

論文 腰壁・垂れ壁付き RC 梁部材の曲げ終局変形に関する研究

篠田 拓人^{*1}・田才 晃^{*2}・楠 浩一^{*3}

要旨: 本研究では、既往の腰壁・垂れ壁付き梁および袖壁・腰壁・垂れ壁付き柱梁接合部試験体の実験結果をもとに、腰壁・垂れ壁の形状およびせん断補強筋比と梁の曲げ終局変形との関係を明らかにすることを目的とした。また、引張鉄筋比や梁せいをパラメータに加えてファイバーモデルによる曲げ断面解析を行うことで、各パラメータが梁の曲げ終局変形に与える影響を確認した。

キーワード: 腰壁, 垂れ壁, 壁厚, 壁長さ, 曲げ終局変形

1. はじめに

より精確に構造物の性能を評価するためには、腰壁・垂れ壁付き梁部材の復元力特性や曲げ終局変形などの構造性能を適切に評価することが重要である。既往の研究では大久保ら¹⁾の実験などがあり、弾性剛性や曲げ終局強度を検討しているがそれ以外はほとんど行われておらず、腰壁・垂れ壁付き梁部材の壁の形状が曲げ終局変形に与える影響は不明確である。

壁谷澤らが提案している柱の曲げ終局変形の簡易評価式²⁾が腰壁・垂れ壁付き梁へ適応できることが文献³⁾で示されている。しかし、文献³⁾で検討対象とした断面は壁の形状が限られたものである。そこで本研究では、壁厚さ・壁長さなどをパラメータとして文献³⁾の研究を拡大してファイバーモデルによる曲げ断面解析を行い、各パラメータと曲げ終局変形との関係を明らかにすることを目的とした。

2. 保有水平耐力計算による変形性能評価

ここでは既往の腰壁・垂れ壁付き梁および袖壁・腰壁・垂れ壁付き柱梁接合部試験体の実験結果を保有水平耐力計算による部材種別判定法⁴⁾で判定する。部材種別では靱性に富む部材から FA・FB・FC・FD に分類され、各部材の塑性変形能力及び振動減衰性等に応じて判定される。既往の実験の試験体梁部分の諸元を表-1 に、例として SP-J1 の試験体配筋図を図-1 に示す。また、従来の部材種別判定を表-2 に示す。保有水平耐力計算による方法では、腰壁・垂れ壁付き梁部材の部材種別は梁の判定法を準用している。

保有水平耐力計算による判定法では、 τ_u/F_c によって部材種別の評価がされている。 τ_u/F_c の τ_u は、試験体最大せん断力 Q_{max} を断面積で除した値、 F_c はコンクリート圧縮強度として求められる。断面積の計算にはいくつかの方法が考えられ、 τ_u の計算において以下の主要な3つの方法

表-1 試験体梁部分諸元

	二次壁付柱梁十字型接合部試験体				二次壁付梁試験体					
	SP-J0	SP-J1	SP-J2	SP-J3	SP-B1	SP-BW1	SP-BW2	SP-BW3	SP-BW4	SP-BW5
梁幅(mm)	200									
梁せい(mm)	300									
梁主筋	3-D13 [SD345]									3-D16 [USD785]
引張鉄筋比	0.70%									1.11%
あばら筋	2-D6@100 [SD295]									2-D10@50 [SD345]
あばら筋筋比	0.32%									1.43%
壁	無し	両側			無し	両側				
壁幅(mm)		80	50	80		80				
壁長さ(mm)		350		200		350		500	350	
壁横筋		2-D4@150 [SD295]	1-D4@100 [SD295]	2-D4@150 [SD295]		2-D4@150 [SD295]			2-D6@150 [SD345]	
壁横筋比		0.23%	0.28%	0.23%		0.23%			0.46%	
壁縦筋		2-D4@150 [SD295]	1-D4@100 [SD295]	2-D4@150 [SD295]		2-D4@150 [SD295]	2-D4@50 [SD295]	2-D4@450 [SD295]	2-D4@150 [SD295]	2-D6@50 [SD345]
壁縦筋比		0.23%	0.28%	0.23%		0.23%	0.70%	0.08%	0.23%	1.60%
壁端部筋		4-D6 [SD345]	2-D6 [SD345]	4-D6 [SD345]		4-D6 [SD345]			4-D10 [SD345]	
実験時コンクリート強度 $\sigma_B(N/mm^2)$	35.6	34.8	32.2	34.8	30.7	33.2	34.5	35.3	30.9	31.8

