

論文 高強度高靱性セメント系複合材料を用いた PCa 構造接合部におけるせん断伝達

斉 煒^{*1}・榎谷 榮次^{*2}・伊藤 嘉則^{*3}

要旨：プレキャスト部に高強度コンクリートを使い，接合部に高靱性モルタル及び高強度鉄筋を用いたプレキャスト接合部のせん断挙動及びせん断伝達能力を調べるため，接合幅とシアキーを持つ PCa 接合部に対して変位制御による直接せん断実験を行った。その結果，せん断伝達能力は高強度高靱性コンクリート及び高強度鉄筋に十分に寄与することが検証された。また，接合幅の影響を考慮し，既往の評価式及び提案式と比較するために，接合部のせん断抵抗モデルを提案した。

キーワード：高強度，高靱性，接合幅，せん断抵抗，圧縮ストラット機構

1. はじめに

接合幅を持つプレキャスト鉄筋コンクリート構造(以降，PCa 構造と呼ぶ)のせん断抵抗に対して，著者らの研究^{1),2)}によると，接合幅の変動はせん断耐力に大きく影響を与える。その影響を考慮して，接合幅を持つ PCa 構造接合部のせん断抵抗式が提案及び検証された。ただし，これらの研究で使われたコンクリートは，圧縮強度が 40N/mm^2 ，鉄筋は降伏強度が 390N/mm^2 以下の適用範囲によって制限されている。一方，プレキャスト構造が近年に性能設計及び高層化に対応して，PCa 部及び接合部は高強度コンクリート及び高強度鉄筋で施工されるケースが多くなってきた。そのため，高強度コンクリート及び高強度鉄筋を用いた PCa 接合部の構造性能を確認する目的として実験を計画した。

また，接合幅を持つ PCa 構造接合部のせん断伝達は，既往の研究によると，接合部内に形成された圧縮ストラットによって伝達される。この圧縮ストラットは，ひび割れの発生によるコンクリートの圧縮強度が軟化して，せん断伝達はコンクリートの圧縮強度より低いレベルで最大耐力になる。これに対して，接合部に高靱性繊維補強セメント複合材料を使って，繊維入り複合材料のひずみ硬化特性(応力は著しく低下しない特性)とひび割れが一樣に分布するひび

割れ性状(マルチプルクラッキング)の特徴を応用して，接合部の力学性状を改善すると共にせん断抵抗を向上する目的として実験を行った。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，既往実験結果^{1),2)}と比較するために，同様な試験体を製作した。試験体は，図 1 に示すように，PCa 構造にお

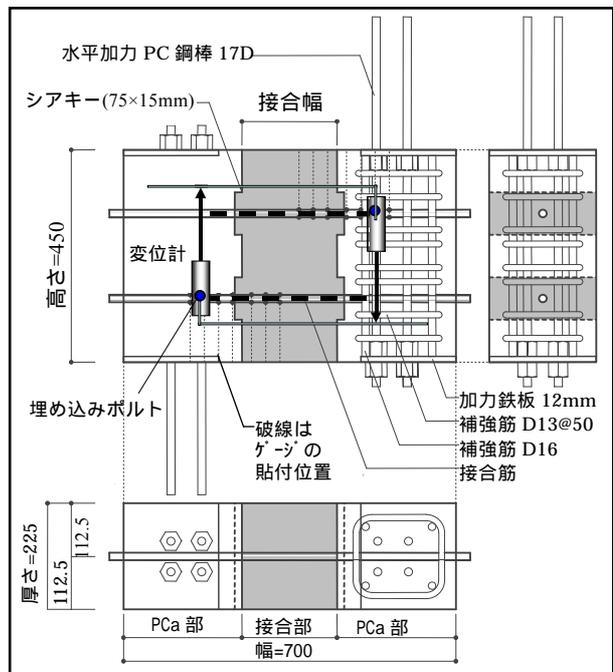


図 1 試験体図

*1 関東学院大学 工学研究科建築学専攻博士後期課程 大学院生 工修(正会員)

*2 関東学院大学 工学部建築学科 教授 工博(正会員)

*3 建材試験センタ - 中央実験所 構造グループ 工修(正会員)

