

論文 PCa 構造接合部における接合幅のせん断伝達に与える影響

斉 煒^{*1}・榎谷 榮次^{*2}・伊藤 嘉則^{*3}

要旨：プレキャスト構造における接合幅がせん断伝達に与える影響を調べるため、PCa 接合部のせん断伝達性能に着目し、シアキーを有する試験体に対して変位制御で直接せん断実験を行った。その結果、接合幅は、接合部のせん断伝達に大きな影響を与えることが検証された。この接合幅の影響を考慮し、せん断伝達が接合部に形成される圧縮ストラットモデルから導かれたシアキーのせん断抵抗と接合筋の摩擦抵抗の有効な組み合わせによって行われると考えて、接合部のせん断抵抗モデルを提案した。

キーワード：シアキー、接合幅、せん断抵抗、圧縮ストラット、接合筋のせん断摩擦抵抗

1. はじめに

プレキャスト鉄筋コンクリート構造(以降、PCa 構造と呼ぶ)は、接合部の保有耐力により、その建物の耐震性能が大きく左右される。現在、PCa 構造における構造規定は「現場打ち同等型プレキャスト鉄筋コンクリート構造設計指針・同解説」¹³⁾に準拠しており、接合部の設計には「壁式プレキャスト鉄筋コンクリート造設計規準・同解説」²⁾により詳細が定められている。これらの評価式では、実際の PCa 造の施工に必要とされる「接合幅」による影響因子が考慮されていない。本研究は、既往の研究^{11),12)}を継続する一環として、PCa 要素試験体を対象として、シアキーの形状と接合筋径及び接合幅が接合部耐力に及ぼす影響に関して調べることを目的とした。また、得られた実験結果に対して、支圧抵抗メカニズムに基づいた接合筋のせん断摩擦効果と接合部に形成される圧縮ストラットモデルから導かれたせん断伝達能力評価式を用いて検証した。以下に研究成果を報告する。

2 実験概要

2.1 試験体

本研究に用いた試験体は、図-1 に示すように、架構式、壁式を問わない PCa 構造における鉛直接合部応力伝達要素を局部的に想定したもの

である。試験体は、二つの PCa 部の中央部にモルタルと接合筋で 30、60、120、200mm の幅を有する接合部を構成した。また、接合幅 0mm とした PCa-RC 造試験体も製作した。試験体の変動要因は、表-1 に示すように、シアキーの形状と接合筋径及び本数とした。シアキー形状は、シアキー幅深さ比 b/h によって C1 タイプ($b/h=15\text{mm}/75\text{mm}$)と C3 タイプ($b/h=15\text{mm}/45\text{mm}$)2 種類のシアキーを接合界面に配置した。

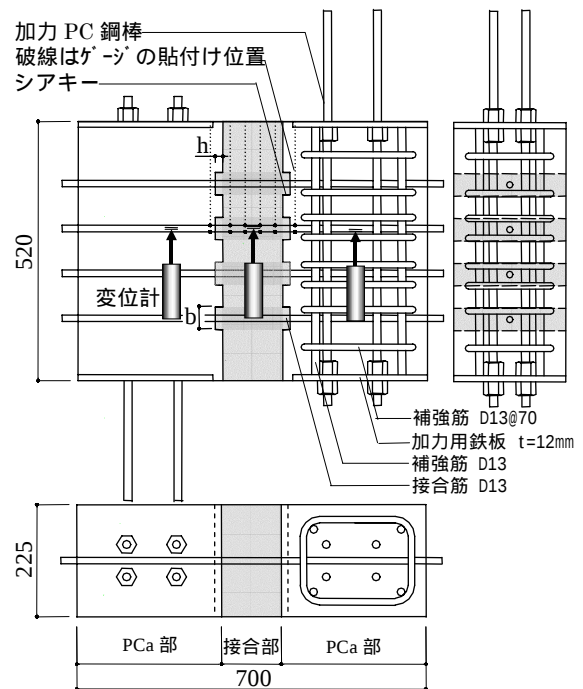


図-1 試験体図

*1 関東学院大学大学院生 工学部建築学専攻 工修(正会員)

