

論文 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

小林 正浩*¹・松崎 育弘*²・中野 克彦*³・福山 洋*⁴

要旨: 連続繊維シートを矩形柱に閉鎖的に巻き付けることで、有効な補強効果を示すことが多くの研究により明らかになっている。しかし、柱には雑壁等が付帯することが多く、閉鎖的に巻き付けることが困難である。また、腰壁付き柱は短柱化し、脆性的な破壊を生じるため、面内方向では多くの研究が行われているが、面外方向では壁を考慮せず独立柱として設計されており、研究もほとんどなされていないのが現状である。本論文は、腰壁付き RC 柱部材に面外加力によるせん断実験を行い、その破壊性状を示すとともにこのような柱での炭素繊維シートによる補強についての問題点と有効な補強方法を明らかにした。

キーワード: 耐震補強, 炭素繊維シート, 腰壁付き柱, 面外加力, 靱性能

1. はじめに

腰壁が付帯した柱において、面内方向では短柱化することを考慮した構造検討が求められているが、面外方向においては、付帯した腰壁の影響は少ないとして、独立柱とみなして設計が行われているのが一般的である。しかし、面外加力においても壁位置、壁厚さにより独立柱とは異なり、付帯する壁の影響を受けた破壊を誘発することが懸念される。

一方、兵庫県南部地震後、連続繊維シートによる耐震補強技術の研究が活発化し、独立柱については閉鎖的に巻き付けることにより部材のせん断耐力、靱性能が向上することが多くの研究により明らかになった。¹⁾ さらに壁の付帯した柱においても補強効果を期待する研究が進められており、炭素繊維シートを柱と壁との間にスリットを設けて閉鎖型で補強する方法、または非閉鎖型にて補強する方法等が示されている。しかし、まだ適切な方法が確立されるには至っていない。本研究では、面外方向による加力を行い、腰壁が付帯する柱の面外加力による構造

性能の把握と炭素繊維シートによる補強を施して従来の独立柱の場合と同等に評価可能であるかを明らかにする。特に腰壁が付帯する柱部分の補強の有無による破壊モードの把握と、その部分の補強方法として腰壁に孔をあけ炭素繊維ストランドを束ねて作ったアンカー(以下 CF アンカー)を通して定着し閉鎖的に巻き付ける方法を提案し、この補強効果を検討する。

2. 実験概要

2.1 試験体

図-1 に試験体要因図、図-2 に試験体配筋図、表-1 に使用材料特性を示す。共通要因は、断面 $b \times D=30\text{cm} \times 30\text{cm}$ 、せん断スパン比 $a/D=1.5$ 、実験時コンクリート強度 $23.0 \sim 24.5\text{N/mm}^2$ 、主筋 12-D16(SD295A, $p_g=1.7\%$)、せん断補強筋 2-D6@160(SD295A, $P_w=0.13\%$)、とし、文献{1}における独立柱の試験体と同一とした。腰壁部は壁厚 $t=7.5\text{cm}$ の場合、壁筋 2-D4@80(SD295A, $P_s=0.42\%$)とし、ウォールガーダーと想定した壁厚 $t=20\text{cm}$ の場合は、主筋

* 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)
* 4	建設省建築研究所	国際地震工学部第一耐震工学室主任研究員、工博	(正会員)

