

# 低アルカリ性セメントの 処分場における長期適用性 に関する検討

植田浩義, 兵藤英明, 鈴木覚  
原子力発電環境整備機構

廣永道彦, 山本武志, 西田孝弘, 西内達郎, 杉山大輔  
電力中央研究所

2008年12月  
原子力発電環境整備機構

2008年11月

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記へお問い合わせください。

〒108-0014 東京都港区芝4丁目1番地23号 三田NNビル2階  
原子力発電環境整備機構 技術部  
電話 03-6371-4004 (技術部) FAX03-6371-4102

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:  
Science and Technology Department  
Nuclear Waste Management Organization of Japan  
Mita NN Bldg, 1-23, Shiba 4-chome, Minato-ku, Tokyo 108-0014 Japan  
Phone +81-3-6371-4004 Fax +81-3-6371-4102

©原子力発電環境整備機構  
(Nuclear Waste Management Organization of Japan) 2007

# 低アルカリ性セメントの 処分場における長期適用性 に関する検討

植田浩義, 兵藤英明, 鈴木覚  
原子力発電環境整備機構

廣永道彦, 山本武志, 西田孝弘, 西内達郎, 杉山大輔  
電力中央研究所

2008年11月  
原子力発電環境整備機構

## 目次

1	はじめに.....	1
1.1	背景.....	1
1.2	目的.....	1
1.3	報告書の構成.....	2
2	材料試験に基づく低アルカリ性セメントの適用性調査.....	3
2.1	低アルカリ性セメントの種類と特徴.....	3
2.2	基礎物性評価.....	6
2.2.1	試験項目及びその必要性.....	6
2.2.2	初期物性.....	8
2.2.3	硬化体物性試験.....	11
2.2.4	耐久性.....	18
2.3	低アルカリ性セメントに用いる補強材の適用性評価.....	40
2.3.1	長期耐久性を考慮した補強材の選定.....	40
2.3.2	補強材を使用したコンクリートの基礎特性.....	43
2.3.3	補強材を使用したコンクリート部材の力学特性.....	54
2.4	材料試験に基づく低アルカリ性セメントの適用性の評価.....	60
3	処分場の環境条件における低アルカリ性セメントの適用性評価.....	61
3.1	各部位の要求機能に関する検討.....	61
3.2	処分環境条件の設定.....	64
3.3	建設工程, 施工方法, 基準等の調査.....	65
3.4	低アルカリ性セメントの適用性評価.....	88
4	まとめ.....	95
	参考文献.....	96
	謝辞.....	98

## 目次

図 2.1-1	フライアッシュ粒子表面からの距離と反応相の Ca/Si 比 (材齢 378 日)	4
図 2.1-2	ポゾラン反応相の形成	1
図 2.2-1	断熱温度上昇量	12
図 2.2-2	圧縮強さ経時変化	13
図 2.2-3	空隙率経時変化	13
図 2.2-4	空隙率と強度の関係	13
図 2.2-5	乾燥収縮ひずみ経時変化	15
図 2.2-6	乾燥収縮ひずみと質量変化の関係	15
図 2.2-7	自己収縮ひずみ測定結果	17
図 2.2-8	自己収縮ひずみ測定結果	17
図 2.2-9	予備乾燥後の空隙径分布	18
図 2.2-10	各種セメント硬化体の中性化深さ	19
図 2.2-11	浸漬方法	21
図 2.2-12	初期試料の粉末 X 線回折結果	23
図 2.2-13	初期試料の熱分析結果 (DSC)	24
図 2.2-14	Ca 濃度と液固比の関係 (粉末試料, 浸漬 52 週後)	25
図 2.2-15	浸漬前後の XRD 回折結果 (粉末試料, 浸漬 52 週後, 海水)	26
図 2.2-16	$^{29}\text{Si}$ -NMR スペクトル(粉末試料, 液固比 $1000\text{cm}^3/\text{g}$ )	29
図 2.2-17	浸漬前後の空隙径分布 (薄片試料, 浸漬期間 52 週, カッコ内は総空隙率)	30
図 2.2-18	浸漬液の累積 Ca 溶出量経時変化 (ブロック試料)	31
図 2.2-19	曝露面で沈殿生成した炭酸カルシウムの結晶とその背面の水和物相	32
図 2.2-20	浸漬液の pH 経時変化 (ブロック試料)	32
図 2.2-21	浸漬液の累積 Si 溶出量経時変化 (ブロック試料)	33
図 2.2-22	Ca/Si モル比分布 (ブロック試料, 浸漬 82 週後)	35
図 2.2-23	曝露面における SEM 観察像	36
図 2.2-24	Cl 分布 (ブロック試料, 海水系模擬地下水)	37
図 2.2-25	アルカリ骨材反応試験結果	39
図 2.3-1	材齢 28 日強度で正規化したコンクリートの圧縮強度の経時変化	45

図 2.3-2	コンクリートのヤング係数の経時変化.....	46
図 2.3-3	コンクリートの引張強度の経時変化.....	47
図 2.3-4	コンクリートの曲げ強度の経時変化.....	48
図 2.3-5	コンクリートのクリープ係数の経時変化.....	49
図 2.3-6	単位水量を考慮したクリープ定数の計算値と実験値の比較.....	50
図 2.3-7	コンクリートの乾燥収縮ひずみの経時変化 .....	51
図 2.3-8	単位水量を考慮した乾燥収縮ひずみの計算値と実験値の比較 .....	52
図 2.3-9	セメント種別の破壊エネルギー .....	53
図 2.3-10	破壊エネルギーと繊維添加率の関係.....	53
図 2.3-11	試験体の外観および寸法諸元 .....	55
図 2.3-12	炭素繊維複合材ケーブルを用いた補強筋組み立て状況.....	55
図 2.3-13	炭素繊維複合材ケーブル (CFCC) の外観.....	56
図 2.3-14	セメント種別に応じたコンクリート部材の曲げモーメントと曲率の関係.....	58
図 2.3-15	コンクリート部材の載荷試験におけるひび割れ発生間隔.....	59
図 3.1-1	本報告書で想定した放射性廃棄物処分施設の概念図.....	61
図 3.3-1	都市トンネル工事の流れ .....	68
図 3.3-2	設計手順の概略【山岳トンネル設計施工標準・同解説, 2008, p.52】 .....	69
図 3.3-3	当初設計での標準支保パターンによる設計の流れ【山岳トンネル設計施工標準・同解説, 2008, p.61】 .....	71
図 3.4-1	処分施設に供するセメント系材料の環境条件を考慮した検討すべき事項.....	94

## 表目次

表 2.1-1	低アルカリ性セメントの種類と開発目的.....	3
表 2.1-2	主要なポズラン添加型低アルカリ性セメントの配合.....	5
表 2.2-1	基本物性評価のための検討項目と目的.....	7
表 2.2-2	試験に用いた基本配合.....	8
表 2.2-3	初期物性試験結果および JIS 規格値.....	9
表 2.2-4	透水係数.....	18
表 2.2-5	模擬地下水組成.....	22
表 2.3-1	調査対象.....	41
表 2.3-2	主な短繊維補強材料の特徴比較.....	42
表 2.3-3	検討対象とした繊維の概要.....	43
表 2.3-4	各種セメントを用いた場合の示方配合.....	44
表 2.3-5	試験ケース.....	56
表 3.1-1	支保工に対する要件.....	62
表 3.1-2	地下施設の設計要件.....	63
表 3.3-1	主なトンネル工法の比較.....	66
表 3.3-2	当初設計における設計手法の選択.....	70
表 3.3-3	鉄道トンネルの標準支保パターン【山岳トンネル設計施工標準・同解説, 2008, p.65】.....	72
表 3.3-4	ショットクリートの作用効果【山岳トンネル設計施工標準・同解説, 2008, p.74】 .....	75
表 3.3-5	ショットクリートの配合例.....	77
表 3.3-6	コンクリート覆工の設計巻厚の標準と目安.....	80
表 3.3-7	乾式と湿式の比較.....	81
表 3.3-8	材料の品質管理試験【山岳トンネル設計施工標準・同解説, 2008, p.221】.....	85
表 3.3-9	日常および適宜実施する管理試験【山岳トンネル設計施工標準・同解説, 2008, p.223】.....	87
表 3.3-10	ショットクリートの品質管理基準【山岳トンネル設計施工標準・同解説, 2008, p.225】.....	87

# 1 はじめに

## 1.1 背景

放射性廃棄物の処分事業の円滑な実施においては、処分場の安全性を確保できる見通しを得ながら、経済性および効率性をも念頭においた技術開発を計画的に進めていく必要がある。

処分場においては、処分坑道の力学的安定性の観点から、セメント系材料を使用する必要があると考えられるが、その変質から生じる高アルカリ成分が、緩衝材（ベントナイト）等に与える影響が懸念される。このため、浸出液が高アルカリを呈する従来の高アルカリ性のセメント系材料が使用できない場合の代替材料としてアルカリ性成分の低いセメント（低アルカリ性セメント）の開発が重要視されている。

現在開発されている低アルカリ性セメントは、大別して①クリンカー設計型、②ポゾラン質混和材添加型、③アルミナシリケート系混和材添加型に大別される。これらの低アルカリ性セメントに関しては、開発元や開発目的が異なる等の理由により、データの蓄積状況がそれぞれ異なる。クリンカー設計型の **Low Alkaline cement**（以下 **LAC**）の場合は、処分場に対する適用性を検討した事例があり、適用の可否を判断するためのデータは概ね取得されている。これに対して、ポゾラン質混和材添加型の場合は、近年、各国で研究が実施されているが、**pH**を下げることを主目標として開発されたため、設計、施工、長期安定性に必要なデータが比較的不足している。また、アルミナシリケート系混和材添加型である **Slag Alkaline Cement**（以下 **SAC**）については、**pH**や水和物成分についての限られた情報しか得られていない。

以上のように、各種低アルカリ性セメントのデータ取得状況は大きく異なっており、それぞれの開発元が独自に試験をした結果しか示されていないため、現状入手可能な情報のみでは処分場に適用するための基本特性に関して総合的な比較・検討が難しいのが現状である。

## 1.2 目的

処分場におけるセメント系材料の役割、使用部位の要求機能、施工性等を考慮しながら、材料試験、従来知見の調査・整理、新たに得られる知見を踏まえた上での工学的な評価等を実施することにより、処分場における低アルカリ性セメントの長期適用性を検討する。

なお、本報告書は、原子力発電環境整備機構（以下、機構）と（財）電力中央研究所（以

下、電中研)との「特定放射性廃棄物の地層処分技術に関する協力協定」(以下、協力協定)において規定される「共同研究」として2003年度～2007年度に実施された低アルカリ性セメントの処分場における長期適用性に関する検討結果を取りまとめたものである。

### 1.3 報告書の構成

本報告書は、全4章より構成されており、各章で記述した内容は以下のとおりである。

第1章「はじめに」では、報告書を取りまとめるにあたっての背景、目的に関して記述した。

第2章「材料試験に基づく低アルカリ性セメントの適用性調査」では、既往の文献および低アルカリ性セメントの各種材料試験結果に基づき、低アルカリ性セメントの基本特性および補強材の適用性に関して記述した。

第3章「処分場の環境条件における低アルカリ性セメントの適用性評価」では、各部位の要求機能に関する検討、処分環境条件の設定、建設工程、施工方法、基準等の調査等を既往の文献に基づき行い、第2章で得られた結果を考慮した低アルカリ性セメントの適用性に関して記述した。

第4章「まとめ」では、本報告書で得られた新たな知見に関して記述した。

## 2 材料試験に基づく低アルカリ性セメントの適用性調査

本章では、低アルカリ性セメントの開発状況を集約したうえで、低アルカリ性セメントの基本物性、補強材の適用性に関して材料試験に基づき調査し、低アルカリ性セメントの処分場への適用性を評価した。

### 2.1 低アルカリ性セメントの種類と特徴

現在、国内外で検討されている低アルカリ性セメントの種類と開発目的は表 2.1-1 に示すとおりである。なお、pH が 11.0 程度であれば、セメント系材料から周辺環境へのアルカリ影響を軽減できる可能性が従来より指摘されており(核燃料サイクル開発機構, 1999)、これらの低アルカリ性セメントはいずれもこの条件を満足している。

表 2.1-1 低アルカリ性セメントの種類と開発目的

分類	クリンカー設計型	ポゾラン質混和材添加型			アルミノシリケート混和材添加型
名称	LAC	HFSC	LHHPC	—	SAC
pH	10.5 程度	10.5 程度	10.5 程度	11.0 程度	10.5 程度
開発元	電力中央研究所—太平洋コンサルタント	核燃料サイクル機構 (現原子力開発機構) —大林組	カナダ原子力公社 (AECL)	スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社 (SKB), Posiva 社 (フィンランド)	キエフ工科大学 (ウクライナ)
開発目的	塩類による劣化の防止, pH の低下	pH の低下	低発熱性	pH の低下	pH の低下

上記に示すように、低アルカリ性セメントは大きく 3 種類に大別でき、各種低アルカリ性セメントの詳細は以下に示す通りである。

#### ①クリンカー設計型

この型に分類される LAC は、電力中央研究所—太平洋コンサルタントで開発されたセメントであり、セメントの製造過程において得られるクリンカーの材料設計に変更を加え、クリンカー粉砕後に高炉スラグ微粉末、無水セッコウおよびシリカフェームを混合することにより、生成される主要水和物の特性を改良した低アルカリ性セメントである。すなわち、市販セメントの主要水和物が水酸化カルシウムや高カルシウム型のカルシウムシリケート水和物 (C-S-H) であるのに対して、エトリンガイト ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ) 等の低カルシウム型水和物が生成されるように材料設計されている。

## ②ポゾラン質混和材添加型

この型の低アルカリ性セメントは、市販セメントにポゾラン質（シリカフェームやフライアッシュ）を添加して製造された混合セメントである。ポゾラン質は、セメントの水和反応により生成するポルトランドサイトを消費しC-S-Hを生成する。その結果、ポゾラン質粒子周辺の水和物のCa/Siを低下させる(図 2.1-1 (山本・廣永, 2008) 参照)。このことから、ポゾラン質混和材添加型低アルカリ性セメントの低アルカリ化のメカニズムは、ポゾラン反応によるポルトランドサイトの消費と低Ca/SiのC-S-Hを生成することにあると考えられる。

ポゾラン反応とは、ポルトランドセメントの水和反応の進行とともに、フライアッシュなどのポゾラン粒子周囲に独特な水和物（ポゾラン反応相）を形成する反応である（K. Wesche, 1991）。ポゾラン反応においてはセメント水和物の一つである水酸化カルシウム（ $\text{Ca(OH)}_2$ ）を消費し、Ca-Al-Si系水和物（以下ポゾラン反応相）を生成する。図 2.1-1 は、ポゾラン粒子の表面に近づくほどCa/Si比が低下しており、ポゾラン反応を示す例と考えられる（山本・金津, 2005）。フライアッシュのポゾラン反応は、セメント由来のアルカリ成分（ $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{OH}^-$ ）に対する粒子表層部の非晶質相（可溶性Si）の反応量に支配される（S. Urhan et al., 1987）。また、フライアッシュの粒子に付着しているアルカリ成分（ $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{OH}^-$ ）もポゾラン反応の進行に影響を及ぼすことがエーライト（ $\text{C}_3\text{S}$ ）の焼成クリンカーを用いた実験から明らかとなり、ポゾラン反応のモデルが示されている（K. Ogawa et al., 1980）。

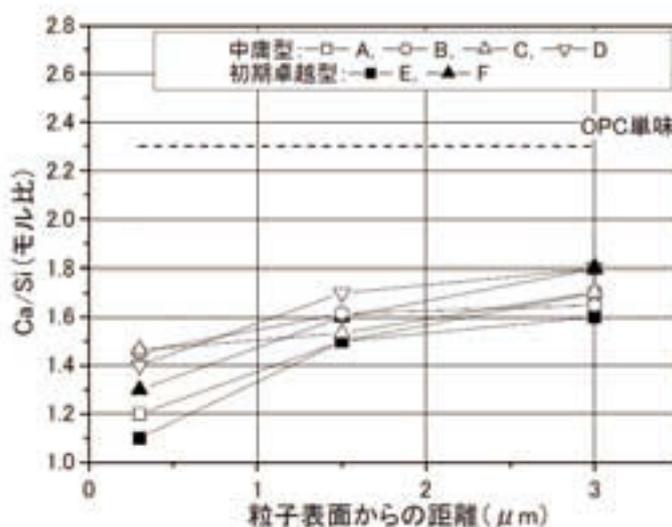


図 2.1-1 フライアッシュ粒子表面からの距離と反応相のCa/Si比（材齢378日）

(山本・廣永, 2008)

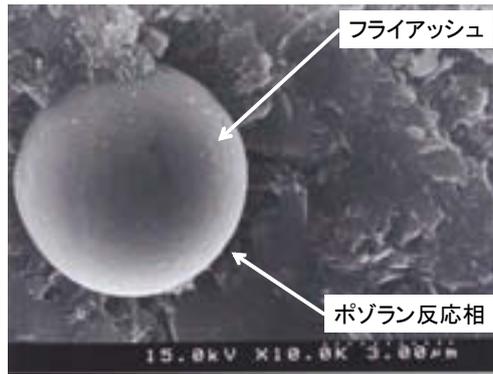


図 2.1.2 ポゾラン反応相の形成 (山本・廣永, 2008)

材齢 54 週におけるモルタル中で球状のフライアッシュ粒子の周囲に放射状に板状結晶 (相厚約  $2\mu\text{m}$ ) を形成した。

原子力機構におけるセメント, シリカフューム (SF), フライアッシュ (FA) の 3 成分系セメント (HFSC, Highly Fly ash contained Silica Fume cement) (大和田ほか, 2000), AECL におけるセメント, シリカフューム, 石英粉 (Crashed quartz) の 3 成分系セメント (LHHPC, Low Heat High Performance Concrete) (Gray and Shenton, 1998), SKB や POSIVA におけるセメントとシリカフュームの 2 成分系セメント (Vuorinen et. al. 2005) がこの型に属する。なお, AECL における LHHPC は, 低アルカリ化を指向したものではなく, プラグコンクリートへ適用するため, 水和熱の発生を抑制し, かつ高流動化を指向したものであるが, ポゾラン質材料を含んでいるため, 結果的に低アルカリ性 ( $\text{pH}<11$ ) を満足している。表 2.1-2 に主要なポゾラン添加型低アルカリ性セメントの配合を示す。

表 2.1-2 主要なポゾラン添加型低アルカリ性セメントの配合

		Mix composition ratio /mass%			
		Cement	SF	FA	Silica flower
LHHPC	-	25	25	-	50
HFSC	442	40	20	40	
	352	30	20	50	
	262	20	20	60	
SKB-Posiva		約 70~60	約 30~40	-	-

---

LHHPCはコンクリート配合表を元に算出  
LHHPCのセメントは耐硫酸塩セメント（硫酸塩膨張の原因となるアルミネート相を低下させたセメント）  
HFSCに使用されるセメントは普通および早強ポルトランドセメント  
SFはシリカフューム、FAはフライアッシュ

### ③アルミナシリケート系混和材添加型

この型に分類される SAC は、ウクライナのキエフ工科大学で開発された一般のセメント系とは異なる材料である（Glukhovskiy and Pakhomov 1978）。練り混ぜ時に、水とともにアルミナシリケート系混和材（メタ珪酸ナトリウム）を添加する。基本的には、水和反応により硬化するのではなく、高炉スラグ微粉末にアルカリ刺激剤を加えることで、スラグ自身の潜在水硬性を發揮させ、硬化する材料である。

以上が低アルカリ性セメントの開発状況であるが、セメント系材料の長期的な安定性や変質挙動について検討する場合、水和物の生成過程や化学的特性を把握しておく必要がある。この観点からは、②のポゾラン質材料添加型は、基本的に普通ポルトランドセメントの水和反応にポゾラン反応を加えたものであり、従来から高強度コンクリートやマスコンクリートなど水和熱を抑制したコンクリートに多くの適用実績があり、反応過程や水和生成物もある程度把握されているものの、①および③については、これらについて十分に解明されていない現状にある。

本章では、上記を踏まえ、①LAC（クリンカー設計型低アルカリ性セメント）、②HFSC（ポゾラン質混和材添加型低アルカリ性セメント）、③SAC（アルミナシリケート系混和材添加型低アルカリ性セメント）を対象とした材料試験に基づく適用性の評価を実施した。

## 2.2 基礎物性評価

### 2.2.1 試験項目及びその必要性

クリンカー設計型（LAC）、ポゾラン質混和材添加型（HFSC）およびアルミナシリケート系混和材添加型（SAC）の3種類の低アルカリ性セメントおよび比較用基準試料としての普通ポルトランドセメント（OPC）を対象とし、(1) 初期物性、(2) 硬化体物性、(3) 耐久性に関する情報を集約し、低アルカリ性セメントの基本特性を比較・検討した結果を取りまとめた。実施した試験項目およびその目的は表 2.2-1 に示す通りである。

(1)初期物性に関しては、現場施工においてセメントの擬凝結や凝結遅延、材料不均一などに起因する初期欠陥を防止する目的で、セメントの水和反応による凝結特性を評価した。また、打ち込み後のセメント系材料の強度不足は、ひび割れを誘発する恐れがあるため、

初期の強度発現性に関しても評価した。

また、(2)硬化体物性に関しては、処分場への水の浸入経路や不連続部を形成するセメント系材料のひび割れの発生、およびセメント系材料の変形による周辺環境への影響を軽減する目的で、セメント系材料の水和発熱特性（断熱温度上昇試験）、強度特性（セメント強さ試験）、収縮特性（乾燥収縮試験、自己収縮試験）をそれぞれ評価した。加えて、地下水の処分場内への浸透を把握する上で必要となるセメント系材料の透水特性（透水試験）を評価した。

さらに、(3)耐久性に関しては、坑道開放中の大気中の  $\text{CO}_2$  や地下水中の  $\text{CO}_3^{2-}$  との反応による水和物の変質（中性化）、成分溶出によるセメント硬化体の空隙の粗大化（溶脱）、および骨材とアルカリ成分の反応によるひび割れやゲルの生成（アルカリ骨材反応）に関してそれぞれ評価した。これらの現象は、いずれも水和物の変質を伴い、埋め戻し後のセメント系材料の長期的な挙動に対する不確実性の要因と考えられることから、その性状を把握する目的で評価した。

なお、本検討の(2)硬化体物性および(3)耐久性に関しては、モルタルおよびセメントペーストを用いており、ここで得られる結果が処分施設に用いられるコンクリートの物性を決定づけるものではないが、低アルカリ性セメント自体の基本特性を取得し、相対比較をすることにより、各種セメントが有する基本特性および留意点を把握する目的で本検討を実施した。

表 2.2-1 基本物性評価のための検討項目と目的

検討項目		目的
(1)初期物性試験	標準軟度試験	セメントの偽凝結、凝結遅延、材料不均一などの特性を把握する
	凝結試験	
	流動性試験	
	安定性試験	
	ブリーディング試験	
	初期強度発現性試験	
(2)硬化体物性試験	断熱温度上昇試験	セメントの水和熱の発現性を把握する
	セメント強さ試験	セメントの強度発現性を把握する
	乾燥収縮試験	セメントの収縮特性を把握する
	自己収縮試験	
	透水試験	セメント系水和物の透水特性を把握する
(3)耐久性	中性化試験	セメント系水和物の中性化の進行を把握する

	溶脱試験	セメント系水和物の溶脱特性を把握する
	アルカリ骨材反応試験	セメント由来のアルカリ成分と骨材との反応性を把握する

以下に検討に用いたセメント系材料の配合を示す。LAC では、凝結遅延剤としてクエン酸を使用した。HFSC では、高性能減水剤としてポリカルボン酸エーテル系の化学混和剤を使用し、OPC、フライアッシュ（JIS 1 種灰）、およびシリカフューム（U983, Elkem 社製）を 4:4:2 の割合で使用した。SAC では、練混ぜ溶液としてメタケイ酸ナトリウム水溶液を使用した。硬化体物性試験および耐久性試験に用いた基本配合を表 2.2-2 に示す。

表 2.2-2 試験に用いた基本配合

試験項目	種類	W/C	W*	C	S**
			単位:g		
断熱温度上昇試験	モルタル	0.5	225	450	1350
セメント強さ試験	モルタル	0.5	225	450	1350
自己収縮試験	モルタル	0.4	340	850	850
乾燥収縮試験	モルタル	0.4	340	850	850
透水試験	モルタル	0.5	225	450	1350
中性化試験	モルタル	0.5	225	450	1350
溶脱試験	ペースト	0.4	520	1300	-
アルカリ骨材試験	モルタル	0.5	481.2	962.4	825.4

\* LAC にはクエン酸，HFSC には高性能減水剤（ポリカルボン酸エーテル系）を添加した。また，SAC にはメタケイ酸ナトリウム水溶液を用いた。

\*\* アルカリ骨材試験にはパイレックスガラス，自己収縮試験，乾燥収縮試験にはけい砂 5 号，それ以外の試験には ISO 標準砂をそれぞれ用いた。

### 2.2.2 初期物性

処分場にセメント系材料を使用する場合，現場で施工する場合と工場製品（プレキャスト部材）として使用する場合が考えられる。特に，吹付けコンクリートやグラウト，力学プラグにおいては，現場施工が想定され，施工性を考えた場合，各種セメントが有する硬化前後の性状を把握することにより，セメントの擬凝結や凝結遅延，材料不均一などの初期欠陥を制御することが可能となる。そこで，本節では各種セメントが有する硬化前および材齢 28 日までの強度発現の性状を初期物性として検討した。

初期物性に関しては，(1)標準軟度水量，(2)凝結時間，(3)モルタルフロー，(4)安定性，(5)

ブリーディング率（硬化前のセメント系材料から練混ぜ水の一部が分離上昇する現象）、(6)初期強度発現性の試験を実施した。試験に際しては、(1)～(4)及び(6)は、JIS R 5201：1997（セメントの物理試験方法）に準じて行った。また、(5)はJIS A 1123：2003（コンクリートのブリーディング試験方法）を基にモルタルを対象とした試験を行った。なお、ここでは化学混和剤の添加量をパラメータとした検討を実施した。表 2.2-3 に初期物性試験の結果および JIS 規格値を示す。

表 2.2-3 初期物性試験結果および JIS 規格値

	混和剤種類 および添加量		標準軟度 水量 (%)	凝結時間 (h-min)		モルタル フロー (mm)	安定性	ブリーディン グ率 (%)		初期強度 発現性 (MPa) (3日/28日)
	種類	添加量		始発	終結			3.5h	24h	
LAC	ケイ酸	0.0 %	29.0	0-30	1-00	130	良	-	-	-
		0.1 %	26.2	0-15	1-15	153	良	-	-	-
		0.3 %	24.2	0-46	1-15	171	良	-	-	25.1/51.4
		0.5 %	24.4	1-28	2-28	176	良	0	0	24.4/47.1
		0.7 %	24.2	3-03	4-03	165	良	-	-	-
SAC	メタケイ酸 トリウム	1160 kg/m <sup>3</sup>	26.2	0-39	1-35	175	良	-	-	31.0/74.0
		1100 kg/m <sup>3</sup>	29.0	1-13	2-53	175	良	0	0	25.0/59.0
		1050 kg/m <sup>3</sup>	29.5	1-40	2-15	175	良	-	-	15.0/25.0
	炭酸 トリウム	1160 kg/m <sup>3</sup>	29.7	1-11	3-15	150	良	-	-	1.2/32.0
HFSC	高性能 減水剤	0.0 %	38.1	4-18	6-08	130	良	0	0	-
		0.8 %	23.7	2-45	5-15	191	良	0	0	10.5/28.4
OPC	-	0.0 %	28.4	2-25	3-38	180	良	0.25	0	13.2/48.2
JIS 規格値			—	60min 以上	10h 以下	—	良	—	—	12.5 以上 /42.5 以上

(1)標準軟度水量

標準軟度は、LAC、SAC、OPC については何れの場合も水量が 30%以下となり、良好な値が得られた。一方、HFSC については、混和剤（高性能減水剤）を添加しない場合、水量が 38.1%と増大したが、混和剤を使用することにより、その他のセメントと同程度の水量となった。

## (2)凝結時間

凝結の始発・終結時間は、LAC、SACの場合、混和剤の添加量を増加させることにより制御できることが確認された。特に、LACの場合は、クエン酸0.5%以上添加することにより、SACの場合はメタケイ酸ナトリウム1100kg/m<sup>3</sup>以上添加することにより、凝結の始発時間が1時間以上となることが確認された。一方、HFSCの場合は、高性能減水剤を使用することにより凝結始発をOPCの場合とほぼ同等とできることが確認された。JIS R 5210では、凝結の始発・終結時間をそれぞれ1時間以上・10時間以内と規定されており、何れのセメントも適切な混和剤を使用することにより、規格内の凝結時間を得ることが確認された。なお、HFSCの凝結時間が遅い理由としては、セメント量が40%と少ないこと、初期に反応しにくいフライアッシュが40%と多く含まれていることに起因すると考えられる。

## (3)モルタルフロー

フロー値は、何れの低アルカリ性セメントにおいても混和剤を適切に使用することによりOPCと同程度の物性に制御できることが確認された。

## (4)安定性

安定性は、何れの低アルカリ性セメントにおいても膨張性のひび割れや反りが確認されず、良と判断され、異常膨張などが起こらないことが確認された。

## (5)ブリーディング率<sup>註</sup>

ブリーディングは何れの低アルカリ性セメントも確認されなかった。

## (6)初期強度発現性

初期強度発現性は、何れの低アルカリ性セメントにおいても、混和剤を適切に使用することによりOPCと同程度となることが確認された。

## (7)まとめ

以上の結果から、何れのセメントについても、混和剤を使用することによりOPCと同程度の初期物性を得ることが確認された。したがって、現場で使用する際の施工性や初期強度に関しては、OPCと同様の性能が得られると考えられる。一方で、今回の試験では、各種低アルカリ性セメントに適した混和剤を使用したのが、実際の処分場においてこれらの混和剤が周辺バリアの核種収着性に及ぼす影響に関しては明確になっていない

---

<sup>註</sup> 硬化前のセメント系材料から練混ぜ水の一部が分離上昇する現象。ブリーディングが増加した場合、硬化体を構成する材料の不均一性を助長することとなる。

ため、この影響評価を行う必要があると考えられる。

なお、以降の検討においては、以上の検討結果を踏まえ、凝結時間を満足しかつ添加量を極力低減させる観点から、混和剤の添加量として、LACについてはクエン酸 0.5%、SACについてはメタケイ酸ナトリウム 1100kg/m<sup>3</sup>、HFSCについては高性能減水剤 0.8%として使用することとする。

### 2.2.3 硬化体物性試験

硬化体物性に関しては、(1) 断熱温度上昇、(2)セメント強さ、(3)乾燥収縮、(4) 自己収縮、(5) 透水の試験を実施した。各種試験の目的、方法および結果は以下に示す通りである。

#### (1) 断熱温度上昇試験

セメントは水との反応において発熱することが知られており、これに起因するコンクリートの温度応力によるひび割れの発生が懸念される。ひび割れの発生は、処分場への水の浸入経路となるだけでなく、周囲との不均一な部分を形成し、施設の長期安全性を考える場合に不確実性の増大につながると考えられる。したがって、ここでは、各種低アルカリ性セメントの水和熱の発生に関して検討した。

試験に際しては、練混ぜたモルタルを容器に詰め、断熱温度上昇試験装置により断熱温度上昇値の測定を実施した。測定材齢は、14日とした。

図 2.2-1 に断熱温度上昇試験の測定結果を示す。断熱温度上昇量は、OPC の場合で最も高い値となり、7日で 62.4℃となった。その次に LAC が 7日で 51.8℃、HFSC で 45.6℃、SAC の場合で最も低く、27.3℃の上昇量であった。また、温度上昇の立ち上がりは、HFSC の場合でほかのセメントに比べて遅く定常状態に達するまでに 4日程であった。その他のセメントにおいては、温度は一日程度で急激に増加し、2～3日で一定温度となった。

