

論文 一面せん断を受ける孔あき鋼板ジベルのせん断破壊性状

佐藤 悠史^{*1}・西村 泰志^{*2}

要旨：鉄骨骨組にプレキャストコンクリート壁板を組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2枚の孔あき鋼板ジベルを用いた接合部を提案し、その接合部のせん断破壊性状について、実験的に検討を行った。実験結果から、一面せん断を受ける孔あき鋼板ジベルのせん断耐力は、モルタルの破断によると定義すると、挿入鉄筋の鉄筋径の面積に比例してせん断耐力は増大すること、異形鉄筋を挿入した場合は丸鋼を挿入した場合に比べてせん断耐力がやや向上することおよび挿入鉄筋の定着方法および付着性能の相違によって破壊性状に若干相違が生じることが示された。また、この接合部の耐力評価法が提案された。

キーワード：合成構造、接合部、孔あき鋼板ジベル接合、挿入鉄筋、応力伝達、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。従来の施工方法は、S 骨組に頭つきスタッドボルトなどのシアーキーを数多く溶植した後に壁筋を配筋し、その後壁板のコンクリートを現場で打設するなど非常に煩雑である。したがって、省力化・工期短縮などの観点から、工法そのものの妥当性が懸念されることが十分に考えられる。本研究では、このような観点から、施工性を向上させるために、PCa 化した RC 耐震壁を S 骨組に建て入れる工法を提案する。しかしながら、壁板を骨組に組み込むことを考えると、従来の工法と同様のシアーキーを設けるのであれば、省力化、工期短縮化の面で疑問が残る。したがって、S 骨組と RC 壁板の接合方法として、土木分野^{2,3)}において合成梁などで有用性が示されている孔あき鋼板ジベル（以下、PBL という）接合に着目し、それを活用することを試みる。

本研究は、2 枚の PBL を重ねて用いることによって、一面せん断を受ける接合部のせん断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. 提案する工法の概要

図-1 (a) は、S 骨組に水平力 Q_g が作用し、接合部を介して骨組に内蔵された RC 壁板にせん断力が作用している状態を示している^{4,5)}。このせん断力に対して、図-1 (a) に示すように、壁板には接合部間を対角方向に結ぶ圧縮束が形成されると考えられる。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 (a) に示すように、接合部間を結ぶ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の S 部材に対する鉛直成分は壁筋に作用する引張力によって釣合い、他方の成分

は、接合部を介して S 部材に軸方向力として伝達できると考えられる。したがって、接合部には主にせん断力の伝達が要求される性能となる。

接合部として、図-1 (b) に示すように、一面せん断を受ける孔あき鋼板ジベルを用いたディテールを提案する。このディテールを壁板と S 骨組との接合部に利用する場合、モルタルを充填する程度の小さな形状寸法となり、土木分野で用いられている設計法^{2,3)}を直接適用することに対していくつかの疑問点が残されている。この

