

論文

[2099] 壁式プレキャスト構造の水平接合部の復元力特性

正会員 望月 重 (武蔵工業大学工学部)

正会員 ○井口 雅章 (武蔵工業大学大学院)

§ 1. はじめに

壁式プレキャスト鉄筋コンクリート構造（以下P C a造と呼ぶ）の靱性設計に当たって最も重要なことは、水平接合部の復元力特性である。本研究は接合筋断面積、敷モルタル圧縮強度、敷モルタル厚さなどをパラメーターとしたS型加力の正負繰返し実験による29体の結果から、P C a造水平接合部の復元力特性を求め、さらにモデル化を試みたものである。

§ 2. 実験計画概要

表-1に29体の試験体の構造諸元を示す。図-1に接合部面積475cm²の試験体概要および配筋図を示す。なお接合筋は十分な定着長さをとり施工の関係上通し筋とした。

2. 1 使用材料の性質

試験体のP C a部のせん断補強筋にはD 6 (S D 3 0 A)を、加力用としてP C a部にP C 鋼棒A種17.0mmを使った。接合筋には、試験体の種類別にD 1 0, D 1 3共にS D 3 0 Aを用いた。表-2にコンクリートの材料特性、表-3に鉄筋およびP C 鋼棒の材料特性を示す。

2. 3 加力と測定方法

図-2に加力装置概要図を示す。加力方法は、加力治具を取り付けた試験体を反力フレームに設置した後、ジョイント

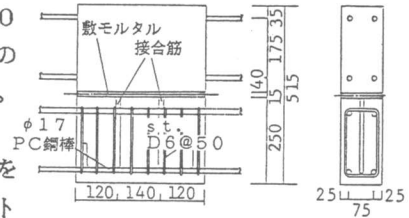


図-1 試験体概要および配筋図

表-1 試験体の構造諸元および実験結果

試験体名	NO	接合筋	接合筋比	敷モルタル設計 基準強度	接合部		垂直応力 (kg/cm ²)	τ_{jo} kg/cm ²	D _{jo} mm	正側加力		負側加力		τ_e kg/cm ²		
					面積 (cm ²)	厚さ (cm)				τ_{max} kg/cm ²	D _{max} mm	τ_{max} kg/cm ²	D _{max} mm			
1-PSH-0	1	2-D10	0.60	180	237.5	1.5	0	10.53	0.03	11.49	0.51	10.50	-0.51	18.19		
1-PSH-15	2						15	23.98	0.06			23.10	-0.07	32.31		
1-PSH-30	3						30	32.31	0.04			36.29	-0.11	35.78		
2-PSH-0	4	2-D10	0.60	360	237.5	1.5	0	10.95	0.01	12.76	0.02	11.97	-0.30	18.62		
2-PSH-15	5						15	27.71	0.02			29.71	-0.06	32.39		
2-PSH-30	6						30	43.49	0.04			33.77	-1.04	45.85		
3-PSH-0	7	2-D10	0.30	180	475.0	1.5	0	5.96	0.07	7.16	0.51	6.63	-0.52	9.01		
3-PSH-15	8						15	21.91	0.01			24.00	0.08	21.54	-0.00	24.11
3-PSH-30	9						30	29.78	0.03			29.79	0.05	35.41	-0.43	31.03
4-PSH-0	10	2-D10	0.30	360	475.0	1.5	0	6.67	0.12	7.13	0.52	6.47	-0.54	10.36		
4-PSH-15	11						15	24.63	0.01				16.48	-2.06	24.32	
4-PSH-30	12						30	37.37	0.00				26.92	-2.01	33.05	
5-PSH-0	13	2-D13	0.53	180	475.0	1.5	0	5.41	0.00	8.74	0.52	7.28	-0.52	14.29		
5-PSH-15	14						15	20.34	0.02				18.12	-2.03	20.42	
5-PSH-30	15						30	36.76	0.07			36.99	0.17	28.54	-1.00	39.59
6-PSH-0	16	2-D13	0.53	360	475.0	1.5	0	7.34	0.07	9.96	0.52	13.92	-0.20	11.88		
6-PSH-15	17						15	30.66	0.00				24.25	-0.03	28.42	
6-PSH-30	18						30	42.86	0.04				32.41	-1.98	39.52	
7-PSH-0	19	3-D10	0.30	180	712.5	1.5	0	7.85	0.04			6.21	-0.50	10.50		
7-PSH-15	20						15	26.49	0.00				23.34	-0.05	23.10	
8-PSH-0	21	3-D10	0.30	360	712.5	1.5	0	4.80	0.01	6.71	0.53	6.01	-0.52	11.14		
8-PSH-15	22						15	23.87	0.00				16.14	-2.02	22.47	
9-PSH-0	23	3-D13	0.53	180	712.5	1.5	0	13.23	0.01			10.41	-0.53	14.16		
9-PSH-15	24						15	19.83	0.00			30.73	0.00	19.54	-0.16	27.13
10-PSH-0	25	3-D13	0.53	360	712.5	1.5	0	7.12	0.03	16.42	0.28	17.42	-0.10	14.49		
10-PSH-15	26						15	27.23	0.07			29.06	0.21	27.68	-0.15	27.72
11-PSH-0	27	2-D13	0.53	360	475.0	3.0	0	6.25	0.11	5.21	1.07	11.38	-0.07	10.25		
11-PSH-15	28						15	20.15	0.02				20.57	-2.03	27.52	
11-PSH-30	29						30	31.26	0.016			35.70	0.06	35.76	-0.01	39.38

