

論文 PCa 壁による鉄骨骨組の耐震性能の向上

佐藤 悠史^{*1}・西村 泰志^{*2}・吉田 幹人^{*3}・尾崎 太亮^{*4}

要旨：鉄骨骨組にプレキャストコンクリート壁板を組み込む工法の合理化を意図して、鉄骨骨組とRC壁板との接合部にせん断力のみ作用するように壁筋を施し、接合部に従来のシアーキーを用いた試験体によって、RC壁板から鉄骨骨組への応力伝達機構を検討した。その結果を受けて、施工性を考慮して、2枚の孔あき鋼板ジベル（PBL）を重ねて用いる接合部ディテールを考案し、その接合部の性能実験を行った。実験結果から、接合部のせん断耐力は、概ね孔数に比例して増大し、孔に鉄筋を挿入することによって最大耐力の向上および最大耐力後の変形性能の改善が認められることを示した。また、この接合部の耐力評価法を提案した。

キーワード：耐震壁、鉄骨骨組、合成構造、応力伝達、孔あき鋼板ジベル接合、耐力評価法

1. 序

鉄骨（以下、S という）骨組に鉄筋コンクリート（以下、RC という）耐震壁やプレキャストコンクリート（以下、PCa という）耐震壁を組み込むことによって、骨組の耐震性能が向上することが既往の研究¹⁾などで報告されている。しかしながら、従来の施工方法は、S 骨組にシアーキーを数多く溶接し壁筋を配筋し、その後コンクリートを打設するなど非常に煩雑である。したがって、PCa 壁に対して力学的に合理的な配筋を施すとともに、PCa 化した壁板を S 骨組に組み込む際の施工性を向上させるため、土木分野²⁾で用いられている孔あき鋼板ジベル（Die Perfobond Leisten, 以下 PBL という）接合を活用することを試みる。提案するディテールは、2枚の PBL の円孔にモルタルを充填し、モルタルの一面せん断による抵抗力を期待するもので、この場合の破壊性状および耐力評価方法は明確にされていると言いがたい。

本研究は、実験-1として、S 骨組に内蔵された RC 壁板を対象として、従来のシアーキーを用いて、S 骨組と RC 壁板との接合部の応力伝達機構を実験的に検討する。なお、RC 壁板には接合部にせん断力のみ作用するように、壁筋が配筋されている^{3,4)}。実験-2では、S 骨組と RC 壁板を結合する方法として、PBL を活用することを試み、その破壊性状を実験的に検討するとともに、接合部の耐力評価法を提案する。

2. 応力伝達機構

図-1 は、S 骨組に内蔵された RC 壁板にせん断力 Q が作用し、コンクリート板に $\theta = 45^\circ$ の傾きを持つ圧縮力 C のような圧縮束が形成された状態を示している。周辺骨組の剛性および耐力が比較的小さい場合でも、図-1 に示すように壁筋が配筋されておれば、コンクリートに

作用する圧縮力 C の一つの成分は、壁筋に作用する引張力 T によって釣合い、他方の成分 F は、シアーキーを介して S 部材に軸方向力として伝達できると考えられる³⁾。

3. 実験-1（S 骨組に内蔵された RC 壁板）

3.1 実験計画

図-1 に示された応力伝達機構の妥当性を検討するために、実験変数を載荷方法（単調載荷（W-2M）および正負漸増繰返し載荷（W-4R））とする計 2 体の試験体が計画された。図-2 に試験体の形状寸法、断面および接合部詳細を示す。

S 骨組の寸法は階高、梁スパンを 1000 mm とし、せん断変形のみ生じるように柱梁接合部をピン接合とした。RC 壁板の形状は、S 骨組と RC 壁板が接触することによって、接合部以外で応力伝達が行われることを避けるために、RC 壁板の隅角部が取り除かれた八角形とした。壁筋は、前述の応力伝達機構に基づいて、接合部を結ぶように、試験体中央部に 4.5ϕ を 50 mm 間隔で縦横 4 本