*2 関東学院大学教授 工学部建築学科 工博(正会員)

*3 建材試験センター - 中央実験所 構造グループ 工修(正会員)

表-1 試験体一覧表

No	試験体	変動要因			
		接合幅 mm	鉄筋 (直径×本数)	シアキー	
				幅×深	数量
1	JPC-10×2-0-C1	0	D10×2	75×30	2
2	JPC-10×2-30-C1	30			
3	JPC-10×2-60-C1	60			
4	JPC-10×2-120-C1	120			
5	JPC-10×2-200-C1	200			
6	JPC-13×2-0-C1	0	D13×2		
7	JPC-13×2-30-C1	30			
8	JPC-13×2-60-C1	60			
9	JPC-13×2-120-C1	120			
10	JPC-13×2-200-C1	200			
11	JPC-16×2-0-C1	0	D16×2		
12	JPC-16×2-30-C1	30			
13	JPC-16×2-60-C1	60			
14	JPC-16×2-120-C1	120			
15	JPC-16×2-200-C1	200			
16	JPC-13×3-120-C3	120	D13×3	45×15	3
17	JPC-13×3-200-C3	200			
18	JPC-13×4-120-C3	120	D13×4		4
19	JPC-13×4-200-C3	200			
20	JPC-13×5-120-C3	120	D13×5		5

接合筋径は、D10、D13、D16(SD345)を使って配筋した。また、接合筋径に対する定着長さの影響をなくすため、更に接合筋末端に定着ワッシャーと鉄筋ネジで固定した。試験体製作方法は、あらかじめ型枠を水平に設置し、接合筋(SD345)を2つのPCa部に配筋し、PCa部にコンクリートを打設した。その後中央接合部に型枠としての発泡スチロール材を撤去して、接合境界面には摩擦抵抗をなくすため表面にグリスを塗布して接合部にモルタルを打設した。各試験体の材料性状は表-2及び表-3に示す。

2.2 加力方法と測定方法

加力方法は、図-2に示すように試験体を垂直に設置し、試験体のPCa部に埋め込んだPC鋼棒によって、水平方向から接合部の中心線上に、押し引き両用のオイルジャッキ(容量1MN)を用いてせん断力を与えるS型加力方式で行った。なお試験体を設置する時に使用した鉛直方向のジャッキは接合面に垂直方向には外力を作用させていない。変位は、図-1に示すように、2つのPCa部及び接合部に設置した高感度変位計によってPCa部間及びPCa-接合部間の相対すべり変位を測定した。加力スケジュールは、No.1

～No.15試験体には、PCa部間の相対すべり変位が±0.5、1、2、4、8、12mmの6サイクルに+15mmの押し切りを加えた変位制御による正負交番繰り返し载荷を行った(No.16～No.20試験体では正側のみに繰り返し载荷を行った)。

表-2 コンクリートの材料性状

No	PCa部コンクリート			接合部モルタル*		
	σ_{Bj}	F_t	E_c	σ_{Bp}	F_t	E_c
	N/mm ²	N/mm ²	kN/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	kN/mm ²
1～2	24.4	2.4	22.1	44.6	1.8	22.0
3～5	26.0	2.2	28.2	41.5	1.8	22.2
6～8	25.2	2.3	24.9	37.5	2.0	22.6
9～10	24.2	2.2	24.7	41.0	2.2	22.0
11～13	23.4	2.1	23.3	38.2	2.3	23.3
14～15	24.0	2.2	23.2	43.2	2.1	23.7
16～18	22.7	2.3	21.7	46.1	2.2	14.0
19～20	24.5	2.2	20.8	42.9	2.1	21.4

