

## 論文 梁降伏型骨組における R/C 造非構造壁の変形性状

中山 治美\*1・大久保全陸\*2

**要旨:** 鉄筋コンクリート造開口壁を含むラーメン構造の耐震設計において、その開口壁の存在が骨組の力学的特性に及ぼす複雑な影響を回避し、耐震構造設計の計算を明快にするために壁の周囲に完全スリットを配置して壁を非構造部材化する設計手法が普及している。本論文では、開口壁の周囲3辺に完全スリットを配した1層1スパン分の鉄筋コンクリート造骨組の水平加力実験を行い、3辺完全スリット配置による壁の非構造化はほぼ耐震構造設計の目的を叶えさせるものであることを示した。また、3辺完全スリットで骨組から絶縁された開口壁の変形性状とスリット幅の挙動について検討し、骨組の設計限界変形に対する所要スリット幅を求める簡単な計算式を示した。

**キーワード:** 鉄筋コンクリート, 開口壁, 非構造部材, スリット, 耐震設計

## 1. はじめに

鉄筋コンクリートラーメン構造の耐震設計において、耐震壁として活用できない開口壁が存在する場合、その開口壁をより積極的に非構造壁扱いするために骨組に内接する開口壁の周囲3辺(開口壁の両柱際2辺と下辺)に完全スリットを設けて梁降伏型の骨組を計画する手法が普及しつつある。しかし、このような3辺完全スリット型開口壁付き骨組におけるスリット幅の挙動(骨組と壁の変形性状の相互作用)に関しては研究資料が乏しいため、実施設計においてはスリット幅は設計者の独自の判断により設定し、壁は完全な非構造部材であるとの仮定に立ち、開口壁の変形・破壊性状についてはほとんど関心が払われていない状況にある。

かつて筆者らは、このような骨組の弾塑性力学的挙動を把握することを目的として、モルタル製の小型骨組の一方向加力実験を行い、開口壁の周囲3辺を完全スリットで縁切りすれば、開口壁付き骨組の荷重変形曲線は壁無しの骨組の場合とほとんど同等となること、また開口壁は3辺を縁切りされてもひび割れが発生する可能性があること等を報告した。<sup>1)</sup> しかし、その実験は小

型のモルタル製骨組であったため、鉄筋コンクリート造骨組での実験により、骨組と開口壁の変形・破壊性状についてより信頼できる詳細な検討が必要であるとの考えから、今回中型のRC造開口壁付き骨組により、前記のスリット幅の挙動についても注目して再度実験を行い、骨組と非構造壁の強度変形破壊性状等について検討することとした。本論文では、その結果について報告する。

## 2. 実験計画

## 2.1 試験体概要

前記の研究目的のために、開口壁付き骨組試験体1体(WO-FRAME)を計画した。この試験体の骨組部分の強度変形性状について考察するために、これと比較できるようにWO-FRAMEから開口壁を取り除いた形の試験体1体(OPEN FRAME)も同時に計画した。

試験体は、多層多スパン骨組の1層1スパン分を想定してモデル化したもので、図-1に示すように柱  $B \times D = 20 \times 30(\text{cm})$ 、梁  $b \times D = 20 \times 20(\text{cm})$ 、柱内法高さ 50cm、梁内法長さ 130cm の実物の約 1/4 程度の中型鉄筋コンクリート造 OPEN

\*1 九州芸術工科大学大学院 芸術工学研究科生活環境専攻(正会員)

\*2 九州芸術工科大学教授 芸術工学部環境設計学科(正会員)

FARAMEと、この骨組に図-2のように開口壁(厚さ4cm, 開口周比0.4, 壁は梁幅の中心に接合)を付けたもの(WO-FRAME)の計2体である。

WO-FRAMEでは、壁の左右両柱際及び壁の下辺の壁周囲3辺には、幅2cmの完全スリットが設けられている。

OPEN FRAMEは梁降伏型で設計されており、WO-FRAMEの柱梁の配筋はOPEN FRAMEと同じとした。骨組の上梁と接合している壁の縦筋は梁内に15d(dは壁筋の公称直径)の長さで定着した。柱梁の主筋は柱梁それぞれの部材端部に鉄板を設けて溶接定着した。

