

論文 RC はりの耐荷・変形状の再現性に関する基礎的研究

山本 佳士*1・上田 尚史*2・小倉 大季*3・車谷 麻緒*4

要旨：本研究は、コンクリート構造分野のシミュレーションの V&V、特に不確かさ評価を含む Validation に向けた基礎的研究として、RC はりの載荷実験におけるばらつきの定量的な評価を試みたものである。具体的には、曲げ破壊およびせん断破壊する 2 種類の RC はりを対象とし、5 つの研究機関で、詳細は異なるもののほぼ同一の条件下で、それぞれ複数の供試体に対して 4 点曲げ載荷実験を実施した。さらに、曲げ破壊型およびせん断破壊型、それぞれ 15 体ずつの RC はりの実験結果から、剛性、耐力等の応答値の分布、ばらつきの度合いを定量的に評価した。

キーワード：Verification & Validation, RC はり, 曲げ破壊, せん断破壊, 不確かさ評価

1. はじめに

建設工学分野における構造物には、他の工学分野と比較して、主に 2 つの特徴がある。ひとつは、構造物のスケールが非常に大きいこと、もうひとつは、コンクリートのような非線形性の強い材料が用いられることである。ほとんどの場合、実スケールの実験は難しいことから、実際の構造物の挙動を評価するには、数値シミュレーションに頼らざるを得ない。RC 構造物のように、力学挙動が複雑な問題の場合、計算モデルの理解や計算結果の考察に専門的な知識と経験が必要になる。しかし、それらが十分でないと、数値解析の予測性能や適用限界を理解せずにシミュレーションが実行されることになる。そこで近年、シミュレーションに対する品質と信頼性を保証するための取り組みが重要視されている。

米国機械学会（以下、ASME）では、V&V (Verification & Validation: 検証と妥当性確認) と呼ばれる、工学シミュレーションの品質・信頼性を保証するための考え方や方法をガイドラインとしてまとめている¹⁾。V&V は大きく 2 つの項目に分かれており、計算モデルが正しく実装され、正しい解が得られているかを検証する Verification と、計算結果と実験結果を比較して、実際の挙動を正しく予測できているかを検証する Validation で構成される。

RC 構造物の場合、力学挙動の非線形性が強いことから、特に Validation が重要な役割を担うと考えられる。ASME の V&V ガイドライン、あるいは日本原子力学会、「シミュレーションの信頼性確保に関するガイドライン」²⁾でも、Validation の要件として、検証用に特化した実験を行い、各種の不確かさを定量化したうえで、計算モデルの妥当性を確認することの重要性が述べられている。一方、RC 部材の載荷実験においては、材料や供試

体の作製に関するばらつきに加えて、実験器具や境界条件、実験者の技術レベルなども実験結果に大きく影響する。しかし、通常実施されている実験や、文献に示されている実験データは、実験のコストが大きいことにも起因して、同一条件下における実験は 1 回、多くても 3 回程度であり、実験結果の分布、不確かさは評価されていない場合がほとんどである。

そこで本研究では、コンクリート構造分野のシミュレーションの V&V、特に不確かさ評価を含む Validation に向けた基礎的研究として、RC の載荷実験におけるばらつきの定量的な評価を試みた。具体的には、曲げ破壊およびせん断破壊する 2 種類の RC はりを対象とし、5 つの研究機関で、詳細は異なるもののほぼ同一の条件下で、それぞれ複数の供試体に対して 4 点曲げ載荷実験を実施した。さらに、実験により得られた各種応答値のばらつきの程度を定量的に評価するとともに、そのばらつきの要因について検討した。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

本研究では、破壊モードの異なる 2 種類の RC はりを対象とした。破壊モードは、曲げ引張破壊（曲げ破壊型）と斜め引張破壊（せん断破壊型）を想定し、図-1 に示す RC はりを作製した。

