

# 論文 ヒンジ部損傷抑制コアの効果に関する実験的研究

都祭 弘幸\*1

**要旨：** 曲げ破壊型で靱性能に富む RC 梁部材でも繰り返し载荷により、せん断ひび割れの拡大や付着劣化に伴う耐力低下によりヒンジ領域におけるせん断変形成分が増加し吸収エネルギーが低下する。本研究は、履歴ループ改善を目的に、ヒンジ領域のせん断変形成分増加抑制ならびに除荷後の再载荷時における剛性低下改善を図ることができるヒンジ部損傷抑制コアに関する実験研究である。縮尺 1/2 の RC 梁部材実験から、コアを有する梁では吸収エネルギー量の増加が図れることが確認できた。本論文では、ヒンジ部損傷抑制コアを有する梁部材の実験結果の分析からコアの目標性能とその効果について定性的な傾向を示した。

**キーワード：** ヒンジ部, 損傷抑制, ダボ筋, コア拘束筋, 吸収エネルギー, 再载荷時剛性

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート造建築構造物の崩壊メカニズムは、一般的に 1 階脚部・最上階柱頭を除き梁が曲げ破壊する全体崩壊系が計画される。梁には靱性に富む変形性能が要求され、文献 1) ではその限界変形  $R_u$  を  $25 \times 10^{-3} \text{rad}$  としている。この限界変形は、多くの実験結果の包絡線(荷重変形関係)から決定された数値である。しかしながら、靱性能に富む部材であっても繰り返し载荷を受けると耐力低下や除荷剛性の減少やスリップ変形の増加等により吸収エネルギーが低下することが報告されている<sup>2)</sup>。

本研究では、梁ヒンジ領域における断面コア部補強により図-1 (a)のように曲げ強度増加を伴わずに履歴ループを改善できる梁開発を目指している。断面コア部を補強した既往の研究は、柱脚部に関する研究<sup>例えば 3,4)</sup>はあるが、梁部材に関する研究例はない。また、それらの研究は、配筋方法改善や高軸力対応による靱性能改善であり、履歴ループの改善を目的とした研究例ではない。

曲げ降伏した梁は、コンクリート劣化に伴いせん断変形成分が増加する。このせん断剛性劣化が除荷後の残留変形状態から再载荷した際、図-1 (b)に示すような繰り返し時の剛性低下を招く要因になると考えられる。この再载荷時剛性の低下を抑え履歴ループを改善するためにはヒンジ部コンクリートの損傷抑制が有効であろうと考え、せん断応力が大きいコア部を補強できるヒンジ部損傷抑制コアを提案した。本研究は、提案したヒンジ部損傷抑制コアの目標性能を実験により検証するとともに、コア補強の様々な効果を定性的に検討する。

## 2. 構造概要

### 2.1 ヒンジ部損傷抑制コアの目標性能

提案したヒンジ部損傷抑制コアは、図-2 に示すように RC 造梁ヒンジ部 (1D を想定) に配置するものである。このコア補強の目標性能は、a)せん断余裕度を下げる要

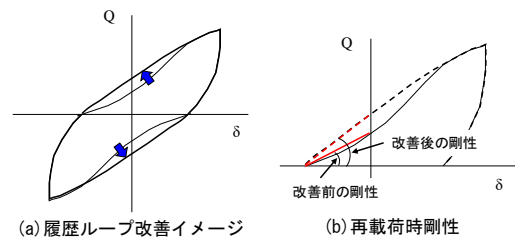


図-1 本研究の狙いおよび再载荷域の剛性

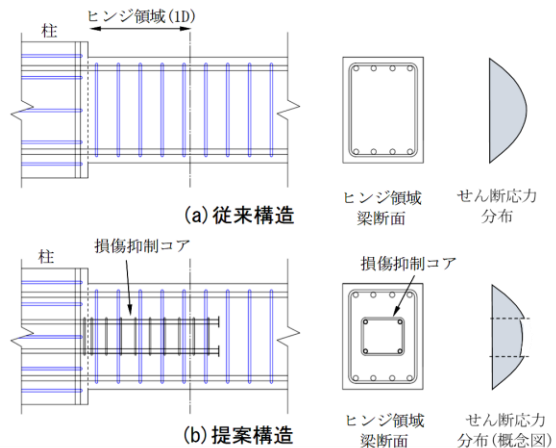


図-2 ヒンジ部損傷抑制コアの配筋例と  $\tau$  分布

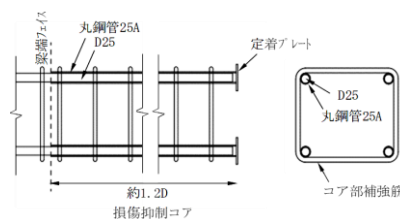


図-3 損傷抑制コアの詳細例

因となる曲げ強度を上昇させない, b)見かけ上のせん断応力を低下させる, c)せん断ひび割れの拡大を抑えせん断変形の増大を抑制する, d)従来構造よりも履歴ループを改善し吸収エネルギー量が增大する, である。