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、二つの PCa 部の中央部にモルタルと接合筋で 60, 120mm 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(シアキーを PCa 片側しか配置しない)。試験体の変動要因は、表 1 に示すように、接合幅と接合部モルタル強度及び繊維の有無とした。試験体は PCa 部では計画圧縮強度 60N/mm^2 のコンクリートを使用し、接合部には圧縮強度と同じく 60N/mm^2 をもつ繊維入りのモルタル複合材料を使用した。使用したコンクリート(モルタル)材料は、水セメント比 35% とした。繊維入り高靱性モルタルは、表 2 に示すように、モルタルに短繊維を体積比 1.5% 程度で混入した。混入した繊維の種類は、ポリエチレン(PE)が長さ 15mm、径 12μ の集束したものとポロビニルアルコール(PVA)が長さ 12mm、径 15μ である。接合筋は、D13(SD785)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。各試験体における鉄筋及びコンクリート(モルタル)材料性状を表 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と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

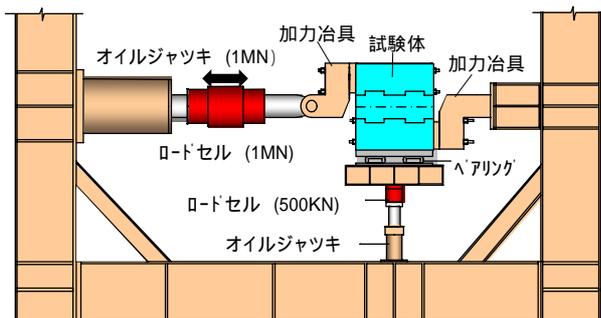


図 2 加力図

計によって PCa 部間の相対すべり変位を測定した。加力スケジュールは、既往研究によると、脆性破壊した試験体には、- サイクルの载荷によるひび割れは+サイクルに生じるひび割れに影響を受け、正確なひび割れ性状が反映しにくいいため、本実験には、正方向のみ 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繰り返し载荷を行った。

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

表 1 試験体一覧表

No	試験体	変動要因			
		接合幅 mm	接合筋	モルタル 強度 繊維種類	
1	JPC00-13×2-C1-60	0	D13×2 (SD785)	無し	
2	JPC60-13×2-C1-60	60			
3	JPC120-13×2-C1-60	120			
4	JPC00-13×2-C1-60PVA	0		60	PVA
5	JPC60-13×2-C1-60PVA	60			
6	JPC120-13×2-C1-60PVA	120			
7	JPC00-13×2-C1-60PE	0		60	PE
8	JPC60-13×2-C1-60PE	60			
9	JPC120-13×2-C1-60PE	120			

*: PCa部に対して、コンクリートの圧縮強度(N/mm²)

表 2 コンクリートの調合(kg/m³)

	繊維種類	セメント C(kg)	水 W(kg)	砂 S(kg)	砂利 G(kg)	繊維混入率 V _f (%)	混和剤 SP/C(%)
PCa部	無し	514	180	540	900	-	1.00
	無し	514	180	750	-	-	1.00
接合部	PVA	514	180	750	-	1.50	1.00
	PE	514	180	750	-	1.50	1.00

* V_f は体積比

表 3 試験体における材料性状

	部位	繊維種類	B	E _c	F _t
			N/mm ²	× 10 ⁴ N/mm ²	N/mm ²
コンクリート	PCa部	無し	61.2	2.1	2.67
		無し	59.8	2.1	2.54
	接合部	PVA	59.2	1.9	3.87
		PE	60.1	1.9	4.12
接合筋	規格	y N/mm ²	u N/mm ²	E _s × 10 ⁵ N/mm ²	y × 10 ⁻⁶
	SD785	801	1025	1.89	4012

