

水理調査研究の概要

地下水の水理に関する調査研究では、地表から地下深部における地下水流動特性を明らかにするための調査・解析技術の構築を目標として、研究所設置地区およびその周辺地区を対象に、表層水理調査、ボーリング調査を実施している。また、これら調査結果に基づき水理地質構造モデルの構築・更新、地下水流動解析を実施している。

表層水理調査

- 目的：地下水流動解析における上部境界条件となる涵養量や地下水位分布の把握
- 実施内容
 - ・水収支法による涵養量の算定に必要な河川流量、降水量、蒸発散量（牧草地、森林）の観測
 - ・地盤水理学的手法による涵養量の推定に必要な土壌水分分布の観測
 - ・地下水位の観測（各観測の実施位置は図-1を参照）
- 今後の予定
 - ・水収支法による涵養量の算定（平成16年度から）
 - ・地盤水理学的手法による涵養量の推定（平成16年度から）



図-1 表層水理調査観測位置

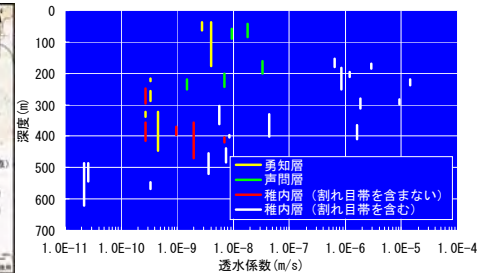


図-2 透水係数 (HDB-1,3,4,5,6,7,8)

ボーリング調査

- 目的：地下深部の地下水流動特性の把握
- 実施内容
 - ・水理試験・流体検層（HDB-1～11孔）
 - ・地下水水圧の長期観測（HDB-1,2,3孔）
- これまでの知見（図-2）
 - ・声間層の透水係数は $10^{-9} \sim 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$
 - ・稚内層の透水係数は $10^{-11} \sim 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$
 - ・高透水区間の多くが層理面に高角に交わるせん断性の割れ目帯（以降、割れ目帯）中に存在している⇒割れ目帯がみずみちとなる可能性がある
 - ・透水係数は深度の増加とともに低下する傾向がある（割れ目帯中も同様）

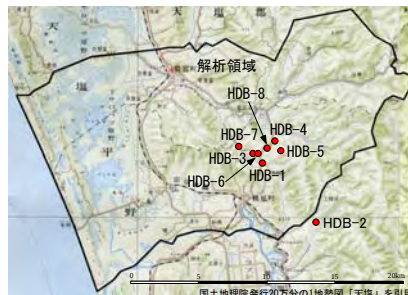


図-3 解析領域

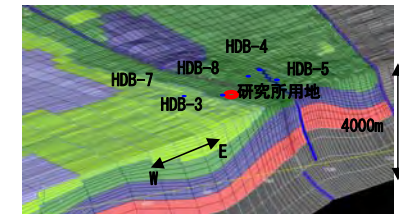


図-4 解析メッシュ

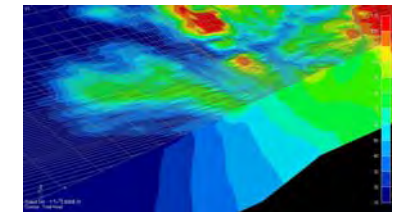


図-5 解析結果の一例（全水頭分布）

水理地質構造モデルの構築

- 目的：水理地質環境の理解
- 実施内容
 - ・研究所設置地区を対象とした地下水流動解析のための解析領域を設定（図-3）
 - ・各地層の透水係数の分布や深度依存性を考慮した水理地質構造モデル（連続体モデル）の更新（図-4）
 - ・地下水流動解析を実施中（図-5）
 - ・割れ目帯の分布を考慮した水理地質構造モデルの構築、地下水流動解析を実施中

地球化学調査研究の概要

地下水の地球化学特性調査では、揚水した地下水とコアから抽出した間隙水を分析することにより、地下水の水質の空間分布を効率的に把握できることが明らかとなった（図-6）。現在、これらの結果をもとに地下水の水質形成過程や分布についての検討を実施中である。

