

# 深層混合処理工法による貯炭サイロ基礎の設計と施工

白 戸 伸 明\*  
松 浦 正 典\*\*  
工 藤 雄 一\*\*\*

**概要** 北海道電力(株)苫東厚真発電所4号機増設工事に伴う貯炭サイロの基礎工法に、セメントにフライアッシュを混合した深層混合処理工法を採用した。本配合による深層混合処理工法の重量構造物基礎への採用は全国で初めての試みである。また、本施工は、改良地盤に硬質地盤の介在、運転稼働中の発電設備の近接施工等の特長があり、水吐出併用貫入および情報化施工を実施した。本稿は、貯炭サイロの基礎に採用した平均改良長20.3m、改良体積約40,700m<sup>3</sup>の深層混合処理工法の設計と施工について報告する。

**キーワード**：深層混合処理，フライアッシュ，攪拌混合度，硬質地盤，近接施工，情報化施工

## 1. はじめに

北海道電力(株)苫東厚真発電所4号機(最大出力70万kW、微粉炭燃焼)増設工事は、平成11年3月に工事を開始し、平成14年6月の運転開始を目指して、現在、鋭意建設工事中である。<sup>1)</sup>

当発電所の主要構造物の基礎工法は、深度40~50mの砂礫層を支持層とした杭工法を標準としているが、貯炭サイロ地点には深度23m付近に中間支持層があることから、この層を支持層としたセメントにフライアッシュを混合した深層混合処理工法(以下FCDM(Fly-ash Cement Deep Mixing)と呼ぶ)を採用した。<sup>2)3)4)</sup>FCDMの重量構造物基礎への採用は全国で初めての試みである。

本施工は、改良地盤に硬質地盤の介在、運転稼働中の発電設備との離隔が6.5mの近接施工等の特長があり、水吐出併用貫入および情報化施工を実施した。

深層混合処理の支持層としている中間支持層以深に圧密沈下対象層があり、運炭コンベア設備据付け以降の石炭載荷後に沈下を生じるが、この残留沈下については、貯炭サイロと運炭コンベア接続部の機械構造で対処することとした。沈下の許容については、貯炭サイロの本体工事を担当する土木部門と運炭コンベア工事を担当する機械部門との共同検討により実現したものである。

## 2. 貯炭サイロの概要

貯炭サイロは、内径22.0m、筒体高さ30.6mのプレストレスト鉄筋コンクリート構造で、容量7000トンの石炭サイロを3基建設する。



白戸 伸明

松浦 正典

工藤 雄一

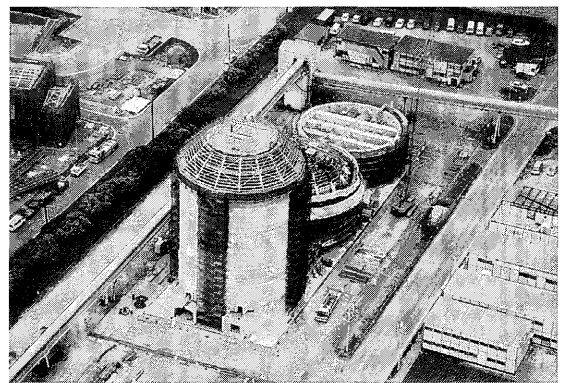


写真-1 貯炭サイロ全景(筒体工事中)

