

論文 薄肉プレキャスト板を用いて構築された耐震壁の力学的性能に関する実験的研究

武井一夫 *1・佐藤真一郎 *1

要旨：薄肉プレキャスト板と後打ちコンクリートによって構築され一体となった耐震壁（PCF耐震壁）の構造性能の把握を目的とした実験は以前よりいくつか発表されているが、鉄骨鉄筋コンクリート造に組み込まれたPCF耐震壁の実験はほとんど報告されていない。このことから、周辺フレームを鉄骨鉄筋コンクリート造にしたPCF耐震壁の水平加力実験を行い、その実験結果と既往の実験資料から計算に用いる壁体の有効厚さが、どの程度が適当なのか検討を行った。

キーワード：耐震壁、有効厚さ、プレキャストコンクリート、鉄骨鉄筋コンクリート

1. はじめに

プレキャストコンクリート（以下PCaとする）を用いて建物を構築する場合、全ての部材をPCaにすると他の部材との取り合い・揚重作業・運搬などが問題となる。このため、耐震壁の外側に薄肉のPCa部材を用いて内側の後打ちコンクリートの打設により一体となった耐震壁（以下PCF）が考案され開発されてきた。PCF耐震壁の実験は以前よりいくつか報告されているが、それらのほとんどがRC骨組に組み込まれた耐震壁の実験報告であり、SRC造に組み込まれたPCF耐震壁の実験はほとんど報告されていない。このため、ここでは耐震壁の周辺フレームをSRC造にしたPCF耐震壁の実験を行い、その実験結果と既往の実験資料から計算に用いる壁体の有効厚さがどの程度が適当なのかを検討する。

2. 実験概要

2.1 試験体

実験に用いる試験体はPCF試験体と在来工法による一体打ち試験体の各々2体ずつで、大きさを実大寸法の1/2とし破壊モードは斜め圧縮破壊（壁厚12cm）と壁筋引張破壊（壁厚18cm）であり、合計4体である。PCF試験体は試験体の中央で薄肉PCa板（厚さ35mm）を鉛直接合し目地部には接合筋を配している。試験体の種類を表-1に、試験体の形状および配筋を図-2.1~2.3、材料の試験結果を表-2.1~2.2に示す。

2.2 加力および測定方法

加力装置を図-3に示す。加力方法は試験体のスタブ部分を反力床に固定し、水平方向の加力は加力ビームを介して串型ジャッキを用いて加力した。また、鉛直方向の加力は試験体の両外に配置され

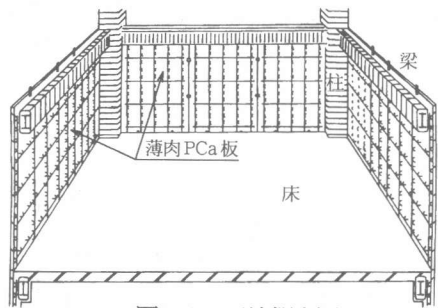


図-1 工法概念図

表-1 試験体一覧 (単位: 厚さ mm)

試験体名	工法	接合部	全壁厚	PCa板厚	後打ち厚	Ps (%)	破壊モード
SKS-1	PCF	有	120	35	85	0.70	斜め圧縮破壊
SKS-2	PCF	有	180	35	145	0.14	壁筋引張破壊
SKS-3	一体打ち	無	120	—	—	0.70	斜め圧縮破壊
SKS-4	一体打ち	無	180	—	—	0.14	壁筋引張破壊

* Ps: 壁板のせん断補強筋比

*1 日本カイザー (株) (正会員)