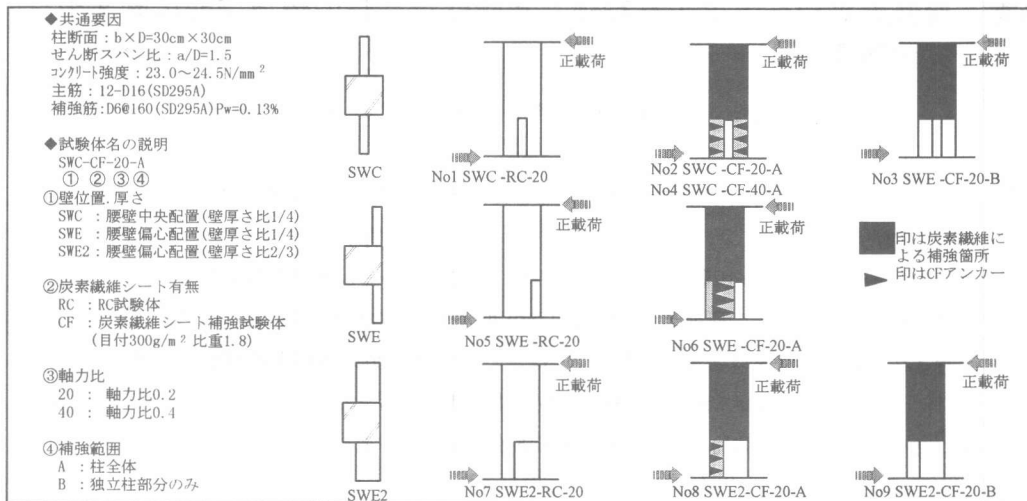


図-1 試験体要因図

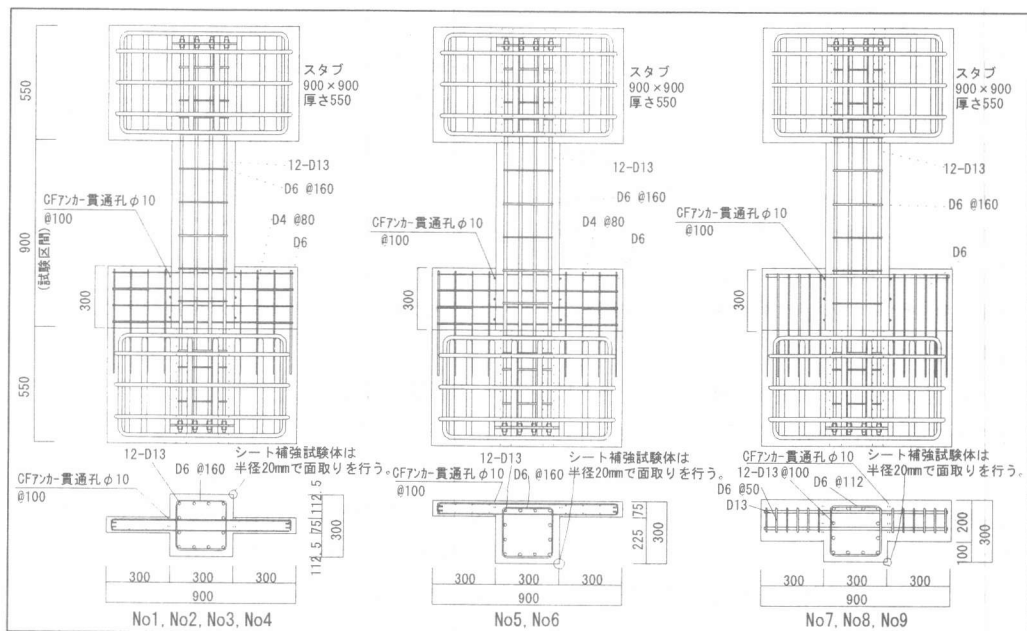


図-2 試験体配筋図

を2-D13(SD295A)補強筋を2-D6@50(SD295A, Pw=0.64%)とした。炭素繊維シート目付量は150, 300 g/m²の2種を用いており、試験体断面の四隅は、シートの引張強度の低下を防ぐために半径 R=20mm の面取りを行った。変動要因は腰壁位置(中央腰壁付き柱, 偏心腰壁付き柱), 壁厚さ比(1/4, 2/3), 炭素繊維シートの貼り付け部分(独立柱部分のみ, 柱全体), 軸力比(0.2, 0.4)とし、試験体総数9体とした。また腰壁の有無の影