σ_{Bj} 、 σ_{Bp} :圧縮強度、 F_t :割裂強度、 E_c :ヤング係数

*:接合幅0の試験体には、RC部コンクリート強度とした。

表-3 鉄筋の機械性質

種類	降伏強度 σ_y [N/mm ²]	引張強度 σ_{max} [N/mm ²]	ヤング係数 E_s [$\times 10^5$ N/mm ²]	伸率 [%]
D10(SD345)	455	607	1.92	16
D13(SD345)	388	538	1.91	19
D16(SD345)	403	619	2.04	23

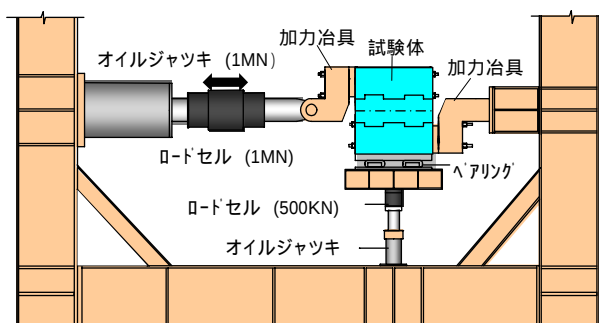


図-2 加力図

3 実験結果

3.1 ひび割れ及び破壊性状

各試験体の代表的な接合部ひび割れ性状を図-3に示した。試験体接合部の界面にグリスを塗布しているため、加力初期より接合界面に初ひび割れが生じていた。但し、接合幅、シアキー形状による変化は見受けられない。その後、接合幅0mmは、シアキー隅角部から加力鉄板を結ぶ斜めひび割れ(図-3(a))、接合幅30と60mm

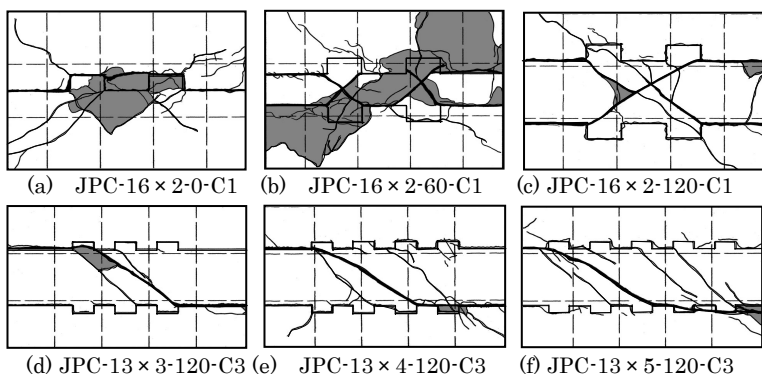


図-3 各試験体におけるひび割れ性状

では、1組のシアキー隅角部を結ぶ斜めひび割れ(図-3(b))、接合幅120と200mmは、シアキー2組の隅角部を結ぶ斜めひび割れ(図-3(c))を生じた。シアキーC3タイプの試験体には、図3のd、e、fに示すように、初ひび割れ後にシアキーから約45度の斜めひび割れが発生した。その後、荷重の増大によって、隣接2個のシアキーの隅角部を結ぶひび割れ(1)を生じた。最終破壊性状は、各試験体ともに端部のシアキーと端部から3つ目のシアキーを結ぶ斜めひび割れ(2)の急激な進展により滑り面が形成され、荷重が急激に劣化し、終局に至っている。

既往の論文⁷⁾によれば、シアキーの深さ/幅比がシアキーの破壊モードを決めることが指摘されている。本研究のように接合幅がある場合、殆どシアキー内の斜めひび割れで最大耐力が得られ、脆性的な破壊を示すことが判った。これは、接合幅を有する試験体では、シアキーがせん断(支圧)破壊耐力に達する前に、接合部内に形成された圧縮ストラットがコンクリート圧縮強度に達したためと考えられる。

