

大飯原子力発電所増設工事の掘削工事における アンカーによる山留めの設計・施工

Design and Construction of Earth Retaining Walls with Anchors
Employed in Excavation Works at Ooi Nuclear Power Plant

齊 野 進 (さいの すすむ)

関西電力㈱ 建設部課長

青 嶋 憲一郎 (あおしま けんいちろう)

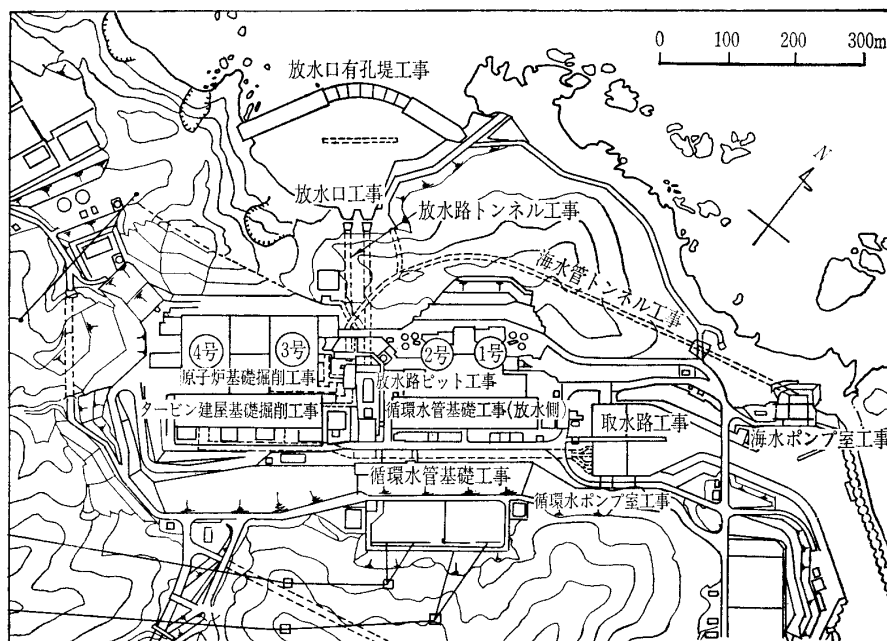
前田建設工業㈱ 土木設計部課長

上 出 厚 (かみで あつし)

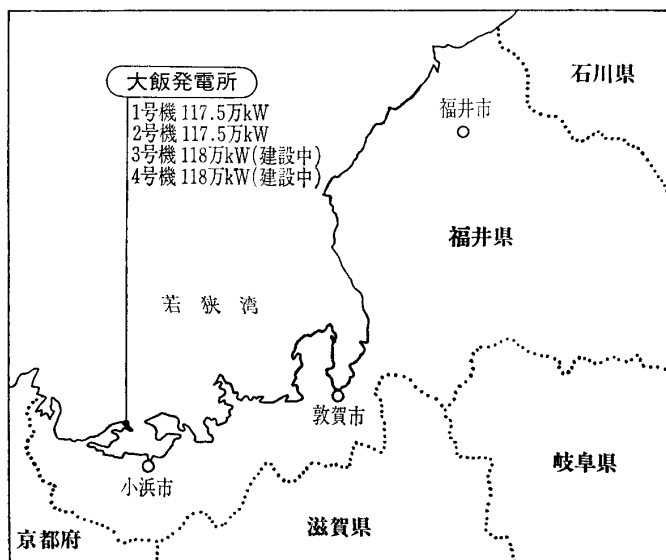
前田建設工業㈱ 技術研究所

1. ま え が き

関西電力㈱は、近年ますます多様化・増大する電力需要に対処し、基軸エネルギーとしての電力供給の長期安定化を図るため、福井県大飯郡大飯町大島で総出力 471 万 kW (1・2 号機：各 117.5 万 kW, 3・4 号機：各 118 万 kW) の原子力発電所の建設を進めている (図—1, 2)。大飯発電所増設工事は稼働中の既設発電所 1・2 号機に隣接して 3・4 号機を増設するものであり、3 号機は平成 3 年 12 月、4 号機は平成 5 年 2 月にそれぞれ運転開始を予定している。



