

論文 鉄骨部分をリング金物で補強したSRC有孔梁の実験的研究

田中 秀宣^{*1}・瀧島 善之^{*2}・中野 建蔵^{*3}・南 宏一^{*4}

要旨: S部分をリング金物で補強したSRC有孔梁の終局せん断耐力や変形性能を把握する目的で、梁端部近傍に貫通孔を有するSRC有孔梁の実験を行った。その結果、SRC有孔梁の終局せん断耐力は孔径や補強方法に関わらずS部分とRC部分の累加強度により安全側に推測できるが、孔径が梁せいの0.4倍のSRC有孔梁(SRC規上限値)では、小さな孔径のSRC有孔梁よりも梁降伏後の変形性能やエネルギー吸収能力が著しく劣ることが判明した。

キーワード: SRC有孔梁, リング金物, 終局せん断耐力, エネルギー吸収能力

1. はじめに

鉄筋コンクリート(以下RC)構造では、古くから有孔梁に関する多くの研究が行われており、これらを基に「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」¹⁾や「鉄筋コンクリート造建物の靱性保障型耐震設計指針・同解説」²⁾にRC有孔梁の終局せん断耐力式が示されている。一方、鉄骨鉄筋コンクリート(以下SRC)構造では、有孔梁

に関する研究が少なく、数例³⁾である。

文献3)は鉄骨部分(以下S部分)をスリーブ管で補強したSRC有孔梁の研究であり、スリーブ管が鉄骨部分の補強効果のみならずコンクリート部分の拘束にも寄与することを指摘している。また、文献4)では、「鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」⁵⁾(以下SRC規準)がSRC有孔梁のS部分を過小評価していること、S部分を

表-1 試験体概要

No.	試験体	構造	D (mm)	D_s (mm)	d (mm)	リング 金物	体積比 V_s/V_w	L_h (mm)	p_s (%)	備 考
C1	C2507-05	SRC	435	250	175	175A	0.5	175	0.146	
C2	C2505-05				125	125A				
C3	C2507-10				175	175B	1.0		0.293	
C4	C2507-05-pw					175A	0.5			
C5	C2507-05-Q					—	2.0	625	0.146	在来補強(スリーブ管)
C6	C2507-20-C									在来補強(無補強)
C7	C2507-00-C						0	175	0.264	既製補強筋金物
C8	C2507-05-R					175A	0.5			C1,C4,C8のS部分
S1	S2507-05	S	—		125	125A			—	C2のS部分
S2	S2505-05									C3のS部分
S3	S2507-10				175	175B	1.0			C5のS部分
S4	S2507-05-Q					175A	0.5			

※D: SRC 梁せい, D_s : 内蔵SまたはS梁せい, d: 孔径, L_h : 孔中心-梁端間距離

V_s : S部分補強金物の体積, V_w : ウェブ欠損部の体積, p_s : 孔周囲の補強筋比

試験体名: C2507-05-pw

pw: 補強筋量大, Q: L_h 大, C: S部分在来補強, R: 既製補強筋金物
 05: $V_s/V_w=0.5$, 10: $V_s/V_w=1.0$, 20: $V_s/V_w=2.0$
 07: $d=175(d/D=0.7, d/D=0.4)$, 05: $d=125(d/D=0.5, d/D=0.3)$
 鉄骨せい(250mm)
 C: SRC有孔梁, S: S有孔梁

*1 日立機材(株) テクニカルセンター 博士(工学) (正会員)

*2 (株)クラタコーポレーション (元 福山大学 工学部 建築学科)

*3 日立機材(株) テクニカルセンター

*4 福山大学 工学部 建築・建設学科教授 工博 (正会員)

プレート補強するにより SRC 有孔梁の最大耐力が向上することを指摘している。

本研究は、鉄骨(以下 S)構造の有孔梁のウェブ補強に使用するリング状の補強金物(以下リング金物、表-2 参照)を用いて S 部分を補強した SRC 有孔梁の曲げせん断実験を行い、SRC 有孔梁の終局せん断耐力や変形性能について検討したものである。

