

独立行政法人港湾空港技術研究所

港湾空港技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH
INSTITUTE

VOL.47 NO.2 June 2008

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION,
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第 47 卷 第 2 号 (Vol. 47, No. 2), 2008 年 6 月 (June 2008)

目 次 (CONTENTS)

- 太平洋北東岸GPS波浪計観測網が捉えた大水深域における海象特性
.....永井 紀彦・清水 勝義・佐々木 誠..... 1
(Characteristics of the Observed Offshore Data by the Northern Pacific GPS Buoys
..... Toshihiko NAGAI, Katsuyoshi Shimizu, Makoto Sasaki)
- T型あるいは浮き型SCP工法によって改良された粘性土地盤の支持力特性
.....高橋 英紀・市川 栄徳・北詰 昌樹..... 53
(Bearing Capacity of T-shaped or Floating-type Sand Compaction Pile Improved Ground
..... Hidenori TAKAHASHI, Eitoku ICHIKAWA, Masaki KITAZUME)
- 混成堤における根固方塊および被覆ブロックの合理的な形状とその設計法
.....下迫健一郎・久保田真一・浜口正志・松本 朗・半沢 稔・中野史丈.....89
(A Rational Design of Foot-Protection Block and Armor Block Covering Rubble Mound
of Composite Breakwaters
..... Ken-ichiro SHIMOSAKO, Shin-ichi KUBOTA, Masashi HAMAGUCHI,
Akira MATSUMOTO, Minoru HANZAWA, Fumitake NAKANO)
- 産業副産物(製鋼スラブ・フライアッシュ・高炉スラブ)を有効利用したコンクリートの品質
および耐久性に関する研究
.....審良 善和・山路 徹・濱田 秀則.....111
(Research on Quality and Durability of the By-Products Concrete Using Steel Making Slag,
Fly ash and Blast Furnace Slag
..... Yoshikazu AKIRA, Toru YAMAJI, Hidenori HAMADA)

産業副産物（製鋼スラグ・フライアッシュ・高炉スラグ）を 有効利用したコンクリートの品質および耐久性に関する研究

審良 善和*・山路 徹**・濱田 秀則***

要 旨

本研究は、産業副産物（製鋼スラグ、フライアッシュおよび高炉スラグ）を用いた FS コンクリートの港湾構造物への適用を目的として、FS コンクリートの品質や耐久性について検討を行った。FS コンクリートは、細骨材にフライアッシュおよび製鋼スラグを、粗骨材に高炉スラグ粗骨材を用いたコンクリートであるが、コンクリート容積のおよそ 7 割を占める骨材の物理化学的特性は、コンクリートのフレッシュおよび硬化後の品質に大きく影響する要因の一つである。FS コンクリートの利用拡大を目指すためには、安心して利用できる安定なコンクリートであることが望ましい。しかしながら、FS コンクリートは不安定骨材を利用する特殊コンクリートであるため、フレッシュおよび硬化後のコンクリートの性状は未だ不明な部分が多い。そこで、1) FS コンクリートに用いる製鋼スラグの品質試験方法、2) FS コンクリートの配合設計手法、3) 硬化した FS コンクリートの安定性、4) FS コンクリートの耐久性について検討を行った。

その結果、比較的簡便に FS コンクリートの強度および安定性を考慮した配合設計が可能で、硬化後のコンクリートは、製鋼スラグとフライアッシュとのボゾランによって膨張を抑制し、硬化体組織は緻密な構造となる。また、FS コンクリートは塩害に対する耐久性に優れ、普通コンクリートの力学特性と同等であることなどから、FS コンクリートの港湾施設への適用は可能であると考えられる。

キーワード：FS コンクリート，産業副産物，製鋼スラグ，フライアッシュ，安定性

* 地盤・構造部 材料研究室 研究官

** 地盤・構造部 材料研究室 主任研究官 兼 室長心得

*** 九州大学大学院 工学研究院 准教授（前 材料研究室室長）

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人 港湾空港技術研究所
電話：046-844-5061 Fax：046-844-0255 e-mail：akira@pari.go.jp

Research on Quality and Durability of the By-Products Concrete Using Steel Making Slag, Fly ash and Blast Furnace Slag

Yoshikazu AKIRA*

Toru YAMAJI**

Hidenori HAMADA***

Synopsis

This report examined quality and durability of concrete utilizing by-products that used steel making slag, fly ash and blast furnace slag. This concrete is called FS concrete. A physicochemical characteristic of the aggregate that accounts for about 70% per unit volume is one of the factors that greatly influence the quality of concrete. However, steel making slag has expansiveness by the reaction with water. So, performance of fresh concrete and hardened concrete has still a lot of uncertain parts.

In this study, some examinations were tried to apply the FS concrete to the port and harbor structure. The results are as follows, 1) The design of mix proportion including the compressive strength and soundness of FS concrete is possible. 2) The expansion of steel making slag is controlled by Pozzolan of steel making slag and fly ash. And, cement matrix becomes dense by Pozzolan. 3) The durability of FS concrete to deterioration due to chloride attack is high. 4) A structural performance is usually equal to normal concrete. From these results, it is considered that the use of the FS concrete to the port and harbor structures is possible.

Key Words: direct shear test, pleistocene clay, shear strength, stability analysis

* Researcher of Material Division, Geotechnical and Structural Engineering Department
** Senior Researcher of Material Division, Geotechnical and Structural Engineering Department
*** Associate Professor, Faculty of Engineering, Kyusyu University (Former Head of Materials Division)
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-46-844-5061 Fax : +81-46-844-0255 e-mail:akira@pari.go.jp

目 次

要 旨	111
1. まえがき	115
2. FSコンクリートについて	115
3. 使用材料	117
3.1 FSコンクリート	117
3.2 比較用普通コンクリート	119
3.3 鹿島港防波堤上部工に使用されたFSコンクリート	120
4. 製鋼スラグの品質管理試験方法について	120
4.1 密度・吸水率試験方法	120
4.2 製鋼スラグの膨張試験方法	121
5. FSコンクリートの配合設計方法に関する検討	123
5.1 配合強度について	123
5.2 FSコンクリートのフレッシュ性状について	124
5.3 FSコンクリートの配合設計	127
6. FSコンクリートの品質安定性に関する検討	129
6.1 生コンクリートの均一性	129
6.2 FSコンクリート内部構造の安定性について	129
6.3 FSコンクリート内部構造の安定性について	136
7. FSコンクリート部材の耐久性に関する検討	138
7.1 塩害に対する抵抗性	138
7.2 凍害に対する抵抗性	143
8. 結論	145
9. あとがき	146
謝辞	146
参考文献	147
付録	148

1. まえがき

現在、天然骨材の枯渇や骨材採取による環境破壊の防止などの理由から、コンクリートの分野においても、エココンクリートやリサイクルコンクリートなどの特殊なコンクリートが研究開発されている。今回、検討を行った製鋼スラグ、フライアッシュおよび高炉スラグを使用したコンクリート（以下、FSコンクリートと呼ぶ）も、細骨材として通常混和材として利用されるフライアッシュや不安定鉱物を多く含むコンクリート用骨材としてJIS化されていない製鋼スラグを用い、粗骨材として高炉スラグ粗骨材を利用する産業副産物を多量に利用したりサイクルコンクリートである。このコンクリートの特徴から、フライアッシュの「F」とスラグの「S」としてFSコンクリートと名付けられた。このFSコンクリートの普及は、環境面を保護するだけでなく、産業副産物の有効利用による最終処分場の延命化や地元産業の発展にも寄与すると考えられる。

FSコンクリートは、平成7年度より技術開発が始まり、平成10年度に「FSコンクリート利用手引書」¹⁾、平成14年度には「FSコンクリート技術資料」²⁾が発刊されている。その間、コンクリートの性能試験等の調査研究³⁾⁴⁾⁵⁾が続けられ、一方では、茨城県鹿島地区および常陸那珂地区等において、護岸や防波堤等の上部コンクリートや根固めブロック、消波ブロックなどに使用され、平成15年度までに約20,000m³の施工実績を得ている。しかし、いずれも無筋コンクリートを対象としており、今後、FSコンクリートをより多く普及させるためには、新たな展開として、RC構造物への適用も考える必要がある。

現在、構造物の設計施工は性能照査に移行し、要求される性能に対し満足すればFSコンクリートの利用が可能となる。ただし、要求性能を満足するためには、安定で安全なコンクリートを製造する必要がある。品質の高いコンクリートを製造するためには、適切なコンクリート用材料を用いる必要がある。

FSコンクリートは、細骨材に多量のフライアッシュおよび製鋼スラグを用い、粗骨材に高炉スラグ粗骨材を用いたコンクリートであるが、コンクリート容積のおよそ7割を占める骨材の物理化学的特性は、コンクリートのフレッシュおよび硬化後の品質に大きく影響する要因の一つである。しかしながら、FSコンクリートに使用するフライアッシュは原粉（非JIS品）を基本とし、転炉や電気炉還元スラグなどの製鋼スラグは物理化学的に非常に不安定な骨材であることから未だコンクリート用骨材としてJIS化されていない。このような不安定骨材を利用する

特殊コンクリートであるため、FSコンクリートの硬化後の性能は未だ不明な部分が多い。また、FSコンクリート製造の上で不可欠な配合設計手法も十分に確立されていないのが現状である。

そこで、本研究では、使用材料のばらつきがFSコンクリートのフレッシュおよび硬化後のコンクリートの品質に与える影響について検討し、配合設計手法の一提案を行うとともに、硬化後のコンクリートの安定性および耐久性について評価した。本報告は、これら結果を取り纏めたものである。

2. FSコンクリートについて

前述のように、FSコンクリートは骨材に全て産業副産物を用い、天然骨材を使用しないエココンクリートである。しかしながら、使用骨材のうち製鋼スラグは、骨材内部に遊離石灰（Free-CaO）や珪酸二カルシウムβ型（β-C₂S）などの不安定鉱物が存在し、コンクリート内部または外部から浸入する水との反応によって膨張する。このため、安定なFSコンクリートを製造するためには、エージング処理を行った骨材膨張性の低い安定な製鋼スラグを使用するか、もしくは、膨張を抑制するための何らかの対策が必要となる。この膨張抑制を目的にポズラン反応性を有するフライアッシュを代替骨材の一部とみなし混入することが、FSコンクリートの特徴の一つであると言える。ただし、現状では、製鋼スラグの品質とFSコンクリートの安定性の関係や、フライアッシュによる製鋼スラグの膨張抑制効果など十分に解明されていない特殊なコンクリートである。

図-1に製鋼スラグの骨材膨張のメカニズムおよびフライアッシュによる膨張抑制メカニズムのモデル図を示す。また、写真-1に製鋼スラグの電子組成像を示す。製鋼スラグ中の鉱物としてはβ-C₂S（珪酸二カルシウム）やアルミン酸三カルシウム（C₃A）、水酸化カルシウム（Ca(OH)₂）、珪酸カルシウム水和物（C-S-H）、遊離石灰（Free-CaO）および遊離マグネシア（Free-MgO）などが存在する。β-C₂Sはポルトランドセメント中に含まれるビーライトと同様の鉱物でクラスター（集合体）として存在している。β-C₂Sは、水和反応が遅く長期の強度増進に寄与する鉱物である。製鋼スラグ中にはこのβ-C₂Sが非常に多く存在していることが写真から分かる。また、β-C₂Sクラスターの間隙にアルミネート相（C₃A）やフェライト相（C₄AF）、FeO、Free-CaOおよびFree-MgOが存在すると考えられている⁶⁾⁷⁾。遊離石灰（Free-CaO）は水と接触すると水酸化カルシウム（Ca(OH)₂）を生成する。

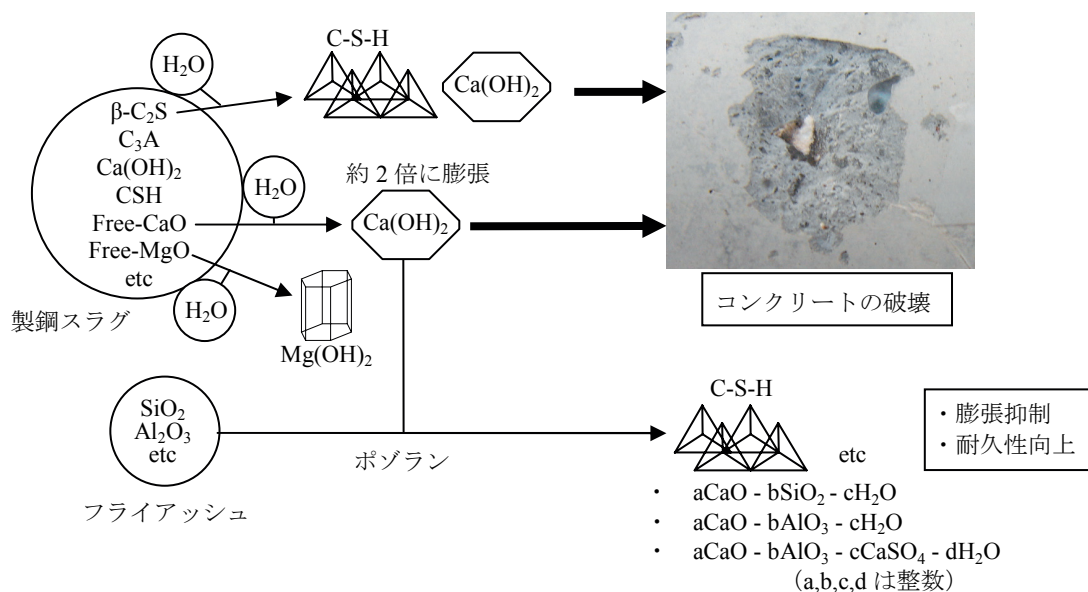
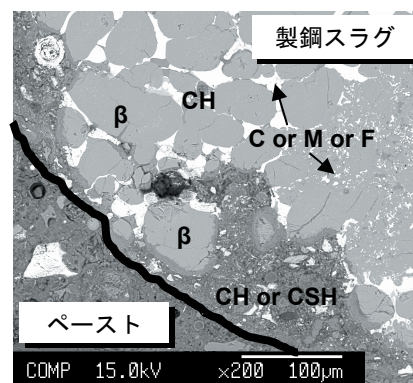


図-1 製鋼スラグの膨張作用とフライアッシュの膨張抑制作用のモデル

この反応によってFree-CaOはおよそ2倍に膨張する。また、Free-MgOにおいても同様に水と接触すると水酸化マグネシウム ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) を生成する。いずれの化合物も難溶で細孔空隙または骨材中に析出することで、FSコンクリート中に膨張圧が生じ、図-1に示すような膨張破壊が生じる。

一方で、フライアッシュは珪酸 (SiO_2) およびアルミナ (Al_2O_3) を主成分とした材料であり、人工ポゾランの一種である。ポゾランとは、それ自体ではほとんど水硬性を持たないが、水の存在のもと常温で水酸化カルシウムと徐々に反応し(ポゾラン反応)、不溶性の化合物を生成、硬化する材料である⁸⁾。ただし、コンクリート中の水酸化カルシウムを減少させることになり、中性化等に対する耐久性やコンクリートの品質の低下が懸念されるためJIS A 6201では、フライアッシュの分量を表-1のように規定している⁹⁾。FSコンクリートの場合は、フライアッシュと製鋼スラグの混合割合によって若干異なるが、およそセメントと同等の単位量となる。このフライアッシュによるポゾラン反応はゆっくりと進行し、長期強度の増進、物質移動抵抗性の増大などの効果が期待できる¹⁰⁾。なお、FSコンクリートに大量のフライアッシュを混入させる理由としては、製鋼スラグを起源とした水酸化カルシウムを消費させることで骨材膨張を抑制させることを主目的としている(図-1)。

以上のように、製鋼スラグおよびフライアッシュはFSコンクリートの品質に大きな影響を与えることになる。



β : $\beta\text{-C}_2\text{S}$ 、CH : $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、CSH : C-S-H、
C : Free-CaO、M : Free-MgO、F : FeO
写真-1 製鋼スラグの電子組成像

表-1 フライアッシュセメントの種類

種類	フライアッシュの分量 (質量%)
A種	5 を超え 10 以下
B種	10 を超え 20 以下
C種	20 を超え 30 以下

現状では、エージング処理によって製鋼スラグを安定化させた骨材を使用し、かつ、膨張抑制評価試験等を行いコンクリートの安定性を確認した上で施工されている。

3. 使用材料

3.1 FSコンクリート

FSコンクリートは、前述の通り、骨材に製鋼スラグ、フライアッシュおよび高炉スラグを使用し、骨材の全量に産業副産物を使用したコンクリートである。以下に、使用材料を示す。また、付録Aに検討したFSコンクリートおよび普通骨材を使用したコンクリートの配合の一覧および検討した項目を取り纏めたものを表に示す。

(1) 製鋼スラグ

高炉で製造された銑鉄は、炭素含有量が多く、その他珪素、燐および硫黄などの鋼材として不要な成分を多く含んでいるため固くて脆い性質を有す。銑鉄中のこれらの不要成分を酸化して除去し靱性・加工性のある鋼にするのが製鋼過程である。製鋼で使用される副原料は、生石灰、石灰石およびドロマイトなどがある。これらは挿入原料中の鋼材としての不要成分を捕捉し、溶鋼から分離するために使われる。この工程で生ずるのが製鋼スラグであり、粗鋼1tあたり130kg~150kg生成する。製鋼スラグは、徐冷後、破碎、篩分け、磁選が行われるが、生成直後の製鋼スラグは、水和反応を起こし膨張する傾向にある。現在は、屋外に数ヶ月暴露する大気エージングおよび短期間に安定化する蒸気エージングによってスラ

グの膨張を抑制し安定化を図る技術が確立されている。

今回、実験に使用した製鋼スラグを表-2に示す。検討では16種類の産地や品質の異なる製鋼スラグを用いた。製鋼スラグの粒度分布を図-2に示す。製鋼スラグはJIS A 5005で規定したコンクリート用骨材の基準値よりも粗粒分が多い傾向にある。また、写真-2には製鋼スラグ(SS-F)を用いた場合のFSコンクリートのモルタル部分の写真を示すが、天然骨材を使用したコンクリートと比べ製鋼スラグは角張った形状であることが分かる。このことは、モルタルの流動性に影響を与え、FSコンクリートは天然骨材を使用したコンクリートに比べてワーカビリティ

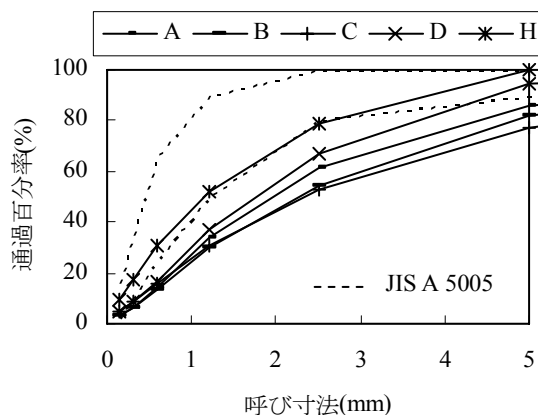


図-2 製鋼スラグの粒度分布

表-2 実験に使用した製鋼スラグの品質

記号	種類	混合比	粉化率 (%)	水浸膨張比 (%)	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	粗粒率	エージング方法
SS-A	溶銑予備		0.14	0.21	3.42*	3.63*	3.95	大気 3ヶ月 + 蒸気 3日
SS-B	溶銑予備		0.44	0.46	3.47*	3.06*	4.10	大気 3ヶ月
SS-C	溶銑予備		0.30	0.62	3.79*	2.38*	4.10	大気 1ヶ月
SS-D	溶銑予備		0.3		3.51	4.30	3.72	蒸気
SS-E	溶銑予備 + 転炉	I : G 9 : 1	1.0		3.43	4.04	3.65	大気
SS-F	溶銑予備 + 転炉	J : G 2 : 1	2.5		3.46	3.59	3.30	なし + 大気
SS-G	転炉		6.9		3.02	5.09	3.15	大気
SS-H	溶銑予備		0.40	0.34			3.13	大気 3ヶ月
SS-I	溶銑予備		0.3		3.48	3.91	3.71	大気
SS-J	溶銑予備		0.3		3.68	2.84	3.37	なし
YA	八幡				2.86*	6.62*		
HI	光				2.82*	3.95*		
FU	福山				2.72*	10.25*		
CHI	千葉				3.51*	5.08*		
KE	京浜				3.16*	6.55*		
KU	倉敷				3.03*	8.25*		