図—2 工事平面図



図—1 大飯発電所位置

この大飯発電所増設工事に関連する土木工事の総掘削土量は約 330 万 m^3 である。

主要土木工事は、敷地造成工事に引き続いて原子炉建屋基礎等の掘削工事と復水器冷却海水系設備・原子炉補機冷却海水系設備の基礎を施工するものであり、昭和62年5月に着工した。

主要土木工事の掘削工事のうち以下の7地点においてアンカーを用いた掘削工事が施工された。

①タービン建屋基礎南側、②取水路、③循環水ポンプ室、④循環水管基礎、⑤放水路ピット、⑥放水口、⑦海水管トンネル開削部

これらのうち放水路ピットの山留めの一部で、コンクリート吹付けアンカー構造の山留めを用い、大規模な垂直掘削を実施した。他の掘削工事はすべて

親杭（H型鋼，鋼管矢板など）をともなっている。

この報告は，放水路ピット掘削工事の山留め工の設計と，施工時の計測管理を行った結果について述べるものである。

2. 地質概要

敷地周辺のおもな地質は，夜久野複合岩類，古生代～中生代の堆積岩類を主とする地層，中生代の火成岩類，新第三紀の堆積岩類，新第三紀～第四紀の堆積物で構成されている。原子炉設置位置付近の地質は，大部分が夜久野複合岩類に属する細粒石英閃緑岩と輝緑岩から構成されている。細粒石英閃緑岩は緑灰色ないし緑色を呈し，塊状の岩石で，おもに原子炉格納施設の北側および北西側に分布している。3号および4号原子炉格納施設基礎底面の基礎岩盤は[C_H]級が全体の約6割を占めている。

3. 工事概要

放水路ピット掘削工事は，幅20m，長さ37.5m，高さ18.6～22.3mの復水器冷却用海水を放流する放水路ピットく体構築のための，総掘削土量約42000m³の大規模土工事である。

この工事の特徴としては

- ① 既設1・2号機発電設備に隣接している。
- ② 建築工事と接して，取合い作業・上下作業が多い。
- ③ 狭いエリアに構造物が入り組んでいる。
- ④ 構造物構築中に機械工事の配管作業が施工さ

れる。

が挙げられ，工事は通水開始までのクリティカルパスルートにあり，複雑でかつ，厳しい工程の工事であった（図－3）。

放水路ピットの掘削は，既設1・2号機発電設備と建築工事の原子炉周辺建屋の間における標高+16.0～-12.5mまでの深さ28.5mの掘削工事である。地質は大部分が[C_M]～[C_H]級の岩盤であるが，北側の一部と1・2号機放水路ピット側に崖錐・埋戻し土が介在している。掘削は放水路ピット部と循環水管基礎部の全域にわたり，標高+16.0mから+2.5mまでと放水路ピット部の標高+2.5mから-12.5mまで行った。

4. 土留め工の設計

4.1 土留め形式の選定

土留め工法の検討条件として，

- ① 既設構内排水管理槽と隣接している（4m）。
- ② 1・2号機側の地質は埋戻し土である。
- ③ 北側の地質は崖錐ないし岩盤である。
- ④ 作業ヤードが狭い。

が挙げられ，以下の4案で検討した。

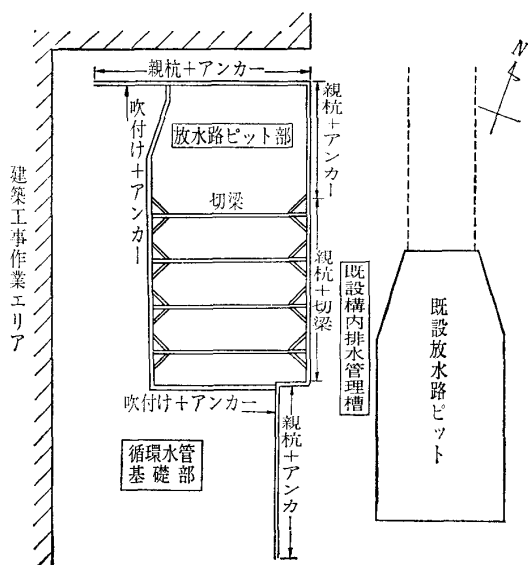
- 1) オープン掘削
- 2) 全面山留め（H杭+横矢板+アンカー）
- 3) 全面山留め（H杭+横矢板+切梁）
- 4) 全面山留め（コンクリート吹付け+アンカー）

