JNC TJ8400 2002-013

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（II）

（核燃料サイクル開発機構　業務委託報告書）

2002 年 2 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大字村松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)
2002

2002 年 2 月

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（Ⅱ）
（核燃料サイクル機構業務委託報告書）

入矢桂史郎*　三上哲司*　秋好賢治*　上垣義明*

要　　旨

幌延深地層研究センターは、処分場の設計建設技術に関する確認検証を行うことがその役割の１つとしてあげられている。処分場の建設の際に使用されるセメントは、周辺岩盤や緩衝材に与える影響を最小限とするために、低アルカリ性セメントの使用が検討されている。核燃料サイクル開発機構殿では、フライアッシュを高含有した低アルカリ性セメント（HFSC）を開発し、室内試験を通じてその性能を研究してきた。しかし、構造物としてのコンクリート系材料に求められる施工性や物理性能などは、いまだ十分研究されていない。

本研究は、実際の処分場において、コンクリートが使用される状況（吹付コンクリート、覆工コンクリート、グラウトなど）を想定して施工性を検討するとともに、要求通りの性能を発揮できるかどうかの検討を行ったものである。

吹付けコンクリートに関しては、模擬トンネルの施工試験を行い、吹付け施工が可能であることを実証した。施工性に関しては良好な結果を得た。

低アルカリ性セメント中では鉄筋などの鋼材の腐蝕する挙動が普通セメント中と異なっている可能性がある。鉄筋腐蝕に関しては、昨年度の研究で作った供試体を海中および飛沫帯における暴露試験を開始した。塩分浸透量や埋込んだ鉄筋の腐蝕状況などの調査を来年度以降実施する予定である。

HFSC はシリカヒュームを含んでおり高性能 AE 減水剤でワーカビリティを確保するコンクリートである。従って、吹き付け以外のコンクリートでは、高流動コンクリートとなる。ここでは覆工コンクリートがプレキャストコンクリートである場合を想定して、セグメントの製造方法の検討を実施した。セグメントは上記の理由により、高流動コンクリートとして製造する計画とした。製造に先立て通常のシールドセグメントを例に試設計を行い、その断面形状にて２ピース試作を行った。セグメントを製造することにおいて問題はないことを確認した。

グラウトに関しては、微粒子セメント、石灰石粉微粉末、シリカフュームを組み合わせることによって、低アルカリ性を示す微粉体ができることがわかった。

上記の実験結果を踏まえて課題の抽出と今後の研究開発の方向を示した。

もっとも大きな課題は、強度発現が遅いことである。吹付けコンクリートにおいても、セグメントコンクリートにおいても、普通セメントでは材令 28 日で満足できる強度に、HFSC では 28 日材齢では到達できなかった。フライアッシュとシリカヒュームの混合割合などの見直しが必要である。

HFSC では、セメント中に OPC より多くのフライアッシュを使用するために、フライアッシュの品質のばらつきがコンクリートの品質に与える影響が大きい。コンクリートに悪影響を与える成分を低く押さえるためのフライアッシュの管理方法などを検討するとともに、品質のばらつきに関して把握しておく必要がある。

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

機構担当課室：東海事業所環境保全・研究開発センター処分研究部システム解析ｸﾞﾙｰﾌﾟ
* (株)大林組

JNC TJ8400 2002-013

February.2002

Study on construction method of concrete in the underground research laboratory (Ⅱ)

(Document Preparent by Other Institute, Based on the Trust Contruct)

K.IRIYA,* T.MIKAMI,* ,K.AKIYOSHI,* and Y.UEGAKI*

Abstract

The underground research laboratory, which will be constructed in Horonobe, plays a role of demonstration of construction technique upon nuclear waste repositories. Low alkalinity cement is one of candidates for repositories as a cementitious material in order to prevent alteration of bentonite and rock by hyper alkaline solution.

JNC has developed a low alkalinity cement (HFSC) which contains a lot of fly ash, and has studied the physical and chemical properties by laboratory test. However workability which is required for construction procedure of repositories has not been studied enough yet.

This study shows if requirements in actual construction, such as shotcreting, self-compacting, and, grouting, are fulfilled, and if the workability is preferable for tunneling construction.

It is demonstrated that HFSC is applicable for shotcreting by testing in a modeled tunnel.

It is pointed out that re-bars have a possibility of corrosion in low alkalinity cement. In-site test for saline water which may accelerate corrosion is started by setting specimen made in last year. Analyzing and assessing will be done next year.

Construction method of tunnel lining is investigated in case of applying pre-cast segments. Self-compacting concrete is adopted, since added silica-fume needs superplasticizer and its workability is very flowable. Two piece of segment were made for the section which designed for a ordinary urban tunnel. It is noted that pre-casting concrete can be made by HFSC.

Super fine cement powder for grouting which indicate low alkalinity can be selected by combination of grinned lime stone powder and silica fume with grinned ordinary Portland cement.

The items to be improved toward using in Horonobe construction are pointed out by results of this study and summarized a study plan is described. Major problem to be solved is delaying compressive strength generation of HFSC. It is recognized in shotcrete and self-compacting concrete. Selecting types of fly ash and Portland cement will be done.

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

JNC Liaison : System analysis group

Disposal research Division of Tokai works

*OBAYASHI Corporation

目 次

はじめに 1

1. 吹付けコンクリートの施工性確認 2
1.1 研究の概要 2
（1）試験目的 2
（2）試験場所 2
（3）試験水準 3
（4）使用材料 3
1.2 試験 Step 1「最適条件の把握」 4
（1）試験計画 4
（2）試験結果 5
（3）考察 7
1.3 試験 Step 2「模擬トンネルにおける吹付け性状の確認」 7
（1）試験計画 7
（2）試験結果 11
（3）考察 21
1.4 今後の検討課題 25
（1）ばらつき要因 25
（2）実用化のための目標値設定 25

2. 鉄筋腐食挙動の把握 28
2.1 試験目的および試験概要 28
2.2 使用材料 29
2.3 コンクリートの配合 29
2.4 練混ぜ方法および供試体 29
（1）練混ぜ方法 29
（2）鉄筋腐食試験供試体 30
（3）塩分浸透試験供試体 31
2.5 試験項目 31
2.6 暴露試験方法 31
2.7 コンクリートの試験方法 33
2.7.1 所定の暴露期間経過後の試験 33
（1）腐食面積率 33
（2）腐食減量 33

（3）自然電位および分極抵抗 33
（4）コンクリート中の塩分分析 33
2.7.2 供試体作成時の試験 34
（1）フレッシュコンクリートの試験 34
（2）圧縮強度試験 34
（3）塩化物イオン含有量試験 34
（4）腐食面積率および腐食減量 34
（5）自然電位 34
（6）コンクリート抵抗 34
（7）分極抵抗 34
2.8 試験結果 35
（1）フレッシュコンクリートの試験 35
（2）圧縮強度試験 35
（3）塩化物イオン含有量試験 35
（4）腐食面積率および腐食減量 36
（5）自然電位 37
（6）コンクリート抵抗 38
（7）分極抵抗 39

3. 実規模セグメントの製造計画の立案 41
3.1 セグメントコンクリートの配合決定試験 41
（1）コンクリートの仕様 41
（2）示方配合 41
（3）試験練り方法 42
（4）性状評価試験 42
（5）フレッシュコンクリートの性状 42
（6）強度試験結果 43
（7）考察 43
3.2 実規模セグメントの製造方法の検討 43
（1）検討の方法 43
（2）製造計画 44
（3）品質管理計画 47
（4）セグメントの試作結果 48
（5）フレッシュコンクリートの性状 52
（6）コンクリートの圧縮強度試験結果 52
（7）試験結果のまとめおよび考察 52

3.3 セグメントの設計 53
3.3.1 TBM で掘削した山岳トンネルのセグメント設計の考え方 53
（1）シールドトンネル 53
（2）山岳トンネル 54
3.3.2 設計概要 56
（1）設計の流れ 56
（2）土の分類による荷重の考え方 56
3.3.3 セグメントの形状 57
3.3.4 材料の許容応力度 58
3.3.5 設計条件 59
3.3.6 設計荷重の算定 60
3.3.7 作用荷重分布図 62
3.3.8 自重、土圧、水圧による断面力の算定 63
3.3.9 合成断面力 65
3.3.10 本体断面に発生する応力度の算定 68
3.3.11 曲げひびわれの検討 71
3.3.12 本体の抵抗モーメント 72
3.3.13 セグメント継手の検討 73
3.3.14 ジャッキ推力に対する検討 74

4. グラウト適用性確認のための基礎データ取得 75
4.1 目標とするグラウトの性能 75
4.2 材料の選定 75
4.3 低アルカリ性の評価試験 78
（1）使用材料 78
（2）材料の組み合わせ 78
（3）試料調整 78
（4）試験方法 79
（5）試験結果 79
（6）考察 81

5. 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見直し 82
5.1 平成 13 年度の研究で明らかとなった課題 82
（1）支保工 82
（2）グラウト 83
5.2 平成 14 年度の研究計画の提案 83

5.2.1 吹付けコンクリート 83
（1）ベースコンクリートの強度発現の改善 83
（2）吹付けコンクリートにおける強度発現の評価 83
5.2.2 フライアッシュのバラツキが HFSC の品質に与える影響評価 83
（1）フライアッシュのバラツキがコンクリートの品質に与える影響調査 83
（2）フライアッシュの品質のバラツキが pH の低下速度に与える影響 84
5.2.3 セグメントの暴露による変質の確認と破壊試験 84
（1）変質調査 84
（2）破壊強度の確認 85
5.2.4 高性能 AE 減水剤の見直し 85
5.2.5 グラウト 85
（1）室内注入試験 85
（2）モデル岩盤による注入試験 85
5.2.6 HFSC 製造計画と製造上の問題点の抽出 85
5.2.7 鉄筋腐食試験と設計手法の検討 86

おわりに 87

図 目 次

図 1.1　強度供試体採取用の型枠 11
図 1.2　空隙径と空隙量の関係 18
図 1.3　吹付けコンクリート圧縮強度 22

図 2.1　供試体の寸法および形状 30
図 2.2　供試体の製作方法 30

図 3.1　打設方法 45
図 3.2　蓋型枠構造概略図 45
図 3.3　蒸気養生時間 46
図 3.4　品質管理フロー 47
図 3.5　セグメントの例 55
図 3.6　荷重の考え方 57
図 3.7　セグメントの形状 58
図 3.8　作用土圧の考え方 60
図 3.9　抵抗土圧による変位量 62
図 3.10 作用荷重 63
図 3.11 トンネル断面に作用する断面力分布図 67
図 3.12 断面および配筋 68
図 3.13 断面および配筋 70
図 3.14 継ぎ手の構造 73
図 3.15 ジャッキ推力の作用位置 74

図 4.1　材料の粒度分布 76
図 4.3　pH の測定結果（60℃） 80
図 4.4　pH の測定結果（20℃） 80

表 目 次

表 1.1　HFSC の材料と配合 3
表 1.2　急結剤 3
表 1.3　細骨材、粗骨材および減水剤 4
表 1.4　試験 Step 1 の要因と水準 4
表 1.5　コンクリート配合 4
表 1.6　フレッシュコンクリートに関する試験項目と試験方法 5
表 1.7　硬化コンクリートに関する試験項目と試験方法 5
表 1.8　ベースコンクリートのフレッシュ性状試験結果 6
表 1.9　ベースコンクリートの練置き性状試験結果 6
表 1.10 硬化コンクリートに関する試験結果 6
表 1.11 試験 Step 2 のコンクリート配合 7
表 1.12 主要試験使用機械 8
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（再掲）..... 9
表 1.14 吹付け性状（施工性）に関する試験項目と試験方法 9
表 1.15 目視観察の判断基準 9
表 1.16 硬化コンクリートに関する試験項目と試験方法 10
表 1.17 硬化コンクリートに関する追加試験項目と試験方法 11
表 1.18 フレッシュコンクリート試験結果（HFSC 調整吹付け）..... 12
表 1.19 吹付け性状（施工性）試験結果（HFSC 調整吹付け）..... 12
表 1.20 最終吹付けコンクリート配合 13
表 1.21 フレッシュコンクリート試験結果 14
表 1.22 吹付け性状（施工性）試験結果 14
表 1.23 吹付けコンクリート初期強度試験（プルアウト試験）..... 15
表 1.24 ベースコンクリート圧縮強度試験 15
表 1.25 吹付けコンクリート圧縮強度試験 16
表 1.26 吹付けコンクリート割裂引張強度試験（材齢 28 日）..... 17
表 1.27 透水試験結果 17
表 1.28 空隙率と細孔径分布の測定 17
表 1.29 吹付けコンクリート強度試験の判定基準例
（設計基準強度 18N/mm2 の場合）..... 22
表 1.30 HFSC の目標強度 25
表 1.31 HFSC 吹付けコンクリートの目標値（案）..... 26
表 2.1　鉄筋腐食試験の概要 28
表 2.2　使用材料 29

表 2.3　コンクリートの配合 29
表 2.4　試験項目 31
表 2.5　暴露試験方法の実施例 31
表 2.6　フレッシュコンクリートの試験結果 35
表 2.7　圧縮強度試験結果 35
表 2.8　塩化物イオン含有量試験結果 36
表 2.9　腐食面積率測定結果 36
表 2.10　腐食減量測定結果 37
表 2.11　自然電位測定結果（飽和硫酸銅電極換算値） 38
表 2.12　コンクリート抵抗測定結果 39
表 2.13　分極抵抗測定結果 40

表 3.1　検討したセグメントコンクリートの示方配合 42
表 3.2　性状評価試験項目 42
表 3.3　フレッシュコンクリートの試験結果 43
表 3.4　圧縮強度試験結果 43
表 3.5　養生方法 46
表 3.6　品質管理試験 48
表 3.7　コンクリートの練り上り直後の性状 52
表 3.8　圧縮強度試験結果 52
表 3.9　材料の許容応力度 58
表 3.10　合成断面力 66
表 3.11　最大断面力 67

表 4.1　注入材料の粒度分布 77
表 4.2　使用材料 78
表 4.3　試験ケース 78
表 4.4　浸漬水の pH 測定結果 79

写 真 目 次

写真 1.1 模擬トンネル全景 2
写真 1.2 HFSC 調整吹付け状況（急結剤 12%添加時）..... 12
写真 1.3 HFSC 吹付け状況 13
写真 1.4 供試体切断面の状況（材齢 56 日、HFSC）..... 19
写真 1.5 供試体切断面の状況（材齢 56 日、OPC）..... 20

写真 2.1 供試体暴露状況 32
写真 2.2 供試体暴露状況 32

写真 3.1 セグメント型枠（下枠の部分）..... 49
写真 3.2 コンクリート打設状況 49
写真 3.3 コンクリートの流動状況 50
写真 3.4 型枠脱型直後の状況 50
写真 3.5 型枠脱型直後の状況 51
写真 3.6 水中養生 51

はじめに

幌延深地層研究センターでは、処分場の建設技術を実証することが目的の一つとされている。処分場の建設においては、セメント系材料がトンネルの支保工や覆工コンクリートあるいは充填材などの候補材料として考えられている。

また、処分場ではベントナイト系材料も有力な候補であり、セメント系材料とベントナイト系材料が共存することが考えられる。セメントの高アルカリ間隙水によって、ベントナイトや岩盤が変質することが懸念されている。

JNC 殿のベントナイトの変質に関する室内試験においても pH が 11.0 を超えると変質することが認められている。この変質に対する対策として、浸出水の pH を 11.0 以下におさえた低アルカリ性セメントの使用が考えられる。

セメントの低アルカリ化についてはいくつかの方法が考えられるが、JNC 殿ではポゾラン反応を利用して pH を下げるセメントの研究を進めてきた。その結果、フライアッシュを多量添加したシリカフュームセメント（HFSC）を低アルカリ性セメントとして開発した。HFSC の低アルカリ性に関しては、室内試験を通じて、水和に伴う生成鉱物および侵出液の組成、pH などが調査されてきたが、建設工事に要する際の強度や施工性の確認については、十分把握されているとは言い難い状況にある。

本研究では、建設に使用されるセメント系材料の形態を①吹付けコンクリート②高流動コンクリート③プレキャストコンクリート④グラウトの 4 種類と考え、処分場の建設に必要な施工性や強度を満足しているかどうかを実験により確認したものである。

さらに、実験を通じて明らかになった性能を整理して、問題点を明らかにした上でそれを解決するべき次年度以降の研究開発計画を策定した。

1. 吹付けコンクリートの施工性確認

1.1 研究の概要

（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それに伴う強度劣化防止に効果がある。

本実験では、上記の変質等を抑制することを目的として開発された普通ポルトランドセメント（以下、OPC と呼ぶ）にシリカフューム等を混入した低アルカリ性セメント（以下、HFSC と呼ぶ）について、吹付けコンクリートとして現地への適用性を検討するための実規模模擬実験を行った。

（2）試験場所

（i）試験場所

模擬トンネルと吹付け施工機械設備が備わっている研究施設を選定する。試験場所として電気化学工業㈱青海工場（住所：新潟県西頸城郡青海町青海 2209）を選定した。

（ii）模擬トンネル

模擬トンネルの大きさは、内空幅 5.2m、高さ 4.4m、延長 20mである。写真 1.1 に模擬トンネル全景を示す。

写真 1.1　模擬トンネル全景

（3）試験水準

試験は、下記の２ステップに分けて実施する。

・試験 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

・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　：Step１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、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

（4）使用材料

使用材料を表 1.1～表 1.3 に示す。

表 1.1　HFSC 材料と配合

種類	メーカー	仕様	混合比(%)
普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ（OPC）	電気化学工業社製	密度＝3.16g/cm³	20
シリカフューム	ｴﾙｹﾑ社製	密度＝2.22g/cm³	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 密度=2.38 g/cm³	60

表 1.2　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×10%
ﾅﾄﾐｯｸ Type５	〃	一般強度吹付け用、粉末、標準添加率＝C×７%

表 1.3　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＝2.62g/cm³
粗骨材	〃	新潟県糸魚川産６号砕石、密度＝2.62g/cm³
減水剤	ｻﾝﾌﾛｰﾊﾟﾘｯｸ社製	HS700

1.2　試験 Step 1「最適配合条件の把握」

（1）試験計画

（i）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 1.4 に示す。

表 1.4　試験 Step１の要因と水準

要因	水準	数 値
単位ｾﾒﾝﾄ量	3	360、400、450kg/m³
水ｾﾒﾝﾄ比	4	60、55、50、45% ＊

＊平成 13 年度に実施したモルタル試験結果から，HFSC の水セメント比(W/C)＝50%程度で、OPC の W/C=60%と同程度の強度発現性であったことから，W/C を 60%中心に設定。

（ii）コンクリートの配合条件

最適配合条件を把握するための試験用のコンクリート配合条件を表 1.5 に示す。

表 1.5　コンクリート配合

配合種類	ｾﾒﾝﾄ種類	目標ｽﾗﾝﾌﾟ (cm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量（kg/m³）					
					水 W	OPC	HFSC	細骨材 S	粗骨材 G	減水剤 SP
標準配合	OPC	10 程度	60	60	216	360	―	1053	708	―
配合条件１	HFSC	10 程度	60	60	216	―	360	1006	676	(1.1%)
配合条件２	HFSC	18 程度	55	60	198	―	360	1035	695	
配合条件３	HFSC	18 程度	50	60	200	―	400	1006	676	
配合条件４	HFSC	18 程度	45	60	203	―	450	970	652	

＊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、s/a は 60%一定で実施するものとした。

（iii）試験項目と試験方法

混練りは試験室において、以下の要領で実施した。

・混練り量　：30 ﾘｯﾄﾙ

・温度　　：20℃
・ミキサー　：2 軸ミキサー（容量 50 ﾘｯﾄﾙ）
・混練り時間：全材料投入後 2 分

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 1.6、硬化コンクリートに関するものを表 1.7 に示す。

なお、配合条件 2～4 では暫定的にスランプ目標値を 18cm としたが、今回検討するコンクリートはシリカフューム等の微粉末材料が含まれることによりコンクリート粘性が大きくなることが予測されるため、コンクリートの状態に応じて適当と判断されるスランプ値を最終的に採用するものとする。

表 1.6　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	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 1.7　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 に準ずる。 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φ100×200㎜

（2）試験結果

ベースコンクリートに関するフレッシュ性状試験結果を表 1.8 に、練混ぜ直後から練置き 60 分後迄の練置き性状試験結果を表 1.9 に、硬化コンクリートに関する試験結果を表 1.10 に示す。練置き試験は、フレッシュ性状がもっともよいと判断された条件 3 について実施した。

表 1.8　ベースコンクリートのフレッシュ性状試験結果

配合種類	ｾﾒﾝﾄ種類	ｺﾝｸﾘｰﾄ配合			ﾌﾚｯｼｭ性状				
		W/C (%)	ｾﾒﾝﾄ量 (kg/m³)	減水剤量 (C×%)	ｽﾗﾝﾌﾟ (cm)	ﾌﾛｰ (cm)	Air (%)	温度 (℃)	状態
標準配合	OPC	60	360	―	9.5	―	2.0	20.5	普通の状態
条件 1	HFSC	60	360	0.7	21.0	32.0	―	20.0	ﾎﾟｯﾃﾘ、軟らかい
				0.3	12.0	-	1.5	20.0	重く硬い
条件 2	HFSC	55	360	0.7	16.5	27.0	1.4	20.0	粘りあり、少し硬い
条件 3	HFSC	50	400	0.8	10.0	―	―	20.5	硬い
				1.2	15.0	31.0	―	20.0	少し硬く重い
				1.5	23.5	42.0	―	20.0	適度な粘り
条件 4	HFSC	45	450	0.8	20.0	30.0	1.6	20.0	粘り強い
				1.1	23.5	41.5	1.2	22.0	粘りあり