※JSCE-C506-2003「電気抵抗法によるコンクリート用スラグ骨材の密度および吸水率試験方法」による。

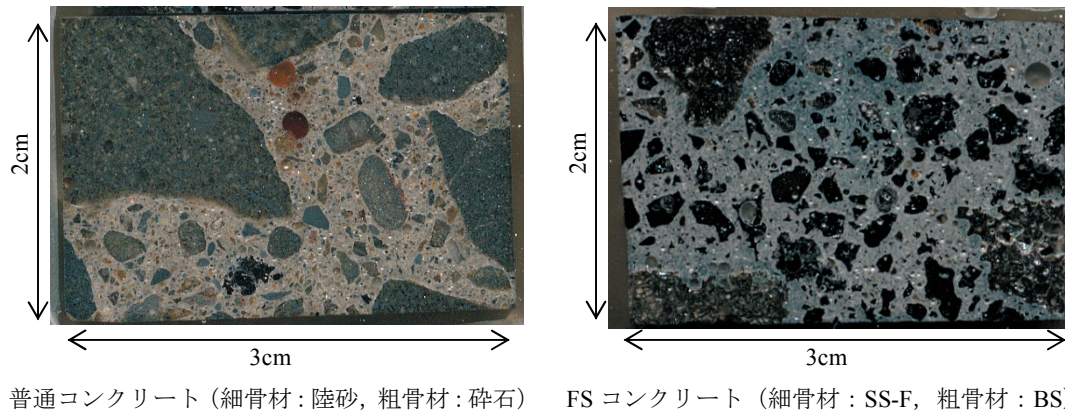


写真-2 FS コンクリートの断面

が低下する可能性がある。しかしながら、今回の検討では、産業副産物を効率よく利用できるコンクリートを目指すため粒度調整等を行わず、このまま使用することとした。また、写真-2から骨材自体に空隙が多いのも特徴の一つである。また、FeOを多く含有していることから天然骨材よりも密度が高く、FSコンクリートの単位体積重量も大きくなる傾向にある。

(2) フライアッシュ

石炭火力発電所において微粉炭を燃焼した際に発生する灰を総称して石炭灰と呼んでいる。石炭灰は発生箇所により、クリンカアッシュ、シンダアッシュおよびフライアッシュに分類される。ここで、フライアッシュは微

粉炭燃焼ボイラの燃焼ガスから集塵機で採取された石炭灰のことである。実験に使用したフライアッシュを表-3に示す。

製鋼スラグの膨張抑制は、フライアッシュのポズラン反応によるものである。ここで、ポズラン反応はフライアッシュのガラス層にCa(OH)₂などが接触することで生じるため、総Ca(OH)₂量によってフライアッシュの混入量が決まる。FSコンクリートの場合、製鋼スラグ中のCaOとの反応を期待するため多量混和が可能で、ポズラン反応による耐久性向上が期待できる。ただし、初期の強度発現は小さく、また、養生を十分に行わないと品質が低下することになる。

表-3 実験で使用したフライアッシュの品質

記号	強熱減量 %	密度 g/cm ³	比表面積 cm ² /g	45μふるい残分 μ	二酸化けい素%	フロー値 比%	湿分 %	MB 吸着量 mg/g	活性度指数% 28日、91日
FA-A	2.0	2.53	3580	22	47	105	0	0.24	83、95
FA-B	3.7	2.16	3990	33	57.6	101	0	0.51	81、95
FA-C	5.7	2.17	3670	22	56.1	99	0	0.61	82、95

表-4 実験で使用した高炉スラグ粗骨材の品質

	試験方法	JIS 規格	試験値	
			B-A	B-B
絶乾密度 (g/cm ³)	JIS A 5011-1	≧ 2.4	2.47	2.50
表乾密度 (g/cm ³)	JIS A 5011-1		2.52	2.57
吸水率 (%)	JIS A 5011-1	≦ 4.0	2.2	2.9
単位容積質量 (kg/L)	JIS A 1104	≧ 1.35	1.39	1.47
CaO (%)	JIS A 5011-1 付	≦ 45.0	41.2	41.4
T-S (%)	JIS A 5011-1 付	≦ 2.0	0.7	0.6
SO ₃ (%)	JIS A 5011-1 付	≦ 0.5	0.0	0.2
FeO (%)	JIS A 5011-1 付	≦ 3.0	0.5	0.4
水中浸漬試験	JIS A 5011-1		合格	合格
紫外線照射試験	JIS A 5011-1		合格	合格

(3) 高炉スラグ粗骨材

高炉スラグ粗骨材は、銑鉄の製造過程で排出されるスラグで、銑鉄1tあたり約300kg生成される。高炉から取り出された熔融状態のスラグは約1500℃で冷却方法によって異なった性状となる。高炉スラグ骨材はJIS化されており、JIS A 5011-1-2003「コンクリート用スラグ骨材 第一部：高炉スラグ骨材」として規定されている⁹⁾。検討に用いた高炉スラグ粗骨材もJISに適合する材料を使用した。表-4に使用した高炉スラグ粗骨材の品質を示す。

(4) セメント

実験には普通ポルトランドセメントおよび高炉セメントB種の2種類を用いた（表-5）。ここで、より多くの産業副産物の有効利用を考えるのであれば、高炉セメントB種を用いるべきであると考えられるが、普通ポルトランドセメントの使用理由としては、骨材に副産物を多量に用いるFSコンクリートの性能を評価するに当たり、セメントからの副産物の供給を除外するためである。

(5) 化学混和剤

フレッシュコンクリートに要求される性能は、製造、運搬、施工などに関連する事項となる。基本的には、コンクリートの流動性が大きく施工が容易であり、かつ材料分離を起こさないことが良いコンクリートと考えられる。FSコンクリートは、細骨材に多量のフライアッシュ

を使用するため粉体量が多く、コンクリートの粘性が高くなる。ワーカビリティの良いコンクリートを製造するためには、流動性を高める必要があるため、FSコンクリートは、単位水量が多くなる傾向にある。そこで、実験では高性能AE減水剤を用いて検討を行った。使用した高性能AE減水剤は、ポリカルボン酸エーテル系の高性能AE減水剤を使用した（以下、SPと呼ぶ）。また、空気量調整剤としてフライアッシュ中の未燃炭素量の変動に対しても安定した空気量が得られると考えられるフライアッシュ用のAE剤（主成分：高アルキルカルボン酸塩系陰イオン界面活性剤）を使用した。

3.2 比較用普通コンクリート

表-6に使用材料を示す。セメントとしては、普通ポルトランドセメントおよび高炉セメントB種を用い、細骨材に陸砂、粗骨材に碎石を用いた。

表-5 実験で使用したセメントの品質

	記号	密度 (g/cm ³)	ブレン値 (cm ² /g)
普通ポルトランドセメント	OPC	3.16	3300
高炉セメントB種	BB-A	3.04	3890
	BB-B	3.04	3830

表-6 比較用天然骨材使用の普通コンクリートの使用材料

	C	セメント	普通ポルトランドセメント、密度 3.15g/cm ³
ON1	S1	細骨材	静岡県大井川産陸砂、表乾密度 2.57 g/cm ³ 、粗粒率 2.59
	G	粗骨材	東京都八王子産碎石 2005、表乾密度 2.67 g/cm ³
	Ad1	AE 減水剤	リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体
	AE2	空気量調整剤	アルキルアリルスルホン酸化合物系陰イオン界面活性剤
	C	セメント	普通ポルトランドセメント、密度 3.16g/cm ³
ON2	S1	細骨材	静岡県大井川産陸砂、表乾密度 2.57 g/cm ³ 、粗粒率 2.59
	G	粗骨材	東京都八王子産碎石 2005、表乾密度 2.67 g/cm ³
	Ad1	AE 減水剤	リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体
	AE2	空気量調整剤	アルキルアリルスルホン酸化合物系陰イオン界面活性剤
	C	セメント	高炉セメント B 種、密度 3.04g/cm ³
BN1	S1	細骨材	静岡県大井川産陸砂、表乾密度 2.57 g/cm ³ 、粗粒率 2.59
	G	粗骨材	東京都八王子産碎石 2005、表乾密度 2.67 g/cm ³
	Ad1	AE 減水剤	リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体
	AE2	空気量調整剤	アルキルアリルスルホン酸化合物系陰イオン界面活性剤
	C	セメント	高炉セメント B 種、密度 3.04g/cm ³
BN2	S1	細骨材	東京都八王子産砕砂、表乾密度 2.61 g/cm ³ 、粗粒率 3.10
	S2	細骨材	千葉県君津産陸砂、表乾密度 2.56 g/cm ³ 、粗粒率 1.80
	G	粗骨材	東京都八王子産碎石 2005、表乾密度 2.67 g/cm ³
	Ad1	AE 減水剤	リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体
	AE2	空気量調整剤	アルキルアリルスルホン酸化合物系陰イオン界面活性剤
	C	セメント	高炉セメント B 種、密度 3.04g/cm ³

表-7 製鋼スラグの品質

記号	種類		水浸膨張比 (%)	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	粗粒率	エージング方法
鹿	鹿島	転炉	0.37	3.04	4.54	2.98	蒸気

表-8 フライアッシュの品質

記号	絶乾密度 (g/cm ³)	ブレン値 (cm ² /g)	強熱減量 (%)
鹿	2.19	3240	0.51

表-9 FS コンクリートの配合 (鹿島防波堤上部コンクリート)

記号	使用材料			スラン ^o (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						AE減水剤 (kg/m ³)
	C	FA	SS					W	C	SS	BS	FA	BS	
鹿島防波堤	BB	鹿	鹿	7.5	3.6	62.2	43	143	230	480	258	139	1092	2.45

3.3 鹿島港防波堤上部工に使用されたFSコンクリート

本研究では、平成9年度に試験施工（暴露試験）された鹿島港防波堤上部コンクリートのコアを採取し、長期間暴露されたFSコンクリートについても、調査を行った。

使用した製鋼スラグは、表-7に示す水浸膨張比が0.37%のものを用いた。また、使用したフライアッシュを表-8に示す。なお、このFSコンクリートは、1997年9月7日に表-9に示す配合で打設された。今回の検討では、上部コンクリートを2007年8月27日にコア採取し分析等を行った。なお、本文中に示さなかった結果については、取り纏めて付録Bに示す。

4. 製鋼スラグの品質管理試験方法について

安定なコンクリートを製造するためには、使用する材料の物性を正確に把握する必要がある。製鋼スラグは3.1で示したように、JIS骨材とは粒度や形状などが異なるため、現行の手法では的確に材料の物性を評価できていない可能性がある。そこで、FSコンクリート製造のための最適な材料試験方法について検討を行った。

4.1 密度・吸水率試験方法

骨材の表乾密度および吸水率は配合設計および生コンクリート製造時に非常に大切な指標であり、測定された吸水率に大きな差が生じた場合、単位水量が大きく増減することになる。このことは、フレッシュのみならず硬化後のコンクリートにも影響を与える。一般的な試験方法としては、JIS A 1109に準拠したフローコーンによる判定がある。しかしながら、測定した吸水率と簡易的であるが、人の手および目視による判定によって、骨材の含水状態を確認したところ、表面状況に違いが認められた

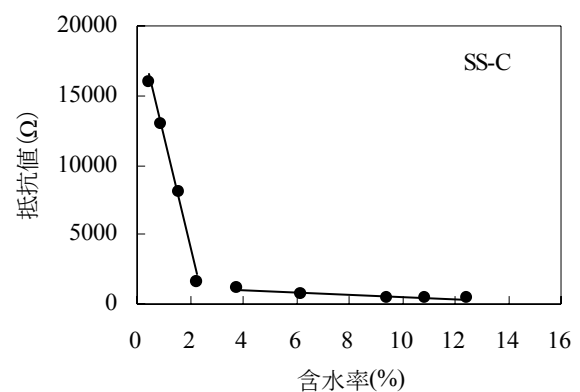


図-3 含水率と電気抵抗値の関係

ことから、製鋼スラグ骨材の密度・吸水率試験の最適な方法の検討を試みた。

現在、土木学会において「電気抵抗法によるコンクリート用スラグ細骨材の密度および吸水率試験方法（案）（JISCE-C 506-2003）」が規準化されている¹¹⁾。これは、高炉スラグ、フェロニッケルスラグ、銅スラグおよび電気炉酸化スラグなどのコンクリート用スラグ細骨材に適用される基準である。そこで、同じスラグ骨材である製鋼スラグへの適用について検討を試みた。

図-3に製鋼スラグ細骨材の含水率と電気抵抗値の関係を示す。製鋼スラグは、Feを多く含む骨材で電気抵抗測定時に何らかの影響があるかと考えられたが、製鋼スラグが表乾状態までの乾燥状態にある時は含水率の増加にともない抵抗値は急激に減少し、表乾状態以降の湿潤状態の電気抵抗値は緩やかに減少した。また、大きなばらつきもなく非常に良好な測定結果であった。したがって、JISCE-C506-2003で規定された試験方法によって製鋼スラグ細骨材も測定可能と考えられた。

図-4および図-5にJIS A 1109で行うコーン法およびJISCE-C506-2003で行う電気抵抗法の各試験方法から求められた製鋼スラグの表乾密度および吸水率を示す。表乾

密度、吸水率ともに、それぞれの測定結果には差が生じた。全体的に電気抵抗法（JSCE法）よりもコーン法（JIS法）の吸水率が小さくなり、表乾密度が電気抵抗法（JSCE法）よりもコーン法（JIS法）の方が大きくなる傾向を示した。吸水率は最大で4%程度の差が生じた。

表乾密度および吸水率試験は、いかなる骨材であろうと、試験を繰り返し行った場合に結果にばらつきが生じてはならない。図-6に数回繰り返し行った表乾密度・吸

水率試験の表乾密度の測定結果のばらつきについて示す。1回のみ結果もあり、妥当性を検討するためには検体数を増やす必要があるが、今回の結果においては、コーン法（JIS法）の場合、2回の測定で最大0.4g/cm³程度ばらつき、電気抵抗法（JSCE）では、3回の測定で約0.05g/cm³となった。コーン法による試験の測定結果の差は、スラグ骨材のように角張った形状の骨材の骨材同士のかみかわせによって生じたものと考えられる。したがって、製鋼スラグをコンクリート用骨材として利用する場合は、比較的再現性のある電気抵抗法によって骨材試験を実施する方が望ましいと考えられる。

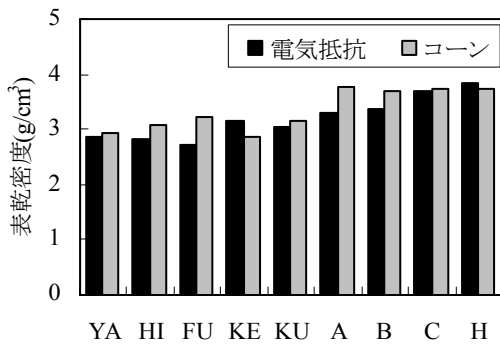


図-4 表乾密度の測定結果

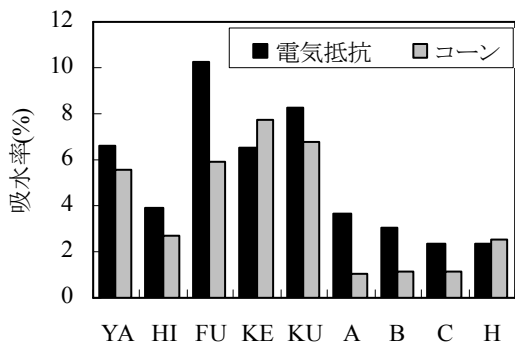


図-5 吸水率の測定結果

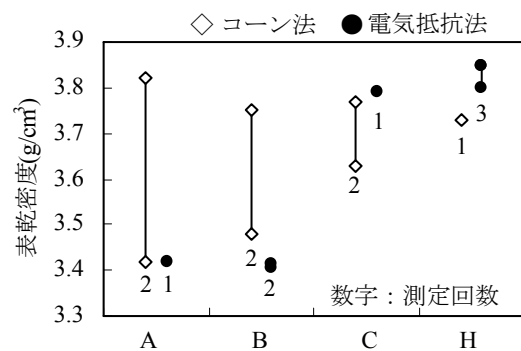


図-6 表乾密度のばらつき

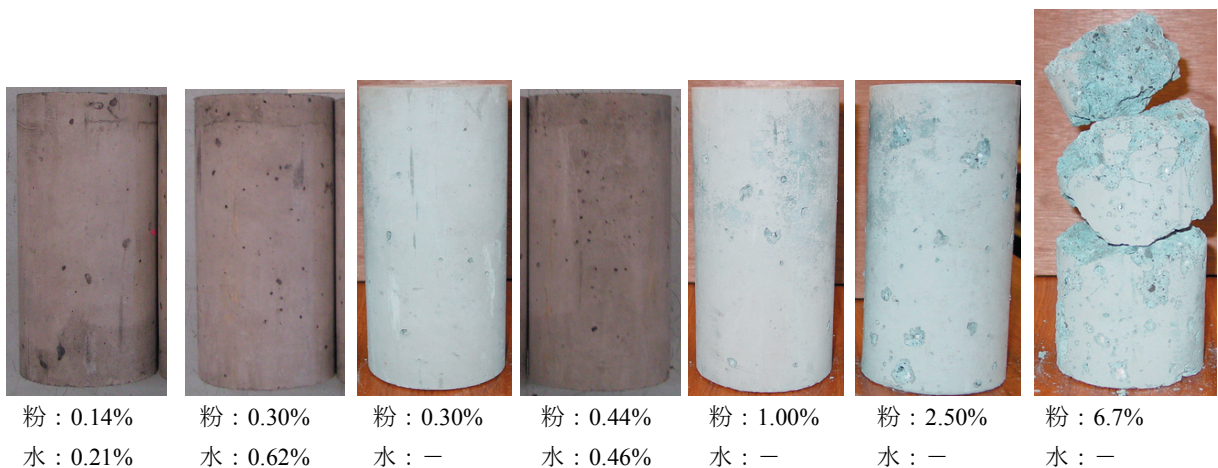


写真-3 オートクレーブ養生後の供試体表面状況

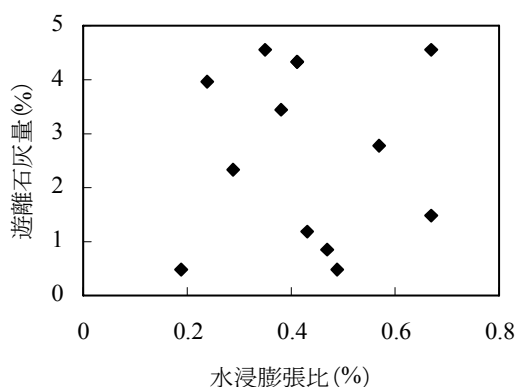


図-7 水浸膨張比と遊離石灰量の関係

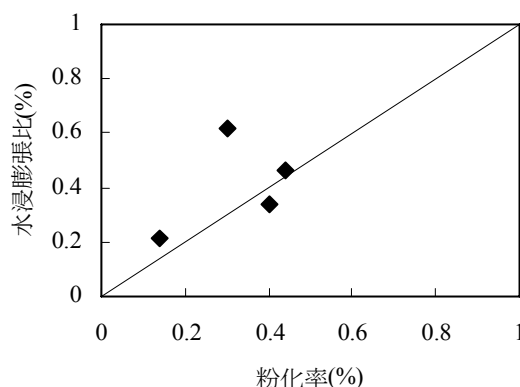


図-8 水浸膨張比と粉化率の関係

一方で、水浸膨張比が 1.0%程度でも 0.5%の製鋼スラグと同程度の長さ変化率を示す場合もある²⁾。したがって、製鋼スラグの水浸膨張比が FS コンクリートの品質の安定性を十分に評価できていない可能性がある。

水浸膨張試験は、ある容積の製鋼スラグ全体の平均的な膨張性を評価する指標であり、路盤のように、スラグ粒で構成されたものの全体的な膨張が問題となる場合の膨張安定性評価に適している。図-7に水浸膨張比と遊離石灰 (free-CaO) 量の関係を示す。結果から、骨材膨張に影響を与える遊離石灰と水浸膨張比には相関は得られず、製鋼スラグ粒個々の膨張特性を十分に評価できていないと考えられる。

