# 報告　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

全　振煥[*1]・依田　和久[*2]・坂田　昇[*3]・青木　雅路[*4]

**要旨**：環境負荷低減技術の一環として，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における実機実験により呼び強度に対応する水セメント比を求め，実大施工実験を実施した。実験要因は，セメント種類，鉄筋量，打設時中断の有無とし，場所打ち杭試験体の施工性や出来形及び断面観察による充填性，コア強度の確認などについて検討した。その結果，高炉スラグ高含有セメント（HS）を用いたコンクリートは打設中断による充填性やコア強度も問題無く，従来の高炉セメントB種（BB）や普通ポルトランドセメント（N）のコンクリートと比較して同等以上の品質であることを確認した。

**キーワード**：高炉スラグ微粉末，場所打ち杭，杭コンクリート，充填性，コア強度，着色材，打ち重ね

## 1. はじめに

ポルトランドセメントは，製造時に大量の$CO_2$を排出しており，環境負荷への影響は大きい。筆者らは$CO_2$削減を目的として高炉スラグ微粉末を 65%程度含むセメント（以下HS）を用いたコンクリートの用途開発[1),2)]を行っている。この用途の一つとして，高炉セメントB種（以下 BB）が多く使用されている場所打ち杭が挙げられる。場所打ち杭のコンクリートは，中性化の進行の懸念や，型枠脱型時の初期強度の確保への懸念について考慮する必要がないことなどからHS に適していると言える。一方，場所打ち杭の工事では，地盤中の止水や掘削壁の崩れ防止のために安定液を使用しているが，セメントとの化学反応，または鉄筋などの障害物によりコンクリートの流動性が低下する傾向がある[3),4)]。場所打ち杭の品質を確保するためには，安定液中に打設するコンクリートの流動性や充填性の検討が必要である。また，杭コンクリートは連続的に打設するのが望ましいが，生コン車の運搬遅延や施工時のトラブルによる打設中断が生じる場合も考慮し，打設中断による杭の品質への影響について検討する必要がある。本報告では，HS を用いたコンクリートを場所打ち杭への適用を目指し，室内実験による基礎的性質の検討結果[5)]をもとに，実機実験により呼び強度に対応する水セメント比（以下W/C）を求める調合設計を行い，実大施工実験を実施して施工性や出来形さらには断面観察による充填性とコア強度などについて検討した。

## 2. 杭コンクリートの目標性能

場所打ち杭用のコンクリートは，水中での打設となるため十分な流動性と材料分離抵抗性を有すること及び強度確保が課題として挙げられる。これらに関し，環境負荷低減の効果を上げるために単位セメント量を極力抑制した上で，材料分離抵抗性と強度確保を目指した。本報告の範囲における HS を用いた杭コンクリートの目標性能を以下に示す。

・材料分離抵抗性：BB を用いたコンクリート同等以上
・圧縮強度：構造体コンクリート強度 36N/mm$^2$ 以上

## 3. 実機実験

### 3.1 実験計画

実験要因と水準を**表－1** に示す。実験要因はセメント種類と W/C の違いとした。セメントは HS と比較用の BB の 2 種類とした。W/C において，HS コンクリートは設計基準強度（以下 Fc）36N/mm$^2$ を満足する調合を選定するために W/C58，48，45，38%の 4 水準とし，BB コンクリートは使用実績の多い呼び強度 36 に対応する W/C48%とした。使用材料は**表－2** に，コンクリートの調合は**表－3** に，試験項目及び方法は**表－4** に示す。コンクリートは，荷卸時を経時 30 分としスランプ 21±1.5cm，空気量 4.5±1.5%を満足するよう，練上り直後においてスランプ 23±1.5cm，空気量 5.0±1.5%を目標値とした。

### 3.2 実験結果及び考察

#### (1) フレッシュ性状

コンクリートの性状は分離もなく，良好であった。

**表－1　実験要因と水準**

| 要因 | 水準 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| セメント種類 | HS | | | | BB |
| W/C(%) | 58.0 | 48.0 | 44.7 | 38.0 | 48.0 |

*1 鹿島建設(株)　技術研究所　建築生産グループ　主任研究員　博士（工学）(正会員)
*2 鹿島建設(株)　技術研究所　建築生産グループ　上席研究員　博士（工学）(正会員)
*3 鹿島建設(株)　土木管理本部 土木技術部長　博士（工学）(正会員)
*4 (株)竹中工務店　技術研究所　地盤・基礎部　マネージャー　(正会員)

