

論文 二分割されたプレキャスト壁柱の鉛直接合面のせん断伝達性能

伴 幸雄*¹・古田 智基*²・田才 晃*³

要旨：中高層壁式ラーメン鉄筋コンクリート構造（HFW）のプレキャスト化に当たって、壁柱に鉛直接合部を設けることを想定し、接合部の幅を約20mmとしてグラウト充填により一体化を計る新しい工法の接合面のせん断耐力を確認する要素実験を行った。最大耐力に及ぼす接合面の目荒しの効果は、目荒し深さが16mm以上の場合に確認された。またコッターを設けることにより、最大耐力をコッターなしに対し60%程度上昇させることが確認できた。そして、接合面のだぼ筋にプレストレスを導入すると、プレストレス量に比例した耐力上昇が確認できた。これらの効果に基づいた接合部せん断耐力の評価方法を考察した。

キーワード：HFW，プレキャスト，壁柱，鉛直接合面，せん断伝達

1. はじめに

壁式ラーメン鉄筋コンクリート構造のプレキャスト（以下P C a）化に、新たなP C a部材分割による工法を考案し、その鉛直接合部のせん断伝達性能を基礎的な要素実験により検討した。この工法は、壁柱を縦に二等分割し、梁と一体化した門型P C a部材を、柱部材のシース管に鉄筋（P C 鋼棒）を挿入し、鉛直接合部にはコッターと目荒しを施し、その接合部とシース管内をグラウト充填することによりフレームを一体化させるものである。今回のP C a壁柱鉛直接合部の直接せん断要素実験の目的は、①コンクリート面の目荒しによる摩擦抵抗、②P C 鋼棒のプレストレスによる圧着効果、③シース管に挿入した鉄筋およびP C 鋼棒（以下だぼ筋）のダウエル効果、④コンクリート面に設けたコッターのせん断抵抗、⑤接合面に充填するグラウト強度の影響の項目を確認することである。

2. 実験概要

2. 1 試験体

試験体は、P C a壁柱の鉛直接合部を取り出したS字型試験体とし、試験体の形状および配筋を図-1に示す。試験体の接合部寸法は $B \times D \times H = 285 \times 200 \times 625\text{mm}$ で、グラウト材を充填するクリアランスは実施工と同じ20mmとした。また、コッターは実施工と同じ面積比（コッター投影面積/接合面全面積=40%）となるよう $b \times h = 200 \times 125\text{mm}$ とし深さ d も実施工と同じ25mmとした。コッターは125mm間隔に2箇所配置し、各コッターの中心にだぼ筋（鉄筋及びP C 鋼棒）を挿入するシース管（ $\phi = 26$ ）を設置した。目荒しは化粧型枠によるはつり模様とした。

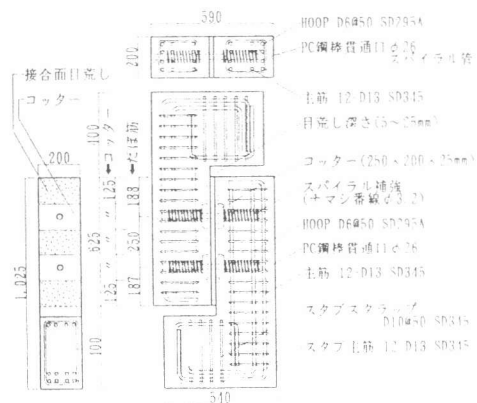


図-1 試験体図

*1 矢作建設工業（株）建築技術部 技術開発室 主任 (正会員)
 *2 矢作建設工業（株）建築技術部 技術開発室 係長 (正会員)
 *3 大阪工業大学 工学部 建築学科 助教授 博(工) (正会員)

