

論文

[2138] 頭つなぎ筋にFRPを用いた壁式プレキャスト鉄筋コンクリート耐力壁の構面実験

正会員 ○西岡聖雅 (武蔵工業大学大学院)
 正会員 望月 重 (武蔵工業大学建築学科)
 正会員 濱本卓司 (武蔵工業大学建築学科)
 正会員 藤崎忠志 (清水建設技術開発本部)

1. はじめに

壁式プレキャスト鉄筋コンクリート耐力壁において、水平つなぎ筋(頭つなぎ筋,床スラブ筋)が鉛直接合部,さらに壁パネル間同志のずれおよび目開きを拘束することは,既発表の論文¹⁾より明らかにされた。本研究では,さらに頭つなぎ筋の剛性が鉛直接合部の挙動に及ぼす影響を解明するために,頭つなぎ筋に強度,ヤング率および引張剛性の異なるFRP(NFM)を用いた耐力壁の構面実験を行った。また頭つなぎ筋にFRPを用いたS形実験²⁾において頭つなぎ筋のヤング率を考慮した最大耐力の算定式が,構面実験の結果にも適用できることを検証した。

2. 実験内容

2.1 試験体

図1に構面実験の試験体配筋図を示す。試験体は,厚さ125mm,高さ928mm,幅400mmの2枚の壁パネルを,幅100mmの鉛直接合部と厚さ15mmの敷モルタルの水平接合部で,基礎ばりと場所打ち頭つなぎ部により合成した片持ちばり型試験体である。そして,鉛直接合部のコッターは70x75x7.5mmの形状のものが層高当り6個で,鉛直接合部水平方向接合筋(以下,水平接合筋とする)は通し配筋とした。水平接合部鉛直方向接合筋(以下,鉛直接合筋とする)はスプライススリーブによるモルタル充填継手とした。なお,NFMの頭つなぎ部への定着は,NFMの10cm間隔に4.5cmの突起を持たせ,十分な定着を持たせるようにした。試験体数は2体とし,FRPの引張強さ,ヤング率及び引張剛性を変化させて,その挙動を比較した。表1に構造諸元を,表2に使用材料の材料特性を示す。

2.2 加力および制御方法

図2に加力装置を示す。水平加力は等荷重の同時押し引きとし,正荷重時(左側より右側に押す)の場合,引張力は治具AおよびBを結ぶPC鋼棒の張力により,また圧縮力はロードセルを介し治具Bを直接押すことにより伝達した。制御は頂部加力スタブに取り付けた4つの変位計の値の平均を基礎ばり上面から加力点までの高さで除した部材角Rに関して行い, R=1, 2, 4, …, 20, 25

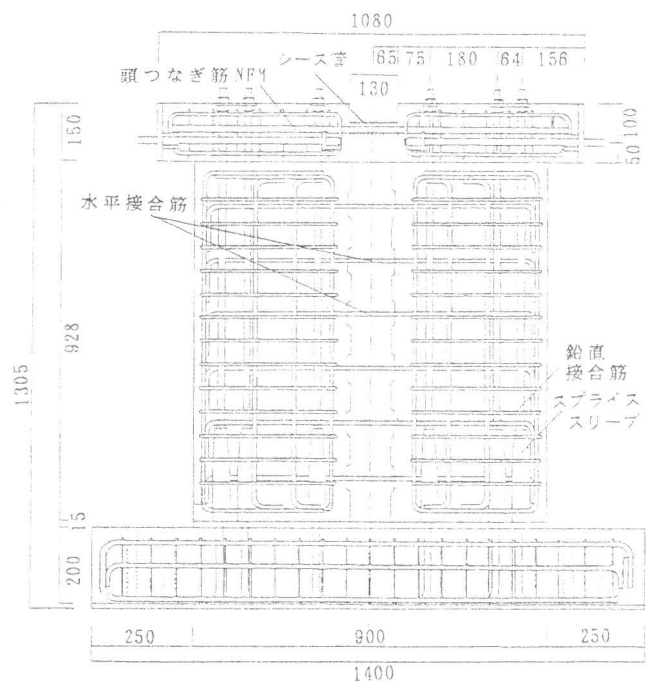


図1 試験体配筋図

表1 構造諸元

試験体名	コッター				水平接合筋		頭つなぎ筋	鉛直接合筋	
	断面積 (cm ²)	コッター せし (cm)	コッター 形状比	面積比	断面積 (cm ²)	接合筋比 (%)	断面積 (cm ²)	断面積 (cm ²)	接合筋比 (%)
WPC-N2	315.0 (7.0x7.5)x6	0.75	10	0.272	4.28 (6-D10)	0.369	1.970 (2-NFM2)	11.94 (6-D16)	1.06
WPC-N4	315.0 (7.0x7.5)x6	0.75	10	0.272	4.28 (6-D10)	0.369	3.628 (2-NFM4)		

