

論文 RC Slotted Beam 構造の耐震特性とひび割れ性状

大久保全陸*1・朱文照*2・浜本哲嗣*3

要旨：Slotted Beam 構造は、梁と柱の付け根に沿って幅の狭いスロットを梁下端からスラブ下面まで設置してコンクリートを絶縁し、曲げモーメントによる梁下端の応力伝達を下端筋のみに依存する RC ラーメン構造である。本構造では、スロット設置によりコンクリートのひび割れ発達の抑制や圧壊・剥落の抑制など地震による損傷軽減を図り、同時に強度靱性面でも優れた性能を保有することを目的としている。本論文では、スラブ付き梁柱十字型部分骨組の水平加力実験結果に基づいて、同構造が在来工法技術による骨組に比べて損傷軽減で効果が得られること、また、同構造が強度変形状等の力学特性についても優れた性能を示すこと、を報告する。

キーワード：スロット付き梁、ひび割れ損傷、曲げ降伏、耐震性能

1. はじめに

筆者らは6年前に Slotted Beam のコンセプトを提案し¹⁾、その構造の実現を目指して開発研究を続けている。Slotted Beam は、梁降伏型の RC ラーメン構造の梁端部において、梁と柱との付け根に沿って梁下端からスラブ下面までの間にスロットを設置してコンクリートを絶縁し、地震時に作用するその間の応力伝達は梁の下端筋だけで処理することによって梁のコンクリートに生じるひび割れや圧壊等の損傷を軽減させるねらいの構造である。

通常の梁降伏型の RC ラーメン構造では、大地震時には繰り返しの地震力によって梁端部の上端筋と下端筋が交互に曲げ降伏することを許容しているため、地震後には大きなひび割れや下端筋の被りコンクリートの圧壊剥落などの損傷を補修しなければならない事態が生じる。Slotted Beam 構造の開発では力学的性能を満足し、かつ、損傷の軽減が図れることを目的としている。本論文では、実大に近いスラブ付きの Slotted Beam 構造部分骨組の実験を行い、ひび割れ損傷性状についての評価を行うとともに剛性、諸強度等の力学性状について検討する。

2. 試験体と実験方法

2.1 試験体の種類

本実験では図-1 と図-2 に示す RCB, SB-1, SB-2 の3体のスラブ付き梁柱十字型部分骨組試験体を計画した。試験体 RCB は、Slotted Beam との比較用として従来型在来工法を模擬したスラブ付き RC 梁と柱からなる試験体である。その断面寸法、配筋等を図-1 の左側半分を示す。

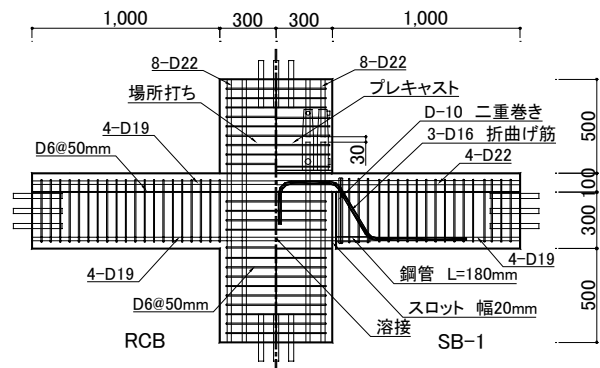


図-1 試験体 RCB と SB-1 の配筋等

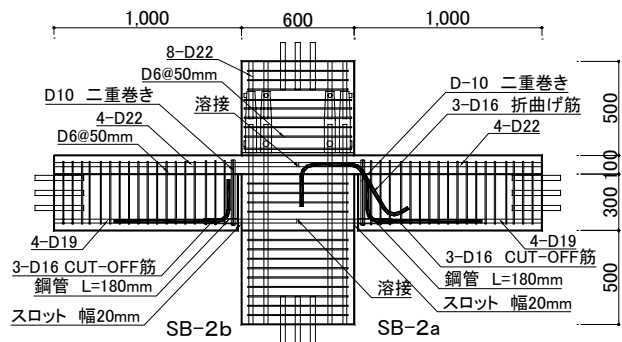


図-2 試験体 SB-2 の配筋等

*1 九州芸術工科大学教授 芸術工学部環境設計学科 工博 (正会員)

