

論文 傾斜配筋されたプレキャスト接合面のせん断挙動と接合筋傾斜角度との関係に関する研究

岡田行江^{*1}・香取慶一^{*2}・林静雄^{*3}

要旨: プレキャスト接合面において、接合筋を傾斜配筋した場合のせん断耐力や接合筋の挙動を明らかにすることを目的とした。その結果、①接合筋を傾斜配筋した接合面の履歴性状が良好となること、②配筋方法によらず、傾斜角度が 30° の場合に耐力が大きくなること、③傾斜配筋した接合筋はダボ的挙動をほとんどせず、軸方向力によってせん断抵抗をすること、④従来のプレキャスト接合部の耐力評価同様、傾斜配筋した場合にもせん断抵抗要素ごとの負担せん断力の累加によって耐力評価が可能であることがわかった。

キーワード: プレキャスト、接合面、接合筋、傾斜配筋、せん断力

1. はじめに

プレキャストコンクリート構造の接合部設計において、現行では強度支配型の設計法が基本であるが、近年では靱性能を加味した設計法の確立も要求されている。また、過去の諸研究^{1),2)}では、接合面と接合筋のなす角度により接合部のせん断耐力や復元力特性が変化することが確認されている。

本研究では、接合筋を傾斜配筋させたプレキャスト接合部のせん断挙動と接合筋傾斜角度との関係を解明することを目的とし、プレキャストコンクリート接合面のS型加力による正負交番繰返しせん断実験を行い、実験結果に基づいてそのせん断挙動と接合筋傾斜角度との関係についての検討を行った。

2. 実験概要

2. 1 試験体概要

試験体は、プレキャストコンクリート構造の水平接合部、主に耐震壁-梁接合部の微小要素を想定したものである。試験体一覧を表-1に、また試験体詳細図を図-2に示す。パラメータは

接合筋傾斜角度、配筋種類、接合筋交差部位置の3種類とした。また、実験データのばらつきを考えて同じパラメータの組み合わせのものを2~3体ずつ、総計50体製作した。

全試験体とも形状、接合筋の種類は同一とし、左右の接合筋が同一傾斜角度の試験体をIシリーズ、左右の接合筋が直角に交わっているものをLシリーズ、左右の接合筋が直角に交わり、かつ溶接されているものをWシリーズとする。Wシリーズには溶接格子を利用した。各シリーズとも接合筋交差部が接合面上にあるものをA type、ないものをB typeとする。試験体名は〈シリーズ種類〉+〈接合筋交差部の位置〉+〈傾斜角度〉で表した。(例:L-B-60)

試験体の作成順序は、まず先打ち部分の型枠を組み、接合筋およびスタブ補強筋を所定の位置に配筋した後、先打ち部分のコンクリート打設を行う。接合面上の凹凸によるかみ合いを可能な限り除去するため、打設終了後接合面を金鏝で仕上げる。先打ちコンクリート打設後およそ2~3日で後打ち部分の型枠を組み、スタブ補強筋を配して後打ち部分のコンクリート打設

*1 住宅金融公庫(元 東京工業大学大学院) 修士(工学)(正会員)

*2 東京工業大学助手 建築物理研究センター 博士(工学)(正会員)

*3 東京工業大学教授 建築物理研究センター 工博(正会員)

を行う。後打ちコンクリート硬化後、すべての脱型をし試験体を完成させる。試験体は気中養生させ、材齢28日で実験を行った。尚、接合筋は定着の完璧と配筋精度の確保のため、接合筋両端には板厚6mmの鉄板を溶接した。

2. 2 使用材料

接合筋にはD10を2本使用したが、I, Lシリーズの試験体では、Wシリーズにおいて使用する溶接格子を切断して用いた。すなわち、すべての試験体で同一ロットの鉄筋を接合筋として用いるよう配慮した。鉄筋の材料特性を表-2に示す。また、鉄筋の曲げ試験（3点曲げ）より得られた結果を図-1に示す。

コンクリート用粗骨材は石灰石碎石（ふるいにより最大粒径20mm）を、細骨材には川砂を用い、セメントには普通ポルトランドセメントを用いた。力学的性質を表-3に示す。先打ち部分と後打ち部分のコンクリート強度が異なるため、その両部分のコンクリート強度を比較し、その差が15%以上の場合はどちらかの小さい方の値を、15%未満の場合は両方の平均値を代表圧縮強度 σ_B として以後の検討に用いる。