骨材の膨張量を測定する方法として、製鋼スラグ水和固化体で用いられている粉化率試験がある¹²⁾。粉化率試験は製鋼スラグ粒個々の膨張破壊を照査でき、工業的に計量不可能な free-CaO や free-MgO 粒の存在量に代わる指標となる。したがって、粉化率は、スラグ粒個々の膨張影響を受ける場合の膨張安定評価に適する試験と考えられる。本試験の測定方法は、細粒径をカットした製鋼スラグ (5kg) を 80℃恒温水槽に浸漬し膨張促進させ、細粒径に破碎した製鋼スラグの割合を測定するものである。算定方法を式 (1) に示す。

$$\text{粉化率}(\%) = \frac{\text{粉化スラグ質量}(\text{kg})}{\text{初期試料質量}(\text{kg})} \times 100 \quad (1)$$

ただし、FS コンクリートの場合、細骨材として使用するため、製鋼スラグの粒径は 5mm 以下と小さい。小粒径になるほど、骨材の膨張破壊を正確に判定できない可能性もある。図-8 に水浸膨張比と粉化率の関係を示す。全体的には 1:1 の増加傾向を示す中で、特異な骨材が存在することが分かる。これら骨材を使用した FS コンク



図-9 ポップアウトのトレース図の一例

リートを作製し、膨張抑制評価試験を行った。オートクレーブ養生後の供試体表面の状況を写真-3 に示す。粉化率が大きくなるに従い、ポップアウトの量も多くなっていることが分かる。粉化率 0.44%以下の供試体においては、ポップアウトが少し確認された程度であったが、粉化率 6.7%の供試体においては、オートクレーブ養生中の骨材の異常膨張によって供試体が破壊した。外観観察による骨材安定性の評価を行うにあたり、供試体側面のポップアウトの状況をトレースし (図-9)、ポップアウトの面積を求め骨材の安定性を定量化した。製鋼スラグの粉化率または水浸膨張比とオートクレーブ養生後の供試体のポップアウト率の関係を図-10 に示す。ここで、ポップアウト率は供試体表面積との比である。粉化率との関係は、粉化率が大きくなるに従いポップアウト面積率も増加する傾向が認められた。水浸膨張比との関係は、水浸膨張比 0.6%の製鋼スラグにおいて、ポップアウト率が低下した。したがって、粉化率試験の方が FS コンクリートの異常膨張を的確に評価できていると考えられる。今回の試験結果によって得られた粉化率とポップアウト率との関係を式 (2) に示す。

$$A = 5.20x - 0.90 \quad (2)$$

ここに、 A : オートクレーブ養生後のポップアウト率(%),
 x : 粉化率(%)である。

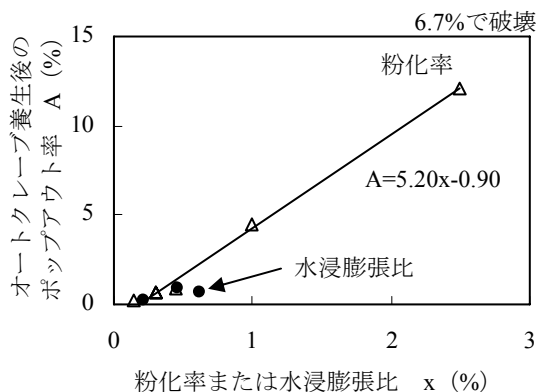


図-10 粉化率または水浸膨張比とポップアウト率の関係

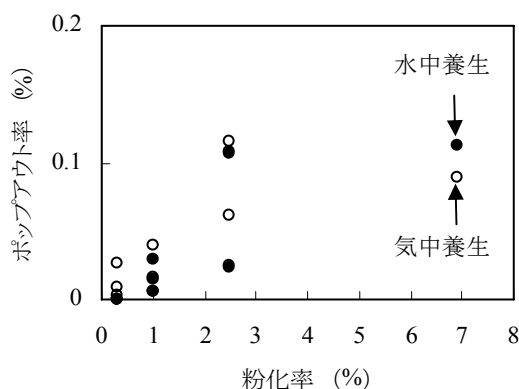


図-11 気中および水中養生供試体の材齢3年時のポップアウト率と粉化率の関係

今回の結果からは、ポップアウトを許容しない安定なコンクリートを製造する必要がある場合の製鋼スラグの粉化率は0.15%以下となった。また、外観上ほとんど問題ないと考えられた粉化率0.5%の場合で、ポップアウト率は1.7%程度となる。ただし、これら値は将来的なFSコンクリートの品質安定性の予測であり、必ずしも同様なポップアウトが実環境で生じるとは限らない。図-11に、気中および水中養生を行っているFSコンクリート供試体の材齢3年時のポップアウト率と粉化率の関係を示す。なお、海水養生の供試体は、FSコンクリート中の鉄(Fe)が腐食し、コンクリート表面を錆が覆ってしまったため測定できなかった。一般のコンクリートであれば安定化していると思われる暴露3年の状況で、いずれのFSコンクリートもポップアウトは、0.11%以下となった。若干、粉化率が大きくなるに従って、ポップアウト率も増加する傾向にあるが、オートクレーブ養生で破壊に至った粉化率6.7%のものでも0.11%と非常に小さな値である。このことから、オートクレーブ養生のポップアウト率での評価では、非常に安全側の照査となる可能性はあるが、オートクレーブ養生時のポップアウトが最大

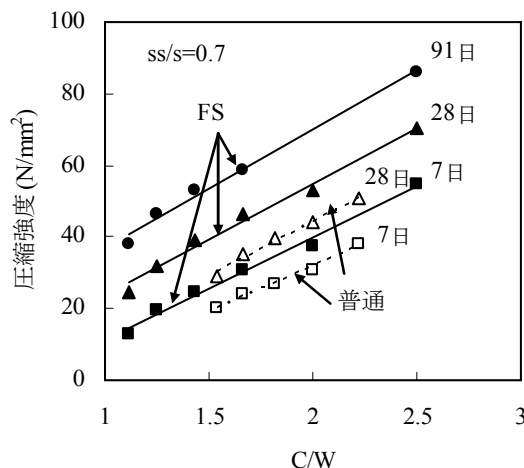


図-12 C/Wと圧縮強度の関係

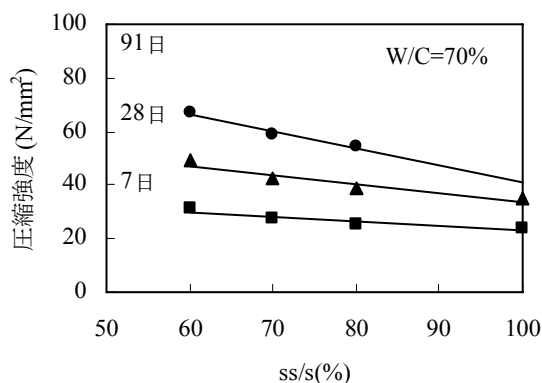


図-13 ss/sと圧縮強度の関係

になると仮定し、それを指標として材料の選定を行ってもよいと考えられる。ただし、骨材からの溶出に伴う膨張エネルギーが蓄積されている可能性もあり、信頼性向上のためには、今後もオートクレーブ養生によるポップアウト率のデータの蓄積と実環境でのFSコンクリートの劣化変状の把握が必要である。

最後に、FSコンクリートに製鋼スラグ細骨材を用いるための粉化率試験方法(案)について、付録Cに示す。ただし、今後もデータを蓄積を行い、試験方法の改良または信頼性を向上させる必要があると考えている。

5. FSコンクリートの配合設計方法に関する検討

5.1 配合強度について

コンクリートの配合設計は、設計基準強度および耐久性の両面を満足する配合を選定する必要がある。

図-12に材齢7日、28日および91日のセメント水比(C/W)と圧縮強度の関係を、図-13に細骨材中に占める製鋼スラグの容積比(以下、製鋼スラグ細骨材容積比(ss/s)と呼ぶ)と圧縮強度の関係を示す。一般にコンク

リートの圧縮強度はセメント水比と比例関係にあることが知られているが、FS コンクリートにおいても同様に C/W と比例関係が認められた。今回の結果では、

普通コンクリートの場合：

$$\sigma = 30.0 (C/W) - 15.7 \quad (3)$$

FS コンクリートの場合：

$$\sigma = 31.1 (C/W) - 7.5 \quad (4)$$

となった。ここに、 σ ：圧縮強度 (N/mm²)、C/W：セメント水比である。普通コンクリート、FS コンクリートともに傾きは 30N/mm²程度となり、普通コンクリートと同等であると考えられる。ただし、FS コンクリートの場合、細骨材としてフライアッシュを多量に混入しているため、同一セメント水比において圧縮強度はおよそ 8N/mm²程度増加した。また、製鋼スラグ細骨材容積比 (ss/s) と圧縮強度の関係も比例関係が認められ、ss/s が大きくなるにしたがって強度が低下した。これは、製鋼スラグ容積の増加に伴い細骨材中のフライアッシュ量が減少するため、フライアッシュのポズラン反応による強度増加が減少したためであると考えられる。いずれにしても、FS コンクリートの場合、セメント水比および製鋼スラグ細骨材容積比と圧縮強度の関係を用いて配合強度を算定することが可能で、今回の結果から得られた配合強度は式(5)で示すことができる。

$$\sigma_{28} = 31.1 \cdot (C/W) - 33 \cdot (ss/s) + 15.6 \quad (5)$$

ここに、 σ_{28} ：材齢 28 日の圧縮強度 (N/mm²)、C/W：セメント水比、ss/s：細骨材中の製鋼スラグの容積比である。ただし、 $1.1 < C/W < 2.5$ 、 $0.6 < ss/s < 1.0$ の範囲とする。

次に、FS コンクリートの圧縮強度のばらつきについて、**図-14**に材齢 7 日、28 日および 91 日の圧縮強度の度数分布を示す。圧縮強度の測定は、骨材の品質による影響も加味し、製鋼スラグは 8 種類の骨材 (SS-A, B, C, D, E, F, G, H) を用い、フライアッシュは FA-A, B および C の 3 種類の骨材を用いた結果である。FS コンクリートの配合を表-10に示す。いずれの配合も W/C=70%、ss/s=70%である。異なる骨材を用いた場合でも、各材齢における圧縮強度のばらつきは標準正規分布に従い、各材齢の圧縮強度の平均値、標準偏差および変動係数は表-11に示すとおりとなった。標準偏差は材齢 7 日で 1.51N/mm²、28 日で 2.85 N/mm²、91 日で 2.58 N/mm²となった。一般に普通コンクリートの配合設計ではレディーミクストコンクリート工場の実績をもとに定められる

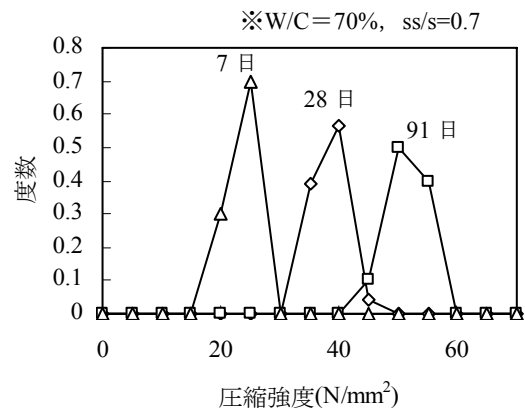


図-14 圧縮強度の度数分布

表-10 FS コンクリートの配合

スランブ (cm)	W/C (%)	ss/s (%)	s/a (%)	W (kg/m ³)
10±2.5	70	70	52	170

※目標空気量は、4.0±1.5%または 5.0±1.5%

表-11 圧縮強度の平均値、標準偏差、変動係数

材齢	平均値 (N/mm ²)	標準偏差 (N/mm ²)	変動係数 (%)
7 日	21.2	1.51	7.1
28 日	33.8	2.85	8.4
91 日	48.8	2.58	5.3

※W/C=70%、ss/s=0.7

が、実績がない場合は、2.5N/mm²または 0.1F_q (品質基準強度)の大きい方の値をとる。今回の結果から、FS コンクリートのばらつきも普通コンクリートとほぼ同等であると思われる。

5.2 FSコンクリートのフレッシュ性状について

より簡便に FS コンクリートの配合設計を行うためには、与えられた配合条件 (圧縮強度、スランブ、空気量、水セメント比など) を満足できる配合設計手法を構築する必要がある。**図-15**に水セメント比とスランブの関係を、**図-16**に水セメント比と空気量の関係を示す。スランブ、空気量ともに、水セメント比が大きくなるにつれ、線形的にスランブおよび空気量が増加していることが分かる。スランブは、水セメント比 10%の増減に対し 3cm 増減し、空気量は水セメント比 10%の増減に対し、0.4% 増減となった。

図-17 および **図-18** に製鋼スラグ細骨材容積比とスランブおよび空気量の関係を示す。FS コンクリートのフレッシュ性状には、フライアッシュの混入量が大きく影響し、製鋼スラグ細骨材容積比 1%の増減に対し、スランブは 1.2cm 増減する結果となった。空気量は、若干増加

傾向にあり、ss/s10%の増減に対し、0.3%の増減となった。

細骨材率とスランプおよび空気量の関係を図-19 および図-20 に示す。スランプは、細骨材率1%の増減に対し2cmの減増となった。空気量に関しては、明確な相関が得られなかった。

単位水量とスランプおよび空気量の関係を図-21 および図-22 に示す。単位水量 5kg/m^3 の増減に対し、スランプは4cmの増減となり、空気量は0.4%の増減となった。いずれの場合においても、配合条件とスランプ・空気量の関係はある程度の相関が得られた。

次に、図-23 に SP 使用量とスランプの関係を示す。高スランプの場合、スランプが崩れ正確な値がとれない場合があったが、スランプ 12.5cm 以下の場合には、SP 使用量と相関が得られた。SP 使用量1%の増減に対し、スランプは2cmの増減となった。ただし、FS コンクリートに化学混和剤を用いる場合に注意が必要となるものとして、フライアッシュ中の未燃炭素の影響が考えられる。未燃炭素は非常に比表面積が大きいいため混和剤が吸着し、コンクリートの流動性に必要な剤の量を減少させ空気連行などを妨げてしまう¹³⁾。また、製鋼スラグは粒子形状が角張り重たい骨材であるため、粘性等が失われた場合

には材料分離が生じ、コンクリートのフレッシュ性状に大きく影響すると思われる。図-24 に同一スランプ（ $10 \pm 2.5\text{cm}$ ）時のフライアッシュの強熱減量と SP 使用量の関係を示す。製鋼スラグの品質の違いによりばらつきが大きく、相関から外れる場合もあったが、強熱減量が大きくなるにつれ、所定のスランプを得るために必要な SP 添加量は増加する傾向にあった。今回の結果からは、フライアッシュの強熱減量1%の増減に対し SP 使用量を0.1P*%程度増減する必要があると考えられる。

図-25 に同一スランプ（ $10 \pm 2.5\text{cm}$ ）時の製鋼スラグの粗粒率（FM）と SP 使用量の関係を示す。使用したフライアッシュの種類によって SP 使用量は大きく異なるものの、全体的に製鋼スラグの粗粒率が大きくなるにしたがい SP 使用量が低下する傾向にあった。所定のスランプを確保するためには、粗粒率1%の増減に対し、SP 使用量を $0.25P \times \%$ 減増させる必要がある。ただし、粗粒率は細骨材の粗さの指標であり、粗粒率の大きな製鋼スラグを用いる場合は、FS コンクリートの粘性が低下することが考えられるため、試し練りにより細骨材率等も変更する必要がある。