3.1 履歴性状及び強度性状

シアキーを有する試験体では、図-4に示すよ

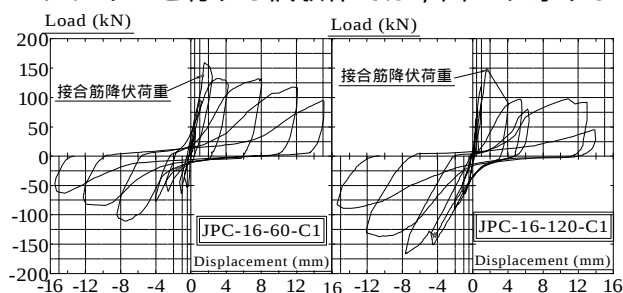


図-4 試験体における荷重-変位曲線

うに、加力初期は殆どすべり変位は生じておらず、多くの試験体が初ひび割れによりすべり変位を生じている。そして、接合部内に斜めひび割れ破壊を生じると、急激に耐力が低下し、接合筋が降伏を示した。その後、変位の増加に伴いながら緩やかに耐力の低下を続けて、終局(変位15mm)に至る。最大耐力でシアキーによる変位の拘束及びせん断伝達が

支配的であることが判り、すべての試験体において脆性的な破壊を示した。

各試験体に対する、最大荷重時の耐力及び変位を表-4に示す。ここで、接合部のコンクリート強度及び接合筋の降伏強度の影響を取り除くために最大せん断応力 τ_{max} を $\sqrt{\sigma_{Bj} \cdot \sigma_y}$ で除して無次元化した指標でせん断応力と接合幅の関係を比較した。図-5に示すように、最大耐力は、接合幅が大きくなるにつれて、小さくなるが、接合幅が120と200mmでは大きな差は見られなかった。また、シアキー形状の違いが、せん断力に与える影響を調べるために、既往の研究⁽¹²⁾によるシアキー深さ15mm(深さ幅比が15/75)の試験体と本研究のシアキー深さ30mm(深さ

表-4 各試験体の強度一覧表

No	試験体	最大耐力			
		+サイクル		-サイクル	
		耐力 (kN)	変位 (mm)	耐力 (kN)	変位 (mm)
1	JPC-10-0-C1	155.2	1.3	-92.6	-1.5
2	JPC-10-30-C1	190.6	3.2	-91.0	-2.0
3	JPC-10-60-C1	182.7	3.6	-81.8	-2.1
4	JPC-10-120-C1	115.3	3.4	-73.9	-2.0
5	JPC-10-200-C1	86.2	3.8	-88.2	-1.8
6	JPC-13-0-C1	267.5	3.1	-134.0	-4.0
7	JPC-13-30-C1	168.0	4.0	-137.4	-4.1
8	JPC-13-60-C1	149.7	2.0	-123.6	-3.1
9	JPC-13-120-C1	130.2	3.5	-123.6	-2.1
10	JPC-13-200-C1	83.2	1.1	-118.7	-3.2
11	JPC-16-0-C1	352.2	3.8	-132.5	-3.5
12	JPC-16-30-C1	191.6	3.0	-141.8	-0.9
13	JPC-16-60-C1	162.6	0.9	-110.8	-7.5
14	JPC-16-120-C1	148.6	1.9	-142.3	-2.0
15	JPC-16-200-C1	110.3	2.0	-102.5	-2.8
16	JPC-13x3-120	141.2	2.0	--	--
17	JPC-13x3-200	110.8	2.4	--	--
18	JPC-13x4-120	208.9	1.8	--	--
19	JPC-13x4-200	198.6	3.1	--	--
20	JPC-13x5-120	270.4	2.1	--	--