スランプと空気量試験の結果を**図－1** に示す。スランプは，練上りから経過時間とともに徐々に低下する傾向であったが，荷卸相当の経時 30 分において，目標値を満足した。空気量は，経時に伴う大きな変化がなく 4.0～5.5%の範囲で目標値を満足した。ブリーディング試験の結果を**図－2** に示す。ブリーディング量は全て 0.2cm$^3$/cm$^2$ 以下であり，目標値の 0.3cm$^3$/cm$^2$ 以下を満足した。また，E48 のブリーディング量は同一 W/C の B48 のものと同等であり，HS を用いたコンクリートのブリーディングにおける材料分離抵抗性は BB と同等であると言える [6)]。

(2) 圧縮強度特性

標準養生試験体の材齢と圧縮強度の関係を**図－3**に示す。圧縮強度は材齢の経過とともに増進しており，W/C が小さいほど高い値を示し，すべての調合において材齢 28日で Fc36N/mm$^2$を上回った。同一の W/C48%において E48の圧縮強度は，B48に比べ材齢56日までは0.8～7.4N/mm$^2$小さかったが，材齢91日では2.3N/mm$^2$と差が小さくなる傾向を示した。材齢28日標準養生強度と材齢91日簡易断熱養生強度の関係を**図－4**に示す。

表－2　コンクリートの使用材料

| 材料 | 記号 | 種類 | 産地・銘柄 | 密度(表乾)(g/cm$^3$) | 吸水率(%) | 粗粒率(実積率) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| セメント | BB | 高炉 | T 社 | 3.04 | － | － |
| | HS | 高炉 | T 社 | 2.98 | － | － |
| 細骨材※ | S1 | 山砂 | 千葉県市原市 | (2.59) | 1.61 | 2.05 |
| | S2 | 砕砂 | 東京都奥多摩町 | (2.65) | 1.12 | 3.00 |
| | S3 | | 埼玉県秩父郡 | (2.65) | 1.51 | 3.03 |
| 粗骨材 | G | 砕石 | 東京都奥多摩町 | (2.66) | 0.46 | (60.8%) |
| 水 | W | 地下水 | 東京都調布市 | 1.0 | － | － |
| 混和剤 | Ad1 | AE 減水剤 | KP(T 社) | 1.08 | － | － |
| | Ad2 | | EX(T 社) | 1.09 | － | － |

※混合比　S1:S2:S3＝35:30:35(wt%)

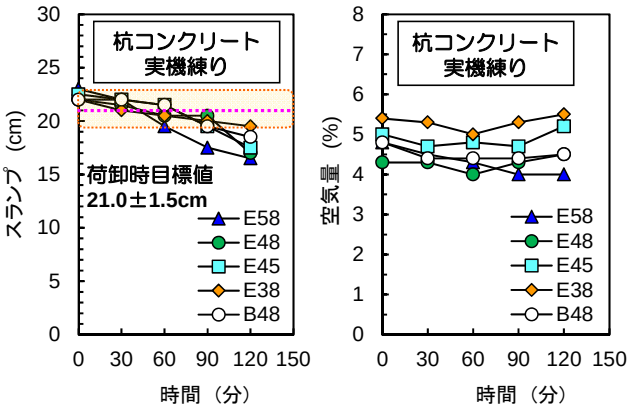
表－3　コンクリートの調合

| 記号 | セメント種類 | W/C (%) | s/a (%) | 単位量(kg/m$^3$) 水 | セメント | 細骨材 S1 | S2 | S3 | 粗骨材 G | 混和剤 Cx% Ad |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| E58 | HS | 58.0 | 49.9 | 182 | 314 | 307 | 263 | 306 | 888 | 0.80 |
| E48 | | 48.0 | 48.2 | 182 | 379 | 286 | 245 | 287 | 888 | 0.80 |
| E45 | | 44.7 | 47.2 | 182 | 407 | 278 | 239 | 278 | 888 | 0.80 |
| E38 | | 38.0 | 44.5 | 187 | 492 | 247 | 212 | 246 | 888 | 0.95 |
| B48 | BB | 48.0 | 46.6 | 195 | 407 | 269 | 230 | 269 | 888 | 0.90 |