($\times 10^{-3}$ rad) の正負交番載荷とした。軸方向力は、1 1階建て最下層を想定して $\sigma_0 = 22.0 \text{ kg/cm}^2$ とした。

2.3 測定方法

測定は、高感度型変位計による壁パネルの水平及び鉛直変位、鉛直接合部をはさんで2枚の壁パネル間および壁パネルと鉛直接合部間の鉛直方向相対変位（ずれ変位）と水平方向相対変位（目開き）、またひずみゲージによる水平接合筋、頭つなぎ筋および鉛直接合筋のひずみについて行った。

3 実験結果

3.1 破壊経過

図3に構面実験の荷重-部材角曲線、表3に各種実験値そして図4に頭つなぎ部の破壊状況図を示す。両試験体とも、まずはじめに水平接合部の接合面に沿ったひび割れが発生し、 $R=1.0 \times 10^{-3}$ radに至るまでに接合部全体に貫通した。その後、 $R=2.0 \times 10^{-3}$ radで壁パネルの左右縁端のスプライススリーブ上部に曲げひび割れが、 $R=4.0 \sim 6.0 \times 10^{-3}$ radで壁パネル中央部付近にせん断ひび割れが発生し、ほぼ同時に、鉛直接合部の壁パネルの間の接合面に沿ったひび割れが発生し、また接合コンクリートにせん断ひび割れが発生した。その後、WPC-N2では鉛直接合部の接合コンクリートと壁パネルとのずれ及び目開きが進展し、コッターの接合面の損傷が確認された。頭つなぎ部のせん断ひび割れは、WPC-N2は $R=6.4 \times 10^{-3}$ rad時に発生

表2 使用材料の性質

コンクリートおよびモルタルの材料特性				
試験体名	打設箇所	圧縮強度 kg/cm ²	引張強度 (割裂) kg/cm ²	ヤング率 ($\times 10^5$) kg/cm ²
WPC-N2	基礎ばり	380	22.8	2.53
	壁パネル	395	19.2	2.43
	敷モルタル	400	—	2.51
	鉛直J	311	21.5	2.66
	グラウト材	723	—	2.91
WPC-N4	基礎ばり	373	26.7	2.55
	壁パネル	402	28.8	2.46
	敷モルタル	382	—	2.49
	鉛直J	329	21.3	2.51
	グラウト材	723	—	2.91
鉄筋の材料特性				
使用材料	降伏点 kg/cm ²	引張強さ kg/cm ²	ヤング率 ($\times 10^6$) kg/cm ²	
D6	3757	5408	1.80	
D10	3747	5033	1.83	
D13	3581	5146	1.85	
D16	3769	5578	1.68	
NFMの材料特性				
使用材料	断面積 cm ²	引張強さ kg/cm ²	ヤング率 ($\times 10^6$) kg/cm ²	
NFM2	0.985	10540	0.92	
NFM4	1.814	7560	1.26	