以上から、低アルカリ性セメントは、いずれも OPC よりも水和による温度上昇量が低く、温度応力によるひび割れの可能性は OPC と同程度以下であると考えられる。

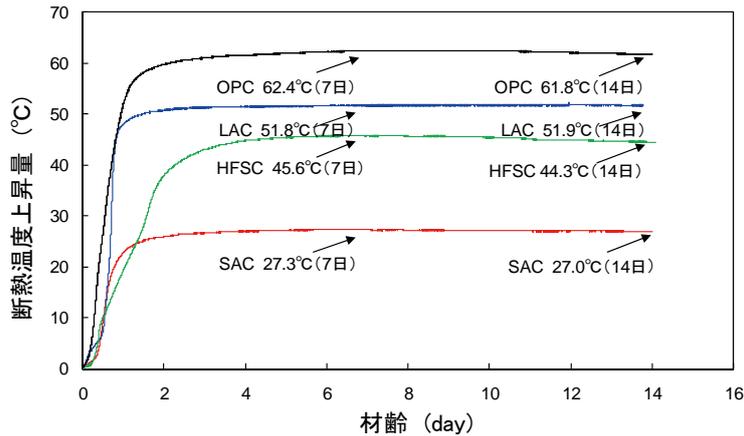


図 2.2-1 断熱温度上昇量

## (2)セメント強さ試験

処分場にセメント系材料が使用される場合、要求される性能の一つとして力学的安定性が考えられ、各種低アルカリ性セメントが有する強度発現性を把握する必要がある。そこで、ここでは、セメント強さ試験を行い各種セメントの強度発現性を検討した。

試験に際しては、JIS R 5201 : 1997 (セメントの物理試験方法) に準拠して実施した。測定材齢は、1日、3日、7日、28日、56日、91日、180日、1年、1.5年、2年とした。所定材齢までの養生条件は水中養生 (20°C) とした。

図 2.2-2 に圧縮強さの測定結果を示す。一般的なセメントである OPC の場合、材齢 1 日から圧縮強さは 13.6MPa となった。OPC の圧縮強さは材齢とともに増加し、材齢 56 日で 75.2MPa となった。一方、LAC は、材齢 1 日では、OPC よりも圧縮強さは低くなるが、材齢 7 日程度で OPC とほぼ同等の圧縮強さをとなり、材齢 91 日では、OPC よりも高い圧縮強さとなった。LAC はその後も材齢とともに圧縮強さの増加が見られ、材齢 1 年では、88.0MPa となった。SAC の場合では、材齢 1 日より OPC と同等の値となったが、材齢 14 日で 56.2MPa となり、その後の材齢に伴う強度増加はほとんど見られない。HFSC は、初期強度発現性が小さく材齢 56 日でも 40MPa 以下の圧縮強さしか示さなかったが、56 日以降の強度増進は著しく、材齢 182 日では 74.8MPa と OPC と同等の圧縮強さとなった。

図 2.2-3 にセメント強さ試験に用いた硬化体の総空隙率の経時変化を、図 2.2-4 に総空隙率と圧縮強さの関係をそれぞれ示す。図 2.2-3 より、低アルカリ性セメントの空隙率は養生期間の増加に伴い概ね減少する傾向が確認される。これは、何れのセメントにおいても水和反応により組織が緻密化しているためと考えられる。また、図 2.2-4 より低アルカリ性セメントのセメント強さは空隙率の影響を受け、空隙率が増加すると強度が低下する傾

向にあることも確認される。

以上から、各種低アルカリ性セメントの強度発現性状は以下のように整理された。

- ・ LAC は初期強度発現性が若干低いなが長期的に強度増大が期待できる。
- ・ SAC の初期強度発現性状は OPC と同程度であるが、材齢 7 日以降の強度増進は小さい。
- ・ HFSC は、初期強度発現性状は低いなが、長期的な圧縮強さの発現性は良好である。
- ・ 低アルカリ性セメントの圧縮強さと総空隙率の関係には相関性が確認され、強度発現性に関しては、総空隙率に基づく評価が可能であると考えられる。

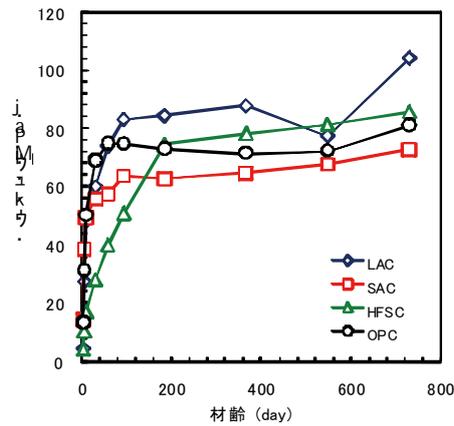


図 2.2-2 圧縮強さ経時変化

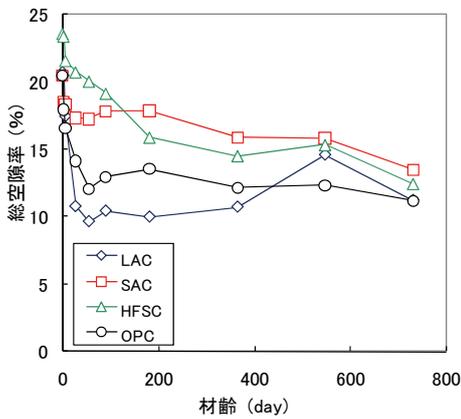


図 2.2-3 空隙率経時変化

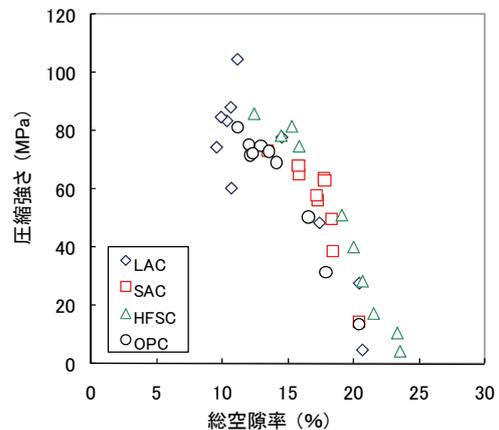


図 2.2-4 空隙率と強度の関係

### (3) 乾燥収縮試験

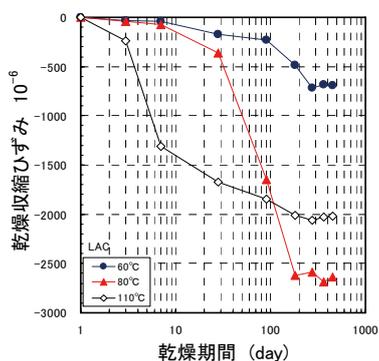
セメント系材料は、水分の逸散により収縮することが知られており、その結果、初期にひび割れを生じる可能性がある。また、収縮やひび割れの発生は、セメント材料の変形を伴い、周辺バリアの機能低下につながる恐れがある。そこで、ここでは、各種セメントを

使用して作製した供試体を乾燥環境に暴露し、その収縮特性を把握した。

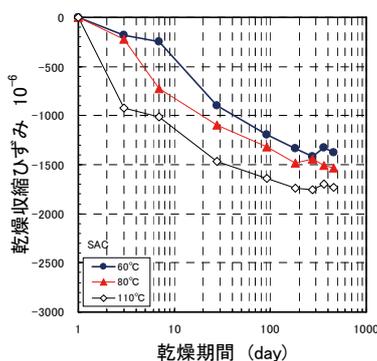
試験に際しては、コンタクトひずみ計によりモルタルの乾燥収縮ひずみの計測を実施した。アタッチメントを取り付けた乾燥収縮試料用型枠で1日養生後、水和反応を十分進行させ自己収縮の影響を取り除くために水中養生(50°C, 3ヶ月間)を行った供試体を60°C, 80°C, 110°Cの乾燥炉内に曝露した。これらの温度は廃棄体からの熱影響(60°C~100°C)を想定し、それより厳しい温度環境下も含めてパラメータを設定した。

図 2.2-5 に、W/C=0.4 のモルタルの乾燥収縮ひずみ測定結果を示す。LAC の場合は、60°C で乾燥させた場合、ほとんど収縮は生じないが、80°C では乾燥期間が 28 日以降で、110°C では初期から急激な収縮が観察された。一方、SAC, HFSC および OPC については、それぞれの乾燥温度で、乾燥期間の増加とともに収縮量が増加していく傾向が見られ、HFSC が最も収縮量が少ないことが確認された。

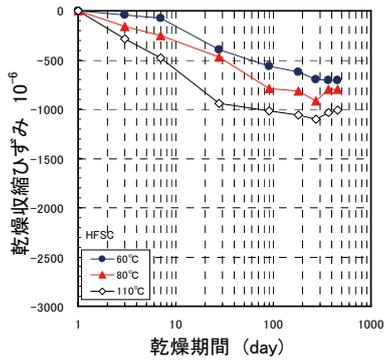
図 2.2-6 に、W/C=0.4 のモルタルの質量減少量と乾燥収縮ひずみの関係を示す。SAC, HFSC および OPC については、質量減少量で乾燥収縮ひずみを整理すると、図 2.2-5 において確認されたような温度の違いによる影響は確認されず、乾燥収縮ひずみは質量減少量で評価可能であると考えられた。一方、LAC の場合では、質量減少量で整理しても乾燥収縮ひずみは、乾燥温度ごとに異なる曲線となった。その傾向は、温度が増加すると、グラフの右上のほうに曲線がシフトすることが確認される。つまり、温度が高い場合では、質量減少量は高くなっても、それに伴う収縮量の増加が見られない。この原因は、硬化体中の水和物(エトリンガイト)の脱水反応に起因すると考えられるが、現状では明確な原因は明らかとなっていない。



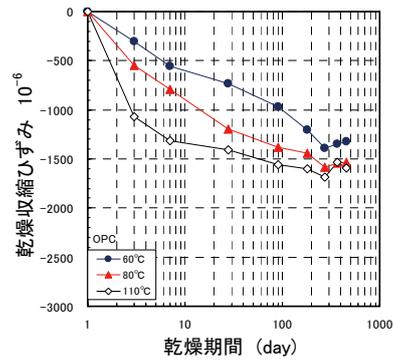
(a) LAC



(b) SAC

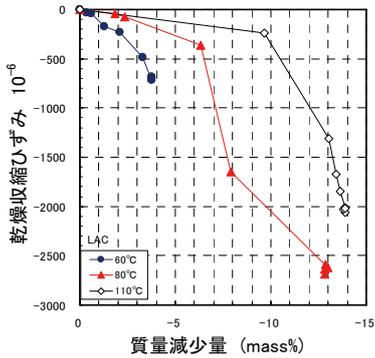


(c) HFSC

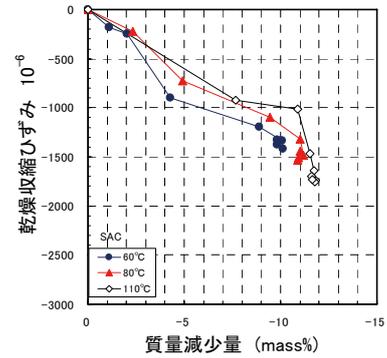


(d) OPC

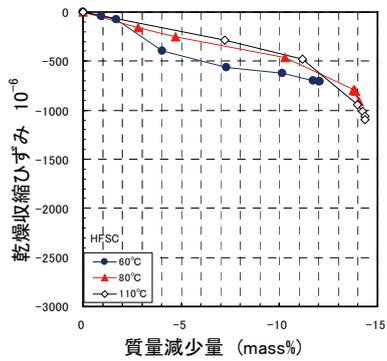
図 2.2-5 乾燥収縮ひずみ経時変化



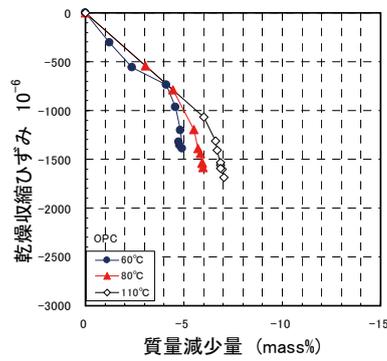
(a) LAC



(b) SAC



(c) HFSC



(d) OPC

図 2.2-6 乾燥収縮ひずみと質量変化の関係

#### (4) 自己収縮試験

セメント系材料の収縮現象としては、上記の乾燥収縮と併せて、セメントの水和反応に起因する収縮（自己収縮）が挙げられる。自己収縮は、特にセメント量の多い高強度コンクリートとした場合にその影響が顕著になることが知られている。ここでは、各種低アルカリ性セメントがもたらす自己収縮特性を把握した。

試験に際しては、日本コンクリート工学協会自己収縮委員会「モルタルの自己収縮測定方法（案）」に準拠して実施した。自己収縮ひずみは、凝結始発から材齢3日までを自己収

縮自動測定装置により測定した。材齢3日以降の収縮ひずみは、ゲージプラグを取り付けた乾燥収縮試料用型枠（40x40x160mm）で1日養生後脱型し直ちにアルミテープで被覆したものについて、ダイヤルゲージ方法（JIS A 1129-3:2001）により測定した。

図 2.2-7 に、W/C=0.4 のモルタルの自己収縮ひずみ測定結果を示す。なお、凝結の終結時間は、LAC、HFSC、OPC の場合で、それぞれ 8 時間、11 時間 20 分、6 時間 30 分、3 時間 50 分であった。これらの時間を基に、グラフ上のプロットは、「塗り潰し」が硬化前、「白抜き」が硬化後の計測結果を示している。また、測定に関しては、凝結の始発から材齢3日までが自動計測装置による測定結果、材齢3日以降はダイヤルゲージ方法による測定結果を示している。ダイヤルゲージ方法によるひずみ値は、材齢3日の自動計測によるひずみ値を基準とした。

初期の自己収縮ひずみは、若干の膨張傾向を見せる OPC に比べ、低アルカリ性セメントである LAC、HFSC の場合では、始発時間から 12 時間程度まで、大きな収縮が生じている。特に、シリカフュームが混和されている LAC および HFSC においては、凝結始発の測定開始直後からの収縮が著しく生じている。これは、シリカフュームの反応が早いことに起因するものであると推察される。これに関しては、基本配合を HFSC と同じにして、それぞれの比率を変えずに、フライアッシュを添加しないもの（OPC-SF 系）、シリカフュームを添加しないもの（OPC-FA 系）で自己収縮ひずみの測定を行った結果（図 2.2-8）、OPC-SF 系でのみ凝結の始発直後からの急激な収縮が見られたことにより確認を行った。なお、これらはモルタルを用いた検討結果であり、初期の自己収縮に起因する初期ひび割れの発生に関しては、コンクリートを用いた試験や現場試験などにより確認する必要があると考えられる。

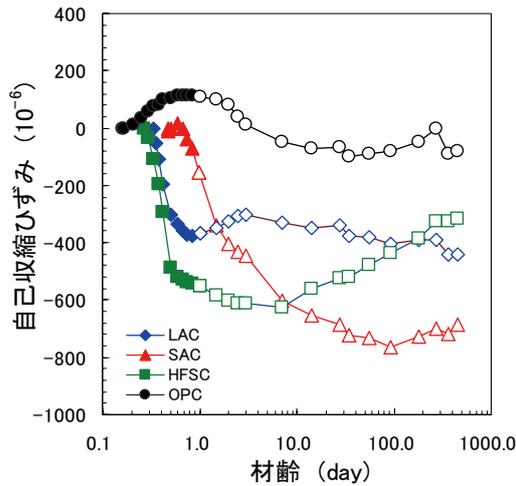


図 2.2-7 自己収縮ひずみ測定結果  
(塗り潰し：硬化前，白抜き：硬化後)

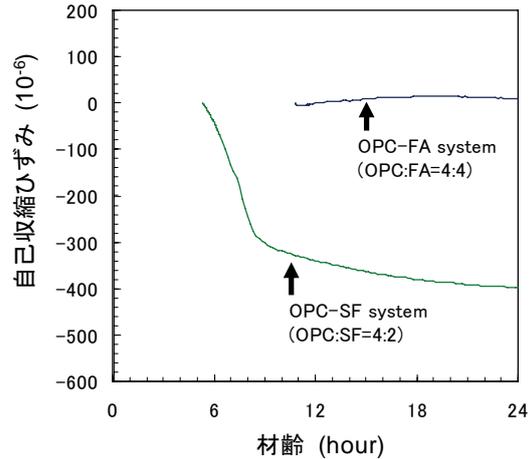


図 2.2-8 自己収縮ひずみ測定結果  
(OPC-FA系，OPC-SF系)

### (5) 透水試験

処分場は地下水位以下に建設されるため，湧水の影響による処分施設への影響を考慮する必要がある。この際，地下水はセメント系材料を透過して施設内へ流入することが考えられ，施設内での地下水流動特性を把握するためにはセメント系材料の透水性を把握する必要がある。そこで，ここでは，各種低アルカリ性セメントが有する透水性状を把握した。

試験に際しては，インプット法により透水係数を測定した。JIS モルタル供試体を 50℃ の水中で 3 ヶ月養生した後，20℃，相対湿度 60% の雰囲気中で 28 日以上予備乾燥させて透水試験用供試体とした。試験体のサイズは，直径 150mm×高さ 150mm の円柱とした。透水係数は，次式により求めた。

$$K = \rho \cdot g \cdot \frac{q \cdot l}{t \cdot A \cdot P}$$

ここに， $q$ ：供試体に圧入された水量 ( $\text{m}^3$ )  $l$ ：平均浸透深さ (m)  $t$ ：試験時間 (s)  
 $A$ ：流水に直角な平均面積 ( $\text{m}^2$ )  $P$ ：水圧 (Pa)  $\rho$ ：水の密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )  $g$ ：重力加速度 ( $\text{m}/\text{s}^2$ )  $K$ ：透水係数 (m/s)。

表 2.2-4 にインプット法により測定した透水係数測定結果を示す。これによると，透水係数は，LAC を除いて， $10^{-11} \sim 10^{-13}$  と小さい値となった。これは，硬化体の水セメント比が 0.50 (質量比) と小さいもので測定したためであると推察された。なお，LAC に関しては，図 2.2-9 の細孔径分布に示すように，透水性に影響を及ぼすと考えられる  $0.1\mu\text{m}$  以上の空隙が多く存在しており，これらの空隙が水みちとなったため，他のセメントと比較し

て透水係数が高くなったと考えられる。一方、HFSC の場合、総空隙率が最も高いにも関わらず、透水係数は SAC や OPC と同程度であった。これは、HFSC 中に存在する主な空隙が、C-S-H 相中の空隙 (0.01  $\mu\text{m}$ ~0.1  $\mu\text{m}$  程度) であり、これらの空隙が透水性に及ぼす影響が小さいためと考えられる。

表 2.2-4 透水係数

	LAC	SAC	HFSC	OPC
透水係数(m/s)	$1.8 \times 10^{-9}$	$3.8 \times 10^{-13}$	$1.5 \times 10^{-13}$	$2.7 \times 10^{-11}$
空隙率(%)	14.61	14.64	17.50	13.04

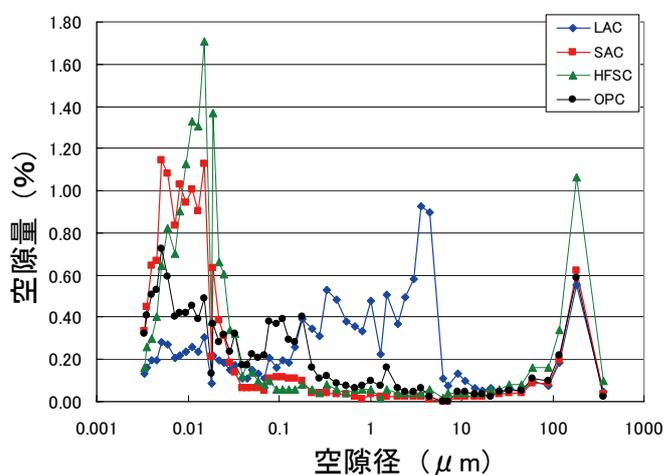


図 2.2-9 予備乾燥後の空隙径分布

## 2.2.4 耐久性

耐久性については、処分場で生じる可能性が高い変質現象を想定し、(1)中性化、(2)溶脱、(3)アルカリ骨材反応に対する抵抗性の試験を実施した。これらの現象は、セメント系材料を構成する水和物の変質を伴うため、セメント系材料の長期挙動の不確実性の要因と考えられる。ここでは、低アルカリ性セメント硬化体自体の各種変質の影響を把握する目的でモルタルあるいはセメントペーストを用い、それぞれの現象がセメント硬化体に及ぼす影響を評価した。

### (1)中性化

低アルカリ性セメント硬化体を処分場で使用した場合、坑道開放中に大気中に存在する  $\text{CO}_2$  や地下水中に存在する  $\text{CO}_3^{2-}$  と水和物との反応により、中性化 (炭酸化) 反応が生じることが想定される。このような反応は水和物の変質を伴うため、セメント系材料の長期挙

動の不確実性の要因の一つとなると考えられる。したがって、これに対する留意点を把握する目的で促進中性化試験を実施した。

試験に際しては、水中養生(50°C, 3ヶ月間)後の供試体を促進中性化条件下(温度40°C, 湿度60%, CO<sub>2</sub>濃度10%)に所定の期間曝露した。

図2.2-10にJISモルタルの中性化深さを示す。ここで、低アルカリ性セメントは、間隙水のpHが11以下になるように設計されている。一般に中性化深さを判定するために使用される試薬であるフェノールフタレインは、pH>8.2~10.0の範囲で変色するが、促進中性化養生後の硬化体にフェノールフタレインエタノール溶液(1.0mass%)を噴霧することで変色域と無色の領域で明確な差が確認された。この無色の領域は、水和物が炭酸化反応を生じた領域であると推測される。そのため、ここでは、炭酸化に対する抵抗性としてフェノールフタレインエタノール溶液を噴霧後の無色の領域を中性化深さとして評価した。

中性化深さは、セメントの種類で比較するとLAC=OPC<<HFSC=SACの順番となった。なお、中性化養生前の何れの硬化体の空隙率は16%程度となり、セメントの種類に起因する空隙量の大きな差異は確認されなかった。

SACとHFSCについては、低アルカリ性セメントであるため、pHを上昇させる水酸化カルシウムが生成しない材料設計となっている。水酸化カルシウムは炭酸ガスと反応して炭酸カルシウムを生成する。HFSCとSACは水酸化カルシウムを生成せず、主にCSH相から構成されるため、炭酸ガスを固定しにくいことから、炭酸が容易に内部まで侵入して中性化深さが深くなっていると推察される。一方、LACの中性化深さはOPCの場合と同程度であった。

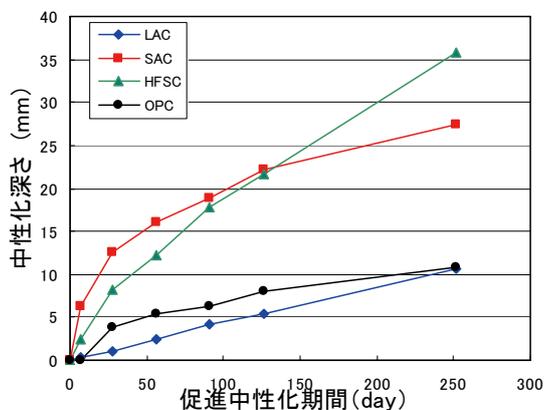


図 2.2-10 各種セメント硬化体の中性化深さ

## (2) 溶脱試験

低アルカリ性セメント硬化体を処分場で使用した場合、地下水の影響によるセメント成分の溶脱が生じることが想定される。これにより、セメント系材料の長期的な変質および溶出成分による周辺バリアへの影響が懸念される。そこで、ここでは、その溶脱挙動を評価することを目的に、溶脱試験を実施した。

試験に際しては、①硬化体を粉末にしたもの（粉末試料）、②薄片にしたもの（薄片試料）、ならびに③ブロックにしたもの（ブロック試料）について実施した。図 2.2-11 にそれぞれの試験目的および浸漬方法を示す。粉末試料浸漬試験は固相 - 液相間での平衡状態を把握するため、薄片試料浸漬試験はセメント成分の溶脱後の物性変化を把握するため、ブロック試料浸漬試験は、深さ方向へのセメント溶脱現象を把握するためにそれぞれ実施した。

浸漬させる試料は、ペーストとして、水セメント比は 0.40（質量比）とした。20°Cで練混ぜ、型枠に流し込んだ後、20°C湿空養生で 24 時間養生した。24 時間の養生後、脱型し、それぞれのセメントの飽和水溶液中に浸漬させて 50°Cで3ヶ月間水中養生させたものを試験用硬化体として用いた。以下に各試料の詳細を示す。

### ①粉末試料

50°Cで養生を行った硬化体の粉砕を 108 $\mu\text{m}$  の篩を通過するまで実施した。得られた粉体は、アスピレータにより減圧乾燥して試料とした。粉末と浸漬溶液の液固比は、10, 50, 100 および 1000  $\text{cm}^3/\text{g}$  とした。浸漬溶液は、純水、淡水系模擬地下水および海水系模擬地下水とした。浸漬期間は 52 週間とし、その間に液交換は実施していない。浸漬作業および浸漬は  $\text{N}_2$  ガスを充満させたグローブボックス内で行った。試験温度は 20°Cとした。

### ② 薄片試料

薄片浸漬試験では、50°Cで前養生を行った硬化体についてダイヤモンドカッターにより切断して 20mm $\times$ 20mm $\times$ 0.3mm の供試体を作製した。浸漬溶液は純水、淡水系模擬地下水、海水系模擬地下水の 3 種類とし、薄片 2 枚を 2  $\text{dm}^3$  の溶液に浸漬させた。浸漬期間は 52 週間とし、その間に液交換は実施していない。

### ③ブロック試料

ブロック浸漬試験に供する供試体は、50°Cで前養生させた硬化体を 20mm $\times$ 20mm $\times$ 20mm の立方体にダイヤモンドカッターで切断して調製した。浸漬溶液は、純水、淡水系模擬地下水、海水系模擬地下水とした。浸漬溶液は、4 週ごとに交換した。浸漬期間は、52 週と

82 週とした。

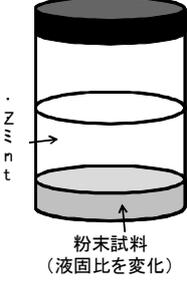
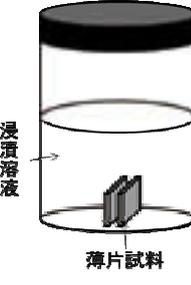
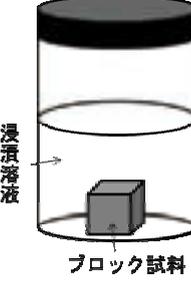
試料	①粉末試料	②薄片試料	③ブロック試料
目的	固相 - 液相間での平衡状態を把握するため	セメント成分の溶脱後の物性変化を把握するため	深さ方向へのセメント溶脱現象を把握するため
状態			
試料形状	108 $\mu$ m の篩を通過するまで粉碎した試料	20mm $\times$ 20mm $\times$ 0.3mm の試料	20mm $\times$ 20mm $\times$ 20mm の試料

図 2.2-11 浸漬方法

浸漬溶液は、純水と処分環境を想定した模擬地下水とした。実際の地下水は、降水が起源のものと海水が起源のもの2種類に大別されることから、浸漬溶液として用いる模擬地下水は、淡水系模擬地下水と海水系模擬地下水の2種類とした。浸漬溶液として使用する模擬地下水の組成は、高 pH 型降水系地下水と高 pH 型海水起源地下水の2種類とし、作業手順や入手可能な試薬などを考慮して、表 2.2-5 の組成に決定した。

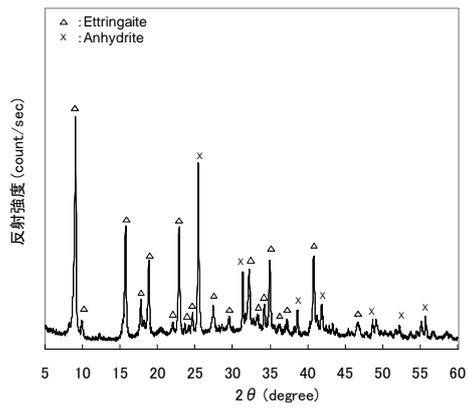
表 2.2-5 模擬地下水組成

	地下水組成 /mg・dm <sup>-3</sup>												
	Na	Ca	K	Mg	HCO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	B	F	Br	I	NH <sub>3</sub>	Cl	Si
淡水系	97.7	2.42	1.22	4.41	9.55	10.6	3.13	1.03	-	-	0.34	0.53	214
海水系	13795	4.30	6.08	13.2	8.43	3.07	18.4	1.90	42.4	25.4	88.6	20916	915

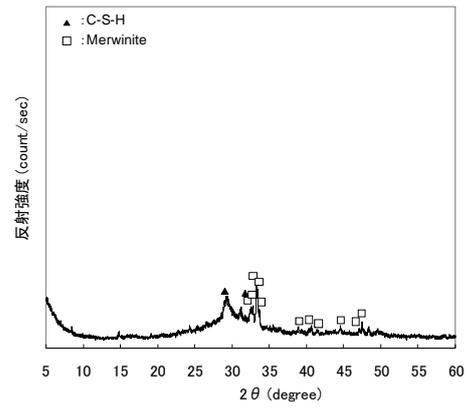
分析項目は、以下に示す液相分析と固相分析を以下のように実施した。

- ① pH (pH メータ)
- ② 溶存イオン分析 (融合結合プラズマ発光分析: Inductively Coupled Plasma- Atomic Emission Spectrometry, ICP-AES 及びイオンクロマトグラフィ)
- ③ 硬化体相組成分析 (粉末 X 線回折装置; Powder X-ray Deflection Analyzer, Powder-XRD)
- ④ 水和相定性・定量分析 (走査型熱天秤; TG-DTA, DSC)
- ⑤ 空隙構造 (水銀圧入法)
- ⑥ 元素マッピング (EPMA)
- ⑦ 硬化体微細組織観察 (フィールドエミッション型走査電子顕微鏡; Field Emission Scanning Electron Microscope, FE-SEM)

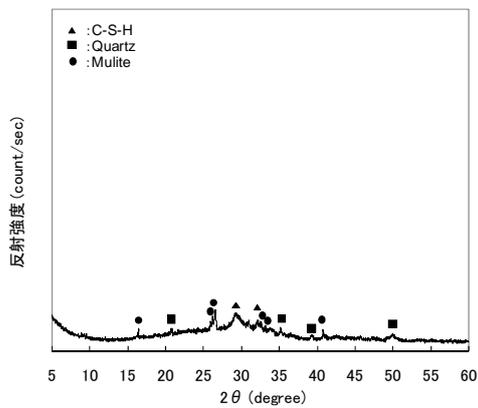
図 2.2-12 に初期試料の粉末 X 線回折結果を示す。浸漬前の LAC 硬化体の構成水和物は、エトリンガイトであり、未反応の無水セッコウ (図中 Anhydrite) も残存している。SAC は、元のセメントに含まれているメリライトのピークが確認された。HFSC では、フライアッシュに含まれるムライトと石英のほかに、セメント水和物としてケイ酸カルシウム水和物 (C-S-H) が確認された。比較用の OPC 硬化体では、未反応物としてフェライト相が確認され、水和物相は C-S-H と水酸化カルシウム、モノサルフェートであった。



