

論文

[2077] 水平つなぎ筋の拘束を考慮した壁式プレキャスト構面実験

正会員 ○望月 重 (武蔵工業大学工学部)

正会員 山口 雄二 (武蔵工業大学大学院)

井口 雅章 (武蔵工業大学大学院)

中田 浩司 (武蔵工業大学大学院)

1. はじめに

プレキャスト構造の特徴である、接合部に作用する応力は主たるせん断力以外にも面内拘束力があり、その力学的挙動には未解明な点が多く残されている。本研究は、壁式プレキャスト構造の鉛直接合部に着目し、壁パネル頂部の水平つなぎ筋(頭つなぎ筋とスラブ筋の和)の鉛直接合部への面内拘束効果を説明しようとするものである。実験は、水平つなぎ筋と鉛直接合部水平方向接合筋の組合せを種々変えた5体の試験体の曲げせん断実験であり、その結果より水平つなぎ筋が鉛直接合部のせん断抵抗機構に与える影響を説明し、せん断耐力を検討することを目的としている。

2. 実験計画

2.1 試験体 試験体は、厚さ12.5cm、高さ92.8cm、巾40.0cmの2枚の壁パネルと、厚さ10.0cm、巾50.0cmの床スラブを鉛直接合部と水平接合部で合成した『片持ちばり型』試験体である。その場合、鉛直接合部は通し配筋で、水平接合部はスプライススリーブによるモルタル充填継手である。試験体の数は、合計5体であり、鉛直接合部水平方向接合筋(以後、水平方向接合筋と略す)、水平接合部鉛直方向接合筋(以後、鉛直方向接合筋と略す)、頭つなぎ筋、床スラブ筋などの構造諸元一覧を表-1に示し、標準試験体WPC IV-1の配筋図を図-1に示す。使用材料の

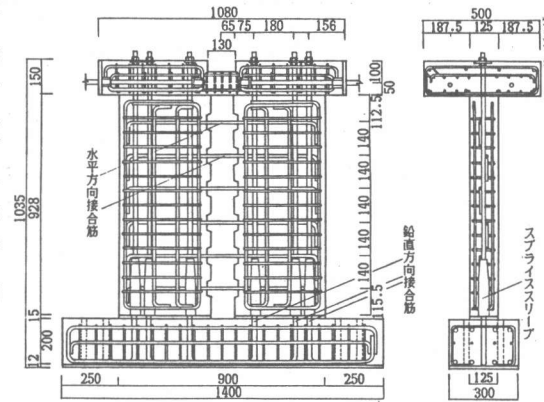


図-1 試験体配筋 (単位:mm)  
(WPC IV-1)

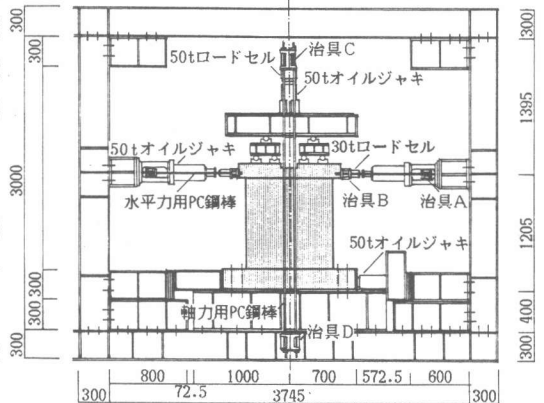


図-2 加力装置 (単位:mm)