2. 実験概要

2.1 試験体

本実験の試験体の概要を表-1 に SRC 試験体の試験体形状例を図-1 に示す(図示していない C2507-10, C2507-20-C, C2507-00-C の孔周囲の RC 部分は C2507-05 と同様)。また、使用材料の材料試験結果を表-3, 4 に示す。

内蔵 S に H-250×125×6×9(SS400)を用いた梁せい(D)435mm の SRC 有孔梁試験体(以下 SRC 試験体)8 体と比較のための S 有孔梁試験体(以下 S 試験体)4 体を実験した。SRC 試験体では、孔径、S 部分及び RC 部分の補強方法、孔位置をパラメータとし、S 試験体はリング金物を使用した SRC

試験体の内蔵 S 部分のみによる試験体である。

孔径は $\phi 175(0.4D)$, SRC 規準の上限)と $\phi 125$ の 2

表-2 リング金物の形状・寸法

リング金物	d (mm)	b (mm)	d1 (mm)	d2 (mm)	d3 (mm)
175A	175	12	195.6	206	216
175B	175	20	200.7	218	228
125A	125	11	140.8	150	160

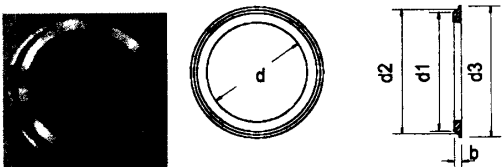


表-3 材料試験結果(鋼材)

鋼材	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)
リング金物	372	553
梁フランジ	315	453
梁ウェブ	368	458
梁主筋 D19	367	547
補強筋 D6	486	603
既製補強筋金物 $\phi 5.1$	1375	1494

表-4 材料試験結果(コンクリート)

試験体 No.	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)
C1~C4	31.9	1.9
C5~C8	27.2	2.0

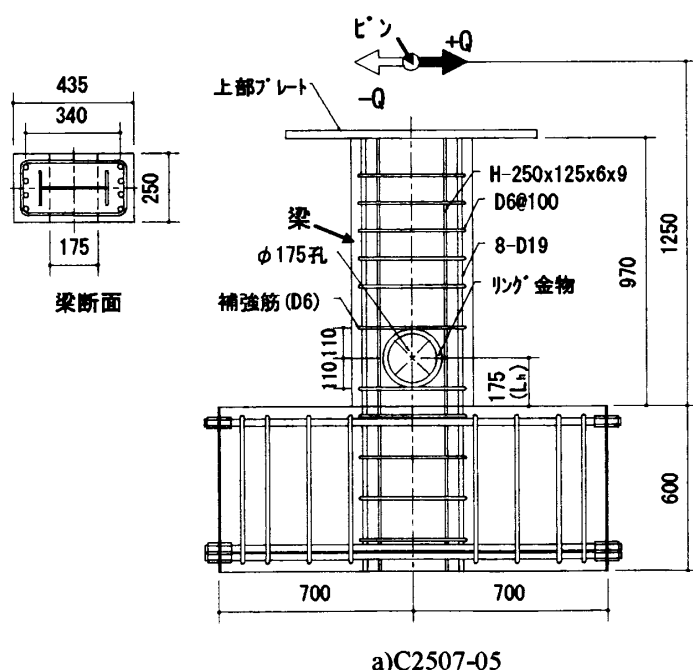


図-1 試験体形状例(SRC 試験体)

[単位: mm]

種類、S 部分の補強方法はリング金物と内径 175mm のスリーブ管($\phi 180 \times 2.5$, 長さ 230mm, 材質 SS400), 無補強の 3 種類とした。また, $\phi 175$ 用リング金物は 2 つの体積比(V_s/V_w)について実験した。RC 部分の補強筋比は, 0.146%, 0.293%, 0.264%(既製補強筋金物)の 3 種類とした。孔位置は梁端部近傍($L_h=175\text{mm}$, L_h : 梁端部から孔中心までの距離)のものを基本とし, 比較のため, 梁端とピン(加力点)の中間点($L_h=625\text{mm}$)に孔を有する試験体の実験を行った。

