

材端に腰壁を有する RC 梁の加力実験報告

Loading Tests of R/C Beams with Spandrel Wall at Beam-end

松永 健太郎 KENTARO MATSUNAGA

小坂 英之 HIDEYUKI KOSAKA

新上 浩 HIROSHI SHINJO

構造設計ディビジョン 小田 稔 MINORU ODA

一般に柱と腰壁の間にはスリットを設けるが、腰壁を構造部材として利用することを目的として、材端のみ部分的に腰壁を設けた変断面梁の加力実験を行った。腰壁の横筋を上端に集中的に配筋するよりも壁の高さ全体に分散して配筋すると損傷を抑えることができた。腰壁内に剛域を設定して算出した曲げ耐力計算値は最大荷重を安全側に評価することができた。腰壁先端部の所要補強筋量を把握するために、腰壁先端部補強筋の最大引張力について検討した。その結果、腰壁の軸剛性によって梁に作用する曲げ戻しモーメントから求めた最大引張力計算値は、実験値とよく対応した。

キーワード：腰壁，変断面材，ひび割れ，剛域，モデル化

Slits are generally employed between column and spandrel wall to separate the spandrel wall structurally. Loading tests of non-uniform section beams with the spandrel wall at beam-end without slits were conducted aiming the use of the spandrel wall as structural members. Distributed arrangement of longitudinal (horizontal) reinforcement in the spandrel wall controlled the damage of the beam more effectively than concentrated arrangement to the upper side of the spandrel wall. Calculated flexural capacity assuming the rigid zone on the spandrel wall evaluates the maximum load conservatively. The maximum tensile force in the reinforcement at the tip of spandrel wall was examined to understand reinforcement requirement. The maximum tensile force calculated by the reverse bending moment acting on the beam considering the axial stiffness of spandrel wall was corresponded to the experimental value.

Key Words: Spandrel Wall, Non-uniform Cross Section Member, Crack, Rigid Zone, Modeling

1. はじめに

板状集合住宅の外廊下側の梁には、材端部に腰壁が配されることが多い。この場合は柱-腰壁間にスリットを設け、腰壁を非構造部材として扱うことが一般的である。しかしながら、腰壁をハンチのように梁の一部として活用すれば、梁せいを抑えて所定の耐力を確保することができ、建築計画上の自由度が高まるものと思われる。

本研究は、このように腰壁を構造部材として利用した変断面梁の耐力や変形性能を検討することを目的としたものである。

既報告では、一方の端部にだけ腰壁を設けた梁の逆対称曲げ加力実験（大野式加力形式）を行っている¹⁾。

実験結果から、載荷中の反曲点位置の変動はほとんどなく、材軸芯のずれを無視した変断面梁の計算値で反

曲点位置を算定できること、試験体の補強筋量の範囲では比較的良好的な履歴性状を示すことが明らかになった。

そこで本報告では、反曲点位置を仮定した片持ち梁形式の実験を行い、配筋方法の違いによる腰壁の損傷状況の差異、曲げ耐力の評価方法および腰壁先端部の補強筋に作用する最大引張力について検討した。

2. 実験概要

(1) 試験体

試験体形状を図-1 に、試験体一覧を表-1 に示す。以下、部位等の呼称は図-1 に従う。試験体は端部に腰壁を設けた梁部材 5 体であり、縮尺を約 1/2 としている。梁の断面は $b \times D = 425 \times 425 \text{mm}$ 、腰壁の断面は $t \times h = 225 \times 475 \text{mm}$ で共通である。腰壁は梁の軸心に対して偏心