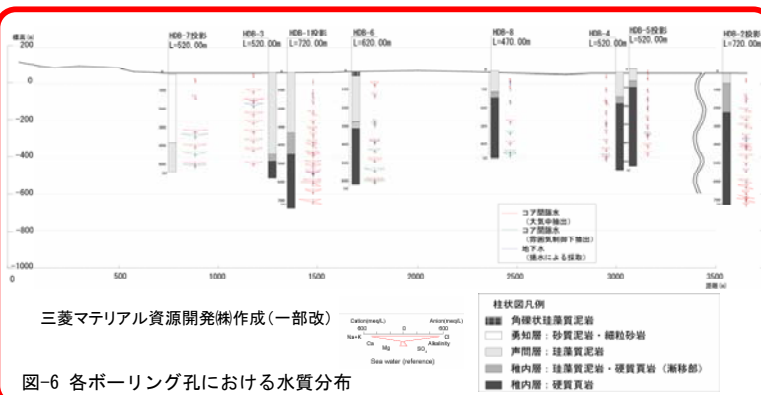


図-6 各ボーリング孔における水質分布

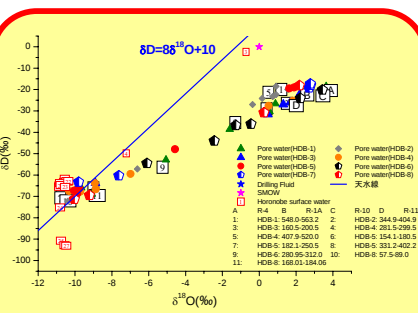
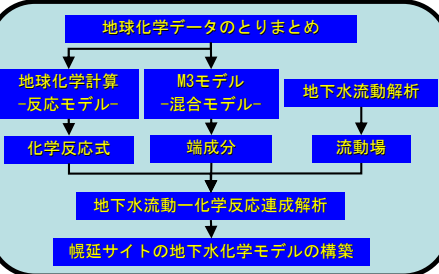


図 各ボーリング孔から採水した地下水と間隙水の酸素・水素同位体比

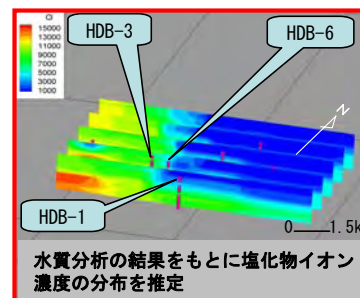
結果

- ①本地域の地下水は深度が深くなるにともなって溶存成分濃度も高くなる傾向を示す。
- ②各ボーリング孔ごとに溶存成分濃度分布を比較すると、HDB-1,3孔の方がHDB-4,5孔より浅い深度から高くなる傾向を示す。
- ③酸素・水素同位体比の分布は、溶存成分濃度分布の分布と調和的である。
- ④酸素・水素同位体比から、降水と深部の塩水系地下水が混合している可能性が考えられる。
- ⑤深部の塩水系地下水の起源は、現海水ではなく、過去の海水が岩石と反応した可能性が考えられる。



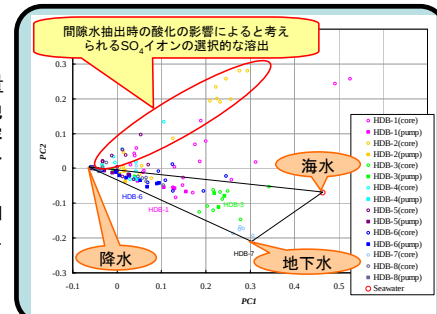
M3解析手法を用いた検討

Multivariate Mixing and Mass balance (M3:SKB)を用いて多変量解析を実施した。その結果、本地域の地下水は、表層部の降水と溶存成分濃度の高い地下水との混合が優勢であることが示唆された。また、大気雰囲気下で間隙水抽出を行った際の酸化の影響と考えられる SO_4 イオンの選択的な溶出が確認された。



