

# 能代火力発電所第3号機における基礎工事の設計及び施工 Design and construction of foundation of Noshiro No.3 thermal power plant

吉田 智志\*                      内村 星史\*  
Satoshi Yoshida                Seishi Uchimura  
大西 慶典\*\*                    土屋 光弘\*\*  
Yoshinori Oonishi               Mitsuhiko Tsuchiya

## 要 約

石炭火力発電所は安定性・経済性に優れた重要なベースロード電源として位置付けられており、高効率火力発電等により環境負荷を低減しつつ活用されている。当社が既設1・2号機を施工した東北電力(株)能代火力発電所においても、石炭を主燃料として1・2号機より熱効率が高い3号機の建設が進められており、タービン基礎・ボイラー基礎は平成29年4月に設計施工を完了し、平成32年6月の運転開始に向けて、建築工事及び諸機械基礎を施工中である。本文は、能代火力発電所第3号機におけるタービン基礎・ボイラー基礎の設計及び施工について報告する。

### 目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 工事概要
- § 3. 設計
- § 4. 施工
- § 5. まとめ

### § 1. はじめに

能代火力発電所は、秋田県能代市の市街地から南西に約4kmの沿岸部に位置し(図-1)、1号機が平成5年に、2号機が平成6年に運転を開始している。3号機は、既設1・2号機の南側に隣接し、既設1・2号機に比べ出力は同じ60万kWとしつつ、より高い熱効率44.8%を見込んでいるほか、垂漚青炭の使用を拡大することで高い経済性と二酸化炭素排出量の削減を図る計画となっている(表-1、写真-1)。

タービン基礎は、平成28年4月から工事を開始し、平成29年4月に基礎引渡しを完了して、建屋建築工事を施工中である。ボイラー基礎は、平成28年3月から工事を開始し、平成29年1月に基礎引渡しを完了している。

本文は、能代火力発電所第3号機におけるタービン基礎・ボイラー基礎の設計及び施工について報告する。



図-1 能代火力発電所の位置図

表-1 能代火力発電所の諸元

項目	既設		新設
	1号機	2号機	3号機
発電機出力	60万kW	60万kW	60万kW
主燃料	石炭	石炭	石炭
熱効率(LHV: %)	約43.5	約44.0	約44.8
運転開始	平成5年5月	平成6年12月	平成32年6月(予定)

\* 北日本(支)能代火力(出)

\*\* 土木設計部設計一課



写真一 完成予想図

§2. 工事概要

能代火力発電所3号機における基礎工事の主な工事概要を以下に示す。

- (1) 工事件名：能代火力発電所第3号機新設工事のうち発電所本館基礎他工事
- (2) 発注者：東北電力株式会社
- (3) 工事場所：秋田県能代市字大森山1-6
- (4) 工期：自 2015年5月25日  
至 2018年10月23日
- (5) 工事内容：
 

発電所本館基礎（タービン基礎）	一式
ボイラー基礎	一式
逆洗フィルターピット	一式
機械装置基礎（変圧器基礎等）	一式
実施設計業務	一式

§3. 設計

3-1 基礎構造

タービン基礎・ボイラー基礎の基礎形式について、既設1,2号機は中空スラブ基礎（直接基礎）を採用しているが、構造が複雑化することによる工程への影響や、万が一圧密沈下した場合の既設1,2号機の安定運転への影響を考慮し、3号機では杭基礎を採用した。

タービン基礎は、循環水管が基礎側面より復水器へ接続されるため、一般部の天端高FL±0.00m（GL+0.30m）に対して、ピット部の復水器設置エリア天端高がFL-7.60m（GL-7.30m）と、基礎中央部が深い掘り込み構造となっている。基礎スラブの平面寸法は、90.88m（NS方向）×58.05～38.25m（EW方向）である（図-2）。

ボイラー基礎は、タービン基礎と比較してフラットな構造となっており、基礎スラブの平面寸法は、61.93～43.43m（NS方向）×87.08m（EW方向）である（図-3）。

