

JNC TJ1400 2001-004

幌延深地層研究センターにおける
コンクリート材料の施工性に関する研究

(核燃料サイクル開発機構 委託研究成果報告書)

2001年5月

株式会社 大林組

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

〒319 - 1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184,
Japan

©核燃料サイクル開発機構
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2001

幌延深地層研究センターにおけるコンクリート材料の施工性に関する研究

入矢桂史郎* 三上哲司* 保岡哲治* 上垣義明*

要 旨

これまでフライアッシュを多量添加した低アルカリ性セメント HFSC の研究を進めてきており、間隙水の化学的特性やその挙動評価など基本的な特性は把握されたが、施工性などの建設に関わる課題は抽出されているものの、その検討は行われていない。

本研究では低アルカリ性コンクリートについて、幌延深地層研究センターへの適用を視野に入れて、岩盤中の地下施設における施工性を確認するための室内試験レベルのデータを取得するとともに、施工性確認のために必要な技術開発項目を明らかにすることを目的とする。

本研究で得られた結論は以下の通りである。

- ① 低アルカリ性セメントとして HFSC と AECL が開発した LHHPC について、室内試験における湿式吹試験の結果、カルシウムサルホアルミネート系急結剤を使用することによって、目標とした吹付けコンクリートとしての性能（12 時間圧縮強度 1.0N/mm^2 、24 時間圧縮強度 9N/mm^2 ）を確保する結果を得た。本実験より、室内試験レベルでは、吹付けの可能性が確認された。
- ② 低アルカリ性セメント中での鉄筋の腐食挙動を調査するための暴露試験について、鉄筋コンクリート供試体を海中に暴露する試験計画を作成した。
- ③ 低アルカリ性を 1 ヶ月程度で発現するためのセメントの改良として、シリカフュームとセメントの使用量を同量とすることで、低アルカリ性を早期に実現できることがわかった。この期間は温度を上昇させると pH 低下速度がさらに急激に上昇する。
- ④ 低アルカリ性セメントを放射性廃棄物処分場において想定すべき使用部位を検討し、実際の使用に向けた実験計画を作成した。

* (株)大林組

本報告書は、(株)大林組が核燃料サイクル開発機構の委託により実施した研究成果に関するものである。

核燃料サイクル開発機構担当部課：バックエンド推進部 深地層研究施設計画グループ

Study on construction method of concrete in the underground research laboratory

K.IRIYA, T.MIKAMI, T.YASUOKA, and Y.UEGAKI

ABSTRACT

Although there are several types in low alkalinity cements, highly fly ash contained silicafume cement (HFSC) has been studied in JNC. It is demonstrated that pH of pore water of the cement indicates below 10.5 as results of other TRU study. However although chemical properties and basic mechanical behavior are well understood, workability so on in constructing is little investigated.

Since the underground research laboratory plays a important role in investigating constructing technology, HFSC will be adopted for supporting rock cavern so on. It is required that workability of low alkalinity cements should be assessed.

Major performance of workability in tunnel construction in rock will be investigated and R & D planning will be done toward the laboratory construction.

Conclusion obtained in this study is described as followings.

- 1) As results of laboratory test, HFSC and LHHPC developed by AECL fulfil the requirements of shotcrete using by hardening accelerator with calcium-salpho-aluminate. It is concluded that HFSC and LHHPC can be applied for shotcrete.
- 2) The experiment upon corrosion of re-bars by facing saline water at a offshore is planned.
- 3) It is noted that pH decreases significantly with rise of silicafume content and that silicafume should be used as much as OPC.
- 4) It is investigated where the low alkalinity cement should be applied in a actual radio waste repository and R & D program in the laboratory is planned.

Civil Engineering Division of OBAYASHI CO.

This work was performed by OBAYASHI Co. under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute

JNC Liaison : Underground Research Laboratory Project Group

Nuclear Cycle Background Division

目次

はじめに	1
1. 吹付けコンクリートへの適用性確認のための研究計画の策定	3
1.1 湿式吹付けの可能性検討	3
(1) 試験方法	3
(2) 吹付けモルタルとしての目標仕様	5
(3) 試験結果	5
1.2 実大規模トンネル吹付けコンクリート実験計画	9
(1) 試験目的	9
(2) 研究計画	9
(3) 実大規模吹付けコンクリート試験の施工場所と模擬トンネルの大きさ	9
(4) 試験水準	12
(5) 使用材料	12
(6) 最適配合条件の把握 (Step 1) のための詳細計画	13
(7) 模擬トンネルにおける吹付け性状の確認 (Step 2) の詳細計画	14
2. 鉄筋腐食挙動の把握試験	19
2.1 試験目的および試験概要	19
2.2 使用材料	20
2.3 コンクリートの配合	20
2.4 練混ぜ方法および供試体	20
(1) 練混ぜ方法	20
(2) 鉄筋腐食試験供試体	21
(3) 塩分浸透試験供試体	22
2.5 試験項目	23
2.6 暴露試験方法	23
2.7 コンクリートの試験方法	24
(1) 腐食面積率	24
(2) 腐食減量	24
(3) 自然電位	24

(4) 分極抵抗	24
(5) コンクリート中の塩分分析	25
2.8 鉄筋腐食挙動の評価	25
3. プレキャストコンクリートの力学特性の把握試験	27
3.1 低アルカリ性を早期に発現させるためのセメントの改良	27
(1) 試験方法	27
(2) 試験結果	29
3.2 高温養生の温度と期間の検討	31
(1) 試験方法	31
(2) 試験結果	31
3.3 高温養生における強度および静弾性係数試験	32
(1) 試験方法	32
(2) 試験結果	33
3.4 力学特性の評価	34
(1) セメントの配合比率	34
(2) 高温養生の効果	35
4. 幌延深地層研究センターへの適用性確認のための研究計画の策定	37
4.1 低アルカリ性セメントの特徴と使用部位	37
4.2 低アルカリ性セメントの施工性に関する課題	38
4.2.1 用途毎の課題の抽出	38
(1) 支保工	38
(2) 覆工コンクリート	38
(3) グラウト	39
(4) プラグ	39
4.2.2 課題と実験場所時期の位置づけ	40
4.3 低アルカリ性セメントの研究計画	43
4.3.1 支保工への適用実験	43
(1) 吹付け施工実証実験	43

(2) 吹付け実証試験（トンネル吹付け試験）	43
(3) 支保工機能実証試験	44
(4) 岩盤の影響に関する定量的評価	44
4.3.2 セグメントへの適用	44
(1) 設計および製造方法の検討	44
(2) 製造と組み立ての実証	45
(3) 暴露による変質の確認	45
(4) 鉄筋腐食の調査	45
(5) 山岳トンネル施工法の確立	45
4.3.3 覆工コンクリートのひび割れ	46
(1) 試験目的	46
(2) ひび割れ抵抗性の把握	46
(3) モデルトンネルにおけるひび割れ予測	46
(4) ひび割れ対策の効果の確認	47
(5) 無ひび割れ施工の確立	47
4.3.4 グラウト	47
(1) 使用材料の見直しと低アルカリ性の確認	47
(2) 室内注入試験	48
(3) モデル岩盤による注入試験	48
(4) 注入確証試験と地球化学的影響評価	48
おわりに	49

図目次

1章

- 図1.1 模擬トンネルの大きさ 10
- 図1.2 強度供試体採取用の型枠の例 17

2章

- 図2.1 供試体の寸法および形状 22
- 図2.2 供試体の製作方法 22
- 図2.3 低アルカリ性セグメント中での鉄筋腐蝕検討フロー 26

3章

- 図3.1 各温度毎の浸漬期間とpHの関係 29
- 図3.2 ケース2セメントにおけるpHの低下 32

表 目 次

1 章

表1.1	実験に使用する材料（セメント）	3
表1.2	実験に使用する材料（急結剤）	4
表1.3	実験に使用した材料（その他）	4
表1.4	モルタルフロー試験	5
表1.5	モルタル凝結試験	6
表1.6	モルタル強度試験	6
表1.7	試験項目および確認事項	9
表1.8	HFSCセメント配合	12
表1.9	急結剤	12
表1.10	細骨材、粗骨材および減水剤	12
表1.11	Step 1 の要因と水準	13
表1.12	最適配合条件を把握するためのコンクリート配合	13
表1.13	フレッシュコンクリートに関する試験項目と試験方法	14
表1.14	硬化コンクリートに関する試験項目と試験方法	14
表1.15	吹付けコンクリート配合例	14
表1.16	主要試験使用機械	15
表1.17	フレッシュコンクリートに関する試験項目と試験方法（再掲）	16
表1.18	吹付け性状（施工性）に関する試験項目と試験方法	16
表1.19	目視観察の判断基準	16
表1.20	硬化コンクリートに関する試験項目と試験方法	18

2 章

表2.1	鉄筋腐食試験の概要	19
表2.2	使用材料	20
表2.3	コンクリートの配合	20
表2.4	試験項目	23
表2.5	暴露試験方法の実施例	23

3 章

表3.1	使用材料	27
表3.2	試験ケース	27
表3.3	浸漬水のpH測定結果	27
表3.4	モルタルフロー測定結果 (SP2.0%固定)	30
表3.5	モルタルフロー測定結果 (SP量変化)	30
表3.6	浸漬水のpH測定結果	31
表3.7	使用材料 (表3.1に示したものの以外)	32
表3.8	コンクリートの配合	33
表3.9	圧縮強度測定結果	34
表3.10	静弾性係数測定結果	34

4 章

表4.1	セメントの特徴	37
表4.2	想定される低アルカリ性セメントの用途	37
表4.3	課題と解決する実験方法 (その1)	40
表4.4	課題と解決する実験方法 (その2)	41
表4.5	課題と解決する実験を実施する場所 (その3)	42

写 真 目 次

1 章

写真1.1	凝結試験（プロクター貫入試験）	8
写真1.2	圧縮試験用供試体	8
写真1.3	模擬トンネル全景（その1）	11
写真1.4	模擬トンネル全景（その2）	11

はじめに

セメントを結合材としたコンクリート材料は、その間隙水が pH12.5 程度の高アルカリ性となることから、ベントナイトや岩盤に与える影響が指摘されている。

そのため、特に地下水位以下に建設される放射性廃棄物処分場では、ベントナイトや岩盤を変質させないセメント系材料が求められる。この背景から、放射性廃棄物処分の研究においてセメントの物理的性能を失わないで間隙水の pH が 11.0 以下を目標とした低アルカリ性セメントの研究が進められてきた。

低アルカリ性セメントにはいくつか種類があるが、TRU 廃棄物処分の研究において、フライアッシュを 40%程度高含有したシリカフェームセメント（以下 HFSC）を開発し、低アルカリ化できることを確認した。このセメントは、普通ポルトランドセメント、フライアッシュ、シリカフェームなどの従来から建設工事で使用されてきた材料を組み合わせることで低アルカリ化を可能にしたことを特徴とする。

これまで、TRU 廃棄物処分研究において進められてきた HFSC に関する研究では、pH10.5 程度の低アルカリ性が確保されることがわかった。しかし HFSC の化学的特性の把握やその挙動の評価など基本的な特性は把握されたが、施工性などの建設に関わる課題は抽出されているもののその検討はなされていなかった。

一方、幌延に計画している幌延深地層研究センターは、その役割として処分場の設計建設技術に関する確認検証を行うことがあげられており、HFSC 等の低アルカリ性コンクリートを部分的に使用することなどが検討されている。このことから、地下施設の建設が開始されるまでに低アルカリ性コンクリートの施工性を確認しておく必要がある。

本研究においては、低アルカリ性コンクリートについて、幌延深地層研究センターへの適用を視野に入れて、岩盤中の地下施設における施工性を確認するための室内試験レベルのデータを取得するとともに、施工性確認のために必要な技術開発項目を明らかにすることを目的とする。