*1 横浜国立大学大学院 都市イノベーション学府 大学院生 (学生会員)

*2 横浜国立大学大学院 都市イノベーション研究院 教授・工博 (正会員)

*3 横浜国立大学大学院 都市イノベーション研究院 准教授・博士(工学) (正会員)

により断面積 (A_0 , A_e , A_b) を計算し、それぞれ検討を行った。概念図を図-2 に示す。

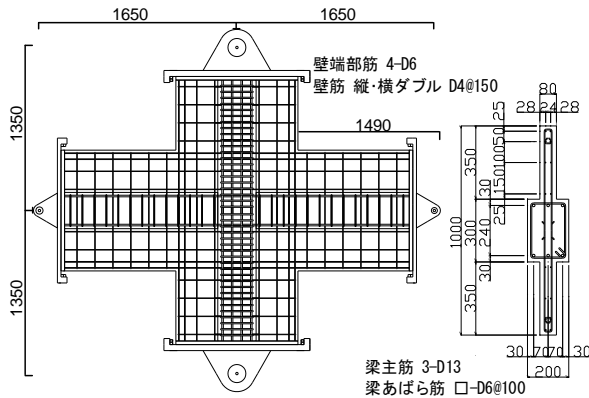


図-1 試験体配筋図 SP-J1 (mm)

表-2 保有水平耐力計算による部材種別判定

部材	破壊の形式	τ_u/F_c の数値	種別
条件	せん断破壊、付着割裂破壊及び圧縮破壊その他の構造耐力上支障のある急激な耐力の低下のおそれのある破壊を生じないこと。	0.15以下	FA
		0.2以下	FB
		—	FC
		FA、FB又はFCのいずれにも該当しない場合	FD

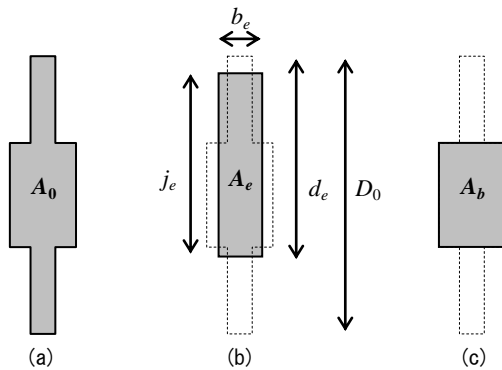


図-2 断面積概念図

(1) 壁を含めた全断面積 A_0

壁を含めた全断面積を A_0 とした。概念図を図-2(a) に示す。

(2) せん断耐力計算時における断面 A_e

腰壁・垂れ壁付き梁部材の変断面を断面積と全せいが等価な置換長方形断面に置換する方法。この時の置換長方形断面の幅に応力中心間距離を乗じた断面 A_e で、式(1)により計算できる。概念図を図-2(b) に示す。

$$A_e = b_e \cdot j_e \quad (1)$$

ただし、

b_e : 置換長方形断面の幅 (= A_0/D_0) (mm)

D_0 : 壁を含めた全せい (mm)

j_e : 応力中心間距離 (= $7 d_e/8$) (mm)

d_e : 引張鉄筋群の重心から圧縮最外縁までの距離 (mm)

(3) 梁のみの断面積 A_b

壁を含めない梁のみの断面積を A_b とした。概念図を図-2(c) に示す。

以上より、検討する τ_u/F_c の数値は、式(2)によりそれぞれ計算できる。

$$\frac{\tau_{u0}}{F_c} = \frac{Q_{\max}}{A_0 F_c}, \quad \frac{\tau_{ue}}{F_c} = \frac{Q_{\max}}{A_e F_c}, \quad \frac{\tau_{ub}}{F_c} = \frac{Q_{\max}}{A_b F_c} \quad (2)$$

ただし、

Q_{\max} : 試験体最大せん断力 (N)

F_c : コンクリート圧縮強度 (N/mm^2)

(ただし、材料試験値の値とした)