τ_{jo} : 接合面部ひび割れ発生時のせん断応力
 τ_{max} : ずれ変位2mm以内での最大せん断応力
 τ_e : ずれ変位10mm時のせん断応力

D_{jo} : 接合面部ひび割れ発生時のせん断ずれ変位

D_{max} : ずれ変位2mm以内での最大せん断変位

* 正側の空白は接合面部ひび割れ発生と同時に最大せん断耐力となった場合

部高さに固定した電動油圧ジャッキにより水平力を加え、加圧プレートを介してせん断力を接合部に作用させることとした。負側載荷については各々の加圧プレートを上下入れ換えることにより行った。軸力は、試験体上下面のローラー（ロット棒φ25）を介し、16mm鉄板を50t 油圧ジャッキで押すことにより垂直応力を与えた。また試験中は垂直応力を常に一定に保つものとし、水平力除荷時にその荷重の調整を行った。

水平力は、試験体の左右変位計の平均による変位制御とした。変位ステップは急激なずれ変位をともし、制限は $\pm 0.1, \pm 0.5, \pm 1.0, \pm 1.5, \pm 2.0, \pm 3.0, \pm 10.0$ mmとした。なお各制御変位において定常ループを求めるために3回ずつの繰り返しを行った。

§ 3. 実験結果

実験結果の各種強度を表-1に示す。試験体の破壊経過は垂直応力によって大きな差がみられた。図-3、4に垂直応力のない場合とある場合の代表としてそれぞれ 3-PSH-0, 15の荷重-ずれ変位曲線を示す。垂直応力のない場合には、7, 9-PSH-0を除いて接合部ひび割れ発生後も耐力の上昇が見られ、正側の約0.5mmで最大耐力となった。最大耐力後はずれ変位約2mmまで耐力の低下がみられた。2mm以上のずれ変位になると再び耐力の上昇がみられた。垂直応力のある場合には接合部ひび割れ発生と同時に急激な耐力低下とずれ変位をともなった試験体が多く、接合面に沿ったひび割れが貫通すると再び耐力の上昇が見られた。破壊形式は垂直応力の有無にかかわらず接合面でのずれ破壊である。