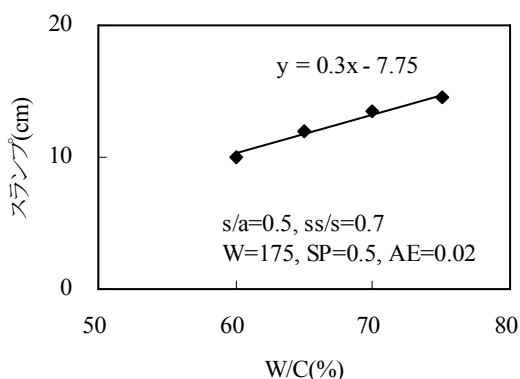


図-15 水セメント比とスランプの関係

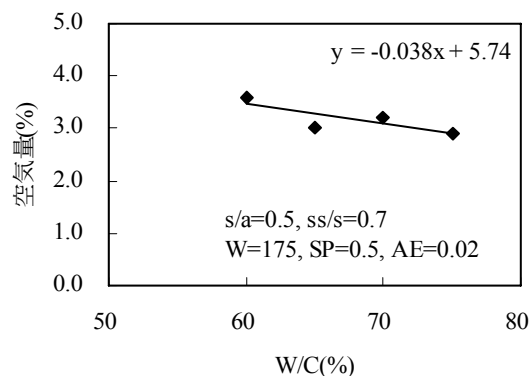


図-16 水セメント比と空気量の関係

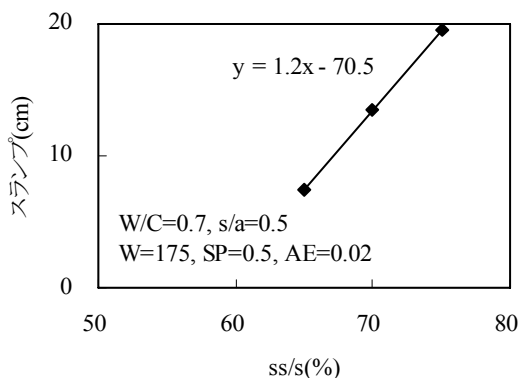


図-17 製鋼スラグ細骨材容積比とスランプの関係

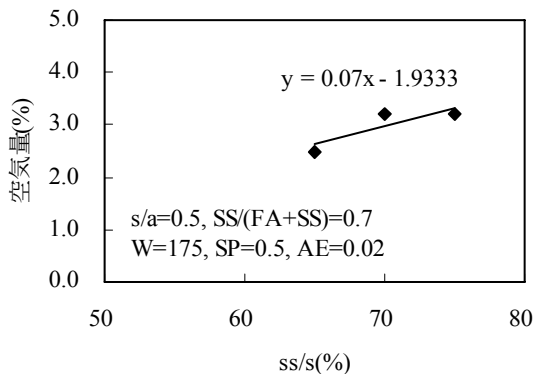


図-18 製鋼スラグ細骨材容積比と空気量の関係

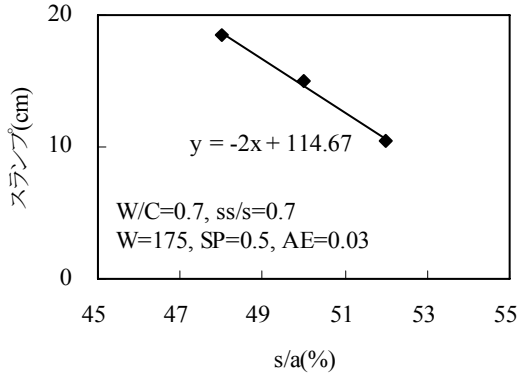


図-19 細骨材率とスランプの関係

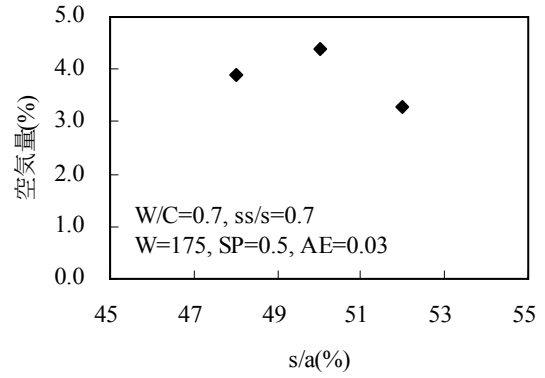


図-20 細骨材率と空気量の関係

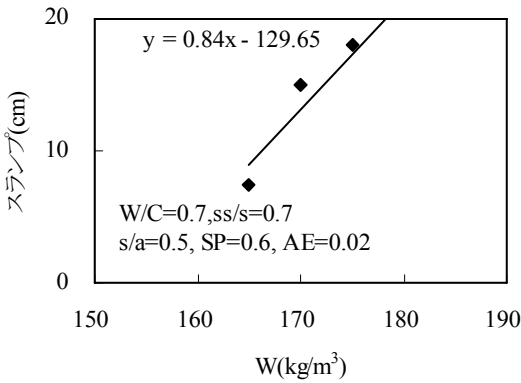


図-21 単位水量とスランプの関係

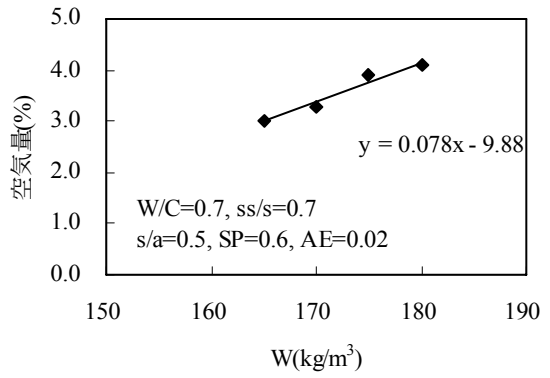


図-22 単位水量と空気量の関係

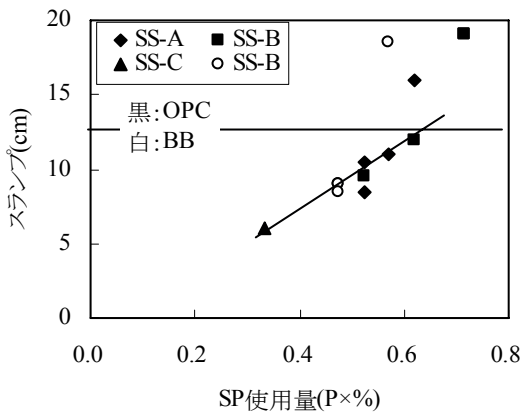


図-23 SP 使用量とスランプの関係

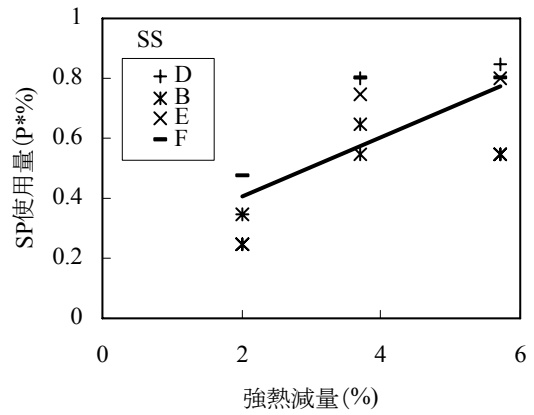


図-24 強熱減量と SP 使用量の関係

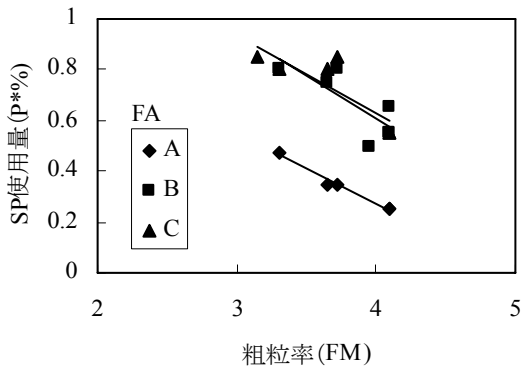


図-25 粗粒率と SP 使用量の関係

5.3 FS コンクリートの配合設計

前項の検討結果から、設計基準強度を基本とした配合設計手法の構築を試みた。図-26 に配合設計手順（案）を示す。FS コンクリートにおいても、圧縮強度とセメント水比の関係は比例関係にあり、また、使用材料の違いによるコンクリートのばらつきも天然骨材使用のコンクリートとほぼ同等であったため、設計基準強度を基本として、FS コンクリートの配合強度を算出した。配合強度は、強度のばらつきは標準正規分布にしたがうと仮定し、片側 5%水準で求めた。その後、製鋼スラグ細骨材容積比を設定することで、セメント水比と圧縮強度の関係により水セメント比を算出できる方法とした。この手法によって、配合設計時に使用材料や配合条件で強度や安定性などの性能をある程度把握でき配合決定までの作業の簡略化が可能となると考えられる。

ここで、塩化物イオンの浸透による鉄筋腐食の照査については、8 章で詳しく述べるが、港湾の施設の技術上の基準・同解説では、コンクリートの配合条件は、耐久性を考慮して適切に定める必要があり、栈橋上部工等のように、これまでに塩害劣化によって所要の性能が失われる事例が多発しているような構造部材においては要求性能を照査する必要がある。ただし、それ以外の構造部材では、これまでの研究成果や知見から標準的な配合条

件が示されている¹⁴⁾。FS コンクリートは、フライアッシュを細骨材の代替として使用するため、耐久性の向上に効果があるものの、配合上の水セメント比には反映されない。そこで、配合設計時の FS コンクリートの耐久性の照査については、細骨材の代替であるフライアッシュも結合材と考え、水粉体比が耐久性から求められる最大水セメント比を下回れば良いこととした。

設定された配合条件を満たす配合の修正方法について、フレッシュコンクリートの試験結果から配合補正できる資料を作成した。基本配合を表-12 に、補正方法を表-13 および表-14 に示す。図-26 で設定された配合条件と基本配合を比較し、相違する場合に補正を行うものである。補正方法は、表-12 と設定された配合条件を比較し、表-13 によって、スランプおよび空気量の変化を推定し、最終的に設定された FS コンクリートの目標スランプおよび目標空気量に合わせるように混和剤量（SP 量）を調整するものである。ただし、今回は空気量調整剤として AE 剤も用いているが、空気量の調整については、別途試験練りで調整するように考えた。これは、現状では、SP 剤と AE 剤の混和剤同士の相関が十分に得られていないためである。

表-12 FS コンクリートの基本配合

粗骨材最大寸法(mm)	FA の強熱減量(%)		SS の粗粒率	スランプ(cm)	空気量(%)
20	3.7		3.65	10±2.5	4.0±1.5
W/C(%)	ss/s(%)	s/a(%)	単位水量(kg/m ³)	SP(p*wt%)	AE 剤(p*wt%)
70	70	52	170	0.8	0.012

表-13 配合変更によるフレッシュ状態の変化

	スランプ	空気量
水セメント比 (W/C) が 10%の増減	3cm の増減	0.4%の増減
製鋼スラグ細骨材容積比 (ss/s) が 5%の増減	6cm の増減	0.3%の増減
細骨材率 (s/a) が 1%の増減	2cm の増減	—
単位水量 (W) が 5kg/m ³ の増減	4cm の増減	0.4%の増減

表-14 骨材品質の違いおよびスランプの増減に対する SP 混和量の調整

	SP 量
製鋼スラグの粗粒率が 1.0 の増減	0.25 (P*) の増減
フライアッシュの強熱減量が 1.0%の増減	0.10 (P*) の増減
スランプが 1.0cm の増減	0.05 (P*) の増減

※P は単位セメント量と単位フライアッシュ量の和とする。

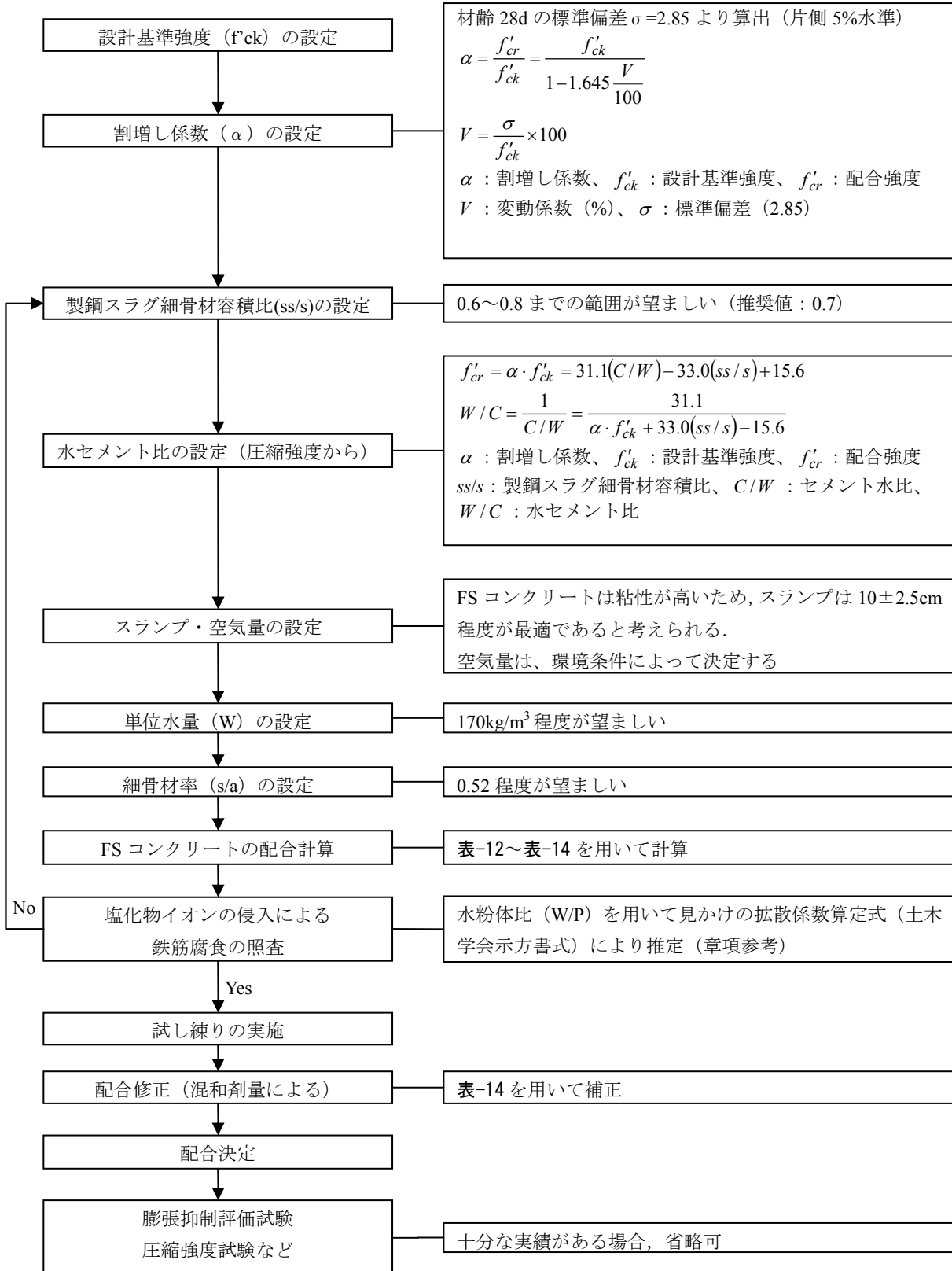


図-26 FS コンクリートの配合設計手順 (案)

6. FSコンクリートの品質安定性に関する検討

6.1 生コンクリートの均一性

図-27に同一配合のFSコンクリートを製造した際のバッチ毎のスランプの測定結果を、図-28に空気量の測定結果を示す。練り混ぜは100Lのパン式強制ミキサで行った。いずれの場合も多少のばらつきはあるものの、値は許容値内にあり、均一な生コン製造は可能と考えられる。

6.2 FSコンクリート内部構造の安定性について

(1) 供試体概要

実験に用いたコンクリートの配合を表-15に示す。供試体は10×10×40cmの角柱供試体を作製し、28日の湿布養生後、港湾空港技術研究所構内海水循環水槽の海中部、干満部およびシャワー暴露場に2年間暴露したものをを用いた。ただし、分析には塩化物イオンの影響を受けていないと思われる供試体内部の試料を用い、製鋼スラグおよびフライアッシュの品質の違いがFSコンクリート内部構造に及ぼす影響について検討を行った。

(2) FSコンクリートペースト部の微視的観察結果

ペースト部分の電子組成像を撮影し、微視的観察を行った。ここで、電子組成像は物質を構成する鉱物の平均原子番号の違いによりコントラストが生じ、原子番号が大きいものほど明るく観察される。また、黒色の部分は空隙となる。写真-4にペースト部の電子組成像を示す。普通コンクリートは、数10μm程度の未水和セメント（セメントクリンカー）が比較的多く存在していることが分かる。また、全体的には均一にセメントマトリックスが形成されているが、試料調整の際に生じたものも含まれると思われるが、自己収縮または乾燥収縮などによりと思われる数μm以下の空隙が網目状に生じていた。

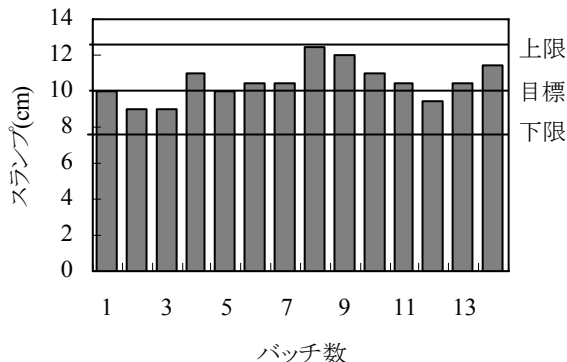


図-27 バッチ毎のスランプ測定結果

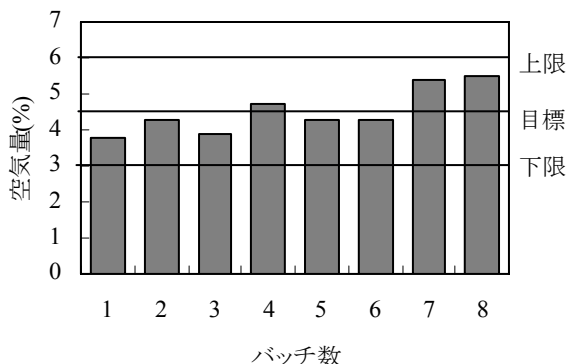


図-28 バッチ毎の空気量測定結果

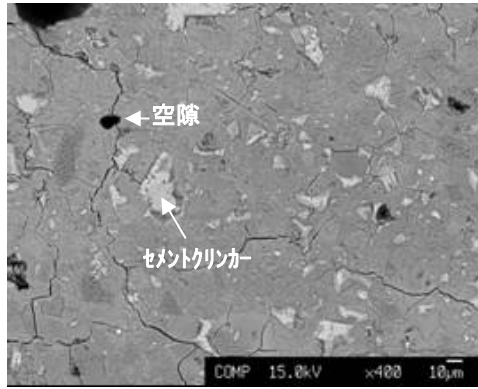
しかしながら、FSコンクリートの場合、独立な空隙が多数認められるが、毛細管空隙のような連続空隙はほとんど発生していない。FSコンクリートの空隙は、それぞれが独立した空隙であり、その形状や位置から練り混ぜによって連行した空気またはフライアッシュおよび製鋼スラグ内部にある微細な空隙であると考えられる。毛細管空隙は水分や外部劣化因子の浸透に大きな影響を及ぼす空隙となることから、FSコンクリートは水密性が高く、外部劣化因子の浸透に対する抵抗性も高い、緻密なセメントマトリックス構造であると考えられる。

写真-5にFSコンクリートの骨材界面の顕微鏡写真の

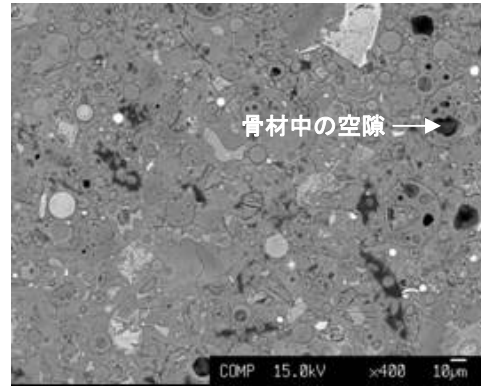
表-15 FSコンクリートの配合

記号	使用材料			W/C (%)	W/P (%)	ss/s (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					SP (p*wt%)	AE (p*wt%)
	C	FA	SS					W	C	SS	FA	BS		
OAD	O	A	D	70	32.4	70	52	170	243	911	281	883	0.4	0.004
OAE	O	A	E	70	32.4	70	52	170	243	890	281	883	0.4	0.004
OAF	O	A	F	70	32.4	70	52	170	243	898	281	883	0.5	0.004
OBD	O	B	D	70	35.2	70	52	170	243	911	240	883	0.8	0.012
OBE	O	B	E	70	35.2	70	52	170	243	890	240	883	0.8	0.012
OBF	O	B	F	70	35.2	70	52	170	243	898	240	883	0.8	0.012
OCD	O	C	D	70	35.1	70	52	170	243	911	241	883	0.9	0.014
OCE	O	C	E	70	35.1	70	52	170	243	890	241	883	0.8	0.014
OCF	O	C	F	70	35.1	70	52	170	243	898	241	883	0.8	0.014
OCG	O	C	G	70	35.1	70	52	170	243	784	241	883	0.9	0.014

※目標スランプ 10±2.5cm、目標空気量 4.0±1.5%

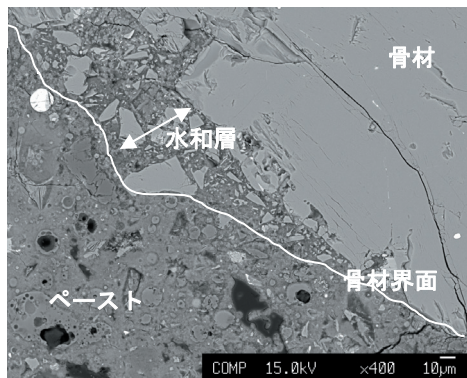


普通コンクリート



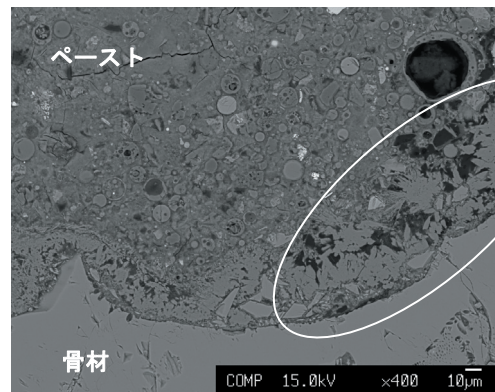
FS コンクリート (OCD)

写真-4 ペースト部の電子組成像 (×400)



FS コンクリート (OCG)

写真-5 細骨材 (製鋼スラグ) 界面の状況



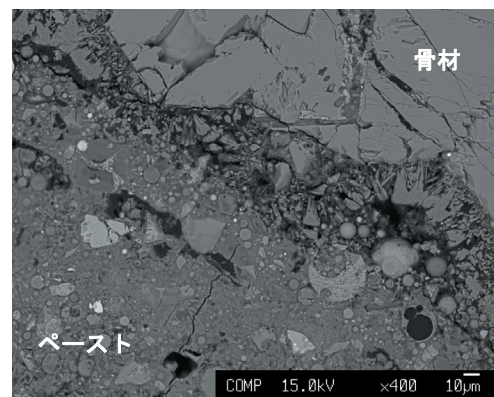
FS コンクリート (OAD)

写真-6 細骨材 (製鋼スラグ) 界面の状況

一例を示す。これは骨材界面のペースト組織が緻密な場合の顕微鏡写真である。骨材粒子の表面から徐々に内部へと水和が進み、骨材界面に水和層が形成されていることが分かる。また、膨張に影響があると思われる水酸化カルシウムの異常な析出は認められず、遷移帯がより緻密な構造に変化しているものと考えられる。

写真-6 は、骨材界面に空隙があったと思われる箇所の顕微鏡写真である。この骨材についても徐々に表面から反応が進んでいることが観察できる。また、空隙部は、C-S-H ゲルまたは水酸化カルシウムと思われる結晶が確認でき、多孔質ではあるものの、徐々に析出した反応生成物によって、空隙を埋めているとも伺える。一方で、写真-7 に示すように遷移領域が非常にポーラスな箇所も確認された。

写真-8 は、鉄を多く含む製鋼スラグ細骨材表面の状況である。このような骨材についても、表面から徐々に反応が進んでいることが観察できる。ただし、その結晶は若干ポーラスで針状もしくは板状の結晶が確認された。



FS コンクリート (OBD)

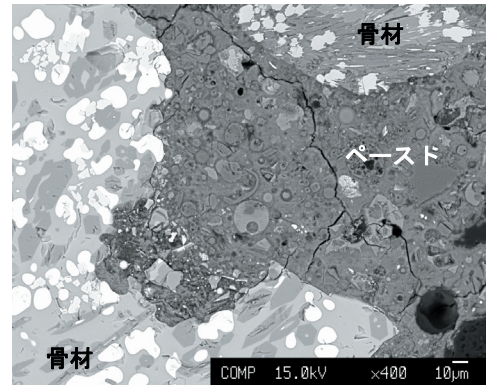
写真-7 細骨材 (製鋼スラグ) 界面の状況

(3) FS コンクリート中の鉱物の同定

図-29 に塩化物イオンの影響が少ないと考えられる供試体中央部より取り出したモルタル部のX線回折による鉱物同定結果を示す。試験は、管球 Cu, 管電圧 50kV, 管電流 250mA, ステップ 0.02°, スキャン速度 5° /分で行った。