袖壁・腰壁・垂れ壁付き柱梁接合部試験体 SP-J0~SP-J3、梁のみ試験体 SP-B1、および腰壁・垂れ壁付き梁試験体 SP-BW1~SP-BW5 の τ_u/F_c および終局変形角の実験値一覧を表-3 に示す。また、最も安全側の評価となる τ_{ub}/F_c による部材種別の判定結果を合わせて示す。この時、最大耐力の80%に耐力が低下した点の変形を終局変形角としている。

表-3 より、 τ_u の計算の際に用いる断面積が A_0 , A_e , A_b のいずれの場合でも、曲げ圧縮破壊した SP-BW5 を除

表-3 各試験体実験値一覧

	τ_{u0}/F_c	τ_{ue}/F_c	τ_{ub}/F_c	部材種別 (τ_{ub}/F_c による)	終局変形角 (rad.)
SP-B1	-	0.022	0.017	FA	1/19
SP-BW1	0.038	0.061	0.073	FA	1/45
SP-BW2	0.039	0.064	0.076	FA	1/40
SP-BW3	0.037	0.060	0.071	FA	1/46
SP-BW4	0.049	0.081	0.115	FA	1/51
SP-BW5	0.116	0.181	0.224	FD	1/76
SP-J1(N)	0.037	0.060	0.072	FA	1/56
SP-J1(S)	0.036	0.059	0.070	FA	1/70
SP-J2(N)	0.037	0.063	0.059	FA	1/115
SP-J2(S)	0.036	0.061	0.057	FA	1/143
SP-J3(N)	0.030	0.046	0.046	FA	1/35
SP-J3(S)	0.030	0.046	0.046	FA	1/36

く全ての試験体で τ_u/F_c の値は 0.15 以下となり、部材種別 FA として判定されることが確認された。また、SP-BW5 試験体は変形角 1/200(rad.)で圧縮縁コンクリートが曲げ圧縮破壊したため、FD として判定される。保有水平耐力計算による判定法によると SP-BW1～SP-BW4 および SP-J1～SP-J3 は部材種別 FA として判定されるものの、梁のみ試験体 SP-B1 の終局変形角 1/19(rad.)と比べると著しく低い。

腰壁・垂れ壁付き梁試験体の変形性能が梁のみ試験体 SP-B1 に比べて著しく低下する原因として、腰壁・垂れ壁付き梁の典型的な破壊性状のひとつである腰壁・垂れ壁端部の圧壊により耐力が急激に低下することが挙げられる。ただし、表-3 よりその中でも SP-BW2 と SP-J3 が比較的大きい変形性能を保持している。要因として SP-BW2 に関しては他の試験体よりせん断補強筋量が多く、SP-J3 に関しては腰壁・垂れ壁長さが短いことが考えられる。

3. 実験結果の検討

前項より、壁のせん断補強筋量と腰壁・垂れ壁長さが腰壁・垂れ壁付き梁の変形性能に影響を与えと考えられる。ここでは、壁せん断補強筋比、梁幅に対する壁厚の比 α (壁厚比=壁厚さ/梁幅)、梁せいに対する壁長さの比 β (壁長さ比=壁長さ/梁せい) をパラメータとし、各パラメータと終局変形角の関係について検討を行った。

図-3 に同一断面における壁せん断補強筋比-曲げ終局変形角の関係を、図-4 に壁長さが等しい試験体における壁厚比-終局変形角関係を、図-5 壁厚が等しい試験体における壁長さ比-終局変形角関係を示す。

図-3 より、壁せん断補強筋比が増加するに伴いわずかであるが変形性能に改善が見られることがわかる。図-4 より壁長さ比 β が同じ試験体でも壁厚比 α が増加するに伴い、変形性能が向上することがわかる。図-5 から壁厚比 α が同じ試験体でも壁長さ比 β が増加するほど、変形性能が低下することがわかる。これは壁の形状が細長くなると圧縮縁コンクリートが圧壊しやすくなるためであると考えられる。

袖壁付柱部材においては壁筋、帯筋の配筋量の増加に伴い変形性能の改善が見られることが指摘されている。しかし、腰壁・垂れ壁付き梁部材において配筋量による変形性能の改善はあまり見られなかった。これらの結果より、壁厚比、壁長さ比が腰壁・垂れ壁付梁部材の変形性能に与える影響が大きいと考えられる。