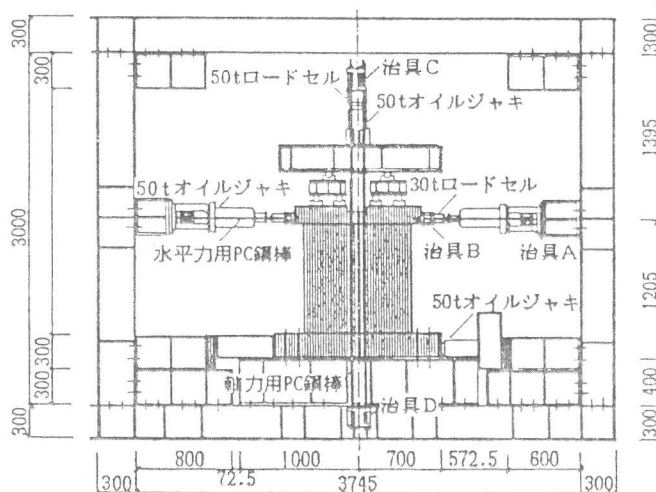


図2 加力装置

したが、WPC-N4は曲げひび割れのみであった。

WPC-N2, WPC-N4の両試験体はそれぞれ、 $R=8.1 \times 10^{-3} \text{ rad}$, $16.2 \times 10^{-3} \text{ rad}$ で最大耐力26.5tf, 28.6tfとなった。最大耐力以後、耐力低下し、WPC-N2は $R=20.0 \times 10^{-3} \text{ rad}$ までに正側、負側加力ともに20.0tf（最大耐力の約75%）となり、じん性に欠く挙動を示した。一方WPC-N4は、負側加力時の圧縮側敷モルタルの縦ひび割れにより耐力低下を示したが、正側加力時では $R=20.0 \times 10^{-3} \text{ rad}$ の終局時まで耐力低下はなく、ほぼじん性に富む挙動であるといえる。

3.2 ひずみと変位

図5に正側加力時のスプライススリーブ直上における鉛直接合筋のひずみ分布を示す。鉛直接合筋のひずみ分布は、 $R=2.0 \times 10^{-3} \text{ rad}$ までは両試験体とも中立軸が試験体中間の鉛直接合部内にあるひずみ分布を示した。鉛直接合部の接合面に沿ったひび割れや、鉛直接合部のせん断ひび割れが発生後の $R=10 \times 10^{-3} \text{ rad}$ に至るまでに、WPC-N2では SVP3の値がSVP4の値を下回り、左右の壁パネルの一体性が損なわれているのに対して、WPC-N4はSVP1~SVP4はほぼ同様なひずみ分布で、中立軸が鉛直接合部内からはずれて壁パネル内に生じ、左右の壁パネルが一体としての曲げひずみ分布を示していることが分かる。この傾向は部材角が進むにつれて顕著となり、WPC-N2では左右の壁パネルが別々の挙動を示し、WPC-N4では終局時までSVP1~SVP4が安定した引張ひずみを維持し、左右の壁パネルの一体性が確認された。

図6に正側加力時の鉛直接合部内の水平接合筋のひずみ分布を示す。水平接合筋のひずみ分布は、鉛直接合部と壁パネルとの接合面および接合コンクリートにせん断ひび割れが発生した $R=4.0 \times 10^{-3} \text{ rad}$ でひずみ値が急増し、その後も増加している。特に鉛直接合部にせん断ひび割れの入ったコッター部の水平接合筋のひずみの増分が著しくなっている。 $R=16.0 \times 10^{-3} \text{ rad}$ 時で降伏ひずみを 超えているのは、WPC-N2で4箇所、WPC-N4で2箇所

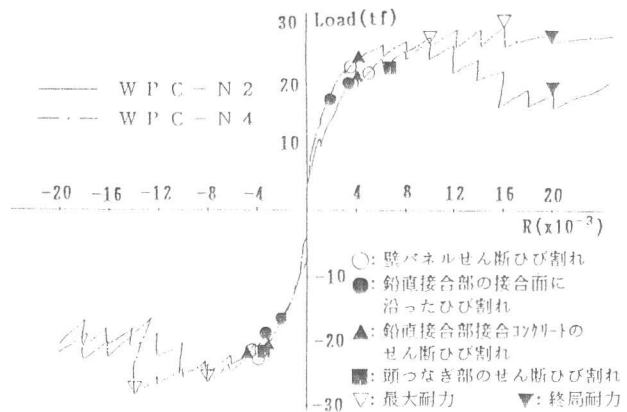


図3 荷重-部材角曲線

表3 各種実験値

試験体名		ひびわれ荷重							最大荷重 Q_{max} (τ_{max})	
		接合部			プレキャスト壁			頭つなぎ部		
		Q_{JH} (τ_{JH})	Q_{JU} (τ_{JU})	Q_{JS} (τ_{JS})	曲げ Q_{PB} (τ_{PB})	曲げせん断 Q_{PBS} (τ_{PBS})	せん断 Q_{PS} (τ_{PS})	Q_{SB}		Q_{SS}
WPC-N2	正側	5.3 (4.7)	21.3 (18.3)	21.3 (18.3)	10.6 (9.4)	22.5 (20.0)	22.0 (19.6)	21.0	21.9	26.5 (22.8)
	負側	5.6 (5.0)	16.1 (13.9)	20.5 (17.7)	12.3 (10.9)	24.5 (21.8)	22.8 (20.3)	21.5	20.5	26.3 (22.6)
WPC-N4	正側	7.6 (6.8)	16.5 (14.2)	25.2 (21.8)	13.1 (11.6)	21.9 (19.5)	22.0 (19.5)	-11.5	-	28.9 (24.9)
	負側	6.7 (5.9)	19.3 (16.6)	22.0 (19.0)	16.0 (14.3)	17.5 (15.6)	21.3 (18.9)	-	-	28.6 (24.7)