2.2 実験方法

実験は, 梁の部材軸が鉛直になるように支持部を載荷フレーム内に固定した試験体において, 梁端部から 1250mm の位置にあるピンに水平力(梁せん断力)を作用させることで行った。ピン位置の水平変位から算出した部材角(R)に基づき載荷制御し, 図-2 の載荷履歴に基づき実験した。また, 実験終了は, $R=\pm 0.06\text{rad}$ のサイクルを終了したとき, または変形更新サイクルの最大荷

重が最大耐力の 80%以下となるときとした。

3. 実験結果および考察

3.1 せん断力-部材角関係

せん断力(Q)と部材角(R)の関係を図-3 に, 降伏時や最大耐力時の実験結果を表-5 に示す。図-3 中, $\triangle$ 印は図-4 の方法⁶⁾(S 試験体は General yeild strength 法⁷⁾)により求めた梁降伏時の荷重(Q_y), 部材角(R_y)であり, $\circ$ 印は SRC 試験体において孔中心近傍の梁主筋降伏時の荷重, 部材角であり, 点線は終局せん断耐力計算値(3.3 節参照)である。また, S2505-05, S2507-05-Q は

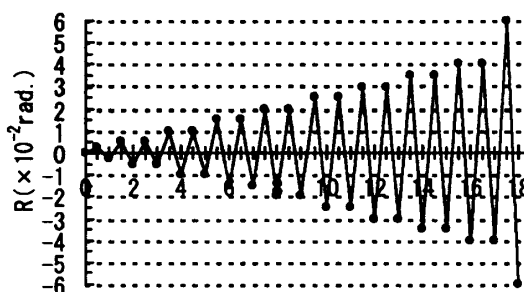


図-2 載荷履歴

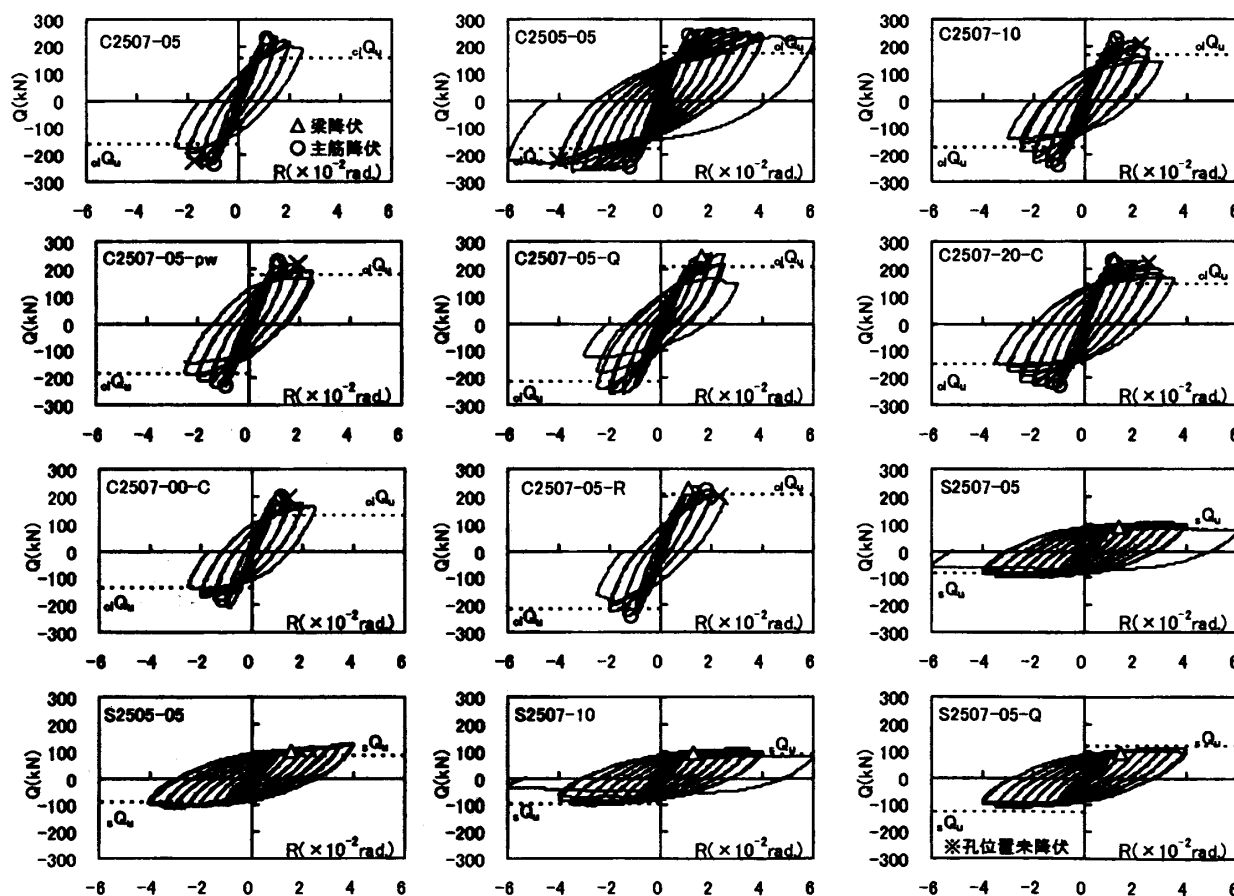


図-3 Q-R 関係

表-5 実験結果及び終局せん断耐力計算値

試験体	降伏時		最大耐力時				終局せん断耐力計算値			
	R_y ($\times 10^{-2}$ rad.)	Q_y (kN)	$R_u(+)$ ($\times 10^{-2}$ rad.)	$Q_u(+)$ (kN)	$R_u(-)$ ($\times 10^{-2}$ rad.)	$Q_u(-)$ (kN)	sQ_u (kN)	rQ_{bu} (kN)	rQ_{su} (kN)	clQ_u (kN)
C2507-05	1.11	227	1.26	234	-1.27	-242	80.2	134	76.8	157
C2505-05	1.15	233	1.91	265	-3.42	-262	87.2	134	88.8	176