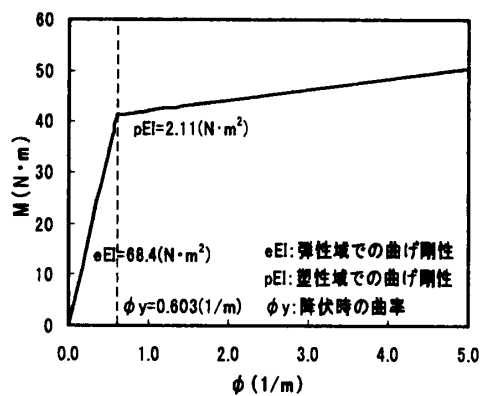


図-1 曲げモーメント-曲率関係

表-1 試験体一覧

シリーズ	試験体名	鉄筋種類	配筋方法	傾斜角度	鉄筋交差部位置	溶接の有無
I	I-A-30	主筋 D10 スタブ筋 D6	左右同一傾斜角度	30	接合面上 接合面から35mm	なし
	I-A-45*1			45		
	I-A-60			60		
	I-B-30			30		
	I-B-45*2			45		
	I-B-60			60		
L	L-A-30	主筋 D10 スタブ筋 D6	交差部直交配筋	30	接合面上 接合面から35mm	なし
	L-A-45*1			45		
	L-A-60			60		
	L-B-30			30		
	L-B-45*2			45		
	L-B-60			60		
W	W-A-30	溶接格子 D10 スタブ筋 D6	交差部直交配筋	30	接合面上 接合面から35mm	あり
	W-A-45			45		
	W-A-60			60		
	W-B-30			30		
	W-B-45			45		
	W-B-60			60		

*1: 傾斜角度、配筋方法の都合上同一の試験体となる。

*2: 傾斜角度、配筋方法の都合上同一の試験体となる。

表-2 使用接合筋の力学的性質

鉄筋種類	降伏強度 σ_y (N/mm ²)	引張強度 σ_t (N/mm ²)	ヤング率Es (kN/mm ²)
D10	376	509	183
D6	381	494	171

溶接格子	溶接点せん断強さ (N/mm ²)
	174

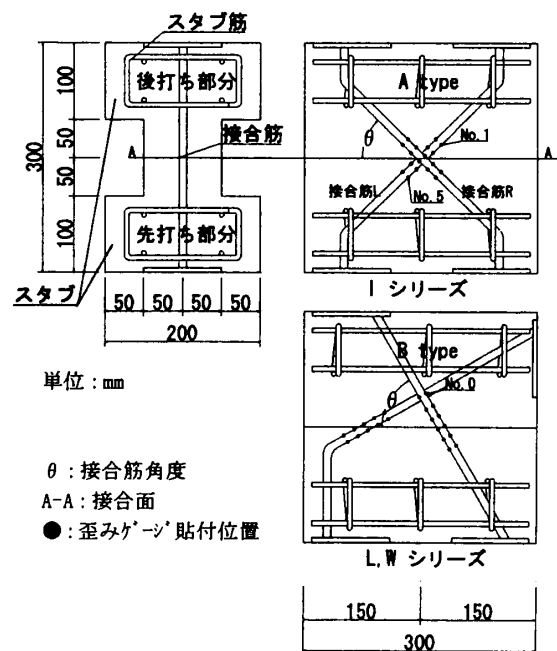


図-2 試験体図

表-3 使用コンクリートの力学的性質

試験体名	I-A-30_1 I-A-60	I-A-30_2 IL-A-45	I-B-30	I-B-60 IL-B-45	L-A-30 L-A-60	L-B-30 L-B-60	W-A-30 W-A-60	W-A-45 W-B-30	W-B-60 W-B-45
σ_B (MPa)	39.1	33.9	38.0	32.4	33.6	31.2	35.0	34.4	28.6
$\sqrt{\sigma_B}$	6.2	5.8	6.2	5.7	5.8	5.6	5.9	5.9	5.3