1. 吹付けコンクリートへの適用性確認のための研究計画の策定

1.1 湿式吹付けの可能性検討

平成 12 年度までに、フライアッシュを高含有した低アルカリ性コンクリートの乾式吹付けへの適用性について検討し、適用可能という結果を得た¹⁾。ここでは、実際の吹き付け条件である湿式吹付けについて、室内試験により適用性を検討した。低アルカリ性セメントとして、JNC 殿で開発された HFSC (High Fly ash silica fume Cement) と Gray 博士らが開発した LHHPC (Low Heat High performance Cement) の 2 つを検討の対象とする。

(1) 試験方法

1) 試験の水準

水準 1 : HFSC

実際の使用条件を考慮し、湿式混練り方法によりモルタルの流動性を減水剤で調整し、凝結速度と圧縮強度を測定・評価する。

水準 2 : LHHPC

水準 1 実施の湿式方法により、凝結速度と圧縮強度を測定・評価する。

2) 使用材料

使用材料の内セメント、混和材について表 1.1 に示す。

表 1.1 実験に使用する材料 (セメント)

HFSC 配合

種類	メーカー	仕様	混合比 (%)
普通ポルトランドセメント	電気化学工業社製	密度=3.16g/cm ³	40
シリカフューム	エルケム社製	密度=2.22g/cm ³	20
分級フライアッシュ	太平洋セメント社製	中部電力碧南火力発電所産	40

LHHPC 配合

種類	メーカー	仕様	混合比 (%)
普通ポルトランドセメント	電気化学工業社製	密度=3.16	20.9
シリカフューム	エルケム社製		20.9
シリカフラワー	US Silica		58.2

急結剤

一般に広く使用されているタイプとしてナトミック Type5 は、pH が 12~13 でアルカリ度

が高いために、本研究の主目的である低アルカリ性を損なう恐れがあるので、アルカリ度を下げたナトミック Type10 (pH10~11) およびナトミック AF (pH7以下) を使用を検討した。しかし、ほぼ中性の急結剤として開発されたナトミック AF は、ポズランを多量添加したコンクリートでは凝結不良を起こすことが懸念されたために、本研究ではナトミック Type10 を使用することとした。ナトミック Type10 の化学的組成について以下に示す。

ナトミック T-10：主成分＝カルシウムサルホアルミネート鉱物($3\text{CaO}\cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot \text{CaSO}_4$)

作用機構＝カルシウムサルホアルミネート鉱物($3\text{CaO}\cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot \text{CaSO}_4$)は、水と反応して種々のカルシウムアルミネート水和物とエトリンガイト($3\text{CaO}\cdot \text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$)を生成して、コンクリートを急結させるとともにコンクリートの初期強度を高める。無機アルカリ塩をほとんど含有していないため、低アルカリで、かつセメントの初期水和鉱物(C_3A 、 C_3S)を刺激することがほとんどなく、長期強度の低下もほとんどないため、ナトミック T-10 を添加してもベースコンクリートと同程度の圧縮強度を確保できる。

本研究で使用する急結剤の仕様を表 1.2 に示す。

また、その他の材料を表 1.3 に示す。

表 1.2 実験に使用する材料（急結剤）

種類	メーカー	仕様
ナトミック Type10	電気化学工業社製	高強度吹付け用、粉末、標準添加率＝ $C \times 10\%$

※C=OPCの単位量

表 1.3 実験に使用した材料（その他）

種類	メーカー	仕様
細骨材	北陸石産社製	新潟県姫川水系砂、密度＝2.6、FM＝2.90
高性能 AE 減水剤	サンフロー社製	HS700NT（従来の HS700 から凝結遅延成分を取り除いたもの）

3) 試験項目

圧縮強度試験

方法：土木学会基準に原則として準じる。

モルタル凝結試験

方法：プロクター貫入抵抗試験とし、土木学会基準に原則として準じる。

(2) 吹付けモルタルとしての目標仕様

土木学会吹付けコンクリート用混和剤の規格に従う。

- ① 圧縮強度：1.0N/mm² (12 時間)
- ② 圧縮強度：9.0N/mm² (24 時間)
- ③ 圧縮強度：材齢 28 日で、急結剤を混入しないモルタルの 75%以上
- ④ プロクター貫入試験による始発時間(3.5(N/mm²))が5分以内、終結時間(28.0(N/mm²))が 15 分以内

(3) 試験結果

高性能 AE 減水剤の使用量を決定するために、高性能 AE 減水剤の使用量を変えてモルタルを混練し、フローを測定した。その結果を表 1.4 に示す。

表 1.4 モルタルフロー試験

セメント種類	モルタルフロー (mm)			備考
	減水剤 1.0%	1.5%	2.0%	
HFSC	197*195	242*240	—	
LHHPC	214*210	250*243	261*260	

上記結果より、目標とする両セメントとも減水剤添加量は HFSC あるいは LHHPC の単位の 1.0%とし、凝結・強度試験を行った。

表 1.5 にモルタルの凝結試験結果を示す。

表 1.5 モルタル凝結試験

セメント 種類	W/C (%)	急結剤		貫入抵抗値(N/mm ²)								
		種類	添加 率 (%)	凝結	45 秒	1 分	2 分	3 分	5 分	7 分	10 分	15 分
HFS C	50	NT 10	8	○	14.0	11.2	25.2	29.0				
			10	○	8.96	11.2	19.6	23.5	28.0			
			12	○	11.8	14.0	20.7	27.4	31.6			
LHH PC	50	NT 10	8	△○	5.60	6.16	8.40	10.1	10.6	11.8	13.2	—
			10	△○	5.60	7.28	10.1	11.2	12.9	16.2	14.0	—
			12	△○	7.28	7.28	15.1	12.9	16.8	15.7	17.4	18.2

※ 急結剤添加率は、HFSC あるいは LHHPC 単位量に対する重量比とした。

※※ 始発=3.5(N/mm²)、終結=28.0(N/mm²)

表 1.6 にモルタルの圧縮強度試験結果を示す。

表 1.6 モルタル強度試験

No.	セメント 種類	W/C (%)	急結剤		圧縮強度(N/mm ²)					
			種類	添加率	1h	3h	1d	3d	7d	28d
1	HFS C	50	NT10	0	—	—	3.38	7.84	16.4	37.0
2				8	1.06	1.73	4.81	11.9	18.9	36.9
3				10	1.17	2.08	6.29	12.7	22.3	38.4
4				12	1.29	2.51	8.06	14.6	23.7	41.8
5	LH HPC		NT10	0	—	—	1.42	2.71	6.4	16.8
6				8	0.17	0.86	3.16	6.60	11.2	24.5
7				10	0.21	1.05	4.60	8.77	13.3	26.4
8				12	0.19	0.99	4.50	10.2	14.4	28.4

上記の結果から、HFSC については、湿式吹付けが十分に可能といえる。また LHHPC については、凝結に関する限り、始発（凝結開始）時間は目標仕様を満足するが、終結（強度発現）時間は目標を達成できなかった。初期強度が低い可能性が懸念される。強度については、いずれの配合においても圧縮強度試験において 24 時間で 9N/mm² の基準値を満足しなかった。トンネルの支保として採用する場合には実際の要求される強度に応じた水セメント

比の設定が必要である。

また、HFSC226 配合を考えると、LHHPC がシリカフラワーを用いることと HFSC226 が分級フライアッシュを用いることの違いを除いて、HFSC の混合比が LHHPC セメントと極めて近い状態になる。今回の LHHPC の結果から類推する限り、HFSC226 については、LHHPC セメントと同様初期強度の低下が懸念される。

今回の凝結試験状況を写真 1.1 に示す。圧縮強度用供試体の作成状況を写真 1.2 に示す。

参考文献

- 1) 入矢桂史郎、三原守弘他、ポゾランを多量添加した低アルカリ吹付けコンクリートに関する研究、土木学会年次学術講演会論文集、2001.9



写真 1.1 凝結試験（プロクター貫入試験）

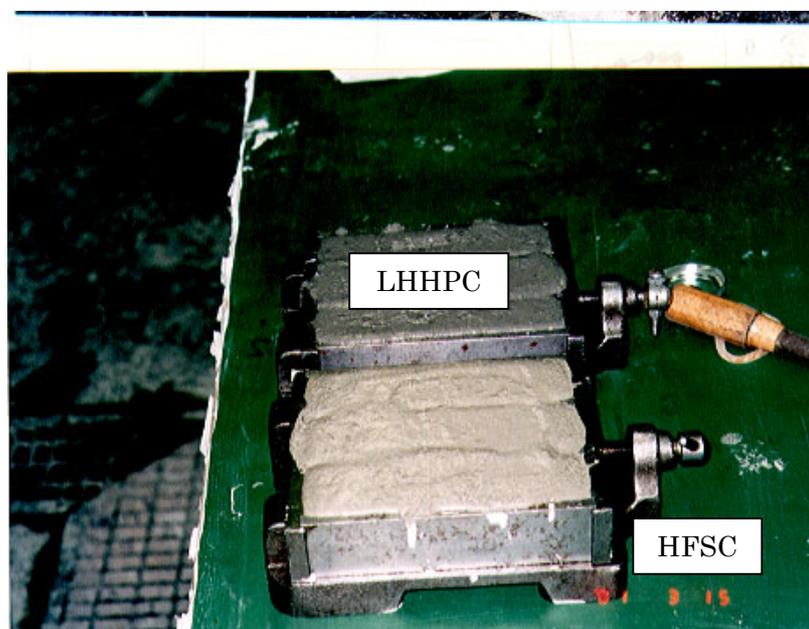


写真 1.2 圧縮試験用供試体

1.2 実大規模トンネル吹付けコンクリート実験計画

(1) 試験目的

低アルカリ性セメントを用いた吹付けコンクリートは、そのアルカリ性が低いため、吹付けコンクリート背面地山の長期的な変質や変質に伴う強度劣化防止に効果がある。

本実験では、深地層研究所において上記の変質等を抑制することを確認検証する目的として開発された普通ポルトランドセメントにシリカフェーム等を混入した低アルカリ性セメント（以下、HFSC）について、吹付けコンクリートへの現地適用性検討を行う。

(2) 研究計画

研究は3年間で実施する予定である。各年度の試験項目と確認事項等を表 1.7 に示す。

表 1.7 試験項目および確認事項

	1年目	2年目	3年目
	実規模模擬実験	原位置試験	補充（確認）試験
試験項目	<ul style="list-style-type: none"> 最適配合条件の把握 模擬トンネルにおける吹付け性状の確認 	<ul style="list-style-type: none"> 対象岩盤のトンネルにおける吹付け性状の確認（通常の状態） 施工設備（吹付け機やロボット等）変更に伴う配合修正 	<ul style="list-style-type: none"> 特殊条件下の吹付け性状の確認 湧水 膨張性地山対応（大容量吹付け、繊維吹付けなど）
確認事項	<ul style="list-style-type: none"> ベースコンクリートの力学特性 吹付けコンクリートの施工性と力学特性の把握 最適施工条件の確認 	<ul style="list-style-type: none"> 吹付けコンクリートの施工性と力学特性確認 	<ul style="list-style-type: none"> 吹付けコンクリートの施工性の確認 最適配合の把握 吹付けコンクリートの力学特性の把握
実用化に関する判定	<ul style="list-style-type: none"> 実使用に耐えられるかどうかの判断 	<ul style="list-style-type: none"> 実用可能であれば、想定される特殊条件に対応できるかの確認に移行 	