表-1 使用材料特性

コンクリート	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)	弾性係数 ×10 ³ N/mm ²	CFアンカー			引張荷重 (KN)avg
				ロット部	本数	種類	
材齢28~63日	23.5	2.1	0.21		38	12K	55.8

12K炭素繊維の素線を12000本束ねたもの

使用シート	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)	破断伸び (%)	鉄筋種類			
				降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)	
高強度炭素繊維 目付300(g/m ²)	3480	2.30×10 ⁵	1.5	D13(SD295A)	370	527	1.88×10 ⁵
	4005	2.47×10 ⁵			D6(SD295A)	350	514
高強度炭素繊維 目付150(g/m ²)	3480	2.30×10 ⁵	1.5	D4	231	301	2.12×10 ⁵
	4500	2.73×10 ⁵					

↑上段:カテゴリー値 下段:試験結果

響を知るため、文献{1}における独立柱試験体 (RC:No. I, シート 1 層:No. II) 2 体の実験結果を含めて検討することとした。

写真-1に腰壁が付帯した時のシートの定着方法を示す。まず柱部に目付 150g/m^2 のシートを縦張りし、その上に目付 300g/m^2 のシートによりせん断補強する。次に柱際の腰壁に穿孔した孔($10\phi @ 100$)にエポキシ樹脂を含浸させながら CF アンカーを貫通させ、その両端部を扇状に広げて定着する。CF アンカー1 本には柱部のシート(目付け 300g) 100mm 幅に相当する炭素繊維が含まれている。

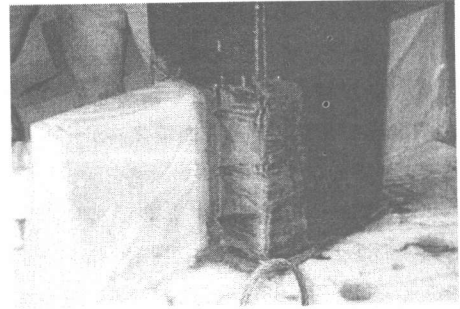


写真-1 CF アンカー定着方法

2. 2 実験方法

図-3に加力模式図、**図-4**に載荷履歴を示す。加力は建研式加力により行い、一定軸力での正負交番繰り返し載荷とした。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量を測定した。

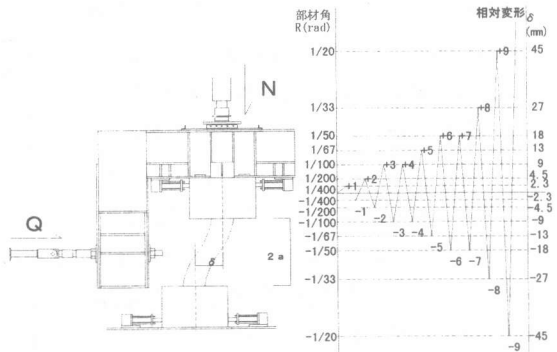


図-3 加力装置図

図-4 載荷履歴図

3 実験結果及び検討

3. 1 RC 試験体の破壊変形状

図-5~7に Q (せん断力) — δ (相対変位) 曲線を、**写真-2**に RC 試験体の最終破壊状況を示す。No1 は $R=+1/150\text{rad}$ 付近において、柱頭部より腰壁上面に向かってせん断ひび割れが伸展し、腰壁上面近傍の柱補強筋の降伏歪みと同時に柱頭部の主筋が降伏歪みに達したが部材降伏には至らず、その後の繰り返し載荷により、せん断破壊し、耐力低下した。No5 は $R=1/150\text{rad}$ 付近において柱頭部主筋が降伏歪みに達し、剛性低下をしたのち、 $R=+1/100\text{rad}$ において腰壁の付帯した柱脚部主筋も降伏歪みに達し最大耐力に至った。 $R=-1/100\text{rad}$ には、柱頭部から、せん断ひび割れが腰壁上端部に向かって伸展し、短柱化の様相を示した。 $R=+1/67\text{rad}$ 直前に、加力点間を結ぶせん断ひび割れが広がりせん断破壊した。No7 は $R=+1/200\text{rad}$ で短柱化の様相を示すように腰壁より上方の柱部分にせん断ひび割れがはいるが、腰壁と柱の際に沿う様にひ

