

論文 腰壁・垂れ壁付き RC 柱が面外方向に荷重を受けた場合の 構造性能に関する実験研究

宇野 功一*1・松崎 育弘*2・中野 克彦*3・杉山 智昭*1

要旨：腰壁・垂れ壁付き柱は、面内方向では壁の影響による短柱化を考慮した構造検討が行われているが、面外方向では短柱化の影響を考慮しないで独立柱として設計されている。しかし、それを裏づける資料はなく、研究もほとんどされていない。そこで本論文では、壁厚が厚い腰壁あるいは垂れ壁(ウォールガーダー)付き柱を面外方向において曲げせん断実験することにより、構造性能を把握することを目的とし、面外加力と面内加力の違いによる影響、および面外加力において腰壁・垂れ壁が偏心することで生じる影響を検討した。その結果、面外方向においても付帯した壁は、柱の破壊性状、変形性状、最大耐力に影響を与えることを示した。

キーワード：腰壁・垂れ壁付き柱、面外加力、面内加力、短柱化、ウォールガーダー

1. はじめに

従来、構造設計では、腰壁・垂れ壁は非構造物とみなされ、単にその重量だけを考慮したり、耐力に関しては余力とみなすことが多く行われていた。しかし、1968年の十勝沖地震以降、鉄筋コンクリート柱部材に腰壁・垂れ壁が付帯することにより、壁が柱に対して変形を拘束し、柱の剛性、強度および破壊性状に影響を与えることが多くの研究¹⁾により示された。現在、構造設計においては、腰壁・垂れ壁の影響による短柱化を考慮した構造検討を行っている。しかし、その構造検討は面内方向のみで行われており、面外方向においては付帯した壁の影響は少ないとして、腰壁・垂れ壁を無視して取り扱われているが、それを裏づける資料はなく、研究もほとんどされていない。

筆者²⁾は、面外加力においても腰壁の存在は柱部材の破壊性状に影響を与え、脆性的な破壊を生じることを報告した。

そこで本論文では、文献²⁾において壁の影響が特に顕著であった壁厚の厚いウォールガーダータイプについて着目し、壁厚が厚い場

合の腰壁あるいは垂れ壁付き RC 柱を、面外方向および面内方向において曲げせん断実験を行うことで、構造性能をより明らかにすることを目的とした。それにより面外加力と面内加力の違いによる影響、および面外方向において腰壁・垂れ壁が偏心することで生じる影響を把握する。

2. 試験体および実験方法

2.1 試験体

表-1に試験体および計算値一覧、表-2に材料試験結果、図-1に配筋図の一例を示す。共通因子は、柱断面 $b \times D = 300\text{mm} \times 300\text{mm}$ 、試験区間 $L = 900\text{mm}$ 、主筋 12-D13(SD295A、 $p_g = 1.7\%$)とし、実大の 1/2 から 1/3 のスケールを想定した。また腰壁・垂れ壁は壁高さ、壁長さ共に 300mm のウォールガーダーを想定し、主筋 2-D13(SD295A)、せん断補強筋 D6 @50mm(SD295A、 $p_w = 0.64\%$)とした。変動因子は、加力方向(面内加力、面外加力)、壁付き位置(腰壁、腰壁・垂れ壁)、壁厚さ $t/D(2/3, 1/2)$ 、柱部分のせん断補強筋比($p_w = 0.21, 0.79, 1.19\%$)

*1 東京理科大学大学院 工学研究科建築学専攻 (正会員)

*2 東京理科大学教授 工学部建築学科 工博 (正会員)

*3 東京理科大学助手 工学部建築学科 (正会員)