表 1.9　ベースコンクリートの練置き性状試験結果

配合種類	ｾﾒﾝﾄ種類	ｺﾝｸﾘｰﾄ配合			ﾌﾚｯｼｭ性状				
		W/C (%)	ｾﾒﾝﾄ量 (kg/m³)	減水剤量 (C×%)	測定時間	ｽﾗﾝﾌﾟ (cm)	ﾌﾛｰ (cm)	Air (%)	温度 (℃)
標準配合	OPC	60	360	0	0 分	9.5	―	2.0	20.5
					30 分	8.5	―	―	―
					60 分	8.0	―	―	―
条件 3	HFSC	50	400	1.2	0 分	19.0	31.0	―	20.0
					30 分	15.0	―	―	―
					60 分	11.0	―	―	―
				1.5	0 分	23.5	42.0	―	20.0
					30 分	22.0	35.0	―	―
					60 分	19.5	28.0	―	―

表 1.10　硬化コンクリートに関する試験結果

配合種類	ｾﾒﾝﾄ種類	ｺﾝｸﾘｰﾄ配合			圧縮強度(N/mm²)	
		W/C (%)	ｾﾒﾝﾄ量 (kg/m³)	減水剤量 (C×%)	材齢 7 日	材齢 28 日
標準配合	OPC	60	360	―	26.2	37.7
条件 1	HFSC	60	360	0.3	3.77	5.49
条件 2	HFSC	55	360	0.7	4.37	7.27
条件 3	HFSC	50	400	0.7	4.14	9.44
				1.2	4.58	11.9
				1.5	4.82	13.3
条件 4	HFSC	45	450	0.8	5.61	12.5
				1.1	6.25	13.3

（3）考察

（i）スランプ

HFSCはOPCに比べ微粉成分が多くなるためか粘性が増加する傾向が確認された。従って、施工性を確保する観点からスランプは大きく設定したほうが良いと考える。

なお、各条件に推奨するスランプは次のとおりである。

・条件1、条件2 ： 18cm程度

・条件3、条件4 ： 20cm程度

（ii）吹付けの最適配合の絞り込み

条件1～4のHFSCベースコンクリート配合の中から実際に吹付けに採用すべき配合の絞り込みを行う。表1.10より、「条件3」と「条件4」の水セメント比の方が、「条件1」と「条件2」に比べて圧縮強度が大きく、これに急結剤を添加すれば材齢28日で既往の吹付けコンクリートの基準値18N/mm^{2}を発現する可能性が高い。次に、表1.8の施工性の観点より、「条件4」は「条件3」に比べて粘りが強すぎるため、吹付け時の脈動や閉塞によるトラブルの危険性が高い。以上より、強度発現性と施工性がともに確保される最適配合は、「配合条件3」と判断される。

（iii）試験Step 2のコンクリート配合

今回の試験Step 1の結果より、下表1.11に示す配合を用いて試験Step 2模擬トンネル吹付け試験を実施する。

表1.11　試験Step 2のコンクリート配合

配合種類	ｾﾒﾝﾄ種類	目標ｽﾗﾝﾌﾟ(cm)	W/C(%)	s/a(%)	単位量（kg/m^3）					
					W	OPC	HFSC	S	G	減水剤
条件3	HFSC	20	50	60	200	－	400	1006	676	(C×1.5%) 6.0
標準配合	OPC	10	60	60	216	360	－	1053	708	－

1.3　試験Step 2「模擬トンネルにおける吹付け性状の確認」

（1）試験計画

（i）コンクリート配合

Step 1で絞り込まれた最適配合のHFSC及び標準配合OPC、合計2種類のコンクリート（表1.11参照）を実際の模擬トンネルに吹付けてみる。ここで、HFSC用の急結剤は昨年度のモルタル試験結果より、凝結不良が懸念されたナトミックAFではなく、ナトミックType-10を使用するものとする。

（ii）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。なお、プラントは、須沢生コン(株)（新潟県西頸城郡青海町大字須沢 1176-1、TEL.0255-52-0066）を使用する。

吹付け回数は、データの信頼度の関係から１配合につき最低２回実施する。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使用機械内に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り一般的な 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での吹付けコンクリート圧縮強度試験用供試体の採取箇所は、最低 15cm 程度の吹付け厚が必要である。

（iii）試験機械

主要な試験使用機械を表 1.12 に示す。ここで計画したものは、一般的な山岳トンネルの施工で用いられている機械である。

表 1.12　主要試験使用機械

機械名	型名	能力	備考
吹付けﾛﾎﾞｯﾄ	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 添加装置	ﾅﾄﾑｸﾘｰﾄ 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
ｺﾝｸﾘｰﾄﾎﾟﾝﾌﾟ	MKW-25SNT	理論吐出量：５～25m³/H （50Hz の場合）	MKW-25SNT (ﾋﾟｽﾄﾝﾎﾟﾝﾌﾟ、ｼﾝﾃｯｸ社製)
ｺﾝﾌﾟﾚｯｻ	－	100PS 級エンジン式×２台	－

（iv）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 1.13（再掲）、吹付け性状（施工性）に関するものを表 1.14、目視観察の評価基準を表 1.15 に、硬化コンクリートに関するものを表 1.16 に示す。また、試験に用いる箱型枠の例を図 1.1 に示す。

以上の試験を実施し、HFSC を用いた吹付けコンクリートが実使用に適した妥当なものかどうかを、OPC を用いた既往の一般吹付けコンクリートの施工性と比較しながら総合評価する。但し、当初計画した試験結果、HFSC 吹付けの透水性を詳細に評価する必要が生じたため、表 1.17 に示す追加試験を実施した。

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（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 A １１２８に準拠
ｺﾝｸﾘｰﾄ温度の測定	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　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	回収したリバウンド材の重量を吹付けに要したコンクリート重量で除して算出
急結剤添加率の測定	急結剤添加装置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 1.15　目視観察の判断基準

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。
ﾉｽﾞﾙだれ	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 1.16　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 JSCE-G561-1999「引抜きによるコンクリートの初期強度試験方法」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	吹付け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：7 日、28 日、42 日、56 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３供試体、吹付コンクリートは各材齢とも４供試体。 ④試験体寸法：ベースコンクリートはφ100×200㎜（現着時採取）、吹付コンクリートはφ50×100㎜（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φ50×100㎜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本採取。
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φ100×200㎜（現着時採取）、吹付コンクリートはφ50×100㎜（コア採取）
透水試験	試験方法は、コンクリートから透水した量を測定するアウトプット法とする。 材齢 28 日、供試体高さ 15㎝、高さ 15㎝、断面積 176.63㎝^{2}、透水時間 48 時間 算定式： 透水係数＝水の単位容積重量×（供試体高さ／水圧）×（流出量／供試体断面積）

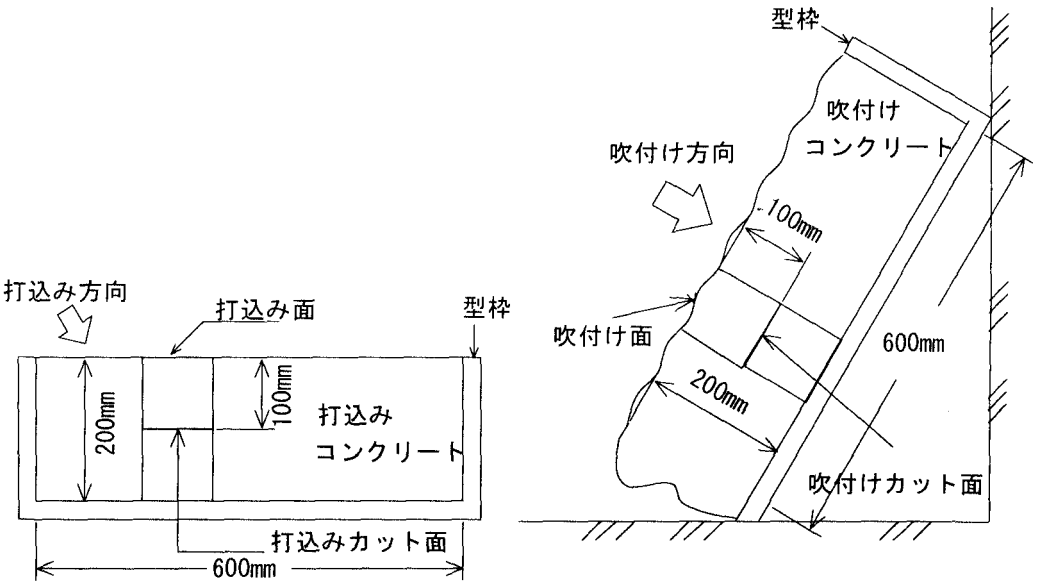


図 1.1　強度供試体採取用の型枠

表 1.17　硬化コンクリートに関する追加試験項目と試験方法

試験項目	試験方法
空隙率・細孔径 分布の測定	吹付けコンクリートのコアリング後、水銀圧入法により細孔径分布を測定。 材齢：56 日
供試体切断面の目視観察	上記の測定後、上記テストピースを縦に切断し、目視観察。

（2）試験結果

試験 Step2 は平成 13 年 11 月 6 日（火）に実施した。

（i）調整吹付け

HFSC を実際に吹き付けるのは日本国内では今回が始めてである。そこで、実際に吹き付け可能かどうか予め確認して最終試験条件を調整するために、当日午前中に予備的に HFSC 吹付け（2m^3）を行った。吹付け状況を写真 1.2 に、フレッシュコンクリート及び吹付け性状（施工性）に関する試験結果を表 1.18 と表 1.19 に示す。

結果をまとめると次のとおりである。

① 目標スランプ 20cm に対して練上げ直後で 19.0cm と若干硬めであった。

② 練置き 38 分後では 8cm と大きく（19－8＝11cm）スランプダウンした。

③ 急結剤添加率を 10%から 12%に上げるとリバウンドが増えて脈動が大きくなった。

最終的な HFSC 吹付け条件を、急結剤添加率 9.8%、減水剤添加率 1.6%、コンク

リート吐出量 10 m³/h と決定した。

写真 1.2　HFSC 調整吹付け状況（急結剤 12%添加時）

表 1.18　フレッシュコンクリート試験結果（HFSC 調整吹付け）

ｺﾝｸﾘｰﾄ種別	HFSC （練置き 0 分後）	HFSC （練置き 38 分後）
外気温（℃）	15.0	―
ｺﾝｸﾘｰﾄ温度（℃）	15.0	15.0
スランプ（cm）	19.0	11.0
スランプフロー（cm）	29.5 ×30.0	
空気量（%）	3.2	―
減水剤添加率（%）	1.5	―
目視観察	粘り有り	やや重い

表 1.19　吹付け性状（施工性）試験結果（HFSC 調整吹付け）

ｺﾝｸﾘｰﾄ種別	HFSC（前半）	HFSC（後半）
コンクリート吐出量(m³/h)	10	10
急結剤添加率（%）	10.0	12.0
リバウンド量(kg)	167.5	241.1
リバウンド率(%)	11.0	13.1
吹付け状況	ノズルだれ以外は良好	ノズルだれ・脈動あり

（ii）最終吹付け

午前中の上記１）HFSC の調整吹付けに引き続き、午後から HFSC と OPC の最終吹付け（各 2m³）を行った。最終的な吹付けコンクリート配合を表 1.20 に、吹付

け状況を写真 1.3 に、フレッシュコンクリートと吹付け性状（施工性）に関する試験結果を表 1.21 と表 1.22 に示す。硬化コンクリートに関する試験結果のうち、吹付けコンクリートの初期強度試験（プルアウト法）を表 1.23、ベースコンクリートの圧縮強度試験・静弾性係数測定を表 1.24、吹付けコンクリートの圧縮強度試験・静弾性係数測定を表 1.25、吹付けコンクリートの割裂引張強度試験を表 1.26、透水試験を表 1.27、空隙率と細孔径分布の測定結果を表 1.28、図 1.2、写真 1.4～1.5 に示す。

写真 1.3　HFSC 吹付け状況

表 1.20　最終吹付けコンクリート配合

配合条件	コンクリート配合								急結剤	
	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)						ﾅﾄﾐｯｸ Type-10	ﾅﾄﾐｯｸ Type-5
			W	OPC	HFSC	S	G	減水剤		
HFSC	50	60	200	―	400	1006	676	HFSC×1.6%	HFSC×9.8%	―
OPC	60	60	216	360	―	1053	708	―	―	C×7%

表 1.21　フレッシュコンクリート試験結果

ｺﾝｸﾘｰﾄ種別	HFSC （練置き 0 分後）	HFSC （練置き 30 分後）	HFSC （練置き 60 分後）	OPC （練置き 0 分後）
外気温（℃）	11.0	―	―	11.0
ｺﾝｸﾘｰﾄ温度（℃）	14.0	14.0	―	16.0
スランプ（cm）	18.0	12.0	6.5	11.5
ｽﾗﾝﾌﾟﾌﾛｰ（cm）	28.0×29.0	―	―	―
空気量（%）	3.0	―	―	4.2
減水剤添加率（%）	1.6	―	―	―
目視観察	粘りあり	やや重い	硬く重い	粘りあり

表 1.22　吹付け性状（施工性）試験結果

ｺﾝｸﾘｰﾄ種別	HFSC （練置き 0 分後）			HFSC （練置き 30 分後）		HFSC （練置き 60 分後）			OPC （練置き 0 分後）	
急結剤添加率（%）	9.8			―		―			7.0	
ﾘﾊﾞｳﾝﾄﾞ量（kg）	299.5			―		―			338.6	
ﾘﾊﾞｳﾝﾄﾞ率（%）	13.1			―		―			14.5	
目視観察	下表			―		―			下表	
ｺﾝｸﾘｰﾄ種別	HFSC					OPC				
観察者（4 名）	A	B	C	D	平均	A	B	C	D	平均
①混合状態	5	5	5	5	5.0	5	5	5	4	4.8
②脈動状態	5	5	4	4	4.5	5	5	5	4	4.8
③ノズルだれ	3	3	3	4	3.3	3	3	3	4	3.3
④急結状態	3	5	5	4	4.3	3	4.5	4	5	4.1
⑤粉塵	4	5	5	5	4.8	2	3	3	3	2.8
⑥付着状態	4	5	4	5	4.5	2	4	3	5	3.5
合計	4.0	4.7	4.3	4.5	4.4	3.3	4.1	3.8	4.2	3.9

表 1.23　吹付けコンクリート初期強度試験（プルアウト試験）

ｺﾝｸﾘｰﾄ種別	n	プルアウト換算圧縮強度(N/mm²)		
		材齢３時間	材齢６時間	材齢 24 時間
ＨＦＳＣ	1	2.00	2.00	3.00
	2	2.00	3.00	3.00
	3	2.00	3.00	4.00
	平均	2.00	2.70	3.33
	養生	現場約 10℃湿潤養生		
ＯＰＣ	1	2.00	3.00	10.0
	2	2.00	3.00	9.00
	3	2.00	3.00	8.00
	平均	2.00	3.00	9.00
	養生	現場約 10℃湿潤養生		
参考値	－	1.50：鉄公	－	5.00：JH （8.00：鉄公）

表 1.24　ベースコンクリート圧縮強度試験

ｺﾝｸﾘｰﾄ種別	n	材齢７日		材齢 28 日	
		圧縮強度 (N/mm²)	弾性係数 (×10⁴N/mm²)	圧縮強度 (N/mm²)	弾性係数 (×10⁴N/mm²)
ＨＦＳＣ	1	4.80	0.93	9.76	1.35
	2	4.60	1.13	11.5	1.61
	3	4.80	1.16	10.7	1.67
	平均	4.60	1.07	10.7	1.54
	養生	20℃モールド内養生		材齢７日以降 20℃水中養生	
ＯＰＣ	1	22.7	2.18	37.3	2.52
	2	23.8	2.15	36.9	2.54
	3	22.0	2.28	35.2	2.43
	平均	22.8	2.20	36.5	2.50
	養生	20℃モールド内養生		材齢７日以降 20℃水中養生	

表 1.25　吹付けコンクリート圧縮強度試験

ｺﾝｸﾘｰﾄ種別	n	材齢 7 日		材齢 28 日		材齢 42 日		材齢 56 日	
		圧縮強度	*弾性係数*	圧縮強度	*弾性係数*	圧縮強度	*弾性係数*	圧縮強度	*弾性係数*
HFSC	1	7.6	0.84	16.4	1.80	14.7	1.86	19.7	2.16
	2	5.8	1.44	15.8	1.93	16.1	1.81	18.7	1.92
	3	8.0	1.67	17.3	1.78	15.9	1.96	20.7	1.78
	平均	7.1	1.32	16.5	1.84	15.6	1.88	19.7	1.95
	養生	ｺｱ抜き(7 日後)迄屋外養生(約 10～15℃)		ｺｱ抜き(15 日後)迄屋外養生(約 10～15℃)、以後 20℃水中養生		ｺｱ抜き(35～40 日後)迄屋外 10℃養生、ｺｱ抜き後 20℃水中養生		同左	
HFSC 天端採取	1	―	―	16.4	1.79	18.4	2.02	19.7	2.17
	2	―	―	15.2	1.66	14.9	1.66	22.6	2.17
	3	―	―	16.8	1.78	15.9	1.89	20.1	2.16
	平均	―	―	16.1	1.74	16.4	1.86	20.8	2.17
	養生	同上		同上		同上		同上	
OPC	1	24.6	2.07	32.8	2.76	34.9	2.55	39.2	2.67
	2	16.0	2.25	34.7	2.48	32.6	2.25	41.2	2.65
	3	18.3	2.24	34.1	2.36	32.9	2.23	―	―
	平均	19.6	2.19	33.9	2.53	33.5	2.34	40.2	2.66
	養生	同上		同上		同上		同上	
OPC 天端採取	1	―	―	30.1	2.03	27.1	2.28	40.9	2.36
	2	―	―	33.8	2.64	33.1	2.48	37.6	2.53
	3	―	―	31.0	2.52	25.5	2.20	―	―
	平均	―	―	31.6	2.40	28.6	2.32	39.3	2.45
	養生	同上		同上		同上		同上	
参考値	―	(仏:17)	―	18：JH、鉄公	0.40:JH 0.33:鉄公	同左	同左	同左	同左

単位：圧縮強度(N/mm²)、弾性係数(×10⁴N/mm²)

表 1.26　吹付けコンクリート割裂引張強度試験（材齢 28 日）

ｺﾝｸﾘｰﾄ種別	n	割裂引張強度(N/mm²)	
		側壁採取	天端採取
HFSC	1	3.03	3.05
	2	2.99	2.92
	3	3.00	3.06
	4	3.22	3.07
	平均	3.06	3.03
	養生	ｺｱ抜き(15 日後)迄屋外養生(約 10～15℃)、以後 20℃水中養生	
OPC	1	4.76	4.50
	2	5.07	4.89
	3	5.34	4.40
	4	5.23	5.36
	平均	5.10	4.79
	養生	同上	

表 1.27　透水試験結果

種類	水圧 (kg/cm²)	n	材齢 28 日	
			流出量 (cc/sec)	透水係数 (×10⁻⁹m/sec)
HFSC	5	1	1.47	249.674
		2	1.05	178.339
		3	0.0339	5.758
		平均	0.8513	144.59
OPC	10	1	0.0028	0.238
		2	0.0028	0.238
		3	0.00375	0.318
		平均	0.00125	0.265

表 1.28　空隙率と細孔径分布の測定

ｺﾝｸﾘｰﾄ種別	材齢	空隙量 (ml/g)	空隙面積 (m²/g)	空隙率 (%)
HFSC	56 日	0.1152	22.400	24.89
OPC	56 日	0.0847	16.577	18.34