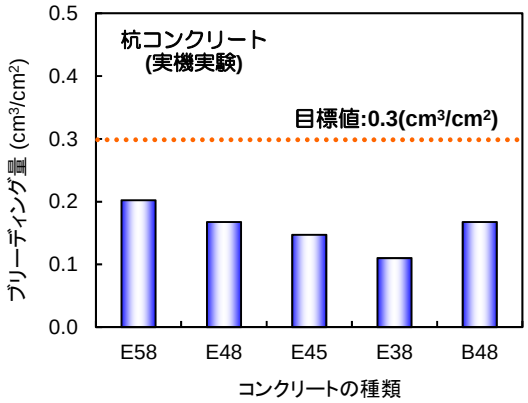
※HS は Ad1 を，BB は Ad2 を使用

表－4　試験項目と方法及び目標値

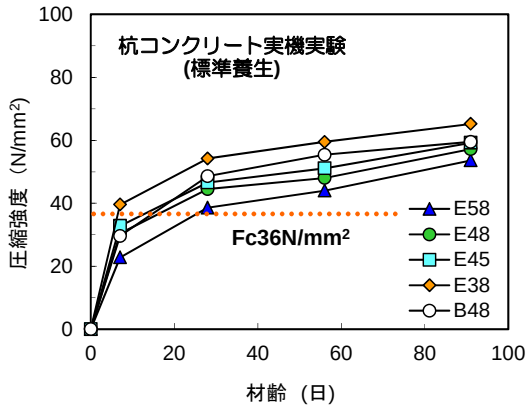
| 区分 | 試験項目 | 測定方法 | 目標値 | 備考 |
|---|---|---|---|---|
| フレッシュ | スランプ(cm) | JIS A 1101 | 23.0±1.5 | ・練上り直後と出荷後 30，60，90，120 分 |
| | 空気量(%) | JIS A 1128 | 5.0±1.5 | |
| | コンクリート温度(℃) | JIS A 1156 | 35 以下 | |
| | ブリーディング量 (cm$^3$/cm$^2$) | JIS A 1123 | 0.3 以下 | ・練上り直後 |
| 強度 | 標準養生(N/mm$^2$) | JIS A 1108 | 36 以上 | ・材齢 7，28，56，91 日 |
| | 簡易断熱養生 (N/mm$^2$) | | | ・材齢 91 日 |



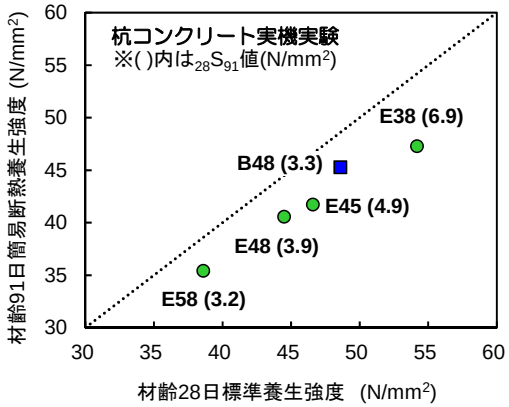

図－1　スランプと空気量試験の結果




図－2　ブリーディング試験の結果




図－3　材齢と圧縮強度の関係（標準養生）




図－4　標準養生強度と簡易断熱養生強度の関係

材齢 91 日簡易断熱養生強度はすべての調合において，材齢 28 日標準養生強度より低い値を示した。強度補正値（以下 mSn）を材齢 28 日標準養生強度と材齢 91 日簡易断熱養生強度の差とすると，HS コンクリートは水セメント 38%の E38 を除き，3.2～4.9N/mm$^2$ であり，BB を用いた B48 の 3.3N/mm$^2$ と同等であった。また，材齢 91 日簡易断熱養生強度を構造体強度とすると，E48 は 40.6N/mm$^2$ であった。この結果より，実大施工実験で使用する HS コンクリートの調合管理強度は，Fc36N/mm$^2$ に mSn の平均値 4N/mm$^2$ を加えて 40N/mm$^2$ とした。このことから発注呼び強度は 40 で，これに対応する生コンプラントでの W/C は 43.5%となった。