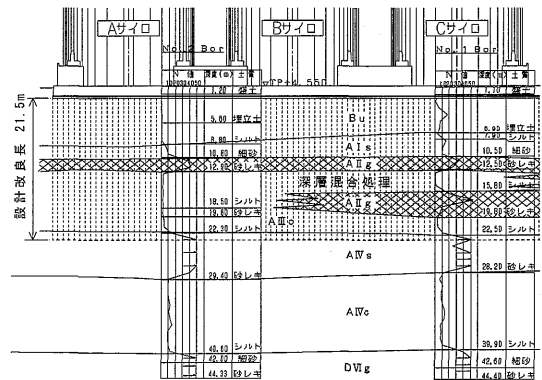


図-1 地質縦断面図

基礎スラブは、幅27.4m×長さ89.7mで、3基一体型の長方形スラブである。

石炭はサイロ頂部のコンベア1条から受入れ、サイロ下部のコンベア2条から払出す方式である。

## 3. 地質概要

施工地点は埋立地で、深度40m以浅の地質は、第四紀沖積層の氾濫原堆積物と海成堆積物からなり、その土層構成は礫、砂および粘土が錯綜した状態にあるが、深度23m付近にはN値50の砂礫層(中間支持層)があり、それ以深にはN値10程度のシルト層、深度40m以深にはN値50以上の第四紀洪積層が分布する。地質縦断面図を図-1に示す。

\*北海道電力(株) 苫東厚真火力発電所建設所 土木課 総括主任 会員 n-shirato@epmail.hepco.co.jp  
 \*\*北海道電力(株) 苫東厚真火力発電所建設所 土木課 会員 m-matsu@epmail.hepco.co.jp  
 \*\*\*北電興業(株) 技術部 会員

## 4. 設 計

### 4.1 適用基準

各種諸基準を検討し、構造物の適合性および設計方法から「改良地盤の設計および品質管理指針—セメント固化材を用いた深層、浅層混合処理工法」日本建築センター(1997年)を採用した。

### 4.2 設 計

改良体の径は1.0m×2軸、改良深さはGL-1.6~23.1mとし、改良形式は非ラップ配置の接円ブロック方式、改良率は78.5%、設計基準強度 $F_c$ は1765kN/m<sup>2</sup>とした。

深層混合処理基礎の検討結果を表-1に示す。

表-1 深層混合処理基礎の検討結果

検 討 項 目	常時応力度		地震時応力度			
	許 容	設 計	許 容	設 計		
鉛 直 支持力	改良地盤支持力 kN/m <sup>2</sup>	864	220	1884	372	
	改良体鉛直応力 %	588	270	1176	459	
水 平 支持力	曲げ応力	圧縮 %	—	—	1176	643
		引張 %	—	—	196	-306
	せん断応力 %	—	—	373	70	
	杭頭変位 cm	—	—	—	0.26	
滑 動 すべり	F S	—	—	1.20	2.37	
	F S	—	1.20	1.35	—	
沈 下	改良体(弾性) cm	—	1.8	—	—	
	地 盤(圧密) %	—	10.3	—	—	

### 4.3 配合設計

設計要求強度の設計材令は91日、変動係数は0.45を採用した。セメント量と現場試験ボーリングコアの平均一軸圧縮強さの関係を図-2に示すが、配合量の設計対象層是最弱層の粘性土層とし、単位セメント量を算出した。

(1) 設計要求強度

$$F_c = (1 - m \cdot V_{quf}) \bar{q}_{uf}$$

$F_c$ : 設計基準強度 (1765kN/m<sup>2</sup>)

$m$ :  $\bar{q}_{uf}$ ,  $V_{quf}$  を関係づける係数 (1.3)

$V_{quf}$ :  $q_{uf}$  の変動係数 (0.45)

$\bar{q}_{uf}$ : 現場採取コアの平均一軸圧縮強さ (kN/m<sup>2</sup>)

$$\therefore \bar{q}_{uf} = F_c / (1 - m \cdot V_{quf})$$

$$= 1765 / (1 - 1.3 \times 0.45) = 4253 \text{ kN/m}^2$$

(2) 単位セメント量(図-2の近似式より算出)

$$y = 35x - 1060, \quad x = (4253 + 1060) / 35 = 152 \div 155 \text{ kg/m}^3$$

$x$ : 単位セメント量 (kg/m<sup>3</sup>),  $y$ : 一軸圧縮強さ (kN/m<sup>2</sup>)