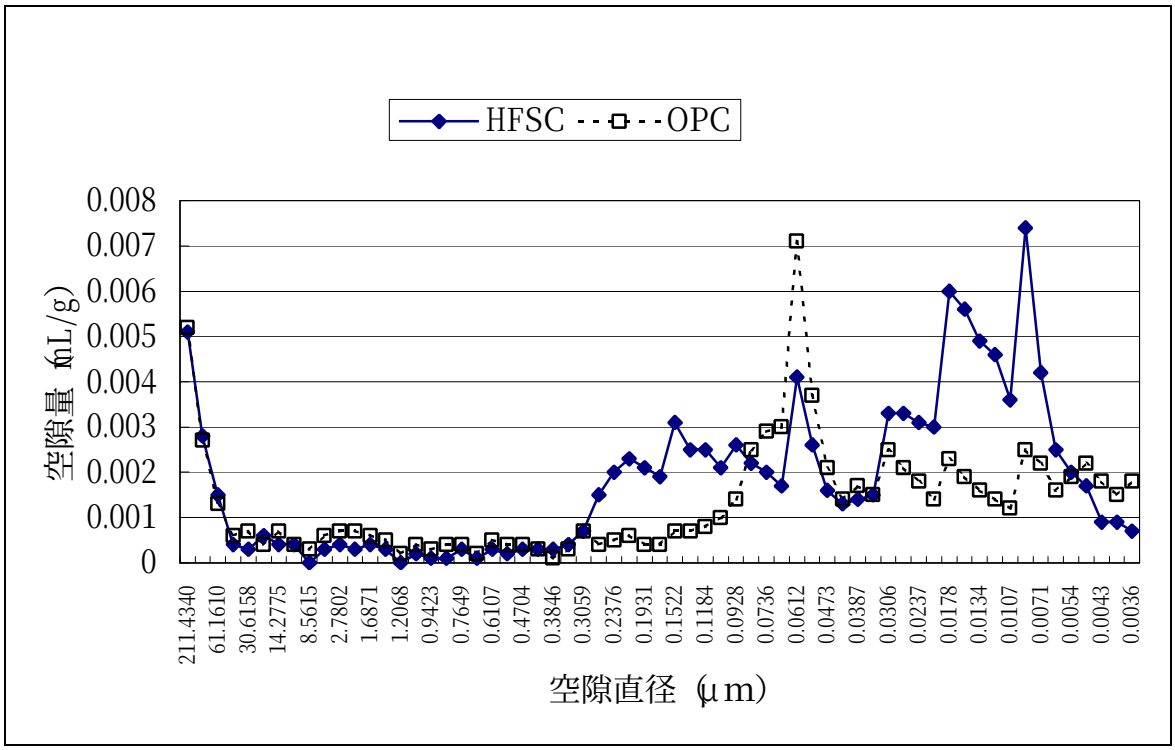


図 1.2　空隙径と空隙量の関係

写真 1.4　供試体切断面の状況（材齢 56 日、HFSC）

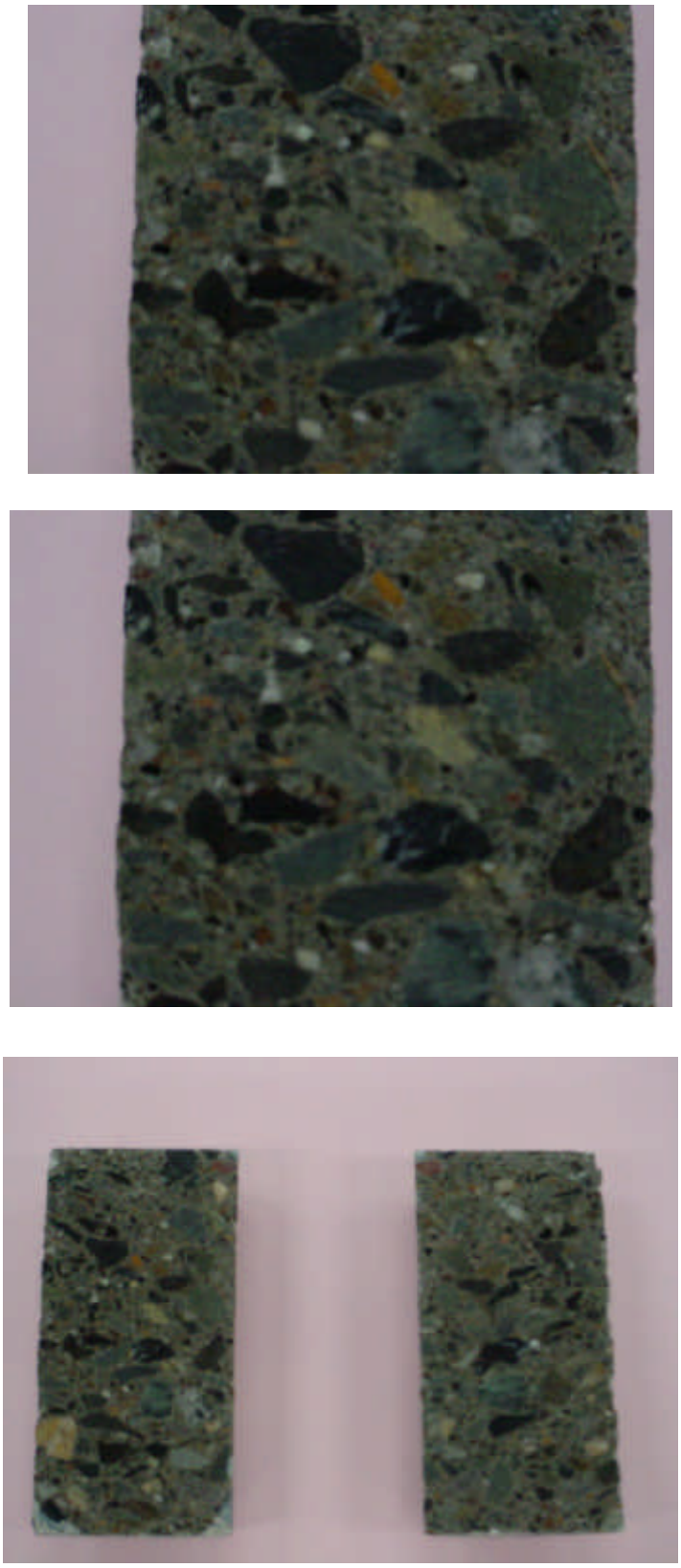


写真 1.5　供試体切断面の状況（材齢 56 日、OPC）

（3）考察

（i）施工性

表 1.22 より、HFSC 吹付けは圧送、付着、リバウンド、粉塵などに関して OPC と比べても全く遜色無い事から、吹付け施工それ自体に問題は無く可能と言える。

リバウンド率は、既往のトンネル構造物の吹付け実積標準値 20～30%[3)]に対して、HFSC で約 13%（OPC で約 15%）と非常に少なかった。これはシリカフュームを添加した吹付けコンクリートは非添加のものに比べて粘性が増大するため、リバウンド量が減少するという過去の実積[3)]と一致する。

粉塵発生量は、一般的にリバウンド率と正比例の関係にある[3)]とされるが、目視による観察結果もそれと同じ傾向で、HFSC の方が低粉塵であった。

（ii）圧縮強度

吹付けコンクリートの各種特性は時間経過と共に変化して行く。ここでは、時間経過を「初期≦1 日、1 日≦短期≦7 日、7 日≦中期≦28 日、28 日≦長期」と分類する。図 1.3 に示す HFSC と OPC の圧縮強度の経時変化図より、次の事が判る。

材齢 3 時間と 6 時間の HFSC の初期強度は OPC とほぼ等しい。

① 材齢 24 時間の HFSC の短期強度は平均値 3.33N/mm^2 であり、OPC の 9N/mm^2 と比べて 37%と小さい。

② その後も HFSC は中期～長期（7 日以降）の圧縮強度の伸びが悪く、OPC の半分程度の値である。

下表 1.29 に示す既往のトンネル構造物の吹付けコンクリートの基準値を参考に、「3 時間で 1.5N/mm^2 以上、1 日で 8N/mm^2 以上、28 日で 18N/mm^2 以上」を基準値と仮定する。この基準値と HFSC 実測値を比べると、

① 材齢 3 時間の初期強度は基準値を上回っている。

② 材齢 24 時間の短期強度は基準値（8N/mm^2）の半分以下である。

③ 材齢 28 日の中期強度は僅かながら基準値を下回っている。

今回の HFSC 吹付けコンクリート中のセメント量は 80kg/m^3 であり、OPC の 360kg/m^3 の 1/4.5 と少ないため、これに急結剤を添加したとしても初期～短期の強度発現は OPC に比べて小さいものと予想はしていた。フライアッシュのポゾラン反応により中長期には強度が増進すると考えていたが、強度の伸びが低く目標の 18N/mm^2 に到達するのに 28 日の 2 倍の 56 日を要した。

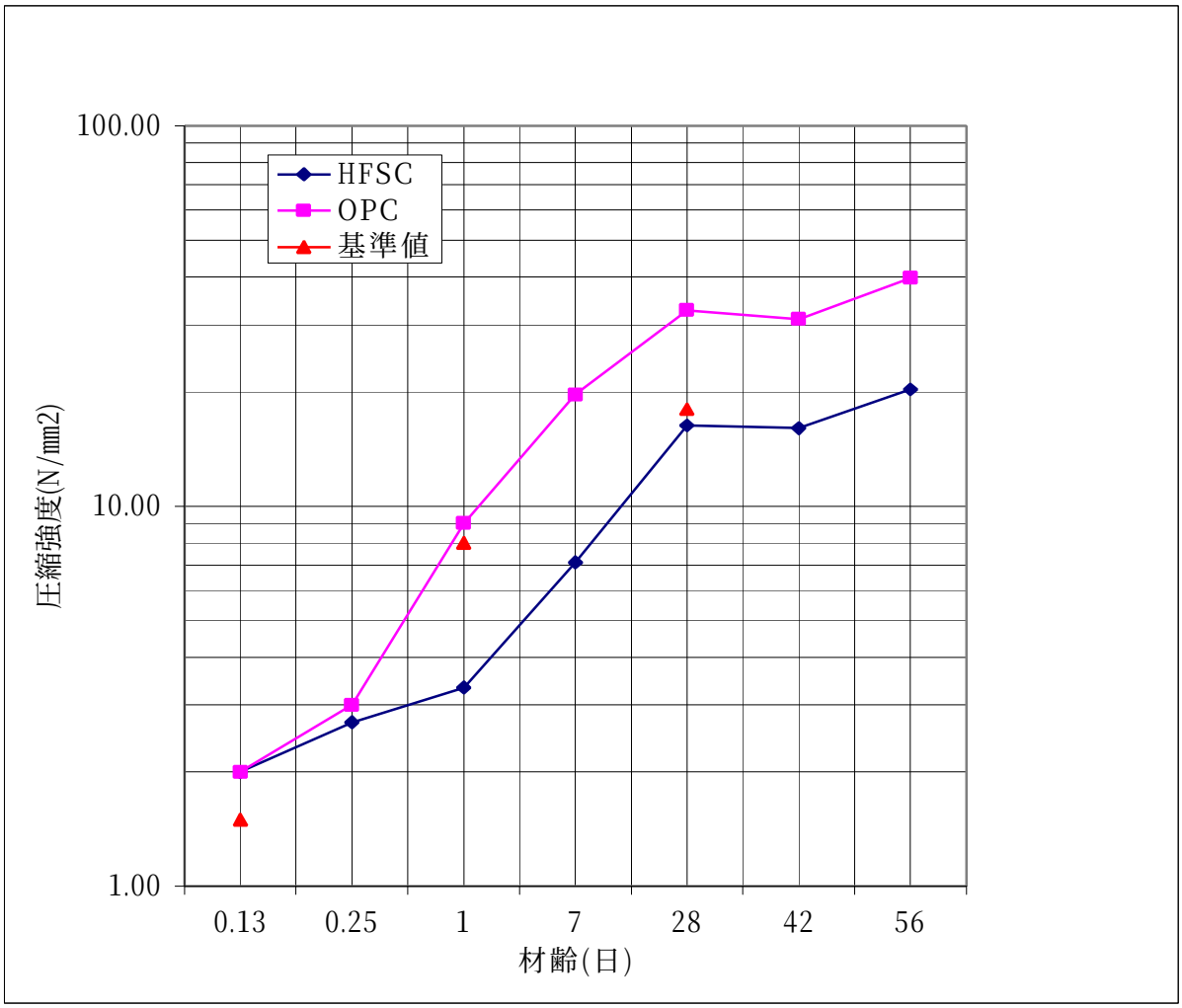


図 1.3　吹付けコンクリート圧縮強度

表 1.29　吹付けコンクリート強度試験の判定基準例（設計基準強度 18N/mm^2 の場合）[1)]

機関	時期・回数	判定基準
日本道路公団	トンネル施工延長 50m 毎に 1 回	1 日圧縮強度が 5N/mm^2 以上
		28 日圧縮強度が 18N/mm^2 以上
日本鉄道建設公団	掘削初期は 20m 毎に 1 回 その後は 50m 毎に 1 回	3 時間圧縮強度が 1.5N/mm^2 以上
		1 日圧縮強度が 8N/mm^2 以上
		28 日圧縮強度が 18N/mm^2 以上

（iii）スランプ

現行では、日本道路公団のトンネル施工管理要領[4)]と日本鉄道建設公団の土木工事標準示方書[5)]ともに設計基準強度 18N/mm^2 の場合、スランプの既定値は（8±2.0）cm である。また、土木学会のコンクリート標準示方書[2)]によれば、一般のコンクリート受入れ検査においてスランプ許容誤差は、スランプ 3cm 以上 8cm 未満の場合「±

1.5cm」、スランプ 8cm 以上 18cm 未満の場合「±2.5cm」である。

次に、プラントで練混ぜ始めてから現場で吹付け終わるまでの「練置き時間」は、土木学会コンクリート標準示方書 [2]によると「原則として外気温が 25℃を越える時で 1.5 時間、25℃以下の時で 2 時間を越えてはならない」とされている。一方、吹付けコンクリートの品質は、一般の打込みコンクリートに比べ施工性に関する種々の要因に大きく影響されるとして、「湿式では 60 分以内、乾式では 120 分以内を限度とすべき」という考えもある [3]。深地層処分場のトンネル施設は既往のトンネルに比べて深さ、広がりともに大規模である事から、運搬時間もより多くなる可能性がある。従って、現時点においては HFSC 吹付けコンクリート（湿式）のスランプ保持の目標値は「120 分以内で±2.5cm」相当が妥当であると考える。

これに対して、HFSC 吹付けコンクリートの実測結果は表 1.20 より「60 分後で－11.5cm」であり、練置き後のスランプダウンが過大である。事前の試験 STEP 1 のベースコンクリート練置き性状結果（表 1.9 参照）では、HFSC（減水剤 1.5%添加、コンクリート温度 20℃）のスランプダウンは「60 分後で－4.0cm」と比較的小さかった。両者の違いはコンクリート温度差＝20℃－14℃＝6℃である。このスランプダウンに関しては今後解明改善する必要がある。

（iv）弾性係数

吹付けコンクリートの弾性係数に関しては、施工管理上の基準値は今のところ我が国には存在しない。参考として、トンネル設計上の入力物性値（地山との相互作用の影響を受ける実際のトンネル挙動に合うように求めた吹付けコンクリートの 28 日後の見掛けの弾性係数）は、日本道路公団の解析マニュアル [6]では 4,000N/mm^2、日本鉄道建設公団の設計指針 [7]では 34,000kgf/cm^2＝3,332N/mm^2 が用いられている。また、日本鉄道建設公団より短期（7 日後）の弾性係数として 117,000kgf/cm^2＝11,466N/mm^2 という OPC 吹付けコンクリートの試験結果 [7]が示されている。

表 1.25 より、HFSC の弾性係数は、OPC の 50～80%でありやや小さいこと、7 日～56 日への時間経過と共に圧縮強度と同様に値が増加して行くことがわかった。7 日後の弾性係数は 13,200N/mm^2 であり、上記の参考値（11,466N/mm^2）に比べて 15%ほど大きいものであった。詳細は不明であるが、HFSC 吹付けコンクリートは一般的なトンネルの吹付けコンクリートと同程度の剛性を有しているものと推察される。

（v）引張強度

我が国において、現在のところ吹付けコンクリート引張強度の基準値は存在しない。材齢 28 日の引張強度を圧縮強度から推定すると [2]、次のとおりである。

$$f'_{tk}(t) = c\{f'_{ck}(t)\}^{1/2}$$

ここに、 $f'_{ck}(t)$：材齢 t 日におけるコンクリート圧縮強度特性値（N/mm^2）

$f'_{tk}(t)$：材齢 t 日におけるコンクリート引張強度特性値（N/mm^2）

c ：コンクリートの乾燥程度によって異なるが 0.44 が標準

$\therefore f'_{tk}(28)=0.44\{f'_{ck}(28)\}^{1/2}=0.44\times(18.0)^{1/2}=1.87\ N/mm^2$

この $1.87N/mm^2$ を吹付けコンクリートの目標参考値とする。材齢 28 日の HFSC の引張強度は、表 1.26 より $3N/mm^2$ であり、それを上回っている。

（vi）透水係数

一般的に、シリカフュームを添加したコンクリートは、「マイクロフィラー効果による高密度充填性」、「活性ポゾラン反応による性能改善」などにより、水密性が増し防水性も向上する、と言われる。しかしながら、今回の透水試験結果では、OPC の透水係数がバラツキ無く $2.65\times10^{-10}m/sec$ と小さな値であったのに対して、HFSC の方は短期～長期に渡る圧縮強度不足に連動するかのように、透水性の大幅アップを示した。特に、供試体 No.1 と No.2 が No.3 に比べて 2 桁大きく、$10^{-7}m/sec$ オーダーであった。この原因としては、供試体中に未充填のポーラスな部分があったためではないかと推測されたが、透水試験後この供試体は廃棄されてしまったため、空隙状態は確認できなかった。

そこで、この原因を追求するために追加実施した空隙率・細孔径分布の測定及び供試体切断面の目視観察の結果、以下のことが判った。

① 肉眼では、HFSC と OPC の空隙の違いは認められない。

② HFSC はトータルとして空隙量が OPC よりも 36%多い。

③ その寸法としては、HFSC は 0.2μm 以下の微細な空隙が OPC に比べて多く分布している。

従って、今回の OPC に比べた HFSC の高透水性は多量の微細空隙に起因するコンクリートとしての結合力の不足によるものかと思われる。しかしながら、この原因に関しては推測の域を出ない状況であるため、今後の試験等を通して確認する必要が有る。

一般のトンネル構造物に適用される吹付けコンクリートの要求機能の一つとして「水密性（吸水量、空隙量、透水度等）」が挙げられてはいるが、具体的な数値は現時点では設定されていない。

参考として、海外での防水性に関する基準には次の 2 つがある [3)]。

① CEN の規準：透水性 $10^{-12}m/sec$ 以下。

② ISO7031 の規準：個々の供試体では 50mm で、平均は 20mm 以下。

1.4　今後の検討課題

(1) ばらつき要因

吹付けコンクリートの強度は、通常の打込みコンクリートと異なり、施工条件によってかなりの影響を受け、ばらつきが多いのが現状である。設計基準強度を 18N/mm^2 とした場合、コア採取によって得られた供試体による圧縮強度は f'_c＝24～36N/mm^2 の範囲にあることが多い [1)]。この場合、割増し係数は 1.33～2.00 の範囲であるが、日本道路公団の吹付けコンクリートの強度管理基準 [4)]で示される割増し係数α＝1.375（別添資料-3 を参照）はこの範囲内にあり、ほぼ対応している。ここで、HFSC 吹付けコンクリートが既往の OPC と同様のバラツキ傾向にあると仮定すると、HFSC の目標強度は下表 1.30 の通りとなる。

表 1.30　HFSC の目標強度

材齢	目標値（N/mm^2）	割増し係数	目標強度（N/mm^2）
3 時間	1.5	1.375	2.1
1 日	8		11
28 日	18		25

通常の管理状態にある場合には、圧縮強度の変動はほぼ正規分布することが経験的に認められている。一方、HFSC 吹付けは国内では今回が始めてであり実積は殆ど無いのが実状である事、さらに OPC に比べてシリカフューム、フライアッシュ、減水剤が余計に配合されており材料自体の品質や材料同士の相性などバラツキ因子が多い事から、今後は室内吹付けベースコンクリートや実際の吹付け試験をとおして圧縮強度のバラツキ程度、即ち変動係数（V）を確認する必要がある。

(2) 実用化のための目標値設定

本年度の模擬トンネルでの実規模吹付け試験結果より、HFSC 吹付け施工それ自体は問題なく可能であることが確認されたが、圧縮強度、スランプダウン、止水性（密実性）の面で実使用は現状レベルでは困難と判断され、改善が必要であることが判った。

そこで、HFSC の構成材料の規格、配合比率、減水剤・急結剤の種類と相性、添加率などを総合的に見直しの上、再度模擬トンネルでの実規模吹付け試験を行うことにより、HFSC の吹付けコンクリートへの実用化の可否について最終判定すべきと考える。

そのためには、既往のトンネル構造物を参考にして、深地層研究所のトンネル施工に適用すべき吹付けコンクリートの要求性能の目標値を設定しておく必要が有る。現時点での考え方を表 1.31 にまとめる。

表 1.31　HFSC 吹付けコンクリートの目標値(案)

要件	単位	目標値	備考
スランプ	cm	20±2.5	
練置き時間	時間	2 以内	
圧縮強度（材齢 3 時間）	N/mm^2	2.1	割増し係数＝1.375 と仮定した場合。
圧縮強度（材齢 1 日）	N/mm^2	11	
圧縮強度（材齢 28 日）	N/mm^2	25	
引張強度	N/mm^2	(1.87)	
透水係数	m/sec	(10^{-10})	周辺地山と同等
岩盤との付着強度	N/mm^2	(0.5)	構造物
リバウンド率	%	20 以下	

注意：( ) は参考値。

＜参考文献＞

1）(社)土木学会コンクリート委員会：ｺﾝｸﾘｰﾄﾗｲﾌﾞﾗﾘｰ 102 トンネルコンクリート施工指針(案)、pp.71、（2000）

2）(社)土木学会コンクリート委員会：平成 11 年度版 コンクリート標準示方書[施工編]－耐久照査型－、pp.146、（2000）

3）(社)日本トンネル技術協会：トンネルの吹付けコンクリート、pp.125、（1996）

4）日本道路公団：トンネル施工管理要領（本体工編）、p.6、（1997）

5）日本鉄道建設公団：NATM 設計施工指針、pp.81、（1996）

6）日本道路公団 試験研究所：トンネル数値解析マニュアル、pp.3~36、（1998）

7）日本鉄道建設公団：NATM 設計施工指針、pp.335、（1996）

2. 鉄筋腐食挙動の把握

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、鉄筋腐食屋外暴露を行った。本試験は、室内で行われてい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した。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 φ150×150	―	―	飛沫帯、海中
鉄筋の腐食性状	有筋円柱 φ100×200	φ13 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	φ100×200 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φ100×200 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 に本試験に用いた材料を示す。

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	シリカフューム（983U）	エルケム社製	2.20	
	分級フライアッシュ オノダスーパーフロー	太平洋セメント社製	2.38	
細骨材	陸砂	静岡県小笠産	2.59	
粗骨材	硬質砂岩砕石（2005）	茨城県岩瀬産	2.64	
混和剤	高性能ＡＥ減水剤 フローリックＨＳ－７００Ｈ	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		－	φ13

フローリック HS－700H の成分比率＝減水成分：スランプ保持成分＝8：2

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した。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：シリカフューム：フライアッシュ
＝20%：20%：60%