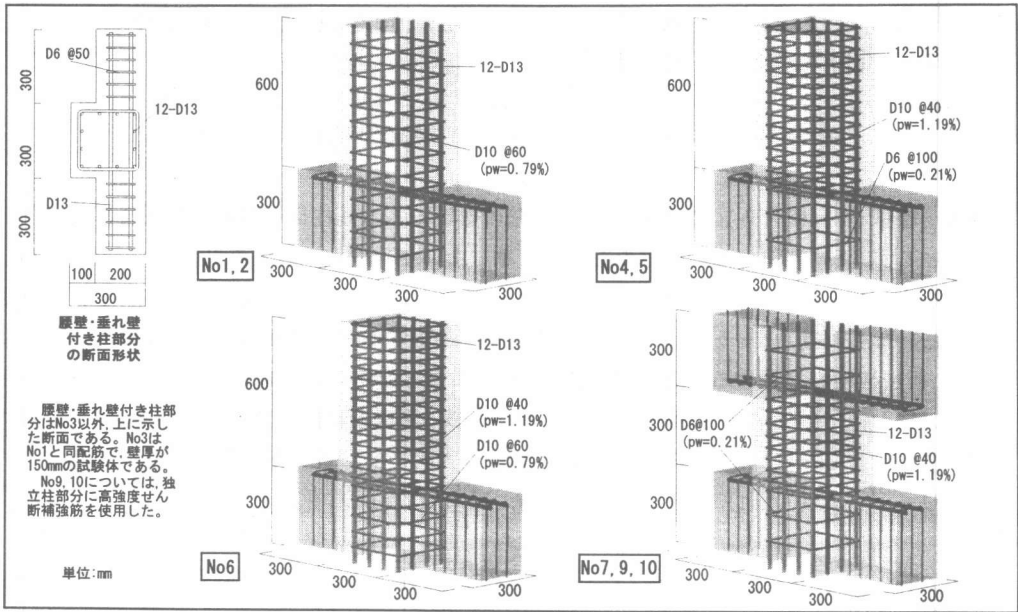


図-1 配筋図の一例

表-1 試験体、計算値一覧および破壊形式

試験体名	変動因子		加力方向	計算値 ³⁾									破壊形式 (実験結果)			
	腰壁厚さ (t/b)	垂れ壁厚さ (t/b)		Pw (%)		曲げ耐力 3) G _m (kN)			せん断耐力 4) Q _s (kN)			付着余裕度 4) (τ bu/ τ f)				
				独立柱部分	壁付き柱部分	900mm	600mm	300mm	900mm	600mm	300mm	900mm		600mm	300mm	
1 SW-OUT-079	200mm (2/3)	200mm (2/3)	面外	0.79		240	359		383	388		1.90	1.05	0.19	曲げ破壊	
2 SW-IN-079			面内	0.79		241	362		387	394		1.95	1.07	0.20	曲げ降伏後せん断破壊	
3 SW-OUT-079-A	150mm (1/2)	200mm (2/3)	面外	0.79		240	359		383	388		1.90	1.05	0.19	曲げ破壊	
4 SW-OUT-(119-021)			面外	1.19	0.21	240	359		455	455		2.25	1.24	0.23	曲げ降伏後せん断破壊	
5 SW-IN-(119-021)	200mm (2/3)	200mm (2/3)	面内	1.19	0.21	241	362		466	466		2.30	1.27	0.24	曲げ降伏後せん断破壊 付着剥離破壊	
6 SW-OUT-(119-079)			面内	1.19	0.79	240	359		455	455		2.25	1.24	0.23	曲げ破壊	
7 DSW-OUT-(119-021)	200mm (2/3)	200mm (2/3)	面外	1.19	0.21	240	359	719	455	455	455	2.25	1.24	0.23	せん断破壊	
8 DSW-OUT-(119-079)			面外	1.19	0.79	240	359	719	455	455	455	2.25	1.24	0.23	曲げ破壊	
9 DSW-IN-(119-021)-B	200mm (2/3)	200mm (2/3)	面内	1.19 ^{*1}	0.21		362	723		528	528		2.30	1.27	0.24	曲げ圧縮破壊
10 DSW-IN-(119-021)-C			面内	1.19 ^{*2}	0.21		362	723		528	528		2.58	1.42	0.26	曲げ圧縮破壊

