

論文 RC 梁の損傷度と変形量の相関モデルに関する実験的研究

野本 晟矢*1・権 淳日*2・山根 雅由*1・崔 琥*3

要旨：本研究では RC 梁部材を対象に損傷度と変形量の相関モデルの提案を主目的として、せん断余裕度を 2.0 及び 1.5 とする実大 RC 梁試験体を製作し、静的載荷実験を行った。実験の結果、せん断余裕度の低い試験体の終局変形角が小さくなることを確認した。また、せん断余裕度が異なる両試験体において損傷度を区分する部材角の閾値に差異が見られた。最後に、実験結果に基づき異なる変形性能を有する RC 梁部材の損傷度と変形量の相関モデルを提案した。

キーワード：鉄筋コンクリート造, 梁, 損傷度, 塑性率, せん断余裕度

1. はじめに

地震により被災した RC 造建物において、日本建築防災協会の「震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針」¹⁾では建物のエネルギー吸収能力に基づいた残存耐震性能評価方法を提案している。しかし、実際の被災現場では部材や建物のエネルギー吸収能力を把握することが困難であり、同文献では部材の損傷度に応じたエネルギー吸収能力の残存度合である耐震性能低減係数 η を用いて建物の残存耐震性能を評価する略算法が定められ、その適用性に関する検討^{2),3)}も多数行われている。

一方、上記の略算法における既往の時刻歴応答解析研究⁴⁾では、部材の損傷度と変形量の相関モデルを仮定し、解析結果により得られた部材の変形量に基づきその損傷度を推定し、建物の残存耐震性能を評価してきた。しかし、RC 梁部材における損傷度と変形量の相関モデルの妥当性についてはまだ明確に検証されていない。そこで、本研究ではせん断余裕度を変数とした計 2 体の実大 RC 梁試験体の静的載荷実験を行い、せん断余裕度が損傷度と変形量に及ぼす影響について把握し、RC 梁の変形性能を考慮した損傷度と塑性率の相関モデルを提案する。

2. 実験概要

2.1 試験体計画

試験体は実大の RC 造建物の梁部材（スパン長さ：3600mm）を想定したせん断余裕度を変数とする計 2 体である。図-1 に示すように、各試験体断面の幅は 360mm、せいは 600mm であり、加力点位置は実スパンの幾何学中心までの長さ 1800mm とした。また、両試験体の主筋を 8-D25 (SD345)、あばら筋の間隔を 150mm に合わせ、補強筋比 p_w と補強筋強度 σ_{wy} でせん断余裕度を調整し、せん断余裕度が 2.0 (SDM-2.0 試験体) 及び 1.5 (SDM-1.5 試験体) となる試験体を製作した。ここで、後述するように損傷度分類に用いられる残留ひび割れ幅

などの損傷量に対する試験体寸法の効果を考慮しないため、両試験体とも実大として設計した。また、主筋の配

$$Q_{mu} = 0.9a_t\sigma_y d/h_w \quad (1)$$

$$Q_{su} = \left(\frac{0.068p_t^{0.23}(F_c + 18)}{M/(Qd) + 0.12} + 0.85\sqrt{p_w\sigma_{wy}} \right) bj \quad (2)$$

ここで、 a_t ：引張鉄筋断面積、 σ_y ：主筋の降伏強度、 d ：有効せい、 h_w ：クリアスパン、 p_t ：引張鉄筋比、 F_c ：コンクリートの圧縮強度、 $M/(Qd)$ ：せん断スパン比、 p_w ：せん断補強筋比、 σ_{wy} ：せん断補強筋の降伏強度、 b ：幅、 j ：応力中心間距離

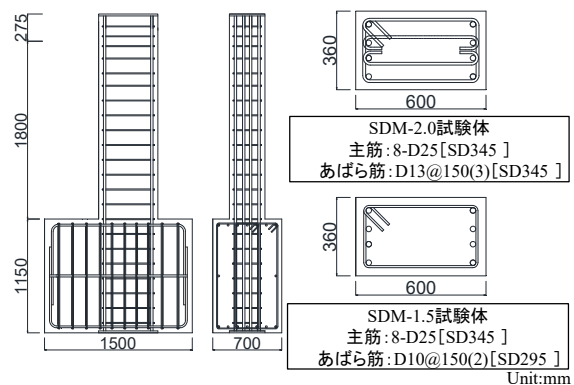


図-1 試験体詳細

表-1 コンクリートの材料特性

	ヤング係数	圧縮強度	引張強度
SDM-2.0 試験体	2.67×10^4	29.6	2.75
SDM-1.5 試験体	2.66×10^4	31.4	3.06

Unit:N/mm²

表-2 鉄筋の材料特性

	ヤング係数	降伏強度	引張強度
D25(SD345)	1.99×10^5	394.4	576.4
D13(SD345)	1.95×10^5	399.3	554.6
D10(SD295)	1.78×10^5	364.2	486.7