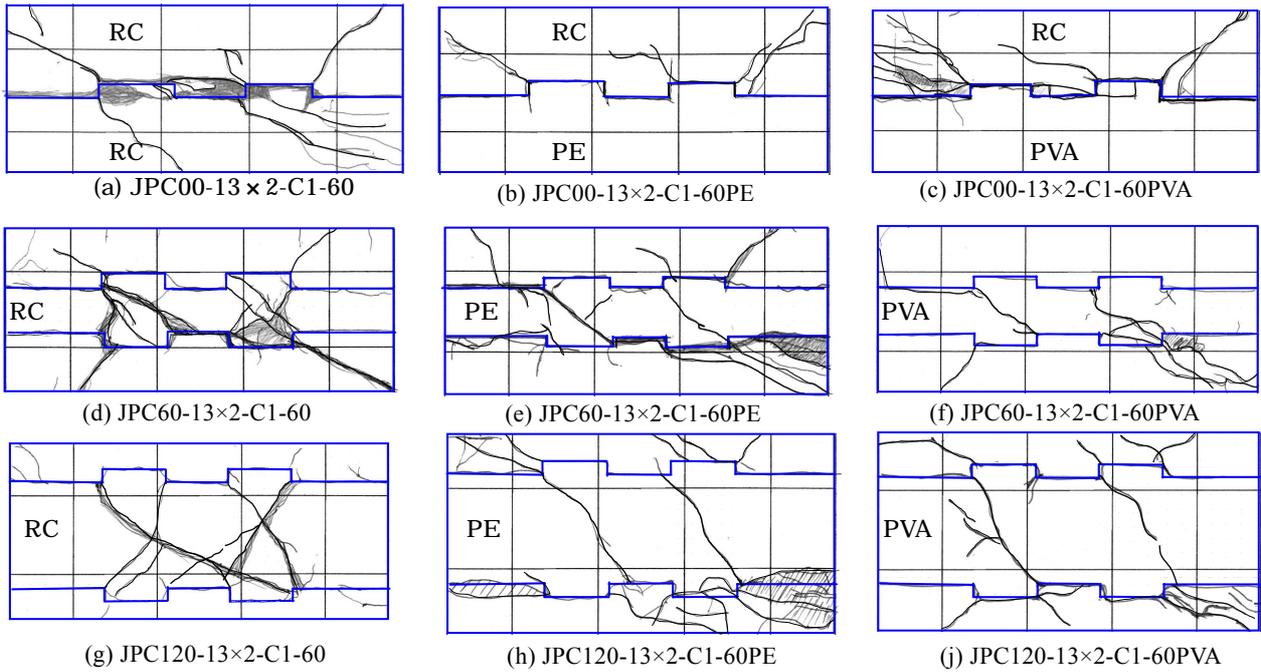


図 3 各試験体におけるひび割れ性状

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た。接合幅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)(b)(c))、接合幅を有する場合には、接合部内のシアキー隅角部を結ぶ斜めひび割れをそれぞれ生じた。最大耐力に至った時は、この斜めひび割れは急激な進展により滑り面が形成され、荷重が低下し、終局(最大変位)に至っている。各試験体の破壊モードを表 4 に示した。ここで、破壊モード A はシアキー隅角部から加力鉄板を結ぶ斜めひび割れによる破壊、破壊モード B は 2 個のシアキー間のシアオフ破壊⁶⁾、破壊モード D はシアキー隅角部近傍 PCa 部の圧壊による破壊、破壊モード F は接合部斜めひび割れの進展による破壊を示す。これより、接合幅を持つ試験体は接合部斜めひび割れの進展(破壊モード F)による最終破壊になったが、コンクリート強度 60N/mm^2 の無繊維試験体に対して、接合幅が小さい場合(60mm)では、1 組のシアキー隅角部を結ぶ斜めひび割れ(図 3(d))、接合幅が大きくなった場合(120mm)は、シアキー 2 組の隅角部を結ぶ斜めひび割れ(図 3(g))を生じた。このひび割れ性状は既往研究^{1)・2)}で普通強度コンクリートを用いた試験体と同じひび割れ性状

を示した。これに対して、接合部に繊維を混入した試験体では、接合幅の大きさに関係なく(接合幅 60mm,120mm とともに)1 組のシアキー隅角部を結ぶ斜めひび割れを生じる(図 3(e)(f)(h)(j))。これは繊維の有無によって、接合部内に形成された圧縮ストラットの構成要素が異なると推測される。終局レベルでは、接合部に繊維を混入した試験体は PCa 部(繊維を入れていない部分)コンクリートに生じたひび割れの進展が目立ち、ひび割れが PCa 部に集中する傾向が見られる。また、繊維の種類の違い(PE 及び PVA)によるひび割れの差異は認められない。

3.2 履歴性状及び強度性状

シアキーと接合幅を有する試験体における加重変位曲線は、図 4 に示す(図中に点線はコンクリート圧縮強度 30N/mm^2 、接合筋が SD345 を使った同タイプ試験体¹⁾における荷重-変位曲線)。各試験体は、シアキーの拘束によって、加力初期は殆どすべり変位は生じておらず、多くの試験体はシアキーの隅角から斜めひび割れによりすべり変位を生じている。そして、せん断力の増大によって、接合部内に斜めひび割れ破壊を生じると、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

