦接触を考慮した損傷モデルによる 鉄筋コンクリートの破壊シミュレーション，土木学会論文集 A2（応用力学），Vol. 75，pp. I_165-I_173，2019