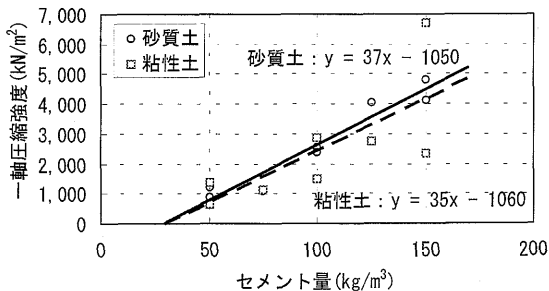


図-2 セメント量と一軸圧縮強さの関係

## 5. 施 工

### 5.1 概 要

深層混合処理の施工実績数量は1275セット、平均改良長20.3m、改良体積は約40,700m<sup>3</sup>で、施工期間は平成11年3月~9月、後工程の制約から深層混合処理機3台による昼夜施工を実施した。

本施工箇所は、①改良地盤に層厚1~2mの硬質地盤(砂礫層、

N値30~50)が存在するため、貫入時間の増加および貫入不能等のトラブルが懸念される。②運転稼働中の発電設備(運炭コンベア基礎)に近接しており、深層混合処理施工に伴う周辺地盤の地中水平変位による既設構造物への影響が懸念される等の特長がある。このため硬質地盤を考慮した貫入およびスラリー吐出方法および近接施工対策を実施した。

また、深層混合処理機オーガのモータ電源は環境対策を考慮し、処理機にトランスを搭載した工専用電力方式を採用した。

### 5.2 配 合

深層混合処理の配合はFCDMを基本としていたが、当発電所既設ユニットの定期点検に伴うフライアッシュの供給停止期間は、セメント単身の配合(以下、CDMと呼ぶ)を採用した。深層混合処理の配合を表-2に示すが、セメントは高炉B種、フライアッシュはJIS A 6201「コンクリート用フライアッシュ」のII種相当である。

配合試験から、設計で要求される強度を満足する単位セメント量は155kg/m<sup>3</sup>であったが、想定した変動係数(0.45)を確保するためにスラリーを増量し、攪拌混合度(改良体の均質性)を向上させることとした。

攪拌混合度は、攪拌翼の形状、攪拌回数およびスラリー量により影響を受けるが、特に粘性土地盤(AIIIc層)については共回りを生じやすいことから、確実に地盤をほぐすスラリー量が必要であると考えられた。

スラリー量の増量方法は、水結合材比 {W/(C+F)=60%} を変更せず、結合材を増量した。CDMについてはセメントを増量材、FCDMについてはフライアッシュを増量材とし、スラリー量を確保した。FCDMの単位セメント量は要求される強度から決定しているため、全層同一の配合とした。

表-2 深層混合処理の配合表

項 目	単 位	FCDM		CDM	
		Bu~AIIg	AIIIc	Bu~AIIg	AIIIc
セメント	kg/m <sup>3</sup>	155	155	200	250
フライアッシュ	%	93	93	—	—
W/(C+F)	%	60	60	60	60
F/(C+F)	%	37.5	37.5	0	0
スラリー量	ℓ/m <sup>3</sup>	239	239	186	232

\*Bu ~ AIIg: 砂質~砂礫層, AIIIc: シルト層

### 5.3 貫入およびスラリー吐出方法の検討

試験施工により硬質地盤貫入方法を検討の結果、通常の貫入時スラリー吐出方法を採用した場合、硬質地盤において貫入速度が著しく低下し、スラリー吐出量の増大、サイクルタイム増加による引抜き時のトラブルおよびスラリー吐出管の閉塞等が予想されることから、「水吐出併用貫入+引抜き時スラリー吐出方法」を採用した。

また、貫入力および回転力の増加を図るため、深層混合処理機は、50t級ベースマシン、90kWモータを採用した。ビットについては硬質型とし、最下段の攪拌翼に硬質特殊鋼を取付けた。