C2507-10	1.12	220	1.31	229	-1.37	-247	90.7	134	76.8	168
C2507-05-pw	1.12	228	1.18	231	-1.35	-236	80.2	134	98.9	179
C2507-05-Q	1.62	245	1.98	256	-1.90	-258	123	230	88.9	212
C2507-20-C	1.14	232	1.20	237	-1.27	-238	72.1	134	74.6	147
C2507-00-C	1.01	192	1.00	210	-0.93	-214	61.3	134	74.6	136
C2507-05-R	1.10	226	1.39	237	-1.31	-240	80.2	134	142	214
S2507-05	1.33	84.9	2.59	104	-2.13	-98.9	80.2	—	—	—
S2505-05	1.55	97.9	3.91	128	-2.88	-109	87.1	—	—	—
S2507-10	1.26	89.9	3.11	109	-2.56	-102	90.6	—	—	—
S2507-05-Q	1.44	92.9	3.04	112	-3.30	-112	123	—	—	—

※ R_y , Q_y : 降伏時の梁部材角とせん断力(図-4 参照)

$R_u(+)$, $R_u(-)$, $Q_u(+)$, $Q_u(-)$: 正負最大荷重時の梁部材角とせん断力

sQ_u : S 有孔梁の終局せん断耐力計算値 rQ_{bu} : 曲げ破壊による RC 有孔梁終局せん断耐力計算値

rQ_{su} : せん断破壊による RC 有孔梁終局せん断耐力計算値

clQ_u : SRC 有孔梁終局せん断耐力計算値

実験途中で試験装置能力の上限に達したために $R=0.04$ rad.において実験を終了した。

SRC 試験体では、孔径 125mm の C2505-05 を除き $R=0.04$ rad.未満の変形で実験を終了した。ピン-孔間の距離が小さい C2507-05-Q を除き、SRC 試験体は孔径や補強方法に関係なく $R=0.01$ rad.付近で梁降伏している。また、これらの試験体は梁主筋が降伏している。