表 2.3　コンクリートの配合

使用セメント	配合記号	W/C (%)	s/a (%)	単　位　量（kg/m³）					
				W	C	S	G	SP	AE
普通ポルトランド	OPC	30.0	55.0	165	550	877	732	C×1.5%	0.0165
低アルカリ性	HFSC	30.0	55.0	165	550	807	673	C×2.3%	0.1650

SP は高性能 AE 減水剤を示し、AE は空気を連行するための空気連行助剤を示す。

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、ミキサには強制二軸型ミキサを使用した。練混ぜ量は、1 バッチ 50 リットルとした。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、ふるい通過試料を鉄筋腐食試験供試体に使用した。

（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 を参考に製作した。

（i）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 に切断した。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した。鉄筋にマーキングし、型枠設置前の鉄筋重量を mg 単位で測定した。

（ii）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、φ100×200mm の型枠を用いて製作した。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 本設置した。

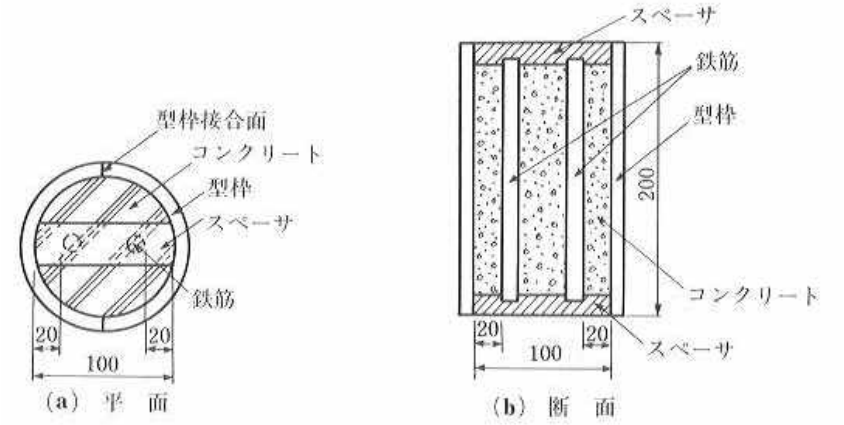


図 2.1　供試体の寸法および形状

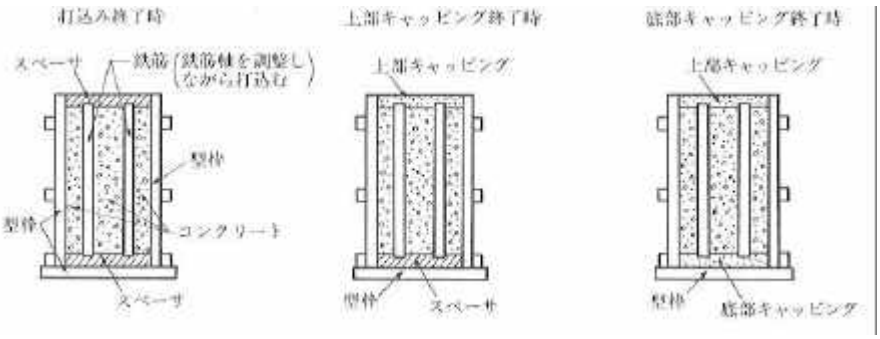


図 2.2　供試体の製作方法

（iii）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った。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った。材齢 3 日で型枠を脱型し、7 日間 60℃温水養生を行った。さらに、材齢 91 日まで標準水中養生を行い、暴露試験を開始した。

（3）塩分浸透試験供試体

供試体は、φ150×150 の無筋円柱供試体とした。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った。

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	コンクリート温度	棒状温度計	
		スランプフロー	JSCE-F502	B法
		空気量	JIS A 1128	
暴露開始前（材齢 91 日） 所定暴露期間終了直後	φ100 無筋円柱	圧縮強度	JIS A 1108	
	φ100 有筋円柱	腐食面積率	JCI 基準案	
		腐食減量	―	
		自然電位	―	
		分極抵抗	―	
	φ150 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）	φ５０×１００～５００×５００×１０００
使用鉄筋径	φ６～Ｄ１９
かぶり（mm）	１０～５０

暴露試験実施場所は、静岡県清水港防波堤とし、環境区分を飛沫帯と海中の 2 水準とした。

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。

写真 2.1 および 2.2 に、供試体暴露状況を示す。

写真 2.1　供試体暴露状況

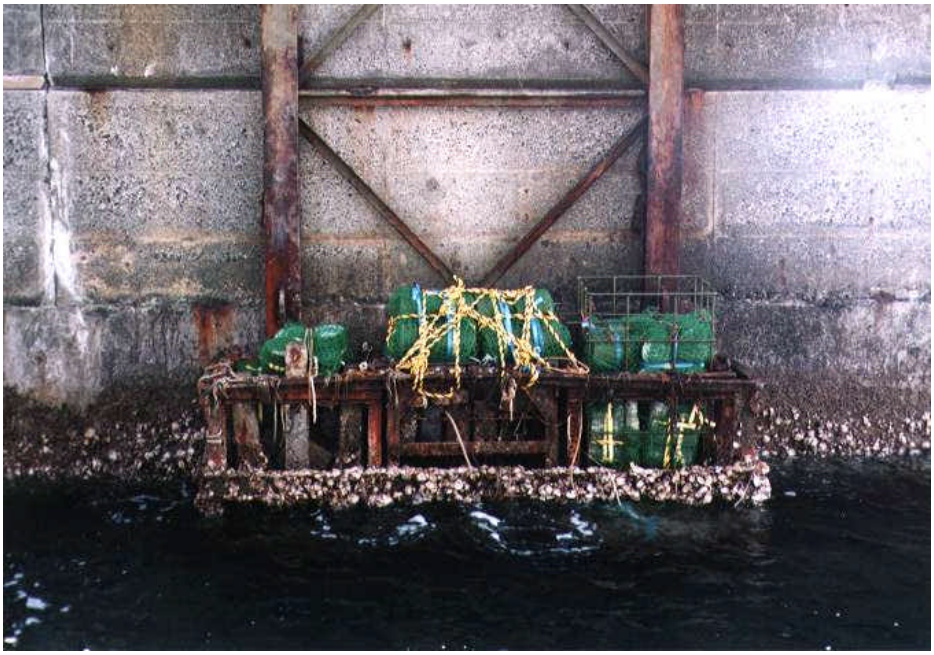


写真 2.2　供試体暴露状況

2.7　コンクリートの試験方法

2.7.1　所定の暴露期間経過後の試験

（1）腐食面積率

暴露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った。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した。

発錆面積の測定は、長さ方向の中心から 5cm ずつ計 10cm の部分について行った。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 単位で記録した。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、下式により求めた。

発錆面積率（%）＝発錆面積／測定面積×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った。重量および鉄筋径を測定し、下式により腐食減量を算出した。

$\Delta W = Wo - W - \{Wp \times (100 - S)/100\}$

ここに、ΔW：腐食減量（mg）

Wo：打設前の鉄筋重量（mg）

W：除錆前の鉄筋重量（mg）

Wp：非腐食部における表面物質重量（mg）

S：腐食面積率（%）

（3）自然電位および分極抵抗

自然電位および分極抵抗は、鉄筋腐食診断装置（日鉄テクノス社製）を用いて測定した。本装置は、交流インピーダンス法により、外部から電圧を印加し、その周波数を変えながら応答を求めることにより、分極抵抗を求めるものである。また、プローブ中央に銀／塩化銀の参照電極が設けられており、自然電位の測定も可能である。

供試体は、測定前 24 時間以上浸潤させ、測定時も雑巾等により湿潤状態とした。供試体端部から露出している鉄筋のコーティングを取り除き、作用極を取り付け、鉄筋中央部上の供試体表面にセンサを設置した。高周波パルスの周波数を 10Hz にセットし、電流レンジを自動モードで測定を行った。

（4）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った。

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。

2.7.2　供試体作成時の試験

供した作詞時の試験として、フレッシュコンクリートの試験、圧縮強度試験、塩化物イオン含有量試験、腐食面積率および腐食減量、自然電位、コンクリート抵抗、分極抵抗を測定した。

（1）フレッシュコンクリートの試験

練り上がり直後のフレッシュコンクリートの状態を調査するために、コンクリート温度、スランプフロー、および空気量を調査した。

（2）圧縮強度試験

暴露試験直前の圧縮強度を調査するために、暴露供試体と同一に養生した圧縮強度供試体により、材齢 91 日の圧縮強度試験を行った。

（3）塩化物イオン含有量試験

コンクリート中には、セメントや骨材中に含まれる塩分に加え、高性能 AE 減水剤中の塩分などの影響により、外部からの侵入塩分以外にも塩化物が含まれている。ここでは、暴露試験に先立って、各配合条件下において含まれる塩分量を測定した。

（4）腐食面積率および腐食減量

とくに HFSC では、低い pH の影響により、暴露開始前にすでに腐食を開始している可能性が考えられる。ここでは暴露試験の開始前に、供試体中に埋め込まれた鉄筋の腐食量を暴露試験前に調査し、初期値とする。

（5）自然電位

暴露試験中においては、非破壊検査として自然電位を測定する。ここでは、暴露試験開始前に自然電位の初期値を測定する。

（6）コンクリート抵抗

暴露試験中においては、非破壊検査としてコンクリート抵抗を測定する。ここでは、暴露試験開始前にコンクリート抵抗の初期値を測定する。

（7）分極抵抗

暴露試験中においては、非破壊検査として分極抵抗を測定する。ここでは、暴露試験

開始前に分極抵抗の初期値を測定する。

2.8　試験結果

本研究では、暴露試験開始前の供試体の初期値に関する試験を実施した。

(1) フレッシュコンクリートの試験

表 2.6 に、供試体作製時に測定した各配合のフレッシュ試験結果を示す。

HFSC 配合では、OPC 配合と同程度のスランプフローおよび空気量を得るための混和剤量が多くなった。フライアシュに含まれる未燃カーボンの影響により、高性能 AE 減水剤がフライアッシュ表面に吸着され、うまく分散しない。そのために、一定の減水効果が得られなかった。この吸着現象については、フライアッシュの未燃カーボン量のばらつきとともに、今後調査する必要がある。

表 2.6　フレッシュコンクリート試験結果

配合記号	高性能 AE 減水剤添加率（P×%）	助剤添加率*	ｺﾝｸﾘｰﾄ温度（℃）	ｽﾗﾝﾌﾟﾌﾛｰ（cm）	空気量（%）
OPC	1.50	3A	21.0	62.0×61.5	4.4
HFSC	2.30	30A	20.5	64.0×63.0	3.9

1A：P×0.001%

(2) 圧縮強度試験

表 2.7 に圧縮強度試験結果を示す。

表 2.7　圧縮強度試験結果

配合記号	圧縮強度（N/mm²）
	暴露開始時
OPC	94.2
HFSC	56.1

暴露開始材齢＝91 日、暴露環境区分＝飛沫帯

この供試体は、打設後 3 日間の温水養生を実施しかつ標準水中養生を行ったために、HFSC においても 56.1N/mm² とかなりの高強度が得られた。

(3) 塩化物イオン含有量試験

表 2.8 に塩化物イオン（全塩分）含有量試験結果を示す。

暴露以前にコンクリート中に含まれている塩化物の量は、非常に小さい値であった。

表 2.8　塩化物イオン含有量試験結果

環境区分	配合記号	塩化物イオン含有量（kg/m³） 暴露開始時
海中	OPC	0.14　（0.006%）
	HFSC	0.10　（0.005%）
飛沫帯	OPC	0.14　（0.006%）
	HFSC	0.10　（0.005%）

（4）腐食面積率および腐食減量

表 2.9 に腐食面積率測定結果を、表 2.10 に腐食減量測定結果を示す。

暴露試験前に、埋設した鉄筋に腐食している兆候は見られなかった。

表 2.9　腐食面積率測定結果

環境区分	配合記号	供試体番号	腐食面積率（%） 暴露開始時
海中	OPC	1	0.00
		2	0.00
		3	0.00
	HFSC	1	0.00
		2	0.00
		3	0.00
飛沫帯	OPC	1	0.00
		2	0.00
		3	0.00
	HFSC	1	0.00
		2	0.00
		3	0.00

腐食面積率：同一供試体内の鉄筋 2 本の平均値

表 2.10　腐食減量測定結果

環境区分	配合記号	供試体番号	腐食減量（mg）暴露開始時
海中	OPC	1	19
		2	14
		3	16
	HFSC	1	22
		2	5
		3	7
飛沫帯	OPC	1	19
		2	14
		3	16
	HFSC	1	22
		2	5
		3	7

腐食減量：同一供試体内の鉄筋 2 本の平均値

また、鉄筋の重量測定を行った結果、若干の減量が見られた。しかし、鉄筋の表面観察とあわせてみると、腐食の兆候も見られないし、この測定では除錆処置を行っていないので、腐食による減量ではなく、測定の誤差によるものではないかと考えられる。

（5）自然電位

表 2.11 に自然電位測定結果を示す。

飽和硫酸銅電極への換算＝測定値（飽和塩化銀電極）－89.5（mV、室温：20℃）

測定された自然電位の値を初期値として、暴露試験時の腐食状況のモニタリングの際に使用する。

暴露試験開始時の HFSC の自然電位は、OPC に比べ絶対値が大きく、腐食しやすい環境にあることがわかる。

表 2.11　自然電位測定結果（飽和硫酸銅電極換算値）

環境区分	配合記号	供試体番号	自然電位　（mV） 暴露開始時
海中	OPC	1-1	-125
		1-2	-112
		2-1	-129
		2-2	-149
	HFSC	1-1	-457
		1-2	-551
		2-1	-232
		2-2	-328
飛沫帯	OPC	1-1	-128
		1-2	-115
		2-1	-138
		2-2	-189
	HFSC	1-1	-331
		1-2	-238
		2-1	-363
		2-2	-351

（6）コンクリート抵抗

表 2.12 にコンクリート抵抗測定結果を示す。

測定されたコンクリート抵抗の値を初期値として、暴露試験時の腐食状況のモニタリングの際に使用する。

暴露試験開始時の HFSC のコンクリート抵抗の測定値は、OPC に比べ絶対値が大きく、腐食しやすい環境にあることがわかる。

表 2.12　コンクリート抵抗測定結果

環境区分	配合記号	供試体番号	コンクリート抵抗（kΩ）暴露開始時
海中	OPC	1-1	3.42
		1-2	3.58
		2-1	6.55
		2-2	3.76
	HFSC	1-1	22.0
		1-2	19.6
		2-1	55.4
		2-2	45.2
飛沫帯	OPC	1-1	4.73
		1-2	4.22
		2-1	6.73
		2-2	5.91
	HFSC	1-1	43.3
		1-2	35.6
		2-1	53.2
		2-2	47.1

（7）分極抵抗

表 2.13 に分極抵抗測定結果を示す。

測定された分極抵抗の値を初期値として、暴露試験時の腐食状況のモニタリングの際に使用する。

暴露試験開始時の HFSC の分極抵抗の測定値は、OPC に比べ絶対値が大きく、腐食しやすい環境にあることがわかる。

表 2.13　分極抵抗測定結果

環境区分	配合記号	供試体番号	分極抵抗（kΩ）暴露開始時
海中	OPC	1-1	0.908
		1-2	1.04
		2-1	2.19
		2-2	1.06
	HFSC	1-1	2.72
		1-2	2.27
		2-1	11.8
		2-2	8.34
飛沫帯	OPC	1-1	1.91
		1-2	2.27
		2-1	2.46
		2-2	0.828
	HFSC	1-1	6.75
		1-2	8.52
		2-1	9.44
		2-2	11.5

3. 実規模セグメントの製造計画の立案

3.1 セグメントコンクリートの配合決定試験

本試験は、「低アルカリ性コンクリート HFSC」をトンネル用の覆工セグメントに使用するためのコンクリート示方配合を定めるに当たり、コンクリートの配合を決定することを目的とする。

(1) コンクリートの仕様

これまで実施してきた研究から、コンクリートの仕様として次のものを考える。

HFSC は、シリカフュームを含んでおり、高性能 AE 減水剤を使用しないと施工に必要な流動性を確保することができない。従って、軟らかさの程度は高性能 AE 減水剤で調整することとなる。高性能 AE 減水剤で軟らかさを調整する場合、少しの添加量の違いで大きく軟らかさが変化する場合が多いために、高流動コンクリートとして使用するほうが、管理上も施工上も簡単である。ここでは、コンクリートの形態としては、締め固め不要高流動コンクリートとした。

コンクリートの形態：締め固め不要高流動コンクリート
設計基準強度：42 N/mm^2 （一般的なセグメントの設計基準強度を用いた）
基準材齢：28 日（一般的なセグメントの強度基準材齢を用いた）
骨材の最大寸法：20 mm
スランプフロー：65 cm±5
空気量：4.5%±1.0
セメントの種類：HFSC；OPC:SF:FA = 2:2:6
高性能 AE 減水剤の種類：サンフローパリック社製 HS700

(2) 示方配合

過去の HFSC に関する試験結果から、上記仕様を満足するコンクリートの配合として表 3.1 に示す 2 種類のコンクリート配合を検討した。

表 3.1　検討したセグメントコンクリートの示方配合

配合ｹｰｽ	粗骨材の最大寸法(mm)	ｽﾗﾝﾌﾟﾌﾛｰ範囲(cm)	空気量の範囲(%)	水結合材比 W/B (%)	細骨材率 s/a (%)	単　位　量（kg／m³）				
						水 W	ｾﾒﾝﾄ HFSC	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 AD
1	20	65±5	4.5 ±1	30.0	54.7	150	500	906	750	HFSC× 2.1%
2	20	65±5	4.5 ±1	27.3	54.7	150	550	897	743	HFSC× 2.1%

（3）試験練り方法

試験練りは、30 リットルでコンクリートを練り混ぜ、フレッシュコンクリートの状況を確認した後、標準養生と製品同一養生として蒸気養生を行う。蒸気養生は、前養生の後、蒸気を放出して行う。蒸気養生の開始は、打設終了後 2 時間経過した後とし、温度 20℃／h の割合で上昇させ、最高温度 60℃で一定時間保持した後、蒸気放出を止め、その後約 1 時間徐冷するのを標準とする。

本研究では、上記養生時間がコンクリートの強度に与える影響を調査するために、最高温度保持時間を 1 時間、2 時間、3 時間の 3 種類で強度試験を行った。

（4）性状評価試験

コンクリートの配合を決定するための性状評価試験項目を表 3.2 に示す。

表 3.2　性状評価試験項目

(1)	スランプフロー試験	高流動コンクリート施工指針試験方法（土木学会基準）(案) スランプフロー試験方法による。
(2)	V ロート試験	高流動コンクリート施工指針試験方法（土木学会基準）(案) 漏斗を用いた流下試験方法による。
(3)	空気量試験	高流動コンクリート施工指針試験方法（土木学会基準）(案) ﾌﾚｯｼｭｺﾝｸﾘｰﾄの空気量の圧力による試験方法による。
(4)	コンクリート温度測定	棒状温度計にて測定。
(5)	コンクリート中の塩化物含有量試験	ＪＩＳ Ａ ５３０８ 付属書５ による。
(6)	圧　縮　強　度　試　験	ＪＩＳ Ａ １１０８ による。

（5）フレッシュコンクリートの性状

配合 1 および 2 におけるフレッシュコンクリートの試験結果を表 3.3 に示す。

表 3.3　フレッシュコンクリートの試験結果

測定項目	ｽﾗﾝﾌﾟﾌﾛｰ	Ｖﾛｰﾄ試験	空気量	温　度	ｺﾝｸﾘｰﾄ中の塩化物含有量		
許容値	65±5 cm	9～20 秒	1.5±１%	5℃～35℃	0.3kg/m³以下		
配合１測定値	67×66cm	7.90 秒	5.5%	18℃	①	②	③
					0.023	0.022	0.020
					平　均	0.022 kg/m³	
配合２測定値	65×64cm	13.00 秒	4.9%	18℃	①	②	③
					0.013	0.015	0.014
					平　均	0.014 kg/m³	

（6）強度試験結果

配合 1 および 2、養生方法の違いなどをパラメータとした強度試験結果を表 3.4 に示す。

表 3.4　圧縮強度試験結果

配合 No.	養生方法	蒸気養生時の 60℃保持時間	試験材齢	圧縮強度 (N/mm²)	試験材齢	圧縮強度 (N/mm²)
1	標準				28 日	26.4
2	標準				28 日	29.5
1	製品同一	1 時間	18 時間	8.4	28 日	17.7
2	製品同一	1 時間	18 時間	12.3	28 日	19.3
2	製品同一	2 時間	18 時間	13.6	28 日	21.7
2	製品同一	3 時間	18 時間	15.5	28 日	22.3

（7）考察

28 日材齢の圧縮強度はどちらの配合も 42N/mm² を下回る結果となった。設計基準強度を早期に発現することは現配合では難しいと思われる。管理材齢を伸ばすこと（56 日あるいは 91 日）さらに水中養生行うことなどで設計基準強度を達成できるようにしたいと考える。

フレッシュ状態においては、高流動コンクリートとして、配合 1 はやや粘性が少ない。流れていく過程で分離する可能性があり、配合 2 がセグメントの配合としては望ましいと考える。

3.2　実規模セグメントの製造方法の検討

（1）検討の方法

低アルカリ性高流動コンクリート HFSC は、まだ供試体レベルの施工実績しかもたず、したがってその特性も供試体レベルの特性である。しかし、施工適用性の観点からは構造物としての特性（品質）の把握が必要である。ここでは、HFSC をセグメント