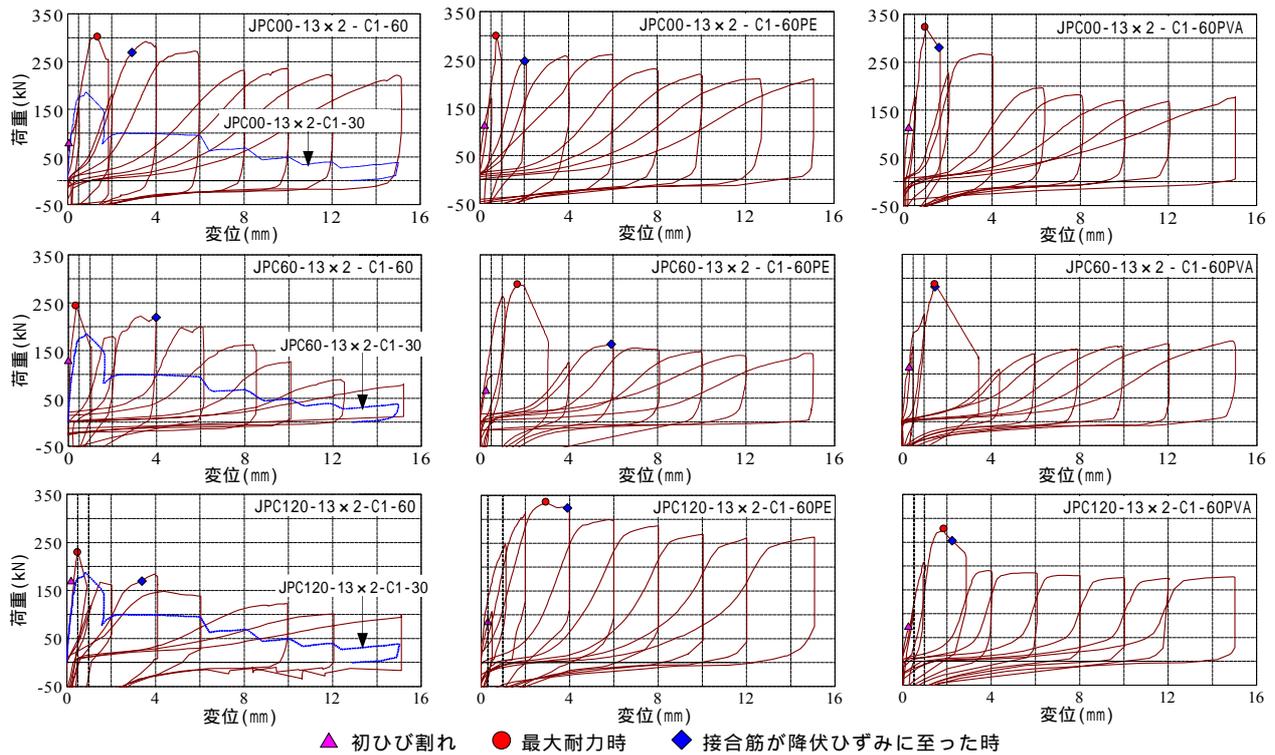


図-4 試験体における荷重-変位曲線

かに耐力の低下を続けて、終局(変位 15mm)に至る。各試験体の終局時における耐力の低下は既往研究^{1),2)}より少ない。これは高強度鉄筋(SD785)によって生じる面圧増加によるせん断摩擦抵抗が大きく発現したためと考えられる。最大耐力時では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った。

各試験体における最大荷重時の耐力及び変位を表 4 に示す(ここで、普通強度コンクリートと比較するために、文献¹⁾の実験データを引用した)。最大耐力レベルにおけるすべり変位を比較すると、同一の接合幅を持つ試験体の最大耐力時変位 δ_i は $\delta_{PE} > \delta_{PVA} > \delta_{60} > \delta_{30}$ (i は接合部モルタル圧縮強度及び繊維種類)傾向が見られる。また、同一種類のモルタルを使用した試験体に対して、最大耐力時の変位 δ_j は $\delta_{120} > \delta_{60} > \delta_0$ (j は接合幅)、既往の接合幅を有する試験体¹⁾²⁾と同じ傾向が見られた。