本節では、特に1年目の実規模模擬実験について、その試験計画を述べる。

(3) 実大規模吹付けコンクリート試験の施工場所と模擬トンネルの大きさ

1) 施工場所

模擬トンネルと吹付け施工機械が備わっている研究施設を選定する。



写真 1.3 模擬トンネル全景（その1）



写真 1.4 模擬トンネル全景（その2）

(4) 試験水準

本年度の試験は、下記の2ステップに分けて実施する。

Step 1 最適配合条件の把握

主目的 : ベースコンクリートについて、フレッシュコンクリート及び硬化コンクリートの性状を把握し、配合条件を絞り込む。

確認項目 : ベースコンクリート : スランプ試験、空気量試験、コンクリート温度の測定、スランプフローの測定、目視観察、圧縮強度試験

Step 2 模擬トンネルにおける吹付け性状（施工性）の確認

主目的 : Step 1 で絞り込まれた配合条件のコンクリートを用いて、模擬トンネルにおいて実際に吹付け試験を行い、吹付け性状の確認評価を行う。

確認項目 : ベースコンクリート : スランプ試験、空気量試験、コンクリート温度の測定、スランプフローの測定、目視観察

吹付けコンクリート : 目視観察、リバウンド率の測定、急結剤添加率の測定、コンクリート吐出量の測定、初期強度試験（プルアウト法）、圧縮強度試験（箱型枠、模擬トンネル）、静弾性係数の測定、割裂引張強度試験、透水試験

(5) 使用材料

使用材料を表 1.8～表 1.10 に示す。

表 1.8 HFSC セメント配合

種類	メーカー	仕様	混合比(%)
普通ポルトランドセメント	電気化学工業社製	密度=3.16g/cm ³	40
シカフォーム	エルケム社製	密度=2.22g/cm ³	20
分級フライアッシュ	太平洋セメント社製	中部電力碧南火力(発)産	40

表 1.9 急結剤

種類	メーカー	仕様
ホミック Type10	電気化学工業社製	高強度吹付け用、粉末、標準添加率=C×10%
ホミック Type 5	〃	一般強度吹付け用、粉末、標準添加率=C×7%

表 1.10 細骨材、粗骨材および減水剤

種類	メーカー	仕様
細骨材	北陸石産社製	新潟県姫川水系砂、密度=2.60g/cm ³ 、FM=2.90
粗骨材	〃	新潟県糸魚川産 6 号碎石、密度=2.64g/cm ³
減水剤	サンフローパリック社製	HS700NT

なお、巻末に細骨材と粗骨材の試験成績表を示す。

(6) 最適配合条件の把握 (Step 1) のための詳細計画

1) 要因と水準

最適配合条件を把握するための要因と水準を表 1.11 に示す。

表 1.11 Step 1 の要因と水準

要因	水準	数 値
単位セメント量	3	360、400、450kg/m ³
水セメント比	4	60、55、50、45% *

*昨年度のモルタル試験結果から、水セメント比(W/C)=50%程度で標準吹付け配合と同程度の強度発現性であったことから、水セメント比(W/C)を設定

2) コンクリートの配合条件

試験を実施するコンクリート配合条件を表 1.12 に示す。

表 1.12 最適配合条件を把握するためのコンクリート配合

配合種類	セメント種類	単位セメント量 (kg/m ³)	W/C (%)	目標スランプ (cm)	備考
標準配合	普通ポセ	360	55	10 程度	一般吹付け配合
配合条件 1	HFSC	360	60	10 程度	
配合条件 2	HFSC	360	55	18 程度	
配合条件 3	HFSC	400	50	18 程度	
配合条件 4	HFSC	450	45	18 程度	

*作業性を考慮して単位水量=200kg/m³程度として上記配合を設定した。また、細骨材比 (s/a) は、60%一定で実施するものとする。

3) 試験項目と試験方法

フレッシュコンクリートに関する試験項目と試験方法を表 1.13、硬化コンクリートに関するものを表 1.14 に示す。

表 1.13 フレッシュコンクリートに関する試験項目と試験方法

試験項目	試験方法
スランプ試験	JIS A 1101に準拠
空気量試験	JIS A 1128に準拠
コンクリート温度の測定	デジタル温度計にて測定
スランプフローの測定	JSCE F 503に準拠
目視観察	フレッシュ状態のコンクリートについて、ばさばさである、粘りがある等の定性的な評価。

表 1.14 硬化コンクリートに関する試験項目と試験方法

試験項目	試験方法
圧縮強度試験	圧縮強度試験は JIS A 1108 に準じた。 ①試験材齢：7日、28日 ②養生方法：標準水中養生 ③供試体数：各材齢とも3供試体、 ④試験体寸法：ベースコンクリートはφ100×200mm

本試験結果より、標準配合を含む5配合条件の中から標準配合を中心に、目安として2条件程度の最適配合条件を決定する。判断の基準は、目標スランプが確保できるか、強度が確保できるか等である。

(7) 模擬トンネルにおける吹付け性状の確認 (Step 2) の詳細計画

1) コンクリート配合

Step 1 で絞り込まれた配合は、急結剤を含んだ表 1.15 に示すものを実際の模擬トンネルに吹付けてみる。ここで、急結剤は昨年度のもルタル試験結果より、ナトミック Type-10 を使用するものとする。

表 1.15 吹付けコンクリート配合例

配合条件	コンクリート配合						急結剤	
	W/C	s/a	単位量 (kg/m ³)				ナミック	同左
	(%)	(%)	W	C	HFSC	減水剤	Type-10	Type-5
配合条件3	50	60	200	—	400	—	○	—
標準配合	55	60	198	360	—	—	—	○

2) 試験方法

生コン工場にて混練りしたベースコンクリートを用い、模擬トンネル内において以下に示す回数吹付けを行い、諸性状を測定・確認する。吹付け回数は、データの信頼度の関係から1配合につき3回実施する。2配合では、6回の吹付けを実施する。1回の吹付けは2m³を目安とし、各試験前には、前回の試験のコンクリートが残らないように留意する。

なお、吹付けコンクリートの品質はオペレーターの熟練度に影響を受けやすいので、経験豊かなものが全回数実施するものとする。なお、吹付けノズルと模擬トンネル壁面の距離は、トンネル内空幅の関係もあって 1.0～1.5m程度を原則とし、試験の初期の段階で付着状況等から決める。なお、吹付けノズルは、トンネル壁面に垂直とする。また、後述する模擬トンネルの吹付けコンクリートの圧縮強度試験用供試体の採取箇所は、最低 15cm 程度の吹付け厚は必要である。

3) 試験機械

主要な試験使用機械を表 1.16 に示す。ここで使用したものは、一般的に山岳トンネルの施工で用いられている機械である。

表 1.16 主要試験使用機械

機械名	型名	能力	備考
吹付けロボット	MACR-2000	伸縮ストローク:2.0m、吹付け面半径:5.7m	三井三池製作所社製
急結剤添加機	ナムクリート PAC-250(V)	タンク容量::280リットル 圧送能力:1kg/min～8kg/min	電気化学工業社製
コンクリートポンプ	MKW-25SNT	理論吐出量：5～25m ³ /H (50Hzの場合)	MKW-25SNT (ピストンポンプ、シテック社製)
コンプレッサ		100PS 級エンジン式×2台	

4) 試験項目

フレッシュコンクリートに関する試験項目と試験方法を表 1.17 (再掲)、吹付け性状 (施工性) に関するものを表 1.18、目視観察の評価基準を表 1.19、硬化コンクリートに関するものを表 1.20 に示す。また、試験に用いる箱型枠の例を図 1.2 に示す。

表 1.17 フレッシュコンクリートに関する試験項目と試験方法 (再掲)

試験項目	試験方法
スランプ試験	JIS A 1101 に準拠
空気量試験	JIS A1128 に準拠
コンクリート温度の測定	デジタル温度計にて測定
スランプフローの測定	JSCE F 503 に準拠
目視観察	フレッシュ状態のコンクリートについて、ばさばさである、粘りがある等の定性的な評価

表 1.18 吹付け性状（施工性）に関する試験項目と試験方法

試験項目	試験方法
目視観察による吹付け状況の評価	吹付け状況を点数法（5段階）により評価。評価項目としては、①混合状態、②脈動状態、③ノズルだれ、④急結状態、⑤粉塵、⑥付着状態等 複数（3人以上）の観察者による評価
リバウンド率測定	吹付け材の重量と回収したリバウンド材の重量で除して算出
急結剤添加率の測定	急結剤添加機の吹付け前後での重量差から測定
コンクリート吐出量の測定	実吐出量と吹付け時間を測定し、実吐出能力を測定

表 1.19 目視観察の判断基準表

項目	良 ← 目視評価 → 否					判断基準
	5	4	3	2	1	
混合状態	良		普通		否	ノズルから吐出後のコンクリートと急結剤の混合状態。例えば、白いスジが見られる場合は、良い状態とは言えない。
脈動状態	なし		普通		激しい	マテリアルホースの脈動、あばれ。管内の付着物が多くなったり、コンクリートの流動性低下などに起因する。脈動の増加は閉塞の前兆ととらえられる。
ノズルだれ	なし		普通		多い	ノズル先端から配管内のノロが落ち散る状態。コンクリートの性状や急結剤の混合状態、圧送空気圧力の不足、ノズルチップの絞りなどに起因する。
急結状態	急結		普通		遅い	壁面付着後の急結状態。基本的に吹付け後の触指で判断。天端部では、吹付けエアによる下地コンクリートの「捲られ」などの動きで判断する。
粉じん	小		普通		多	粉じんの多少を判断。模擬トンネル内に入ってくる風の影響や光線の加減で判断しにくいかも知れないが、基準ケースとの相対比較で判断する。
付着状態	良		普通		否	リバウンド・だれ・圧送エアによる「捲られ」や、吹付け表面の平滑さを含む総合的な付着状態を判断。ただし、付着状態の良否には急結性の判断は含まれない。

表 1.20 硬化コンクリートに関する試験項目と試験方法

試験項目	試験方法
初期強度試験 (プルアウト法)	土木学会規準「引抜きによるコンクリートの初期強度試験方法(案)」 (JSCE-G 561)に準拠 ①試験材齢：3時間、6時間、24時間 ②養生方法：現場湿潤養生(材齢24時間のみ20℃湿潤養生) ③供試体数：各材齢とも3供試体
圧縮強度試験	吹付コンクリートのコア採取方法は JSCE-F 552、JSCE-F 561 に準じ、圧縮強度試験は JIS A 1108 に準拠 ①材齢：28日 ②養生方法：標準水中養生 ③供試体数：ベースコンクリートについては各材齢とも3供試体、吹 付コン各材齢とも4供試体 ④試験体寸法：ベースコンクリートはφ100×200mm(現着時採 取)、吹付コンクリートはφ50×100mm(コア採取)
静弾性係数の測定	JSCE-G 502に準拠した。試験は圧縮強度試験と同時に実施
模擬トンネルの 吹付けコンクリートの 圧縮強度試験	実際に吹付けた壁面のコンクリートをコアリング後、端面整形しφ50× 100mmの供試体で圧縮強度試験を実施 天端と側壁(片側)で各々3本
割裂引張強度試験	土木学会規準 JIS-A1113-1999 に準じて実施 ①材齢：28日 ②養生方法：標準水中養生 ③供試体数：ベースコンクリートについては各材齢とも3供試体、吹 付コン各材齢とも4供試体 ④試験体寸法：ベースコンクリートはφ100×200mm(現着時採 取)、吹付コンクリートはφ50×100mm(コア採取)
透水試験	別途詳述