表-1 試験体の構造諸元一覧

試験体名	コブテ- 断面積 (cm <sup>2</sup> )	コブテ- 面積比	水平方向接合筋 断面積 (cm <sup>2</sup> )	水平方向 接合筋比	頭つなぎ筋 断面積 (cm <sup>2</sup> )	床スラブ筋 断面積 (cm <sup>2</sup> )	水平つなぎ筋 断面積 (cm <sup>2</sup> )	鉛直方向接合筋 断面積 (cm <sup>2</sup> )	鉛直方向 接合筋比
WPC IV-1	(7.0x7.5)x6 315.0	0.272	(6-D10) 4.28	0.369(%)	-	(16-D6) 5.12	5.12	(6-D16) 11.94	1.06(%)
WPC IV-2	(7.0x7.5)x6 315.0	0.272	(6-D10) 4.28	0.369(%)	(2-D13) 2.54	-	2.54		
WPC IV-3	(7.0x7.5)x6 315.0	0.272	(6-D6) 1.92	0.166(%)	(2-D13) 2.54	(16-D6) 5.12	7.66		
WPC IV-4	-	-	-	-	(2-D16) 3.98	(16-D6) 5.12	9.10		
WPC IV-5	(7.0x7.5)x6 315.0	0.272	-	-	(2-D16) 3.98	(16-D6) 5.12	9.10		

性質は表-2に示す通りである。

表-2 使用材料の性質

2.2 加力および制御方法 加力装置を図-2に示す。水平加力は、頂部加力スラブに取り付けた4つの変位計の値の平均を基礎より上面から加力点までの高さで除した、部材角 $R=1,2,4,6,\dots$  (2.5 ( $\times 10^{-3}$  rad)の正負交番载荷とする。加力は加力スラブ左右の同時押し、引きとし、正荷重時(左側より右側に押し)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、それぞれ伝達する。軸方向応力 $\sigma_0$ は、8階建て最下層を想定して $\sigma_0=22.0\text{kg/cm}^2$ を载荷した。

2.3 測定方法 壁パネルおよび加力スラブの水平変位と鉛直変位、壁パネル同志および壁パネルと鉛直接合部間のずれと開きを高感度型変位計によって測定する。鉛直方向接合筋、水平方向接合筋、床スラブ筋および頭つなぎ筋の接合部付近に鉄筋ひ

コンクリート				
試験体名	打設箇所	圧縮強度 kg/cm <sup>2</sup>	引張強度 kg/cm <sup>2</sup>	ヤング率 x10 <sup>6</sup> kg/cm <sup>2</sup>
WPCIV-1	基礎、壁ハコ	384	47.3	2.61
	VJ、床スラブ	357	29.5	2.53
	敷物外	326	31.8	1.77
	ゲラト材	1315	-	3.21
WPCIV-2	基礎、壁ハコ	400	35.7	2.62
	VJ、床スラブ	369	42.3	2.59
	敷物外	370	30.7	1.81
	ゲラト材	1315	-	3.21
WPCIV-3	基礎、壁ハコ	393	38.9	2.51
	VJ、床スラブ	418	39.1	2.41
	敷物外	395	32.9	1.82
	ゲラト材	1315	-	3.21
WPCIV-4	基礎、壁ハコ	391	30.1	2.83
	VJ、床スラブ	402	30.0	2.59
	敷物外	378	28.8	1.98
	ゲラト材	1070	-	2.98
WPCIV-5	基礎、壁ハコ	399	29.8	2.76
	VJ、床スラブ	408	30.2	2.76
	敷物外	380	22.6	1.93
	ゲラト材	1070	-	2.98

金属材料		
使用材料	降伏点強度 kg/cm <sup>2</sup>	引張強度 kg/cm <sup>2</sup>
D6	3757	5408
D10	3747	5033
D13	3581	5146
D16	3467	5009

