

論文 材端に腰壁を有する鉄筋コンクリート梁の配筋と曲げ強度の検討

松永 健太郎*1・小坂 英之*1・新上 浩*2・小田 稔*3

要旨: 腰壁を構造部材として利用することを目的とし、材端に腰壁を設けた梁の加力実験を行い、腰壁部分の配筋と曲げ強度の評価方法について検討した。実験の結果、腰壁の横筋は上部に集中的に配筋するよりも、高さ方向に分散させて配筋する方が、腰壁の損傷が抑制されることを確認した。部分的に腰壁のある変断面梁の曲げ強度は、腰壁内に仮想剛域を設定し、その剛域端で曲げ降伏する等断面梁として扱うことで評価できることが明らかになった。腰壁先端部の補強筋量を定めるために、腰壁の軸剛性を考慮したモデルを設定して補強筋に作用する引張力を検討した結果、計算値は実験値に概ね対応した。

キーワード: 腰壁, 配筋, 変断面材, 剛域, 降伏ヒンジ

1. はじめに

板状集合住宅の外廊下側の梁には、**図-1**に示すように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扱えば、梁せいを抑えて所要の耐力を確保することができ、住居計画において必要な腰壁を有効に活用できるものと思われる。

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に関するものであり、既報告¹⁾では梁の降伏ヒンジ領域を材端にした場合と腰壁先端近傍に設定した場合の加力実験を実施し、各部の損傷状況や曲げ耐力等の基本性状について検討した。実験の結果、このような梁

では降伏ヒンジ領域を腰壁先端近傍に設定した方が、つまり腰壁のある部分は剛域のように扱った方が、腰壁の損傷が抑えられることが明らかになった。また、梁の一方の端部にのみ腰壁を設けて逆対称曲げ加力実験を行った結果、载荷中の反曲点位置の変動は小さく、材軸心のずれを無視して変断面梁として扱うことで反曲点位置を概ね評価できることが確認された。

そこで、本論文では反曲点位置を仮定して腰壁のある梁片側部分を対象とした片持ち梁形式の加力実験を実施し、降伏ヒンジ領域を腰壁先端近傍に設定する場合の腰壁部分の配筋方法および材端に部分的に腰壁を有する変断面梁の曲げ強度の評価方法について検討した。

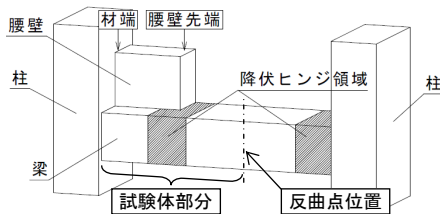


図-1 腰壁付き梁

2. 実験計画

2.1 試験体

試験体一覧を表-1に示す。いずれも**図-2**の試験体図に示すように、端部にのみ腰壁を設けた縮尺約1/2の片持ち梁試験体であり、本論文では既報告¹⁾の4体(No.4~No.7)を含めて計9体を検討対象とする。腰壁はその

表-1 試験体一覧

試験体	梁			腰壁																			
	$b \times D$ (mm)	主筋	せん断補強筋	$t_w \times H_w$ (mm)	L_w (mm)	主筋 (横筋)		一般部補強筋			先端部補強筋												
						配筋	方式	配筋	A ^{※1}	B ^{※1}	C ^{※1}	$w p_w$ (%) ^{※2}	配筋	p_w (%) ^{※3}									
No.4	425 × 425	6+4-D19	5-U7.1@65	225 × 475	725	3×3-D19	集中	U7.1	@130	-	@130	0.55	□2×3-U12.6@51	4.36									
No.5																							
No.6																							
No.7																							
No.8																							
No.9																							
No.10																							
No.11																							
No.12																							

b : 梁幅, D : 梁せい, t_w : 腰壁厚, H_w : 腰壁高さ, L_w : 腰壁長さ, $w p_w$: 腰壁一般部補強筋比, p_w : 腰壁先端部補強筋比

