

論文 高強度コンクリートを用いた場所打ち杭の強度に関する実験的研究

谷村 幸裕^{*1}・佐藤 勉^{*2}・棚村 史郎^{*3}・池亀 真樹^{*4}

要旨：近年の耐震設計の改訂に伴い、杭部材に作用する断面力が増加する傾向にあるが、これに対して高強度コンクリートの適用が有効と考えられる。しかし、場所打ち杭の施工方法は通常のコンクリートの打設方法と異なるため、この影響を明らかにしておく必要がある。そこで、場所打ち杭の施工を模擬して供試体を製作し載荷実験を行った。その結果、圧縮強度は通常の施工に比べて低下するが、高流動コンクリートを用いることにより強度低下を抑えることができること、場所打ち RC 杭のせん断耐力は泥水中で施工すると気中施工よりも低下し、これは高流動コンクリートを用いても改善されないことが明らかになった。

キーワード：高強度コンクリート、高流動コンクリート、場所打ち杭、せん断

1. はじめに

近年の耐震設計の改定に伴い、地震時に杭部材に作用する断面力が増加する傾向にあるが、これに対して高強度コンクリートの適用が有効と考えられる。場所打ち杭のコンクリートは、通常のコンクリートの施工と異なり、水中や泥水中でトレミー管を用いて打設し、締め固めは行われないのが一般的である。しかし、高強度コンクリートを用いた場合のこれらの影響について、明らかにされていないのが現状である。

そこで、本研究では、場所打ち杭に高強度コンクリートを用いた場合の、施工条件による影響を明らかにするため、場所打ち杭の施工を模擬して供試体を製作し、載荷実験により検討することとした。なお、コンクリートは、従来用いられてきた程度のスランプを有するもののほかに、自己充填性を有する高流動コンクリートも合わせて検討を行った。

2. 圧縮強度、静弾性係数、単位体積質量

2.1 実験の目的

場所打ち杭のコンクリートの特性を検討するために、気中、水中ならびに濃度の異なるベン

トナイト溶液中にトレミー管を用いてコンクリートを打ち込み、これより採取した供試体と標準供試体の特性（圧縮強度、静弾性係数、単位体積質量）について比較を行った。

2.2 実験の概要

試験体の製作方法を図-1に示す。試験体型枠にはφ900mmのボイド管を用いた、コンクリートの打設時に、締め固めは行っていない。コンクリートが硬化した後、試験体よりコアを採取し供試体を作成した。表-1に試験体の施工

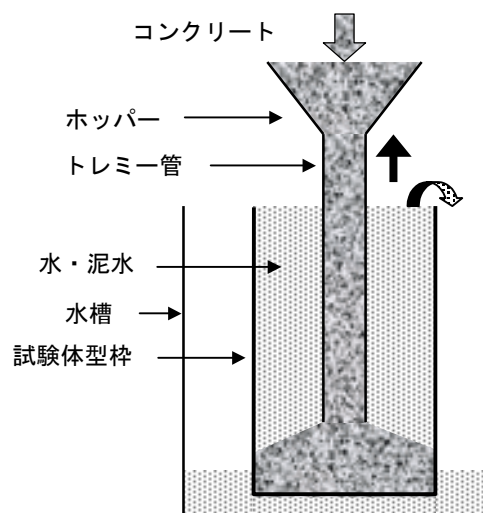


図-1 試験体製作方法

*1 (財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部コンクリート構造主任研究員 工修 (正会員)

*2 (財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部コンクリート構造室長 工博 (正会員)

*3 (財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部基礎・土構造室長

*4 (株) 復建エンジニアリング

条件を、表－2にコンクリートの配合を、表－3にベントナイトの性質を示す。HN はスランプ18cmの高強度コンクリートを用い、HSはスランプフロー60cmの自己充填性を有する高流動コンクリートを用いた。また、図－2にコア供試体の採取位置を示す。供試体の形状は、径100mm、高さ200mmの円柱形とした。