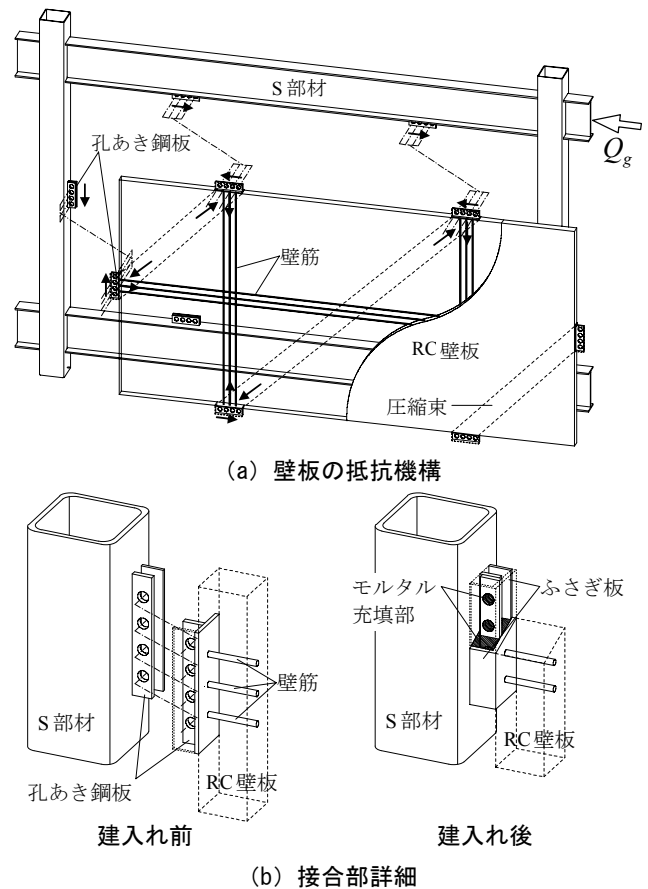


図-1 提案する工法の概要

*1 大阪工業大学大学院 博士前期課程（現大成建設）（正会員）

*2 大阪工業大学 教授 工博（正会員）

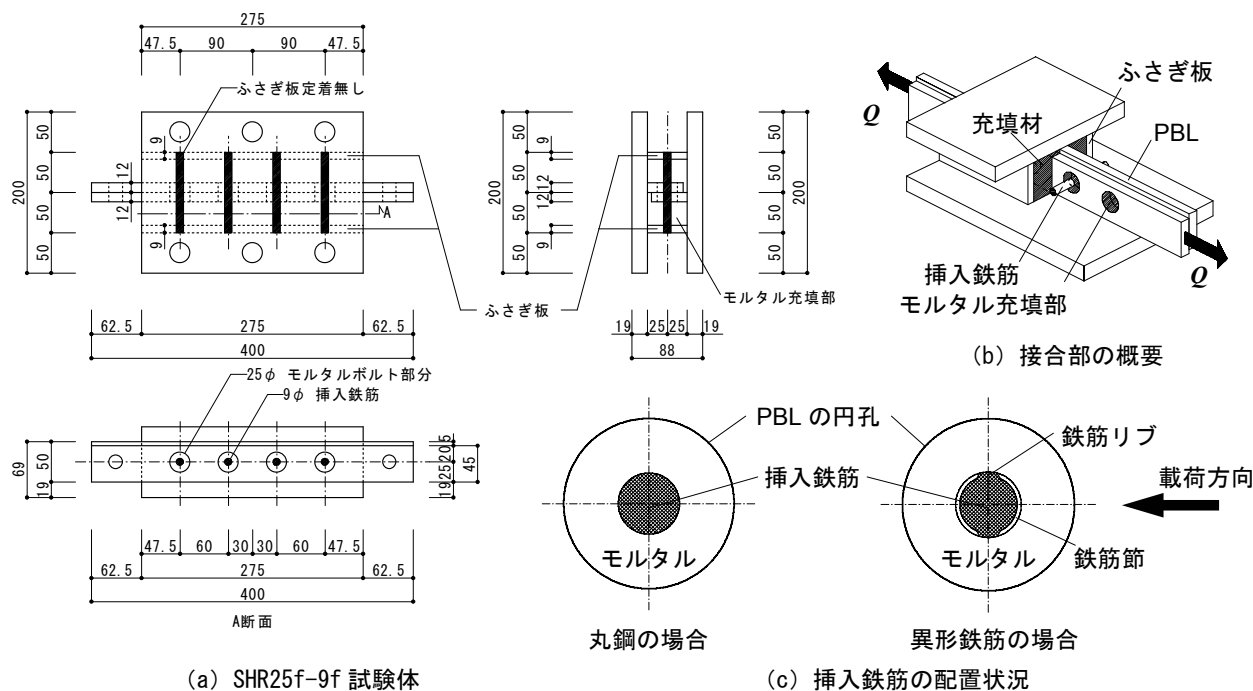


図-2 試験体詳細

ような観点から、既報^{5~7)}では、充填材（モルタル）の種類と強度、孔径、孔数、孔の配置位置、ふさぎ板の板厚および挿入鉄筋の有無を実験変数とした26体の実験を行った結果、接合部のせん断強度は充填されたモルタルの純せん断強度程度であること、ふさぎ板の板厚に関わらずふさぎ板によるモルタルの拘束効果は期待できないこと、PBLの孔内に鉄筋を挿入した場合せん断耐力および変形性能は増大すること、また、その場合、PBLの孔内に充填されたモルタルのせん断耐力に鉄筋のせん断耐力を累加することによって、接合部のせん断耐力を概ね評価できることが示された。しかしながら、挿入鉄筋を有する場合、PBLの孔径に対してどの程度の鉄筋径を用いれば良いか、挿入する鉄筋は異形鉄筋と丸鋼によって性能に違いがあるかなど様々な問題点が残されている。また、実際の骨組に提案された接合部を用いる場合、提案するディテールの形状寸法では、挿入鉄筋の定着長さが充分に取れない場合も考えられる。したがって、挿入した鉄筋端部の処理方法によっても性能に相違が生じる可能性がある等疑問点が残されている。

土木分野の研究成果において、PBL単体を用いた場合の挿入金物の径に対してPBLの孔径を変化させた実験⁸⁾は若干見られるものの、本研究で提案するようにPBLを2枚重ねることによって、一面せん断の抵抗力を期待した研究事例は非常に少なく、提案するディテールを実現させるための基礎資料が必要になると考えられる。

このような観点から、以下の実験が計画された。

3. 実験（PBLを用いた接合部の性能実験）

3.1 実験計画

図-2に接合部試験体詳細の一例を示す。試験体の形状寸法は、想定する接合部ディテールのほぼ実物大である。本実験では、この接合部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、PBLに設けた孔径、孔中央部に設けた挿入鉄筋の種類、鉄筋径および鉄筋端部の処理方法である。なお、比較のため、PBLに鉄筋を挿入していない試験体も計画した。各試験体とも、PBLに充填したモルタルとPBLの孔中央部に挿入した鉄筋によって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。