この地域は作業ヤードが狭く，他工事と隣接しており工事中の輻輳が激しいため1) オープン掘削は無理と判断した。

地質が変化している1・2号機放水路ピット側の一部と放水路ピット北側は2) H杭+横矢板+アンカーとした。

放水路ピット東側の一部には，構内排水管理槽がありアンカーが施工できないこと，既設設備保全の考え方から既設1・2号機ピットの変位を拘束するため，3) H杭+横矢板+切梁とした。

放水路ピット南側は，岩盤であり比較的安定しておりまた掘削背面に既設構造物がない。放水路ピット西側のうち北半分は，掘削機械の搬入路に位置し，地盤が岩盤で比較的安定していると考えられる。したがってこれらの箇所は施工性・経済性を考慮して4) コンクリート吹付け+アンカーとした。このよ



図－3 放水路ピット土留め平面図

うに上記制約条件および経済性の面から、図一3に示すような複雑な形式の山留めとなった。

4.2 山留め工の断面設計

放水路ピット設置箇所の地質は、一部に埋戻し土、崖錐を含むものの大部分が $[C_M] \sim [C_H]$ 級の岩盤である。掘削時の地山の安定は岩盤の亀裂状況やその方向性に支配される。これを山留め計算に反映するのは難しいので、安定を考慮して表—1に示す物性値を用いて山留め工の設計を行った。

放水路ピットは山留めの種類が多く、掘削深度も多岐にわたるため11断面について設計計算を行った。

各山留めに用いた設計方法の概略を表一2示す。

アンカーの引張り材は、PC鋼より線 $\phi 12.7$ mm (7本)を使用した。

アンカー打設傾斜角は 15° とした。

グラウト材（モルタル）はアンカーとグラウトの付着強度が 14 kgf/cm^2 以上、圧縮強度で 180 kgf/cm^2 以上を目標とした。グラウト注入翌日にアンカーを緊張するため、原則として早強セメントを用いることとした。

アンカーの定着長，自由長，必要本数は，「アースアンカー工法」(土質工学会)¹⁾に準拠し設計した。

表一1 設計用地山物性値

項 目	岩 部 (C _M , C _H)	埋戻し土	崖 錐
単位体積重量 γ (tf/m ³)	1.9	1.9	1.9
粘 着 力 c (kgf/cm ²)	0	0	0
内部摩擦角 ϕ (°)	45	45	30

表一 2 山留め設計手法一覧

	設	計	手	法
親杭+アンカー	・自立時(一次掘削) なし ・二次掘削以降 下方担担法 ・側圧 $2 \cdot \gamma$ ・単純梁を用い親杭・腹起こしの断面力のチェック			
親杭+切梁	・自立時(一次掘削) chang(片持梁) ・側圧 ランキン - changの方法にて、親杭の断面力・杭頭変位、および腹起こし・切梁の断面力のチェック ・二次掘削以降 下方担担法 ・側圧 $2 \cdot \gamma$ ・単純梁を用い親杭・腹起こし、切梁の断面力のチェック			
吹付け+アンカー	・下方担担法によりアンカー導入力を設定			