4. ファイバーモデルによる解析

4.1 壁厚さ・壁長さをパラメータとした検討

前項より、壁厚比・壁長さ比が変形性能に与える影響

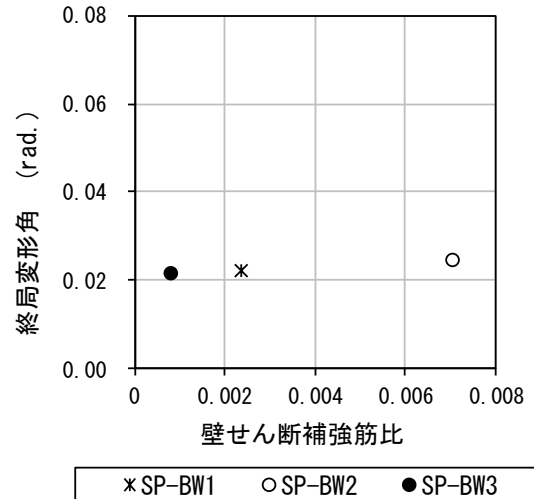


図-3 壁せん断補強筋比と終局変形角の関係

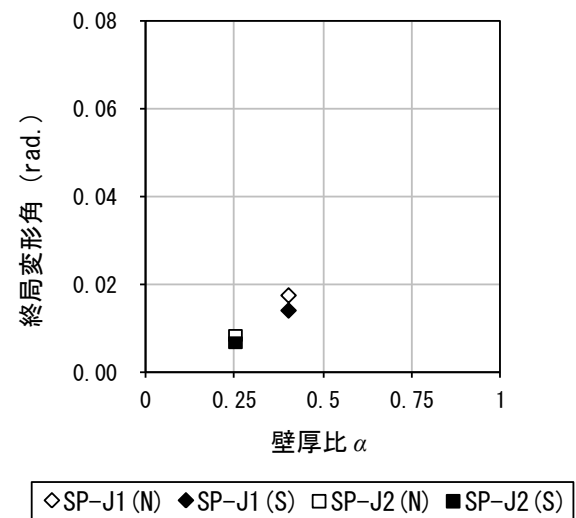


図-4 壁厚比 α と終局変形角の関係

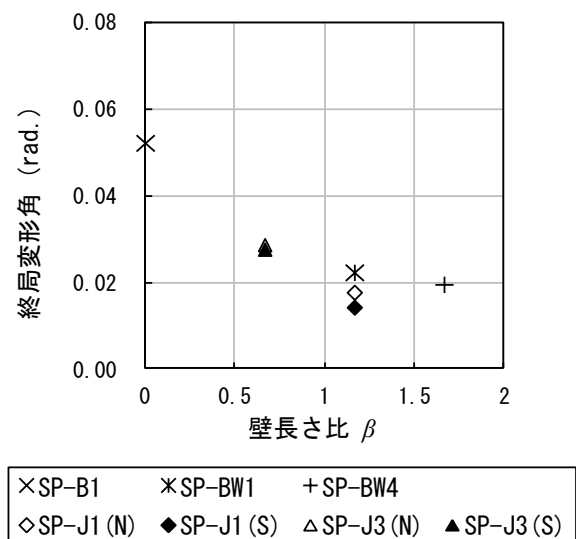


図-5 壁長さ比 β と終局変形角の関係

が大きいことがわかったため、ここでは壁厚比 α 、壁長さ比 β に関して検討を行う。壁厚比 α に関して $\alpha=0.25$, $\alpha=0.3\sim 1.0$ まで 0.1 刻みとなるよう壁厚を 20mm ずつ変化させた。壁長さ比 β は $\beta=0.2$, $\beta=0.3\sim 0.7$ までは 0.1 刻みとなるよう壁長さを 30mm ずつ変化させた。 $\beta=0.7$ 以降は壁横筋を 1 本増やし、なおかつ壁横筋間隔が十分に確保できるよう β を変化させた。壁厚比 α 、壁長さ比 β を変化させた腰壁・垂れ壁付き梁（梁断面は SP-B1 と同様 図-6）の圧縮縁—中立軸位置距離 x_n をファイバーモデルによる曲げ断面解析（圧縮縁コンクリートが圧縮強度に達した時）により求め、その x_n をもとに式(3)を用いて終局変形角を算出する。圧縮縁コンクリートひずみ $\epsilon_{cu}=0.003$ とし、実験値と計算値を適合させるための変形係数 c の値は $c=8$ として検討を行う。SP-BW1~SP-BW5 および SP-J1~SP-J3 実験値と式(3)より求めた計算値を 図-7 に示す。また式(3)より求めた終局変形角と α , β の組み合わせを算出したものを 図-8 に示す。