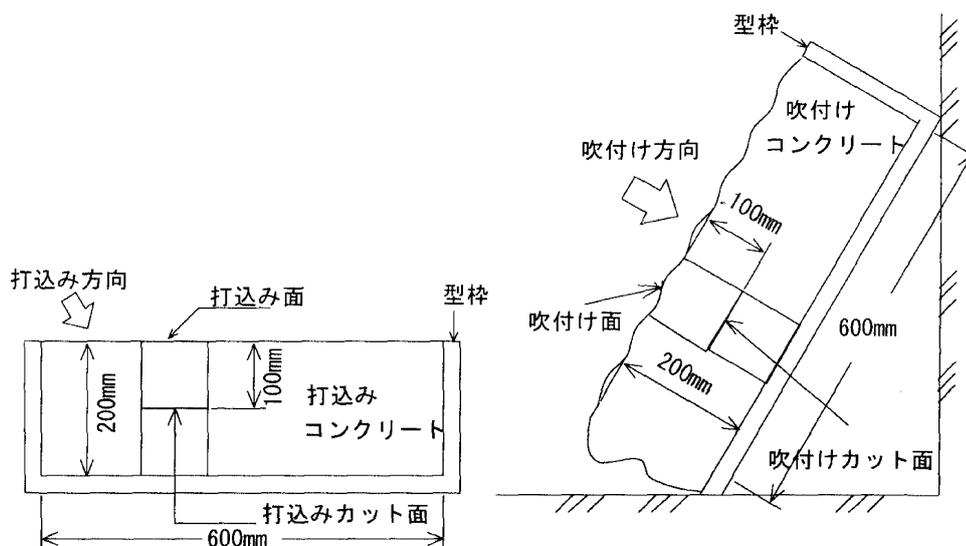


図 1.2 強度供試体採取用の型枠の例

以上について、試験を実施し、低アルカリ性セメントを用いた吹付けコンクリートが実使用に妥当なものかどうかを総合評価する。

2. 鉄筋腐食挙動の把握試験

鉄筋腐食挙動については、本年度試験計画を立案し、次年度より試験を行うものとする。

2.1 試験目的および試験概要

セメントの種類をパラメータとして、鉄筋腐食屋外暴露試験を行う。本試験は、室内で行われる促進試験結果との比較により、

- ①コンクリート中の塩化物イオンの浸透速度
- ②鉄筋腐食開始塩化物イオン量・鉄筋腐食速度

を普通ポルトランドセメントと低アルカリ性セメントについて評価し、塩化物イオンの浸透量および鉄筋腐食量の予測を耐久性設計に反映させることを目的とする。

本試験は、2種類の供試体に対して暴露試験を実施する。各々の概要と評価モデルあるいは耐久性設計上の位置付けを表 2.1 に示す。

表 2.1 鉄筋腐食試験の概要

評価項目	鉄筋の有無・ 供試体の形状	鉄筋・かぶり	供試体の 準拠規準	腐食性環境
塩化物イオンの 浸透速度	無筋円柱 φ 150×150	—	—	飛沫帯、海中
鉄筋の腐食性状	有筋円柱 φ 100×200	φ 13 磨き・20	形状：JIS A 6205	飛沫帯、海中

【参考】

鉄筋腐食に関する試験および評価方法

規格	試験・評価方法	試験・評価内容
JIS A 6205	鉄筋コンクリート用防せい 剤	φ 100×200 の供試体にかぶり 20mm の位置に磨き鉄筋を 2 本設置する。オートクレーブによる乾湿繰返しを行った後、鉄筋発錆面積を測定する。
JCI-SC3	塩分を含んだコンクリート 中における補強用棒鋼の促 進腐食試験方法	人工海水を混入したコンクリートにより、かぶり 20mm の位置に磨き鉄筋を 2 本設置した φ 100×200 の供試体を作製する。湿潤 3 日・乾燥 4 日の乾湿繰返しを 20 サイクル行い、鉄筋発錆面積を測定する。
JCI-SC1	コンクリート中の鋼材の腐 食評価方法	均一腐食と局部腐食での評価方法を規定。均一腐食における腐食状況を表す尺度として腐食面積率、腐食度、侵食度を選定。
JCI-SC5	硬化コンクリート中に含ま れる全塩分の簡易分析方法	硬化コンクリートに含まれる全塩分分析方法について規定。

2.2 使用材料

表 2.2 に本試験に用いる候補材料を示す。

表 2.2 使用材料

種類	名称	製造・産地	比重	備考
セメント	普通ポルトランドセメント	太平洋セメント社製	3.16	
混和材	シリカヒューム	エルケム社製	2.22	
	分級フライアッシュ	スーパフロー20	2.34	
細骨材	未定	未定	2.60*	
粗骨材	未定	未定	2.60*	
混和剤	高性能AE減水剤 サンフローHS-700	日本製紙社製	1.07	ポリカルボン酸系化合物
鉄筋	みがき棒鋼用一般鋼材	未定	—	φ13

*：ここでは、細骨材については陸砂を、粗骨材については砕石を使用するとして特定の製品を想定しないで検討を行った。

2.3 コンクリートの配合

表 2.3 にコンクリートの配合を示す。

セメントとして、普通ポルトランドセメントと低アルカリ性セメントを使用する。以下に低アルカリ性セメントの構成材料と比率を示す。

低アルカリ性セメント＝普通ポルトランドセメント：シリカヒューム：フライアッシュ
＝40%：20%：40%

表 2.3 コンクリートの配合

使用セメント	配合記号	W/C (%)	設計空気量	s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)				
					W	C	S	G	Ad
普通ポルトランド	OPC	30.0	4.0%	55.0	150	500	932	763	調整
低アルカリ性	HFSC	30.0	4.0%	55.0	150	500	881	721	調整

S:細骨材 G:粗骨材、Ad:高性能AE減水剤

2.4 練混ぜ方法および供試体

(1) 練混ぜ方法

コンクリートの目標練り上がり温度を20℃とし、ミキサには強制パン型ミキサを使用する。練混ぜ量は、1バッチ50リットルとする。コンクリートの練混ぜ方法は、

C+S+G→30秒→+W+Ad→120秒

とし、フレッシュ性状試験および強度供試体製作後にコンクリートを15mmふるい(JIS A 1102)にかける。

(2) 鉄筋腐食試験供試体

供試体は、JIS A 6205（鉄筋コンクリート用防せい剤）付属書 2 を参考に製作する。

1) 鉄筋

鉄筋は、JIS G 3108 の SGD3 に規定する材質で、形状丸 13mm のものを用い、長さ 178 ±2mm に切断する。両端を面取り加工し、試験前に JIS R 6252 に規定する 600 番の研磨紙で研磨し、JIS K 8034 に規定するアセトンで脱脂する。鉄筋にマーキングし、型枠設置前の鉄筋重量を mg 単位で測定する。

2) 供試体形状・寸法および鉄筋の配置

図 2.1 に供試体の寸法および形状を、図 2.2 に供試体の製作方法を示す。供試体は、φ 100 × 200mm の型枠を用いて製作する。鉄筋は、図 2.1 に示すように、かぶりが 20mm となるようにスペーサを用いて、2 本設置する。

3) 供試体数

①圧縮強度試験用（無筋） 試験時期：暴露試験開始時、各所定暴露期間終了直後

3 本 × 2 配合 × 5 材齢 = 30 本

②破壊試験用：腐食面積率・腐食減量

（暴露前 1 回 + 測定 4 回） × 3 本 = 15 本

15 本 × 2 配合 × 2 区分（飛沫帯・海中） = 60 本

③非破壊試験用：自然電位・分極抵抗

2 本 × 2 配合 × 2 区分 = 8 本

④供試体本数

無筋 = 30 本

有筋 = 68 本

4) キャッピングおよび養生方法

供試体製作後、20℃の恒温室で 24 時間養生し、材齢 1 日目に上部のスペーサ除去後水セメント比 30%のセメントペーストでキャッピングを行う。同様の養生方法の後、材齢 2 日目に底型枠を脱型し、底部のキャッピングを行う。材齢 3 日で型枠を脱型し、7 日間 60℃温水養生を行う。さらに、材齢 9 1 日まで標準水中養生を行い、暴露試験を開始する。

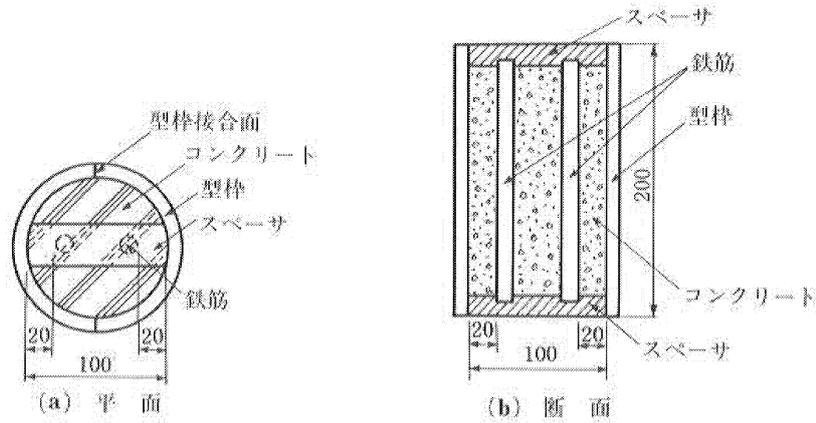


図 2.1 供試体の寸法および形状

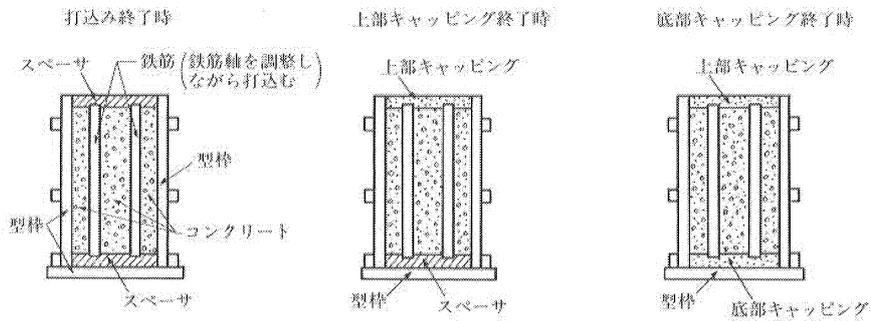


図 2.2 供試体の製作方法

(3) 塩分浸透試験供試体

1) 供試体形状・寸法および養生方法

供試体は、 $\phi 150 \times 150$ の無筋円柱供試体とする。前述と同じ養生方法を行い、養生終了後に、円周面および底面をエポキシ樹脂にてコーティングを行う。

2) 供試体数

(試験前1回+測定4回) \times 3本 = 15本 15本 \times 2配合 \times 2区分 = 60本

2.5 試験項目

表 2.4 に試験項目を示す。

表 2.4 試験項目

実施時期	供試体	試験項目	試験方法	備考
練混ぜ直後	各配合共通	試料温度	棒状温度計	
		スランプフロー	JSCE-F502	B法
		空気量	JIS A 1128	
所定暴露期間終了直後	φ 100 無筋円柱	圧縮強度	JIS A 1108	
	φ 100 有筋円柱	腐食面積率	JCI 基準案	
		腐食減量・顕微鏡観察	—	
		自然電位	—	
所定暴露期間終了直後	φ 150 無筋円柱	分極抵抗	—	
所定暴露期間終了直後	φ 150 無筋円柱	コンクリート中の塩分濃度	JCI 基準案	

2.6 暴露試験方法

表 2.5 に、近年論文発表された暴露試験方法を示す。各研究者により、環境区分や暴露期間等は様々である。

表 2.5 暴露試験方法の実施例

項目	実施例
環境区分	飛沫帯、海上大気中、海中、気中
暴露期間	6ヶ月～43年
供試体寸法 (mm)	φ 50×100～500×500×1000
使用鉄筋径	φ 6～D19
かぶり (mm)	10～50

本試験では、暴露試験の環境区分を飛沫帯と海中の2水準とする。

測定時期は、暴露試験開始時（材齢3ヶ月）、暴露期間6ヶ月（材齢9ヶ月）、1年（材齢1年3ヶ月）、3年（材齢3年3ヶ月）、5年（材齢5年3ヶ月）とする。

2.7 コンクリートの試験方法

(1) 腐食面積率

試験を終了した供試体は、その中の鋼材が載荷方向に並ぶようにして載荷試験を行い、鋼材を取り出して発錆面積の測定を行う。面積の測定が直ちにできない場合は、鋼材をデシケータに保存する。

