

論文 プレキャスト RC 梁部材の接合面におけるせん断伝達機構に関する実験的研究

西村 大^{*1}・松崎 育弘^{*2}・杉山 智昭^{*3}・中村 卓史^{*4}

要旨：筆者らはこれまでにプレキャスト RC 部材の接合面における要素実験を行い、ずれ量を考慮した接合部構造性能評価法を提案している。本研究では、部材内における接合部の挙動の把握および評価法の適合性を検証することを目的とし、変動要因を接合筋の本数・材質、シヤキーおよび軸力の有無として計画を行い、部材実験を行った。その結果、部材内の接合部の構造性能を把握し、さらに提案している評価法が有用であることを示した。

キーワード：PCa 接合面, ダボ抵抗, シヤキー抵抗, 摩擦抵抗

1. はじめに

プレキャスト鉄筋コンクリート(PCa)造において、部材同士の継ぎ目である接合面の応力伝達、特にせん断力の伝達を行うために、シヤキーや接合筋および軸力による摩擦抵抗を設けることが基本的な工法となっている。一般的に PCa 接合部の設計は、これらの抵抗要素の耐力のみを対象として接合部の安全性の確認を行っている。

そのような中、これまで筆者らは、PCa 部材の接合面におけるせん断伝達機構を評価するため、各抵抗要素に対する要素実験を行ってきた。その成果として、ずれ量を考慮した接合部の構

造性能評価法、復元力特性を提案¹⁾²⁾している。しかし、部材内における接合部の性状については十分に示されていないのが現状である。

そこで本研究では、部材内における接合部の各せん断抵抗要素の構造特性を把握し、筆者らが提案している接合部の構造性能評価法の適合性の検証を目的とする。

2. 実験概要

2.1 試験体

表-1 に試験体一覧を、図-1 に試験体配筋を、図-2 に接合部詳細を、図-3 にシヤキー

表-1 試験体一覧

No.	部材要因						接合部要因								
	コンクリート強度		主筋		せん断補強筋		純せん断を受ける接合部(中央接合部)					曲げ・せん断・軸力を受ける接合部(端部接合部)			
	Fc(N/mm ²)	材質・配筋	材質	配筋	ρ _w (%)	接合筋	本数	シヤキー ^{*2} 形状	グリースの有無	軸力(kN)	補強量 ^{*3} (%)	接合筋	本数	シヤキー ^{*2} 形状	グリース
(1) ^{*1}	(2) ^{*1}	p _t (%)													
1	48		UB785	4-D6 @90	0.68	D16 SD490	4	-	○	-	-	D16 SD490	16	-	-
2						○	-	0.38							
3						-	-	-							
4						-	-	-							
5						D10 SD345	8	○	-	0.38					
6	48	8-D16 SD490 二段配筋 (ρ _t =2.55%)	UB785	4-D6 @90	0.68	D16 SD490	4	A-type	○	-	-	D16 SD490	16	-	-
7						○	-	0.38							
8						○	-	2.05							
9						D10 SD345	8	○	-	-					
10						○	-	0.38							
11						○	-	2.05							
12						○	-	2.05							
13						○	-	2.05							
14	48		SD345	4-D10 @145	0.94	D16 SD490	4	-	-	154	0.85	D16 SD490	16	-	-
15						A-type	○	-	154	2.05					
16	48		UB785	4-D6 @90	0.68	D16 SD490	16	-	○	-	0.38	D16 SD490	16	-	-
17						○	-	154	0.85						
18						○	-	0.85							
18	24		SD345	4-D10 @110	1.24	D16 SD490	16	-	○	-	0.85	D16 SD490	16	A-type	○

*1 (1) : 先打部・スタブ部, (2) : 後打部, *2 シヤキー形状は図-3 に示す, *3 補強量 : シヤキー凸角部より 45° 方向の断面積に対するそれを横切る鉄筋の断面積の比とし、シヤキーがない場合は、シヤキーA-type があると仮定し、その補強量を算出した。

- *1 東京理科大学大学院 工学研究科建築学専攻 (正会員)
- *2 東京理科大学 工学部建築学科教授 工博 (正会員)
- *3 東京理科大学 工学部建築学科助手 博(工) (正会員)
- *4 東京理科大学大学院 工学研究科建築学専攻