骨材起源の鉱物として、メリライト、苦土カンラン石 (2MgO・SiO₂), 石英 (SiO₂), ムライト (3Al₂O₃・2H₂O) およびヘマタイト (Fe₂O₃) が同定された。メリライトはスラグ骨材に由来する鉱物で、ゲーレンナイト (2CaO・Al₂O₃・SiO₂) とアケルマナイト (2CaO・MgO₂・SiO₂) の中間的化学組成をもつ鉱物である。また、ヘマタイトについては、製鋼スラグ中の鉄 (Fe) が酸化したものと思われる。フライアッシュの成分としてはガラス（非結晶のため同定不可）が圧倒的に多いが、少量の結晶物質として石英、ムライトが同定された。

セメント組織の同定結果としては、水酸化カルシウム (Ca(OH)₂), カルシウムシリケート水和物 (nCaO・SiO₂・mH₂O) およびエトリンガイト (3C₃A・3CaSO₄・32H₂O) が同定され、未同定ピークが存在した。未同定ピークに関しては、組成像観察において、モノサルフェート (C₃A・CaSO₄・12H₂O) のような板状結晶が観察されたがモノサルフェートのピークは確認されていない (2θ=9.9°) ため、モノサルフェートの硫酸イオンの部分に塩化物イオンがいくらか置き換わった形態の鉱物ではないかと推



FS コンクリート (OCF)

写真-8 粗骨材（高炉スラグ）界面の状況

定した。以上の同定結果では、特異な鉱物は認められなかったため、製鋼スラグ等の産業副産物材料を用いたコンクリートにおいても、反応によって生成され则认为される鉱物は、セメント鉱物の水和によって生成されるものと同様であると考えられる。

X線回折により得られたX線強度から試料内の水酸化カルシウム量の推定を行った。推定結果を図-30に示す。製鋼スラグの品質が同じ (SS-D) を使用しフライアッシュの品質が異なる FA-A および FA-C を用いた場合は、フライアッシュ中の SiO₂ 量の多い FA-C を使用した FS コンクリート (OCD) の水酸化カルシウム量が若干少なく

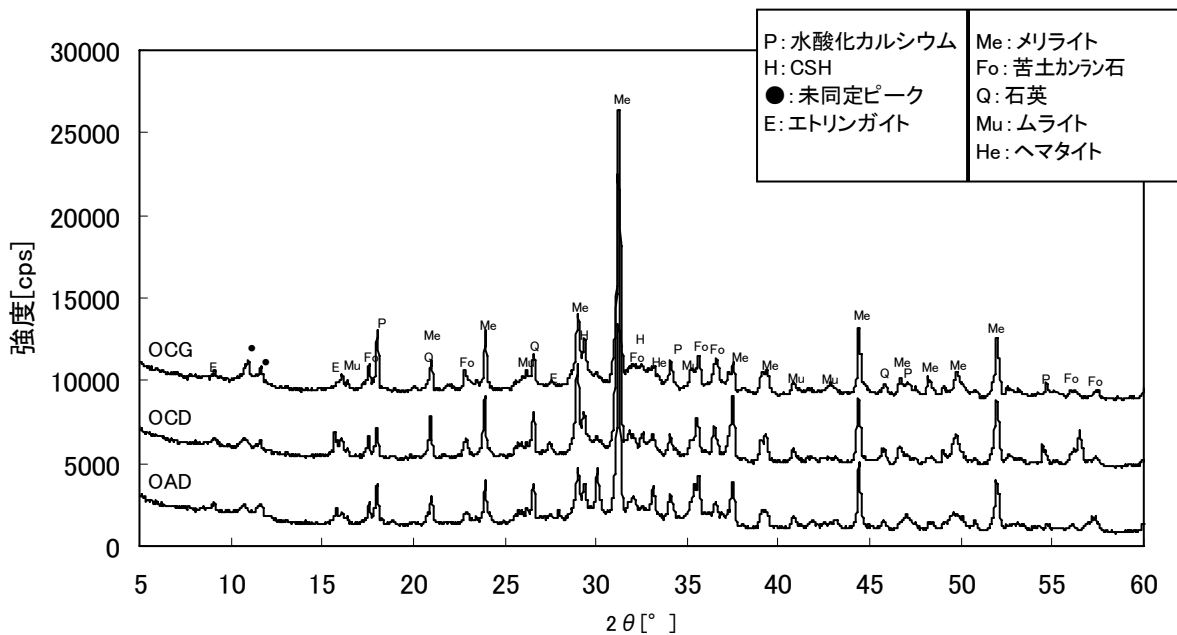


図-29 X線回折結果 (マルチプロット)

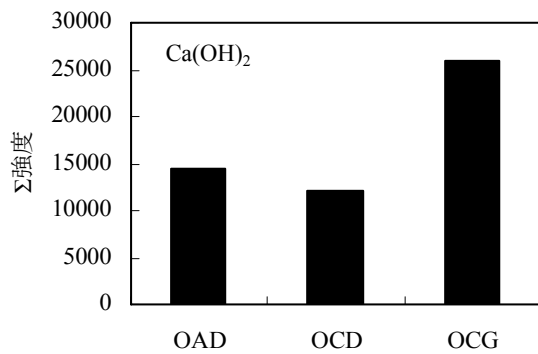


図-30 FS コンクリート中のCa(OH)₂量

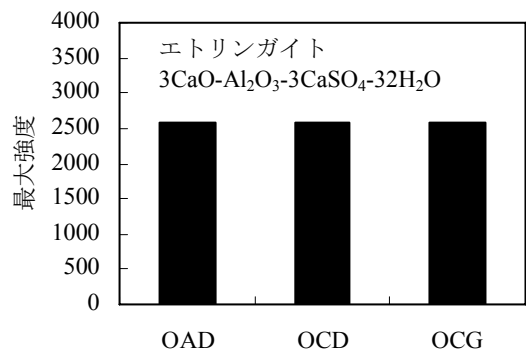


図-31 FS コンクリート中のエトリンガイト量

なった。明確な差ではないが、FA-Cを使用したFSコンクリートの方がポゾラン反応が進み、Ca(OH)₂を多く消費したためと思われる。また、同一フライアッシュ(FA-C)を使用し、異なる製鋼スラグを用いた場合(OCDおよびOCG)では、SS-Gを使用したFSコンクリート(OCG)の方が水酸化カルシウム量が多く同定された。これは、粉化率が大きく(反応性が高い)、不安定であると考えられるSS-Gを使用した方が、骨材中に内在する遊離石灰量(Free-CaO量)が多いため、その反応生成物によって水酸化カルシウム含有量が多くなったと考えられる。このことは、骨材膨張によるコンクリートの不安定化にもつながるため、製鋼スラグの品質については十分に注意して使用する必要があると思われる。

また、骨材界面に生成したと予想されるエトリンガイトおよびモノサルフェートのX線最大強度の比較を図-31および図-32に示す。エトリンガイトは針状で膨張性を有する鉱物のため、急激な生成はコンクリートに悪影響を及ぼす。今回の結果においては、エトリンガイトおよびモノサルフェートの含有量はいずれの供試体も同程度であった。このことから、FSコンクリートの安定性に最も影響を及ぼす鉱物は水酸化カルシウムであると推定される。

(4) 製鋼スラグ骨材界面の状況

骨材界面(400×400μm)の各元素の濃度分布を調べることによって、製鋼スラグ骨材の膨張性について検討した。分析は、カルシウム(Ca)、ケイ素(Si)、マグネシウム(Mg)および硫黄(S)の4元素についてEPMA面分析を行った。試験装置は、日本電子社製X線マイクロアナライザー(JXA-8621M)を用い、測定は、加速電圧:15kV、試料電流:5×10⁻⁸A、プローブ径:0μm、分光結晶:Si、Mg(TAP)、Cl、Ca(PET)、計数時間:40msec、ピクセル数:

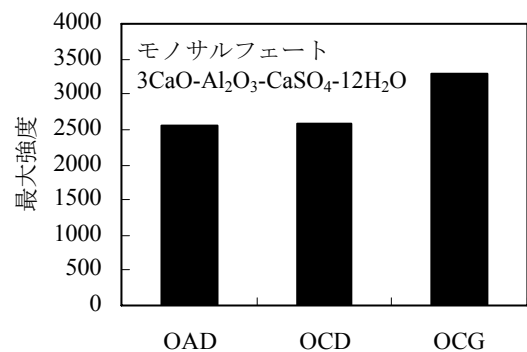


図-32 FS コンクリート中のモノサルフェート量

400×400, ピクセルサイズ:1μm(分析範囲:400×400μm), 標準試料:Si, Ca(Wollastonite, SiO₂=51.73%, CaO=48.27%), Cl(Halite, Cl=60.66%), Mg(Periclase, MgO=99.75%)で行った。

図-33に骨材表面部が水和していると考えられた製鋼スラグのEPMA面分析結果を示す。なお、図中には分析箇所の子電子組成像も併せて示す。なお、この製鋼スラグは元素分布から、ほとんどがカルシウム、マグネシアまたは珪酸によるものと思われる。骨材界面はマグネシア含有量がセメントマトリックスに比べて多いものの、あまり大きな差異はないと考えられる。また、骨材膨張に大きな影響があると考えられる水酸化カルシウムの濃縮等も認められず、安定な状態であると考えられた。今後、製鋼スラグ骨材内部へ水和が進んだ場合においてもあまり影響はないと思われる。

図-34に高濃度のCaOが確認された製鋼スラグ界面のEPMA面分析結果を示す。また、電子組成像より鉄も多く含む骨材であると予想される。SiO₂およびCaOの元素分布からフライアッシュの存在する箇所を推定すると、フライアッシュはCaO分布で黒色円形で映し出され、SiO₂分布で白色円形で現れるため、製鋼スラグとの界面

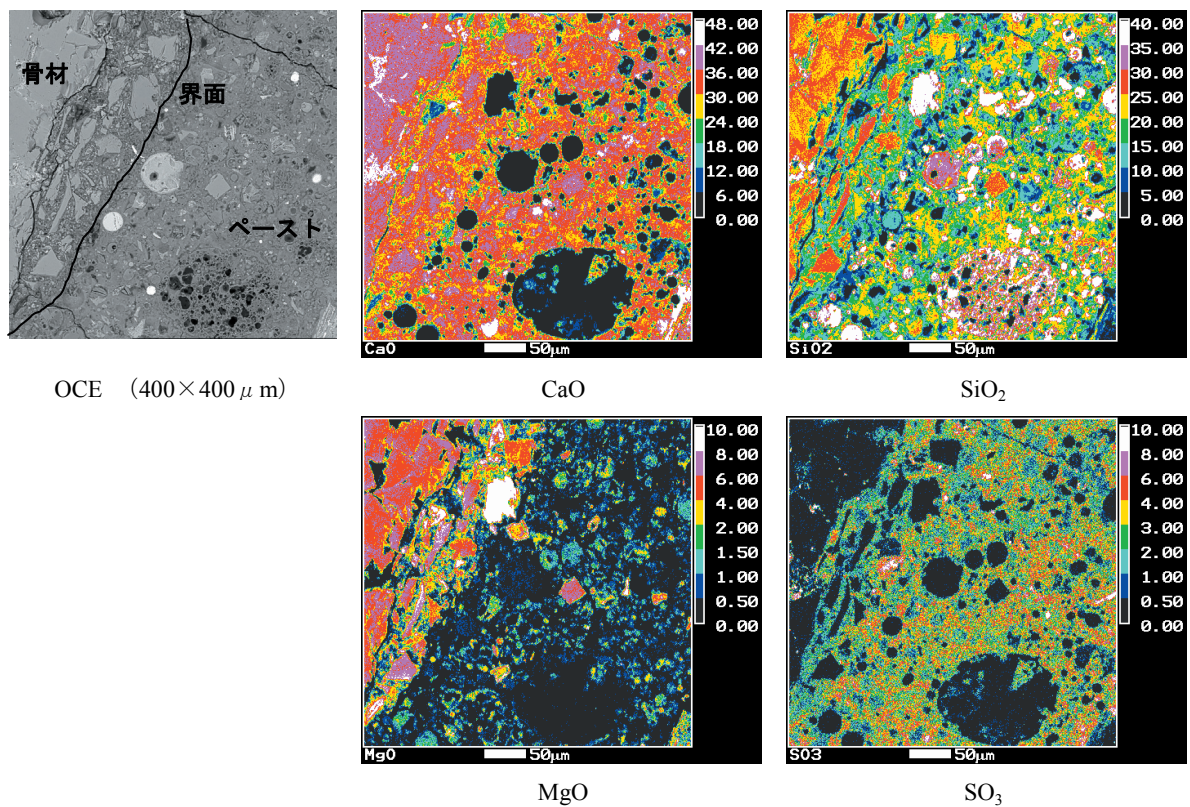


図-33 微少範囲 (400×400 μm) の EPMA 像 (配合 : OCE)

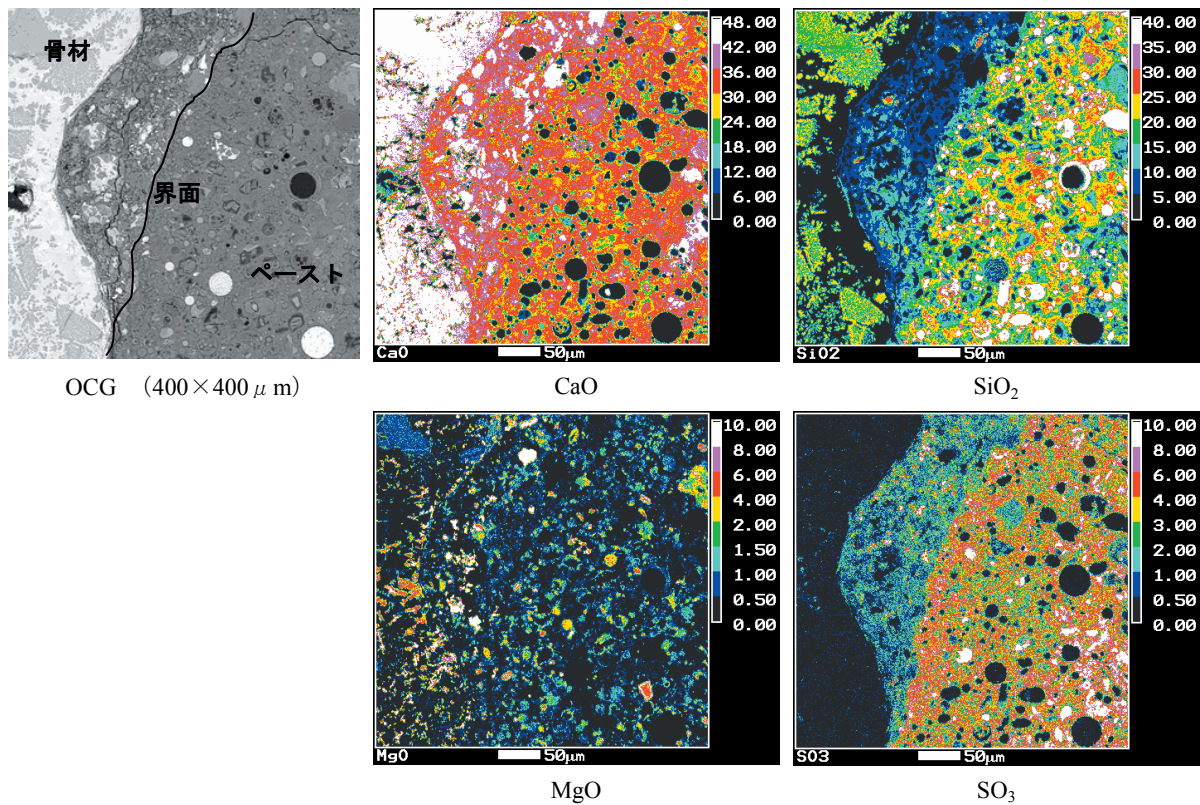
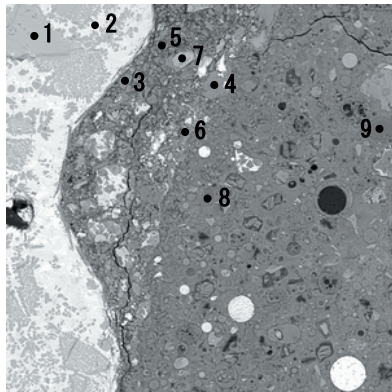


図-34 微少範囲 (400×400 μm) の EPMA 像 (配合 : OCG)

表-16 FS コンクリート内の鉱物組成 (配合 : OCG)

No.	濃度 (%)					Ca/Si モル比	
	CaO	SiO ₂	MgO	SO ₃	other		
1	70.0	19.2	0.6	0.2	10.1	3.9	スラグ中鉱物
2	63.5	22.2	0	0.1	14.3	3.1	スラグ中鉱物
3	67.9	0	0	1.9	30.6		Ca(OH) ₂
4	68.5	0	0	3.5	28.3		Ca(OH) ₂
5	40.2	6.8	1.2	2.5	49.2	6.4	水和物
6	38.6	10.0	1.1	1.2	49.0	4.1	水和物
7	0.9	0	40.4	0	59.1		Mg(OH) ₂
8	29.2	21.9	0.3	2.5	46.0	1.4	C-S-H
9	0.0	89.1	0	0	11.2		フライアッシュ



※左図は、表中の測定位置を示す。

は電子組成像で示した箇所と予想される。SO₃ 分布より骨材中に SO₂ やモルタル中のイオンおよび水等が浸透することで、何らかの生成物に変化するものと予想される。若干、ペースト部に比べ骨材反応層はカルシウム濃度が高いものの、活性状態であると思われるカルシウム分布で白色の領域に比べ分散しているように考えられる。基本的には物質の移動は濃度勾配によるものであると考えられることから、反応生成したカルシウムイオンは骨材側からペースト部に拡散したものと考えられる。ただし、反応層の珪酸 (SiO₂) の濃度は非常に低く、CSH ゲル以外の水和生成物であると考えられる。表-16 に図-34 中の骨材部、骨材遷移部、ペースト部それぞれの鉱物組成を示す。なお、表中の左図に各測定位置を示す。骨材中の鉱物は、CaO が 60~70%程度とカルシウムリッチな鉱物であった。既往の研究によれば、製鋼スラグ中の β-C₂S にはリン (P) が固溶することが報告されており¹⁵⁾、測定結果では、Ca/Si モル比が 3~4 と非常に大きなものの、基本的にはリンを固溶した β-C₂S の集合体に FeO や Free-CaO などが混在していると予想される。

セメントペースト中の C-S-H (表-16, No.8) は、Ca/Si モル比が 1.4 と安定なゲルを生成していると考えられる。また、No.9 はフライアッシュである。骨材界面部分では、Ca/Si モル比が 4~6 と非常にカルシウムが多い結晶であった。骨材中の Ca/Si モル比よりも大きな値を示し、また、硫黄分も確認され電子組成像に針状の結晶体も確認できることから、骨材界面の構造は、C-S-H ゲルの他にエトリンサイトやモノサルフェートなどのアルミネート系の水和物が存在しているものと予想される。また、表-16, No.3,4 (図-34 中の CaO の白色部) は、硫黄が若干検出しているものの、マグネシアおよび珪酸などの存在が認められず、水酸化カルシウムが析出した箇所と考え

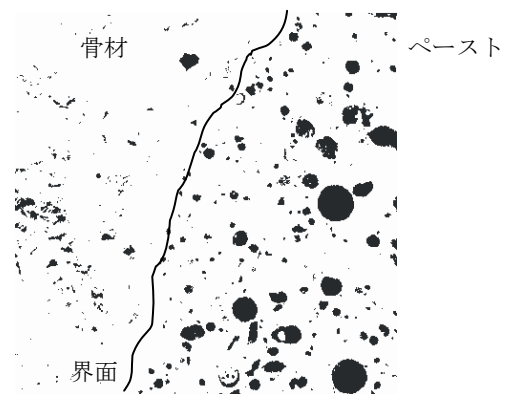


図-35 製鋼スラグ近傍のフライアッシュの分布

られる。同様に、Mg(OH)₂ も確認された。これら FS コンクリートの膨張に起因する化合物は、初期硬化後、空隙部分に徐々に充填されたものと考えられる。今後、骨材からの溶出および化合物の析出が進む可能性はあるが、現時点では、緻密な箇所での水酸化カルシウムの多量の析出や骨材界面からのひび割れ等は確認されず、製鋼スラグによる緻密化が進んでいる段階と考えられる。