圧縮強度はJIS A 1107、JIS A 1108、静弾性係数はASTM C 469-65により、アムスラー試験機を用いて実験を行った。また、単位体積質量は、供試体の質量、形状寸法より算出した。

2.3 実験結果と考察

(1) 実験結果概要

JIS A 1132 に準じて製作し現場封緘養生した供試体（以下、標準供試体）と、採取したコアから作成した供試体（以下、採取供試体）の圧縮強度、静的弾性係数および単位体積質量の実験結果を表－4～6に示す。なお、試験時材齢は、HNは28日、HSは56日である。

(2) 圧縮強度

採取供試体の圧縮強度を標準供試体の圧縮強度で除して、圧縮強度比として検討する。図－3に、施工条件と圧縮強度比の関係を示す。

採取位置で比較すると、下で採取したものは他に比べて、全般的に圧縮強度の低下は少ない。これは自重で締め固められる影響と考えられる。

HNにおいて、気中、水中施工の採取供試体は標準供試体に比べて15%程度、泥水中施工は20%程度圧縮強度が低下する結果となった。一方、HSでは、気中、水中施工の場合は標準供試体に比べて圧縮強度はほとんど低下せず、泥水中施工は、ばらつきがあるものの、最も低い場合で10%程度の低下にとどまった。従って、場所打ち杭に高強度コンクリートを用いた場合、施工の影響により圧縮強度は低下するが、コン

クリートに自己充填性を付与することにより、圧縮強度の低下を低減できることがわかる。

(3) 静弾性係数

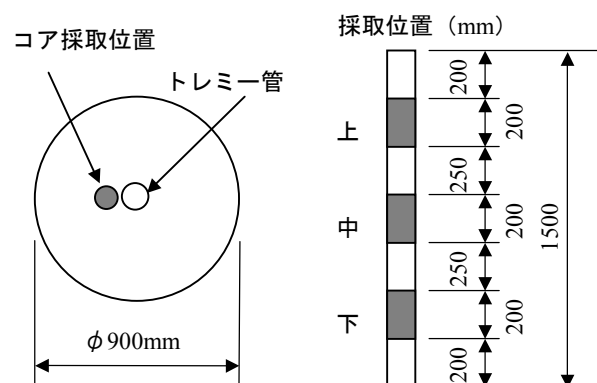
図－4に、施工条件と静弾性係数比の関係を示す。静弾性係数比は、採取供試体の静弾性係数を標準供試体の静弾性係数で除したものである。

表－1 試験体の施工条件

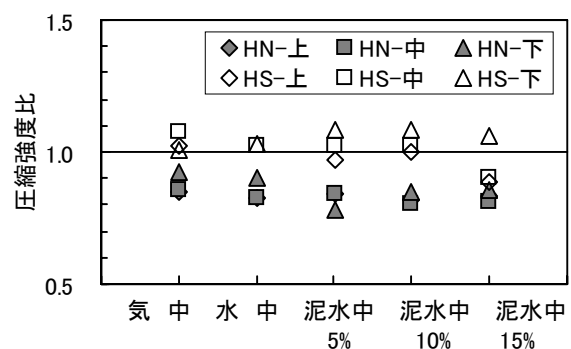
試験体	施工条件
HN-A, HS-A	気中
HN-0, HS-0	水中
HN-5, HS-5	泥水中（濃度 5%）
HN-10, HS-10	泥水中（濃度 10%）
HN-10, HS-10	泥水中（濃度 15%）

表－3 ベントナイトの物理的性質

産地	水分 (%)	土粒子密度 (g/cm ³)	PH (2%液)
群馬県	7.2	2.6	10.0



図－2 試験体形状および供試体採取位置



図－3 施工条件と圧縮強度比の関係

表－2 コンクリートの配合表

	呼び強度 (N/mm ²)	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	スランプフロー (cm)	W/C (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)				
								水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 CX%
HN	60	20	18	—	36	4.5	45.4	183	508	727	888	5.08
HS	60	20	—	60	33	5.5	51.9	165	500	846	801	8.00