### 5.4 施工管理基準

本施工に先立ち事前確認試験において、硬質地盤貫入時の水吐出開始および終了、支持層着底の施工管理基準を決定した。施工管理基準を表-3に示す。

表-3 施工管理基準

項 目	電流値 (A)	貫入速度 (m/分)
水吐出開始	350以上	0.5以下
〃 終了	300以下	—
着 底	350以上	0.1以下

5.5 施工結果

施工方法を表-4に示すが、初期施工の“水吐出併用貫入+引抜き時スラリー吐出方法”のチェックボーリングにおいて、硬質地盤下層の粘性土層に強度のパラツキが見られたため、表-4の最終施工(I)に示す“硬質地盤で浅まで水吐出併用貫入、それ以深は貫入時スラリー吐出方法”に変更すると共に、羽根切り回数を350回/m(通常の数)から525回/m(通常の数1.5倍)に増加させた。最終施工(I)の施工手順を図-3示す。

表-4 施工方法

施工段階	サイロ	貫入	引抜き	備考
初期	—	水吐出併用	スラリー吐出	
最終	(I)	A・B	水吐出併用	硬質地盤で浅
		—	スラリー吐出	硬質地盤で深
(II)	C	スラリー吐出	—	水吐出先行貫入

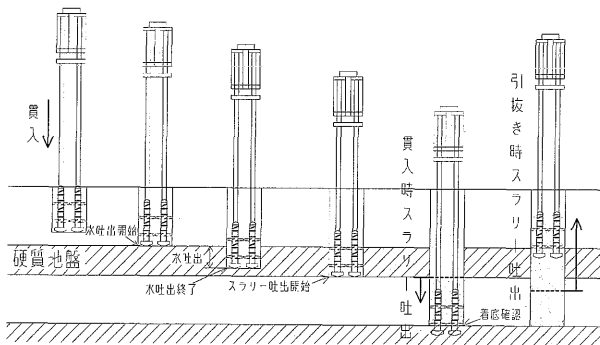


図-3 最終施工(I)の施工手順

硬質地盤下層の粘性土層における強度のパラツキの原因としては、この層を空掘り状態で貫入したため、地盤のほぐしにおいて、粘性土の細分化が進まず(小片のブロック、または、粒状化)共廻り現象が発生し、引抜きスラリー吐出時の攪拌混合度が低下したものと推察された。

Cサイロについては、硬質地盤が強く、互層になっていたため、深層混合処理機による“水吐出併用の先行掘削貫入+貫入時スラリー吐出方法”に変更した。

最終施工(I)の水とスラリーの切替については、スラリー吐出改良範囲に水が混入しないように、スラリー吐出開始の1m上方までに切替を行った。水吐出量は、水結合材比の増加による強度低下が懸念されるため、極力最小流量とした。なお、貫入時の水およびスラリーは、ピットの先端から、引抜き時のスラリーは、最上段の攪拌翼の上部から吐出する方法を採用した。

最終施工(I)の標準的な施工データを図-4に示すが、モータに450A以上の電流が継続的に流れるとモータの回路が遮断されることから電流の許容最大値を450A(瞬時)とし、水吐出量、速度を調整しながら硬質地盤を貫入した。

概ね、硬質地盤の水吐出量は150ℓ/m、速度は0.4m/分、1セットのサイクルタイムは、全セット数の90%が130分以内であり、平均値91分、最頻値73分であった。