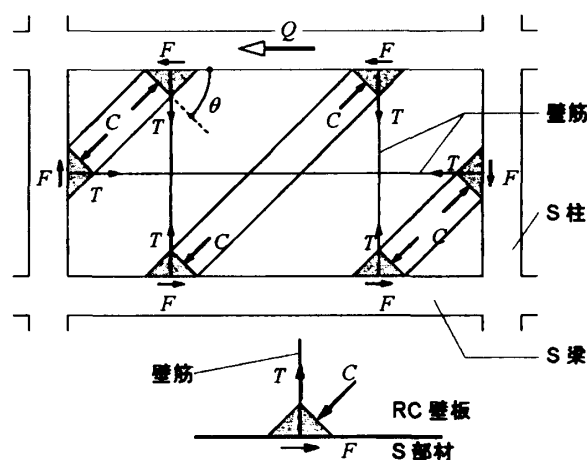


図-1 圧縮束の構成と接合部の釣合い³⁾

*1 大阪工業大学大学院 博士前期課程 工学研究科建築学専攻（正会員）

*2 大阪工業大学 教授 工博（正会員）

*3 大阪工業大学大学院 博士前期課程 工学研究科建築学専攻

*4 高砂熱学工業（元大阪工業大学生）

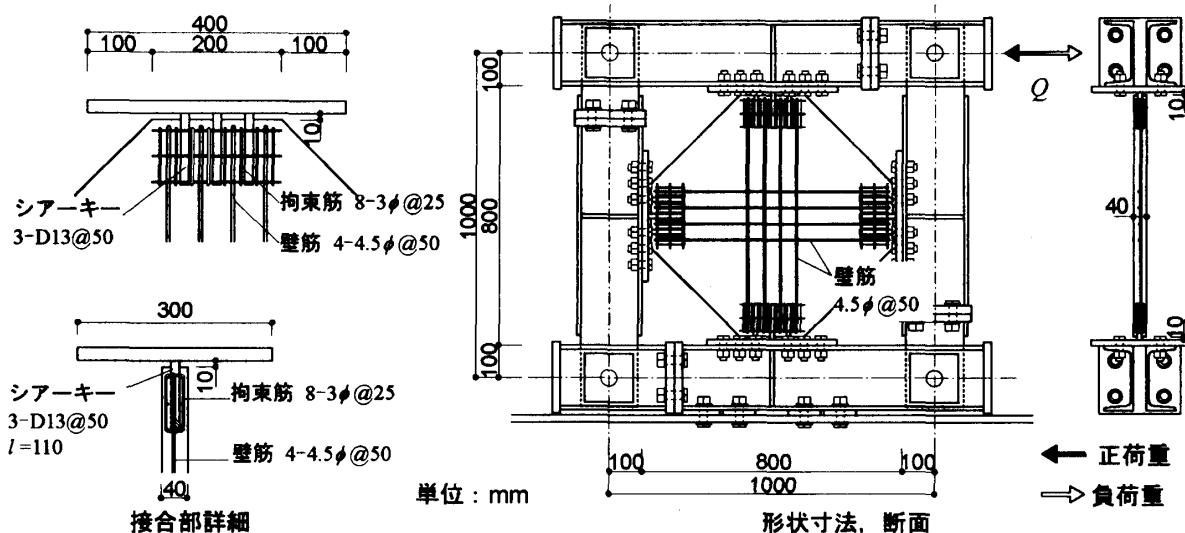


図-2 試験体の形状寸法、断面および接合部詳細

表-1 使用材料の力学的特性

試験体	材料	降伏応力度 σ_y (N/mm ²)	引張強度 σ_u (N/mm ²)	ヤング係数 E_s (N/mm ²)
W-2M W-4R	シアーキー D13	384	539	1.83×10^5
	シアーキー拘束筋 3φ	383	497	1.97×10^5
	壁筋 4.5φ	477	515	2.15×10^5
試験体	材料	圧縮強度 σ_B (N/mm ²)	割裂強度 σ_t (N/mm ²)	ヤング係数 E_c (N/mm ²)
W-2M W-4R	モルタル	27.1	1.97	4.84×10^4
		28.4	1.97	4.00×10^4

W-2M試験体：単調載荷，W-4R試験体：繰返し載荷

表-2 実験結果

試験体		シアーキーに 沿ったひび割れ	せん断ひび割れ	最大荷重
W-2M (単調載荷)	Q (kN)	6.25	18.8	42.8
	δ (mm)	0.443	1.37	4.69
	R (rad.)	0.000426	0.00132	0.00451
W-4R (繰返し載荷)	Q (kN)	13.5 (10.8) ^{*)}	33.7 (-15.5)	43.0 (-39.3)
	δ (mm)	0.802 (-0.525)	2.42 (-1.58)	8.56 (-5.07)
	R (rad.)	0.000800 (-0.000524)	0.00242 (-0.00103)	0.00854 (-0.00506)

*) ()内は負荷重の値

ずつ配筋した。なお、壁筋量はコンクリート圧縮束の圧縮強度に見合う量とした。S骨組と壁との接合部は、D13で長さ110mmのシアーキーを50mm間隔で3本配筋した。なお、接合部でのせん断力の伝達をシアーキーのみに依存させるため、RC壁板とS骨組との間に幅10mmのスリットが設けられている。