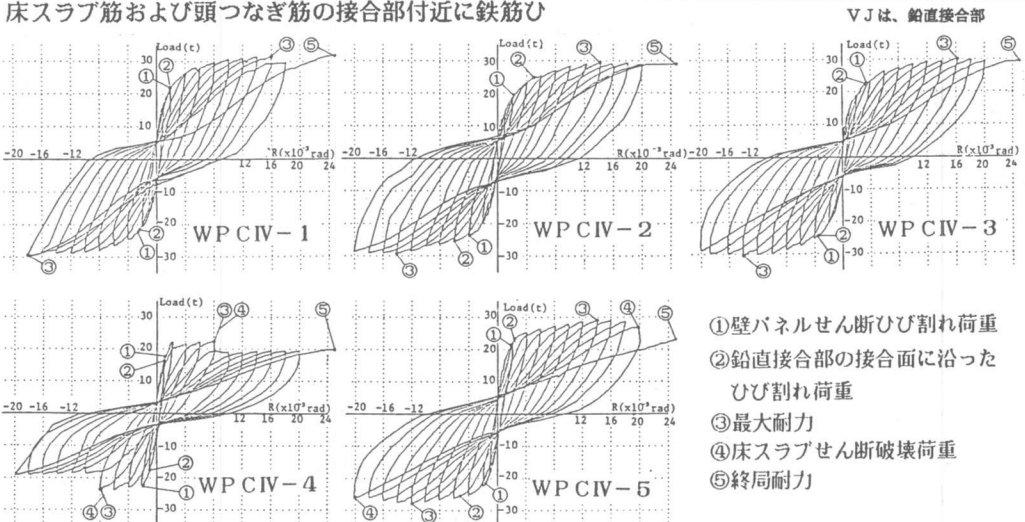


図-3 荷重-部材角関係

表-3 各種強度

試験体名	接合部ひび割れ荷重 (t)			壁パネルひび割れ荷重 (t)		床スラブひび割れ荷重 (t)		最大耐力 (t)	終局耐力 (t)	
	$Q_{JH} (\tau_{JH})$	$Q_{JV} (\tau_{JV})$	$Q_{JS} (\tau_{JS})$	$Q_{PB} (\tau_{PB})$	$Q_{PS} (\tau_{PS})$	$Q_{SB} (\tau_{SB})$	$Q_{SS} (\tau_{SS})$			
WPCIV-1	正	5.80(4.98)	21.07(18.73)	21.07(18.73)	21.49(19.10)	21.07(18.73)	29.78(26.47)	31.48(27.98)	30.83	
	負	5.83(5.18)	21.59(19.19)	22.10(19.84)	20.44(18.17)	21.94(19.50)	27.88(24.78)	-	29.61(26.32)	(27.40)
WPCIV-2	正	4.23(3.78)	24.94(22.17)	24.71(21.96)	18.46(16.41)	19.06(16.94)	25.00(22.22)	-	29.30(26.04)	28.80
	負	5.32(4.73)	25.53(22.69)	23.60(20.98)	19.79(17.59)	23.76(21.12)	23.01(20.45)	-	29.22(25.97)	(25.60)
WPCIV-3	正	3.12(2.77)	22.22(19.75)	22.22(19.75)	18.01(16.01)	22.74(20.21)	23.02(20.48)	-	30.21(26.85)	29.40
	負	4.47(3.97)	24.45(21.73)	24.45(21.73)	18.12(16.11)	24.56(21.56)	24.45(21.73)	-	30.54(27.15)	(28.13)
WPCIV-4	正	8.05(7.16)	16.04(14.28)	19.78(17.58)	12.04(10.70)	17.00(15.11)	22.60(20.09)	22.60(20.09)	22.60(20.09)	19.90
	負	6.31(5.61)	17.59(15.64)	22.32(19.84)	11.27(10.01)	22.32(19.84)	18.94(16.84)	22.85(20.31)	23.88(21.20)	(17.69)
WPCIV-5	正	7.51(6.68)	23.15(20.58)	25.48(22.63)	12.28(10.92)	21.54(19.15)	26.24(23.32)	26.89(23.90)	29.00(25.78)	23.00
	負	-	25.62(22.77)	25.53(22.89)	13.58(12.05)	21.59(19.19)	26.62(23.68)	27.35(24.31)	27.88(24.76)	(20.44)

$Q_{JH}$ : 水平接合部の水平接合面に沿ったひび割れ発生時荷重  
 $Q_{JV}$ : 鉛直接合部の鉛直接合面に沿ったひび割れ発生時荷重  
 $Q_{JS}$ : 鉛直接合部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  
 $Q_{PS}$ : PC板のせん断ひび割れ発生時荷重  
 $Q_{SB}$ : 床スラブの曲げひび割れ発生時荷重  
 $Q_{SS}$ : 床スラブのせん断ひび割れ発生時荷重  
 ( ) 内は、平均せん断応力度 (kg/cm<sup>2</sup>)