PBLに設けた孔径は、25mmおよび50mmである。PBLの孔中央に挿入した鉄筋は、6φ、9φ、13φ、16φ、D6、D10、D13の7種類である。なお、挿入鉄筋については、図-2(c)に示す状態で配置した。鉄筋端部の処理方法については、ふさぎ板まで貫通させた鉄筋を固定していないもの、ふさぎ板の外面で完全溶け込み溶接を施したもの2種類である。これらの変数の組合せによって、計11体の試験体が計画された。

SHR25fシリーズは、PBLに設けた孔径を25mmとし、孔中央部に挿入した鉄筋の鉄筋種類、鉄筋端部の処理方法による性能の相違を確認した。SHR50fシリーズでは、PBLに設けた孔径を50mmとし、PBLの孔中央部に挿入した鉄筋の有無による性能の相違を確認した。なお、SHR25f-9fw試験体とSHR50f-16fw試験体の孔径と鉄筋径の比は概ね同一であり、スケール効果の影響を調べた。

表－1 試験体一覧および実験結果

シリーズ	試験体名*1	モルタル強度 F_c (N/mm ²)	孔径 D_b (mm)	孔数 n_b	挿入鉄筋	ふさぎ板 定着	挿入鉄筋の 破壊形式*2	Q_{exp} ^{*3} (kN)	δ_H ^{*4} (mm)	Q_{theo} ^{*5} (kN)	Q_{exp}/Q_{theo}
SHR25f	SHR25f-0	60	25	4	無	無		21.2	0.101	18.2	1.17
	6φ				曲げ		(51.8)	(0.237)	45.1	1.15	
	9φ				曲げ		(91.5)	(0.500)	76.9	1.19	
	SHR25f-9fw					溶接	せん断	(103)	(0.687)	76.9	1.34
	SHR25f-13f				13φ	無	曲げ	(117)	(0.582)	112	1.04
	SHR25f-D6				D6		せん断	(72.6)	(0.349)	45.8	1.58
	SHR25f-D10				D10		せん断	(100)	(0.573)	74.0	1.36
	SHR25f-D10w					溶接	せん断	(109)	(0.538)	74.0	1.48
	SHR25f-D13				D13	無	－	(164)	(2.01)	134	1.23
SHR50f	SHR50f-0	50	3	無	溶接		66.4	0.302	54.6	1.22	
	SHR50f-16fw			16φ		－	(212)	(1.48)	167	1.27	