表-1に使用材料の力学的特性を示す。

実験は、下梁を固定し、図-2の矢印で示すように上梁の端部に水平力を負荷した。

3.2 実験結果と考察

図-3に各試験体の最終破壊状況を示す。

各試験体とも層間変形角 $R = 0.0008$ (rad.) までにシアーキーに沿ったひび割れが生じた。次いで、接合部付近にせん断ひび割れが生じた。その後、各試験体とも変形の増大に伴って、せん断ひび割れの進展が観察され、接

合部間を結ぶせん断ひび割れ状況が観察された。最大荷重に達した後、RC壁板にひび割れの大きな進展はなく、接合部近傍のせん断ひび割れの進展のみ観察された。その後、上下接合部におけるモルタルの剥落が観察された。なお、繰返し載荷を行った W-4R 試験体では、シアーキー拘束筋の内部モルタルの剥落も観察された。表-2に各試験体のひび割れ発生荷重を示す。

図-4に荷重変形関係を示す。縦軸は作用水平力 Q ，横軸は層間変形角 R である。

最大荷重に達するまでは、載荷方法による変形状の大きな相違は見られない。各試験体とも、層間変形角 $R = 0.0045 \sim 0.0085$ rad. で最大荷重に達した。載荷方法による最大荷重の相違は見られなかった。各試験体とも、最大荷重に達した後、耐力低下が見られた。単調載荷を行った W-2M 試験体では、耐力低下後、 $R = 0.02 \sim 0.05$ rad. 程度である一定の耐力を維持しているのに対し、W-4R 試験体は、W-2M 試験体に比べて耐力低下が大きく、 $R = 0.02$ rad. 以降も耐力低下が認められる。これは、W-4R 試験体が繰返し載荷によって、接合部近傍のモルタルやシアーキー拘束筋の内部モルタルの剥落が顕著になったためと推察される。なお、W-4R 試験体における負荷側では、正載荷側に比べ最大荷重は若干小さいものの、変形状は同じである。

なお、シアーキーに貼付したひずみゲージの値から、シアーキーには軸力がほとんど作用していなかったこと等から、接合部では、前述の応力伝達が行われていることが推察される。

3.3 終局耐力評価法

S骨組に内蔵された壁の終局耐力 Q_u は、接合部 (シアーキー) のせん断耐力 Q_1 ，壁筋の降伏引張耐力 Q_2 および圧縮束の圧縮耐力 Q_3 より

$$Q_u = \min \{ Q_1, Q_2, Q_3 \} \quad (1)$$

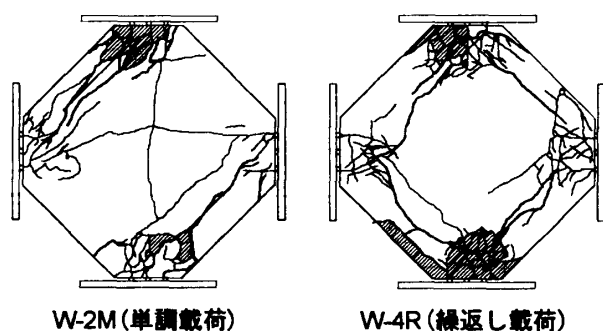


図-3 最終破壊状況

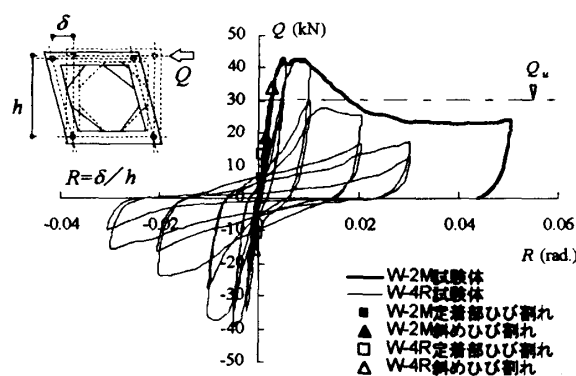


図-4 荷重変形関係

によって評価する。ここに、

$$Q_1 = n \times a_1 \times \tau_s$$

$$Q_2 = m \times a_2 \times \sigma_s \times \tan \theta$$

$$Q_3 = s \times t \times \sigma_b \times \cos \theta \times \sin \theta$$

a_1 : シアーキー1本の断面積 a_2 : 壁筋1本の断面積

σ_s : 壁筋の降伏応力度 m : 壁筋の本数

n : シアーキーの本数 θ : 圧縮束と梁材軸の

s : 接合部の長さ なす角度

σ_b : コンクリートの圧縮強度 t : 壁厚

τ_s : シアーキー1本のせん断強度 ($\sigma_s/\sqrt{3}$)