発錆面積の測定は、長さ方向の中心から 5cm ずつ計 10cm の部分について行う。測定は、透明なシートを鋼材に当て、発錆している部分を写し取り、その面積の総合計を mm^2 単位で記録する。なお、単色で均一な薄いさび層の場合は発錆部分と認めない。

鋼材の発錆面積率は、下式により求める。

$$\text{発錆面積率 (\%)} = \text{発錆面積} / \text{測定面積} \times 100$$

ここに、測定面積：鋼材の長さ方向の中心から 5cm ずつ計 10cm の全表面積

(2) 腐食減量

発錆面積を測定した鉄筋をクエン酸アンモニウム 10%水溶液で除錆処理を行う。重量を測定し、下式により算出する。

また、腐食箇所について断面検鏡し、減肉状況を観察する。

$$\Delta W = W_0 - W - \{W_p \times (100 - S) / 100\}$$

ここに、 ΔW ：腐食減量 (mg)

W_0 ：打設前の鉄筋重量 (mg)

W ：除錆前の鉄筋重量 (mg)

W_p ：非腐食部における表面物質重量 (mg)

S ：腐食面積率 (%)

(3) 自然電位

供試体に参照電極（塩化銀電極）を設置し、自然電位の測定を行う。

(4) 分極抵抗

供試体に対極（白金またはステンレス材）を設置し、交流インピーダンス測定器で鉄筋材の分極抵抗を測定する。なお、測定周波数を $1 \text{ MHz} \cdot 0.1 \text{ Hz}$ とし、印加電圧を自然電位 $\pm 10 \text{ mV}$ とする。

(5) コンクリート中の塩分分析

JCI-SC5（硬化コンクリート中に含まれる全塩分の簡易分析方法）に準じて行い、塩化物イオン選択性電極を用いた電位差滴定法により測定を行う。

なお、測定位置は、表面から 0～2cm、2～4cm、4～6cm、6～8cm、8～10cm の深さとする。

2.8 鉄筋腐食挙動の評価

ここでは、低アルカリ性セメントの特性として、実際の海洋環境下において、次の2点を評価する。暴露試験場所は、これまで多くの暴露試験の実績があり、OPC を用いた暴露試験結果のデータベースや環境条件のモデル化ができやすい場所を選定する。現在、過去 10 年以上にわたって、当社技術研究所がコンクリート供試体を暴露してきた場所を考えている。

- ①低アルカリ性セメントはポズラン反応などの影響により緻密化し、塩素イオンの拡散係数が小さいと想定される。
- ②低アルカリ性セメント間隙水の pH は、10.5～11.0 で、塩素イオンが鉄筋まで到達した場合に、鉄筋の腐食速度が大きいと想定される。

鉄筋腐食挙動に関する検討フローを図-2.3 に示す。

- ①については、鉄筋を使用しない供試体を作成して、塩分の浸透速度(拡散係数)を測定する。促進試験結果と合わせて拡散係数を評価し、鉄筋コンクリート設計時のかぶり厚さによって鉄筋保護する際のかぶり算定に必要なデータを提供する。
- ②については、ひび割れなどによって塩素イオンが鉄筋の到達した場合の鉄筋の腐食速度について評価する。腐食速度から見て、耐用年数に対して腐食が懸念されるばあいには、ひび割れを生じさせない設計や耐腐食鉄筋などの対策を取る必要がある。

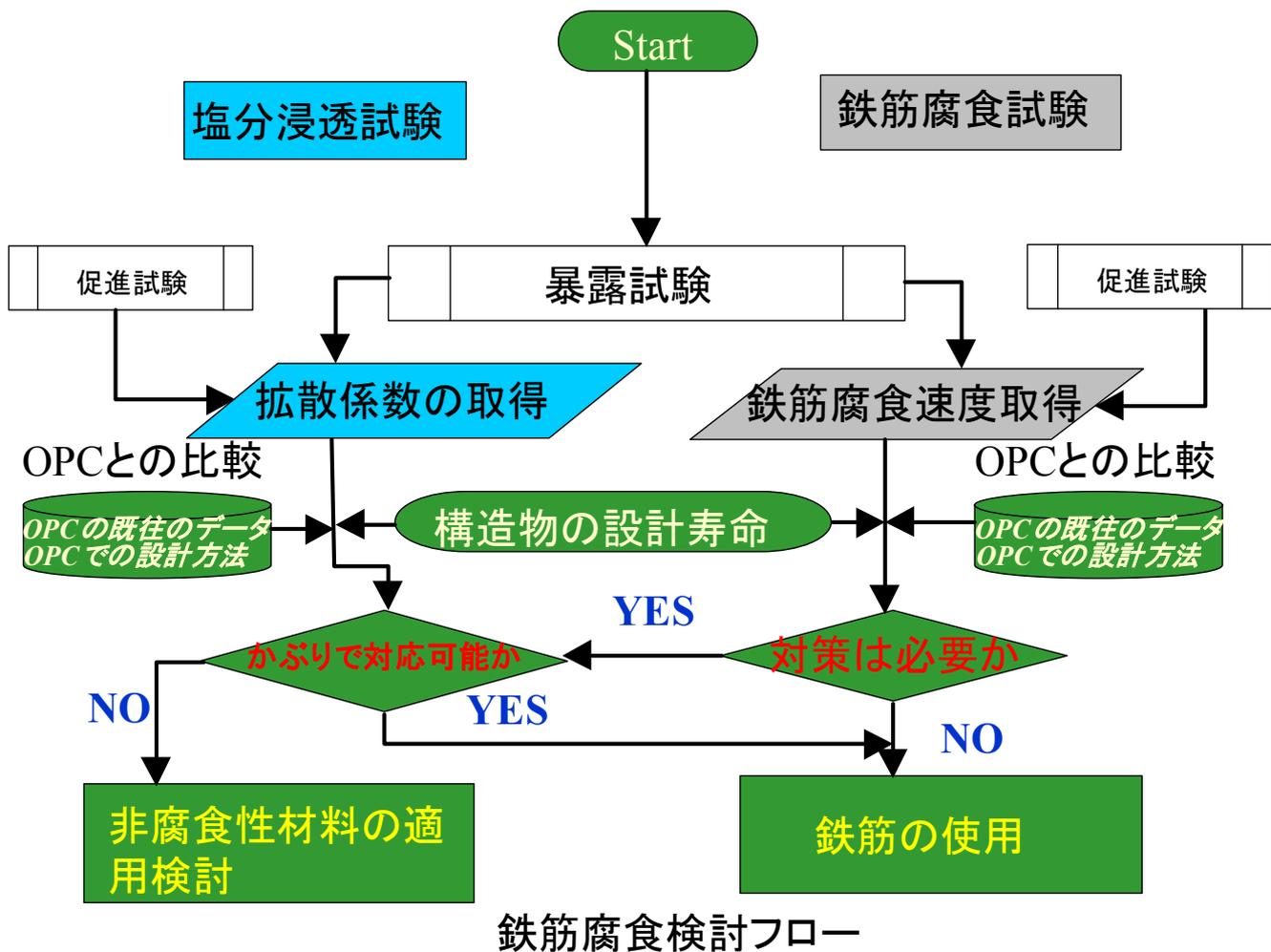


図-2.3 低アルカリ性セメント中での鉄筋腐食検討フロー

3. プレキャストコンクリートの力学特性の把握試験

3.1 低アルカリ性を早期に発現させるためのセメントの改良

pH を低下させるのに必要な養生期間を短縮することを目的とし、HFSC の使用材料の配合割合を変える改良をおこなった。

(1) 試験方法

1) 使用材料

使用した材料を表 3.1 に示す。

表3.1 使用材料

材 料	本試験で使用した製品
普通ポルトランドセメント(OPC)	太平洋セメント社製
シリカフューム (SF)	エルケム社製 マクロシリカ983-VSB
フライアッシュ (FA)	太平洋セメント社製 分級フライアッシュ ONODAスーパーフローSF20
高性能AE減水剤 (SP)	日本製紙社製 サンフロー HS-700NT ポリカルボン酸塩系高分子化合物
細骨材	静岡県小笠産陸砂

2) 試験ケース

表 3.1 に示した OPC、SF、FA の混合比を変えて混合し、表 3.2 に示した 3 種類のセメントを調製して試験ケースとした。

表3.2 試験ケース

試験ケース	配合割合 (wt%)		
	OPC	SF	FA
基本	40	20	40
1	25	25	50
2	20	20	60

3) 試験方法

i) pH 低下時期に関する試験

各ケースのセメントにつき、ペースト硬化体を粉碎後にイオン交換水中に浸漬し、浸漬水の pH を測定した。

① 混練配合

W/C=40%とした。

② 養生

混練後、密閉容器に入れて3日間20℃で密封養生をおこなった。

③ 乾燥・粉砕

養生後の硬化体を密閉容器から取り出し、1日間真空乾燥をおこなった。真空乾燥後、0.5mm以下となるように粉砕して浸漬試験に供した。

④ 浸漬条件

ポリ容器に、粉砕した固相試料20gとイオン交換水40gを入れ（液固比2）、所定期間浸漬をおこなった。この際の温度は20℃と65℃の2水準とした。

⑤ pH測定

原則として7日間隔で浸漬水のpHを測定し、測定期間は60日とする。測定する時期は3,7,14,21,28,35,42,49,56,60日の10点とした。浸漬試料は両温度ともにpH測定点数の10試料準備し、1度測定した試料は破棄した。また、65℃で浸漬した試料も20℃となるまで放冷した後にpH測定を実施した。

ii) 流動性に関する試験

各ケースのセメントにつき、SPを添加したモルタルのフローを測定し流動性を評価した。SP/C比を一定とした時のフロー測定と、所定の流動性を得るのに必要な高性能AE減水剤量の検討をおこなった。

ア) 所定配合での流動性評価試験

① 混練配合

W/C=40%、SP/C=2.0%、S/C=2.0とした。

② フロー測定

JIS R 5201 記載の試験設備を用いて、15打フローを測定した。

イ) 所定流動性に必要なSP量の検討

① 混練配合

W/C=40%、S/C=2.0とし、SP/Cをパラメータとした。

② フロー測定

フロー値250mmが得られるSP量を選定した。

(2) 試験結果

1) pH 低下時期に関する試験

各ケースの pH 測定結果を表 3.3 に示す。結果をプロットしたものを図-3.1 に示す。

各ケースとも 20℃よりも 60℃の方が、pH の低下が早かった。また、基本ケースに比べて、ケース 1 および 2 では pH が大きく低下し、pH の低下速度に関する改善が確認された。特に、65℃では pH 低下が著しく 3 日で pH11 を下まわった。ケース 1 とケース 2 の間では、pH 挙動に大きな差異は認められなかった。

表 3.3 浸漬水の pH 測定結果

ケース	温度 (°C)	各養生期間における pH 測定結果									
		3 日	7 日	14 日	21 日	28 日	35 日	42 日	49 日	56 日	60 日
基本	20	12.67	12.66	12.62	12.50	12.29	12.28	12.36	12.16	12.05	12.02
	65	11.76	11.58	11.52	11.40	11.31	11.38	11.42	11.25	11.25	11.10
1	20	12.60	12.41	12.17	11.96	11.74	11.73	11.77	11.61	11.50	11.41
	65	10.88	10.76	10.62	10.49	10.41	10.51	10.53	10.42	10.27	10.16
2	20	12.56	12.37	12.18	11.99	11.83	11.83	11.88	11.68	11.59	11.53
	65	10.88	10.80	10.70	10.60	10.54	10.56	10.61	10.48	10.37	10.22