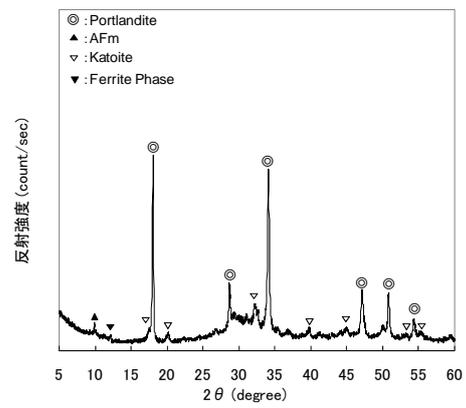
(a) LAC



(b) SAC



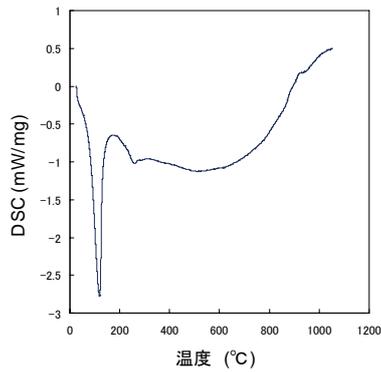
(c) HFSC



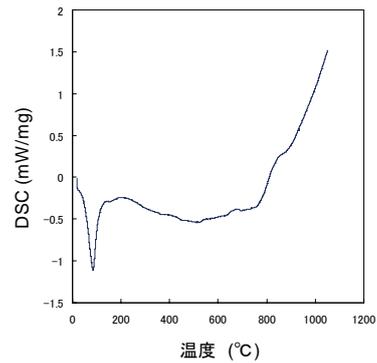
(d) OPC

図 2.2-12 初期試料の粉末 X 線回折結果

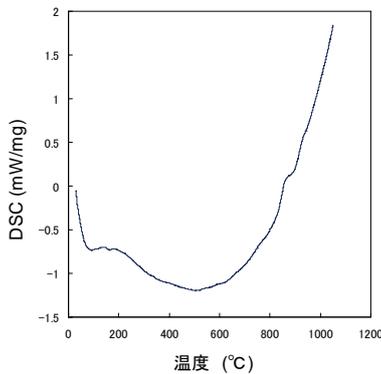
図 2.2-13 に初期試料の熱分析結果を示す。LAC では、エトリンガイトの分解によると考えられる 100°C 付近と 250°C 付近にピークが確認された。SAC の場合は、80°C 付近にピークが確認された。HFSC の場合は、水和物の分解等による明確なピークは確認されなかった。また、OPC では、水酸化カルシウムの脱水によると考えられる 400-500°C のピークが確認されたが、他の低アルカリ性セメントにおいては確認されなかった。



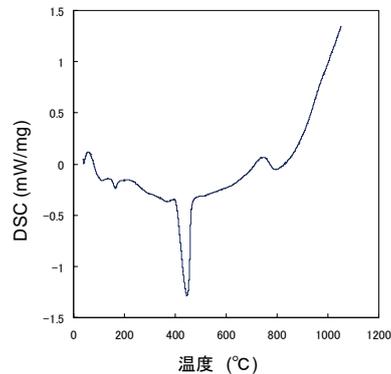
(a) LAC



(b) SAC



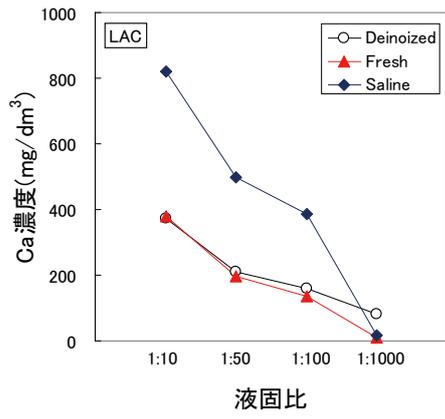
(c) HFSC



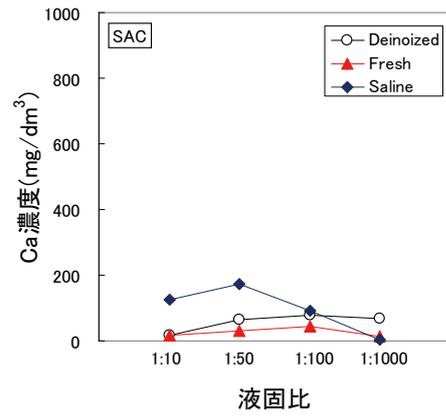
(d) OPC

図 2.2-13 初期試料の熱分析結果 (DSC)

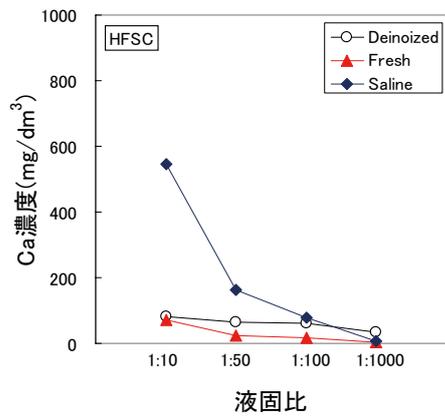
図 2.2-14 に粉末試料を浸漬した場合の各種セメント硬化体の Ca 濃度と液固比の関係を示す。これらより、何れの低アルカリ性セメントにおいても、純水、淡水系模擬地下水に浸漬した場合、液固比によらず、液相中の Ca 濃度が OPC と比較して低いことが確認される。これは、OPC と比較して、低アルカリ性セメントの Ca 水和物が解けにくい状態であること示唆している。一方で、海水系模擬地下水に浸漬した場合、液相中の Ca 濃度が純水の場合と比較して高くなることが確認される。これは、図 2.2-15 に示すように、海水系模擬地下水に浸漬した場合、溶液中の炭酸イオンとの反応による炭酸カルシウムの沈殿に加えて、LAC の場合エトリンタイトのピークが、SAC や HFSC の場合 C-S-H のブロードなピーク(30°付近)が消失しており、Ca 水和物の溶解反応に共存イオンやイオン強度が影響を及ぼすことを示唆していると考えられる。一方、OPC に関しては、初期に存在していた水酸化カルシウムのピークが完全に消失し、初期の水和物が溶解したことが確認される。



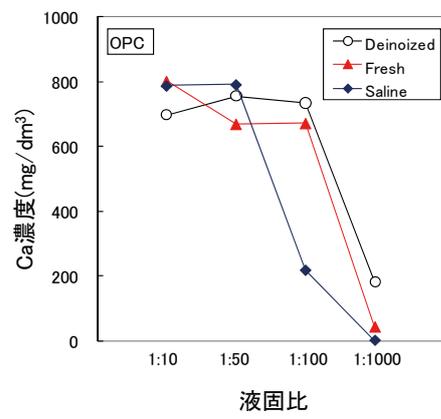
(a) LAC



(b) SAC

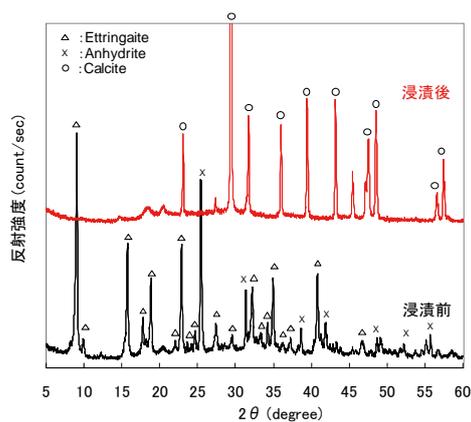


(c) HFSC

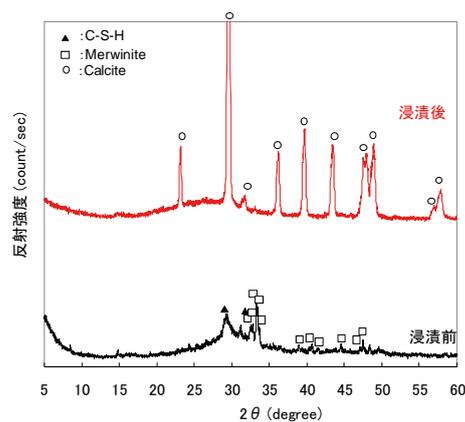


(d) OPC

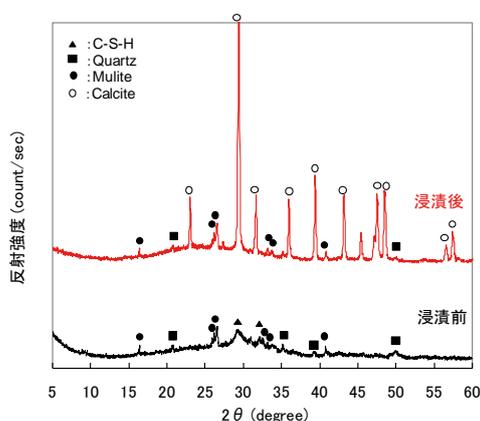
図 2.2-14 Ca 濃度と液固比の関係 (粉末試料, 浸漬 52 週後)



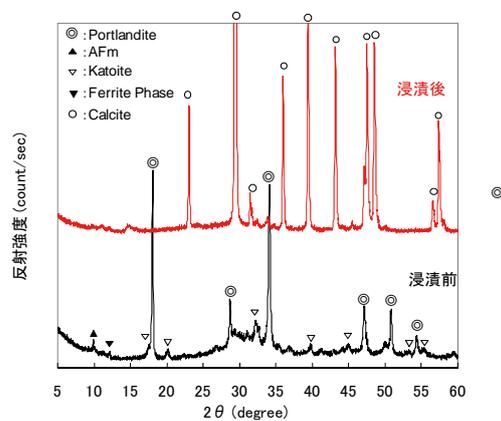
(a) LAC



(b) SAC



(c) HFSC



(d) OPC

図 2.2-15 浸漬前後の XRD 回折結果 (粉末試料, 浸漬 52 週後, 海水)

図 2.2-16 に、粉末試料の  $^{29}\text{Si-NMR}$  スペクトルを示す。なお、 $^{29}\text{Si-NMR}$  スペクトルは、初期試料と、液固比  $1000\text{cm}^3/\text{g}$  に浸漬させた場合について測定を行った。また、 $^{29}\text{Si-NMR}$  スペクトルは C-S-H の骨格である Si 四面体の構造のつながり具合を示しており、 $Q^0$  は Si 四面体の単量体のピーク、 $Q^1$  は Si 四面体の一方向の結合、 $Q^2$  は 2 方向の結合、 $Q^3$  は 3 方向の結合、 $Q^4$  は 4 方向の結合をそれぞれ示している。この結果により、C-S-H の骨格構造の変化を評価できる。

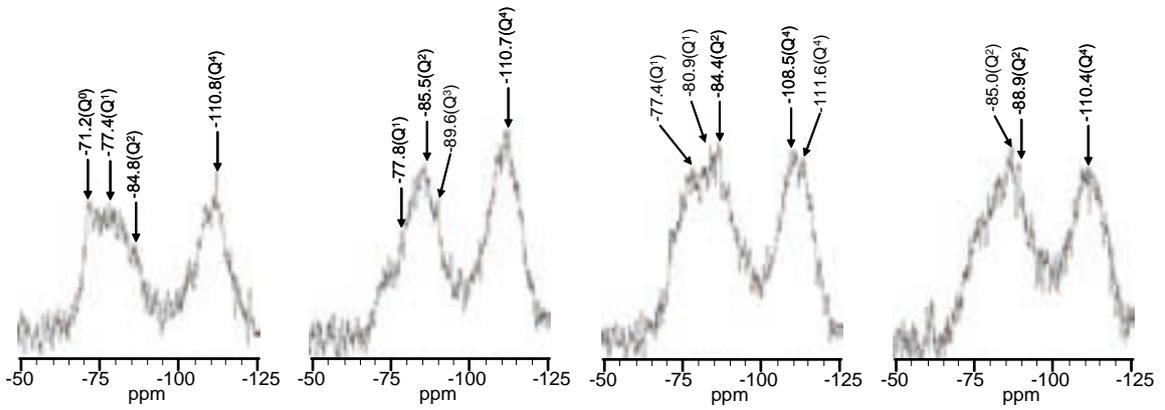
LAC に関しては、初期試料において、未反応の化合物が存在した場合に示す Si 四面体の単量体のピーク ( $Q^0$ ) が認められたが、浸漬させることにより、ピークが減少、あるいは消失していることが確認される。また、純水や海水系模擬地下水に浸漬した場合、Al の

溶出によると考えられる低磁場側 (図中右方向) へのピークシフトが確認される。さらに、何れの試料においても原材料に由来すると思われるガラス質のピーク ( $Q^4$ ) が確認され、これらの構成物の変質による構造変化は生じていないと考えられる。

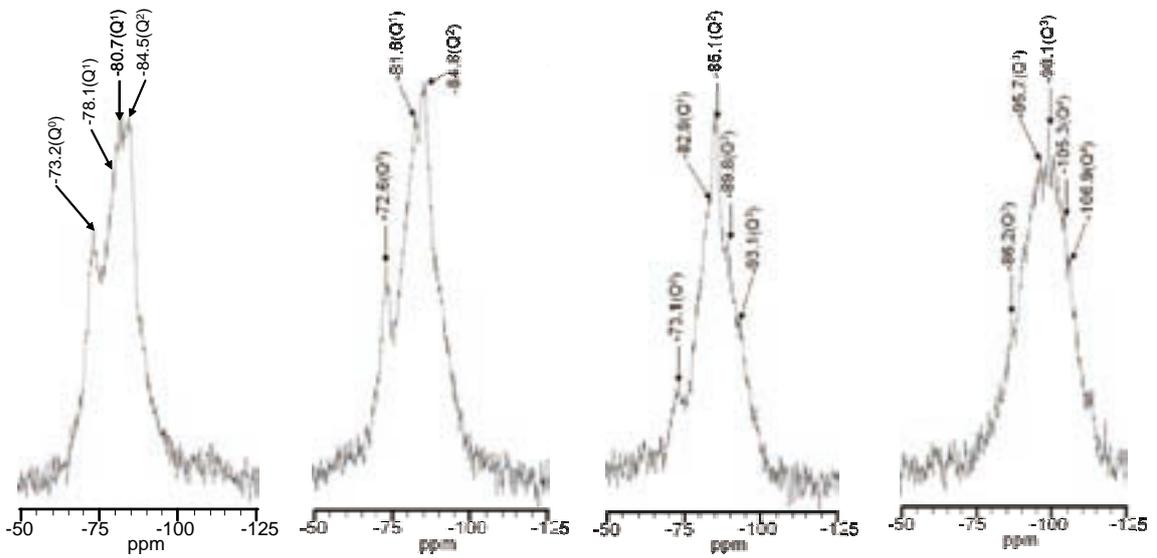
SAC に関しては、LAC と同様に、初期試料において確認された Si 四面体の単量体のピーク ( $Q^0$ ) が認められたが、浸漬させることによりピークが減少していることが確認される。また、浸漬させることにより、低磁場側へのピークシフトが確認され、 $Q^3$  に相当する -100ppm のブロードピークが増加しており、Ca の溶出により C-S-H 中の Si イオン間の距離が短くなったと考えられる。さらに、海水系模擬地下水においては、低磁場側のピーク ( $Q^4$ ) が現れており、純水や淡水系模擬地下水よりさらに Ca の溶出が進み、Si 濃度の高い C-S-H に変質していると考えられる。

HFSC に関しても、浸漬させることにより Si 四面体の単量体のピーク ( $Q^0$ ) の消失を確認した。また、 $Q^3$  のピークが増加しており、C-S-H からの Ca の溶出により、C-S-H 中の Si イオン間の距離が短くなったと考えられる。さらに、海水系模擬地下水の場合、 $Q^4$  のピークが卓越しており、スメクタイト等の高 Si 化合物が析出していると予想される。

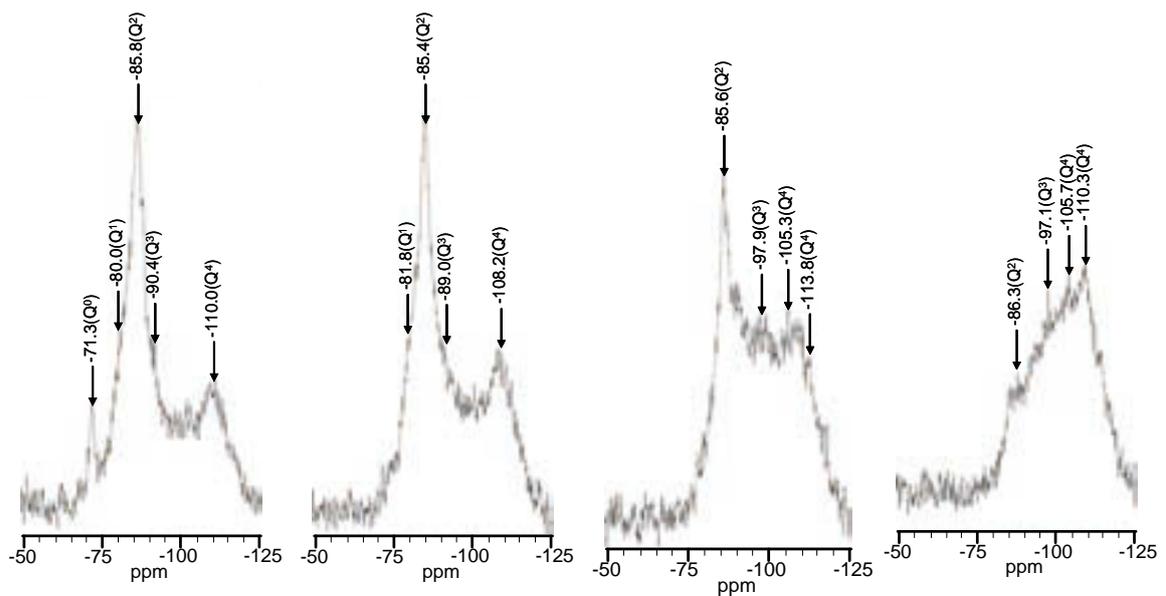
OPC に関しても、浸漬により Si 四面体の単量体のピーク ( $Q^0$ ) が消失したことを確認した。また、純水の場合、 $Q^2$  に対する  $Q^1$  の比率が減少しており ( $Q^1/Q^2$  比：初期=0.91, 純水：0.82)、C-S-H からの Ca の溶出が進んでいると考えられる。また、海水系模擬地下水の場合、基準試料であるシリコンゴムのピークとの比較より、全体的なピークが小さいことから、Ca のみならず Si の溶出も進んでいると考えられる。



(a-1) 初期      (a-2) 純水      (a-3) 淡水      (a-4) 海水  
(a) LAC



(b-1) 初期      (b-2) 純水      (b-3) 淡水      (b-4) 海水  
(b) SAC



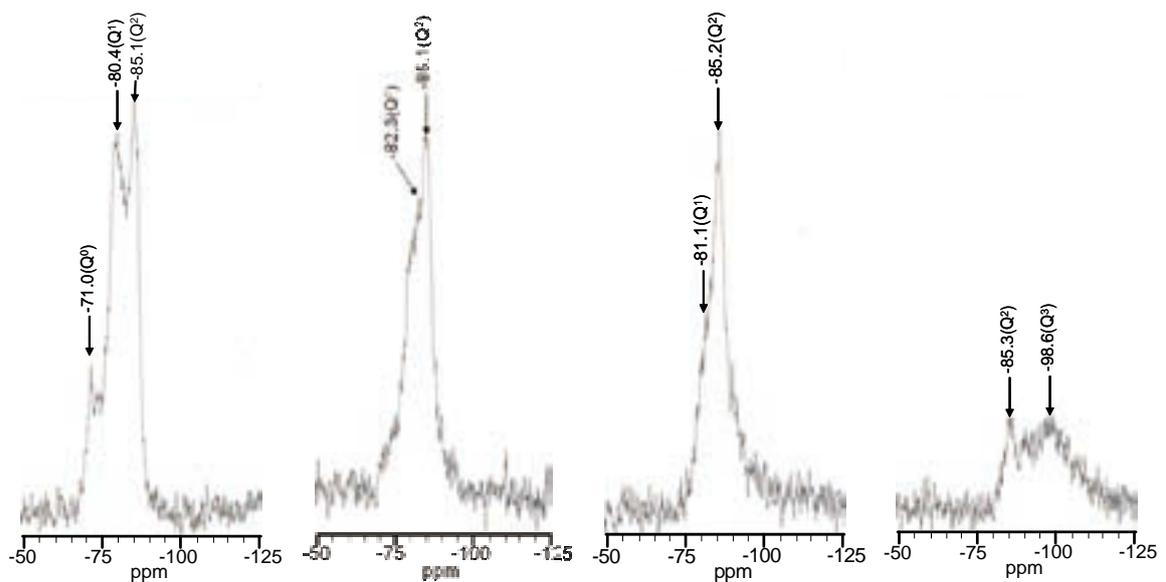
(c-1) 初期

(c-2) 純水

(c-3) 淡水

(c-4) 海水

(c) HFSC



(d-1) 初期

(d-2) 純水

(d-3) 淡水

(d-4) 海水

(d) OPC

図 2.2-16  $^{29}\text{Si}$ -NMR スペクトル(粉末試料, 液固比  $1000\text{cm}^3/\text{g}$ )

図 2.2-17 に薄片試料を浸漬した場合の各種セメント硬化体の空隙径分布およびその変化を示す。これらより、何れのセメント硬化体においても、52 週間浸漬することにより空隙が増加することが確認される。

LAC に関しては、何れの浸漬溶液においても、 $1\mu\text{m}$  以下の空隙が増加しており、特に、 $0.1\mu\text{m}\sim 1\mu\text{m}$  程度の空隙の増加が著しいことが確認される。一方、SAC および HFSC に関

しては、純水の場合、 $0.1\mu\text{m}\sim 0.5\mu\text{m}$  程度以下の空隙が増加するが、淡水系模擬地下水や海水系模擬地下水の場合は、増加量が小さいことが確認される。OPC に関しては、純水の場合、 $1\mu\text{m}$  以下の空隙が著しく増加することが確認され、淡水系模擬地下水や海水系模擬地下水の場合は、増加量が小さいことが確認される。長期的なセメント硬化体の耐久性を考えた場合、空隙構造の変化を把握することは非常に重要であり、特に、粗大な空隙の増加を防止することが必要となる。したがって、空隙構造の変化を考えた場合、粗大な空隙の増加を抑制できる HFSC や SAC を使用することが望ましいと考えられる。なお、何れのセメントにおいても確認される  $100\mu\text{m}$  以上の空隙の増大は、炭酸カルシウムなどの 2 次鉱物の析出による結晶間の空隙の増加によると推察される。

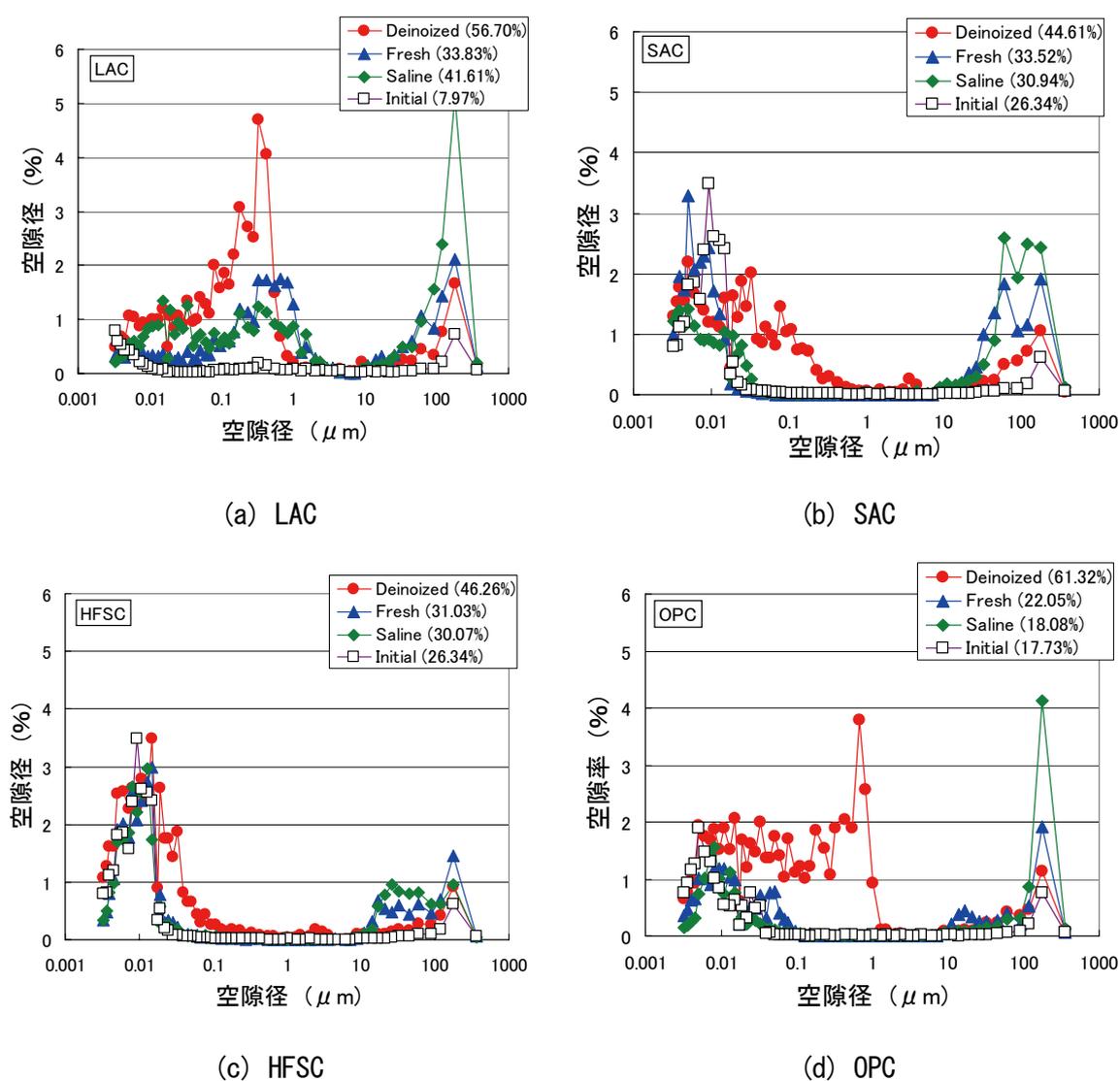


図 2.2-17 浸漬前後の空隙径分布（薄片試料，浸漬期間 52 週，カッコ内は総空隙率）

図 2.2-18 にブロック試料を浸漬した場合の液相中の累積 Ca 溶出量の経時変化を示す。これらより、浸漬溶液が純水の場合、Ca 溶出量は OPC が最も高く、低アルカリ性セメントにおける Ca 溶出量は OPC の 3 分の 1 以下となることが確認される。特に、HFSC や SAC を用いた場合、Ca 溶出量は非常に小さくなることが確認される。一方で、淡水系模擬地下水や海水系模擬地下水を用いた場合、セメント種類によらず、Ca 溶出量はほとんどゼロとなり、中にはマイナスとなるものもある。この理由としては、淡水系模擬地下水や海水系模擬地下水中に含まれる炭酸イオンとセメント硬化体中や浸漬溶液中のカルシウムイオンが曝露面近傍で沈殿反応を生じ、図 2.2-19 の SEM 像に示すような炭酸カルシウムの結晶を生成することが考えられる。ただし、淡水系模擬地下水や海水系模擬地下水は初期の Ca 濃度が高いため、溶出量が正確に測定できていない可能性もあり、結果の解釈においては注意が必要である。

粉末試験で得られた結果も合わせて考慮すると、セメント硬化体の水和物の溶解は、共存イオンの影響を受けていると結論付けることができる。したがって、淡水系模擬地下水や海水系模擬地下水など溶液中に多量のイオンを含む場合の溶解反応においてはより複雑な反応が生じていることが予想され、今後更なる検討が必要であると考えられる。

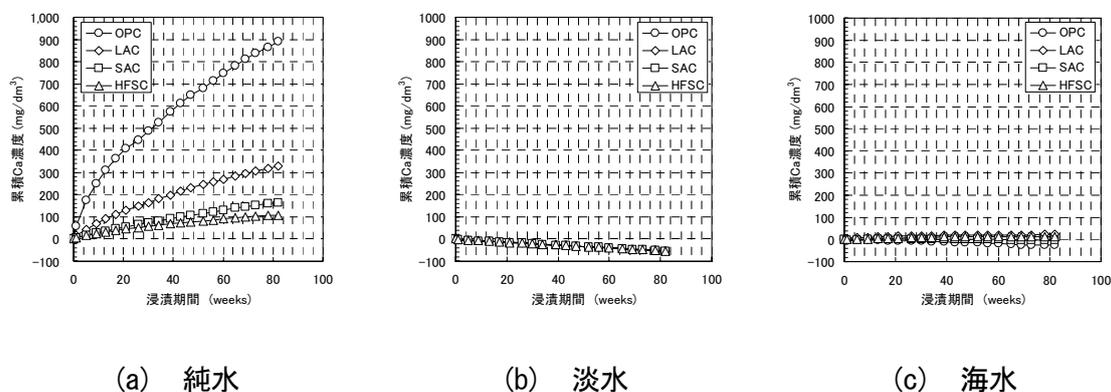


図 2.2-18 浸漬液の累積 Ca 溶出量経時変化 (ブロック試料)

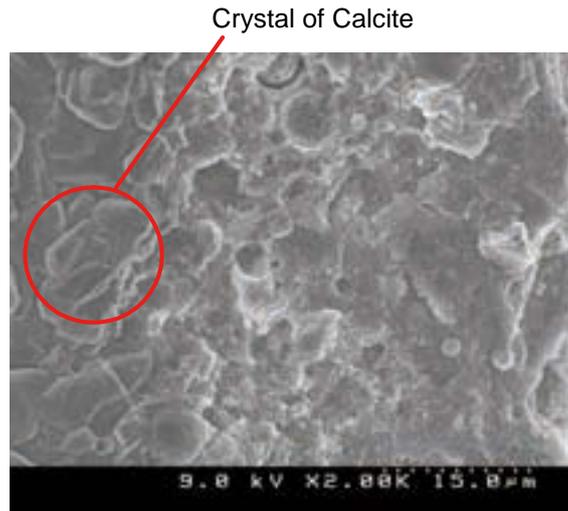


図 2.2-19 曝露面で沈殿生成した炭酸カルシウムの結晶とその背面の水和物相  
(HFSC, ブロック試料, 海水, 浸漬 52 週後)

図 2.2-20 にブロック試料を浸漬した場合の液相中の pH の経時変化を示す。これらより、浸漬溶液が純水の場合、OPC の pH は 11 を超えているが、低アルカリセメントの pH は 11 以下となることが確認される。これは、低アルカリ性セメントからのアルカリ成分の溶出が少ないことを示しており、溶存イオンの少ない地下水の場合、低アルカリセメントを用いることで、バリア性能への影響を軽減できると期待される。一方、淡水系模擬地下水や海水系模擬地下水の場合、セメント種類が pH の変化に及ぼす影響は小さく、ほぼ一定の値で推移することが確認される。これは、模擬地下水中の成分（例えば、弱酸の塩や弱塩基の塩）がアルカリに対する緩衝作用を發揮しているためと推察される。いずれにしても、地下水に含まれる成分が pH に及ぼす影響は大きく、固相からの成分溶出に影響を及ぼすと考えられる。

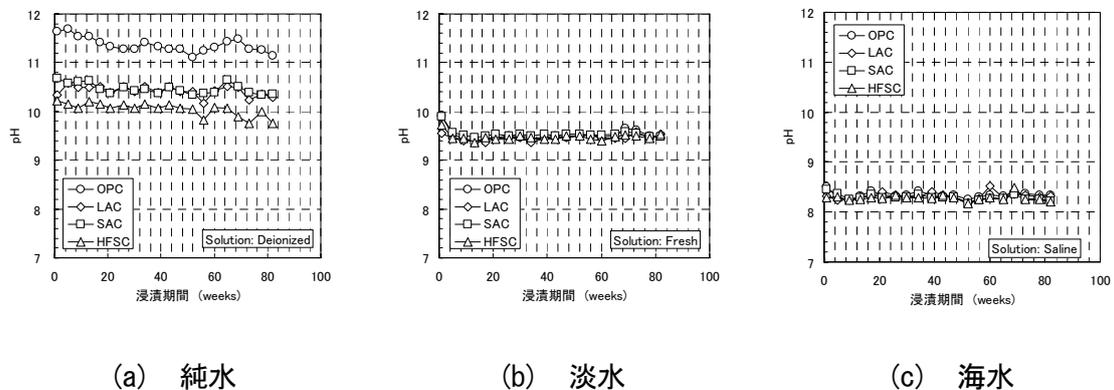


図 2.2-20 浸漬液の pH 経時変化 (ブロック試料)