なお、(1)式では、シアーキー定着部の耐力は考慮していない。図-4の Q_u は、(1)式の計算結果を示す。計算値 Q_u は、壁筋の引張耐力 Q_2 によって決定されている。計算値は、やや小さめの評価となっている。

4. 実験-2 (PBLを用いた接合部の性能実験)

4.1 PBLを用いた接合部ディテール

実験-1より、RC壁板とS骨組の接合部にはせん断力を伝達できる性能が備わっていればよいことが分かった。したがって、せん断力を伝達できる接合部として、施工性を考慮してPBLを活用したディテールを考案する。元来、土木構造物などでPBLを用いる際は、PBLを単体で

用いることが多く、その適用範囲も幅広い。本研究では、図-5に示すように、PBLを2枚重ねた状態で用いることに特徴がある。このディテールは、PCa化されたRC壁板とS部材の両部材にそれぞれ取り付け付けたPBLを重ねあわせ、モルタルで連結するもので、PCa壁板をS部材に容易に建入れすることができる。また、高力ボルトなどに変わり、モルタルを充填することによって、施工誤差を吸収できる利点もある。したがって、孔内に充填されたモルタルがボルトとしての役目を有しており、本論では、モルタルボルトという。なお、ふさぎ板は、モルタル充填の際の型枠として、あるいはモルタルの拘束効果を期待して設けられている。

4.2 実験計画

図-6に接合部試験体詳細の一例を示す。本実験は、この接合部ディテールのせん断破壊性状を実験的に検討するものである。

実験変数は、充填材の種類、PBLの孔径、孔数と孔の配置位置、ふさぎ板の板厚および挿入鉄筋の有無である。充填材は、呼び強度 $F_c 40$ 、 $F_c 80$ および粉末樹脂を混入した $F_c 40$ のモルタルを用いた。孔径は16、20および25mmの3種類である。孔の配置位置は、2本を外側に配置したもの、2本を内側に配置したものである。ふさぎ

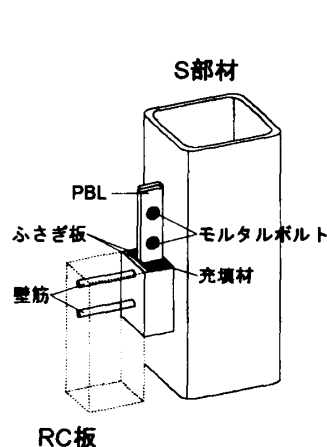


図-5 考案された接合部ディテール

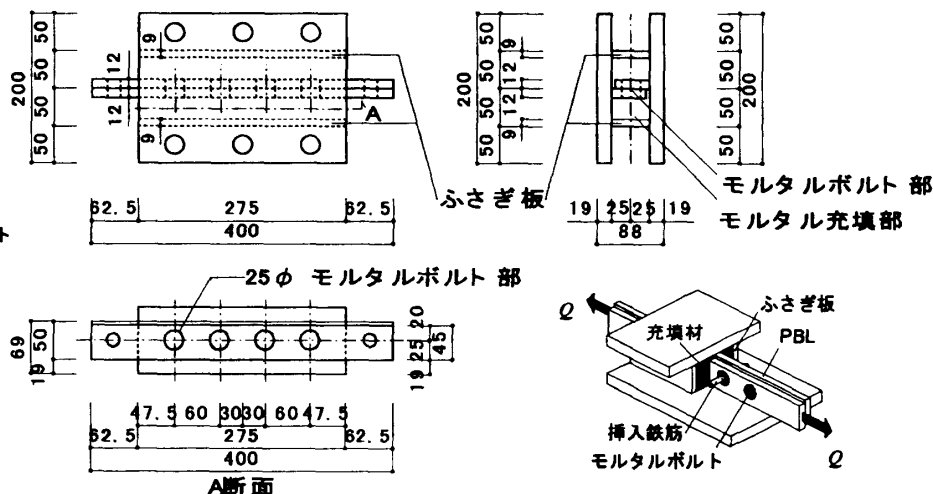


図-6 試験体詳細 (SH40-25-4-9)