に使用することを考えて、セグメントの製造方法について検討することとした。

高流動コンクリートを用いたトンネル 2 次覆工用セグメントについては、普通セメントを用いた場合にはすでに実用段階にある。ここでは、高流動セグメントの製造実績を有する工場で、HFSC を高流動コンクリートとして使用しでセグメントを製造した場合、製造上の問題点を把握することを目的として、セグメント製造を行った。

（2）製造計画

（i）セグメントの種類と数量

セグメントは、A型セグメントを 2 ピース製造した。このセグメントの断面は、3.3 セグメント設計のところで検討した。セグメントを製造する場合に、型枠が非常に高価であり価格に占める割合が大きい。ここでは問題点の抽出とセグメント製造の実証ということに目的としているので、既設の型枠を使用した製造計画とした。

（ii）コンクリートの仕様および配合

コンクリートの仕様は、試験練時の仕様と同一とする。コンクリートの仕様を以下に示す。

<u>コンクリートの仕様</u>

コンクリートの形態：締め固め不要高流動コンクリート
設計基準強度：42 N/mm^2（一般的なセグメントの設計基準強度を用いた）
基準材齢：28 日（一般的なセグメントの強度基準材齢を用いた）
骨材の最大寸法：20 mm
スランプフロー：65 cm±5
空気量：4.5%±1.0
セメントの種類：HFSC；OPC:SF:FA = 2:2:6
高性能 AE 減水剤の種類：サンフローパリック社製 HS700
土木学会『高流動コンクリート施工指針』ランク 1 に準拠

配合は、試験練の結果、強度および分離抵抗性などから表 3.1 に示す配合 2 と定めた。

（iii）打設方法および蓋型枠の改良

・充填方法

下図のように型枠の頂部にあけた投入孔より、打設高さを 50cm 以下、打設速度は 0.2～0.3m^3/分として、高流動コンクリートを打設した。

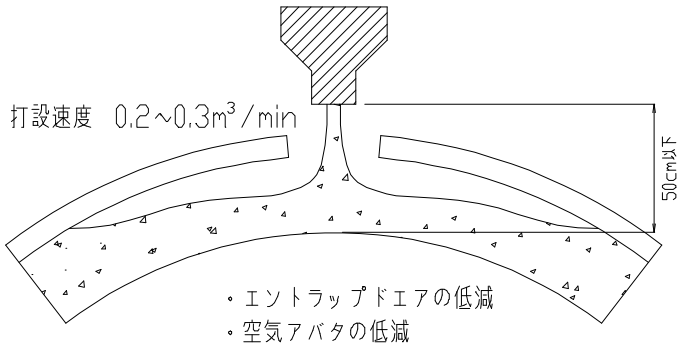


図 3.1　打設方法

・表面の気泡除去

蓋型枠にメッシュ間隔および線径を変化させた二重メッシュを取付け、その二重メッシュにより、表面の気泡除去を行う。詳細は下図に示す。

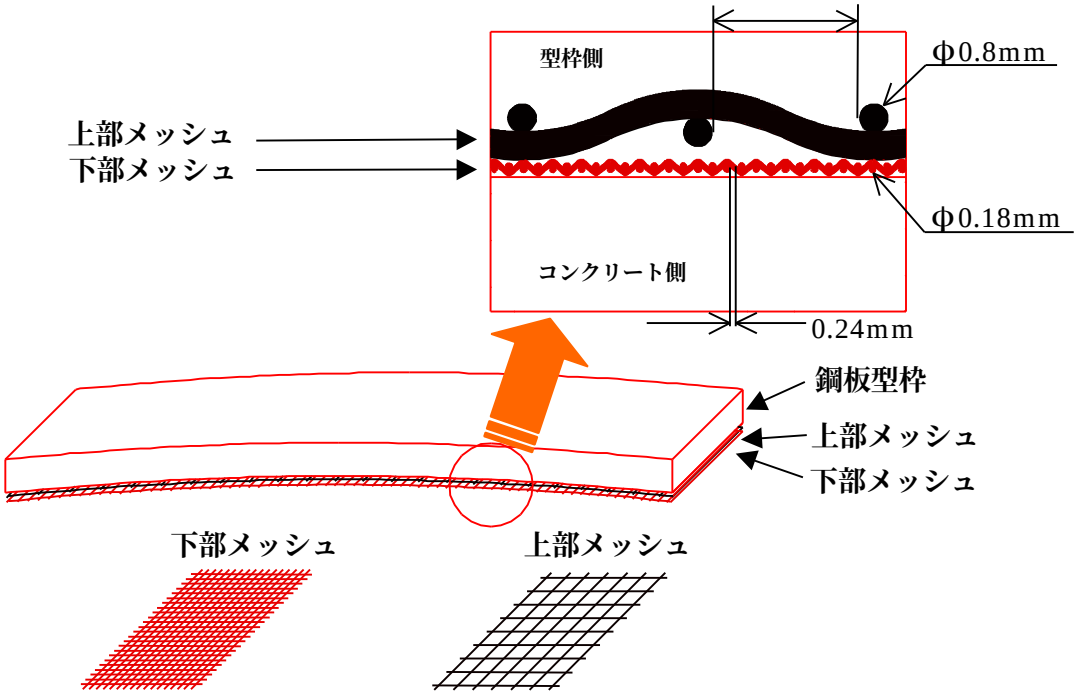


図 3.2　蓋型枠構造概略図

(iv) 養生方法

養生方法は、蒸気養生とする。蒸気養生時間は、最低 7 時間とし、最高温度は 60℃とする。最高温度保持時間は試験練の結果から 3 時間とした。

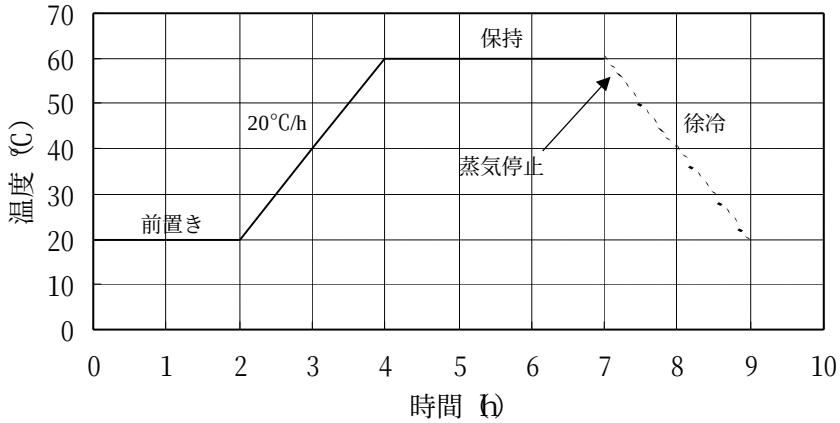


図 3.3　蒸気養生時間

（v）蒸気養生後の処置

通常のセグメントは、蒸気養生後は屋外に放置して出荷まで仮置きされる。本研究では、使用セメントがポゾランを多量に含んだセメントであることを考慮して、水中養生するケースと気中放置するケースの 2 つのケースで状況を観察することとした。

表 3.5　養生方法

養生パターン 1 ※1	**試験体を気中に露出した状態で、乾燥収縮にひび割れの発生状況を確認する。**
養生パターン 2 ※2	**試験体を水中養生した後、乾燥収縮によるひび割れの発生状況を確認する。**

セグメントとして 2 ピース製造したが、それぞれ養生パターン 1 と 2 に分けて養生の比較を行った。

（vi）セグメント製造検討フロー

本研究におけるセグメント試作の検討フローを図 3.4 に示す。

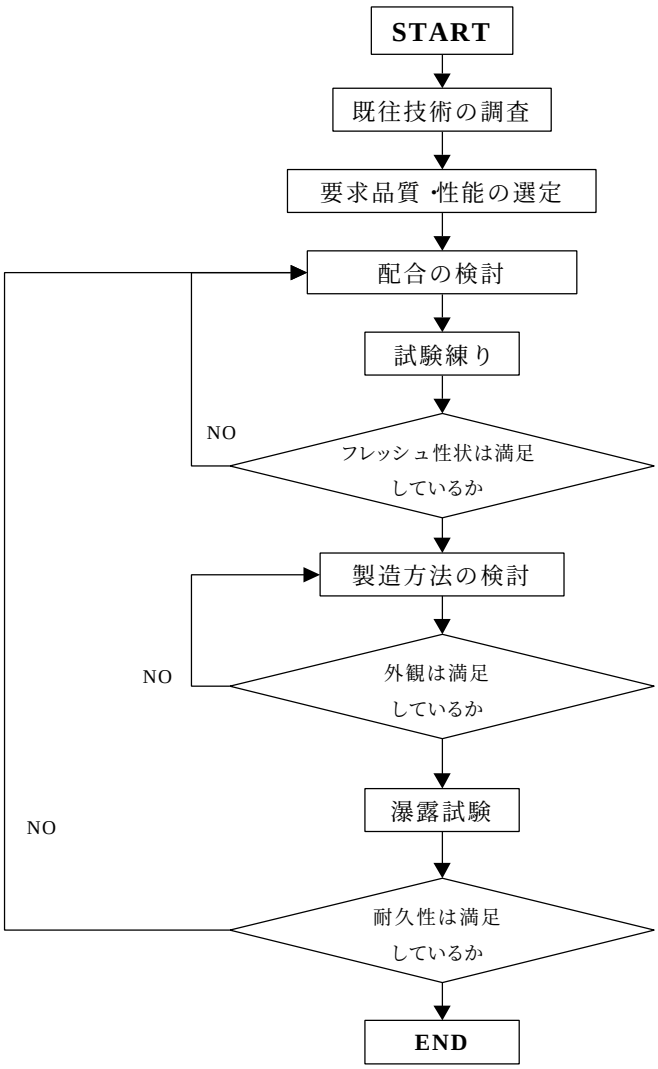


図 3.4　**品質管理フロー**

(3) 品質管理計画

セグメント試作時の品質管理項目は以下の通りとする。

以下の項目について行うものとする。

- **コンクリート用材料管理**
- **コンクリートの品質管理**
- **セグメントの外観寸法管理**

表 3.6　品質管理試験

種別	試験検査項目	内容
コンクリート用材料試験	細骨材試験	表面水量
		ふるい分け
		微粒分量
		密度・吸水
		単位容積
		有機不純物
		粘土塊量
	粗骨材試験	ふるい分け
		微粒分量
		密度・吸水
		単位容積
		すりへり
	セメント	品質証明
	混和材	〃
	混和剤	〃
	鉄筋	規格証明
	注入孔パイプ	〃
コンクリートの管理	コンクリート圧縮強度	脱型時・3,7,28 日強度
	練混時ミキサ負荷電流	練混完了時
	スランプフロー	フロー値
	V ロート	流下時間
	空気量	
	塩化物含有量	
セグメントの外観寸法	単位寸法	幅・厚み寸法

（4）セグメントの試作結果

打設状況および養生状況の写真を以下に示す。

写真 3.1　セグメント型枠（下枠の部分）

写真 3.2　コンクリート打設状況

写真 3.3　コンクリートの流動状況

写真 3.4　型枠脱型直後の状況

写真 3.5　型枠脱型直後の状況

写真 3.6　水中養生

（5）フレッシュコンクリートの性状

打設中のコンクリートの性状は、スランプ変化も特になく、セグメントの製造に影響するような問題は生じなかった。

表 3.7　コンクリートの練り上り直後の性状

供試体 No	試験時間	ｽﾗﾝﾌﾟﾌﾛｰ	V ﾛｰﾄ試験	空気量	温度
No.1	練り上がり直後	64×62cm	12.5 秒	8.0%	10℃
	20 分後	67.5×64cm	13.2 秒	4.4%	11℃
No.2	練り上がり直後	65×64cm	14.3 秒	6.0%	11.5℃
	20 分後	65×63cm	15.8 秒	3.7%	12℃

（6）コンクリート圧縮強度試験結果

セグメント試作時に採取した供試体の圧縮強度試験結果を表 3.8 に示す。

表 3.8　圧縮強度試験結果

コンクリート圧縮強度試験					
養生方法	材　令	許容値	№	圧縮強度	
蒸気養生 3 時間	18 時間 (脱型)	15 N／mm²	①	12.6	平　均 12.9 N/mm²
			②	13.4	
			③	12.6	
蒸気養生 3 時間＋水中 20℃	7 日	―	①	19.7	平　均 20.2 N/mm²
			②	20.5	
			③	20.5	
蒸気養生 3 時間＋水中 20℃	28 日	42 N／mm²	①	20.0	平　均 19.7 N/mm²
			②	19.6	
			③	19.6	
蒸気養生 3 時間＋水中 20℃	56 日	42 N／mm²	①	24.1	平　均 23.0 N/mm²
			②	22.9	
			③	21.9	
蒸気養生 3 時間＋水中 20℃	91 日	42 N／mm²	①	25.3	平　均 25.6N/mm²
			②	26.0	
			③	25.6	

（7）試験結果のまとめおよび考察

フレッシュ性状確認試験においては、スランプフロー試験・V ロート試験はともに、土木学会『高流動コンクリート施工指針』粉体系高流動コンクリートランク 1 に準拠した流動性および材料分離抵抗性が得られた。

空気量に関しては、一般のセグメントでは、美観上の理由から、1.5%程度に制限しているものが多い。本研究では、高性能 AE 減水剤を使用し一般のコンクリートと同じ

4.5%の空気量が得られる配合とした。空気を混入するために必要な AE 剤は、フライアッシュ中の未燃カーボンに吸着されその効果が左右される。今回はあらかじめ試験練時に空気の連行性を確認して試作をおこなったが、フライアッシュの未燃カーボンの含有量が低かったこともあって、空気が多く連行される結果となった。今後フライアッシュ中のカーボン量を制限するとともに、ばらつきに対する検討が必要である。

コンクリート圧縮強度試験においては、脱型強度が平均 12.9N/mm^2 で許容値として規定した 15N/mm^2 を下回った。

28 日強度においては、製品同一養生・標準養生・水中養生ともに設計基準強度である 42N/mm^2 を下回った。フライアッシュ高含有しているために、初期の蒸気養生の効果が少なく、長期の強度発現が大きいものと推定される。従来の製品の製造過程にこだわらないで、長期強度管理や製品の水中養生など HFSC に最適な製造方法を採用する必要がある。

3.3　セグメントの設計

3.3.1　ＴＢＭで掘削した山岳トンネルのセグメント設計の考え方

セグメントは従来土被りの比較的薄い軟弱な地盤を対象としたシールド工法で多く用いられてきた。岩盤を対象とした山岳トンネルの用いられた例は、宮ヶ瀬ダムの導水路トンネルのみである。この両者では、セグメント（一次支保として吹付コン等もあるが）に作用する荷重の考え方が異なっている。

本項においては、それらの考え方の違いについて言及し、幌延の深地層研究所におけるこのシールドセグメントの設計法あるいはその適応性について検討を行う。

両者において、大きく異なることは、セグメントにかかる荷重の設定方法であると考えられ以下にはその概要を示す。

（1）シールドトンネル

シールドトンネルにおいては、掘削対象地山として軟弱地山を想定しているが、土被りとしては大きなものを考えておらず一般的には 30～40M 程度のものである。それ以上のものは大深度とよばれるものである。

荷重設定の際において、土の分類を行い、粘性土においては、土圧と水圧を一体として考慮し、全土被り重量を採用する。砂質土においては、土圧と水圧を分離して考えセグメント外径の 2 倍以下では全土被り重量を荷重とする。全土被り重量が 2 倍を超えるときは原則として緩み土圧を採用する。但し、緩み高さは、2 倍を下限としている。

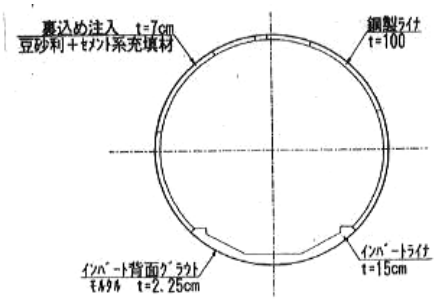
（2）山岳トンネル

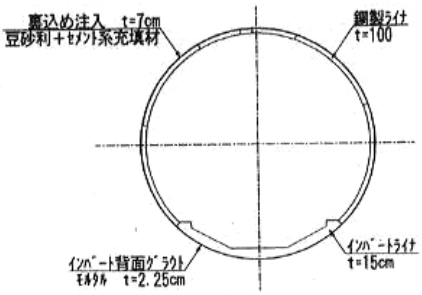
山岳トンネルに分類される TBM においては一次支保としてのセグメントは一般的にはあまり用いられず吹付コンクリートや鋼製支保工、ロックボルトが用いられることが多いのが現状である。セグメント（ライナーと呼ぶことが多いが）は岩盤強度が低くTBMのメイングリッパが使用できないときとかシールドジャッキによって推進が必要な時に限定されている。したがって基本的な考え方においてはTBMは比較的良好な岩盤における高速掘進を目指す工法であることから支保の設計において明確な設計手法は確立されていないので地山の荷重についてはあまり計算を実施していないことが多い。

一般的な支保に対する荷重の設定についても、明確な方法論が確立されている訳ではなく、岩盤の分類によって支保工にかかる荷重をテルツアーギの表等から設定することも一つの方法となっている。最近では計算機能力の向上や計算技術の進歩によってFEM等の解析によって支保を設計することが多くなってきている。この方法は、支保と地山を一体化して支保が安定性を確保できるかどうかを見る方法であり、荷重を設定して支保の安定性を検討するわけではない。

また水圧に関しては、考慮しないことを原則としている。これは山岳トンネルにおいては、大きな土被りの地山を施工することがあるが、それを考慮すると支保として成立しないからである。したがって水抜きを基本として水圧が支保にかからないように施工を行うこととなる。

以下には、鋼性のセグメント例であるが、山岳トンネルにおける道路トンネルと水路トンネルにおける施工例を2例示す。





荷重区分	等分布荷重
荷重(tf/m²)	5.75
荷重想定範囲	0.5D
適用推力(t/本)	50
鋼製ライナ重量(kg)	586

荷重区分	等分布荷重
荷重(tf/m²)	11.5
荷重想定範囲	1.0D
適用推力(t/本)	100
鋼製ライナ重量(kg)	638

避難坑（飛騨トンネル）
鋼製ライナ例

支保工・覆工パターン例（新内川第二地点）

岩盤等級	分　類	支保方法	覆工方法	種別	備考
C_H級以上	長期的に崩落、肌落ちの恐れのない岩盤	無支保	無覆工	第１種	
C_M級	長期的に風化、崩落の恐れがある岩盤	無支保	吹付けコンクリート t＝4cm	第２種(a)	
C_H～C_L級	工事中に肌落ちの恐れがあり、長期的には崩落の恐れがある岩盤	金　網	吹付けコンクリート t＝8cm	第２種(b)	
C_L級	掘削時に肌落ちがあり、長期的には崩落の恐れがある岩盤	鋼製リング支保工	吹付けコンクリート t＝8～14cm	第２種(c)	
D級	掘削中にメイングリッパ使用不能、長期的には地圧のかかる岩盤	スチールセグメント	内張鉄板＋モルタル填充	第３種	

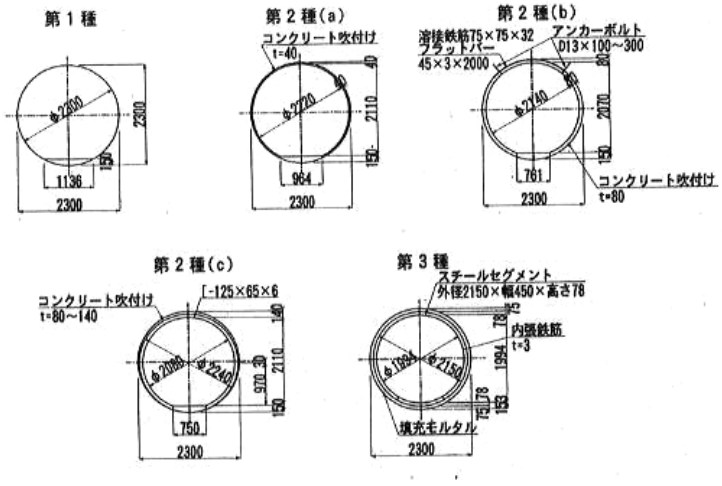


図 3.5　セグメントの例

これらの事例から考えると山岳トンネルにおいては地山条件にもよるが想定荷重を 1D 程度のものとしていることがわかる。

以上の比較からシールドトンネルでは想定荷重を 2D とし、最大荷重設定としては山岳トンネルのものより大きい荷重を設定することが多いと考えられる。幌延深地層研究センターにおいて TBM を用いて掘削を行うものとすると一次支保としては、その地山の強度特性や地山性状から塑性変形や膨張性が予測されることから支保耐力のあるラ

イナやセグメントを建て込む必要性が出てくるものと思われる。

したがって幌延においては、一次支保としてのセグメントは、適切な（例えば土圧の測定結果を反映等）荷重設定をしてその耐力を確保するセグメントとする必要がある。

幌延深地層研究センターの土質条件については、現在十分は把握されていない状況であるので、ここでは、HFSC を使用したセグメントの製造の可能性を調べるために試設計を行うという観点から、シールド工法で施工するセグメントとして試設計を行う。

3.3.2　設計概要

（1）設計の流れ

設計の手順は、

① 荷重の設定

② セグメント本体に作用する断面力の設計

③ 断面決定（配筋量、厚さと作用応力算定）

④ 継ぎ手の設計

である。

（2）土の分類のよる荷重の考え方

荷重算定に当たっての土の分類：

シールドトンネルが施工される地盤条件はきわめて複雑であるが、セグメントの断面力算定に当たっては、土を大別して粘性土と砂質土との 2 種類に分類する。

粘性土：土圧と水圧を一体として考えるほうが妥当と思われる土

砂質土：土圧と水圧を分離して考えるほうが妥当と思われる土

緩み高さ：

粘性土、砂質土で土かぶりがセグメント外径の 2 倍以下の場合については、アーチング効果はないと考え、全土かぶり重量をとる。

標準セグメントでは、長年にわたって作用する荷重を対象とし、砂質土の場合、土かぶりがセグメント外径の 2 倍以下ではアーチング効果はないと考えて、全土かぶり重量をとり、2 倍を超える場合には原則として緩み土圧をとっている。