Unit:N/mm²

表-3 試験体の諸元及び耐力計算値

	SDM-2.0 試験体	SDM-1.5 試験体
有効スパン (mm)	1800	
引張鉄筋比 (%)	1.04	
せん断補強筋比 (%)	0.706	0.264
M_u (kNm) [Q_{mu} (kN)]	423.4 [235.2]	
Q_{su} (kN)	475.5	370.1
Q_{su}/Q_{mu}	2.02	1.57

*1 大阪工業大学大学院 工学研究科 大学院生 (正会員)

*2 大阪工業大学 工学部建築学科 講師 (正会員)

*3 静岡理科大学 理工学部建築学科 教授 (正会員)

筋や補強筋の間隔がひび割れ幅に及ぼす影響を最小限にするため、両試験体の主筋と補強筋間隔を統一している。せん断余裕度算定に用いた曲げ終局耐力 Q_{mu} 及びせん断終局耐力 Q_{su} の算定式⁵⁾を式(1)及び(2)にそれぞれ示す。また、コンクリート及び鉄筋の材料特性を表-1及び表-2に、試験体耐力の算定結果を表-3に示す。

2.2 荷重計画

図-2に示すように、反力壁に取り付けた水平ジャッキにより正負交番繰返し荷重を行った。ここで、次節で述べるように荷重点位置に水平変位計を取り付け、その計測値を試験体高さ1800mmで除した部材角 R に基づき変位制御荷重を実施した。荷重スケジュールは先行研究⁶⁾を参考に、 $R=1/1600, 1/800, 2/800\text{rad}$ を1サイクルずつ、4/800, 6/800, 8/800, 12/800, 16/800, 24/800, 32/800, 40/800radを2サイクルずつ行い、主筋のひずみ度計測値により確認された降伏部材角でも2サイクルの荷重を加えた。また、試験体の耐力が最大耐力の80%以降に低下した時点で荷重を終了した。

2.3 計測計画

図-3(a)に示すように、各試験体の加力位置の水平変位と軸伸び、危険断面を含む軸方向の区間曲率とせん断変形を計測した。ひずみ度に関しては、図-3(b)に示すように、主筋は危険断面とその直上計測断面まで外側及び内側主筋の4点、それ以降の計測断面では内側主筋の2点にひずみゲージを貼り付け、軸方向1200mm(梁せいの2倍)の位置まで150mm間隔で計測断面を設けた。あばら筋は、塑性ヒンジ領域以降でのせん断変形も考慮し、軸方向1350mmの位置までの各あばら筋にひずみゲージを配置した。また、試験体の損傷量を把握するため、各制御部材角のピーク時及び除荷時にひび割れ幅と長さを計測した。ここで、地震後の残留ひび割れ幅から損傷度を評価することを考慮し、各加力サイクル終了時においては全ての残留ひび割れ幅を計測した。

3. 実験結果

3.1 荷重-変形関係

(1) SDM-2.0 試験体

図-4にSDM-2.0試験体の荷重-変形関係を示す。また、同図に曲げ終局耐力 Q_{mu} の計算値を破線で併記する。正・負荷重時の部材角 $R=+0.06\%\text{rad}$ 及び $-0.05\%\text{rad}$ 時に危険断面位置に曲げひび割れが発生し、 $R=+0.61\%\text{rad}$ 及び $-0.60\%\text{rad}$ 時に主筋の降伏とともに、それぞれ+218.5kN及び-219.3kNの荷重が観測された。その後、緩やかな耐力増加を維持し、正・負荷重ともに部材角 $R=4.00\%\text{rad}$ でそれぞれ259.5kN及び-265.0kNの最大耐力を記録し、 $R=5.50\%\text{rad}$ 及び $-4.83\%\text{rad}$ でそれぞれの荷重側最大耐力の80%まで低下し、終局塑性率が9.01及び8.06となった以降に荷重を終了した。