なお、タービン基礎とボイラー基礎は、既設1,2号機とは異なり、一体ではなく分離した構造とし、タービン

基礎は建築確認申請を考慮して建築基準（主に「建築基礎構造設計指針」<sup>1)</sup>、以下、「建築指針」という。）に、ボイラー基礎は土木基準（主に「道路橋示方書 IV下部構造編」<sup>2)</sup>、以下、「道示」という。）に準拠して設計した。

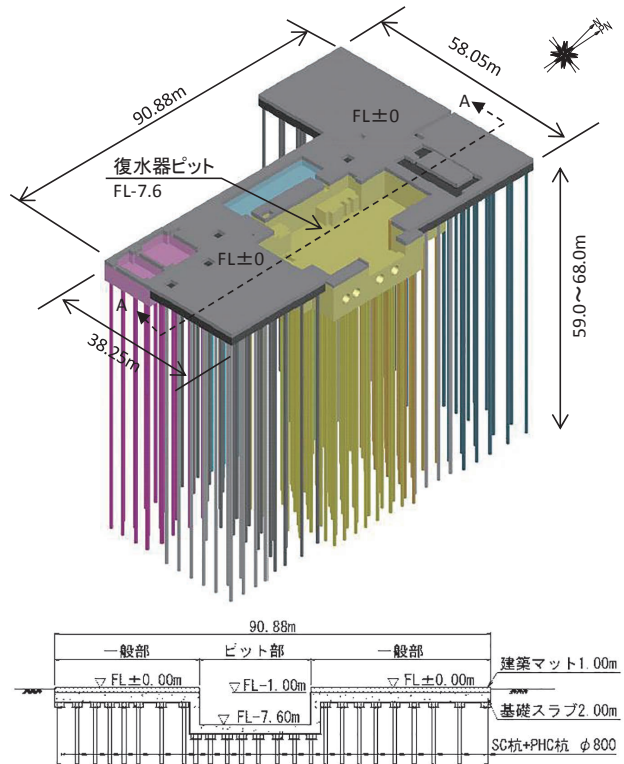


図-2 タービン基礎概要

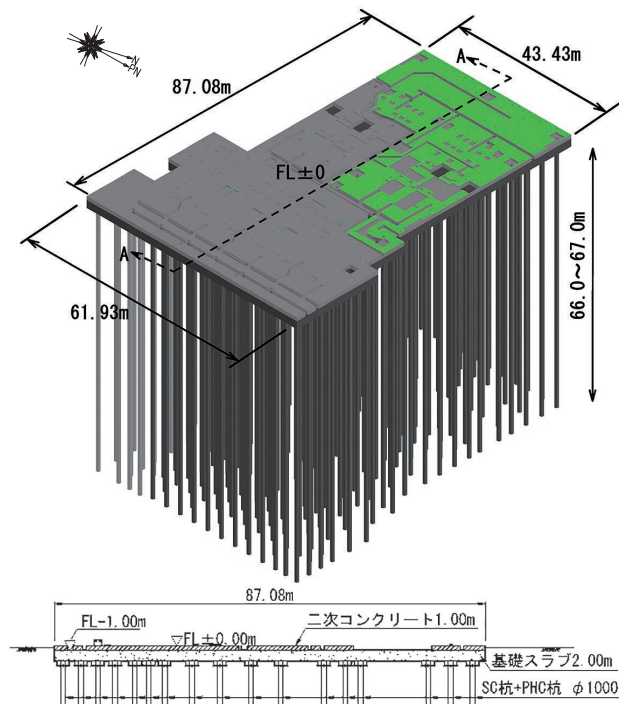


図-3 ボイラー基礎概要

3-2 地盤条件

能代火力発電所は、砂丘前面の遠浅の海域を埋め立てた造成地であり、埋土は粒径均一な細砂を主体とした浚渫土砂である。

地層構成は、図-4に示すように、N値5程度の緩い埋土層(Bs)が層厚約10mで一様に分布しており、埋土層の下に第四紀完新世～更新世末期の沖積層が層厚60m以上で堆積している。沖積層は、N値20～40程度の砂質土層(As1～As4)とN値10程度の粘性土層(Ac2～Ac4)からなる互層であり、最下層はN値50以上の砂礫層(Ag5)となっている。各地層は層厚変化が緩やかで、概ね連続性をもって水平に堆積している。また、地下水位はGL-2.40mである。