2. 3 接合面せん断載荷実験

加力装置を図-3に示す。加力方法はS型加力フレームを用いた正負交番繰返し載荷とする。試験体の先打ち・後打ち两部分を常に平行な状態でせん断力を載荷するために、加力フレームの表裏に平行クランクを1組ずつ取り付ける。試験体の軸方向に取り付けたスクリージャッキは、載荷開始直前に試験体の鉛直方向に2kN程度の圧縮力(拘束力)を与えるもので、先打ち部分と後打ち部分が接合面で目開きを起こすのを防ぐものである。

加力フレームの鉛直変位、水平変位に関しては加力フレームの表裏に1軸変位計を取り付け測定した。

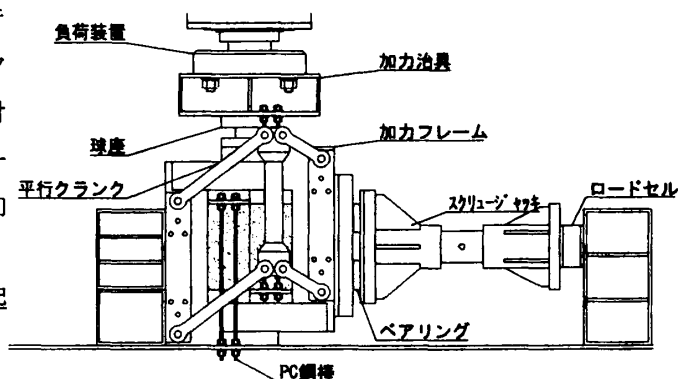


図-3 加力装置図

2. 4 測定方法

変位は、接合面長さ方向の先打ち・後打ち两部分のスタブ間相対変位（接合面滑り変位 δh と接合面目開き変位 δv ）を測定した。なお、過去の実験結果より、加力フレーム内での試験体の回転は生じていないと見なしている。

滑り変位と目開き変位に関しては、試験体の表裏に貼付した2軸変位計によって測定し、加

3. 実験結果および考察

表-4に載荷実験結果（変形発生荷重、鉄筋降伏荷重、最大せん断力および履歴性状）を示す。また、図-4に特徴的な履歴性状を示したI-A-45_No.1, L-B-60_No.1, W-B-30_No.1試験体の荷重-変形関係を示す。

表-4 実験結果一覧

試験体名		滑り変形発生荷重 Qa*1 (kN)	鉄筋降伏荷重 Qy*2 (kN)	最大せん断荷重 Qmax*3 (kN)	履歴性状*4		試験体名		滑り変形発生荷重 Qa*1 (kN)	鉄筋降伏荷重 Qy*2 (kN)	最大せん断荷重 Qmax*3 (kN)	履歴性状*4	
I-A-30	No.1	2.29	44.69	71.56	SP	Y	I-B-30	No.1	2.45	47.00	66.97	s1	N
	No.2	4.41	40.21	48.83	SP	Y		No.2	4.01	40.92	62.72	SL	N
IL-A-45	No.2	3.58	39.80	52.85	SP	N	IL-B-45	No.3	3.33	40.91	70.65	s1	N
	No.3	2.29	36.62	42.81	SP	Y		No.1	57.17	44.87	56.89	s1	N
I-A-60	No.1	7.21	50.72	55.01	SP	N		No.2	46.57	42.41	54.83	s1	N
	No.2	3.19	37.66	42.95	SP	Y	No.3	53.59	45.52	57.61	SL	N	
L-A-30	No.1	1.12	41.37	56.27	SP	N	I-B-60	No.1	38.63	34.17	44.27	SP	N
	No.2	0.59	31.15	44.94	SP	Y		No.2	70.37	37.66	50.26	SP	N
	No.3	27.28	30.76	43.97	SP	Y		No.3	53.74	43.97	51.98	SP	N
L-A-60	No.1	2.91	36.05	40.10	SP	Y	L-B-30	No.1	6.17	34.02	57.60	s1	N
	No.2	3.42	35.47	47.69	SP	Y		No.2	8.42	30.34	58.82	s1	N
	No.3	2.66	34.17	42.39	SP	Y		No.3	62.51	39.55	55.02	s1	N
W-A-30	No.1	47.28	43.55	58.92	s1	N	L-B-60	No.1	4.01	32.47	37.50	s1	Y
	No.2	9.91	37.36	51.83	s1	N		No.2	2.75	30.47	48.10	s1	Y
	No.3	57.75	34.18	50.10	SP	N		No.3	9.19	36.77	43.36	s1	Y
W-A-45	No.1	2.14	31.06	41.82	SP	Y	W-B-30	No.1	12.53	35.21	44.80	S	N
	No.2	5.47	29.57	40.23	SP	Y		No.2	7.66	35.63	46.58	S	N
	No.3	44.41	35.76	48.57	SP	Y		No.3	2.88	35.19	42.91	S	N
W-A-60	No.1	2.75	30.33	38.06	SP	Y	W-B-45	No.1	2.74	30.33	43.66	SP	Y
	No.2	32.03	32.33	41.06	SP	Y		No.2	1.73	26.63	38.20	SP	Y
	No.3	48.43	25.81	39.08	SP	Y		No.3	2.15	26.70	42.65	SP	Y
*1: 滑り変形0.03mm以下で剛性低下した時の載荷せん断力 *2: 左右どちらかの接合筋が降伏した時の載荷せん断力 *3: 変形5mm以内の最大載荷せん断力							W-B-60	No.1	4.51	31.45	41.82	s1	Y
								No.2	5.33	29.15	41.95	SL	Y
								No.3	7.35	21.58	33.20	s1	N