*1 試験体名は、SHR〇〇の部分にPBLに設けた孔径を示し、ハイフンの後は挿入した鉄筋径および鉄筋種類（丸鋼の場合：f、異形鉄筋の場合：D）、端部の定着（完全溶け込み溶接を施した試験体は末尾にwを追加）を示している。なお、挿入鉄筋を設けていない試験体については、ハイフンの後に0を表記している。

*2 SHR25f-D6試験体については、4本の挿入鉄筋の内1本に曲げ変形が見られた。なお、SHR25f-D13およびSHR50f-16fw試験体は破断面の観察ができなかったため除外。

*3 最大荷重を示す。ただし、挿入鉄筋を設けた試験体については、()内は図-5に示す Q_b 点の荷重を示す。また、載荷装置の限界により載荷を終了した試験体については、最大荷重は除外。SHR25f-D6試験体については、鉄筋破断時の荷重を示す。

*4 最大荷重時の接合部の相対水平変位を示す。

*5 (1) 式および (2) 式より求めた計算値を示す。

表－2 使用材料力学的特性

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)
SHR25f	ふさぎ板	$t=9$ (mm)	302	446	2.02×10^5
	孔あき鋼板	$t=12$ (mm)	307	437	2.05×10^5
SHR50f	ふさぎ板	$t=9$ (mm)	301	425	2.05×10^5
	孔あき鋼板	$t=12$ (mm)	297	396	2.03×10^5
SHR25f	挿入鉄筋 (SR295)	6 ϕ	429	511	1.49×10^5
		9 ϕ	416	597	2.08×10^5
		13 ϕ	322	448	1.91×10^5
	挿入鉄筋 (SD295)	D6	394	462	1.70×10^5
		D10	355	483	1.74×10^5
		D13	411	586	1.80×10^5
SHR50f	挿入鉄筋 (SR295)	16 ϕ	338	474	1.99×10^5
シリーズ	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)
SHR25f SHR50f	モルタル		66.8	5.14	6.63×10^4



(a) SHR25f-0



(b) SHR25f-9f



(c) SHR25f-9fw



(d) SHR25f-D10

図－3 最終破壊状況

表－1 に試験体一覧を示す。

表－2 に使用材料の力学的特性を示す。なお、モルタルの圧縮および割裂強度は、50 ϕ ×100 のモールドを用いて作製したシリンダーによって測定した値を示す。

なお、2 枚の PBL の両面にはグリースを塗布し、PBL とコンクリートおよび PBL 同士の付着を除去している。

実験は、PBL の孔の中央線上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。

3.2 実験結果と考察

3.2.1 破壊性状

図－3 に最終破壊状況の数例を示す。PBL の孔内にモ

ルタルのみ充填した試験体（図－3 (a)）では、モルタルの一面せん断による破断が見られ、局部支圧などによる破壊は観察されなかった。

PBL の孔中央部に丸鋼を挿入し鉄筋の端部をふさぎ板に定着していない試験体（図－3 (b)）では、モルタルは直接せん断で破断し、挿入された鉄筋は曲げ変形によってクランク型に変形している状況が観察された。なお、モルタルには鉄筋によって局部支圧で破壊されている状況が確認された。一方、PBL の孔中央部に丸鋼を挿入し鉄筋の端部をふさぎ板に定着を施した試験体（図－3 (c)）および異形鉄筋を挿入した試験体（図－3 (d)）では、モルタルおよび挿入された鉄筋が直接せん断で破断してい