表-3 試験体一覧および実験結果

シリーズ	試験体	モルタル強度 F_c (N/mm ²)	孔径 D_b (mm)	孔数 n_b	ふさぎ板板厚 t_1 (mm)	挿入鉄筋	Q_{exp}^{*2} (kN)	δ_H (mm)	Q_{thea}^{*3} (kN)	Q_{exp}/Q_{thea}
SH40	SH40-25-4-6	40	25	4	6	無	16.5	0.152	13.7	1.20
	9				15.5		0.100	12.5	1.24	
	12				17.2		0.140	13.7	1.25	
	2 (内側)			9	8.50		0.0962	6.27	1.35	
	2 (外側)				7.85		0.203	6.27	1.25	
					10.3		0.0767	8.80	1.17	
	SH40-20-4-9		20	4	9.15		0.118	5.63	1.63	
	SH40-16-4-9		16							
SH80	SH80-25-4-6	80	25	4	6	無	11.8	0.162	21.2	0.554
	9				18.6		0.137	21.2	0.877	
	12				17.7		0.117	21.2	0.831	
	2 (内側)			9	6.86		0.197	10.6	0.647	
	2 (外側)				5.88		0.197	10.6	0.554	
					10.0		0.153	13.6	0.734	
	SH80-20-4-9		20	4	7.85		0.245	8.70	0.902	
	SH80-16-4-9		16							
SH40f	SH40f-25-4-6	40 (粉末樹脂混入)	25	4	6	無	16.3	0.0846	11.8	1.38
	9				9.48		0.0623	12.2	0.780	
	12				13.9		0.143	11.8	1.18	
	2 (内側)			9	7.68		0.104	6.08	1.26	
	2 (外側)				8.66		0.103	6.08	1.42	
					-		-	7.55	-	
	SH40f-20-4-9		20	4	8.01		0.0790	4.83	1.66	
	SH40f-16-4-9		16							
SH40R	SH40RL-25-4-6	40	25	4	6	断面欠損 ^{*1}	17.5	0.208	14.5	1.20
	12				無	19.4	0.156	16.7	1.17	
	SH40R-25-4-9				9	有	(106)	(0.621)	(78.7)	(1.34)
	SH40R-25-2i-9						144	11.3	104 ^{*4}	1.38
	SH40R-25-2o-9						(49.5)	(0.518)	(39.3)	(1.26)
							64.1	17.6	52.2	1.23
				(45.4)			(0.554)	(39.3)	(1.15)	
				77.8			11.1	52.2	1.49	

*1 鉄筋挿入部に空洞を設けた試験体

*2 最大荷重。ただし、SH40Rシリーズについては、()内は降伏荷重を示す。SH40f-20-4-9試験体は、計測装置の不良により除外。

*3 (2) 式および (3) 式より求めた計算値を示す。

*4 SH40Rシリーズの最大荷重については、(3) 式の Q_p を挿入鉄筋の引張強度 σ_u から求めたせん断強度 τ_u を用いて計算された。

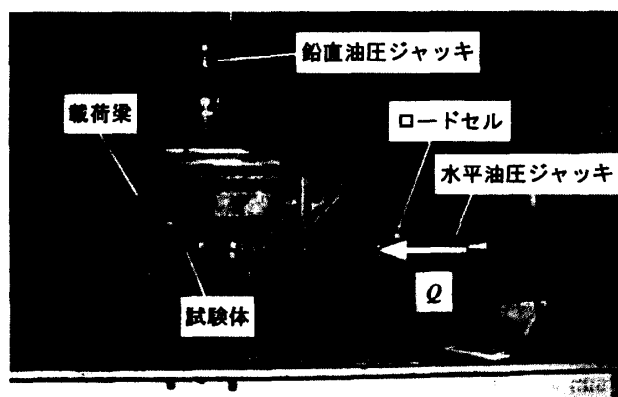


図-7 載荷装置

表-4 使用材料の力学的特性

シリーズ	材料	降伏応力度 σ_y (N/mm ²)	引張強度 σ_u (N/mm ²)	ヤング係数 E_s (N/mm ²)	
SH40	ふさぎ板 (SS400)	$t = 6$ (mm)	298	421	1.98×10^5
SH80		$t = 9$ (mm)	305	437	2.02×10^5
SH40f		$t = 12$ (mm)	285	420	2.03×10^5
SH40R	孔あき鋼板 (SS400)	$t = 12$ (mm)	297	431	2.02×10^5
SH40R	挿入鉄筋 (SR295)	9 ϕ	437	612	2.20×10^5

シリーズ	材料	圧縮強度 σ_c (N/mm ²)	割裂強度 σ_t (N/mm ²)
SH40 ^{*1}	モルタル	46.2	3.54
SH40 ^{*2}		42.0	4.67
SH80		77.7	6.02
SH40f ^{*3}		37.6	4.09
SH40f ^{*4}		34.2	4.23
SH40R		53.0	5.46