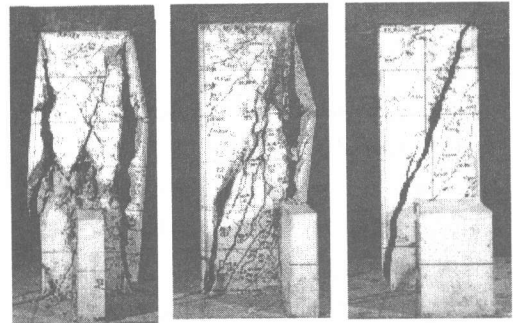


写真-2 RC 試験体最終破壊状況

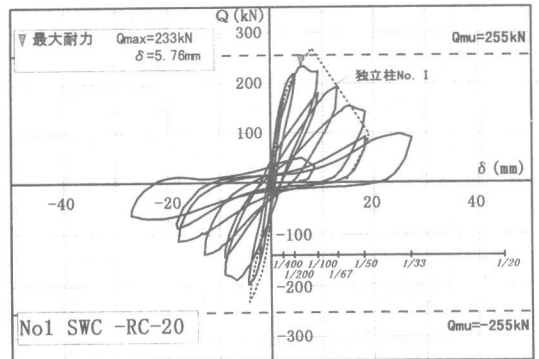


図-5 No.1 Q- δ 曲線

び割れが柱脚部へと伸展した。R=-1/200rad においても腰壁上端の短柱部分に対角線を結ぶ様なせん断ひび割れが発生し始め、その後、R=+1/150rad においてせん断補強筋がすべて降伏して脆性的なせん断斜張力破壊を起こした。

次に RC 試験体を腰壁位置の違いと腰壁の有無による変形状を比較する。初期剛性においては、独立柱 No. I は 83KN/mm、腰壁の付帯した No.1,5,7 はそれぞれ 120,116,155KN/mm、であり、腰壁が大きく影響を与えていることが確認できる。また壁厚さ 7.5cm の No.1,5 における腰壁位置の違いでは、ともに似た履歴を示したが、壁厚さ 20cm の No.7 は上記の試験体に比べ、最大耐力が低下した。そして壁が柱に対し、偏心である場合、せん断ひび割れが壁を避ける様に入り、特に腰壁が厚い No7 の場合には、せん断ひび割れの入る場所が限定され、負荷荷時には短柱化の様相を示していた。

3. 2 シート補強試験体の破壊変形状

図-8~12に Q(せん断力)- δ (相対変位)曲線、写真-3にシート補強試験体の最終破壊状況を示す。

腰壁を中央に配置し柱全体を補強した No.2 は R=+1/150rad にて柱頭部の主筋降伏により部材降伏した。R=+1/20rad に向かう際、曲げ変形により腰壁の付帯した側の柱脚部及び、腰壁上端部の柱側面のひび割れが大きく口開き、CF アンカーにも曲げによるき裂があつたものの耐力低下することはなかった。No1 と比較し大幅に靱性能が改善され、独立柱 No. II と同等以上の靱性能を示すことが確認された。一方、独立柱部分にのみシート補強を施した No.3 は R=+1/150rad において柱頭部の主筋により部材降伏し、その後は No.1 よりも最大耐力の上昇が観られたが、繰り返し载荷によりせん断ひび割れが無補強部分において対角線にはいり、R=+1/67rad において無補強部分が急激にせん断破壊し、腰壁部上端のシートがせん断による変形を抑え切れずに破断した。