3-3 液状化判定と土質定数の低減

液状化の判定は、タービン基礎では建築指針に基づき、土質調査結果で得られたN値を用いて行った。ボイラー基礎では道示に基づき、液状化発生時の地盤強度をN値よりも直接的に測定できると考えられる非排水三軸試験で得られた液状化強度比 $RL_{20}$ (繰返し載荷回数20回)を用いて行った。

液状化判定の対象となる土層は、地表面から20m以浅に存在する埋土層(Bs)及び沖積砂質土層(As1)の2種類とし、タービン基礎の地表面水平加速度はレベル1地震時で150gal、レベル2地震時で350gal、ボイラー基礎の設計水平震度はレベル1地震時で0.15、レベル2地震時のタイプIで0.40、タイプIIで0.51とした。

各基準に基づく液状化判定結果と液状化地盤における土質定数の低減係数を、表-2に示す。杭の設計にあたっては、基礎の引渡し工程(基礎着工12ヵ月後)の制約等から、地盤改良等の液状化対策は実施せず、液状化の影響を考慮した杭の設計とした。

表-2 液状化判定と土質定数の低減係数

基礎	地震動	地表面加速度または設計水平震度	液状化の可能性 ○:なし ×:あり		土質定数の低減係数	
			Bs層	As1層	Bs層	As1層
タービン基礎	レベル1	150 gal	×	○	0.1	-
	レベル2	350 gal	×	×	0	0.5
ボイラー基礎	レベル1	0.15	○	○	-	-
	レベル2	0.40/0.51	×	×	1/3	2/3