## 4. 実大施工実験

### 4.1 実験概要

#### (1) 実験計画

実大施工実験の要因と水準を**表－5** に示す。実験要因はセメント種類，設計基準強度，主筋量，打設中断の有無とした。セメントは HS と比較用の普通(以下 N)，BB の 3 種類とし，杭試験体は HS コンクリートが 4 本，N と BB コンクリートが各 1 本で，計 6 本を施工した。コンクリートは Fc36N/mm$^2$ をベースに，HS コンクリートの Fc40 N/mm$^2$ を追加した。杭の鉄筋は，HS コンクリートにおいて主筋量を 0.4 と 0.8%の 2 種類とし，鉄筋量がコンクリートの流動性に及ぼす影響を確認した。また，生コンの供給遅延や工事中のトラブル発生を想定した杭打設中断の有無を要因として，打設中断有のものは杭コンクリート打設を 1 層目と 2 層目に分割し，その間隔を 30 分程度あけて打設した。なお，N36T において 2 層目のコンクリートを着色して打設（N36TC）し，連続打設の中断による打ち重ね部の充填性を確認した。

#### (2) 使用材料と調合

コンクリートの使用材料は，**表－2** と同じ材料に加え，普通セメント（密度 3.16 g/cm$^3$）を使用した。コンクリートの調合を**表－6** に示す。HS コンクリートは実機実験の調合設計の結果より算出し，W/C43.5%と W/C38%とした。N36T において 2 層目のコンクリートの，着色は，生コン車にコンクリート用顔料（赤；Cx2.0%）を投入して 5 分間混練した後に打設した。

#### (3) 試験項目と方法

試験項目と方法及び目標値を**表－7** に示す。フレッシュ試験は，スランプと空気量，塩化物量を測定した。安定液の粘性確認は，安定液の劣化を判定する一般的な方法であるファンネル粘度計を用いて流下時間により評価した。杭試験体の出来形の確認は，杭試験体の周りを掘ってクレーンで引抜いた後に寸法を測定した。充填性の確認は，引抜いた杭試験体を 3 等分に輪切した後，縦切し，切断面を目視で観察した。さらに，打ち重ね部については，杭試験体 N36T の着色有無の境界部分からダイヤモンドカッターを用いて試料を切出し，所定の前処理後 SEM 観察により微細レベルの欠陥の有無を確認した。圧縮強度は，各調合にてφ100×200mm の試験体を作製し標準養生を行い，所定材齢（7，28，56，91 日）にて測定した。また，N36T における 2 層目の着色コンクリートについても圧縮強度試験体を作製し，上記と同様に所定材齢にて着色有無による強度の違いを比較した。

表－5　実験要因と水準

| 記号 | セメント種類 | 設計基準強度 (N/mm$^2$) | 主筋量 (%) | 打設中断有無 |
|---|---|---|---|---|
| E36R | HS | 36 | 0.8 | 有 |
| E36N | | 36 | 0.4 | 無 |
| E36T | | 36 | 0.4 | 有 |
| E40T | | 40 | 0.4 | 有 |
| N36T※ | N | 36 | 0.4 | 有 |
| B36T | BB | 36 | 0.4 | 有 |

※2 層目のコンクリートを着色して打設。

表－6　コンクリートの調合

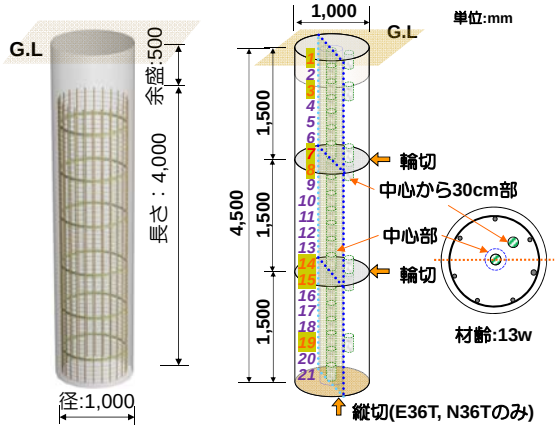
| 記号 | セメント種類 | W/C (%) | s/a (%) | 単位量(kg/m$^3$) 水 | セメント | 細骨材 | | | 粗骨材 | 混和剤 (Cx%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| E36R | HS | 43.5 | 47.2 | 182 | 418 | 275 | 236 | 275 | 888 | 0.9 |
| E36N | | | | | | | | | | |
| E36T | | | | | | | | | | |
| E40T | | 38.0 | 44.6 | 187 | 492 | 247 | 212 | 248 | 888 | 1.0 |
| N36T | N | 46.5 | 46.6 | 196 | 422 | 268 | 230 | 267 | 888 | 0.95 |
| B36T | BB | 45.5 | 45.8 | 197 | 433 | 260 | 223 | 259 | 888 | 0.85 |