本施工において一部施工方法の変更も生じたが、水吐出併用貫入方法により、貫入不能等の障害を招くことなく施工を完了した。

また、ピットの損耗度は、A・Bサイロで、改良土約1,600㎡に1回の交換、Cサイロでは、約500㎡に1回の交換であった。

5.6 盛り上がり土

盛り上がり土量は施工の進捗と共に増加する傾向となり、最終的

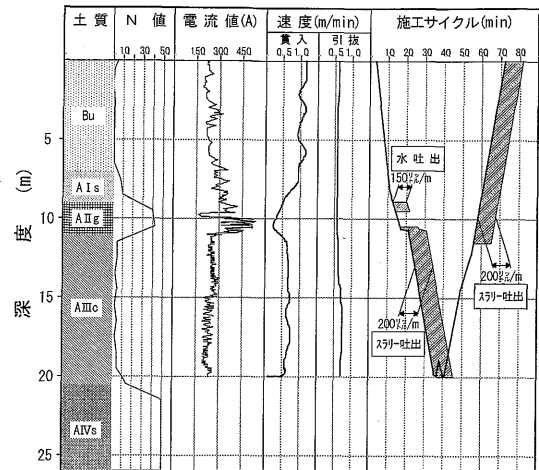


図-4 最終施工(I)施工データ

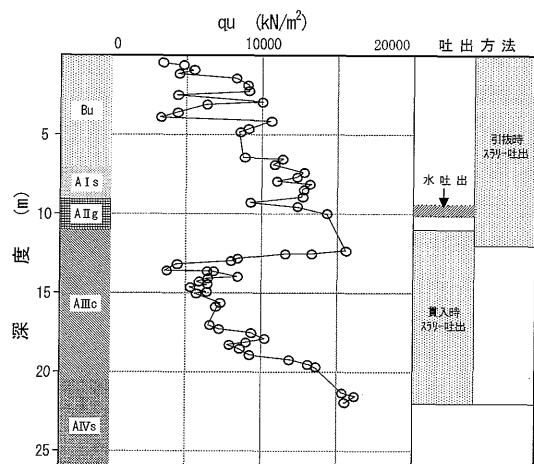


図-5 最終施工(I)一軸圧縮強さ

に注入したスラリー量に対して約70%の盛り上がり土が発生した。

5.7 杭頭処理

深層混合処理杭頭部の打設高さは、初期施工において、その仕上がり状況の品質を検査し、設計高+0.5mとした。なお、杭頭部は硬化後、ツインヘッドにより所定の仕上がり天端に揃えた。

5.8 強度試験の結果

最終施工(I)の材令91日のFCDMの一軸圧縮強さを図-5に示すが、標準偏差を用いた品質検査手法において、設計基準強度を満足するものであった。また、硬質地盤(A II g層)の水吐出貫入施工による悪影響は見られず、水吐出の対象土層が砂礫層のため他の土層に比べ高強度を示す結果であった。

最終施工(II)におけるFCDMとCDMのスラリー量がほぼ一定であるA III c層(シルト)の攪拌混合度を変動係数で比較すると、FCDMは0.45、CDMは0.52であった。深層混合処理において、攪拌混合度を向上させるためにスラリーを増量させる場合、セメントに比べ安価なフライアッシュを増量材としたFCDMは有効な工法と考えられる。

5.9 近接施工

(1) 近接施工対策

施工平面図を図-6に示すが、施工箇所は、鋼管杭(径0.5m)に支持された既設の運炭コンベア基礎が近接しており、その離隔距離は最接近部で6.5mであることから近接施工対策を実施した。