3-4 構造解析概要

基礎スラブ及び杭の構造解析においては、基礎スラブをシェル要素、杭をバネ要素でモデル化した三次元FEM解析による検討を行った。構造解析フローを図-5に示す。

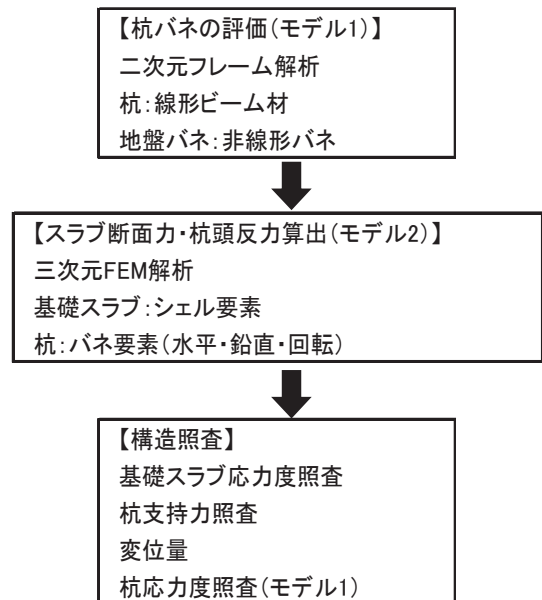


図-5 構造解析フロー

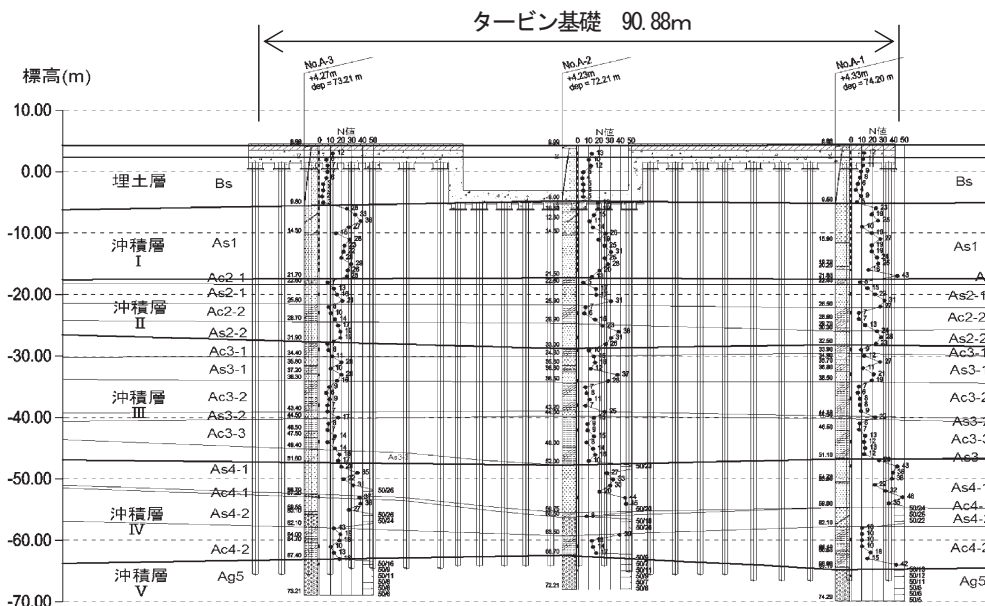


図-4 地層断面図



まず杭を対象に、地盤バネの非線形性を考慮した二次元フレーム解析モデル（モデル1、図-6）にてプッシュオーバー解析を行い、杭頭における非線形バネとして杭のバネ値を設定する。次に、杭の非線形バネ要素を三次元FEM解析モデル（モデル2、図-7）に反映し、杭頭反力及び基礎スラブの断面力を算定する。

その後、モデル2で算定した杭頭反力をモデル1に戻し、静的設計における杭の応力度照査を実施した。

なお、地下ピット部については、基礎スラブ・壁・循環水管開口等の詳細な形状や、側部の地盤バネ及び土圧を考慮した三次元FEM解析を実施し、断面検討を行った。

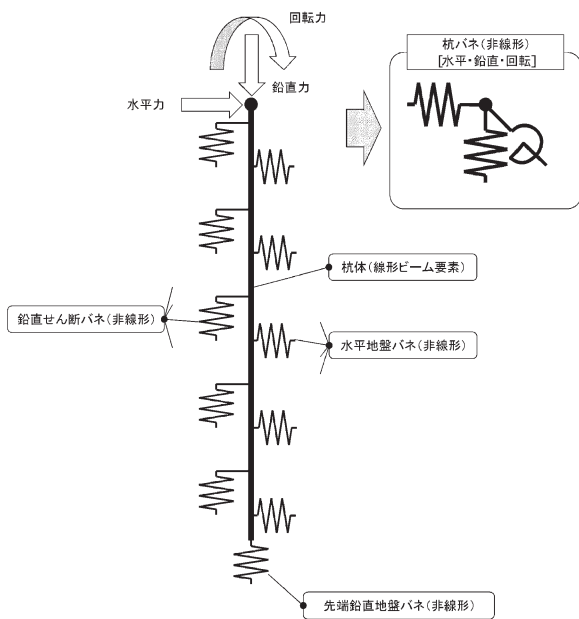


図-6 構造解析モデル概要図（モデル1）

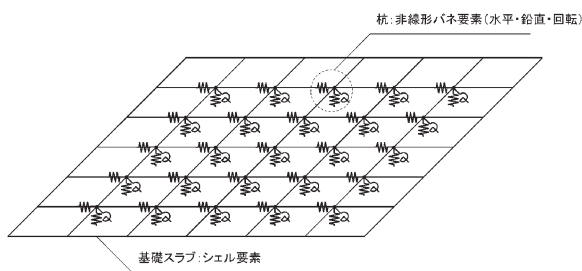


図-7 構造解析モデル概要図（モデル2）

### 3-5 杭基礎の仕様・工法

杭の仕様は、タービン基礎では杭径φ800 mm、ボイラー基礎では杭径φ1000 mmとし、上杭をSC杭（鋼管厚16または19 mm，SKK490），下杭をPHC杭とした。上杭と下杭の段落しは、作用する断面力に対して応力度及び水平変位が許容値内に収まるよう設定し、SC杭の余長は支持層の不陸に配慮し、0.5 mと設定した。