形状を示す。試験体は、梁幅 $b=210\text{mm}$ 、梁せい $D=360\text{mm}$ 、せん断スパン比 $a/D=2.0(a=720\text{mm})$ とし、コンクリート設計基準強度を $F_c=48\text{N/mm}^2$ (No.11~13,18 後打部のみ $F_c=24\text{N/mm}^2$) とした。主筋はD16-SD490を、せん断補強筋はD6-UB785、D10-SD345を使用した。

接合面は、せん断力および軸力を生じる試験区間中央反曲点位置(中央接合部)および、曲げ・せん断力および軸力を生じる左右梁端部(端部接合部)の2つを計画した。なお、各接合面は、コンクリート打設を試験区間右側(先打部)、左側(後打部)、スタブ部と3回に分けることで設けており、すべて鋼製型枠による仕上げとした。

変動要因は、中央・端部各接合部におけるせん断抵抗要素とし、(1)接合筋の本数(4本,8本,16本)・材質(D16-SD490,D10-SD345)、(2)シヤキーの有無・形状の違い、(3)軸力の有無とした。端部接合筋は16本とし、全ての主筋を接合筋とした。中央接合部接合筋も主筋を接合筋とし、接合筋以外の主筋は中央部において接合面から5mmの位置で切断した。なお、D10の接合筋のみ主筋とは別に600mmの接合筋を配した。シヤキー形状は4種類とし、全てシヤキー支圧型破壊が先行するよう計画した。軸力は、アーチ機構コンクリート圧縮束による圧縮力とし、アーチ機構の角度を考慮し、接合面鉛直方向成分を算出した。なお、アーチ機構の算出には、終局強度型耐震設計指針³⁾A法非靱性式を用いた。また、グリースありの試験体は、接合面にグリースを塗布することで固着抵抗を除去した。

2.2 使用材料

表-2にコンクリート材料試験結果を、表-3に鉄筋材料試験結果を示す。コンクリートのヤング係数は1/3割線剛性とし、鉄筋の降伏点は上降伏点とした。

2.3 加力方法

図-4に加力装置図を、表-4に加力サイクルを示す。加力は、大野式逆対称モーメント形式正負交番繰返し漸増载荷とし、加力の制御は相対変位制御とした。

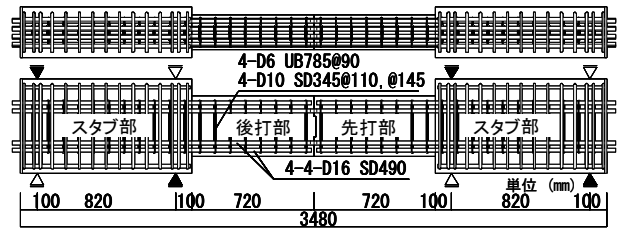


図-1 試験体配筋

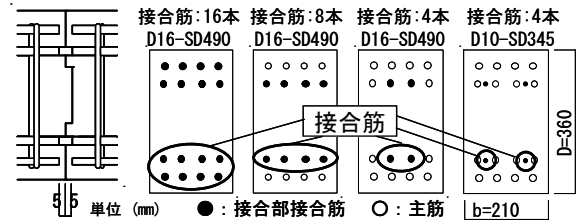


図-2 接合部詳細

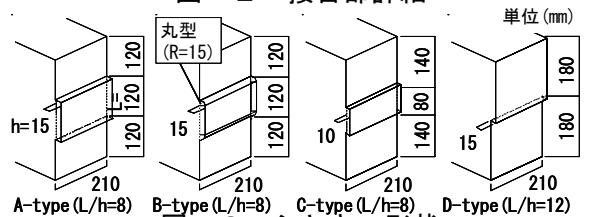


図-3 シヤキー形状

表-2 コンクリート材料試験結果

No.	コンクリート	圧縮強度 (N/mm ²)	圧縮歪み (μ)	ヤング係数 (N/mm ²)	引張割裂強度 (N/mm ²)
1, 3, 4, 6, 9	先打(右)	50.5	2160	37500	4.16
	後打(左)	58.9	2350	37900	4.64
	スタブ	64.2	2420	35500	4.29
2, 5, 7, 10, 16	先打(右)	52.5	1920	33900	3.90
	後打(左)	49.0	2020	32700	3.58
	スタブ	61.9	2130	35800	4.24
8, 14, 15, 17	先打(右)	46.8	2560	25900	3.70
	後打(左)	48.9	2480	26000	3.81
	スタブ	52.7	2330	27200	3.96
11-13, 18	先打(右)	41.5	2030	27500	2.86
	後打(左)	26.7	1690	20600	2.21
	スタブ	50.5	2450	25000	3.23