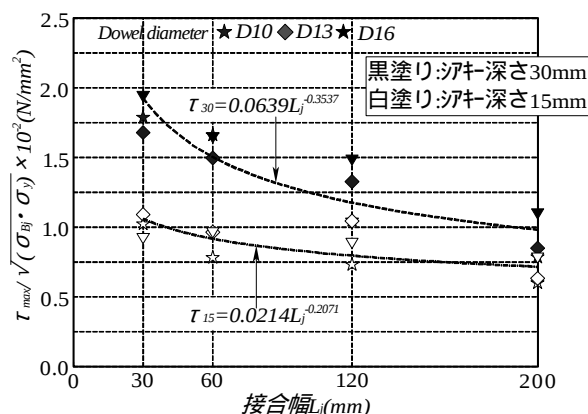


図-5 せん断応力度 - 接合幅の関係

幅比が 30/75)試験体の最大耐力を図-5にプロットした。変動要因がシアキーの深さのみである場合，シアキーの深さが大きい方(15mm 30mm)が，最大せん断応力度は増大する。これは，接合部に形成された圧縮ストラットの面積がシアキー支圧面積(シアキーの深さ)に強く依存しているためと考えられる。

実験結果と建築学会式²⁾及び望月・榎谷・永坂式⁸⁾の比較を図-6に示した。同図の近似曲線によって，接合幅の影響を考慮していない既往の接合部せん断耐力式(建築学会式，望月・榎谷・永坂式)は接合幅の増大につれ，実験値/計算値の値は0.8～1.2の範囲から離れていく傾向が見られる。これらの式は，いずれも過大評価になっていることが判る。

3.3 接合筋のひずみ分布

図-1に示すように，接合筋表裏に貼り付けたゲージから測定されたひずみより，弾性段階における接合筋の軸方向引張力 N 及び曲げモーメント M が下式で得られる。

$$N = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \cdot \frac{\pi \cdot dr^2}{4} \quad (1)$$

$$M = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cdot \frac{\pi \cdot dr^3}{32} \quad (2)$$

式(1)及び式(2)を用いて計算された結果によると，各試験体では，加力初期より全体に引張力が発生しており，初ひび割れと共に曲げモーメントが発生する。最大耐力時には，概ね接合筋降伏軸力の40%～90%程度の引張力が発生し

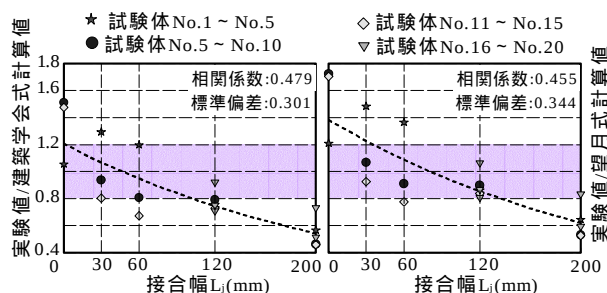


図-6 実験値と建築学会式及び望月式の比較

ており，接合幅が小さくなるにつれて引張力は大きくなっている。また，各試験体の最大耐力レベルにおける接合筋の引張軸力 N_{max} 及び接合筋の曲げモーメント M_{max} に対して，接合筋の降伏引張力 $N_y (= \sigma_y \cdot \pi dr^2/4)$ 及び降伏曲げモーメント $M_y (= \sigma_y \cdot \pi dr^3/32)$ との比を求めると，接合筋の引張軸力低減係数 $\gamma_s (\gamma_s = N_{max}/N_y)$ と曲げモーメント低減係数 $\gamma_m (= M_{max}/M_y)$ が得られる。これより各低減係数と接合幅の関係を図-7に示す。この図によると，最大耐力時において接合筋の引張(平均 $N_{max}/N_y = 0.701$)によるせん断摩擦は，接合筋の曲げモーメント(平均 $M_{max}/M_y = 0.185$)によるダウエル抵抗より大きく支配されていることが判る。また，接合幅が大きくなるにつれて，軸力低減係数 γ_s が低下している傾向が見られる。これは，接合幅の違いが接合筋のせん断摩擦抵抗に大きく影響を与えているためと考えられる。