表－４ 実験結果一覧表（採取供試体 HN）

No	採取位置	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)	単位体積質量 (t/m ³)
HN-A	上	52.3	27.0	2.29
	中	52.7	24.0	2.21
	下	56.7	24.4	2.25
HN-0	上	53.8	22.8	2.22
	中	53.9	23.6	2.22
	下	58.7	24.2	2.25
HN-5	上	54.6	22.5	2.20
	中	54.6	21.9	2.21
	下	50.5	25.8	2.25
HN-10	上	53.1	22.9	2.23
	中	52.2	22.8	2.21
	下	55.1	25.1	2.26
HN-15	上	53.7	22.7	2.21
	中	52.5	22.3	2.23
	下	55.3	25.3	2.31

表－５ 実験結果一覧表（採取供試体 HS）

No	採取位置	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)	単位体積質量 (t/m ³)
HS-A	上	59.7	26.3	2.23
	中	62.8	26.6	2.26
	下	58.6	24.7	2.26
HS-0	上	※	※	※
	中	59.4	24.6	2.20
	下	59.8	24.6	2.22
HS-5	上	56.6	24.2	2.20
	中	59.4	26.7	2.24
	下	63.0	27.8	2.28
HS-10	上	60.5	25.0	2.20
	中	61.6	26.9	2.24
	下	65.3	26.0	2.26
HS-15	上	53.6	22.9	2.24
	中	54.3	26.7	2.26
	下	63.8	26.7	2.27

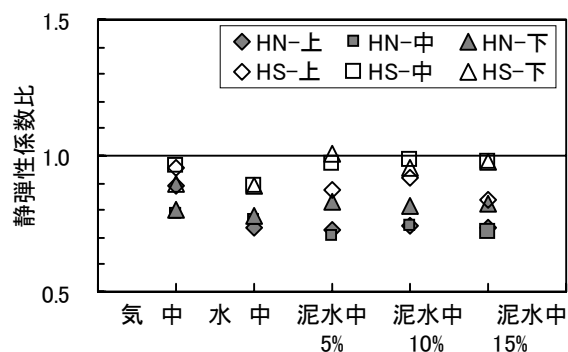
※ 異物混入のためデータなし

表－６ 実験結果一覧（標準供試体）

No	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)	単位体積質量 (t/m ³)	記事
1	61.4	30.4	2.31	HN-A
2	65.0	31.0	2.32	HN-0, 5
3	64.7	30.8	2.34	HN-10, 15
4	58.2	27.6	2.29	HS-A, 0, 5
5	60.3	27.3	2.31	HS-10, 15

採取位置の浅い供試体に着目すると、HNは標準供試体に比べて気中施工で10～20%程度、水中、泥水中施工で20～30%程度静弾性係数が低下した。一方、HSは標準供試体よりも概ね10%程度、

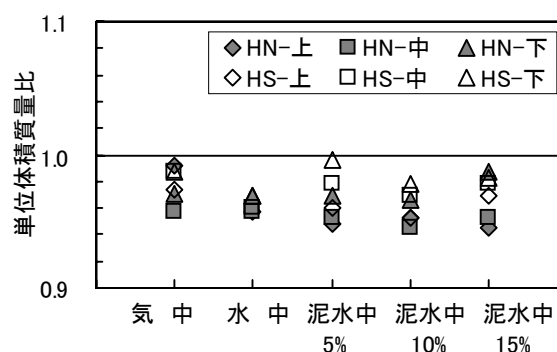
濃度の高い泥水中で施工した場合で最大15%程度静弾性係数が低下する結果となった。



図－４ 施工条件と静弾性係数比の関係

(4) 単位体積質量

図－５に、施工条件と単位体積質量比の関係を示す。単位体積質量比とは、採取供試体の単位体積質量を標準供試体の単位体積質量で除したものである。各施工条件ごとの平均の単位体積質量比は、HN の場合は 0.95～0.97, HS の場合は 0.97～0.98 であった。単位体積質量が低下した場合、一般にはコンクリートが粗になっていると考えられる。この影響により圧縮強度および静弾性係数が低下するものと考えられるが、HS は HN に比べて粘性が高くコンクリートが粗になりにくいため、影響が小さくなっていると考えられる。