※HS は Ad1 を，N と BB は Ad2 を使用

表－7　試験項目と方法及び目標値

| 区分 | 試験項目 | 測定方法 | 目標値※ | 備考 |
|---|---|---|---|---|
| フレッシュ | スランプ(cm) | JIS A 1101 | 21.0±1.5 | 出荷・荷卸時，着色前後 |
| | 空気量(%) | JIS A 1128 | 4.5±1.5 | |
| | 塩化物量(kg/m$^3$) | JASS5 T502 | 0.3 以下 | 出荷時 |
| 安定液 | 粘性(秒) | ファンネル粘度計 | 22~33[3] | 実験直前 |
| 施工性 | 出来形 | 実測 | － | 4 ヶ所の平均値 |
| | 断面観察(輪切) | 写真観察 | － | 縦切：E36R,N36T |
| | 打ち重ね観察 | SEM 観察 | － | N36T |
| 強度 | 標準養生 (N/mm$^2$) | JIS A 1108 | 36 以上 | 材齢 1,2,4,8,13w (N36T 着色後) |
| | コア強度(N/mm$^2$) | JASS5 T605 | | 材齢：13w |

※フレッシュ試験の目標値は荷卸し時を示す。




図－5　実大施工実験のコア採取位置

杭試験体のコア試験体は，**図－5** に示すように 3 等分に輪切したものから深さ方向に対し中心部と中心から 30cm 部（打ち重ね部と考えられる部分）にて採取し，材齢 91 日にて圧縮強度試験を実施した。

### 4.2 杭施工の方法

杭試験体は，アースドリル工法により地中に杭径 φ1m，長さ 4.5m（掘削長:5m，鉄筋天端 GL-0.3m，コンクリート天端 GL-0.5m）の 6 本を施工した。配筋量は**表－8** に示すように主筋 D25 を用いて主筋量 0.4%を 7 本，0.8%を 13 本とし，フープ筋は D13 とした。**図－6** に実大施工実験の流れを，**写真－1** に実大施工の様子とコア採取位置を示す。杭試験体は，G.L.より深さ約 5m を掘削し，安定液を投入して掘削孔壁を安定化した後，鉄筋カゴ（長さ:4.5m）を建込んで固定し，コンクリートを打設して作製した。安定液は，水に対してベントナイト 3%，CMC（カルボキシメチルセルローズ）0.2%を外割で投入し，十分攪拌して製造した。安定液の管理は，漏斗型粘度計であるファンネル粘度計を用いて施工実験直前に粘度を確認した（結果は 26.8～28.5 秒）。その後，トレミー管（φ0.0254m，長さ 3+2+1m）を挿入し，杭の底面から高さ 0.3m で固定した。コンクリートの打設は，フレッシュ性状を確認した後，トレミー管を通して自由落下により掘削孔の底面から高さ半分（約 2.3m）まで 1 層目を打設した。打設中断の無の条件は荷卸し試験後直ちに 2 層目のコンクリートを打設した。打設中断の有の条件は 1 層目コンクリートの打設後，30 分経過した時点でトレミー管 1m を除去し，トレミー管の先端が 1 層目のコンクリートに 1.5m 程度挿入した状態で，2 層目のコンクリートを打設した。その後，所定材齢 28 日まで地中に埋まった状態で養生を行った後，**写真－2** に示すように杭試験体の周囲を掘削し，水を加えながら杭の引抜きを実施し，所定材齢までブルーシートを巻いて 1 週間 2 回程度水を散布しながら養生を行った。その後，所定材齢にて 3 等分の輪切し，コア試験体を採取した。杭試験体 B36T は，礫層にコンクリートが流出して拡底したため引抜きができず，地盤に埋まった状態でコア抜きを実施した。

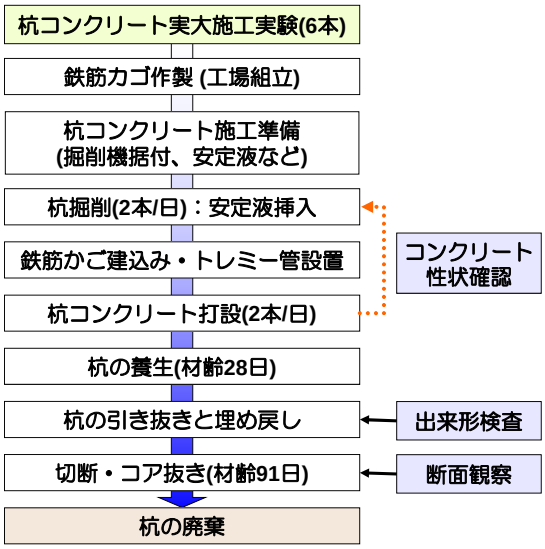
### 4.3 実験結果

#### (1) フレッシュ試験

フレッシュ試験のスランプの結果を**図－7** に示す。スランプは，出荷時と荷卸時，いずれも変化が少なく目標値を満足した。空気量は，変化がほとんどなく 4.0～5.5%の範囲で目標値を満足した。塩化物量は HS と BB コンクリートが 0.02kg/m$^3$，N コンクリートが 0.05 kg/m$^3$ を示し，目標値を満足した。