供試体の断面諸元は、曲げ破壊型、せん断破壊型ともに、幅は 150mm、有効高さは 150mm であり、引張鉄筋として D16 を 2 本配置した。鉄筋比は 1.77% である。なお、主鉄筋の端部は、180 度フックにより定着した。曲げ破壊型の RC はりには、D6 を用いた閉合スターラップを 75mm 間隔で配置した。また、圧縮鉄筋として断面上

*1 名古屋大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 博士（工学）（正会員）

*2 関西大学 環境都市工学部都市システム工学科准教授 博士（工学）（正会員）

*3 清水建設 技術研究所 社会システム技術センター 博士（工学）（正会員）

*4 茨城大学大学院 理工学研究科 都市システム工学専攻 博士（工学）

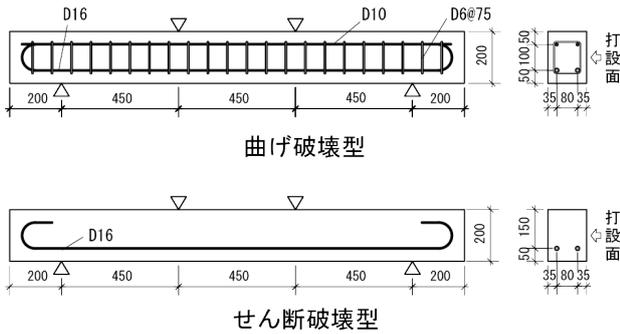


図-1 供試体概要

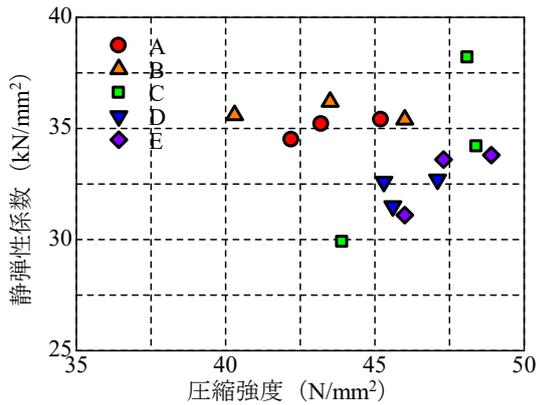


図-2 圧縮強度－静弾性係数関係

縁から 50mm の位置に D10 を 2 本配置した。一方、せん断破壊型の RC はりには、主鉄筋のみを配置し、スターラップ、圧縮鉄筋ともに配置しないものとした。

供試体内部におけるコンクリート強度のばらつきの影響を極力避けることを目的として、コンクリートは供試体側面から打設することとした。供試体の作製は、三重県内のコンクリート工場にて行った。供試体は、打設後、24 時間蒸気養生を行った後、脱型した。その後は、プラスチック製のシートでラップすることで、封緘養生とした。材齢 14 日に、それぞれの試験機関へと移動させた。なお、試験体数は、1 機関について、曲げ破壊型と

せん断破壊型を、それぞれ 3 体ずつとした。

2.2 材料強度

図-2 に機関ごと実施したコンクリート強度試験の結果を示す。各機関 3 体ずつ、計 15 体の試験結果を示している。それぞれの機関において荷材材齢は異なるものの、蒸気養生を行ったこともあり、材齢による強度の違いは見られなかった。すべての結果を用いると、圧縮強度は、平均値 45.4N/mm²、標準偏差 2.35N/mm²であり、静弾性係数は、平均値 34.0kN/mm²、標準偏差 2.09kN/mm²であった。

鉄筋のヤング係数と降伏強度は引張試験により求めた。D16 は、ヤング係数は 186kN/mm²、降伏強度は 401N/mm²であり、D10 は、降伏強度は 398N/mm²であった。D6 は明確な降伏棚を示すことは無く、破断強度は 632N/mm²であった。