### 2.2 ヒンジ部損傷抑制コアの構成要素

ヒンジ部損傷抑制コアの詳細例を図-3 に示

\*1 福山大学 工学部建築学科教授 博士(工学) (正会員)

表-1 試験体一覧

試験体名	断面形状		Fc N/mm <sup>2</sup>	主筋	stirrup	P <sub>w</sub> (%)	コア形状		ダボ筋	コア拘束筋		
	b mm	D mm					b' mm	d' mm		配筋	P <sub>wc</sub> (%)	P <sub>wc</sub> /P <sub>w</sub>
BN-1	250	400	24	上下とも 4-D16 (SD490)	D6@75 (SD295A)	0.34	—	—	—	—	—	—
BC-1							150	200	4-D13 (SD490)	D4@50	0.34	1.0
BC-2							150	160	6-D13 (SD490)			
BC-3										—	—	—
BC-4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	

注: 1) 試験体記号 BC-1  
 試験体  $\square$   $\square$  N: 従来 RC, C: 損傷制御コア有り  
 2) b', d' は拘束筋で囲まれた損傷制御コアの幅とせい  
 3) P<sub>wc</sub> は損傷制御コアの拘束筋比で次式より算出。  
 $P_{wc} = a_{wc}/(b'x')$ , a<sub>wc</sub>, x' は、損傷制御コアの1組の拘束筋断面積  
 および拘束筋のピッチ

表-2 鉄筋の材料試験結果

	鉄筋種別	降伏応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)	降伏比 (%)	降伏ひずみ (μ)
主筋	D16 (SD490)	535.5	733.2	184.6	11.7	73.0	2900
あばら筋	D6(SD295A)	360.5	520.1	175.9	14.6	69.3	2050
コアダボ筋	D13 (SD490)	528.1	748.0	179.0	11.6	70.6	2950
コア拘束筋	D4 (SD295A)	370.1	517.9	176.0	15.2	71.5	2103
鋼管	15A (SPG)	403.4	430.1	177.3	3.0	93.8	2275

表-3 コンクリート材料試験結果

試験体	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	割裂強度 (N/mm <sup>2</sup> )
BN-1	29.9	27.5	2.7
BC-1, BC-2	31.0	27.8*	2.8*
BC-3	32.7	28.2	2.9
BC-4	33.0	32.0	2.9

\*: コンクリート圧縮強度から線形補間して算出

す。損傷抑制コアの構成要素は、ダボ筋、ダボ筋の付着を絶縁する鋼管、鋼管の先端部を塞ぐ定着プレート、コア拘束筋、である。ダボ筋は、柱内部には定着させるが梁側では鋼管によりアンボンド化するので曲げ強度の上昇はない。また、この鋼管は梁フェイス面までなので、これによる曲げ強度上昇もない。鋼管はダボ筋とほぼ同径の内径であり、フェイス面の隙間はプトルゴムあるいは粘土などでセメントペーストの流入を防いでいる。

設置するコアの幅は、ダボ機能を効果的に働かせるために断面内部に位置する方が支圧に対して有利と判断し梁幅の0.6倍とした。コアは、弾性力学におけるせん断応力度分布を考えると(図-2参照)、せん断応力度が大きい部分に配置されるので、見かけのせん断応力度を低下させる効果があると考えられる。

コアの梁内部における設置長さは、梁せいの1.2倍とした。プレキャストで製作することも可能であるが、本研究では梁と一体打ちで製作することとした。

### 3. 試験体

試験体は 1/2 縮尺の RC 造曲げ降伏型梁部材とし、基準となる従来構造試験体は文献1)の設計例を参考に検討した。ただし、試験装置の関係から試験体は、実大でクリアスパン 4.8m 梁の反曲点(中央と仮定)から半分を取