表-16 でフライアッシュと判定された箇所のペースト内の分布状況を図-35 に示す。打設時には均一にフライアッシュが分布していたと仮定すれば、製鋼スラグ骨材界面に近づくにつれ粒径が小さくなり、また、フライアッシュ量も少なくなっている。図-36 に未水和フライアッシュの面積率と製鋼スラグ細骨材界面からの距離の関係を示す。なお、配合から求めたフライアッシュ量の理論値も併せて示す。セメントを起源とする水酸化カルシウムとのポゾラン反応も同時に生じるために全体的に理論値よりも小さな値となっている。ただし、製鋼スラグ細骨材界面に近づくにつれ面積率は減少しており、製鋼スラグを起源とした水酸化カルシウムとのポゾラン反応

の促進が確認できる。このことから、フライアッシュが製鋼スラグの膨張抑制に有効であることが確認できた。

(5) 製鋼スラグの品質と FS コンクリートの安定性

骨材界面 (400×400mm) の各元素の濃度分布を調べることで、製鋼スラグ骨材の品質のばらつきが FS コンクリートの安定性に与える影響について検討した。試験装置は、日本電子社製 X 線マイクロアナライザー (JXA-8621M) を用い、測定は、加速電圧：15kV、試料電流： 5×10^{-8} A、プローブ径：50 μm、分光結晶：Si, Mg(TAP), Cl, Ca(PET), 計数時間：50msec、ピクセル数：400×400、ピクセルサイズ：100 μm (分析範囲：400×400mm)、標準試料：Si, Ca(Wollastonite, SiO₂=51.73%, CaO=48.27%), Cl(Halite, Cl=60.66%), Mg(Periclase, MgO=99.75%)で行った。

図-37 に FS コンクリート中のカルシウム (CaO) の EPMA 面分析結果を示す。普通コンクリートに比べて全体的に Ca 濃度の高いコンクリートであることが分かる。FS コンクリートの分布は、高炉スラグ粗骨材の CaO 濃度が高く、ペースト部分はいずれの場合も粗骨材の CaO 濃度よりも若干低い濃度分布となった。ただし、製鋼スラグ細骨材に関しては、所々白色の非常に高い CaO 濃度を示している部分があり、粉化率の増加 (製鋼スラグ D<E<F<G) にもなって、その分布も多くなる傾向にある。この白色部が基本的に骨材膨張を引き起こす箇所と

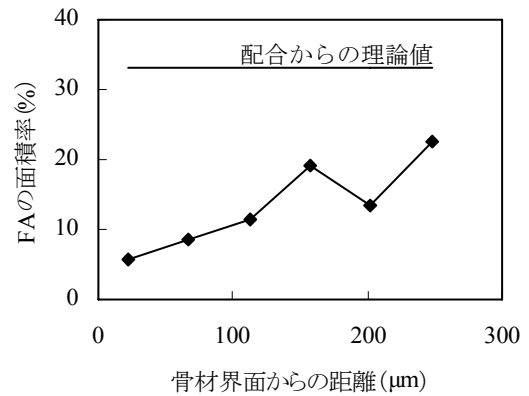


図-36 未水和フライアッシュの面積率

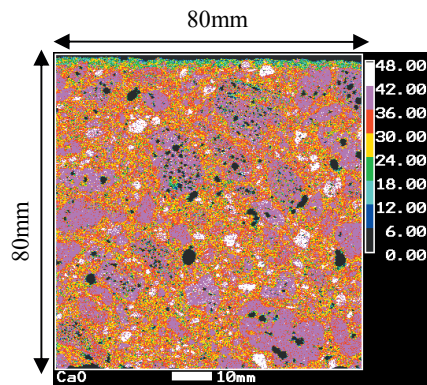


図-38 鹿島港防波堤の FS コンクリートの CaO 分布 (測定範囲：80×80mm)

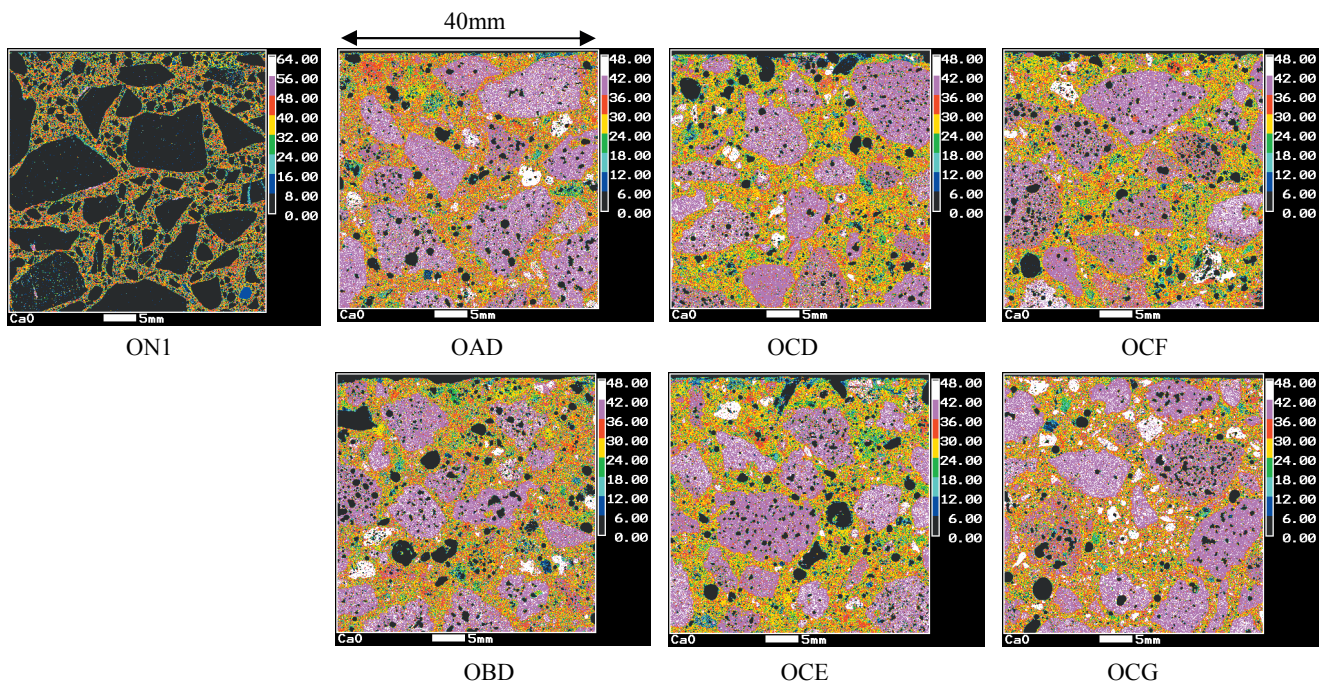


図-37 EPMA 分析結果 (CaO) (測定範囲：40×40mm)

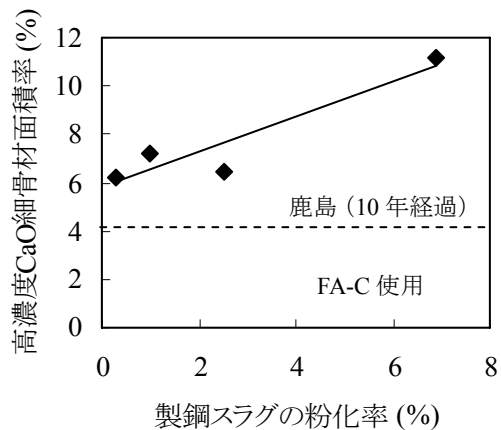


図-39 製鋼スラグの粉化率と CaO 高濃度細骨材面積率の関係

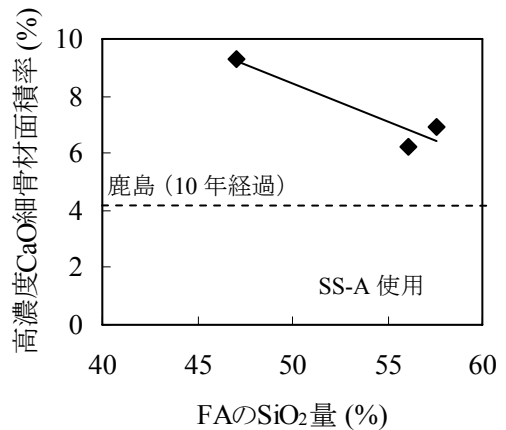


図-40 フライアッシュの SiO₂ 量と CaO 高濃度細骨材面積率の関係

思われる。高濃度 CaO 細骨材の元素分布は、およそ 50～60%程度の濃度範囲が多く、最大で 80%程度の濃度分布となった。一方、SiO₂は 10%程度、MgOは 2%程度に留まった。また、CaO 濃度が最大であった 80%程度の箇所においては、SiO₂および MgO はほとんど存在しておらず、Free-CaO として存在していると思われる。このことから、カルシウムの EPMA 面分析結果で得られた白色部が、非常に CaO リッチな環境で水分供給にともなって Ca(OH)₂ が生成し、膨張破壊が生じやすい箇所であると推察できる。

鹿島港南防波堤上部コンクリートに使用されている FS コンクリートの供用 10 年目の EPMA 分析を行った。CaO の EPMA 面分析結果を図-38 に示す。使用材料や配合等が異なるため、直接比較することはできないが、10 年経過した FS コンクリートにおいても、高濃度の CaO 細骨材が存在していることが分かる。

使用した細骨材の違いによる高濃度 CaO 細骨材の割合について、図-39 に製鋼スラグの粉化率と高濃度 CaO 細骨材面積率の関係を、図-40 にフライアッシュ中に含まれる SiO₂ 量と高濃度 CaO 細骨材面積率の関係を示す。ここで、高濃度 CaO 細骨材の抽出は、EPMA 面分析で得られた濃度分布の CaO 濃度 42%以上の骨材の面積とした。なお、図中には、鹿島港防波堤上部コンクリートの結果も併せて示す。ただし、粉化率等の結果がないため、点線で示している。

材齢 2 年の FS コンクリートの結果では、製鋼スラグの粉化率が大きくなるにしたがい高濃度 CaO 細骨材も多くなる傾向を示した。また、フライアッシュ中に含まれる SiO₂ 量の違いによって、高濃度 CaO 細骨材量が減少する傾向を示した。このことは、SiO₂を多く含むフラ

イアッシュの方がポズラン反応の速度が速く、製鋼スラグ中の CaO の消費を促進したと推察できる。したがって、SiO₂ 量の多いフライアッシュほど製鋼スラグの膨張抑制効果が高いと考えられる。

鹿島港防波堤上部コンクリートの結果では、水浸膨張比が 0.37%の製鋼スラグを使用しているが、粉化率が分からず、また、FS コンクリートの配合も異なるため、定量的評価はできないが、暴露試験 2 年目の結果と比較すると、高濃度の CaO 面積率は少なくとも 2%程度減少していることになる。これは、製鋼スラグからの CaO の供給に伴って、フライアッシュのポズランが 10 年以上にわたり生じ、骨材の膨張抑制と共にコンクリートの緻密化（耐久性向上）が生じていると予想される。

現時点では、暴露 2 年および暴露 10 年の結果のみのため、より長期の経時的な不安定骨材の挙動は定かではない。しかしながら、フライアッシュ品質の違いによって不安定骨材の含有量が低下していることから持続的に反応が続き、最終的には十分な膨張抑制効果が得られると思われる。

6.3 FSコンクリートの強度特性

図-41 に付録 A で示す配合の内、W/C70%の配合のもの平均圧縮強度の経時変化を示す。コンクリートの強度発現は暴露中の湿潤状態や温度などに大きく影響されるが、基本的には式(5)によって近似できる¹⁶⁾。

$$\sigma_c = A \cdot \log t + B \quad (6)$$

ここに、A, B: 定数、 σ_c : コンクリートの圧縮強度、t: 材齢である。FS コンクリートも同様に時間の対数に

比例して強度が増進していることが分かる。普通コンクリートと比べると、材齢 91 日までの初期強度は小さな値を示すものの長期の強度増進は大きい。これはフライアッシュのポゾラン反応によるものと考えられる。ただし、FS コンクリートは初期強度が低く、部材への適用を考える場合には、初期材齢時の脱型までの養生等には十分に注意が必要である。表-17 に示す FS コンクリートの圧縮強度の経時変化について図-42 に示す。材齢 91 日までの結果であるが、いずれの場合も時間の対数と比例関係にあることが分かる。このことから、水セメント比が変化した場合においても、図-41 で示したものと同等の強度特性が得られると考えられる。

図-43 に圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。なお、これら結果の配合は、付録 A に示す配合である。圧縮強度が 60N/mm² 以下（材齢 91 日以前）の静弾性係数との関係は土木学会提案値¹⁷⁾よりも静弾性係数が若干低い値となるが、ほぼ同等と考えて良いと思われる。高強度（材齢 2 年）の場合は土木学会提案値よりも静弾性係数は大きな値を示した。ここで、アルカリ骨材反応が生じた場合のコンクリートは、圧縮強度に与える影響は顕著でなく、静弾性係数に大きく影響を与え、骨材膨張量の増加にともない静弾性係数の低下が顕著に現れる¹⁸⁾。暴露 2 年までの結果であるが、FS コンクリートを海中に暴露した場合の静弾性係数に低下はなく、逆に増加する傾向を示している。FS コンクリート中の製鋼スラグの異常膨張に伴うコンクリートの損傷は、アルカリ骨材反応によるひび割れ発生と同じメカニズムであると考えた場合、静弾性係数に低下が認められないことから、内部骨材の異常膨張による欠陥は生じていないと推察される。

表-18 に配合 BBH および BN2 の圧縮強度、静弾性係数、曲げ強度および引張強度の結果を示す。一般に普通骨材を使用したコンクリートは、引張強度は圧縮強度の約 1/10~1/13、曲げ強度は圧縮強度の 1/5~1/7 と言われている。FS コンクリートも概ねこの範囲にあると思われるが、若干小さな値を示した。このことから、コンクリ

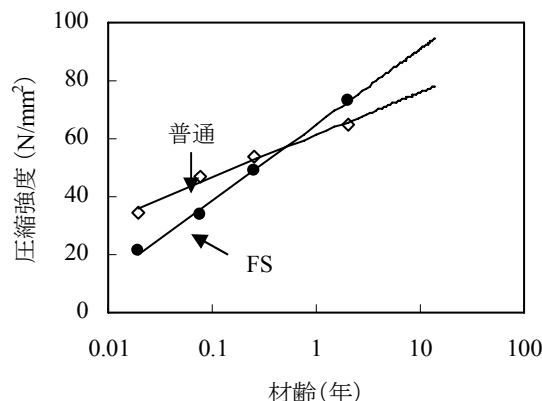


図-41 圧縮強度の経時変化

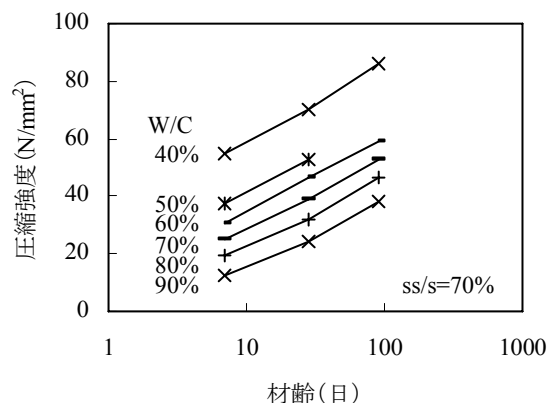


図-42 異なる水セメント比の圧縮強度の経時変化

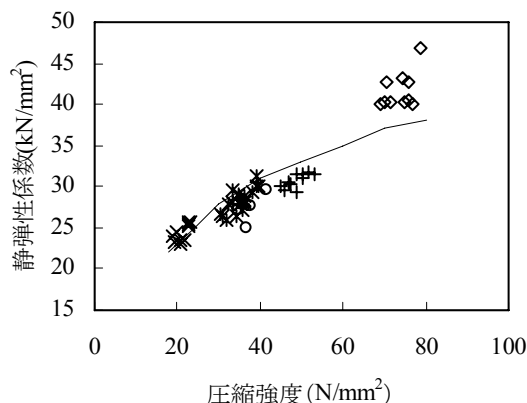


図-43 圧縮強度と静弾性係数の関係

表-17 FS コンクリートの配合

記号	使用材料			W/C (%)	W/P (%)	ss/s (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					SP (p*wt%)	AE (p*wt%)
	C	FA	SS					W	C	SS	FA	BS		
1	O	B	I	40	28.1	70	46.0	185	463	659	196	696	0.91	0.0070
2	O	B	I	50	31.7	70	48.0	185	370	584	214	760	0.82	0.0060
3	O	B	I	60	34.5	70	49.5	185	308	536	227	808	0.58	0.0000
4	O	B	I	70	37.1	70	50.0	185	264	498	234	832	0.58	0.0050
5	O	B	I	80	39.4	70	50.0	185	231	469	238	845	0.39	0.0050
6	O	B	I	90	41.5	70	50.0	185	206	446	241	905	0.23	0.0045

※目標スランプ 10±2.5cm、目標空気量 4.0±1.5%

ートの曲げや引張が作用する場合には注意が必要であると考えられる。

7. FSコンクリート部材の耐久性に関する検討

7.1 塩害に対する抵抗性

(1) 試験概要

実験に用いた供試体の形状は、**図-44**に示すような100×100×400mmの角柱供試体とした。供試体には、みがき丸鋼φ13mmをかぶり20mmおよび30mmとなるように埋設した。なお、供試体側面（端面2箇所）は、エポキシ樹脂で被覆し、側面からの塩化物イオンの侵入および鋼材の腐食を防いだ。鉄筋端部にはリード線を接続し、自然電位等の電気化学的計測ができるようにした。また、圧縮強度および静弾性係数測定用にφ10×20cmの円柱供試体も作製した。FSコンクリートの配合を**表-19**に、普通コンクリートの配合を**表-20**に示す。FSコンクリートが10配合、天然骨材を使用した普通コンクリートは1配合とした。打設後、材齢28日まで封緘養生を行い、その後、暴露試験に供した。

暴露試験は、港湾空港技術研究所構内の海水循環水槽で行った。暴露環境としては、飛沫帯、干満帯および海中部の3環境を模擬した施設に2年間暴露した。暴露状況（暴露開始時）を**写真-9**に示す。いずれの供試体も所定の暴露期間が経過するまで同一箇所に静置した。**図-45**に各暴露環境の1日のサイクルを示す。飛沫帯想定暴露施設は、3.5時間の海水散布（**写真-9**）と8.5時間の乾湿繰り返し暴露試験である。また、干満帯を想定した

暴露試験では、6時間の海水浸漬と6時間の乾燥を繰り返し、海中部想定暴露では、常時、海水中に浸漬させた。なお、本暴露場の海水は久里浜湾（神奈川県横須賀市）の自然海水を利用している。**図-46**に暴露試験に使用している海水の塩化物イオン濃度の推移を示す。年平均の塩化物イオン濃度はおよそ16450ppmである。

表-18 コンクリートの強度および静弾性係数

	FS (BBH)	普通 (BN2)
圧縮強度 (N/mm ²)	36.6	31.2
静弾性係数 (kN/mm ²)	24.9	23.6
曲げ強度 (N/mm ²)	4.2 (1/8.7)	4.0 (1/7.8)
引張強度 (N/mm ²)	2.7 (1/13.6)	2.6 (1/12.0)

