

論文 グラウト充填式鉄筋継手を有する PCa 構造接合部におけるせん断伝達挙動に関する研究

辻口忠寛*¹・槇谷栄次*²・新藤健太*³・小曽根茂雄*⁴

要旨：プレキャスト鉄筋コンクリート構造の接合界面におけるせん断伝達機構に関する研究資料は現在まで様々発表されてきた。今回、グラウト充填機械式鉄筋継手で結合された水平接合筋のせん断伝達の影響を調べるため直接せん断実験を行った。その結果からせん断伝達挙動を把握し、実験結果との比較によりダウエル力、せん断摩擦力、軸方向摩擦力を考慮した提案式より実験結果との比較検討を行った。その結果、評価式の値は実験値と良く適応している。

キーワード：プレキャスト、せん断伝達、継手、グラウトモルタル、かさ上げ高さ、

1. はじめに

プレキャスト鉄筋コンクリート(以後PCaと呼ぶ)構造において、グラウトモルタル充填機械式鉄筋継手で結合されたプレキャスト鉄筋コンクリート部材の接合界面におけるせん断伝達機構に関する研究資料は乏しい。よって、本研究はプレキャスト構造においてその接合部が各種変動要因により接合界面におけるせん断伝達にどのように影響するかという目的のもとに直接せん断実験を行った。ともに継手の構造性能を確認し、接合面におけるせん断伝達機構の把握を目的とした。以下にその研究成果を報告する。

2. 実験概要

2.1 試験体

今回用いた試験体詳細を試験体名300-10-60(プロトタイプ)を例にして、図-1に示す。試験体総数は20体で詳細は表-1に示す。すべてプレキャスト鉄筋コンクリート構造であり、その内2体については、比較用として通し鉄筋のものを製作した。上部部材内にはグラウト充填式鉄筋継手(以後鉄筋継手と呼ぶ)が埋設されており、下部部材には接合筋が埋設されている。これらの要素を有した2個のPCaユニットとジョイントコンクリートにより構成されている。これら2つのユニットは、鉄筋継手内に充填されたグラウトモルタル、およびジョイントコンクリートによって接合されている。試験体寸法は、幅×高さ×厚さ=450×550×225mmであり、試験体最上部より325mmの位置にそれぞれ10mm, 20mmの2種類のジョイントコンクリートを有して

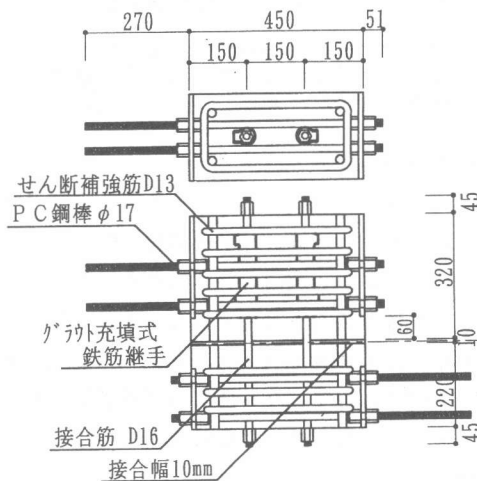


表-1 試験体一覧

*1 関東学院大学大学院 (正会員)

*3 関東学院大学大学院 (正会員)

*2 関東学院大学教授 工学部建築学科、工博 (正会員)

*4 東京鐵鋼(株) (正会員)

いる。また変動要因としてPC a部のコンクリート設定目標強度を $F_c=300, 450, 600$ の3種類とした。接合モルタルの種類として、セメントモルタル、グラウトモルタルの2種類、接合面から鉄筋継手までの高さ（以後かさ上げ高さと呼ぶ）を0mm, 60mmの2種類とした。試験体上部内に埋設された鉄筋継手には、接合筋D16(SD390)により接合されている。せん断補強筋はD13(SD390)を使用した。試験体に使用したコンクリート、ジョイント用モルタル、充填用グラウトモルタル、および鉄筋の材料性状を表-2、表-3、表-4に示す。