表-3 鉄筋材料試験結果

No.	1, 3, 4, 6, 9			2, 5, 7, 10, 16		8, 11-15, 17, 18		
	主筋 接合筋	せん断 補強筋	せん断 補強筋	主筋 接合筋	せん断 補強筋	主筋 接合筋	せん断 補強筋	せん断 補強筋
使用鉄筋	D16 SD490	D10 SD345	D6 UB785	D16 SD490	D6 UB785	D16 SD490	D6 UB785	D10 SD345
降伏応力度 (N/mm ²)	540	388	836	533	990	546	994	379
降伏歪み (μ)	2830	2050	4380	2650	4730	2910	4820	1920
ヤング係数 × 10 ⁵ (N/mm ²)	1.90	1.95	2.02	2.06	2.16	1.91	2.11	1.94

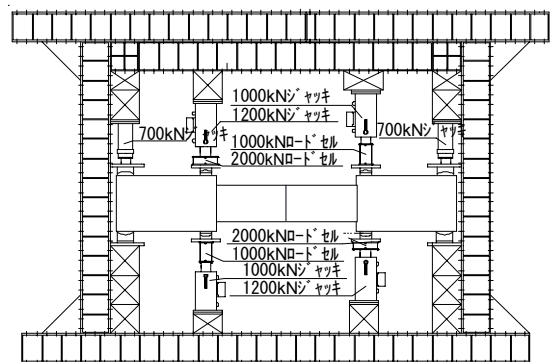


図-4 加力装置

表-4 加力サイクル

部材角 (rad.)	1/200	1/100	1/50	1/33	1/25	1/20
相対変位 (mm)	7.20	14.40	28.80	43.64	57.60	72.00
繰返し数	±1	±2	±2	±2	±2	+1

表-5 計算値および実験結果一覧

No.	計算値											実験値								
	梁部材			中央接合部						各ずれ量時の耐力			部材降伏		最大値			破壊モード*		
	曲げ耐力	せん断耐力		(1)ダボ耐力		(2)シアキー		(3)摩擦耐力	接合部累加耐力(1)+(2)+(3)		中央接合部ずれ量			最大耐力	部材変形	中央接合部変形				
		(kN)	トラス	アーチ	合計	2mm	9mm		2mm	9mm	2mm	9mm	1mm				2mm		9mm	
1	319	478	0	478	233	305	-	-	-	233	305	cZ	159	205	194	-	261		43.73	17.09
2	315	499	0	499	210	274	-	-	-	210	274	cZ	183	211	184	-	281	14.58	2.14	cZ
3	319	478	0	478	233	305	-	-	-	233	305	cZ	227	300	-	-	336	43.63	30.83	cZ
4	319	478	0	478	74	102	-	-	-	74	102	cZ	87	88	86	-	102	7.25	4.75	cZ
5	315	499	0	499	420	548	-	-	-	420	548	FS	299	285	-	333	340	28.71	1.51	FS
6	319	478	0	478	233	305	159	0	-	392	305	F	185	276	-	-	287	14.58	2.14	CN
7	315	499	0	499	210	274	160	0	-	370	274	F	290	319	293	-	322	19.84	2.44	CN
8	323	496	0	496	193	250	147	0	-	340	250	F	315	210	273	-	337	28.22	1.25	P
9	319	478	0	478	74	102	159	0	-	233	102	P	154	58	78	-	164	7.29	1.27	CN
10	315	499	0	499	420	548	160	0	-	580	548	F	-	-	-	315	336	26.35	0.77	FS
11	323	344	0	344	151	199	84	0	-	235	199	P	255	293	256	-	293	21.37	1.79	P
12	323	344	0	344	151	199	56	0	-	207	199	P	237	186	214	-	247	14.43	1.04	P
13	323	344	0	344	151	199	69	0	-	220	199	P	279	215	261	-	307	43.60	26.45	P
14	323	349	19	368	193	250	-	-	85	278	335	cZ	245	312	330	-	330	28.11	9.02	cZ
15	323	349	19	368	193	250	256	0	85	534	335	F	-	-	-	317	330	27.43	0.16	FS
16	315	499	0	499	692	904	-	-	-	692	904	F	-	-	-	317	321	22.31	0.16	FS
17	323	349	19	368	636	824	-	-	12	648	836	F	-	-	-	324	332	24.99	0.65	FS
18	323	344	0	344	499	658	-	-	-	499	658	F	-	-	-	303	20.19	0.22	FsZ	