モデル化の進め方

- ①ボーリング調査などにより取得されたデータを取りまとめ、品質チェックを行い解析に必要なデータセットを構築する。
- ②データセットをもとに、地球化学モデルとして岩石-水反応、混合モデルを検討する。
- ③地下水流動解析と比較し、地球化学モデルの妥当性とする。



地下水の水質の3次元分布

各ボーリング孔から得られた地下水の地球化学特性および、M3解析の結果をもとにクリギング法により地下水の水質分布を推定した。

今後の予定

- ①原位置で取得されるデータと解析結果との比較による解析手法の検討
- ②地下水流動解析と地球化学計算を組合わせた解析の実施
- ③複数のモデル化手法の適用性の確認

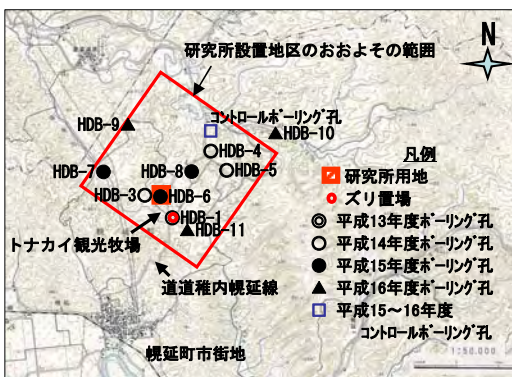
2-3 幌延深地層研究計画 一施設計画一

核燃料サイクル開発機構 幌延深地層研究センター
白戸伸明, 畠山信也, 小島亘, 森岡宏之, 尾留川剛

地下施設は、3本の立坑を設置し、複数の深度に水平坑道を展開する計画である。地下施設の設計・施工計画においては、研究環境を確保し、施設を安全に建設・維持できることが基本的な要件であるため、地下施設における調査研究の内容のほか、地下施設の安全性を確保するために岩盤特性に応じた空洞の安定性を評価すると共に、防災対策（可燃性ガス、坑内作業環境、火災等）を検討している。さらに、一般の人々が深地層を体験する場であることも考慮する。

研究用地

研究用地は、幌延町市街地から北東方向約3.5kmに位置し、面積は約19.1haである。地形は、丸みを帯びた丘陵地に囲まれた盆地状の部分にあたる緩い傾斜地である。



* 国土地理院発行5万分の1地形図「雄信内」「豊富」を使用

施設全体計画

研究用地のうち約6.8haを造成して地上施設および地下施設用地として計画している。施設用地の造成高は標高60mである。



平成16年11月15日撮影

地山性状

地質は新第三紀の堆積岩で、珪藻質泥岩（声間層）および硬質頁岩（稚内層）で構成され、両者とも軟岩に属する。地質環境の特徴は、可燃性ガスを賦存し、地下水は塩水系である。

岩盤の物理性状および初期地圧（HDB-3・6孔）

項目	声間層	稚内層
<岩盤物理性状>		
単位体積重量	14~16 kN/m ³	16~18 kN/m ³
空隙率	60~65 %	40~50 %
一軸圧縮強度（ボーリングコア）	5 MPa程度	5~25 MPa
透水係数（原位置試験）	10 ⁻⁹ ~10 ⁻⁸ m/s	10 ⁻¹¹ ~10 ⁻⁶ m/s
耐久性（I _d ）	90 %以上	95 %以上
膨潤ひずみ指数（円周拘束）	0.04 %以下	0.03 %以下
<初期地圧（水圧破壊法による）>		
水平面内	E-W	
最大主応力方向	1.2:0.8:1.0	
主応力比	（水平面内：水平面内：鉛直応力） 最大主応力：最小主応力	