Q_{JH} : 水平接合部の水平接合面に沿ったひび割れ発生時荷重 Q_{PS} : PC板のせん断ひび割れ発生時荷重
 Q_{JU} : 鉛直接合部の鉛直接合面に沿ったひび割れ発生時荷重 Q_{PBS} : PC板の曲げせん断ひび割れ発生時荷重
 Q_{JS} : 鉛直接合部接合コンクリートせん断ひび割れ発生時荷重 Q_{SS} : 頭つなぎ部のせん断ひび割れ発生時荷重
 Q_{PB} : PC板の曲げひび割れ発生時荷重 Q_{SB} : 頭つなぎ部の曲げひび割れ発生時荷重
 Q_{max} : 最大荷重 上段は荷重 (tf), 下段は平均せん断応力度 (kgf/cm^2) を示す。

であった。これは、頭つなぎ筋にヤング率がNFM2より大きいNFM4を用いたWPC-N4の方がWPC-N2より鉛直接合部を拘束しているためである。

図7に最大耐力時と終局耐力時の壁パネル相互のずれ変位を示す。ヤング率の高いNFM4を頭つなぎ筋に用いたWPC-N4はWPC-N2よりもずれを拘束している。WPC-N2の頂部のずれ変位の進展が顕著となっているのは、頭つなぎ部のせん断破壊によりNFMに引張力が作用し、低いヤング率のため拘束が弱い結果である。目開きもずれと同様な傾向がみられた。

図8に頭つなぎ筋に貼付したひずみより算定した負担軸力と部材角の関係を示す。両試験体とも鉛直接合部の接合面に沿ったひび割れや、鉛直接合部接合コンクリートのせん断ひび割れの入った部材角 $R=4.0 \times 10^{-3}$ rad以降に負担軸力が急激に増加しているのが分かる。その傾向はWPC-N4で $R=8.0 \times 10^{-3}$ radまで続いたが、それ以降では鉛直接合筋のひずみ分布が、2枚の壁パネルの一体性を示したことから分かるように負担軸力は一定となり終局に至った。それに対してWPC-N2は、試験体が最大耐力となる $R=10.0 \times 10^{-3}$ rad以降、鉛直接合筋のひずみ分布より2枚の壁パネルが別々に挙動し始め