*破壊形式：F；曲げ降伏先行型、FS；曲げ降伏後せん断破壊、P；シヤキー支圧破壊、cZ；中央接合部ずれ破壊、FsZ；曲げ降伏後端部接合部ずれ破壊、CN；シヤキー斜めひびによる破壊、黒塗リ：耐力決定の要因

3. 実験結果および検討

表-5に諸耐力計算値および実験結果一覧を示す。接合部計算値は筆者らが提案している評価式(以下、提案式)¹⁾²⁾を用いた。想定破壊モードは接合部の各ずれ量における累加耐力と部材の耐力を比較して決定した。表-5より実験結果の破壊モードと想定破壊モードは概ね一致しており、提案式を用い、接合部を有する部材の設計は可能であると考えられる。

まず、部材全体の挙動と接合部の挙動を比較する。図-5に中央接合筋の本数を比較したせん断力(Q)-相対変位(δ)関係を示す。No.5,16は包絡線を示した。接合部ずれ破壊を想定し、接合筋を4本としたNo.2は、中央接合部において耐力が決定したため、部材全体の変形に対する接合部変形の割合が大きくなり、接合部の性状が顕著に現れた。一方、部材降伏を想定し、接合筋を8,16本と増やしたNo.5,16は、想定どおり部材降伏し、接合部変形の全体変形に占める割合が小さく、一体打ちと同様な性状となった。

以上より、接合部のずれを抑制することで、部材降伏を生じさせることができるといえる。そこで以降では、各せん断抵抗要素別に接合部の性状を詳細に示し、検討を行う。

3.1 ダボ抵抗

図-6に接合筋の本数を比較したせん断力(Q)

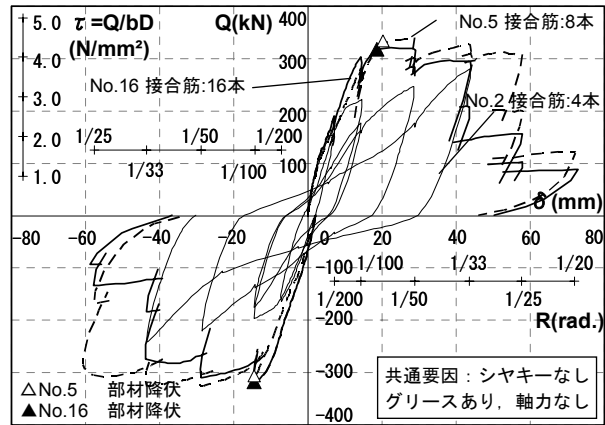


図-5 Q-δ関係(接合筋本数)

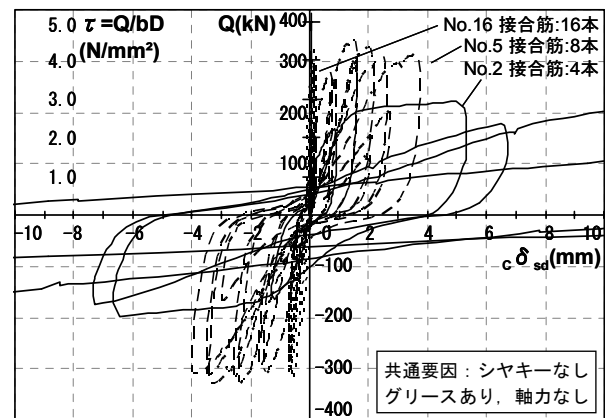


図-6 Q-cδsd関係(接合筋本数)