*1 高強度せん断補強筋(685MPa級)使用
*2 高強度せん断補強筋(1275MPa級)使用

*3 計算値は、壁を考慮せず独立柱部分の耐力を算出した

3) 多段配筋柱の曲げ終局耐力方式
4) 終局強度型耐震設計指針式

表-2 材料試験結果

種類	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	ϵ_y (μ)	ϵE (GPa)	コンクリート			
					試験体No.	c σ B (MPa)	c σ T (MPa)	c ϵ E (GPa)
D13 SD295A	378	539	1780	214	No1,3,4,6,7,8	30.6	2.43	25.2
D10 SD295A	388	542	2195	177	No2,5,9,10	32.0	2.31	25.9
D6 SD295A	341	550	1946	200	σ_y :降伏強度	σ_u :引張強度		
D10 SHD685	770	966	3985	194	ϵ_y :降伏歪み	s ϵ ,c ϵ :弾性係数		
U9.0 SBPD1275	1386	1458	7349	189	c σ B:圧縮強度	c σ T:割裂強度		

とした。

図-2 にモーメント想定図を示す。柱頭、柱脚、腰壁・垂れ壁上端部のいずれかにヒンジが出来ると仮定し、腰壁の試験体は2タイプ、腰壁・垂れ壁の試験体は3タイプのモーメント分布を想定した。

せん断補強筋比(以下 pw)の設定は、No1~3は、内法スパンが 900mm(柱頭・柱脚にヒンジ)のときは曲げ降伏型、内法スパンが 600mm(柱頭と腰壁上端部にヒンジ)のときはせん断耐力と曲げ耐力がほぼ等しくなる様に柱全体の pw を 0.79%とした。No4~10は、内法スパンが 600mm のとき独立柱部分が曲げ降伏型

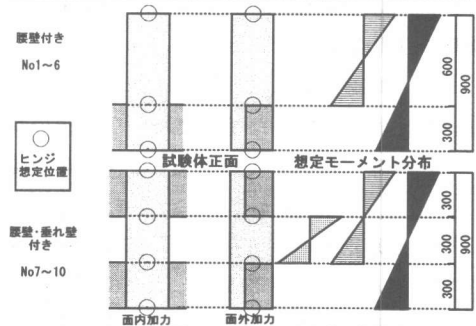


図-2 モーメント想定図

となる様に p_w を 1.19% とした。そのなかで、No4, 5, 7, 9, 10 は壁付き柱部分の p_w を 0.21% に減らすことで加力方向の違いによる壁付き柱部分の性状を確認した。また、腰壁・垂れ壁の面内加力試験体の No9, 10 については、独立柱部分のせん断破壊が先行しないように、高強度せん断補強筋を使用した。

2.2 加力および計測

加力は建研式加力装置により行い、一定軸力(軸力比 0.2:520kN)の下で、変形制御により上下スタブの平行を保ちながら、**図-3** に示す载荷方向による正負交番繰り返しとした。また、水平変位は上下スタブ区間に取り付けた測定治具により相対変形を測定した。

3. 実験結果及び検討

3.1 破壊性状

写真-1 に腰壁の面外加力試験体の破壊状況を示す。腰壁の面外加力試験体は壁が偏心しているため、正載荷と負載荷で破壊状況が異なった。

正載荷では短柱化の様相を示すように腰壁より上方の独立柱部分にせん断ひび割れが発生した。また、腰壁上端部付近に発生した曲げひび割れの幅が、他の部分に発生した曲げひび割れの幅と比べて卓越していた。これは、腰壁付き柱部分が壁により変形を拘束され、独立柱部分で変形しているためである。

負載荷では、せん断ひび割れの発生の仕方が正載荷とは異なり、柱頭と柱脚の加力点を結ぶ様にせん断ひび割れが発生した。しかし、曲げひび割れは正載荷と同様に、腰壁上端部付近の幅が最も開いていた。

No1 は腰壁より上方の独立柱部分のせん断ひび割れが顕著である。また、腰壁により変形が拘束され、独立柱部分で変形をしている状況が観察できる。No4 は負載荷において腰壁付き柱部分のせん断補強筋が破断し、急激にせん断破壊した。No6 はせん断ひび割れが顕