*2 九州芸術工科大学大学院 芸術工学研究科生活環境専攻

*3 (株)富士ピー・エス九州支店 建築技術部設計課

試験体 SB-1 と SB-2 の 2 体は、Slotted Beam と 柱からなる十字型試験体である。Slotted Beam 構造では、文献 2 で指摘したように、この構造特有の問題として梁端部のせん断力伝達のために折曲げ筋や cut-off 筋等の特別な配筋が必要である。SB-1 では図-1 の右半分に示した折曲げ筋を左右対称形に配筋してせん断力伝達に対処している。一方、SB-2 は図-2 に示すように左右の梁端の配筋が異なっている。図-2 の右側は梁端に部分的な折曲げ筋と cut-off 筋を配筋したせん断力伝達処理であり、この梁を SB-2a と呼ぶ。図-2 の左側は折曲げ筋を省略したタイプであり、この梁を SB-2b と呼ぶ。

スロット幅は 20mm、高さ方向の長さは梁下端からスラブ下面までの 300mm である。梁下端筋はスロットを貫通して柱梁接合部パネル内を通し配筋されている。スロットから梁のスパン側 180mm 区間の下端筋はアンボンドとし、鋼管で被覆している。

試験体作製では RCB は通常の施工と同様にコンクリートを立て打ちとし、スラブから下の部分を先に施工し、上柱は後日施工した。一方、SB-1 と SB-2 は柱と梁をプレキャストで施工し、スラブ部分と柱梁接合部パネルの部分の部分を場所打ちとした。

2.2 試験体の断面寸法、配筋、材料強度等

柱の断面寸法は $400 \times 600(\text{mm})$ 、 $p_t=0.81\%$ 、 $p_w=0.32\%$ (接合部内も同じ)で各試験体共通である。梁の断面寸法は $400 \times 400(\text{mm})$ で、梁主筋は RCB では上下共 4-D19($p_t=0.82\%$ 、全スラブ筋考慮時 1.0%)せん断補強は 2-D6@50mm($p_w=0.32\%$)である。

SB-1、SB-2 では下端筋の曲げ降伏を先行させるため、下端筋が 4-D19($p_t=0.82\%$)に対して上端筋を 4-D22($p_t=1.14\%$)とした。梁端のせん断力伝達に関し、SB-1 では折曲げ筋 3-D16 を梁中心線に関して約 ≈ 56 度の角度で配筋した。この折曲げ筋をせん断補強筋比に換算すると p_{we} は 0.41%となり、折曲げ筋が負担できる梁のせん断力 Q は梁下端筋曲げ降伏時せん断力 Q_y の約 1.13 倍となる。Cut-off 筋については計算によらず、折曲げ筋と同量で 3-D16 とし、下端筋と同レベルに配筋した。

スラブは厚さを 100mm 片側の出し幅を 400mm とし、x, y 方向とも D6@100mm シングルとした。

材料強度試験結果を表-1 と表-2 に示す。

表-1 鉄筋の引張強度試験結果

呼び名	D22	D19	D16	D10	D6
$\sigma_y(\text{MPa})$	374	383	345	337	384
$E_s(\text{GPa})$	189	183	193	191	191
$\sigma_y(\%)$	0.21	0.22	0.18	0.18	0.20
$\sigma_t(\text{MPa})$	580	548	500	485	540

表-2 コンクリートの圧縮強度試験結果

コンクリート	[1]	[2]	[3]
$\sigma_B(\text{MPa})$	60.6	47.2	53.8
$E_C(\text{GPa})$	36.3	34.0	36.4
$\sigma_B(\%)$	0.28	0.21	0.21