なお、レベル1地震時における許容水平変位量については、上部構造の要求事項を確認した上で、道示の水平変位制限の緩和条項を適用し、杭径の3.5%（杭径φ800 mm：28 mm，杭径φ1000 mm：35 mm）とした。

杭の打設工法は、最大杭長が68 mの長尺杭となるため、孔壁崩壊等による杭の沈設不能の恐れのない中掘り工法に変更し、タービン基礎では杭周面摩擦力や杭先端支持力等を大きく評価できる拡大根固めによる高支持力杭工法（Hyper-NAKS II工法）、ボイラー基礎では一般工法（STJ工法）を採用した。

### 3-6 副基礎方式による杭とフーチングの接合

SC杭とフーチングの接合方法は、主筋定着方式（方法B）または埋込み方式（方法A）による接合方法が一般的である。しかし、主筋定着方式は中詰め補強鉄筋だけでは不十分で、杭体内補強鉄筋や杭頭外周鉄筋の溶接が必要となり、工程への影響や基礎スラブとの干渉が懸念されたことから、埋込み方式を採用することとした。

しかしながら、埋込み方式では、フーチング内に1D（0.8 mまたは1.0 m）以上埋め込む必要があることから、フーチング下面主鉄筋が切断され、十分な補強鉄筋が必要になること、さらに杭頭部は建屋柱脚アンカー及びアンカーフレームとの干渉が懸念される箇所が多数あることから、埋込み長分を掘り下げ、フーチング下部に副基礎を設ける方式を採用し、副基礎の範囲内で杭を接合することとした（図-8、写真-2）。副基礎の採用にあたっては、杭と副基礎の支圧応力や押し抜きせん断応力等の照査を行い、構造成立性を確認した。

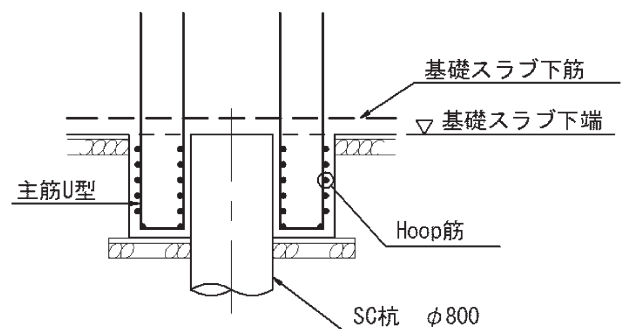


図-8 副基礎方式 断面図

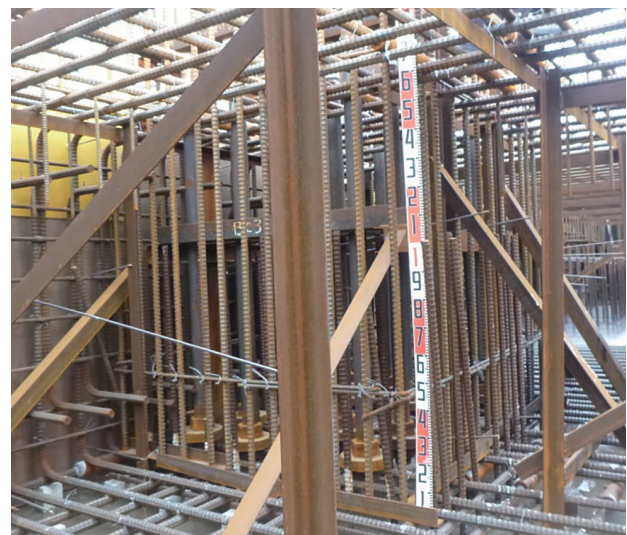


写真-2 建屋柱脚アンカー等との干渉状況

### 3-7 温度応力解析

タービン基礎・ボイラー基礎は厚さ2.0 mのマスキングコンクリートで温度応力ひび割れが懸念されることから、温度応力解析を行い、ひび割れ指数1.0以上またはひび割れ幅0.3 mm未満を目標値として照査を行った。