表-1に試験体のパラメータを示す。プレストレス応力(プレストレス量/接合部面積)は0.0, 3.5, 7.0, 10.5kg/cm²の4種類、コッターの有無、目荒しの深さは0mm, 5mm, 16mm, 25mmの4種類、だぼ鉄筋はD13, D16の鉄筋(SS試験体)、φ(直径)11mmのP C鋼棒(SP試験体)の3種類、シース管の周囲に配するスパイラル筋(φ3.2)補強の有無、グラウト材は非金属系と金属系の2種類である。

2.2 材料特性

(1) コンクリートおよびグラウト材

コンクリートおよびグラウト材の性質を表-2に示す。コンクリートは、設計基準強度400kg/cm²に対して実験時の強度は407.6kg/cm²、グラウト材は非金属系の製品試験圧縮強度600kg/cm²に対して718.5kg/cm²、金属系では800kg/cm²に対して702.7kg/cm²であった。

(2) だぼ鉄筋およびP C鋼棒

だぼ筋に使用した鉄筋およびP C鋼棒の性質を表-3に示す。鉄筋はD13に超高強度鉄筋USD685を使用し、D16にはSD490を使用した。また、P C鋼棒はφ11mmのC種1号を使用した。

2.3 加力および測定方法

加力装置の概要を図-2に、加力状況を写真-1に示す。加力方法は、試験体を立てた状態で上端部をピン支持とし、大阪工業大学構造実験センター所有の200tonアムスラー万能試験機により、一方単調載荷とした。

試験体の変形量の測定方法を図-3に示す。鉛直方向の相対滑り量は鉛直にセットした2本の変位計で、水平方向の目開き量は水平にセットした2本の変位計により測定した。また、だぼ筋には、接合面中央部より左右95mm位置の上下に、また同中央部より片側195mm位置の上下の計6箇所に変位ゲージを貼付した。