図4 頭つなぎ部破壊状況図

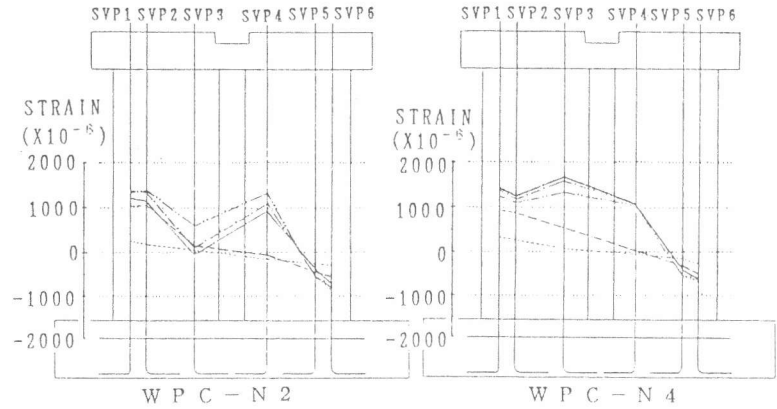


図5 鉛直接合筋のひずみ分布図

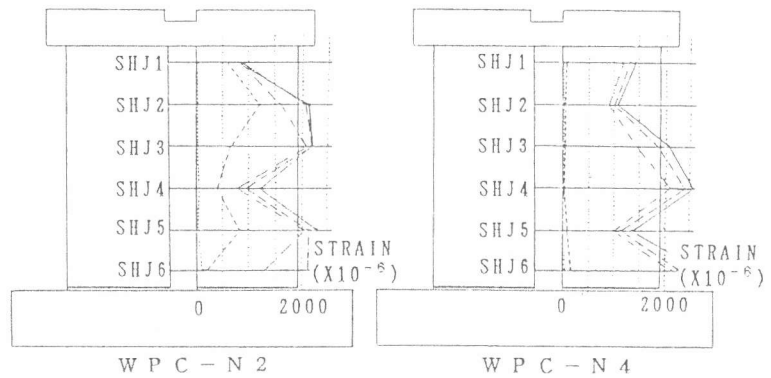


図6 水平接合筋のひずみ分布図

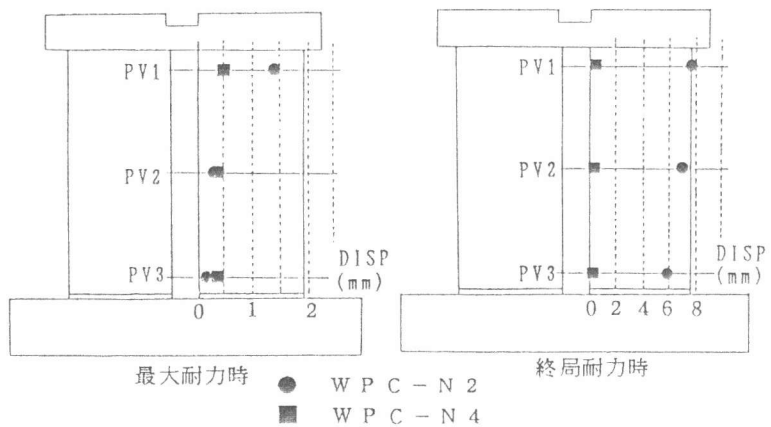
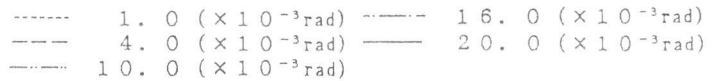


図7 ずれ変位の分布図

たことから分かるように、頭つなぎ筋による壁パネルの分離を防ぐため耐力低下後も頭つなぎ筋の負担軸力は増加していった。

4. 最大耐力と終局耐力

図9に耐力壁の抵抗メカニズムの模式図を示す。最大耐力が耐力壁の曲げ耐力で決まる場合は、最大耐力と終局耐力は等しくなる。また、最大耐力が鉛直接合部のせん断耐力で決まる場合は、その後2枚の壁パネルが別々の挙動を示すものとして、左右の壁パネルの曲げ降伏時せん断力の和により終局耐力が決まる。実験結果からWPC-N2の最大耐力は鉛直接合部のせん断破壊に起因し、終局耐力は2枚の壁パネルの曲げ降伏に起因した。WPC-N4では、最大耐力と終局耐力が共に耐力壁の曲げ降伏に起因した。

また、既発表の頭つなぎ筋にNFMを用いたS形実験²⁾の最大耐力時および終局耐力時の頭つなぎ筋の負担強度をNFMの引張強さで除した値を有効率 C_N とし、この C_N とヤング率 E との間には図10に示すように、おおむね比例関係が認められる。 C_N と E は比例関係があるので(4.2a)、(4.3b)式に頭つなぎ筋に鉄筋を用いた場合の低減係数 C_b にヤング率 E で表した比例係数(~~~~部)を乗じて耐力を算定した。なお、S形実験の終局耐力は壁パネル同志のずれ変位が4mmの時とする。

4.1 最大耐力

耐力壁曲げ耐力時せん断力 Q_{wb} と鉛直接合部のせん断耐力 Q_{vj} の算定式は以下に与えられる。耐力壁せん断耐力 Q_{ws} 、水平接合部のせん断耐力 Q_{Hj} の算定値は実験値を大きく上回り、これらの算定値が破壊モードを決定することはないので、算定式は省略した。

- ・曲げ耐力時せん断力 Q_{wb}

$$Q_{wb} = M_{wb}/H \quad \dots (4.1)$$

ただし

$$M_{wb} = 0.9a_t \sigma_y d + 0.5NL(1-N/b \cdot L \cdot \sigma_B) \quad \dots (4.1a)$$