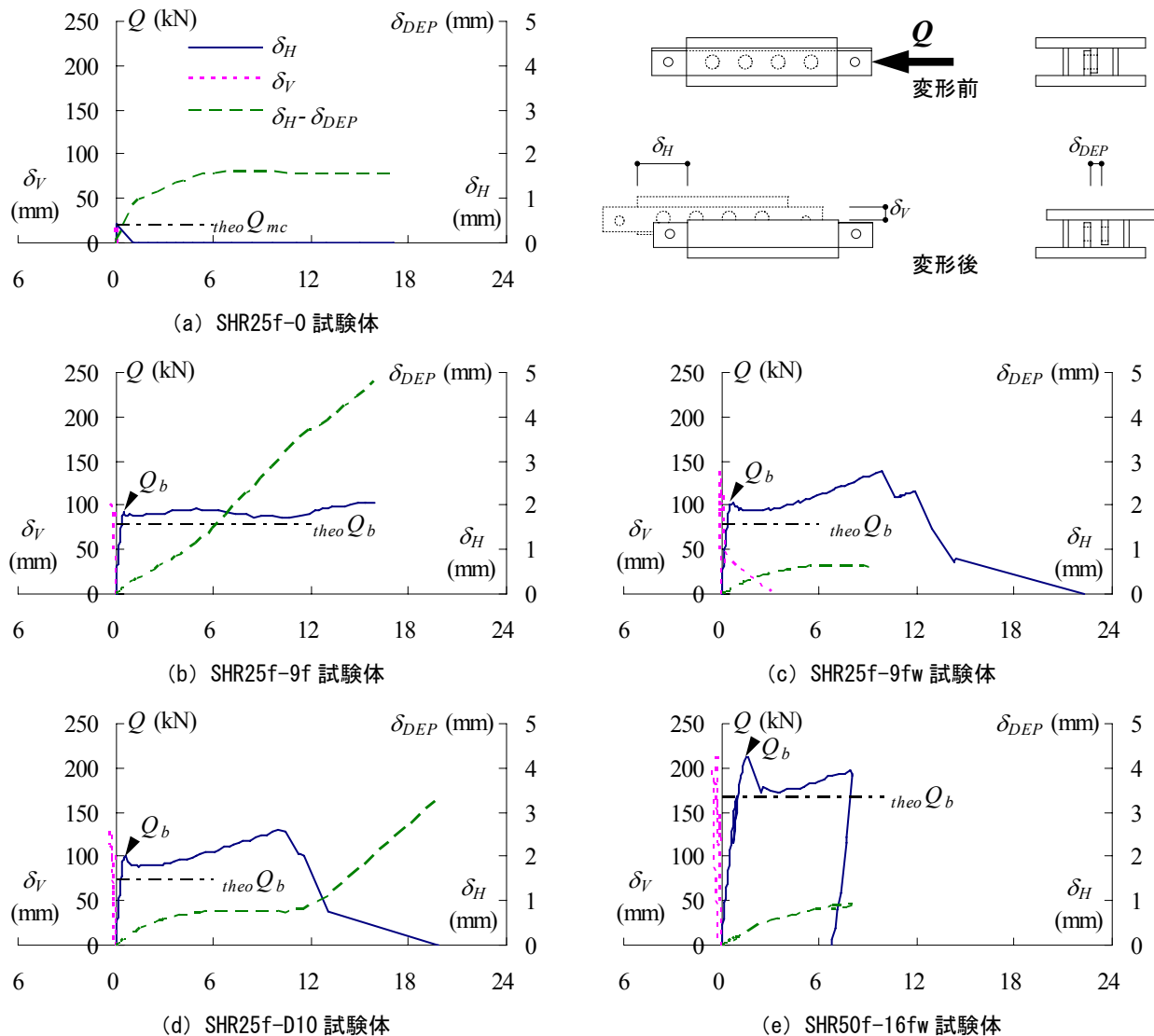


図-4 荷重変形関係

る状況が観察され、モルタルには鉄筋の変形によって部分的に支圧されている状況が確認された。

表-1 に各試験体の挿入鉄筋の破壊形式を示す。

3.2.2 荷重変形関係

図-4 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。また，図中に 2 枚の PBL の相対水平変位 δ_H -相対離間変位 δ_{DEP} 関係を示す。図中の一点鎖線で示した $theo Q_{mc}$ および $theo Q_b$ は，後述の耐力評価法より求めた計算値を示す。

PBL の孔中央部に鉄筋を挿入した丸鋼および異形鉄筋の相違にかかわらず，図-4 (b) ~ (e) に示す Q_b 点の荷重に達するまで荷重が増大し，その後荷重がいったん低下する現象が見られた。丸鋼を挿入し鉄筋端部の定着を設けていない試験体では，荷重が低下した後，低下後の荷重を概ね維持しながら変形が増大し載荷を終了した。一方，異形鉄筋を挿入した試験体および挿入した鉄筋の