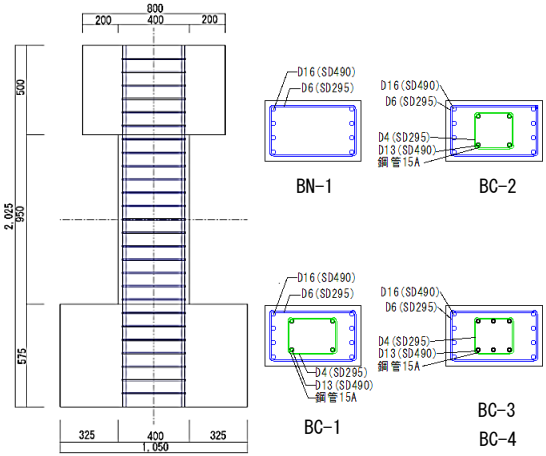


図-4 試験体形状および梁断面

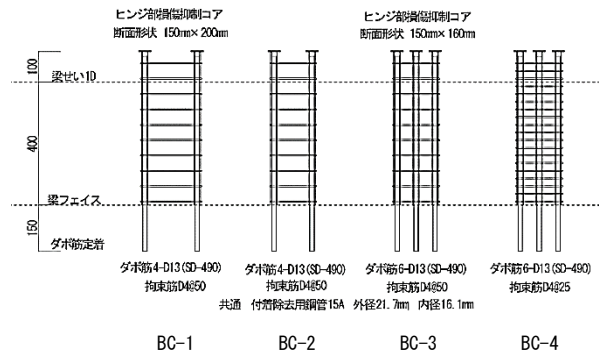


図-5 ヒンジ部損傷抑制コアの配筋

り出したモデルである。表-1に試験体一覧を、図-4に試験体の形状を、図-5にヒンジ部損傷抑制コアの配筋を示す。試験体は従来構造1体とヒンジ部損傷抑制コアを有する試験体4体の計5体であり、梁の主筋量・せん断補強筋量は全て共通である。ヒンジ部損傷抑制コアを有する試験体のパラメータは、目標性能のb)とc)に影響があると考えられる、コア断面せい、ダボ筋本数およびコア拘束筋量である。試験体に使用した鉄筋およびコンクリートの材料試験結果を表-2および表-3に示す。

曲げ終局強度およびせん断終局強度は、式(1)および式(2)より算出した。コア拘束筋は梁主筋を繋ぐ鉄筋ではないのでトラス機構は形成されないと判断し、式(2)のせん断強度には考慮していない。材料試験結果を使用したせん断余裕度  $Q_{su}/Q_{mu}$  は 1.35 程度となった。

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

ここで、 $a_t$  : 引張鉄筋の断面積(mm),  $a_y$  : 引張鉄筋の材料強度(N/mm<sup>2</sup>),  $d$  : 有効せい(mm),  $\ell$  : 反曲点高さ(mm)。

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

ここで、 $p_t$  : 引張鉄筋比(%),  $p_w$  : せん断補強筋比,  $a_w$  : 一組のせん断補強筋の断面積(mm<sup>2</sup>),  $\sigma_{wy}$  : せん断補強筋の降伏強度(N/mm<sup>2</sup>),  $\sigma_B$  : コンクリート圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>),  $M/Qd$  : せん断スパン比。

## 4. 実験計画

### 4.1 実験方法および加力方法

図-6に加力装置を、図-7に載荷加力履歴を示す。載荷は片持ち梁形式とし、1000 kN 油圧ジャッキにより正負交番の繰り返し載荷を行った。変位制御は、載荷高さにおける部材角 R により実施した。加力履歴は、部材角 R=±1/1600(rad)を各1回, ±1/800, ±1/400を各2回, ±1/200, ±1/133, ±1/100(rad)を各3回, ±1/67, ±1/50, ±1/33, ±1/25, ±1/20(rad)を各2回繰り返すことを計画した。

なお、載荷位置が上スタブ中央ではないので、実験終了後に上スタブの回転量による油圧ジャッキの傾きを考慮した荷重の補正を行った。

### 4.2 測定項目および計測方法

図-8に変位計取り付け図を示す。各試験体ともに、試験区間の水平変位および軸方向変位、さらに、曲率分布、せん断変形を計測した。試験体の主筋、せん断補強筋、ダボ筋、コア部せん断補強筋、円形鋼管のひずみの計測のため、ひずみゲージを貼付した。

