

報告 高炉スラグ高含有セメントを用いた場所打ちコンクリート杭の品質

辻 大二郎^{*1}・村上 裕貴^{*2}・若井 修一^{*3}・小島 正朗^{*4}

要旨: 高炉スラグを高含有したセメント（高炉セメント C 種）を用いたコンクリートで、場所打ちコンクリート杭の実大施工試験を行った。改良した混和剤を用いることで、温度が高い暑中環境下の運搬でも、急激なスランブの低下はなく良好なフレッシュ性状を保持でき、トレミー管を用いた水中コンクリートの打込みを実施できることが確認できた。掘り出し後の検査で、杭体のかぶりコンクリートの充填性も良好であり、杭体の構造体強度は設定した設計基準強度を大きく上回っていた。杭体の下部ほど、密度が高く圧縮強度が増進する傾向があること、上部の余盛り部も十分な圧縮強度を発現していることなどが確認できた。

キーワード: CO₂削減, 高炉スラグ微粉末, 場所打ち杭, 実大施工試験, 施工性, 構造体コンクリート強度

1. はじめに

近年、地球環境保護の観点からエネルギーと二酸化炭素排出の発生量を抑制するための有効な手段として高炉セメントの利用拡大が期待されている。筆者らの研究グループは高炉スラグ微粉末の含有量が 40~45 重量%の高炉セメント B 種よりも更にクリンカーの使用量を減少させ、より高い CO₂削減効果を得ることを目的として高炉スラグ微粉末を 60%以上と多く含有するセメントを開発してきた¹⁾。

このような高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの実構造物への適用に向けた部位の候補として、場所打ち杭が挙げられる。杭は地中の水中もしくは高い湿度環境下にあることから、中性化が進行しにくく耐久性に及ぼす影響が小さいことや、通常の RC 構造物のように型枠脱型を考慮することが不要であるからである。また、高炉セメントを使用することで、塩化物イオン侵入抵抗性や酸劣化・硫酸塩劣化などの化学抵抗性が向上することから、海水、温泉地帯や下水道などの地下劣化環境に対して耐久性の向上が期待できる部位である。

一方、場所打ちコンクリート杭の施工は、安定液中にトレミー管を用いて打込み、バイブレータを用いた締固めは通常行わないため、施工不良の起こりやすい部位である。例えば、流動性が損なわれたコンクリートを打込むと、図-1のように杭頭かぶり部に充填不良が発生することがあり、杭体の品質を損なうこととなる。杭頭部は打込み中の上部からの圧力が小さくなることから水平方向への流動性が低下するため、このような不具合が生じやすい。特に、大口径場所打ち杭になると、かぶり部の充填不良が起こりやすく、この課題を解決するためにコンクリート材料および杭工法の両面からの検討が行わ

れた報告²⁾がある。

場所打ち杭の施工に際し、打込むコンクリートに求められる性能は、トレミー管の先から吹き上げられたコンクリートが鉄筋のかぶり部を充填する高い流動性および十分な分離抵抗性である。しかし、高炉スラグを多量に混合したコンクリートは、普通セメント用に使用されている一般の化学混和剤を使用すると、経時によるスランブの低下が生じやすい傾向があり³⁾、打込み中の流動性の低下があると先に示したような充填不良の不具合が発生しやすいことが危惧される。従って、実工事に使用するためには、施工実験により品質を確認することが必要であり、これまでも実大施工試験による検討した報告⁴⁾がなされている。

本報告では、高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの場所打ち杭への適用を目指し、実大杭の試験施工実験を実施することで、コンクリートおよび杭体の品質を確認することを目的とした。フレッシュコンクリートの経時変化と施工性、硬化した杭体の充填性と構造体コンクリート強度を検討した結果を報告する。