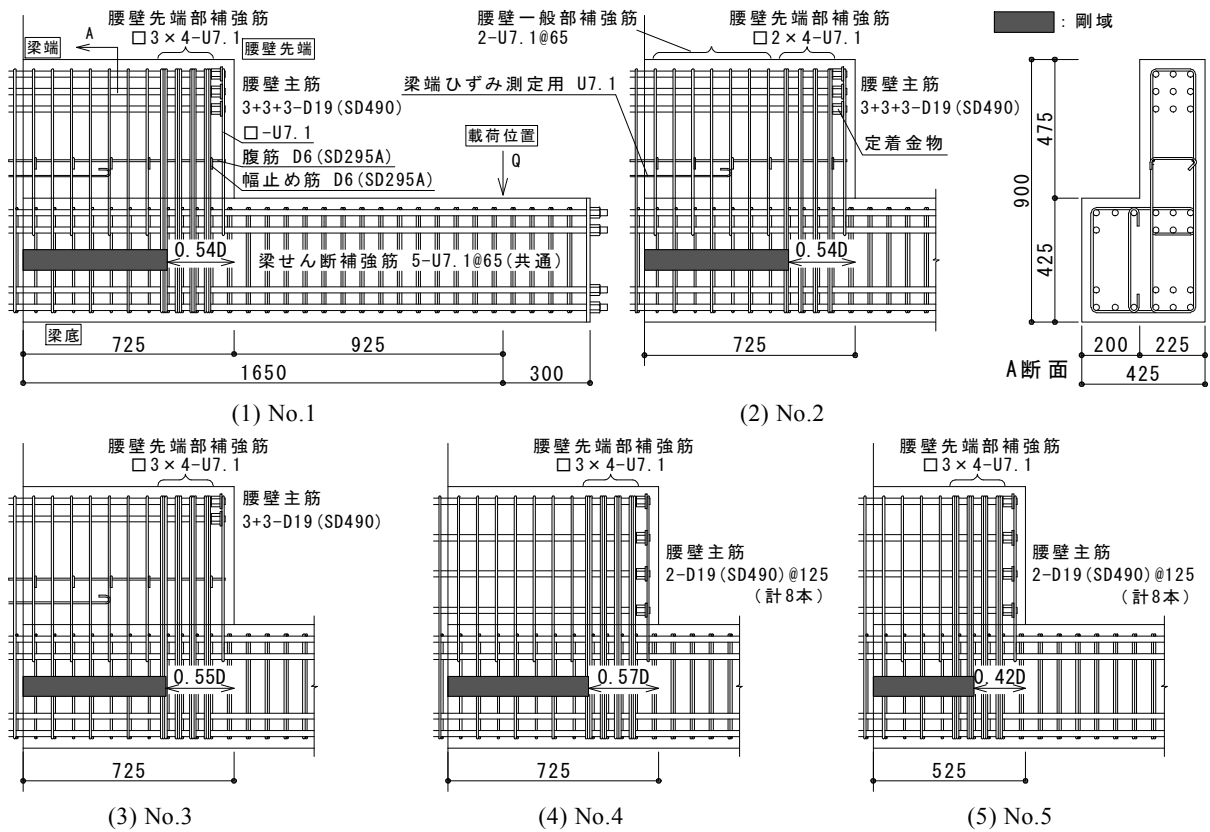


図-1 試験体形状

表-1 試験体一覧

| 試験体 | No.1 | No.2 | No.3 | No.4 | No.5 |
|--------------|----------------------|---------------------|----------------|------------------|------|
| 梁 | $b \times D$ (mm) | 425 × 425 | | | |
| | 主筋 | 6+4-D19(SD490) | | | |
| | $b\rho_l$ (%) | 1.92 | | | |
| | 補強筋 | 5-U7.1(SBPD1275)@65 | | | |
| 腰壁 | $b\rho_w$ (%) | 0.72 | | | |
| | $t \times h$ (mm) | 225 × 475 | | | |
| | 長さ L_w (mm) | 725 | | | 525 |
| | 主筋 (横筋) | 3+3+3-D19(SD490) | 3+3-D19(SD490) | 2+2+2-D19(SD490) | |
| | $w\rho_l$ (%) | 1.45 | 0.93 | 1.54 | |
| | 一般部補強筋 | 2-U7.1(SBPD1275)@65 | | | |
| | $w\rho_w$ (%) | 0.55 | | | |
| 先端部補強筋 | □3×4-U7.1 | □2×4-U7.1 | □3×4-U7.1 | | |
| ρ_w (%) | 2.13 | 1.42 | 2.13 | | |

b : 梁幅, D : 梁せい, $b\rho_l$: 梁の引張鉄筋比, $b\rho_w$: 梁のせん断補強筋比, t : 壁厚, h : 壁の高さ, $w\rho_l$: 腰壁の引張鉄筋比, $w\rho_w$: 腰壁一般部補強筋比, ρ_w : 腰壁先端部補強筋比

して取り付いており、腰壁側面の片側は梁側面と面一になっている。曲げ降伏位置は梁端ではなく、腰壁先端近傍を想定している。腰壁が取り付けられない部分の梁の配筋は全試験体とも共通としている。実験パラメータは腰壁先端部補強筋比 ρ_w 、腰壁主筋（壁横筋）の配筋方法、

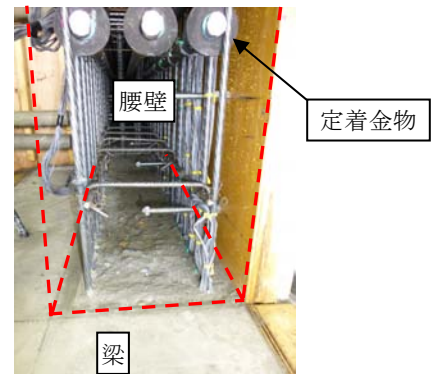


写真-1 腰壁部打設前の目荒らし状況

腰壁の長さ L_w である。

試験体 No.1~No.3 では腰壁主筋 D19 (SD490) を腰壁上端に集中的に配筋し、No.4~No.5 では腰壁の高さ全体に分散させて配筋している。腰壁主筋先端には定着金物を配している。定着金物から主筋を 10mm 貫通させており、その先端に U7.1 を配している。No.1~No.3 では腰壁主筋と梁上端主筋の間に腹筋 D6 (SD295A) および幅止め筋 D6 (SD295A) を配している。腰壁の長さ L_w は No.1~No.4 が 725mm であり、No.5 のみ 525mm としている。腰壁先端から荷重位置までの長さは 925mm (No.5 のみ 1025mm) としている。

コンクリートの打設は梁部と腰壁部で打ち分けており、横打ちとしている。梁上端までコンクリートを打設

表-2 コンクリートの材料試験結果

| 試験体 | 部位 | 圧縮強度 σ_B (N/mm ²) | ヤング係数 ($\times 10^4$ N/mm ²) | 割裂引張強度 σ_t (N/mm ²) |
|------|----|--------------------------------------|---|--|
| No.1 | 腰壁 | 45 | 2.8 | 3.3 |
| | 梁 | 50 | 3.1 | 4.1 |
| No.2 | 腰壁 | 44 | 2.8 | 3.5 |
| | 梁 | 47 | 3.0 | 4.1 |
| No.3 | 腰壁 | 46 | 3.0 | 3.5 |
| | 梁 | 45 | 2.8 | 3.4 |
| No.4 | 腰壁 | 47 | 3.0 | 3.5 |
| | 梁 | 45 | 2.8 | 3.5 |
| No.5 | 腰壁 | 46 | 3.2 | 3.5 |
| | 梁 | 43 | 3.0 | 3.4 |

表-3 鉄筋の材料試験結果

| 使用部位 | 種類 | 降伏点 σ_y (N/mm ²) | 引張強度 σ_u (N/mm ²) | 伸び (%) |
|-------------|--------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--------|
| 梁主筋 腰壁主筋 | D19(SD490) | 543 | 712 | 17.0 |
| せん断補強筋 | U7.1(SBPD1275) (閉鎖型) | 1400 | 1451 | 9.4 |
| | U7.1(SBPD1275) (フック型) | 1382 | 1439 | 8.2 |
| 幅止め筋 | D6(SD295A) | 334 | 513 | 21.0 |