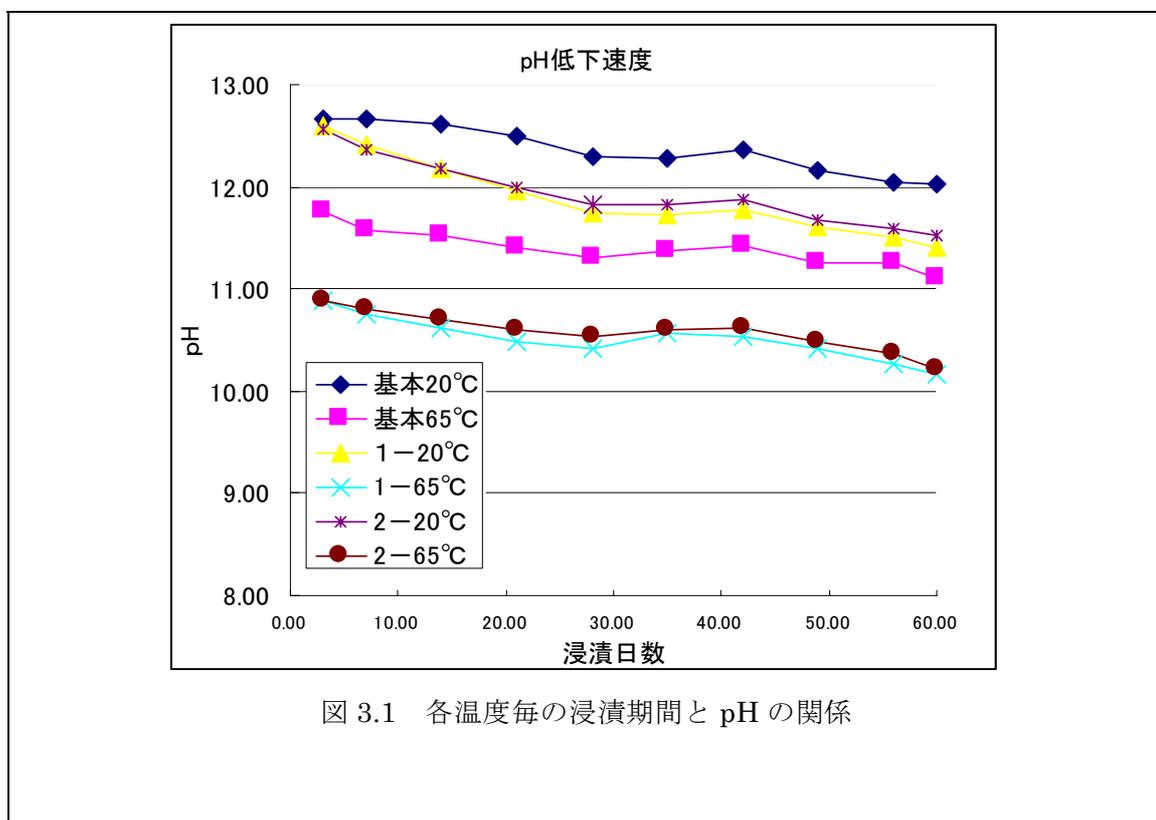


図 3.1 各温度毎の浸漬期間と pH の関係

2) 流動性に関する試験

i) 所定配合での流動性評価試験

SP2.0%添加時のモルタルフロー測定結果を表 3.4 に示す。

各ケースとも大きな差は無かった。いずれものケースも 2.0%の SP 添加量ではフロー 250mm には達しなかった。

表 3.4 モルタルフロー測定結果 (SP2.0%固定)

ケース	モルタルフロー (mm)
基本	200
1	198
2	202

ii) 所定流動性に必要な SP 量の検討

モルタルフロー250mm 以上の流動性を目標とし、SP 添加量を変えた時のモルタルフロー測定結果を表 3.5 に示す。

フローが 250mm を超える時の SP 添加量には基本ケースとケース 1 で 2.4%、ケース 2 で 2.3%であった。差は小さかったものの、ケース 2 が最も少ない添加量であった。

表 3.5 モルタルフロー測定結果 (SP 量変化)

ケース	SP/C (%)	モルタルフロー (mm)
基本	2.2	230
	2.4	252
	2.5	測定不能 (0 打で 268)
1	2.3	245
	2.4	257
2	2.2	240
	2.3	256

3.2 高温養生の温度と期間の検討

3.1 項の配合改良試験において最も効果の認められたセメントに関して、高温養生における pH 挙動についてデータ取得をおこなった。

(1) 試験方法

1) 使用材料

3.1 項と同じ材料を使用した。ただし、SP と細骨材は使用しない。

2) 試験ケース

3.1 項の試験ケースのうち、流動性試験において最も効果の認められたケース 2 のセメント 1 種類とした。

3) 試験方法

3.1 (1) 3) i) 項の試験方法と基本的に同じとした。ただし、温度のみ 50℃ と 80℃ の 2 水準とした。

(2) 試験結果

pH 測定結果を表 3.6 に示す。

80℃では 3 日で pH11 を下まわった。50℃、80℃ともに最初の測定である浸漬 3 日目で水酸化カルシウムが消失していると考えられる pH を呈した。

表 3.6 浸漬水の pH 測定結果

ケース	温度 (℃)	各養生期間における pH 測定結果									
		3 日	7 日	14 日	21 日	28 日	35 日	42 日	49 日	56 日	60 日
2	50	11.54	11.25	11.14	11.10	11.04	11.07	11.11	10.97	10.90	10.78
	80	10.59	10.64	10.52	10.38	10.40	10.46	10.36	10.22	10.16	10.05

ケース2セメントにおける養生温度毎の浸漬期間と pH の関係を図 3.2 に示す。

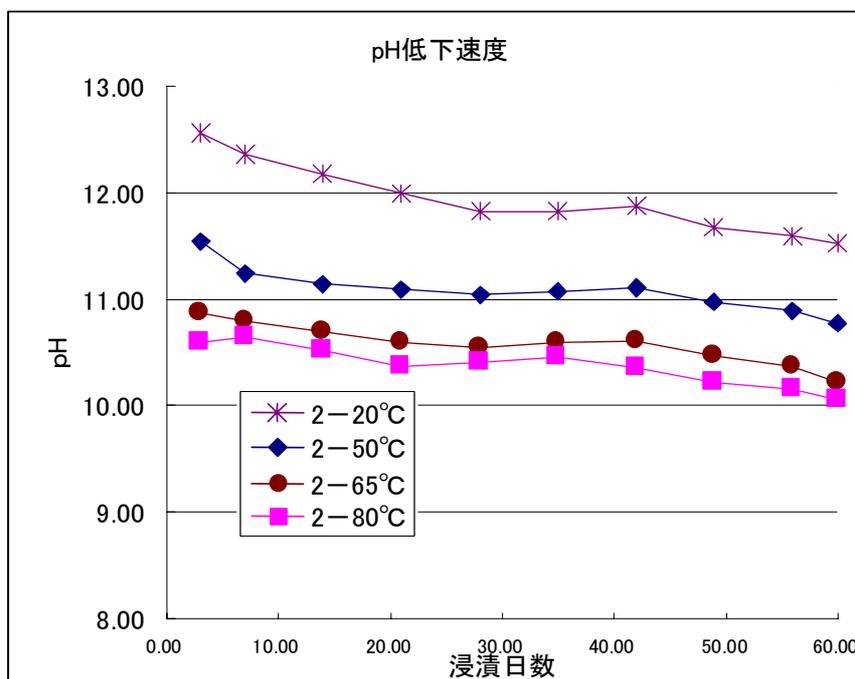


図 3.2 ケース2セメントにおける pH の低下

3.3 高温養生における強度および静弾性係数試験

3.1 項のセメントの改良試験において最も効果の認められたセメントを使用してコンクリート試験をおこない、高温養生における圧縮強度および静弾性係数の挙動についてデータを取得した。

(1) 試験方法

1) 使用材料

3.1 項と同じ材料に加え、表 3.7 示す粗骨材を使用した。

表3.7 使用材料（表3.1に示したものの以外）

材 料	本試験で使用した製品
粗骨材	茨城県岩瀬産碎石（2005）

2) 試験ケース

3.1 項の試験ケースのうち、流動性試験において最も効果の認められたケース2のセメント1種類とした。

3) 試験方法

i) 混練配合

混練配合を表 3.8 に示す。

表3.8 コンクリートの配合

W/C	s/a	SP/C	スランプ ロー(cm)	単 位 量 (kg/m ³)				
				W	C	S	G	SP
0.30	0.55	2.6%	47.5	150	500	906	750	13

※SPはWを含む

ii) 供試体成型

各水準 n=2 として、φ10×20cm 円柱状供試体を成型した。

iii) 養生温度

養生温度は 20℃、50℃、65℃、80℃の 4 水準とした。

iv) 養生期間

材齢は 12 時間、1 日、3 日とし、20℃で養生するものについては、7 日と 28 日についても試験をおこなった。

v) 圧縮強度および静弾性係数試験

一軸圧縮強度の測定、およびコンプレッソメータ法による静弾性係数の測定をおこなった。

(2) 試験結果

1) 圧縮強度測定結果

圧縮強度測定結果を表 3.9 に示す。

養生温度 20℃では、3 日までの初期強度が小さく、12 時間では脱型強度が得られなかった。しかしながら、28 日では 40N/mm²を超える強度となった。

50℃以上の養生温度では、良好な強度発現を示した。材齢 12 時間では、温度が高いほど高い強度を示し、いずれも 10N/mm²を超える強度となった。養生温度 50℃以上では、3 日強度はいずれも 10N/mm²を超え、その差は小さくなった。

表 3.9 圧縮強度測定結果

ケース	養生温度 (°C)	圧縮強度 (N/mm ²)				
		12 時間	1 日	3 日	7 日	28 日
2	20	測定不能	4.3	9.3	18.6	40.4
	50	12.7	23.6	40.8		
	65	26.4	34.7	42.6		
	80	31.3	37.8	43.5		

2) 静弾性係数測定結果

静弾性係数測定結果を表 3.10 に示す。

養生温度 20°C では、3 日までの静弾性係数は非常に小さかったものの、28 日で 3×10^4 N/mm² 程度の値を示した。

50°C 以上の養生温度では、材齢 12 時間で 2×10^4 N/mm² を超えた。

表 3.10 静弾性係数測定結果

ケース	養生温度 (°C)	圧縮強度 ($\times 10^4$ N/mm ²)				
		12 時間	1 日	3 日	7 日	28 日
2	20	測定不能	0.68	1.66	2.50	2.98
	50	2.28	2.44	2.95		
	65	2.37	2.51	2.75		
	80	2.26	2.61	2.68		

3.4 力学特性の評価

(1) セメントの配合比率

セメントの改良として、pH の早期低下を目的としたセメントとポゾランの配合比率を変化させて試験を行った結果、OPC とシリカフェームの使用量を同一とすることで、pH が早期に低下することがわかった。OPC の使用量を 20% と 25% の 2 種類選定して試験を行ったが、フレッシュコンクリートの流動性において若干 OPC を 20% とした方がまさっている。またシリカフェームのコストが高いことからコスト的に見ると、シリカフェームを 20% とした配合の方が有利である。この結果、改良した低アルカリ性セメントとしては、OPC20%、SF20%、FA60% の配合比率が望ましいと考える。今後はこの配合比率のセメントを HFSCN セメントと称する。

(2) 高温養生の効果

HFSCN は、標準養生供試体の 24 時間強度で 4N/mm^2 以上あり、また 28 日強度で 40N/mm^2 以上発現している。構造用コンクリートの強度として十分な強度を発現している。65°C の高温養生（高温蒸気養生）を 12 時間行うことによって、 26N/mm^2 程度の圧縮強度が期待できる。プレキャスト部材（セグメントなど）を製造する上で支障はないものと考えられる。高温養生の効果として、3 日養生で標準養生の 28 日に相当する強度が発現できることがわかった。