[1]SB-1, SB-2 の柱梁プレキャスト部材, [2]SB-1, SB-2 の接合部パネルとスラブ、及び RCB のスラブ以下の部分, [3]RCB の上柱部分

2.3 加力方法

梁の両先端に鋼製治具を取り付けてその位置をローラー支持、下柱下端をピン支持とし、上柱上端に水平力と柱軸力を作用した。梁の左右ローラー支持点間距離は 2900mm、柱上下の支持点間距離は $H=1700\text{mm}$ である。水平力の制御は変位制御とし、層間変形角 R (荷重点の水平変形を H で除した値)0.25%, 0.5%で正負各 1 回、次いで 1%, 2%, 3.3% で正負各 2 回の繰り返し加力を行った。

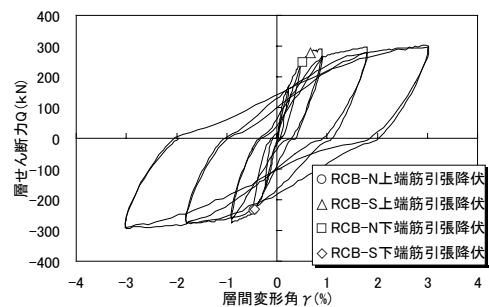


図-3 水平力・層間変形角関係 (RCB)

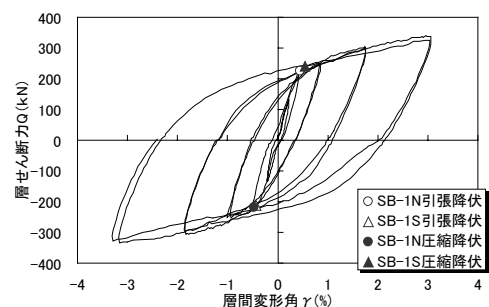


図-4 水平力・層間変形角関係 (SB-1)

3. 弾塑性荷重変形関係

在来工法の試験体 RCB (以下, RCB と略記) とスロット付き梁からなる試験体 SB-1 の水平荷重 (層せん断力) Q と層間変形角 R との関係を図-3 と図-4 に示す。SB-2 の QR 関係は巨視的にみて SB-1 とほぼ同じであるので紙数の関係で省略する。

全試験体の梁部材についての荷重変形関係の包絡線を図-5(slab 圧縮加力時)と図-6(slab 引張加力時)に示す。各試験体はいずれも計画通り、梁端の曲げ降伏により耐力が決定し、曲げ降伏後優れた靱性を示しており、図-3 と図-4 に示した水平荷重と層間変形角との関係の履歴挙動が梁の曲げ降伏に基づく弾塑性挙動に支配されていることを裏付けている。

図-5 からは、スラブが圧縮となる加力時には曲げ降伏時の耐力と変形、及びそこに至るまでの荷重変形関係が各試験体ともほぼ同じであり、スロット有無による大きな違いは無いが、曲げ降伏以降について注目すると、スロット付き梁(以下 SB と略記)では下端筋が正負交互の繰り返し降伏によって歪硬

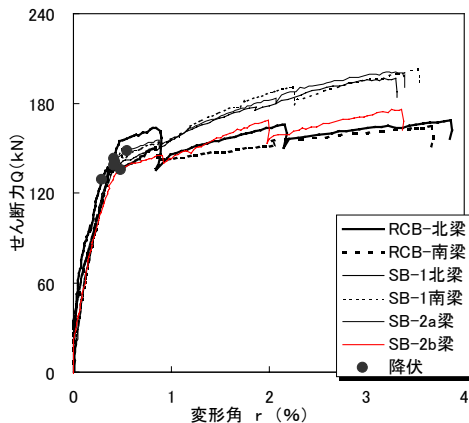


図-5 梁の荷重変形関係包絡線(Slab 圧縮加力時)