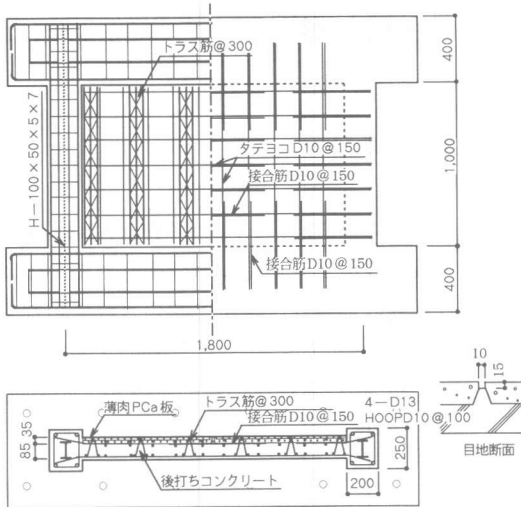


図-2.1 SKS-1配筋図

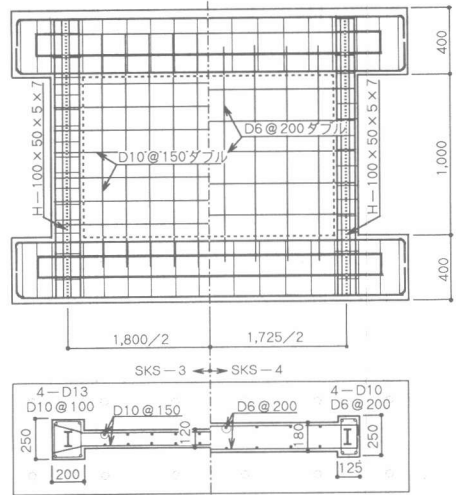


図-2.3 SKS-3,4配筋図

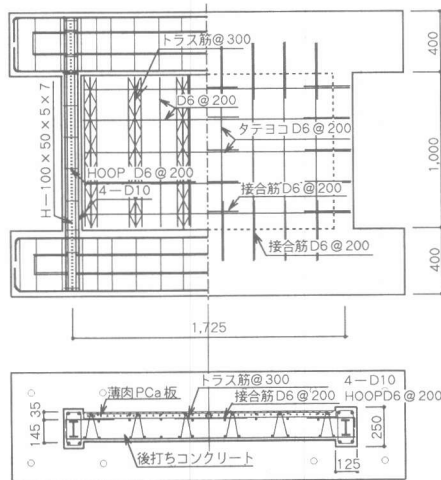


図-2.2 SKS-2配筋図

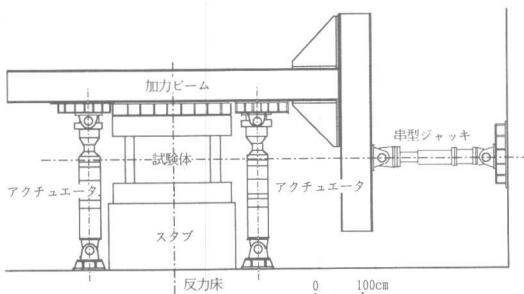


図-3 加力装置

たアクチュエータで加力ビームからの偏心荷重を軸力に換算し、鉛直荷重（定軸力）が左右同じ荷重になるように加力した。柱軸力の大きさは破壊モードが斜め圧縮破壊・壁筋引張破壊となるように表-3に示す値とした。

加力サイクルは層間部材角（壁中央の変位量を壁の内法で除した値）1/800で正負各1回、1/400・

表-2.1 鉄筋・鋼材試験結果

鉄筋	断面積 (cm ²)	降伏強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	ヤング係数 (kgf/cm ²)	伸び率 (%)
D13	1.267	3,420	5,520	1.60 × 10 ⁶	15.9
D10	0.713	3,100	4,310	1.58 × 10 ⁶	14.9
D6	0.320	3,390	5,250	1.56 × 10 ⁶	8.5
9φトラス	0.640	3,570	5,640	1.74 × 10 ⁶	20.8
PL-5	1.214	3,420	4,590	1.97 × 10 ⁶	29.3
PL-7	0.828	3,260	4,420	1.97 × 10 ⁶	25.8

表-2.2 コンクリート試験結果

	圧縮強度 (kgf/cm ²)		割裂強度 (kgf/cm ²)		ヤング係数 (kgf/cm ²)	
	PCa板部	後打ち部	PCa板部	後打ち部	PCa板部	後打ち部
SKS-1	328	292	27.6	22.7	2.47 × 10 ⁵	2.46 × 10 ⁵
SKS-2	346	284	32.9	20.0	2.36 × 10 ⁵	2.44 × 10 ⁵
SKS-3	264		19.9		2.52 × 10 ⁵	
SKS-4	272		20.8		2.47 × 10 ⁵	