開口壁の開口の形状・寸法・配置等の決定方法に関しては特別な根拠は有していないが、鉄筋コンクリート壁式ラーメン構造の集合住宅で類似の形状が観られることをイメージした。本実験では、研究の基礎段階としてWO-FRAME1体を対象としたが、壁の開口形状・寸法・配置等は、本研究の主目的である壁の変形・破壊性状やスリット幅の挙動に関する変動要因となりうるものであるので、現段階ではこの点に関しては後の研究課題として捉えることとした。

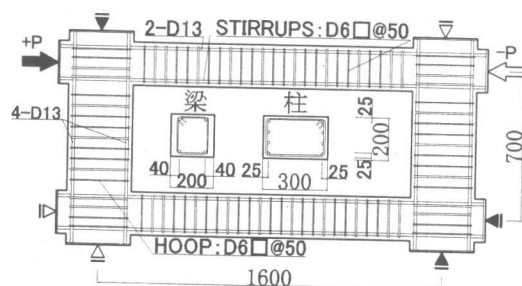


図-1 OPEN FRAMEの形状・配筋・加力方法等

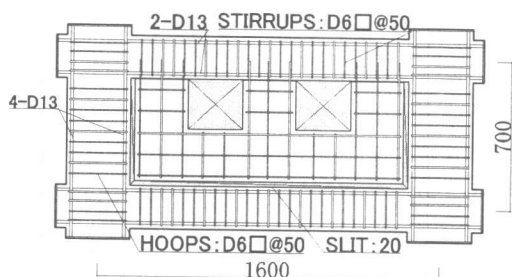


図-2 WO-FRAMEの形状・配筋

## 2.2 使用材料の性質

鉄筋とコンクリートの材料試験結果を表-1と表-2に示す。コンクリートは、普通コンクリートで粗骨材の最大寸法は15mmである。

表-1 鉄筋の材料試験結果

	$\sigma_y$ (MPa)	$\epsilon_y$	$\sigma_t$ (MPa)	Note
D13	353	0.0020	487	梁柱主筋
D6	395	0.0037	499	肋筋, 壁筋

※D6の $\epsilon_y$ は0.2% off-setに対応する値

表-2 コンクリートの材料試験結果

$\sigma_B$ (MPa)	$\epsilon_B$	$E_c$ (GPa)	$\sigma_t$ (MPa)
19.0	0.00202	20.1	1.70

## 2.3 加力測定方法

加力は図-1に示した。図中の矢印のように骨組の上下梁芯線と左右柱芯線に荷重と反力が作用するようにし、上梁の片側からアクチュエータにより水平力を加えた。このような加力方法の場合には、水平力により上下の梁に水平力の1/2に相当する変動軸力が作用し、柱にもそれに連動する変動軸力が生じる。この点は実際の骨組と異なるが、本実験での目的に対して致命的な問題は生じないと思われる。

水平力は正負繰り返し加力とした。繰り返し加力のルールは、層間変形角 $R = \pm 0.25\%$ と $\pm 0.5\%$ で各1回、 $\pm 1\%$ 、 $\pm 2\%$ 、 $\pm 4\%$ で各2回繰り返しすることとした。ここに、 $R$ は上下梁芯線の相対水平変位を上下梁芯線間距離で除した値である。

測定項目としては、水平荷重と左右柱の水平層間変形その他、梁軸方向変形、梁主筋位置での梁の軸方向区間変形、鉄筋各部の歪、壁表面のコンクリートの歪とした。また、開口壁の下端において柱際鉛直スリットの幅の変化を変位計で測定した。さらに、主要なひび割れ幅を実験中にクラックスケールで測定した。

## 3. 実験結果

### 3.1 荷重変形曲線

2体の骨組の実験による水平力・層間変形関係(荷重変形曲線)を図-3と図-4に示す。OPEN FRAME(図-3)においては、試験体の設計通り

梁降伏型の抵抗機構が形成され、層間変形角  $R = \pm 4\%$  においても耐力低下が起こらず終始安定した抵抗性状を示した。梁の曲げ降伏は約  $R = 6.7\%$  前後の層間変形で起こっている。水平力の  $1/2$  が梁に変動軸力  $N$  として作用することを考慮して、柱の曲げ終局強度略算式  $M_u = 0.8a_1 \sigma_y D + 0.5ND(1 - N/BD \sigma_g)$  を梁にあてはめて求めた OPEN FRAME の終局水平耐力は  $148\text{kN}$  であり、梁降伏機構が完成された後の  $R = 1\%$  時の水平荷重実験値とほぼ同等である。

