

論文 泥水中打設された場所打ちコンクリート杭のせん断強度に関する実験

齊藤弘幸*1・香取慶一*2・林静雄*3・村田義行*4

要旨: 筆者らは、円形断面柱の場合、付着応力度が $5\text{N}/\text{mm}^2$ 以下であるならば、主筋付着破壊は起きないことを確認している。しかし場所打ちコンクリート杭の場合、泥水中でコンクリートを打設するため、付着性状に不具合が生じると考えられる。そこで本実験では、場所打ちコンクリート杭の、比較的付着応力度が高い場合のせん断強度の確認を目的とし、許容せん断応力度;終局せん断強度式の計算値と実験値の比較, 及び既往の研究との比較を行う。また、せん断強度と付着応力度との関係についても考察する。

キーワード: 場所打ちコンクリート杭, 泥水, ベントナイト, せん断強度

1. はじめに

場所打ちコンクリート杭は、騒音が少なく、杭径、配筋等の自由度、工法自体の施工性により、都市部においては杭施工法の大多数を占めている。ところが泥水中でコンクリートを打設するため、気中打設されたコンクリートに比べて強度が劣る、また泥水中に含まれるベントナイト粒子が主筋に付着し、付着強度が低下する可能性がある。

本実験では、コンクリートを泥水中打設した場所打ちコンクリート杭で比較的主筋の付着応力度が高い場合のせん断強度の確認をする。

ベントナイト濃度とし、一般的な配合の 6%及び配合量が比較的多い場合の 12%とする。

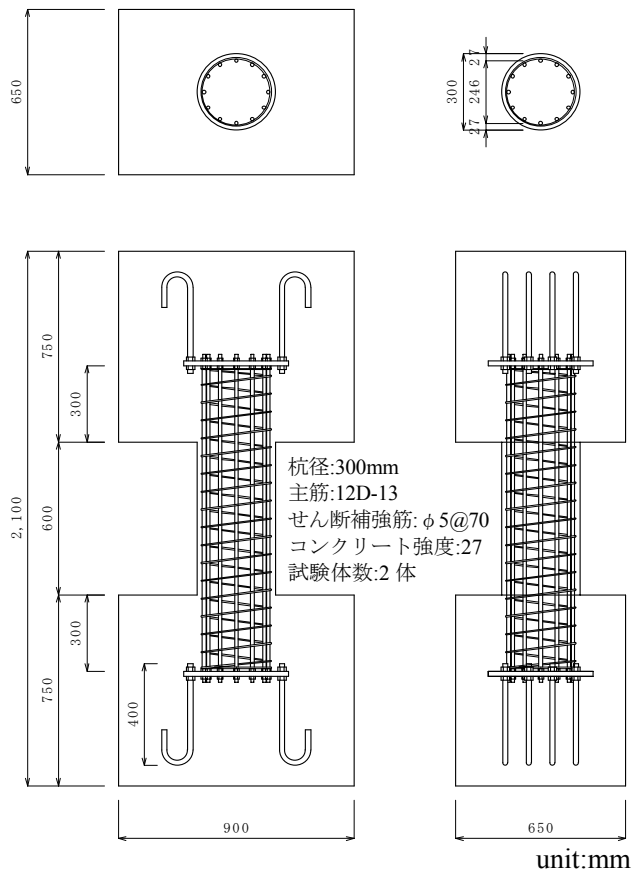


図-1 試験体図

2. 実験概要

2.1 試験体概要

2.1.1 試験体形状

試験体図を図-1に示す。試験体は、杭径 $D=300\text{mm}$, スパン長 $L=600\text{mm}$ のものを2体製作した。せん断補強筋は高強度補強筋をスパイラル配筋とした。いずれもせん断破壊を先行させるため、シアスパン比を 1.0 とし、主筋は焼入れしたものを用いた。変動要因は泥水中の

*1 東京工業大学大学院 総合理工学研究科 環境理工学創造専攻 (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)

*4 (株)高周波熱錬 製品事業部 博士(工学)