表-3 各試験体の軸方向力

試験体名	Ac (cm ²)	Aw (cm ²)	Ac・Aw	N (tf)	σ _o (kgf/cm ²)
SKS-1,3	1,000	1,920	2,920	68.0	23.1
SKS-2,4	625	2,880	3,505	42.0	12.1

Ac: 柱の断面積、Aw: 壁体の断面積、
N: 鉛直方向の軸方向力、σ_o: 圧縮応力度

1/200で正負各3回、1/100で正負1回繰り返した後、正側に押しきった。但し、SKS-4試験体はスタブと反力床に滑りが生じたため、1/100の負側の途中で加力を中止した。荷重の測定はアクチュエータおよびロードセルにより検出し、各点の変位は水平方向の変位計により全体変形を対角線方向の変位計によりせん断変形を検出した。

表-4 実験結果一覧

試験体名	圧縮強度 kgf/cm ²	t cm	l cm	初期ひび割れ時 tf		最大荷重時 tf	
				φ(%)	Qc (rad)	φ(%)	Qu (rad)
SKS-1	292	12.0	180.0	+1	58.0 (0.17)	+5	189.3 (4.79)
SKS-2	284	18.0	172.5	+1	65.4 (0.20)	+5	155.1 (5.06)
SKS-3	264	12.0	180.0	+1	64.9 (0.21)	+5	185.0 (5.02)
SKS-4	272	18.0	172.5	+1	75.9 (0.25)	+5	145.0 (5.02)

3. 実験結果

表-4に実験結果の一覧を示す。また、図-4に荷重・変形曲線を示す。荷重は串型ジャッキに取付けたロードセルの値であり、変形は試験体中央の水平方向の変形を表している。図-5に最終ひび割れ図を示す。

3.1 せん断ひび割れ荷重

各試験体のせん断ひび割れの初期ひび割れは、1サイクルの正荷重時に発生し、PCF耐震壁では薄肉PCa板側も場所打ち側も同時に生じている。初期ひび割れはPCF試験体SKS-1・2の方が一体打ちSKS-3・4より早く発生している。これは一体打ちの平均値0.25rad [7]よりも早く、耐力も10%程度低い。

3.2 最大せん断耐力

各試験体の最大せん断耐力 (Qu) は、いずれも5サイクルが最大である。PCFの一体打ち耐震壁に対する比率は、SKS-1とSKS-3では189.3/185=1.02、SKS-2とSKS-4では155.1/145=1.07で、ほとんど等しい値になっている。目地による耐力低下はみられない。

3.3 全体変形とせん断変形

各試験体の全体変形に対するせん断変形の占める割合を図-6に示す。せん断変形の占める割合は70%~100%で、特にSKS-3は各試験体の中で最もせん断変形の占める割合が高く、壁板がスリップ破壊した最終ループでは100%になっている。SKS-1もSKS-3と同様にスリップ破壊しているが、SKS-3よりせん断変形の占める割合は低くなっている。SKS-2とSKS-4の比較では、SKS-2の方がSKS-4よりせん断変形の占める割合は大きい。