※1 **図-2**参照, ※2 $w p_w = 100 \times \Sigma(\text{補強筋 A~C の断面積}) / (t_w s_w)$ ($s_w = 130\text{mm}$)

※3 $p_w = 100 \times \Sigma(1 \text{ 組の先端部補強筋の断面積}) / (t_w s_t)$ (s_t : 先端部補強筋のピッチ)

*1 三井住友建設 (株) 技術開発センター 工修 (正会員)

*2 三井住友建設 (株) 技術開発センター

*3 三井住友建設 (株) 構造設計ディビジョン

3. 実験結果

3.1 破壊状況および荷重－変形角関係

腰壁主筋を集中配筋した No.8 と分散配筋した No.11 の変形角 $R = \pm 1/33 \text{rad}$ 載荷後のひび割れ状況を図-4 に例示し、全試験体の梁せん断力 Q －変形角 R 関係を図-5 に示す。破壊状況は全試験体で概ね同様であり、梁の曲げひび割れは、正・負加力ともに腰壁先端の近傍部から発生し始め、その後、材端寄りおよび加力点寄りにひび割れ範囲が拡大した。梁のひび割れが密に発生する範囲は、降伏ヒンジ領域を想定した腰壁先端の近傍部であった。なお、梁と腰壁が同面の側面の梁部分には、負加力時に梁部分が腰壁を押すことによる影響として、逆せん断のひび割れが確認された。

図-5 中に初ひび割れの発生時期を示すように、梁の曲げひび割れ (○印) の直後に腰壁に斜めひび割れ (△印) が発生した。腰壁主筋を集中配筋した試験体と分散配筋した試験体で腰壁の斜めひび割れを比較すると、梁と腰壁が同面の側面で顕著に見られるように、分散配筋の方がひび割れ数は少なかった。 $R = -1/50 \text{rad}$ 載荷後の腰

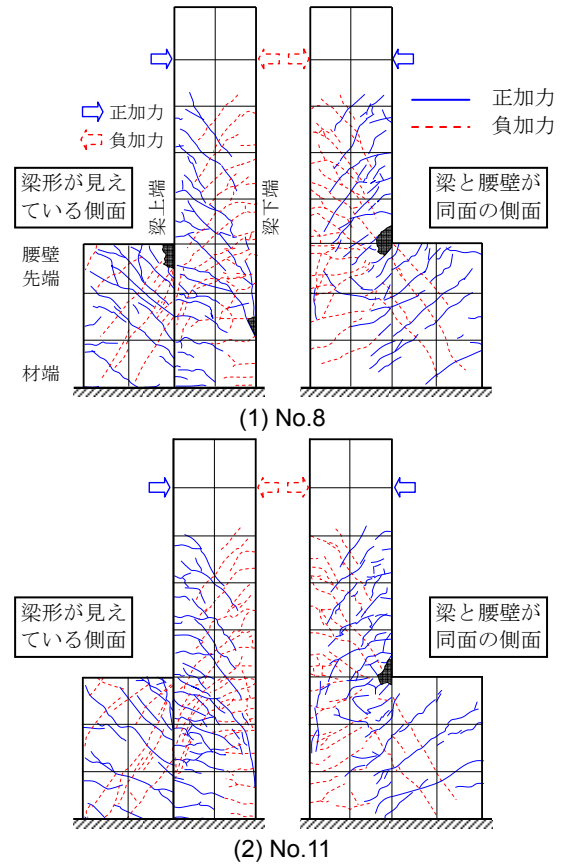


図-4 ひび割れ状況 ($R = \pm 1/33 \text{rad}$ 載荷後)