表-1 試験体一覧

No	試験体名	コンクリート 設計強度 $F_c(\text{kgf/cm}^2)$	接合筋 種類 SD	接合筋径 呼び名	モルタル 厚さ (mm)	かさ上げ 高さ (mm)
1	300-10-00	300	SD390	D16	10-S	0
2	300-10-60				60	
3	300-20-00				0	
4	300-20-60				60	
5	300-10G-00				0	
6	300-10G-60				60	
7	450-10-00	450			10-S	0
8	450-10-60				60	
9	450-20-00				0	
10	450-20-60				60	
11	450-10G-00				0	
12	450-10G-60				60	
13	600-10-60	600	10-S	0		
14	600-10-60		60			
15	600-20-00		0			
16	600-20-60		60			
17	600-10G-00		0			
18	600-10G-60		60			
19	300-10-PC	300	10-S	—		
20	300-20-PC		20-S	—		

S: セメントモルタル G: グラウトモルタル

表-3 セメントモルタル
グラウトモルタルの試験結果一覧

モルタル種類	圧縮強度 (kgf/cm^2)	引張強度 (kgf/cm^2)	ヤング係数 $\times 10^4(\text{kgf/cm}^2)$	ポアソン比
グラウトモルタル	1200	49.1	2.94	0.32
セメントモルタル	493	25.4	3.06	0.17

表-2 コンクリート試験結果一覧

試験体名	圧縮強度 (kgf/cm^2)	引張強度 (kgf/cm^2)	ヤング係数 $\times 10^4(\text{kgf/cm}^2)$	ポアソン比	材令 (日)
300-10-00	334	28.1	1.91	0.25	69
300-10-60	355	25.3	2.68	0.27	81
300-20-00	335	25.0	1.81	0.08	81
300-20-60	352	21.8	2.56	0.25	81
300-10G-00	365	27.5	2.17	0.22	81
300-10G-60	359	26.3	2.21	0.13	81
450-10-00	345	27.8	1.92	0.13	69
450-10-60	366	27.8	2.45	0.27	69
450-20-00	365	26.3	1.98	0.16	81
450-20-60	360	25.7	2.62	0.21	81
450-10G-00	350	26.7	2.30	0.12	81
450-10G-60	377	25.1	2.41	0.27	81
600-10-00	633	53.5	3.31	0.39	106
600-10-60	564	61.8	3.10	0.31	107
600-20-00	653	58.2	3.98	0.27	108
600-20-60	671	47.6	3.97	0.37	109
600-10G-00	641	59.2	3.87	0.70	113
600-10G-60	500	56.9	3.46	0.39	112
300-10-PC	337	30.3	2.02	0.16	82
300-20-PC	363	31.8	2.54	0.23	82

表-4 鉄筋引張実験結果一覧

種類	強度	使用箇所	引張強度 (kgf/cm^2)	降伏強度 (kgf/cm^2)	ヤング係数 $\times 10^4(\text{kgf/cm}^2)$	伸び率 (%)
D16	SD390	接合筋	6080	3890	1.97	23.4
D13	SD390	せん断補強筋	6300	4490	2.04	18.2

2.2 加力方法および測定方法

図-2に示されているようなフレームに鉛直方向に上下1基ずつのオイルジャッキ(100t, 50t)により一定軸力 $\sigma_0 = 10\text{kgf/cm}^2$ を載荷し鉛直方向に圧縮応力を与えた。水平方向からは、オイルジャッキによりPC a部内のPC鋼棒と加力ばりを介し、試験体の鉛直接合部に対し、せん断力を与えた。試験時の加力サイクルは、0.5, 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14mmを片振り幅とし、1サイクルずつの交番繰り返し載荷を行った。加力スケジュールを図-3に示す。測定方法として、水平および鉛直方向の荷重はロードセルによって計測し、また変位については高感度変位計を使用して、PC a部と接合部の相対すべり変位を測定した。ワイヤーストレインゲージにより鉛直接合筋のひずみを測定した。