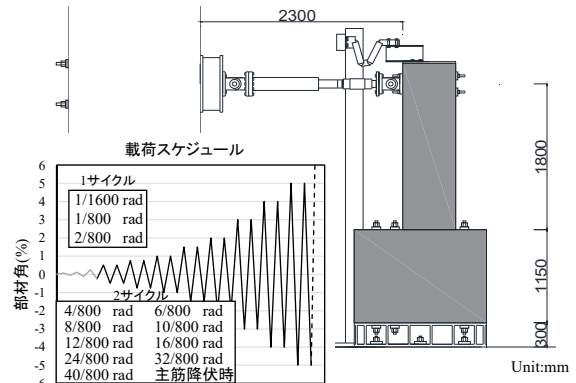


図-2 荷重装置および荷重スケジュール

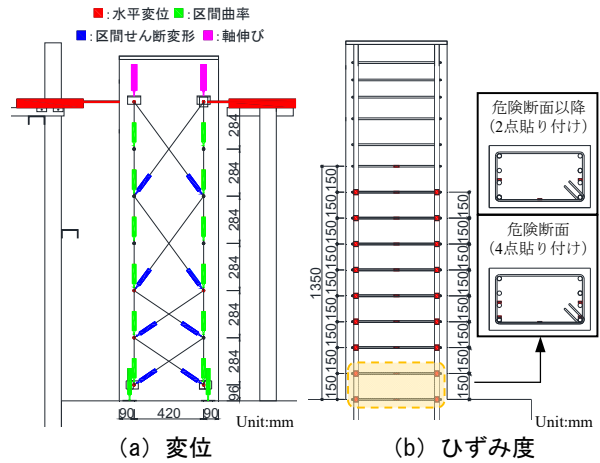


図-3 計測計画

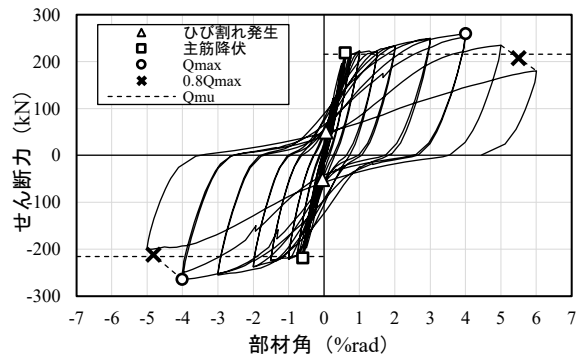


図-4 SDM-2.0 試験体の荷重-変形関係

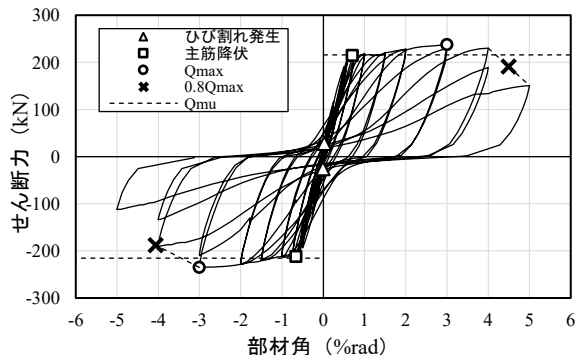


図-5 SDM-1.5 試験体の荷重-変形関係

(2) SDM-1.5 試験体

図-5にSDM-1.5試験体の荷重-変形関係を示す。また、同図に曲げ終局耐力 Q_{mu} の計算値を破線で併記する。正・負荷重時の部材角 $R=+0.03\%\text{rad}$ 及び $-0.01\%\text{rad}$ 時に