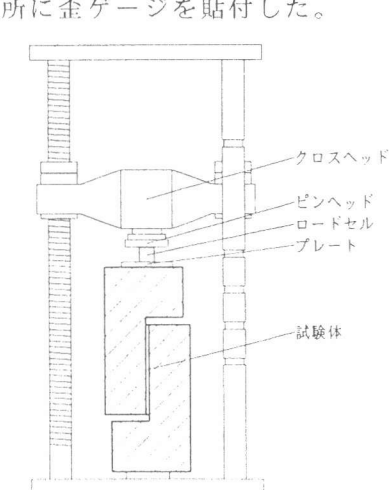


図-2 加力装置

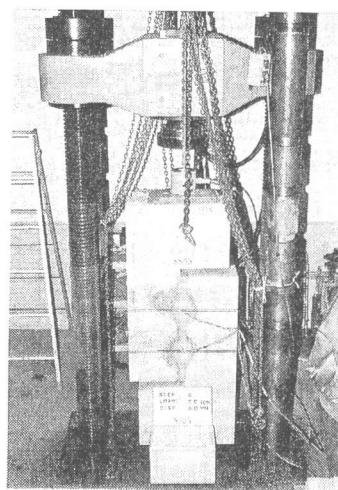


写真-1 加力状況

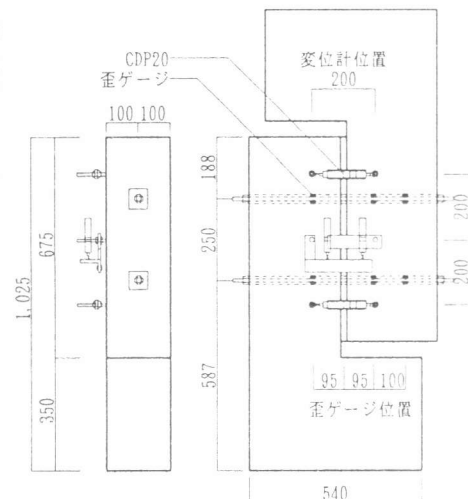


図-3 変位・歪測定位置

表-1 試験体パラメータ

試験体名	プレストレス量 kg/cm ²	ダウエル筋	コッター	スパイラル筋	目荒し 深さmm	グラウト強度 kg/cm ²
SS01	0.0	D13	無	無	無	600
SS02	0.0	D13	無	無	16	600
SS03	0.0	D16	無	無	16	600
SS04	0.0	D13	有	無	無	600
SS05	0.0	D13	有	有	16	600
SS06	0.0	D13	有	有	16	600
SS07	0.0	D13	有	有	16	1000
SS08	0.0	13 45	有	有	16	600
SS09	0.0	D13	有	無	16	600
SP10	0.0	PC11	無	無	16	600
SP11	2.8	PC11	無	無	無	600
SP12	2.8	PC11	無	無	5	600
SP13	2.8	PC11	無	無	16	600
SP14	2.8	PC11	無	無	16	600
SP15	2.8	PC11	無	無	16	1000
SP16	2.8	PC11	無	有	16	600
SP17	2.8	PC11	無	無	25	600
SP18	2.8	PC11	有	無	無	600
SP19	2.8	PC11	有	無	16	600
SP20	5.6	PC11	無	無	16	600
SP21	8.4	PC11	無	無	16	600

表-2 コンクリート・グラウトの材料特性

試験体	圧縮強度 kg/cm ²	割裂強度 kg/cm ²	ポアソン比 10 ⁻⁶	E _s 数 10 ⁵ kg/cm ²
コンクリート	407	49.2	0.155	2.81
グラウト 金属系	701	60.1	0.213	2.67
グラウト 非金属系	718	60.3	0.194	2.44

表-3 鉄筋・P C鋼棒の材料特性

試験体	降伏強度 t/cm ²	引張強度 t/cm ²	降伏歪度 10 ⁻⁵	ヤング係数 10 ⁶ kg/cm ²
D13	7.36	8.48	393	1.96
D16	5.50	7.01	316	1.95
PC11	15.1	15.7	914	2.11

3. 実験結果

3. 1 耐力

実験耐力結果の一覧を表-4に示す。コッターを有した試験体の耐力が全体的に高く、プレストレス量が大きいほど耐力が高い。また、目荒しの深さが深いほど滑りが生じた後の安定耐力（滑り発生後、滑り量のみ増加し、荷重がほぼ一定な状態での耐力）が高かった。

3. 2 ひび割れ発生状況

ひび割れ発生状況を4タイプに分類し図-4に示す。目荒し・コッターを共に有しない試験体は接合面に沿った縦ひび割れが一直線に発生し(同図a)、目荒しを有し、コッターを有しない試験体は接合面に沿った縦ひび割れと目荒しの凹凸部分からコンクリート部に斜め方向のひび割れが多数発生した(同図b)。また、目荒しが無く、コッターを有する試験体(同図c)及び目荒し・コッターを共に有する試験体(同図d)は、コッター内グラウト部及びコンクリート部に斜めひび割れが発生した。目荒しやコッターの凹凸により、接合面にかみ合い作用が形成されせん断応力の伝達がなされた。