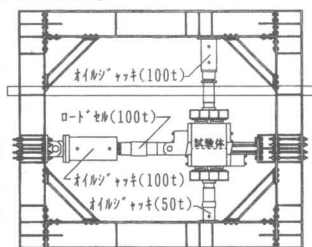


図-2 加力装置図

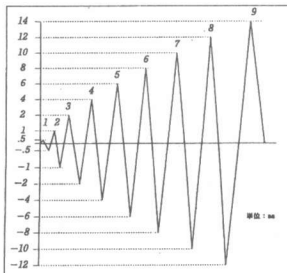


図-3 加力スケジュール

3. 実験結果

3.1 ひび割れおよび破壊性状

試験体名300-10-60と300-10G-60の最終破壊性状を図-4-1、図-4-2に示す。両者の違いは、ジョイントモルタルとしてセメントモルタルを使用したか、グラウトモルタルを使用したかの違いである。両者共、鉛直方向接合筋の降伏を迎える前にジョイントモルタル-PCa間の接合界面に初亀裂が発現し、その後ジョイントモルタルに細かく縦にひび割れが発現するが、セメントモルタルを使用したものについてはPCa部に目立ったひび割れの進行は見られない。一方、グラウトモルタルを使用したものについては、初期の小さなすべり変位においてもPCa両端部にひび割れが進行する傾向が見られる。

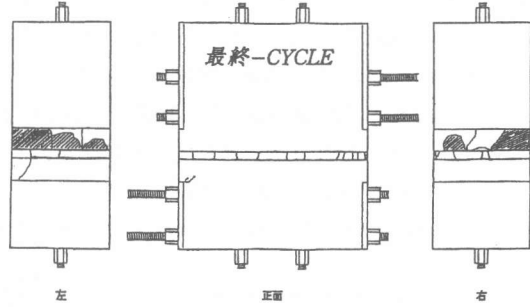


図-4-1 300-10-60亀裂図

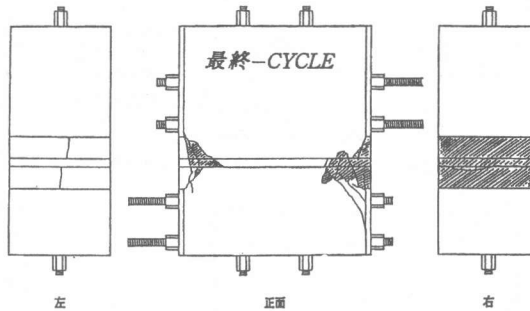


図-4-2 300-10G-60亀裂図

3.2 荷重-すべり変位履歴曲線

実験より得られた荷重-すべり変位に関する履歴曲線を試験体300-10G-00、300-10-00、300-10G-60、300-10-60について図-5に示す。また、各試験体の比較を行うために各変動要因により分類した包絡線を図-6~図-11に示す。包絡線によりコンクリート強度別に、かさ上げ高さの有無(0mm, 60mm)、モルタル厚さ(10mm, 20mm)を変動させた際の各試験体の比較を行うと、鉄筋継手を用いた試験体、通し

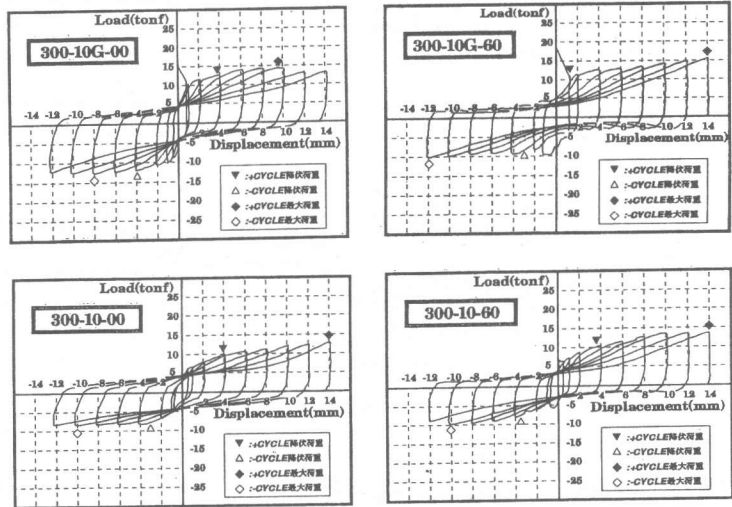


図-5 履歴曲線(300-10G-00, 300-10G-60, 300-10-00, 300-10-60)

鉄筋を用いた試験体共に最終時まで耐力の上昇は微増が見受けられるものの、耐力低下は、見受けられない。最も顕著に耐力の増加が見受けられるものとして、接合モルタルにグラウトモルタルを使用した試験体は、初期のすべり変位が発生するまでの耐力が著しく高いことが認められる。