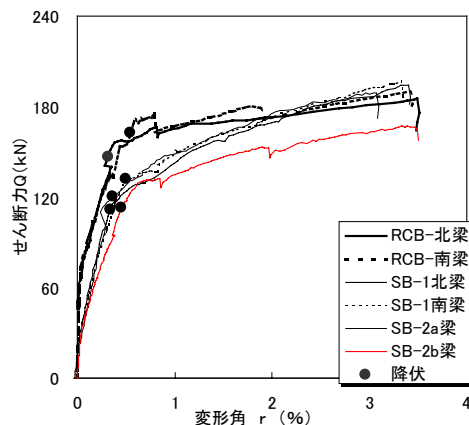


図-6 梁の荷重変形関係包絡線 (Slab 引張加力時)

化による強度上昇を起こし、曲げ降伏後の梁の耐力上昇を生じさせている RCB に観られない特徴的な挙動が観察される。

なお、SB 試験体の挙動について細かく観ると、梁端に折曲げ筋を配置していない SB-2b では、梁の全体変形に対するスロット断面での直接せん断変形の占める割合が他の SB 試験体より大きくなり、図-5 では曲げ降伏後の荷重変形曲線の包絡線が他の SB 試験体より低く、他と異なる挙動が観察される。

次に、スラブが引張となる加力時(図-6)には、SB では下端筋の圧縮降伏耐力より梁の曲げ耐力が決定しているのに対して RCB では梁の上端筋とスラブ筋が降伏して曲げ耐力が決定しているため曲げ降伏耐力が高く、そこに至るまでの荷重変形関係が SB と RCB とでは若干異なっている。なお、SB では下端筋の圧縮降伏後も荷重低下は無く、正負繰り返し変形による歪硬化に起因して梁としての耐力はしだいに増加し、RCB と同等にまでなっている。

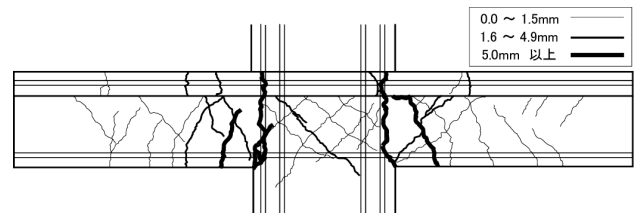


図-7 R=1/30 加力後のひび割れ図 (RCB)

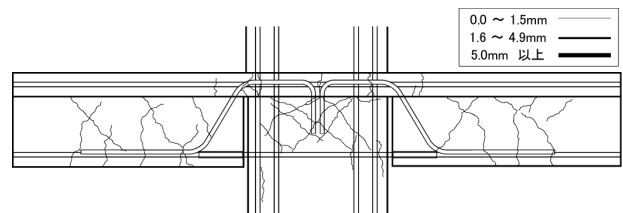


図-8 R=1/30 加力後のひび割れ図 (SB-1)

4. ひび割れ等の損傷評価

本実験では、SB の損傷性状を RCB と直接対比して SB の損傷軽減効果について検討するため、実験中にひび割れ幅測定を逐次行った。

図-7 と図-8 に RCB と SB-1 の $R=3.3\%$ での正負繰り返し加力終了後のひび割れ状況を示す。柱にはほとんどひび割れが生じていないため、ひび割れ図では柱部分の表示を省略している。また、SB-2 のひび割れ状況は SB-1 とほぼ同様であったことから、紙数の関係で掲示を割愛する。