2.1.2 試験体製作

試験体製作図を図-2に示す。試験部分は、実際の場所打ち杭の施工方法を模擬して、試験部分のみ主筋及びせん断補強筋を先行して配筋し(写真-1)、型枠および底蓋を設置したあとにベントナイト液で型枠を満たし(写真-2)、トレミー管を用いてコンクリートを打設した(写真-3)。試験部分を脱型した後、スタブを後打ちして埋め込んだ。また、試験体とは別にコア抜き用の供試体を3体(気中、6%、12%)製作した。表-1にベントナイト液の試験結果、表-2にコンクリートの調合及びフレッシュ試験結果、表-3に試験体諸元一覧を示す。

表-1 ベントナイト液試験結果

試験項目	6%	12%
ファンネル粘度	20.6秒	27.2秒
比重	1.03	1.06
pH	9.8	9.8
液温	26.7°C	26.5°C

表-2 コンクリートの調合およびフレッシュ試験結果

セメント	水	細骨材	粗骨材	混和剤	水セメント比	細骨材率
l/m ³				ml/m ³	%	
285	185	825	169	973	65	47

調合条件

呼び強度	スランプ	粗骨材の最大寸法	セメントの記号
27	18cm	13mm	N

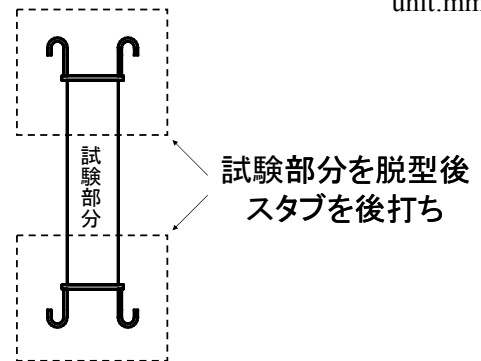
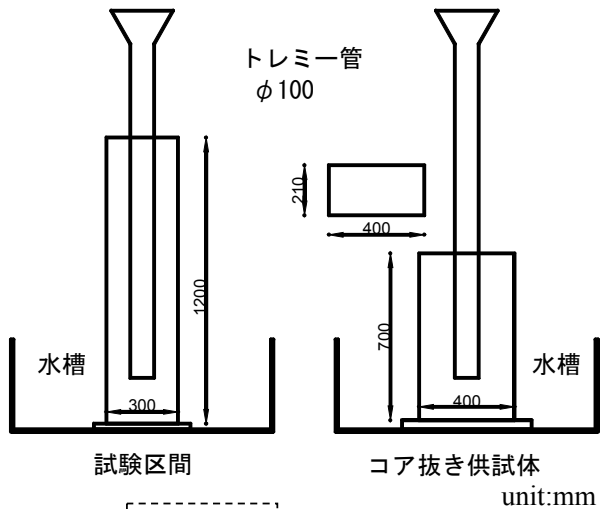


図-2 試験体製作図

フレッシュ試験結果

スランプ	空気量	コンクリート温度	フロー値
17cm	4.7%	33°C	300×295mm



写真-1 型枠内部



写真-2 ベントナイト液注入



写真-3 コンクリート打設

表-3 試験体一覧

試験体	Be (%)	D (mm)	L (mm)	M/QD	主筋			せん断補強筋			$p_w \cdot w \cdot \sigma_y$ (N/mm ²)	σ_B (N/mm ²)	N (kN)	η
					配筋	P_g (%)	σ_y (N/mm ²)	配筋	p_w (%)	$w \cdot \sigma_y$ (N/mm ²)				
C-H19-S-6%	6	300	600	1.0	12-D13	2.16	1065	2- ϕ 5@70	0.19	1499	2.84	32.1	202	0.10
C-H19-S-12%	12	300	600	1.0	12-D13	2.16	1065	2- ϕ 5@70	0.19	1499	2.84	29.7	202	0.10

Be: 泥水打設ベントナイト濃度 D: 杭径 L: スパン長 M/QD: せん断スパン比 P_g : 主筋比 σ_y : 主筋降伏強度
 p_w : せん断補強筋比 $w \cdot \sigma_y$: せん断補強筋降伏強度 σ_B : コンクリート 圧縮強度 N: 軸力 η : 軸力比
 ※ 試験体記号の C は円形断面を, H は高強度せん断補強筋, S はせん断破壊先行, 数字 (19) は補強筋比を示す。
 補強筋比 p_w はせん断補強筋断面積を等価長方形断面の幅とせん断補強筋間隔で除し, さらに $\pi/4$ の補正を掛けて求めた。