表-4 実験耐力結果一覧

試験体	パラメータ (kg/cm ²)				ひび割れ耐力		最大耐力		安定耐力	
	コッター	目荒し	鉄筋	グラウト	スワイル	PC耐力	ton	kg/cm ²	ton	kg/cm ²
SS01	無	無	D13	600	無	0	28.1	22.5	28.1	15.6
SS02	無	有	D13	600	無	0	12.1	9.6	27.8	24.3
SS03	無	有	D16	600	無	0	16.1	12.9	32.0	29.4
SS04	有	無	D13	600	無	0	20.1	16.0	40.2	27.9
SS05	有	有	D13	600	有	0	20.0	16.0	44.5	27.0
SS06	有	有	D13	600	有	0	14.0	11.2	47.4	26.4
SS07	有	有	D13	1000	有	0	17.1	13.7	48.5	28.8
SS08	有	有	D13	600	有	0	14.1	11.2	20.9	2.3
SS09	有	有	D13	600	無	0	15.0	12.0	48.1	29.2
SP10	無	無	P11	600	無	0	10.0	8.0	25.4	23.8
SP11	無	無	P11	600	無	2.8	33.0	26.4	33.0	18.0
SP12	無	有	P11	600	無	2.8	10.3	8.3	18.7	16.7
SP13	無	有	P11	600	無	2.8	18.1	14.5	26.3	25.0
SP14	無	有	P11	600	無	2.8	18.1	14.5	25.6	24.1
SP15	無	有	P11	1000	無	2.8	14.0	11.2	26.2	24.4
SP16	無	有	P11	600	有	2.8	13.9	11.1	26.5	25.5
SP17	無	有	P11	600	無	2.8	10.1	8.1	27.2	26.4
SP18	有	有	P11	600	無	2.8	24.0	19.2	40.1	32.1
SP19	有	有	P11	600	無	2.8	14.0	11.2	43.9	28.4
SP20	無	有	P11	600	無	5.6	21.1	16.9	28.5	27.0
SP21	無	有	P11	600	無	8.4	23.1	18.5	34.5	30.0

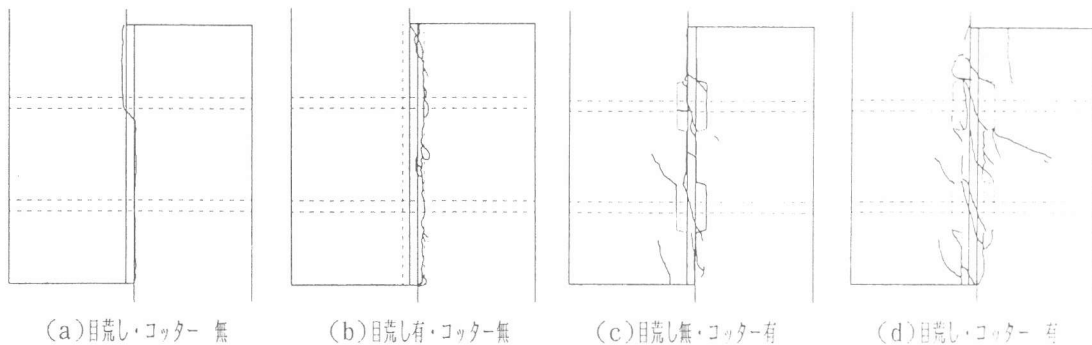


図-4 ひび割れ図

3. 3 荷重-滑り関係

荷重 τ (実験値/接合部面積) と鉛直方向の相対滑り量 δv の関係を各パラメータ毎に分類して図-5に示す。各パラメータが耐力と変形に及ぼす影響を以下に述べる。