2.3 境界条件

荷荷は 4 点の曲げせん断荷荷にて行った。図-1 に示すように、曲げ破壊型、せん断破壊型ともに、せん断スパン長を 450mm、等曲げ区間を 450mm とした。

境界条件や荷荷方法は、各機関の都合により試験機関で若干異なる。表-1 に各試験機関の境界条件と荷荷方法を示す。試験機関 A、D、E では、荷荷点と支点に幅 50mm の鋼板を設置した。試験機関 B および C では、荷荷点にのみ幅 50mm および 30mm の鋼板を設置した。

荷荷点および支点の境界条件として、試験機関 A、D、E では水平方向の変位を拘束しない条件とした。ただし、試験機関 A、E では、荷荷点において若干の摩擦が存在していることを確認している。一方、試験機関 B、C では試験機の関係上、荷荷点および支点は初期位置で固定されており、供試体の変形には追従しない条件である。その結果、後述するように、曲げ破壊型の供試体においては、降伏以降に荷荷版と供試体が数 mm ずれることとなった。回転については、いずれの試験機関においても拘束しない条件とした。

表-1 境界条件と荷荷方法

試験機関		A	B	C	D	E
荷荷点	板幅 (mm)	50	50	30	50	50
	水平移動	フリー (摩擦あり)	荷荷点間隔を完全固定	荷荷点間隔を完全固定	フリー (摩擦なし)	フリー (摩擦あり)
	回転	フリー	フリー	フリー	フリー	フリー
支点	板幅 (mm)	50	不使用	不使用	50	50
	水平移動	フリー	支点間隔固定	支点間隔固定	フリー	フリー
	回転	フリー	フリー	フリー	フリー	フリー
荷荷方法	制御方法	手動	自動	手動	自動	手動
	荷荷速度	—	～降伏： 0.01mm/sec 降伏～： 0.1mm/sec	—	～降伏： 0.1kN/sec 降伏～： 0.05mm/sec	—

載荷方法は、試験機関 A, C, E では、各機関 1 名のオペレータにより手動で加力した。したがって、載荷速度はオペレータの感覚により制御されることとなった。一方、試験機関 B, D では、コンピュータにより自動制御とした。試験機関 B では、降伏までは 0.01mm/sec、降伏以降は 0.1mm/sec の変位制御により加力した。試験機関 D では、降伏までは 0.1kN/sec の荷重制御により、降伏以降は 0.05mm/sec の変位制御により加力した。

3. 実験結果

3.1 荷重-変位応答

図-3 に、各機関の実験により得られた荷重-変位関係を示す。ここで、変位はスパン中央で計測した変位から、支承部の変位を引いたものである。なお、応答値のばらつきの定量的な評価は次節で説明し、ここでは、定性的にばらつきを評価する。まず、曲げ破壊型の曲げ降伏までの挙動に着目すると、同機関内では応答のばらつきは比較的小さく、一方、各機関の結果を全て載せた図に着目すると、機関の間で応答の差が大きくなっていることが確認できる。鉄筋が降伏した以降の挙動は、同機関内の結果でもばらつきは徐々に大きくなり、特に、最大荷重時の変位のばらつきは大きくなっている。なお、本研究では鉄筋のひずみを計測していないが鉄筋の降伏は荷重-変位関係の勾配の変化点から判断した。その後、荷重低下が生じた後、いずれの供試体も約 75kN 程度の荷重を保持して変位が増加し、さらに、変位がおよそ 60mm から 90mm 付近で 2 回目の荷重低下が生じている。