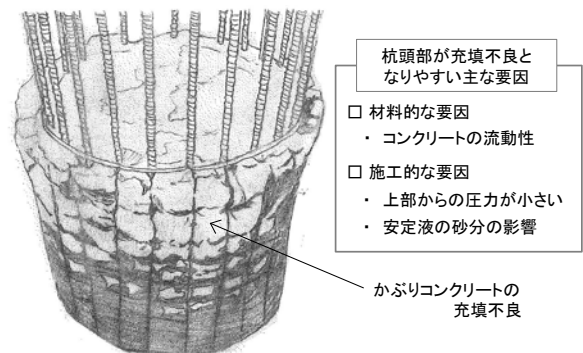


図-1 杭頭かぶり部の不具合の例

*1 (株) 竹中工務店 技術研究所 建設材料部 主任研究員 工修 (正会員)

*2 (株) 竹中工務店 広島支店 生産統括部 建築技術グループ 工修

*3 (株) 竹中工務店 技術研究所 地盤・基礎部 研究主任 工修

*4 (株) 竹中工務店 技術研究所 建設材料部 主任研究員 工修 (正会員)

2. 室内実験

2.1 実験計画

高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの調合式を作成する目的で、出荷するレディーミクストコンクリート工場にて室内試験を実施した。

使用材料を表-1に、セメントの品質を表-2に示す。高炉スラグ高含有セメントは高炉セメントC種のJIS規格に適合しており、スラグ含有率は約65%である。

化学混和剤は、高炉スラグ高含有セメント用に経時による流動性の低下を改善させた改良品を使用し、水セメント比によってAE減水剤と高性能減水剤を使い分けた。

コンクリート調合を表-3に示す。W/Cを3種類(50%, 40%, 25%)とし、W/C=50%と40%は目標スランブを21cm、目標空気量を4.5%とし、W/C=25%は目標スランブフローを60cm、目標空気量を2.0%とした。練り混ぜは60L強制二軸ミキサーを用いて練り量を40Lとした。

試験項目は、フレッシュコンクリートのスランブ(JIS A 1101)、空気量(JIS A 1128)、コンクリート温度(棒状温度計)、および硬化コンクリートの圧縮強度(JIS A 1108)を標準養生の材齢7, 28, 91日で実施した。

2.2 実験結果

フレッシュ試験結果および圧縮強度試験結果を表-4に示す。また、C/Wと標準養生材齢28日の圧縮強度の関係を図-2に示す。混和剤種類は異なるが、C/Wと圧縮強度には強い相関があり、直線式($Y=21.7X-0.40$:式①)で近似でき、目標とする圧縮強度に対する水セメント比が逆算で求められることが確認できた。

3. 実大杭施工実験

3.1 実験概要

(1) 実大杭の試験施工

場所打ち杭試験体と地盤の概要を図-3に示す。試験杭は軸部径1200mm、杭長8100mの直杭であり、杭天端レベルはGL-8.7mにあり、余盛りを600mm、かぶり厚さを100mmとした。また、水頭圧の小さい杭頭部におけるかぶりコンクリートの充填性を確認するために、主筋の空き寸法を、片側は100mm、もう反対側を150mmとして比較する計画とした。

試験地盤は、地表からGL-15m程度までが砂を主体とした沖積層、GL-15~17mが礫層、GL-17m以深が土丹層であり、地下水位はGL-1.9mであった。

試験施工フローを図-4に示す。打込み前日に表層ケーシングを設置し、安定液を用いて孔壁崩壊を防止しながら所定深度まで掘削後、底浚いバケットおよびスライムポンプにて一次スライム処理を行った。泥水置換完了後に、超音波側壁測定器により孔壁測定を行った。孔壁測定結果を図-5に示す。東西南北いずれの方角も精度

表-1 使用材料

区分	記号	名称	概要
水	W	上水道水	-
セメント	BC	高炉スラグ高含有セメント(高炉セメントC種)	密度: 2.98g/cm ³
細骨材	S	山砂(千葉県君津市吉野産)	表乾密度: 2.60g/cm ³ 吸水率: 1.56% 粗粒率: 2.57
粗骨材	G	砕石2005(北海道義朝産石灰砕石)	表乾密度: 2.70g/cm ³ 吸水率: 0.56% 粗粒率: 6.72
混和剤	Ad	AE減水剤・高機能タイプ(遅延形)	高炉スラグ高含有セメント用改良品(W/C=50, 40%)
	SP	高性能減水剤	高炉スラグ高含有セメント用改良品(W/C=25%)