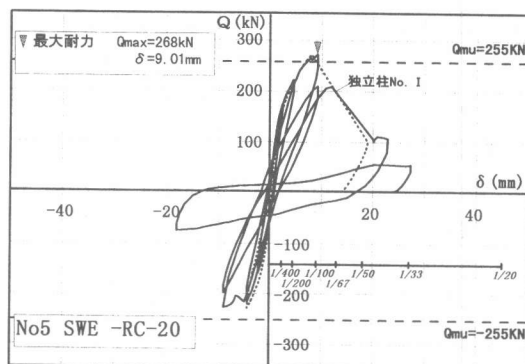


図-6 No5 Q- δ 曲線

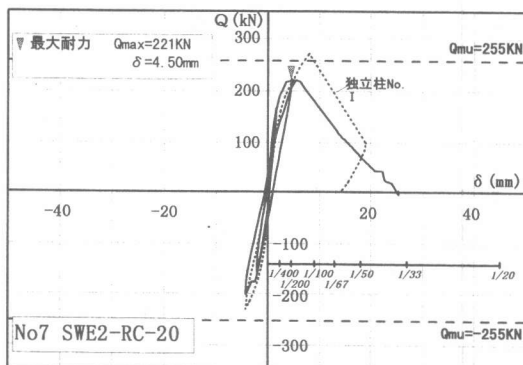


図-7 No7 Q- δ 曲線

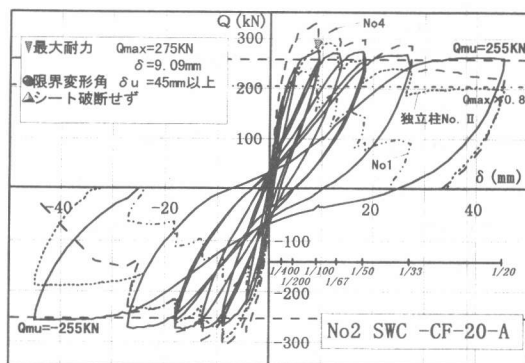


図-8 No2 Q- δ 曲線

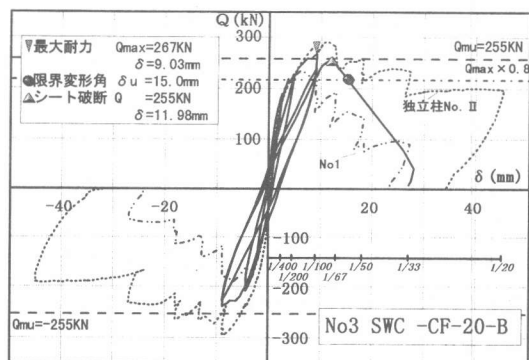


図-9 No3 Q- δ 曲線

次に壁をウォールガーダーと想定した No.8 は No.2 に比べ 20kN ほど高い耐力を示して、部材降伏し、その際、壁筋も降伏歪みに達しており、 $R=+1/33\text{rad}$ まで良好な靱性能が得られた。

No.9 は No.7 と比較し、耐力の向上が観られた。せん断ひび割れは腰壁と柱の付け根に沿って伸展し、 $R=+1/60\text{rad}$ 付近において、柱と腰壁際のコンクリートごと、せん断破壊し腰壁上端部近傍のシートが破断した。

腰壁が偏心に配置された No.6 においては No.2 と類似した性状を示し、また軸力比が 0.4 の No.4(図-8 包絡線)は No.2 と比較して初期剛性が高く、55kN ほど高い曲げ耐力を示し、 $R=1/33\text{rad}$ にてシート破断し耐力低下したものの $R=1/33\text{rad}$ 以前の靱性能は良好であり、軸力比が 0.4 程度でもシートによる補強効果が確認された。さらに、曲げ降伏破壊した試験体においては、壁筋も降伏歪みに達していることから、腰壁厚さが曲げ降伏耐力に影響を与えており無視出来ない事も確認できた。