つづいて、せん断破壊型の結果に着目すると、いずれの機関においても、3 体中 1 体あるいは 2 体は、鉄筋降伏後にせん断破壊が生じた。なお、本実験で用いた供試体の、等価応力ブロックを用いた終局曲げ耐力算定式から得られた最大荷重 P_u は 96.4kN、土木学会コンクリート標準示方書の式より得られた斜めひび割れ発生荷重は 75.4kN であり、曲げせん断耐力比は 1.28 であった。ここで、材料強度は、試験により得られた値を用いて計算している。曲げ破壊型供試体の実験により得られた最大荷重は、上記の計算値と比較すると、やや大きい傾向にあった。せん断破壊型供試体では、計算により得られた斜めひび割れ発生荷重と同程度の荷重で終局に至っているものもあれば、斜めひび割れ発生荷重に達した後も荷重が増加しその後鉄筋降伏前に荷重低下に至るケース、および前述のように鉄筋が降伏し荷重低下に至るケースもあった。このばらつきの要因については、斜めひび割れの進展性状を踏まえて、以降で詳しく説明する。

3.2 応答値のばらつきの定量的評価

表-2 に、実験により得られた剛性、限界値等の応答値の一覧、および表-3 に、機関ごとの応答値およびす

べての応答値を用いて評価した変動係数の一覧を示す。なお、C#1 は載荷初期の計測のエラーにより初期剛性を評価することができなかった。表-3 から、初期剛性は、各機関内の応答値および全体の応答値ともに、他の応答値と比べると大きいことが分かる。ひび割れ発生後の剛性の変動係数は、初期剛性と比べれば小さくなっていることが分かる。また、全体的に、荷重に関する応答値は、剛性、変位に関する応答値よりも、変動係数が小さい。さらに、曲げ破壊型の応答値に共通して言えることとして、各機関内の応答値の変動係数に比べて、全体の応答値で評価した変動係数は著しく大きくなっている。本研究では前述のように一つの工場で作製した RC はりを全機関で使用している。また、各機関で載荷材齢と同時に実施した試験により得られた圧縮強度の変動係数は 3.7%であった。以上のことから、曲げ破壊型供試体の応答値のばらつきの要因として、供試体の材料特性、施工に関するばらつきよりも、各機関の境界条件、計測方法の違いの方が顕著であるといえる。せん断破壊型の応答値の変動係数は、曲げ破壊型と比べてもさらに大きくなっている。また、各機関の中の応答値で評価した変動係数および全機関のデータを用いて評価した変動係数ともに大きいことが確認できる。これは、同一機関内の、同一の条件の実験においても、複数の破壊モードが生じたためである。

図-4 には、曲げ破壊型供試体の実験により得られたひび割れ発生後の剛性、降伏荷重および最大荷重と圧縮強度の関係を示す。それぞれの応答値と圧縮強度の相関係数は、ひび割れ発生後の剛性で 0.121、曲げ降伏荷重で 0.266、最大荷重で 0.305 でありいずれも相関は見られなかった。すなわち、応答値のばらつきの要因としては、コンクリートの材料強度よりも、その他の条件、例えば境界条件の違い等の方が、影響が大きいと考えられる。また、図-3 の荷重-変位関係からも分かるように、ひび割れ発生後の剛性、降伏荷重、最大荷重ともに、機関 C により得られた応答値が最も大きくなった。一方で、機関 C と同様な境界条件を適用した機関 B は、いずれの応答値も、5 つの機関の中では比較的小さい値を示している。また、機関 B および機関 C と支承の水平方向の拘束条件が異なる機関 A の結果が、機関 C の値に次いで、剛性、降伏荷重、最大荷重が大きくなっている。さらに、機関 A および機関 E では、ほぼ同一の境界条件で実験を行っているものの、応答値には差が見られた。すなわち、境界条件に関する仕様のみで、応答値の変動、大小の傾向を把握することはできなかった。表-1 で示した、各機関の載荷装置、境界条件の諸元の他にも、各種載荷治具の摩耗、不陸処理の詳細などの不確かさも影響していることが考えられ、各機関の間における応答値のばらつ