3.4 目地部の変位

PCF耐震壁の目地部の鉛直方向のずれは、SKS-1では最大耐力近くで、SKS-2ではせ

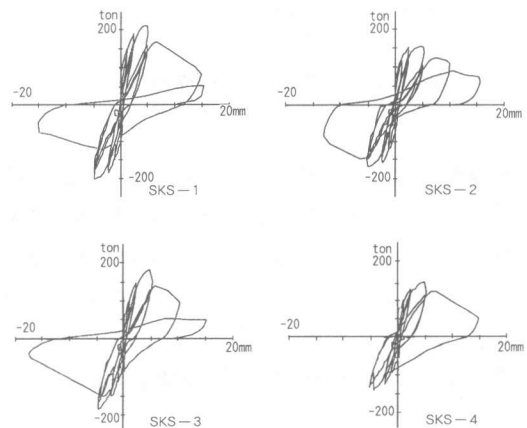


図-4 荷重・変形曲線

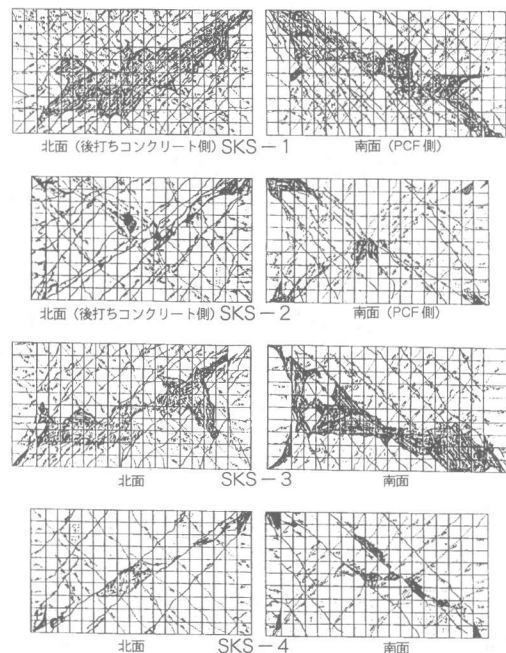


図-5 最終ひび割れ図

せん断ひび割れ発生時近くで急激に増した。水平方向の目開きはSKS-1・SKS-2とも5サイクルの最大耐力付近で大きく増した。

4. 実験値と計算値の比較

4.1 せん断ひび割れ強度

せん断ひび割れ強度の算定に用いる式はRC造の耐震壁の式 [8] を準用した。

$$Q_{sc} = K_s \cdot K_{tb} \cdot \sqrt{c\sigma t + \sigma_0 \cdot c\sigma t \cdot t \cdot l} \quad \text{--- (1)}$$

但し、 $K_s = 1 - 0.52P_w \sqrt{F_c}$ 、 $c\sigma t = 1.8 \sqrt{F_c}$

$$K_{tb} = (1.0 + 1.05t/b) / (1.0 + 1.77t/b)$$

F_c : 圧縮強度 (kgf/cm²)、 t : 壁厚 (cm)、 b : 柱幅 (cm)、
 l : 柱間隔 (cm)、 P_w : せん断補強筋比 (%)

実験値と計算値を表-5に示す。せん断ひび割れ強度の実験値/計算値の比率は一体打ち (SKS-3,4) の場合は1.03・0.99とよく一致しているが、PCF耐震壁 (SKS-1,2) の場合は0.91・0.85とやや低めになっている。

4.2 最大せん断耐力

最大せん断耐力の算定式 [9] を準用する。

壁板の拘束が十分大きい場合

$$wQ_u = wF's \cdot wt \cdot l' + sQ_u \quad \text{----- (2)}$$

壁板の拘束が小さい場合

$$wQ_u = (wP \cdot w\sigma y + w\tau u) wt \cdot l' + sQ_u \quad \text{--- (3)}$$

但し、 $wF's$: 耐震壁のコンクリート圧縮場によるせん断耐力

wt : 耐震壁厚 (cm)、 l' : 梁の内法スパン (cm) (kgf/cm²)

sQ_u : 鉄骨耐力 (kgf)、 wP : 壁筋比 (%)

$w\sigma y$: せん断補強筋の降伏応力度 (kgf/cm²)

$w\tau u$: 耐震壁に接する骨組の耐力によって決まる
 コンクリートの終局せん断応力度 (kgf/cm²)

実験値と計算値の比の平均は2.27とかなり実験値が大きいが、各試験体の実験値と計算値の既往の実験結果 [9] と比較すると図-7のようになり、本実験の結果も既往の実験と同様な傾向を示していると考えられる。