4. 幌延深地層研究センターへの適用性確認のための研究計画の策定

4.1 低アルカリ性セメントの特徴と使用部位

低アルカリ性セメント(HFSC)は、低アルカリ、高耐久性などの長所を有するが、コストが普通セメント(OPC)よりも高いために、処分場のすべてを施工することは不経済である。ここでは、まず低アルカリ性セメントの用途を限定するために、低アルカリ性セメントと OPC の特長を比較した。表 4.1 に比較表を示す。

表 4.1 セメントの特徴

セメントの種類	アルカリ性	低発熱性	低収縮性	低溶解性	耐酸性	有機物の有無	初期強度	コスト
HFSC	10.5	ひび割れ防止に有効	OPC と同等	地下水に溶けにくい	○ 要確認	高性能 AE 減水剤の使用が不可欠	1 日強度 5N/mm ² 程度	OPC の 4 倍 コンクリートとして 2 倍
OPC	13.0	ひび割れ防止処置が必要	高炉セメントなどに比較して少ない	CH が存在することにより溶けやすい	×	施工性を無視すれば有機物を排除することも可能	1 日強度 10N/mm ²	

HFSC の特長を生かして使用するとすると、その用途として表 4.2 のように考えられる。

表 4.2 想定される低アルカリ性セメントの用途

部位	適用理由
支保工 (吹付けコンクリートセグメント)	岩盤と接触し、変質させることを懸念して低アルカリ性の要求から HFSC の使用
覆工コンクリート	ひび割れ防止の観点から HFSC の使用
グラウト	岩盤中の亀裂への充填に際して、岩盤をいためないために低アルカリ性が要求される。
プラグ	マスコンクリートとなるために、ひび割れ防止の観点から HFSC を使用する。

以下は上記の用途に HFSC が施工されることを想定して、今後幌延深地層研究センターの建設・研究において、解決しなければならない課題を抽出した。

4.2 低アルカリ性セメントの施工性に関する課題

4.2.1 用途毎の課題の抽出

(1) 支保工

1) 吹付けコンクリート

本年度の研究で、HFSC を用いた低アルカリ吹付けコンクリートが室内実験レベルで製造が可能であることがわかった。しかしこれまでに、実際の工事で吹付け施工された事例はない。

HFSC を支保工に適用する場合、今後の課題として次のものがある。

①施工性を考慮した配合の選定 ②吹付け施工可能性のの実証 ③支保工として機能することの実証④岩盤を侵食しないことの実証⑤高耐久性を有することの実証

2) セグメント

室内試験において、コンクリートの物性として、工場でセグメントを製造することは可能との結果を得た。しかしセグメントを製作して実際に使用した経験はなく、セグメントに関しては、次の課題を有している。

①製造方法の検討（蒸気養生時間、温度の決定）②セグメント製造の実証③ひび割れの発生など変質の観察④鉄筋の腐食のモニタリング⑤コンクリートセグメントを使用した山岳トンネル施工法の確立

(2) 覆工コンクリート

山岳トンネルの覆工コンクリートでは、水和熱や乾燥収縮などによる施工時のひび割れが問題とされており、その対策がなされている。現在の対策の主流は、吹付けコンクリートと覆工コンクリートの間に樹脂やシートを貼り付け、岩盤の拘束が覆工コンクリートに及ばない処置を施すことによって、覆工コンクリートのひび割れを低減している。処分場のコンクリートでは、覆工コンクリートは支保工の 1 部であり、また長期的に変質が予測される有機系の材料を支保工の中に入れることは好ましくないと思われる。従って、吹付けコンクリートと覆工コンクリートを一体化させた覆工システムの中で、ひび割れを防止する工法を検討する必要がある。この工法については、山岳トンネルとしてはこれまでほとんど検討されていない。

ここでは、鉄筋コンクリート構造物のひび割れ制御技術として研究してきたコンクリートのひび割れ防止のノウハウを応用して、ひび割れ防止工法を検討する必要がある。

課題は次の通りである。

①HFSC のひび割れ抵抗性の把握②モデルトンネルを想定したひび割れ予測解析③ひび割れ対策の検討④ひび割れ対策の効果の確認⑤ひび割れのない覆工コンクリート施工の実証

(3) グラウト

岩盤グラウトに関しては、亀裂への充填性を考慮して注入材料の粒径が重要視される。一般には超微粒子セメントなどが使用される。岩盤の変質が懸念されることから、グラウトに使用するセメントにも低アルカリセメントを使用すべきと考える。現在の HFSC は分級フライアッシュが含まれており、この粒径が大きいことから、微細なひび割れへの注入は困難と思われる。フライアッシュの微粒分あるいはシリカフラワー（AECL 仕様）の使用など、セメントを微粒系のものに改良し、亀裂への充填性を高める必要がある。

グラウトに適用する際の課題は次の通りである。

①HFSC 使用材料の見直し②低アルカリ性の確認③室内模擬試験④モデルによる注入実験⑤注入の確証試験⑥岩盤に与える影響の確証

(4) プラグ

プラグに使用するコンクリートは、ひび割れが無いことと岩盤に密着して隙間無く充填することが要求される。また、このプラグコンクリートはマスコンクリートとなることからセメントの水和熱に起因したひび割れ対策が必要である。

AECL の LHHPC が低アルカリではなく、低発熱自己充填コンクリートとして、プラグの施工用に開発された経緯を考えてみても、プラグコンクリートにはひび割れ防止と高充填性から HFSC の適用が考えられる。このコンクリートは既に室内実験レベルでの施工性試験は終了している。プラグコンクリートについての課題は次の通りである。

①施工計画②運搬方法・打設方法の検討③配合の見直し④プラグ施工の実証⑤機能（止水性）の実証

4.2.2 課題と実験場所時期の位置づけ

HFSC を各用途に適用するための課題と必要な実験項目を対比して表 4.3～表 4.5 に示す。

表 4.3 課題と解決する実験方法（その 1）

用途	課題	実験方法	実験場所	備考	実験時期
支保工(吹付けコンクリート)	配合の選定試験	室内試験	研究所		平成 13 年度
	吹付け施工の実証	室外試験 (模擬トンネル)	工場用地		平成 13 年度
		実トンネル試験	トンネル内	支保工の実証も一部かねる	平成 14 年度～15 年度
	支保工としての機能の実証	室外試験	幌延深地層研究センター	施設の建設中に実証試験を実施	平成 16 年度以降
	岩盤を侵食しないことの実証	セメント・岩盤相互作用の現位置試験	幌延深地層研究センター	施設内に試験ヤードを設置	施設完成後
	高耐久性を有することの実証	試験坑道の変質調査	幌延深地層研究センター	建設時に施工した吹付けコンクリートの劣化調査を定期的実施する。	施設完成後

表 4.4 課題と解決する実験方法 (その 2)

用途	課題	実験方法	実験場所	備考	実験時期
セグメント	設計および製造方法の検討	室内試験および製造計画・設計	工場用地		平成 13 年度
	セグメント製造の実証	セグメントの製作・組み立て	工場用地		平成 14 年度
	暴露による変質確認	屋外暴露	工場用地		平成 14 年度～
	鉄筋腐食の検討と実証	屋外暴露	工場用地		平成 13 年度～
	山岳トンネル施工法の確立	TBM による掘削試験	幌延深地層研究センター	横坑建設の一部を TBM コンクリートセグメント方式で施工	平成 16 年度以降
覆工コンクリートのひび割れ	HFSC のひび割れ抵抗性の把握	室内試験	研究所	ひび割れ抵抗性に関連する諸物性を実験により把握	平成 14 年度
	モデルトンネルにおけるひび割れ予測解析	解析・パラメータスタディ	事務所	HFSC を使用した場合のひび割れ発生予測と対策の立案	平成 15 年度
	ひび割れ対策効果の確認と対策の確立	立坑の施工	幌延深地層研究センター	幌延深地層研究センターの最初の施工部分で試験工事	平成 16 年度
	無ひび割れ施工の実証	立坑・横坑の施工	幌延深地層研究センター	幌延深地層研究センターの覆工必要区間にて確認	

表 4.5 課題と解決する実験を実施する場所（その3）

用途	課題	実験方法	実験場所	備考	実験時期
グラウト	HFSC の使用材料の見直しと低アルカリ性の確認	室内実験	幌延深地層研究センター	微粒子系材料の調査・応用・低アルカリのコンセプトの変更も含む Gray 博士のグラウトの導入	平成 13～14 年度
	室内模擬試験	模擬亀裂への注入試験	幌延深地層研究センター		平成 15 年度
	モデル岩盤による注入試験	岩盤への注入試験	国内ダムサイト、国外の岩盤研究所	幌延深地層研究センターの建設場所で試験できれば実施	平成 16 年度～
	注入確証試験と地球化学的影響評価	幌延深地層研究センターの一区画	幌延深地層研究センター		施設完成後
プラグ	シーリングテスト計画とプラグ部の施工計画	シール性確証実験の試験計画 コンクリートの充填性確保とひび割れ防止対策の検討	事務所		平成 16 年度
	コンクリートの運搬計画とコンクリートの改良	室内試験	幌延深地層研究センター	プラグ施工にあわせた運搬計画および運搬時下内の流動性保持対策 ひび割れ対策	平成 16 年度以降
	プラグ施工の実証	施工試験	幌延深地層研究センター		平成 16 年度以降
	止水性の実証	注水試験	幌延深地層研究センター	プラグへの注水試験	平成 16 年度以降

4.3 低アルカリ性セメントの研究計画

4.3.1 支保工への適用実験

(1) 吹付け施工実証実験

吹付け施工実証実験は、平成 13 年度に計画されているもので 1 章にその詳細を記述した。ここでは、低アルカリセ性メントが吹付けコンクリートとして施工できることを実証するため、吹付けたコンクリートの品質と施工性について調査する。アウトプットとして、このコンクリートが吹付けコンクリートとして施工可能かどうかを判定する。

1) 品質調査

コンクリートを吹付けた壁面からコアを採取する。そのコアにより、物理特性として①圧縮強度②単位体積重量③引張強度④静弾性係数⑤透水係数などを調査し、室内試験結果と比較する。また、化学特性として、生成鉱物の定量分析、間隙水 pH 等を調査し、これまで実施してきた室内試験と比較する。模擬トンネルでは、長期放置ができないために、ひび割れなどの長期間必要な変質試験については、ここでは実施しない。

2) 施工性試験

この実験の中心的な実験で、吹付け施工が可能かどうかを判定する。調査項目として次の点を検討する。

①吹付け可能厚さ、②リバウンド、③施工能率、④大量のコンクリート製造上課題

また HFSC は、OPC、フライアッシュ、シリカフェームを混合した特殊セメントであり、セメントとしての製造販売実績はない。今後の大量使用に備えて、この実験で、大量使用時のセメントの製造方法について検討する。

(2) 吹付け実証試験（トンネル吹付け試験）

吹付け施工実証試験では、施工が可能であることを実証する。次に支保工として機能を満足するかどうかを確証する必要がある。これを実証するには、実際に NATM 工法で施工されるトンネルにこの低アルカリ吹付けコンクリートを適用して調査する。ここでは、模擬トンネルで実施した施工性調査を実際のトンネルで再度実施するとともに、覆工する前までの品質調査が中心となる。品質調査は、OPC と比較することによって行う。項目は、①ひび割れ、②崩落、③漏水、④変形など、支保工として低アルカリ吹付けコンクリートが機能するかどうかを実際のトンネル建設において調査する。試験サイトについては、平成 13 年度に調査する。