表-2 セメント試験成績表

品質	試験成績	JIS R 5211(高炉セメントC種)
密度	g/cm ³	2.98
比表面積	cm ² /g	4260
凝結	水量 %	30.1
	始発 h-min	3-30
	終結 h-min	6-10
安定性	バット法	良
圧縮強さ(N/mm ²)	3日	19.4
	7日	33.3
	28日	54.2
化学成分(%)	酸化マグネシウム	4.43
	三酸化硫黄	3.56
	強熱減量	0.51
	塩化物イオン	0.008
備考	試験方法はJIS R 5201、JIS R 5202による	

表-3 コンクリート調合

種別	W/C	混和剤種類	目標値		s/a	単位量(kg/m ³)				
			SL(SLF)(cm)	Air(%)		W	BC	S	G	合計
室内	50	Ad	21	4.5	45.0	182	364	762	966	2274
	40	Ad	21	4.5	43.0	189	473	679	935	2275
	25	SP	(60)	2.0	35.1	185	841	477	889	2392

表-4 フレッシュ試験結果と圧縮強度試験結果

No.	W/C(%)	混和剤使用量(C×%)	フレッシュ試験結果			圧縮強度試験結果(N/mm ²)		
			SL(SLF)(cm)	Air(%)	CT(°C)	標準養生		
						7日	28日	91日
1	50	1.05	22.5	3.3	18	30.8	43.3	47.1
2	40	0.90	23.5	3.7	18	38.3	53.6	60.4
3	25	0.63	(66.5)	2.5	20	67.1	86.6	88.2

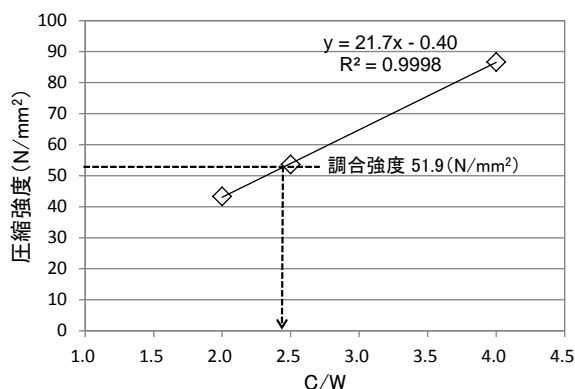


図-2 C/Wと圧縮強度の関係

よく掘削され、削孔鉛直精度 (1/100 以下)、杭径 1200mm を確保していることを確認した。なお、掘削に用いた安定液は、比重、粘性 (ファンネル粘性)、pH、砂分率の 4 項目の確認試験を行った。安定液の性状確認試験結果を表-5 に示す。試験結果はいずれの項目も管理値内であることを確認した。安定液の品質と性状は、コンクリートの流動性にも関わってくると考えられるため、確実に管理することが本実験では重要であった。

打込み日当日に、鉄筋かご (写真-1) およびトレミー管を挿入し、二次スライム処理を行った後、地表よりアジテータ車のシュートから直に荷卸し、トレミー管を用いて安定液中にコンクリートの打込みを行った。

打込みでは、プランジャーを用いてコンクリートの落下による分離を防止した。トラックアジテータ 3 台の合計 12m³ の平均打込み速度は 0.8m³/分であり、通常の普通ポルトランドセメントを用いた普通コンクリートと同様の打込み速度であったことから、施工性は問題なく良好であることが確認された。

(2) コンクリート

場所打ち杭に使用する高炉スラグ高含有コンクリートの目標性能は、設計基準強度 (以下、F_c) 45N/mm² とし、受入時のスランプ管理値を 21±1.5cm、空気量管理値を 4.5±1.5% とした。