*1: 滑り変形0.03mm以下で剛性低下した時の載荷せん断力

*2: 左右どちらかの接合筋が降伏した時の載荷せん断力

*3: 変形5mm以内の最大載荷せん断力

*4: SP-紡錘形, SL-スリップ形, s1-ややスリップ形, S-逆S字型, Y-正負対称, N-正負非対称

『白抜き試験体』: 履歴性状が剛塑性となったもの

3. 1 破壊状況

最初の+1mmまでの荷重サイクルにおいて、I, L-B-45_No.1~3, I-B-60_No.1~3, L-A-30_No.3, L-B-30_No.3, W-A-30_No.1,3, W-A-45_No.3, W-A-60_No.2,3の計13体では、接合面コンクリートの化学的付着力の影響により滑り変位が0mmのまま荷重せん断力が増大し、滑り始めると同時にせん断力が脆性的に減少する剛塑性的な履歴性状となった。その他の試験体では接合面コンクリートの化学的付着力の影響はほとんど見られず、荷重せん断力の増大とともに滑り変位も増大した。すべての試験体とも接合面における滑り破壊であったが、一部試験体では試験体側面に縦方向のひび割れが見られたもの、接合筋の傾斜部分に対応する位置に

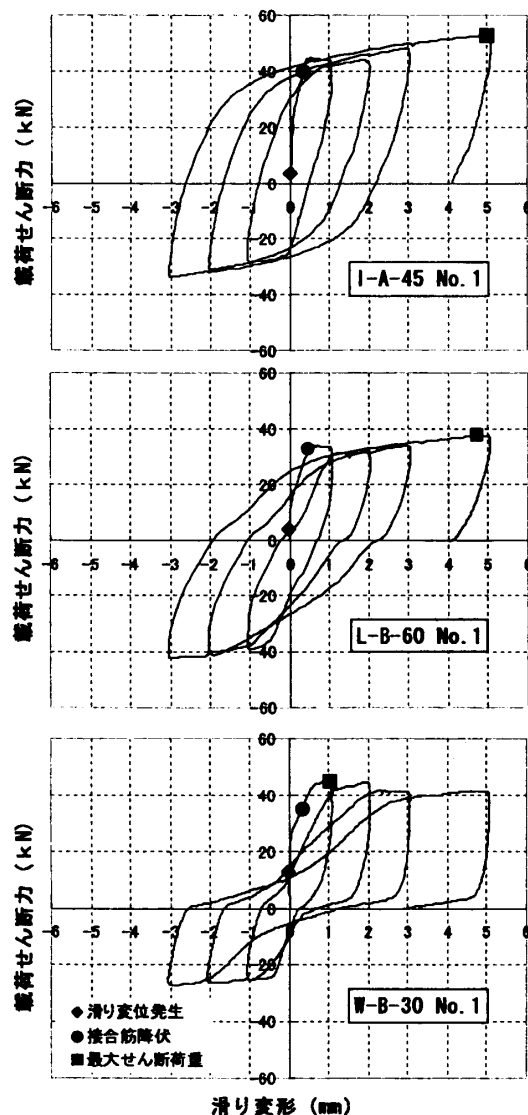


図-4 荷重-滑り変形関係図

斜めひび割れが見られたものもあった。接合筋の配筋位置により、コンクリートが接合筋によって割裂したためと考えられる。接合筋の降伏は正加力での滑り変位0.03~0.05mmで発生している。また、接合部の目開き変位は滑り変位1mmのときにおよそ0.2mm程度であった。

3. 2 最大せん断応力に関する考察

表-5に配筋種類と接合筋交差部の位置による最大せん断応力度の平均値を、図-5に最大せん断応力度と接合筋角度との関係を示す。コンクリート強度の影響を考慮し、最大せん断力の Q_{max} を接合面面積 $A(=300\text{cm}^2)$ で除した最大せん断応力度 τ_{max} を表-3の代表コンクリート強度の平方根で基準化した $\tau_{max}/\sqrt{\sigma_B}$ を用いた。