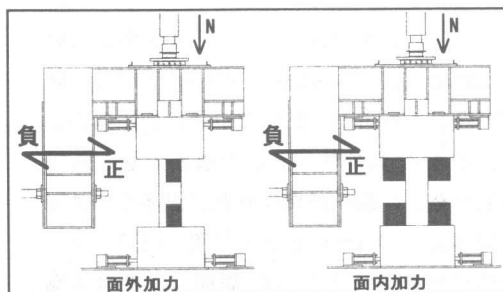
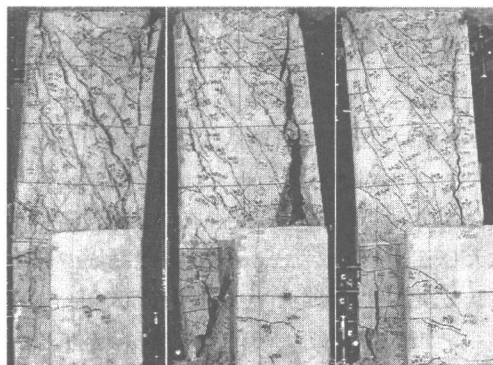
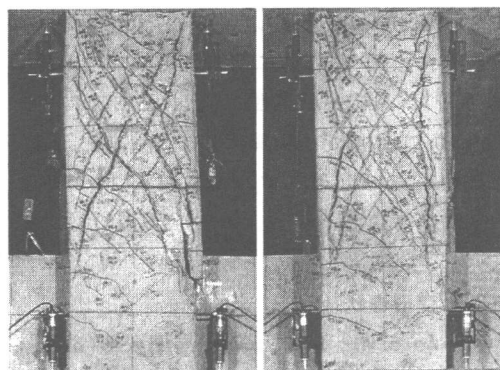


図-3 载荷方向



No1	No4	No6
Q=190(kN) R=1/20(rad.)	Q=111(kN) R=-1/30(rad.)	Q=232(kN) R=-1/20(rad.)
曲げ破壊	曲げ降伏後せん断破壊	曲げ破壊

写真-1 腰壁の面外加力試験体の破壊状況



No2	No5
Q=150(kN) R=-1/33(rad.)	Q=223(kN) R=-1/20(rad.)
曲げ降伏後せん断破壊	曲げ降伏後付着割裂破壊

写真-2 腰壁の面内加力試験体の破壊状況

著に広がらなかったが、付着ひび割れが腰壁上方に発生した。

写真-2 に腰壁の面内試験体の破壊状況を示す。面内加力の場合、腰壁が圧壊することにより、柱の内法スパンが長くなり、層せん断力は低下するが、曲げ型の安定した履歴性状を

示す⁵⁾ことが報告されている。本実験においては腰壁・垂れ壁の圧壊は見られず、耐力の低下が顕著であった。また、壁が後ろ側に偏心しているため、試験体の正面と裏面でせん断ひび割れ発生の様子が異なった。正面では腰壁上端部より $D/4 \sim D/2$ 下の位置に向けてせん断ひび割れが発生したが、裏面では腰壁上端部に向けてせん断ひび割れが発生した。

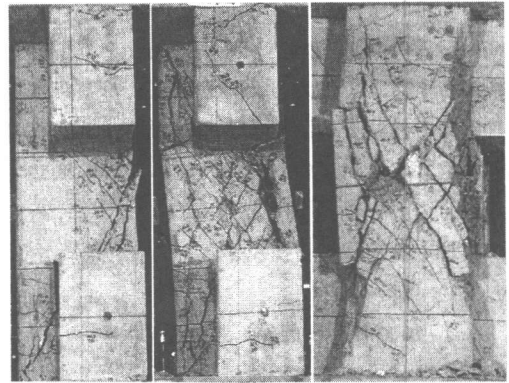
No2 はせん断ひび割れが口開き、大きく耐力低下した。それに対し、No5 は No2 と同様の位置にせん断ひび割れが発生したが、せん断ひび割れが大きく口開くことは無かった。しかし、変形が進むにつれて付着ひび割れが発生し、加力サイクル毎に付着ひび割れ幅が拡大し、耐力低下した。pwを増やすことでせん断破壊は生じなかったが、腰壁が取り付け、スパンが短くなることで付着割裂破壊が生じた。