5. PCF耐震壁の有効厚さの検討

5.1 検討方法

有効厚さの検討方法は次の4ケースについて厚さを仮定し、せん断ひび割れ発生時と最大耐力時について一体打ちの実験値 (Q_c) を計算値 (Q_{c1}) で除し

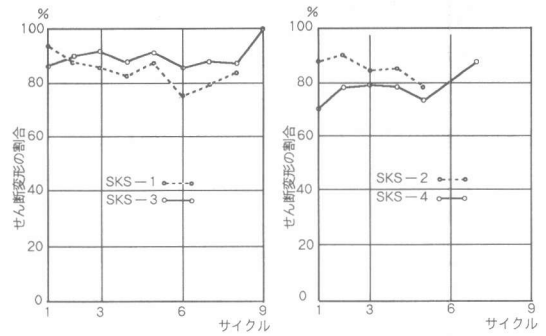


図-6 全体変形とせん断変形の割合

表-5 せん断ひび割れ強度 (tf)

試験体名	実験値 Q_c	計算値 Q_{sc}	Q_c/Q_{sc}
SKS-1	58.0	63.6	0.91
SKS-2	65.4	76.9	0.85
SKS-3	64.9	62.8	1.03
SKS-4	75.9	76.9	0.99

* PCF耐震壁は全厚をとった。

表-6 最大せん断耐力 (tf)

試験体名	実験値	(2) 式	(3) 式	比*
SKS-1	189.3	38.5	111.3	1.70
SKS-2	155.1	52.7	52.7	2.94
SKS-3	185	33.0	111.3	1.66
SKS-4	145	47.9	52.5	2.76

* 実験値と計算値の比は実験値/(2式と3式の大きい方の値)とし、PCF耐震壁の壁厚は全厚をとった。

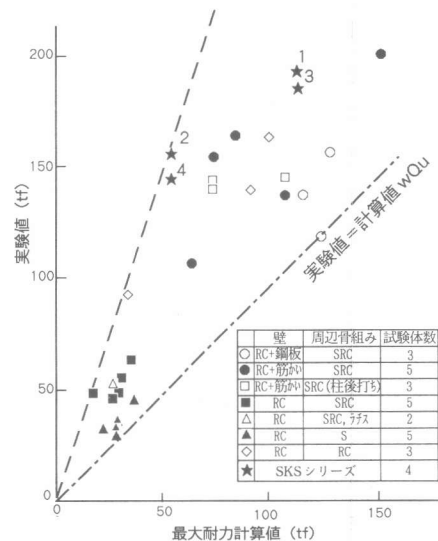


図-7 既往の実験結果との比較 [9]

た強度比と、PCF耐震壁の実験値 (Qc) を計算値 (Qc1~Qc4) で除した強度比とを比較し、強度比が一体打ち試験体より上回っているケースを選ぶことにする。なお、検討に用いる実験資料は縮尺1/2モデルの試験体 [1]~[6] を選んだ。また、計算式はせん断ひび割れ発生時にはケース毎の断面積に許容せん断力応力度を乗じた許容せん断力で、最大荷重時は周辺フレームがRC、SRCとも文献 [10],[11] に示されている式を用いて算定する。

各ケース毎の有効厚さ

ケース (1) 薄肉PCa + 後打ちコンクリートを有効壁厚とした場合

ケース (2) 薄肉PCa × 1/2 + 後打ちコンクリートを有効壁厚とした場合

ケース (3) 後打ちコンクリートのみを有効壁厚とした場合

ケース (4) 薄肉PCa-1cm(目地の深さ) + 後打ちコンクリートを有効壁厚とした場合

5.2 せん断ひび割れ発生時の検討

せん断ひび割れ発生時の計算結果を表-7に示す。() 内の値は各々の試験体の実験値 (Qc) を計算値 (Qc1~Qc4) で除した値を表している。また、図-8は表-7の計算結果から一体打ちとPCF耐震壁の強度比を表し、同じシリーズでは平均値をとった。ケース (3) の計算結果は全て一体打ち試験体の強度比を上回っているが、ケース (1),(2),(4) では一部で下回っている。これは、一体打ち試験体の強度比が2.0を越えるものに多くみられ、回帰分析によって計算したケース (1) の結果も2.0を越えると低くなっている。