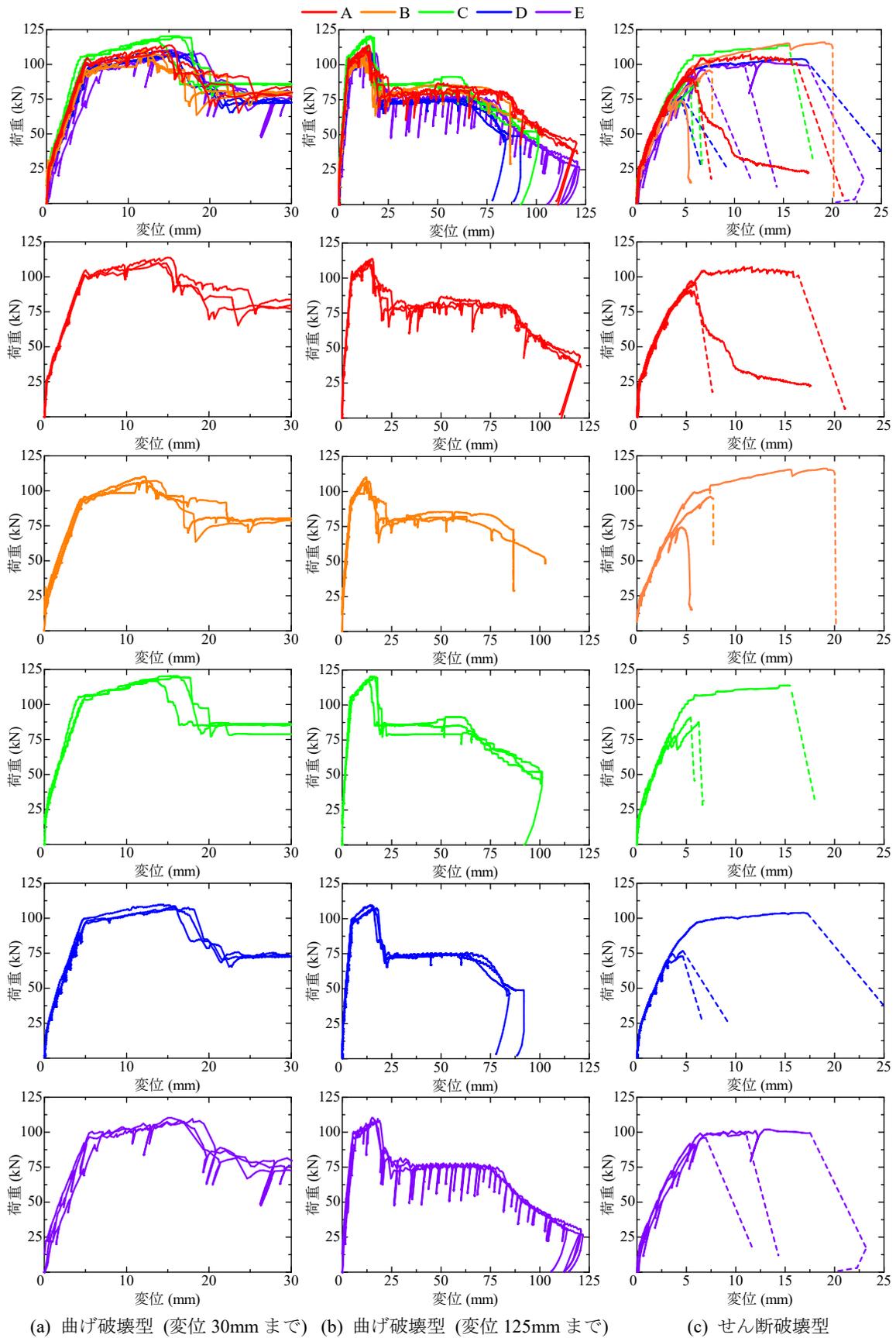


図-3 荷重-変位関係

きの影響要因に関しては今後詳細に調査していく予定である。

3.3 ひび割れ・破壊性状

写真-1に、機関Dの曲げ破壊型供試体(D#3)の実験に

表-2 応答値の一覧

		曲げ破壊型					せん断破壊型			
		初期剛性 (kN/mm)	ひび割れ 発生荷重 (kN)	ひび割れ 後の剛性 (kN/mm)	曲げ降伏 荷重 (kN)	曲げ降伏 時の変位 (mm)	最大 荷重 (kN)	最大荷重 時の変位 (mm)	最大 荷重 (kN)	最大荷重 時変位 (mm)
A	#1	85.5	25.4	17.5	105	5.03	114	15.3	95.5	5.97
	#2	65.7	26.6	16.6	101	5.03	110	13.9	90.1	5.47
	#3	103	25.1	17.0	101	4.87	110	14.8	104	15.8
B	#1	61.9	29.7	14.9	96.0	4.93	110	12.2	74.0	4.48
	#2	65.0	22.7	16.0	93.4	4.76	107	12.1	116	19.2
	#3	55.5	23.2	13.8	93.9	5.12	107	13.6	95.6	7.45
C	#1	-	18.8	22.2	106	4.16	117	12.5	87.3	6.22
	#2	78.8	21.6	17.0	103	4.88	120	15.6	90.9	5.44
	#3	98.9	19.1	17.8	107	4.92	120	16.0	114	15.5
D	#1	80.4	20.3	15.5	98.4	5.32	107	16.1	104	16.9