ずみゲージを貼付してそれぞれひずみ量を測定する。

### 3. 実験結果

3.1 破壊経過 荷重-部材角曲線を図-3に、WPCIV-2, 4の最終破壊状況図を図-4に、各種荷重を表-3にそれぞれ示す。各試験体とも、先ずはじめに水平接合部の水平接合面に沿ったひび割れが発生し、 $R=1.0 \times 10^{-3}$  radに至るまでに水平接合面全体に貫通した。その後、 $R=2.0 \times 10^{-3}$  radで壁パネルの中央部やや下側の端部に曲げひび割れが生じ、 $R=4.0 \sim 6.0 \times 10^{-3}$  rad付近で壁パネルの中央部付近にせん断ひび割れが発生した。同じ頃、鉛直接合部の壁パネルとの接合面に沿ったひび割れとコンクリートのせん断ひび割れがほぼ同時に発生し、それらは後につながった。WPCIV-1~3に関しては、その後もひび割れは多少増加するが、顕著な耐力低下を示さず終局に至った。一方、WPCIV-4に関しては、 $R=8.0 \times 10^{-3}$  radで床スラブにせん断ひび割れが発生し、急激な耐力低下を示し、床スラブ底面が剥落した。その後、壁パネルの一体性が崩れ2枚のパネルとして挙動し、その後は著しい耐力の低下を示さなかった。WPCIV-5に関しては、 $R=14.0 \times 10^{-3}$  radで床スラブにせん断ひび割れが発生し、耐力の低下を示し始め、 $R=20.0 \times 10^{-3}$  radで大きく低下したがその後安定した。各試験体とも水平接合部の曲げ降伏メカニズムになったと判断された、 $R=25.0 \times 10^{-3}$  radをもって各試験体とも終局とした。各試験体の荷重-部材角曲線を見ると、WPCIV-5の包絡線が、 $R=20.0 \times 10^{-3}$  radで安定性を失った点を除けば、WPCIV-1, 2, 3, 5の包絡線は終始安定し、履歴ループは紡錘形に近い。一方、WPCIV-4は包絡線が、 $R=8.0 \times 10^{-3}$  radで大きな断差を有し、安定を欠き、履歴ループは逆S形を示している。

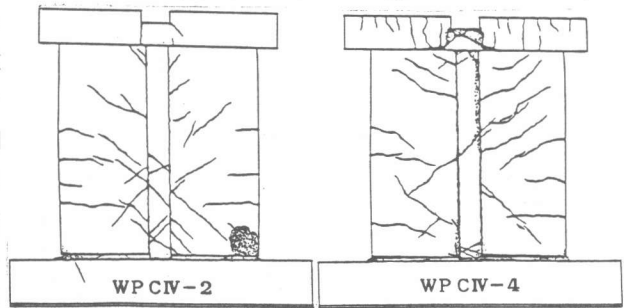


図-4 最終破壊状況図

3.2 ひずみと変位 5体の試験体は、WPCIV-1~3およびWPCIV-4, 5の2つの破壊モードにわけられる。前者の代表としてWPCIV-2, 後者の代表としてWPCIV-4とする。正側加力時のスライススリブ直上における鉛直方向接合筋と水平