3. 1 各種強度

(垂直応力)最大せん断応力(τ_{max})-垂直応力(σ_n)の関係を図-5に示す。

図より最大せん断応力は垂直応力と比例的な関係が強いことがわかる。

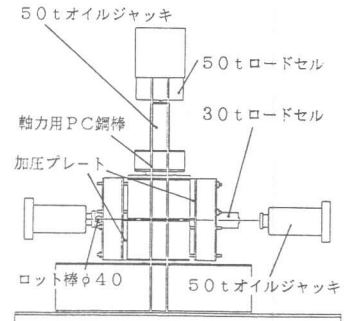


図-2 加力装置概要図

表-2 コンクリートおよび敷モルタルの材料特性

試験体名	打設箇所	水セメント比 (%)	スランプ値 (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (kg/cm ²)	引張強度 (kg/cm ²)	ヤング係数 ($\times 10^6$ kg/cm ²)
1-PSH-0, 15, 30	PCa部	55	18.6	1.1	361	24.7	2.51
3-PSH-0, 15, 30							
5-PSH-0, 15, 30							
7-PSH-0, 15	ジョイント部	75	17.4	—	189	12.5	1.45
2-PSH-0, 15, 30	PCa部	55	18.3	1.2	390	33.6	2.67
4-PSH-0, 15, 30							
6-PSH-0, 15, 30							
8-PSH-0, 15, 30	ジョイント部	55	15.8	—	399	13.1	1.96
9-PSH-0, 15	PCa部	55	19.2	1.2	341	25.1	2.45
	ジョイント部	75	16.9	—	181	9.53	1.26
10-PSH-0, 15	PCa部	55	19.2	1.2	341	25.1	2.45
11-PSH-0, 15, 30							
	ジョイント部	55	16.4	—	341	12.7	1.75

* 但しPCa部のコンクリートはスランプ値、ジョイント部のモルタルはフロー値

表-3 鉄筋およびPC鋼棒の材料特性

種類	降伏点 (kg/cm ²)	引張強さ (kg/cm ²)	ヤング率 (kg/cm ²)	伸び率 (%)
D6	4170	5870	1.74×10^6	15.7
D10	3920	5530	1.62×10^6	21.5
D13	3780	5190	1.91×10^6	24.5
PC鋼棒	9000	10300	2.05×10^6	10.0

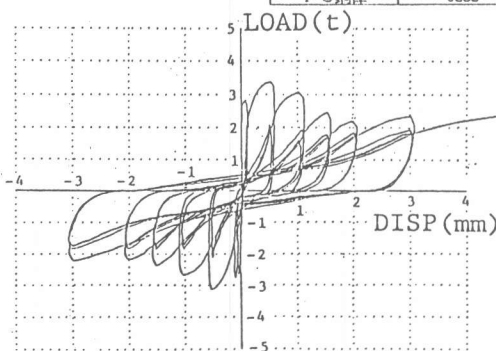


図-3 荷重-ずれ変位曲線 (3-PSH-0)

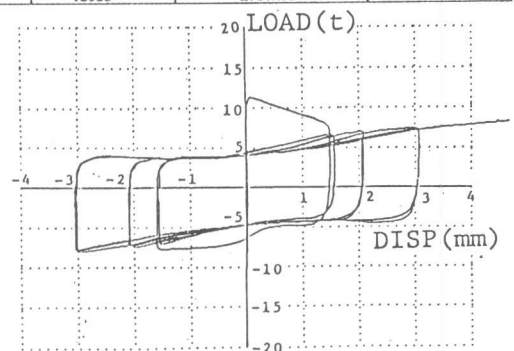


図-4 荷重-ずれ変位曲線 (3-PSH-15)

(接合筋比および敷モルタル圧縮強度) 図-6に $\tau_{\max}$ -接合筋比(P_s)の関係を示す。図よりその関係は垂直応力と最大せん断応力の関係ほど強くないが、一般的傾向としては、接合筋比の増加にともない最大せん断応力の増加がみられる。図-7に $\tau_{\max}$ -敷モルタル圧縮強度(f_c)の関係を示す。この関係についても、 $\tau_{\max}$ - P_s の関係と同様な傾向であった。

(接合部目地厚) 図-8に最大せん断応力-目地厚(D)の関係を示す。図より目地厚15mmに比べて、目地厚30mmの場合は、最大せん断応力の低下がみられる。

3. 2 最大せん断応力

最大せん断応力は垂直応力および接合筋比によって大きな影響を受ける。また接合部目地厚によっても大きく影響を受ける。ここで実験によるせん断抵抗機構は1) 接合筋のだぼ 2) 接合筋の応力による摩擦 3) 垂直応力による摩擦が考えられる。そこで既往の鉛直接合部の耐力式⁽¹⁾に準じてその耐力式を次式で提案する。なお目地厚による耐力式への影響で目地厚30mmの場合は試験体が3体に過ぎないことを考慮して、耐力式は接合部目地厚15mmの試験体のみとする。