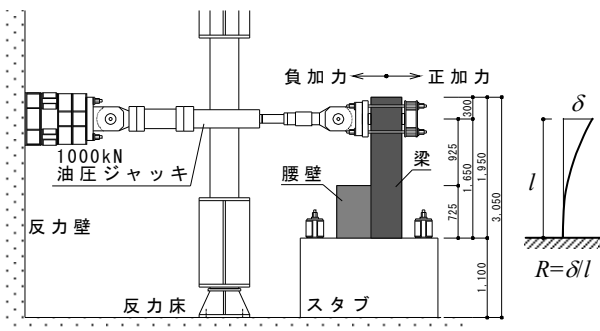


図-2 加力方法

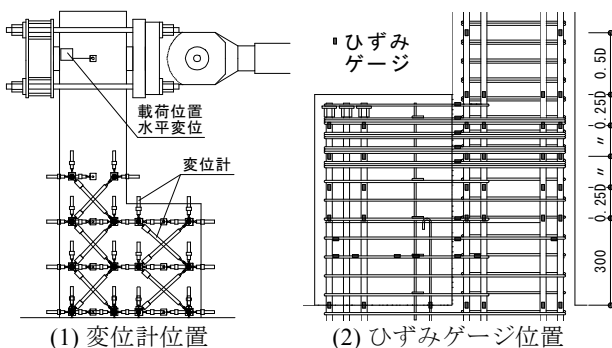
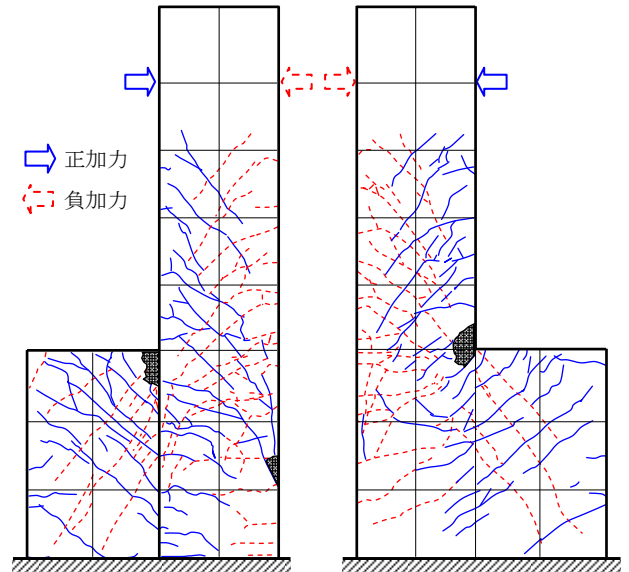
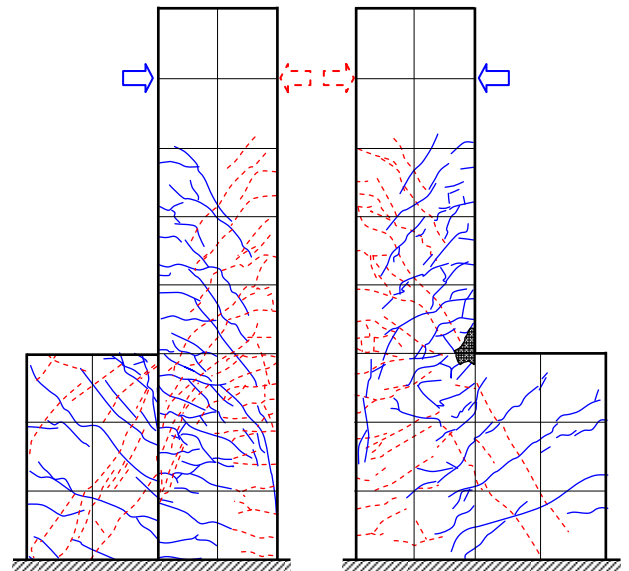


図-3 計測位置

し、その翌日に腰壁の取り付け梁上端表面を目荒らしした。目荒らしの状況を写真-1 に示す。目荒らしした翌日に腰壁部のコンクリートを打設した。梁および腰壁と



(1) No.1



(2) No.4

図-4 ひび割れ状況 ($R=\pm 1/33$ rad 載荷後)

もにコンクリート設計基準強度 F_c を 45N/mm^2 とした。

梁および腰壁の主筋はすべて D19 (SD490) であり、せん断補強筋は U7.1 (SBPD1275) を用いた。コンクリートと鉄筋の材料試験結果を表-2 および表-3 に示す。

(2) 加力方法と計測方法

加力方法を図-2 に示す。試験体を 90 度回転させ垂直に立て、スタブを反力床に固定し、1000kN 油圧ジャッキにより反曲点位置を水平方向に加力した。腰壁が曲げ引張域となる方向を正加力方向とし、曲げ圧縮域となる方向を負加力方向とした。加力は変位制御とし、折り返し変形角 $R=\pm 1/400, 1/200, 1/100, 1/67, 1/50, 1/33, 1/25, 1/20$ (各 2 回), $1/15\text{rad}$ を基本とした。変形角 R の定義を図-2 に示す。 δ は載荷位置における変位、 l は