図－５ 施工条件と単位体積質量比の関係

3. せん断耐力

3.1 実験の目的

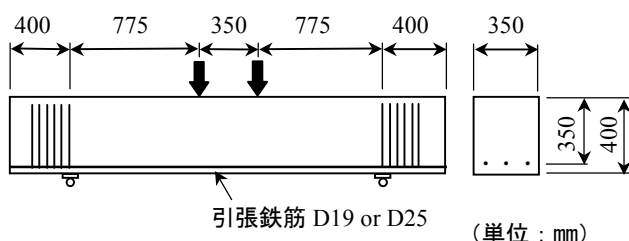
高強度コンクリートを用いた場所打ち RC 杭の、施工条件がせん断耐力に及ぼす影響を把握するため、梁試験体を用いた載荷試験を行った。

3.2 実験の概要

試験体の形状を図－6に、試験体施工条件を表－7に示す。いずれの試験体もせん断補強鉄筋は配置していない。なお、引張鉄筋は、HN-S1～S5 および HS-S1～S5 は D19 (USD685) を 3 本、HS-S6～S9 は D25 (SD390) を 4 本用いた。

試験体の製作は、場所打ち RC 杭の施工を模擬して試験体を鉛直方向に立てて、図－1に示す方法でコンクリートを打ち込んだ。なお、コンクリートおよびベントナイトは2の実験と同じ材料を用いた。載荷は2点対称載荷で静的単調載荷とした。計測項目は、荷重、変位、鉄筋およびコンクリートのひずみである。

⇒ コンクリートの打設方向



図－6 試験体の形状

表－7 試験体の施工条件

試験体	施工条件
HN-S1 , HS-S1 , HS-S6	気中
HN-S2 , HS-S2	水中
HN-S3, HS-S3 , HS-S7	泥水中 (濃度 5%)
HN-S4 , HS-S4 , HS-S8	泥水中 (濃度 10%)
HN-S5 , HS-S5 , HS-S9	泥水中 (濃度 15%)

3.3 実験結果と考察

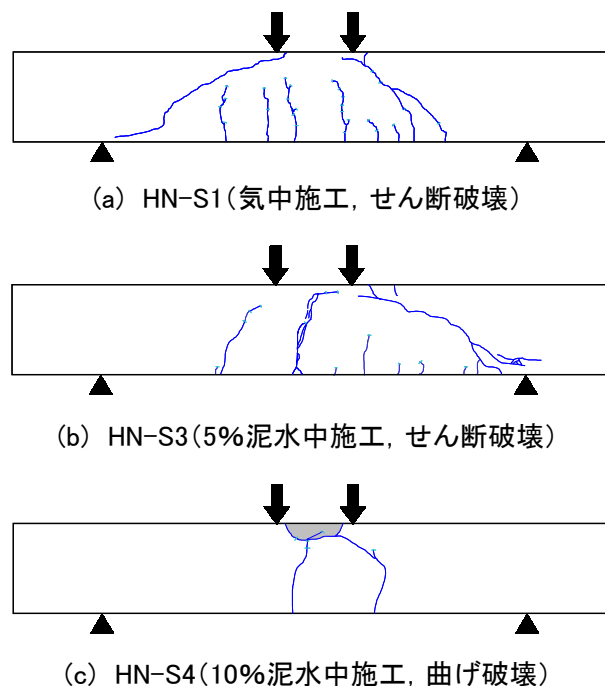
(1) 破壊性状

HN-S1, HN-S3 および HS-S4 の実験終了時のひび割れ状況を図－7に示す。各試験体とも、まずスパン中央付近に曲げひび割れが発生し、その後、気中施工および水中施工の試験体は、図－7 (a) のように曲げひび割れ本数が増加し発達したが、泥水中施工の試験体は、図－7 (b) のように比較的少ないままであった。これは、鉄筋の周りにベントナイトが付着し、鉄筋とコンクリートの付着が低下したためと考えられる。