調合管理強度は、本実験における構造物強度補正值 (₂₈S₉₁ 値) は 0 と設定し、F_c と同じ値とした。調合強度を定める上で、工場の出荷実績のないコンクリートであるため、標準偏差は工場の普通コンクリートの実績から $\sigma = 3.45$ (N/mm²) と設定し、調合管理強度 45N/mm² に 2 σ を足し、調合強度は 51.9 (N/mm²) と定めた。ここで、室内実験で得られた式①により、必要な水セメント比は 41.5% と試算された。実施工では、骨材の表面水率変動の影響による強度のばらつきを考慮して 40.0% とした。

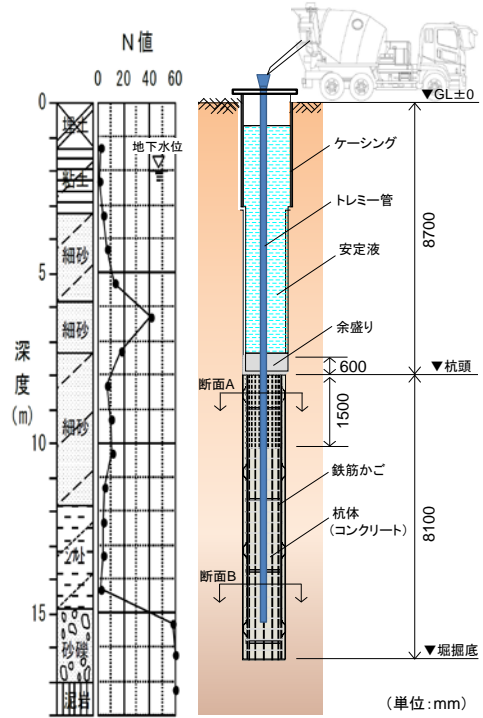


図-3 杭試験体と施工地盤の概要



写真-1 鉄筋かごの寸法確認状況

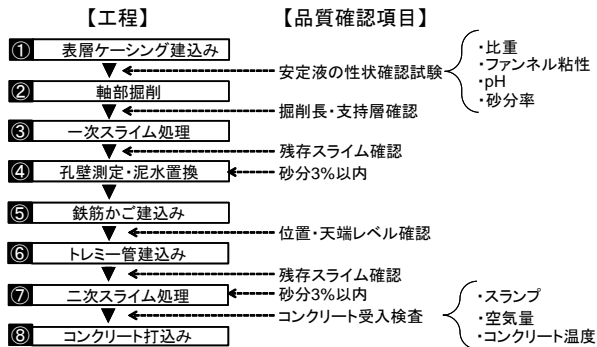


図-4 杭施工試験のフロー

表-5 安定液の性状確認試験結果

試験項目	比重	粘性	pH	砂分率
管理値	1.01~1.15	22~35秒	8.0~12.0	3.0%以下
計測値	1.03	23.4秒	10.2	0.5%以下
判定	OK	OK	OK	OK

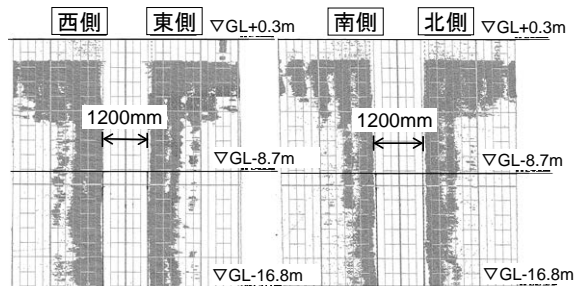


図-5 孔壁測定結果

コンクリート調合を表-6に示す。コンクリートの使用材料は表-1と同じ材料である。製造は、容量 3.0m³ 強制二軸練りミキサーを使用し、材料を全量投入して 35 秒練混ぜを行った。混和剤の添加量は C×1.6%と室内実験の添加量 C×0.90%より大幅に増加した。これは、練混ぜ時の温度が高いことが要因の一つと考えられた。単位水量測定結果は 202.2 kg/m³であり、計画値と比較して +13.2kg/m³と大きい値だった。