I, LシリーズではA typeと比べB typeの試験体で $\tau_{max}/\sqrt{\sigma_B}$ がやや大きく、WシリーズではB typeの試験体で $\tau_{max}/\sqrt{\sigma_B}$ がやや小さな値となっているが、その差は微小であるため、試験体精度の誤差によるものと考えられる。また、接合筋傾斜角度が大きくなるにつれて最大せん断応力度は減少する傾向が見られる。接合筋角度の違いにより、接合筋の応力状態に違いがあるためと考えられる。

表-5 $\tau_{max}/\sqrt{\sigma_B}$ 平均値一覧

	I シリーズ	L シリーズ	W シリーズ
A type	0.29	0.27	0.26
B type	0.33	0.31	0.25

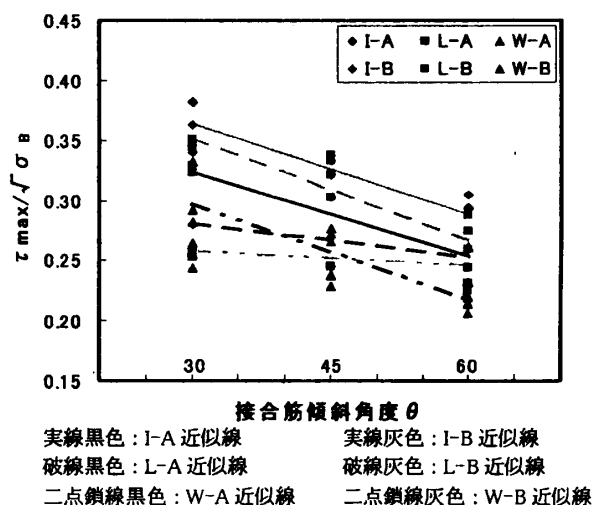


図-5 最大せん断応力度-接合筋傾斜角度

3. 3 接合筋の負担せん断力

図-2中の●で示すように、接合筋には接合面位置から15mm間隔でゲージを貼付し、接合筋のダボ作用と軸方向応力を測定している。実験結果と図-1、表-2に示した鉄筋の材料特性に基づいて、接合筋降伏時と変形1mm時において接合筋が負担するせん断力(sQ)と接合筋軸方向力(sN)を算出した。図-6に sQ に対する sN の割合(sN/sQ)を示す。接合筋せん断力は実験より得られた接合筋の歪み度と図-1よりゲージ貼付間隔ごとのせん断力分布を求め、No.1~No.5までの全区間のせん断力の平均値を接合筋の負担するせん断力とする。また、接合筋軸方向力は接合筋表裏の歪み度の平均値を軸方向歪みとし、これと表-2から接合筋の負担する軸方向力を算出した。ここで接合筋降伏時とは接合筋R, Lのどちらか一方のいずれかが降伏した時を指す。

接合筋降伏時接合筋Rにおいて接合筋軸方向力はせん断力の52~85倍、接合筋Lでは192~261倍が、変形1mm時では接合筋Rで44~162倍、接合筋Lで179~255倍が作用している。また、例として図-7にW-A-30_No.2のゲージの載荷せん断力と接合筋の歪み度の関係を示す。接合筋はダボ的挙動をほとんどしていない。