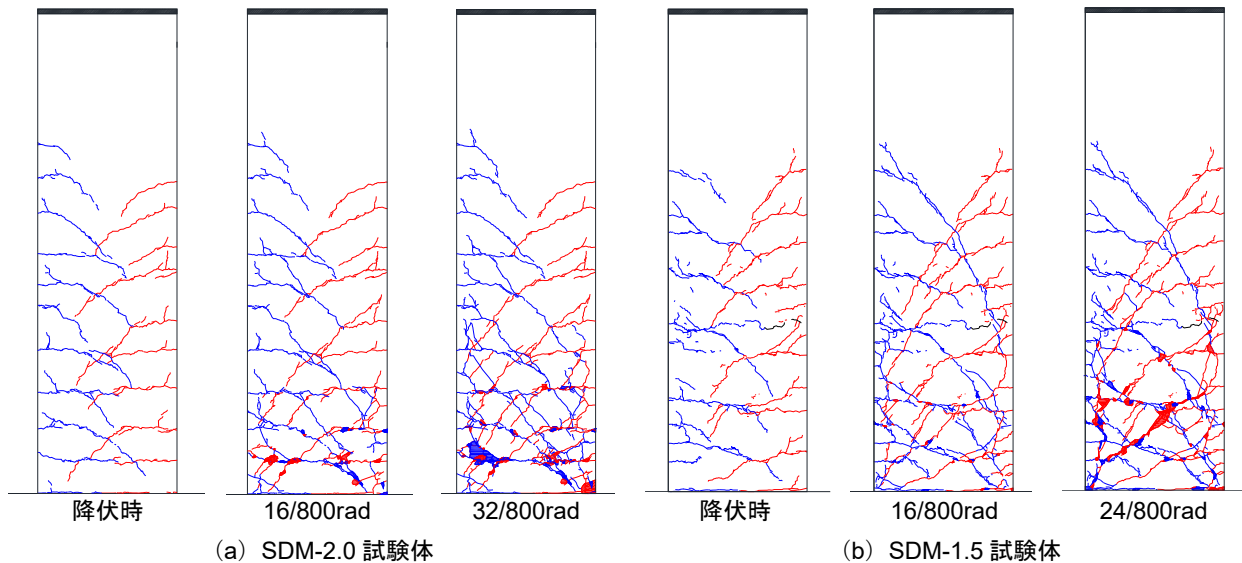


図-6 破壊経過

表-4 実験結果一覧

	±	Q_y	Q_{max}	R_y	R_{max}	R_u	μ_{max}
SDM-2.0 試験体	+	218.5	259.5	0.61	4.01	5.50	9.01
	-	219.3	265.0	0.60	4.00	4.83	8.06
SDM-1.5 試験体	+	214.5	237.5	0.71	3.00	4.49	6.34
	-	212.3	235.0	0.66	3.00	4.06	6.16

Q_y : 降伏時荷重 (kN), Q_{max} : 最大耐力 (kN), R_y : 降伏時部材角 (%), R_{max} : 最大耐力時部材角 (%), R_u : 終局部材角 (%), μ_{max} : 終局塑性率 ($= R_u/R_y$)

危険断面位置に曲げひび割れが確認され、 $R=+0.71\%rad$ 及び $-0.66\%rad$ 時に主筋の降伏とともに、それぞれ $+214.5kN$ 及び $-212.3kN$ の荷重が観測された。その後、緩やかな耐力増加を維持し、正・負荷荷ともに部材角 $R=3.00\%rad$ 時にそれぞれ $237.5kN$ 及び $-235.0kN$ の最大耐力を記録し、 $R=+4.50\%rad$ 及び $-4.06\%rad$ でそれぞれの荷重側最大耐力の 80% まで低下し、終局塑性率が 6.34 及び 6.16 となった以降に荷重を終了した。

表-4 に実験結果を纏めて示す。表より、せん断余裕度が小さいほど最大耐力と変形性能が低下する傾向となり、とくに終局塑性率においては SDM-2.0 試験体と比べ SDM-1.5 試験体が 7 割程度まで低下することが分かる。

3.2 破壊経過

図-6に各試験体の破壊経過を示す。ここで、正荷重時のひび割れを青色、負荷荷時のひび割れを赤色で示す。

(1) SDM-2.0 試験体

正・負荷荷ともに部材角 $R=1/1600rad$ の加力サイクルで危険断面位置に曲げひび割れが、 $R=4/800rad$ の加力サイクルでせん断ひび割れが発生した。主筋の降伏後、 $R=16/800rad$ の加力サイクルの除荷時にかぶりコンクリ

ートの剥落を確認した。その後、曲げ及び曲げせん断ひび割れの拡幅とともに $R=32/800rad$ の加力サイクルでコンクリートの圧壊が確認された。また、 $R=32/800rad$ 以降はコンクリートの剥落が激しいため作業員の安全を考慮し、ひび割れ幅の計測を中断した。そして、 $R=40/800rad$ の加力サイクルで主筋の露出とともにコアコンクリートの圧壊が確認された。

(2) SDM-1.5 試験体

正・負荷荷ともに部材角 $R=1/1600rad$ の加力サイクルで危険断面位置に曲げひび割れが、 $R=4/800rad$ 加力サイクルでせん断ひび割れが発生した。主筋の降伏後、 $R=12/800rad$ の加力サイクル以降では曲げせん断及びせん断ひび割れが急激に拡幅し、 $R=16/800rad$ の加力サイクルの除荷時にはかぶりコンクリートの剥落を確認した。その後、 $R=24/800rad$ の加力サイクルでコンクリートの圧壊と付着割裂ひび割れが発生して、 $R=24/800rad$ の加力サイクル以降はコンクリートの剥落が激しいため作業員の安全を考慮し、ひび割れ幅の計測を中断した。また、同加力サイクルの除荷時に付着割裂ひび割れの拡幅とともに、 $R=32/800rad$ の加力サイクルで主筋の露出やコアコンクリートの圧壊が確認された。