3.2 破壊状況

C2507-05, C2505-05, S2507-05, S2505-05 の最終破壊状況を写真-1に示す。ピン-孔間の距離が短い S 試験体である S2507-05-Q は梁端部が降伏し孔近傍は降伏しなかった(図示せず)。SRC 試験体において、孔径 175mm の C2507-05 は、孔から斜めに伸びるひび割れが大きく開き、孔が円形を保っていない。この傾向は、孔径 175mm のその他の SRC 試験体についても同様であったが、孔径 125mm の C2505-05 では梁主筋付近のコンクリートが剥落するものの、孔から伸びるひび割れは大きく開かず、孔も変形していない。また、S 試験体においても SRC 試験体と同様に孔径 175mm の試験体の孔が大きく変形するが、孔径 125mm の試験体の孔はほとんど変形していない。

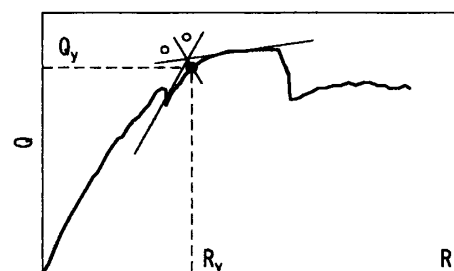


図-4 R_y , Q_y の定義⁶⁾

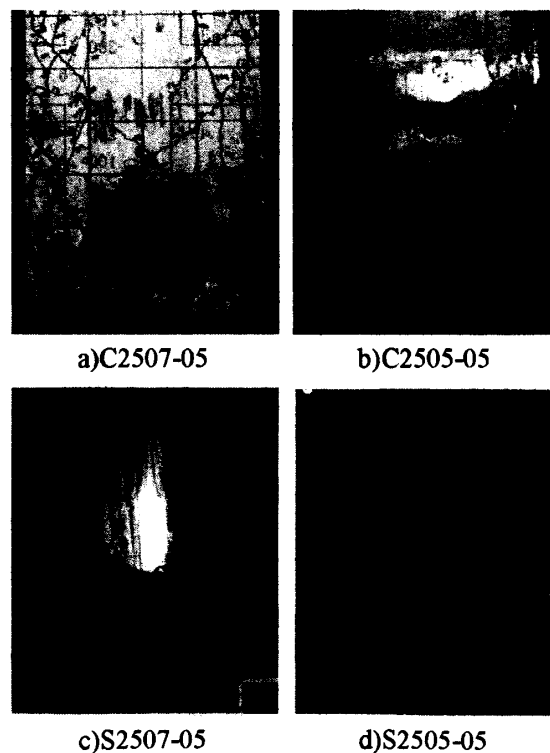


写真-1 最終破壊状況

3.3 終局せん断耐力

SRC 有孔梁の終局せん断耐力は, SRC 規準の累加強度式に基づき, 式(1)~式(5)により算出した(表-5 右欄参照)。ここでリング金物で補強した S 有孔梁の終局せん断耐力は S 有孔梁の M-Q 関係⁸⁾から算出し, 在来補強の S 有孔梁の終局せん断耐力は SRC 規準に従い算出した。

$$c_l Q_u = \min(r Q_{bu}, r Q_{su}) + s Q_u \quad (1)$$

$$r Q_{bu} = r M_u / L \quad (2)$$

$$r Q_{su} = \left\{ \frac{0.092 k_u k_p (F_c + 18)}{M / (Q_f d) + 0.12} (1 - 1.61 \frac{d}{D}) + 0.85 \sqrt{p_s s \sigma_y} \right\} b \cdot j \quad (3)$$

[リング金物補強の場合]

$$s Q_u = \min \left(\frac{V_{ph} \cdot M_{ph}}{V_{ph} \cdot L + M_{ph} - M_{fph}}, V_{ph} \right) \quad (4)$$