## 5. 実験結果

### 5.1 Q-R 関係および破壊経過

各試験体の荷重一部材角関係を図-9に、最終破壊状況を写真-1に示す。図中の赤実線は曲げ終局強度計算値  $Q_{mu}$  であり、橙点線は文献5)によるトラス機構・アーチ機構を考慮したせん断信頼強度計算値  $V_u$  である。また、その他の図中のシンボルは凡例に示す通りである。

各試験体のひび割れ発生現象や主筋の降伏部材角はいずれも同様であった。梁の初曲げひび割れは R=1/1600rad で生じ、R=1/400rad でせん断ひび割れが発生した。R=1/133rad のサイクルで主筋が降伏し、計算上の曲げ終局強度に達した。R=1/50~1/33rad で最大耐力に達し端部に圧壊も見られたが、R=1/20rad の大変形まで繰り返しによる顕著な耐力低下は見られなかった。コアの有無にかかわらず、R=1/20rad のサイクルまで曲げ終局強度計算値  $Q_{mu}$  を下回ることはなかった。

従来構造でコアの無い BN-1 は R=1/20rad のサイクルでヒンジ領域が大きくせん断破壊し耐力が低下した。コア有りの試験体はいずれもヒンジ領域外のせん断破壊が進み主筋かぶり部分が剥落するが、大きな耐力低下は見られなかった。

実験終了後の観察で BN-1 は、せん断補強筋内部のコンクリートが小片に破壊・剥落し、135°フックが外側に曲げ戻されていることが確認された。しかし、コア有りの試験体ではフックのはずれは確認されなかった。

いずれの試験体も R=1/33rad で荷重がせん断強度理論値とほぼ同等となり、R=1/25rad で曲げ強度計算値を下廻る。従来構造の BN-1 が曲げ降伏後にヒンジ領域でせん断破壊した理由は、このためであると考えられる。しかしながら、損傷抑制コアを有する試験体は、ヒンジ領域でせん断破壊することはなかった。このせん断破壊抑制もコアの効果(目標性能 b), c) と考えられる。

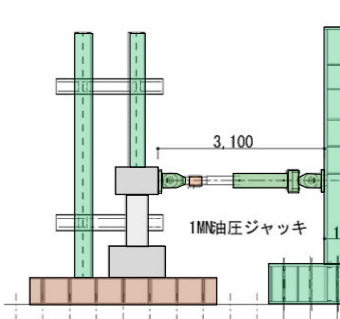


図-6 載荷装置

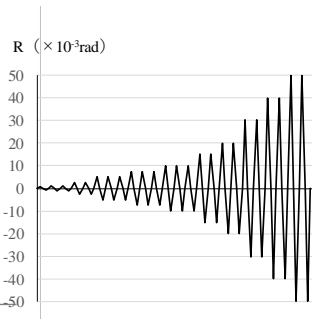


図-7 載荷加力履歴

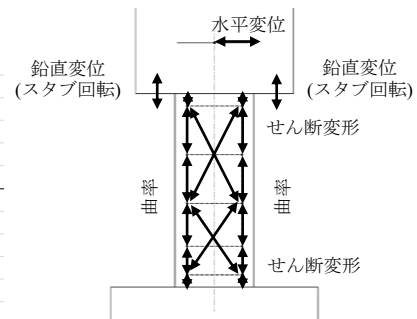


図-8 計測計画

表-4 諸強度の実験値と計算値の比較

試験体名	初期剛性			曲げひび割れ強度			せん断ひび割れ強度			曲げ終局強度		
	$E K_0$ kN/mm	$K_0$ kN/mm	$\frac{E K_0}{K_0}$	$E Q_{mc}$ kN	$c Q_{mc}$ kN	$\frac{E Q_{mc}}{c Q_{mc}}$	$E Q_{sc}$ kN	$c Q_{sc}$ kN	$\frac{E Q_{sc}}{c Q_{sc}}$	$E Q_{mu}$ kN	$c Q_{mc}$ kN	$\frac{E Q_{mu}}{c Q_{mc}}$
BN-1	44.1	35.3	1.25	32.5	20.7	1.57	86.8	81.3	1.07	136.6	116.1	1.18
BC-1	46.1	35.6	1.29	35.0	21.0	1.67	96.2	82.4	1.17	136.9		1.18
BC-2	46.7	35.6	1.31	35.0	21.0	1.67	102.3	82.4	1.24	137.7		1.19
BC-3	45.4	36.0	1.26	32.0	21.5	1.49	101.5	84.2	1.21	139.5		1.20
BC-4	44.7	40.1	1.12	34.0	21.2	1.60	101.8	84.5	1.20	139.0		1.20