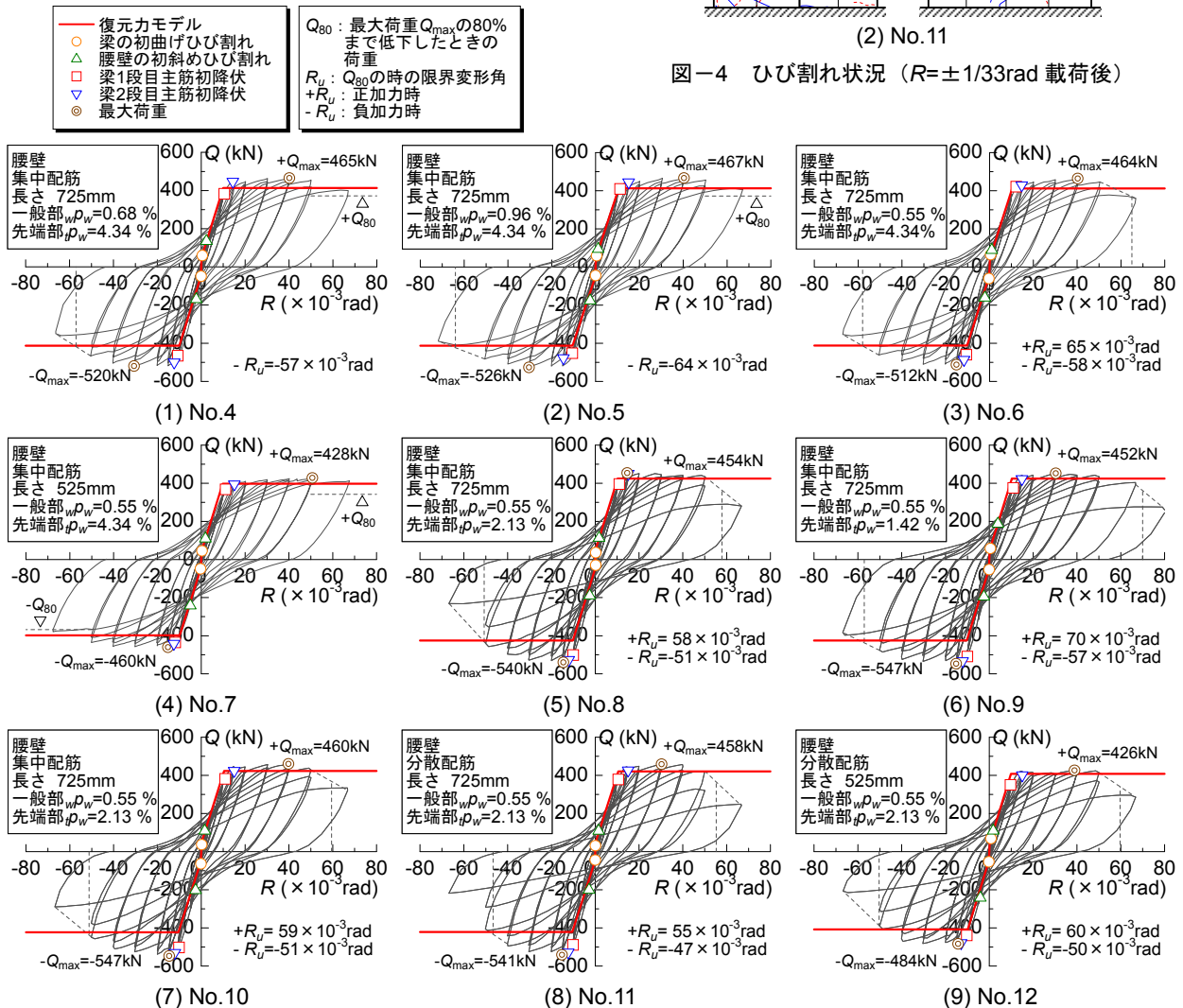


図-5 荷重－変形角関係

壁の斜めひび割れの残留幅は、集中配筋の試験体で0.20～0.45mm程度、分散配筋の試験体で0.10～0.15mm程度であった。このように腰壁主筋を分散させることによって損傷が抑制されたのは、ひび割れを貫通する補強筋量が増大したためと考えられる。