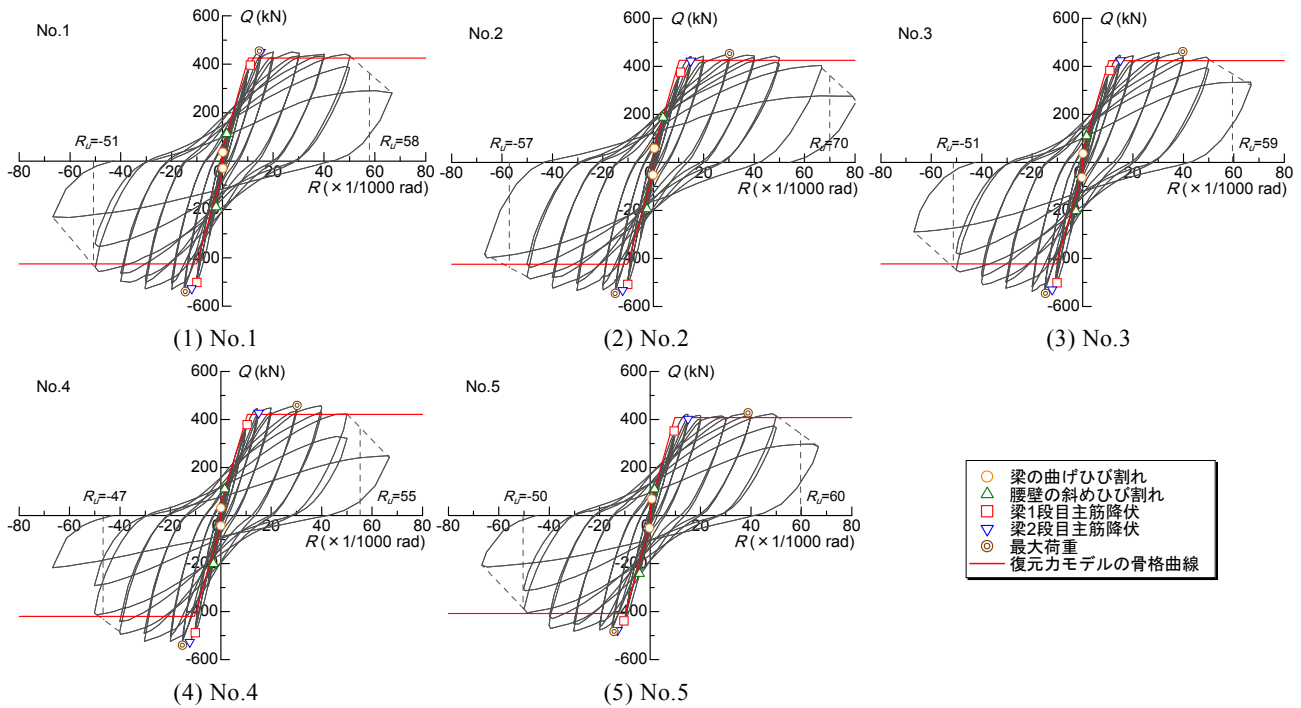


図-5 梁せん断力-変形角関係

梁端から荷重位置までの長さである。

変位およびひずみの計測位置を図-3 に示す。変位計により腰壁および腰壁の取り付け梁部分の水平変位、鉛直変位、斜め変位および梁-腰壁間の目開き変位を計測し、ひずみゲージにより鉄筋のひずみを計測した。

No.1~No.3 の腰壁には梁端ひずみ測定用として図-1 に示すように U7.1 を配した。

3. 実験結果

(1) 破壊経過および荷重-変形角関係

変形角 $R = \pm 1/33\text{rad}$ 荷重後のひび割れ状況を図-4 に示す。正加力時のひび割れを実線で、負加力時のひび割れを破線で示した。同図の左側は梁形が見えている側面、右側は梁と腰壁が面一の側面である。

$R = +1/200\text{rad}$ 程度で腰壁先端の入隅部から斜め方向に伸びる曲げひび割れが発生し始め、ひび割れ領域が広がっていった。 $R = +1/500\text{rad}$ 程度から腰壁の斜めひび割れが見られ、 $R = +1/200\text{rad}$ の加力では、梁のせん断ひび割れが発生した。腰壁長さの違いによる腰壁の斜めひび割れの発生時期に大きな差異は見られなかった。

腰壁主筋(横筋)を高さ方向に分散配筋した試験体 No.4 および No.5 は、腰壁の上端に集中的に配筋した試験体 No.1~No.3 に比べて腰壁のひび割れ数が少なく、ひび割れ幅が小さくなっており、腰壁主筋の分散により損傷が抑制されることを確認した。

梁せん断力 Q -変形角 R 関係を図-5 に示す。最大荷重 Q_{\max} の 80%まで荷重が低下した時の変形角を限界変形角 R_u とし、同図に併記した。腰壁が曲げ引張域となる正加力時に比べて曲げ圧縮域となる負加力時の方が初期剛性および最大荷重が高くなっている。No.1~No.4 では正加力の $R = +1/67\text{rad}$ 、負加力の $R = -1/100\text{rad}$ への加力で梁の 1 段目主筋が降伏し、腰壁の短い No.5 では各々 $R = +1/100\text{rad}$ 、 $R = -1/67\text{rad}$ の加力で降伏した。各試験体とも比較的良好な履歴性状を示し、 $R = \pm 1/25 \sim 1/20\text{rad}$ 程度までは荷重を保持した。いずれの試験体も腰壁先端部近傍での梁の曲げ破壊であった。

(2) 耐力の検討

各種耐力の実験値と計算値の一覧を表-4 に示す。腰壁付き梁をモデル化するに当たり、腰壁部を剛域として扱うことが考えられる。腰壁先端から剛域端までの距離を λD (D : 梁せい) と表すことにする。 λD は、腰壁を有する変断面梁の剛性計算値を算出し、これと剛性が等しくなる等断面梁の仮定の部材長 l_e を求め、 $\lambda D = l - l_e$ として求めた。この剛域部分は、梁と腰壁が面一の側面において、最終加力サイクル後もひび割れ発生本数は比較的少なく、ひび割れ幅も小さかった。剛域端位置で梁が曲げ耐力に達する時の梁せん断力 bQ_{mu} に対する最大荷重 Q_{\max} の比率 Q_{\max}/bQ_{mu} は、正加力で 1.04~1.09 (平均 1.07)、負加力で 1.18~1.29 (平均 1.26) となっている。計算値は、腰壁が曲げ引張域となる正加力時に