SDM-2.0 試験体の破壊性状と比較し、せん断余裕度の小さい SDM-1.5 試験体のせん断及び付着割裂の破壊傾向が顕著であることが分かる。

4. 損傷度評価

4.1 損傷度の定義

被災度区分判定基準^りでは、図-7に示すように部材の荷重-変形関係を基に、主筋降伏などの工学的変化に基づく損傷度区分の概念を提示している。また、表-5に示すように部材の損傷状態や最大残留ひび割れ幅に基づ

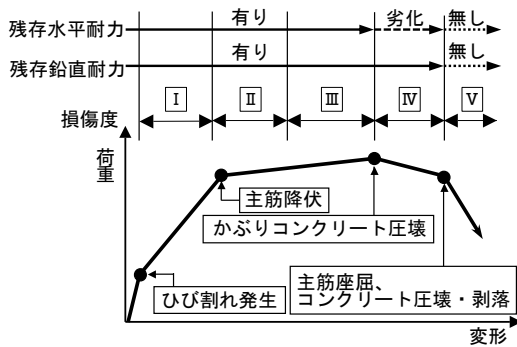


図-7 曲げ部材の損傷度の概念図

表-5 損傷度分類の目安

損傷度	損傷内容
	曲げ部材
I	近寄らないと見えにくいひび割れ、鉄筋は弾性的な状態 最大残留ひび割れ幅 0.2mm 未満
II	主筋が曲げ降伏 最大残留ひび割れ幅 0.2~1.0mm 程度
III	・比較的大きなひび割れが生じている ・かぶりコンクリートの剥落は極くわずか 最大残留ひび割れ幅 1.0~2.0mm 程度
IV	・大きなひび割れが多数生じ、コンクリートの剥落や圧壊が著しく、鉄筋がかなり露出 ・水平耐力は低下しているが軸力は保持している
V	・鉄筋が曲がり、内部のコンクリートも崩れ落ち、部材耐力がほとんど残っていない状態 ・一見して柱(耐力壁)に高さ方向や水平方向に変形が生じていることが分かるもの ・鉄筋の破断が生じている場合もある

いた損傷度分類方法を定めている。そこで、本稿では実験結果を用い、試験体の工学的変化及び最大残留ひび割れ幅それぞれに基づきその損傷度を区分する。

4.2 工学的変化に基づく損傷度評価

(1) SDM-2.0 試験体

SDM-2.0 試験体の工学量に基づく損傷度の分類結果を荷重-変形関係とともに図-8 に併記する。正・負荷荷時の部材角 $R=+0.06\%$ rad 及び -0.05% rad 時に曲げひび割れが発生し損傷度 I, $R=+0.61\%$ rad 及び -0.60% rad 時に主筋の降伏が確認され損傷度 II, $R=\pm 2.00\%$ rad 時にわずかなかぶりコンクリートの剥落が確認され損傷度 III, $R=\pm 4.00\%$ rad 時にコンクリートの圧壊及びそれに伴う耐力劣化により損傷度 IV, $R=\pm 5.00\%$ rad 時にコアコンクリートの圧壊に伴い損傷度 V と評価した。

(2) SDM-1.5 試験体

SDM-1.5 試験体の工学量に基づく損傷度の分類結果を荷重-変形関係とともに図-9 に併記する。正・負荷荷時の部材角 $R=+0.03\%$ rad 及び -0.00% rad 時に曲げひび割れが発生し損傷度 I, $R=+0.71\%$ rad 及び -0.66% rad 時に主筋の降伏が確認され損傷度 II, $R=\pm 2.00\%$ rad 時にわずか