	#2	80.3	18.8	17.7	99.8	4.83	110	14.5	76.7	4.63
	#3	78.3	19.8	16.0	96.9	5.12	108	15.7	72.8	4.58
E	#1	34.7	22.2	13.4	97.2	7.16	110	18.0	96.0	6.96
	#2	44.7	18.5	15.6	96.6	5.47	108	17.0	101	11.0
	#3	49.5	22.2	15.0	99.3	5.43	110	15.4	102	13.4
標準偏差		19.2	3.18	2.01	4.01	0.620	4.32	1.67	12.6	5.04
平均値		70.1	22.3	16.4	99.6	5.14	111	14.8	94.6	9.53

表-3 応答値の変動係数の一覧

* セル内の数値の単位は%

	初期剛性	曲げ破壊型					せん断破壊型		
		ひび割れ 発生荷重	ひび割れ 後の剛性	曲げ降伏 荷重	曲げ降伏 時の変位	最大 荷重	最大荷重 時の変位	最大 荷重	最大荷重 時変位
A	18.0	2.52	2.16	1.84	1.52	1.69	3.95	5.93	52.4
B	6.49	12.7	6.08	1.17	2.98	1.35	5.33	18.0	61.3
C	11.3	6.17	2.19	1.53	0.41	0.30	1.20	11.1	48.1
D	1.23	3.18	5.77	1.20	3.95	1.17	4.36	16.4	66.5
E	14.3	8.32	6.33	1.18	13.4	1.08	6.29	2.56	25.4
すべて	27.3	14.3	12.3	4.03	12.1	3.89	11.3	13.3	52.9