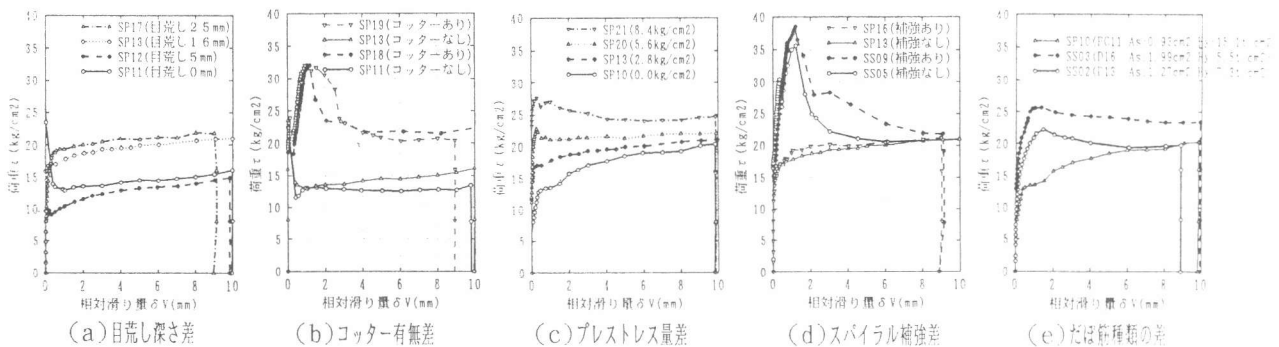


図-5 荷重-相対滑り関係

(1) 目荒しによる影響：目荒しの有無と深さに着目してコッターを有しない試験体(SP11, 12, 13, 17)の滑り発生後の安定耐力を見ると(図-5 a)、目荒しを有しない試験体(SP11)に対し目荒し5mm(SP12)の効果は確認できず、目荒し16mmでは安定耐力が向上した。従って、目荒しは5mm程度の浅いものでは効果が少なく、目荒しは16mm以上の深さを有することで、効果が発揮できる。

(2) コッターによる影響：コッターを有する試験体(SS04, SP18)の最大耐力は 32kg/cm^2 以上を示し、コッターを有しない試験体(SS01, SP11)に対して2倍以上耐力が高い(図-5 b)。コッターの有る場合はひび割れ図を見ると、コッター部分における圧縮ストラットにより、せん断抵抗しているものと推測できる。最大耐力は滑り量が $0.8\sim 1.2\text{mm}$ の範囲で生じた。コッターを有する全ての試験体は、最大耐力後の耐力低下が激しく、その後の耐力は $20\sim 24\text{kg/cm}^2$ の間で安定した。

(3) プレストレスによる影響：ひび割れ発生耐力および最大耐力はプレストレス量が大きくなるにしたがって上昇する(図-5 c)。また、プレストレス量が小さい場合は滑り量が 6.0mm 以降は滑り量の増加と共に耐力が徐々に上昇する。

(4) スパイラル筋補強による影響：ひび割れ発生耐力および最大耐力におけるスパイラル補強の影響は確認できなかった(図-5 d)。

(5) グラウト強度差による影響：金属系グラウトと非金属系グラウトの材料試験における圧縮強度の耐力差がなかったため、グラウト種類による影響の差は確認できなかった(表-2)。

(6) だぼ筋種類差による影響：試験体SS02, SS03とSP10を比較すると(図-5 e)、ひび割れ発生耐力および最大耐力共に鉄筋(D13, D16)をだぼ筋とした試験体が高く、P C鋼棒($\phi 11$)を用いたものが低い。また、鉄筋種別による試験体耐力は、SD490(D16)が高く(SS03)、USD685(D13)が低い(SS02)。

4. 耐力の評価

4.1 目荒しの効果

目荒しによる安定耐力への効果の関係を図-6に示す。縦軸は目荒しを有しない試験体を基準とした耐力差：滑り量 6.0mm 時を、横軸は目荒し深さを表す。安定耐力時(以下、「滑り量 6.0mm 時」を指す)では、目荒し深さ効果に対する係数(耐力差/目荒し深さ) $=0.1$ となる。従って目荒しの深さによる耐力上昇は今回の実験パラメータ範囲である目荒し深さを $0\text{mm}\sim 25\text{mm}$ の範囲に限定して係数 0.1 を適用することが妥当と考えられる。

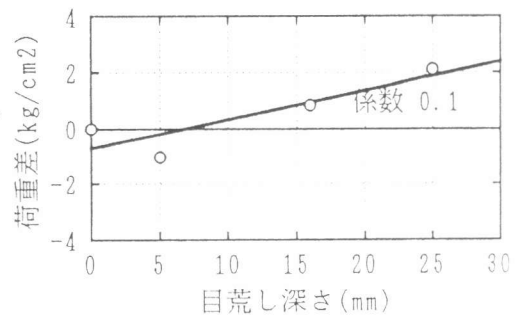


図-6 目荒し効果

4.2 コッターの効果

コッターの効果(コッター効果/接合部面積)を、コッターを有する試験体(SS04, SP18)の最大耐力と、コッターの有無以外は同じパラメータの試験体(SS01, SP11)の安定耐力の差で示す。コッターが効果を最大発揮する滑り量 $0.8\text{mm}\sim 1.5\text{mm}$ の範囲におけるコッターの有無による耐力差は、SS試験体では、 19.6kg/cm^2 、SP試験体では 17.6kg/cm^2 であり、平均 18.5kg/cm^2 である。この値はコッターそのものの破壊耐力に関する計算値 16.1kg/cm^2 とほぼ一致する。従って、コッターの効果は既往の計算式 [1] 次式 (1) で評価した。