## 5.2 諸強度の検討

表-4に各試験体の諸強度に関する実験値と計算値の比較を示す。初期剛性実験値は、曲げひび割れが発生した  $R=1/1600\text{rad}$  ピーク時の荷重変形関係から求めた。曲げひび割れ・せん断ひび割れ・曲げ終局強度の実験値は、事象が発生した正負の平均値とした。初期剛性・曲げひび割れ強度・せん断ひび割れ強度の計算値は、文献1)を参考に式(3)~式(5)を使用した。

$$\frac{1}{K_0} = \frac{1}{K_s} + \frac{1}{K_{be}} \quad (3)$$

ここで、 $K_0$ : 弾性剛性(N/mm),  $K_s$ : せん断剛(N/mm)で  $G_c A_0 / (\kappa l)$ ,  $K_{be}$ : 曲げ剛性(N/mm)で  $12 E_c I_e / l^3$ ,  $\kappa = 1.2$

$$Q_{mc} = 0.56 \sqrt{\sigma_B Z_e} / \ell \quad (4)$$

ここで、 $Q_{mc}$ : 曲げひび割れ強度(N),  $\sigma_B$ : シクリート圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>),  $Z_e$ : 主筋を考慮した断面係数(mm<sup>3</sup>)

$$Q_{cr} = \left\{ \frac{0.061(\sigma_B + 49)}{M / (Qd) + 1.7} \right\} bj \quad (5)$$

ここで、 $Q_{cr}$ : せん断ひび割れ強度(N),  $M / (Qd)$ : せん断スパン比(本実験では 3),  $bj$ : 梁幅(mm)および梁有効せい(mm)

初期剛性および曲げひび割れ強度の実験値/計算値の比はコアの有無に関係なく、本実験では実験値は計算値よりも大きくなった。せん断ひび割れの実験値/計算値の比は、コアを有する方が約1割ほど実験値が高くなる傾向が見られた。曲げ終局強度の実験値/計算値の比は、コアの有無にかかわらず約1.2倍となった。目標性能に掲げた a) 曲げ強度を上昇させない、b) 見かけ上のせん断応力度を低下させる、が確認できた。

## 5.3 吸収エネルギー量の比較

本構造の目標性能の1つに、履歴ループの改善による吸収エネルギー量の増大を挙げている。実験の履歴曲線から各サイクルにおける吸収エネルギー量を1ループ(荷重ゼロからゼロまでの各計測ステップの荷重・変形を積分)ごとに算出した。図-10に従来構造のBN-1の同サイクル時の吸収エネルギー量(定常ループ)に対する比の比較を示す。

履歴ループの差異を比較するために  $R=1/33\text{rad}$  における2サイクル目(定常ループ)の各試験体のループを図-11に示す。ループ形状が比較しやすいように縦軸は最大荷重で基準化している。

図-10よりヒンジ部損傷抑制コアを有する試験体は、曲げ降伏以前の初期変形段階から目標性能d)を満足することが確認できた。その増大する割合は、試験体パラメータにより変わることが分かった。BC-1とBC-2との比較から、コア面積が大きい方が吸収エネルギーは大きくなる傾向が見られる。また、BC-2とBC-3およびBC-4との比較から、ダボ筋本数よりもコア拘束筋量が多い方