表－8 の破壊形態にせん断と記した試験体は、

せん断スパンに斜めひび割れが発生し、大きく荷重が低下した。斜めひび割れ発生時の荷重 P_I を表－8に示す。HN-S3, HN-S5 は、斜めひび割れの発生と同時に破壊したが、それ以外の試験体は、一旦荷重低下後再び荷重が増加し、斜めひび割れが急激に大きく開き破壊に至った。図－8に HN-S1 の荷重－変位関係を示す。なお、HS-S9 は斜めひび割れ発生時 ($P_I=270\text{kN}$) の荷重低下はなく、 $P=406\text{kN}$ で斜めひび割れが大きく進展して一旦荷重が低下した。

また、表－8 で破壊形態を曲げと記した試験体は、図－7 (c) に示すように数本の曲げひび割れ発生後ひび割れ本数が増加せず、その後引張鉄筋が降伏し、圧縮側のコンクリートが圧壊して破壊に至った。図－9に HS-S4 の荷重－変位関係を示す。曲げ破壊した試験体を解体したところ、鉄筋にベントナイトが多量に付着しており、コンクリートとの付着切れが生じひび割れが集中したものと考えられる。なお、HN と HS のひび割れ性状に大きな差異は見られなかった。



図－7 実験終了時のひび割れ性状

(2) せん断耐力の検討

せん断破壊した試験体の一部は、斜めひび割れ発生後にディープビームと同様のアーチ的な

表－８ 実験結果およびせん断耐力計算値

	施工条件	破壊 形態	f'_c (N/mm ²)	P_l (kN)	P_{max} (kN)	P_{cal1} (kN)	P_{cal2} (kN)	P_l/P_{cal1}	P_l/P_{cal2}
HN-S1	気中	せん断	59.9	314	320	333	307	0.94	1.02
HN-S2	水中	せん断	57.7	321	411	329	307	0.98	1.05
HN-S3	泥水中 5%	せん断	57.9	299	299	329	307	0.91	0.98
HN-S4	泥水中 10%	曲げ	57.9	—	570	—	—	—	—
HN-S5	泥水中 15%	せん断	58.0	279	279	330	307	0.85	0.91
HS-S1	気中	せん断	58.8	283	312	331	307	0.85	0.92
HS-S2	水中	せん断	60.2	274	296	334	307	0.85	0.89
HS-S3	泥水中 5%	曲げ	64.1	—	568	—	—	—	—
HS-S4	泥水中 10%	曲げ	71.0	—	553	—	—	—	—
HS-S5	泥水中 15%	曲げ	71.6	—	574	—	—	—	—
HS-S6	気中	せん断	65.7	383	774	457	408	0.84	0.94
HS-S7	泥水中 5%	せん断	66.7	345	623	460	408	0.75	0.85
HS-S8	泥水中 10%	せん断	66.2	309	468	458	408	0.67	0.76
HS-S9	泥水中 15%	せん断	70.0	(270)	747	467	408	(0.58)	(0.66)

※ f'_c : 試験体からの採取したコアの圧縮強度, HS-S9 は斜めひび割れ発生時(P_l)に荷重低下しなかった

耐荷機構に移行し, さらに耐力が上昇したものと考えられる。本試験体のせん断スパン比 $a/d = 2.2$ は, 実構造物の杭頭部の曲げモーメント分布を考慮して設定したが, アーチ的な耐荷機構が形成されるか否かの境界付近にあると考えられる。そこで, 斜めひび割れ発生後の耐力上昇は不確定な要素が大きいと考え, P_l をせん断耐力の実験値として検討することとした。