写真-3 に腰壁・垂れ壁の試験体の破壊状況を示す。面外加力において、No7 は柱脚と垂れ壁の下端部を結ぶ様に斜張力ひび割れが発生し、脆性的な破壊をした。また、No8 は No6 と同様に腰壁・垂れ壁に挟まれた独立柱部分に付着ひび割れが発生した。面内加力の No9,10 は、主筋が圧縮降伏した。独立柱部分に破壊が集中し、サイクル毎に被りコンクリートが剥落した。

3.2 変形状

図-4~6 にせん断力(Q)ー層間変形(δ)関係を示す。なお、せん断力(Q)は全て軸力による付加モーメントを考慮した値である。

図-4 で No4,6 は正載荷では、 $R=1/150rad$. で柱頭が曲げ降伏し、その後最大耐力に至り、 $R=1/20rad$. まで急激な耐力低下はみられなかった。腰壁付き柱部分の pw の差による影響が表れないのは、腰壁により、腰壁付き柱部分の変形が拘束され、独立柱部分で変形を負担しているからである。一方、負載荷では No6 が $R=-1/20rad$. まで安定した履歴性状



No7(面外加力)	No8(面外加力)	No9(面内加力)
Q=-298(kN) R=-1/140(rad.)	Q=-187(kN) R=-1/20(rad.)	Q=-180(kN) R=-1/50(rad.)
せん断破壊	曲げ破壊	曲げ圧縮破壊

写真-3 腰壁・垂れ壁の試験体の破壊状況

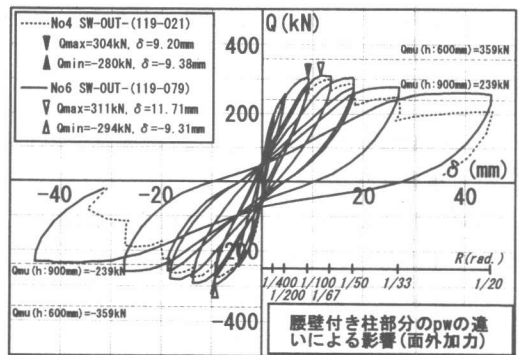


図-4 Q- δ 関係(No4, 6)

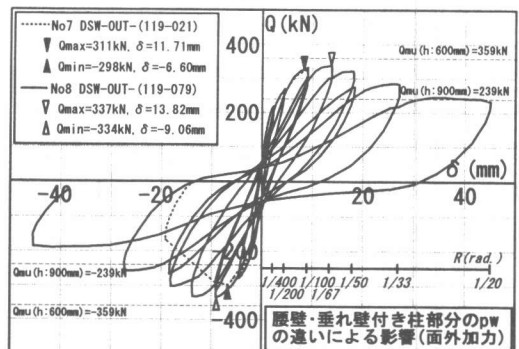


図-5 Q- δ 関係(No7, 8)

を示したが、No4 は加力サイクル毎に耐力が低下し、 $R=-1/30rad$. で腰壁付き柱部分においてせん断破壊した。これは、負載荷では腰壁の影響が正載荷に比べて小さく、pwが少ない腰壁付き柱部分が相対的に弱くなったためだと考えられる。

腰壁付き柱の No4 は $R=-1/30rad$. でせん

断破壊したのに対して、図-5より腰壁・垂れ壁付き柱の No7 は、 $R=1/140\text{rad}$ という小さい相対変形角でせん断破壊した。これは腰壁の試験体に、さらに垂れ壁が付加することで、柱に対する壁の拘束力が増したと考えられる。一方、No8 は $R=1/120\text{rad}$ において曲げ降伏し、最大耐力も面外試験体の中で最大であった。

また図-6より、面内加力試験体は曲げ降伏時の相対変形角が $R=1/300\text{rad}$ 付近であり、 $R=1/100\text{rad}$ 付近であった面外加力試験体に比べて降伏時剛性が大きい。また面外加力よりも最大耐力は上昇したが、その後の耐力低下は急激であった。