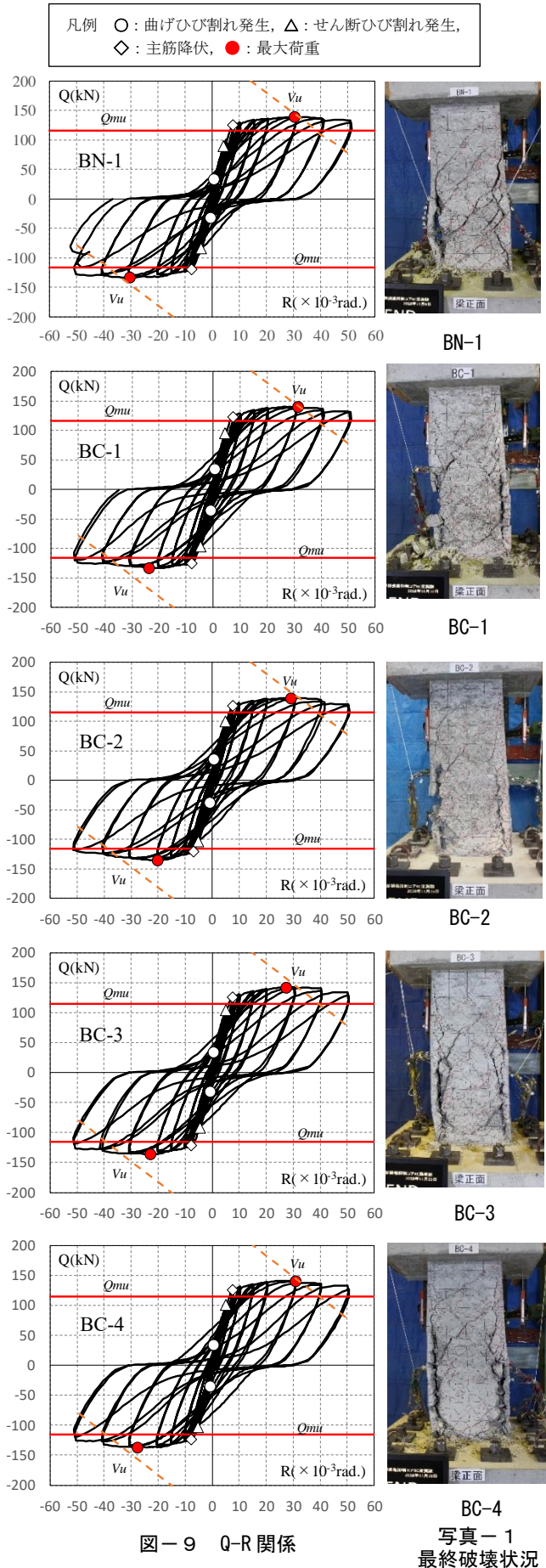


図-9 Q-R 関係

写真-1  
最終破壊状況

が初期から大変形まで吸収エネルギー量が大きくなる傾向があると考えられる。

図-11 に示した履歴ループ形状の差から除荷後における再載荷時剛性 (図-1 (b) 参照) の大きさが吸収エネルギー量に影響を及ぼすことが認められた。

#### 5.4 等価粘性減衰定数の比較

各試験体の定常ループに関する等価粘性減衰定数  $h_{eq}$  の推移を比較する。本論文における等価粘性減衰定数の算出方法概念図を図-12 に示す。最大荷重前後で式(6)における  $W$  の計算方法が異なる。つまり、最大荷重前は各サイクルのピーク時荷重・変形を使用するが、最大荷重以降では荷重が低下していても最大荷重とそのサイクルの最大変形を使用している。本実験の場合、いずれの試験体も  $R=1/33rad$  以降の等価粘性減衰定数は、最大荷重を使用して算出した。

$$h_{eq} = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\Delta W}{W} \quad (6)$$

算出結果の推移を図-13 に示す。主筋降伏前の  $R=1/133rad$  以前は概ね 5% であるが、曲げ降伏以降、最大荷重に達する  $R=1/33rad$  まで増加する。本実験では吸収エネルギー量の増加割合が従来梁に対して 2 割程度であったことから、文献 1) で定義する目標限界変形  $R_u$  までは  $h_{eq}$  に関しても 2 割程度が目標となる。今回の実験ではパラメータにより  $h_{eq}$  の増加が 1 割から 2 割であった。

#### 5.5 再載荷時剛性の比較

目標性能である吸収エネルギー量の増大に影響を及ぼす残留変形からの再載荷時剛性について検討する。損傷抑制コアを有する試験体の再載荷時剛性実験値の推移を BN-1 のそれに対する倍率として図-14 に示す。なお、再載荷時剛性実験値は、各変形段階の定常ループにおける負側除荷後の荷重ゼロから変位ゼロまでの剛性と定義し (図-1 (b) 参照), 最大荷重となる  $R=1/33rad$  までの比較とした。この剛性とした理由は実験値を容易に特定できるからである。BN-1 とコア有り試験体の再載荷時剛性は、主筋が降伏する  $R=1/133rad$  でほぼ同等となるが、曲げ降伏以降、変形が増加するにつれて再載荷時剛性の倍率が增大する傾向が見られた。

#### 5.6 曲率分布

図-15 に BN-1 と損傷抑制コア有りの代表として BC-1 の各変形段階における曲率分布を示す。曲率は  $R=1/800$  から  $R=1/50rad$  までの 1 回目のピーク時における分布である。曲率分布はコアの有無にかかわらず、フェイスから梁せい  $D$  の範囲で変形の増分に伴い曲率が増加していることが分かる。曲率分布においては、コアの有無による大きな差異は、認められなかった。

