

論文 シアキーと接合幅を有する PCa 構造接合部のせん断伝達に関する研究

齊 燿^{*1}・榎谷 榮次^{*2}・水上 明^{*3}

要旨: 接合幅がプレキャスト接合部の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伝達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)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 構造の広範囲における構造規定は「鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説」(文献¹)に準拠しており, 接合部の設計に至っては「壁式プレキャスト鉄筋コンクリート造設計基準・同解説」(文献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 造の施工に必要なとされる「接合幅」による影響因子が考慮されていない。また, 様々な接合幅を有する場合には, その都度, 壁・梁接合部や梁・梁接合部を含む部材実験によって確認されているのが現状である。本研究は, シアキーの形状および接合幅を変化させた接合部を持つ PCa 要素試験体を用いて直接せん断実験を行い, シアキーと接合筋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。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。

応力伝達要素として局部的に想定したもので, シアキー 2 個の試験体は幅×高さ×厚さが 700×450×225 mmの中央部にモルタルと接合筋で 30, 60, 120, 200 mmの幅を有する接合部を構成し, PCa 部 2 つで挟む形とした。接合幅 0mm として PCa-RC 造も比較している。接合筋は抵抗を簡素にするため, 添え筋溶接は施していない。また, 接合筋径に対する定着長さの影響をなくす為, 接合筋末端に定着ワッシャーを鉄筋ネジで固定した。試験体作成方法として, 先に接合筋(2×D10, 13, 16)SD345 を 2 つの PCa 部

2. 実験概要

2.1 試験体

本研究に用いた試験体は, 図 1 に示す通り, 架構式, 壁式を問わない PCa 構造における鉛直接合部を

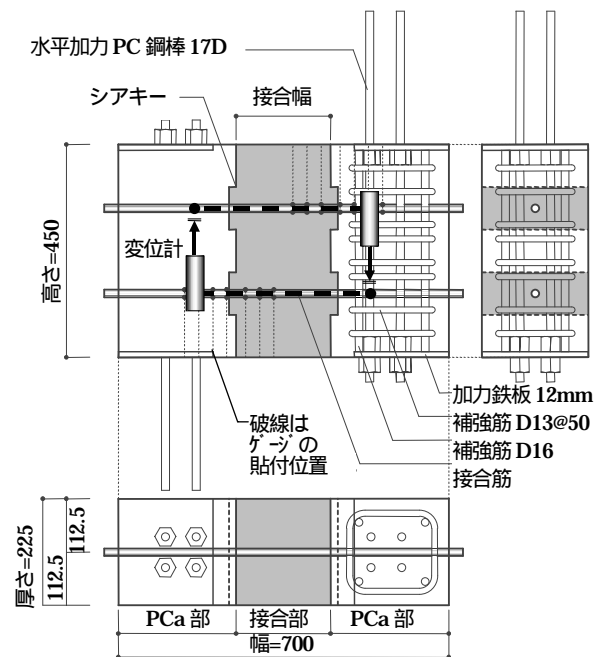


図 1 試験体図

*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 株式会社エヌエムビー 技術研究所 工修(正会員)