ただし、緩み土圧を緩み高さに換算したとき、これがセグメント外径の 2 倍以下の場合には、緩み高さは 2 倍以下になる事はないとし、2 倍をその下限としている。また、粘性土の場合は全土かぶり重量をとっている。

土圧の考え方を図 3.6 に示す。

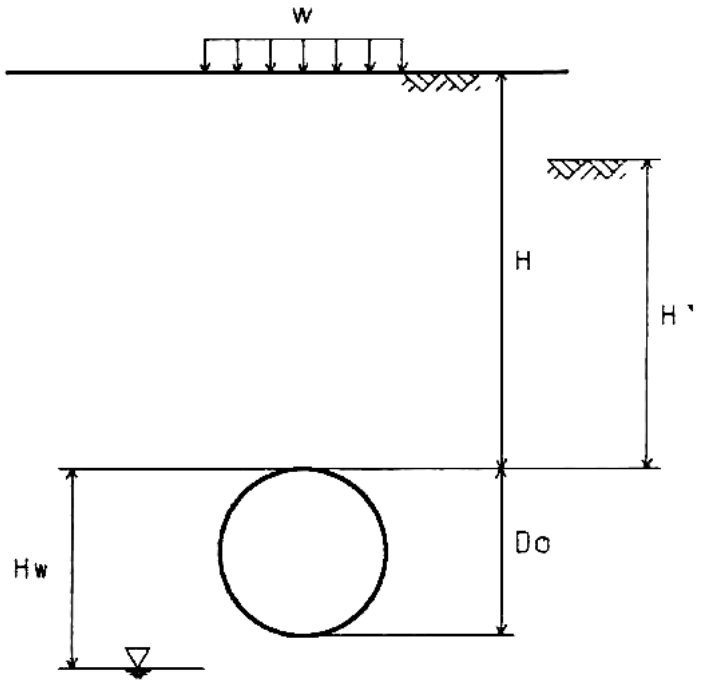


図 3.6　荷重の考え方

荷重の算定方法は以下の通りである。

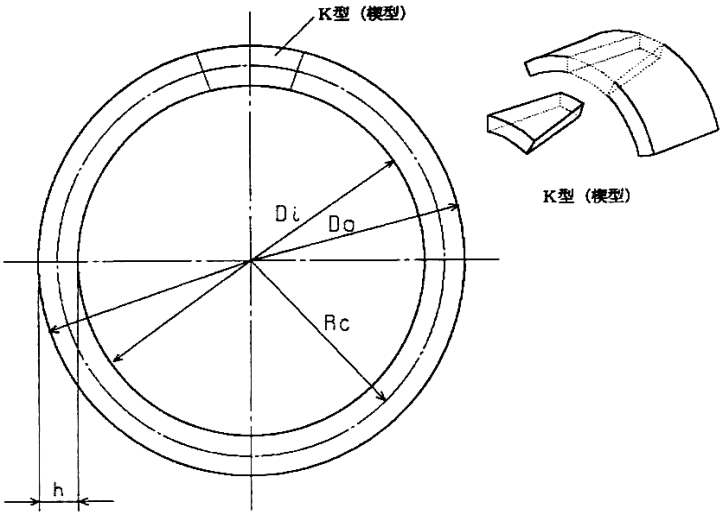
w ＝ 10.00 kN／m^2　Do ＝2.550 m　H ′＝ 2.875 m（**換算土被り**）

H ＝3.700 m　※「**設計荷重の算定**」**の項参照**

Hw ＝-6.000 m

3.3.3　セグメントの形状

試設計を行うセグメントの形状は、深地層研究センターの抗道の形状に近いものとして、内径 2.2m **として行う。図** 3.7 **にセグメントの形状を示す。**



○ セグメント外径：Do ＝ 2550.0 mm
○ 〃 内径：Di ＝ 2200.0 mm
○ 〃 図心半径：Rc ＝ 1187.5 mm
○ 〃 厚さ：h ＝ 175.0 mm
○ 〃 幅：B ＝ 1000.0 mm
○ 分 割 数 ＝ 5 個

図 3.7 セグメントの形状

3.3.4 材料の許容応力度

(i) 許容応力度

セグメントに使用される構造材料の許容応力度を表 3.9 に示す。

表 3.9 材料の許容応力度

材 料		引張(N/mm²)	圧縮(N/mm²)	せん断(N/mm²)
鋼 板	SS400	160	160	90
鉄 筋	SD295	180	180	—
ボルト	8.8	290	—	200
	降伏点応力度	660		
コンクリート	σck＝42 N/mm²		16	

ただし、一時的荷重（ジャッキ推力）に対しては許容応力度を上記値の 50%まで割増しする。

(ii) ヤング係数

不静定力または弾性変形の計算では、鉄筋およびコンクリートのヤング係数を次のようにする。

鉄筋のヤング係数　　Es ＝ 210 kN/mm²

コンクリートのヤング係数　Ec ＝ 33 kN/mm²

断面の決定または応力度の計算では、鉄筋およびコンクリートのヤング係数を次のようにする。

鉄筋のヤング係数　　Es ＝ 210 kN/mm²

コンクリートのヤング係数　Ec ＝ 14 kN/mm²

ヤング係数比　　$n = \frac{Es}{Ec} = 15$

3.3.5　設計条件

設計条件として、考慮する諸定数は以下の通りとする。

○ 土かぶり（換算値）：H' ＝ 2.875 m

○ 地下水位　　：Hw＝ -6.000 m（GL –9.700 m）

○ 上載荷重　　：w ＝ 10.00 kN/m²

○ 土質　　：－

○ 標準貫入試験測定値（N 値）：N＝ －

○ 土の内部摩擦角　　：φ＝考慮せず

○ 土の粘着力　　：c ＝考慮せず

○ 土の単位体積重量（地下水位以上）：γ ＝ 22.0 kN/m³

○ 〃 （ 〃 以下）：γ' ＝ 22.0 kN/ m³

○ 水の 〃 ：γw ＝ 10.0 kN/ m³

○ 地盤反力係数：k ＝ 5.00 MN/ m³

○ 側方土圧係数：λ ＝ 0.50

○ ジャッキ推力：P ＝ 1000 kN／本×10 本

（注）セグメントの設計方針は、日本下水道協会発行の「シールド工事用標準セグメント」によって計算を行う。

3.3.6　設計荷重の算定

（i）緩み高さの算定

ゆるみ高さの算定に関しては、想定した地盤条件から土のアーチング効果が期待できず、土かぶりが全部緩むと考える。セグメントに作用する土圧の考え方を図 3.8 に示す。

緩み高さ：H

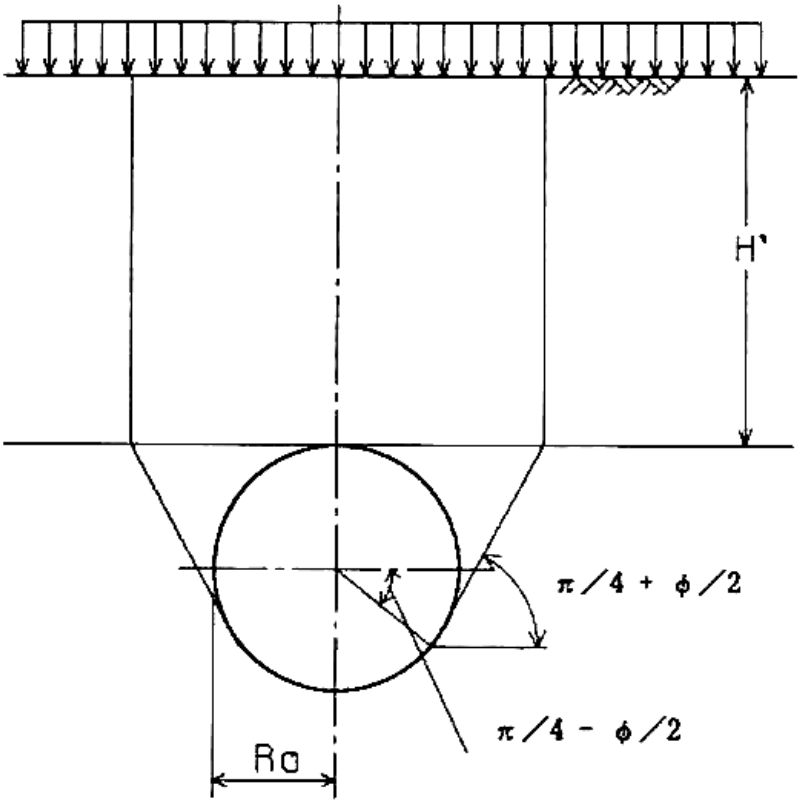


図 3.8　作用土圧の考え方

本試設計における作用する土被り厚さは、次の通りである。

H ＝ H'

＝ 2.875 m（換算値）

（ii）鉛直荷重：PV1

上載荷重：w　＝ 10.00 kN/m²

土圧　　：Psv ＝ γ・H

＝ 63.26 kN/m²

$\therefore$ Pv1 ＝ w＋PsV

＝ 73.26 kN/m²

（iii）**上部水平荷重：**P_{H1}

PH1 ＝ λ｛PV1＋（Do／2－Rc）γ｝

＝ 37.59 kN/m²

（iv）**下部水平荷重：**P_{H2}

PH2 ＝ λ｛PV1＋（Do／2＋Rc）γ｝

＝ 63.72 kN/m²

（v）**自重による下部反力荷重：**Pg

トンネル 1m **当たりの重量：**Wg $= \dfrac{\pi\ (Do^2 - Di^2)}{4} \times 2.6$

＝ 33.95 kN/ m²

セグメントの円周率単位当たり重量：g $= \dfrac{Wg}{2\pi \cdot Rc}$

＝ 4.55 kN/m²

$\therefore$ Pg ＝ π・g

＝ 14.29 kN/m²

（vi）**抵抗土圧：**q

抵抗土圧による変位量：δ

$\delta = \delta_1 - \delta_2$

$$\delta = \frac{(2Pv1 - PH1 - PH2)\,Rc^4}{24\,(?Ec \cdot I + 0.0454k \cdot Rc^4)}$$

$= 2.465982 \times 10^{-4}$ m

$\therefore$ q ＝ k・δ ＝ 1.23 kN／m²

抵抗土圧による変位量の考え方を図 3.9 **に示す。**

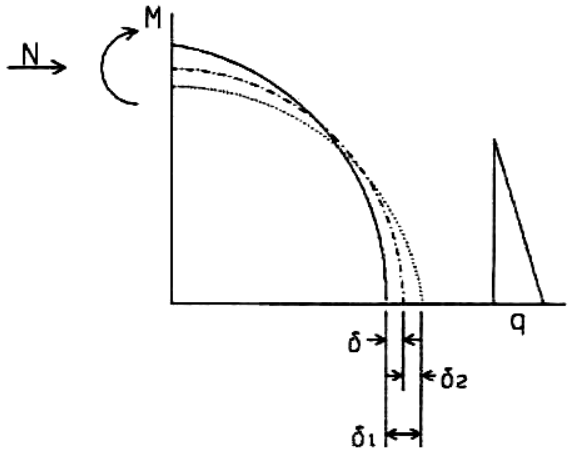


図 3.9　抵抗土圧による変位量

ただし δ_1　：土圧、水圧による水平変位量

δ_2　：抵抗土圧による逆の水平変位量

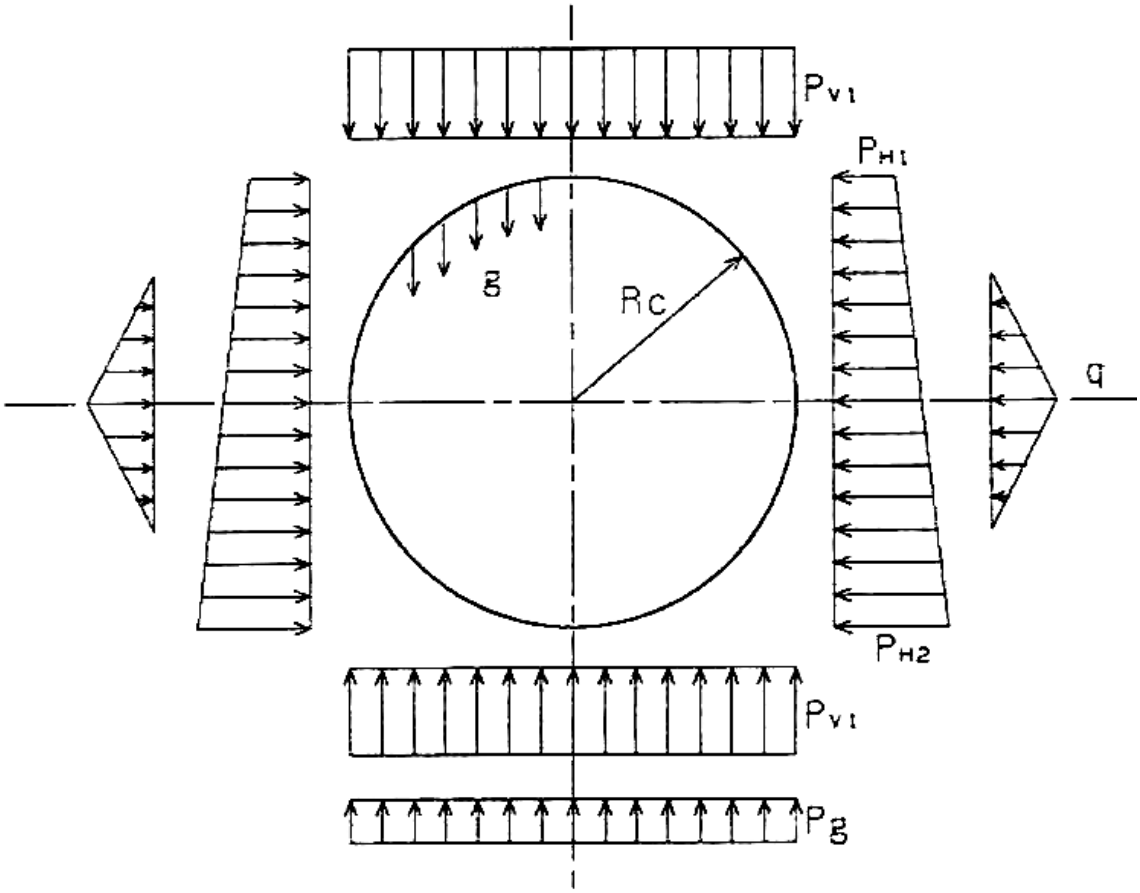
η　：曲げ剛性の有効率（＝100%）

Ec ＝ 33×10^6 kN/m^2

I　：1m 当りの断面二次モーメント

3.3.7　作用荷重分布図

上記の設計荷重算定をまとめて、トンネルに作用する荷重を図 3.10 に示すように考える。



鉛直荷重	： P_{v1}	＝	73.26 kN/m²
上部水平荷重	： P_{H1}	＝	37.59 kN/m²
下部水平荷重	： P_{H2}	＝	63.72 kN/m²
セグメントの円周単位当り重量	： g	＝	4.55 kN/m²
自重による下部反力荷重	： Pg	＝	14.29 kN/m²
抵抗土圧	： q	＝	1.23 kN/m²

図 3.10　作用荷重

3.3.8　自重、土圧、水圧による断面力の算定

(i) 鉛直等分布荷重

$$Mv1 = \frac{1}{4}(1-2\sin^2\theta)\,Pv1 \cdot Rc^2$$

$$Nv1 = Pv1 \cdot Rc \cdot \sin^2\theta$$

$$Qv1 = -Pv1 \cdot Rc \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta$$

（ii）水平等分荷重

$$MH1 = \frac{1}{4}(1-2\cos^2\theta)\ PH1 \cdot Rc^2$$

$$NH1 = PH1 \cdot Rc \cdot \cos^2\theta$$

$$QH1 = PH1 \cdot Rc \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta$$

（iii）水平等変分布荷重

$$MH0 = \frac{1}{48}(6-3\cos\theta-12\cos^2\theta+4\cos^3\theta)(PH2-PH1)\ Rc^2$$

$$NH0 = \frac{1}{16}(\cos\theta+8\cos^2\theta-4\cos^3\theta)(PH2-PH1)\ Rc$$

$$QH0 = \frac{1}{16}(\sin\theta+8\sin\theta \cdot \cos\theta-4\sin\theta \cdot \cos^2\theta)(PH2-PH1)\ Rc$$

（iv）抵抗土圧

$0 \leqq \theta \leqq \frac{\pi}{4}$ の場合

$$Mq = (0.2346-0.3536\cos\theta)\ k \cdot \delta \cdot Rc^2$$

$$Nq = 0.3536\cos\theta \cdot k \cdot \delta \cdot Rc$$

$$Qq = 0.3536\sin\theta \cdot k \cdot \delta \cdot Rc$$

$\frac{\pi}{4} \leqq \theta \leqq \frac{\pi}{2}$ の場合

$$Mq = (-0.3487+0.5\sin^2\theta+0.2357\cos^3\theta)\ k \cdot \delta \cdot Rc^2$$

$$Nq = (-0.7071\cos\theta+\cos^2\theta+0.7071\sin^2\theta \cdot \cos\theta)\ k \cdot \delta \cdot Rc$$

$$Qq = (\sin\theta \cdot \cos\theta-0.7071\cos^2\theta \cdot \sin\theta)\ k \cdot \delta \cdot Rc$$

（注）$\frac{\pi}{2} \leqq \theta \leqq \pi$ での Qq は $0 \leqq \theta \leqq \frac{\pi}{2}$ での Qq に絶対値は等しく符号は逆になる

（v）自重

$0 \leqq \theta \leqq \frac{\pi}{2}$ の場合

$$Mg = \left(\frac{3}{8}\pi-\theta \cdot \sin\theta-\frac{5}{6}\cos\theta\right)\ g \cdot Rc^2$$

$$Ng = (\theta \cdot \sin\theta - \frac{1}{6}\cos\theta)\ g \cdot Rc$$

$$Qg = -(\theta \cdot \cos\theta + \frac{1}{6}\sin\theta)\ g \cdot Rc$$

$\frac{\pi}{2} \leqq \theta \leqq \pi$ **の場合**

$$Mg = \{-\frac{1}{8}\pi + (\pi - \theta)\sin\theta - \frac{5}{6}\cos\theta - \frac{1}{2}\pi \cdot \sin^2\theta\}\ g \cdot Rc^2$$

$$Ng = (-\pi \cdot \sin\theta + \theta \cdot \sin^2\theta - \frac{1}{6}\cos\theta)\ g \cdot Rc$$

$$Ng = (-\pi \cdot \sin\theta + \theta \cdot \sin^2\theta - \frac{1}{6}\cos\theta)\ g \cdot Rc$$

$$Qg = \{(\pi - \theta)\cos\theta - \pi \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta - \frac{1}{6}\sin\theta\}\ g \cdot Rc$$

3.3.9 合成断面力

部材の角度毎に作用する断面力を表 3.10 **に示す。**

P_{v1} ＝ 73.26 kN/m^2　　P_{H1} ＝ 37.59 kN/m^2　　P_{H2} ＝ 63.72 kN/m^2

g ＝ 4.55 kN/m^2　　P_g ＝ 14.29 kN/m^2　　q ＝ 1.23 kN/m^2

R_C ＝ 1.1875 m　　**断面二次モーメント** I ＝ 44661.5×10^{-8} m^4/m

地盤反力係数 k ＝ 5×10^3 kN/m^3　　**曲げ剛性の有効率** η ＝ 100（%）

ヤング係数 E_c＝ 33×10^6 kN/m^2　　δ ＝ 2.465982×10^{-4} m

表 3.10　合成断面力

θ（°）	M（kN･m/m）	N（kN/m）	Q（kN/m）
0	10.741	53.952	0.000
10	10.054	55.250	-6.555
20	8.087	58.963	-12.209
30	5.109	64.587	-16.203
40	1.521	71.372	-18.032
50	-2.203	78.453	-17.514
60	-5.588	84.970	-14.822
70	-8.227	90.232	-10.405
80	-9.825	93.792	-4.888
90	-10.225	95.481	1.038
100	-9.409	95.117	6.756
110	-7.486	92.725	11.591
120	-4.706	88.801	14.954
130	-1.414	83.975	16.492
140	1.996	78.919	16.095
150	5.131	74.278	13.875
160	7.643	70.578	10.146
170	9.262	68.204	5.349
180	9.822	67.387	0.000