$Q-R$ 関係を見ると、いずれの試験体も変形性能に優れた履歴性状を示しており、同図中に併記した限界変形角 R_u は $1/20\text{rad}$ 程度以上となっている。初期剛性および最大荷重は、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高くなっている。正加力時には $R=+1/67\text{rad}$ までに梁上端筋が降伏ひずみに達し、負加力時は正加力時よりやや小さな変形角で梁下端筋が降伏ひずみに達した。腰壁主筋の配筋方法のみが異なる試験体（集中配筋の No.8 と分散配筋の No.11）を見ると、梁主筋の降伏時期、最大荷重および履歴形状に大きな差異は見られない。

腰壁先端部補強筋比 p_w のみが異なる腰壁主筋を集中配筋した No.6 ($p_w=4.34\%$)、No.8 ($p_w=2.13\%$)、No.9 ($p_w=1.42\%$) を比較すると、 p_w の最も小さい No.9 で正加力時の R_u が大きくなっており、梁-腰壁間を結ぶ、この補強筋の剛性が影響したものと考えられる。

3.2 復元力モデル

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あたり、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、材軸心のずれを無視して腰壁断面と梁断面で構成され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想の部材長 l_e を求め、 $\lambda D=L_w-(l-l_e)$ として

求めた。各試験体の λ は、表-4 および図-2 に示したようになり、腰壁長さ $L_w=725\text{mm}$ の場合は $0.54\sim 0.57$ 、 $L_w=525\text{mm}$ の場合は 0.42 、 0.43 となり、ひび割れが密に発生した範囲と概ね対応している。この剛域端位置で梁が曲げ耐力に達する時の梁せん断力 Q_y に対する最大荷重 Q_{\max} の比率 Q_{\max}/Q_y は、正加力で $1.04\sim 1.13$ (平均 1.09)、負加力で $1.16\sim 1.29$ (平均 1.25) 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。これは、前述のように材軸心のずれを無視し、正・負加力ともに剛域端位置を同じに設定したためであるが、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ものと思われる。

表-4 に示す剛性低下率 α_y は、式(1)に示す一般に用いられている等断面梁の剛性低下率 $_{sg}\alpha_y$ に低減係数 $(1-L_w/l)$ を乗じ、式(2)により算出したものである。

$$_{sg}\alpha_y = \left(0.043 + 1.64n \cdot p_t + 0.043 \cdot \frac{a}{D} \right) \cdot \left(\frac{d}{D} \right)^2 \quad (1)$$

$$\alpha_y = _{sg}\alpha_y \cdot \left(1 - \frac{L_w}{l} \right) \quad (2)$$

ここで、 n はヤング係数比、 a は剛域端からのせん断スパン長さ、 d は梁の有効せい、 p_t は梁の引張鉄筋比とする。式(2)の剛性低下率 α_y を用いた復元力モデルの骨格曲線を図-5 に併記する。骨格曲線の降伏時変形角は、実験結果と概ね対応していることがわかる。