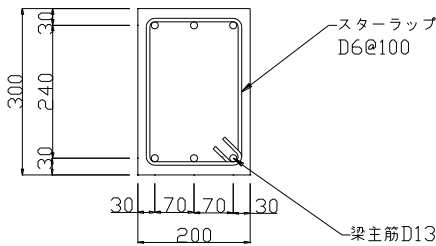


図-6 試験体 SP-B1 の梁断面図 (mm)

$$R_u = c \times 2t_w \times \epsilon_{cu} / x_n \quad (3)$$

ただし、

c : 変形係数

t_w : 壁厚さ (mm)

ϵ_{cu} : 圧縮縁コンクリートひずみ ($\epsilon_{cu}=0.003$)

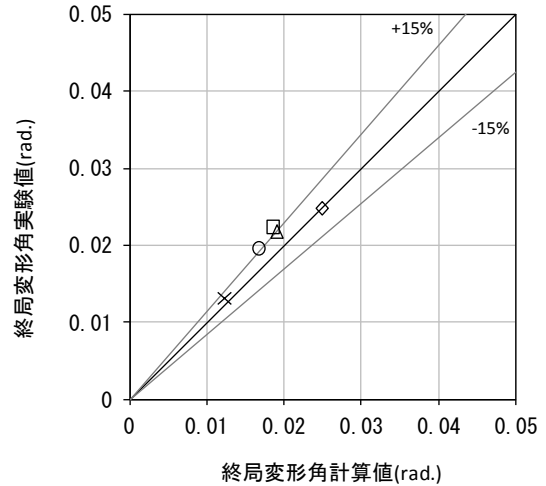
x_n : 圧縮縁—中立軸位置距離 (mm)

式(3)において、簡易化するにあたり圧縮側コンクリートの一定の曲率 ($=\epsilon_{cu}/x_n$) と壁厚さの 2 倍と仮定したヒンジ領域 ($=2t_w$) の曲げ変形のみにより算定している。

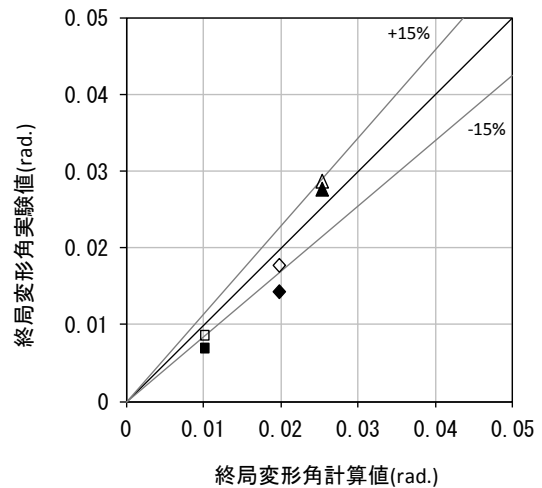
図-7 より、壁・袖壁付き梁試験体 SP-BW1~SP-BW5 および袖壁・腰壁・垂れ壁付き柱梁接合部試験体 SP-J1~SP-J3 の終局変形角において $\pm 15\%$ 程度の精度で評価が可能である。

図-8 より、壁厚さ α および壁長さ比 β の増加に伴い、変形性能が向上する。ただし、壁厚さ α の増加における比例的な終局変形角の向上は、壁長さ比 β においては見ることができなかった。

ここで、優れた変形性能を部材角 $1/40(\text{rad.})$ 程度と考える。図-8 において終局変形角が $1/40(\text{rad.})$ となる α , β の値を算出し、プロットすると 図-9 のようになる。