* 鉛直応力は土被り圧相当を仮定

地下施設の配置計画

東立坑 深度530m目途
西立坑 深度505m目途
換気立坑 深度500m目途

地下施設の掘削および支保計画

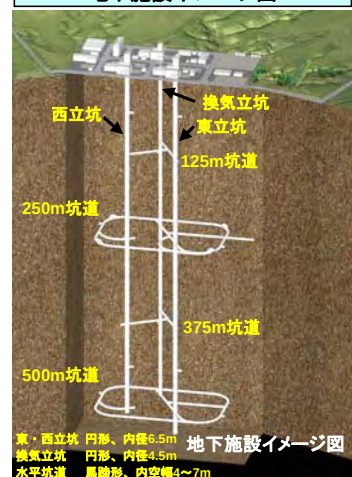
<掘削工法>

東立坑 発破工法
西立坑 機械工法（自由断面掘削機）
換気立坑 機械工法（自由断面掘削機）
水平坑道 機械工法（自由断面掘削機）

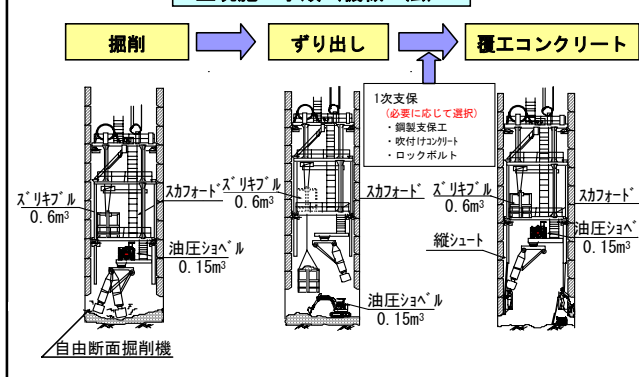
<支保工法>

立坑 ショートステップ工法
水平坑道 NATM

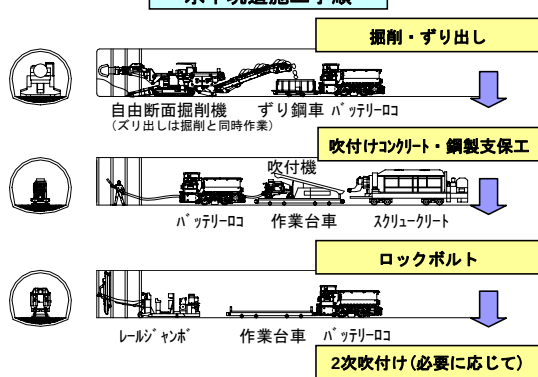
地下施設イメージ図



立坑施工手順（機械工法）

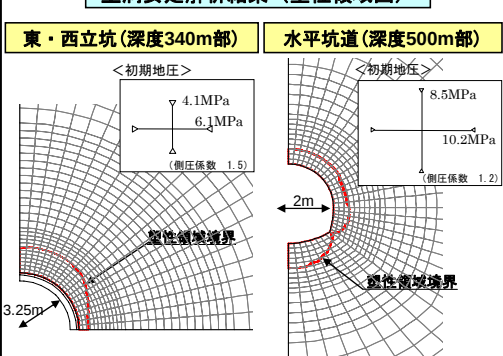


水平坑道施工手順

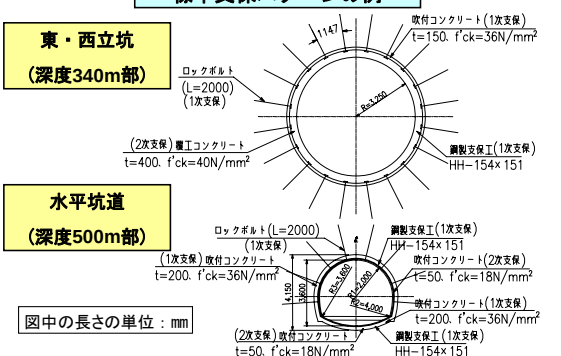


空洞の安定性評価

空洞安定解析結果（塑性領域図）



標準支保パターン例



環境調査

モニタリング調査等の例



2-4 幌延深地層研究計画 ー第2, 3段階研究計画案ー

核燃料サイクル開発機構 幌延深地層研究センター 松井 裕哉 東海事業所処分研究部 青柳 茂雄, 牧野 仁史

計画策定に当たっての基本的考え方

- ①全体
- ・研究所設置地区内の地質環境の知見に基づき、地下施設建設時に生じると予測される諸現象を考慮しつつ、現在の研究施設の坑道レイアウト・工程をできる限り踏襲し調査研究計画とする
 - ・深地層の科学的研究・処分技術の信頼性向上・安全評価手法の高度化に関する研究が合理的・体系的に進められるものとする。
- ②第2段階調査計画
- ・地質環境モデルの検証及びその更新のため、研究対象地層である声間層、稚内層それぞれについて可能な限り3次元的地質環境データの取得を試みる。
 - ・第3段階研究の中心となる250m坑道、500m坑道周辺の地質環境に関する詳細なデータ取得を試みる。これは、第3段階の調査試験計画を最適化するとともに、成果の一般化(地質環境への掘削影響を合理的に説明するメカニズムの解明)に寄与する。
 - ・建設への影響を最小限にとどめる調査試験計画とする。
- ③第3段階調査計画