実験中に測定した最大ひび割れ幅と層間変形角の関係を全試験体について整理し図-9と図-10に示す。

スラブ上面の最大ひび割れ幅に注目すると(図-9), SB-1, SB-2 では梁上端筋の曲げ降伏を許容しないため RCB に比べてひび割れ幅が小さくなっている。梁側面の最大ひび割れ幅について観ると(図-10), SB-1, SB-2 は RCB よりひび割れ幅がかなり小さくなっていることが分かる。また, 図には参考として, SB-1 と SB-2 のスロット幅の変化量を示しており, SB ではスロット幅の増加量が RCB の最大ひび割れ幅の値とほぼ対応していることが分かる。なお, 梁柱接合部パネルについても同様な検討をしたが最大せん断ひび割れ幅は約 0.6mm(R=3.3%時)であり, 各試験体間に特に大きな違いは観られない。本実験では, R=3.3%の大変形での繰り返し加力終了後に層間残留変形を0に戻し, その状態での梁側面とスラブ上下面のひび割れ幅測定も行った。このひび割れ幅の測定は, R=3.3%の大変形を経験した地震後の補修工事用と見立てたものとして位置付け, ひび割れ幅が 0.1mm を超えているもののみでひび割れ図を作成した。RCB と SB-1 についての結果を図-11 と図-12 に示す。SB-2 は SB-1 とほぼ同じであったので, 紙数の関係で掲示を割愛した。これらの図を基に全試験体のひび割れ本数を部位ごとに数えた結果を取りまとめて表-3 に示す。

SBはRCBに比べてひび割れ損傷が少なくなって

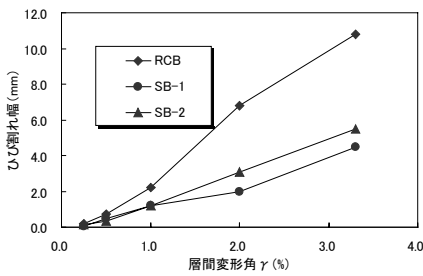


図-9 ひび割れ幅と層間変形角の関係(Slab 上面)

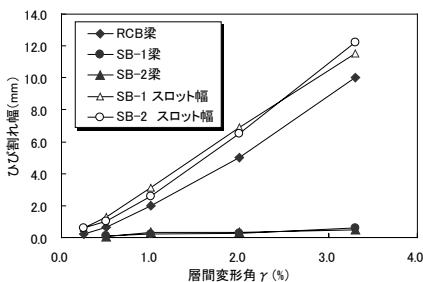


図-10 ひび割れ幅と層間変形角の関係(梁)

おり, Slotted Beam は損傷軽減構造の開発目的になったものとなっていることが分かる。

5. 剛性, 諸強度

5.1 梁の初期剛性

実験開始から曲げひび割れ発生あたりまでの梁の荷重変形関係を図-13 に示す。図に観られるように, SBはスロットの存在によりRCBに比べ初期剛性が低く, 下端引張時にはRC部材特有のひび割れ発生

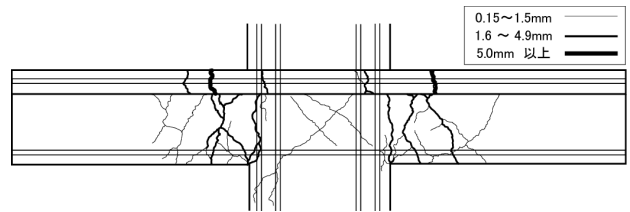


図 11 補修の対象となるひび割れ状況 (RCB)

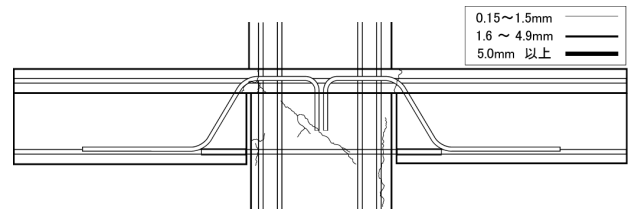


図-12 補修の対象となるひび割れ状況 (SB-1)