(a) SP-BW シリーズ



(b) SP-J シリーズ

図-7 曲げ終局変形実験値と計算値の比較

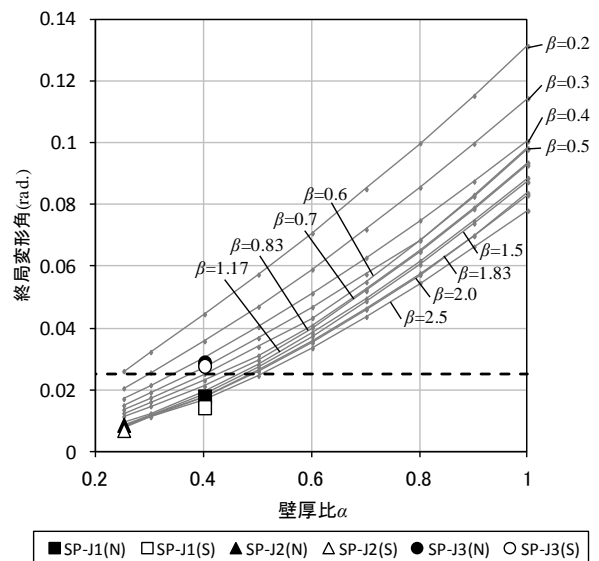


図-8 壁長さ比 β と終局変形角の関係

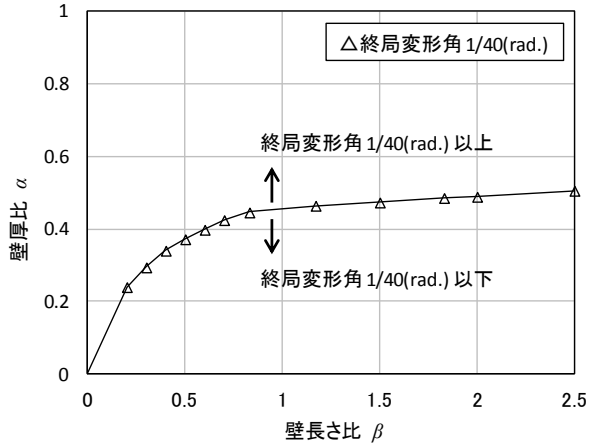


図-9 終局変形角点 1/40における壁厚比 α と壁長さ比 β

図-9 に示した線の上においては終局変形角が 1/40(rad.)以上、下部においては 1/40(rad.)以下となる。今回検討した梁断面での解析においては壁長さ比 β が増大するに伴い壁厚比 α が 0.5 付近に収束する傾向が見られた。

図-10 に腰壁・垂れ壁付き梁試験体および袖壁・腰壁・垂れ壁付き柱梁接合部試験体の α と β を示す。終局変形角が 1/40(rad.)を超えた試験体 SP-J3(図中▲印)はおおよそ境界線付近にプロットされる。また終局変形角が 1/40(rad.)程度の SP-BW2(図中□印)においては、せん断補強筋が 50mm 間隔と密に配筋されているため、その影響を考慮して $\epsilon_{cu}=0.004$ とすると、境界線付近にプロットされる。