最大せん断力と接合幅の関係に関する比較を、図 5 に示す。これより、圧縮強度 30N/mm^2 と 60N/mm^2 をもつ無繊維モルタルを用いた試験体は、接合幅が大きくなるにつれて、最大耐力は、小さくなるが、接合部に繊維入りモルタル

を使用した試験体は接合幅の変化による大きな耐力の差は見られなかった。また、同一接合幅で、圧縮強度 60N/mm^2 の高強度コンクリートと繊維入り高靱性コンクリートの強度特性を比較すると、接合幅 0mm 試験体においてほぼ同じ耐力が得られるが、接合幅を持つ場合、接合部に繊維入りモルタルを用いた試験体は 18%~46% の耐力が増加した。繊維によってせん断伝達を向上させることが確認された。

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鉄筋ひずみ (ϵ_1, ϵ_2) 変化が測定された。各試験体では、加力初期より接合筋全域

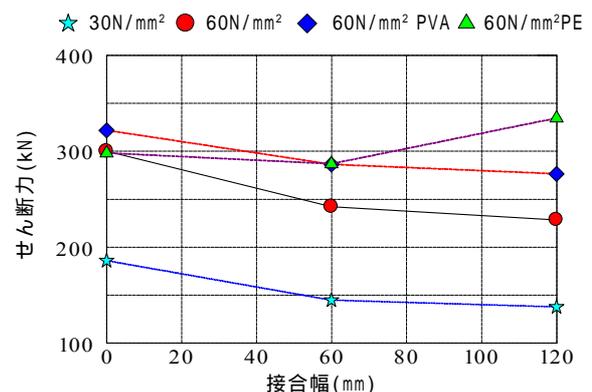


図-5 せん断応力度 - 接合幅の関係

に引張力 $[N = (\pi dr^2/4) \cdot E(\epsilon_1 + \epsilon_2)/2]^1$ が発生しており、ひび割れと共に接合面近傍に曲げモーメント $[M = (\pi dr^3/32) \cdot E(\epsilon_1 - \epsilon_2)/2]^1$ を発生する。最大耐力時には、接合筋に生じるひずみと接合幅との関係を図 6 に示す。高強度接合筋を使用した各試験体では最大耐力時に接合筋は降伏を生じず、接合筋降伏軸力の概ね 50%~90%程度の引張力が発生している。圧縮強度 30N/mm^2 と 60N/mm^2 のプレーンモルタルを用いた試験体は、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が、繊維入りモルタルを補強した試験体の接合筋に生じる引張力は接合幅と明確な関係は見られない。また、同じ接合幅で、繊維入り試験体において接合筋に生じる引張力は繊維で補強していない試験体より平均 35%大きくなることが確認された。

3.4 最大耐力の既往式との比較

PCa 構造接合部における既往の耐力評価式(建築学会鉛直接合部評価式 $_{cal}Q_1^3$)、望月・榎谷・永坂式 $_{cal}Q_2^8$)及び著者らの提案式 $_{cal}Q_3^2$)を以下のように示す。

$$_{cal}Q_1 = 0.10\sigma_{BP} \cdot A_{SC} + \sigma_y \cdot \sum a_s \quad (1)$$

$$_{cal}Q_2 = 0.09\sigma_{BP} \cdot A_{SC} + 1.28 \cdot \sum A_s \cdot \sqrt{\sigma_y \cdot \sigma_{BP}} + 0.54\sigma_y \cdot \sum a_s \quad (2)$$

$$_{cal}Q_3 = Q_C + Q_f \quad (3)$$

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

$$Q_{C1} = 0.09 \cdot \sigma_{BP} \cdot A_{sc} \cdot n$$

$$Q_{C2} = A_s \cdot (v\sigma_{Bj} - \sigma_s) \cdot \tan\theta \cdot n \quad (\text{接合幅小さい場合})$$

$$= A_s \cdot (v\sigma_{Bj} - \sigma_s) \cdot \tan\theta \cdot (n-1) \quad (\text{接合幅大きい場合})$$

$$Q_f = \gamma_s \cdot Q_{f0} = e^{-0.0025L_j} 0.54 \cdot \sum a_s \cdot \sigma_y$$