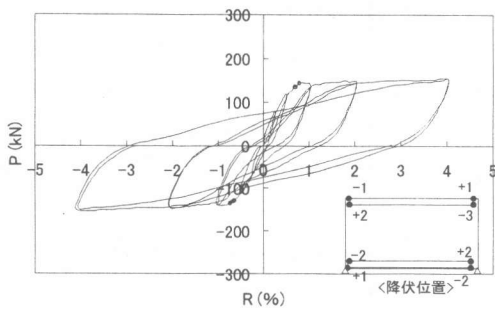


図-3 荷重変形曲線 (OPEN FRAME)

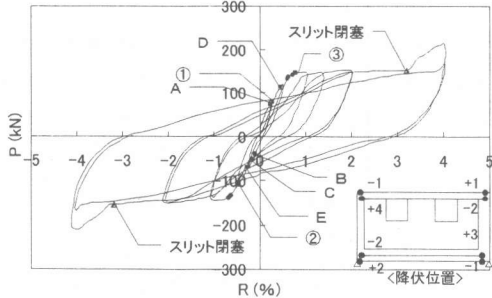


図-4 荷重変形曲線 (WO-FRAME)

WO-FRAME の場合 (図-4) においても、OPEN FRAME (図-3) と同様に上下左右4ヶ所の梁端危険断面位置の主筋が曲げ降伏し、開口壁の下端隅角部において鉛直スリットが閉塞して柱と接触するまでの間の荷重変形曲線は OPEN FRAME (図-3) のものとほとんど全く同形となった。スリットの閉塞は層間変形角が約  $R = 3.3\%$  で起こり、以降は層間変形の増加に伴って水平力の一部が開口壁に伝達されたことにより水平力の上昇が生じた。開口壁下端隅角部における鉛直スリット幅の挙動については後に考察

する。

### 3.2 ひび割れ性状

OPEN FRAME と WO-FRAME の  $R = 2\%$  での繰り返し加力後のひび割れ状況を図-5と図-6に示す。梁・柱のひび割れ性状は、両試験体ともほぼ同じであり、上梁に開口壁が付いていることによる影響は梁のひび割れパターンに関する限り特に観られない。

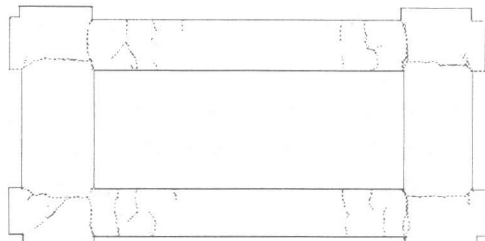


図-5 OPEN FRAME のひび割れ状況 ( $R = 2\%$ )

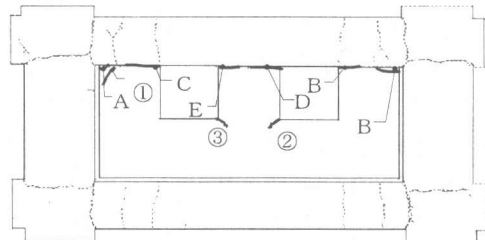
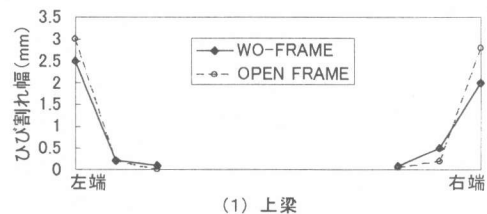
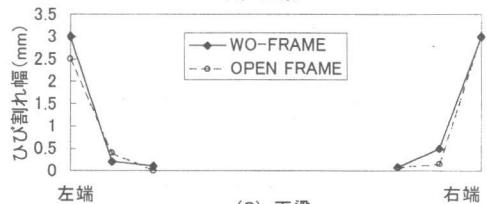


図-6 WO-FRAME のひび割れ状況 ( $R = 2\%$ )



(1) 上梁



(2) 下梁

図-7 ひび割れ幅 ( $R = 2\%$ )

梁のひび割れは、上下左右の梁端部で梁端からスパン中央に向けて梁せい  $D$  の約  $1.25$  倍の範囲に発生しており、このひび割れパターンは

R=1%レベルまでにほぼ完了し、R=4%の実験終了時においてもほぼ同じであった。

梁の曲げひび割れ幅をクラックスケールで測定した結果を図-7に示す。図はR=2%の正加力ピーク時のものであり、図に観られるようにひび割れ幅は梁端危険断面位置のひび割れが他に比べて極端に大きい。WO-FRAMEとOPEN-FRAMEとの間に顕著な違いはない。また、梁主筋の歪測定値について検討した結果、WO-FRAMEの上梁スリット部での歪集中は特に観察されなかった。