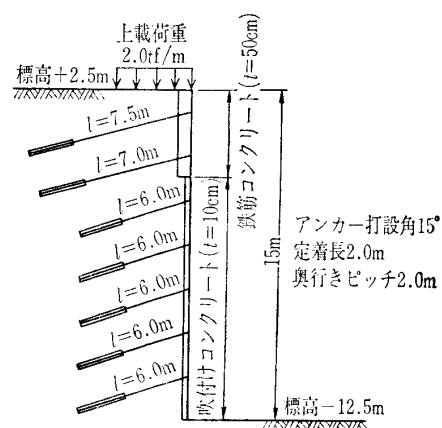


図-4 吹付けコンクリート部設計断面

なお、アンカー軸力からコンクリート吹付け厚を決定した。

コンクリート吹付けアンカー部の設計断面を図-4に示す。

5. コンクリート吹付け部の施工

掘削は、放水路ピット北西部に増設する構内排水処理槽の基礎である標高 +2.5m まで、作業エリアを確保するため、コンクリート破砕器を用いて掘削整地した。

標高+2.5~-1.5mの4mは、掘削後、土留めコンクリート（鉄筋コンクリート構造、厚さ50cm）を構築し、その後アンカー（2段）を緊張する構造とした。コンクリートは2回に分けて打設するが、下段は逆巻きコンクリートとなる。標高+2.5m盤は重機等の作業があり、岩の緩みをなくすためこのような構造とした。標高-1.5~-12.5mの11mは吹付けコンクリート（厚さ10cm）+アンカー構造である。施工は、掘削（アンカー削孔位置より1m余掘りする）、コンクリート吹付け、アンカー削孔、アンカー緊張の順を繰り返して行った。

なお、各次掘削後、アンカーの約20%に対し引抜き試験を実施し、アンカー体と岩盤の定着状況を確認した後、アンカー緊張の本施工を実施した。

6. 計測計画

計測の目的を以下に列挙する。

- ① 山留め壁，コンクリート吹付けアンカー部の安全性の確認。
- ② 背面地山の影響，根入れ部受働側の安定性の

報告—2027

チェック。

- ③ 既設1・2号機放水路ピットへの影響。
- ④ コンクリート吹付けアンカーの挙動把握。
- ⑤ 掘削に伴う背面地山の変位挙動の把握。

計測項目の一覧表を表-3に、主な計測器配置図を図-5に示す。コンクリート吹付けアンカー部の計測断面を図-6に示す。

計測管理は情報化施工の概念を取り入れた。計測管理のフローを図-7に示す。

計測の管理基準値は、親杭およびアンカーの応力度については、表-4に示す方法で一次管理値（注意状態）、二次管理値（警戒状態）を設け安全管理を行った。

山留めの変位に関する管理基準値の設定方法は難しいので施工前に予測解析を実施し、変位に関する異常な変化の見られないことを監視するための資料とした。親杭部では弾塑性山留め計算を、コンクリート吹付け部では弾性有限要素法を実施した。

予測解析より親杭部の天端変位、曲げ応力、アンカー荷重とも一次山留め工時に最大値を示し、以降は減少しながら収束する結果を得た。また最終時における最大値は、天端変位 65 mm、曲げ応力 1 100 kgf/cm² という解析結果を得た。アンカー荷重はおおむね設計荷重に収束した。

コンクリート吹付け部は、天端変位がほとんどの

表-3 放水路ピット計測項目一覧表

計測対象	計測項目	計測器	仕様	数量
土留め壁	アンカー荷重	ロードセル	ひずみゲージ式	23
	親杭変位	挿入式傾斜計	差動トランス式	6
	土留め壁背面地山変位	挿入式傾斜計	差動トランス式	6
	土留め壁頭部水平変位	トランシット		13
	土留め壁背面地中変位	地中変位計	ひずみゲージ式	6
	切梁軸力	ひずみゲージ	ひずみゲージ式	12
切梁	切梁軸力	油圧式軸力計		1
	外気温	自記式温度計	バイメタル方式	1

表-4 管理値の設定方法

	一次管理値	二次管理値
親杭	$f_b \times 0.8$	$f_b \times 1.0$
アンカー	$0.65 P_u, 0.75 P_y, P_a$ のうち最小値	$0.7 P_u, 0.75 P_y, P_a/0.8$ のうち最小値