*1 SH40-25-4-9, SH40-25-2i-9, SH40-25-2o-9

*2 SH40-25-4-6, SH40-25-4-12, SH40-16-4-9, SH40-20-4-9

*3 SH40f-25-4-9, SH40f-25-2i-9, SH40f-25-2o-9

*4 SH40f-25-4-6, SH40f-25-4-12, SH40f-16-4-9, SH40f-20-4-9

板板厚は6, 9 および 12 mm の3種類である。これらの変数の組合せによって、計 26 体の試験体が計画された。

SH80 シリーズは、SH40 シリーズよりも圧縮強度の高いモルタルを用いた。SH40f シリーズは、粉末樹脂を混入したモルタルを用い、充填材の引張強度を増大させることによって接合部のせん断強度の向上を目的とした。SH40R シリーズは、挿入鉄筋の有無を変数とし、孔の中央部に鉄筋9 ϕ を配置した。

SH40, SH80 および SH40f シリーズはモルタルのみ、SH40R シリーズはモルタルと挿入鉄筋で接合部に作用するせん断力を負担させようとするものである。表-3 に試験体一覧を示す。

実験は、図-7 に示すように、鋼板ジベル中央にせん断力が作用するように、載荷梁を介し水平力を負荷した。なお、鉛直油圧ジャッキは、試験体の浮き上がりを防止するためのものである。

表-4 に使用材料の力学的特性を示す。

4.3 実験結果と考察

図-8 に各シリーズの最終破壊状況を示す。各試験体とも、モルタルおよび鉄筋の直接せん断で破断している状況が観察された。

図-9 に荷重変形関係の数例を示す。縦軸は作用せん断力 Q 、第一象限の横軸は接合部の相対水平変位 δ_H 、第二象限は接合部の相対鉛直変位 δ_V である。

SH40, SH80 および SH40f シリーズは最大荷重に達す

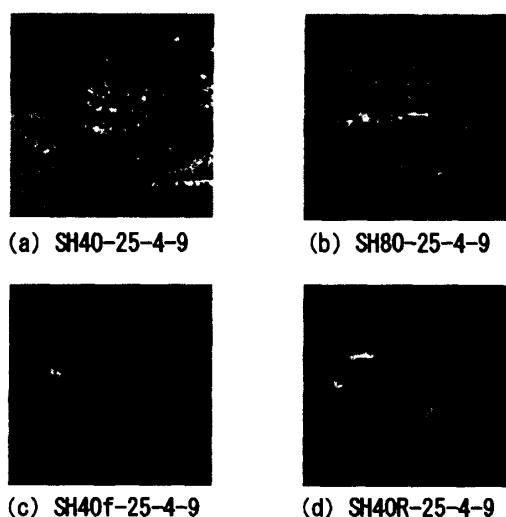
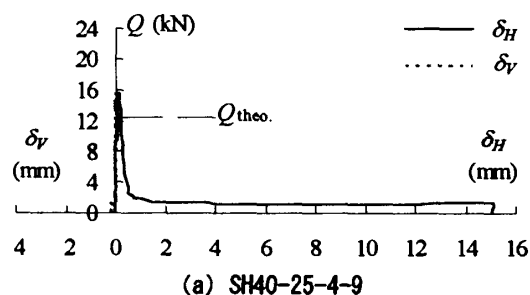
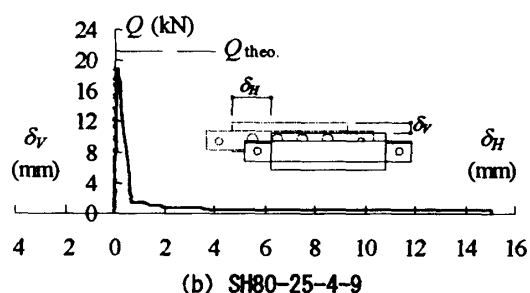