表 1 試験体一覧表

NO	試験体名	変動要因			NO	試験体名	変動要因		
		接合幅(mm)	接合筋	シアキー-type			接合幅(mm)	接合筋	シアキー-type
1	JPC00-10×2-C1-40	0	D10×2	C1	24	JPC120-16×2-D-40	120	D16×2	D
2	JPC00-13×2-C1-40		D13×2		25	JPC120-16×2-D-40			
3	JPC00-16×2-C1-40		D16×2		26	JPC200-16×2-D-40			
4	JPC00-16×2-C1-40		D16×2		27	JPC200-16×2-D-40			
5	JPC30-10×2-C1-50	30	D10×2		28	JPC30-16×2-A-30	30		A
6	JPC30-13×2-C1-50		D13×2		29	JPC30-16×2-B-30			B
7	JPC30-16×2-C1-50		D16×2		30	JPC30-16×2-E-30			E
8	JPC60-10×2-C1-50	60	D10×2		31	JPC60-16×2-A-30	60		A
9	JPC60-13×2-C1-50		D13×2		32	JPC60-16×2-B-30			B
10	JPC60-16×2-C1-50		D16×2		33	JPC60-16×2-E-30			E
11	JPC120-10×2-C1-40	120	D10×2		34	JPC200-16×2-A-30	200		A
12	JPC120-13×2-C1-40		D13×2		35	JPC200-16×2-B-30			B
13	JPC120-16×2-C1-40		D16×2		36	JPC200-16×2-E-30			E
14	JPC200-10×2-C1-40	200	D10×2		37	JPC30-16×2-C1-30	30		C1
15	JPC200-13×2-C1-40		D13×2		38	JPC30-16×2-C1-30			
16	JPC200-16×2-C1-40		D16×2		39	JPC60-16×2-C1-30			
17	JPC200-16×2-C1-40		D16×2	40	JPC60-16×2-C1-30				
18	JPC00-16×2-D-40	0	D16×2	D	41	JPC60-16×2-C2-30	60	C2	
19	JPC00-16×2-D-40				30	42		JPC60-16×2-C3-30	C3
20	JPC30-16×2-D-40					43		JPC200-16×2-C1-30	200
21	JPC30-16×2-D-40	60			44	JPC200-16×2-C1-30	C2		
22	JPC60-16×2-D-40				45	JPC200-16×2-C2-30	C3		
23	JPC60-16×2-D-40	46			JPC200-16×2-C3-30				

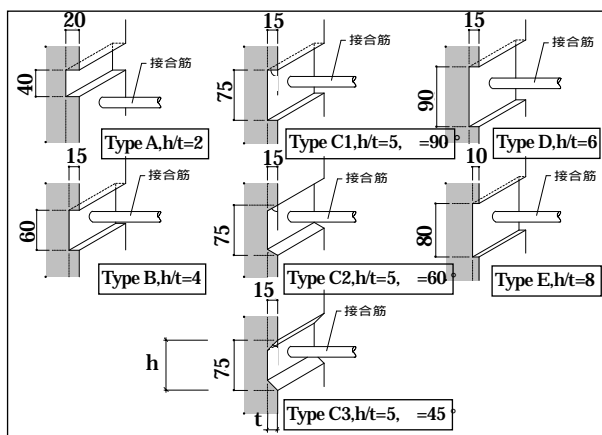
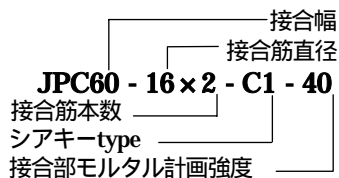


図 2 シアキー形状図

に渡して配筋し，両スタブに主筋 4-D16SD785，せん断補強筋 D13SD785@50mm で補強し，加力治具固定用に PC 鋼棒 17 を埋め込み，PCa 部にコンクリートを打設した。接合境界面には摩擦抵抗をな

くすために表面にグリスを塗布して接合部に 30、40、50MPa のモルタルを打設した。各試験体の一覧は表 1 に示し，材料性状は表 2 及び表 3 に示す。

シアキー形状は，図 2 に示すように，シアキー高さ幅比とシアキー角度を比較した 7 種類のシアキータイプを接合境界面に配置した。各試験体のシアキータイプの詳細は表 1 に示した。

2.2 加力方法と測定方法

加力方法は，図 3 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を用いてせん断力を与える S 型加力方式で行う。試験体を設置した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。加力スケジュールは，相対すべり変位 ± 0.5, 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12mm の 8 サイクルに +15mm の押し切りを加えた変位制御の正負交番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*		
	f_c	f_t	E_c	f_c	f_t	E_c
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
1~4	31.9	2.6	22.1	40.1	3.7	22.0
5~7	32.0	2.6	28.2	53.0	4.4	22.2
8~10	31.3	2.7	24.9	59.0	4.7	22.6
11~17	32.3	2.3	24.7	45.6	3.3	22.0
18~22	28.2	2.1	23.3	38.0	2.4	23.3
23~27	27.8	2.4	23.2	29.9	1.7	23.7
28~36	34.2	2.2	21.7	35.1	1.6	14.0
37~46	34.5	2.2	20.8	35.0	1.4	21.4

f_c : 圧縮強度, f_t : 割裂強度, E_c : ヤング係数

*: No1~4, No18~20試験体には, RC部コンクリート強度とした。

表3 鉄筋の機械的性質

No	種類	降伏強度	引張強度	ヤング係数
		f_y (N/mm ²)	f_u (N/mm ²)	E_s (kN/mm ²)
No1 - No17	D10	367.4	541.4	156.3
	D13	373.0	526.6	153.5
	D16	371.0	595.0	152.1
No18- No28	D16	376.9	536.6	152.8
No28-No36	D16	389.9	596.0	162.1
No37-No46	D16	389.9	596.0	162.1