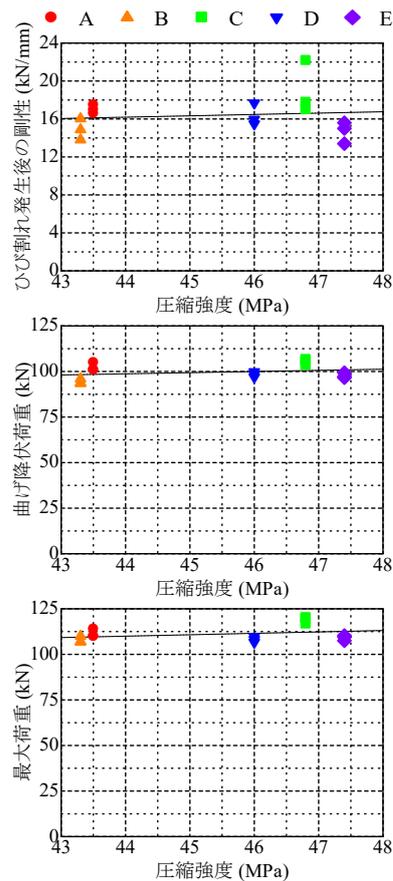


図-4 曲げ破壊型供試体の
応答値-圧縮強度関係の例

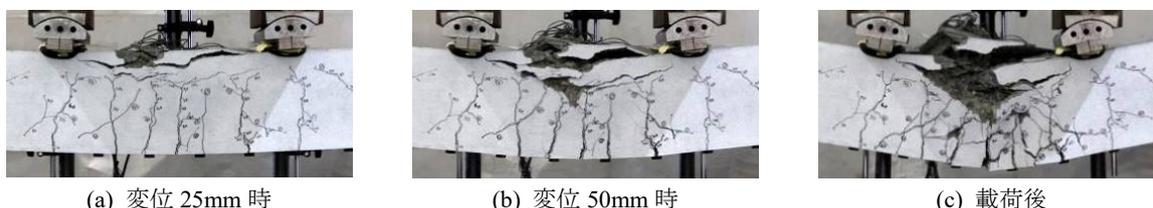


写真-1 曲げ破壊型供試体の破壊進展過程 (D#3)

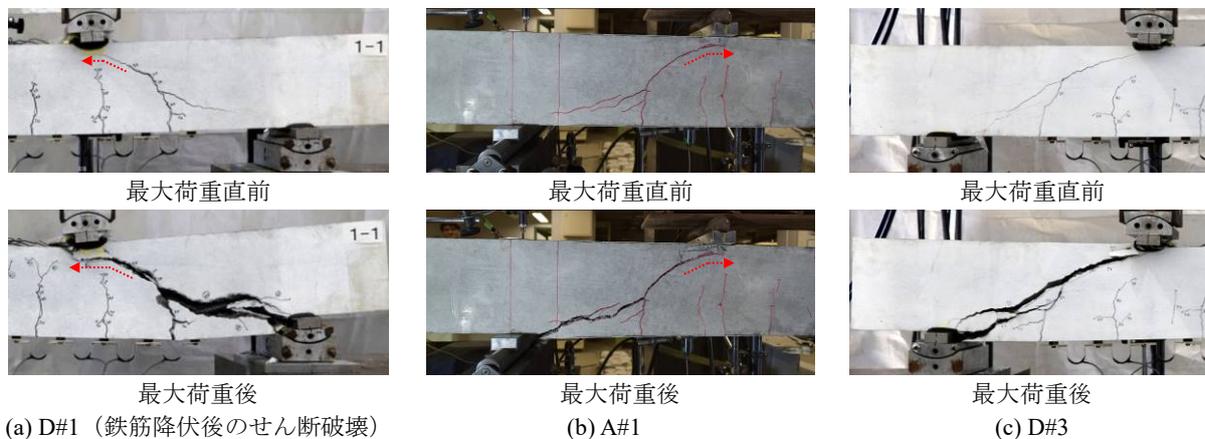


写真-2 せん断破壊型供試体の破壊進展過程

より得られた、ひび割れ・破壊性状を示す。写真に示すように、鉄筋降伏後、はり上縁コンクリートの圧縮破壊によって最大荷重を迎える典型的な曲げ引張破壊挙動を

示した。ポストピークの詳細な考察に関しては、紙面の都合上別報に譲るが簡単に説明すると以下のような応答を示した。同写真に示すように、はり上縁の圧縮破壊の

後は、かぶりコンクリートが剥離するが、圧縮鉄筋、スターラップで囲まれたコアコンクリートが抵抗して一定の荷重を保って変位する。その後、圧縮鉄筋が座屈し、コアコンクリートが圧縮破壊して、2回目の荷重低下に至った。上記の破壊の進展過程は、すべての機関の実験で観察された。