表-4 実験結果と計算結果一覧

| 試験体 | 加力方向 | 実験値 | | | 計算値 | | | | | |
|------|------|-------------|----------------|-----------------------------------|----------------|----------------|----------------|------------|-------------------|------------------------|
| | | bQ_y (kN) | Q_{max} (kN) | R_{max} ($\times 10^{-3}$ rad) | bQ_{mu} (kN) | bQ_{su} (kN) | Q_{end} (kN) | α_y | Q_{max}/bQ_{mu} | $\lambda \cdot D$ (mm) |
| No.1 | 正 | 396 | 454 | 14.6 | 425 | 635 | 864 | 0.14 | 1.07 | 0.54D |
| | 負 | -502 | -540 | -14.6 | | | 1099 | 0.14 | 1.27 | |
| No.2 | 正 | 375 | 452 | 30.3 | 425 | 616 | 864 | 0.14 | 1.06 | 0.54D |
| | 負 | -509 | -547 | -15.1 | | | 1099 | 0.14 | 1.29 | |
| No.3 | 正 | 382 | 460 | 39.9 | 423 | 601 | 680 | 0.15 | 1.09 | 0.55D |
| | 負 | -503 | -547 | -14.6 | | | 1099 | 0.15 | 1.29 | |
| No.4 | 正 | 382 | 458 | 30.3 | 421 | 606 | 701 | 0.15 | 1.09 | 0.57D |
| | 負 | -503 | -541 | -15.2 | | | 1197 | 0.15 | 1.28 | |
| No.5 | 正 | 350 | 426 | 38.9 | 408 | 597 | 746 | 0.17 | 1.04 | 0.42D |
| | 負 | -439 | -484 | -14.2 | | | 1274 | 0.17 | 1.18 | |

bQ_y : 梁 1 段目主筋初降伏時の梁せん断力, Q_{max} : 最大荷重, R_{max} : 最大荷重時の変形角, bQ_{mu} : 剛域端における曲げ耐力時の梁せん断力, bQ_{su} : 梁のせん断耐力²⁾, Q_{end} : 梁端における終局曲げモーメント時のせん断力³⁾

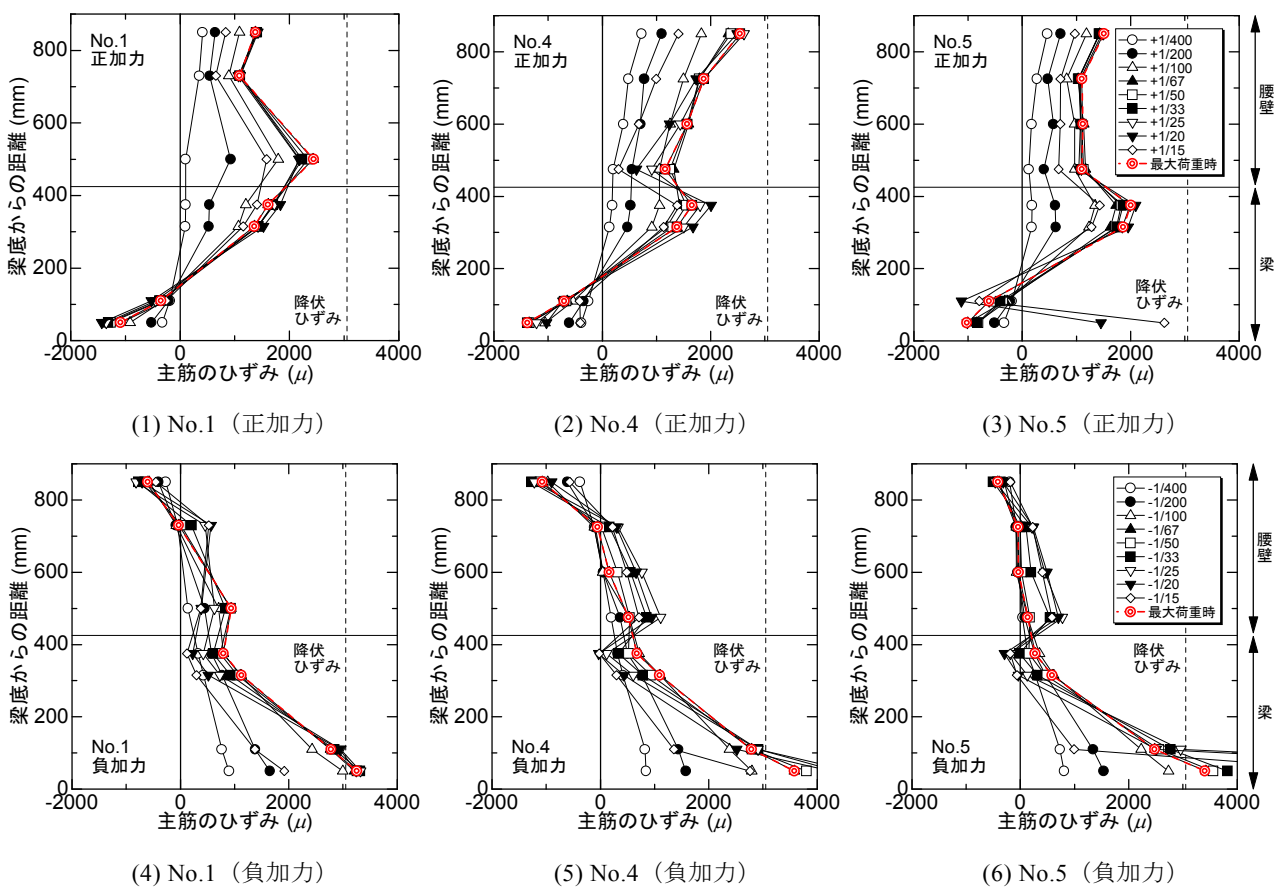


図-6 梁端部における主筋の高さ方向のひずみ分布

は実験値によく対応しているが、腰壁が曲げ圧縮域となる負加力時には実験値より低めに評価されている。したがって、負加力で計算値より荷重が高くなる影響は、設計時には別途考慮する必要があるだろう。

表-4 に示す剛性低下率 α_y は、文献 1 と同様に式(1)により求めたものである。式(1)中の $\alpha_{y,sg}$ は一般に用いられている等断面梁の剛性低下率であり、これに低減係数 $(1-\beta)$ を乗じることにより α_y を算出した。