※曲げ強度、引張強度の（）内の値は圧縮強度との比

※普通コンクリートの一般的な範囲

曲げ強度：1/5～1/7，引張強度：1/10～1/13

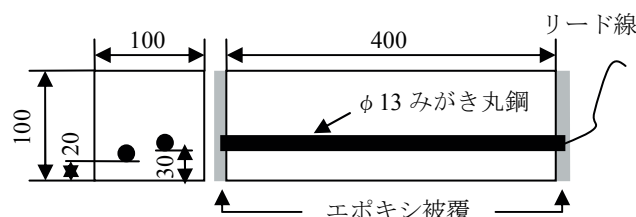


図-44 供試体形状（単位：mm）

表-19 FSコンクリートの配合

記号	使用材料			W/C (%)	W/P (%)	ss/s (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					SP (p*wt%)	AE (p*wt%)
	C	FA	SS					W	C	SS	FA	BS		
OAD	O	A	D	70	32.4	70	52	170	243	911	281	883	0.4	0.004
OAE	O	A	E	70	32.4	70	52	170	243	890	281	883	0.4	0.004
OAF	O	A	F	70	32.4	70	52	170	243	898	281	883	0.5	0.004
OBD	O	B	D	70	35.2	70	52	170	243	911	240	883	0.8	0.012
OBE	O	B	E	70	35.2	70	52	170	243	890	240	883	0.8	0.012
OBF	O	B	F	70	35.2	70	52	170	243	898	240	883	0.8	0.012
OCD	O	C	D	70	35.1	70	52	170	243	911	241	883	0.9	0.014
OCE	O	C	E	70	35.1	70	52	170	243	890	241	883	0.8	0.014
OCF	O	C	F	70	35.1	70	52	170	243	898	241	883	0.8	0.014
OCG	O	C	G	70	35.1	70	52	170	243	784	241	883	0.9	0.014

※ 目標スランプ 10±2.5cm、目標空気量 4.0±1.5%

表-20 普通コンクリート（天然骨材使用）の配合

記号	使用 C	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					AE 減水剤 (P×wt%)	AE 剤 (P×wt%)
					W	C	S1	S2	G		
ON1	OPC	4	45	43	160	356	748		1031	0.25	0.009



写真-9 暴露状況

(2) FS コンクリートの外観

暴露2年後のFSコンクリートの外観を写真-10に示す。FSコンクリートは、製鋼スラグを大量に使用したコンクリートであるため、製鋼スラグ中に残留している鉄が腐食するため、コンクリート表面が錆で覆われる。特に、飛沫帯などの腐食環境に暴露される場合は、写真のように顕著に現れる。鉄の腐食は、その腐食生成物の影響で、コンクリートを剥離させる可能性があるため、部材の断面減少が生じる可能性がある。したがって、腐食環境に施工する場合は、磁選によって鉄を除去した製鋼スラグを使用した方が望ましいと考えられる。

(3) 圧縮強度

図-47にそれぞれ異なる環境に暴露した供試体の圧縮強度を示す。暴露2年の結果では、いずれのFSコンクリートも極端に強度が低下することはない、フライアッシュおよび製鋼スラグによる強度増進が認められた。また、暴露環境の違いによる強度のばらつきも、普通コンクリートとほぼ同等であると考えられる。ただし、配合毎に比べると若干差が生じる結果となった。

(4) コンクリートの細孔空隙

コンクリート内部の細孔の状況を把握することを目的に水銀圧入法による細孔径分析を行った。測定試料はコンクリート中央部のモルタル部分を切断機を用いて一辺が約5mmの立方体になるように採取し、D-乾燥して水和を停止したものである。測定にはmicromeritics社製水

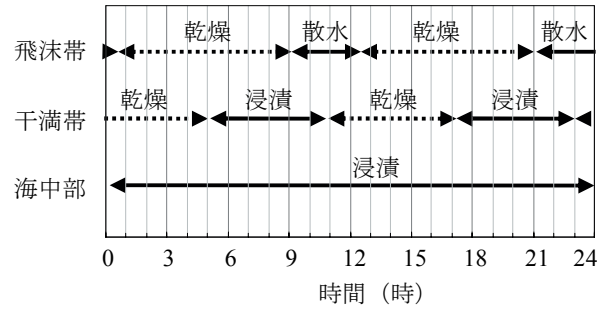


図-45 各暴露場の1日のサイクル

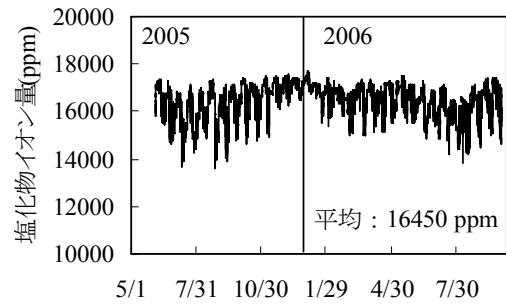


図-46 暴露場の塩化物イオン濃度の推移

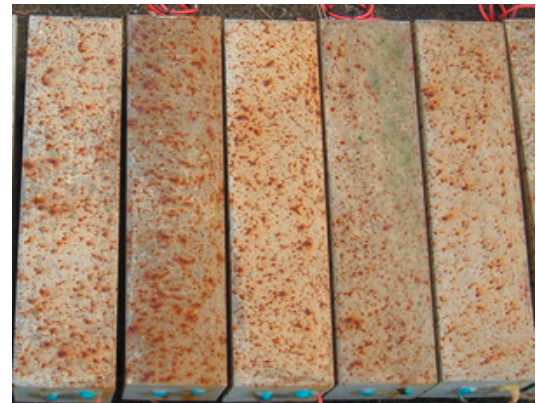


写真-10 暴露2年後の外観（飛沫帯）

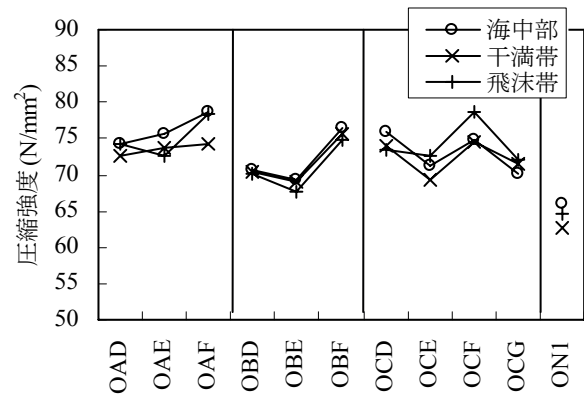


図-47 暴露2年後の圧縮強度

銀圧入式ポロシメータ AutoPoreIV 9500 を用い、量り取った測定試料に水銀を注入後、水銀を圧入して細孔量を測定した。細孔径-細孔容積曲線は次式の細孔径（直径）と圧入圧の関係から細孔径を計算し求めた。

$$d=4 \gamma \cos \theta / P \quad (8)$$

ここに、 d :細孔径（直径）、 γ :水銀の表面張力 0.484 N/m、 θ :水銀と試料との接触角 130° ($\cos \theta = -0.643$)、 P :圧入圧 (MPa) である。

図-48 に細孔径分布測定から得られた各コンクリートの気孔率を示す。なお、気孔率とは、単位質量あたりの空隙量である細孔量 (ml/g) から求めた単位体積あたりの空隙量 (ml/ml) の百分率である。FS コンクリートは普通コンクリートに比べて気孔量が多いコンクリートと考えられる。

図-49 に普通およびFS コンクリートの気孔量分布を示す。なお、FS コンクリートの細孔径分布は、いずれのFS コンクリートの場合も同程度であったことから、本文中には一例として配合 OCD の結果を示し、その他の結果は付録 D に示す。

普通コンクリートに比べ FS コンクリートの場合、ゲル空隙と考えられる $0.01 \mu\text{m}$ より小さな空隙の量が非常に大きいことが分かる。FS コンクリートの気孔率は普通コンクリートと比べ 5%程度大きかったが、水分や腐食性物質などの浸透に大きく影響すると考えられる $0.01 \mu\text{m}$ 以上の空隙は普通コンクリートと同程度となった。FS コンクリートの単位セメント量は、普通コンクリートに比べ $100\text{kg}/\text{m}^3$ 程度少ないにもかかわらず、微細空隙が多いということは、フライアッシュと製鋼スラグによって生じるポズランによるものと考えられる。この結果から、FS コンクリートは緻密な硬化体組織が形成されていると予想される。

鹿島港南防波堤上部コンクリートに使用されているFS コンクリートの供用 10 年目のコアを採取し、同じ試験を実施した。結果を図-50 に示す。材齢 10 年を超えるFS コンクリートのゲル空隙は、暴露 2 年目の結果よりも多く、また、 $0.01 \mu\text{m}$ 以上の空隙が減少した。これは、経時的に緻密化が進み、毛細管や欠陥空隙をゲルまたは反応生成物によって埋めていると考えられる。したがって、FS コンクリートは経時的に耐久性が向上していると考えられる。

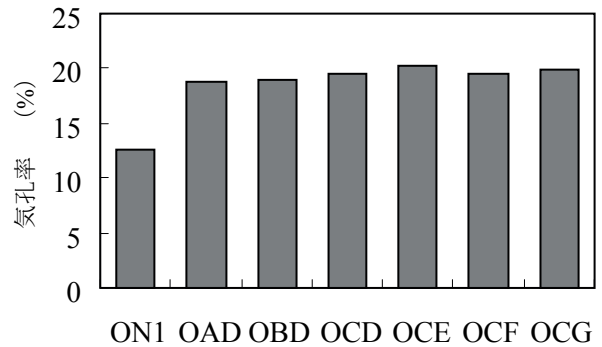


図-48 コンクリートの気孔率

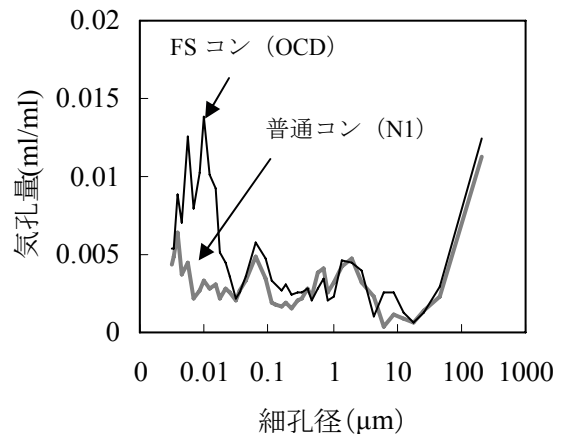


図-49 細孔径分布

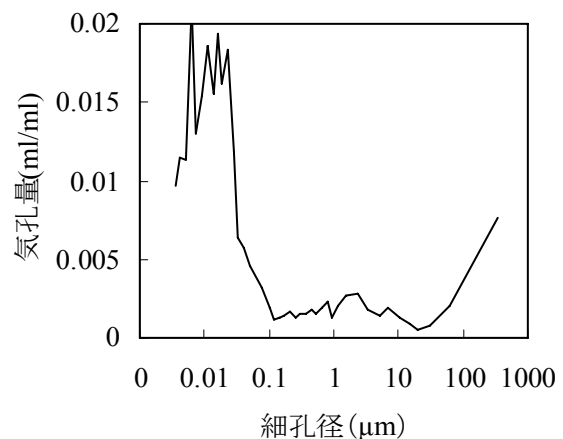


図-50 10年間供用されたFS コンクリートの細孔径分布

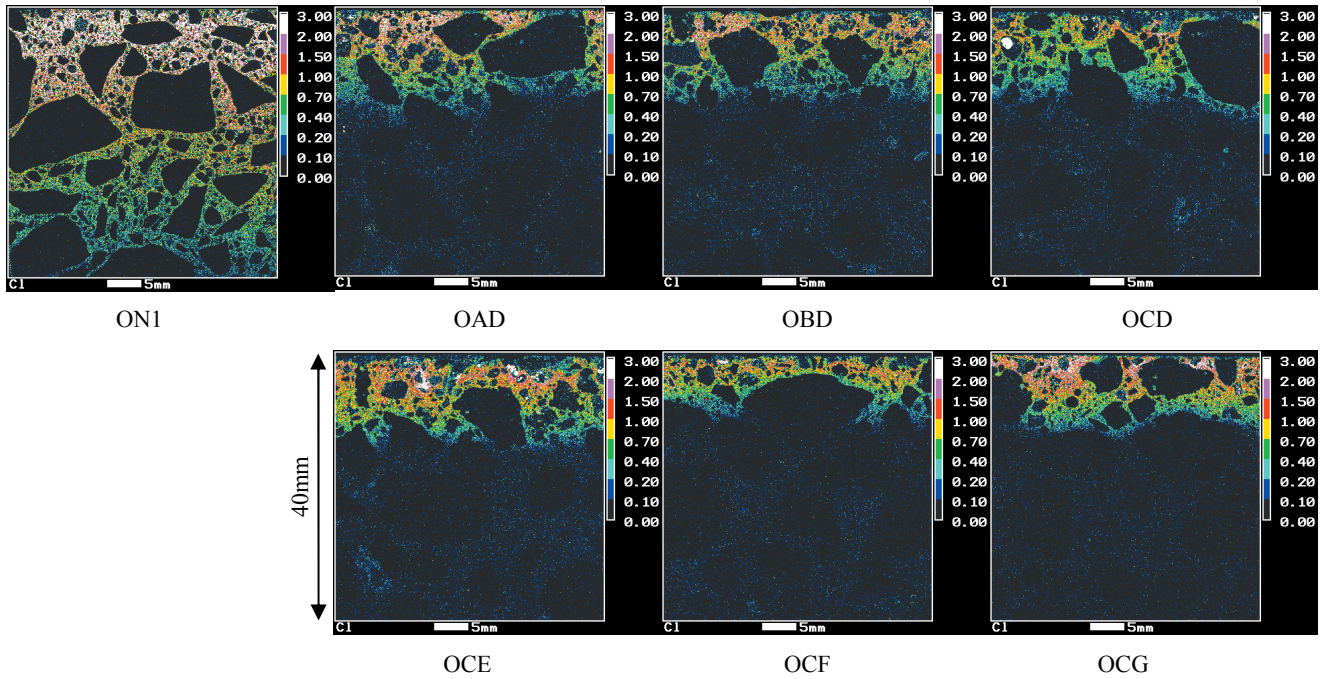


図-51 暴露供試体の塩素の EPMA マッピング像 (40×40mm)

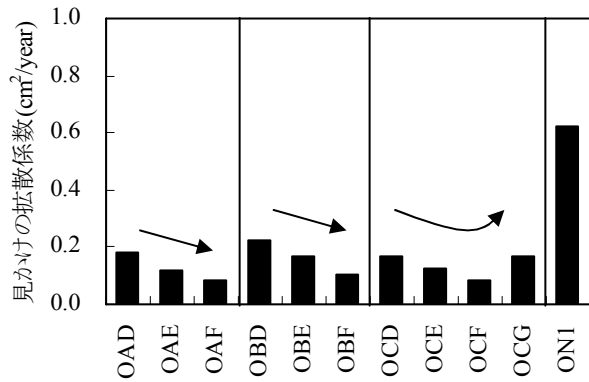


図-52 見かけの拡散係数

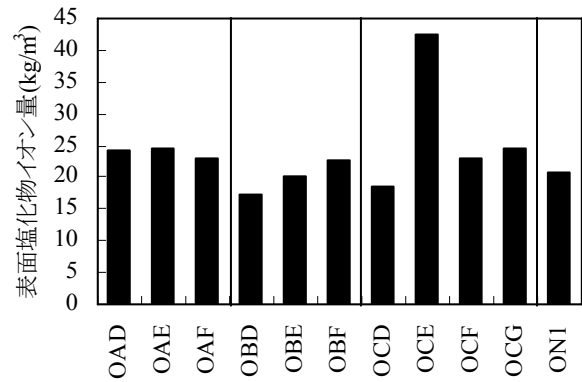


図-53 表面塩化物イオン量

(4) 塩化物イオンの浸透性

図-51 に海中部に暴露した供試体の塩素 (Cl) の EPMA 面分析結果を示す。また、付録 E に全暴露供試体の塩化物イオン量分布を示す。ここで、本文では暴露環境の違いが塩化物イオンの浸透性状にあまり影響を与えていなかったために海中部暴露の結果のみを示す。

ケーソン等の RC 構造物の最大水セメント比である W/C=50%以下の普通コンクリート (ON1, W/C45%) の塩化物イオンの浸透に比べて、FS コンクリートの塩化物イオンの浸透は非常に小さいことが分かる。フライアッシュの品質が異なる場合には、いずれの場合も塩化物イオンの浸透深さは 16mm 程度となり、今回の品質の範囲であれば、塩化物イオンの浸透に大きな差は生じていない。しかしながら、製鋼スラグの品質が異なる場合は、使用した製鋼スラグの種類によって塩化物イオンの浸透

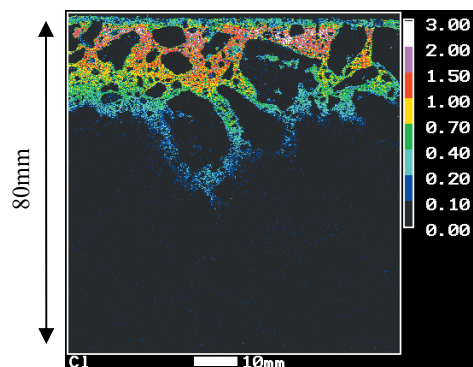


図-54 10年間供用された FS コンクリートの EPMA 面分析結果 (Cl, 80×80mm)

深さは10~16mmと異なる結果となった。

海水シャワー散布暴露試験体（飛沫帯）の全塩化物イオンの見かけの拡散係数を図-52に、表面塩化物イオン量を図-53に示す。FSコンクリートの見かけの拡散係数は、普通コンクリート（W/C=45%）に比べ非常に小さな値となった。したがってFSコンクリートは、塩化物イオンの浸透抵抗性が非常に高いと考えられる。また、FSコンクリートの見かけの拡散係数は、製鋼スラグの粉化率が大きくなるにしたがって、低下する傾向が認められた。なお、表面塩化物イオン量は、多少のばらつきはあるが、いずれの場合も同程度となった。

鹿島港南防波堤上部コンクリートに使用されているFSコンクリートの供用10年目のコアの塩素（Cl）のEPMA面分析結果を図-54に示す。また、得られたデータから求めたFSコンクリート内部の塩化物イオン量分布を図-55に示す。使用材料や配合等が異なるため、直接比較することはできないが、材齢10年を超えるFSコンクリートも同様に塩化物イオンの浸透抵抗性は高いと考えられる。見かけの拡散係数は $0.12\text{cm}^2/\text{年}$ と、今回の暴露試験結果と同程度の値となった。このことから、経年的にも塩化物イオンの浸透に対して異常膨張等による不具合等は生じないと考えられる。

図-56に使用した製鋼スラグの粉化率と見かけの拡散係数の関係を示す。フライアッシュの品質にかかわらず、製鋼スラグの粉化率の増加とともに粉化率2.5%程度までは見かけの拡散係数が低下する傾向が認められた。しかしながら、粉化率が6.9%と非常に高い場合は、見かけの拡散係数が大きくなった。このことは、製鋼スラグが起源となるある程度の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の供給は、フライアッシュのポズランを活性化させ、より緻密な構造になると考えられ、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が過剰に供給されると骨材膨張などの影響で、塩化物イオンの浸透が早くなる可能性が示唆される。ただし、4.2式(2)で示した粉化率2%の製鋼スラグを使用したFSコンクリートの膨張抑制評価試験後のポップアウト率は9.5%となる。これは、将来的には異常膨張による損傷が起これかねない骨材であるとも考えられるが、長期的にみると不安定骨材の存在により耐久性が向上しているともいえる。暴露3年の結果では、ひび割れやポップアウトなどの損傷は殆ど認められない。現状では、不確定な部分が多いため安定した骨材を使う方が望ましいと思われるが、今後、より長期的な調査を実施することで、使用できる骨材の範囲は広くなると考えられる。