図 2.2-21 にブロック試料を浸漬した場合の液相中の累積 Si 溶出量の経時変化を示す。これらより、浸漬溶液が純水の場合、何れのセメントにおいても Si の溶出が確認されるが淡水系模擬地下水や海水系模擬地下水の場合、Si の溶出量は非常に小さい。Si の溶出からは、カルシウムシリケート水和物の溶解が予想され、固相における変質性状は地下水中に含まれる成分により大きくことなることが予想される。

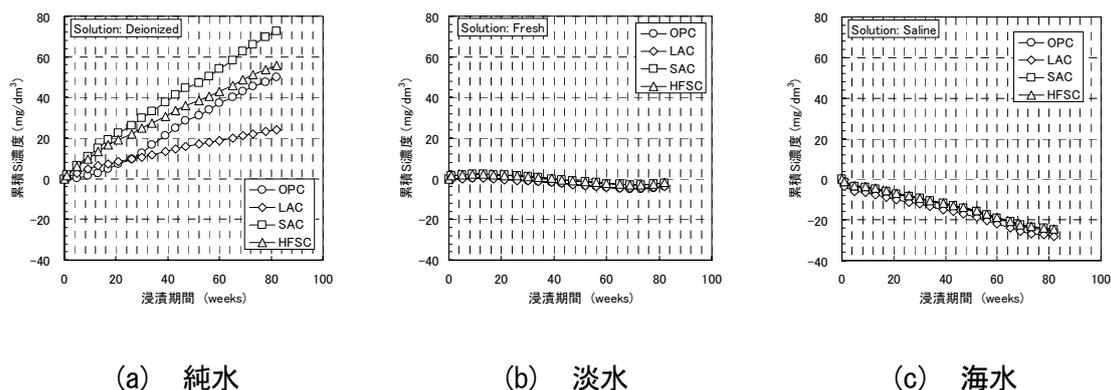


図 2.2-21 浸漬液の累積 Si 溶出量経時変化 (ブロック試料)

図 2.2-22 にブロック試料断面の Ca/Si モル比分布を示す。これらより、何れの試験条件においても、Ca 溶脱に伴う、表面からの Ca/Si モル比の低下が確認される。特に、OPC を用い、純水の浸漬溶液に浸漬した場合、Ca/Si モル比の低下領域 (変色領域) が最も広く、接触面から 2mm 程度の深部まで進行することを確認した。また、Ca/Si モル比の低下領域は何れのセメント硬化体においても、淡水系模擬地下水の場合に最も狭く、純水や海水系模擬地下水の場合に広がる傾向にある。これは、純水を用いた場合、セメント硬化体中の細孔溶液と浸漬溶液間の濃度勾配が高くなるため、また、海水系模擬地下水を用いた場合、粉末浸漬試験の結果からも確認されたように、共存イオンがセメント系水和物からの Ca 溶解反応を促進するためと考えられる。特に、ポルトランドaitを多く含む OPC 系より、C-S-H を多く含む HFSC の方が変質深さが大きくなっていることから、共存イオンの影響は C-S-H の溶解に大きく影響を及ぼすと推察される。

図 2.2-23 に曝露面における SEM 像を示す。これらより、何れのセメントにおいても、純水の場合、曝露面近傍の組織が粗となっていることが確認される。また、淡水系模擬地下水および海水系模擬地下水においては、炭酸カルシウムの結晶の析出が確認される。前述の XRD の結果からも炭酸カルシウムが同定されており、液相中の  $\text{HCO}_3^{2-}$  と反応を生じ、

表面近傍に2次鉱物の析出層を形成していると考えられる。これらの析出層は、セメント硬化体と周辺環境間での物質の移動を抑制するのみならず、 $\text{Ca}^{2+}$ やアルカリ成分の緩衝作用を有している可能性があるが、現在のところ析出メカニズムや定量的な評価にはいたっていない。今後、これら2次鉱物の析出メカニズムやその効果を詳細に検討する必要があると考えられる。

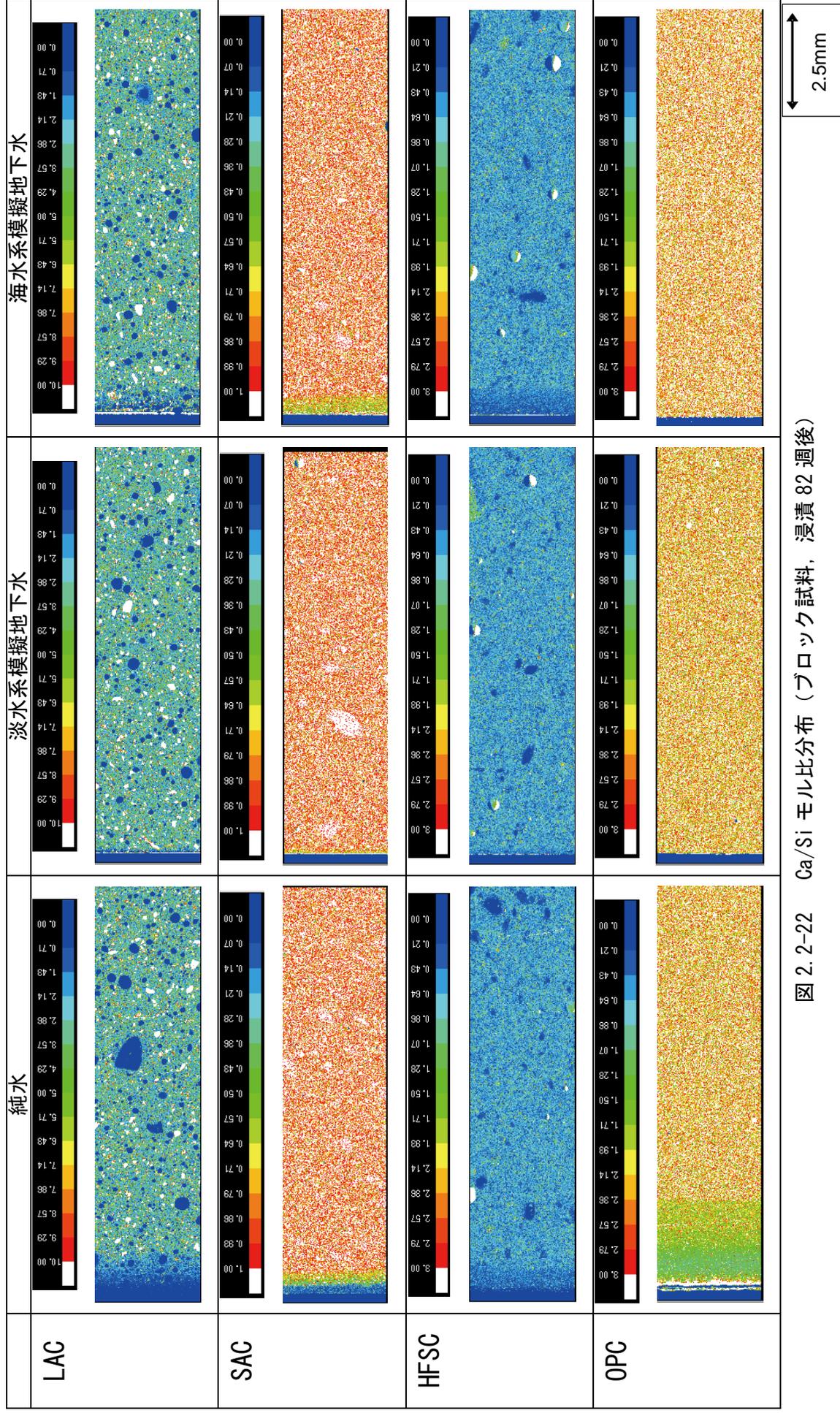


図 2.2-22 Ca/Si モル比分布 (ブロック試料, 浸漬 82 週後)

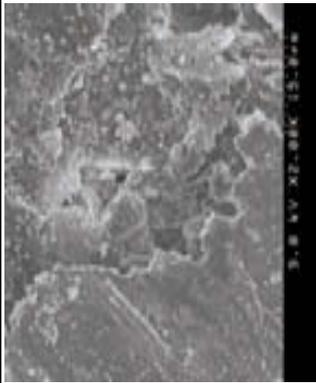
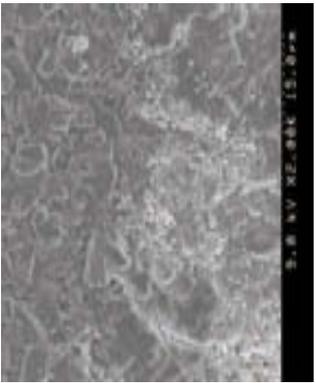
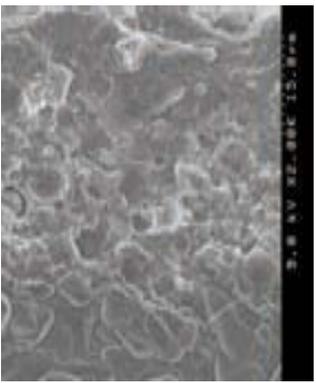
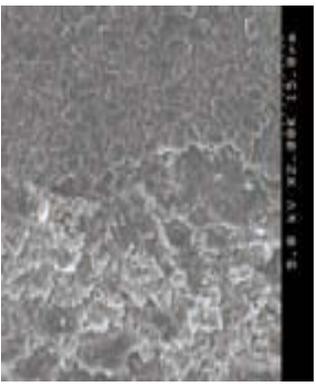
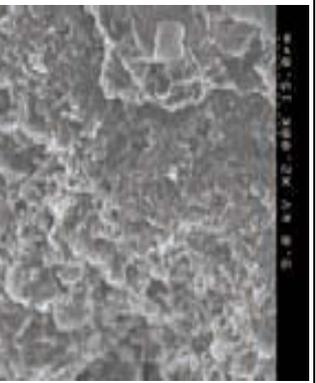
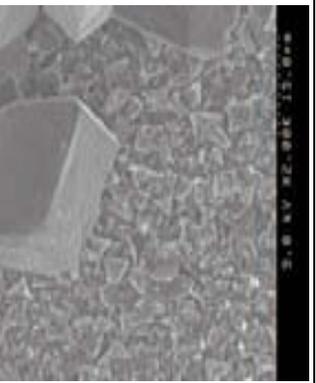
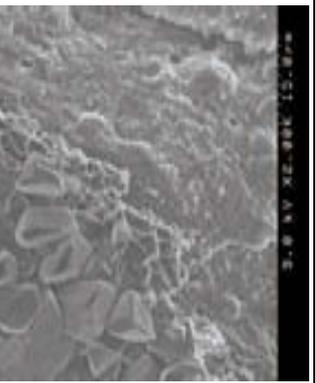
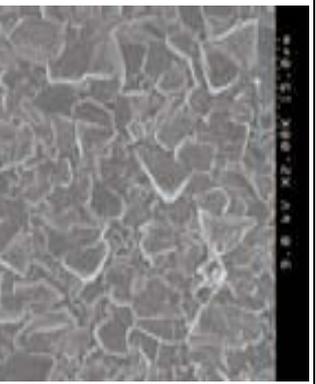
	LAC	SAC	HFSC	OPC
純水				
淡水系				
海水系				

図 2.2-23 曝露面における SEM 観察像

図 2.2-24 にブロック試料を海水系模擬地下水に浸漬した場合の Cl 分布を示す。これより、何れの低アルカリ性セメントも OPC より、塩分浸透性が低いことが確認される。特に、OPC の場合、試料の深部まで塩分が浸透しているのに対し、低アルカリ性セメントの場合、表面の極近傍での浸透のみにとどまっていることが確認される。この結果から、低アルカリ性セメントは遮塩性の高いセメント系材料であると考えられる。

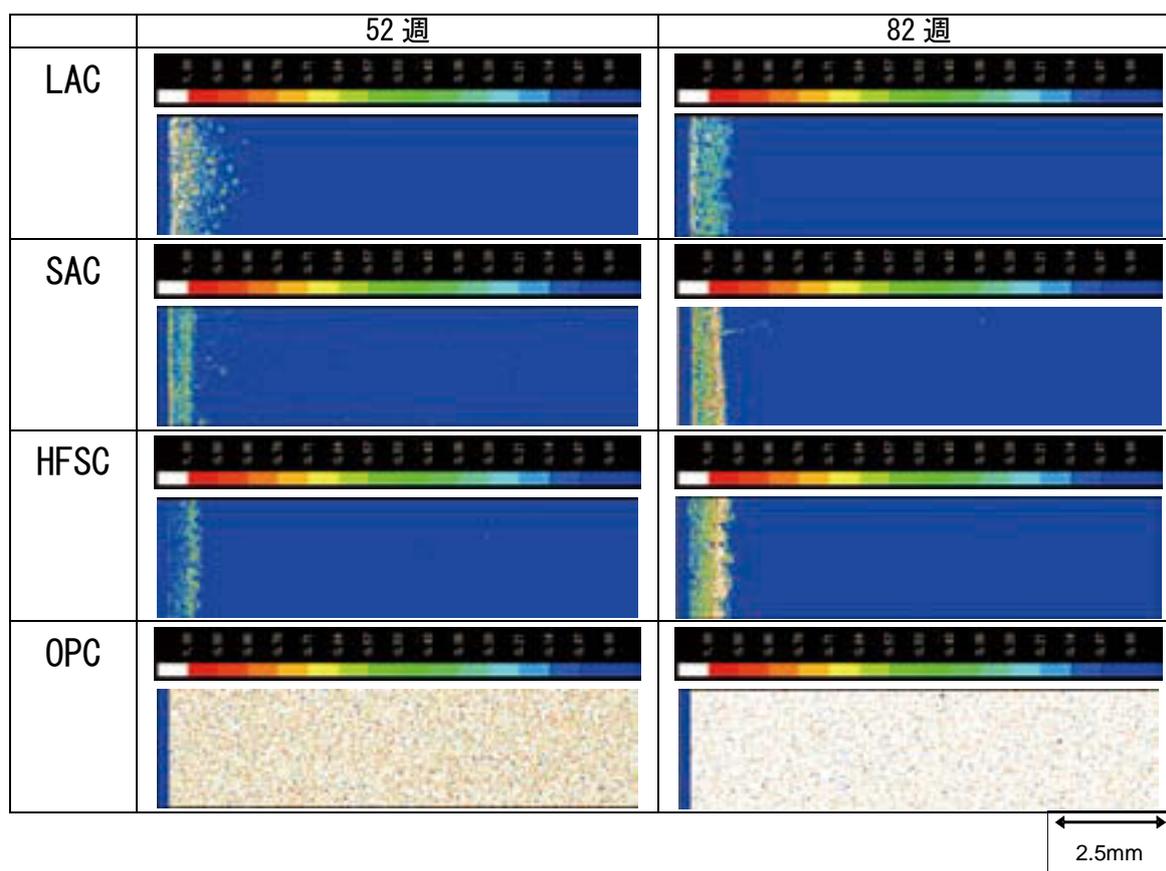


図 2.2-24 Cl 分布 (ブロック試料, 海水系模擬地下水)

以上の溶脱試験の結果をまとめると以下の通りである。

- ・ 何れの低アルカリ性セメントにおいても、純水、淡水系模擬地下水に浸漬した場合、液固比によらず、液相中の Ca 濃度が OPC と比較して低いことが確認され、OPC と比較して、低アルカリ性セメントの Ca 水和物が解けにくい状態であると推察される。一方で、海水系模擬地下水に浸漬した場合、LAC、HFSC に関しては液相中の Ca 濃度が高くなることを確認した。これは、Ca 水和物の溶解反応に共存イオンやイオン強度が影響を及ぼすことを示唆しており、今後 Ca 溶解反応に及ぼす共存イオンの影響を検討する必要があると考えられた。

- ・ 何れのセメント硬化体においても、純水の場合、曝露面近傍では初期の主水和生成物が消失し、淡水系模擬地下水や海水系模擬地下水の場合、カルサイト等の 2 次鉱物の析出が確認された。
- ・ 低アルカリ性セメントを用いた場合、岩盤や緩衝材などのバリア機能への影響が懸念される  $\text{Ca}^{2+}$  や  $\text{OH}^-$  の溶出量を抑制できる。また、浸漬曝露面からの内部方向への変質現象は、純水の場合、低アルカリセメントの方が OPC と比較して浅くなる。ただし、海水系模擬地下水に対して浸漬した場合、低アルカリ性セメントの方がより深部まで変質の影響が及ぶ場合があることが確認された。

### (3) アルカリ骨材反応

アルカリ骨材反応は、骨材中のシリカ分とセメント中のアルカリが反応して膨張性のゲルを生じる反応であり、ひび割れや析出物の生成によりセメント系材料の長期挙動の不確実性の一因となると考えられる。そこで、ここでは、低アルカリ性セメントが有するアルカリ骨材反応性を評価した。

アルカリ骨材反応試験では、硬化体の膨張ひずみの測定により、各種低アルカリ性セメントから供給されるアルカリ量に起因するアルカリ骨材反応性の評価を行った。特に、ここではセメントに含まれるアルカリ分による反応を検討するため、NaOH などのアルカリは使用していない。アルカリ骨材反応試験に供するモルタルは、パイレックス骨材を用いた。膨張ひずみの測定は、JIS A 1129-3 に規定されるダイヤルゲージ法により測定した。

図 2.2-25 に膨張ひずみ測定結果を示す。低アルカリ性セメントを使用した場合は、何れのものも、OPC よりも膨張ひずみが小さい結果となった。低アルカリ性セメントは、アルカリ骨材反応性が低いセメントであるといえる。特に HFSC では、収縮傾向となった。これは、ポズラン反応に伴う組織の緻密化によるアルカリイオンの拡散性の低下ならびに細孔溶液中のアルカリの C-S-H 相への吸着によりアルカリ骨材反応が生じにくくなったと推察される。なお、OPC においては 91 日後に、SAC においては 182 日後に骨材の膨張に伴うひび割れが生じていることが確認された。

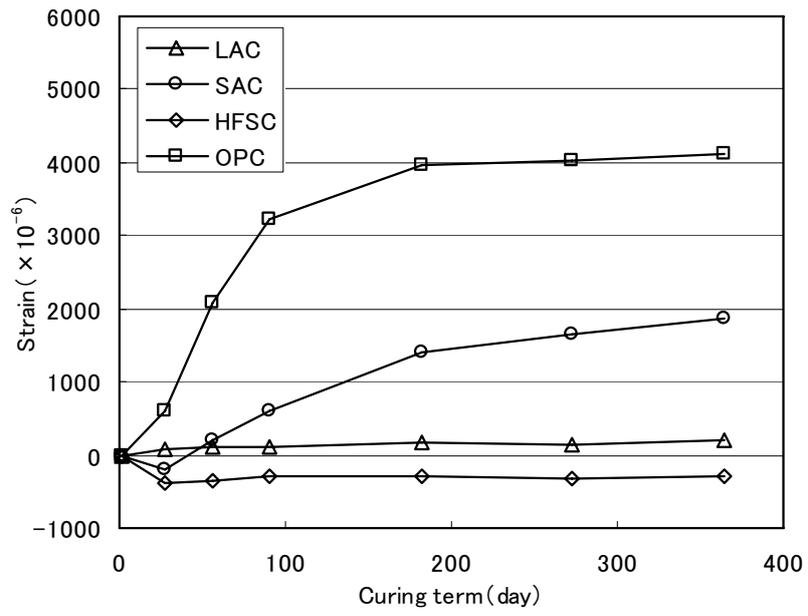


図 2.2-25 アルカリ骨材反応試験結果

## 2.3 低アルカリ性セメントに用いる補強材の適用性評価

処分場のコンクリート構造部材では、周辺バリアへの影響を軽減するため、低アルカリ性セメントの使用が検討されている。「2.2」の検討により、セメントに起因する基礎物性に関するデータは取得できたが、セメント系材料は引張に弱いことから補強材の使用が必要となる。それぞれの低アルカリ性セメントは、pHを11以下に抑えるように開発が進められているが（核燃料サイクル開発機構，1999）、この場合に通常補強材として使用される鉄筋を使用すると、鉄筋腐食が生じる可能性がある。したがって、本節では、鉄筋補強材の代替材として、繊維および炭素繊維複合材ケーブルを使用した場合の補強効果に関して検討した。

### 2.3.1 長期耐久性を考慮した補強材の選定

本調査の目的は、幅広く繊維補強材の性状を調べ、処分場のコンクリート構造部材へ適用可能な補強材候補を抽出することである。調査では、補強材単体の性状に加えて、コンクリートとしての強度特性、施工性、構造性能、耐久性、使用実績などの情報を収集し、その特徴を整理・分析した。

下記①～⑤に示す調査項目に関して、過去7年間にわたる関連学協会の論文や資料などの公開情報を収集し、その特徴を取りまとめた。

情報収集においては、処分場のコンクリート構造部材へ適用可能と思われる候補材料を優先した。そして、公開情報の多い項目に関しては、重複する内容を除外して、各繊維補強材に対して概ね15件程度の情報を収集した。また、公開情報、検討実績のない項目についてはその旨を記載した。

#### ①補強材の種類と特徴

短繊維，長繊維，シート形状のものを対象とした。

#### ②繊維補強材を使用したコンクリートの製造施工特性

フレッシュ性状と硬化性状，配合設計法を対象とした。

#### ③繊維補強材を使用したコンクリートの構造性能

耐力・変形性能，ひび割れ性状を対象とした。

#### ④繊維補強材を使用したコンクリートの耐久性

中性化，透水・透気性，塩害，凍害，化学的侵食，アルカリ骨材反応を対象とした。

#### ⑤繊維補強材を使用したコンクリートの施工実績

施工事例，設計概念，施工方法を対象とした。

表 2.3-1 に調査対象とした文献一覧を示す。

表 2.3-1 調査対象

分類	文献名	発行者	発行年
指針類、 委員会報告書	2002 年度版コンクリート標準示方書 [施工編]	土木学会	2002
	2002 年版コンクリート標準示方書 改訂資料, 2002	土木学会	2002
	2002 年度版コンクリート標準示方書 [構造性能照査編]	土木学会	2002
	鋼繊維補強鉄筋コンクリート柱部材の設計指針 (案)	土木学会	1999
	コンクリート構造物の補強指針 (案)	土木学会	1999
	鋼繊維補強コンクリート設計施工指針	土木学会	1983
	連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針	土木学会	2000
	高靱性セメント複合材料を知る・作る・使う (高靱性セメント複合材料の性能評価と構造利用研究委員会報告書)	日本コンクリート工学協会	2002
	高靱性セメント複合材料の性能評価と構造利用研究委員会報告書	日本コンクリート工学協会	2002
	コンクリートのひび割れ調査, 補修・補強指針	日本コンクリート工学協会	1987
	コンクリートのひび割れ制御指針	日本コンクリート工学協会	1986
	コンクリート構造物のリハビリテーション研究委員会報告書	日本コンクリート工学協会	1998
	スチールファイバーコンクリートの手引 [第3版]	鋼材倶楽部	1998
	書籍類	エンサイクロペディア	セメント協会
コンクリート技術の要点		日本コンクリート工学協会	2005
コンクリート便覧		日本コンクリート工学協会	1996
コンクリート工学ハンドブック		朝倉書房	1998
コンクリート名人養成講座		日経BP	2000
ステンレス鋼便覧		ステンレス協会	1995
最新のマスコンクリート技術		土木学会	1996
繊維コンクリート		森北出版	1980
繊維補強コンクリート 新素材繊維を中心に		鹿島出版会	1992
繊維補強セメント/コンクリート複合材料		技報堂出版	1994
論文	土木学会年次学術講演概要集	土木学会	1999-2005
	土木学会論文集 (第V部門)	土木学会	1999-2005
	セメント・コンクリート論文集 (セメント技術年報)	セメント協会	1999-2005
	日本建築学会大会学術講演梗概集	日本建築学会	1999-2005
	コンクリート工学年次論文報告集	日本コンクリート工学協会	1999-2005
	コンクリート工学論文集	日本コンクリート工学協会	1999-2005
	コンクリート工学	日本コンクリート工学協会	1999-2005
鹿島技術研究所年報	鹿島建設	1999-2005	

既往文献の調査により，各種繊維補強材の単体ならびにコンクリート用補強材としての特徴を把握した。表 2.3-2 に主な繊維補強材の各種性能とその特徴をまとめた結果を示す。

表 2.3-2 主な短繊維補強材料の特徴比較

繊維種類	使用実績	添加による影響			長期化学的安定性	コスト 円/10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>
		力学特性	ひび割れ抵抗性	施工性		
鋼	豊富	強度増加	改善	スランプへの影響	不明	2万
炭素	豊富	強度増加	改善	スランプ, 空気量への影響	安定	20万
ガラス	豊富	影響無し	改善	スランプ, 空気量への影響	不明	2万
アスベスト	現在不可	強度増加	不明	不明	安定	0.6万
PVA系	豊富	強度増加	不明	スランプへの影響	不明	1.5万
ポリエチレン	豊富	強度増加	改善	不明	不明	2万
ポリプロピレン	豊富	強度増加	改善	スランプへの影響	不明	1.5万
ナイロン	不明	強度増加	改善	スランプへの影響	不明	1万
アラミド	豊富	強度増加	不明	スランプへの影響	不明	9万
PBO	少ない	不明	改善	不明	不明	25万

注) 未収集の項目は不明と記載した。

このうち、コンクリート用補強材としての使用実績ならびに諸性能、費用面を比較すると、概ね以下のように取りまとめることができる。

- ・炭素繊維に代表される無機系繊維材料は、一般構造物のコンクリート用補強材としての使用実績は多く、施工性、力学特性、長期耐久性（材料の化学的安定性）において優れた材料である。ただし、材料単価が非常に高額である。
- ・アラミド繊維やポリプロピレン繊維に代表される有機系繊維材料も、無機系の炭素繊維と同様に一般構造物のコンクリート用補強材としての使用実績は多く、施工性、力学特性に優れている。ただし、長期耐久性（材料の化学的安定性）の観点では材料の変質などが想定されることから、これに対する評価、検討は必要と考えられる。材料単価は比較的安価である。

これらの結果に基づき、以下の検討では、低アルカリ性セメントを使用したコンクリートに用いる短繊維補強材候補として、長期耐久性を除く性能は同等と考えられ、かつ、材料単価が大幅に異なる「炭素繊維」と「ポリプロピレン繊維」の2つを選択した。

2種類の繊維の概要は表 2.3-3 に示すとおりである

表 2.3-3 検討対象とした繊維の概要

	炭素繊維	ポリプロピレン繊維
外観		
概要	添加率 0.5~2.0vol% 繊維長 30mm, 密度 1.9g/cm <sup>2</sup> ヤング係数 24000N/mm <sup>2</sup> 引張強度 780N/mm <sup>2</sup>	添加率 0.5~1.0vol% 繊維長 48mm, 密度 0.91g/cm <sup>2</sup> ヤング係数 10500N/mm <sup>2</sup> 引張強度 530N/mm <sup>2</sup>

### 2.3.2 補強材を使用したコンクリートの基礎特性

処分場のコンクリート構造部材では、周辺ベントナイト層への悪影響や鉄筋腐食によるひび割れ発生の回避などの観点から、コンクリート用材料として、低 pH セメント（以下、低アルカリ性セメントと称す）と繊維補強材を使用することが想定される。このため、低アルカリ性セメントと繊維補強材を用いたコンクリートの諸性状のうち、コンクリートの製造施工特性に関連したフレッシュ性状と、コンクリートの硬化後の特性に関連した材料物性を把握する目的で、コンクリートの配合試験ならびに力学特性試験を実施した。

#### (1) コンクリートの配合選定試験

普通ポルトランドセメント（OPC）と 3 種類の低アルカリ性セメント（LAC, HFSC, SAC）を用いたコンクリートに、炭素繊維とポリプロピレン繊維の 2 種類の短繊維補強材を添加して、コンクリートのフレッシュ性状を試験により把握した。その結果、配合強度（材令 28 日の圧縮強度）40N/mm<sup>2</sup>以上、スランプ 8~12cm を満足する条件での、コンクリートの示方配合を表 2.3-4 のように選定した。なお本検討の結果、配合強度を満足するためには、いずれの低アルカリ性セメントとも、単位結合材量は OPC の場合よりも多くなった。

コンクリートの示方配合に基づき、力学特性試験（圧縮強度、引張強度、曲げ強度、ヤング係数、クリープ特性、乾燥収縮特性）ならびに引張軟化特性試験に供する試験体を作製した。試験体は打設後 28 日間水中養生とし、その後、試験時までには温度 20℃、湿度約 50%の室内に保管した。

表 2.3-4 各種セメントを用いた場合の示方配合

(a) OPC コンクリートの示方配合

配合名	水セメント比 W/C(%)	細骨材率 S/a(%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	繊維
OPC	58	43	195	336	748	1007	0.00
OPC-C0.5	58	43	195	336	748	1007	9.50
OPC-C1.0	55	43	195	355	740	999	19.00
OPC-C2.0	52	43	200	385	724	977	38.00
OPC-P0.5	58	43	200	345	737	996	4.55
OPC-P1.0	58	43	220	379	702	950	9.10

$a = S + G$

(b) LAC コンクリートの示方配合

配合名	水セメント比 W/C(%)	細骨材率 S/a(%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	繊維
LAC	45	43	180	400	740	1002	0.00
LAC-C0.5	48	43	180	375	750	1013	9.50
LAC-C1.0	44	43	180	409	738	996	19.00
LAC-C2.0	45	43	190	422	721	974	38.00
LAC-P0.5	40	43	180	450	724	975	4.55
LAC-P1.0	40	43	200	500	681	920	9.10

$a = S + G$

(c) HFSC コンクリートの示方配合

配合名	水結合材比 W/P(%)	細骨材率 S/a(%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )							
			P (C+SF+FA)				細骨材 S	粗骨材 G	繊維	高性能 AE減水剤
			水 W	セメント C	シリカフェーム SF	フライアッシュ FA				
HFSC	40	43	180	180	90	180	723	976	0.00	1.62
HFSC-C1.0	40	43	180	180	90	180	723	976	19.00	1.62
HFSC-P1.0	40	43	180	180	90	180	723	976	9.10	2.52

$a = S + G$

(d) SAC コンクリートの示方配合

配合名	水セメント比 W/C(%)	細骨材率 S/a(%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				繊維
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	
SAC	40	43	220	550	640	864	0.00
SAC-C1.0	45	43	210	467	682	921	19.00
SAC-P1.0	40	43	230	575	619	836	9.10

$a = S + G$

W:メタ珪酸ナトリウム添加溶液

## (2)コンクリートの力学特性試験結果

圧縮強度、ヤング係数、引張強度および曲げ強度については材齢1ヵ年までの経時変化について、クリープ特性と乾燥収縮特性については材齢6ヶ月までの経時変化について、引張軟化特性について材齢1ヵ年以上について検討した。

### ①圧縮強度

図 2.3-1 に材齢 28 日後の圧縮強度で正規化した圧縮強度の経時変化を示す。これより、材齢 28 日までの強度増加の傾向は、何れのセメントを用いたコンクリートにおいても大差なかった。材齢 28 日以降は、OPC と LAC、HFSC を使用したコンクリートの強度増加が大きく、HFSC については材齢 1 ヶ年以降も増加傾向にあることがわかった。HFSC については、長期強度が期待できるポズラン質材料のフライアッシュを使用しているものの、材齢 28 日以降は気中で試験体を保管したため、ポズラン反応の促進に必要な水分の供給が十分ではなく、材齢 28 日以降の強度増加は、当初、OPC と LAC を用いたコンクリートに比べて小さかった。しかしその後、材齢 1 ヶ年時点では、OPC と LAC を用いたコンクリートと同程度まで増加した。SAC については材齢 28 日以降の強度増加はほとんど無かった。