表-7 ひび割れ時の実験値と有効厚さを考慮した計算値の比

引用文献	試験体名	t ₁ , t ₂ mm	l cm	σ _b	f _s	Qc	Qc1	Qc2	Qc3	Qc4
[1]	* W-2	80	180	220	10.8	12.0	15.6(0.77)	—	—	—
	KW-1	30, 50	180	243	11.01	11.04	15.9(0.70)	12.9(0.86)	9.9(1.11)	13.9(0.80)
	KW-2	30, 50	180	287	11.81	21.0	17.0(1.23)	13.8(1.52)	10.6(1.98)	14.9(1.41)
[2]	* W-3	80	180	257	11.36	10.65	16.4(0.65)	—	—	—
	KW-3	30, 50	180	256	11.34	18.90	16.3(1.16)	13.3(1.42)	10.2(1.85)	14.3(1.32)
	KW-4	30, 50	180	254	11.31	21.50	16.3(1.32)	13.2(1.62)	10.2(2.11)	14.3(1.51)
[3]	* B	115	290	292	11.88	90.0	39.6(2.27)	—	—	—
	A	30, 85	290	204	10.20	80.0	34.0(2.35)	29.6(2.70)	25.1(3.18)	31.1(2.58)
[4]	* MONO	100	225	275	11.63	29.93	26.2(1.14)	—	—	—
	OM-1	30, 70	225	261	11.42	49.95	25.7(1.94)	21.8(2.29)	18.0(2.78)	23.1(2.16)
	OM-2	30, 70	225	236	11.04	49.95	24.8(2.01)	21.1(2.37)	17.4(2.87)	22.4(2.23)
[5]	*FW-OM-1	95	240	282	11.73	64.98	26.7(2.43)	—	—	—
	FW-OM-2	30, 65	240	282	11.73	54.95	26.7(2.05)	22.5(2.44)	18.3(3.00)	23.9(2.30)
	FW-OM-3	30, 65	240	282	11.73	70.0	26.7(2.62)	22.5(3.11)	18.3(3.83)	23.9(2.93)
[6]	* N	90	260	243	11.15	35.9	26.1(1.38)	—	—	—
	P1	35, 67	260	269	11.54	40.0	30.6(1.31)	24.8(1.62)	19.5(2.05)	27.0(1.48)
	P2	35, 67	260	243	11.15	42.0	29.6(1.42)	23.9(1.76)	18.8(2.23)	26.1(1.61)
本報	* SKS-3	120	180	264	11.46	64.9	24.8(2.62)	—	—	—
	SKS-1	35, 85	180	292	11.88	58.0	25.7(2.26)	21.9(2.65)	18.2(3.20)	23.5(2.47)
	SKS-4	180	172.5	272	11.58	75.9	36.0(2.11)	—	—	—
	SKS-2	35, 145	172.5	284	11.76	65.4	38.1(1.72)	34.4(1.90)	30.7(2.13)	36.0(1.82)

Qc: 実験値 ton, Qc1~Qc4 = fs (有効厚×l) : ケース毎の計算値 ton, * : 一体打ち試験体
σ_b: 圧縮強度 kgf/cm², f_s: 許容せん断力応力度 kgf/cm²