① 施工時の地中変位対策として、深層混合処理前面から4.5mの

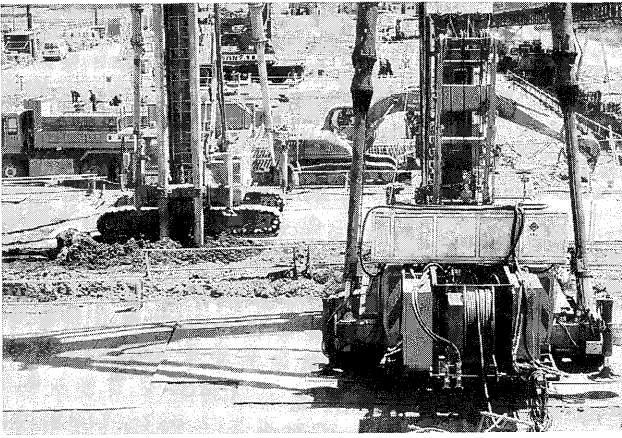


写真-2 深層混合処理の施工状況

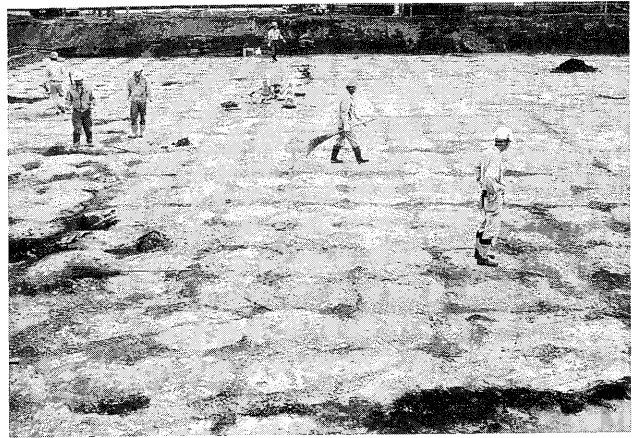


写真-3 深層混合処理の杭頭状況

位置にアースオーガ機により変位吸収孔(空孔, 上部はポリエチレン製波状管を挿入, 径0.5m, 深さ23.1m, 間隔1m)を設置した。

- ② 深層混合処理の施工順序は, 最も近接する運炭コンベアライン(No.2-1)に対して離れるように施工した。
- ③ 周辺地盤の地中変位については地中傾斜計による自動観測, 既設コンベア基礎の変位については基礎上に設置した変位鉄の手動観測を行い, 情報化施工を実施した。

(2) 水平変位管理基準値の設定

変位の管理基準値の設定を表-5に示すが, 施工当初, 地中変位の形状を地表部が最大となる逆三角形と考え, 既設運炭コンベア基礎の鋼管杭の許容応力度から算出した基礎天端の許容変位量10mmを管理基準値とした。

施工の進捗に伴い, 地中傾斜計No.2の地中変位(吸収孔背面)の形状が下部のシルト層に最大変位が発生する半円形(図-10参照)になったため, この形状において, 地中変位と鋼管杭の応力度の関係をFEM弾性解析により検討し, 地中傾斜計の地中変位30mmを管理基準値とした。荷重は地中傾斜計設置位置において地中変位を強制変位として与えた。弾性解析の解析モデルを図-7に示す。

地中傾斜計を設置していないコンベア基礎についても, B3基礎と同様に吸収孔の機能低下により半円形の地中変位が発生することが予想されるため, 図-8に示すNo.2深度16.6mの地中変位とB3基礎天端変位の関係から半円形変位時の許容地中変位30mmに相当する“基礎天端変位量10mm”を管理基準値とした。

表-5 変位の管理基準値の設定

施工段階	
施工当初 逆三角形変位	施工途中 半円形変位
基準値 変位形状 (基礎杭) 10mm	基準値 変位形状 (基礎杭) (地中傾斜計) 10mm 30mm