$\tau_{cal}=1.48 \cdot P_s \sqrt{(f_y \cdot f_c) + c \cdot \mu \cdot f_y \cdot P_s + \mu \cdot \sigma_n} - (1)$
 τ_{cal} :最大せん断応力(kg/cm^2) A_s :接合筋断面積(cm^2)
 $c=0.39$:低減係数 f_c :敷モルタル圧縮強度(kg/cm^2)
 $\mu=0.84$:摩擦係数 f_y :接合筋の降伏応力(kg/cm^2)
 P_s :接合筋比 σ_n :垂直応力圧縮力を正(kg/cm^2)

上式の第1項、第2項、第3項はそれぞれ上記の1) 2) 3)にあたる。図-9は接合筋の水平加力方向に添付してある歪ゲージより、最大せん断応力時の軸歪を降伏歪で割った値と垂直応力の関係である。垂直応力のある場合には接合部ひび割れ発生と同時に最大せん断応力となり、その後急激なずれ変位をともなうので、歪値は不確かである。そこで垂直応力0 kg/cm^2 の試験体の軸歪の平均を第2項の低減係数の値とする。(1)式による最大せん断応力 τ_{exp} - τ_{cal} の関係を図-10に示す。(1)式による相関係数は0.97で、本式は水平接合部の最大せん断応力式として妥当であると考えられる。

3. 3 スケルトンカーブ

図-11~図-15は試験体のせん断応力(τ)-ずれ変位(DISP)の関係の処女包絡線を垂直応力、接合筋比、接合部面積、敷モルタル圧縮強度、目地厚をパラメ

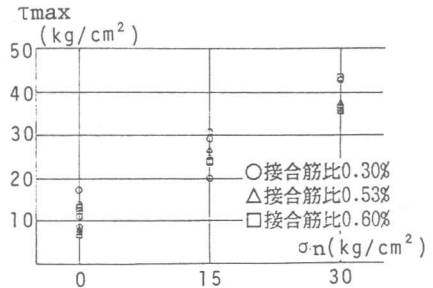


図-5 $\tau_{\max}$ - σ_n の関係

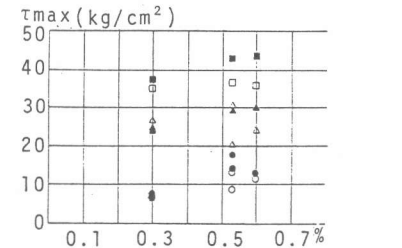


図-6 $\tau_{\max}$ - P_s の関係

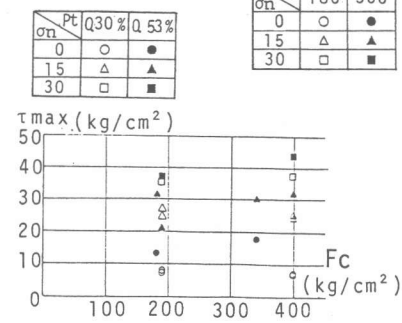


図-7 $\tau_{\max}$ - f_c の関係

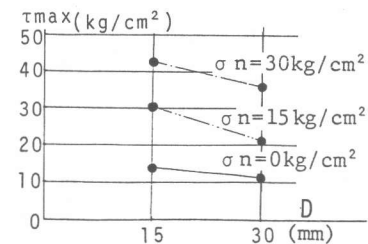


図-8 $\tau_{\max}$ - D の関係

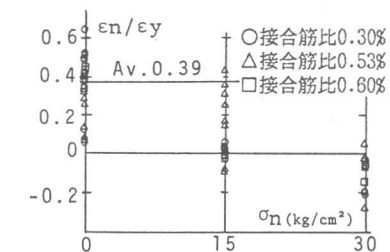


図-9 最大せん断力時の軸歪-垂直応力の関係

ーターとして比較した図である。図より以下のことがわかる。

1) 垂直応力の有無によりスケルトンカーブに大きな違いがみられた。垂直応力なしの試験体は接合部のひび割れ発生後も耐力上昇がみられるものが多く、ずれ変位約0.5mmで最大せん断応力となった。垂直応力の作用している試験体は接合部ひび割れ発生と同時に急激な耐力低下とずれ変位をとめた試験体が多く、最大せん断応力時のずれ変位も垂直応力なしの試験体に比べ0.04mmと小さい。