$$\begin{aligned}
 Q_{1s} &= 1.5 \cdot \sqrt{f' \cdot c_1} \sum a_i \cdot w_i & Q_{2s} &= 1.5 \cdot \sqrt{f' \cdot c_2} \sum b_i \cdot w_i \\
 Q_s &= \min(Q_{1s}, Q_{2s}) & &
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

f'_{c1}, f'_{c2} : 接合面両側のコンクリート圧縮強度(kg/cm²) a_i, b_i : コッター付け根部高さ(cm)

Q_s : コッター耐力(kg) w_i : コッター幅(cm)

4. 3 プレストレス量の効果

プレストレス量の効果を図-7に示す。縦軸にプレストレス応力0.0kg/cm²を基準とした耐力差:剛性最大低下点時(P-δ関係において剛性が最も低下する荷重)及び安定耐力時を、横軸にプレストレス量を表す。剛性最大低下点時における、係数(耐力差/プレストレス量)は1.8であり、プレストレスによる効果が大きく、安定耐力時における、係数は0.6であった。従って、プレストレス量に対する効果は、剛性最大低下点時には1.8を、安定耐力時には0.6をプレストレス量の比例係数として用いた。

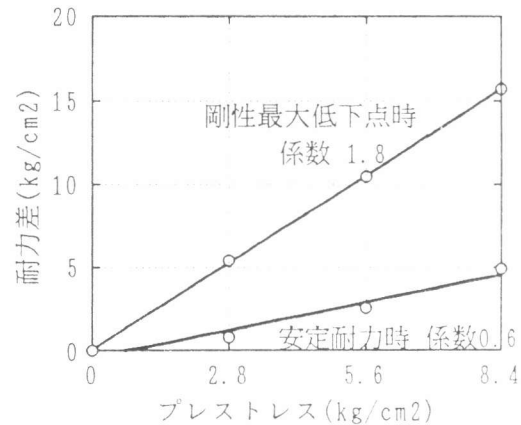


図-7 プレストレス量の効果

4. 4 だぼ筋の効果

接合面における、だぼ筋単体のダウエル効果を求める。ここで実験値は摩擦抵抗を含んだ耐力であるため、ダウエル効果のみの耐力は算出できなかった。そこで、ダウエル効果は既往の計算式、式(2)[1]で表されると仮定する。

$$D = 1.65 \cdot a_v \cdot \sqrt{f'_c} \cdot F_v \quad (2)$$

D : だぼ筋1本のダウエル効果(kg) a_v : だぼ筋断面積(cm²) f'_c : グラウト圧縮強度(kg/cm²)
 F_v : だぼ筋降伏強度(kg/cm²) ※ f'_c はジョース管によるコンファインド効果を考慮した値を使用した[2]

4. 5 接合面の摩擦係数

目荒し・コッターを共に有しない試験体(SP11)について、接合面の摩擦係数を既往の計算式、式(3)[1]を利用して求める。式(3)の左辺から式(2)によって算定したダウエル効果の項を、右辺から外部から加わる直応力の項を差引くと式(4)となる。この式(4)を使用して基準とする摩擦係数 μ_0 を算出する。

$$\tau = \mu \cdot \{ (f_y \cdot P_s) + \sigma n \} \quad (3)$$

$$\tau - \tau_d = \mu_0 \cdot (f_y \cdot P_s) \quad (4)$$

τ : 安定せん断応力度(実験値/接合部面積)(kg/cm²) μ : 摩擦係数 f_y : だぼ筋降伏応力度(kg/cm²)
 P_s : だぼ筋断面積比(だぼ筋面積/接合部面積) σn : 境界面に作用する外部からの直応力度(kg/cm²)
 τ_d : 単位面積当たりのダウエル効果(ダウエル効果/接合部面積)(kg/cm²) μ_0 : 基準摩擦係数