#### 5.7 ヒンジ領域におけるせん断変形

ヒンジ領域に設置した斜め方向の変位からせん断変形

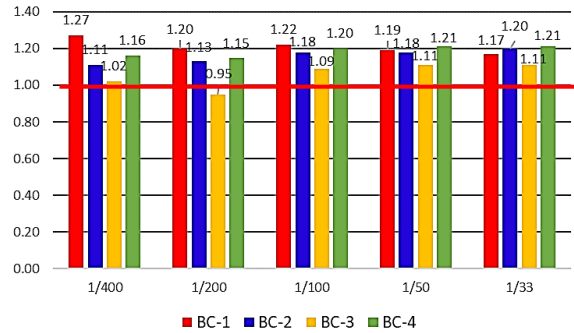


図-10 定常ループにおける吸収エネルギー量の比

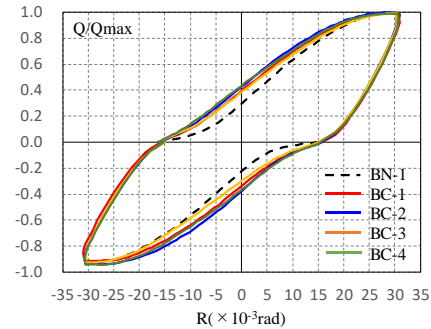


図-11  $R=1/33rad$  定常ループの比較

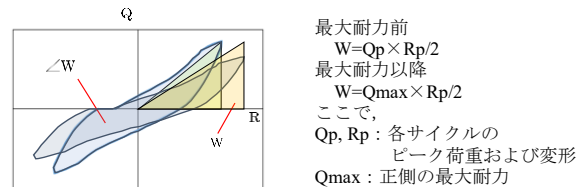


図-12 等価粘性減衰定数概念図

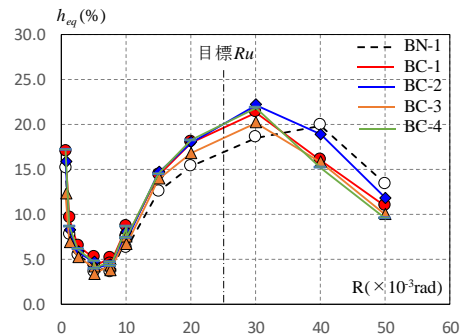


図-13 等価粘性減衰定数の推移

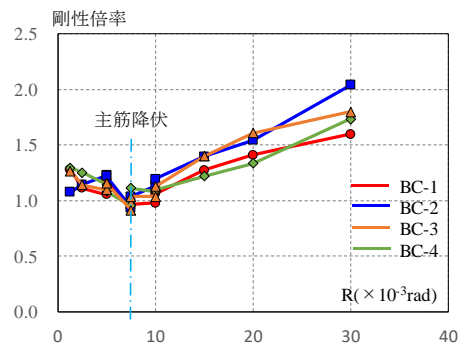


図-14 再載荷時剛性倍率の比較

を算出した。せん断変形の計算方法は、式(7)による。

$$R_{sh} = \frac{\sqrt{h^2 + l^2}}{2hl} (d_1 + d_2) \quad (7)$$

ここで、 $R_{sh}$  : ヒンジ領域のせん断変形角(rad),  $h$  : 計測高さ(mm),  $l$  : 計測幅(mm),  $d_1, d_2$  : 斜め方向に設置した変位計による変形量(mm)

図-16 に各試験体のヒンジ領域におけるせん断変形成分の推移を示す。コア有り試験体の BC-3 については測定不良が生じたため図中には含まれていない。図-16 の縦軸は全体部材角に対するヒンジ領域のせん断変形成分を表している。

ヒンジ領域のせん断変形は、 $R=1/100\text{rad}$  までほぼ全体変形に比例して増加するが、曲げ降伏後も曲げ変形が卓越し、せん断変形成分が増加しないことが望ましい。しかしながら、せん断ひび割れの発生や曲げ降伏による主筋の付着劣化に伴い、曲げ変形量が低下してしまう。