端部をふさぎ板の外面で完全溶け込み溶接を施した試験体については，荷重がいったん低下した後，再び荷重が増大し， $\delta_H = 10 \text{ mm}$ 程度で最大荷重に至った。最大荷重に達した後，挿入した鉄筋の破断音とともに荷重が急激に減少した。これらのことから， Q_b 点に達した後荷重が一旦低下するのは，鉄筋の降伏あるいは付着力が関係しているのではないかと考えられるが，詳細については今後の課題である。なお，丸鋼を挿入した SHR25f-6f，SHR25f-9f および SHR25f-13f 試験体は，載荷装置の不良により約 $\delta_H = 20 \text{ mm}$ 以降は実験を中止した。また，SHR25f-D13 および SHR50f-16fw 試験体は，載荷装置の負荷能力の限界によって載荷を終了したため，鉄筋が破断すると考えられる荷重は測定できなかった。なお， δ_V は δ_H に比べ非常に小さい。

また， δ_H - δ_{DEP} 関係に着目すると，PBL の孔中央部に丸鋼を挿入し鉄筋端部の定着を設けていない試験体では， δ_H の増大に伴って δ_{DEP} は比例的に増大している。これ

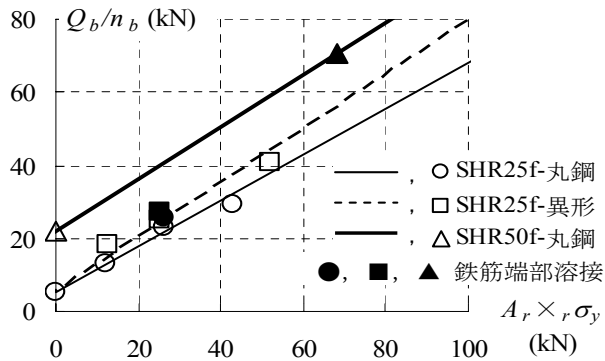


図-5 挿入鉄筋径と耐力の関係

は、2枚のPBLの間に丸鋼が徐々に入り込むことによって δ_{DEP} 間が比例的に増大したと考えられる。一方、異形鉄筋を挿入した試験体および挿入した鉄筋の端部をふさぎ板の外面で溶接を施した試験体では、 Q_b 点の荷重に達するまで、 δ_H の増大に伴って δ_{DEP} は比例的に増大しているものの、 Q_b 点の荷重に達した後、 δ_{DEP} がある一定の変位量で δ_H が増大し、その後、鉄筋破断前後において、 δ_{DEP} は急激に増大している。これは、 Q_b 点の荷重に達した後、鉄筋とモルタルの付着または定着によって、挿入鉄筋が引き抜きに対して抵抗していることが推察される。モルタルのみ充填した試験体では、最大荷重時以降に δ_{DEP} が急激に増大している。これは、最大荷重後にモルタルがせん断によって破断したため、2枚のPBLを繋ぎとめるものが無くなり δ_{DEP} が増大したと考えられる。

以上のことより、 Q_b 点の荷重に達するまでは、鉄筋種類や鉄筋端部の定着の有無による変形性状の大きな相違はなく、 Q_b 点の荷重に達した後、鉄筋の固定度によって、 δ_{DEP} の性状が変化していると考えられる。なお、ここで述べる固定度とは、鉄筋による付着効果および鉄筋端部のふさぎ板の定着効果などによるものを意味している。

図-5に実験値（ Q_b 点の荷重）より得られた孔1個当たりの耐力と鉄筋径の関係を示す。縦軸は Q_b 点の荷重を孔数 n_b で除した値 Q_b/n_b 、横軸は挿入鉄筋一本の断面積に各鉄筋の降伏強度を乗じた値を示す。図中の○および細実線はSHR25fシリーズの丸鋼の結果、□および破線はSHR25fシリーズの異形鉄筋の結果、△および太実線はSHR50fシリーズの結果を示している。挿入した鉄筋の端部を溶接した試験体は●印で示している。なお、細実線、破線および太実線はそれぞれのシリーズの実験値の回帰式である。