つづいて、写真-2に、機関Aおよび機関Dのせん断破壊型供試体(A#1, D#1, D#3)の実験により得られた、ひび割れ・破壊性状を示す。写真中の矢印で示すように、鉄筋降伏後にせん断破壊したD#1では、斜めひび割れが載荷版の下側に進展している。載荷版の拘束の影響と考えられるが、斜めひび割れの上縁への貫通が抑制され、結果として、鉄筋降伏が先に生じ、その後せん断破壊が生じた。鉄筋降伏前に荷重低下したA#1では、斜めひび割れ発生後、アーチ機構の形成により荷重が増加した。A#1はD#1と同様に斜めひび割れが載荷版の下に進展しているものの、鉄筋降伏前に載荷版近傍で圧壊が生じ荷重低下に至った。D#3供試体は、斜めひび割れが、載荷版の支承側の端部に進展している。A#1およびD#3と比較して、載荷版の拘束が小さく、斜めひび割れが貫通しやすくなったと考えられるが、斜めひび割れ発生とほぼ同時に荷重低下に至った。なお、その他の機関においても、ひび割れが載荷版の下に進展した場合に、鉄筋降伏後にせん断破壊に至るという傾向は観察されている。

当然、破壊モードが変化すれば応答値は大きく変化するが、本研究で対象とした条件下では、せん断破壊型の場合、同じ条件でも破壊モードが変化した。破壊モードが変化した理由としては、今後さらに検討を進める必要があるが、上記のように斜めひび割れの発生位置や進展する方向の変動が影響しているものと考えられる。

4. 結論

本研究では、曲げ破壊およびせん断破壊する2種類のRCはりを対象とし、5つの機関で、詳細は異なるもののほぼ同一の条件下で、それぞれ3体の供試体に対して4点曲げ載荷実験を実施した。さらに、各種応答値のばらつきを定量的に評価した。本研究で得られた知見は以下のとおりである。

- 1) それぞれ15体ずつの曲げ破壊型およびせん断破壊型RCはりの実験結果から、各種剛性、限界値の変動係数を評価した。具体的には、曲げ降伏荷重の変

動係数が4.03%、曲げ破壊型の最大荷重は3.89%であった。せん断破壊型では、複数の破壊モードが生じたため、曲げ破壊型と比べて最大荷重の変動係数は大きく、13.3%であった。

- 2) 荷重に関する限界値と比較して剛性や、変位に関する応答値の変動係数は大きくなった。曲げ破壊型の実験の変動係数は、初期剛性、ひび割れ後の剛性、曲げ降伏時の変位および最大荷重時の変位がそれぞれ、27.3%、12.3%、12.1%および11.3%であった。
- 3) 曲げ破壊型のRCはりにおいて、同一機関の中で得られた応答値で評価した変動係数は、全機関のデータを使って評価した変動係数よりも小さくなった。すなわち、曲げ破壊型RCはりでは、機関ごとに設定した境界条件の詳細、載荷装置の特徴が応答のばらつきの影響要因として大きいと考えられる。
- 4) 一方、せん断破壊型では、同一機関で得られた応答値で評価した変動係数は、全機関のデータで評価した変動係数と同程度に大きくなった。これは、同一機関の同一条件の実験においても、複数のせん断破壊モードが生じたためである。
- 5) 複数のせん断破壊モードが生じた理由として、同一機関の同一条件の実験においても、斜めひび割れの発生位置、進展方向の変動が生じ、その変動が破壊モードに影響したと考えられる。このことは、引き続き、ひび割れ性状の定量的な評価により、詳細に検討していく予定である。

謝辞:本研究は2016年度日本コンクリート工学会研究助成金の助成を受けたものです。また、香川大学、岡崎慎一郎准教授には、本研究の載荷実験にご参加いただくとともに、多大なご協力をいただきました。さらに、土木学会応用力学委員会、土木分野の数値解析に関するV&Vに関する小委員会の委員各位には、多くの有益な議論・助言をいただきました。ここに記して謝意を示します。

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) 日本原子力学会 : シミュレーションの信頼性確保に関するガイドライン, 2015.