2.2 使用材料

表-4 に使用した鋼材およびコンクリートの材料特性を示す。主筋はD13 を焼き入れし, せん断補強筋は ϕ 5 の高強度せん断補強筋とした。降伏強度は, 0.2% オフセット法で求めた。コンクリート強度はコア抜き供試体から採取したコアを用い, 材齢 23 日で圧縮試験を行って求めた。

表-4 材料特性

鋼材	$\sigma_{y,w} \sigma_y$ (N/mm ²)	σ_{max} (N/mm ²)	E_s ($\times 10^5$ N/mm ²)
D13 (焼き入れ)	1065	1094	1.95
ϕ 5 (高強度補強筋)	1499	1516	1.99

コンクリート		σ_B (N/mm ²)	E_c ($\times 10^4$ N/mm ²)
コア抜き	気中	28.1	2.81
	6%濃度	32.1	2.96
	12%濃度	29.7	2.78

2.3 加力方式

加力装置を図-3 に示す。加力形式は変位制御による逆対称正負交番繰返し载荷とした。加力スケジュールは, 部材角 $\pm 1/400$ で正負交番载荷 1 回, その後は, $\pm 1/200$, $\pm 1/100$, $\pm 1/67$, $\pm 1/50$, $\pm 1/33$ で 2 回繰返しした後, 押し切りとした。軸力は水平加力中一定になるように制御した。軸力及び水平力はロードセルによる測定を行った。せん断スパン内における相対変位は, 測定治具を両スタブから持ち出し, 測定した。

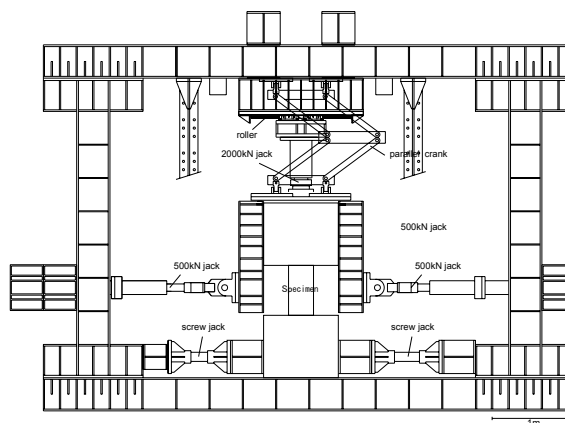


図-3 加力装置

表-5 実験結果及び計算値との比較

試験体	cQ_{AL}	cQ_{AS}	cQ_{su1}	cQ_{su2}	eQ_{max}	eQ_c	cQ_{mu}	kN		
								eQ_{max}/cQ_{su1}	eQ_{max}/cQ_{su2}	eQ_{max}/cQ_{mu}
C-H19-S-6%	43	84	216	224	239	195	414	1.11	1.07	0.58
C-H19-S-12%	42	82	210	216	266	171	414	1.27	1.23	0.64

cQ_{AL} : 文献 1) により求めた長期許容せん断力計算値 $cQ_{AL} = \frac{f_s(\text{長期}) \cdot A_s}{\kappa}$
 cQ_{AS} : 文献 1) により求めた短期許容せん断力計算値 $cQ_{AS} = b \cdot j \cdot \{f_s + 0.5 \cdot w \cdot f_t \cdot (p_w - 0.001)\}$
 cQ_{su1} : 修正荒川式を用いた終局せん断強度計算値 $cQ_{su1} = \left\{ \frac{0.053 \cdot p_t \cdot (\sigma_B + 18)}{M/Q \cdot d + 0.12} + 0.846 \sqrt{p_w \cdot w \cdot \sigma_y} + 0.1 \cdot \sigma_o \right\} \cdot b \cdot j$
 cQ_{su2} : AIJ 終局指針より求めた終局せん断強度計算値 $cQ_{su2} = b \cdot j_t \cdot p_w \cdot w \cdot \sigma_y + k_1 \cdot (1 - k_2) \cdot b \cdot D \cdot v \cdot \sigma_B$
 eQ_{max} : 終局せん断強度実験値
 eQ_c : せん断ひび割れ発生荷重
 cQ_{mu} : 曲げ終局強度計算値