コンクリートの試験項目を表-7に示す。通常のフレッシュ試験の他に、出荷時に工場で採取した試料にて、塩化物量測定、ブリーディング試験を 20℃環境下の室内で実施した。また、2 台目のアジテータ車では受入検査の後、フレッシュ試験の経時変化を 30 分毎に測定した。圧縮強度試験は、受入検査で採取した標準養生供試体、簡易断熱養生供試体(図-6)、模擬柱部材(図-7)および杭体より採取した鉛直コア供試体で実施した。模擬柱部材の 91 日コア強度は JASS5 における構造体コンクリート強度であり、杭体コアの構造体コンクリート強度と比較する目的で採取した。

3.2 コンクリート試験結果

(1) フレッシュ試験

フレッシュ試験結果を表-8に、スランプと空気量の経時変化を図-8に示す。また、スランプ試験の状況を写真-2に示す。工場出荷から現場着までの時間は 60 分であった。温度が高い暑中環境下での運搬であったが、スランプの低下はほとんど生じず、経過時間 180 分まで管理値内(21±1.5cm)の流動性が保持された。混和剤の添加量が多いことや単位水量が大きかったことのほかに、高炉スラグ高含有セメント用に改良した混和剤を用いていることが流動性の保持を高める効果があったと考えられる。また、空気量も経過時間 180 分まで管理値内(4.5 ±1.5%)を満足した。120 分以降は空気量が徐々に増加しているが、試料を採取する際のアジテータ車の攪拌により空気を巻き込んだ影響と考えられる。

ブリーディング試験は採取後 270 分で生じなくなり、ブリーディング量は 0.06cm³/cm²と、JASS5 における基準値⁵⁾の 0.30cm³/cm²に比べて十分に小さかった。また、塩化物量は 0.02kg/m³で基準値⁶⁾0.30kg/m³以下であった。



写真-2 スランプ試験（受入時）

表-6 コンクリート調合

種別	W/C (%)	混和剤種類	目標値		s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
			SL (SLF) (cm)	Air (%)		W	BC	S	G	合計
実機	40	Ad	21	4.5	43.0	189	473	679	935	2275

表-7 試験項目

種別	試験項目	試験方法	採取場所		管理値/試験材齢
			出荷	受入	
フレッシュ試験	スランプ	JIS A 1101	○	○	21±1.5cm
	スランプロー	JIS A 1150	○	○	-
	空気量	JIS A 1128	○	○	4.5±1.5%
	コンクリート温度	JIS A 1156	○	○	35℃以下
	塩化物量	カンタブ	○	-	0.3kg/m ³ 以下
	ブリーディング量	JIS A 1123	○	-	0.3cm ³ /cm ² 以下
	単位水量測定	高周波加熱乾燥法	○	-	±15kg/m ³
圧縮強度	標準養生	JIS A 1108	-	○	材齢7, 28, 56, 91日
	簡易断熱養生	JASS 5T-606:2005	-	○	材齢28, 56日
	模擬柱部材コア	JASS 5T-605:2005	-	○	材齢28, 56, 91日
	杭体コア	JIS A 1107	-	○	材齢122日