- ・研究ステージ(250m坑道及び500m坑道)の完成時期が異なることから、深部においてデモンストレーションが必要な試験と長期間にわたる試験期間が必要な試験を分離して検討する。
 - ・処分技術の信頼性の向上に関する研究のうち、支保部材の施工性や耐久性に関する試験は、地質環境への影響を考慮し、他の調査試験への影響がないと考えられかつ建設工程に大きな影響を及ぼさない場所で実施する。

各調査試験の相互関連

深地層の科学的研究

第1段階における地下施設建設に伴う掘削影響の予測結果を第2段階で検証するとともに、さらにそれをフィードバックし地表からの調査から客観的かつ信頼度の高い地質環境モデルを構築する技術を例示する。また、第3段階までの地質環境変化のモニタリングを継続し、第2段階で構築した地質環境モデルを長期的変化を表現できるよう改良するとともに、地質環境長期モニタリング技術の適用性の検討を実施する。本成果は、第2, 3段階で計画している処分技術の信頼性向上・安全評価手法の高度化研究を進める上でのモデル及び各種境界条件となる。

処分技術の信頼性向上に関する研究

第1段階で実施する人工バリアシステム(オーバーバック、緩衝材など)の試設計及び第2段階までで得られるサイトスケール・ブロックスケールの地質環境モデルを用い、原位置試験場所の選定を実施する。選定した試験場所において設計仕様に従った人工バリアシステムを設置し、第3段階終了時までのモニタリング及び解体調査を実施することにより、実環境を想定した人工バリア設計手法を確立し実証する。本研究実施時に、第2段階までで構築したブロックスケールモデルの更新を図る。

安全評価手法の高度化に関する研究

第1段階で研究の全体計画を策定するとともに、第2次とりまとめで示されたリファレンスケースで考慮されている断層、天然バリア(EDZも含む)、人工バリア中のトレーサー試験を主として第3段階に行い、その結果に基づき、ブロックスケール、ディテイルスケールにおける地質環境モデルの更新を図る。

さらに、最終的には、深地層の科学的研究で構築した短期・長期にわたるサイトスケール〜ブロックスケールまでの地質環境の変化を表現できるモデルと合わせ、地下〜生物圏までの物質移動を表現する統合解析を試行し、実際の地質環境を対象とした場合の地表〜地下深部にいたる体系的な物質移行評価技術を例示する。