ここで、 σ_{BP} はコンクリート圧縮強度、 A_{SC} はシアキーの水平投影面積、 n はシアキーの個数、

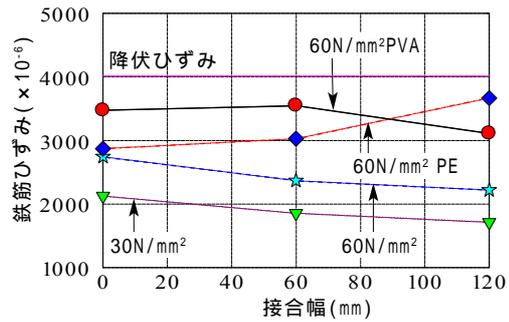


図-6 接合筋におけるひずみ 接合幅との関係

a_s は、接合筋の全断面積、 σ_y 、接合筋の降伏強度、 L_j は、接合幅である。

実験結果と各評価式の比較を図 7 及び表 4 に示した。図 7 から、接合幅の影響を考慮していない建築学会式、望月・榎谷・永坂式は過大評価になっているに対して、著者らの提案式 $_{cal}Q_3$ は繊維で補強していない試験体を安全側に評価できるが、繊維入り試験体では、繊維の引張ひずみ硬化特性を考慮していないため、実験結果に対して、過小評価する傾向が見られる。

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、ひび割れがせん断面に対しての角度で発生する。図 8 に示すように、接合部コンクリート内部で、斜めストラットが形成される。繊維のない試験体は、最大耐力時に、接合筋の引張合力 T と斜めストラットに生じる圧縮合力 C 及びせん断摩擦力 Q_I が釣り合いを保ち、せん断抵抗を行っている(図 8(a))。これに対して、繊維入り試験体は、引張ひび割れを生じても、ひずみの硬化特性によって、圧縮ストラットは図 8(b)に示す

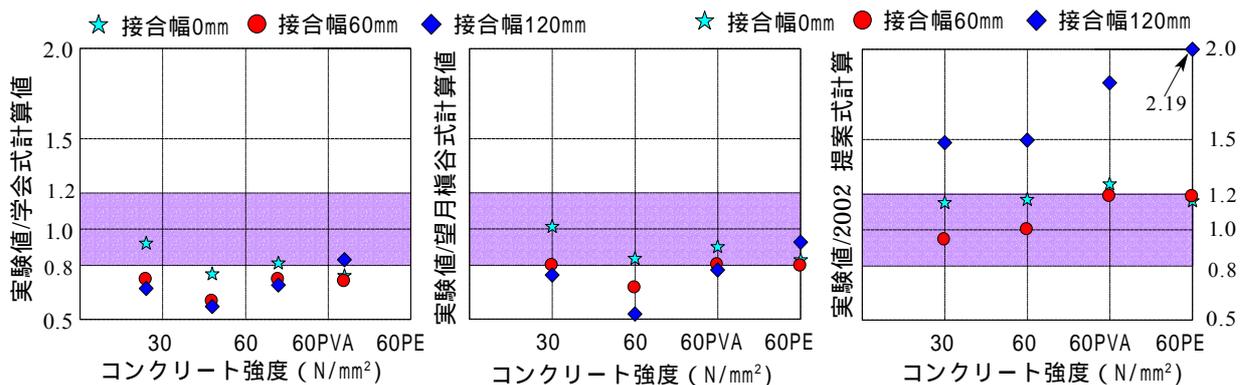
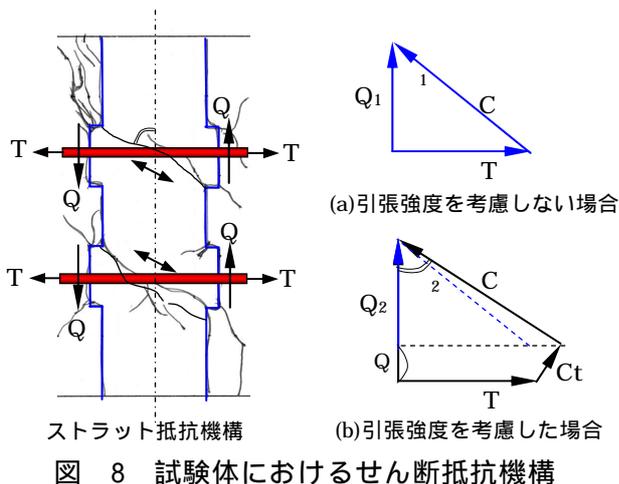