表-3 幅が0.1mmを超えるひび割れの部位別本数

試験体	RCB	SB-1	SB-2
ひび割れ本数(梁)	11	0	1
同(スラブ)	5	2	4
同(接合部)	3	3	4

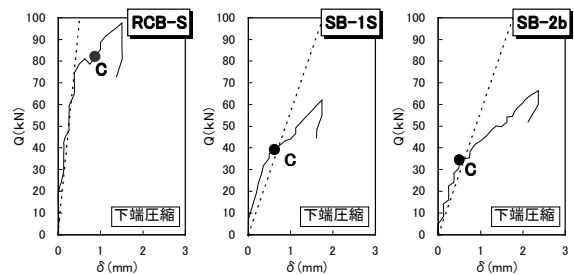
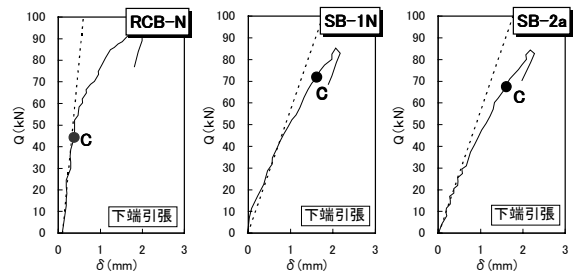


図-13 梁の初期剛性(C:初曲げひび割れ発生)

による急激な剛性低下がなく原点から曲げ降伏点に直接向かう直線的な荷重変形関係を示す特徴がある。

弾性剛性 K_E の計算値 (図-13 の破線) を実験の初期剛性と比較して表-4 に示す。RCB の弾性剛性は通常の方法により梁の曲げ変形とせん断変形に基づいて計算した。その際、スラブの協力幅は片側 $0.1L_0$ (L_0 は梁内法スパンに対応する長さで 2300mm) とした。一方、SB については、梁端から $D/2$ の長さの下端筋付着除去区間を、下端筋とスラブと斜材コンクリートにモデル化したトラスに仮定し (剛性 $K_1=67\text{kN/mm}$)、またそれより先の梁部材については RCB と同様な RC 部材 (剛性 $K_2=342\text{kN/mm}$) とした直列バネモデルの剛性 $K=K_1K_2/(K_1+K_2)$ とした。計算結果は表-4 に示すように SB では実験値のばらつきはあるが概ね対応する結果となった。

5.2 曲げひび割れ強度

SB は梁端に最初から計画的にひび割れを設けた構造であり、梁端では梁の曲げひび割れ強度という概念がないが、スロット上部にはスラブがあるので、この部分に正負の曲げモーメントによりひび割れが発生する。このひび割れ強度については、スラブの有効幅の部分と下端筋からなる合成断面について断面係数 Z_e を算出し、 $M_c=1.8(\sigma_B)^{0.5} Z_e$ によりひび割れモーメントを求め、実験値と表-4 で比較した。計算値はほぼ実験値に近似した値となった。

5.3 曲げ降伏強度及び降伏時剛性

式(1)~(3)により、各試験体の曲げ降伏強度を計算した。その結果を実験値と比較して表-4 に示す。表-4 に観られるように、下端筋引張時においては、実

験値は計算値より 8%~23%大きい、SB と RCB とはほぼ同等な値になっている。また、SB では下端筋圧縮時には断面内の応力中心間距離が一定で変化しないため、曲げ降伏荷重はほぼ計算値と同じ値になっている。

降伏時変形については、降伏時剛性の初期剛性に対する低下率の形で算出し表-4 に示す。計算値は既往の式による γ_y の値とした。なお、SB については 5.1 初期剛性で述べたバネ K_2 のみが剛性低下すると仮定し、剛性低下率を $\gamma_{sy} = \gamma_y(K_1+K_2)/(K_1+\gamma_y K_2)$ で計算した。

$$M_u = 0.9 a_t \gamma_y d \quad [\text{RCB, SB 下端引張}] \quad (1)$$

$$M_u = a_c \gamma_y j \quad [\text{SB 下端圧縮}] \quad (2)$$

$$M_u = 0.9(a_t \gamma_y + a_{ts} \gamma_{sy}) d \quad [\text{RCB 上端引張}] \quad (3)$$