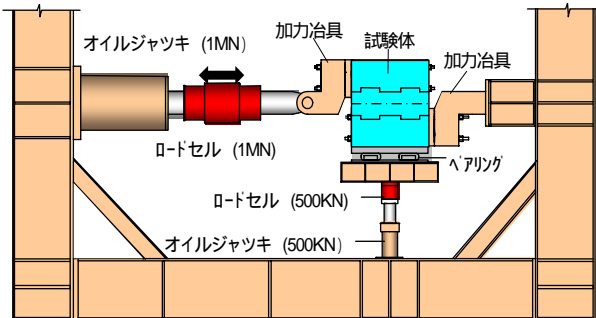


図3 加力図

3. 実験結果

3.1 ひび割れ及び破壊性状

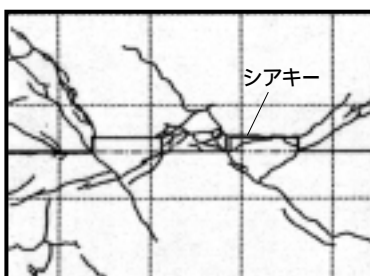
各試験体に対して, 図4に各試験体接合部のひび割れ図を示した。各試験体は, すべり変位が0.5mm時までに初ひび割れを生じるが, 接合幅, シアキー形

状による変化は見受けられない。その後, 多くの試験体で, 接合幅0mmでは, シアキー隅角より加力鉄板を結ぶ斜めひび割れ(図4(a)) 接合幅30,60mmでシアキー1組のシアキー隅角部を結ぶ斜めひび割れ(図4(b)) 接合幅120,200mmでシアキー2組の隅角部を結ぶ斜めひび割れ(図4(c))を生じた。

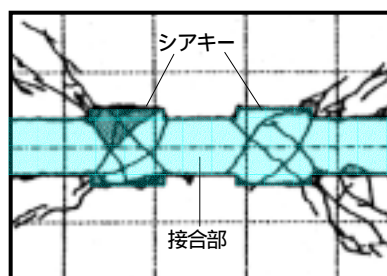
既往の論文^(文献 3,7)によれば, シアキーの高さ/幅比 $h/t=5$ (試験体 TypeC1)よりも小さいシアキー形状(試験体 TypeA,B)ではシアキーのせん断破壊, $h/t=5$ 以上(試験体 TypeD,E)であればシアキー隅角部の支圧破壊という破壊モードが指摘されているが, 本研究のように接合幅がある場合には殆どの場合がシアキー内の斜めひび割れで最大耐力が生じ, 極めて脆性的な破壊を生じることが判った。これは, 接合幅を有する試験体に対して, シアキーがせん断(支圧)破壊耐力に達する前に, 接合部内の圧縮ストラットの圧縮強度に達したためと考えられる。

3.2 履歴性状及び強度性状

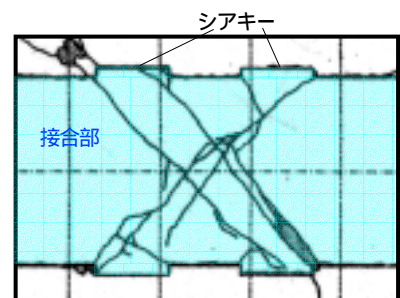
シアキーを有する試験体に対して, 図5に示すように, 加力初期は殆どすべり変位は生じておらず, ほぼ荷重軸と平行に耐力上昇を続けており, 多くの試験体で初ひび割れによりすべり変位を生じている。そして, 接合部内の斜めひび割れ破壊を生じると, 急激な耐力低下, 変位増大と接合筋降伏を示した。その後, 変位の増加に伴いながら緩やかに耐力の低下を続け, すべり変位15mm時にはシアキーのない試験体(図5に破線で示す)とほぼ同等の耐力を示した(ここで, シアキーのない試験体と比較するため, 文献4,5を使用した)。最大耐力レベルでシアキーによる変位の拘束, せん断伝達が支配的であることが判り, どの試験体においても脆性的な破壊を示した。