A_s : 杭断面積 (mm²) b : 等価長方形断面の幅 j : 等価長方形断面の応力中心間距離 d : 等価長方形断面の有効せい κ : 形状係数 (円形断面の場合 $\kappa = 4/3$) f_s : コンクリートの許容せん断応力度 (RC 規準に準拠)
 $w \cdot f_t$: せん断補強筋の許容応力度で 585 (N/mm²) とする σ_{wy} : 終局せん断強度算定用の材料強度で 1275 (N/mm²) とする σ_o : 軸方向応力度 j_t : 引張側主筋及び圧縮側主筋の中心間距離 v : コンクリート圧縮強度の有効係数

$$k_1 = \frac{\sqrt{(L/D)+1} - (L/D)}{2} \quad k_2 = \frac{3 \cdot p_w \cdot \sigma_{wy}}{v \cdot F_c} \quad v = 0.7 - \frac{F_c}{200}$$

3. 実験結果

表-5に実験結果及び計算値との比較を示す。長期許容せん断力，短期許容せん断力に関しては文献1)の算定式を用いて計算した。文献1)では使用限界状態の範囲である長期許容せん断力に対してはせん断ひび割れの発生を許容しないが，損傷限界状態の範囲である短期許容せん断力に対してはせん断補強筋の効果も見込んでせん断ひび割れの発生を許容した形となっている。しかし，実際には安全側の評価となっていた¹⁾。終局せん断強度に関しては，修正荒川式²⁾及び建築学会終局指針A法式³⁾より求めた。

なお計算値は全て図-4に示すように，円形断面を，適用性が良くかつシアシパン比の変動を避けることができる長方形断面に置換して求めた。そのため断面せいを直径とした。

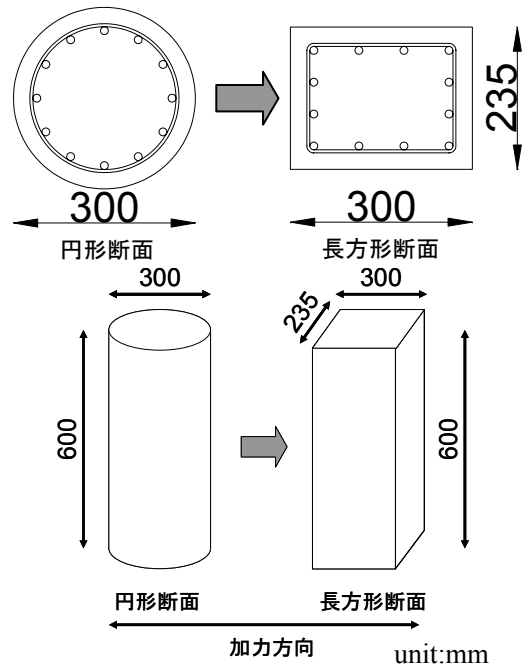


図-4 等価断面置換

表-6 コア抜き試験結果

3.1 コア抜き供試体

3.1.2 圧縮強度

表-6にコア抜き供試体の試験結果，図-5に応力-歪関係及びコア抜き採取位置を示す。ベントナイト6%濃度のものが最大となり，ついで12%，気中の順となった。通常場所打ち杭工法により施工されたコンクリートは，一般的に気中で養生されたコンクリートに比べ強度が劣り，特に杭頭部の比較的浅いところでは，ブリーディングによる影響で安定液が混入しやすく，強度低下が顕著になると言われているが⁴⁾，本実験においては確認出来なかった。また，応力-歪関係において，気中打設されたものより泥水中打設されたものの方が大きくばらついていた。これはコンクリート打設時に泥水を巻き込んだことによる影響だと考えられる。

3.1.2 ヤング係数

ヤング係数の関係を図-6に示す。ヤング係数も圧縮強度同様に，ベントナイト濃度の影響による劣化が確認できなかった。なお各供試体ともに建築学会RC規準式²⁾と良い相関を示している。