	θ（°）	M（kN･m/m）	N（kN/m）
＋Mmax	0	10.741	53.952
－Mmax	90	-10.225	95.481

断面力図を図 3.11 に示す。また、最大断面力を表 3.11 に示す。

（1m 当り）

－ 軸　　力 －　　－曲げモーメント－

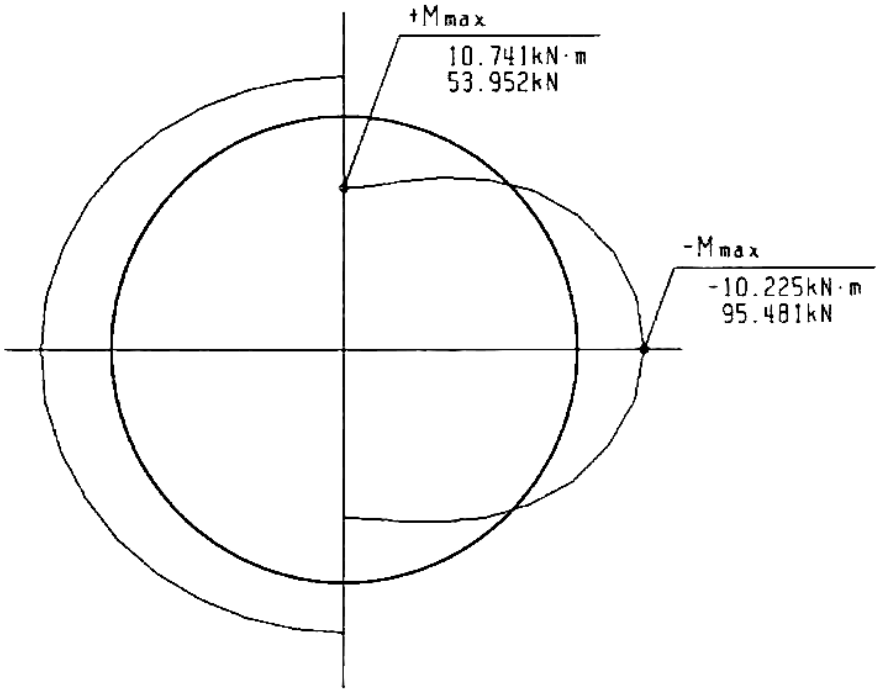


図 3.11　トンネル断面に作用する断面力分布図

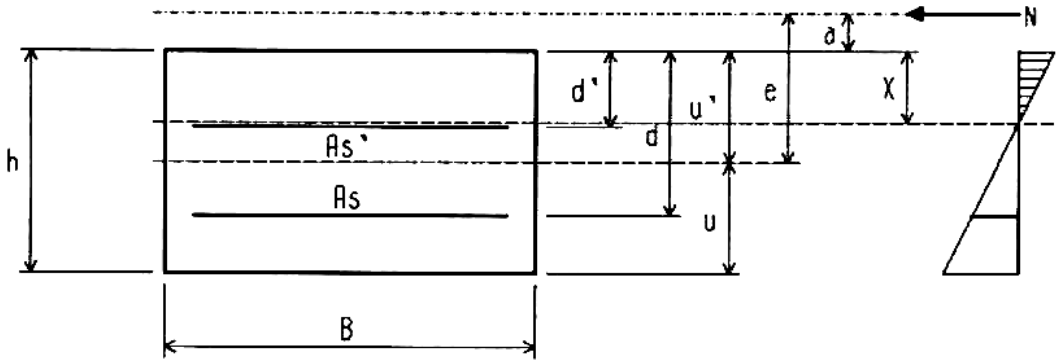
表 3.11　最大断面力（1m 当り）

区分	断　面　力	
正曲げ	M（kN･m）	10.741
	N（kN）	53.952
負曲げ	M（kN･m）	-10.225
	N（kN）	95.481

3.3.10　本体断面に発生する応力度の算定

（i）正曲げ

想定する断面形状配筋を図 3.12 に示す。



B ＝ 1000 m　　As' ＝ 7.602×10² mm²（D13×6）

H ＝ 175 m　　d' ＝ 60 mm

As ＝ 7.602×10² mm²（D13×6）

d ＝ 130 mm

図 3.12　断面および配筋

（a）最大曲げモーメント（θ＝0°）

M ＝ 10.741 kN•m/m　　N ＝ 53.952 kN/m

（b）重心位置の算定

$$u' = \frac{\sum A \cdot y}{A} = \frac{(B \cdot h^2)/2}{B \cdot h}$$

＝ 87.5 mm　　**u** ＝ 87.5 mm

（c）重心より軸力作用位置までの距離の算定

e ＝ M／N ＝ 199.1 mm

（d）断面コアの算定

A ＝ B・h ＝ 17500.0 mm²

$$I = \frac{B \cdot u'^3 + B \cdot u^3}{3}$$

＝ 446615.0 mm⁴

$$\alpha = \frac{I'}{A(h - u')}$$

＝ 29.2 mm

（c)、（d）により、e＞αとなるから、断面には圧縮と引張の両応力が作用する。

（e）偏心距離：a（圧縮縁より軸力作用位置までの距離）

$$a = e - u' = 111.6\ \mathrm{mm}$$

（f）中立軸の位置：x（圧縮縁から中立軸までの距離）

$$x^3 + 3a \cdot x^2 + \frac{6n}{B}\{As'(a+d') + As(a+d)\}x - \frac{6n}{B}\{As' \cdot d'(a+d') + As + d(a+d)\} = 0$$

$$x = 56.6\ \mathrm{mm}$$

（g）コンクリートに発生する最大圧縮応力度：σc

$$\sigma c = \frac{N \cdot x \cdot B}{\frac{B}{2}x^2 + n\{As(X-d) - As(d-As)\}}$$

$$= 4.21\ \mathrm{N/mm^2} < 15\ \mathrm{N/mm^2}$$

（h）主鉄筋に発生する圧縮応力度：σs'

$$\sigma s' = n\frac{\sigma c}{x}(x-d')$$

$$= -3.80\ \mathrm{N/mm^2} < 180\ \mathrm{N/mm^2}$$

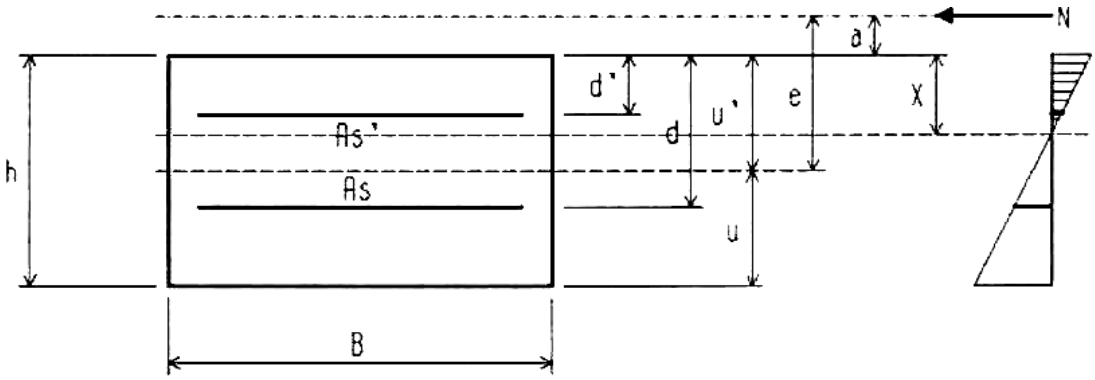
（i）主鉄筋に発生する引張応力度：σs

$$\sigma s = n\frac{\sigma c}{x}(d-x)$$

$$= 81.90\ \mathrm{N/mm^2} < 180\ \mathrm{N/mm^2}$$

（ii）負曲げ

想定する断面形状配筋を図 3.13 に示す。



B ＝ 1000 mm　　As' ＝ 7.602×10² mm²　（D13×6）

h ＝ 175 mm　　d' ＝ 45 mm

As ＝ 7.602×10² mm²　（D13×6）

D ＝ 115 mm

図 3.13　断面および配筋

（a）最大曲げモーメント（θ＝90°）

M ＝ 10.225 kN･m/m　　N ＝ 95.481 kN/m

（b）重心位置の算定

$$u' = \frac{\sum A \cdot y}{A} = \frac{(B \cdot h^2)/2}{B \cdot h}$$

＝ 87.5 mm　　**u** ＝ 87.5 mm

（c）重心より軸力作用位置までの距離の算定

e ＝ M／N ＝ 107.1 mm

（d）断面コアの算定

A ＝ B・h ＝ 175000 mm²

$$I = \frac{B \cdot u'^3 + B \cdot u^3}{3}$$

＝ 446615000 mm⁴

$$\alpha = \frac{I'}{A\ (h-u)}$$

＝ 29.2 mm

（c)、（d）により、e＞αとなるから、断面には圧縮と引張の両応力が作用する。

（e）偏心距離：a（圧縮縁より軸力作用位置までの距離）

$$a = e - u' = 19.6\ \mathrm{mm}$$

（f）中立軸の位置：x（圧縮縁から中立軸までの距離）

$$x^3 + 3a \cdot x^2 + \frac{6n}{B}\{As'(a+d') + As(a+d)\}x$$

$$-\frac{6n}{B}\{As' \cdot d'(a+d') + As \cdot d(a+d)\} = 0$$

$$x = 60.4\ \mathrm{mm}$$

（g）コンクリートに発生する最大圧縮応力度：σc

$$\sigma c = \frac{N \cdot x \cdot B}{\frac{B}{2}x^2 + n\{As'(x-d') - As(d-x)\}}$$

$$= 4.19\ \mathrm{N/mm^2} < 15\ \mathrm{N/mm^2}$$

（h）主鉄筋に発生する圧縮応力度：σs'

$$\sigma s' = n\frac{\sigma c}{x}(x-d')$$

$$= 16.02\ \mathrm{N/mm^2} < 180\ \mathrm{N/mm^2}$$

（i）主鉄筋に発生する引張応力度：σs

$$\sigma s = n\frac{\sigma c}{x}(d-x)$$

$$= 56.79\ \mathrm{N/mm^2} < 180\ \mathrm{N/mm^2}$$

3.3.11　曲げひびわれの検討

（i）ひびわれ幅：ω（正曲げ）

$$\omega = k\{4c + 0.7(Cs - \phi)\}\left(\frac{\sigma_{se}}{Es} + \varepsilon_{cs}'\right)$$

ここで、

c	＝	38.5 mm	：かぶり
φ	＝	13 mm	：鉄筋径
Cs	＝	167 mm	：鉄筋の中心間隔
σse	＝	81.90 N/mm²	：引張鉄筋の応力度
Es	＝	2.1×10⁶ N/mm²	：鉄筋のヤング係数
ε'cs	＝	150×10⁻⁶	：乾燥収縮およびクリープ考慮の数値

より、

ω ＝ 0.1414 mm ＜ ωa

ωa ＝ 0.0050　　c ＝ 0.1925 mm（一般環境）

上記検討結果より、ひびわれ幅は許容値を超えていない。

（ii）ひびわれ幅：ω（負曲げ）

$$\omega = k\ \{4c + 0.7\ (Cs - \phi)\} \left(\frac{\sigma_{se}}{Es} + \varepsilon'_{cs} \right)$$

ここで、

c	＝ 53.5 mm	：かぶり
ϕ	＝ 13 mm	：鉄筋径
Cs	＝ 167 mm	：鉄筋の中心間隔
σ_{se}	＝ 56.79 N/mm^2	：引張鉄筋の応力度
Es	＝ 2.1×10^6 N/mm^2	：鉄筋のヤング係数
ε'_{cs}	＝ 150×10^{-6}	：乾燥収縮およびクリープ考慮の数値

より、

ω ＝ 0.1563 mm ＜ ωa

ωa ＝ 0.0040　　c ＝ 0.2140 mm（腐食性環境）

上記検討結果より、ひびわれ幅は許容値を超えていない。

3.3.12　本体の抵抗モーメント

中立軸の位置：x

$$x = \frac{-n\ (As' + As)}{B} + \sqrt{\frac{\{n\ (As' + As)\}^2 + 2n \cdot B\ (As' \cdot d' + As \cdot d)}{B^2}}$$

＝ 46.9 mm

断面二次モーメント：I

$$I = \frac{B \cdot x^3}{3} + n\ \{As'\ (x - d')^2 + As\ (d - x)^2\}$$

＝ 11508.9×10^4 mm^4

抵抗モーメント：M_{ra}'

セグメントの場合、鉄筋の抵抗モーメントで本体強度が決定される。したがって、

$M_{ra}' = M_{rs} = \sigma_{sa} \cdot Zs$ より（σ_{sa}：鉄筋の許容引張り応力度）

$$M_{ra}' = \sigma_{sa}\ \frac{1}{n\ (d - x)} = 16.6 \times 10^6\ \text{N}\cdot\text{m}$$

抵抗モーメント：M_{ra}' ＝ 16.6 kN･m/R

破壊モーメント：M_{ru}' ＝ 41.5 kN･m/R

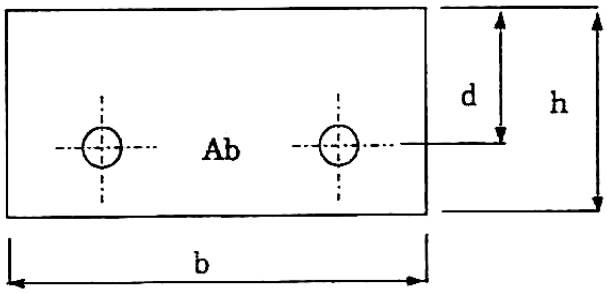
3.3.13　セグメント継手の検討

「シールド工事用標準セグメント」のセグメント性能表によれば、セグメント継手の効率は、セグメント本体の規格値（M_{ra}）の 60%を要求している。

継ぎ手の設計を行う際の形状および寸法を図 3.14 に示す。

抵抗モーメント：M_{ja} ＝ 16.6×0.6 ＝ 10.0 kN･m/R

破壊モーメント：M_{ju} ＝ M_{ja}×2.5 ＝ 25.0 kN･m/R



b ＝ 100 cm
h ＝ 17.5 cm
d ＝ 11.5 cm
Ab＝ 6.06 cm²
（M22×2 本）

図 3.14　継ぎ手の構造

中立軸の位置 x は

$$x = \frac{n \cdot Ab}{b} \cdot \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{2 \cdot b \cdot d}{n \cdot Ab}} \right)$$

$$= 3.753 \text{ cm}$$

（i）コンクリートの破壊圧縮応力度 σck ＝ 42 N/mm² に達するモーメント：M_{cr}'

$$M_{cr}' = \frac{\sigma ck}{2} \left\{ B \cdot x \left(d - \frac{x}{3} \right) \right\}$$

$$= 80.77 \text{ kN･m} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \text{(c)}$$

（ii）ボルトの破壊強度 σs ＝ 846 N/mm² に達するモーメント：M_{br}'

$$M_{br}' = \frac{\sigma s \cdot B \cdot x^2 \left(d - \frac{x}{3} \right)}{2n \left(d - x \right)}$$

$$= 52.55 \text{ kN･m} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \text{(d)}$$

(c)、(d) より　$M_{cr}' > M_{br}'$ よりボルトの破壊モーメント Mb は、

$M_{br} = M_{br}'$

$= 52.55$ kN・m

となる。

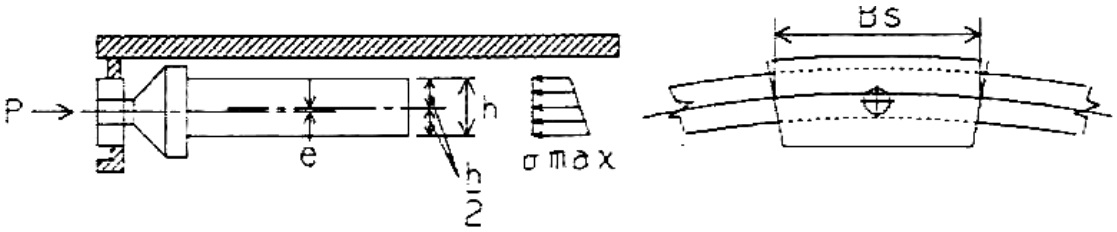
従って、セグメント継手の破壊モーメント $M_{ju} = 25.00$ kN・m であるから

$M_{br} > M_{ju}$

となり、セグメント継手ボルトは M22（8.8）を 2 本使用する。

3.3.14　ジャッキ推力に対する検討

ジャッキ推力はセグメントに図 3.15 のように作用すると考える。



Bs ＝ 70.0 cm

h ＝ 17.5 cm

図 3.15　ジャッキ推力の作用位置

○ P　：ジャッキ 1 本当りの推力 ＝ 1000000 N

○ Ao ：スプレッダーシューに接するセグメント面積

$Ao = Bs \cdot h = 1225.00 \times 10^2$ mm²

○ e　：ジャッキとセグメントの偏心距離 ＝ 10 mm

○ σ_{ca}：セグメントの許容圧縮応力度（一時的荷重）

$\sigma_{ca} = 150 \times 1.65 = 24$ N/mm²

○ I　：受圧面の断面二次モーメント $= \dfrac{Bs \cdot h^3}{12}$

$I = 31263.0 \times 10^4$ mm⁴

セグメントに発生する最大圧縮応力度：σmax

$$\sigma max = \frac{P}{Ao} + P \cdot e \frac{h/2}{I}$$

$= 10.96$ N/mm² ＜ 24 N/mm²

4.　グラウト適用性確認のための基礎データ取得

4.1　目標とするグラウトの性能

平成 9 年度に実施した人工バリア材の変質に関する研究の中で、低アルカリセメント OFS および HSF を用いて作ったモルタルが、最大寸法 20mm の砂利の中を充填しコンクリートとなることを確認した。したがって、現在の HFSC を使用しても砂利の空隙のような 5mm 以上の大きな隙間であれば充填可能であると考えられる。

しかし、岩盤の亀裂やプラグと岩盤の隙間などの小さな割れ目へのグラウトに対しての検討は十分でない。

また、すでにこのような小さな亀裂を充填するために必要なセメント系充填材は、超微粒子セメントとして市販され、ダム工事などで実用化されている。これらは普通セメントを微粉砕してさらに高炉スラグ微粉末を加えたもので、アルカリ性は普通セメントと同等である。

本研究では、蒸気の超微粒子セメントと同じような粒度分布を有する材料を組みあわせて、低アルカリ性を有するグラウトが製造可能かどうかについて、基礎研究をおこなった。

4.2　材料の選定

使用する材料は、ポゾラン反応によって低アルカリ性を示す材料を基本とし、できるだけ粒径の小さなものを選定した。粒度分布を図 4.1 および表 4.1 に示す。

選定した材料は、微粒子 OPC（通常の OPC をすりつぶしたもの）、高品位シリカフューム、中品位シリカフューム、石灰石微粉末、および高炉スラグ微粉末である。

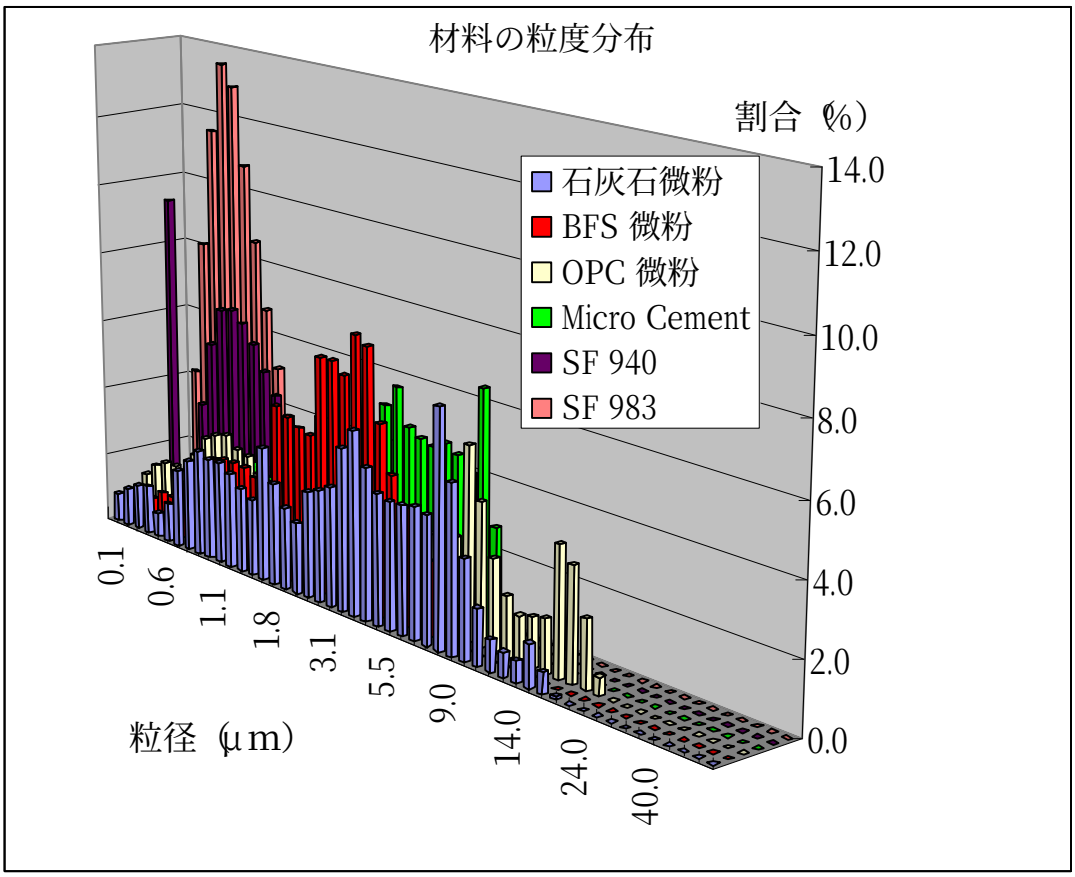

材料の粒度分布
割合（%）
14.0
12.0
10.0
8.0
6.0
4.0
2.0
0.0
石灰石微粉
BFS 微粉
OPC 微粉
Micro Cement
SF 940
SF 983
0.1
0.6
1.1
1.8
3.1
5.5
9.0
14.0
24.0
40.0
粒径（μm）