2) 接合筋比による最大せん断応力時のずれ変位量の違いはみられない。しかし接合筋比に比例して最大せん断応力の上昇およびその後の耐力低下に違いがみられる。

3) 図-13の接合部面積の違いによるスケルトンカーブの形状は、接合筋比0.3%の試験体においては余り違いが認められないが、接合筋比が大きくなると破壊形式およびスケルトンカーブ形状に差がみられる。しかしずれ変位2mm以上になるとスケルトンカーブ形状に差はない。

4) 数モルタル圧縮強度によるスケルトンカーブの違いは、最大せん断応力時での耐力においてみられるが耐力低下後の形状はほぼ同じと言える。その違いは接合筋比0.53%の試験体に大きくみられた。

5) 接合部目地厚によるスケルトンカーブの違いは、最大せん断応力およびそのずれ変位量またその後の耐力低下にもみられる。しかし2mm以上のずれ変位になるとその形状はほとんど変わらない。

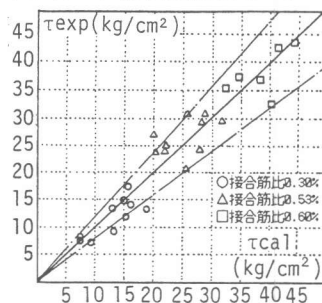


図-10 $\tau_{exp}-\tau_{cal}$ の関係

3.4 無次元化ループ

図-16～図-21は第3回目の定常ループの荷重 L 、ずれ変位 D をそれぞれのループ頂点の荷重 L_0 、ずれ変位 D_0 で除した無次元化ループである。図より以下のことがわかる。

(1) 無次元化ループは原点に対してほぼ対称である。

(2) 垂直応力が無次元化ループの形状に与える影響は、本実験のパラメーターの中で最も大きい。

(3) 接合筋比が無次元化ループの形状に与える影響は、垂直応力の作用している試験体に対してのみ正負荷荷時のスリップ荷重に大きく影響を与え、接合筋比の大きいものほどその値 L/L_0 は小さくなる。