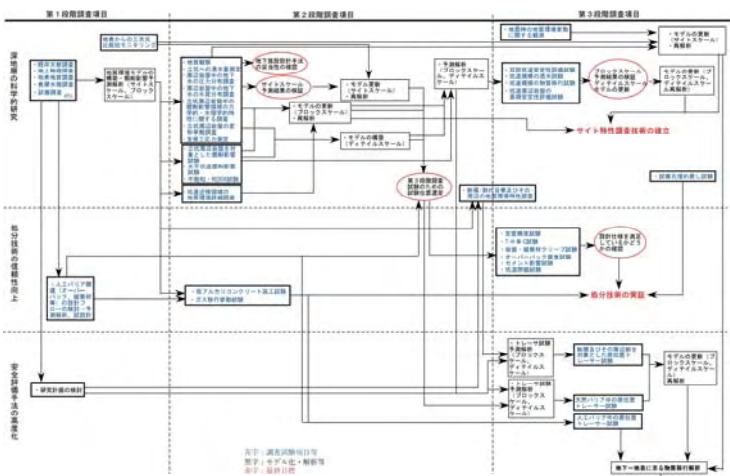


図 各調査試験項目間およびモデル化の相互関連

表 第2, 3段階において計画中の主な調査試験

分野	目的	主な試験項目	試験概要
第2段階 深地層の科学的研究	第1段階で構築した地質環境モデルおよび施設設計手法の検証	立坑内での地質観察、湧水量測定	立坑および周辺部における壁面観察、湧水量測定、岩盤内変位測定など
	第3段階原位置試験の試験計画策定のためのデータ取得	立坑・坑道周辺部の地質環境詳細調査	検層・孔間物理探査、コア観察、単孔・孔間透水試験、応力測定、孔内載荷試験、室内試験等
	第3段階の研究の中心となる250m坑道、500m坑道周辺の地質環境に関する詳細なデータ取得	水平坑道短期影響試験／不飽和・REDOX試験	検層・孔間物理探査、コア観察、単孔透水試験、応力測定、孔内載荷試験、室内試験等(坑道掘削前・中・後)
処分技術の信頼性向上	処分技術の実証・高度化(長期観測が必要な調査試験)	塩アルカリ性コンクリートの施工性確認試験	取寄付け、施工応力測定、周辺岩盤中の水質モニタリング、コンクリートサンプリング・分析等
		ガス移行挙動試験	縦置き式人工バリアシステムを模擬、模擬オーバーバックからのガス移行を対象とした遡進材中の各種モニタリング
第3段階 深地層の科学的研究	新規坑道を既存坑道との間隔距離を定めて掘削、単一の水平坑道掘削影響試験とほぼ同等の試験内容	双設坑道安定性評価試験	新規坑道を既存坑道との間隔距離を定めて掘削、単一の水平坑道掘削影響試験とほぼ同等の試験内容
	堆積岩を対象とした地質環境の短期・長期変動の把握	坑道周辺岩盤の長期安定性評価試験	長期変形計測、孔内透水・力学試験、孔間物理探査など
		断層・割れ目帯及びその周辺の地質環境特性調査	断層を貫く坑道あるいは数本のボーリング孔を掘削、孔間物理探査、単孔・孔間透水試験、室内物理試験等
		地震時の地質環境変動に関する観測	地震動計測(加速度計・速度計)、水圧・水質モニタリングなど
		T-H-M-C試験/定置槽確認試験	縦置き式人工バリアシステムを模擬、模擬オーバーバック・遡進材中の各種モニタリング
処分技術の信頼性向上	オーバーバック腐食試験	縦置き式人工バリアシステムを模擬(縮小スケール・実規模、コンクリート支保の有無)・模擬オーバーバック・遡進材中の各種モニタリング	縦置き式人工バリアシステムを模擬(縮小スケール・実規模、コンクリート支保の有無)・模擬オーバーバック・遡進材中の各種モニタリング
	セメント影響試験	遡進材中の各種モニタリング	セメント材中の各種モニタリング
	岩盤・遡進材フリップ試験	縦置き式人工バリアシステムを模擬、模擬オーバーバック・遡進材中の各種モニタリング(力学的計測主体)	縦置き式人工バリアシステムを模擬、模擬オーバーバック・遡進材中の各種モニタリング(力学的計測主体)
	坑道閉鎖試験	埋め戻し材による既存坑道の埋め戻し後、埋め戻し材および坑道周辺岩盤中の各種モニタリングを実施	埋め戻し材による既存坑道の埋め戻し後、埋め戻し材および坑道周辺岩盤中の各種モニタリングを実施
安全評価手法の高度化	安全評価手法の実証・高度化	人工バリア中/天然バリア中/断層及びその周辺部を対象としたトレーサー試験	T-H-M-C試験等のサイト、水平坑道短期影響試験サイト(EDZ)、断層・割れ目帯及びその周辺の地質環境調査サイトなどにおける孔間トレーサー試験

参考資料(公開技術資料)