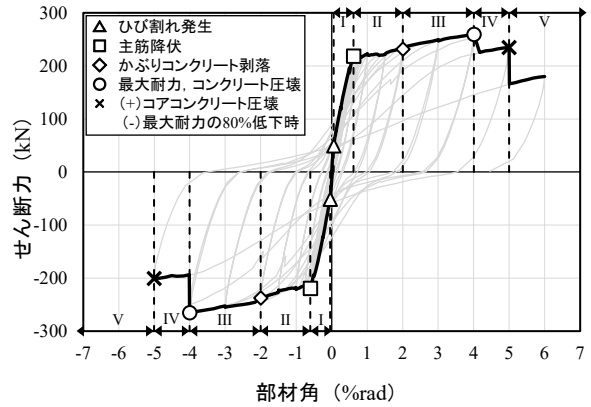


図-8 SDM-2.0 試験体の工学的変化に基づく損傷度

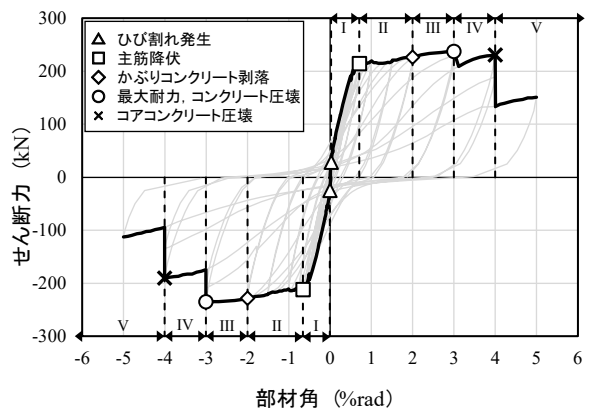


図-9 SDM-1.5 試験体の工学的変化に基づく損傷度

なかぶりコンクリートの剥落が確認され損傷度 III, $R=\pm 3.00\%$ rad 時にコンクリートの圧壊及びそれに伴う耐力劣化により損傷度 IV, $R=\pm 4.00\%$ rad 時にコアコンクリートの圧壊に伴い損傷度 V と評価した。

4.3 最大残留ひび割れ幅に基づく損傷度評価

(1) SDM-2.0 試験体

SDM-2.0 試験体の各加力サイクルの除荷時における正・負側の最大残留ひび割れ幅の推移及びそれに基づく損傷度分類結果を図-10 に示す。正・負荷荷時の部材角 $R=+0.59\%$ rad 及び -0.58% rad 時に最大残留ひび割れ幅が 0.2mm まで拡幅し損傷度 II となった。その後、最大残留ひび割れ幅が急激に増加して、 $R=+1.09\%$ rad 及び -1.21% rad 時に最大残留ひび割れ幅が 1.0mm まで拡幅し損傷度 III, $R=+1.58\%$ rad 及び -1.88% rad 時に最大残留ひび割れ幅が 2.0mm まで拡幅し損傷度 IV と評価した。

(2) SDM-1.5 試験体

SDM-1.5 試験体の各加力サイクルの除荷時における正・負側の最大残留ひび割れ幅の推移及びそれに基づく損傷度分類結果を図-11 に示す。正・負荷荷時の部材角 $R=+0.60\%$ rad 及び -0.58% rad 時に最大残留ひび割れ幅が 0.2mm まで拡幅し損傷度 II となった。その後、最大残留ひび割れ幅が増加し、 $R=+1.00\%$ rad 及び -0.86% rad 時に最

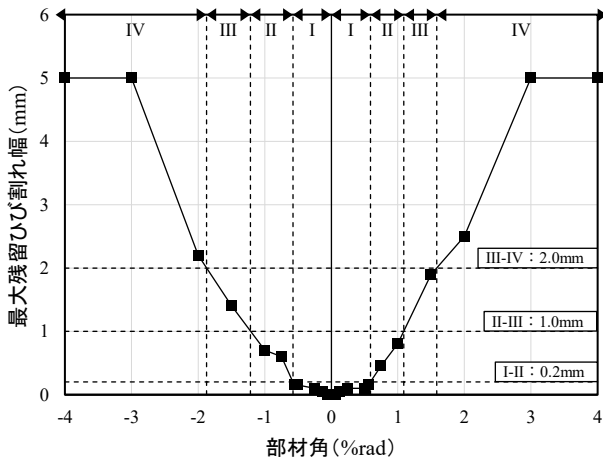


図-10 SDM-2.0 試験体の最大残留ひび割れ幅

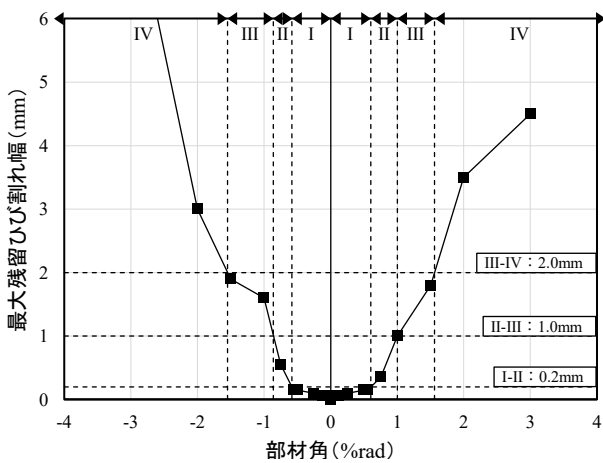


図-11 SDM-1.5 試験体の最大残留ひび割れ幅

大残留ひび割れ幅が 1.0mm まで拡幅し損傷度Ⅲ， $R=+1.56\%$ rad 及び -1.55% rad 時に最大残留ひび割れ幅が 2.0mm まで拡幅し損傷度Ⅳと評価した。