3.3 ひずみ性状

材端における高さ方向の主筋のひずみ分布を図-6 に示す。腰壁が曲げ引張域となる正加力時では、梁部分の

表-4 実験値および計算値一覧

試験体	加力方向	実験値		計算値					
		最大荷重 Q_{\max} (kN)	Q_{\max} 時変形角 R_{\max} ($\times 10^{-3}\text{rad}$)	曲げ耐力 Q_y (kN) ※1	材端降伏せん断力 Q_{end} (kN) ※2	剛性低下率 α_y	Q_{\max}/Q_y	λ	Q_{end}/Q_y
No.4	正	465	40.2	413	847	0.14	1.13	0.57	2.05
	負	-520	-30.6	-413	1077		1.26		2.61
No.5	正	467	40.4	413	847	0.14	1.13	0.57	2.05
	負	-526	-30.4	-413	1077		1.27		2.61
No.6	正	464	40.3	412	847	0.15	1.13	0.57	2.06
	負	-512	-15.1	-412	1077		1.24		2.61
No.7	正	428	50.7	398	902	0.17	1.08	0.43	2.27
	負	-460	-15.2	-398	1147		1.16		2.88
No.8	正	454	14.6	425	864	0.14	1.07	0.54	2.03
	負	-540	-14.6	-425	1099		1.27		2.59
No.9	正	452	30.3	425	864	0.14	1.06	0.54	2.03
	負	-547	-15.1	-425	1099		1.29		2.59
No.10	正	460	39.9	423	680	0.15	1.09	0.55	1.61
	負	-547	-14.6	-423	1099		1.29		2.60
No.11	正	458	30.3	421	701	0.15	1.09	0.57	1.67
	負	-541	-15.2	-421	1197		1.28		2.84
No.12	正	426	38.9	408	746	0.17	1.04	0.42	1.83
	負	-484	-14.2	-408	1274		1.18		3.12

※1 $Q_y = 0.9 \cdot a_i \cdot \sigma_y \cdot d / l_e$ 、※2 $Q_{end} = \sum a_{ti} \cdot \sigma_y \cdot (d_i - x_n / 2) / l^2$ 、 a_i : 梁の引張鉄筋の断面積、 d : 梁の有効せい、 a_{ti} : 中立軸より引張側にある i 番目の鉄筋の断面積、 d_i : 圧縮縁から i 番目の鉄筋までの距離、 x_n : 中立軸位置