$$\alpha_{y,sg} = (0.043 + 1.64n_b p_t + 0.043a/D) \cdot (d/D) \quad (1)$$

$$\alpha_y =_{sg} \alpha_y \cdot (1-\beta) \quad (2)$$

ここに、

n : ヤング係数比

a : 剛域端からのせん断スパン長さ

d : 梁の有効せい

β : 片持ち梁長さ l に対する腰壁長さ L_w の比

式(1)の剛性低下率 α_y を用いた骨格曲線を図-5 に併記する。骨格曲線の降伏時変形角は、実験結果とおおむね対応していることが分かる。

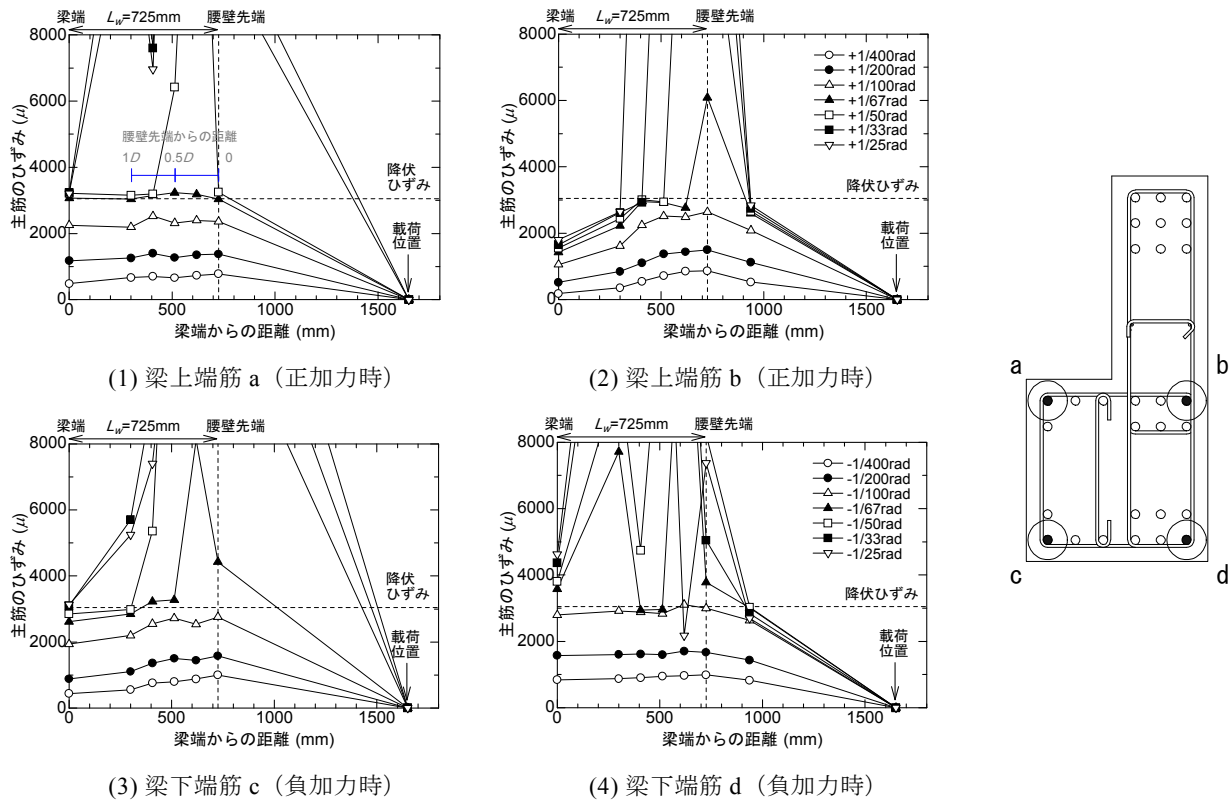


図-7 梁主筋の軸方向のひずみ分布 (No.4)

(3) ひずみ性状

梁端部における高さ方向の主筋のひずみ分布を図-6に示す。上段が正加力時、下段が負加力時の図を示している。腰壁が曲げ引張域となる正加力の場合、梁部分のひずみ分布は直線形状となっているものの、腰壁付き梁断面全体では直線状となっておらず、平面保持仮定が成立していない。腰壁部分のひずみは同程度の値を示し、ひずみの勾配は小さい。一方、腰壁が曲げ圧縮域となる負加力の場合、 $R=-1/200\text{rad}$ までは直線に近い分布形状を示し、その後の変形角では梁と腰壁で異なるひずみ勾配を示している。

腰壁主筋は全試験体において降伏ひずみに達するものではなく、正加力時は梁端から腰壁先端に向かって徐々にひずみが小さくなった。負加力時は梁端部の腰壁の上端1段目主筋が圧縮ひずみとなり、それ以外は変形角が大きくなると引張ひずみとなっている。

試験体 No.4 の梁主筋の材軸方向のひずみ分布を図-7に示す。梁主筋の降伏範囲について見ると、 $R=\pm 1/50\text{rad}$ (□印) では腰壁先端から $0.5D\sim 0.75D$ の範囲で降伏ひずみに達している。耐力計算時に想定した剛域端は、表-4 に示すように $\lambda \cdot D = 0.57D$ であり、ひずみ分布とおおむね対応している。

(4) 等価粘性減衰定数

各試験体の荷重-変形角関係から求めた等価粘性減衰定数 h_{eq} の推移を図-8 に示す。同図には等価線形化法に基づく限界耐力計算において基本的な減衰評価法である等価粘性減衰定数の式(3)を併記する。

$$h_{eq} = \left(\frac{1}{\pi}\right) \cdot \left(1 - \frac{1}{\sqrt{\mu}}\right) \tag{3}$$

ここに、

μ : 梁1段目主筋の降伏を基点とした塑性率

各試験体とも変形角 R の増大に伴って $R=1/100\text{rad}$ 程度から等価粘性減衰定数 h_{eq} も大きくなり、変形角 R が大きくなるとその増大する割合は小さくなった。本実験の範囲では、腰壁の長さや腰壁先端部補強筋量、腰壁主筋の配筋方法が等価粘性減衰定数に与える影響はほとんど見られない。

4. 腰壁先端部補強筋の最大引張力

(1) 曲げモーメント分布

$R=+1/100\text{rad}$ 時の曲げモーメント分布を図-9 に示す。実線は部材全体の曲げモーメント図であり、□印で示す分布は梁主筋に貼付したひずみゲージから求めた梁負担部分の曲げモーメント分布である。腰壁負担分を除いた