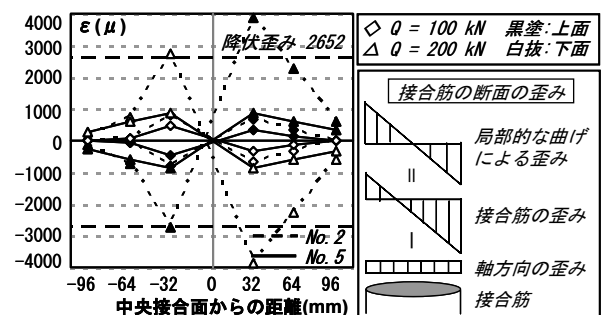


図-7 中央接合筋の歪み分布

—中央接合部ずれ変形($c\delta_{sd}$)関係を示す。接合筋を8,16本としたNo.5,16は、接合部が大きくずれることはなく部材降伏に至った。一方、接合筋が4本のNo.2は、加力に伴い徐々に剛性が低下し、ずれ量が1mm程度で接合筋が局部的な曲げの作用により局部降伏を起こし、剛性が低下した。その後は、耐力低下することなく若干耐力上昇しながらずれ量が増大した。

図-7に接合筋の本数による歪み性状比較を示す。なお、歪みは $Q=100\text{kN}$, 200kN 時のものを示す。接合筋の歪みは、接合筋の上下、左右で対称な分布を示していることから、局部的な曲げの力が作用していることがわかる。さらに、同じ耐力時の歪みで比較した場合、接合筋が4本のNo.2は、8本のNo.5のおよそ2倍の歪みが生じていることが確認できる。

3.2 シヤキー抵抗とダボ抵抗の複合

図-8にシヤキーの有無を比較した $Q-c\delta_{sd}$ 関係を示す。接合筋のみのNo.2に対して、シヤキーを有するNo.8は、直線的な剛性を保ったまま耐力が上昇し、ずれ量が1~2mm程度でシヤキーが支圧型破壊し最大耐力に至った。その後は、ダボ抵抗の性状へと移行した。

写真-1にNo.7およびNo.8の中央接合部破壊状況(変形角(R)= $1/50\text{rad}$.時)を示す。No.7,8ともに $Q=100\text{kN}$ 程度でシヤキー凸角部から斜めひび割れが発生した。その後、No.7はそのひび割れが大きく口開き耐力が低下した。一方、接合部の補強量を増加させ、シヤキー凸角部を丸くしたNo.8は、斜めひび割れが大きく口開くことはなく、ひび割れが分散する傾向が見られ、最大耐力が上昇した。

3.3 摩擦抵抗とダボおよびシヤキー抵抗の複合

図-9に軸力の有無を比較した $Q-c\delta_{sd}$ 関係を示す。軸力が存在するNo.14に対し、軸力がないNo.3を用いて比較を行った。No.3,14とも、 70kN 程度までずれを生じなかった。その後軸力がないNo.3は、 $R=1/100\text{rad}$.に向かうサイクルで固着抵抗がなくなり接合部が大きくずれ、耐力が低下した。一方、軸力があるNo.14は、ずれ

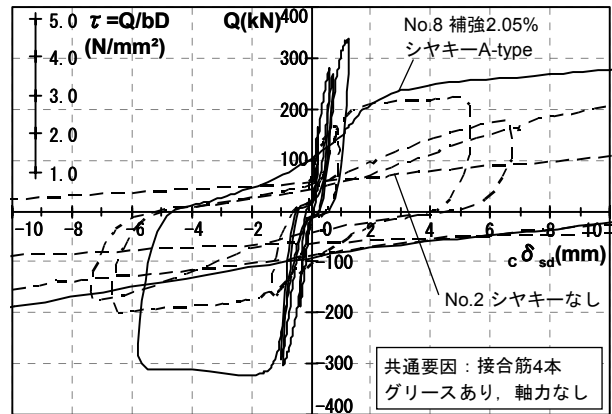
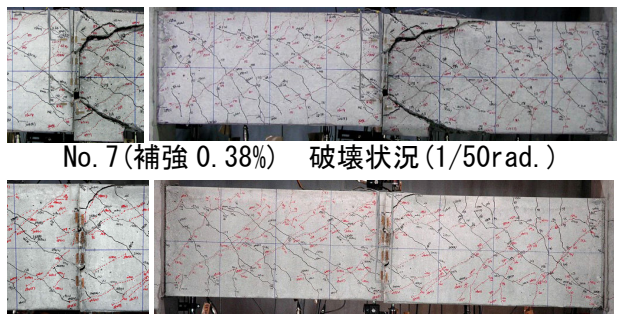


図-8 $Q-c\delta_{sd}$ 関係(ダボ+シヤキー)



No.7(補強 0.38%) 破壊状況(1/50rad.)

No.8(補強 2.05%) 破壊状況(1/50rad.)