採取位置	気中打設		ベントナイト6%濃度		ベントナイト12%濃度	
	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
上-1	28.0	26.9	33.6	28.9	29.4	27.0
上-2	28.3	25.7	32.2	27.7	29.4	24.2
中-1	27.0	27.6	32.7	28.5	28.8	28.2
中-2	28.5	28.3	32.6	30.5	30.0	29.2
下-1	28.3	27.3	30.8	30.3	30.0	28.1
下-2	28.5	28.9	30.7	31.5	30.4	30.2
全平均	28.1	27.5	32.1	29.6	29.7	27.8

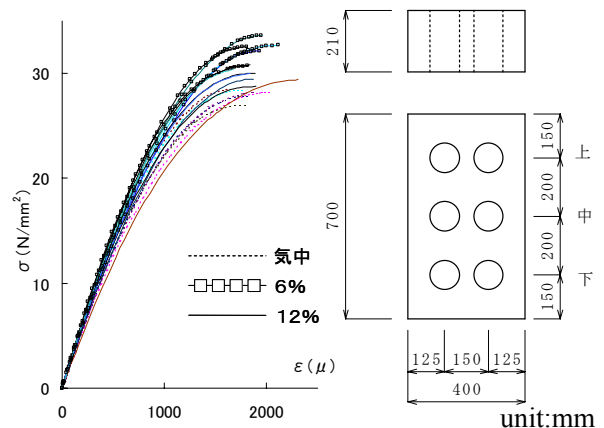


図-5 応力-歪関係及びコア抜き採取位置

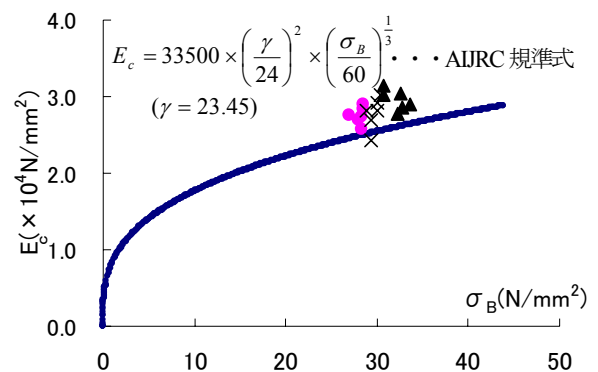
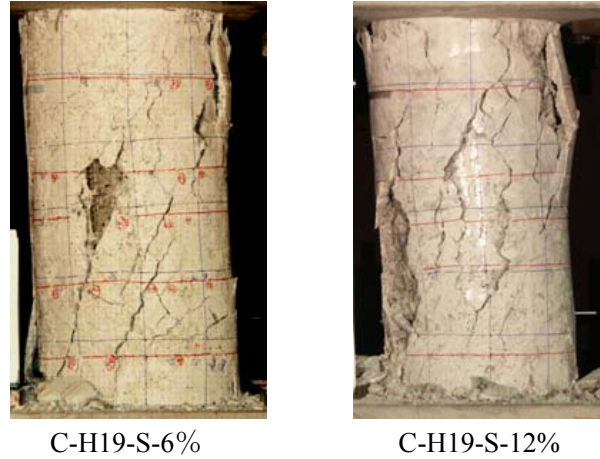


図-6 ヤング係数

3.2 破壊性状

写真-4に試験体の破壊性状を示す。両試験体とも、試験体腹部に入ったせん断ひび割れが徐々に開口してゆき、せん断破壊に至った。破壊面となったひび割れの最大幅は部材角 1/50 で 1mm 程度と小さく、局所的に集中することはなかった。その際に一つの補強筋を横切る合計ひび割れ幅は 3mm 程度であった。かぶりコンクリートは、ベントナイトが混入したことで白くなっていた。



C-H19-S-6%

C-H19-S-12%

3.3 荷重—変位関係

図-7に荷重—変位関係を示す。両試験体とも部材角 1/100 でせん断ひび割れが発生したものの、部材角 1/50 までせん断力は上昇を続け、その後は徐々に低下し、せん断破壊に至った。終局せん断強度は C-H19-S-12%が C-H19-S-6%を若干上回る結果となった。