図 7 最大耐力の既往式との比較



ように，上述図 8(a)のトラス作用以外に，繊維による引張力 C_t を加えた釣り合いを保ちながら，せん断抵抗が行われる。その結果，引張合力 C_t の鉛直方向の分力によって，せん断耐力を向上するものと考えられる。また，この引張力の水平方向分力の釣り合いにより，繊維入り試験体における圧縮ストラットの角度は $\theta_2 > \theta_1$ になる。これは図 3(h)(j)におけるひび割れの傾きが図 3(g)と異なることを裏つけている。

5. まとめ

高強度及び高靱性複合材料を用いたPCa接合部に対して，以下の事柄が判った。

- (1)高強度コンクリート及び高強度接合筋の使用によって，せん断耐力の増加が認められた。
- (2)接合部に繊維入りモルタル材料を用いた試験体は，接合幅 0mm を除き，同強度試験体よ

り 1 割以上耐力を増加するが認められた。

- (3)ジョイント接合部において，繊維モルタルのひずみ硬化特性を用いて，圧縮ストラット機構が提案された。

参考文献

- 1) 斉 煒他:JCI, Vol.24,pp.697 ~ 702, 2002.6
- 2) 斉 煒他:JCI, Vol.25,pp.787 ~ 792, 2003.7
- 3) 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
- 4) 福山洋他:スマートコンクリート, コンクリート工学, pp.104 ~ 109, Vol.39, No.1, 2001.1
- 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) 日本建築学会編:「現場打ち同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
- 8) 望月重他: AIJ 第 424 号, pp.11 ~ 22, 1991.6
- 9) 斉 煒他: AIJ, 第 560 号, pp.147 ~ 154, 2002.10
- 10)小西伸哉他:JCI, Vol.20, pp.1317 ~ 1322, 1997
- 11)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
- 12) 松崎育弘他: 日本建築学会構造系論文集(AIJ) 491 号, pp.97 ~ 104, 1997.6

謝辞

本研究は，笹川科学助成によって行われたものである。本実験を行うにあたり独立行政法人建築研究所福山洋博士から貴重な助言を頂いた。ここに記して深く感謝の意を表します。また，試験体の製作にあたり鉄筋を提供頂いた東京鐵鋼株式会社ならびに繊維を提供頂いた東洋紡績，クラレ株式会社に深く感謝の意を表します。

表 4 実験結果一覧表

試験体名	接合筋降伏時		最大耐力(exp Qu)			学会式		榎谷式		2002提案式		破壊形式
	変位	耐力	変位	耐力	ひずみ	cal Q ₁	exp Q _u	cal Q ₂	exp Q _u	cal Q ₃	exp Q _u	
	mm	k N	mm	k N	×10 ⁻⁶	k N	cal Q ₁	k N	cal Q ₂	k N	cal Q ₃	
JPC00-13×2-C1-60	2.92	268.5	1.38	299.98	2475	401.2	0.75	359.8	0.83	257.2	1.17	AB
JPC60-13×2-C1-60	3.98	218.9	0.12	242.02	1922	401.2	0.60	359.8	0.67	242.0	1.00	F
JPC120-13×2-C1-60	3.39	140.0	0.51	228.40	1832	401.2	0.57	359.8	0.63	152.6	1.50	F
JPC00-13×2-C1-60PVA	1.61	280.7	1.00	321.59	3471	399.2	0.81	357.6	0.90	256.8	1.25	AD
JPC60-13×2-C1-60PVA	1.49	282.4	1.50	286.15	3880	399.2	0.72	357.6	0.80	241.6	1.18	FD
JPC120-13×2-C1-60PVA	2.23	252.7	1.89	276.33	3111	399.2	0.69	357.6	0.77	152.4	1.81	F
JPC00-13×2-C1-60PE	2.02	246.8	0.77	298.06	2709	402.2	0.74	360.8	0.83	257.5	1.16	AD
JPC60-13×2-C1-60PE	5.92	162.6	1.72	286.64	3025	402.2	0.71	360.8	0.79	242.2	1.18	FA
JPC120-13×2-C1-60PE	2.00	310.3	2.97	334.46	3667	402.2	0.83	360.8	0.93	152.7	2.19	FA