写真-1 中央接合部破壊状況(1/50rad.)

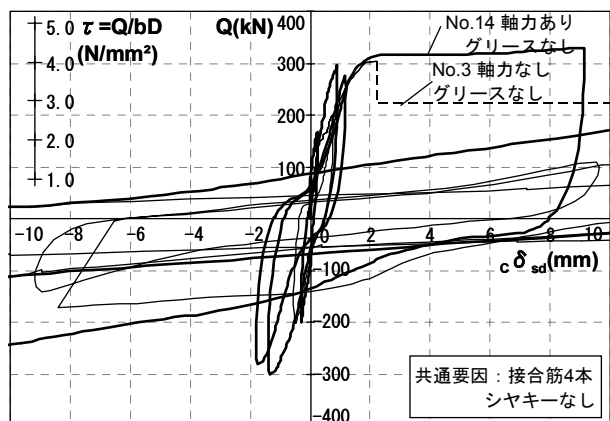


図-9 $Q-c\delta_{sd}$ 関係(軸力の有無)

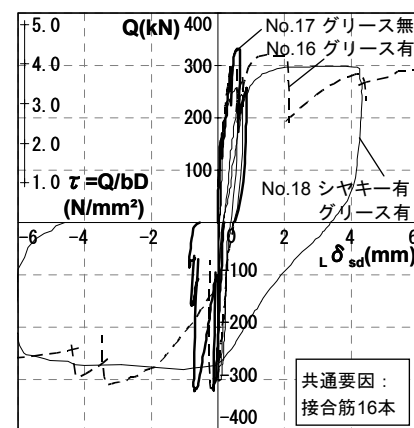


図-10 $Q-L\delta_{sd}$ 関係(端部接合部)

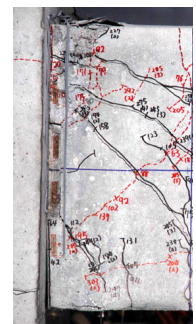


写真-2 端部接合部破壊状況(1/50rad.)

が生じた後も、ずれ量にかかわらず軸力のない No.3 よりも 100kN 程度高い耐力を維持し、摩擦抵抗とダボ抵抗を複合した性状を示した。

また、接合筋・シヤキー・軸力がある No.15 は、軸力下においてもシヤキーの効果により高い剛性を保持したまま曲げ降伏に至った。

3.4 曲げとせん断および軸力を受ける接合部

図-10 に端部接合部のせん断力(Q)-左端部接合部ずれ変形($c\delta_{sd}$)関係を示す。No.16,17 は包絡線を示した。曲げによる軸力の影響を見るためグリースを塗布せずに摩擦抵抗を生じさせた No.17, グリースを塗布した No.16, シヤキーを設けた No.18 を示した。3 試験体とも加力初期には、ずれがほとんど生じず、部材降伏に至った。No.16 は部材降伏付近で接合部のずれが増大したのに対し、No.17 は曲げによる軸力によって摩擦抵抗が生じ、降伏後もずれ量の増大はなかった。これより、曲げを受ける接合部では、曲げによる軸力で、摩擦抵抗が生じているといえる。

次に、曲げによる回転の影響を考察する。写真-2 に No.18 の端部接合部破壊性状を示す。シヤキーを設けた No.18 においてもずれが増大した。これは、写真-2 に示すように曲げによる回転の影響で、シヤキーの支圧面積が得られず、シヤキーがせん断抵抗していないためではないかと考えられる。

4. 提案式との適合性

ここでは、提案式¹⁾²⁾と部材内接合部の実験結果との比較・検討を行う。

4.1 純せん断を受ける接合部

(1) ダボ抵抗

図-11 に接合筋のみの No.2 の $Q - c\delta_{sd}$ 関係を示す。剛性および接合筋の局部降伏時の耐力・ずれ量について良好な適合性を示している。また、接合筋の局部降伏後の耐力上昇についても評価できているといえる。