その後、すべり変位が大きくなっても初期の耐力を上回ることにはなかった。また、すべり変位が発生した後においても耐力が上昇していく傾向がある。この初期にすべり変位が発生した際の耐力は、PCaユニット部材のコンクリート強度が増大すると、それに比例して上昇していくの

が見受けられる。次にモルタル厚さに関しては、20mmの試験体と10mmの試験体との比較を行うと前者は、後者の試験体に比べ、すべり変位が大きくなっても目立った耐力上昇は認められず、モルタル厚さ20mmの試験体が10mmの試験体の耐力を上回ることにはなかった。鉄筋継手のかさ上げ高さにおいては、かさ上げ高さ0mmの試験体は、60mmの試験体と比較して、すべり変位が大きくなると最終サイクルまで耐力が上昇していく傾向がある。

また、すべり変位が発生する際の試験体の耐力は、ジョイントモルタルにグラウトモルタルを使用したものの方が、すべり変位が発生する際の耐力が卓越していることが分かる。

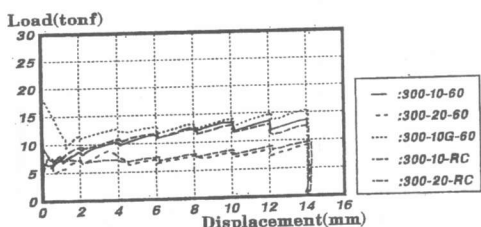


図-6 包絡線 (300シリーズかさ上げ60mm)

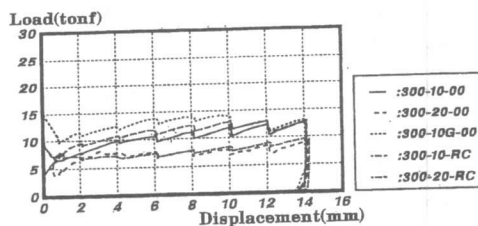


図-7 包絡線 (300シリーズかさ上げ無し)

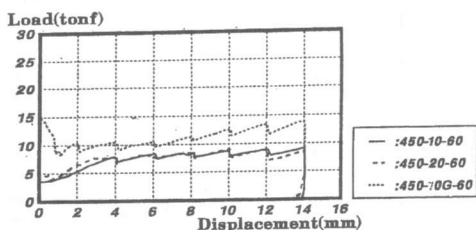


図-8 包絡線 (450シリーズかさ上げ60mm)

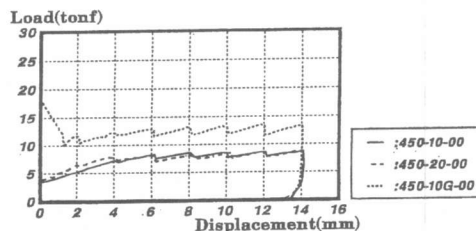


図-9 包絡線 (450シリーズかさ上げ無し)

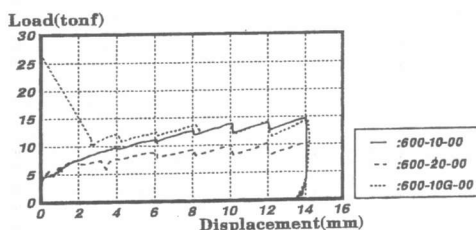


図-10 包絡線 (600シリーズかさ上げ60mm)

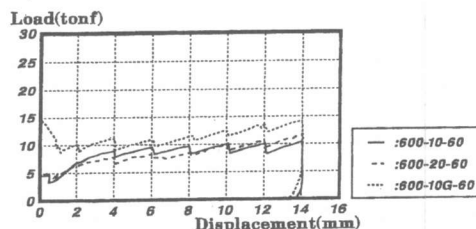
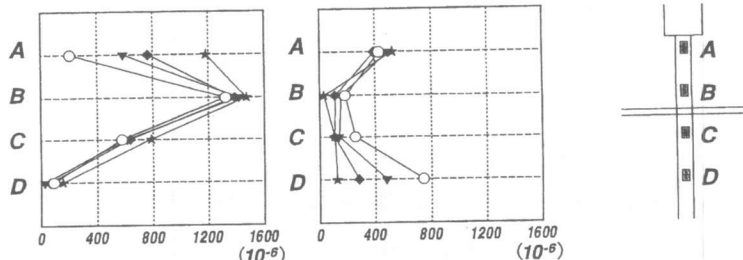