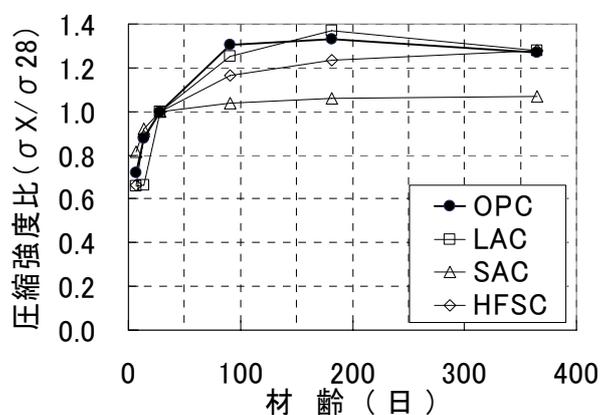
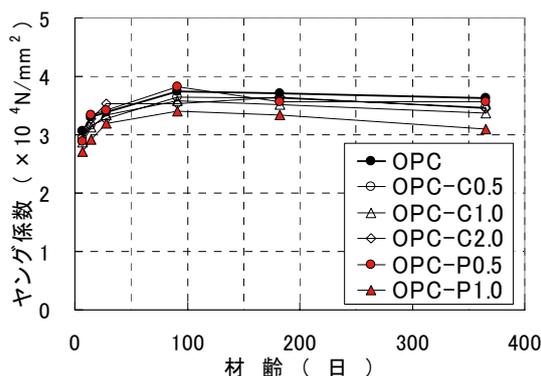


図 2.3-1 材齢 28 日強度で正規化したコンクリートの圧縮強度の経時変化

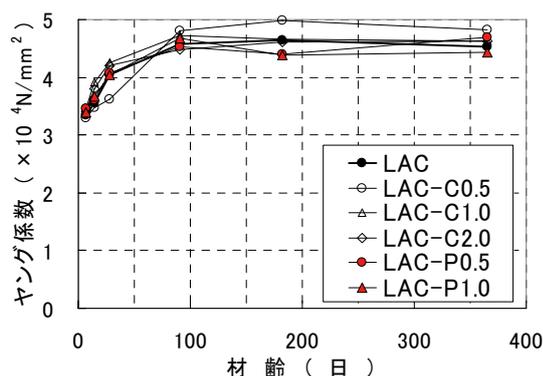
### ②ヤング係数

図 2.3-2 にヤング係数の経時変化を示す。材齢 28 日におけるヤング係数は、LAC を用いたコンクリートが若干大きいものの、何れのコンクリートもほぼ同程度であった。OPC と LAC を用いたコンクリートでは、材齢 28 日以降は材齢 91 日もしくは材齢 6 ヶ月までヤング係数は若干の増加傾向にあるものの、それ以降は材齢 1 ヶ年にかけて緩やかに低下傾向

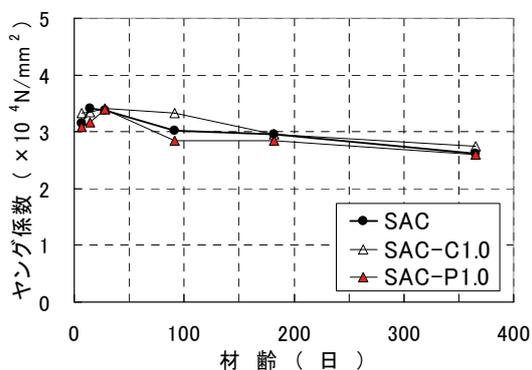
が認められた。HFSC と SAC を用いたコンクリートでは、材齢 28 日以降のヤング係数は、材齢の経過と共に漸減傾向を示した。ヤング係数の漸減傾向は、材齢 28 以降、気中の乾燥条件に曝されたことにより、乾燥収縮で生じた微細なひび割れによる影響と推測される。ヤング係数の大きさは、LAC が他のものより大きいことを除けばセメントの種別によらず同程度である。そして、圧縮強度と同様に、その大きさはコンクリートに混入した短繊維補強材の種類やその添加率による影響を受けないことがわかった。



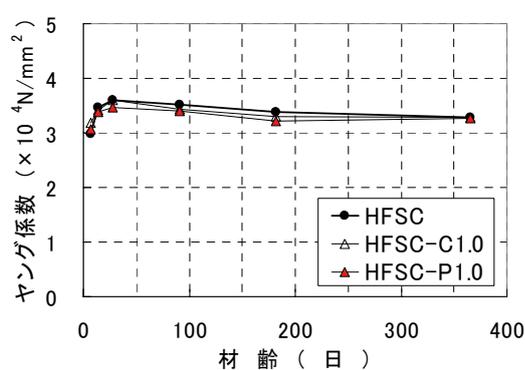
(a) OPC を使用したコンクリート



(b) LAC を使用したコンクリート



(c) HFSC を使用したコンクリート



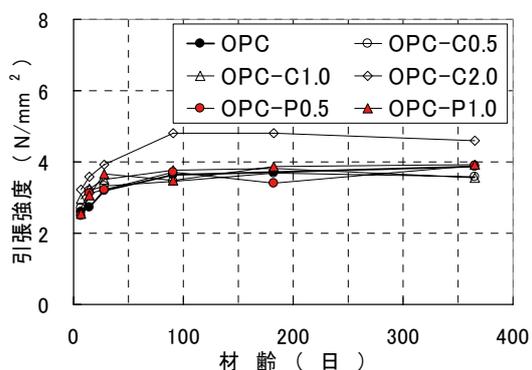
(d) SAC を使用したコンクリート

図 2.3-2 コンクリートのヤング係数の経時変化

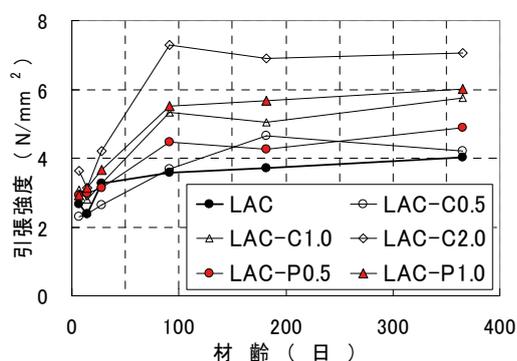
### ③引張強度

図 2.3-3 に引張強度の経時変化を示す。材齢 28 日における引張強度は、何れのコンクリートもほぼ同じであった。OPC と LAC を用いたコンクリートでは、材齢 28 日以降も引張強度は増加傾向を示した。そして、LAC を用いたコンクリートでは、短繊維補強材の種別に係わらず、その添加率の増加に伴い引張強度は大きくなる傾向を示した。HFSC と SAC を用いたコンクリートでは、短繊維補強材を添加しない場合において、材齢 28 日以降の引

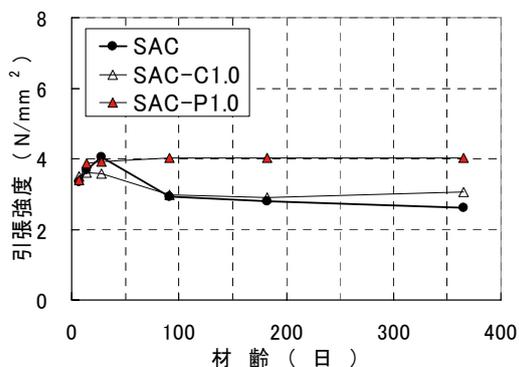
引張強度の経時変化は、ヤング係数の経時変化で認められた傾向と類似しており、材齢の経過と共に減少傾向を示した。引張強度の減少率としては平均的に約 20%であった。短繊維補強材を添加した場合においては、材齢 28 日以降、HFSC を用いたコンクリートでは、引張強度は経時的に漸増傾向を示すが、SAC を用いたコンクリートでは、引張強度は漸減もしくは経時変化がほとんど認められない傾向を示した。この原因の一つとしては、材齢 28 日以降、気中の乾燥条件に曝されたことによる影響と考えられる。引張強度の大きさは、短繊維補強材を添加した LAC が他のものより大きいことを除けば、何れのコンクリートとも同程度であった。



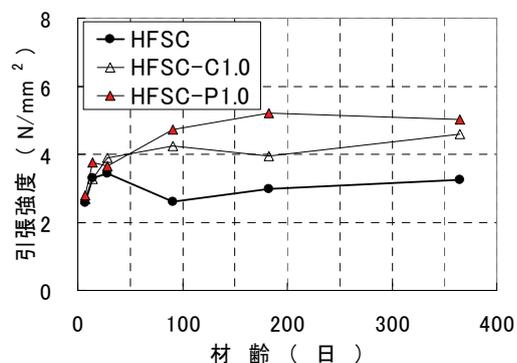
(a) OPC を使用したコンクリート



(b) LAC を使用したコンクリート



(c) HFSC を使用したコンクリート



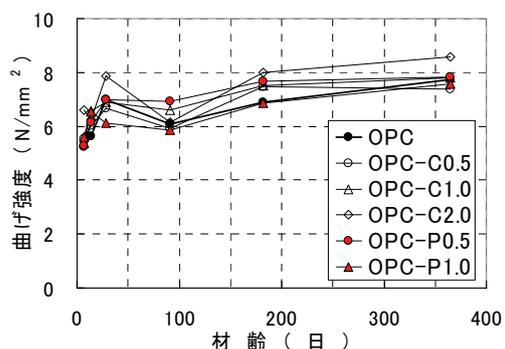
(d) SAC を使用したコンクリート

図 2.3-3 コンクリートの引張強度の経時変化

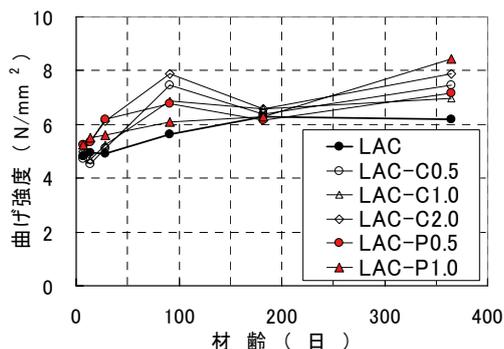
#### ④曲げ強度

図 2.3-4 に曲げ強度の経時変化を示す。材齢 28 日における曲げ強度は、何れのコンクリートもほぼ同じであった。OPC と LAC を用いたコンクリートでは、材齢 28 日以降も曲げ強度は漸増傾向を示した。そして、短繊維補強材を添加した場合に曲げ強度は若干増大す

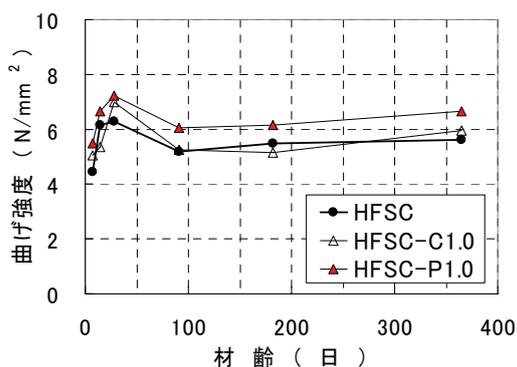
るが、短繊維補強材の種別やその添加率による影響は小さかった。HFSC と SAC を用いたコンクリートでは、短繊維補強材の種別やその添加率に係わらず、材齢 28 日以降の曲げ強度の経時変化は減少傾向を示し、ヤング係数や引張強度の経時変化で認められた傾向と同様であった。曲げ強度の減少率としては、HFSC よりも SAC を用いたコンクリートの方が大きく、HFSC で平均的に約 20%，SAC で平均的に約 30%であった。



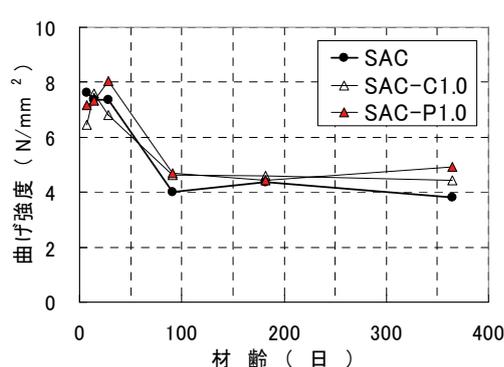
(a) OPC を使用したコンクリート



(b) LAC を使用したコンクリート



(c) HFSC を使用したコンクリート



(d) SAC を使用したコンクリート

図 2.3-4 コンクリートの曲げ強度の経時変化

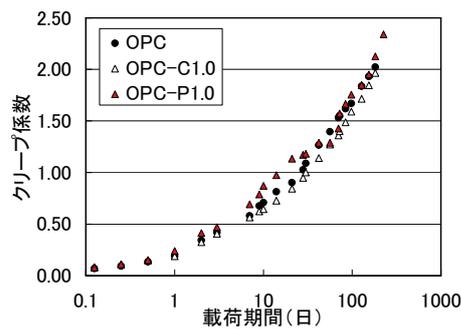
⑤ クリープ特性

図 2.3-5 にクリープ係数の経時変化を示す。クリープ係数とは、塑性ひずみと弾性ひずみとの比率で表され、土木学会コンクリート標準示方書に示された下記予測式において左辺の部分が該当する。

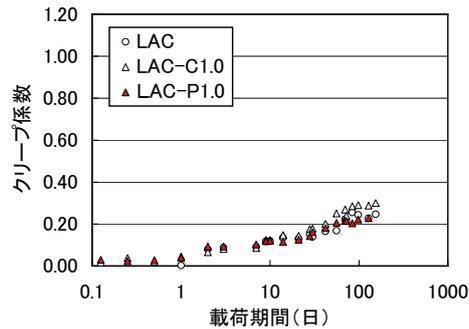
$$\varepsilon'_{cc}(t, t', t_0) / \sigma'_{cp} = \frac{4W(1 - RH/100) + 350}{12 + f'(t')_c} \log_e(t - t' + 1)$$

ここに、 $f'_c(t')$ は荷重開始材齢におけるコンクリートの圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>) ( $f'_c(t') \leq 80\text{N/mm}^2$ )、 $t'$ および $t$ は、荷重時材齢および荷重中の材齢(日)、 $W$ は単位水量(kg/m<sup>3</sup>) ( $130\text{kg/m}^3 \leq W \leq 230\text{kg/m}^3$ )、 $RH$ は大気相対湿度(%)

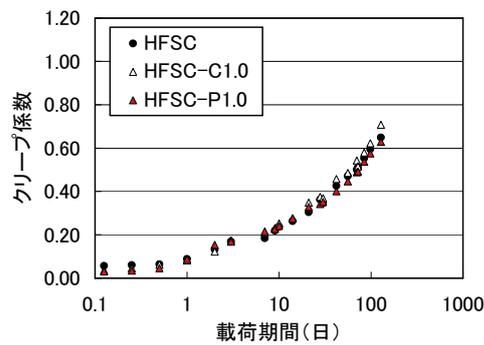
低アルカリ性セメントを用いたコンクリートのクリープ係数は、OPCを用いた普通コンクリートのものよりも小さく、特に、LACを用いたコンクリートのクリープ係数は、OPCを用いた普通コンクリートのものの約20%と最も小さかった。圧縮応力下でのクリープ特性については、短繊維補強材の添加による影響を受けないことがわかった。



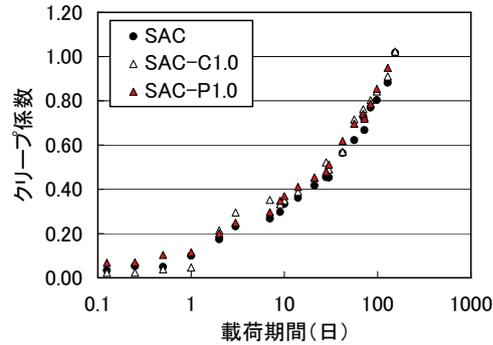
(a) OPC を使用したコンクリート



(b) LAC を使用したコンクリート



(c) HFSC を使用したコンクリート



(d) SAC を使用したコンクリート

図 2.3-5 コンクリートのクリープ係数の経時変化

上記で示した土木学会コンクリート標準示方書のクリープ予測式でわかるように、クリープ特性の違いを適切に比較、評価するためには、コンクリート配合のうち単位水量の違いを考慮する必要がある。以下では、この違いを考慮してクリープ定数(A)を算出した。クリープ定数とは、土木学会コンクリート標準示方書の予測式において、右辺の対数項に掛かる係数部分であり、クリープ係数の経時変化図において、Y切片(時間軸X=0)に該当する値である。

繊維補強材を添加していないプレーンコンクリートに対して、コンクリートの単位水量

を考慮してクリープ定数を計算した結果を図 2.3-6 に示す。

クリープ定数の計算値を比較すると、HFSC と SAC を用いたコンクリートについては、OPC を用いたコンクリートのクリープ定数とほぼ同等であることがわかる。LAC を用いたコンクリートについては、OPC を用いたコンクリートのクリープ定数の約 75% であることがわかる。計算値と実験値との比較から、OPC を用いたコンクリートのクリープ定数については、両者はほぼ合致しており、示方書予測式はクリープ定数を精度良く評価できることがわかる。低アルカリ性セメントを用いたコンクリートのクリープ定数の実験値については、コンクリートの単位水量を加味しても、OPC を用いたコンクリートのクリープ定数の計算値よりも小さいことがわかる。そのなかでも、LAC を用いたコンクリートのクリープ定数が最も小さく、計算値の約 19% であることがわかる。

以上のことから、低アルカリ性セメントを用いたコンクリートのクリープ係数は、OPC を用いた普通コンクリートのものよりも小さいことから、持続荷重の荷重に伴うクリープひずみ（塑性ひずみ）は生じにくい傾向にあることがわかった。そして、低アルカリ性セメントの中でも、LAC を用いたコンクリートが最もクリープひずみの発生を低減できることが分かった。

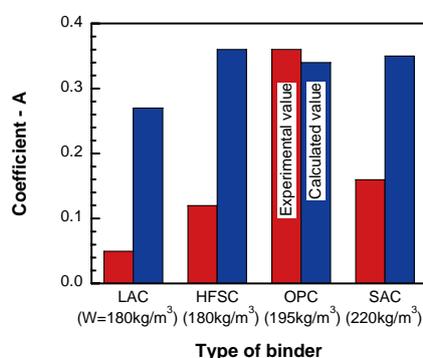
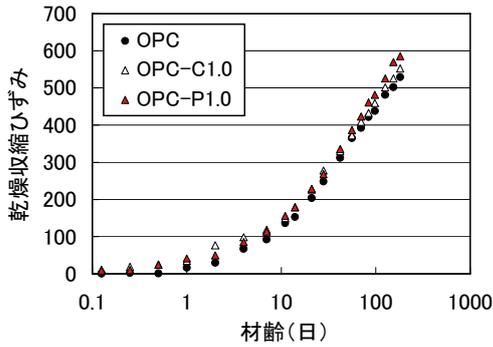


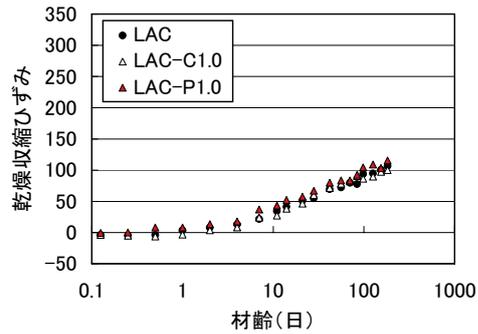
図 2.3-6 単位水量を考慮したクリープ定数の計算値と実験値の比較

#### ⑥乾燥収縮特性

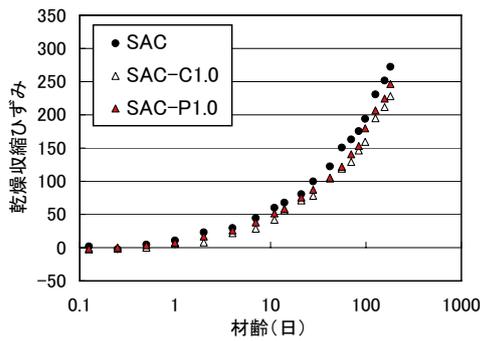
図 2.3-7 に乾燥収縮ひずみの経時変化を示す。低アルカリ性セメントを用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみは、OPC を用いた普通コンクリートのものよりも小さく、特に、LAC を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみは、OPC を用いた普通コンクリートのものの約 25% と最も小さかった。乾燥収縮特性については、短繊維補強材の添加による影響を受けないことがわかった。



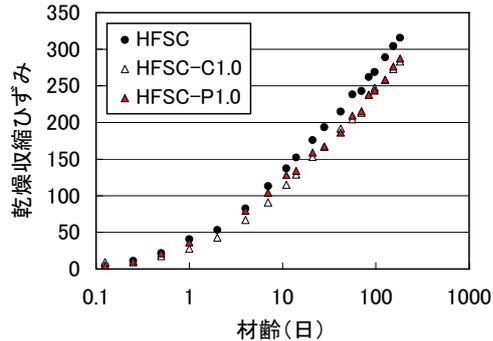
(a) OPC を使用したコンクリート



(b) LAC を使用したコンクリート



(c) HFSC を使用したコンクリート



(d) SAC を使用したコンクリート

図 2.3-7 コンクリートの乾燥収縮ひずみの経時変化

乾燥収縮ひずみについても、クリープ係数と同様に、コンクリートの配合条件のうち、単位水量の違いによる影響を大きく受けることから、以下では、この違いを考慮して乾燥収縮ひずみの最終値（収束値）を算出した。乾燥収縮ひずみの最終値は、土木学会コンクリート標準示方書に示された下記予測式を用いて算出した。

$$\varepsilon'_{ds}(t, t_0) = \frac{\varepsilon'_{ds\infty} \cdot (t - t_0)}{\beta + (t - t_0)}$$

ここに、 $\varepsilon'_{ds}(t, t_0)$ は材齢 $t_0$ に乾燥を開始したコンクリートの材齢 $t$ における乾燥収縮ひずみで、 $\varepsilon'_{ds\infty}$ および $\beta$ は、それぞれ、乾燥収縮ひずみの最終値および乾燥収縮ひずみの経時変化を表す項である。

$$\varepsilon'_{ds\infty} = \frac{\varepsilon'_{dsp}}{1 + \eta \cdot t_0}$$

$$\varepsilon'_{dsp} = \frac{\alpha(1 - RH/100)W}{1 + 150 \exp\left(-\frac{500}{f'_c(28)}\right)}$$

$$\eta = 10^{-4} \{15 \exp(0.007 f'_c(28)) + 0.25W\}$$

ここに、 $\varepsilon'_{ds\infty}$ は乾燥収縮ひずみの最終値( $\times 10^{-6}$ )、 $W$ は単位水量( $\text{kg}/\text{m}^3$ )、 $RH$ は大気相対湿度(%),  $f'_c(28)$ は材齢 28 日における圧縮強度( $\text{N}/\text{mm}^2$ )、 $t_0$ は乾燥開始時材齢(日)である。 $\alpha$ はセメントの種類の影響を表す係数で、普通ポルトランドセメントおよび低熱ポルトランドセメントを用いた場合には $\alpha=11$ で、早強ポルトランドセメントを用いた場合には $\alpha=15$ である。今回は、全てのセメントに対して $\alpha=11$ としている。

$$\beta = \frac{4W\sqrt{V/S}}{100+0.7t_0}$$

ここに、 $\varepsilon'_{ds}(t, t_0)$ は材齢 $t_0$ に乾燥を開始したコンクリートの材齢 $t$ における乾燥収縮ひずみ( $\times 10^{-6}$ )、 $\varepsilon'_{ds\infty}$ は乾燥収縮ひずみの最終値( $\times 10^{-6}$ )、 $W$ は単位水量( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) ( $130 \text{ kg}/\text{m}^3 \leq W \leq 230 \text{ kg}/\text{m}^3$ )、 $V/S$ は供試体の体積表面積比(mm) ( $100 \text{ mm} \leq V/S \leq 300 \text{ mm}$ ) である。

繊維補強材を添加していないプレーンコンクリートに対して、コンクリートの単位水量を考慮して乾燥収縮ひずみを計算した結果を図 2.3-8 に示す。

乾燥収縮ひずみの計算値を比較すると、コンクリートの単位水量の違いにより  $500 \times 10^{-6}$  ~  $700 \times 10^{-6}$  と異なることがわかる。計算値と実験値との比較から、OPC を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみについては、両者はほぼ合致しており、示方書予測式は乾燥収縮ひずみを精度良く評価できることがわかる。低アルカリ性セメントを用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの実験値については、コンクリートの単位水量を加味しても、計算値よりも小さいことがわかる。そのなかでも、LAC を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみが最も小さく、計算値の約 25% であることがわかる。

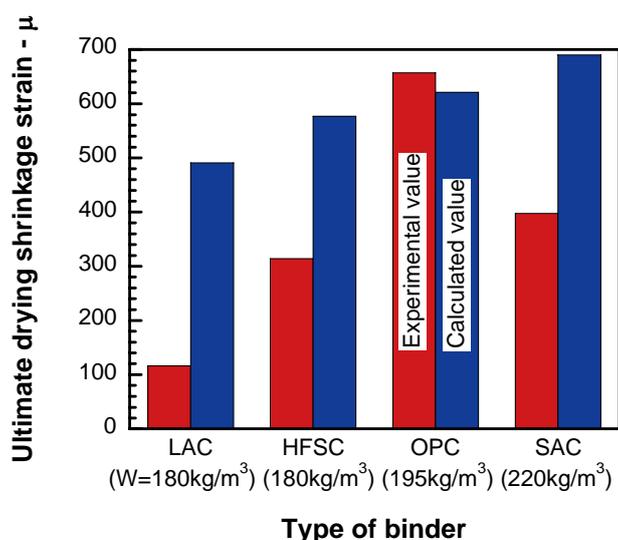


図 2.3-8 単位水量を考慮した乾燥収縮ひずみの計算値と実験値の比較

### ⑦引張軟化特性

図2.3-9に各種セメントを使用した場合の破壊エネルギーを、図2.3-10にOPCおよびLACを使用した場合の破壊エネルギーと繊維添加率の関係をそれぞれ示す。低アルカリ性セメントを用いたコンクリートの引張軟化特性を評価するために、切り欠きを有する試験体の曲げ試験を実施し、曲げ強度と破壊エネルギーを求めた。なお、図中の棒グラフは同一配合の3供試体の結果をそれぞれ示している。その結果、セメントの種別が曲げ強度へ与える影響は小さかったが、破壊エネルギーに関しては、OPCセメントとHFSCセメントが相対的に若干大きい傾向を示した。繊維補強材の添加が引張軟化特性に与える影響は顕著であり、添加量が増えるにしたがって、破壊エネルギーが増加することがわかった。これより、繊維補強材の添加はひび割れ後のひび割れ抵抗性を高めるために有効であると考えられる。

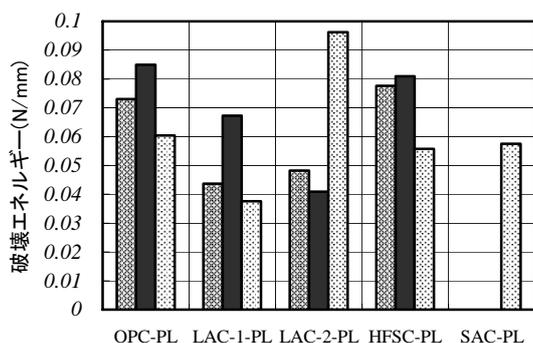
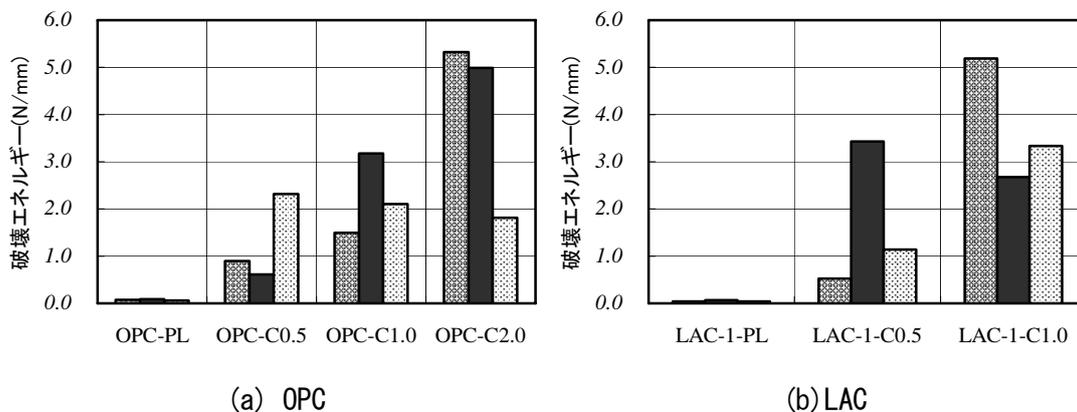


図 2.3-9 セメント種別の破壊エネルギー



(a) OPC

(b) LAC

図 2.3-10 破壊エネルギーと繊維添加率の関係

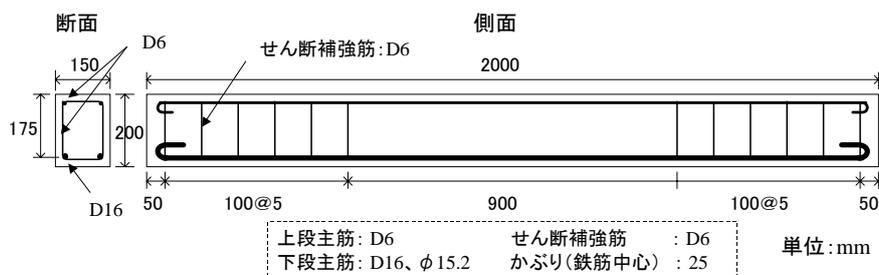
### 2.3.3 補強材を使用したコンクリート部材の力学特性

処分場のコンクリート構造部材では、周辺ベントナイト層への悪影響や鉄筋腐食によるひび割れ発生の回避などの観点から、コンクリート用材料として、低 pH セメント（以下、低アルカリ性セメントと称す）や繊維補強材を使用することが想定されている。そして、これら材料を使用したコンクリート部材に対しては、ひび割れの抑制や耐荷性能の点で、少なくとも一般的な鉄筋コンクリート部材と同等の性能が要求されると考えられている。しかしながら、これら材料を使用したコンクリート部材の構造性能に関する知見は明らかとされていない。このため、低アルカリ性セメントと繊維補強材を用いたコンクリートの諸性状のうち、コンクリートのひび割れ性状ならびに耐荷性能を把握する目的で、コンクリート部材の載荷試験を実施した。なお、本検討では、鉄筋の代替材料として、炭素繊維複合材ケーブルおよび短繊維補強材を用いた検討を行った。

#### (1) 試験の概要

コンクリート部材は、断面が幅 15cm×高さ 20cm、長さ 200cm の寸法とした。試験体の外観、寸法の諸元を図 2.3-11 に示す。試験体内部には、鉄筋の代替材として炭素繊維複合材ケーブル (CFCC) を配置した。配置したのは断面内において引張側（下段）である。炭素繊維複合材ケーブルを用いた補強筋の組み立て状況を図 2.3-12 に示す。

試験においては、コンクリート部材の耐力、変形性状ならびに、ひび割れ性状（発生本数、分散性、ひび割れ開口量等）の把握が重要となることから、コンクリート部材の断面設計においては、試験体中央のせん断補強筋を配置していない 90cm 間を試験区間とし、この区間で曲げ破壊が生じるように試験体長軸方向の補強材の配筋量、位置を定めた。そして、試験区間以外で破壊が生じないように、せん断補強筋（スターラップ）の配筋量と位置、配筋間隔を定めた。なお、補強筋に炭素繊維複合材ケーブルを用いた場合の断面設計の考え方として、①炭素繊維複合材ケーブルの高引張強度を最大限に活用する合理的な方法、②部材断面における鉄筋比（補強筋の径と本数）をほぼ同じとして、単純に鉄筋の代替材として利用したはり部材の耐荷性能を把握する場合、の二通りの考え方があるが、今回は後者の考え方を採用した。後者の場合、引張側の補強筋量が過剰となるため、試験体中央の試験区間が曲げ破壊する以前に、それよりも外側の区間でせん断破壊を生じる可能性があることを予め付記しておく。