(a) 接合幅0mm
JPC00-16 × 2-C1-30



(b) 接合幅60mm
JPC60-16 × 2-C1-30



(c) 接合幅200mm
JPC200-16 × 2-C1-30

図4 試験体接合部におけるひび割れ図

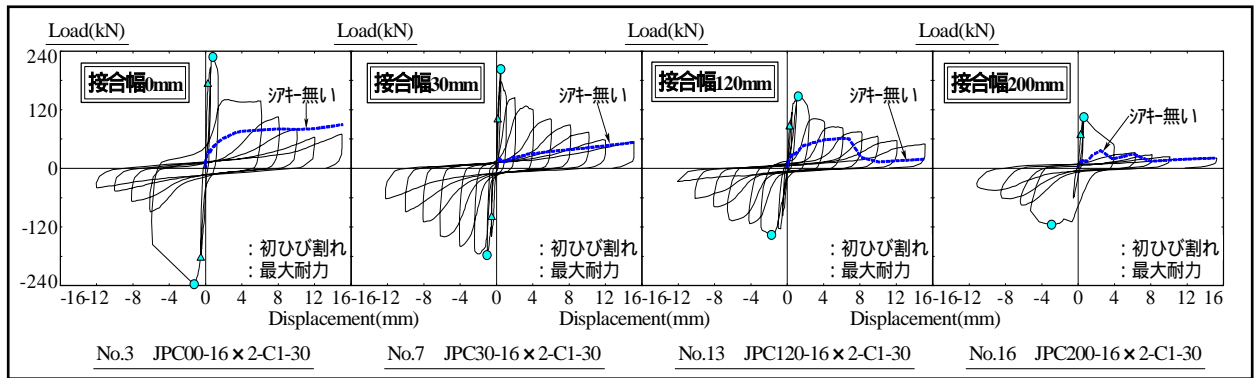


図5 各試験体荷重 - 変位曲線

表4 各試験体の強度一覧表

NO	最大耐力				変位2mm時の耐力		NO	最大耐力				変位2mm時の耐力	
	+サイクル		-サイクル		+サイクル	-サイクル		+サイクル		-サイクル		+サイクル	-サイクル
	耐力 (kN)	変位 (mm)	耐力 (kN)	変位 (mm)	耐力 (kN)	耐力 (kN)		耐力 (kN)	変位 (mm)	耐力 (kN)	変位 (mm)	耐力 (kN)	耐力 (kN)
1	175.4	0.44	135.4	-1.74	109.9	-128.1	24	65.1	0.02	-95.0	-1.20	63.2	-84.6
2	185.7	0.48	-195.1	-1.14	95.6	-127.5	25	78.5	0.26	-88.2	-1.03	48.3	-87.6
3	227.1	0.83	-237.9	-1.23	139.1	-156.1	26	84.14	0.29	-100.9	-0.85	62.4	-87.8
4	187.4	0.43	-200.9	-0.51	134.9	-132.5	27	84.14	0.93	-96.9	-0.52	67.8	-82.4
5	144.8	0.38	-122.6	-1.87	62.6	-122.6	28	146.7	0.49	131.0	-2.02	99.4	-131.0
6	199.6	0.51	-155.1	-1.48	109.9	-174.9	29	182.2	0.51	-136.9	-0.51	106.7	-136.9
7	132.5	0.41	-148.7	-1.01	79.2	-140.8	30	153.2	0.81	-166.4	-1.02	128.4	-149.7
8	116.3	0.54	-100.9	-0.96	81.2	-84.1	31	174.4	1.23	-171.4	-1.93	174.4	-171.4
9	144.4	0.78	-123.1	-1.61	118.8	-118.4	32	134.0	1.46	-126.0	-2.02	130.3	-126.0
10	145.7	0.48	-151.7	-2.05	111.5	-151.7	33	150.2	1.37	-126.0	-2.03	143.8	-126.0
11	95.6	0.41	-99.9	-0.83	73.0	-91.6	34	74.3	0.33	-67.5	-0.02	44.8	-45.3
12	137.5	1.00	-132.5	-1.98	97.6	-132.5	35	81.7	0.12	-83.2	-2.01	61.4	-83.2
13	147.8	0.98	-136.9	-1.47	131.4	-132.9	36	90.6	0.24	-113.3	-2.26	79.8	-111.8
14	78.4	0.48	-79.7	-2.46	47.9	-77.3	37	212.2	1.12	---	---	165.4	---
15	83.4	0.4	-102.9	-1.1	61.5	-85.9	38	217.2	0.33	---	---	124.3	---
16	104.0	0.52	-116.2	-2.88	74.2	-111.9	39	200.8	1.08	---	---	143.2	---
17	97.0	0.23	-111.3	-0.94	75.2	-78.7	40	163.1	0.51	---	---	102.4	---
18	150.24	0.53	-189.56	-0.53	73.4	-171.3	41	213.7	1.02	---	---	174.6	---
19	149.2	0.47	-173.9	-0.59	94.5	147.6	42	235.4	1.01	---	---	187.2	---
20	132.49	0.41	-148.67	-1.01	79.2	-140.8	43	113.3	0.11	---	---	77.6	---
21	120.6	0.44	-135.4	-0.73	65.02	-108.4	44	123.1	0.10	---	---	85.3	---
22	116.2	0.52	-96.5	-2.01	67.5	-96.5	45	133.0	0.14	---	---	95.8	---
23	105.32	0.38	-126.9	-1.02	58.06	-126.5	46	151.2	0.98	---	---	129.4	---