図-11 包絡線 (600シリーズかさ上げ60mm)

3.3 ひずみ分布図

図-12に試験体名300-10-60と300-10G-60の鉛直接合筋の弾性範囲内のひずみ分布図を示す。グラウトモルタルを使用した300-10G-60においては鉄筋継手一接合面間かつ接合面近傍で曲



300-10G-60-3f	★	300-10-60-3f
300-10G-60-5f	◆	300-10-60-5f
300-10G-60-6f	▼	300-10-60-6f
300-10G-60-8f	○	300-10-60-8f

図-12 ひずみ分布図 300-10-60, 300-10G-60

げ応力が最大となり、ひずみが大きく発現している位置があり、塑性ヒンジが形成されていることが分かる。一方、セメントモルタルを使用した300-10-60では、接合面から離れた位置で最大になっている。

4. せん断伝達理論による検討

4.1 理論と実験結果の比較

PCa部材が、せん断力及び軸方向力を受けると、接合面にせん断力が伝達される。このせん断力によってすべり変形が大きくなり、鉛直接合筋において接合面から a_p の位置に塑性ヒンジを形成し、接合面から塑性ヒンジまでの鉛直接合筋直下のコンクリートに生ずる局部圧縮によって抵抗する。この事実は、接合面を横切る鉄筋のせん断伝達を塑性ヒンジ間の曲げせん断抵抗よりコンクリートの支圧抵抗に依存したダウエル効果によ

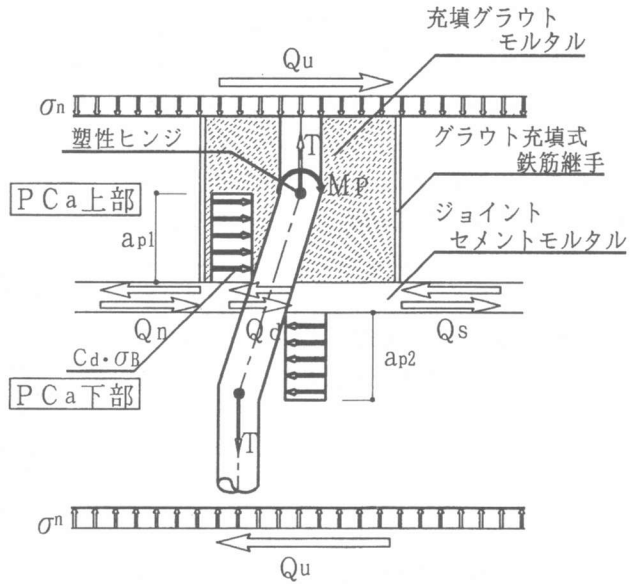


図-13 3タイプの抵抗機構モデル図

る評価の方がPCa接合面の直接せん断実験結果に良く適合することが既往の研究によって検証されている。^{<1>}同時に、鉛直接合筋が引張力を受けることによって近傍のコンクリートが圧縮力を受け、接合面にせん断摩擦作用として作用する。さらに、軸方向力によって与えられた外部圧縮力による摩擦力が接合面に作用する。これら3タイプの抵抗機構により考えると、接合面における全せん断抵抗 Q_u は、図-13のようにダウエル作用^{<2>}、せん断摩擦作用^{<3>}、外部圧縮力による摩擦作用の累加により、次式のように表される。

$$Q_u = Q_d + Q_s + Q_n$$

$$Q_d = C_d \cdot \sigma_B \cdot a_p \cdot \sum d_r \quad \dots (1) \quad (\text{ダウエル作用})^{<2>}$$

$$Q_s = (C_T \cdot a_s \cdot \sigma_y) \mu \quad \dots (2) \quad (\text{せん断摩擦作用})^{<3>}$$

$$Q_n = (\sigma_n \cdot A) \mu \quad \dots (3) \quad (\text{外部圧縮力による摩擦作用})^{<3>}$$