(4) 数モルタルの圧縮強度、接合部の面積および接合部目地厚が無次元化ループの形状に与える影響はほとんど認められない。

(5) 垂直応力の作用していない試験体の場合、ずれ変位の増大にともない無次元化ループの形状に変化が見られるものの、垂

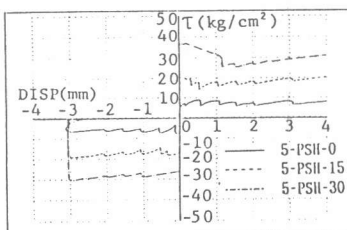


図-11 垂直応力による違い

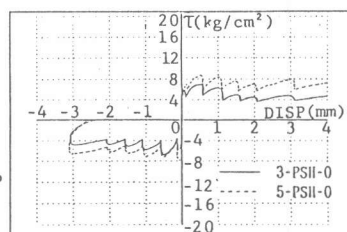


図-12 接合筋比による違い

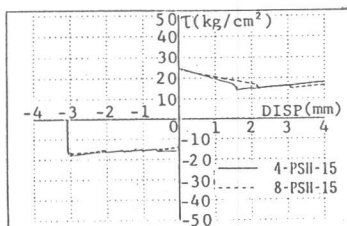


図-13 接合部面積による違い

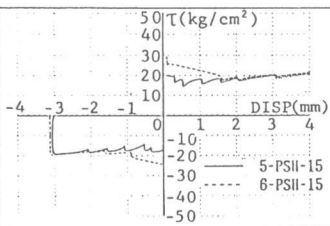


図-14 数モルタル圧縮強度による違い

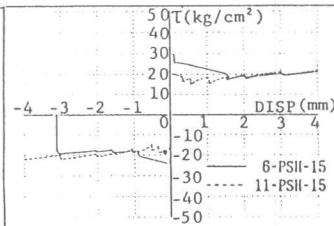


図-15 目地厚による違い

垂直応力の作用している試験体のその形状は最大経線ずれ変位が増大してもほぼ同様の形状を示す。

§ 4. 復元力特性のモデル化

スケルトンカーブおよび無次元化ループの図より、水平接合部の目地厚 15mm の試験体の復元力特性モデルを垂直応力なしとありの 2 種類に分けそれぞれ図-22、23 に示す。スケルトンカーブは接合部ひび割れ発生時のせん断応力を τ_{jc} 、最大せん断応力 τ_{max} 、ずれ変位 2mm での応力 τ_2 、垂直応力のある場合のスリップ時のせん断応力を τ_{sl} とする。ずれ変位のばらつきが大きいため剛性値を一意的に定めるににくい。したがって図中の剛性 K_1 は実験でのせん断応力とずれ変形の関係から導くべきであるが、垂直応力のない場合試験体の最大せん断応力は 0.5mm で最大せん断応力になるとし、ひび割れ発生前の剛性はせん断剛性とした。また垂直応力のある場合についても初期剛性をせん断剛性と理想化し算定した。ループのモデルについてはデータ数が少ないことから、ここでは形状のみのモデル化を行う。剛性 K_2 、 K_3 、 K_4 についてはそれぞれ定量化したずれ変位の値と次式に提案されている応力よりその値を求めるものとする。

(τ_{jc}) スケルトンカーブの図より垂直応力 0 kg/cm² の時 7,9-PSH-0 を除いた試験体は、接合面のひび割れ発生後急激に剛性が低下した。また接合面に沿ったひび割れ貫通後も耐力が上昇し、ずれ変位約 0.5mm で最大せん断応力となっている。しかし垂直応力の作用している試験体は、接合部のひび割れ発生と同時に最大せん断応力となっている場合が多い。そこで垂直応力 0 kg/cm² の時に限り接合部のひび割れ発生応力を τ_{jc} とした図-24 に τ_{jc} - f_c の関係を示す。図よりその関係は f_c にほとんど関係がないといえる。 τ_{jc} は P c a 部接合面の施工

Skeleton Curve Model

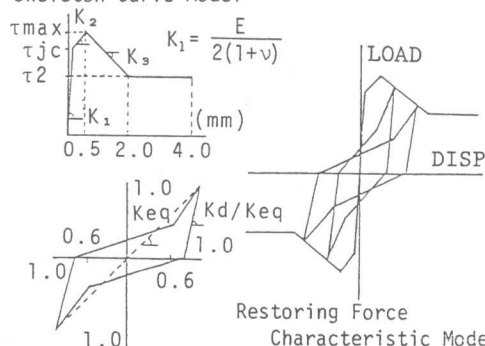


図-22 復元力特性モデル(垂直応力なし)

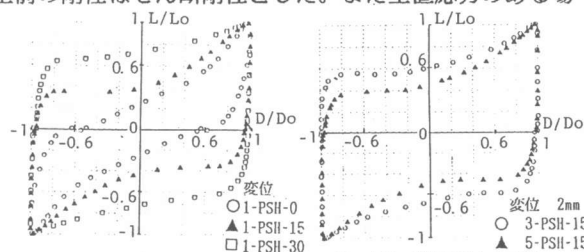


図-16 垂直応力による違い

図-17 接合筋比による違い

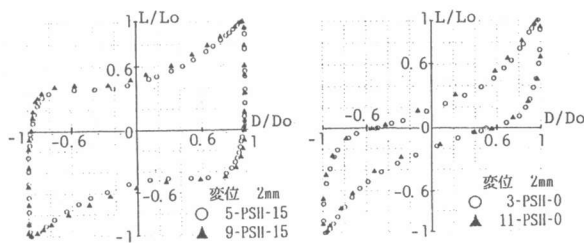


図-18 接合部面積による違い

図-19 接合部目地厚による違い

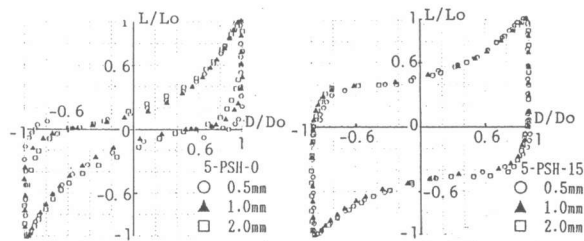


図-20 ずれ変位による違い

図-21 ずれ変位による違い

Skeleton Curve Model

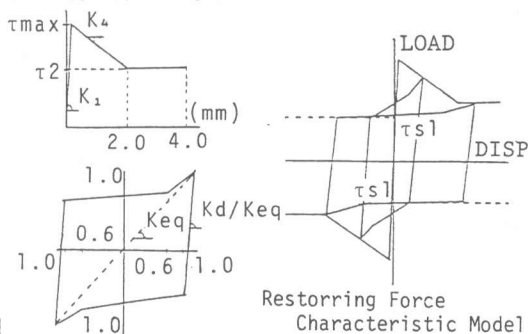


図-23 復元力特性モデル(垂直応力あり)