表－8　主筋量による算出結果

| 主筋量 (%) | 呼び名 | 杭断面積 (㎡) | 必要面積 (㎡) | 主筋本数 (本) | 計画間隔 (mm) |
|---|---|---|---|---|---|
| 0.4 | D25 | 0.785 | 0.00314 | 7.0 | 278.8 |
| 0.8 | | | 0.00628 | 13.0 | 142.6 |




図－6　実大施工実験の流れ

＜杭掘削＞　＜鉄筋ｶｺﾞ･ﾄﾚﾐｰ管の設置＞

＜フレッシュ試験＞　＜コンクリート打設＞

写真－1　実大施工実験の様子

＜杭抜きと表面洗浄＞

＜杭切断とコア抜き＞

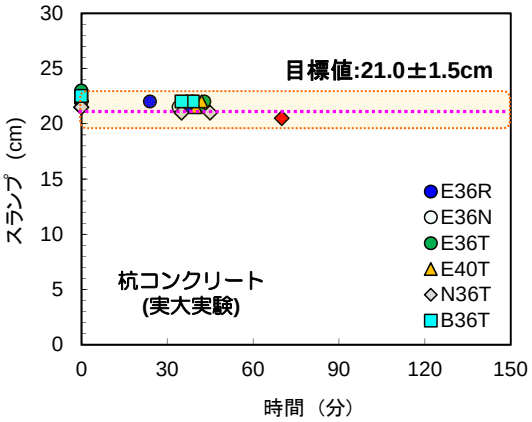
写真－2　杭抜きと切断及びコア抜きの状況

(2) 出来形と充填性

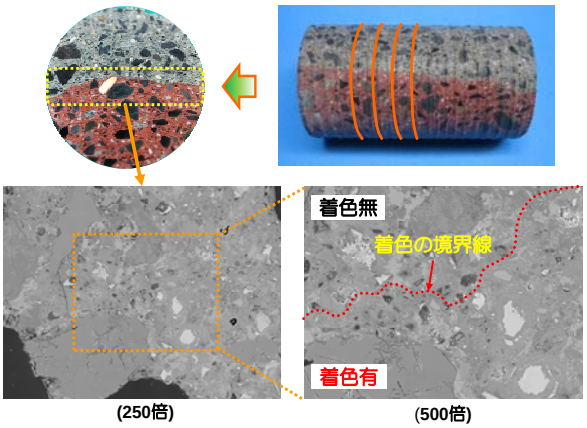
引抜きができなかった杭試験体 B36T を除き，他の杭試験体の出来形状況を図－8 に示す。その外観は，全体的に杭頭部から深さ方向に向けて太くなる拡底の形であったが，杭径φ1.12～1.78m，長さ 4.53～4.58m であり，いずれも施工計画である杭径φ1.0m，長さ 4.5m に近い寸法を確保し，ひび割れなどの欠損部は見当たらなかった。深さ方向への充填性は，E36T と N36T の杭試験体を縦切りして断面の目視観察により実施した。施工時に 30 分の打設中断を有する杭試験体 E36T と N36T の縦切りの断面状況を図－9 に示す。杭試験体 E36T は欠陥が見つからず，鉄筋の外側のかぶり部への充填性が良好であり，施工時に中断にも関わらず 1 層目と 2 層目の打ち重ね部の判別ができなかった。一方，杭試験体 N36 T は 2 層目のコンクリートを赤色で着色したため，二つの色で分けられ明確な色違いの境界部が生じ，1 層目と 2 層目のコンクリートの打ち重ね部の判別ができたが，ひび割れなどの欠陥がなく一体化していた。2 層目の着色コンクリートは，杭の底面まで至らず 1 層目のコンクリートを杭の外周へ押し広げながらトレミー管の周りに沿って充填され，1 層目のコンクリートに囲まれた状態として観察された。この観察結果より E36T も N36T と同様に充填されたと推察される。N36T の打ち重ね部である着色有無の境界部における SEM 観察した結果の一例を図－10 に示す。微細ひび割れなどの欠陥が無く緻密かつ健全であることが確認できた。以上の縦切り切断面による充填性の観察結果，本実験の範囲では杭施工時コンクリートの打設時に 30 分間の中断があっても，充填性には問題なく良好な施工品質が得られることが確認できた。