ここで、接合面に滑り発生後、せん断応力を伝達する要素は、だぼ筋によるダウエル作用と、摩擦による摩擦抵抗の2つの要素であるため、安定耐力がダウエル効果と摩擦効果の合計で表される。従って式中の τ の値には安定耐力を使用した。

つぎに、 f_y の値に使用しただぼ筋の降伏耐力に関して検討した。だぼ筋に貼付したゲージの値(接合面より9.5mmの位置)は降伏歪量に達しなかった。ここで図-8に示すように、接合面でだぼ筋周囲のグラウト部が支圧破壊しており、だぼ筋が接合面近傍で降伏していると仮定する。だぼ筋が降伏するまでの支圧破壊長さ: $C(C = (f_y \cdot a_v \cdot \sin \theta) / f'_c)$ と滑り量の関係からだぼ筋の歪量を求

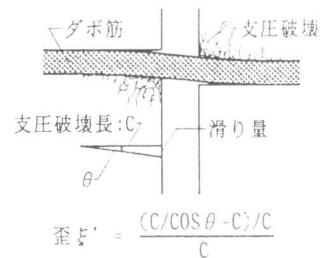


図-8 だぼ筋降伏モデル図

めると、降伏歪量を上回っていることが確認された。そこで、ここでは f_y の値としてだぼ筋降伏耐力を使用した。結果として目荒し・コッターを共に有しないSP11の基準摩擦係数は $\mu_0 = 0.25$ 、と求められた。次節で提案する接合面のせん断耐力評価式はこの値を基準値とした。

4. 6 実験値と計算値の比較

安定耐力の計算値の算出式を式(5)に示す。本式はSP11の摩擦係数 μ_0 を基準値とし、目荒しの効果による摩擦耐力、だぼ筋によるダウエル効果、コッターによる効果を付加耐力値として累加したものである。この式(5)は τ_c を付加していることにより、コッターを有する試験体においては最大耐力を示し、コッターの無い試験体においては安定耐力を示す。

$$\tau = (\mu_0 + K \cdot hr) f_y \cdot Ps + \tau_d + \tau_c \quad (5)$$

τ : 安定せん断応力度計算値(kg/cm²) μ_0 : 基準摩擦係数(0.25) K : $0.1 / (f_y \cdot Ps) = 0.0044$ (4章1項による)

hr : 目荒し深さ(mm) f_y : だぼ筋降伏応力度 Ps : だぼ筋断面積比(だぼ筋面積/接合部面積)

τ_d : 単位面積当たりのダウエル効果(ダウエル効果/接合部面積)(kg/cm²) τ_c : SP18最大応力度 - SP11安定応力度(17.7)

※ K は $K = 0.1 / (f_y \cdot Ps) = 0.1$ という係数はSP試験体により求めたため、 f_y 、 Ps はSP試験体の値を用いた。

実験結果と式(5)による算定結果を表-5に示す。この表より、SS08、SP12を除き、実験値/計算値は1~1.3程度を示している。従って計算値はほぼ実験値の下限值を表すことがわかる。