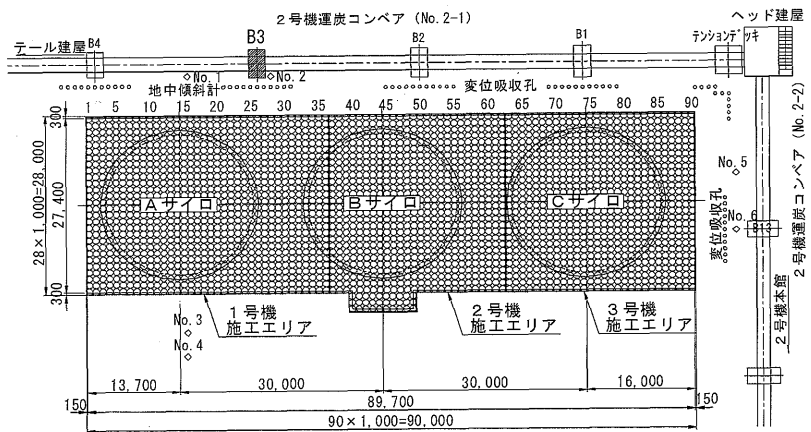


図-6 施工平面図

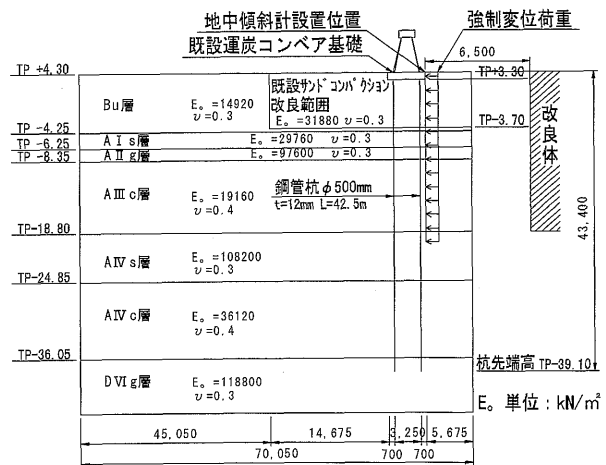


図-7 解析モデル

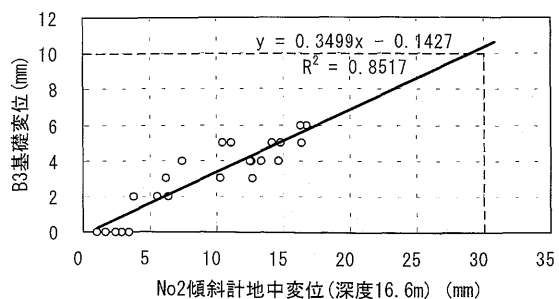


図-8 No.2深度16.6mの地中変位とB3基礎天端変位の関係

(3) 計測管理結果

水平変位の経時変化(No. 2 深度16.6m地中変位・B 3 基礎天端変位)を図-9に示す。両者共、変位はB 3 基礎に打設位置(図中の打設列は図-6を参照)が接近するに従い増加し、そのピークは各施工ラインの最前列において発生したが、地中変位の常時監視体制により、変位が増加した場合は、施工ラインの変更および施工セット数の制限等の情報化施工を適用し、管理基準値を満足することができた。なお、打設終了3ヶ月後の残留変位は、ピーク時の値に対して約70%であった。

地中変位と深度(打設面から6.5m離れ)の関係を図-10に示す。変位吸収孔の効果確認のために設置したNo. 1(吸収孔無)の地中変位は下部のシルト層にふくらみをもつ逆三角形の形状で、地表部において最大32mmの変位が発生した。シルト層の半円形の変位は、ある一定以上の水平変位が発生した後に見られた。

一方、吸収孔背面に位置するNo. 2の地中変位は、地表部から深度約10m以浅までは、吸収孔の変位抑制効果が見られたが、深度10m以深は、シルト層に最大23mmの半円形の変位が発生した。これは、吸収孔が空孔(泥水未使用)のため壁面の崩落がおり、深部の断面の閉塞により水平変位が伝達したと推察された。この最大変位形状を強制変位として与えた弾性解析により、鋼管杭の許容応力度を満足していることを最終確認した。

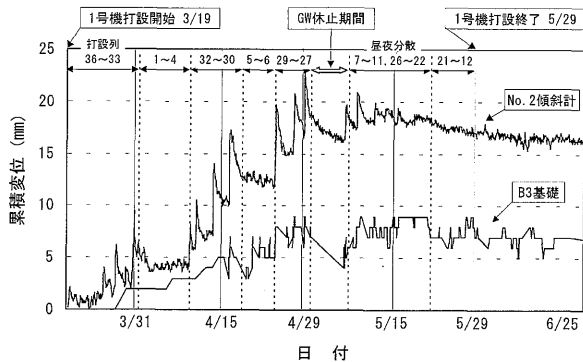


図-9 水平変位の経時変化

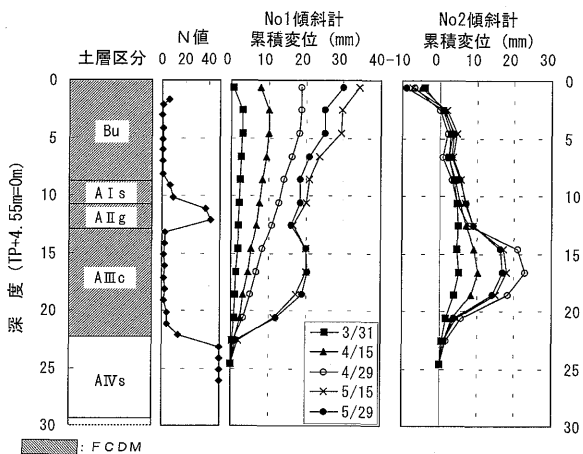


図-10 地中変位と深度の関係

5.10 沈下

貯炭サイロ基礎の設計沈下量は、深層混合処理本体の弾性沈下量が1.8cm、支持層以深のシルト層の圧密沈下量が10.3cm、合計の最終沈下量が12.1cmである。上載荷重の増加および時間の経過に伴い沈下量は増加するが、運炭コンベアの据付時点の設計沈下量は5.7cmで残留沈下量は6.4cmである。