ただし f_b : 鋼材の許容曲げ応力
 P_u : アンカーの破断荷重
 P_y : アンカーの降伏荷重
 P_a : アンカーの許容引抜き荷重

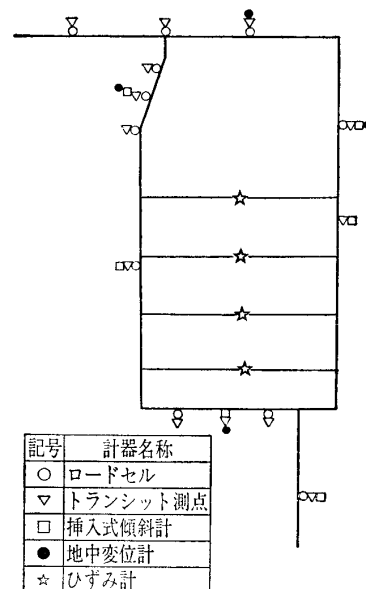


図-5 計測器配置図

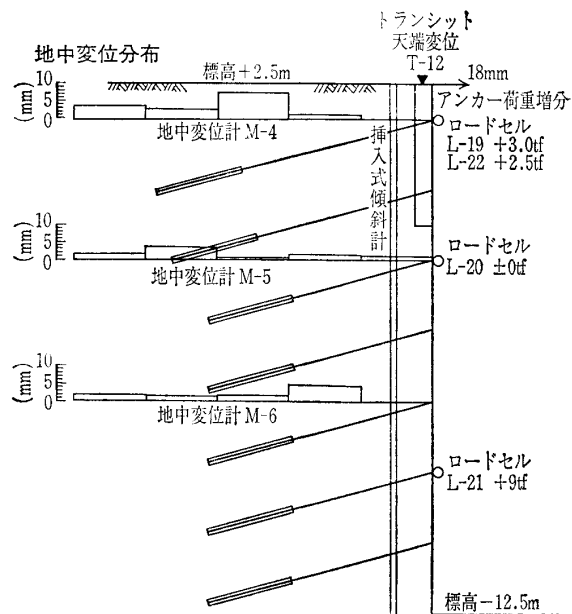


図-6 コンクリート吹付けアンカー部の計測断面、計測結果

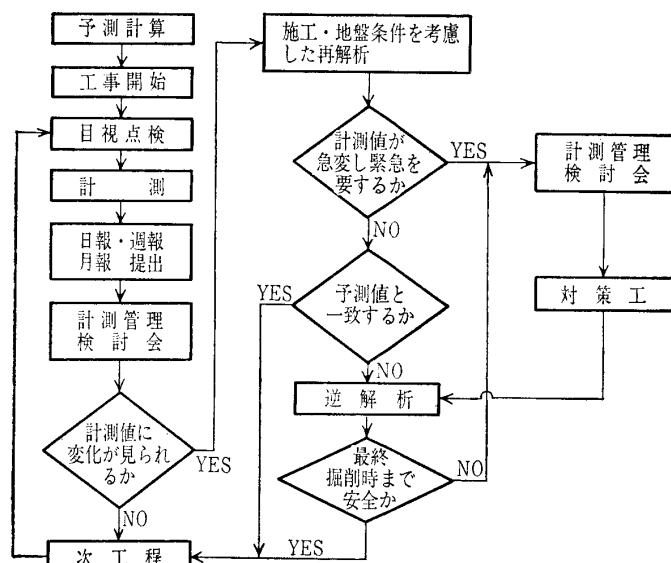


図-7 計測管理のフロー

い1 mm という解析結果を得た。またアンカー荷重は初期からほとんど変化が見られなかった。

日常の計測管理は計測結果と管理基準値を比較することで行った。

7. 計測結果

7.1 親杭・アンカー部の計測結果

杭頭の変位は、放水路ピット北側の一部で山側に大きく変位した(約50 mm)。これは天端付近が比較的緩い状態の崖錐であり、設計時の第1段アンカー荷重が過大に評価されたためと考える。どの計測断面においても一次掘削・1段アンカー打設時に変化した、以降は変化がみられなかった。ほとんどの断面で、計測値は解析値を下回った。

アンカー荷重は周辺のアンカー削孔時に、約10%急増するものがみられた。周辺アンカー削孔時の水圧および地山の乱れの影響を受けたものとする。

山留め背面の地中変位、挿入式傾斜計による親杭の変位・親杭の曲げ応力とも施工開始より徐々に増加したが、とくに大きな変化がみられず、変位・応力とも予測解析値を上回ることがなかった。