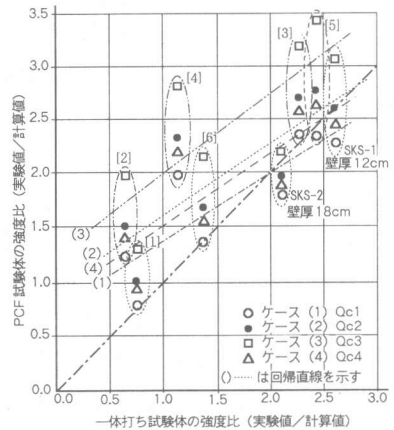


図-8 各ケース毎の試験体の比

5.3 最大耐力時の検討

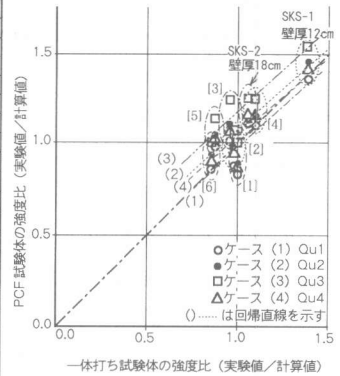
最大耐力時の計算結果を5.2同様に表-8に示す。図-9は、図-8同様に一体打ち試験体とPCF試験体の強度比を表している。これらの計算結果は実験値と良く一致しており、値は1.0付近に集中している。5.2同様にケース (3) の値は全て一体打ちの強度比を上回っているが、ケース (1),(2),(4) では一部で下回っている。特に、[1],[2] の値が低い値となっている。これは、他の試験体と目地の深さが異なり目地底が薄肉PCa板と同じ深さになっているためと考えられる。

また、今回の実験結果を破壊モードの差で比較すると、斜め圧縮破壊 (壁厚12cm) で決まる場合の方が壁筋引張破壊 (18cm) で決まる場合より、強度比 (実験値/計算値) は大きい。

表一 8 最大耐力時の有効厚さを考慮した計算値の比

引用文献	試験体名	D	Dc	M/0・D	be1	be2	be3	be4	at	σ_{wh}	Qu	Qu1	Qu2	Qu3	Qu4
[1]	* W-2	200	20	0.25	10.4	—	—	—	7.62	4048	77.8	77.9(1.0)	—	—	—
	KW-1	200	20	0.25	10.4	9.2	8.0	9.6	7.62	4048	66.5	80.0(0.83)	73.3(0.91)	66.3(1.0)	75.5(0.88)
	KW-2	200	20	0.25	10.4	9.2	8.0	9.6	7.62	4048	74.5	88.1(0.85)	80.7(0.92)	73.0(1.11)	83.2(0.90)
[2]	* W-3	200	20	0.25	10.4	—	—	—	7.62	3727	81	83.0(0.98)	—	—	—
	KW-3	200	20	0.25	10.4	9.2	8.0	9.6	7.62	3727	71.4	82.7(0.86)	75.7(0.94)	68.5(1.04)	78.1(0.91)
	KW-4	200	20	0.25	10.4	9.2	8.0	9.6	7.62	3727	76.8	82.4(0.93)	75.5(1.02)	68.3(1.12)	77.8(0.98)
[3]	* B	340	55	0.59	17.3	—	—	—	81.1	3670	220	232(0.95)	—	—	—
	A	340	55	0.59	17.3	15.0	12.8	15.8	81.1	3670	197	196(1.0)	177(1.11)	158(1.25)	184(1.07)
[4]	* MONO	250	25	0.52	13.0	—	—	—	10.2	4040	127	114(1.11)	—	—	—
	OM-1	250	25	0.52	13.0	11.8	10.6	12.2	10.2	4040	119.3	112(1.07)	105(1.14)	97.4(1.23)	107(1.12)
	OM-2	250	25	0.52	13.0	11.8	10.6	12.2	10.2	4040	119.7	107(1.12)	101(1.19)	93.7(1.28)	103(1.16)
[5]	*FW-OM-1	270	24	0.56	12.7	—	—	—	16.1	4000	110	127(0.87)	—	—	—
	FW-OM-2	270	24	0.56	12.7	11.6	10.4	11.9	16.1	4000	137	127(1.08)	119(1.15)	110(1.25)	121(1.13)
	FW-OM-3	270	24	0.56	12.7	11.6	10.4	11.9	16.1	4000	120	135(0.89)	126(0.95)	117(1.03)	129(0.93)
[6]	* N	290	31	0.48	14.5	—	—	—	15.9	3930	110	130(0.85)	—	—	—
	P1	290	31	0.48	14.5	13.1	11.7	13.7	15.9	3930	128.8	143(0.91)	133(0.98)	123(1.06)	137(0.95)
	P2	290	31	0.48	14.5	13.1	11.7	13.7	15.9	3930	114.5	143(0.80)	133(0.86)	123(0.93)	137(0.84)
本報	* SKS-3	200	20	0.25	14.6	—	—	—	13.8	3095	185	133(1.39)	—	—	—
	SKS-1	200	20	0.25	14.6	13.2	11.8	13.8	13.8	3095	189.3	139(1.36)	130(1.46)	120(1.56)	134(1.41)
	* SKS-4	185	12.5	0.27	19.0	—	—	—	12.7	3385	145	137(1.06)	—	—	—
SKS-2	185	12.5	0.27	19.0	17.4	15.9	18.1	12.7	3385	155.1	140(1.11)	132(1.18)	123(1.26)	135(1.15)	