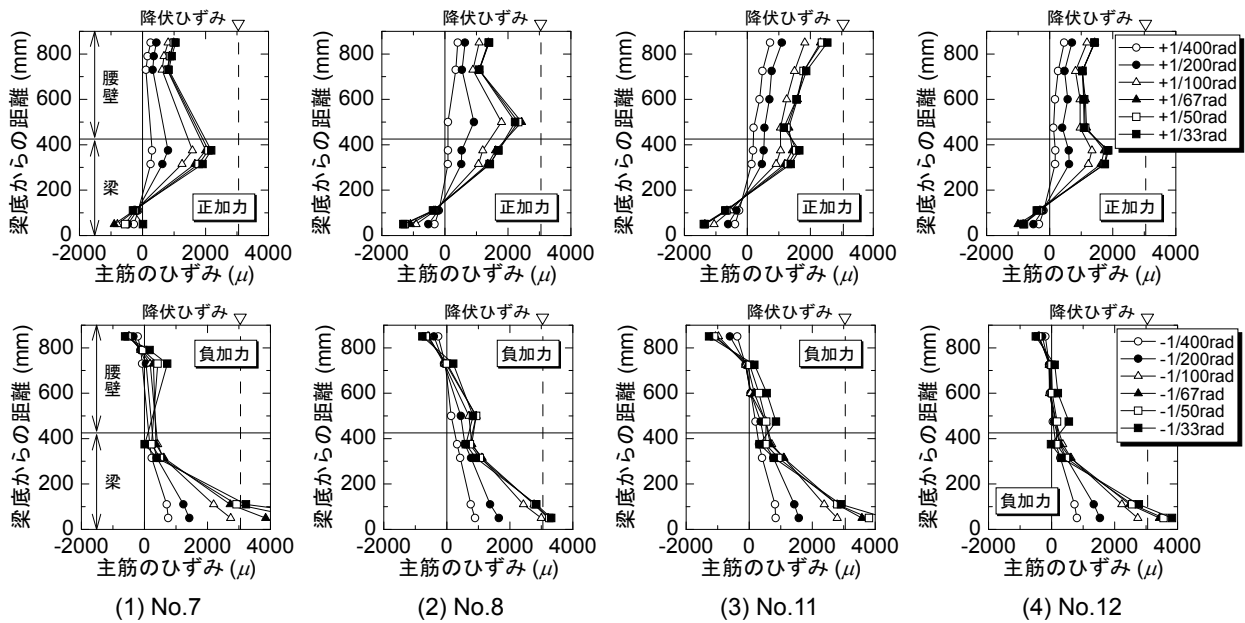


図-6 材端の高さ方向の主筋ひずみ分布

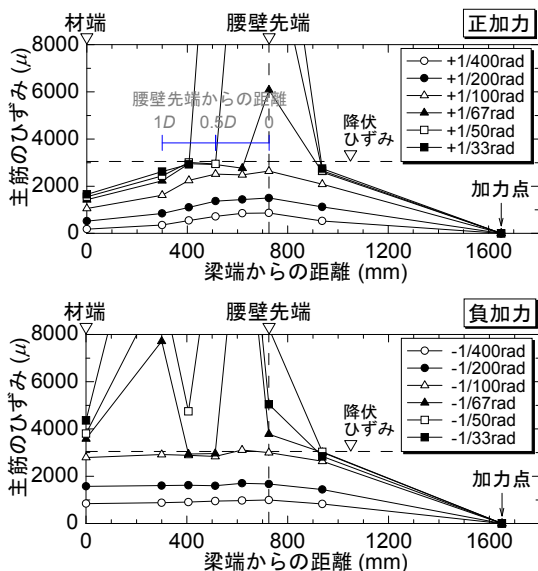


図-7 材軸方向の主筋のひずみ分布 (No.11)

ひずみ分布は曲げモーメントの方向に対応して直線状になっているが、腰壁部分のひずみの勾配は梁部分より小さくなっており、平面保持仮定が成立しないことを示している。一方、腰壁が曲げ圧縮域となる負加力時では、 $R=-1/200\text{rad}$ までは腰壁付き断面全体で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。

試験体 No.11 の梁の引張主筋（正加力：梁上端筋，負加力：梁下端筋）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 $0.5D$ 近傍までの範囲で降伏ひずみに達している。腰壁の付く範囲の梁引張主筋のひずみ分布を見ると、正加力時では梁端でひずみが小さく、腰壁

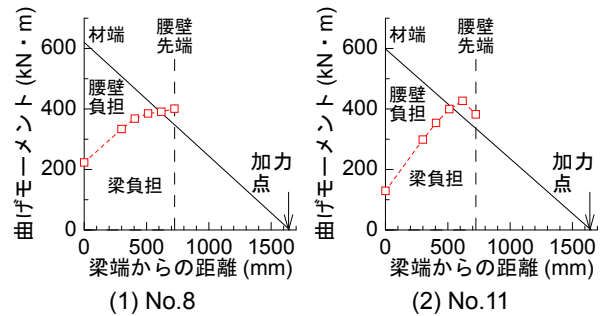


図-8 曲げモーメント分布 ($R=+1/100\text{rad}$)

先端部でひずみが大きくなっているのに対し、負加力時では腰壁の範囲で梁下端筋のひずみが同程度の値を示している。RC 規準²⁾付 10 の終局曲げ耐力式により算定した材端の降伏せん断力 Q_{end} (表-4 参照) は、ヒンジ領域の降伏せん断力 Q_y に対して $2.59\sim 3.12 (=Q_{end}/Q_y)$ であるが、 $R=-1/67\text{rad}$ 以降で材端も降伏ひずみに達するまでひずみが大きくなっている。しかしながら、引張主筋のひずみが著しく増大する範囲は、正・負加力ともに前述の剛域端（材端から $\approx D$ の位置）の近傍であった。

4. 腰壁先端補強筋の引張力

4.1 曲げモーメント分布

正加力の $R=+1/100\text{rad}$ 時の曲げモーメント分布を図-8 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。図示のように梁部分の負担曲げモーメントは、腰壁先端近傍から材端に向かって徐々に減少し、逆に腰壁の負担曲げモーメントが増加している。したがって、負加力時のひび割