PBLの孔内にモルタルのみ充填したSHR25f-0試験体およびSHR50f-0試験体をみると、PBLの孔径の面積に比例して最大荷重 Q_{exp} が増大している。PBLの孔中央部に鉄筋を挿入した試験体についてみると、鉄筋径を変数

とした試験体では、鉄筋の断面積に概ね比例して Q_b 点の荷重が増大している。鉄筋端部の処理方法を変数とした試験体の Q_b 点の荷重は、ふさぎ板まで貫通させた鉄筋を固定していない試験体に対し、ふさぎ板の外面で完全溶け込み溶接を施した試験体の方がやや増大している。丸鋼を挿入した試験体に比べて異形鉄筋を挿入した試験体の直線がやや傾きは大きい。これは、前述したように、挿入鉄筋の固定度の影響であると考えられる。

これらの実験結果から、提案する接合部ディテールに挿入鉄筋を設ける場合、挿入した鉄筋の固定度によって、 Q_b 点の荷重および Q_b 点の荷重に達した後の荷重変形関係に相違が生じる。固定度が大きくなるにつれて、 Q_b 点の荷重は若干増大する傾向が見られ、 Q_b 点の荷重に達した後の変形性能は低下するが、鉄筋破断による最大荷重は増大する。

4. 接合部のせん断耐力評価

文献5)より、モルタルのみ充填した接合部のせん断耐力 Q_{mc} は、図-6(a)に示す抵抗機構より、

$$theo Q_{mc} = n_b \times q_{mc} \quad (1)$$

によって評価する。ここに、

$$q_{mc} = \tau_{mc} \times \pi \cdot D_b^2 / 4, \quad \tau_{mc} = 0.5 \times \sqrt{\sigma_B \cdot \sigma_t}$$

q_{mc} : モルタルのせん断耐力

n_b : PBLに設けた孔数

τ_{mc} : モーラー・クーロンの破壊基準による純せん断強度

D_b : PBLに設けた孔の直径

σ_B : モルタルの圧縮強度

σ_t : モルタルの割裂強度

PBLの孔中央部に鉄筋を挿入し、モルタルを充填した接合部の Q_b 点の荷重は、本実験結果および既往の研究^{2,3)}を参考に、図-6(b)に示す状態を考えると、

$$theo Q_b = n_b \times (q_{mc}' + q_r) \quad (2)$$

によって評価する。ここで、

$$q_r = \tau_y \times \pi \cdot D_r^2 / 4, \quad \tau_y = \sigma_y / \sqrt{3}$$

q_r : 挿入鉄筋の降伏せん断耐力

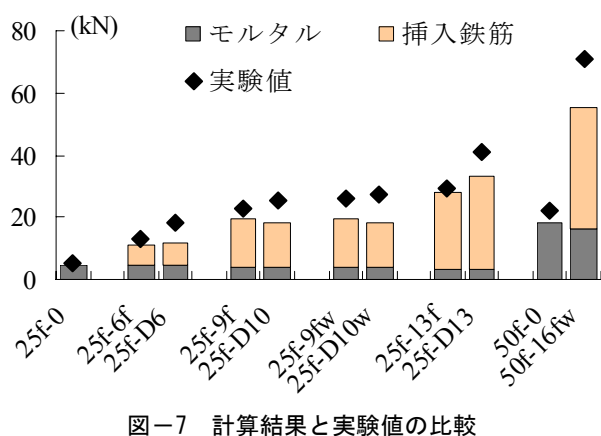
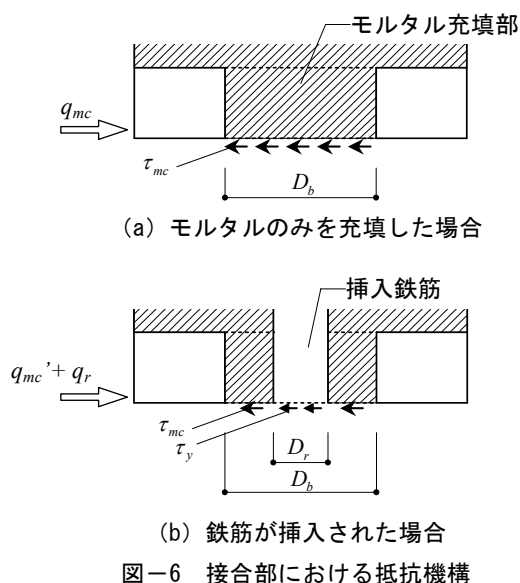
τ_y : 挿入鉄筋の降伏せん断強度