両試験体において、鉄筋降伏後の変形領域では最大残留ひび割れ幅に基づく損傷度分類結果が工学的変化に基づくそれより過大に評価される傾向であった。これは、最大残留ひび割れ幅が試験体の危険断面及びその近傍に発生した限定的なひび割れより計測されたことに起因していると考えられる。

4.4 本研究における損傷度評価結果

本研究では、被災度区分判定基準⁷⁾に定めている部材の損傷度の定義を踏まえ、鉄筋降伏や耐力低下などの工学的変化及びひび割れ発生やコンクリート剥落などの損傷進展を総合的に考慮し、各試験体の損傷度を確定することとした。表-6 に示すように、損傷度Ⅱまでは工学的変化を含む損傷状態と最大残留ひび割れ幅による損傷度評価結果を比較し、大きいものを最終的な損傷度として判定する保守的評価を行った。損傷度ⅢとⅣにおいては、限定的なひび割れが試験体の最大残留ひび割れ幅を支配する影響を考え、コンクリート剥落や耐力劣化など工学的変化に基づき損傷度を区分した。また、安全限界

表-6 本研究の損傷度評価方法

損傷度	評価基準
I	ひび割れ発生
II	主筋の降伏，最大残留ひび割れ幅 0.2mm 以上
III	極くわずかな剥落
IV	かぶりコンクリートの圧壊，耐力劣化
V	座屈，コアコンクリートの圧壊，最大耐力の 80%低下時

表-7 損傷度区分結果

SDM-2.0 試験体			
損傷度	(+)	(-)	判断要因
0			
I	0.06%	-0.05%	ひび割れ発生
II	0.59%	-0.58%	残留ひび割れ幅
III	2.0%	-2.0%	極くわずかな剥落
IV	4.0%	-4.0%	コンクリート圧壊，最大耐力
V	5.0%	-4.83%	(+)コアコンクリート圧壊 (-)最大耐力の 80%低下
SDM-1.5 試験体			
損傷度	(+)	(-)	判断要因
0			
I	0.03%	-0.00%	ひび割れ発生
II	0.60%	-0.58%	残留ひび割れ幅
III	2.0%	-2.0%	極くわずかな剥落
IV	3.0%	-3.0%	コンクリート圧壊，最大耐力
V	4.0%	-4.0%	コアコンクリート圧壊

の判断として広く用いられている最大耐力の 80%低下時及びコアコンクリート圧壊などの工学的変化による損傷度評価結果を比較し、大きいものを最終的に損傷度Ⅴとして判定する保守的評価を行った。

各試験体の損傷度評価結果及び判断要因を表-7 に示す。表より、両試験体において損傷度Ⅲまでの損傷度を区分する部材角の閾値は同程度であることが分かる。しかし、前述したとおり小さいせん断余裕度が試験体の変形性能の低下を起こすため、損傷度Ⅲ以降ではせん断余裕度の小さい SDM-1.5 試験体の損傷度を区分する部材角の閾値が SDM-2.0 試験体のそれより小さくなる傾向となった。

5. 損傷度と変形量の関係

5.1 変形量の定義

本研究では、損傷度と変形量の相関モデルの作成に当たって、変形量は塑性率 μ を適用する。ここで、 μ は式(3)のように降伏変位 δ_y に対する経験変位 δ の割合で定義する。また、 δ_y は前述したとおり各試験体の主筋のひずみ度計測値により確認されたものである。

$$\mu = \delta / \delta_y \quad (3)$$

5.2 損傷度と塑性率の相関モデル

表-8 に損傷度を区分する塑性率の閾値を示す。両試験体における損傷度を区分する塑性率の閾値を比較すると、損傷度Ⅲまでは概ね同様な傾向を示したが、損傷度Ⅲ以降は試験体のせん断余裕度に依存して塑性率の閾値の差異が見られた。