タービン基礎は基礎スラブに拘束される壁に着目して、ボイラー基礎は基礎スラブと基礎スラブ上の厚さ1.0 mの二次コンクリートを対象とし、それぞれ1/4モデルで検討した。解析結果を図-9及び表-3に示す。なお、ひび割れ幅は部材の鉄筋比とひび割れ指数との関係から推定した<sup>3)</sup>。

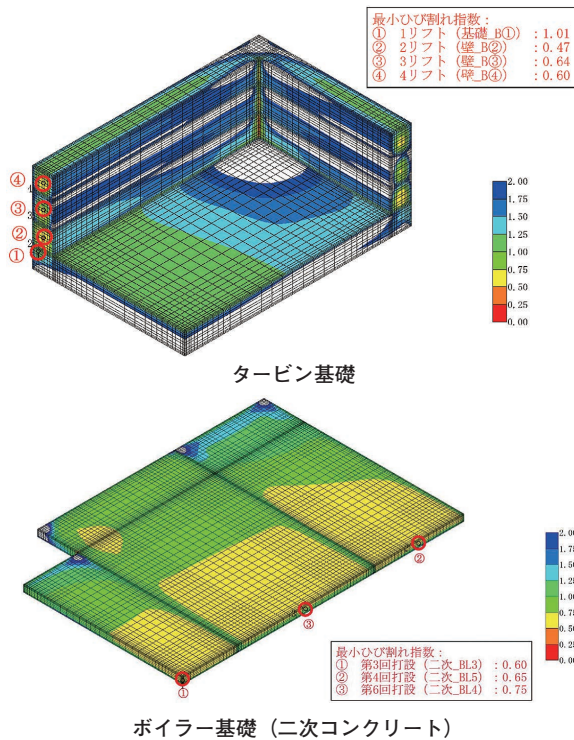


図-9 温度応力解析結果 (最小ひび割れ指数)

表-3 温度応力解析結果

基礎	部位	リフト高 (m)	最小ひび割れ指数	ひび割れ幅 (mm)
タービン基礎	①	2.0	1.01	0.11
	②	2.1	0.47	0.17
	③	2.5	0.64	0.15
	④	2.0	0.60	0.15
ボイラー基礎	基礎①	2.0	1.55	0.07
	基礎②	2.0	1.50	0.08
	二次①	1.0	0.60	0.30以上→0.27 <sup>**</sup>
	二次②	1.0	0.65	0.30以上→0.26 <sup>**</sup>
	基礎③	2.0	0.91	0.17
	二次③	1.0	0.75	0.30以上→0.24 <sup>**</sup>

※補強後を示す。

タービン基礎において、2リフト目以降のひび割れ指数が1.0を下回るものの、ひび割れ幅は全て0.3 mm未満を満足する結果となった。

ボイラー基礎において、基礎スラブはひび割れ指数が一

部で1.0を下回るものの、ひび割れ幅は0.3 mm未満を満足する結果となった。二次コンクリートはひび割れ指数が1.0を下回り、ひび割れ幅も0.3 mmを超えることから、客先指示により柱脚のコーン破壊が想定される平面範囲+鉄筋定着分に補強鉄筋 (D29@200)を追加することで、ひび割れ幅0.3 mm未満を満足する結果となった。

## §4. 施工

### 4-1 杭の施工状況

タービン基礎・ボイラー基礎の杭打ち機の稼働台数は、施工エリアへの設置可能最大数により、タービン基礎は261本の杭に対して3台、ボイラー基礎は206本の杭に対して2台とした。杭施工状況を写真-3に示す。



写真-3 杭施工状況

### 4-2 統合管理装置による杭の施工管理

杭の施工に当たっては、杭打ち機に設置した統合管理装置により、以下の項目について管理を行った (写真-4)。

- ① スパイラルオーガの掘削深度
- ② スパイラルオーガの回転速度
- ③ 近傍ボーリングのN値の深度分布
- ④ 杭周固定液・根固め液注入状況 (吐出流量・圧力)
- ⑤ 積分電流値