「幌延深地層研究計画-第2, 3段階における全体研究計画案」 JNC TN 5400 2003-004

「幌延深地層研究計画における処分技術に係わる原位置試験概念の検討」 JNC TN8400 2004-002

「人工バリア等の設計検討および幌延の地質環境を条件とした原位置試験環境の検討」 JNC TN8400 2004-006

幌延における遠隔監視システム(アクロス)の概要

ACROSS (Accurately Controlled Routinely Operated Signal System: 精密制御定常信号システム)

アクロスは、時間変動の検知も考慮した物理探査の手法の一つで、位相と周波数を精密に制御した連続的な弾性波と電磁波を送信し、地盤などの対象からの応答を計測・解析して、その構造や状態の変化を観測する手法である。

幌延深地層研究計画では、地下研究施設の建設(立坑掘削)に伴い生じるであろう地質環境の変化を把握するため、東濃地科学センターにおいて開発・改良等が進められてきたアクロス技術を用いた遠隔監視システムの送受信機器を幌延町北進地区に設置し、調査・研究を実施することとしている。

電磁アクロスは、H16年度に設置終了し、弾性波アクロスは、H17年度に設置の予定である。

・電磁アクロスの概要(H16:送受信機器を設置し、現在試験観測中)

送信点モニタと受信点の観測データを分析することにより、立坑周辺の地質変動などを、モニタリングする技術を研究開発している。

幌延におけるアクロス設置予定図

本報告では、幌延地域における「天然現象の過去から現在にわたる変動の時間的・空間的变化(変動のプロセス)」について、数100万年オーダーおよび数10万～数千年オーダーを対象とした研究の一例を紹介する。

今後、幌延地域において隆起、汀線の移動など広域的で緩慢な天然現象を数万年以上の時間スケールで評価・予測するに当たっては、活断層や活褶曲など活構造の履歴と堆積域の移動、およびその影響等に関する情報を十分検討する必要がある。

低アルカリ性セメント開発の必要性

軟岩内に処分施設を設置する場合、空洞の支保工としてセメント系材料の使用が検討されているが、地下水がセメント系材料と接触することによって高アルカリ化(pH>12)し、セメント系材料周辺の緩衝材および岩盤を変質させ、人工バリア・天然バリアとしての性能に影響を及ぼす可能性がある。
「第2次取りまとめ」では、支保工として低アルカリ性セメントの使用を推奨している。

・サイクル機構が提案する低アルカリ性セメント：HFSC (High Elyash contained Silicafume Cement)

普通ポルトランドセメントにボゾラン材料*を添加し、ボゾラン反応**により高pHの原因となるCa(OH)₂を低減することを目的としたセメント。

*ボゾラン材料：天然産および人工のシリカ質混合材（フライアッシュ、シリカフュームなど）

**ボゾラン反応：可溶性シリカであるボゾランがCa(OH)₂と反応し、硬化して難溶性のシリカ質化合物を生成する反応

<低アルカリ性(pH)の目標値>

セメントの模擬浸出液(pH=10~13)に対するベントナイトの溶解試験から、ベントナイトの溶解はpH11以上でpHとともに増大することが示唆されている（久保他、土と基礎、46-10、pp31-34（1998））ため、本研究では

pHの目標値をpH≤11に設定

した。

開発課題

1. 施工性の確認

・吹付けコンクリート、場所打ちコンクリート(セグメント)、グラウトとしての施工性の確認

2. 目標品質の達成

・pH：**11以下**

・圧縮強度：材齢28日で場所打ちコンクリートで**40N/mm²以上**、吹付けコンクリートで**30N/mm²以上**
(幌延地下施設の基本設計強度)

3. 品質変動の把握

・フライアッシュの変動に起因するコンクリートの品質変動の把握

4. 耐久性の評価

・鉄筋の腐食挙動を把握し、長期間の使用に対する耐久性を評価

HFSC中のボゾラン材料の混合割合(wt%)

	OPC	SF	FA
HFSC226	20	20	60
HFSC325	30	20	50
HFSC424	40	20	40

OPC: 普通ポルトランドセメント

SF: シリカフューム FA: フライアッシュ

1. 施工性の確認

～吹付けコンクリート施工試験・実規模セグメントの製作

吹付けコンクリートとしての施工性

配合：HFSC226, 325, 424

吹付け施工は可能：圧送、付着、リバウンド、粉塵などOPCと同等
透水性はOPCと同等⇒透水係数：～10⁻¹⁰ m/s (HFSC424)