WO-FRAME(図-6)の壁のひび割れに注目すると、上梁に接合している3ヶ所の壁と梁との水平接合部と、中央壁開口下端隅角部にひび割れが生じている。これらのひび割れの内、壁と梁との水平接合部に生じたひび割れAからDは骨組が曲げ降伏する以前のR=0.5%前後で観察され、中央壁下端隅角部のひび割れ②③は曲げ降伏後の約R=0.71%の変形で観察された。これらのひび割れは、実構造物でしばしば観察されるいわゆる乾燥収縮き裂の発生原因である元応力の影響が全く無いとは言えないが、実験開始前には観察されておらず、明らかに梁のラーメン変形が強制的に開口壁に及ぼされることにより発生する2次的なひび割れである。しかし、ひび割れ幅はR=2%レベルで0.1mm程度で、梁のひび割れの幅に比べると微細であった。

WO-FRAMEのR=4%での繰り返し加力後のひび割れ状況を図-8に示す。開口壁中央の斜めひび割れ、開口下端隅角部の斜めひび割れ、壁下端隅角部の圧壊は、およそR=3.3%の変形で鉛直スリットの下端が閉塞して水平力の一部が直接壁に伝達されるようになってから発生したものである。

スリットが閉塞すると、骨組の水平せん断力が増加し、かつ壁にひび割れや圧壊が生じるので、耐震設計でスリットを設けて開口壁を非構造化し、かつ壁の損傷軽減も期待する場合には、スリットが閉塞する時の層間変形は重要な情報の一つである。

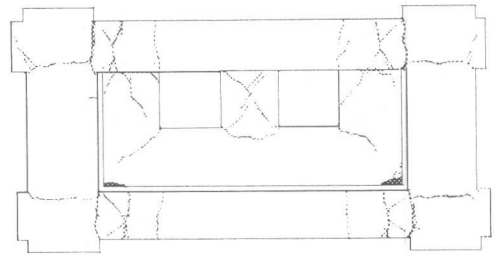


図-8 WO-FRAMEのひび割れ状況(R=4%)

#### 4. スリット幅の挙動

図-9は、梁端危険断面位置のみで曲げモーメントによって回転変形を起こし、他の部分は変形しない(剛体)と仮定した梁降伏型骨組の変形マクロモデルを模式化して示したものである。この仮定により、図に示すように柱は剛体として層間変形角に相当する回転変形Rを生じ、梁には両梁端圧縮縁(c点)で回転変形し部材角R'が生じる。図からRとR'の間には幾何学的関係から

$$R' = R(Dc/lo) \quad (1)$$

が得られる。ここに、Dcは柱の断面せい、loは梁の内法スパン長さである。

図中の右柱の破線cbはc点から水平線(oo)に対して直角に下ろした鉛直線であり、∠acbはRに等しいので、線分abは、梁が回転変形しないと仮定したときの右壁下隅角部d点の層間変形角Rに伴う水平移動距離となり、線分abは

$$ab = h_w R \quad (2)$$

となる。この $h_w R$ がスリット幅の変化量Wsの一部となるが、実際には梁がR'だけ回転し、d点はd'点に移動するので、Wsにはその移動距離dd'を加算しなければならない。図中の破線edはe点から下ろした鉛直線であるので、∠ded'はR'に等しく、dd'は

$$dd' = h_w R' \quad (3)$$

となる。以上から、右壁下隅角部位置でのスリット幅の変化量Wsは式(1)から式(3)の関係を用いて

$$\begin{aligned} Ws &= ab + dd' = h_w(R + R') \\ &= h_w(1 + Dc/lo)R \\ &= h_w(1 + Dc/lo) \delta / h \end{aligned} \quad (4)$$