- 仕様 ①下段主筋は、鉄筋(D16)および炭素繊維ロッド(CFCC、φ15.2)  
\* 炭素繊維ロッドは、鉄筋と比して、降伏強度約5倍、ヤング係数約2/3  
②コンクリートはプレーンおよび炭素繊維添加(1.0vol%)

図 2.3-11 試験体の外観および寸法諸元



図 2.3-12 炭素繊維複合材ケーブルを用いた補強筋組み立て状況（下段が当該材料）

前述の配合試験結果に基づき定めたコンクリートの示方配合に準拠して、配合試験や力学特性試験と同じ材料を用いて載荷試験に供するコンクリート部材を作製した。

コンクリートに混入する短繊維補強材は炭素繊維とした。炭素繊維は前述のコンクリートの配合試験や力学特性試験で使用したのと同じものであり、東レ社製の PAN 系炭素繊維（トレカ CFRP 線材，繊維長 30mm，密度 1.90g/cm<sup>3</sup>）である。コンクリートへの添加率は 1.0vol%とした。

鉄筋の代替材として使用した補強材は、東京製綱社製の炭素繊維複合材ケーブル「CFCC 1×7 15.2φ」である。この補強材は、CFRP をより線に加工したものであり、その諸元は直径 15.2mm，引張強度 2.14kN/mm<sup>2</sup>，ヤング係数 137 kN/mm<sup>2</sup>，密度 1.50g/cm<sup>3</sup>である（榎本，2003）。炭素繊維複合材ケーブルの外観を図 2.3-13 に示す。図 2.3-11 に示したように、コンクリート部材の断面内において、引張側（下段）に 2 本配置した。比較として使用した部材断面の引張側の鉄筋は D16 である。



図 2.3-13 炭素繊維複合材ケーブル (CFCC) の外観

試験ケースを表 2.3-5 に示す。セメント 4 種類 (OPC, LAC, HFSC, SAC) に対して、炭素繊維補強材(C)の添加の有無 (添加率は 1.0%)，鉄筋の代替補強材 (炭素繊維複合材ケーブル；CFCC) の利用の有無をパラメータとして，全 16 ケースをコンクリート部材の試験ケースとした。

全ケースに対しては，載荷試験実施時のコンクリート強度を把握する目的で，圧縮強度試験体と引張強度試験体を各々 3 本ずつ作製した。

作製したコンクリート部材ならびに強度試験体は，コンクリート打設後材令 28 日まで水中養生とし，それ以降は試験開始まで気中保管 (温度 20℃，湿度約 50%) とした。

表 2.3-5 試験ケース

試験体名	使用セメント	炭素繊維添加率	補強材	載荷試験
OPC-S	OPC	0	鉄筋	○
OPC-C			炭素繊維複合材ケーブル	○
OPC-SC1.0		1.0vol%	鉄筋	○
OPC-CC1.0			炭素繊維複合材ケーブル	○
LAC-S	LAC	0	鉄筋	○
LAC-C			炭素繊維複合材ケーブル	○
LAC-SC1.0		1.0vol%	鉄筋	○
LAC-CC1.0			炭素繊維複合材ケーブル	○
HFSC-S	HFSC	0	鉄筋	○
HFSC-C			炭素繊維複合材ケーブル	○
HFSC-SC1.0		1.0vol%	鉄筋	○
HFSC-CC1.0			炭素繊維複合材ケーブル	○
SAC-S	SAC	0	鉄筋	○
SAC-C			炭素繊維複合材ケーブル	○
SAC-SC1.0		1.0vol%	鉄筋	○
SAC-CC1.0			炭素繊維複合材ケーブル	○

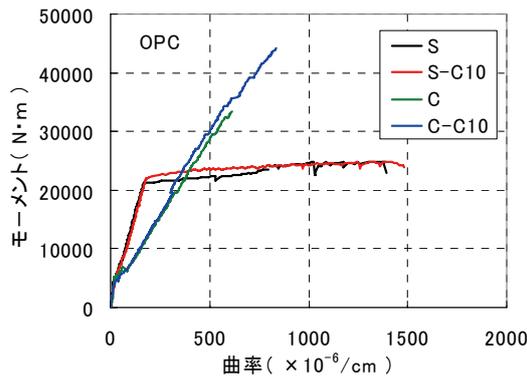
載荷試験は、最大荷重 200kN の油圧制御方式アクチュエータ（加力試験機）を用いて実施した。載荷試験では、一方向（鉛直下向き）への静的加力を基本とし、ある荷重レベル（例えば、ひび割れ発生荷重や鉄筋降伏荷重等）まで加力した後に荷重をゼロ近辺に除荷して、再度加力する方法とした。

## (2) 載荷試験結果

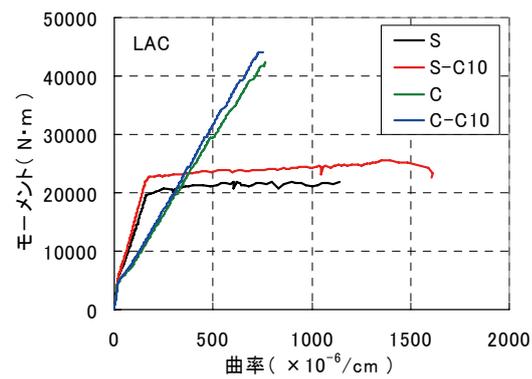
一方向の静的単調載荷試験により、コンクリート部材の耐力、変形性状ならびにひび割れ性状を把握した。試験結果から判明した事項を以下に示す。

### ①耐荷性状

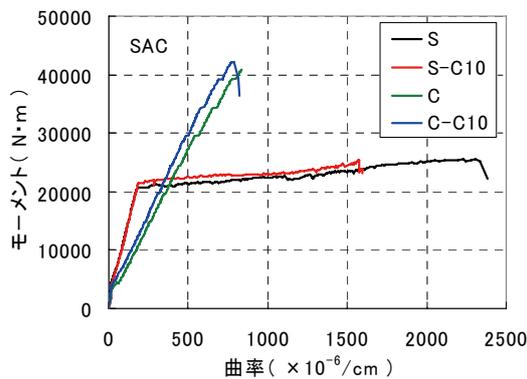
図 2.3-14 に曲げモーメントと曲率の関係を示す。曲げモーメントと曲率の関係において、引張側補強材の違いによる影響が大きく、セメント種別の違いや短繊維補強材の混入による影響は小さい。引張側補強材に鉄筋を用いた場合、鉄筋降伏以降の曲げモーメントの増加は小さく、曲率は終局時（破壊時）まで増加する。炭素繊維複合ケーブルを用いた場合、ひび割れ発生以降は破壊時まで、曲げモーメントと曲率の関係はほぼ比例関係を示す。これは、コンクリート部材の破壊時の曲げモーメントの方が、炭素繊維複合ケーブルが破断する曲げモーメントよりも小さく、炭素繊維複合ケーブルの応力、ひずみ状態が弾性範囲内にあるためと考えられる。これに起因して、終局時の破壊形態は、鉄筋を使用した場合は曲げ破壊となり、炭素繊維複合ケーブルを使用した場合はせん断破壊となった。



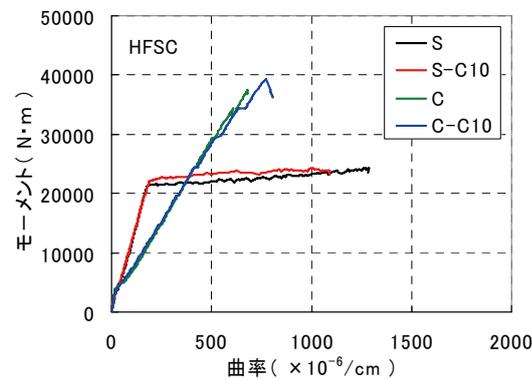
(a) OPC を用いたコンクリート



(b) LAC を用いたコンクリート



(c) HFSC を用いたコンクリート



(d) SAC を用いたコンクリート

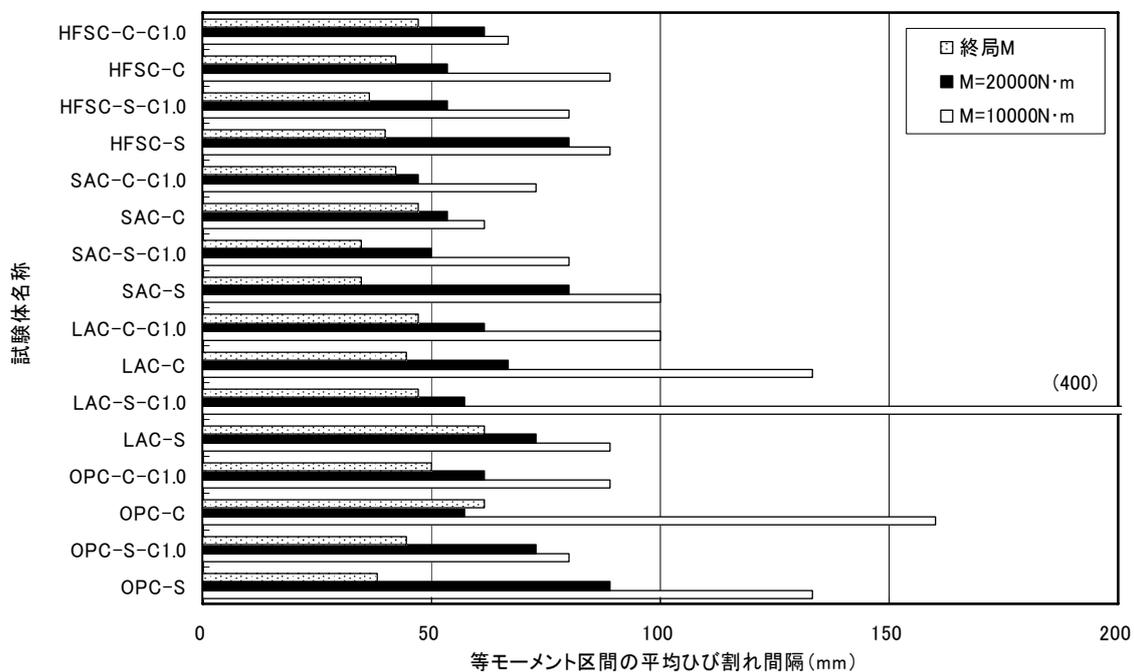
図 2.3-14 セメント種別に応じたコンクリート部材の曲げモーメントと曲率の関係

## ②ひび割れ性状

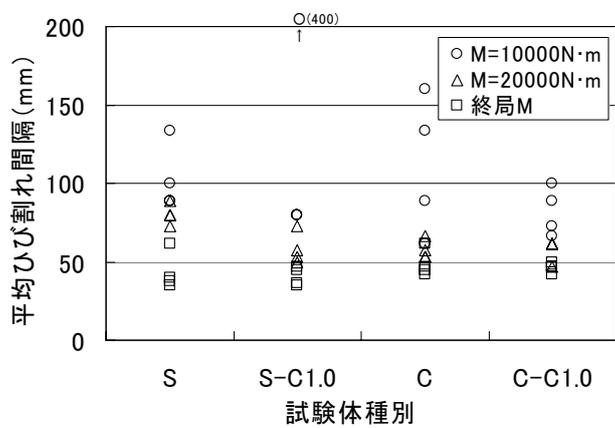
図 2.3-15 にコンクリート部材の荷重試験におけるひび割れ発生間隔をそれぞれ示す。OPC と LAC を用いたコンクリートのひび割れ発生間隔は同程度であり、これらは、HFSC と SAC を用いたコンクリートのひび割れ発生間隔よりも若干大きい傾向にある。この傾向は、荷重初期の段階でも終局時でも同じである。

引張側補強材の種類や短繊維補強材の混入の有無による違いについては、炭素繊維複合ケーブルを用いた場合の方が、鉄筋を用いた場合よりもひび割れ発生間隔は若干大きくなる傾向にあり、特に、荷重初期の段階ではこの差が顕著に認められた。これは、炭素繊維複合ケーブルの表面は樹脂系材料により滑らかなコーティングが施されているため、鉄筋と比べてコンクリートとの付着性能が劣ることから、ひび割れの分散性が低下したことが原因の一つとして考えられる。また、短繊維補強材の混入の影響については、引張側補強材の種類に係わらず、荷重初期の段階では、混入した方がひび割れ発生間隔は小さくなる

傾向にある。これは、短繊維補強材がコンクリートの引張力に対して抵抗し、部材長軸方向に対するひび割れの分散性が改善されたためと考えられる。



(a) 試験体別のひび割れ発生間隔



(b) 試験体種別でのひび割れ発生間隔

図 2.3-15 コンクリート部材の載荷試験におけるひび割れ発生間隔

## 2.4 材料試験に基づく低アルカリ性セメントの適用性の評価

本章では、各種低アルカリ性セメントの基本特性および補強材の適用性に関して、既往の研究および実験結果に基づき整理した。その結果、現状の低アルカリ性セメントの諸性質は、その製造方法の相違によって異なる特性を示す場合もあるものの、概ね普通ポルトランドセメントと同程度の基礎物性を示すことが確認された。また、低アルカリ性セメントの補強材として鉄筋を使用できない場合を想定し、繊維補強や炭素繊維複合ケーブルによる補強効果を検討した結果、これらの材料により引張強度や耐荷力、じん性の向上が可能であることが確認された。以上より、処分施設成立のための説明性の向上という観点から考えた場合、施設の候補材料のひとつとして低アルカリ性セメントが使用可能であると考えられる。

今後は、本検討で得られたデータに基づき、処分場で使用されるコンクリートの要求性能、施工性、環境条件等に適した配合の選定、使用実績の増加による低アルカリ性セメントの信頼性向上を図っていく必要があると考えられる。また、低アルカリ性セメントが実際の周辺バリアへ与える影響を評価した事例がないことから、これらのデータを取得する必要があると考えられる。

### 3 処分場の環境条件における低アルカリ性セメントの適用性評価

本章では、現段階における我が国の処分場の概念及び想定される環境条件を考慮するため、各部位の要求性能、処分環境、および建設工程、施工方法、基準等に関して整理した。以上の項目および2章での検討結果を踏まえた上で、各種低アルカリ性セメントについて、それを使用した場合の課題の抽出及び高度化方策の検討を実施し、その適用性を評価した。

#### 3.1 各部位の要求機能に関する検討

本節では、我が国の処分施設概念に基づき、セメント系材料が使用される部位を抽出し、各部位の要求機能を整理した。

図 3.1-1 に本検討で想定した処分施設概念図を示す（電力中央研究所・電気事業連合会，1999）。この図から、処分施設でセメント系材料が供される部位は、立坑、処分坑道の支保工、力学プラグであることが分かる。

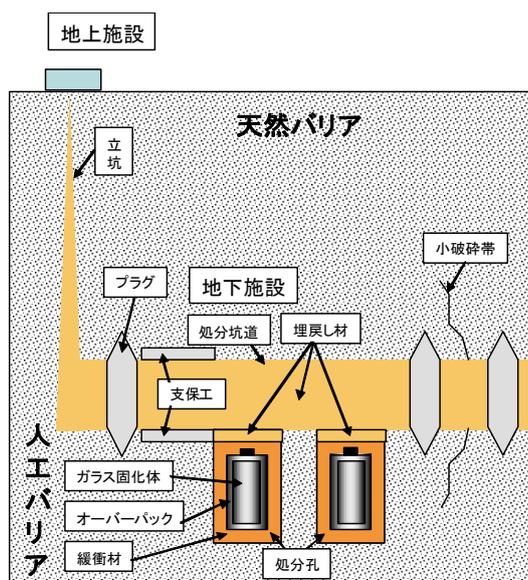


図 3.1-1 本報告書で想定した放射性廃棄物処分施設の概念図  
(電力中央研究所・電気事業連合会，1999)

処分施設的设计・施工に関する検討は、立地場所が未定のため、具体的に検討された事例はないが、過去にはモデルサイトを設定して検討された事例がある。その一つに図 3.1-1 で示したような概念に基づいて、各構成部位の要件が検討されている。このような検討を踏まえて本検討では、各構成部位の要件を整理することとした。

表 3.1-1 に支保工に対する要件（電力中央研究所・電気事業連合会，1999）を示す。こ

れによると支保工の要件は、①力学的安定性、②化学的安定性、③施工性が要件として必要とされ、本来的に必要な要件は、①の力学的安定性、すなわち、処分空洞の安定性である。その要件を求められている期間は建設～操業までの間である。③の施工性については、後述する 3.3 でも示すが、処分施設の処分坑道に用いられる支保工だけでなく、一般的なトンネルにおけるショットクリート、あるいは支保工でも必要とされている要件である。

表 3.1-1 支保工に対する要件（電力中央研究所・電気事業連合会，1999 に基づき作成）

設計要件	概要
①力学安定性 (本来的に必要な機能)	・ 建設～閉鎖までの期間において、周辺岩盤を安定に保持
②化学的安定性 (人工バリアを保護する)	・ コンクリートと緩衝材の接触により、緩衝材が許容限度を超えて劣化することを回避 ・ コンクリートの劣化により、支保工部分が許容限度を超えた高透水性ゾーンとなることを回避
③施工性 (付随して期待する機能)	・ 地山の安定のため早期架設が可能で初期強度の発現が早い支保工を選択

これらの要件のうち、特に②化学的安定性については、人工バリアを保護することに関しての内容であり、具体的な要件については、未だ明確にされていない。ここで、表 3.1-2 に地下施設の設計要件（原子力発電環境整備機構，2004）を示す。表 3.1-2 は、表 3.1-1①力学的安定性、②化学的安定性、③施工性に対して、さらに具体的な設計要件を示している。

処分坑道に対して、表 3.1-1 に示された設計要件と表 3.1-2 に示した設計要件の関係を整理すると以下のようなになる。

#### ①力学的要件

- ・ 安全に建設・操業・閉鎖が実施できること
- ・ 空洞の力学的安定性が確保されること
- ・ 建設に必要な空間が確保できること
- ・ 建設関連の物流経路が確保できること
- ・ 地理、地形、地質等の設計上の前提となる条件を満たすこと
- ・ 操業に必要な空間が確保できること
- ・ 廃棄体を含む操業関連の物流経路が確保できること

#### ②化学的要件・閉鎖後長期安全性を有すること

- ・核種移行遅延性能に有意な影響を与えないように配慮がなされること
- ・長期的に健全であること
- ・人工バリアが安定するように埋め戻されること

### ③施工性

上記から明らかなように、処分坑道は力学的要件が主に想定されており、化学的要件については、長期的な安定性（耐久性）が求められている記述はあるものの、その具体的な要件および要件の維持期間は、未だ明確にされていない。また、セメント系材料に①、②の要件を求める上で、処分空洞の安定化を担うセメント系材料に対して、最も懸念すべき項目と思われる③施工性については、具体的な要件は抽出されていないのが現状であると思われる。

そのため、処分施設に供されるセメント系材料の要件は、上記①力学的安定性、②化学的安定性、③施工性とするものの、特に③については現状の既往の技術であるトンネル等の施工方法に準拠した上で検討を進めるものとする。検討を進める上で、上記に示したように、処分坑道に用いられる支保工には、処分坑道の力学的安定性に係る設計要件として、「地理、地形、地質等の設計上の前提となる条件」を満たすことが必要とされることから、立地サイト等の絞り込みの過程で、地質・地下水等の条件が明らかにされる中で、随時見直すことが必要と考えられる。

表 3.1-2 地下施設の設計要件（原子力発電環境整備機構，2004）

坑道	設計要件
アクセス坑道 連絡坑道	<ul style="list-style-type: none"> <li>・安全に建設・操業・閉鎖が実施できること</li> <li>・空洞の力学的安定性が確保されること</li> <li>・建設に必要な空間が確保できること</li> <li>・建設関連の物流経路が確保できること</li> <li>・地理、地形、地質等の設計上の前提となる条件を満たすこと</li> <li>・操業に必要な空間が確保できること</li> <li>・廃棄体を含む操業関連の物流経路が確保できること</li> <li>・閉鎖に必要な空間が確保できること</li> <li>・核種移行遅延性能に有意な影響を与えないように配慮がなされること</li> </ul>
処分坑道 (処分孔)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・安全に建設・操業・閉鎖が実施できること</li> <li>・空洞の力学的安定性が確保されること</li> <li>・建設に必要な空間が確保できること</li> <li>・建設関連の物流経路が確保できること</li> <li>・地理、地形、地質等の設計上の前提となる条件を満たすこと</li> <li>・操業に必要な空間が確保できること</li> <li>・廃棄体を含む操業関連の物流経路が確保できること</li> <li>・閉鎖後長期安全性を有すること</li> <li>・核種移行遅延性能に有意な影響を与えないように配慮がなされること</li> <li>・長期的に健全であること</li> <li>・人工バリアが安定するように埋め戻されること</li> </ul>

## 3.2 処分環境条件の設定

3.1 で示したように、処分坑道の支保工等、処分施設に供するセメント系材料の要件を検討する上で、地理・地形・地質等、いわゆる天然バリア条件は有用な情報となる。

ここでは、我が国の地理・地形・地質等の条件を踏まえて、本検討で考慮すべき処分環境条件を調査する。

3.1 で示したように処分坑道の設計要件として、①力学的安定性、②化学的安定性、③施工性がある。このうち、①、③については後述する 3.3 の中で、現在のトンネル等に代表される地理・地形・地質等を考慮した設計の考え方、いわゆる処分坑道の力学的安定性を担保するための設計の考え方、あるいはその設計に併せた施工方法について示している。このため、ここでは、②化学的安定性に影響を与えると思われる要因のうち、特に地下水環境について調査・整理した。

既往の知見によると、我が国の地下水水質は降水系、海水系に分けられる（核燃料サイクル開発機構，1999）。ここで、上述した②化学的安定性については、①力学的安定性、③施工性とは異なり、唯一周辺バリア材、および周辺岩盤等への影響が懸念されている設計要件であり、長期的な安定性、いわゆる耐久性について表現されている設計要件である。セメント系材料の長期耐久性を議論する上で、既往の知見（蔵重他，2005）等で、地下水組成がセメント系材料の溶脱等へ与える影響は明らかにされつつある。このため、②化学的安定性を議論する上で、地下水組成は大きな影響を与える要因である。しかし、地下水組成は、地理・地形・地質等の条件に支配されることから、処分施設の立地サイトが未だ明確でないため、既往の文献（核燃料サイクル開発機構，1999）に示されているモデル地下水の組成を参考とし検討を進めるものとする。

また、岩種は大きく分類すると硬岩と軟岩に分けられるが、本報告書では軟岩を想定し検討を行った。これは、処分場においてセメント系材料は空洞の力学的安定性確保の観点から使用されることが想定され、特に軟岩の場合にセメント系材料への要求機能が重要となり、その用途や使用量が増大すると考えられるためである。

### 3.3 建設工程，施工方法，基準等の調査

一般的な地中構造物（トンネル，地下発電所等）の建設工程，施工方法，基準等を調査するとともに，上記 3.2 の結果を考慮した上で，処分施設の建設工程，施工方法および準拠すべき基準等を検討・整理する。さらに，その結果を踏まえながら，セメント系材料を使用する部位とその要求機能を再度検討・整理する。

ここでは，一般的な地中構造物の建設工程，施工方法，基準等を調査・整理した。

その結果を以下に示す。

#### (1) 工法の特徴と概要

主なトンネル工法として，山岳工法，シールド工法，開削工法がある。これら工法の特徴に関して比較したものを表 3.3-1 に示す。

表 3.3-1 主なトンネル工法の比較 (土木学会, 1996)

比較項目	山岳工法	シールド工法	開削工法
工法概要	トンネル周辺地山の支保機能を有効に活用し掘削後次付けコンクリート、ロックボルト、鋼製支保工等により地山の安定を確保して掘進する工法である。周辺地山のグラウンドアーチが形成されることおよび掘削時の切羽の自立が前提となり、それらが確保されない場合には補助工法が必要となる。	シールドを地中に推進させ、状態をシールド外殻およびセグメントにより保持し土砂の崩壊を防ぎ、トンネルを構築する工法である。密閉型シールドは泥土あるいは泥水で切羽の土圧と水圧に対抗して切羽の安定を図る。開放型シールドでは、切羽の自立が前提となり、自立しない場合は補助工法が必要である。	地表面から掘り下がり、所定の位置にトンネルを掘進して、その上部を埋戻し地表面を復旧する工法である。全断面を掘削する方式が一般的に行われている。
通用地質 (標準的な過去の実績、 地山条件等の変化への 対応性)	一般的には、硬岩から新第三紀の軟弱までの地盤に適用される。条件によっては、洪積層にも適用されることもある(未固結地山では、一軸圧縮強度 $q_u = 0.1 \text{ MPa}$ 、変形係数 $\nu = 0.10 \text{ MPa}$ 程度以上までであるが、これより軟弱な場合にも適用された例もある)。地質の変化には、支保剛性、掘削工法、補助工法の変更により対応可能である。	一般的には、沖積層、洪積層、新第三紀層の軟弱層から一軸圧縮強度 $q_u = 数千 \text{ kN/m}^2$ 程度までの地盤に適用されるが、未固結地盤を対象とすることが多い。地質の変化への対応は容易である。また、最近では、数万 $\text{kN/m}^2$ の岩盤に対する事例も増加している。	基本的に地質による制限はない。各種地質に対応した土留め、補助工法等を選定して、これに対応する。
地下水対策 (切羽の自立性 掘削の安定)	掘削時の切羽の自立性、地山の安定性に影響するような湧水がある場合には、地盤注水等による止水、ディープウェル・ウェルポイント・水抜きトンネルなどによる地下水位低下等の補助工法が必要となる。	密閉型シールドでは、特に補助工法を必要としないが、開放型では必要となる。	ボーリングや盤割れの対策として、土留め壁の掘入れを深くしたり、地下水位低下工法や地盤改良等の補助工法が必要となる場合が多い。
トンネル深度 (最小土盛り 最大深度)	未固結地山では、土盛り高さ/トンネル直径比 ( $H/D$ ) が小さい場合(2未満程度)には土盛り下量を抑制する有効な補助工法が必要となる。	最小土盛りは、一般的にはシールド径程度であり、圧気工法を併用する場合や流式シールドでは、噴発に注意が必要である。最大深度は地下水圧で決まる場合が多い。	最小土盛りは、施工上からの制限は特になし。最大掘削深度は、40 m 程度の実績がある。
断面形状	掘削断面天端部にアーチ形状を有することを原則とし、その限りでは、かなりの程度まで自由な断面で施工可能であり、施工途中での断面形状変更も可能である。	円形が標準であるが、特殊シールドを用いて単円形、複円形、楕円形等も可能である。形状の施工途中での変更は、一般的に困難である。	矩形断面が一般的であるが、複雑な形状にも対応できる。
断面の大きさ (断面形状 変化への対応)	一般的には $150 \text{ m}^2$ 程度まで可能で、 $200 \text{ m}^2$ 以上の実績もある。支保工や掘削工法の変更により、施工途中での断面積変更が可能である。	実績では、トンネルの外径は最大で 14 m である。外径の施工途中での変更は一般には困難である。	断面の大きさおよびその変化に対しては、施工上からの制限は特になし。ただし、断面が変化する隅角部は、十分な補強を行う必要がある。
線形 (急曲線への対応)	施工上の制約はほとんどない。	曲線半径/シールド外径=3程度までの急曲線の実績がある。	施工上の制約はほとんどない。
周辺環境への影響 (近接施工、路上交通) 騒音振動)	近接施工の場合は、補助工法が必要である。ただし、都市部においては地下水位低下工法により問題が生じる場合が多く、施工上必要な地下水対策が困難となる場合がある。路上交通への影響は、立坑部を除き、きわめて少ない。騒音・振動は、坑口付近に限定され、一般に防音壁、防音ハウス等で対応できる。	近接施工の場合は、補助工法を必要とする場合もある。路上交通への影響は、立坑部を除き、きわめて少ない。騒音振動は、坑口付近に限定され一般的に防音壁、防音ハウス等で対応できる。	近接施工の場合は、土留めの剛性の増大を図るとともに、近接度合いにより補助工法を必要とする場合もある。施工区間に作業帯を常時設置するため、路上交通への影響は大きい。各施工段階において、騒音振動対策が必要である。

処分場の建設を想定した際、土木学会トンネル標準示方書（土木学会，1985）において標準工法として位置付けられた NATM 工法の適用が考えられる。この工法は山岳工法の範疇に分類されるものである。以下では、山岳工法の全般的な概要を述べた後に、NATM 工法の概要を述べる。

## (2) 山岳工法の概要

山岳工法は、トンネル周辺地山の支保機能を有効に活用し、トンネル掘削後に吹付コンクリート、ロックボルト、鋼製支保工等により地山の安定性を確保して、掘進する工法と定義されている（土木学会，1985）。

山岳工法は坑道を掘削して建設する方式であり、同様に坑道を掘削して建設するシールド工法との違いは、掘削した後、支保工を施工して、地山を支持することにより、掘削後の切羽の自立性の存続が工法採用の条件となる。この工法によるトンネルでは、掘削後の応力状態において、支保工や覆工には全土被り荷重が作用しない。従って、山岳工法では、周辺地山の支持能力をいかに活用するかが重要となる（建設産業調査会，1987）。

## (3) NATM 工法の概要

NATM 工法は山岳トンネルを中心として急速に普及し、すでに標準工法として定着した感がある。NATM 工法の適用に当たって、切羽の自立性を初めとし、トンネル掘削に伴う地下水位の変化、地表面の沈下、既設構造物の変状等の周辺環境に及ぼす影響について検討が必要となる場合が多い。

参考として、都市部およびその周辺において NATM 工法を採用する場合の調査、設計、施工、計測の流れの概略を図 3.3-1 に示す。

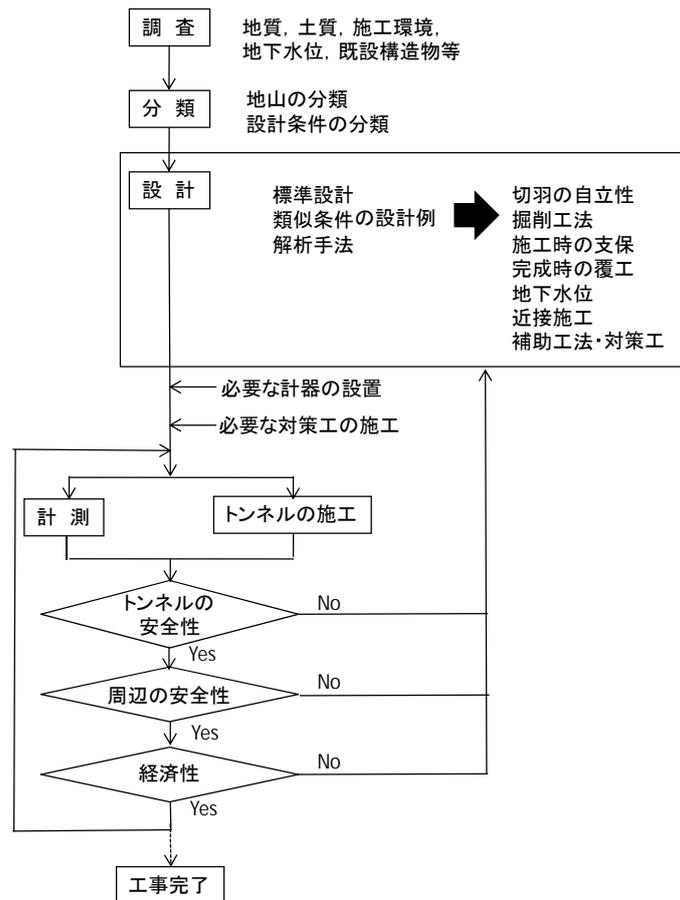


図 3.3-1 都市トンネル工事の流れ（地盤工学会，1986 を一部修正）

#### (4) NATM 工法の設計

##### (i) 概要

トンネルのような地下構造物では、作用する荷重を正確に推定することが困難であり、地山と支保工との相互作用に関する知見なども十分に得られていないことから応力解析の結果評価が難しい。さらに、施工法によってトンネルを含む周辺地山の挙動が異なるため、支保工の設計に際しては、施工法を十分に考慮して行うことも必要とされている。