貯炭サイロ基礎と運炭コンベア基礎は杭の支持層および杭工法が違ふことから、運炭コンベア据付け後、貯炭サイロの始点部において、6.4cmの不等沈下が生じる。(運炭コンベア基礎は場所打ち杭で沈下量はゼロ)その沈下量については、貯炭サイロと運炭コンベア接続部の機械構造(鉛直可動)で対処することとした。

沈下量の計算は $\Delta e$ 法により、地中鉛直応力度は、作用面上に改良深さの1/3だけ上方の点において30°の勾配で広がり方を考慮した幅を設定し算出した。

平成12年9月までの沈下量の経時変化を図-11に示すが、今後共、各サイロの基礎コンクリート天端高および層別沈下量を継続監視し、設計の妥当性を検証する予定である。

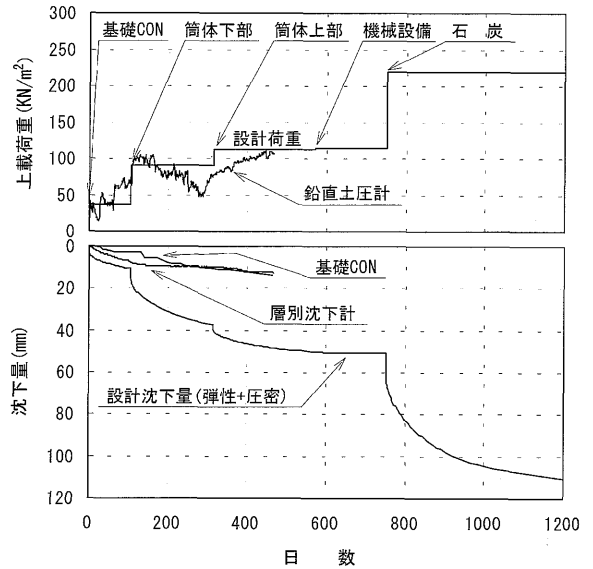


図-11 沈下量の経時変化

6. おわりに

貯炭サイロの基礎に採用した“セメントにフライアッシュを混合したFCDM”は、設計基準強度を満足するものであったと共に、深層混合処理の攪拌混合度の向上において有効な工法であることが確認された。

本深層混合処理は、改良地盤に硬質地盤の存在、近接施工等の施工条件下において、貫入不能等の障害を招くことなく、また、運転稼働中の発電設備に影響を及ぼすことなく、施工を無事完了した。

最後に、本施工にあたって、ご指導、ご協力を頂いた関係各位に深く感謝の意を申し上げます次第である。

参考文献

- 1) 松下啓郎; 佐藤賢次; 白戸伸明. 苫東厚真発電所4号機増設工事に伴う土木工事の計画概要. 電力土木. no.283, 1999, p.45-47.
- 2) 白戸伸明; 寺田卓雄; 杉松 彰; 大久保悟. 発電設備に近接した貯炭サイロ基礎の深層混合処理工法による施工について. 土木学会第55回年次学術講演集. 2000, III-B225.
- 3) 寺田卓雄; 白戸伸明; 渡部 貢; 工藤雄一. 硬質地盤における貯炭サイロ基礎の深層混合処理工法の施工について. 土木学会第55回年次学術講演集. 2000, III-B226.
- 4) 大久保悟; 白戸伸明; 高橋昌之. フライアッシュを混合した深層混合処理工法(FCDM)の強度特性について. 土木学会第55回年次学術講演集. 2000, III-B230.