(2) ダボとシヤキー抵抗の複合

図-12 に接合筋およびシヤキーを有する No.8 の $Q - c\delta_{sd}$ 関係を示す。提案式は、ダボ耐力の

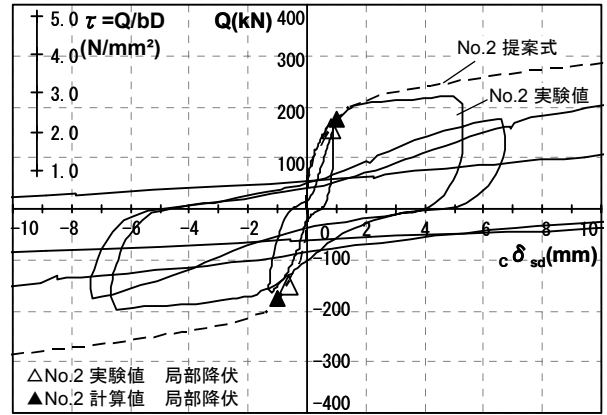


図-11 Q-c δ_{sd} 関係 (ダボ)

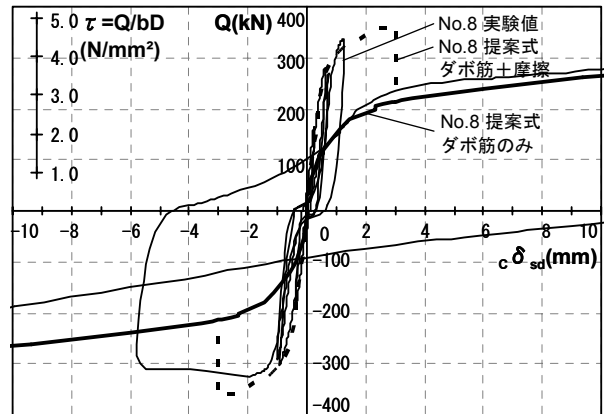


図-12 Q-c δ_{sd} 関係 (シヤキー)

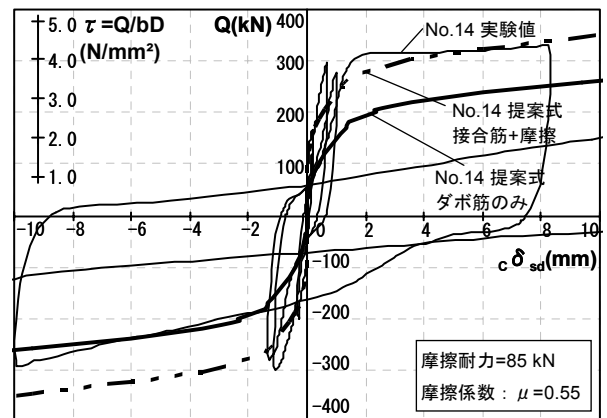


図-13 Q-c δ_{sd} 関係 (軸力あり)

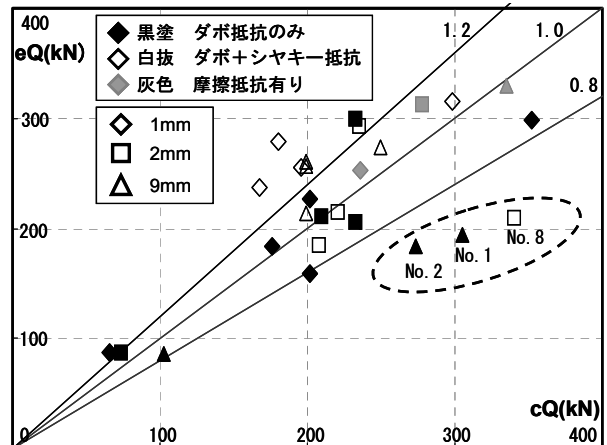


図-14 提案式との比較分布

みのものと、接合筋とシヤキーの複合耐力を示した。同図より接合筋とシヤキーを有する場合についても概ね評価できていることがわかる。さらに、シヤキーが破壊に至った後、ダボ抵抗に移行する性状も評価できている。

(3) 摩擦抵抗とダボおよびシヤキーの複合

図-13 に接合筋と摩擦抵抗が存在する No.14 の $Q - c \delta_{sd}$ 関係を示す。提案式は、ダボ耐力と摩擦耐力の複合耐力を示した。摩擦係数は要素実験¹⁾²⁾より算出した $\mu = 0.55$ を用いて計算を行った。同図より、軸力がある場合も、ずれの発生、その後の挙動を良好に評価できている。