表-8 の損傷度を区分する塑性率の閾値に基づき、図-12 に示すように終局塑性率 6 及び 8 を有する曲げ梁部材の損傷度と塑性率の相関モデルを提案する。なお、相関モデルの作成に当たって、損傷度を区分する塑性率の閾値は表-9 に示すように正・負荷荷時それぞれの算定結果の小さい値を基に簡略化した。このことより、終局塑性率を用いせん断余裕度の異なる RC 梁部材の変形能力の差異を表し、損傷度を区分する塑性率の閾値を提案することができた。

6. 結論

本研究では、せん断余裕度の異なる実大 RC 梁の静的載荷実験を行い、損傷度と変形量の相関モデルについて検討した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 試験体のせん断余裕度が小さいほどせん断及び付着割裂の破壊傾向が顕著であり、その最大耐力及び変形性能の低下が見られた。
- (2) 損傷度評価において、試験体のせん断余裕度が低いほど損傷度Ⅲ以降の損傷度を区分する部材角及び塑性率の閾値が小さくなった。
- (3) 主筋と補強筋間隔が同様である RC 梁部材のせん断余裕度とその変形性能に及ぼす影響を考慮し、終局塑性率 6 と 8 を有する RC 梁部材の損傷度と塑性率の相関モデルを提案した。

謝辞

本研究は、日本学術振興会の科学研究費助成事業（若手研究，課題番号：20K14815，代表：権淳日）の助成の下に実施しました。また、本研究の遂行にあたり、大阪工業大学・権研究室の岩木陸斗氏、菊澤佑太氏に多大なご協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

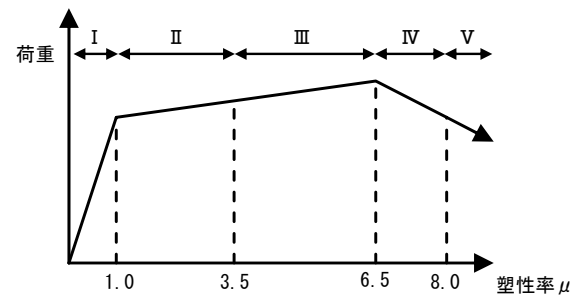
- 1) 日本建築防災協会：震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針，2015
- 2) 高橋典之，権淳日，中埜良昭：梁の損傷を考慮した RC 造架構の残存耐震性能の評価手法 その 2 全架構耐震性能残存率 SI_{margin} の略算法，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp569-570，2013.8
- 3) 藤田起章，三浦耕太，田畑佑，前田匡樹，AlexShegay，関松太郎：連層耐震壁を有する RC 造ラーメン架構

表-8 損傷度を区分する塑性率

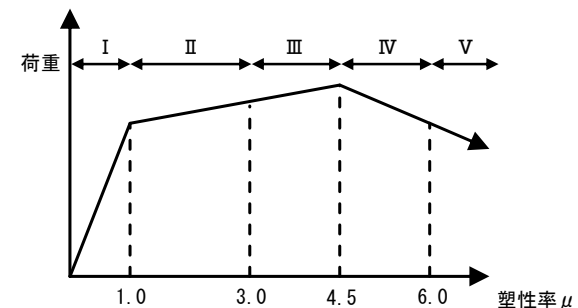
損傷度		0-I	I-II	II-III	III-IV	IV-V
SDM-2.0	(+)	0.09	0.96	3.27	6.55	8.19
	(-)	0.08	0.96	3.34	6.68	8.06
SDM-1.5	(+)	0.04	0.85	2.82	4.24	5.65
	(-)	0.00	0.88	3.03	4.55	6.07

表-9 相関モデル作成に用いる塑性率

損傷度		I-II	II-III	III-IV	IV-V	μ_u
SDM-2.0	精	0.96	3.27	6.55	8.06	8.06
	略	1.0	3.5	6.5	8.0	8.0
SDM-1.5	精	0.85	2.82	4.24	5.65	5.65
	略	1.0	3.0	4.5	6.0	6.0



(a) 終局塑性率 8.0



(b) 終局塑性率 6.0

図-12 損傷度と塑性率の相関モデル

の残存耐震性能評価法と縮小試験体の振動台実験による検証，日本建築学会構造系論文集，Vol.86，No.785，pp1084-1094，2021.7

- 4) 鄭文淑，前田匡樹，田才晃，長田正至：地震被害を受けた RC 造建築物の残存耐震性能の評価，日本建築学会構造工学論文集，Vol.48B，pp189-196，2002.3
- 5) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造保有水平耐力計算基準・同解説，2021.2
- 6) 野本晟矢，権淳日：RC 造梁の損傷度と変形量の相関モデルに関する基礎的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp249-250，2021.9