各試験体には、最大耐力時、変位 2mm 時の耐力及び変位を表 4 に示した。多くの試験体は、微小変位 (0.02 ~ 1.46mm) で最大耐力に達して、接合部は急激な斜めひび割れの進展により終局に至った。最大せん断応力時について接合幅および接合筋径の関係で比較したところ、図 6 に示すように、接合幅が大きくなるにつれて、耐力の低下が著しく、接合幅が 120, 200mm では大きな差は見られなかった。ここで、接合部のコンクリート強度 B_j 、接合筋の降伏強度 y_s にばらつきがあるので、これらの因子を取り除くためにせん断応力 u を材料係数 $(B_j \cdot y_s)$ で除して無次元化した指標で評価を行う。

最大せん断応力時について接合幅およびシアキー形状で比較したところ、図 7 に示すように、シアキー高さ幅比 $h/t < 5$ の type A, B 試験体では、シアキーのせん断面積の大きさによってせん断力が決まる傾

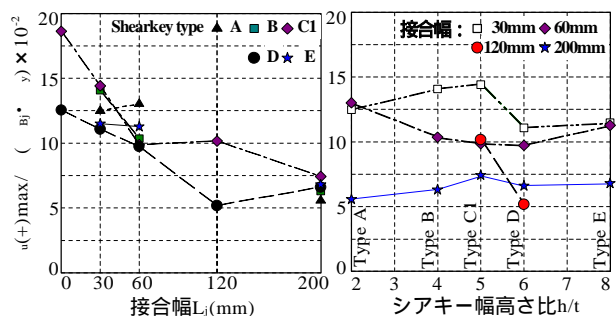


図6 せん断力と接合幅の関係

図7 せん断力とシアキー高さ比の関係

向は見られない。同様に、シアキー高さ幅比 h/t 5 の typeC1,D,E 試験体では、接合幅 60mm の場合、鉛直投影面積 $A_{S-typeD} = 2 \cdot A_{S-typeE}$ なのに、せん断力 $Q_{typeD} < Q_{typeE}$ になった。既往の研究で(文献 3,7)シアキーの高さ幅比によってせん断耐力を決めることは、接合幅の存在によって、適用できないのではないかと考えられる。シアキー側面角度に違いのある typeC1,C2,C3 試験体においては、シアキー側面角度が 45 度の typeC2 試験体が相対的に高い耐力を示した。

実験結果と建築学会式(文献 2)、望月・榎谷・永坂式(文献 8)の比較を図 8 に示した。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)では過大評価になると考えられる。