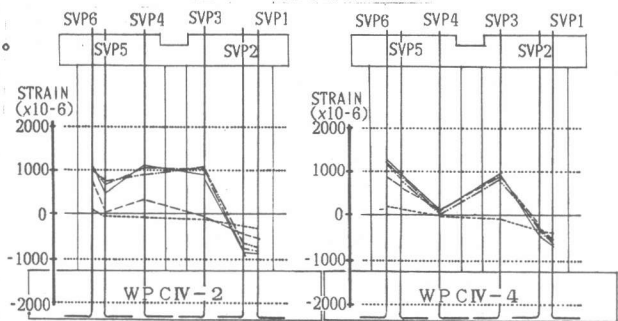


図-5 鉛直方向接合筋のひずみ分布図

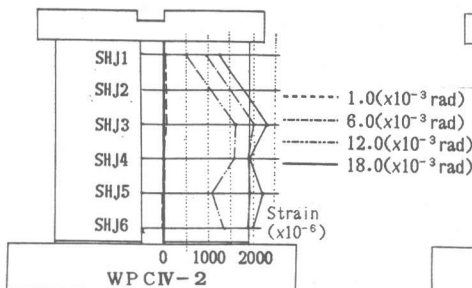


図-6 水平方向接合筋のひずみ分布図

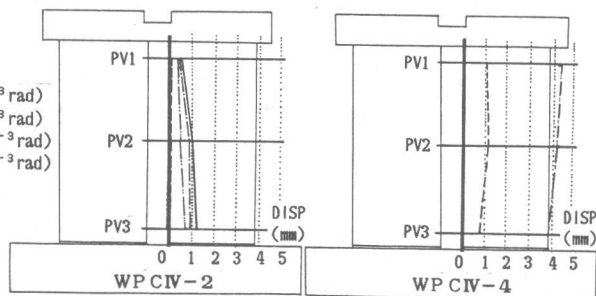


図-7 パネル相互の相対ずれ変位分布図

方向接合筋のひずみ分布 (WPCIV-4, 5は水平方向接合筋をもたない) をそれぞれ図-5, 図-6に示す。鉛直方向接合筋ひずみ分布は, 図-5に示すように,  $R=2.0 \times 10^{-3} \text{ rad}$  までは各試験体とも中立軸が鉛直接合部内にあるひずみ分布を示す。その後鉛直接合部にせん断ひび割れが発生すると, WPCIV-1~3のグループでは, SVP1

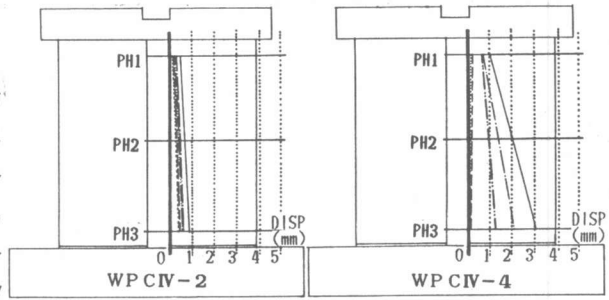


図-8 パネル相互の相対目開き分布図

, 2が圧縮, SVP3~6が引張といった, 全体が1枚としての曲げひずみ分布を示すのに対して, WPCIV-4, 5では, 鉛直接合部両側におけるSVP3が引張に対して, SVP4がほとんど0といった, 全体が2枚として曲げひずみ分布を示している。図-6のWPCIV-2における水平方向接合筋のひずみ分布より, 鉛直接合部の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 $4.0 \sim 6.0 \times 10^{-3} \text{ rad}$ 以後, ひずみが急速に増していること, および壁パネル頂部のSHJ1は水平つなぎ筋の拘束によりひずみが少ないことがわかる。

壁パネル相互の相対鉛直方向変位 (相対ずれ変位と略す) と相対水平方向変位 (相対目開きと略す) を図-7, 8に示す。図-7の壁パネル頂部, 中央部および底部の3ヶ所で測定した相対ずれ変位では, 2つのグループのその絶対量に大きな差が見られる。既往の研究<sup>1)</sup>によれば, 鉛直接合部が降伏し, その最大せん断耐力時における相対ずれ変位は2mmを越すと急激に値を増すことがいわれている。前者のグループでは, WPCIV-3のみ終局時に平均が2mmを超えているが急激な値の増加はない。後者のグループでは, WPCIV-4で  $R=6.0 \times 10^{-3} \text{ rad}$ , WPCIV-5で  $R=14.0 \times 10^{-3} \text{ rad}$  で平均が2mmをこえ, 以後急激に値を増している。図-8の相対目開きは, 各試験体とも壁パネル頂部から脚部にむかって広がる傾向があり, 床スラブにより相対目開きが拘束されていることがわかる。また相対ずれ変位と同様にWPCIV-1~3のグループはWPCIV-4, 5のグループより目開きが小さくなっていることがわかる。破壊モードとして以上の点から次のことがいえる。WPCIV-1~3については, 鉛直接合部は降伏しておらず壁パネルの一体性はほとんど崩れていないのに対して, WPCIV-4, 5については鉛直接合部はせん断破壊している。