このことから、トンネルの建設は通常、次のような手順で行われる。まず初めに、標準設計や類似条件での設計を利用して当初設計を行う。次に、施工中の掘削に伴う地山挙動を切羽観察や計測により把握して、これら取得データを用いて、実際の地山条件に適合した精度の高い詳細設計へと当初設計を修正していく。

このように、トンネルの設計と施工とは密接な関係があり、合理的な設計、施工を行うためには、施工中の観察や計測が重要となってくる。特に、NATM 工法では地山の支持能力を活用するため、計測はトンネルの設計に対するフィードバックとして重要となる。

## (ii) 設計項目と手順

設計手順の概略を図 3.3-2 に示す。トンネルの設計において、適切な設計手法を選定し、断面形状や掘削断面、一次支保および変形余裕量、二次覆工などの検討において手戻りがないよう、合理的で経済的な設計、施工とすることが求められている。

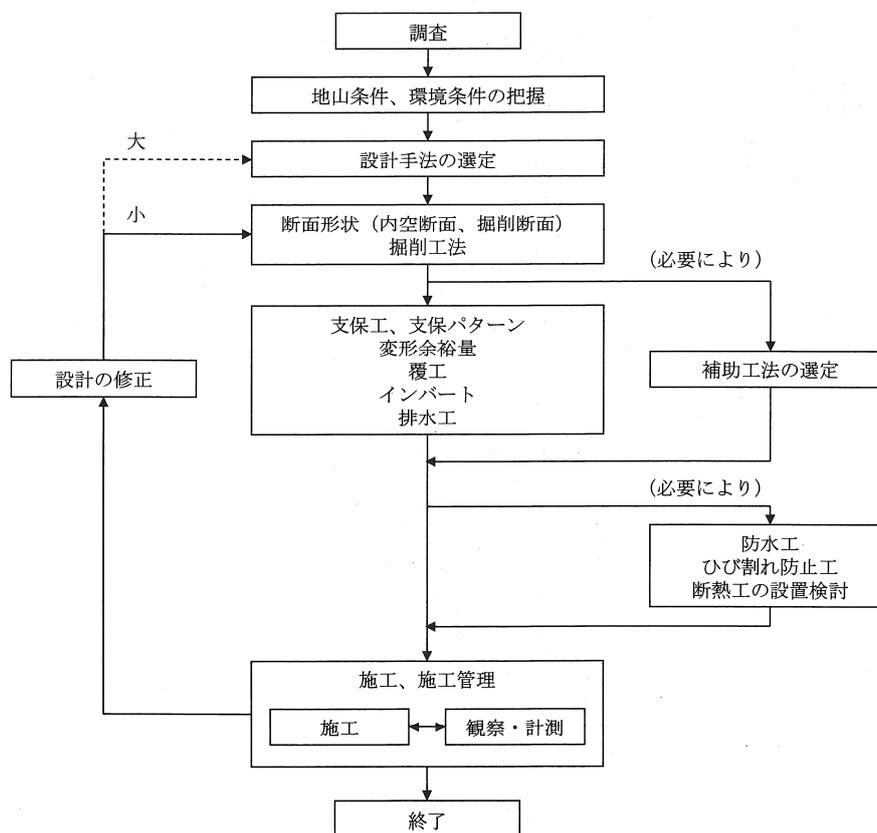


図 3.3-2 設計手順の概略【山岳トンネル設計施工標準・同解説, 2008, p. 52】

(鉄道建設・運輸施設整備支援機構, 2008)

## (iii) 設計手法

トンネル設計の考え方には、トンネル掘削に伴い発生する地山の緩み荷重という概念に基づき、これを支持するように支保工または覆工を構築するものと、トンネル掘削に伴いトンネル周辺地山が応力再配分によって、それ自体で安定するように支保工または覆工を構築するものがある。両者は、地山を荷重としてみるか、支保工の一部としてみるかの違いである。

近年、ロックボルトや吹付コンクリートの導入により、地山の緩みを極力防止し、トンネル周辺地山を安定化する設計概念が確立され、設計の考え方は後者が主流となってきた。

しかし、地山条件とその力学的特性の把握など未解明事項も多く、現状では理論的、解析的な手法のみではトンネル周辺地山の応力状態を的確に推定することが困難であり、トンネルの合理的な設計に反映することは難しいと考えられている。

このような事情から、トンネル掘削前に行う当初設計では、設計条件を考慮して次の手法の中から適宜選択して行うのが一般的である（地盤工学会，1986）。

- ①標準支保パターンによる設計
- ②類似条件による設計
- ③解析的手法による設計

各設計手法の選択の考え方を表 3.3-2 に示す。

表 3.3-2 当初設計における設計手法の選択（地盤工学会，1986 を一部修正）

設計条件 地山条件	一般的な場合	特殊な場合 (断面が著しく大または小, 他の 構造物と近接している場合など)
一般的な場合	地山に応じた標準設計	
特殊な場合 (膨張性地山, 土被りが 特に小さい場合など)	類似条件における設計例や解析結果を参考にして個別に設計	

地山条件と設計条件が一般的な場合は、通常、地山条件を数種類に区分し、等級ごとにあらかじめ設定しておいた標準設計を用いる場合が多い。また、地山条件や設計条件が特殊で、特別な設計検討を必要とする場合には、類似条件における設計例や解析結果を参考にして個別に設計が行われる。

#### (a) 標準支保パターンによる設計

断面形状がほぼ一定で、事業量の多い鉄道トンネルや道路トンネルの場合、当初設計の合理化を図るために、地山等級ごとに標準設計を設定して、これを適用することが多い。標準設計は既往のトンネル工事における実績や経験および支保工の作用効果に関する検討結果等に基づいて作成されている。当初設計での標準支保パターンによる設計の流れを図 3.3-3 に示す。また、鉄道トンネルの標準支保パターンを表 3.3-3 に示す。

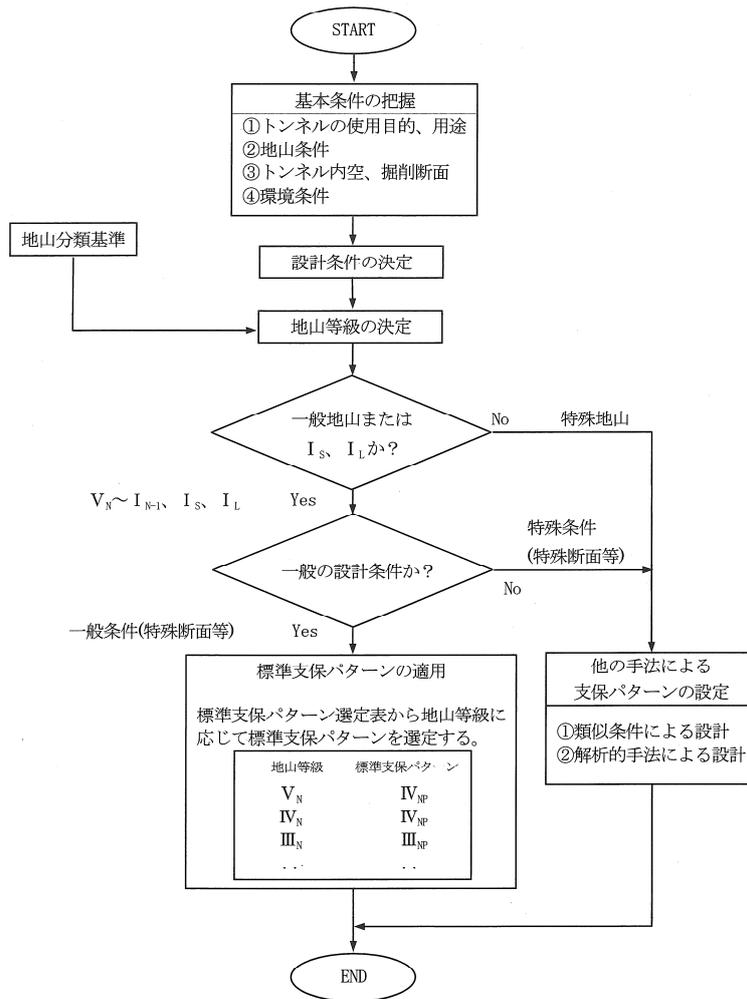


図 3.3-3 当初設計での標準支保パターンによる設計の流れ【山岳トンネル設計施工標準・同解説, 2008, p. 61】(鉄道建設・運輸施設整備支援機構, 2008)

表 3.3-3 鉄道トンネルの標準支保パターン【山岳トンネル設計施工標準・同解説, 2008, p. 65】(鉄道建設・運輸施設整備支援機構, 2008)

(a) 在来線単線トンネル

標準支保パターン	支保部材	ロックボルト		吹付けコンクリート厚 (cm)		鋼製支保工 種類
		配置	長さ×本数 <sup>*1</sup> (m) (本)	縦断間隔 (m)	アーチ、側壁	
IV <sub>NP</sub>	—	—	—	—	5 (平均)	—
III <sub>NP</sub>	アーチ	2×0~4	(随意)	10 (平均)	—	—
II <sub>NP</sub>	アーチ	2×6	1.5	10 (平均)	—	—
I <sub>N-2P</sub>	アーチ、側壁	3×6	1.2	10 (最小)	—	100H (上半)
I <sub>N-1P</sub>	アーチ、側壁	3×10	1.0	10 (最小)	—	100H
I <sub>SP</sub>	アーチ、側壁	3×12	1.0	10 (最小)	(10(最小)) <sup>*2</sup>	100H
I <sub>LP</sub>	アーチ、側壁	3×8	1.0	15 (最小)	—	100H

(b) 在来線複線トンネル

標準支保パターン	支保部材	ロックボルト		吹付けコンクリート厚 (cm)		鋼製支保工 種類
		配置	長さ×本数 <sup>*1</sup> (m) (本)	縦断間隔 (m)	アーチ、側壁	
IV <sub>NP</sub>	—	—	—	—	5 (平均)	—
III <sub>NP</sub>	アーチ	2×0~5	(随意)	10 (平均)	—	—
II <sub>NP</sub>	アーチ	3×8	1.5	10 (平均)	—	—
I <sub>N-2P</sub>	アーチ、側壁	3×8	1.2	12.5 (最小)	—	125H (上半)
I <sub>N-1P</sub>	アーチ、側壁	3×12	1.0	15 (最小)	—	125H
I <sub>SP</sub>	アーチ、側壁、 (インバート)	3×12 (3×4) <sup>*2</sup>	1.0	15 (最小)	(15(最小)) <sup>*2</sup>	150H
I <sub>LP</sub>	アーチ、側壁	3×10	1.0	20 (最小)	—	125H

(c) 新幹線複線トンネル

標準支保パターン	支保部材	ロックボルト		吹付けコンクリート厚 (cm)		鋼製支保工 種類
		配置	長さ×本数 <sup>*1</sup> (m) (本)	縦断間隔 (m)	アーチ、側壁	
IV <sub>NP</sub>	—	—	—	—	5 (平均)	—
III <sub>NP</sub>	アーチ	2×0~5	(随意)	10 (平均)	—	—
II <sub>NP</sub>	アーチ	3×10	1.5	10 (平均)	—	—
I <sub>N-2P</sub>	アーチ、側壁	3×10	1.2	12.5 (最小)	—	125H (上半)
I <sub>N-1P</sub>	アーチ、側壁	3×14	1.0	15 (最小)	—	125H
I <sub>SP</sub>	アーチ、側壁、 (インバート)	3×14 (3×4) <sup>*2</sup>	1.0	15 (最小)	(15(最小)) <sup>*2</sup>	150H
I <sub>LP</sub>	アーチ、側壁	3×12	1.0	20 (最小)	—	125H

\*1 ロックボルトの長さ、本数は標準的なものを示しており、その配置は、第25条による。

\*2 I<sub>SP</sub>のインバート部のロックボルトおよび吹付けコンクリートは、あくまでも標準的なものを示しており、新第三紀以降の泥岩、凝灰岩等、盤ぶくれ等の変状が懸念される場合には、地山の状況を見ながら適切な支保工の施工を行う。

(その他) 標準支保パターンの分類記号は、地山等級と区別するためP(Pattern)のサフィックスつけた。

## (b) 類似条件による設計

計画地点の近傍に既設トンネルがあり、その施工実績が得られている場合、これを参考にした的確な当初設計をすることが可能となる。このような場合には、地山条件を比較的高い精度で把握することが可能であり、トンネル掘削に伴う地山挙動も類似していることが多いので、既往の施工実績を参考にして行うことができる。

この手法は、地山条件がほぼ同じと見なせる場合や、断面形状等の設計条件が多少異な

る場合でも、その類似性を検討した上で適用することが可能である。

### (c) 解析的手法による設計

有限要素法による各種トンネル解析専用プログラムや、汎用構造解析プログラムを用いた解析結果に基づき設計を実施する例もある。これらは、地山、ショットクリート、ロックボルト等の材料物性を任意に表現でき、施工過程に応じて支保工を適宜考慮することが容易であるため、実際の施工段階に応じた地山の応力、変位などを比較的精度良く予測することができるためである。

### (5) ショットクリートの設計

#### (i) 概要

ショットクリートは、セメント、水、細骨材、粗骨材、急結剤などの吹付材料をポンプ圧送して、ノズルから圧縮空気により高速噴射することにより地山と密着させて支持させるものである。

ショットクリートは、掘削後、ただちに地山に密着するように施工でき、掘削断面の大きさや形状に左右されず、容易に施工できることから、最も一般的に用いられる支保部材の1つである。ショットクリートは、一般に表 3.3-4 に示すような作用効果が考えられている。

ショットクリートの設計は、地山条件、使用目的、ショットクリートの特性(品質、仕上げ形状等)および吹付方式、吹付機の特徴などの施工特性を考慮して、その目的が達成できるよう施工時期、厚さ、強度、配合等を決め、主に次の要件を満足するように行わなければならないとされている(鉄道建設・運輸施設整備支援機構, 2008)。

- ①作用荷重に対して十分な強度がある
- ②早期に必要な強度発現がある
- ③地山と十分な付着強度がある
- ④耐久性がある
- ⑤はね返りが少ない
- ⑥所要の施工精度(厚さ, 平面性)を有する
- ⑦発生粉じん量が少ない

ショットクリートの適用の考え方は地山条件によって異なる。

地山中の層理・節理などの不連続面がトンネルの挙動を支配する場合で、中硬岩・硬岩地山のように節理等の間隔が比較的大きな場合には、局所的な岩塊の崩落防止や弱層の補強

などが期待すべき効果として考えられる。

また、節理などの間隔が小さく、粒状体のような挙動をする場合には、内圧を与える拘束効果、リング閉合効果などが期待すべき効果として考えられる。

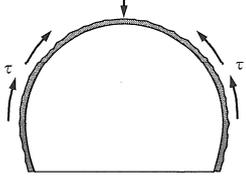
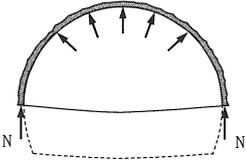
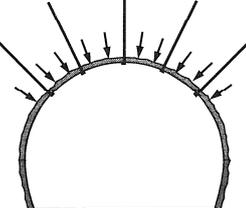
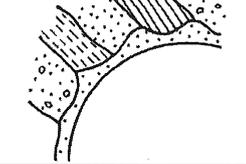
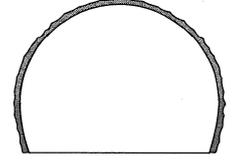
地山の強度がトンネルの挙動を支配するような場合には、ロックボルトや鋼製支保工等他の支保部材と併用することにより、主に内圧を与える拘束効果、リング閉合効果などが期待できる。この場合には、それぞれの支保部材の特性を考慮して鋼製支保工など他の支保部材との相互作用がはかれるように設計する必要がある。

なお、最近、岩盤の亀裂などが少ない比較的堅硬な地山において、二次覆エコンクリートを施工せず、ショットクリートを永久覆工として設計する場合があるが、適用に当たっては、耐久性など次の点について十分検討し、適切な配合とする必要がある。

- ①耐久性(長期強度, 中性化抵抗性, 耐凍結融解性等)
- ②水密性(硬化体の吸水率, 空隙率等)
- ③併用する鋼材の腐食防止等

表 3.3-4 ショットクリートの作用効果【山岳トンネル設計施工標準・同解説, 2008, p. 74】

(鉄道建設・運輸施設整備支援機構, 2008)

吹付けコンクリートの作用効果	概念図
<p>①岩盤との付着力、せん断抵抗力による支保効果 吹付けコンクリートと岩盤との付着力により、吹付けコンクリートに作用する外力を地山に分散させ、またトンネル周辺の割れ目や亀裂にせん断抵抗を与え、キープロックを保持して抜落ちを防止し、グラウンドアーチをトンネル壁面近くに形成させる。割れ目の多い硬岩等に作用効果が大きい。</p>	
<p>②内圧効果、リング閉合効果 吹付けコンクリートが連続した 1 個の部材として地山を支持することにより、地山の変形を拘束して地山に支保力(内圧)を与え、地山を三軸応力状態に近い状態に保持する。また、早期にインバートを敷設して断面を仮閉合することにより、支保効果が発揮される。これらの効果は、軟岩や土砂地山等で大きい。</p>	
<p>③外力の配分効果 鋼製支保工、あるいはロックボルトに土圧を伝達する部材として挙動する。</p>	
<p>④弱層の補強効果 地山の凹みを埋め、弱層を跨いで接着することにより、応力集中を防ぎ、弱層を補強する効果。</p>	
<p>⑤被覆効果 掘削後、早期に壁面を被覆するため、周辺地山の風化防止、止水、微粒子の流出防止等の効果がある。</p>	

(ii) 配合および強度

ショットクリートの配合設計において、一般に、所用の強度 ( $\sigma_{28} = 160 \sim 240 \text{kgf/cm}^2$  程度) を有する範囲内において、はね返り (リバウンド) の少ない高密度のコンクリートを製造することが望ましい。そのためには、粗骨材の最大寸法、細骨材率、単位セメント量、水セメント比、急結剤の種類などについて十分な検討を行う必要があるとされている。

ショットクリートは、掘削後、すみやかに施工して、地山を保持することが効果的であるため、作業能率がよく、付着したコンクリートが自重により剥落しないよう、また発破などの振動に耐えられるように早期に所要の強度を確保する必要がある。

さらに、長期的には地山を保持するだけでなく、構造物の機能を維持するために必要な耐久性を有することが必要である。

吹付方式の大部分が圧縮空気を媒介に行われているため、ショットクリート中に比較的大きな空気の粒が残存し、硬化体の組織に影響を与え、長期強度、耐久性（特に、凍結融解抵抗性）が打込みコンクリートに比べ低下するとされている。ショットクリートの圧縮強度はコア供試体の試験結果によれば、打込み供試体（標準養生）の概ね50～90%程度となっている。

ショットクリートの強度は、吹付方式（乾式、湿式）、吹付位置、吹付厚、吹付面の状態、気温、湿度などの施工条件、養生条件等により異なるので注意が必要である。

ショットクリートの配合は、基本的に打込みコンクリートと同じであるが、はね返り、微粒部分の飛散、急結剤の影響など複雑な要素があることから、現時点では、これらを考慮した実ショットクリートの配合は確立されていない状況であり、強度の確認方法も同様である。このため、ショットクリートは、原則として練混ぜするショットクリートの配合を示方し、吹付られたコンクリートの引抜き強度やコア強度を主体に管理している。

ショットクリートを構造部材として使用する場合には、設計上の強度を確保する必要がある。ショットクリートの初期強度と長期強度との関係は現在のところ、必ずしも明確になっていないことから、JR各社では、構造物の強度を保証するという見地に立ち、さらに、在来のトンネル覆エコングクリートの強度およびこれまでの施工実績などを考慮して、ショットクリートの圧縮強度は材齢28日で18MPa以上としている。また、急結剤を使用することから、材齢24時間の圧縮強度は概ね8MPa以上を目標としている。

表3.3-5にショットクリートの配合例を示す。

表 3.3-5 ショットクリートの配合例（土木学会，1980）

施 工 現 場	粗骨材の 最大寸法 (mm)	水セメント 比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )					備 考
				水 W	セメント C	細骨材 s	粗骨材 G	急結剤 c×(%)	
青函トンネル(本坑)	20	40	60	128	320	1191	841	3	乾式(標準配合)
新関門トンネル	20	50	65	150	300	1267	714	4	乾式( * )
鍋立山トンネル	10	51	58	205	402	1008	719	4	湿式(実績)
奥吉野発電所 (本体、上下半部)	25	47.4	70	180	380	1260	540	上半部 2.4 下半部 2.8	湿式(実績)
高倉山トンネル	15	50	60	180	360	1059	717	4	乾式(標準配合)

### (iii) 設計厚

ショットクリートの設計厚は、地山条件、使用目的、断面の大きさなどにより、適切な厚さを決定する必要があるとされている（鉄道建設・運輸施設整備支援機構，2008）。

ショットクリートの支保工あるいは一次覆工として必要な吹付厚については、理論的に十分解明されておらず、現場技術者の経験や実績により定められているケースが多い。

硬岩で土圧がほとんど作用せず、肌落ちや岩塊のすべり出し防止などを目的としてショットクリートを施工する場合には、設計厚は小さくてよい。しかし、膨張性地出のように作用土圧が大きく、変形量が大きい場合、耐荷能力、変形能力とも小さい未固結地山の場合、土被りが小さく周辺への影響を極力少なくする必要がある場合などでは、支保耐力、支保剛性を増して変位の抑制をはかるため、比較的大きな吹付け厚が必要である。

ショットクリートは、標準支保パターンによる設計厚（現状では5～20cm）を適用しているが、特殊な条件のため、標準支保パターンにより難しい場合には類似設計または解析的手法により周辺地山の安定、許容される変位、発生する支保部材の応力などを参考として決定するのがよい。

設計に示す吹付厚表示には、全面にわたって設計厚以上でなければならないとする「最小吹付厚」の考え方と、断面内の平均厚が設計厚以上であれば部分的に設計厚に満たない箇所があってもよいとする「平均吹付厚」の考え方とがある。

最小吹付厚とすると、硬岩地山では掘削面の凹凸が大きいため、ショットクリートの余吹き量が必要以上に大きくなる問題がある。また、土圧が大きい場合等では平均吹付厚とすると吹付厚が小さい部分が生じ、応力集中が生じやすいなどの問題がある。

### (6) 鋼繊維補強ショットクリートの設計

鋼繊維補強ショットクリートの使用にあたっては、その目的、力学的特性の有効活用、

施工性などについて検討しなければならないとされている（鉄道建設・運輸施設整備支援機構，2008）。

一般に、鋼繊維で補強したコンクリート SFRC（Steel Fiber Reinforced Concrete）には、次のような特徴がある。

- ①引張強度，曲げ強度およびせん断強度が高い。
- ②最大強度以降の残留強度が高い。
- ③タフネスが大きく，ひび割れ発生後も引張力を伝達する。
- ④変形能力が大きい。
- ⑤耐衝撃性，凍結融解抵抗性が高い。

鋼繊維で補強されたコンクリートの圧縮強度は，無筋コンクリートと比較してあまり差はない。一方，せん断強度，曲げ強度，引張強度は増加し，さらに，無筋コンクリートよりも優れた特性として，ひび割れを生じた後もなお相当な耐力を保持しつつ漸次破壊に至るため，コンクリートの弱点である脆性が大幅に改善され，タフネスが向上することがあげられる。

鋼繊維補強ショットクリートは，大きな変形能力を有することにより，一次支保が地山の変形特性にも追従できる。さらに，鋼繊維補強ショットクリートは，引張強度が高く，ひび割れの進行に抵抗することから，剥離，剥落がしにくく，安全管理上からも有効な支保部材である。

ショットクリートの補強用繊維には，鋼繊維の他にも，ポリエチレン繊維，ガラス繊維，ポリプロピレン繊維などがあるが，これらの繊維には，耐久性に影響を与えるとされているひび割れ幅 0.2～0.3mm 付近のひび割れ開口に対する抵抗力が小さいものがあるので，使用にあたっては，十分検討する必要がある。

## (7) 二次覆工の設計

### (i) 概要

覆工は，土圧，水圧等の荷重に耐え，水密性を有し，トンネルとしての必要な空間と機能を維持することが求められている。かつて，覆工は作用荷重に対する支保の役割が中心であったが，現在，ショットクリートやロックボルトの普及とともに，支保工の補強とトンネル内面の仕上げといった役割が中心となってきた。

二次覆工の設計にあたっては，設計条件として，所要の性能について検討することが重要であるとされている（鉄道建設・運輸施設整備支援機構，2008）。

一般地山の場合、二次覆工は、一次支保の応力状態によりその機能を判断する必要があるが、通常、一次支保は地山と一体化し、安定した支保構造体を形成している。したがって、二次覆工は構造上、一次支保の安全率の向上を目的とし、そのうえ、内装機能、保守管理機能、トンネル内施設の保持機能などを付加する目的で設計される。

また、通常、二次覆工の耐久性は気象条件、漏水等の影響を受けるので、安全な供用を確保するため、設計にあたっては影響要因を検討して、適切に対応する必要がある。

## (ii) 耐荷力と巻厚

覆工の厚さを決めるにあたっては、トンネルの形状、土圧、水圧等の荷重、掘削工法、支保工の種類、覆工の施工方法などを考慮しなければならない。これらのうち、覆工に作用する荷重は、覆工厚を決定する場合の最も重要な要素であるが、現在の知見では、覆工に作用する荷重の大きさを正確に推定することは困難である。

一般の山岳トンネルの場合、トンネル空洞の掘削により開放された地山応力の大部分は、周囲の地山に再配分されることにより、地山が安定を保とうとする。したがって、覆工が受けもつ荷重は、掘削に伴ってトンネル周囲の限られた範囲に発生する地山の緩みによる土圧が大部分であると考えられる。しかし、覆工に作用する土圧は、地質条件等により著しく異なるため、地表からの探査やボーリング調査、掘削表面の地山観察などの限られた情報からの確に評価することは難しい。

このように、作用荷重および覆工の力学的条件の把握が困難なため、設計計算によって精度の高い結果を得ることは難しく、一般に行われている覆工の設計は、特殊な条件のトンネルの場合を除いて、これまでの実績や経験をもとに定められている実情である。

表 3.3-6 にコンクリート覆工の設計巻厚の標準あるいは目安としての値を示す。

表 3.3-6 コンクリート覆工の設計巻厚の標準と目安（土木学会，1980）

(a) 国 鉄						
先 別	準 線		区 線		新 幹 線	
	アーチ	側 壁	アーチ	側 壁	アーチ	側 壁
N	30	30	45	45	50 (40)	50 (40)
Ⅲ	45 (30)	45 (30)			50	50
Ⅱ	45	45	60	45 または 60	70	70 または 50
I	60	60				

(注) 膨張性岩石および硬った沈積砂層、土丹以外の第四紀層は適用除外

(b) 建設省		
地質分類	設計巻厚 (cm)	備 考
A	45	施工上可能であれば45cm以下でもよい。
B	＝	＝
C	60	裏込め圧入を行う。支持力の不足する場合および側圧のある場合はインバートを設ける。
D	＝	＝
E	—	地山の挙動に合わせて設計する。二重巻き、鉄筋コンクリート覆工等、必要により形状を変更する。

(注) この表は、鋼アーチ支保工等を用いて掘削し、埋戻しコンクリートにより覆工を行う場合についてのものである。

(c) 道路公団			(d) トンネル標準示方書	
地質区分	覆工の設計巻厚 (cm)	インバート (cm)	内空断面の幅 (m)	コンクリート覆工の設計巻厚 (cm)
A	55 以下	—	3	20～40
B	55	—	5	30～50
C	55	—	10	40～70
D	70	30		
E	70 以上	50 以上		

(8) ショットクリートの施工

(i) 吹付方式の選定

吹付方式は、地質、トンネル延長、トンネル断面、掘削方式、湧水の有無等を十分検討して定めなければならないとされている（鉄道建設・運輸施設整備支援機構，2008）。

吹付方式は、コンクリートの練混ぜ方式、搬送方式により乾式と湿式とに大別される。乾式は、吹付機により骨材、セメントおよび急結剤が浮遊搬送され、ノズルの手前で水が加えられる。湿式は、骨材、セメントおよび水を練り混ぜたコンクリートが吹付機により圧送され、ノズルの手前で急結剤が加えられる。湿式の方が水とその他の材料のなじみがよいため、一般に粉じんやはね返りが少ない。この長所を乾式にも取り入れるため、水をノズルの手前で加える工夫がなされ、これをセミ湿式と呼ぶこともあるが、乾式に分類される。表 3.3-7 に乾式および湿式の各方式の比較を示す。

表 3.3-7 乾式と湿式の比較（土木学会，1980）

	乾式	湿式
コンクリートの品質	ノズルにおいて、水と空練り材料とを混合するので、品質は作業員の熟練度、能力によって左右される	水を含め各材料をあらかじめ正確に計量し、かつ十分に混合できるので品質の管理が容易である
作業の制約	空練り材料を供給すればよいので、供給作業の制限は少ない（運搬時間等）	材料の供給に制限を受ける
圧送距離	比較的長距離の圧送が可能である	長距離圧送に不適である
粉塵	多い	少ない
はね返り	比較的多い	少ない
所要空気量	少ない	多い
空気圧	大きい	小さい
機械の大きさ	小さい	比較的大きい

なお、ショットクリートには次のような工法もあり、通常のショットクリートよりも高強度、高品質が期待できる。

①繊維補強ショットクリート

ショットクリートの局部的破壊に対する耐力の増加および肌落ち防止、膨張性地山による土圧発生に対処する等の目的で銅や樹脂等の繊維を混入する方法であるが、採用にあたっては、使用するセメントの種類や混和剤の組合わせ効果を吹付試験により確認する等、十分検討しなければならない。

②高強度ショットクリート

大きな土圧が発生する膨張性地山や塑性地山等の一次支保として高強度ショットクリートを必要とする場合がある。ショットクリートの混和材としてセメント重量の5%程度のシリカフェーム等を混入することで高強度のショットクリートが期待できるが、施工にあたってはショットクリートの性状や施工性、経済性を調査し、事前に試験吹付等により効果を確認する必要がある。

③SEC ショットクリート

SECは、Sand Enveloped with Cementの略であり、適量の水を添加して、細骨材とセメントの一次練混ぜ過程を経る分割混合を特徴とする工法である。なお、この工法においては、一次練混ぜにおける細骨材の含水率と添加水量の管理が重要である。

(ii) ショットクリートの現場配合

ショットクリートの配合は、通常のコンクリートの配合に比べると、セメント量および

細骨材の多い富配合となり、圧縮強度は急結剤を使用することによって、初期強度は大きくなるが、長期強度は普通コンクリートに比べて伸びが低下する。

ショットクリートの配合を決定する場合の検討項目は、

- ①所要の強度が得られること
- ②はね返りが少ないこと
- ③付着性が良く密実なコンクリートが得られること
- ④ホースの閉そくなどが無いこと
- ⑤湧水の状況に適していること

等があげられる。

セメントが少なすぎると、はね返りが増大し、初期強度の発現が遅れる。多すぎると不経済になるばかりでなく、ホースの閉塞、粉じんの発生量が増加するなど、施工性が低下する。また、湧水のある場合は単位セメント量を増加して対応する場合が多い。

単位水量が増加するに従って、はね返り量は減少し、湿式の場合、機械内の流動性はよくなるが、あまり多すぎると、初期、長期とも強度は低下し、一度付着したコンクリートが剥落しやすくなる。少なすぎると粉じんが発生し、はね返り量が増大する。