(3) 支保工機能実証試験

幌延深地層研究センター立坑および横坑建設時に実証試験を行う。吹付け実証実験では、吹付けの施工性や短期中期の品質を確認することはできるが、処分場を想定した長期の性能を検証することはできない。

支保工機能実証実験では、次の試験を計画する。

- ① 岩盤の状況が良いところ、悪いところ、湧水が多いところ少ないところなどいくつかの岩盤の状況を選定しあらゆる状況で施工性を確認するとともに、支保工として機能するかどうか検証する。
- ② 吹付けコンクリートのまま長期放置することによって、吹付けコンクリートの長期的変質に関して調査する。
- ③ 吹付けコンクリートからコアを採取することによって、物理特性値のばらつきについて調査する。特に吹付けコンクリートにおける透水係数や透水経路についての検討を重点的におこない、吹付けコンクリートを人工バリア内に残した場合の影響について検討する。

(4) 岩盤の影響に関する定量的評価

幌延深地層研究センターの1区画に、セメントの高pHによる岩盤およびベントナイトへの影響を実験するエリアを作る。人工バリアシステムを設置し、セメントによる人工バリアシステムの変質を調査するとともに、岩盤や地下水に与える影響について調査する。

人工バリアシステム———セメント・ベントナイト複合系

パラメータ———セメントの種類、温度

- ・ 調査項目— ・セメントからのリーチング水の影響範囲
 - ・ 間隙水による亀裂および間隙の充填
 - ・ 岩盤の変質
 - ・ ベントナイトの変質
 - ・ ベントナイトの変質後の性能

4.3.2 セグメントへの適用

(1) 設計および製造方法の検討

高温養生によるコンクリートの物性について平成13年度に調査した。それを基にセグメントの製造方法について検討する。製造工場を東京近郊に1社選定し、そこでの製造設備を利用しての製造計画を作成する。製造計画の要点として、①高流動コンクリートによる施工法、

②養生温度、③養生時間、④型枠、⑤脱型後の養生方法

平行してモデルトンネル選定して、モデルトンネルを TBM とコンクリートセグメントで施工することを前提とした施工計画を作成する。それに基づきセグメントの設計を行う。セグメントの設計要件として、①セグメントの厚さ、②セグメントの構成（セグメントのタイプと種類）、③セグメントの配筋④継手構造

(2) 製造と組み立ての実証

上記の設計および製造計画に基づき、セグメント 1/2 リング製造し、組み立てる実験を行う。組み立ては、暴露実験でのモニタリングも含めて、東海事業所内の敷地で行い、組み立てて後長期にわたった暴露する。組み立ては、実際の TBM 施工を模擬して、TBM に備えられている組み立てシステムによる行う。

(3) 暴露による変質の確認

組み立て後、定期的に目視観察することにより、ひび割れ、錆汁、エフロレッセンスなどの表面からの変質について調査する。また、セグメントの真円度を測定し、収縮やそりなどが影響していないかどうか調査する。

(4) 鉄筋腐食の調査

平成 13 年度より低アルカリ性セメント中での鉄筋腐食の促進試験と海上暴露試験を実施する。本実験では、厳しい腐食性環境において低アルカリ性セメント中での鉄筋腐食挙動が OPC と比較してどういう位置づけになるか明確にする。

さらに、セグメント中の鉄筋に、腐食電位を測定する装置を設置して、鉄筋の腐食状況を外部からモニタリングする。また、幌延深地層研究センターの施工に先立って、暴露セグメントを解体調査し、腐食状況を確認する。

(5) 山岳トンネル施工法の確立

セグメントを使用した山岳トンネルの施工法については、いくつか報告されているが、そのほとんどがスチールセグメントを使用している。コンクリートセグメントの施工実績は、国内では宮ヶ瀬ダム導水路トンネル 1 件のみである。コンクリートセグメントと TBM の組み合わせによる施工方法を実際の放射性廃棄物処分場で適用するとすれば、適用上の問題点を抽出把握して、対策を事前に検討することが必要である。特に岩盤が悪い場合の対象方法など検討が必要である。幌延深地層研究センターの 1 部の区間を TBM とコンクリートセグ

メントの組み合わせで施工することにより、問題点を抽出把握し、対策を検討実施する。これによって、実際の処分場施工での本工法の適用が容易となる。

4.3.3 覆工コンクリートのひび割れ

(1) 試験目的

道路トンネルおよび鉄道トンネルなどでは、吹付けを施し支保した後に、覆工コンクリートを施工している。幌延深地層研究センターの施工および実施の処分場の施工において覆工が必要かどうかの検討は必要である。SFR や WIPP 等の処分場また、URL や GRIMSEL などの岩盤研究センターでは、支保工のみで覆工コンクリートは施工されていない。

覆工コンクリートを施工する場合、岩盤が覆工コンクリートを拘束し、温度収縮ひび割れを生じることが懸念される。このため、国内で一般に施工されるトンネルでは、吹付けコンクリートと覆工コンクリートの間に防水シート(ポリエチレンやゴム系など)を施工し、岩盤の拘束が直接覆工コンクリートに影響を及ぼさない構造となっている。しかし、放射性廃棄物処分場では、シートのような変質しやすい材料をコンクリートの中に入れることは閉鎖後の性能評価の面から好ましくないと思われる。

以上から、覆工コンクリートを改良し、ひび割れ抵抗性を高めることによって、吹付けコンクリートと覆工コンクリートを一体で施工することを可能とする。

(2) ひび割れ抵抗性の把握

これまでコンクリートの物性や化学的性質についてデータを取得してきたが、ひび割れ抵抗性についてのデータは、断熱温度上昇試験および乾燥収縮試験以外には取得していなかった。ここでは、ひび割れ抵抗性についてのデータを実験的に取得する。ひび割れ抵抗性の評価は、OPC と比較することによって行う。実験項目は、①直接引張試験②自己収縮試験③拘束枠によるひび割れ抵抗試験とする。

(3) モデルトンネルにおけるひび割れ予測

処分場のトンネル覆工コンクリートにどの程度の温度応力が作用し、コンクリートのどの程度のひび割れの危険性があるかについての検討がこれまでなされていない。ここでは、幌延深地層研究センターのトンネル断面をモデルトンネルとして、吹付けコンクリートと覆工コンクリートを施工した際のひび割れの発生予測を解析により行う。

予測方法は、トンネル断面を 3 次元にモデル化し、非線形非定常温度応力解析コードによって、発生する温度応力を予測する。ひび割れの発生が予測される場合、対策について検討

する。現時点で効果的な対策と思われるものは、①膨張材の使用(エトリンガイド系)、②ファイバーの使用等である。

(4) ひび割れ対策の効果の確認

ひび割れ対策の効果の確認については、幌延深地層研究センターの施工前に実施したいが、試験場になる現場を見つけることは困難と思われる。そこで、幌延深地層研究センターの最初の施工である立坑工事において、覆工コンクリートのひび割れ対策実証実験を行う。立坑コンクリートの施工は、横坑コンクリートの施工と異なることが予測されるが、一部区間においてポンプ施工による HFSC を用いた高流動コンクリートを施工し、ひび割れの状況を把握するとともに合わせて対策を施したコンクリートも施工し、その効果を検証する。

(5) 無ひび割れ施工の確立

上記の試験によりひび割れ対策有効性が確認された場合、幌延深地層研究センターにおいて、覆工コンクリートが必要な場所にこのコンクリートを施工することによって、無ひび割れ覆工コンクリートの施工が可能であることを実証する。

4.3.4 グラウト

低アルカリ性セメントを使用したグラウトについては、これまでの研究では全く検討していない。グラウトに要求される性能は、十分に検討する必要があるが、現段階で考慮する必要があるのは充填性であると思われる。

(1) 使用材料の見直しと低アルカリ性の確認

HFSC は、OPC とフライアッシュおよびシリカフュームの混合セメントである。充填性を向上させるためには、OPC とフライアッシュの粒径を細かくし、小さな亀裂での充填を期待できるように改良する必要がある。その候補材料として、OPC に替えてダムの岩盤注入し用いたりコンクリートのひび割れ充填に使用される超微粒子セメントが有力候補材である。また、分級フライアッシュで可能な充填範囲であれば良いが、さらに細かい亀裂への充填を考慮するとシリカフラワーが有力な候補材料である。

この実験では、上記材料を組み合わせることによって、低アルカリ性が確保できるかどうか実験によって評価する。

グラウトの低アルカリ性評価

グラウトに使用する HFSC の改良セメントが、低アルカリ性を確保できるかどうか、間隙水の pH を調査する。pH の調査方法は、これまでの試験と同様に、イオン交換水への平衡状態をもって間隙水の pH とみなす方法とする。

(2) 室内注入試験

本実験では、グラウトとして、強度を期待して水セメント比 50%程度 of セメントペーストを注入する工法（高性能 AE 減水剤を使用し粘性を出す）と充填性を考慮して水セメント比 100%～150% of セメントペーストを使用する場合の 2 つのグラウトについて、模擬亀裂への充填試験と亀裂充填後の岩盤の改良効果について調査する。

亀裂充填状況

注入後亀裂をコア採取して、充填状況を確認する。注入コアのアウトプット透水試験を行い、改良効果を確認する。

(3) モデル岩盤による注入試験

注入後の注入効果を確認できるような岩盤内構造物を調査する。鉱山跡や廃線トンネルなどが候補となる。国内で適当な試験場所がない場合は、海外の岩盤研究センターを利用する方法もある。この研究の目的として、処分場建設中に湧水や地山の崩壊などでグラウトが必要となったとき、完成後の処分場に使用するグラウト材を施工中にも注入することが望ましい。施工中に必要なグラウトが、完成後のグラウトを兼ねれるかどうか、また、低アルカリグラウトが施工中にも効果を発揮するかどうかの検討を行う。

試験内容は、

- ① 注入試験（注入範囲調査——注入できる亀裂幅、1 孔から注入できる範囲など）
- ② 注入効果（止水性——施工中の漏水を止める効果、岩盤改良——施工中の地山の強度改善・短期強度発現性など）

(4) 注入確証試験と地球化学的影響評価

グラウトが使用されるプラグ部分において、プラグとグラウトを兼ねあわせた実物大の注水試験を行う。注水後にグラウト効果を確認するとともに、低アルカリ性セメントによる岩盤の変質制御効果についても調査を行う。

おわりに

低アルカリ性コンクリートを吹付コンクリートおよび覆工コンクリートの使用することについて、室内試験規模ではあるが適用は可能であるとの結論を得た。

本研究で得られた結論は以下の通りである。

- ①低アルカリ性セメントとして HFSC と AECL が開発した LHHPC について、室内試験における湿式吹試験の結果、カルシウムサルホアルミネート系急結剤を使用することによって、目標とした吹付けコンクリートとしての性能（12 時間圧縮強度 1.0N/mm^2 、24 時間圧縮強度 9N/mm^2 ）を確保する結果を得た。本実験より、室内試験レベルでは、吹付けの可能性が確認された。
- ②LHHPC の吹付けコンクリートの試験では、同じ急結剤を使用しても目標とした性能を満足できなかった。強度発現が遅いと考えられる。
- ③低アルカリ性セメント中での鉄筋の腐食挙動を調査するための暴露試験について、鉄筋コンクリート供試体を海中に暴露する試験計画を作成した。
- ④低アルカリ性を 1 ヶ月程度で発現するためのセメントの改良として、シリカフュームとセメントの使用量を同量とすることで、低アルカリ性を早期に実現できることがわかった。この期間は温度を上昇させると pH 低下速度がさらに急激に上昇する。
- ⑤改良したセメントは、高温養生によって圧縮強度は上昇するが、 80°C で養生しても 91 日強度の 50% 程度しか発現なかった。
- ⑥幌延深地層研究センターの建設に向けて、低アルカリ性セメントを放射性廃棄物処分場において想定すべき使用部位を検討し、実際の使用に向けた実験計画について計画書を作成した。