つまり、接合筋を傾斜配筋させた場合にはダボ作用よりも鉄筋の軸方向力によって載荷せん断力に対する抵抗をすることがわかる。

3. 4 耐力の評価

3. 4. 1 建築学会規準式³⁾との比較

図-8に変形1mmでの実験値(sQ_1)と日本建築学会規準式による計算値(sQ_1)との比較を示す。計算値は、接合筋傾斜角度を考慮した場合(接合筋断面積 Σa_k をIシリーズでは $2a_k/\sin \theta$, L, Wシリーズでは $a_k/\sin \theta + a_k/\cos \theta$ とする。)と考慮しない場合について求めた。傾斜角度を考慮した場合、接合筋断面積は増大し見かけの接合筋断面積の増大による反力を含んでいるため、実験値よりも大きな値となる。また、

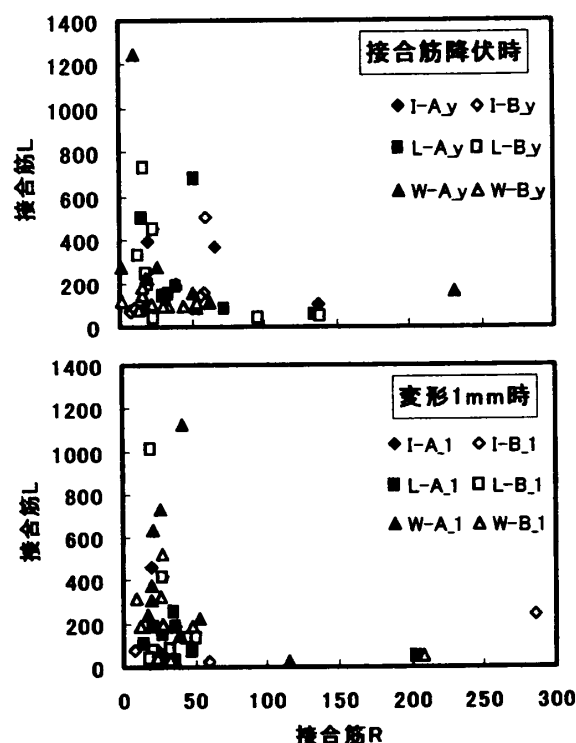


図-6 接合筋R, Lの sN/sQ

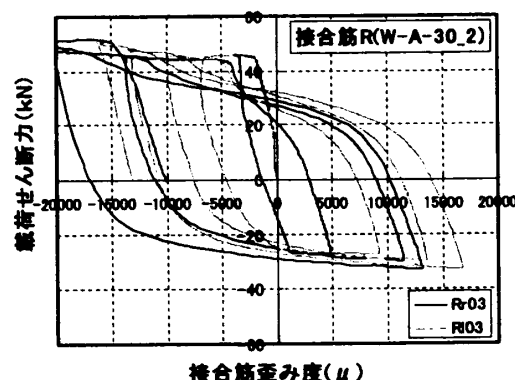


図-7 載荷せん断力-接合筋歪み度
(W-A-30 No.2)

Rr03, R103は接合筋Rの接合面上の同位置における表裏のゲージ。ゲージ番号については図-2を参照。

傾斜角度を考慮しない場合、大きな差は見られないが接合筋傾斜角度の違いは反映されていない。従って、接合筋を傾斜配筋させた場合には、学会規準式によりせん断耐力を表すことは難しいと考えられる。