7.2 コンクリート吹付けアンカー部の計測結果

コンクリート吹付けアンカー部のうち、放水路ピット西側土留めのうち北半分で大きな動きが計測された。

施工ステップごとの土留めの挙動を図-8に示す。計測項目別に主な動きを以下に示す。

① 挿入式傾斜計

三次掘削時に挿入式傾斜計ガイドパイプに計器が挿入できなくなった。このため工事を一時中止し、再ボーリングして再びガイドパイプを設置した後工事を再開したが、第5段アンカー削孔時に地山の変位が進みやはり挿入不能となった。

② トランシット

図中の天端変位はトランシットによる計測値であるが、第2段アンカー緊張後増加し続け、最終的に18 mm まで変位した。有限要素法による予測値は1 mm 以下であり、予測値をはるかに上回る結果となった。これは弾性定数の推定が適切でなかったことが原因の一つと考えられた。

③ 地中変位計

図中の M-4, 5, 6 は天端からの深度がそれぞれ1, 5, 9 m に設置した地中変位計である。ここで用いた地中変位計は、水平奥行き方向に2 m スパンで計測素子が5箇所設置されているが、図中の地中変位は山留め表面から水平奥行き10 m までの地山の総変位量である。M-4 は二次緊張までほとんど変化がなかったが、天端付近に掘削土を仮置きした時に変位が始まった。以後、掘削・削孔にしたがい変位が増加し最終的に27 mm まで変位した。M-5, 6 と