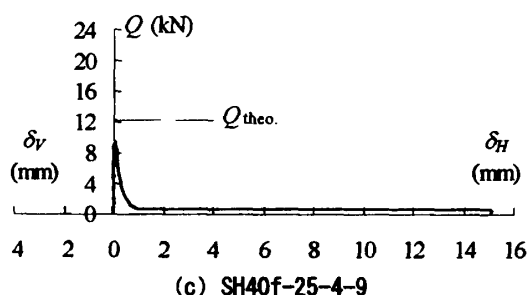
図-8 最終破壊状況



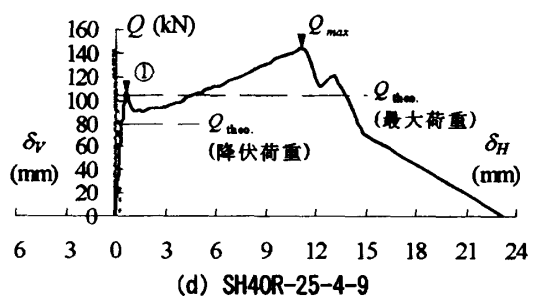
(a) SH40-25-4-9



(b) SH80-25-4-9



(c) SH40f-25-4-9



(d) SH40R-25-4-9

図-9 荷重変形関係

るまで δ_H は小さい。最大荷重に達した後、荷重が急激に低下し脆性的な破壊が見られた。これは、モルタル破断後、荷重を保持できる要因がなくなったためと考えられる。また、荷重が低下した後、一定の荷重を保持して変形が増大した。これは、充填材の細骨材の噛合い作用等によると考えられる。なお、 δ_V は δ_H に比べ、非常に小さい。

孔内に鉄筋が挿入された SH40R シリーズでは、SH40 シリーズと同程度のせん断力に達すると剛性がやや低下したが、その後の剛性も高く、図-9 (d) に示す①点の荷重（以下、降伏荷重という）に達するまで、荷重が増大した。これは、変形初期においては、モルタルと鉄筋が同時にせん断力に抵抗しているが、荷重の増大に伴いモルタルの耐力負担分が減少したため、剛性が低下したものと考えられる。降伏荷重に達した後、荷重はいったん低下し、再び増大した。これは、降伏荷重に達した後、モルタルボルトが破断または鉄筋が降伏したため、荷重が低下したと考えられる。その後、鉄筋のひずみ効果などによって、荷重が増大し、最大荷重に至ったと考えられる。最大荷重に達した後、鉄筋の破断音とともに荷重が急激に低下した。

図-10 に実験変数による荷重変形関係の比較を示す。PBL の孔数を変数とした試験体の最大荷重 Q_{exp} は、孔数に比例して増大している。PBL の孔径を変数とした試験体の Q_{exp} は孔径が大きくなることによって増大するが、孔径の面積に比例した Q_{exp} の増大は確認されなかった。これは、 Q_{exp} は孔径とモルタル内細骨材の寸法関係にも影響があるためと考えられる。ふさぎ板の板厚を変数とした試験体の Q_{exp} は、明瞭な差が確認されなかった。これは、期待した拘束効果が微小であったことを示している。また、充填材の材料特性を変数とした試験体の Q_{exp} には明瞭な差は確認できなかった。モルタルボルト内に鉄筋を挿入した SH40R シリーズの PBL の孔数を変数とした試験体の降伏荷重は、SH40 シリーズと同様に孔数に比例して増大していることが確認された。また、最大荷重についても、孔数に比例して増大する傾向がみられた。