5.4 S-Crack とせん断終局強度

SB では、梁端下端が圧縮となる曲げせん断力を受ける加力時に、梁端のコンクリートがないため、圧縮力が下端筋に被せた鋼管の終点の下端筋で支持されるので、そこに向かって斜め圧縮ストラットが形成され、せん断ひび割れが発生することがある。このひび割れを S-Crack と呼んできた(文献2)。このひび割れ強度 Q_{SC} は、式(4)でほぼ予測できることを既往の研究(文献4)で考察した。ここで、 M/Q は梁の反曲点(支持点)から下端筋に被せた鋼管の終点位置までの距離、 $k_c=0.72$ とする。

また、今回の実験では、いずれの試験体においてもせん断破壊までは至っていないが、式(5)で各試験

表-4 剛性、諸強度の実験値と計算値 (実験値は細字、計算値は太字斜体)

	K_E (kN/mm)	Q_{BC} (kN)		Q_y (kN)		γ_y		Q_{SC} (kN)	Q_{SU} (kN)
		slab 引張	slab 圧縮	slab 引張	slab 圧縮	slab 引張	slab 圧縮		
RCB-北梁	201 <i>200</i>	-- --	44 <i>48</i>	147 <i>147</i>	143 <i>120</i>	-- --	0.15 <i>0.18</i>	-- --	185 <i>229</i>
RCB-南梁	212 <i>200</i>	82 <i>66</i>	-- --	163 <i>147</i>	129 <i>120</i>	0.12 <i>0.19</i>	-- --	-- --	189 <i>229</i>
SB-1 北梁	51 <i>56</i>	-- --	72 <i>63</i>	112 <i>115</i>	138 <i>120</i>	-- --	0.67 <i>0.55</i>	181 <i>184</i>	196 <i>281</i>
SB-1 南梁	58 <i>56</i>	39 <i>29</i>	-- --	132 <i>115</i>	141 <i>120</i>	0.40 <i>0.59</i>	-- --	186 <i>184</i>	203 <i>281</i>
SB-2a 梁	49 <i>56</i>	-- --	67 <i>63</i>	120 <i>115</i>	148 <i>120</i>	-- --	0.53 <i>0.55</i>	168 <i>184</i>	201 <i>281</i>
SB-2b 梁	60 <i>56</i>	34 <i>29</i>	-- --	113 <i>115</i>	135 <i>120</i>	0.36 <i>0.59</i>	-- --	158 <i>184</i>	176 <i>281</i>

K_E : 初期剛性, Q_{BC} : 曲げ初ひび割れ, Q_y : 曲げ降伏(SB 試験体のスラブ引張時の値は下端筋圧縮降伏荷重)
 γ_y : 曲げ降伏時剛性, Q_{SC} : S-crack 強度, Q_{SU} : 最大せん断力(実験値)とせん断終局強度計算値

体のせん断終局強度を計算した。S-Crack 及びせん断終局強度の計算値を S-Crack 実験値および最大荷重とそれぞれ対比して表-4 に示す。表で分かるように、本実験でも式(4)による計算値は実験値に近く、SB の S-Crack 発生荷重が計算でほぼ検討できることが分かる。

$$Q_{SC} = \{0.085k_C(50 + \sigma_B)/(M/Qd + 1.7)\}bj \quad (4)$$

$$Q_{SU} = \min[Q_{SU1}, Q_{SU2}] \quad (5)$$

$$Q_{SU1} = Q_{TRUSS} + Q_{DA}$$

Q_{TRUSS} = 折曲げ筋による伝達せん断力

Q_{DA} は上端筋のダボ作用による伝達せん断力

で、 $Q_{DA} = \min[0.7 \sigma_{yt} a_t, 0.4(E_C \sigma_B)^{0.5} a_t]$

$$Q_{SU2} = \{0.053p_t^{0.23}(\sigma_B + 18)/(M/Qd + 0.12) + 0.85(p_w - \sigma_{wy})^{0.5}\}bj$$