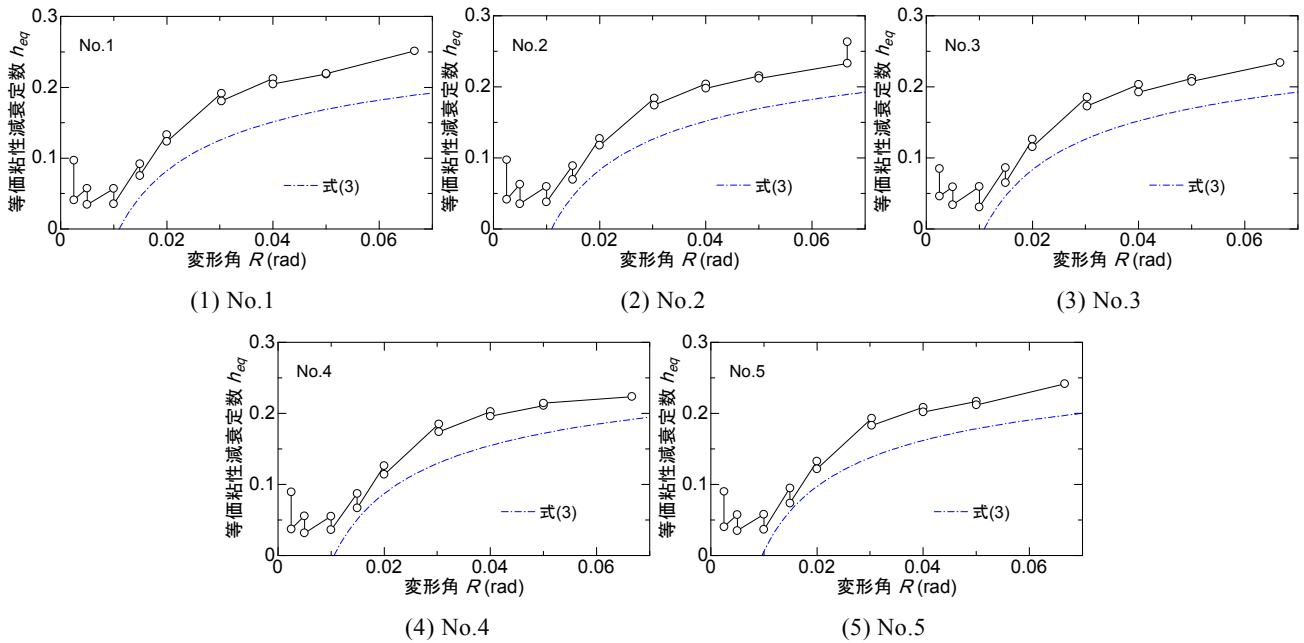


図-8 等価粘性減衰定数の推移

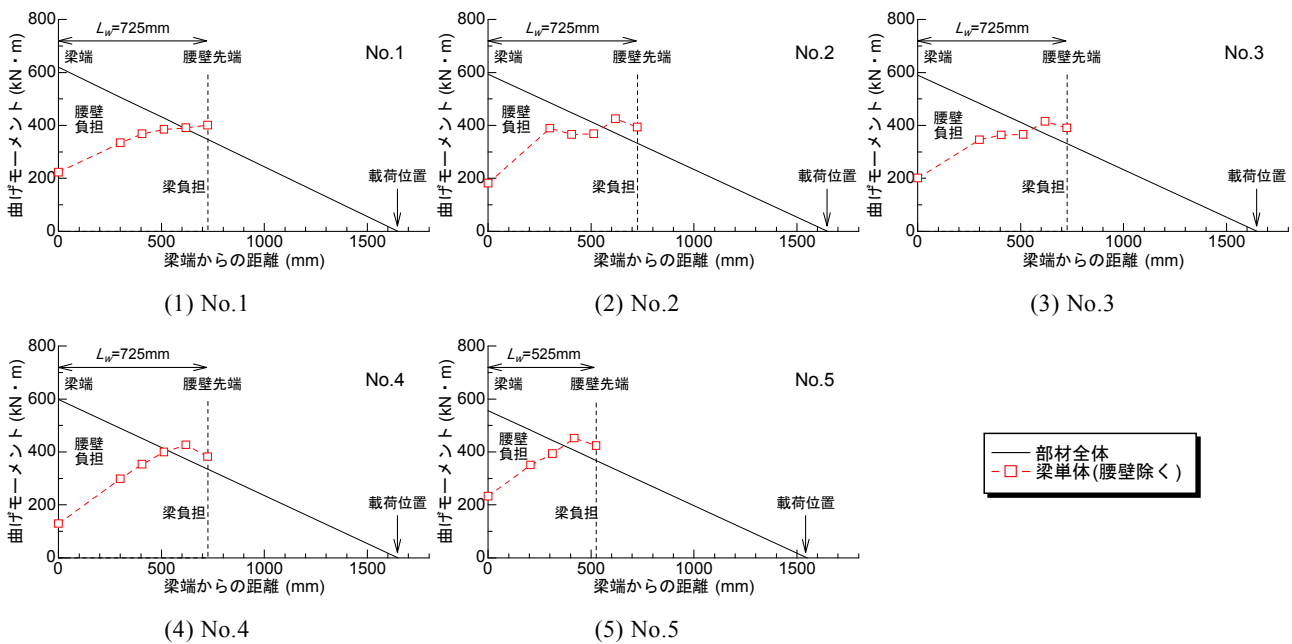


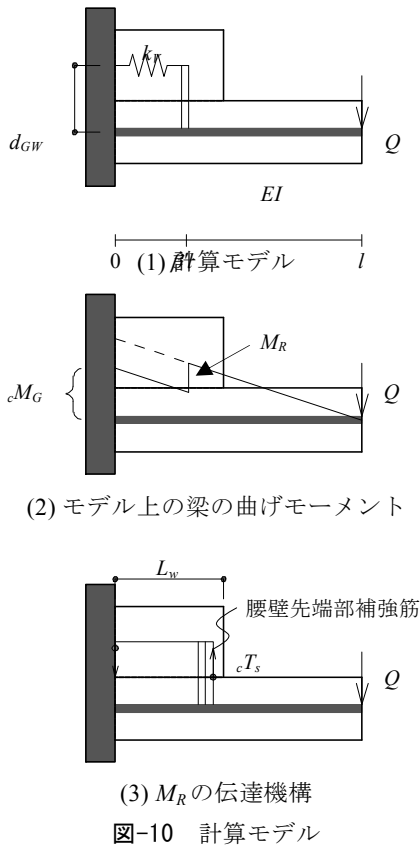
図-9 曲げモーメント分布 ($R=+1/100\text{rad}$ 載荷時)