4. 水平つなぎ筋による拘束

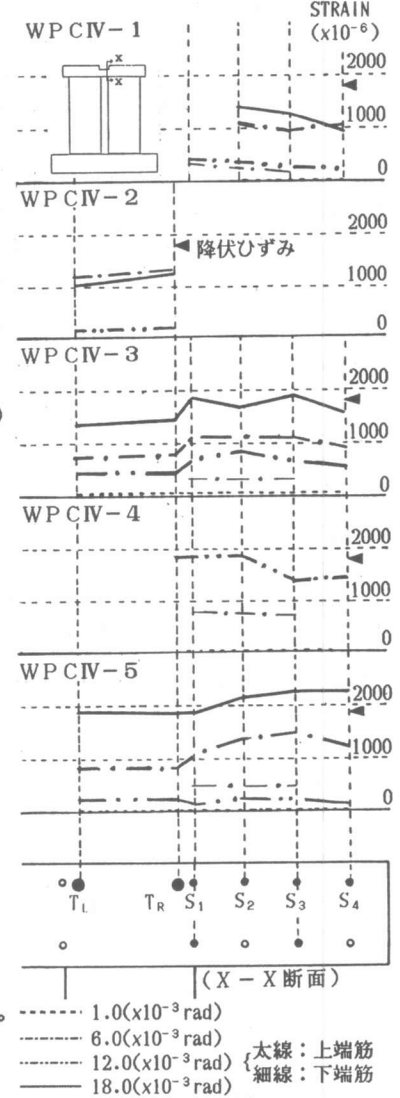


図-9 水平つなぎ筋のひずみ分布図

図-9に各試験体の床スラブ上端筋 ( $R=12.0 \times 10^{-3}$  rad)の細線は下端筋のひずみを示す) および頭つなぎ筋の  $R=1.0, 6.0, 12.0, 18.0 \times 10^{-3}$  rad 時のひずみ分布を示す。

(但し, WPCIV-1の $S_1$ 上端筋は,  $R=12.0 \times 10^{-3}$  rad以後ゲージ不良のため削除されている) 図-7より, WPCIV-1, 2, 3, 5の場合,  $R=18.0 \times 10^{-3}$  radまで, WPCIV-5の一部を除いて, 降伏ひずみ以下となっている。一方, WPCIV-4では,  $R=6.0 \times 10^{-3}$  radで降伏ひずみに達している, 床スラブ筋のゲージ貼付の個所が $S_1$ と $S_3$ のみであるので明確でないが, 下端筋のひずみとの差から曲げが生じていることがわかる。各試験体ともに同じ部材角でのひずみ分布がほぼ同様であることから, スラブ巾50cmの全巾が有効であるといえる。鉛直接合部が降伏しているWPCIV-4, 5については最大耐力時 $R=8.0$  および $14.0 \times 10^{-3}$  radにおいて降伏ひずみ値を超え, その値は終局に至るまで増え続けた。鉛直接合部が降伏していないWPCIV-1, 2, 3については終局に至るまで降伏ひずみ値を超えることはなかった。

図-10にスラブ筋および頭つなぎ筋のひずみの鉛直接合部両側での値から求めた平均負担軸力と部材角との関係を示す。水平方向接合筋を有するWPCIV-1~2の3体では, 最大耐力まではほぼ同様にだだやかな増加を示し, 最大耐力時での軸力の値は3体とも4~8tであった。その後, 水平方向接合筋断面積の小さいWPCIV-3は急激な増加を示した。これに対して水平方向接合筋を有しないWPCIV-4, 5の2体は, 初期の段階での増加傾向はコッター筋を有する3体とはほぼ同様であったが, その後, コッターを有しないWPCIV-4では $R=3.4 \times 10^{-3}$  radで, またコッターを有するWPCIV-5では $R=10.0 \times 10^{-3}$  rad付近から急激に軸力が増加し, 最大耐力時での値は2体とも16~17t程度であった。この結果より, 床スラブの負担軸力の値は水平方向接合筋の断面積による影響を強く受けていることが判った。