ここに、 a_t :耐力壁の引張鉄筋断面積、 b :耐力壁の幅、 d :耐力壁の有効せい、 σ_B :耐力壁のコンクリート圧縮強度、 H :耐力壁の加力点から壁脚までの距離、 N :耐力壁の軸方向力、 σ_y :耐力壁の引張鉄筋の降伏応力度である。

- ・鉛直接合部せん断耐力 Q_{vj}

$$Q_{vj} = (Q'_{vj} + Q_{ss}) \cdot (L/H) \quad \dots (4.2)$$

ここで、 Q'_{vj} は接合部耐力、 Q_{ss} は頭つなぎ部のせん断耐力であり、それぞれ以下のように与えられる。

$$Q'_{vj} = 0.09 \cdot F_{vc} \cdot A_c + 1.48 \cdot a_c \cdot \sqrt{(\sigma_{cy} \cdot F_{vc})} + \mu C_c \cdot a_c \cdot \sigma_{cy} + \mu C_b \cdot \frac{E_N - 0.688 \times 10^6}{E_s - 0.688 \times 10^6} a_b \sigma_{by} \quad \dots (4.2a)$$

$$Q_{ss} = \left\{ \frac{0.0679 \cdot P_c \cdot 0.2^3 \cdot (Fc + 18Q)}{\sqrt{a/d + 0.12}} + 0.1 \sigma_o \right\} \cdot b \cdot j \quad \dots (4.2b)$$

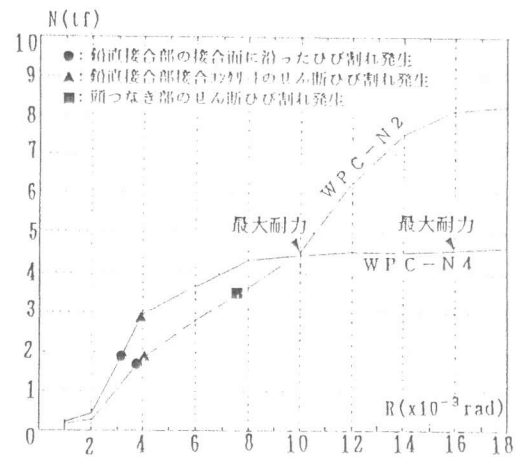


図8 頭つなぎ筋の負担軸力と部材角の関係

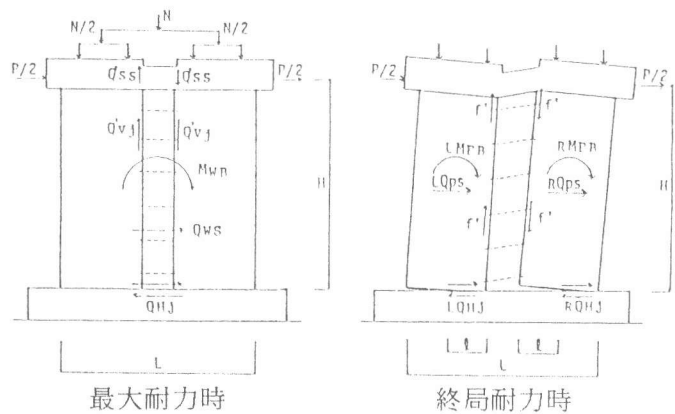


図9 抵抗メカニズムの模式図

ここに、 a :床スラブのジョーハン長さ、 A_c :ジョーの全断面積、 a_b (a_c):頭つなぎ筋(ジョー筋)の全断面積、 b :床スラブの幅、 $C_c=0.5$ ($C_c=0.64$):頭つなぎ筋(ジョー筋)の最大耐力時低減係数、 d :床スラブの有効せい、 E_s (E_N):鉄筋(頭つなぎ筋)のヤング率、 F_c :床スラブのコンクリート圧縮強度、 F_{vc} :鉛直接合部の接合力、 P_t :床スラブの引張鉄筋比、 σ_{by} (σ_{by}):頭つなぎ筋の引張強さ(ジョー筋の降伏応力度)、 σ_o :床スラブの軸方向応力度、 σ_y :耐力壁の引張鉄筋の降伏応力度、 $\mu=0.84$:摩擦係数である。

4.2 終局耐力

壁パネルの曲げ耐力時せん断力 Q_{PB} の算定式は以下に与えられる。壁パネルせん断耐力 Q_{Ds} 、水平接合部のせん断耐力 Q_{HJ} の算定値は実験値を大きく上回り、これらの算定値が破壊モードを決定することはないので、算定式を省略した。