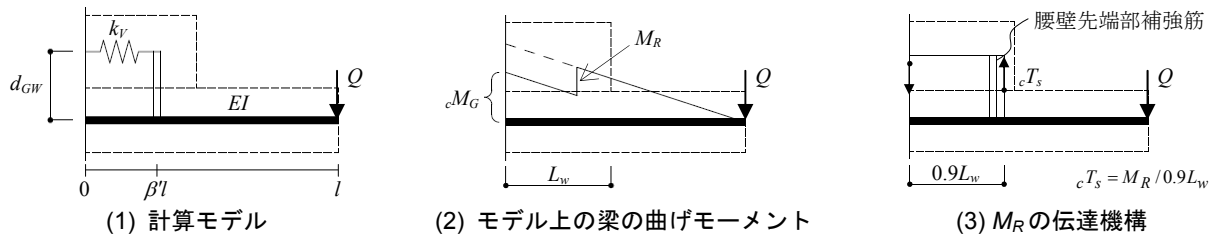


図-9 腰壁付き梁のモデル

表-5 腰壁先端部補強筋の引張力

試験体	加力方向	材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	計算値	M_G	実験値	計算値		T_s
		M_G (kN·m)	M_G (kN·m)	M_G (kN)	T_s (kN)	M_R (kN·m)	cT_s^{**} (kN)	T_s (kN)
No.8	正	329	304	1.08	646	444	681	0.95
	負	-193	-199	0.97	-	-692	(-1061)	-
No.9	正	347	299	1.16	646	447	685	0.94
	負	-192	-201	0.95	-	-701	(-1074)	-
No.10	正	383	342	1.12	721	418	640	1.13
	負	-251	-200	1.25	-	-702	(-1075)	-
No.11	正	315	389	0.81	618	367	562	1.10
	負	-206	-197	1.05	-	-696	(-1066)	-
No.12	正	393	333	1.18	506	327	693	0.73
	負	-221	-141	1.57	-	-608	(-1288)	-

※()内：負加力時の cT_s は腰壁先端部に作用する圧縮力参考値

れ発生状況で確認されたように、正加力時にも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。

4.2 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、正加力時に同補強筋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材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_v のみを考慮する図-9 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-2 に示す仮想剛域端（材端からの長さ $\beta'l$ ）とする。梁に作用する曲げ戻しモーメント M_R は、たわみ角法により定式化すると式(3)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。

$$M_R = \frac{2 - \beta'}{2 \left(\frac{EI}{V} + 1 \right)} \cdot l \cdot Q \quad (3)$$

$$cT_s = \frac{M_R}{0.9L_w} \quad (4)$$

$$V = k_v d_{GW}^2 \beta' l \quad (5)$$

ここで、 k_v は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' は片持ち梁長さ l に対する仮想剛域長さの比、 E は梁コンクリートのヤング係数、 I は梁の断面二次モーメント、 d_{GW} は梁材軸芯と腰壁の軸剛性位置までの長さとする。

腰壁先端部補強筋の引張力の実験値 T_s と計算値 cT_s を表-5 に比較して示す。 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。 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。 T_s/cT_s は 0.73~1.13 (平均 0.97) となっており、腰壁長さの短い No.12 で計算値が過大になっているものの、概ね対応している。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 cT_s より大きくなっている。図-6 を見ると材端の腰壁上部で圧縮ひずみとなっていることから、負加力時の圧縮力は腰壁に形成される斜め圧縮束によって伝達されるものと考えられる。

5. まとめ

材端に腰壁を設けた梁部材の加力実験を行い、腰壁の配筋方法および曲げ強度の評価方法について検討した。結果をまとめると以下の通りである。

- (1) 腰壁主筋は、腰壁の上部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方が腰壁の損傷の抑制に効果的である。
- (2) 腰壁内に仮想の剛域を設定して算出した曲げ耐力の計算値は、実験値の最大荷重を安全側に評価することがわかった。また、復元力モデルは既往の設計式の準用により評価可能である。
- (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概ね評価できる。

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 (その 1) (その 2), 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) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2010