4. せん断抵抗機構の考察

4.1 全せん断抵抗機構

シアキーを有する試験体に対して，接合部のせん断抵抗要素として，(1)シアキーのせん断及び支圧抵抗 Q_{C1} ，(2)ジョイントコンクリート接合部のせん断抵抗 Q_{C2} ，(3)接合筋によるせん断

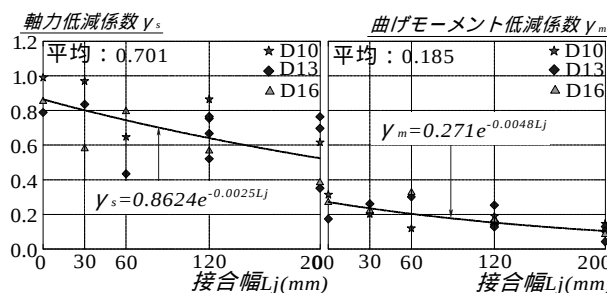


図-7 接合筋の各低減係数 - 接合幅の関係

摩擦抵抗 Q_f , (4) 接合筋のダウエル抵抗 Q_d を考える (接合面にグリスを塗布したため , コンクリートの付着摩擦抵抗を無視した) 。これらの抵抗要素において , シアキーのせん断抵抗及び接合部コンクリートのせん断抵抗が微小変位で耐力を発揮する抵抗特性に対して , 鉄筋のダウエルせん断抵抗はすべり変位がある程度以上になると , 耐力を十分に発揮する抵抗特性を示す。従って , 各せん断抵抗は単純に累加できないと考えられる。試験体のひび割れ性状によって , シアキーがせん断 (支圧) 破壊を生じる前に , ジョイントコンクリートが先に破壊することが認められた。これより , シアキーを有する接合部コンクリートのせん断抵抗 (Q_C) は , シアキーのせん断抵抗 (Q_{C1}) とジョイントコンクリートのせん断抵抗 (Q_{C2}) の中で , 最も小さい値によって決められる。

また , 接合筋のせん断摩擦抵抗 (Q_f) とダウエル抵抗 (Q_d) に対して , 鉄筋のひずみ分布から求めた接合筋の軸力及び曲げモーメントの低減係数 γ_s , γ_m 分布を見ると , 接合筋の引張軸力と曲げモーメント負担率は異なっているため , 接合筋の引張によるせん断摩擦が , 接合筋のダウエル抵抗により大きく支配されていることが判る。ここで , 最大耐力時のせん断抵抗 Q_u は接合筋のダウエル抵抗 Q_d を無視して , ジョイント部コンクリートのせん断抵抗 Q_C と接合筋のせん断摩擦抵抗 Q_f の和として次式のように与えられる。

$$Q_u = Q_C + Q_f \quad (3)$$

$$Q_C = \min(Q_{C1}, Q_{C2}) \quad (4)$$

$$Q_{C1} = 0.09 \cdot \sigma_{Bp} \cdot A_{Sc} \cdot n \text{ (シアキー-せん断破壊)} \quad (5)$$

$$= 0.85 \cdot \sigma_{Bp} \cdot A_s \cdot n \text{ (シアキー-支圧破壊)}$$

ここで , σ_{Bp} はコンクリート圧縮強度 (PCa 部又は接合部の圧縮強度の低い方の値) , A_{Sc} , A_s はシアキーの水平投影面積及び鉛直投影面積 , n はシアキーの個数である。