[在来補強の場合]

$$s Q_u = r_h \cdot t_w (s D - 2t_f - d) \cdot w \sigma_y \quad (5)$$

ここに, $c_l Q_u$: SRC 有孔梁の終局せん断耐力

$r Q_{bu}$: 曲げで決まる RC 有孔梁終局せん断耐力

$r Q_{su}$: せん断で決まる RC 有孔梁終局せん断耐力¹⁾

$s Q_u$: S 有孔梁の終局せん断耐力

M_u : $A_t \cdot \sigma_t \cdot m d$, A_t : 引張側梁主筋の断面積

σ_t : 梁主筋の降伏点, $m d$: 梁主筋の重心間距離

L : ピン-孔中心間距離, b : 梁幅, d : 梁有効せい

$k_u k_p$: 梁有効せい, 引張鉄筋比で決まる係数

p_s : 孔周囲の補強筋比, F_c : コンクリート強度

$s \sigma_y$: 孔周囲補強筋の降伏点, j : 梁応力重心距離

V_{ph} : S 有孔梁の終局せん断耐力最大値⁸⁾

M_{ph} : S 有孔梁の終局曲げ耐力最大値⁸⁾

M_{fph} : V_{ph} が作用する S 有孔梁の最大曲げ耐力⁸⁾

r_h : 補強方法きまる係数(スリーブ管: 1.0, 無: 0.85)

t_w : ウェブ厚, t_f : フランジ厚

$w \sigma_y$: ウェブの降伏点

SRC 試験体の最大せん断耐力実験値と終局せん断耐力計算値 $c_l Q_u$ の比は 1.11~1.62(平均 1.40)であり, 計算値は実験結果を安全側に推測している。これは, $s Q_u$ が S 有孔梁の最大せん断耐力を小さく推測していること(表-5 参照)や式(3)が RC 有孔梁の終局せん断耐力を安全側に推測するため¹⁾と考えられる。

式(3)が RC 有孔梁の終局せん断耐力を安全側に推測するため, $r Q_{bu} > r Q_{su}$ で設計した SRC 有孔梁においても梁主筋が降伏している。そこで,

リング金物を用いた SRC 試験体(比較のための S 試験体を有する)で梁主筋が降伏したものについて, S 試験体の最大せん断耐力実験値(正負平均)

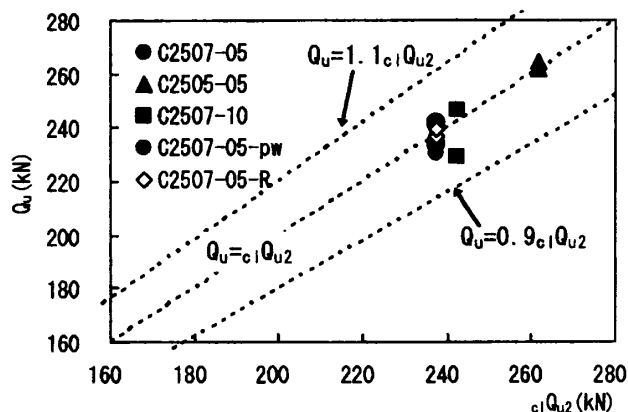


図-5 $Q_u - c_l Q_{u2}$ 関係

表-6 エネルギー吸収能力指標 E_u

試験体	S_1 (kN・rad.)	$\sum S_i$ (kN・rad.)	E_u
C2507-05	1.65	13.54	4.10
C2505-05	1.79	62.36	17.42
C2507-10	1.68	21.30	6.34
C2507-05-pw	1.55	11.30	3.65
C2507-15-C	1.70	21.70	6.38
C2507-00-C	1.46	3.92	1.34
C2507-05-R	1.72	17.47	5.08