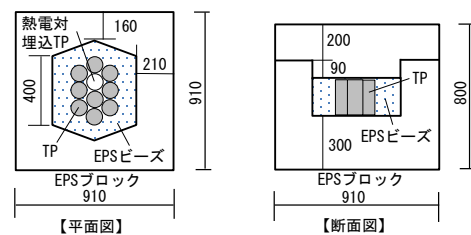


図-6 簡易断熱養生

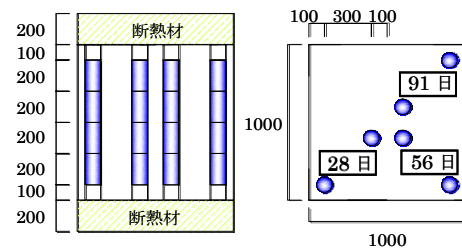


図-7 模擬柱部材

表-8 フレッシュ試験結果

試験項目	単位	経過時間					
		出荷時		受入時			
		0分	60分	90分	120分	150分	180分
外気温	(°C)	25	32	32	29	30	31
コンクリート温度	(°C)	26	27	28	29	30	31
スランプ	(cm)	22.0	21.5	22.0	21.5	21.0	20.0
スランプロー	(cm)	41.5	38.5	40.5	39.0	37.0	34.5
空気量	(%)	5.0	4.4	4.6	4.6	4.9	5.6
塩化物量	(kg/m ³)	0.02					
ブリーディング量	(cm ³ /cm ²)	0.06					
単位水量	(kg/m ³)	202.2					

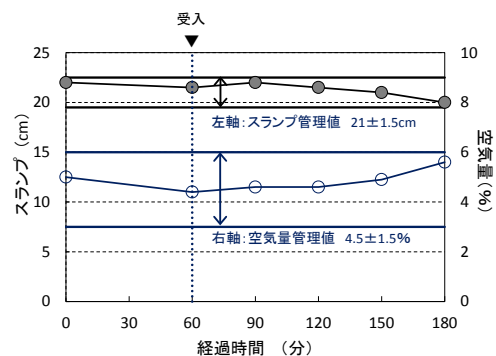


図-8 スランプと空気量の経時変化

(2) 圧縮強度

標準養生，簡易断熱養生，模擬柱部材コアおよび杭体コアの供試体の圧縮強度試験結果を表-9に示す。また材齢と圧縮強度の関係を図-9に示す。

標準養生強度は材齢28日から91日まで圧縮強度が増進する傾向を示したが，簡易断熱養生および模擬柱部材コアの圧縮強度は材齢28日以降の増進は僅かであった。

標準養生28日の圧縮強度は49.9N/mm²となり，調査強度51.9N/mm²とほぼ同値であった。若干小さいのは，単位水量が計画値よりも大きく，実際のW/Cが大きくなった影響であると考えられた。

また，模擬柱部材の材齢91日コアの構造体コンクリート強度は，標準養生28日の圧縮強度よりも大きく， $_{28}S_{91}$ 値は-2.3N/mm²でマイナスの値となり，0N/mm²と見なせた。

3.3 杭体の施工試験結果

(1) 充填性

高炉スラグ高含有コンクリートのスランブ保持性は良好であり，トレミー管を用いた打込みを問題なく実施できた。杭コンクリートの硬化後，周辺地盤の掘削を行い，水頭圧の最も小さい杭頭部について，かぶりコンクリートの充填状況を確認した。杭の掘出し状況を写真-3に，切断後の断面性状を写真-4に示す。杭頭部の主筋のあき寸法100mm，150mmのいずれもかぶり部分の隅々まで骨材が分離することなく密実に充填していた。また，杭の周辺長さ測定結果を表-10に示すが，周長より算出した平均杭径は設計値を上回り，かぶり部分が全て充填されていることが確認された。

(2) 杭体の構造体強度

実打設した杭から材齢122日で採取した鉛直コア供試体(3本×8セット+余盛り部2本)の構造体強度と密度の分布を図-10に示す。工事工程の関係で，材齢91日でコア抜きできなかったため，材齢122日となった。本来は材齢91日が構造体強度の定義であるが，本報告では122日の強度を置き換えている。杭体の構造体強度の平均値は63.3N/mm²であり， F_c (45N/mm²)を大きく上回る圧縮強度となった。また，強度分布は杭の鉛直下方ほど強度が大きい傾向を示した。図-11に，供試体の密度と圧縮強度の関係を示すが，杭体コアの供試体の密度が大きいほど圧縮強度が大きい傾向があった。杭体は鉛直方向に約8mの高さがあり，下方ほど上部からの水頭圧やコンクリート自重による圧密の影響を受けること，加圧下でのブリーディングによる水が抜けやすいことで打込まれた後の水セメント比が小さくなること，そして硬化時には地下水からの水分供給により十分に養生されることなどの種々の要因により，杭体コアの構造体コンクリート強度は標準養生供試体の強度より大きい傾向にあると