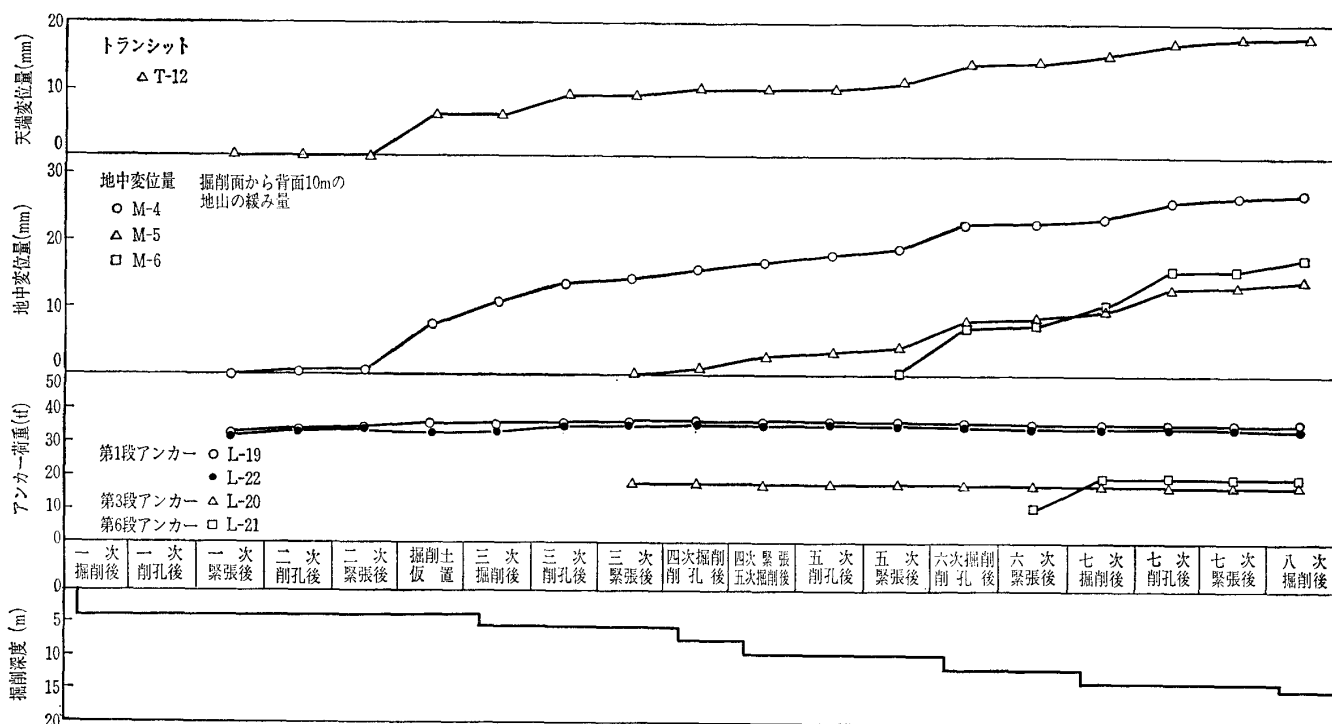


図-8 コンクリート吹付けアンカー部 施工ステップごとの挙動

報告—2027

も、六次掘削の削孔時に変位が進み、最終的にM-5で約13 mm、M-6で約16 mm変位した。

④ アンカー荷重

1段目アンカー荷重が、掘削土仮置きまで徐々に約3 tf増加した。また三次アンカー削孔時に約2 tf増加した。

6段目アンカー荷重が、七次掘削時に約9 tf増加した。

天端変位・地中変位とも、全施工ステップを通じ動きがみられるのに対し、アンカー荷重は一時的な動きに止まっている。3段目アンカー荷重のように動きがほとんどなかったアンカーもあった。当位置で使用しているアンカー鋼線は、1 mm伸ばすためには0.7 tfの荷重が必要である。しかしアンカー荷重と地中変位の計測結果からはこの関係が成り立っていない。この原因としては以下の点が考えられる。

- 1) アンカーセット時のなじみによる張力ロスや、アンカー体および定着岩盤のクリープ現象等のため。
- 2) 天端が鉛直方向に変位した。

以上のように第5段アンカー削孔時に、再設置した挿入式傾斜計ガイドパイプに計器が挿入できなくなったため、土留め表面付近の地山の変位分布を知ることが不可能となり、安全管理上問題となった。そこで、六次掘削工前に検討会を実施し、以下の対策をとることとした。

① 掘削方法の変更

コンクリート破砕器による掘削を取り止め機械掘削とし地盤の緩みを極力低減する。

② アンカー削孔時の水圧管理

アンカー削孔はアンカー荷重を測定しながら、極力低水圧により施工する（通常の最大水圧約15 kgf/cm²から2～7 kgf/cm²に変更）。

③ 施工エリアの制限

天端付近は、進入・作業禁止範囲の明示を行い、重機作業および掘削土の仮置きなどは行わない。

④ 監視の強化

掘削面の吹付けコンクリート表面の状況をよく観察しながら施工する。レベルにより天端の沈下測定を追加実施する。

⑤ 補強対策の実施

標高-9.0～-12.5mの掘削面をロックボルトで補強する（2 mピッチの千鳥配置、 $L=5$ m）、標高-10.0～-12.5mの掘削面のコンクリート吹付け厚さを20 cmとする（従来は10 cm）。

⑥ アンカー緊張力の変更

六次施工よりアンカーの緊張力を設計導入力_の120%とする（従来は100%）。

以上の対策を施すことにより、掘削工事は着手後約8 か月を経て無事終え、放水路ピットく体工事に着手することができた。

当該地盤の大部分は、 $[C_M] \sim [C_H]$ 級の比較的堅固な岩盤であったが、一部に大きな変位が計測された。これは、この地盤は比較的亀裂が多かったこと、重機進入による繰返し荷重を受けたこと、掘削時の応力解放により地山の変位が進んだためと考えられる。

最終掘削状態での計測値は図—6のようになった。

8. おわりに

この報告では、大飯原子力発電所増設工事のうち、主として放水路ピット掘削工事におけるコンクリート吹付けアンカー部の、設計・施工・計測結果について述べてきた。その結果掘削に伴って地中変位の増大が見られるような地山でも、アンカーを用いて垂直な大規模掘削が経済的かつ安全に施工できることが立証された。このような構造の山留めを施工する際には、施工計画時に情報化施工の概念を取り入れた十分な計測計画を立案し、異常の早期発見に努め、素早い対応ができる組織・体制造りが重要であると考ええる。

参 考 文 献

- 1) 土質工学会編：アースアンカー工法，1976。
(原稿受理 1990.2.5)