4.2 接合筋のせん断摩擦抵抗 Q_f

接合筋のせん断摩擦抵抗 Q_f に関して , 図-8 に示すように , 接合部コンクリート内部で , 接合筋の降伏合力 N_{max} と斜めストラットに生じ

る圧縮合力及びせん断摩擦抵抗 Q_f が釣り合いを保つ。軸心と ϕ の傾きをもつストラットで微小要素を考えると , ストラットの圧縮力による応力 σ_s とせん断力による応力 τ_s が作用する。既往の研究 ^{6), 8), 10)} によると , 接合幅が 0 の場合に , $Q_{f0} = 0.54 \cdot \Sigma a_s \cdot \sigma_y$ ⁸⁾ が多くの実験から検証された。接合幅を有する場合 , 図-7 に示すように , 接合幅が大きくなるにつれて , 接合筋の軸力は漸減していることより , 接合幅を有する試験体の接合筋のせん断摩擦抵抗 Q_f は , 図-7 の近似曲線から得られた低減係数 γ_s を適用すると , 次式のように与えられる。

$$Q_f = \gamma_s \cdot Q_{f0} = e^{-0.0025L_j} 0.54 \cdot \Sigma a_s \cdot \sigma_y \quad (6)$$

ここで , a_s は , 接合筋の全断面積 , σ_y , 接合筋の降伏強度 , L_j は , 接合幅 (mm)。

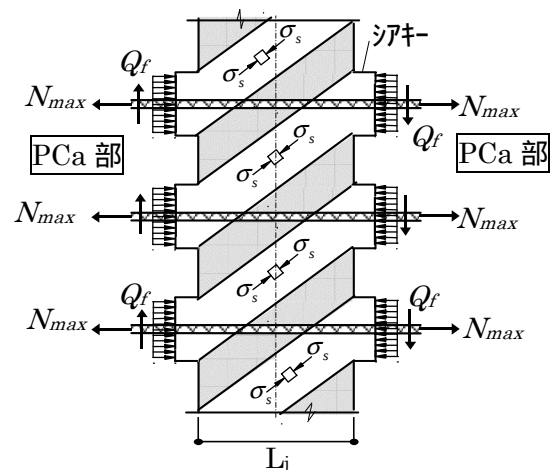


図-8 接合筋摩擦抵抗によるストラット機構

4.3 ジョイントコンクリートのせん断抵抗 Q_{C2}

ジョイントコンクリート接合部のせん断抵抗 (Q_{C2}) に関しては , 試験体のひび割れ性状を考慮し , 図-9 に示すように , 圧縮ストラットは , 接合幅が小さい時に , 1 組のシアキーの内部で形成されるが , 接合幅が大きい時には , 2 組のシアキーにかけて形成される。そこで , 接合部のせん断抵抗 (Q_{C2}) は , 次式に示した。

接合幅が小さい時

$$Q_{C2} = A_s \cdot \sigma_c \cdot \tan \theta \cdot n \quad (7)$$

接合幅が大きい時

$$Q_{C2} = A_s \cdot \sigma_c \cdot \tan \theta \cdot (n-1) \quad (8)$$

ここで , σ_c はシアキー間に形成されたスト

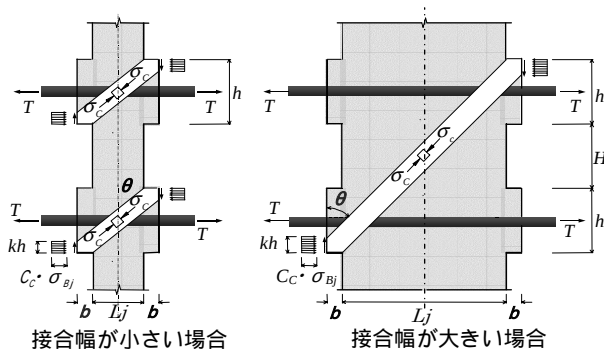


図-9 圧縮ストラットによるせん断抵抗機構

ラットの圧縮応力であり、 θ はひび割れ図に対応する圧縮ストラットの接合部軸心に対する傾斜角である。接合幅を有する PCa 接合部にせん断力を受けると、接合筋のせん断摩擦による圧縮ストラット機構とジョイントコンクリートに形成された圧縮ストラットが同時に接合部で混在する。そのため、図-8 及び図-9 に示すように、接合筋のせん断摩擦による圧縮ストラット機構の中に生じている圧縮応力 σ_s とシアキー間に形成された圧縮ストラット機構の中に生じる圧縮応力 σ_c との間には、両応力の傾きが異なることによる影響を無視すると、下式が成り立つ。