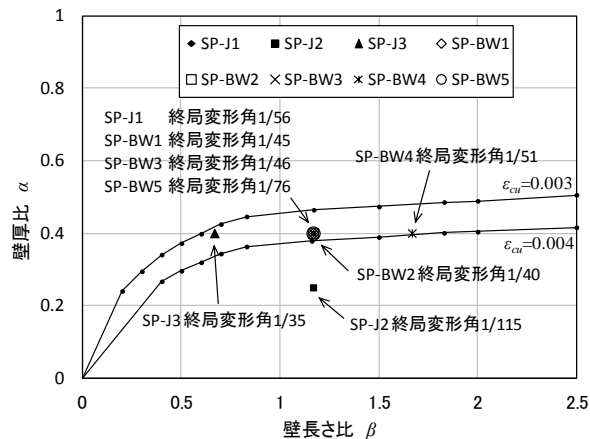


図-10 各試験体の壁厚比 α と壁長さ比 β の関係

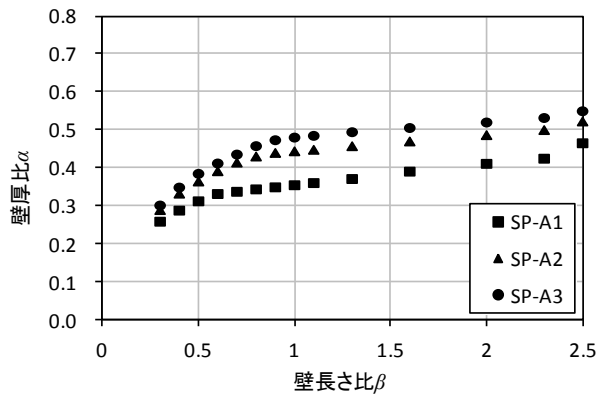
4.2 引張鉄筋比をパラメータとした検討

ここでは引張鉄筋比をパラメータとした際の壁厚比 α と壁長さ比 β の関係について検討する。検討に用いた試験体の諸元を表-4 に示す。SP-A シリーズと SP-B シリーズの壁厚比 α と壁長さ比 β の関係を図-11 に示す。

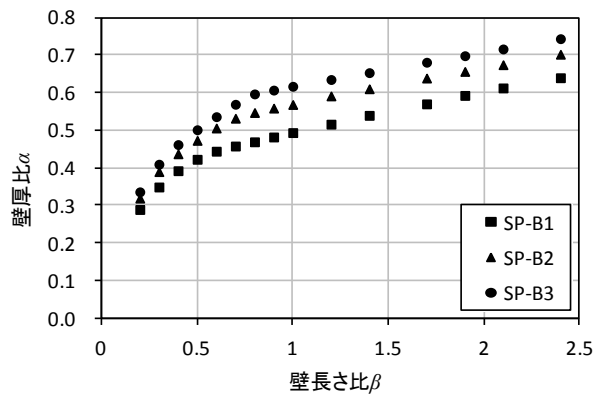
表-4 検討に用いた試験体諸元

	SP-A1	SP-A2	SP-A3	SP-B1	SP-B2	SP-B3
梁幅(mm)	400					
梁せい(mm)	600			850		
梁主筋	3-D19 [SD345]	5-D19 [SD345]	6-D19 [SD345]	2-D29 [SD345]	4-D25 [SD345]	5-D25 [SD345]
引張鉄筋比	0.40%	0.66%	0.80%	0.41%	0.65%	0.81%
あばら筋	2-D13@100 [SD295]			2-D16@100 [SD295]		
コンクリート圧縮強度 σ_B (N/mm ²)	30					

図-11 より、 β の値が低い場合に α に大きな差は見られないが、 β の値が大きくなると引張鉄筋比が増加するとともに α の値が増加することがわかる。つまり終局変形角 1/40(rad.)の変形性能を確保するためには、同じ梁断面における引張鉄筋量が多くなると壁厚さを厚くする必要があることがわかった。



(a) SP-A シリーズ



(b) SP-B シリーズ

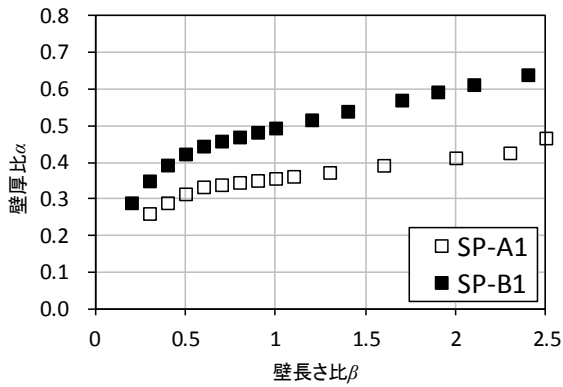
図-11 引張鉄筋比をパラメータとした α と β の関係

4.3 梁せいをパラメータとした検討

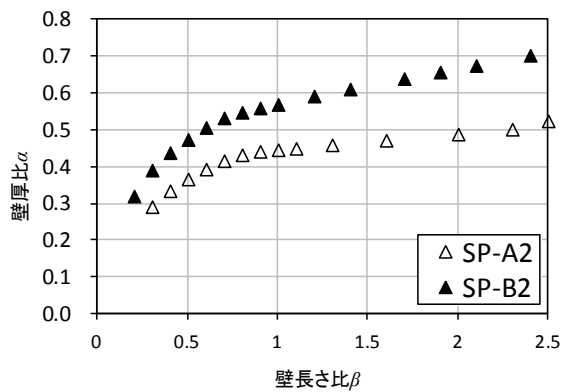
ここでは、壁厚比 α と壁長さ比 β の関係において図-12(a)に SP-A1 と SP-B1 との、図-12(b)に SP-A2 と SP-B2 との、図-12(c)に SP-A3 と SP-B3 との比較を示す。