各試験体間で比較できるように P_l を f'_c の $1/3$ 乗で補正し, $P_l/f'_c^{1/3}$ の気中施工の場合に対する比と施工条件の関係を図－10 に示す。HN, HS とも気中施工よりも泥水中施工の方が, せん断耐力が低下する傾向が見られ, HS の方がやや低下割合が大きい。なお, HS-S9 は P_l で荷重低下がなかったため, 図中には示していない。せん断耐力は, 気中施工に比べ, 比較的濃度の高い泥水中施工では 80% 程度に低下した。

次に, 式(1)に示す既往のせん断耐力算定式¹⁾を用いてせん断耐力時の荷重 P_{cal} ($=V_{cal} \times 2$) を求め, 実験結果の評価を試みた。

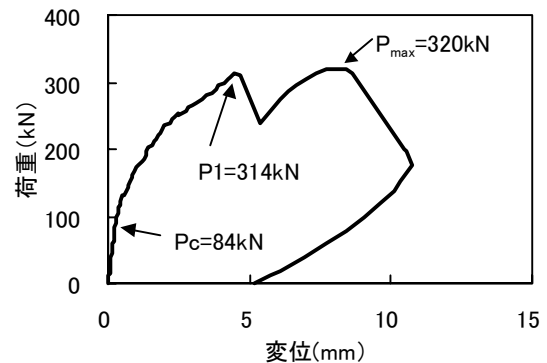
$$V_{cal} = 0.76(a/d)^{-1.166} \cdot f'_c^{1/3} \cdot \beta_d \cdot \beta_p \cdot b \cdot d \quad (1)$$

$$\beta_d = (1000/d)^{1/4}$$

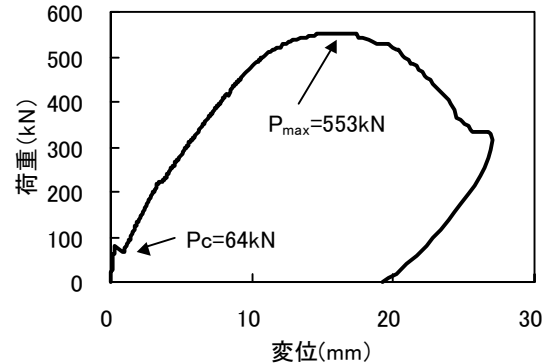
$$\beta_p = (100p_c)^{1/3}$$

$$p_c = A_s / (b \cdot d)$$

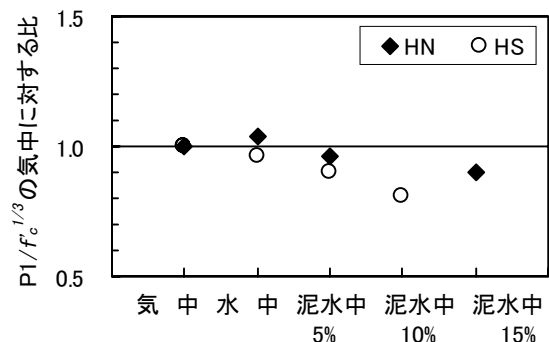
ここに, V_{cal} : せん断耐力 (N), a : せん断スパン ($=775\text{mm}$), d : 有効高さ ($=350\text{mm}$)



図－８ 荷重－変位関係 (HN-S1)



図－９ 荷重－変位関係 (HN-S4)



図－10 施工条件とせん断耐力の関係

b : 試験体幅 (=350mm), f'_c : コンクリート圧縮強度 (N/mm²), A_s : 引張側鋼材の断面積 (mm²)

f'_c を採取コアの圧縮強度とした場合 ($Pcal1$) および $f'_c \leq 47\text{N/mm}^2$ とした場合 ($Pcal2$) を算定し、計算値を表-6に、施工条件と $P1/Pcal1$, $P1/Pcal2$ の関係を図-11, 12に示す。なお、 $Pcal2$ はコンクリート標準示方書²⁾のせん断耐力算定式で $f_{vcd} = 0.20f'_{cd}{}^{1/3} \leq 0.72$ と定められているのを参考に、 f'_c の上限を仮定したものである。