(4) 計算値比較分布

図-14 に全ての試験体の $\delta = 1.0, 2.0$ および 9.0mm 時の実験値および提案式との比較分布を示す。なお、シヤキーを有する試験体は、シヤキーが支圧破壊した試験体のみ示した。表中の丸印の試験体は、繰返しの影響によりかぶりコンクリートが剥落したため耐力が低くなったものである。図より、実験値は提案式の $0.8 \sim 1.2$ 倍程度に分布しており、純せん断力を受ける接合部において、提案式は適合性がよいといえる。

4.2 曲げとせん断を受ける接合部

(1) ダボ抵抗

図-15 に接合筋および摩擦抵抗の存在する No.16 の $Q - L \delta_{sd}$ 関係を示す。接合筋の耐力は、実験時の接合筋の歪みから軸方向力を算出し、低減した値である。提案式は、ずれの発生、剛性とも概ね適合性があり、せん断力と曲げによる軸力が作用した場合も評価できるといえる。

(2) シヤキー抵抗

図-16 に接合筋・シヤキーおよび摩擦抵抗の存在する No.18 と $Q - L \delta_{sd}$ 関係を示す。提案式は、接合筋・シヤキー・摩擦抵抗の複合耐力を示したもので、およびそれよりシヤキー分を除いたものを示す。実験値は、シヤキー耐力を除いたものと良好に適合している。これは、写真-2でも示したように、曲げによる回転の影響で、シヤキー支圧面積が得られないためだと考えられる。よって、曲げが生じる接合部では、シヤ

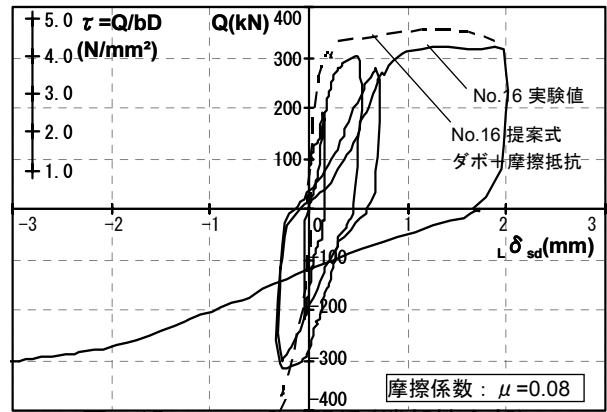


図-15 $Q - L \delta_{sd}$ 関係(端部接合部)

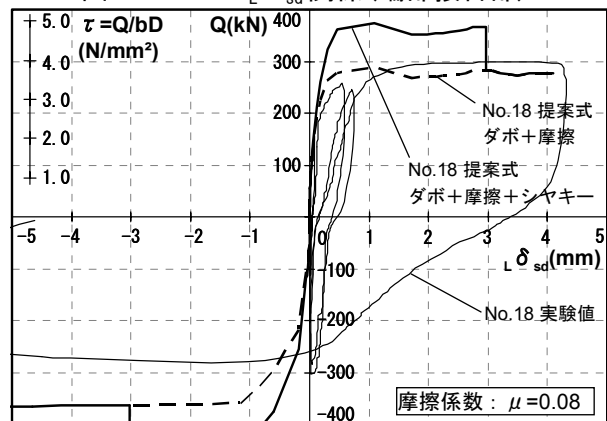


図-16 $Q - L \delta_{sd}$ 関係(端部接合部)

キー耐力を累加せずに提案式を用いることで接合部の耐力を評価できると考えられる。

5. まとめ

プレキャスト RC 部材内における、純せん断力、および曲げ・せん断力・軸力を受ける各接合部の構造性能について以下のことを示した。

- 1) 部材内接合面における接合筋、シヤキーおよびアーチ機構コンクリート圧縮束や曲げにより生じる摩擦抵抗などの各せん断抵抗要素は、要素実験で示した構造性能と同等の挙動を示した。
- 2) PCa 部材内の各接合部せん断抵抗要素も、要素実験より提案した接合部せん断耐力評価式を用いて評価することができる。

参考文献

- 1) 松崎育弘, 中野克彦: プレキャスト RC 部材接合面におけるせん断抵抗要素の耐力累加方法, 日本建築学会構造系論文集 第 550 号, pp.151-158, 2001.12
- 2) 松崎育弘, 大淵英夫ほか: ずれ変形を考慮したプレキャスト部材接合面におけるせん断伝達に関する研究, 日本建築学会構造系論文集 第 491 号, pp.97-104, 1997.1
- 3) 日本建築学会 鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説 1990