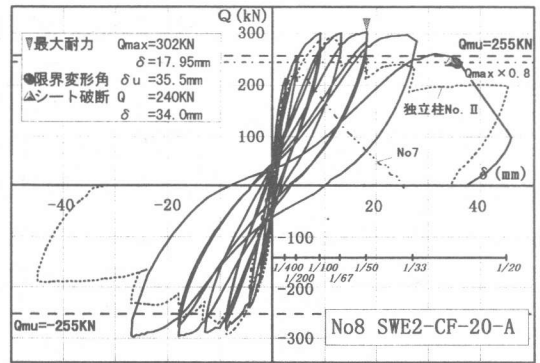


図-10 No.8 Q-δ 曲線

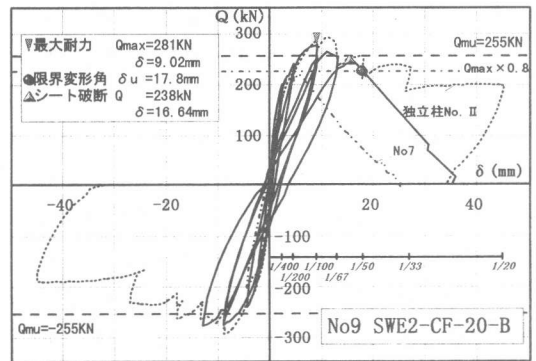


図-11 No.9 Q-δ 曲線

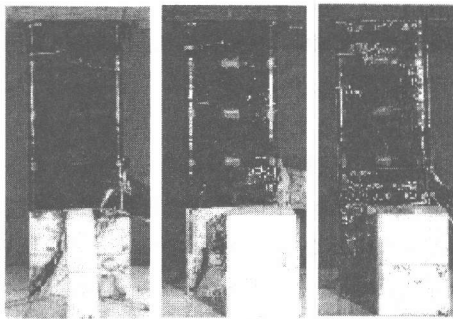


写真-3 シート補強試験体最終破壊状況

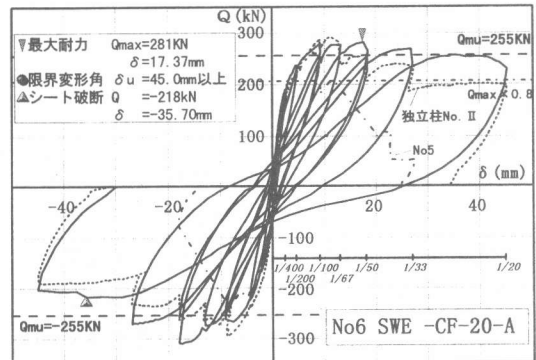


図-12 No.6 Q-δ 曲線

3.3 せん断補強効果

図-13 に破壊時のシートとせん断補強筋の歪み性状を示す。

RC 試験体では腰壁上端部近傍の S4 補強筋が降伏していることから、せん断耐力が多く入り短柱化の様相を示している。

また柱全体の補強の No.2, No.8 では、独立柱部分のせん断補強筋は降伏しており、シートの歪みは 4500μ 程度、腰壁部の CF アンカーの歪みは 6500μ 程度であり CF アンカーがせん