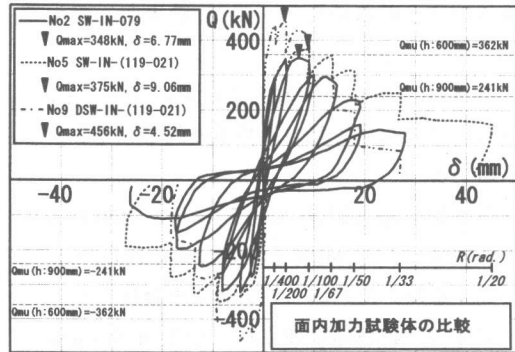


図-6 Q- δ 関係 (No.2, 5, 9)

3.3 せん断補強筋の歪み分布

図-7, 8に腰壁の試験体の $R=1/100\text{rad}$ におけるせん断補強筋の歪み分布を示す。

図-7の面外加力試験体は、正載荷では独立柱部分のせん断補強筋の歪みが増加する様相を示すのに対して、負載荷では腰壁上端部から $D/2$ 下の区間に位置するせん断補強筋の歪みが $R=1/100\text{rad}$ まで顕著に増加した。その後 No1, 3, 6 は腰壁付き柱部分の歪みが増加することなく、独立柱部分の歪みが増加した。それに対して No4 は、腰壁付き柱部分の歪みが顕著に大きくなりせん断破壊した。これは、腰壁により拘束されていない外側の主筋の変形を、せん断補強筋が抑えることができなかったためだと考えられる。

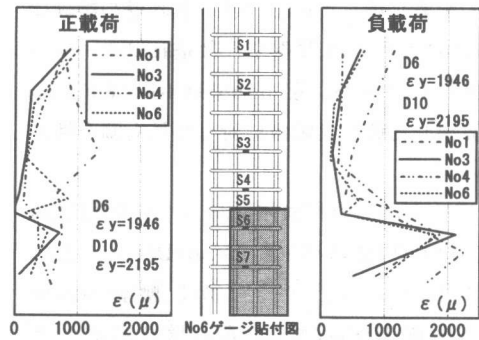


図-7 せん断補強筋歪み分布 (面外加力試験体)

また図-8の面内加力の試験体は、独立柱部分のせん断補強筋の歪みが増加し、壁付き柱部分の歪みは値が小さかった。面内加力においては、壁の影響を大きく受け、独立柱部分で変形するため、壁付き柱部分の p_w は最小限でも柱の性能には影響せず、独立柱部分により柱の性能が決定しているためだと考えられる。

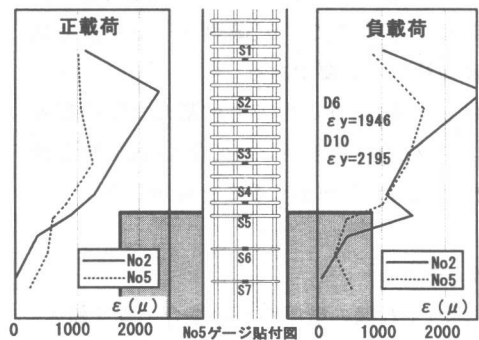


図-8 せん断補強筋歪み分布 (面内加力試験体)

生荷重の実験値と最大耐力計算値の比較を示す。ここでは独立柱部分が $p_w=1.19\%$ であり、曲げ降伏した試験体 (No.5, 6, 8, 9) を比較する。また、独立柱部分の断面形状が本実験の因子と等しい文献 6) の独立柱 ($p_w=1.19\%$) の結果も参考のために含めて検討する。

最大耐力が大きいほど壁の影響を受け、せん断スパンが小さくなっていると考えられる。実験結果の傾向としては、面外加力よりも面内加力、腰壁の試験体よりも腰壁・垂れ壁の試

3.4 せん断スパン

図-9に最大耐力およびせん断ひび割れ発

験体のほうが壁の影響が現れ、最大耐力が大きくなっている。

また、せん断ひび割れ発生荷重に関しても、最大耐力と同様に壁の影響が表れていることがわかる。

曲げ耐力計算値は、図-2 に示した想定図の内法スパンと、剛域を考慮し独立柱長さ h_0 に $D/4$ を加えた内法スパンにより算出した。

面外加力試験体は独立柱として $h=900\text{mm}$ で算出した値よりも最大耐力が増加しており、壁の影響が現れている。腰壁・垂れ壁の試験体 (No8) については、腰壁または垂れ壁の一方を考慮し、内法スパンを $h=h_0+D/4$ ($h_0=600\text{mm}$) で算出した値が実験値に対して最も適合性が良い。