・壁パネルの曲げ耐力時せん断力 Q_{PB}

$$Q_{PB} = L Q_{PB} + R Q_{PB} \quad \dots (4.3)$$

ここに、 $L Q_{PB}$ ($R Q_{PB}$):左(右)側壁パネルの曲げ耐力時せん断耐力である。

$$L Q_{PB} = (L M_{PB} + l f') / H \quad \dots (4.3a)$$

$$R Q_{PB} = (R M_{PB} + l f') / H \quad \dots (4.3b)$$

$$f' = \mu (C_c \cdot a_c \cdot \sigma_{cy} + C_b \frac{E_N + 0.051 \times 10^6}{E_s + 0.051 \times 10^6} \sigma_{by}) \quad \dots (4.3c)$$

ここに、 C_b (C_c) = 1.0:頭つなぎ筋(ジョー筋)の終局耐力時低減係数、 f' :ジョー筋及び頭つなぎ筋の摩擦力、 l :壁パネル中心と壁パネルと鉛直接合部までの距離である。

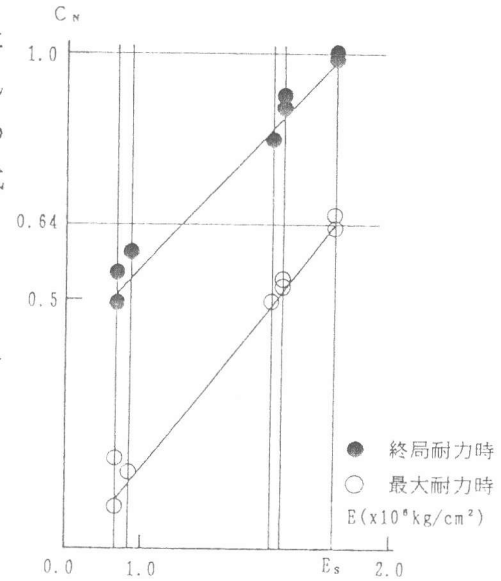


図10 頭つなぎ筋のヤング率と有効率の関係

表4に算定結果と実験結果との比較を示す。実験値と算定値との比較では、最大耐力および終局耐力ともに比較的良好に一致しているといえる。このことは、S形実験による鉛直接合部せん断耐力式の構面実験への適用が可能であることを示している。

表4 算定結果と実験結果の比較

(単位: t f)

試験体名	計算値					実験値				
	最大耐力				終局耐力		最大耐力		終局耐力	
	耐力壁曲げ 降伏耐力	鉛直接合部最大せん断耐力		合計	耐力壁曲げ 降伏耐力	壁パネル曲げ 降伏耐力	実/計		実/計	
WPC-N2	27.85	26.04	2.31	25.68	-	20.65	26.48	1.03	20.30	0.98
WPC-N4	27.85	30.08	3.23	30.17	27.85	-	28.86	1.04	28.86	1.04

* WPC-N2の破壊モードは、鉛直接合部のせん断破壊後の2枚の壁パネルの曲げ降伏である。
WPC-N4の破壊モードは、耐力壁一体曲げ降伏である。

5. 結び

本研究で得られた結論を以下に要約する。

- 1) 頭つなぎ筋にヤング率の高いNFMを用いた方が、試験体はじん性に富む挙動を示した。
- 2) 頭つなぎ筋にNFMを用いても、鉄筋を用いた場合と同様に鉛直接合部を拘束することが分かった。
- 3) 頭つなぎ筋のヤング率を考慮したS形実験によるせん断耐力から、頭つなぎ筋にNFMを用いた構面実験のプレキャスト耐力壁の最大耐力と終局耐力を算定できることが分かった。

【参考文献】

- 1) 望月重: 壁式プレキャスト構造の鉛直接合部のせん断挙動
日本建築学会構造系論文報告集, 1990, Vol. 413, pp11~22
- 2) 田山公一 望月重 西岡聖雅 藤崎忠志: 頭つなぎ筋にFRP筋を用いた壁式プレキャスト構造の鉛直接合部の実験
日本コンクリート工学協会論文報告集, 1990, Vol. 12-1, pp1061~1064

(謝辞) 試験体作製にあたり、ご協力頂きました日本スライスリーフ株式会社に厚く感謝致します。