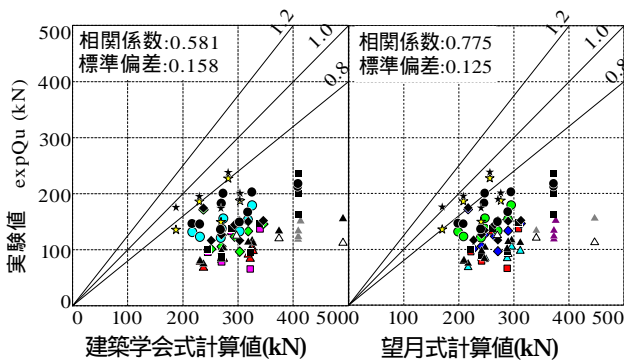


図 8 実験結果と建築学会式及び望月式の比較

3.3 接合筋のひずみ分布

各試験体では、2 本の接合筋はほぼ同じひずみ分布を示した。加力初期より全体に引張り力が発生しており、初ひび割れと共に曲げモーメントが発生するが、シアキーのない試験体の同じ変位時と比べて小さい。最大耐力時、概ね接合筋降伏軸力の 4~7 割程度の引張り力が発生しており、接合幅が小さくなるにつれ値は大きくなっている。

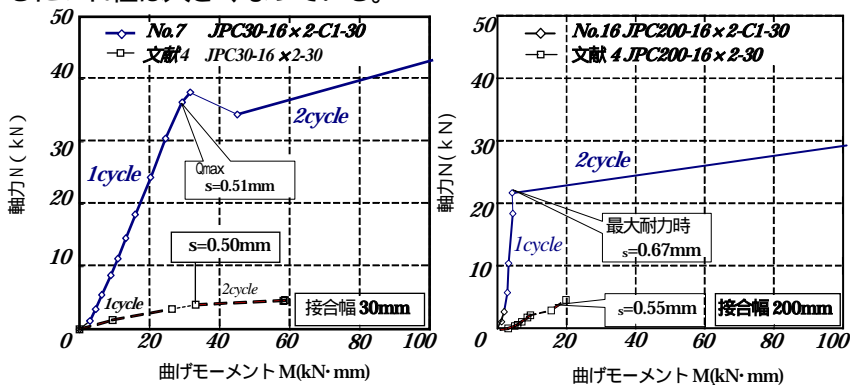


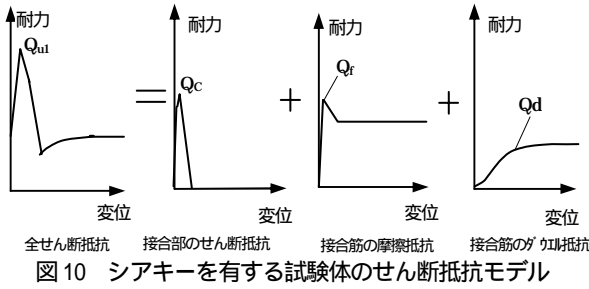
図 9 接合筋における曲げモーメント-軸力関係

接合筋裏表に貼り付けたゲージから測定されたひずみより、鉄筋の軸方向力 N 及び曲げモーメントが得られた。接合幅及び接合筋径の違いによって、最大曲げモーメント部(塑性ヒンジ部)の位置にも違いが見られる。ここにシアキーを有する試験体とシアキーの無い試験体(文献 4,5)の接合筋における最大モーメント部の曲げモーメント M 、軸方向力 N の関係を図 9 に示した。シアキーの無い試験体に曲げモーメントが大きく発現されたことに対して、シアキーを有する試験体は最大耐力までほぼ直線で大きな引張軸力を生じ、最大耐力まで増加し、曲げモーメントが相対的に小さい。最大耐力以降は接合筋断面に働く曲げ抵抗の方が支配的である。これは、シアキーの有無によって、最大耐力レベルで接合筋の引っ張りによるせん断摩擦抵抗と曲げモーメントによるダウエル抵抗の卓越性の違いと考えられる。

4. せん断抵抗機構の考察

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、シアキーのせん断及び支圧抵抗 Q_{C1} 、ジョイントコンクリート接合部のせん断抵抗 Q_{C2} 、接合筋によるせん断摩擦抵抗 Q_f 、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)。これらの抵抗要素で、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強度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。各せん断抵抗は単純に累加できないと考えられる。試験体のひび割れ図 4 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を認められた。シアキーを有する接合部コンクリートのせん断抵抗(Q_d)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得られた図 9 によ