3. 4. 2 せん断抵抗要素の累加

プレキャスト接合部の主要な設計式では、①鉄筋のダボ作用、②鉄筋応力による摩擦効果、③外部圧縮力による摩擦効果などのせん断抵抗

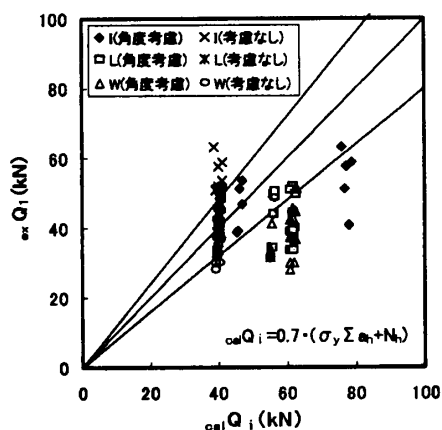


図-8 実験値-計算値（学会標準式による）

要素別の累加式により表される。図-9 に変形 1mm 時における実験値 (Q_{ex}) と 3.3 の結果から算出した累加せん断耐力 (Q_{cal}) との比較を示す。図-10 に示すように、接合筋に作用するせん断力と軸方向力を試験体に対する鉛直・水平方向へのベクトルに分けて累加せん断力を算出した。水平分力は ($sQ_h + sN_h$) を鉄筋によるせん断抵抗、鉛直分力は ($sQ_v + sN_v + N$) がマイナスの場合は摩擦効果は 0、プラスの場合は摩擦係数倍し摩擦効果によるせん断抵抗とした。尚、摩擦効果においては香取らの提案による接合面の粗さを考慮した摩擦係数を用いた。その結果、 Q_{ex}/Q_{cal} の平均値は I シリーズで 1.11 (分散 0.07), L シリーズでは 0.97 (分散 0.02), W シリーズでは 0.87 (分散 0.01) と概ね実験値を表した。よって、力学的厳密性という点を別として、耐力評価という点においては接合筋を傾斜配筋する場合にもせん断抵抗

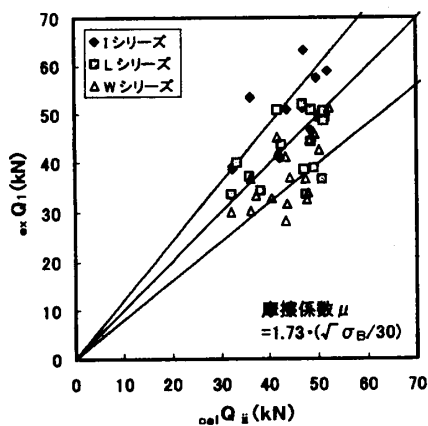


図-9 実験値-計算値（せん断抵抗の累加）

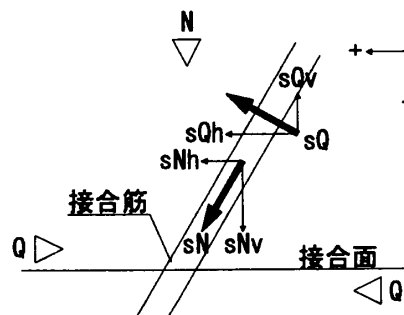


図-10 接合筋によるせん断抵抗の考え方

機構別の累加式を適用できると考えられる。

4. まとめ

本実験の結果より、以下の知見が得られた。

- 1) 履歴形状より、接合筋を傾斜配筋させることでプレキャスト接合面のエネルギー吸収能力が良好であることが確認された。
- 2) 接合筋の傾斜角度によりプレキャスト接合面の最大せん断耐力は変化し、配筋方法、交差部位置に関わらず傾斜角度 30° のものが耐力上良好な性能を示した。
- 3) 傾斜配筋した接合筋は、主に軸方向力によってせん断力に抵抗する。
- 4) 接合筋を傾斜配筋した場合にも、せん断抵抗要素ごとの負担せん断力の累加によってその耐力を評価することが一応可能である。

【謝辞】

試験体製作に際し、住倉鋼材㈱および昭和産業㈱より接合筋用溶接鉄筋格子の提供を受けました。記してお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 香取・林 ほか：接合筋を傾斜配筋させたプレキャスト耐震壁一床接合部のせん断挙動に関する実験研究、日本建築学会構造系論文報告集, No.457, pp.47-59, 1994.3
- 2) 山田・青柳：ひび割れ面におけるせん断伝達、第 2 回 RC 構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集、日本コンクリート工学協会, pp.19-26, 1983.10
- 3) プレキャスト鉄筋コンクリート構造の設計と施工、日本建築学会, 1986.10
- 4) 香取・林 ほか：コンクリート接合面の粗さを用いた接合面せん断耐力の推定と滑り変位挙動、日本建築学会構造系論文集, No.507, pp.107-116, 1998.5