図 4.1　材料の粒度分布

表 4.1　注入材料の粒度分布

粒径（μm）	石灰石微粉	BFS微粉	OPC	OPC微粉	Micro Cement	SF 940（中位品）	SF 983（高位品）
0.1	0.8	0.2	0.9	1.2	0.3	9.3	1.1
0.2	1.1	0.6	0.8	1.6	0.6	0.3	4.2
0.3	1.3	0.8	0.7	1.8	0.9	0.2	8.1
0.4	1.4	1.1	0.8	1.8	1.1	3.5	11.5
0.5	0.7	1.1	0.3	1.8	1.2	5.4	13.5
0.6	1.1	1.6	0.4	2.4	1.8	6.5	12.9
0.7	2.2	2.2	0.8	3.0	2.2	6.6	10.7
0.8	2.6	2.5	1.1	3.2	2.5	6.3	8.6
0.9	3.0	2.7	1.2	3.3	2.6	5.8	6.7
1.0	2.9	2.8	1.3	3.0	2.5	5.1	5.1
1.1	2.9	2.8	1.3	2.9	2.5	4.5	3.8
1.2	2.7	2.8	1.3	2.5	2.3	3.9	2.7
1.3	2.4	2.6	1.1	2.3	2.1	3.4	1.9
1.4	2.2	2.6	1.1	2.0	2.0	2.8	1.2
1.6	3.8	4.9	1.9	3.3	3.5	4.3	1.1
1.8	2.9	4.7	1.6	2.5	2.9	3.0	0.2
2.0	2.3	4.5	1.3	1.9	2.7	2.2	0.0
2.2	2.0	4.4	1.2	1.6	2.6	2.0	0.0
2.5	3.0	6.7	1.8	2.3	3.9	2.8	0.0
2.8	3.2	6.7	1.8	2.6	4.1	3.1	0.6
3.1	3.4	6.4	2.0	2.7	4.3	3.4	1.3
3.5	4.6	7.6	2.7	3.6	5.5	4.1	2.1
4.0	5.2	7.4	2.8	3.8	6.1	3.8	2.0
4.5	4.3	5.4	2.3	2.9	5.1	2.3	0.7
5.0	3.7	4.1	2.0	2.3	4.9	1.3	0.0
5.5	3.6	3.3	2.0	2.4	4.8	1.1	0.0
6.0	3.6	2.8	2.2	2.6	5.0	1.0	0.0
6.5	3.7	2.1	2.3	2.8	4.8	0.8	0.0
7.0	3.6	1.5	2.3	2.8	4.4	0.7	0.0
8.0	6.6	1.1	4.6	5.4	6.8	0.5	0.0
9.0	4.7	0.0	3.7	4.0	3.2	0.0	0.0
10.0	2.8	0.0	2.6	2.6	0.8	0.0	0.0
11.0	1.6	0.0	1.9	1.7	0.0	0.0	0.0
12.0	0.9	0.0	1.6	1.3	0.0	0.0	0.0
13.0	0.7	0.0	1.7	1.4	0.0	0.0	0.0
14.0	0.6	0.0	1.9	1.5	0.0	0.0	0.0
16.0	1.2	0.0	4.6	3.6	0.0	0.0	0.0
18.0	0.6	0.0	5.4	3.2	0.0	0.0	0.0
20.0	0.1	0.0	5.3	1.9	0.0	0.0	0.0
22.0	0.0	0.0	4.3	0.5	0.0	0.0	0.0
24.0	0.0	0.0	3.3	0.0	0.0	0.0	0.0
26.0	0.0	0.0	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0
28.0	0.0	0.0	1.9	0.0	0.0	0.0	0.0
32.0	0.0	0.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0
36.0	0.0	0.0	2.8	0.0	0.0	0.0	0.0
40.0	0.0	0.0	2.3	0.0	0.0	0.0	0.0
45.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0
50.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
56.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0
60.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

4.3　低アルカリ性の評価試験

（1）使用材料

グラウト試験に使用した各材料を表 4.2 に示す。

表4.2　使用材料

材　料	本試験で使用した製品
微粒子OPC	試製品　Blaine 比表面積：10270 cm^2/g
高品位シリカフューム	エルケム社製　ﾏｲｸﾛｼﾘｶ983
中品位シリカフューム	エルケム社製　ﾏｲｸﾛｼﾘｶ940
石灰石微粉末	有恒鉱業社製　比表面積：9500 cm^2/g
高炉スラグ微粉末	第一セメント社製 ﾌｧｲﾝｾﾗﾒﾝﾄ5A　比表面積：12000 cm^2/g

（2）材料の組み合わせ

表 4.2 に示した微粒子 OPC、高品位シリカフューム（以下、高品位 SF）、中品位シリカフューム（以下、中品位 SF）、石灰石微粉末、高炉スラグ微粉末（以下、BFS 微粉末）の混合比を変えて混合し、表 4.3 に示した 5 種類のグラウトとするセメントを調製して試験ケースとした。

表4.3　試験ケース

試験ケース	配合割合（wt%）				
	微粒子OPC	高品位SF	中品位SF	石灰石微粉末	BFS微粉末
1	50	50			
2	50		50		
3	20		20	60	
4	20		20		60
5	30		30	40	

（3）試料調製

（i）混練配合

標準軟度になる W/C=80%とした。練り混ぜ水にはイオン交換水を使用した。

（ii）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。

（iii）乾燥・粉砕

養生後の硬化体を密閉容器から取り出し、7 日間真空乾燥をおこなった。真空乾燥後、粒径 0.5mm 以下となるように粉砕して浸漬試験に用いた。

（4）試験方法

（i）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。

（ii）pH 測定方法

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 日とした。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 度測定した試料は廃棄した。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。pH の測定はガラス電極法でおこなった。

（5）試験結果

各ケースの pH 測定結果を表 4.4 および図 4.3、4.4 に示す。

表 4.4　浸漬水の pH 測定結果

温度 (℃)	ｹｰｽ	各浸漬期間における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
20	1	12.48	12.34	12.11	11.99	11.85	11.68	11.44	11.31	11.22	11.05
	2	12.29	12.12	11.55	11.21	10.92	10.86	10.73	10.67	10.60	10.61
	3	12.08	11.94	11.52	11.27	10.90	10.95	10.77	10.73	10.58	10.59
	4	12.53	12.49	12.47	12.48	12.46	12.42	12.36	12.30	12.19	12.16
	5	12.16	12.02	11.53	11.31	10.92	10.65	10.75	10.72	10.64	10.70
65	1	10.51	10.16	9.96	10.05	9.94	10.12	9.97	10.06	9.97	9.99
	2	10.03	9.88	9.68	9.79	9.38	9.83	9.68	9.72	9.73	9.40
	3	10.02	9.84	9.64	9.77	9.63	9.73	9.69	9.70	9.69	9.64
	4	12.06	11.86	11.79	11.85	11.71	11.82	11.76	11.77	11.70	11.65
	5	10.01	9.79	9.67	9.75	9.67	9.75	9.60	9.70	9.68	9.57

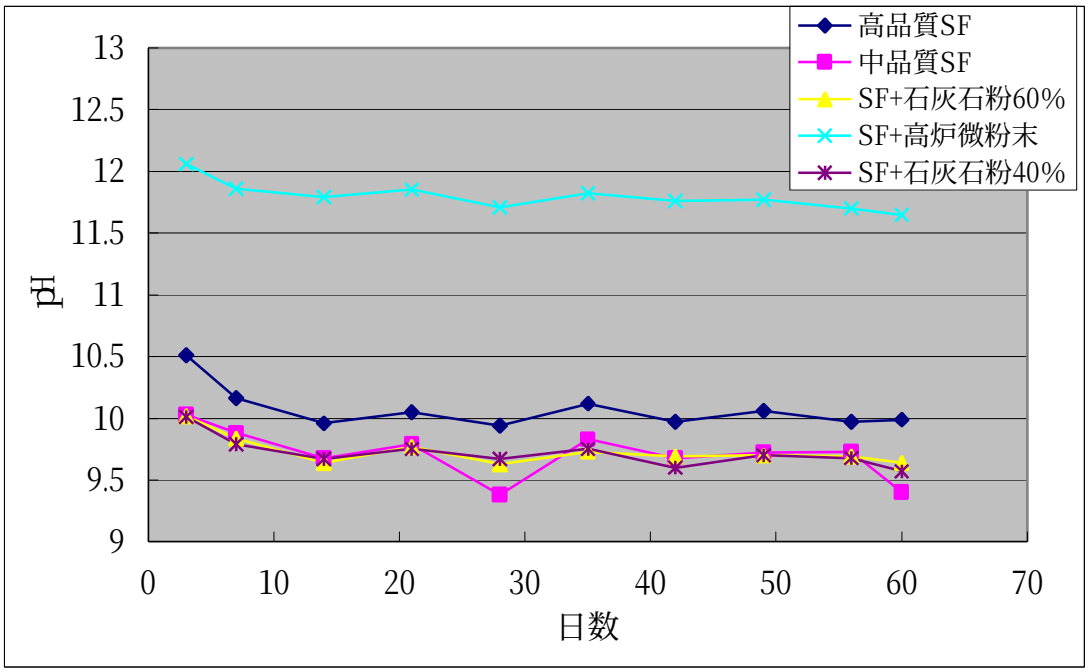


図 4.3　pH の測定結果（60℃）

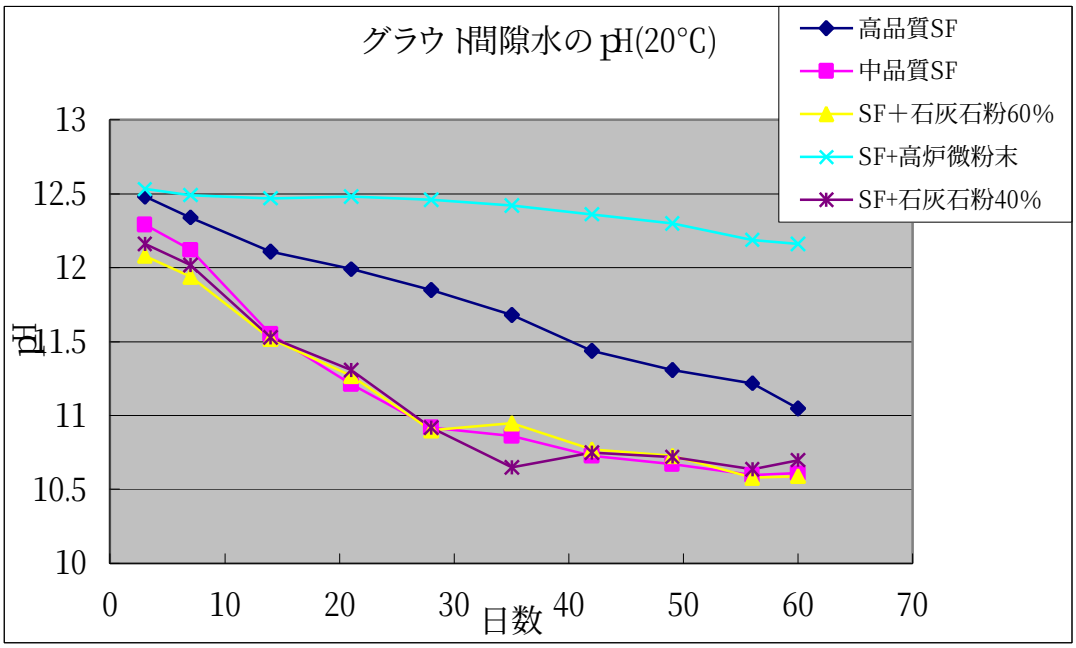


図 4.4　pH の測定結果（20℃）

（6）考察

得られた知見および考察を以下にまとめる。

① 各ケースとも 20℃よりも 65℃の方が pH の低下が早く、65℃では 7～14 日間の浸漬で pH はほぼ一定の値に落ち着いた。一方、20℃では pH の低下は遅く、60 日間の試験終了時においても 65℃に比べ pH はかなり高い。

② 微粒子 OPC＋中品位 SF（＋石灰石微粉末）であるケース 2,3,5 は 65℃では pH が 10 以下まで低下し、石灰石微粉末添加が pH へおよぼす影響はほとんど無かった。

③ 品質の異なる 2 種類の SF では、中品位 SF の方がやや pH が低くなる傾向が見られた。従って、コストダウンを目的に中品位 SF を使用することは pH の点からは問題は無い。ただし、流動性や硬化体物性への影響を確認しておく必要があるものと考えられる。

④ BFS 微粉末の添加は pH を上昇させる。これは、水硬性材料である［OPC+BFS］量が増加し、SF の相対割合が低下するからであると考えられる。BFS 微粉末を含まない各ケースは 65℃で 10 以下程度の低い pH を呈し、分級 FA を使用しない低アルカリ性グラウト材料として適用できる可能性がある。

5. 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見直し

5.1 平成 13 年度の研究で明らかとなった課題

（1）支保工

（i）吹付けコンクリート

HFSC を支保工に適用する場合、今後の課題として昨年度次のことを提案した。

① 施工性を考慮した配合の選定
② 吹付け施工可能性の実証
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

この中で、②吹付施工可能性の実証については十分な施工性が得られ実証ができた。しかし、本年度次のことが明らかとなった。

i）3 時間圧縮強度は満足できるが、1 日強度および 28 日強度は目標値を下回っている。

ii）HFSC は高性能 AE 減水剤によりスランプを維持するが、スランプ維持効果が小さく運搬中にスランプが低下する。

（ii）セグメント

HSFC をセグメントに適用する場合の課題として、昨年度次のことを提案した。

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

このうち①製造方法と②製造の実証については、ほぼ満足できる結果を得た。また、③ひび割れなどの変質の観察は今後継続して実施する予定である。

今年度新たに生じた課題としては、次のものがある。

i）強度発現が小さく、蒸気養生を行っても 28 日でセグメントの設計基準強度の 42N/mm^2 に達しない。

ii）フライアッシュのばらつきによると思われる現象として、高性能 AE 減水剤が吸着して効果を発揮せず、高流動コンクリートとならない場合があった。このフライアッシュを分析したところ、メチレンブルー吸着量が 5.48mg/g とこれまで使用してきたフライアッシュの 1mg/g に比べかなり大きい値であった。未燃カーボンの量をあらわす強熱減量も 5.4%と大きい。（JIS Ⅰ種フライアッシュ 3%以下）

（2）グラウト

グラウトに関しては、今年度実施した室内試験における pH の低下においてほぼ期待通りの成果が得られた。昨年度課題としてあげた項目のうち①HFSC 使用材料の見直し低アルカリ性の確認に関しては、満足する材料選定ができた。

今年度以降は、当初計画に基づき、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等を実施する必要がある。

5.2　平成 14 年度の研究計画の提案

5.2.1　吹付けコンクリート

（1）ベースコンクリートの強度発現の改善

今年度は、フライアッシュを太平洋セメント製の分級フライアッシュ「スーパーフロー」のみを使用したが、このフライアッシュは JIS 規格に照らし合わせるとⅠおよびⅡ種に相当しない。メチレンブルー吸着量や強熱減量などが規格に合わないものが含まれることが分かった。JIS 規格Ⅰ種相当品は、四国電力で「ファイナッシュ」として製品化されており、中部電力碧南火力発電所でも製造する方向で研究が進められている。ここでは、それを使用した強度改善効果について調査する。

次にフライアッシュを変更した効果を踏まえて、最も強度が発現期待できるフライアッシュを使用して、吹付けコンクリートの配合においてベースコンクリートの室内試験練りを行い、圧縮強度試験を実施する。今年度は、OPC：FA：SF＝2：6：2 で試験を実施したが、3：5：2 や 4：4：2 について、フレッシュコンクリートの性状を調査するとともに、材齢 91 日までの強度試験を行う。

（2）吹付けコンクリートにおける強度発現の評価

上記（1）はベースコンクリートの試験練りであるが、ここでは吹付け施工による強度発現性の調査を行う。上記 3 種類のセメントに対して、吹付け施工により供試体を作成し、供試体からコアを採取することによって吹付けコンクリートの強度発現性を調査する。試験材令は、3 時間、1 日、7 日、28 日とする。あわせて透水試験も実施する。

5.2.2　フライアッシュのバラツキが HFSC の品質に与える影響評価

（1）フライアッシュのバラツキがコンクリートの品質に与える影響調査

HFSC はフライアッシュを OPC より多く使用しているために、フライアッシュの品質のばらつきが、コンクリートの品質に与える影響が大きい。ここでは、JIS Ⅰ種相当品 1 種類と JIS 規格外の分級フライアッシュを定期的に採取し、品質のばらつきが HESC コンクリートの品質に与える影響について調査する。

フライアッシュの種類：四電「ファイナッシュ」（JIS Ⅰ種相当品）
太平洋セメント「スーパーフロー」（規格外品）（検討中）
試験頻度および期間：1ヶ月に1回サンプル採取および試験。試験期間1年間
対象セメント配合：OPC：FA：SF ＝ 3：5：2および4：4：2の2配合
試験方法：JIS Ⅰ種規格に相当する品質試験（粉末度、未燃分混入量など）
対象コンクリート：水セメント比30%の高流動コンクリート（セグメント配合）
水セメント比50%の有スランプコンクリート（吹付配合）
試験条件：温度20℃一定、高性能AE減水剤使用量一定
セグメント配合における圧縮強度試験：材令7日、28日
吹付ベースコンクリートにおける圧縮強度試験：材令7日、28日

本試験により、フライアッシュの管理基準（Ⅰ種あるいはJIS規格外）によるバラツキの影響と発電所の年間の石炭の品質変動による品質のバラツキが調査できる。

（2）フライアッシュの品質のバラツキがpHの低下速度に与える影響

強度を増進させるために、水セメント比を下げることのみでは対応できないことが予想される。この場合は、OPCの比率を高めることとなる。OPCの使用量を増やすと強度発現は早くなるが、間隙水のpHが低下する速度が遅くなる。

pHをどの程度期間で下げるかについては、処分場の性能を考えて決定する必要があるが、pHが下がったことを品質管理として確認できる程度の期間が望ましいと考える。どの配合が処分場の環境温度でどの程度の速度でpHが下がるかについては、これまで検討してこなかったために、OPC、FA、SFの比率を変えて、長期的なpHの低下を予測するためのデータを取得する。

セメントの配合比率：3種類（442、352、262）
使用ペースト：水セメント比40%
標準養生日数：28日
標準養生後の養生温度：20℃
測定材令：20℃の場合、1ヶ月毎1年間
測定項目：pHの変化
測定期間：1年間、月1回計測

5.2.3　セグメントの暴露による変質の確認と破壊試験

（1）変質調査

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。

（2）破壊強度の確認

平成 13 年度作成したセグメント供試体の破壊試験を実施する。平成 13 年度の製造したセグメントは、水中養生しているものと、気中に放置しているものと 2 種類の養生方法で保管されている。養生方法の違いにより、セグメントの破壊耐力がどの程度異なるかについて調査する。

破壊試験後にコアを採取して、コンクリートとしての強度発現を確認する。

5.2.4　高性能 AE 減水剤の見直し

スランプ維持性能の改良と強度発現促進の両面から、目標時間を満足する高性能 AE を選定する。これまでの研究で定めたポリカルボン酸系 AE 減水剤の中で選定する。

目標スランプ維持時間：2 時間

許容スランプダウン量：有スランプコンクリートではスランプ値として 2.5 cm
高流動コンクリートではスランプフロー値として 5 cm

5.2.5　グラウト

昨年度の研究で、低アルカリグラウト材料として候補となる材料を絞り込むことができた。平成 14 年度は、この材料の注入特性と改良効果についての検討を行う。

（1）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%程度の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%の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、コンクリートで製作した模擬亀裂を有する供試体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。

（2）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。NAGRA の Grimsel 岩盤研究所は使用可能である。この研究の目的として、処分場建設中に涌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。

5.2.6　HFSC 製造計画と製造上の問題点の抽出

幌延深地層研究センターで低アルカリセメントを使用することとして、既存のセメント工場と流通システムを利用して HFSC の製造運搬貯蔵計画を策定する。具体的な製造運搬計画を検討することによって、サイトスペシフィックなものも含めて問題点を明確にする。

5.2.7　鉄筋腐食試験と設計手法の検討

本年度開始した暴露試験について、暴露 6 ヶ月、1 年の鉄筋腐食状況の調査を行う試験を行い。促進試験結果とも併せて、低アルカリセメント中での鉄筋の腐食に対する設計手法について検討する。

おわりに

本研究では昨年度に続いて、低アルカリ性セメント（HFSC）の施工性に関して、吹付コンクリートや高流動コンクリートあるいはプレキャストコンクリートに関しては、フィールド試験を行った。また、鉄筋腐蝕に関しては、暴露試験を開始した。さらに、グラウトに関しては、候補材料の選定と低アルカリ性の確認を実施した。

本研究を通じて得られた結論は以下のとおりである。

① 吹付コンクリートに関しては模擬トンネルの試験施工を行い、吹付施工が可能であることを実証した。施工性に関しては良好な結果を得た。

② 鉄筋腐蝕に関しては、腐蝕の促進試験と関連させた供試体を海中および飛沫帯に設置して暴露試験を開始した。塩分浸透量や埋込んだ鉄筋の腐蝕状況などの調査を来年度以降実施する予定である。

③ 覆工コンクリートがプレキャストコンクリートである場合を想定して、セグメントの製造方法の検討を実施した。セグメントは高流動コンクリートとして製造する計画とし、2 ピース試作を行った。セグメントを製造することにおいて問題はないことを確認した。

④ グラウトに関しては、微粒子セメント、石灰石粉微粉末、シリカフュームを組み合わせることによって、低アルカリ性を示す微粉体ができることがわかった。

⑤ 上記の実験結果を踏まえて課題の抽出と今後の研究開発の方向を示した。

⑥ 解決すべき最大の課題は、強度発現が遅いことである。吹付コンクリートにおいても、セグメントコンクリートにおいても、普通セメントでは材令 28 日で満足できる強度に、HFSC では 28 日材令では到達できなかった。フライアッシュとシリカヒュームの混合割合などの見直しが必要である。