場所打ちコンクリート(セグメント)としての施工性

HFSC226でセグメントを作成⇒1年間の気中および水中養生

寸法：外径5600mm、幅1200mm、厚さ250mm

試験結果

- ・製造に影響する問題は生じない
- ・ひび割れ発生荷重・破壊荷重ともに設計値をクリア
- ・気中養生で鉄筋の腐食を確認



3. 品質変動の把握

・FA：石炭火力発電所から発生する工業副産物

⇒炭種の変化によって品質が変動する可能性

・使用したFA：JISⅡ種相当品⇒1ヶ月ごと(炭種が変わると想定される期間)に採取

・確認したコンクリートの性状

硬化前性状：スランブフロー*

硬化後性状：圧縮強度

スランブフロー試験結果

・FAの変動によるばらつきは大きい、HFSC混練時の品質管理で対応可能。

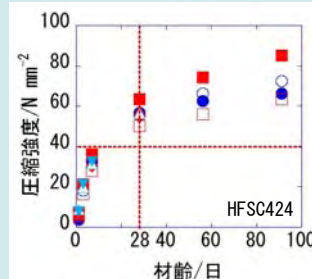
圧縮強度試験結果

・圧縮強度の変動は通常の管理範囲内

・場所打ちコンクリートはHFSC424, w/c=27.3%で目標強度(材齢28日で40N/mm²)をクリア

*スランブフロー：

硬化前のコンクリートのやわらかさを示す指標。プレート上で底のない所定の容器に硬化前のコンクリートを詰め、容器を引き上げたときのプレート上に広がった試料の直径で表す。



2. 目標品質の達成～pH低下挙動

浸出液のpH測定方法

・蒸留水中に浸漬(液固比2:1)

①粉体浸漬

・φ5cm×h10cmの供試体を28日間水中養生したのち、0.5mm以下に粉砕
⇒所定の浸漬期間でpH測定

②固体浸漬

・φ5cm×h2cmの供試体を浸漬

⇒所定の浸漬期間後に0.5mm以下に粉砕後、再度蒸留水に浸漬(液固比2:1)

⇒1日後のpHを記録

試験結果

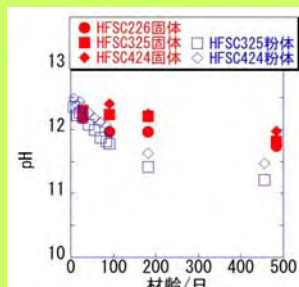
・pH低下速度

- 固体浸漬<粉体浸漬

- HFSC424<HFSC325<HFSC226

(ボゾラン材料の割合が多いほど低下速度が大きい)

・実際の構造物では、pH低下にさらに時間がかかることが想定される



長期のpH低下挙動についてはモデル化による解析が必要
→現在、モデル化に必要な基礎データの取得を実施中

4. 耐久性の評価～鉄筋腐食挙動

試験条件

配合：HFSC226, OPC

供試体寸法：φ10cm×h20cm

暴露条件：海上、海中(0.5年, 1年)

使用鉄筋：SR13

1年後の鉄筋腐食状況

・OPC：腐食は認められない

・HFSC：表面に腐食を確認

→腐食面積率=5~20%

長期の暴露試験を継続中

暴露状況

(海上)



鉄筋腐食状況

(HFSC226/1年)

まとめ

1. 施工性の確認

吹付けコンクリート、場所打ちコンクリート(セグメント)としての施工性を確認

グラウトとしての施工性は未確認

2. 目標品質の達成

pH≤11：室温条件では未確認

圧縮強度：地下施設の基本設計強度をクリア

3. 品質変動の把握

FAの変動による品質への影響は少ない(施工上の管理で対応可能)

4. 耐久性の評価

HFSCに埋め込んだ鉄筋は海中暴露1年で腐食を確認

鉄筋腐食速度の精度向上のために長期試験を継続中