となる。ここに、 $\delta$ は骨組の層間変形、hは上下梁芯間距離(階高に相当)である。

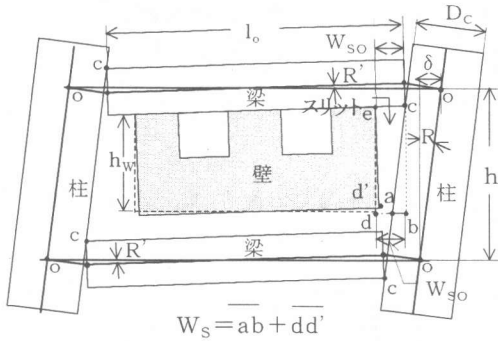


図-9 梁降伏型骨組の変形マクロモデル

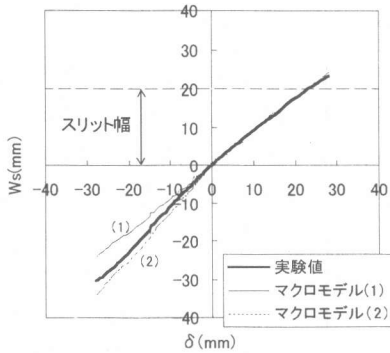


図-10 鉛直スリット幅の挙動

図-10 に実験で測定したスリット幅の変化量  $W_s$  と層間変形  $\delta$  との関係を示す。図中の細線(1)は式(4)による  $W_s$  と  $\delta$  の関係である。 $W_s$  は 0 からスタートし、スリット幅が減少する正加力場合(図の第1象限)には、その上限は実験開始前のスリット幅  $W_{s0}$  である。実験で計測された  $W_s$  は層間変形  $\delta$  の増加にほぼ比例する形で増加し、 $W_s$  と  $\delta$  との関係は図-9 のマクロモデルから予想される式(4)の関係とほぼ一致している。なお、実測値  $W_s$  がスリット閉塞後もスリット幅  $W_{s0}$  を超えて増加しているが、これはスリット閉塞後、接触した壁に局部的な圧壊が生じ、その変形量が  $W_{s0}$  以上の増加分となったためと思われる。

スリット幅が開く負加力の場合(図の第3象限)には、閉塞はないので  $W_s$  に上限はない。図によると、この場合には  $W_s$  は式(4)による値より大きくなっている。この点に関しては、図-9 のマクロモデル的な発想に立つと、梁の回転中心が図-9 の左梁上端の c 点となり、壁高さ  $h_w$  が見かけ上大きくなることによって  $W_s$  の増加が生じるものと考えら

れる。そこで、スリットが開く場合には、式(4)において  $h_w$  を  $(h_w + D_b)$  ( $D_b$  は梁せい)として計算すると、図中の点線(2)となり、計算値は実測値と良く一致した。

なお、開口壁下部の水平スリット幅の挙動に関しては、実験中にその幅の減少によって下梁との接触が問題となるような現象は観察されていない。

## 5. 有限要素解析による考察

### 5.1 解析方法と仮定

スリット幅の挙動に及ぼす開口壁自体の変形の影響を観察すること等のため、汎用ソフトウェア MARC K6.2 を用いて、弾塑性有限要素解析を行った。解析にあたり以下の仮定を設けた。

①コンクリートは4節点四角形平面応力要素とし、鉄筋は1次元要素とする。②コンクリートの単軸応力歪関係は、圧縮側ではコンクリートの圧縮試験で得られた  $\sigma - \epsilon$  関係を折れ線で近似し、引張側では引張強度を  $1.8\sqrt{\sigma_c}$  として引張強度後は  $\sigma - \epsilon$  関係を直線的に軟化させる。③コンクリートの2軸応力化における破壊基準には Von Mises の降伏条件を用いる。④鉄筋の  $\sigma - \epsilon$  関係は bi-linear とし、2次勾配は 0 とする。⑤鉄筋とコンクリートとの間に Spring を設けて付着性状を考慮する。鉄筋の軸方向に平行する方向の Spring の  $\tau - S$  関係には、森田ら<sup>2)</sup>の提案による  $\tau = 1000S$  を採用する。⑥コンクリートのせん断剛性低下率には、Al Mahaidi<sup>3)</sup>による  $\beta = kG'/G = 0.4 \epsilon_c / \epsilon_s$  ( $\epsilon_c$  はひび割れ時の歪、 $\epsilon_s$  はひび割れと直角方向の歪、 $k=1.0$ )を採用する。

### 5.2 解析結果の検討

解析による荷重変形関係を実験による荷重変形関係の正側包絡線と比較して図-11 に示す。また、層間変形角  $R=0.25\%, 0.5\%, 1\%, 2\%$  での荷重の解析値と実験値を表-3 に示す。OPEN FRAME, WO-FRAME とも、荷重と変形の関係については解析値と実験値は概ね良好な対応が得られた。