(3) 圧縮強度

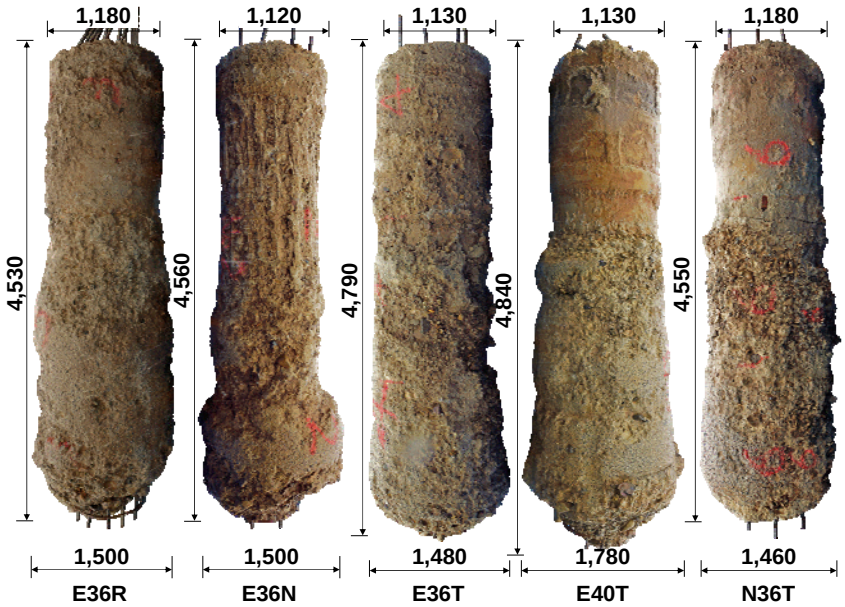
標準養生の圧縮強度の結果を図－11 に示す。圧縮強度は，すべて調合において材齢 28 日で Fc36N/mm$^2$ を大きく上回った。HS コンクリートの W/C43.5%の同一調合の圧縮強度は多少ばらつきがあったが，BB と N のコンクリートに比べて同等以上の値を示した。杭試験体の中心部と中心から 30cm 位置のコア強度の結果を図－12 に示す。コア強度は，コンクリートの自重による圧密の影響のため，中心部では全体的に深さ方向に向けて増加する



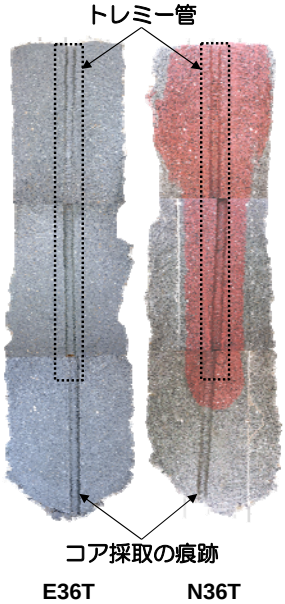

図－7　スランプ試験の結果




図－10　打ち重ね部の SEM 観察結果(N36T)




図－8　杭試験体の出来形状況




図－9　杭の縦切りの断面

傾向を示した。HS コンクリートの W/C43.5%の同一調合のコア強度はばらつきがあったが，BB と N のコンクリートより同等以上の値を示した。中心から 30cm 部のコア強度も Fc36N/mm$^2$ を大きく上回った。また，いずれも打設中断によるコア強度への影響は認められなかった。コア強度の mSn 値の結果を**図－13** に示す。Fc36 N/mm$^2$ の HS コンクリートの平均値は－3.7N/mm$^2$ であり，BB と N のコンクリートに比べ遜色がないことが確認できた。E40T については高い mSn 値となったが，JASS 5 の水中コンクリートの標準的な mSn 値である 3.0N/mm$^2$ と同等となった。