強度および密度の大きいショットクリートを得るためには、骨材の比重、吸水率のほか、特に粒度の適切な骨材を用いることが大切である。細骨材率が小さすぎると、はね返り量が増大し、大きすぎると強度が低下する。一般的には、粗粒率  $FM=2.8\sim 3.2$  が適当である。なお、できるだけ粒径の大きい骨材を用いることが望ましいが、あまり大きい粒径を用いるとホースの閉塞を生じたり、はね返りが多くなる。実際の施工では、粗骨材の最大寸法  $G_{max}=10\sim 15mm$  程度のものが使用されている。

## (9) 二次覆工の施工

### (i) 概要

二次覆工は、鋼製支保工またはショットクリート等で地山を支持した後、切羽から施工上必要な間隔をおいた後方で施工されるが、地山の緩みを最小限とし、土圧の増大を防止するためには、掘削後の早い時期に覆工を施工するのが好ましい。ただし、地質が堅硬の場合、掘削完了後に一気に二次覆工を施工することもある。また、使用上支障のない場合、二次覆工を省略して無巻きとすることや、モルタルやコンクリートの吹付等の被覆により二次覆工の代替とすることもある。これらの場合でも十分な安定性と耐久性を備えている必要がある。

二次覆工コンクリートは、変位が収束したことを確認した後に打設する。変位収束の時期は、地山の状態によって異なるが、インバート閉合後は急速に収束することが多い。しかし、膨張性地山やクリープ変形等により、一次支保のみではトンネルの変形が収束しない場合においては、変位収束を目的として仮巻きコンクリートを施工したり、鉄筋または鋼繊維補強コンクリート等の高強度な二次覆工を早期に打設する場合がある。

#### (ii) 覆工コンクリートの現場配合

覆工コンクリートの現場配合は示方配合に基づき、現場で使用する材料を用いて試験練りを実施し、強度、耐久性、施工性を確認した上で定める。

覆工コンクリートの打設は、コンクリートポンプを使用するのが一般的である。覆工コンクリートの現場配合は、これらの打設機械、打設方法および充填性を考慮して適当なワーカビリティの得られるものに定めなければならない。一般的には、スランプ 8～15cmn 程度のものが使用される。

覆工コンクリートには、通常、普通ポルトランドセメントを使用し、単位水量の減少、ワーカビリティの改善のために、フライアッシュ、AE 剤、減水剤、流動化剤等の混和材料を併用する例が多い。

#### (iii) ひび割れ対策

二次覆工コンクリートのひび割れが、トンネルの水密性、耐久性に悪影響を与え、漏水等の原因となることが想定される場合には、ひび割れ対策を検討しなければならないとされている（鉄道建設・運輸施設整備支援機構，2008）。

二次覆工コンクリートには、ひび割れが発生することが多く、トンネルに有害なひび割れとなる場合も少なくない。ひび割れが発生する主な原因は、硬化熱と乾燥収縮により二次覆工コンクリートに発生するひずみが、ショットクリート面で拘束されるために発生する収縮応力によるものと考えられている。ひび割れ対策として、主要なものは次のとおりである。

##### ①ショットクリートとの縁切り(アイソレーション)

ショットクリートとの縁切りとは、ショットクリートと二次覆工コンクリートとの接触面をシートなどの縁切り材により縁を切る方法であり、防水シートを施工する区間では防水シートが縁切り材としても有効に作用している。その他、ゴムアスファルトエマルジョン、発泡モルタルなどの縁切り材も試用された例がある。

##### ②コンクリートの品質改良

コンクリートの品質改良は、混合セメントの使用や減水剤、膨張剤、流動化剤などの混和剤の使用で発生する硬化熱や乾燥収縮の減少を図り、これにより、ひび割れの発生を抑制しようとする方法である。ひび割れ発生量の減少に効果があると報告された例もあるが、この対策のみではひび割れを完全に抑えるのは困難な状況である。その他、金網や鉄筋、鋼繊維で引張強度を補強する、あるいは引張強度の高いコンクリート、膨張剤を使用するなどの方法も試みられている。

### ③ひび割れ誘発目地の設置

ひび割れ誘発目地の設置は、ひび割れを特定の箇所に集中的に発生させて、全体のひび割れを減少させる効果がある。誘発目地からの漏水が問題となる場合は、目地部の導水工や二次覆工背面に防水シートなどを設けることを検討する必要がある。

## (10) ショットクリートの施工管理

### (i) ショットクリート

ショットクリート用材料の品質管理は、以下のものが標準とされている（鉄道建設・運輸施設整備支援機構，2008）。材料の品質管理試験は表 3.3-8 による。また，日常および適宜実施する管理試験は表 3.3-9 による。

表 3.3-8 材料の品質管理試験【山岳トンネル設計施工標準・同解説, 2008, p. 221】

(鉄道建設・運輸施設整備支援機構, 2008)

	試験項目	試験方法	試験頻度	規格
セメント	品質管理	JIS R 5201 JIS R 5202 JIS R 5203 JIS R 5204	施工開始前に1回 種類の変更ごとに1回	JIS R 5210 製造工場の規格証明書 (普通ポルトランドセメントを用いることを標準とする。普通ポルトランドセメント以外のセメントを使用する場合には、事前に吹付けコンクリートが所要の性能を満足することを確認する。)
水	水質試験	JSCE-B 101-2007 (コンクリート用練混ぜ水の品質規格 (案))	施工開始前に1回 採取箇所または、水質の変更があるごとに1回 (いずれも飲料水は除く)	JSCE-B 101-2007 (コンクリート用練混ぜ水の品質規格 (案))
細骨材	粒度	JIS A 1102	施工開始前に1回 採取箇所または、品質の変更があるごとに1回 ただし、覆工コンクリートと同一材料の場合は省略できる	(高品質吹付けコンクリート設計・施工指針 (案) 2.4.1)
	絶乾密度	JIS A 1109		2.5g/cm <sup>3</sup> 以上 (高品質吹付けコンクリート設計・施工指針 (案) 2.4.2)
	吸水率			3.5%以下 (高品質吹付けコンクリート設計・施工指針 (案) 2.4.2)
	耐久性 (耐凍害性が要求されるコンクリートに用いる細骨材)	JIS A 1122		損失質量 10%以下 (高品質吹付けコンクリート設計・施工指針 (案) 2.4.2)
	粘土塊	JIS A 1137		1.0%以下 (高品質吹付けコンクリート設計・施工指針 (案) 2.4.3)
	洗い試験損失量	JIS A 1103		コンクリートの表面がすりへり作用を受ける場合: 3.0%以下* <sup>1</sup> その他の場合: 5.0%以下* <sup>1</sup> (高品質吹付けコンクリート設計・施工指針 (案) 2.4.3)
	有機不純物	JIS A 1105		標準色より薄い。 (高品質吹付けコンクリート設計・施工指針 (案) 2.4.3)
	アルカリ骨材反応	JIS A 5308 JIS A 1804		(高品質吹付けコンクリート設計・施工指針 (案) 2.4.4)
	表面水率	JIS A 1111 JIS A 1125		1回/1日以上
粗骨材	粒度	JIS A 1102	施工開始前に1回 採取箇所または、品質の変更があるごとに1回	(高品質吹付けコンクリート設計・施工指針 (案) 2.5.1)
	絶乾密度	JIS A 1110		2.5 g/cm <sup>3</sup> 以上 (高品質吹付けコンクリート設計・施工指針 (案) 2.5.2)
	吸水率			3.0%以下 (高品質吹付けコンクリート設計・施工指針 (案) 2.5.2)
	耐久性 (耐凍害性が要求されるコンクリートに用いる粗骨材)	JIS A 1122		損失質量 12%以下 (高品質吹付けコンクリート設計・施工指針 (案) 2.5.2)

	試験項目	試験方法	試験頻度	規格	
粗骨材	粒形判定実績率	JIS A 5005	施工開始前に1回 採取箇所または、品質の変更があるごとに1回	55%以上（碎石のみ） （高品質吹付けコンクリート設計・施工指針（案）2.5.5）	
	粘土塊	JIS A 1137		0.25%以下 （高品質吹付けコンクリート設計・施工指針（案）2.5.3）	
	洗い試験損失量	JIS A 1103		1.0%以下*2 （高品質吹付けコンクリート設計・施工指針（案）2.5.3）	
混和材等	シリカフェューム 品質管理	JIS A 6207	施工開始前に1回 変更ごとに1回	①シリカフェュームの粉末度測定にはBET法を用いること ②品質規格に適合のこと	
	石灰石微粉末	CaO含有量			JIS R 5202
		粘土含有量			JCAS I61*3
		全有機炭素含有量			元素分析
		水分量			JIS A 1125
		粉末度			JIS R 5201
	高炉スラグ微粉末 品質管理	JIS A 6206			空気透過法
その他 品質管理	各試験法	製造工場の規格証明書			
混和剤	比重		施工開始前に1回 種類の変更ごとに1回	製造工場の規格証明書	
	急結剤 圧縮強度、凝結時間	JSCE-D 102-2005（吹付けコンクリート（モルタル）用急結剤品質規格（案））			
	化学混和剤 品質規格	JIS A 6204			
溶接金網 品質管理	JIS G 3551	施工開始前に1回 製品の変更があるごとに1回			
鋼繊維 品質管理	JSCE-E 101-2007（コンクリート用鋼繊維規格）	施工開始前に1回 変更ごとに1回			
鋼繊維以外 品質管理		施工開始前に1回 変更ごとに1回	製造工場の規格証明書		

\*1 砕砂およびスラグ細骨材の場合で、洗い試験で失われるものが石粉であり、粘土、シルト等を含まないときは、最大値を各々5%および7%にしてよい。

\*2 碎石の場合で、洗い試験で失われるものが碎石粉であるときは、最大値を1.5%にしてもよい。

\*3 セメント協会標準試験方法（メチレンブルー吸着法）

表 3.3-9 日常および適宜実施する管理試験【山岳トンネル設計施工標準・同解説, 2008, p. 223】(鉄道建設・運輸施設整備支援機構, 2008)

試験種別	試験内容	試験の頻度
日常管理試験	・砂の表面水量試験	1回/日以上
	・骨材入荷時の粒度の状態 泥、ごみ等の有害物の混入状況	必要の都度
定期管理試験	細骨材 ・ふるい分け試験 ・比重試験 ・吸水量試験 ・洗い試験	必要の都度、または、採取地が変わったとき
	粗骨材 ・ふるい分け試験 ・比重試験 ・吸水量試験	

ショットクリートの品質管理は、一般に表 3.3-10 を標準としている(鉄道建設・運輸施設整備支援機構, 2008)。

表 3.3-10 ショットクリートの品質管理基準【山岳トンネル設計施工標準・同解説, 2008, p. 225】(鉄道建設・運輸施設整備支援機構, 2008)

種別	管理項目	管理内容および試験	試験頻度	備考
日常管理	配合	配合および使用量の検査	必要の都度	現場配合による。
	コンシステンシー	コンクリート温度		
		スランブ試験		
		モルタルフロー試験		
		VロートまたはOロート試験		
	施工状況	吹付けコンクリートの付着性状 はね返り等の観察	施工の都度	
吹付け厚	目視、吹付け量、ピン等による			
変状等	ひび割れ等の観察	1回/日以上	現場計測結果により 対策を講じる。	
定期管理	配合	配合および使用量の点検	骨材の変更ごと	現場配合による。
	厚さ	吹付け厚の検測	トンネル延長20m ごと	
	強度	圧縮強度	掘削初期 <sup>1)</sup> 20m ごと	$\sigma_{28}$ 強度試験 $\sigma_{28} \geq 18\text{N}/\text{mm}^2$ ①直接コア採取 ②管理供試体採取
			その後 50m ごと	$\sigma_{30\text{r}}$ 、 $\sigma_{30\text{c}}$ 強度試験 $\sigma_{30\text{r}} \geq 1.5\text{N}/\text{mm}^2$ $\sigma_{30\text{c}} \geq 8\text{N}/\text{mm}^2$ <sup>2)</sup> ①ピン引き抜き
	曲げ強度(繊維を使用する場合)	必要の都度	ビーム型枠	
その他	繊維の混入量	JSCE-E 101-2007 (コンクリート用鋼繊維品質規格) による	必要の都度	
	はね返り率測定	JSCE-F 563-2005 (吹付けコンクリート(モルタル)のはね返り率試験方法(案)) による	必要の都度 <sup>3)</sup>	
	吸水率	吸水率試験 煮沸吸水率試験	必要の都度	(高品質吹付けコンクリート設計・施工指針(案) 8.5)
	凍結融解抵抗性	凍結融解試験	必要の都度	
	初期養生効果	初期養生効果確認試験	必要の都度	

\*1 掘削初期とは、掘削開始から200m程度までをいう。  
 \*2 高品質吹付けコンクリート以外の場合は $5\text{N}/\text{mm}^2$ 以上とする。  
 \*3 使用材料変更時や付着状況に変化が認められたときに実施する。

### (11) 二次覆工の施工管理

覆工の材料、配合および強度については、示方を満足することを確認しなければならないとされている（鉄道建設・運輸施設整備支援機構，2008）。

覆工コンクリートに用いる材料、配合および強度，ならびにその品質管理については、土木工事標準示方書に準拠し，また，鋼繊維による補強を行う場合については，土木学会「鋼繊維補強コンクリート設計施工指針(案)」に準拠するとしている。

コンクリートの打設にあたっては，施工部位，施工箇所，運搬時間，切羽との距離，貫通の有無，気温，湿度等の環境条件，打設機械等を考慮して品質管理を行うとともに，湧水等の下地処理が十分に行われていることを確認しなければならない。また，1回当たりの打込み量，打上がり速度，打込み順序，投入箇所等の打込み方法についても，あらかじめ施工要領を定めて管理することとなっている。特に，脱型時期については，季節変動による坑内環境の変化，コンクリートの強度発現状況等をきめ細かく管理を行い，強度等について定量的な管理基準を定め管理するのがよいとされている。

## 3.4 低アルカリ性セメントの適用性評価

### (1)調査・試験結果に基づく適用性検討

上記3.1～3.3の結果を踏まえながら，本報告書で対象とした低アルカリ性セメント(LAC, SAC, HFSC)について，それを使用した場合の課題の抽出及び高度化方策の検討を実施し，その適用性を評価する。

3.2で示したように，処分施設に供するセメント系材料の適用部位は支保工，力学プラグが考えられており，その要求機能としては，①力学的安定性（建設～閉鎖までの期間において，周辺岩盤を安定に保持），②化学的安定性（コンクリートと緩衝材の接触により，緩衝材が許容限度を超えて劣化することを回避，コンクリートの劣化により，支保工部分が許容限度を超えた高透水性ゾーンとなることを回避），③施工性（地山の安定のため早期架設が可能で初期強度の発現が早い支保工を選択）が必要とされている。このうち，特に②の化学的安定性については，他の人工バリア，および性能評価にも関係するが，未だその要件および機能維持期間は明確にされていない。

これらのことから，現段階では，要求機能が比較的明確な①，③に対して適用性評価の条件とし，今後の検討の進捗と精度に併せて，②を考慮した適用性評価を実施していくものとする。

現在までに得られた試験・調査結果に基づくと、支保工に供する場合には、ショットクリートにするか覆工にするかで、セメント系材料に必要とされる要件が異なることは、3.3で示したとおりである。

その結果から、ショットクリートとして使用されるセメント系材料には、下記の要件が必要であることを示した。

- ①所要の強度が得られること
- ②はね返りが少ないこと
- ③付着性が良く密実なコンクリートが得られること
- ④ホースの閉そくなどが無いこと
- ⑤湧水の状況に適していること

これらの項目に対して、現在までに得られている各種低アルカリ性セメントの調査・試験結果を踏まえて、処分施設への適用性を整理すると、以下のとおりとなる。

①所要の強度が得られること

LAC, SAC に関しては OPC と同程度の初期強度が得られ、HFSC についても長期的には OPC と同程度の強度が得られた。しかし、SAC については、水和の刺激剤であるメタケイ酸ナトリウムの量によって、初期強度発現性に影響を与えることから、核種移行抑止機能への影響程度を踏まえた上で初期強度発現性について評価を行うことが必要と思われる。LAC は初期の強度発現は若干劣るものの、材齢 7 日以降は OPC と同等程度の強度発現性を示す。HFSC の強度発現性は、他の低アルカリ性セメントよりは劣るが、混和剤を多量に添加することによって、ある程度の初期強度発現は可能であるが、混和剤が核種移行抑止機能に影響を与える可能性が考えられることにより、その影響を踏まえて、初期強度発現に関する評価を今後実施する必要があると思われる。

②はね返りが少ないこと

この要件については、各種低アルカリ性セメントについて、試験は実施されていないため、今後の調査・試験結果を踏まえて評価する。

③付着性が良く密実なコンクリートが得られること

この要件については、各種低アルカリ性セメントについて、試験は実施されていないため、今後の調査・試験結果を踏まえて評価する。

④ホースの閉そくなどが無いこと

各種低アルカリ性セメントも実験では、流動性について特に問題は見られないが、①

の強度発現性と同様に混和剤を添加することによって、改良可能なため、核種移行抑止機能に与える影響を踏まえた上で、評価する必要がある。

#### ⑤湧水の状況に適していること

この要件については、各種低アルカリ性セメントについて、試験は実施されていないため、今後の調査・試験結果を踏まえて評価する。

#### ⑥ひび割れ抑制/制御

各種低アルカリ性セメントとともに、大容量で打設した場合の検討は行われていない。このため、実験室で硬化体試料を用いて得られた結果（2章）に基づくと、各種低アルカリ性セメントの特徴は以下のように集約される。

- ・温度応力によるひび割れ：各種低アルカリ性セメントとも、OPCよりも断熱温度上昇値が同程度以下であるため、低アルカリ性セメントを用いることによる温度応力によるひび割れ対策は通常の市販セメントと同等と考えることができる。
- ・自己収縮：OPCに比べて、何れの低アルカリ性セメントも自己収縮ひずみは大きい。
- ・乾燥収縮：LACの場合、60℃ではOPCよりも乾燥収縮ひずみは小さいが、高温（80,100℃）になると大きくなる。このため、処分環境条件を踏まえた上で、適切な対策を施し、ひび割れ制御・抑制方策を検討する必要がある。

現在までに得られている各種低アルカリ性セメントの調査・試験結果に基づくと、上記に示した通りである。しかし、2章で示したように、各種低アルカリ性セメントについて、普通ポルトランドセメントに比較しても大きく劣る特性はなく、pHが低いことによる周辺バリアへの影響軽減と、説明性の向上という観点では有益な材料である。特に、今後、処分施設的设计・評価、および処分環境条件（地質・地下水等）が絞り込まれることによって、上述した②化学的安定性に関する要件も、さらに具体的に整理されることから、適用性を評価する上での条件を明確にしながら、各種低アルカリ性セメントの適用性評価の確度を向上することが必要と思われる。

このため、各種低アルカリ性セメントについて、今後のデータ取得・蓄積の進行とともに、適用性評価を随時行い、処分施設への適用、および適用部位を絞りこんでいくことが肝要と思われる。

#### (2)長期耐久性を考慮した処分施設に供するセメント系材料への要求事項の検討

ここでは、低アルカリ性セメントのわが国への適用性評価に資するために、放射性廃棄物処分においてセメント系材料を使用する場合の留意事項を抽出・整理することを目的と

して、以下の検討を実施した。

- ①施工段階～操業段階～埋め戻し段階までの期間に想定される処分環境を設定
- ②セメント系材料に生じる劣化現象を抽出・整理（以下「状態設定」と記す）
- ③低アルカリ性セメントの適用性を評価する上での留意事項を抽出

1) 施工段階～操業段階～埋め戻し段階までの期間に想定される処分環境の設定

処分環境条件として熱的環境 (T)、地質水理環境(H)、応力環境(M)、化学環境(C)について以下のように整理した。

- ①熱的環境(T)： 処分施設は地下 300m 以深に建設される。このため、地温の影響も考えられるが、現在、場所が未定であるため、ここでは、地温の影響は考慮せず、廃棄体からの発熱のみを考慮することとした。
- ②地質水理環境(H)： 建設・操業中は、地下水および湧水は排水するものとし、埋め戻し後、排水管理終了時に地下水の影響があるものとした。
- ③応力環境 (H)： 支保工建設時から地圧は作用するものとし、地下水圧の作用は上記②の地質水理条件と整合するように排水管理終了時に作用するものとした。なお、岩盤クリープも地下水圧作用時から作用するものとした。
- ④化学環境(C)： 建設・操業時は酸素混入のため酸化性、埋め戻し時から溶存酸素等が水素発生型の腐食（還元性）のため徐々に還元性になるものとした。  
また、地下水溶存イオンは 3.2 で設定した地下水に含有されるものとした。

2) セメント系材料に生じる劣化現象の抽出・整理

① 建設段階（掘削段階、支保工建設段階、処分坑掘削段階）

建設段階は掘削段階、支保工建設段階、処分坑掘削段階に分けることができる。

掘削段階で用いられるセメント系材料の用途はグラウトである。この場合、グラウトには岩盤割れ目を塞ぎ、湧水等に対する機能が必要とされることから、以下の観点での機能確認が必要と考えられる

- ・施工性：流動性
- ・材料特性：低収縮性（硬化過程での収縮を低減し、岩盤との隙間を少なくし、水みちの形成を極力低減させる）
- ・物性：強度発現性（早期強度発現）、緻密性（水密性）
- ・化学特性：耐化学的安定性（地下水溶存イオン等に対する安定性）、耐溶脱性（溶脱

による組織多孔化の抑制)

また、支保工に関しては操業期間中の地圧等に対する空洞安定性を確保するために必要となる。このため、支保工建設段階においては、施工時の初期欠陥ひび割れの発生を極力制御・抑制し、構造的な安定性を必要とすることから、以下の観点での機能確認が必要と考えられる

- ・施工性：流動性
- ・材料特性：低収縮性（硬化過程での収縮を低減し、岩盤との隙間を少なくし、水みちの形成を極力低減させる）、水和熱低減（温度応力によるひび割れの発生抑制）、骨材安定性（操業期間が100年程度になることも考えられることから、掘削ズリを使用する場合の反応性骨材に対する検討が必要）、補強材（補強材として鉄筋を使用すると、好気性および還元性による鉄筋の腐食膨張によつての水みち形成を抑制）。
- ・物性：強度発現性（早期強度発現）、緻密性（水密性）
- ・化学特性：耐化学的安定性（地下水溶存イオン等に対する安定性）、耐溶脱性（溶脱による組織多孔化の抑制）

さらに、処分坑掘削段階は、縦型処分形態の時に生じるものであり、基本的には支保工建設段階と同様と考えられる。

## ② 操業段階（廃棄体定置段階）

ここでは、廃棄体が発熱体（100℃程度）であることから、上記に加え新たに熱影響に対する考慮が必要となる。

このため、建設段階の項目に加えて、以下の観点での考慮が必要となる。

- ・物性：温度勾配によるひび割れの制御・抑制、熱荷重によるセメント相組成への影響（水和鉱物の変質、空隙率への影響）
- ・化学特性：相組成変質による溶脱メカニズム等への影響

## ③ 閉鎖段階（処分孔閉鎖段階、埋め戻し段階）

閉鎖段階のうち、処分孔の閉鎖に関しては、上記②と同様であると考えられる。

一方、埋め戻し段階では、地下水との接触が考えられることから、上記①～②までに抽出した劣化作用が生じた状態での、耐久性評価が重要となる。また、ここで新たに生じる課題として還元性腐食における水素ガス発生に対する透気特性評価が挙げられる。

すなわち、埋め戻し段階においては、長期的なセメント系材料の化学的安定性を検討する必要がある、このためには、処分場の環境条件を適切に把握することが重要となる。

しかし、現段階では環境条件の設定が困難であるため、今後の天然バリアにおける検討の進捗状況に合わせて、状況の検討を継続しながら、長期耐久性を考慮した処分施設に供するセメント系材料への要求事項の検討を行っていくこととする。

図 3.4-1 に処分施設に供するセメント系材料の環境条件を考慮した検討すべき事項をまとめた。

		編組工用	支保工建設用	処分孔編組用	処分孔廃棄体設置用	処分孔閉鎖用	埋め戻し工用
状態目 (編組時)							
	状態目 (埋戻し時)						
検討すべきセメント系材料	グラウト	支保工				プラグ	
基本性能	①所定の型相当の透水性	①強度安定性 ②所定の型相当の透水性				①強度安定性 ②所定の型相当の透水性 ③ベントナイトの膨張圧に対する耐力	
基本性能に対して検討すべき項目	①十分な施工(充満性) ②緻密性	①十分な強度実現性 ②凹凸の抑制・調整 ③緻密性				①十分な強度実現性 ②凹凸の抑制・調整 ③緻密性	
検討すべき項目	材料	①収縮割れ(自己・乾燥)	①収縮割れ(自己・乾燥) ②水収縮 ③凍結安定性(凍結剤の利用) ④補修材			①収縮割れ(自己・乾燥) ②水収縮 ③凍結安定性(凍結剤の利用) ④補修材	
	施工	①流動性	①流動性			①流動性	
	物性	①硬化性 ②不透水性	①硬化性 ②不透水性		①凹凸割れ ②熱影響(凍結)	①硬化性 ②不透水性 ③圧入圧	
	化学	①中性化 ②耐化学的安定性 ③耐硫酸性	①中性化 ②耐化学的安定性 ③耐硫酸性	①中性化 ②耐化学的安定性 ③耐硫酸性	①熱影響(凍結)	①耐化学的安定性(硫酸系考慮) ②耐硫酸性(硫酸系考慮)	
環境条件	熱的環境 T				廃棄体からの発熱(温度上昇)及び割れ発生要因)	温度上昇の自発的ひび割れ発生要因(自しとするか?)	
	地質水理環境 M					一部見直し) ベントナイトの膨張圧の発生及びひび割れ発生要因(自しとする)	
	圧力環境 P		地圧			地圧、地下水圧、岩盤クランプ 長期荷重(ひび割れ発生要因(自しとするか?))	
	化学環境 C	酸化性				還元性(圧入発生要因) 還元性腐食(ひび割れ発生要因(自しとするか?))	

図 3.4-1 処分施設に供するセメント系材料の環境条件を考慮した検討すべき事項

## 4 まとめ

本報告書では、各種低アルカリ性セメントの基本特性および補強材の適用性に関して、既往の研究および実験結果に基づき整理した。また、現在公開されている文献に基づき、処分場におけるセメント系材料の要求性能を整理し、低アルカリ性セメントの適用性を整理した。その結果、現状の低アルカリ性セメントの諸性質は、その製造方法の相違によって異なる特性を示す場合もあるものの、概ね普通ポルトランドセメントと同程度の基礎物性を示すことが確認された。また、低アルカリ性セメントの補強材として鉄筋を使用できない可能性があることから、代替材料として繊維補強や炭素繊維複合ケーブルによる補強効果を検討した。これらの材料により引張強度や耐荷力、じん性の向上が可能であることが確認された。以上より、処分施設成立のための説明性の向上という観点から考えた場合、施設の候補材料のひとつとして低アルカリ性セメントが使用可能であると考えられる。

今後は、本検討で得られたデータに基づき、処分場で使用されるコンクリートの要求性能、施工性、環境条件等に適した配合の選定、使用実績の増加による低アルカリ性セメントの信頼性向上を図っていく必要があると考えられる。また、低アルカリ性セメントが実際の緩衝材等のバリア材料へ与える影響や廃棄体から生じる熱影響を評価した事例がないことから、これらのデータを取得する必要があると考えられる。さらに、現場での作業を考えた場合、施工性や大規模打設によるひび割れおよび不均一性の発生についてデータを取得する必要があると考えられる。実際の利用においては、サイトの地質・地下水条件に適した低アルカリ性セメントの材料学的な検討を実施していく必要がある。

## 参考文献

- 電力中央研究所・電気事業連合会（1999）：高レベル放射性廃棄物地層処分の事業化技術，  
U98509 d .
- 土木学会（1996）：トンネル標準示方書[山岳工法編]・同解説.
- 土木学会（1980）：新体系土木工学トンネル(I)—山岳トンネル—，技報堂出版.
- 榎本剛（2003）：炭素繊維ケーブル”CFCC”の技術開発，JETI, Vol.51, No.13, pp.140-142.
- 原子力発電環境整備機構（2004）：高レベル放射性廃棄物地層処分技術と安全性，  
NUMO-TR-04-01.
- 地盤工学会（1986）：現場技術者のための土と基礎シリーズ 12 NATM 工法の調査・設計  
から施工まで.
- Glukhovskiy, V.D., Pakhomov V.A. (1978) : Slag-Alkali Cements and Concretes., Budivel'nik  
Publishers, Kiev, Russia.
- Gray M N. and Shenton B S. (1998) : Design and Development of Low-Heat, High-Performance,  
Reactive Power Concrete, The International Symposium on High-Performance and Reactive  
Power Concrete, Sherbrooke PQ, Canada.
- 建設産業調査会（1987）：最新トンネル工法・機材便覧.
- 核燃料サイクル開発機構(1999)：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的  
信頼性—地層処分研究開発第2次とりまとめ—分冊2 地層処分の工学技術.
- 蔵重勲，廣永道彦，杉山大輔，関口陽，秋山隆，庭瀬一仁（2005）：セメント硬化体の溶脱  
に対する地下水組成の影響，土木学会第60回年次学術講演会.
- 大和田仁，三原守弘，入矢桂史郎，松井淳（2000）：放射性廃棄物地層処分システムにおけ  
るセメント系材料の検討 - 浸出液の pH を低くしたセメント系材料の施工性と機  
械的特性-，JNC TN8400 99-057.
- Ogawa, K., Uchikawa, H., Takemoto, K., Yasui, I. (1980) : The mechanism of the hydration in the  
system C3S-Pozzolan, Cement and Concrete Research, Vol. 10, pp.683-696.
- 鉄道建設・運輸施設整備支援機構（2008）：山岳トンネル設計施工標準・同解説，p.52, p.61,  
p.65, p.74, p.221, p.223, p.225.
- Urhan,S. (1987) : Alkali silica and pozzolanic reactions in concrete. Part 1 : Interpretation of  
published results and an hypothesis concerning the mechanism, Cement and Concrete  
Research, Vol. 17, pp.141-152.

- Vuorinen, U., Lehtikoinen J., Imoto H., Yamamoto T., Alonso M. C. (2005) : Grout for Deep Repositories Subproject 1: Low-pH Cementitious Grout for Larger Fractures, Leach Testing of Grout Mixes and Evaluation of the Long-Term Safety, Posiva Working Report 2004-46.
- Wesche, K. (1991) : Fly Ash in Concrete - Properties and Performance, RILEM REPORT 7, E & FN SPON, pp.48-49.
- 山本武志, 廣永道彦 (2008) : フライアッシュのポゾラン反応性を評価するための促進化学試験法 (API 法) の適用性の拡張, コンクリート工学論文集第 30 巻, Vol.30, No.1, pp.195-200.
- 山本武志, 金津努 (2005) : ポゾラン反応がもたらす組織緻密化のメカニズムと強度発現に関する考察, 土木学会第 60 回学術講演会講演概要集, 5-244, pp.487-488.

## 謝辞

本検討における基礎物性評価においては、元(財)電力中央研究所バックエンド研究センター（現 BASF ポゾリス株式会社）井元晴丈氏に多大なご尽力をいただいた。また、処分場の環境条件における低アルカリ性セメントの適用性評価においては、元(財)電力中央研究所バックエンド研究センター（現東京電力株式会社）窪泰浩氏にご助言をいただいた。さらに、本検討を遂行するにあたり、(財)電力中央研究所の松村卓郎氏、松尾 豊史氏、蔵重勲氏、千田太詩氏にご協力いただいた。ここに記して感謝の意を表す。

# 原子力発電環境整備機構

(略称:原環機構)

Nuclear Waste Management Organization of Japan (NUMO)