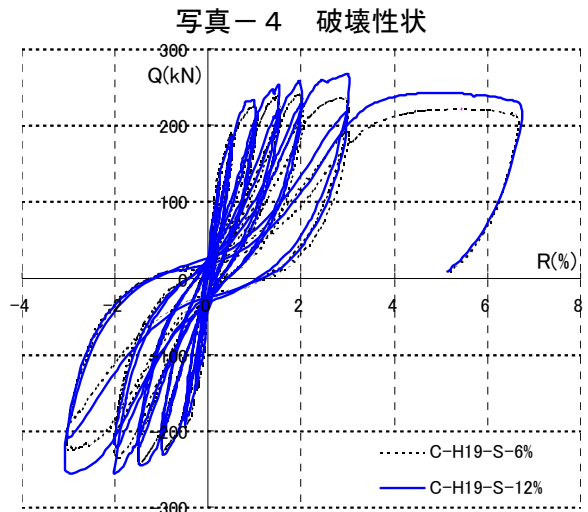


写真-4 破壊性状

3.4 算定式の評価

図-8に既往の円形部材に関する実験をまとめたものを示す。図中の点線は横軸と縦軸の値が同一の線を示す。なお泥水中打設された試験体の許容応力度算定式が現状ではないので、文献1)に用いられている算定式で評価を行った。本実験におけるせん断ひび割れ発生時のせん断応力度は (a) に示すように、長期許容せん断応力度に対して、3 倍以上の安全率を有している。さらに終局せん断応力度は (b) で示すように、短期許容せん断応力度に対して 2 倍以上の安全率を有している。よって文献1)によって安全側に評価することが出来た。

せん断終局強度計算値に関しては、終局指針 A 法による値が荒川式による値より大きくなる傾向にある (d)。安全側からの評価から、実験値は荒川式による値を全て上回っていることから、設計上は荒川式を用いることが妥当である。