梁負担分で考えたときには、腰壁先端近傍から梁端に向かって徐々に曲げモーメントは減少しており、腰壁負担分が増加している。腰壁によって梁部分は逆せん断状態となっていることがわかる。

(2) 腰壁付き梁のモデル化

腰壁先端部補強筋の所要量を定めるためには、正加力時に生じる最大引張力を把握する必要がある。図-6 に示す最大荷重時の梁端のひずみ分布を見ると、正加力時の腰壁部分は全域で引張ひずみとなっており、ひずみ

の勾配は小さい。そこで腰壁部分は軸剛性 k_f のみを考慮する図-10 に示す簡略化したモデルによって、腰壁先端部補強筋の引張力 cT_s を検討する。軸方向ばねの接合位置は、梁の降伏ヒンジ位置と整合するように図-1 に示す仮想剛域端 (梁端からの長さ βl) とする。梁に作用する曲げ戻しモーメント M_R は式(4)で表される。腰壁先端部補強筋は正加力時に M_R を伝達するための引張鉄筋として機能するので、 cT_s は M_R を $0.9L_w$ で除して評価することとした。



$$M_R = \frac{2 - \beta'}{2 \left(\frac{EI}{V} + 1 \right)} \cdot l \cdot Q \quad (4)$$

$$cT_s = \frac{M_R}{0.9L_w} \quad (5)$$

ここに、

$$V = k_V d_{GW}^2 \beta' l$$

k_V : 正加力時は腰壁主筋の軸剛性

負加力時は腰壁コンクリート断面の軸剛性

β' : 片持ち梁長さ l に対する仮想剛域長さの比

E : 梁コンクリートのヤング係数

I : 梁の断面二次モーメント

d_{GW} : 梁材軸芯と腰壁の軸剛性位置までの長さ

腰壁先端部補強筋の引張力の実験値 ${}_i T_s$ と計算値 ${}_c T_s$ を表-5 に比較して示す。 ${}_i T_s$ は最大荷重時の腰壁先端部補強筋のひずみから算出した。 ${}_i T_s$ は表-4 の Q_{max} より大きいことから、腰壁先端部近傍の梁部分は逆せん断状態となることが分かる。 ${}_i T_s / {}_c T_s$ は 0.73~1.13 (平均 0.97) となっており、腰壁長さの短い No.5 で計算値が過大になっているものの、おおむね対応している。なお、最大荷重時の k_V と梁の曲げ剛性 EI との関係 (EI/V) や腰壁長さの影響についてはさらに検討が必要である。

腰壁が曲げ圧縮域となる負加力時についても同様に

表-5 腰壁先端部補強筋の引張力

| 試験体 | 加力方向 | 梁端における梁部分の負担曲げモーメント | | | 腰壁先端部補強筋の引張力 | | | |
|------|------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------|-----------------------|----------------------|
| | | 実験値 ${}_i M_G$ (kN·m) | 計算値 ${}_c M_G$ (kN·m) | ${}_i M_G / {}_c M_G$ | 計算値 | | ${}_i T_s / {}_c T_s$ | |
| | | | | | 実験値 ${}_i T_s$ (kN) | M_R (kN·m) | | ${}_c T_s^*$ (kN) |
| No.1 | 正 | 329 | 304 | 1.08 | 646 | 444 | 681 | 0.95 |
| | 負 | -193 | -199 | 0.97 | - | -692 | (-1061) | - |
| No.2 | 正 | 347 | 299 | 1.16 | 646 | 447 | 685 | 0.94 |
| | 負 | -192 | -201 | 0.95 | - | -701 | (-1074) | - |
| No.3 | 正 | 383 | 342 | 1.12 | 721 | 418 | 640 | 1.13 |
| | 負 | -251 | -200 | 1.25 | - | -702 | (-1075) | - |
| No.4 | 正 | 315 | 389 | 0.81 | 618 | 367 | 562 | 1.10 |
| | 負 | -206 | -197 | 1.05 | - | -696 | (-1066) | - |
| No.5 | 正 | 393 | 333 | 1.18 | 506 | 327 | 693 | 0.73 |
| | 負 | -221 | -141 | 1.57 | - | -608 | (-1288) | - |

※()内 : 負加力時の ${}_c T_s$ は腰壁先端部に作用する圧縮力参考値

計算すると、腰壁先端部に作用する圧縮力 (表-5 括弧内) は正加力時の引張力 ${}_c T_s$ より大きくなっている。図-6 を見ると梁端の腰壁上部で圧縮ひずみとなっていることから、腰壁には斜め圧縮束が形成されているものと考えられる。

5. まとめ

腰壁を構造部材として利用するため、材端に腰壁を設けた梁部材を片持ち梁形式で実験を行い、以下の知見を得た。

- ① 腰壁主筋 (横筋) の配筋を、上端に集中的に配筋するよりも、壁の長さ全体に分散して配筋する方が腰壁の損傷を抑制することができた。
- ② 腰壁内に剛域を設定して算出した剛域端における曲げ耐力の計算値は、最大荷重を安全側に評価することができた。
- ③ 腰壁先端部の補強筋に作用する引張力は、腰壁の軸剛性によって梁に作用する曲げ戻しモーメントから計算することでおおむね評価することができる。

参考文献

- 1) 小坂英之, 新上浩, 松永健太郎, 小田稔 : 材端に腰壁の付く鉄筋コンクリート造梁部材の加力実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), C-2 構造IV, pp.435-438, 2011.8
- 2) 高周波熱錬株式会社 : 鉄筋コンクリート造はり, 柱のせん断補強筋として PC 鋼棒ウルボンを使用する工法設計指針・同解説, 2009.8
- 3) 日本建築学会 : 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2010