表-3 に各試験体の実験結果を示す。

4.4 接合部のせん断耐力評価

モルタルボルトのせん断耐力 $Q_{theo.}$ は、

$$Q_{theo.} = n_b \times Q_{mc} \quad (2)$$

によって評価する。 Q_{mc} は、モール・クーロンの破壊基準⁹⁾を用いて、モルタルボルトの純せん断強度を算出したもので、

$$Q_{mc} = \tau_{mc} \times \pi \times D_b^2 / 4$$

$$\tau_{mc} = 0.5 \times \sqrt{\sigma_b \cdot \sigma_c}$$

となる。

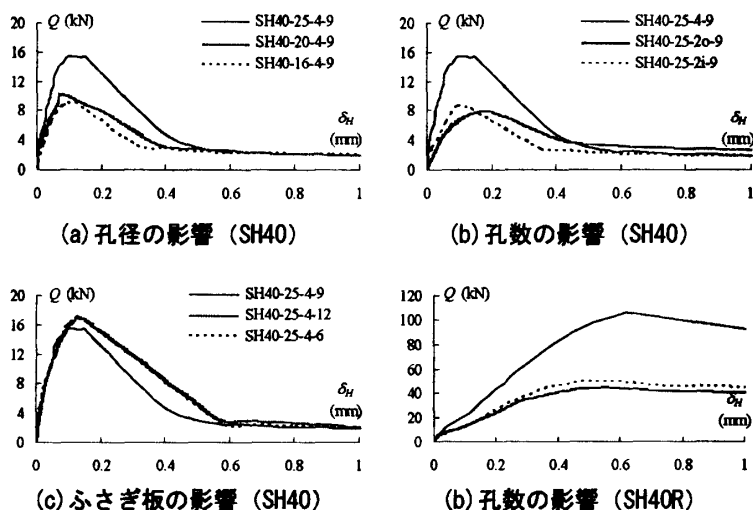


図-10 実験変数の比較

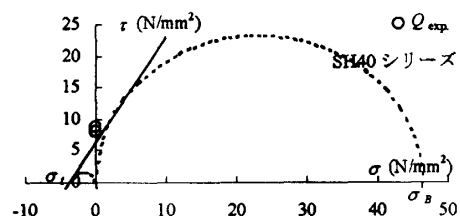


図-11 モール・クーロンの破壊基準

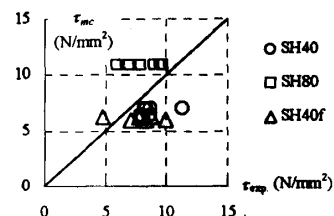


図-12 実験値と計算値の比較

モルタルボルトに鉄筋を挿入した場合の降伏荷重 Q_y は、既往の研究²⁾を参考にして、(3) 式による。

$$Q_y = n_b \times (Q_r + Q_{mc}) \quad (3)$$

ここに、

$$Q_r = \tau_y \times \pi \times D_r^2 / 4$$

$$\tau_y = \sigma_y / \sqrt{3}$$

Q_{mc} : モルタルボルトのせん断耐力

τ_{mc} : モール・クーロンの破壊基準による純せん断強度

D_b : モルタルボルトの直径

σ_B : モルタルの圧縮強度

σ_t : モルタルの割裂強度

Q_r : 鉄筋の降伏せん断耐力

τ_y : 挿入鉄筋の降伏せん断応力度

D_r : 挿入鉄筋の直径

n_b : モルタルボルトの本数

図-11 にせん断強度の実験値 τ_{exp} とモール・クーロンの破壊基準との比較の一例を示す。図-12 に各シリーズの τ_{exp} と計算値 τ_{mc} の比較を示す。縦軸は、計算値 τ_{mc} 、横軸は実験値 τ_{exp} を示す。なお、せん断強度の実験値 τ_{exp} は、最大荷重 Q_{exp} を各試験体の孔の総断面積で除したものである。各試験体の実験値は計算値とほぼ一致している。図-9 に示す Q_{theo} は式 (2) または式 (3) によって求められた結果を示す。なお、孔内に鉄筋が挿入された SH40R シリーズの最大荷重の計算値は、式 (3) の Q_r の算定で、 τ_y のかわりに、挿入鉄筋の引張り強度から求めたせん断強度 τ_u を用いて算定された。SH40R シリーズの計算値は各試験体の実験値に比べて小さい。

前述の実験結果および耐力評価法を踏まえて、PBL の孔数や孔径などの調節によって、実務で求められる性能を満足させることのできる接合部を構築することが可能であると考えられる。

なお、耐力評価法については、今後詳細な検討が必要

であると考えられる。

5 結語

PCa 壁による S 骨組の耐震性能の向上を意図した研究によって、

- 1) S 骨組に内蔵された RC 壁を対象として、RC 壁板に合理的な配筋を施し、従来のシアーキーを用いた試験体によって、RC 壁板から S 骨組への応力伝達を明らかにした。
- 2) RC 壁板と S 骨組との接合方法として、施工性を考慮して、PBL を 2 枚重ねた状態で用いる接合部ディテールを考案した。
- 3) 考案された接合部の耐力評価法を提案した。
- 4) 本研究結果から、考案された接合部ディテールを実務に用いることの可能性を示唆した。

参考文献

- 1) 日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説，pp.149-189, 1985
- 2) 文献調査委員会：鋼とコンクリートを一体化する孔あき鋼板ジベルの耐力評価に関する最近の研究，コンクリート工学，Vol.42, No.3, pp.61-67, 2004.3
- 3) 日本建築学会：鉄骨鉄筋コンクリート造配筋指針・同解説，pp.182, 2005.7
- 4) 藤木・南：SRC 構造の合理的配筋設計法の開発研究〔その 10〕耐震壁の合理的配筋法（その 1），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1565-1566, 1989.10
- 5) W.F.Chen: PLASTICITY IN REINFORCED CONCRETE, 1982

謝辞

本研究の一部は、国土交通省「住宅等の耐震性の向上に資する技術開発」プログラムによるもので、ミラクルスリーコーポレーション(株)から多大な研究協力を得た。記して謝意を表す。