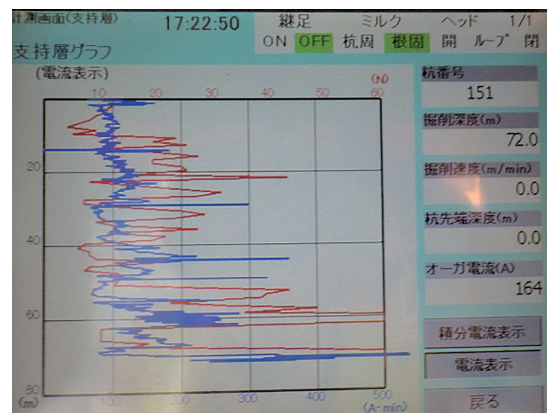


写真-4 統合管理装置

### 4-3 杭継手の施工管理について

SC杭同士の継手は溶接継手 (写真-5)、それ以外の継手は工程短縮の観点から機械式継手 (トリプルプレート



ジョイント、写真一六)を用いた。

溶接継手では、目視及び浸透探傷試験（カラーチェック）により溶接部の欠陥の有無について確認した。また、機械式継手では、施工要領で規定の締め付けトルク値をトルクレンチにて確認した。



写真一五 溶接継手施工状況



写真一六 機械式継手施工状況

#### 4-4 支持層の確認方法

杭の支持層への到達及び必要根入れ長の確認方法については、以下の①と②を組み合わせ総合的に判断した。

- ①タービン基礎・ボイラー基礎エリアについては、約8,000 m<sup>2</sup>の敷地面積に対して、計12本のボーリングにより詳細な地質調査を実施した中で、支持層コンターの起伏が小さいことが確認できていること<sup>4)</sup>、杭長に余長を0.3~1.2 m付与することから、杭を計画深度にて施工することで、支持層への到達及び必要根入れ長が確保されるものと考えた。なお、既存ボーリングのみでは支持層天端高さに不確実性が残ったため、追加ボーリングを提案・実施した。
- ②「杭基礎施工便覧」<sup>5)</sup>に基づき、支持層付近における瞬時電流値及び積分電流値の変化の記録、杭打ち機本体の振動や掘削音の変化の記録、及びスパイラルオーガヘッドに付着した支持層の土質（礫）確認（写真一七）を支持層到達の裏付けとして行った。



写真一七 支持層の土質確認状況

#### 4-5 杭施工に伴う建設汚泥の再利用

杭施工に伴い発生する建設汚泥については、建設廃棄物の減量化及び資源化を図るため、「建設汚泥の再生利用に関するガイドライン」<sup>6)</sup>に準拠し、セメント系固化材（六価クロム溶出量低減型）を添加混合する安定処理を行った上で、発電所構内にて工作物の埋戻し材として再利用を行った。

建設汚泥処理土の品質確認の方法については、コーン指数試験（JIS A 1228）により、コーン指数400 kN/m<sup>2</sup>以上（第3種処理土）であることを確認した。また、六価クロム溶出試験を実施し、溶出量が基準値以下であることを確認した。

#### §5. まとめ

タービン基礎・ボイラー基礎は平成29年4月に設計施工を完了し、平成32年6月の運転開始に向けて、建築工事及び諸機械基礎を施工中である。引き続き既設設備の安定運転に影響を与えることなく、安全最優先に工事を遂行していく所存である。

最後に、本工事は発注者、土木設計部及び建築設計部、支社・支店・現場とが一体となって取り組んでおり、ここに改めて謝意を表すとともに、本事例で得た経験を今後の類似工事に反映させていきたいと考える。

#### 参考文献

- 1) (社)日本建築学会：建築基礎構造設計指針，2001.
- 2) (社)日本道路協会：道路橋示方書 IV下部構造編，2012.
- 3) (社)日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御指針，2008.
- 4) (社)日本建築学会：建築基礎設計のための地盤調査計画指針，pp. 22-23, 2009.
- 5) (社)日本道路協会：杭基礎施工便覧，pp. 82-83, 2015.
- 6) 国土交通省：建設汚泥の再生利用に関するガイドライン，2006.