表-5 安定耐力の実験値と計算値の比較

試験体	パラメータ				基準摩擦係数 μ_0	比例係数 K	目荒し深さ hr mm	$f_y \cdot Ps$ kg/cm ²	摩擦耐力 P kg/cm ²	だぼ耐力 τ_d kg/cm ²	コッター耐力 τ_c kg/cm ²	計算値 $P + \tau_d + \tau_c$ kg/cm ²	実験値 kg/cm ²	実験値 計算値
	コッター	目荒し	鉄筋	グラウト PC応力										
SS01	無	無	D13 600	0	0.25	0.0044	0	14.9	3.73	8.4	0.0	12.1	12.5	1.02
SS02	無	16	D13 600	0	"	"	16	"	4.79	8.4	0.0	13.2	19.5	1.47
SS03	無	16	D16 600	0	"	"	16	17.5	5.60	11.4	0.0	17.0	23.5	1.38
SS04	有	無	D13 600	0	"	"	0	14.9	3.73	8.4	17.7	29.8	*32.1	1.07
SS05	有	16	D13 600	0	"	"	16	"	4.79	8.4	17.7	30.9	*35.6	1.15
SS06	有	16	D13 600	0	"	"	16	"	4.79	8.4	17.7	30.9	*37.9	1.23
SS07	有	16	D13 1000	0	"	"	16	"	4.79	8.3	17.7	30.9	*38.8	1.26
SS08	有	16	D13 600	0	"	"	16	"	4.79	8.4	17.7	30.9	*16.7	0.54
SS09	有	16	D13 600	0	"	"	16	"	4.79	8.4	17.7	30.9	*38.4	1.24
SP10	無	16	P11 600	0	0.25	0.0044	16	22.5	7.22	8.8	0.0	16.0	19.0	1.19
SP11	無	無	P11 600 2.8	2.8	"	"	0	"	5.64	8.8	0.0	14.4	14.4	1.00
SP12	無	5	P11 600 2.8	2.8	"	"	5	"	6.13	8.8	0.0	14.9	13.4	0.90
SP13	無	16	P11 600 2.8	2.8	"	"	16	"	7.22	8.8	0.0	16.0	20.0	1.25
SP14	無	16	P11 600 2.8	2.8	"	"	16	"	7.22	8.8	0.0	16.0	19.8	1.24
SP15	無	16	P11 1000 2.8	2.8	"	"	16	"	7.22	8.7	0.0	15.9	19.5	1.22
SP16	無	16	P11 600 2.8	2.8	"	"	16	"	7.22	8.8	0.0	16.0	20.4	1.27
SP17	無	25	P11 600 2.8	2.8	"	"	25	"	8.12	8.8	0.0	16.9	21.2	1.25
SP18	有	無	P11 600 2.8	2.8	"	"	0	"	5.64	8.8	17.7	32.1	*32.1	1.00
SP19	有	16	P11 600 2.8	2.8	"	"	16	"	7.22	8.8	17.7	33.7	*35.2	1.04
SP20	無	16	P11 600 5.6	5.6	"	"	16	"	7.22	8.8	0.0	16.0	21.6	1.35
SP21	無	16	P11 600 8.4	8.4	0.25	0.0044	16	"	7.22	8.8	0.0	16.0	24.0	1.50

※実験値における*は最大応力度を記述してある

5. 結論

鉛直接合部のせん断伝達性能実験を行なった本研究により以下の項目が明らかとなった。

- ①コッターのせん断抵抗は最大耐力に大きく影響し、その効果は既往の計算式とよく一致する。
- ②目荒しによる効果は、目荒し深さが16mm以上でみられ、安定耐力の向上に効果がある。
- ③プレストレスによる効果はひび割れ耐力、安定耐力共に耐力向上に効果がある。
- ④安定耐力および最大耐力における計算値は実験値と比較的によく一致する。

謝辞：本研究を行うにあたり、大阪工業大学の卒研究生、永井貴志（現(株)鴻池組）、長野満佐志（現旭化成ホームズ(株)）両君の多大なる協力に、ここに記して謝意を表します。

(参考文献)

- [1] 建設省建築研究所：プレキャストコンクリートラーメン構造に関する研究報告書
- [2] 阪井他：コンクリートの強度・変形特性推定式：日本建築学会大会学術講演梗概集、pp307、1995.8