## 5. まとめ

HS を用いた杭コンクリートの実機実験及び実大施工実験について以下の知見が得られた。

(1) 実機実験において，コンクリートのスランプ，空気量，ブリーディング量などフレッシュ時の性状は目標値を満足し，十分な材料分離抵抗性を有した。また，圧縮強度の補正値 mSn は，BB セメントを用いたものと同等であり，Fc36 N/mm$^2$ を十分満足できる調合設計が可能である。

(2) 実大施工実験におけるフレッシュ性状は目標値を満足し，杭コンクリートの流動性やトレミー管先端の挿入深さを確保すれば，打ち重ね部の健全性が確保でき，HS コンクリートの施工品質は良好であると判断される。

(3) 杭実大試験体のコア圧縮強度は所要の Fc36N/mm$^2$ を大きく上回り，HS コンクリートの強度発現は BB と N のコンクリートに比べ遜色がないことが確認できた。

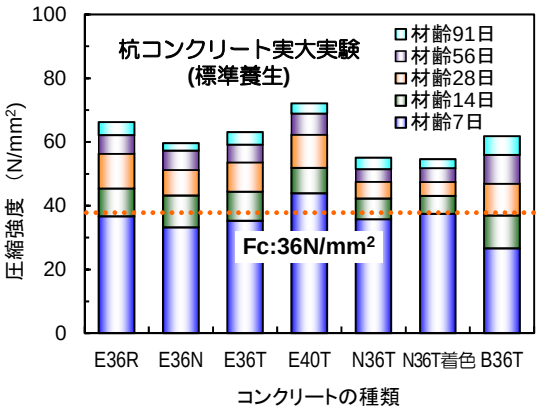

## 謝辞

本研究は新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の助成による「省エネルギー革新技術開発事業/実用化開発/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の研究開発」の一環として実施した。共同研究者である東京工業大学坂井悦郎教授をはじめ，竹中工務店，鹿島建設，デイ・シイ，日鉄住金高炉セメント，太平洋セメント，日鉄住金セメントおよび竹本油脂の関係各位や実大施工実験に多大なご協力いただいた日本基礎技術の永山氏に紙面を借りてお礼申し上げます。

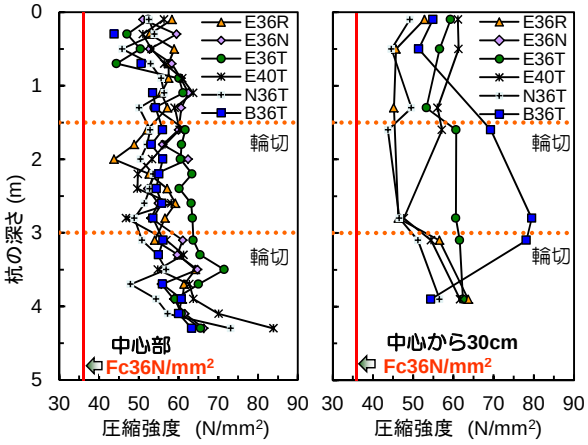

## 参考文献


1) 米沢敏男ほか：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，No.9，pp.69-73，2010

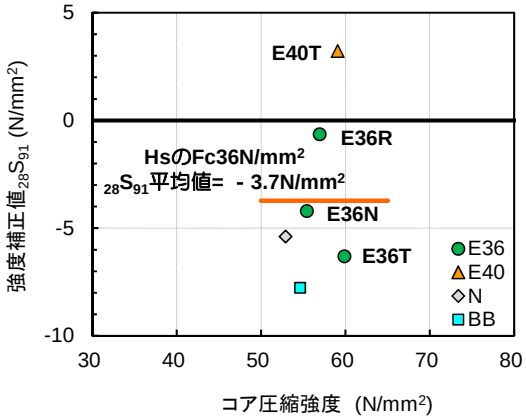
2) 辻大二郎ほか：高炉スラグ高含有セメントを用いた高強度コンクリートの基礎物性，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.145-150，2013


図－11　圧縮強度の結果(標準養生)




図－12　コア強度の結果(材齢 91 日)




図－13　コア強度の mSn 値


3) 平岡成明：地中連続壁の安定液，山海堂，pp.27-53，1991

4) (社)日本基礎建設協会：場所打ちコンクリートと杭の施工と管理，2009

5) 依田和久ほか：高炉スラグ高含有セメントを用いた場所打ち杭用コンクリートの基礎的性質，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.223-228，2013

6) 依田 和久，全振煥ほか：高炉スラグ高含有セメントを用いた場所打ち杭用コンクリートの実用化（その 1 と 2)，日本建築学会学術講演梗概集（北海道)，pp.181-184，201