表-9 圧縮強度試験結果

供試体種類	圧縮強度 (N/mm ²)				S値 (N/mm ²)		
	7日	28日	56日	91日	$_{28}S_{56}$	$_{28}S_{91}$	
標準養生	34.6	49.9	52.2	55.2	-	-	
簡易断熱養生	-	47.7	48.8	※	1.1	-	
模擬柱部材コア	内側	-	50.3	50.5	51.4	-	-
	外側	-	50.3	53.5	53.0	-	-
	平均値	-	50.3	52.0	52.2	-2.1	-2.3
杭体コア	平均値63.3(材齢122日)				-	-	

※供試体紛失のため所定の材齢で試験を実施できなかった

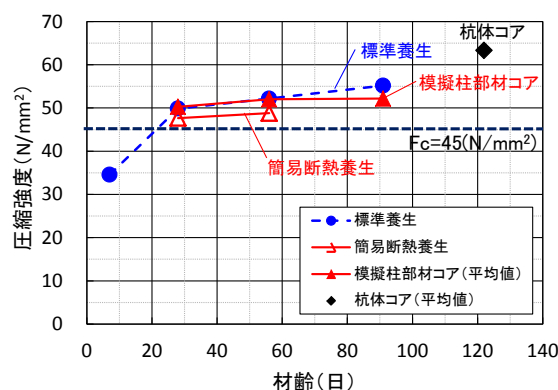


図-9 材齢と圧縮強度の関係



写真-3 掘出し状況

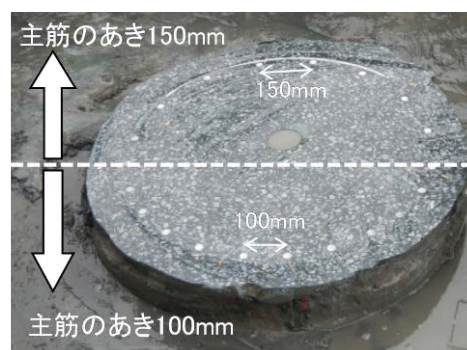


写真-4 切断後の断面

表-10 杭の周長測定結果

計測位置	計測値		設計値	判定
	外周長(m)	平均杭径(m)	杭径(m)	
杭頭±0m	4.10	1.31	1.20	OK
杭頭-0.5m	4.00	1.27	1.20	OK
杭頭-1.0m	4.00	1.27	1.20	OK

考えられる。模擬柱部材の構造体コンクリート強度と比較して、平均値は10N/mm²以上大きい結果となっていた。

(3) 余盛り部の構造体強度

余盛り部 600mm の上部から 120~320mm および 380~580mm で採取したコア供試体の圧縮強度はそれぞれ 47.1 および 47.5 (N/mm²) であり、Fc (45N/mm²) を上回り、健全なコンクリートであることが確認された。杭頭余盛り部の研り落としは通常 500~800mm の範囲で行われるが、今回の実験から高炉スラグ高含有コンクリートを用いても同様の範囲でよいと考えられる。