図-16 のコア有り試験体のせん断変形成分は、コアの無い試験体に比べて、特に  $R=1/67\text{rad}$  以降、せん断変形成分の増加を抑制する効果が見られる。コア断面の大きい BC-1、コア拘束筋量が多い BC-4 はせん断変形抑制効果が高い。目標性能 c) に掲げたせん断変形増大の抑制はできたが、その効果は限定された。コア断面を大きく、かつ拘束筋量を増やすなど効果的なパラメータの組合せによりさらなるせん断変形抑制は可能だと考えられる。

## 6. ヒンジ部損傷抑制コアの評価に関する考察

本実験結果の検討からヒンジ部損傷抑制コアの目標性能として掲げた、a) から d) の 4 項目が確認できた。そのうち、b) については想定通りコアによって断面中心部の見かけ上のせん断応力が低下したため、せん断ひび割れ強度を上昇させることに結び付いたと考えられる。目標性能 c) や d) については、パラメータによる傾向が確認できた。ただし、いずれも定量化するには至っていない。

ヒンジ部損傷抑制コアの効果を評価する構造要素は、コア断面サイズ( $C_{fd}$ )、ダボ筋本数( $C_{fdn}$ )、ダボ筋径( $C_{fd}$ )、鋼管( $C_{fsp}$ )、コア拘束筋量( $C_{fc}$ )、など多くのファクターが存在する。今後は、これらの項目を定量的に評価する手法を構築する必要がある。せん断強度に影響を及ぼす構造要素は、コア断面サイズ( $C_{fd}$ )、コア拘束筋量( $C_{fc}$ )、が考えられる。また、初期剛性と再載荷時剛性に影響を及ぼす構造要素には、コア断面サイズ( $C_{fd}$ )、鋼管( $C_{fsp}$ )、コア拘束筋量( $C_{fc}$ )、が考えられる。これら損傷抑制コアの効果を定量的に評価するためにはさらなる実験データの蓄積が必要である。

## 7. まとめ

本実験研究から以下の知見が得られた。

- (1) ヒンジ部損傷抑制コアは、曲げ強度を上昇させることなく、履歴ループを改善し吸収エネルギー量を増加させる効果を有することが確認できた。

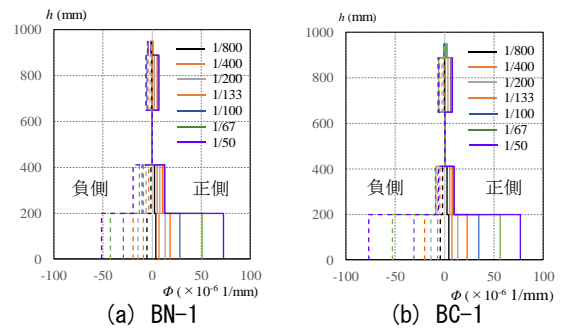


図-15 曲率分布の比較

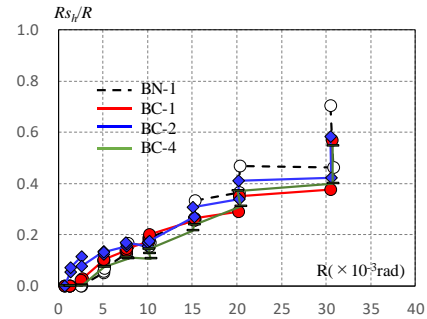


図-16 ヒンジ領域のせん断変形角の推移

- (2) コアを構成する要素の効果に関しては、せん断強度への影響と剛性への影響があり、今後さらなる検討が必要である。

## 謝辞

本研究は JSPS 科研費 18K04451 の助成を受けたものです。また、構造実験に関して ExRC 梁研究開発 WG ((株)熊谷組, 大日本土木(株), 鉄建建設(株), 飛島建設(株), (株)長谷工コーポレーション)のご支援を頂きました。ここに深く感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造保有水平耐力計算規準(案)・同解説, 2016.4
- 2) 高橋俊之, 向井智久, 濱田真, 斉藤大樹, 福山洋, 葉研地彰, 衣笠秀行：多数回繰り返し変形を受ける RC 造梁部材のエネルギー吸収低下に関する研究, 構造工学論文集, No.56B, pp.33-41, 2010.3
- 3) 杉崎向秀, 小林薫：コアコンクリートの補強鉄筋を分割配置した RC 橋脚の変形挙動に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.2, pp.37-42, 2006.7
- 4) 坪崎裕幸, 都祭弘幸, 村田義行, 三浦康成：高靱性柱を用いた超高層 RC 造建物の耐震性に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, pp.877-878, 1991.9
- 5) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 2013.7