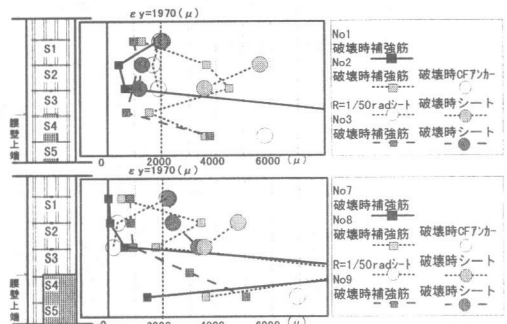


図-13 シートとせん断補強筋歪み分布

表-2 実験結果及び計算値一覧

No.	試験体名	破壊モード	実験値				計算値 (KN)			
			正載荷時		限界変形	負載荷時		せん断耐力*	曲げ略算式	
			Qmax (KN)	δ (mm)	δu (mm)	Qmax (KN)	δ (mm)		矩形断面	壁筋考慮
1	SWC-RC-20	せん断破壊	233	5.76	-	198	4.50	141	255	263
2	SWC-CF-20-A	曲げ降伏	275	9.09	45mm以上	276	16.56	357	255	263
3	SWC-CF-20-B	曲げ降伏後せん断破壊	267	9.03	15.0	227	9.05	357	255	263
4	SWC-CF-40-A	曲げ降伏	332	8.81	32.0	310	9.02	357	316	326
5	SWE-RC-20	せん断破壊	268	9.01	-	230	9.02	141	255	268
6	SWE-CF-20-A	曲げ降伏	281	17.37	45mm以上	275	12.52	357	255	268
7	SWE2-RC-20	せん断破壊	221	4.50	-	203	4.51	141	255	291
8	SWE2-CF-20-A	曲げ降伏	302	17.95	35.5	299	26.52	357	255	291
9	SWE2-CF-20-B	曲げ降伏後せん断破壊	277	9.02	17.8	278	13.03	357	255	291
I	RC-20	せん断破壊	269	7.83	-	232	4.49	149	267	-
II	CF-20-A	曲げ降伏	292	10.99	27.0	283	9.01	384	270	-

*A法非靱性式において終局時シート歪みを $\epsilon_f = 10000(\mu)$ としてシート補強分を換算した。(文献2)

計算値において内法高さは試験区間900mmとした。

断力に抵抗し、シートとの定着力が発揮され、そのため有効にシート補強がなされ、靱性能が向上している。

一方、独立柱のみ補強した試験体ではシートの歪みは 3000 μ 以下であり、シートがせん断抵抗を発揮する以前に、補強されていない腰壁の付帯した柱部分でのせん断破壊が先行した。以上より面外加力においても腰壁付帯部分にせん断力が集中しやすいため有効な補強が必要である事を確認した。

3. 4 曲げ耐力

図-14に試験体腰壁部断面図を、表-2に実験値-計算値を示す。

腰壁が偏心に付帯した面外方向の加力において、正載荷時と負載荷時とでは破壊状況が異なる。また曲げ破壊した試験体において柱脚部主筋が正載荷時に降伏した際に、腰壁部鉄筋も降伏歪みに達しており、曲げ耐力に影響を与えていると思われる。そこで図-14の様に壁筋を考慮して曲げ耐力を算出したところ、実験値と計算値が良い適合性が観られた。

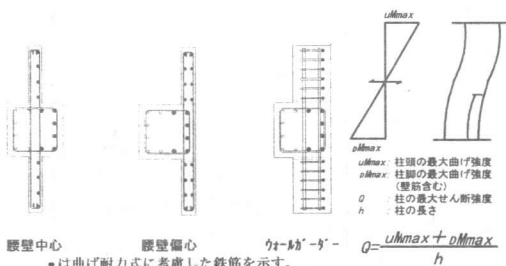


図-14 試験体断面図

まとめ

- 1) 腰壁が付帯した柱における面外方向による加力で、壁厚、壁位置により破壊性状が異なり、壁厚さが厚い時は短柱化することが確認された。
- 2) 腰壁の付帯した柱のせん断補強は、独立柱部分だけをシート補強しても、腰壁の付帯した柱部分が無補強でせん断破壊を起こすため、柱全体を補強することが重要であることを示した。
- 3) 直交壁を有する柱部材においては、定着法としてCFアンカーを介してシートを閉鎖的に巻きつければ、閉鎖型に巻き付け補強した場合と同様なせん断補強効果が得られ、靱性能も良好であった。

本研究は炭素繊維シートによる建築物の補修補強工法研究委員会(委員長:京都大学名誉教授森田司郎)の下で行われたものである。

参考文献

- (1) 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
- (2) 荒木ほか：シート状連続繊維によりせん断補強された鉄筋コンクリート部材のせん断耐力及び靱性能評価に関する実験研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，1998年9月 pp.261~262
- (3) 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