水平つなぎ筋の鉛直接合部への拘束を調べるために, 壁パネル頂部と中央部での相対ずれ変位PVと相対目開きPHの比PV/PHと部材角との関係を描いたのが図-11である。WPCIV-1に関しては相対目開きを測定してないので, パネル-ジョイントコンクリートの目開きに補正係数を乗じた値を用いている。また, 鉛直接合部接合面にひび割れが発生した後の $R=6.0 \times 10^{-3}$  rad以降の値をとっている。WPCIV-4以外のコッターのある試験体は最大耐力までPV1/PH1は3前後で安定している。以後コッターのないWPCIV-4を除いて考えると, 最大耐力以後PV1/PH1の値は, WPCIV-1では余り変化がなく, WPCIV-2は最大耐力時の次の部材角で急激に落ち,

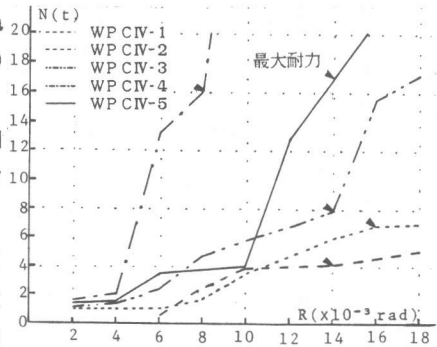


図-10 水平つなぎ筋の負担軸力と部材角の関係

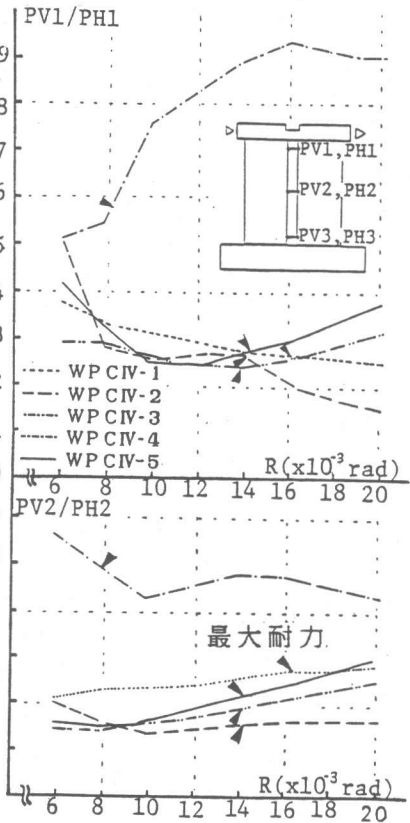


図-11 PV/PHと部材角の関係

逆にWPCIV-3, 5に関してはその値が上昇している。水平つなぎ筋の断面積との関係を考えてみると、その断面積が大きいほど最大耐力以降の壁パネル頂部のPV1/PH1の比は大きくなり、水平つなぎ筋の拘束の指標となっていることがわかる。PV2/PH2の値は、試験体によって変化に差があまりなく、水平つなぎ筋が壁パネル中央部の拘束に余り影響を与えているとはいえない。

### 5. 最大耐力と終局耐力

以上の破壊モード、水平・鉛直接合筋のひずみ、相対ずれ変位、相対目開き、および水平つなぎ筋の拘束効果から、各耐力時の抵抗機構を以下の様に判断する。WPCIV-1~3の場合、最大、終局耐力はともに壁パネルの一体として曲げ降伏である。WPCIV-4, 5の最大耐力は、前者が床スラブのせん断耐力と水平つなぎ筋の摩擦耐力を考慮し、後者は前者のそれらに鉛直接合部コッターのせん断耐力をさらに追加した、鉛直接合部のせん断破壊であると考え。WPCIV-4, 5の終局はともに、つなぎ筋の摩擦力による曲げ戻しを考慮した、図-12に示す2枚の壁パネルの曲げ降伏と考える。WPCIV-4, 5の最大、終局耐力算定の際のつなぎ筋の効果は、最大耐力時のつなぎ筋の負担軸力が16t前後であることを考慮して、全面積の5割を有効として算定している。表-4は各試験体の最大耐力と終局耐力の算定値である。表-4より算定値は実験値と比較的一致していることから、水平つなぎ筋の拘束効果に関する抵抗機構は妥当と判断される。