D_r : 挿入鉄筋の鉄筋径

σ_y : 挿入鉄筋の降伏強度

なお、(2)式で用いた q_{mc}' は、(1)式の q_{mc} から挿入鉄筋部分の断面欠損を考慮した値を用いる。

3.2.2節において、挿入鉄筋の固定度によって Q_b 点の荷重が若干影響されることが示された。挿入鉄筋が引張力を受けるとモルタルの破断面に圧縮力が作用し、せん断抵抗力が増大することが考えられる。また、一方では鉄筋が引張力を受けることによって鉄筋のせん断耐力が



低下すること考えられるが、(2)式ではこれらの影響については考慮していない。これらの効果を加味した耐力評価法については今後の課題である。

図-7に各試験体の実験結果および(1)式～(2)式の計算結果を示す。縦軸は、各試験体の Q_b 点の荷重に対する計算値および実験値を孔の総数で除して孔1個の荷重の負担分としたものを示している。図中の◆は各試験体の実験値、■はモルタルによる耐力、■は挿入鉄筋による耐力を示している。

PBLの孔内に鉄筋を挿入した試験体の計算値に対して実験値は、1～1.5倍のやや大きめの評価になったが、前述のことを考慮すると、各試験体の計算値は実験値をほぼ評価できていると言える。なお、表-1に各試験体の計算値を示す。図-4に示す $_{theo}Q_{mc}$ および $_{theo}Q_b$ は、(1)式および(2)式によって求められた結果を示している。

本耐力評価法の結果より、想定される接合部に提案するディテールを用いる場合、PBLに設ける孔径や挿入する鉄筋の鉄筋径、充填するモルタルの材料強度などを調整することによって、要求する性能を満足することが充分可能ではないかと考えられる。

5. 結語

PCa壁とS骨組の接合部にPBLを用いて結合された接合部のせん断破壊性状を明らかにすることを目的とした実験的研究によって、以下の知見が得られた。

- 1) 考案された接合部のせん断破壊性状は、モルタルのみ充填した場合、モルタルの1面せん断によって破断する。
- 2) 丸鋼を挿入し鉄筋の端部をふさぎ板に定着していない試験体は、挿入鉄筋の曲げ変形によって破壊している。一方、丸鋼を挿入し鉄筋の端部をふさぎ板に定着を施した試験体および異形鉄筋を挿入した試験体の挿入鉄筋はせん断によって破壊する。
- 3) せん断耐力は概ね挿入鉄筋の鉄筋径の面積に比例し、挿入鉄筋の固定度の大きい試験体のせん断耐力は若干増大する。
- 4) 提案された接合部の耐力評価法によって本実験結果を評価できる。

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) 鬼頭宏明，園田恵一郎：鋼・コンクリート複合構造，森北出版，2008.3
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 佐藤悠史，西村泰志，吉田幹人，尾崎太亮：PCa壁による鉄骨骨組の耐震性能の向上，コンクリート工学年次論文報告集，第30巻，pp.1369-1374，2008.3
- 6) 吉田幹人，佐藤悠史，西村泰志：孔あき鋼板を用いたS要素とRC要素が並列的に結合される接合部の破壊性状(その1)，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1245-1246，2008.9
- 7) 佐藤悠史，吉田幹人，西村泰志：孔あき鋼板を用いたS要素とRC要素が並列的に結合される接合部の破壊性状(その2)，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1247-1248，2008.9
- 8) 田中正明，中村隆志，内田裕也，木津良太：鋼・コンクリート合成床板「パイプスラブ」の開発(第1報)，クリモト技報，No.48，pp.30-39，2008.3

謝辞

本研究は、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、(株)ミラクルスリーコーポレーションから多大な研究協力を得た。記して謝意を表す。