一方、面内加力試験体においても、腰壁試験体 (No5) は内法スパンを $h=h_0+D/4$ としたときに良い適合性を示す。しかし、腰壁・垂れ壁の試験体 (No9) は腰壁・垂れ壁を考慮した $h=h_0+2 \times D/4$ で算出すると、最大耐力を過大に評価する結果になり、破壊モードも含めた今後の検討が必要である。

以上より、面外加力でも付帯した壁の影響により、柱の内法スパンが変化し、独立柱と比べて最大耐力が増加することを示した。

4. まとめ

腰壁・垂れ壁の壁厚が厚い場合の本実験の結果より、以下に示す知見が得られた。

1. 腰壁・垂れ壁付き柱が面外方向に荷重を受けた場合、付加した壁は柱の破壊性状、変形性状、最大耐力に影響を与えることを示した。
2. 腰壁が偏心して付いた柱が面外方向に荷重を受けた場合、荷重を受ける方向によって異なった性状を示す。
3. 壁付き柱部分に十分なせん断補強がなされない場合には、せん断破壊を誘発することを示した。
4. 面内方向に荷重を受ける場合、独立柱部分の p_w を増やすことで損傷は大きい、せん断

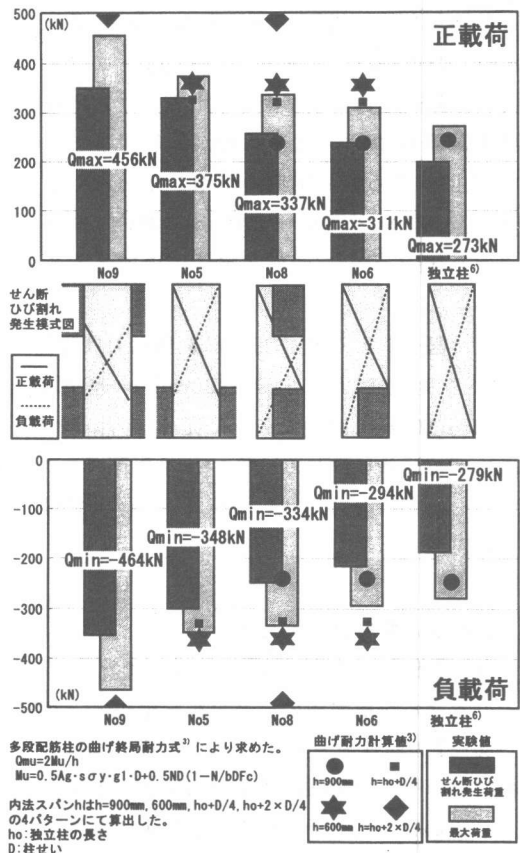


図-9 最大耐力と計算値の比較

破壊の防止が見込めることを示した。

謝辞

本研究に対し、建設省建築研究所の福山洋氏、諏訪田晴彦氏、磯雅人氏には多大な御協力を頂きました。ここに記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート終局強度設計に関する資料, 1987
- 2) 小林ほか: 炭素繊維シートにより補強した腰壁付き柱の構造性能に関する実験研究, コンクリート工学年次講演会論文集, Vol.21, No.3, 1999 pp.14 17~1422
- 3) 日本建築センター: 建築物の構造規定, 1997
- 4) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説, 1990
- 5) 楠原ほか: 既存鉄筋コンクリート造腰壁付き短柱の炭素繊維シートによる耐震補強, Vol.20, No.3, 1998 pp.1171~11
- 6) 片岡ほか: シート状連続繊維によりせん断補強された RC 柱の靱性能に関する実験的研究, コンクリート工学年次講演会論文集, Vol.19, No.2, 1997 pp.213~218