・表の計算式は右式を採用した $Q_{u1} \sim Q_{u4} = \left\{ \frac{0.068 \cdot P_t e^{0.23} \cdot (F_c + 180)}{\sqrt{M/(Q \cdot D) + 0.12}} + 2.7 \cdot \sqrt{\sigma_{wh}} \cdot P_{wh} + 0.1 \sigma_e \right\} \cdot be \cdot j$
 D: 壁の全長cm, Dc: 柱の幅cm, be1~be: i型断面を長方形断面にした時の幅cm, at: 引張り鉄筋の断面積cm²,
 σ_{wh} : 水平せん断補強筋の降伏点強度kgf/cm², Qu: 実験値ton, Q1~Q4: ケース毎の計算値ton, *: 一体打ち試験体



図一 9 各ケース毎の試験体の比

6. 考察

PCF 耐震壁の有効厚さの検討を行った結果、強度比はケース(1), (4), (2), (3)の順に高くなっている。また、目地の深い場合[1], [2]は全体に強度比が低くなっているが、他の実験資料は目地の深さが10~15mm(薄肉PCa板の1/3程度)と浅く一体打ちより強度比が高い。このため、目地の深さが浅い場合には全厚有効として計算した結果、耐力低下はみられないが、検討に用いた資料は目地の大きさ・壁厚・トラスの配筋量・コンクリート強度などが一定でなかった。したがって、全厚を有効厚さとして計算に用いるには、これらの耐力への影響を十分検討しなければならない。

7. まとめ

今回の周辺フレームをSRCにした実験結果では、1) ひび割れ発生時に一体打ち試験体より耐力低下がみられる。2) 最大せん断耐力時の実験値と計算値の比較では一体打ち・PCF試験体とも実験値が平均2.27と大きい。3) 5.2の最大耐力時の検討においても特に耐力低下はみられない。

したがって、設計に用いるPCF耐震壁の有効厚さは周辺フレームがRC・SRCとも、本報の検討範囲内で目地が浅い場合においては全厚を有効と考えても良いと判断できるが、今後、更に実験を重ね、目地の大きさ・位置など耐力への影響について研究を進める必要がある。

引用・参考文献

- [1] 吉田伸一、末永保美: PC板(カイザー板)を型枠として用いた耐震壁の水平加力実験、日本建築学会学術講演梗概集、pp.1995~1996、1984.10
- [2] カイザー板を用いた耐震壁の力学的性能に関する実験的研究(その2): 横浜国立大学 工学部 末永研究室、1983.7
- [3] 小林 淳ほか: 先付けPC版を用いた耐震壁の実験、日本建築学会学術講演梗概集、pp.1729~1730、1981.9
- [4] 田中 清ほか: プレキャスト鉄筋コンクリートラーメン構造の研究開発(その6)、日本建築学会学術講演梗概集、pp.1715~1716、1982.10
- [5] 山田敏夫、伊藤 勝: 型枠兼用PC板付耐震壁の構造実験、日本建築学会学術講演梗概集、pp.1993~1994、1984.10
- [6] 毛井崇博ほか: PCF耐震壁の水平加力実験、日本建築学会学術講演梗概集、pp.269~270、1985.10
- [7] 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説(1991年版)、pp.211
- [8] 広沢雅也: 建築研究資料 既往の鉄筋コンクリート造耐震壁に関する実験資料とその解析、建設省建築研究所、pp.31、1975
- [9] 日本建築学会: 建築耐震設計における保有耐力と変形性能(1990年版)、pp.656
- [10] 日本建築センター: 構造計算指針・同解説(1991年版)、pp.233
- [11] 日本建築学会: 地震荷重と建築構造の耐震性(1976年版)、pp.360