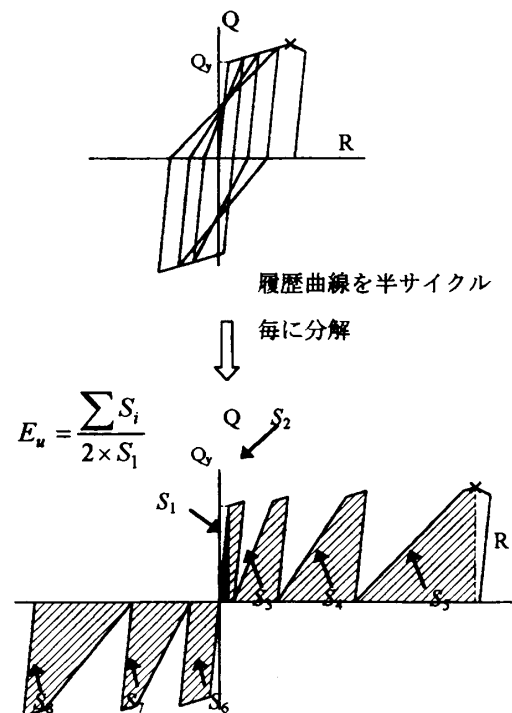


図-6 E_u の求め方⁶⁾

を S 部分の終局せん断耐力とし、 rQ_{bu} を RC 部分の終局せん断耐力として累加した SRC 有孔梁の終局せん断耐力 c_1Q_{u2} と最大せん断耐力実験値を比較した(図-5 参照)。実験値と c_1Q_{u2} は良く対応しており、リング金物を用いる場合の SRC 有孔梁の終局せん断耐力も S 部分と RC 部分の累加強度により推測できることがわかる。

3.4 エネルギー吸収能力

梁端部近傍に孔を有する SRC 有孔梁のエネルギー吸収能力の指標 E_u を表-6 に示す。 E_u は、文献 6) に従い「繰返し載荷時に荷重が最大耐力の 80% まで低下した時」または「変形更新載荷時に明確な耐力低下が発生した時あるいは剛性が正の場合でも荷重が最大耐力の 90% に到達しない時」として定義される終局限界状態(図-3, 6 中, ×印)までのエネルギー吸収能力の評価指標として図-6 に示す方法で求めた。本実験では、孔径 175mm の SRC 試験体の E_u は、S の補強量や RC の補強量を増加させても C2505-05(孔径 125mm)の E_u の 0.4 倍以下であった。従って、塑性化が想定される梁端部に貫通孔を設ける場合、孔径を SRC 規準の上限まで大きくせず、梁せいの 0.3 倍程度以下にすべきと考える。

4. まとめ

S 部分をリング金物で補強した SRC 有孔梁の終局せん断耐力や変形性能を把握する目的で、梁端部近傍に貫通孔を有する SRC 有孔梁と S 有孔梁の実験を行った。この結果から、SRC 有孔梁の挙動について次の知見を得られた。

- ・SRC 有孔梁の終局せん断耐力は、孔径や補強方法に関わらず S 部分と RC 部分の累加強度により安全側に推測できる。
- ・孔径 0.4D の貫通孔を梁端部に有する SRC 有孔梁では、小さな孔径(0.3D)の SRC 有孔梁よりも梁降伏後の変形性能やエネルギー吸収能力が著しく劣る。

謝辞

福原実苗氏(福山大学, 受託研究員)には、本研究の計画段階より多大なる協力と助言を頂きました。また、本研究は 2006 年度福山大学工学部建築学科南研究室の卒業研究として実施し、多数の方々の協力を得ました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会:鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説(第 7 版), pp.271-274, 1999.11
- 2) 日本建築学会:鉄筋コンクリート造建物の靱性保障型耐震設計指針・同解説(第 2 版), pp.169-175, 1999.8
- 3) 神田貴子, 呉偉軍, 土井康生, 福知保長:スリーブ管補強を用いた SRC 有孔梁の耐力に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.479, pp.101-108, 1996.1
- 4) 菊本一高, 田中博明, 荒田辰次郎, 佐藤立美:SRC 有孔梁の力学的挙動に関する基礎的研究(その 1-3), 日本建築学会大会学術講演梗概集(C-1), pp.11451-150, 1999.9
- 5) 日本建築学会:鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説(第 5 版), pp.5-28, 2001.1
- 6) 渡辺英義, 是永健好, 中野克彦, 松崎育弘:曲げ降伏後にせん断破壊する RC 梁部材の靱性評価に関する実験研究, 日本建築学会構造系論文集, No.560, pp.161-168, 2002.10
- 7) 鋼構造建築物の構造性能評価試験法に関する委員会報告書, 建築研究所・日本鉄鋼連盟, pp.81-87, 2002.4
- 8) 大庭秀治, 福知保長, 井戸田秀樹, 青木量介, 伊藤倫夫:鍛造製補強リングを用いた鉄骨有孔はりの補強(その 1,2), 日本建築学会大会学術講演梗概集(C-1), pp.609-612, 2003.9