って、最大耐力時に接合筋の引張りによるせん断摩擦は、接合筋の曲げモーメントによる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、図 10 に示すように、最大耐力時のせん断抵抗 Q_{ul} 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 の和として次式に与えられる。

$$Q_{ul} = Q_c + Q_f \quad (1)$$

$$Q_f = 0.54 \cdot a_s \cdot y \quad (2)$$

$$Q_c = \min(Q_{C1}, Q_{C2}) \quad (3)$$

$$Q_{C1} = 0.09 \cdot B_p \cdot A_{sc} \cdot n \quad (\text{シアキーせん断破壊}) \quad (4)$$

$$= 0.85 \cdot B_p \cdot A_s \cdot n \quad (\text{シアキー支圧破壊})$$

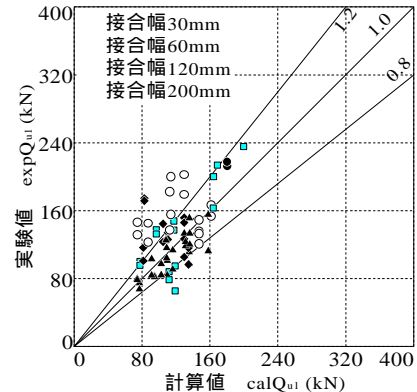
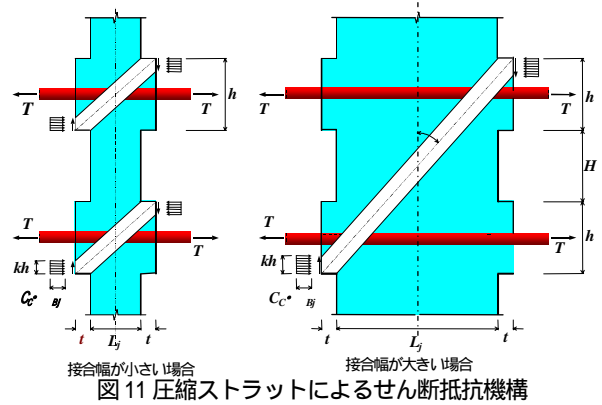
ここで、 a_s は、接合筋の全断面積、 y 、接合筋の降伏強度、 B_p はコンクリート圧縮強度(PCa 部又は接合部の圧縮強度の低い方の値)、 A_{sc}, A_s はシアキーの水平投影面積と鉛直投影面積、 n はシアキーの個数である。

ジョイントコンクリート接合部のせん断抵抗(Q_{C2}) に対して、図 11 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、2 組のシアキーにかけて形成される。接合部のせん断抵抗(Q_{C2}) は、次式に示した。

$$Q_{C2} = \cdot A_s \cdot B_j \cdot \tan \cdot n \quad (5)$$

$$Q_{C2} = \cdot A_s \cdot B_j \cdot \tan \cdot (n-1) \quad (6)$$

ここで、 B_j は接合部モルタルの圧縮強度。 \cdot は圧縮ストラット内部モルタル強度の低減係数、 $= 0.7 \cdot (B_j / 200)^{0.5}$ (文献 9)、 \cdot 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。式(1)~(6)によって、実験値と提案式の比較を図 12 に示した。接合幅を考慮した本提案式は、実験結果とよく対応しているものと考えられる。



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、以下の事柄が明らかとなった。

1. 接合幅を有する PCa 接合部試験体に対して、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、接合部斜めひび割れ破壊によって最大耐力は与えられる。
3. ジョイント接合部の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基準・同解説」, 1999 年。
- 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 年。
- 3) 松崎育弘: 日本建築学会構造系論文集(AIJ) 491 号, 1997 年 6 月, P97 ~ 104。
- 4) 大西昭徳: 日本建築学会大会学術講演梗概集(大会), 1996 年 9 月, P853 ~ 854。
- 5) 小野寺知子: 大会, 1998 年 9 月, P759 ~ 762。
- 6) 斎藤: 大会, 1999 年 9 月, p758 ~ 764。
- 7) 黒正清治: AIJ 89 号, 1963 年 9 月, P141。
- 8) 望月重: AIJ 第 424 号, 1991 年 6 月, p11 ~ p22。
- 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 年。
- 10) 小西伸哉: JCI, 1997 年, P1317 ~ 1322。