方法などによるものと考えられる。ここでは τ_{jc} の平均をとり次式にその値を示す。

$$\tau_{jc}=8.0 \quad (2) \quad (\text{kg/cm}^2)$$

(τ_2) 各パラメーターの違いに変わらず、スケルトンカーブをみると耐力は最大せん断応力以後ずれ変位約2mmまで耐力低下がおこっていることがわかる。ここで各試験体の正側ずれ変位2mmの応力を τ_2 とすると、 τ_2 は最大せん断応力式と同様なせん断抵抗機構が考えられる。しかしながら接合筋による摩擦力は接合面での目開きからその摩擦力の低減が考えられる。したがって τ_2 は接合面でのだぼおよび垂直応力による摩擦力のみを考慮し次式で表す。図-25に τ_{2exp} - τ_{2cal} の関係を示す。図よりその相関係数は0.98となる。

$$\tau_2=1.48 \cdot P_s \sqrt{(f_y \cdot f_c)+0.65 \cdot \sigma_n} \quad (3) \quad (\text{kg/cm}^2)$$

(τ_{sl}) 垂直応力の作用している試験体の水平力除荷時の残留変位は、垂直応力の作用していない試験体の場合と異なり、逆加力時を行っても変位は戻らない。逆側加力により変位が戻り始める時の応力を τ_{sl} とする。 τ_{sl} の値はずれ変位が逆側変位になるまで各ステップに関わらずほぼ一定の耐力であることから、最終サイクルの負側加力時のずれ変位2mmの応力より求める。 $\tau_{sl}-\sigma_n$ の関係を図-26に示す。図より τ_{sl} は垂直応力に対してほぼ比例的な関係があることがわかる。したがってその値として係数の平均をとり、 τ_{sl} の値を次式に示す。

$$\tau_{sl}=0.6 \cdot \sigma_n \quad (4) \quad (\text{kg/cm}^2) \quad \sigma_n: \text{垂直応力} (\text{kg/cm}^2)$$

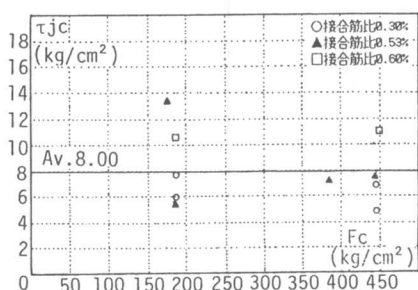


図-24 $\tau_{jc}-F_c$ の関係

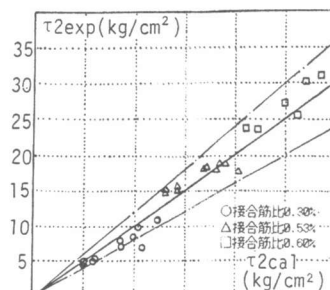


図-25 $\tau_{2exp}-\tau_{2cal}$ の関係

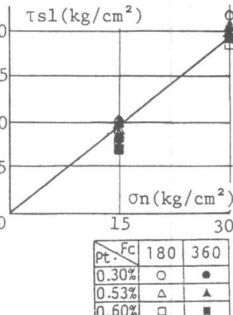


図-26 $\tau_{sl}-\sigma_n$ の関係

§ 5. 結論

- 1) プレキャスト水平接合部の復元力特性は垂直応力、接合筋比、接合部面積、数モルタル圧縮強度、目地厚の影響を受ける。その中でも垂直応力、接合筋比、目地厚が復元力特性に及ぼす影響は大きい。
- 2) 接合部目地厚30mmの試験体の最大せん断応力は、同接合筋比および同数モルタル圧縮強度で接合部目地厚15mmの試験体の最大せん断応力の約70%の値となった。しかしずれ変位2mm以上になると15mmの試験体と比べてその耐力の差は認められない。
- 3) PCa造水平接合部の最大せん断応力の算定式として、接合部目地厚15mmのとき鉛直接合部に準じた(1)式が提案できる。

参考文献)

- 望月、梅木： プレキャスト鉄筋コンクリート構造接合部の面内・面外拘束効果に関する研究
日本建築学会大会梗概集(北海道) S. 61. 8