図-12 に FEM 解析による変形図を示す。壁には梁の曲げ変形によって強制される変形が若干生じているが、図-9 ではこの変形が無視されている。

図-13 に水平力Pとスリット幅の変化量  $W_s$  との関係を示す。スリット幅の変化量  $W_s$  は図中に示した荷重・層間変形曲線と同形の挙動をし、梁端の曲げ降伏後に  $W_s$  は急増している様子が観察できる。

また、図-13 に示したスリット幅の変化量  $W_s$  について FEM 解析値と実験値を比較して表-4 に示す。 $W_s$  については、FEM 解析値は実験値より概して大きくなっている。特に梁の曲げ降伏後に実験と解析の差が大きくなる傾向が観られるので、FEM 解析における鉄筋とコンクリートとの間の spring がやや弱ったことが考えられる。

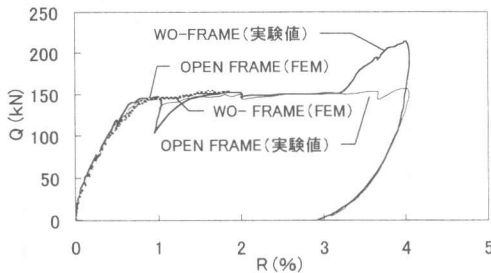


図-11 荷重変形曲線の包絡線

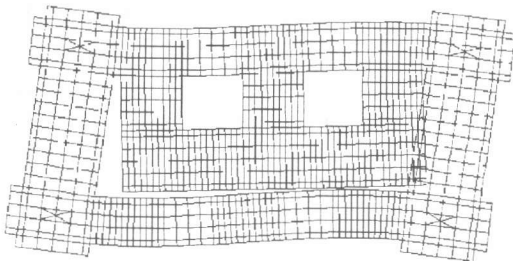


図-12 FEM 解析による骨組と壁の変形性状

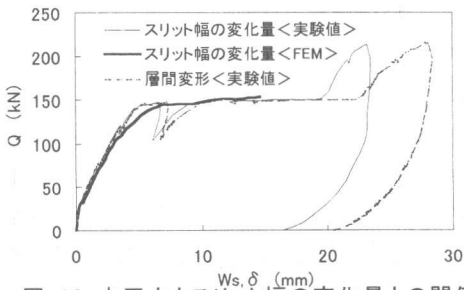


図-13 水平力とスリット幅の変化量との関係

表-3 荷重と変形に関する FEM と実験の比較

層間変形角 R(%)		0.25	0.5	1	2
荷重	実験(kN)	77.7	120.1	147.3	152.4
	FEM(kN)	70.7	112.9	144.8	153.8

表-4 スリット幅変化量  $W_s$  の FEM 解析値と実験値の比較( $W_s$  の単位は mm)

層間変形角 R(%)		0.25	0.5	1	2
$W_s$ (実験)		1.74	3.43	6.64	12.6
$W_s$ (FEM)		1.71	3.55	6.97	13.8

## 6. 結び

本研究から得られた知見を以下に要約する。

1) 完全スリットにより開口壁の周囲3辺を骨組から絶縁し、梁降伏型の設計を計画した開口壁付き骨組の荷重変形関係は、スリットが閉塞しない限りにおいては壁無しの骨組のそれとほぼ同様なものとなる。

2) 梁降伏による抵抗機構が完成される以前の段階から、開口壁と梁との水平接合部には骨組のラーメン変形に起因する変形によってひび割れが発生したが、そのひび割れ幅は梁のひび割れ幅に比べると軽微であった。

3) 骨組の層間変形によって生じる鉛直スリットのスリット幅の挙動を検討し、設計層間変形と所要スリット幅の関係はほぼ式(4)によって表せることを示した。

## 参考文献

- 1) 大久保, 酒井, 中山; 完全スリットで縁切りされた開口壁付きRC骨組の弾性塑性挙動(その2 模型実験による考察), 日本建築学会九州支部研究報告, 第37号, 1998.3.
- 2) 森田ほか; 割り裂き付着破壊モードに与える横補強筋の影響, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 1981.
- 3) Al Mahaidi ; Non-linear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Deep Beams, Report 79-1, Dept. of Structural Engineering, Cornell University, 1979.1.