ここで、図13において接合面上部と下部に形成される支圧抵抗は低い方を採用する。上記の式(1)、(2)、(3)式の累加によって式(4)のように表される。

$$Q_u = C_d \cdot \sigma_B \cdot a_p \cdot \sum d_r + (C_T \cdot a_s \cdot \sigma_y + \sigma_n \cdot A) \mu \quad \dots (4)$$

上記のせん断耐力式(4)で、 C_d ：支圧係数 ($C_d=3.0$)

σ_B ：コンクリート又は、充填モルタルの圧縮強度

a_p ：塑性ヒンジ位置

$$a_p = \frac{d_r}{2} \left(\sqrt{\lambda r^2 \left(1 - \frac{\sigma_{Bj}}{\sigma_{Bp}} \right) + \frac{4}{3} \times \frac{0.61}{3.0} \times \frac{\sigma_y}{\sigma_{Bp}} - \lambda r} \right) < 2 >$$

d_r ：接合筋径、 C_T ：せん断摩擦係数 (=0.638)

a_s ：接合筋断面積、 σ_y ：接合筋降伏強度、

σ_n ：軸方向圧縮応力度、 A ：軸方向圧縮力作用

断面積、 μ ：低減係数 (=0.6) であり、計算結果

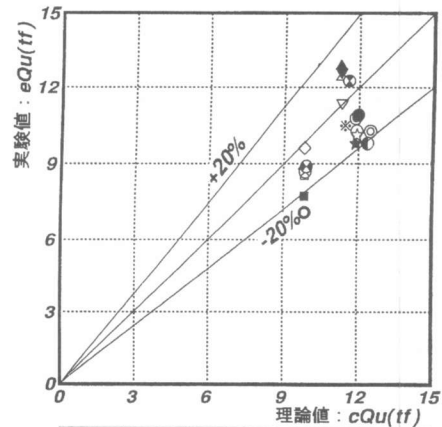
と直接せん断実験より得られた変位4mm時の荷重

の結果を図-14上にプロットした。その結果計算

値は実験値の概ね±20%の範囲内に存在しており、

接合界面におけるせん断伝達能力を旨く推定して

いるといえる。



300-10-00	★	450-10-00	☆	600-10-00	◎
300-10-60	○	450-10-60	●	600-10-60	⊙
300-20-00	◇	450-20-00	◆	600-20-00	⊗
300-20-60	□	450-20-60	■	600-20-60	⊠
300-10G-00	△	450-10G-00	▲	600-10G-00	⊕
300-10G-60	▽	450-10G-60	▼	600-10G-60	⊖
300-10-RC	⊙				
300-20-RC	⊗				

図-14 実験値と理論値の比較

5. まとめ

グラウト充填式鉄筋継手を有するP C a接合部の直接せん断実験及び解析により検討を行った結果、以下のような結果が得られた。

(1)接合用ジョイントモルタルにグラウトモルタルを使用することにより初期のすべり変位が発生する際の耐力およびその後の耐力も上昇する。

(2)接合用ジョイントモルタルにグラウトモルタルを使用することにより初期のすべり変位が発生する際の耐力はP C a部のコンクリート強度に比例して増大する傾向がある。

(3)かさ上げ高さを60mmとすると、初期時の耐力はかさ上げ高さ0mmに比して、低く発現するものの終局時耐力は上昇する傾向がある。

(4)接合筋の曲げモーメントが最大となる位置で形成される塑性ヒンジは、グラウトモルタルをジョイントコンクリートに使用することによって接合面により近い位置に形成される傾向がある。

(5)せん断伝達理論式によって得られた結果と、実験から得られた耐力(4mm時)の誤差は概ね±20%内に存在している。よって理論式は実験結果を良く評価しているものと考えられる。

参考文献

<1>榎谷栄次、小川祥平、謝爽：接合幅を有するプレキャスト部材接合部ダウエル筋のせん断伝達、コンクリート工学年次論文報告集、第16巻第2号、PP. 817～822

<2>小西伸哉、榎谷栄次、謝爽、伊藤嘉則：高強度材料を用いたP C a構造接合面におけるせん断伝達挙動に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、1997年7月

<3>望月 重、榎谷栄次、永坂具也：壁式プレキャスト構造鉛直接合部のせん断耐力、ダウエル効果および圧縮拘束力を考慮した場合、日本建築学会構造系論文報告集、第424号、1991年6月、PP. 11～22