$$\sigma_s + \sigma_c = \nu \cdot \sigma_{Bj} \quad (9)$$

ここで、 σ_{Bj} は接合部モルタルの圧縮強度。 ν は圧縮ストラット内部のモルタル強度の低減係数。本来、低減係数 ν は鉄筋比及びひび割れ幅に大きく影響されるが、ここでは簡単にするために、これを無視して、コンクリートの圧縮強度のみを考慮し、有効係数 $\nu = 0.7 \cdot (\sigma_{Bj}/200)^{0.5}$ を採用した。(9)式を利用すると、(7)及び(8)式は次式のように書き換えられる。

接合幅が小さい時

$$Q_{C2} = A_s \cdot (\nu \sigma_{Bj} - \sigma_s) \cdot \tan \theta \cdot n \quad (10)$$

接合幅が大きい時

$$Q_{C2} = A_s \cdot (\nu \sigma_{Bj} - \sigma_s) \cdot \tan \theta \cdot (n-1) \quad (11)$$

式(3)～(11)から、接合幅を有する PCa 接合部のせん断抵抗 Q_u が得られる。得られた実験値と提案式の比較を図-10 に示した。接合幅を考慮した本提案式は、接合幅 0mm の結果を除いて、実験結果とよく対応しているものと考えられる。

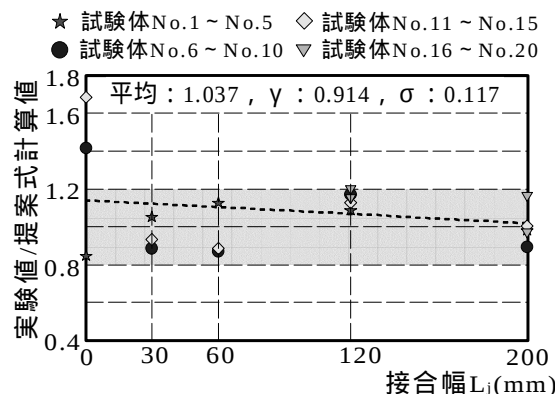


図-10 実験値と提案式の比較

5 まとめ

シアキーと接合幅を有する PCa 接合部におけるせん断実験を行い、以下の事柄が判った。

1. 接合幅を有する PCa 接合部では、接合幅の違いによって、せん断耐力は著しく変動する。
2. 接合幅により破壊性状が異なり、接合部に生じる斜めひび割れによって最大耐力は与える。
3. ジョイント接合部において圧縮ストラット機構を提案し、これより導かれた評価式は、実際の耐力をよく表わしていると判断される。

参考文献

- 1) 日本建築学会編「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」, 1999
- 2) 日本建築学会編「壁式プレキャスト構造鉄筋コンクリート造設計基準・同解説」, 1982
- 3) 松崎育弘ほか：日本建築学会構造系論文集 (AIJ) 491 号, pp.97～104, 1997.6
- 4) 大西昭徳ほか：日本建築学会大会学術講演梗概集(建築学会大会), pp.853～854, 1996.9
- 5) 水上明他：建築学会大会, pp.759～762, 1998.9
- 6) 斉煒他：建築学会大会, pp.758～764, 1999.9
- 7) 黒正清治他：AIJ 89 号, pp.141～149, 1963.9
- 8) 望月重他：AIJ 第 424 号, pp.11～22, 1991.6
- 9) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 1997
- 10) 小西伸哉他：JCI, Vol. 20, pp.1317～1322, 1997
- 11) 斉煒他：AIJ, 第 560 号, pp.147～154, 2002.10
- 12) 斉煒他：JCI, Vol. 24, pp.697～702, 2002.6
- 13) 日本建築学会編：「現場打ち同等型プレキャスト鉄筋コンクリート構造設計指針・同解説」, 2002