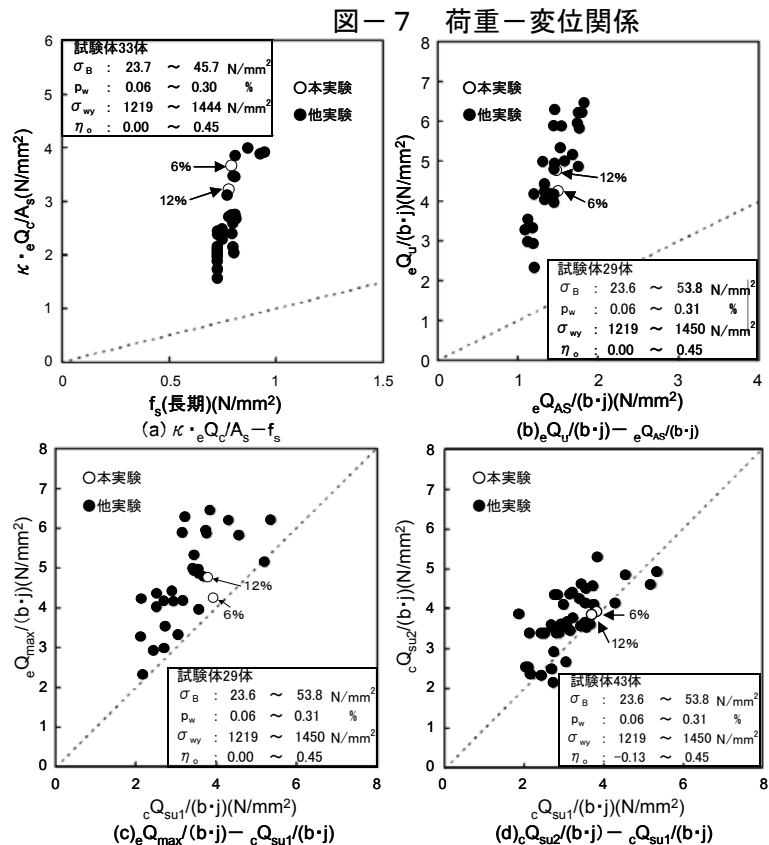


図-7 荷重—変位関係

図-8 他実験との比較

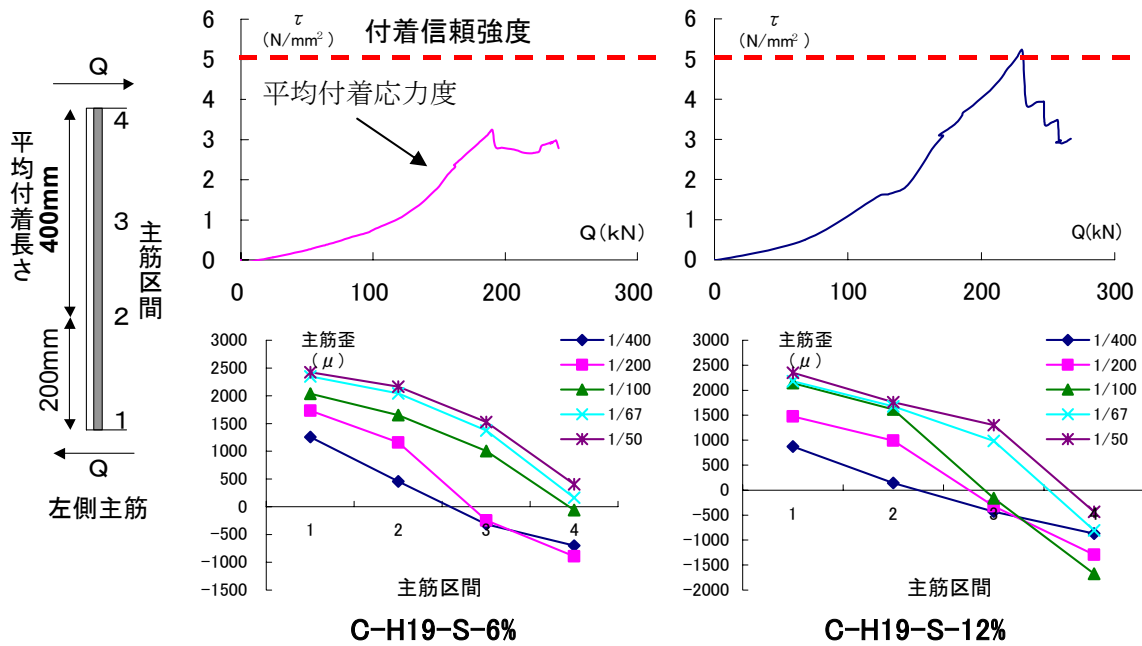


図-9 平均付着応力度および主筋歪

3.5 付着の検討

図-9に平均付着応力度及び主筋歪を示す。平均付着長さはヒンジ領域を除いた長さである、主筋区間2~4とした。図中の点線は建築学会靱性保証型設計指針⁵⁾に基づいて、円形断面を長方形に等価置換し、サイドスプリット破壊形式により求めた付着信頼強度である。

文献1)のデータによると付着応力度が 5N/mm^2 を超えない範囲では、付着破壊は起きないとされている。本実験ではC-H19-S-12%が部材角1/100でこの値を超える結果となったが、付着破壊には至らなかった。円形断面に対する補強筋の拘束効果が高いためであると考えられる。

両試験体はそれぞれ部材角1/200(C-H19-S-6%)、1/100(C-H19-S-12%)で最大付着応力度となっており、その後は横ばい、もしくは低下していったもののせん断力は部材角1/50まで上昇し続けていた。

なお本実験において、ベントナイトの濃度が付着応力度へ及ぼす影響は確認できなかったが、これはバイブレーターを使用しなかったことにより、内部の状態が不均一になったためであると考えられる。よって今度検討が必要である。

4. まとめ

- ・コア抜き供試体の圧縮強度はバラツキがあるが、泥水打設による影響をほとんど受けない。
- ・長期、短期許容せん断応力度に関しては、文献1)による算定式で、終局せん断強度に関しては荒川式を用いることによって安全側に評価する事ができる。
- ・付着劣化が起きた後もせん断力が上昇したことから、付着劣化がせん断破壊につながることはなかった。

謝辞

本研究は東京工業大学建築物理センター全国共同研究の一貫として行われたものであります。

参考文献

- 1) 高周波熱錬株式会社：場所打ちコンクリート杭のせん断補強筋としてウルボンを使用する工法設計指針・同解説，2004
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造計算規準・同解説，1999
- 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
- 4) 花川日出雄：泥水中に打設したコンクリートの品質に関する一考察，pp.503-504，1981.9
- 5) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説，1990
- 6) 林静雄他：鉄筋コンクリート円形断面部材のせん断終局強度式の適用性，コンクリート工学 vol.42，NO.2，pp.27-32，2004.2