HN の場合、気中、水中施工では、 $Pcal1$ は若干過大に、 $Pcal2$ は実験値を精度よく評価できる結果となった。泥水中施工では、ベントナイト濃度が高いほどせん断耐力は計算値よりも小さくなった。HS の場合は、気中、水中施工において、 $Pcal1$, $Pcal2$ とともに実験結果を若干過大に評価する結果となり、ベントナイト泥水中施工では、HS-S9を除くと、せん断耐力が最も小さいもので $Pcal2$ の 76%にとどまった。

以上より、HN, HS のいずれも施工条件によりせん断耐力が低下することが明らかになった。また、HS は、HN に比べてせん断耐力がやや小さいが、これは、HS は粗骨材の単位量が 10% 程度少なく、骨材のかみ合わせによる効果の低下等が影響しているものと考えられる。^{3),4)}

4. 結論

場所打ち杭の施工方法を模擬して製作した試験体を用いて載荷実験を行い、高強度コンクリートを適用した場合における、施工条件がコンクリートの圧縮強度やせん断耐力に及ぼす影響について検討したところ、次の結論が得られた。

- (1) 圧縮強度、静弾性係数は、標準供試体に比べて低下し、気中および水中施工の場合よりも泥水中施工の場合の方が低下の割合が大きい。また、自己充填性を有する高流動コンクリートを用いると、圧縮強度、静弾性係数の低下が比較的小さくなった。
- (2) 単純梁試験体を用いて載荷実験を行ったところ、気中、水中施工よりも泥水中施工の場合の方が、せん断耐力が小さくなった。

また、高流動コンクリートを用いても、せん断耐力の低下は改善されなかった。

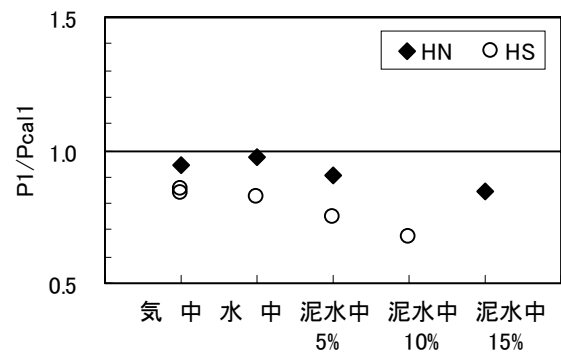


図-11 施工条件と $P1/Pcal1$ の関係

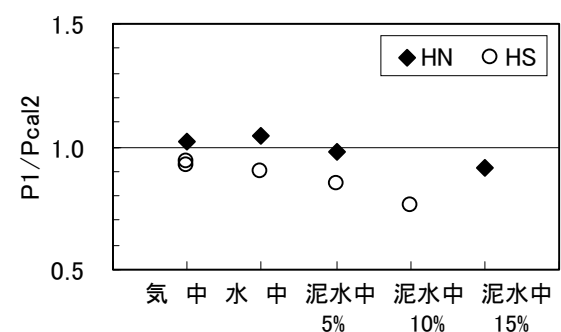


図-12 施工条件と $P1/Pcal2$ の関係

謝辞

実験の実施にあたりご協力いただいた、前田建設工業技術研究所の皆様に謝意を表します。

参考文献

- 1) 石橋忠良, 松田好史, 斉藤啓一: 少数本の杭を用いたフーチングのせん断設計について, 土木学会論文報告集, 第 337 号, pp.197-204, 1983.9
- 2) 土木学会: コンクリート標準示方書 設計編 平成 8 年度制定, 1996.3
- 3) 松元香保里, 藤田学: RC 梁のせん断強度に及ぼす粗骨材の影響に関する実験的研究, 土木学会第 56 回年次学術講演会, V-441, pp.882~883, 2001.10
- 4) 二羽淳一郎, Somnuk Tangtermsirikul: 高強度コンクリートおよび自己充填コンクリートの破壊力学特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.2, pp.117-122, 1997