6. Slotted Beam の特殊補強筋の配筋効果

SB では、S-Crack の拡大防止やせん断力伝達のため、折曲げ筋、Cut-off 筋、梁端の肋筋等の特殊補強筋を配筋している。S-Crack が発生する梁下端近

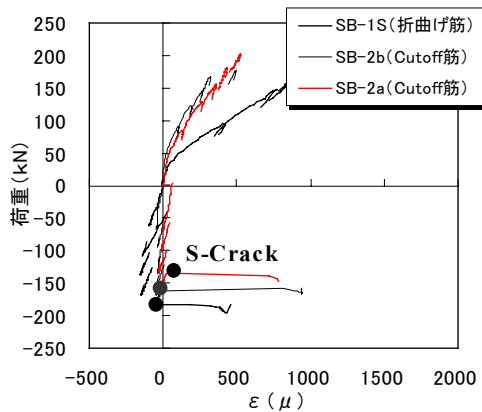


図-14 梁下端の折曲げ筋、Cut-off 筋の挙動

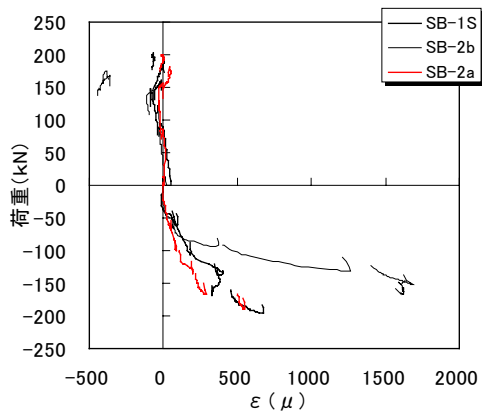


図-15 スロット際の肋筋の挙動

辺の折曲げ筋と Cut-off 筋の挙動を図-14 に示す。また、スロット際肋筋の挙動を図-15 に示す。

図-14 に観られるように、折曲げ筋も Cut-off 筋も S-Crack が発生した後歪が増加しているが降伏に至らず、S-crack の拡大防止に役立っていることが分かる。また、図-15 に観られるように、スロット際肋筋は梁下端圧縮時に折曲げ筋とともにせん断力伝達に大きな役割を示している。SB-2b では、折曲げ筋が配筋されていないため、肋筋の歪が SB-1s、SB-2a より大きくなっている。

7. まとめ

本実験で得られた知見を以下に要約する。

- (1) スロット付き梁は在来工法の梁に比べて、ひび割れ損傷が著しく軽減される。
- (2) スロット付き梁の弾塑性性状については、本報告で検討した計算方法により諸性状が実験値とほぼ対応できた。
- (3) スロット付き梁の梁端部せん断力伝達に関しては、折曲げ筋とスロット際の肋筋の集中的配筋が有効である。また、S-Crack の拡大防止に関しては、Cut-off 筋も有効である。

参考文献

- (1) 大久保全陸ほか；梁端下端エネルギー消費型 RC ラーメン構造に関する研究(その1)及び(その2)，日本建築学会中国・九州支部研究報告，第10号，pp.405-412, 1996.3.
- (2) Masamichi OHKUBO et al.; Shear Transfer Mechanism of Reinforced Concrete Beams with a Slot at the Beam-end, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, pp.523-528, 1999.
- (3) 大久保全陸ほか；梁端にスロットを設けた梁下端筋降伏型 RC 造骨組の水平加力実験，コンクリート工学年次論文報告集, Vol.22, No.3, pp.1513-1518, 2000.
- (4) 松岡忠生ほか；スロット付きプレキャスト鉄筋コンクリート梁のせん断破壊性状，コンクリート工学年次論文報告集, Vol.23, No.3, pp.313-318, 2001.