図-12 より、引張鉄筋比がほぼ同じものでも梁せい

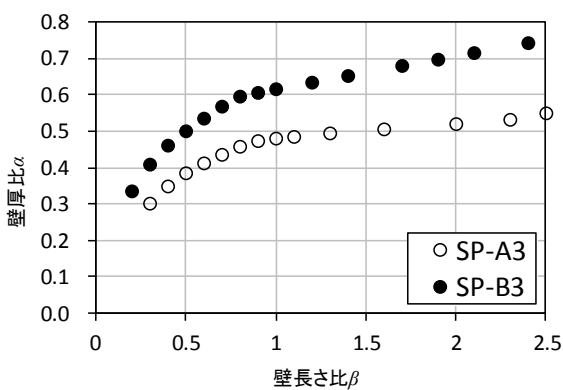
を大きくすることで α が増加した。また、 β が大きくなるにつれて α は一定の値に収束せず、増加し続けた。つまり終局変形角 $1/40(\text{rad.})$ の変形性能を確保するためには、梁せいを大きくすると壁厚さを厚くする必要があり、加えて壁長さが長くなることでも壁厚さを厚くする必要がある。



(a) 引張鉄筋比 $p_t \doteq 0.4\%$



(b) 引張鉄筋比 $p_t \doteq 0.65\%$



(c) 引張鉄筋比 $p_t \doteq 0.8\%$

図-12 梁せいをパラメータとした α と β の関係

5. まとめ

本研究では、壁厚さ・壁長さ・引張鉄筋比・梁せいをパラメータとして文献³⁾の研究を拡大してファイバーモデルによる曲げ断面解析を行い、各パラメータと曲げ終局変形との関係を検討し、以下の知見を得た。

- (1) 壁せん断補強筋、壁厚さおよび壁長さが腰壁・垂れ壁付き梁部材の変形性能に影響を与える。
- (2) 同じ梁断面において、壁せん断補強筋量が多いほど、変形性能が向上する。
- (3) 同じ梁断面において、壁長さが等しいときは壁厚さが大きいほど、壁厚さが等しいときは壁長さが短いほど、変形性能が向上する。
- (4) 引張鉄筋比をパラメータとしたとき、終局変形角 $1/40(\text{rad.})$ の変形性能を確保するためには同じ梁断面における引張鉄筋量が多くなると、壁厚さを厚くする必要がある。これは圧縮側コンクリートの断面積が小さいと圧縮縁コンクリートの圧壊が早期に起こり変形性能が確保できないためだと考えられる。ただし、壁長さ比 β が小さいときは差があまりみられなかった。
- (5) 梁せいをパラメータとしたとき、終局変形角 $1/40(\text{rad.})$ の変形性能を確保するためには、梁せいを大きくすると壁厚さを厚くする必要がある、加えて壁長さが長くなることでも壁厚さを厚くする必要があることがわかった。梁せい・壁長さを長くすることにより中立軸位置から圧縮縁までの距離が大きくなり、圧縮縁コンクリートの圧壊が早期に起こるためであると考えられる。

参考文献

- 1) 大久保全陸, 東洋一, 飯田研: 腰壁, たれ壁付き鉄筋コンクリート梁の弾塑性挙動に関する実験的研究(その1・2), 日本建築学会論文報告集, 第204号, pp.1-7, 1973.2
- 2) 壁谷澤寿海, 黄賢聖, 金裕錫, 細川洋治, 佐藤充晴: 鉄筋コンクリート造袖壁付き柱の変形性能に関する実験的研究(その3 曲げ理論による変形性能の評価), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, pp.139-140, 2011.8
- 3) 田才晃, 西倉 幾, 楠浩一, 渡邊 秀和, 福山洋, 田尻清太郎: 腰壁・垂れ壁付きRC 梁部材の構造性能に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, pp.93-96, 2009.8
- 4) 国土交通省住宅局建築指導課: 2007 年度版建築物の構造関係技術基準解説書, 全国官報販売協同組合, 2007.8