4. まとめ

高炉スラグを高含有したセメント(高炉セメントC種)を用いたコンクリートを実機製造し、場所打ち杭の実大施工試験を実施し、以下の知見を得たので報告する。

- (1) 一般的な普通コンクリートと同様に施工ができ、実工事へ使用が可能である。
- (2) 高炉スラグ高含有セメントに適した混和剤を使用することで、暑中下の経時によるコンクリートの流動性の低下はなく良好なフレッシュ性状を維持できた。
- (3) スランプ21cmのコンクリートの施工性は良好であり、安定液中の締固めのない打込みでも、材料分離はなく、杭のかぶり部の隅々まで密実に充填されていた。
- (4) 杭体コア供試体の構造体強度(材齢122日)の平均値は63.3N/mm²であり、設計基準強度45N/mm²を大きく上回った。
- (5) 杭体鉛直下方方向のコア供試体ほど、圧密の影響などにより密度が大きくなる傾向があり、実際の杭の構造体強度は、地上部の模擬柱部材による構造体コンクリート強度の推定値よりも大きい傾向がある。
- (6) 標準養生と模擬柱部材によって計算された構造体強度補正値 $_{28}S_{91}$ は、今回の実験ではマイナスの値となり、0N/mm²とみなせた。
- (7) 余盛り部600mmのコア強度は杭体コア強度の平均値よりは小さいものの、設計基準強度を上回る強度であり健全であることが確認された。

謝辞: 本実験に関わられた関係各位に紙面を借りてお礼申し上げます。また、実験に際しご協力を賜った(株)デイ・シイ、竹本油脂(株)、第一コンクリート(株)京浜工場の関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 米澤敏男, 坂井悦郎, 鯉淵清, 木之下光男, 釜野博臣: エネルギー・CO₂・ミニマム (ECM) セメント・コンクリートシステム, コンクリート工学, Vol.48,

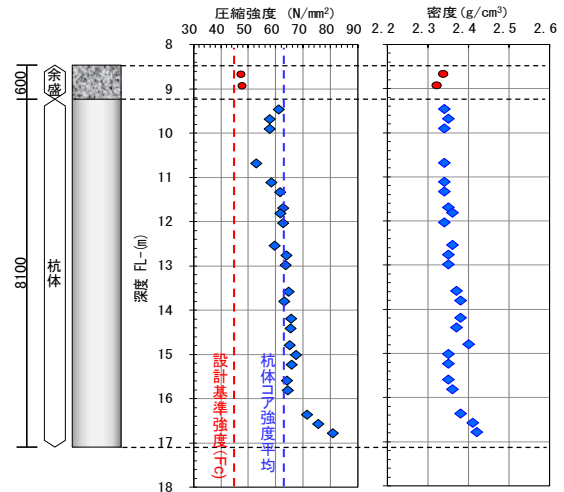


図-10 杭体の構造体強度及び密度の分布

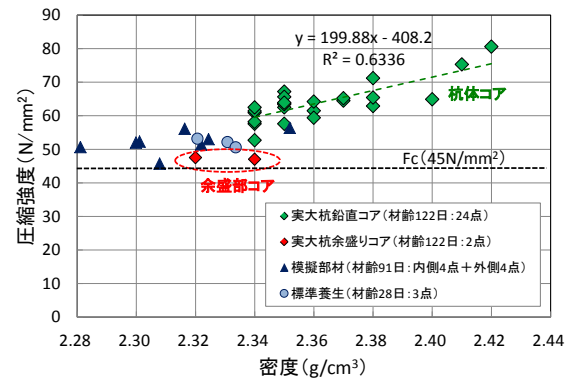


図-11 密度と圧縮強度の関係

No.9, pp.69-73, 2010

- 2) 池本宏文, 鈴木啓晋, 渡邊久智, 今野博史: 生まれかわる JR 千葉駅 駅改良工事での大口径場所打ち杭の施工, セメント・コンクリート, No.799, Sep.2013, pp.9-15.
- 3) 辻大二郎, 和地正浩, 三井健郎, 米澤敏男, 玉木伸二, 齊藤和秀, 木之下光男, 黒田萌: 高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの基礎物性 (その1) 分散剤種類がフレッシュ性状及び硬化性状に及ぼす影響, 日本建築学会学術講演梗概集(関東), pp.205-206, 2011.8
- 4) 全振煥, 依田和久, 坂田昇, 青木雅路: 高炉スラグ高含有セメントを用いた場所打ち杭コンクリートの実大施工実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, 2014, pp.130-135.
- 5) 建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 2009, 3, pp.190
- 6) 高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針 (案)・解説, 3章 3.2 コンクリートの品質, pp.84