### 6. 結論

以上の結果より以下の結論が得られた。

- 1) 水平つなぎ筋のひずみ分布から、床スラブ筋は頭つなぎ筋と同様に有効であるといえる。
- 2) 水平つなぎ筋は壁パネル頂部の鉛直接合部に対して大きな拘束効果をもっている。
- 3) 床スラブのせん断耐力および水平つなぎ筋の拘束による摩擦効果を考慮することが、鉛直接合部の最大および終局耐力の評価に重要である。

<謝辞>試験体製作にあたり御協力頂きました日本ブライススリーブ株式会社に感謝致します。

1)望月重, 梅木芳人: プレキャスト鉄筋コンクリート構造の鉛直接合部に関する構面実験,

日本建築学会大会学術講演梗概集, 1987, pp.115~116

表-4 耐力算定結果 (単位はすべてt)

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	
	壁パネル曲げ 降伏耐力 *1	鉛直接合部最大せん断耐力 接合部耐力*2	スラブ耐力*3	合計*4	壁パネル曲げ 降伏耐力 *1	壁パネル曲げ 降伏耐力 *5	実/計		実/計	
WPCIV-1	30.84	-	-	-	30.84	-	31.48	1.02	30.83	1.00
WPCIV-2	30.86	-	-	-	30.86	-	29.30	0.95	28.56	0.83
WPCIV-3	30.85	-	-	-	30.85	-	30.54	0.98	29.40	0.97
WPCIV-4	-	13.88	12.36	25.04	-	21.89	23.86	0.95	19.90	0.91
WPCIV-5	-	25.28	12.49	36.05	-	21.89	29.00	0.80	23.00	1.05

- \*1  $Q_{PB} = M_{PB} / H$   
 $M_{PB} = \{0.9 \cdot a_t \cdot \sigma_y \cdot d + 0.5 \cdot N \cdot D(1 - N / (b \cdot D \cdot F_c))\}$
- \*2  $Q_{JS} = 0.09 \cdot f_c \cdot A_{sc} + C_r \cdot 1.48 \cdot A_s \cdot \sqrt{(f_u \cdot f_c)} + \mu (C_o \cdot A_s \cdot f_u + s \cdot A_s \cdot f_u)$   
 $(C_r = 1.0 \quad \mu = 0.84 \quad C_o = 0.64)$
- \*3  $Q_{ss} = \left\{ \frac{0.0679 \cdot P_u^{0.23} \cdot (F_c + 180)}{\sqrt{M/QD + 0.12}} + 2.7 \sqrt{P_{uh} \cdot \sigma_{wh}} + 0.1 \sigma_{\theta} \right\} \cdot b_o \cdot j$   
 $(P_{uh} = 0 \quad \sigma_{\theta} = 0 \quad M/QD = 1.3)$
- \*4  ${}^H Q_{max} = {}^V Q_{max} \cdot L / H \quad (L = 90 \quad H = 94.3)$   
 ${}^V Q_{max} = Q_{JS} + Q_{ss}$
- \*5  $Q_{ult} = {}^L Q_{ult} + {}^R Q_{ult}$   
 ${}^L Q_{ult} = ({}^L M_{PB} + \ell \cdot f) / H \quad (\ell = 20)$   
 ${}^R Q_{ult} = ({}^R M_{PB} + \ell \cdot f) / H$   
 $f = \mu \cdot s \cdot A_s \cdot f_u$

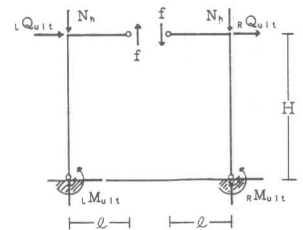


図-12 終局耐力時のモデル (WPCIV-4, 5)