図-57に水セメント比（W/C）または水粉体比（W/P）と見かけの拡散係数を示す。ここで、FSコンクリートの

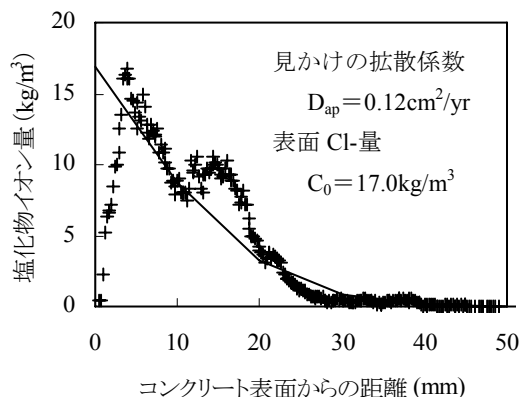


図-55 10年間供用されたFSコンクリートの塩化物イオン量分布

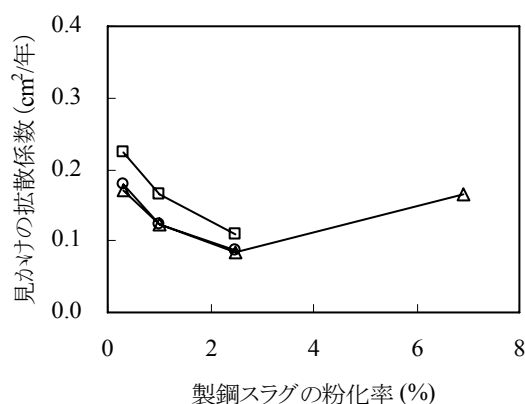
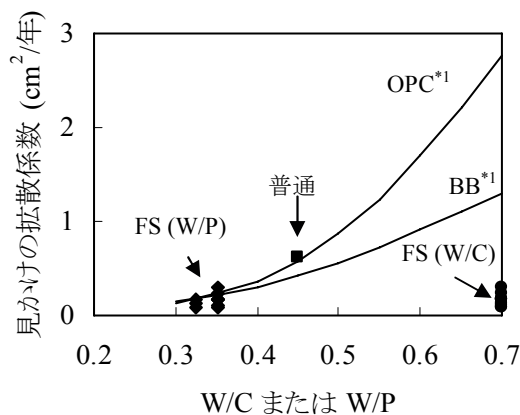


図-56 製鋼スラグの粉化率と見かけの拡散係数の関係



*1 港湾の施設の技術上の基準・同解説による

図-57 水粉体比と見かけの拡散係数の関係

粉体量は、骨材置換したフライアッシュを粉体として考え、セメント量とフライアッシュ量の和とした。また、図中には港湾の施設の技術上の基準・同解説に示されている水セメント比と見かけの拡散係数の関係の提案式¹⁹⁾も併せて示す。FSコンクリートの見かけの拡散係数と

配合の関係は十分に把握できていないものの、今回の結果では、水セメント比との関係をとると実験結果は非常に小さな値を示し、水粉体比として表した場合には、提案式とほぼ同程度となった。

いずれにしても、FS コンクリートの見かけの拡散係数は非常に小さく、塩害に対する抵抗性は高いと考えられる。

(4) 内部鋼材の腐食

供試体中に埋設した鉄筋の腐食は、普通コンクリート部材においては腐食が確認されたものの、暴露2年の結果では、FS コンクリート部材はいずれの供試体も腐食が確認されなかった。図-58 に鉄筋近傍の全塩化物イオン量と腐食面積率の関係を示す。普通コンクリート供試体は、暴露1年で鉄筋腐食発生限界塩化物イオン量¹⁸⁾である 2.0kg/m^3 を上回る塩化物イオン量となり、腐食が開始していた。FS コンクリートの鉄筋近傍の塩化物イオン量は、供試体毎にばらつきはあるが、最大でおおよそ 1.2kg/m^3 程度となった。FS コンクリートの腐食発生限界塩化物イオン量は定かではないが、少なくとも 1.2kg/m^3 以上であると考えられる。

(5) FS コンクリートの腐食開始時期の予測

実際に港湾RC構造物にFSコンクリートを利用した場合の塩化物イオンの侵入による鉄筋腐食の開始時期について、Fickの拡散方程式の解を用いて予測を行った。計算条件としては、FSコンクリートの表面塩化物イオン量および見かけの拡散係数は、今回の暴露試験の結果を用い、鉄筋の腐食発生限界塩化物イオン量を 2.0kg/m^3 、かぶりを 7cm とした。結果を図-59 に示す。普通コンクリート ($W/C=45\%$) と比べ腐食開始時期が延長し、耐久性が向上していることが分かる。普通コンクリートが15年程度で腐食するのに対し、FSコンクリートはばらつきがあるが、今回の配合においては45~100年間は腐食が発生しないと予測された。港湾構造物の設計供用期間を考えると、FSコンクリートの塩害に対する耐久性は、非常に高いと考えられる。

7.2 凍害に対する抵抗性

(1) 試験概要

供試体の形状は $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ の角柱供試体とした。コンクリートの配合を表-21 および表-22 に示す。目標空気量は海洋コンクリートの凍結融解の作用を受ける環境条件として $5 \pm 1.5\%$ と設定した。また、凍結融解試験は JIS A 1148-2001 「コンクリートの凍結融解試験方法」に

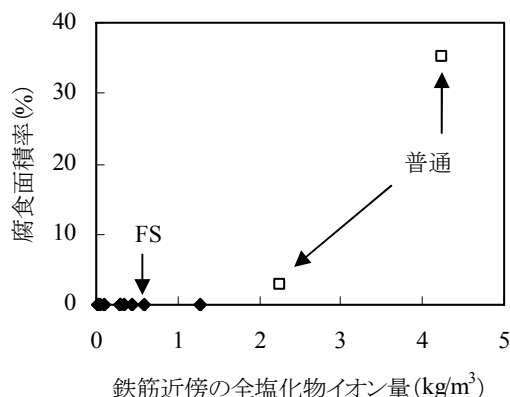


図-58 鉄筋近傍の全塩化物イオン量と腐食面積率の関係

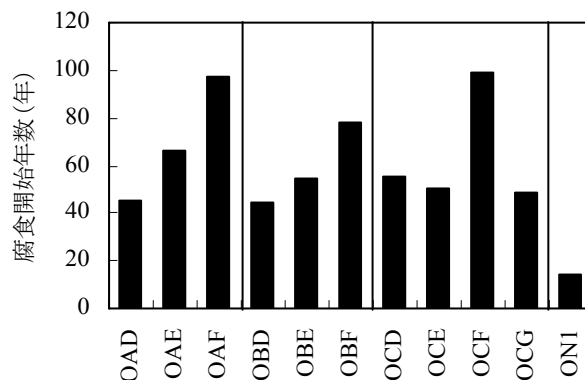


図-59 腐食開始年数

準拠し行った。なお、養生方法は 20°C の水中養生とし、材齢 28 日において試験に供した。

(2) 結果および考察

図-60 にコンクリートの重量変化率と凍結融解試験のサイクルの関係を、図-61 に相対動弾性係数とサイクルの関係を示す。FSコンクリートの質量変化率および相対動弾性係数ともに、試験開始時から急激に低下していることが分かる。一方、普通コンクリートの場合、規定の300サイクルまでほとんど値が変化していない。表-23 にコンクリート標準示方書で定められた凍害に関するコンクリート構造物の性能を満足するための相対動弾性係数の最小限界値を示す。気象作用が激しくなく、氷点下の気温となることがまれな場合でも凍害に対する性能を満足するためには、所定のサイクル終了後の相対動弾性係数が60%を下回ってはならない。いずれのFSコンクリートの相対動弾性係数も200サイクル以内で相対動弾性係数が60%を割り込み、十分な耐凍害性を示さなかった。一般に、凍害に対する抵抗性は空気量と関係がある

と考えられ、試験に用いた FS コンクリートも寒冷地での目標空気量を設定した。しかしながら、十分な耐凍害性を確保できなかった。原因については、今後詳細に検討する必要があると考えられるが、いずれにしても、現状の FS コンクリートでは、寒冷地域における凍害の恐

れのある場所（凍結融解作用が起こる可能性のある。例えば、干満帯・海中部など以外のコンクリート内部の水分が凍結する恐れのある場所）での利用には注意が必要であると考えられる。

表-21 FS コンクリートの配合

記号	使用材料			W/C (%)	W/P (%)	ss/s (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					SP (p*wt%)	AE (p*wt%)
	C	FA	SS					W	C	SS	FA	BS		
OBB	O	B	B	70	35.4	70	52	170	243	888	237	851	0.65	0.012
OAB	O	A	B	70	32.7	70	52	170	243	888	277	851	0.25	0.008
OCB	O	C	B	70	35.3	70	52	170	243	888	238	851	0.55	0.018
BBB	B	B	B	70	35.5	70	52	170	243	884	236	847	0.5	0.018

※目標スランプ 10±2.5cm、目標空気量 5.0±1.5%

表-22 普通コンクリートの配合

記号	使用 C	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					AE 減水剤 (P×wt%)	AE 剤 (P×wt%)
					W	C	S1	S2	G		
ON2	OPC	5	45	43	160	356	759		1046	0.25	0.005
BN1	BB	4	45	43	160	356	744		1024	0.25	0.011

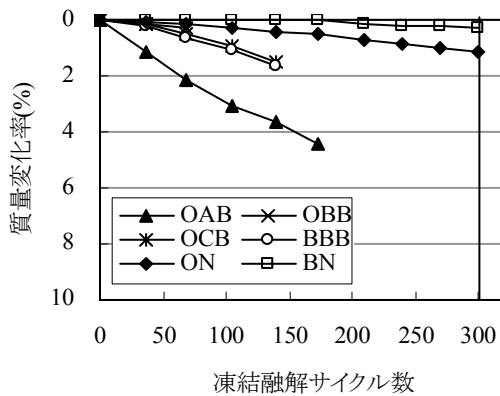


図-60 質量減少率のサイクル変化

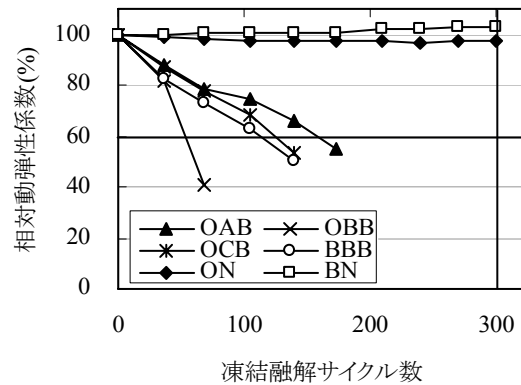


図-61 相対動弾性係数のサイクル変化

表-23 凍害に関するコンクリート構造物の性能を満足するための相対動弾性係数の最小限界値²⁰⁾

	気象作用が激しい場合または凍結融解がしばしば繰り返される場合		気象作用が激しくない場合、氷点下の気温となることがまれな場合	
	薄い場合 ²⁾	一般の場合	薄い場合 ²⁾	一般の場合
(1)連続してあるいはしばしば水で飽和される場合 ¹⁾	85	70	85	60
(2)普通の露出状態にあり、(1)に属さない場合	70	60	70	60

1)水路、水槽、橋台、橋脚、擁壁、トンネル覆工などで水面に近く水で飽和される部分および、これらの構造物の他、桁、床板等で水面からは離れているが融雪、流水、水しぶきなどのため、水で飽和される部分など

2)断面の厚さが 20cm 程度以下の部分など

8. 結論

本研究は、産業副産物（製鋼スラグ、フライアッシュおよび高炉スラグ）を用いた FS コンクリートの港湾構造物への適用を目的に、FS コンクリートの品質や耐久性について検討を行った。

FS コンクリートは、細骨材にフライアッシュおよび製鋼スラグを、粗骨材に高炉スラグ粗骨材を用いたコンクリートであるが、コンクリート容積のおよそ7割を占める骨材の物理化学的特性は、コンクリートのフレッシュおよび硬化後の品質に大きく影響する要因の一つである。FS コンクリートの利用拡大を目指すためには、安心して利用できる安定なコンクリートであることが必要である。しかしながら、FS コンクリートは不安定骨材を利用する特殊コンクリートであるため、硬化後の性能は未だ不明な部分が多い。また、FS コンクリート製造の上で不可欠な配合設計手法も十分に確立されていないのが現状である。そこで、以下について重点的に検討を行った。

- ・ FS コンクリートに用いる製鋼スラグの品質試験方法
- ・ FS コンクリートの配合設計手法
- ・ 硬化した FS コンクリートの安定性
- ・ FS コンクリートの耐久性

これらの結果を取りまとめ結論とする。

【製鋼スラグの品質試験方法】

1) 骨材の密度および吸水率試験方法について

コンクリート用骨材として利用するためには、密度吸水率試験を行う必要がある。JIS A 1109 に準拠したコーンによる試験が一般的に行われているが、製鋼スラグ骨材のように角張った形状の骨材では、締固めの際の骨材のかみ合わせ等によって大きな誤差が生じる。今後、FS コンクリート用骨材として製鋼スラグを利用する場合は、JSCE-C 506-2003「電気抵抗法によるコンクリート用スラグ細骨材の密度および吸水率試験方法（案）」に準拠した試験を行った方がよいと考えられる。

2) 製鋼スラグの骨材安定性試験について

現行の製鋼スラグの骨材安定性試験は、水浸膨張率試験による評価を行い、目視や膨張量測定によって評価されているが、未だ定量的な指標は確立されていない。最適な試験方法として、実際に膨張抑制評価試験を実施し、製鋼スラグ骨材のポップアウトの状況などから、スラグ粒個々の膨張破壊を照査できる粉化率試験の方がより正確に安定性を判定できると考えられた。また、骨材安定性の評価方法として、ポップアウト率による評価を

試みた。オートクレーブ養生または高温養生による膨張抑制評価試験が若材齢時の急激な骨材膨張によって、急激に破壊する最も厳しい状態であると仮定すると、ポップアウト率 $A(\%)$ と粉化率 $x(\%)$ の関係は

$$A = 5.20x - 0.90$$

となる。ただし、オートクレーブ養生でコンクリートが破壊した非常に不安定な骨材を使用した FS コンクリートにおいても、実環境下に3年間で生じたポップアウトは0.1%程度である。

【FS コンクリートの配合設計手法】

コンクリートの配合設計は、設計基準強度および耐久性の両面を満足する設計でなければならない。本報告では、設計基準強度を基本とした配合設計手法の構築を試みた。FS コンクリートは圧縮強度とセメント水比の関係および圧縮強度と製鋼スラグ細骨材容積比の関係式を用いることで圧縮強度を推定することが可能となる。これらを用いた配合設計手法の確立を試みた。図-26 に配合設計手順（案）を、表-12、表-13 および表-14 に配合修正方法を示す。

【硬化した FS コンクリートの安定性】

FS コンクリートは製鋼スラグによる骨材膨張が問題となるが、材齢2年の暴露供試体の化学分析によって、フライアッシュのポゾラン反応による水酸化カルシウムの消費が確認され、骨材の膨張を抑制していると考えられた。ただし、粉化率の高い（活性な骨材が多い）製鋼スラグほど FS コンクリート中に残留する不安定骨材が多く、ポゾランによる FS コンクリートの安定化には長い期間を要すると考えられる。

FS コンクリートの強度特性としては、細骨材として使用するフライアッシュのポゾラン反応によって長期強度の増加が認められた。初期強度は、普通コンクリートに比べ小さいため、養生等は十分に行う必要があるが、長期強度は非常に高い。ただし、FS コンクリートの曲げ強度および引張強度は普通骨材を使用したコンクリートに比べ若干低下する。

【FS コンクリートの耐久性について】

2年間の海水循環水槽暴露試験の結果、飛沫帯、干満帯および海中部の各環境下での塩化物イオンの浸透による鋼材腐食に対する耐久性は非常に高いと考えられる。FS コンクリートはフライアッシュを細骨材として利用しているが、フライアッシュによるポゾランの効果が高く長期耐久性の向上が望めると考えられる。W/C=70%、

ss/s=0.7としたFSコンクリートの場合、見かけの拡散係数は $0.1\sim 0.2\text{cm}^2/\text{年}$ 程度となった。

しかしながら、凍結融解作用に対する抵抗性は低く、寒冷地で使用する場合は、凍結融解作用が起こる可能性のある場所での利用には注意が必要である。

以上の検討結果より、FSコンクリートは塩害に対する耐久性に優れ、また、コンクリート製造に関しても、使用材料の選定から強度や耐久性を考慮した配合設計によって安定なFSコンクリートの製造が可能となると考えられる。したがって、FSコンクリートの港湾施設への適用は可能であると考えられる。

9. あとがき

FSコンクリートは塩害に対する耐久性も高く、力学的特性も天然骨材を使用した普通コンクリートとほぼ同等であると考えられるため、港湾構造物への適用が可能であると考えられる。ただし、FSコンクリートの特徴として、単位体積重量が大きい重たいコンクリートであり、また、製鋼スラグ中には鉄を多く含むためコンクリート表面部の鉄の腐食によって錆が表面に現れ、美観等には問題があると考えられる。また、FSコンクリートは、粉体量の多いコンクリートとなるため、ポンプ圧送性や過密配筋下のコンクリートへの充填性等の確認を行う必要があると考えられる。

本検討において、FSコンクリートの膨張抑制機構の確認はできた。また、膨張抑制評価試験による促進養生下でのFSコンクリートの安定性に対する指標は定量化できた。しかしながら、実環境下でのFSコンクリートの安定性能評価は十分でない。今後も、暴露試験等を継続し、FSコンクリート内部組織の変化について経時的に検討していく必要がある。

(2008年2月4日受付)

謝辞

本研究の実施にあたり、関東地方整備局横浜港湾空港技術調査事務所の多大なるご協力を頂きました。ここに、心から深く感謝の意を表します。

鹿島港上部コンクリートのコアの採取においては、関東地方整備局鹿島港湾事務所および㈱建設資源広域利用センター柳賢一氏にご協力頂きました。また、本研究を実施するにあたりご協力頂きました、LCM研究センターセンター長 横田弘氏、主任研究官 加藤絵万氏、構造強度研究室 主任研究官 岩波光保氏、材料研究室 前研究官 高橋良輔氏、前依頼研修員 中野松二氏、堀井秀之氏には、多大なるご協力を頂きました。ここに、心から感謝の意を表します。

参考文献

- 1) ㈱沿岸環境開発資源利用センター，FSコンクリート利用手引書，1998
- 2) 関東地方整備局横浜港湾空港技術調査事務所：FSコンクリートの技術資料，2005
- 3) 林恒一郎，篠原勝次，澤木裕紀：天然骨材を全く使用しないFSコンクリートの開発，セメント・コンクリート，No.630，pp.28-33，1999
- 4) 伊藤正憲，高橋俊之，田中英紀，田辺忠顕：RC構造物への適用を目指したFSコンクリートの開発，コンクリート工学，Vol.38，No.10，pp.10-21，2000.10
- 5) 大橋潤一，伊藤正憲，早川健司，田辺忠顕：FSコンクリートの基本性状と耐海水性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.2，pp.229-234，2000
- 6) 川端秀和，田中英喜，高橋秀之，田辺忠顕：製鋼スラグを使用したモルタルの膨張とその抑制（1）モルタルの物理的性状，第54回セメント技術大会講演要旨，pp.260-261，2000
- 7) 中田英喜，高橋俊之，川端秀和，田辺忠顕：製鋼スラグを使用したモルタルの膨張とその抑制（2）モルタルの膨張に及ぼす水和の影響，第54回セメント技術大会講演要旨，pp.262-263，2000
- 8) 大即信明，宮里一心：コンクリート材料，朝倉書店，2003
- 9) 土木学会：2005年制定コンクリート標準示方書〔規準編〕JIS規格集，（財）日本規格協会，2005
- 10) 山本武志，金津努：フライアッシュのポゾラン反応に伴う組織緻密化と強度発現メカニズムの実験的考察，土木学会論文集E，Vol.63，No.1，pp.52-65，2007.1
- 11) 土木学会：2005年制定コンクリート標準示方書〔規準編〕土木学会規準および関連規準，2005
- 12) （財）沿岸開発技術研究センター：鉄鋼スラグ水和固化体技術マニュアルー鉄鋼スラグの有効利用技術一，2003
- 13) 土木学会：混和材料を使用したコンクリートの物性変化と性能評価研究小委員会（333委員会）報告書ならびにシンポジウム講演概要集，コンクリート技術シリーズNo.74，2007
- 14) （社）日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説（上巻），2007
- 15) D. C. Goldring and L. M. Juckes：Petrology and stability of steel slags, Ironmaking and Steelmaking, Vol.24, No.6, pp.447-455, 1997
- 16) 西村昭，藤井学：最新土木工学シリーズ8最新土木材料，森北出版，1975
- 17) 土木学会：2002年制定コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕，2002
- 18) 土木学会：コンクリートライブラリー124アルカリ骨材反応対策小委員会報告書ー鉄筋破断と新たな対応一，pp.II-81-89，2005
- 19) （社）日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説（下巻），第4編2章，2007
- 20) 土木学会：2002年制定コンクリート標準示方書〔施工編〕，2002

付 録

付録 A 配合および試験一覧

付録 B 粉化率試験方法

付録 C 防波堤上部コンクリートに使用された供用 10 年目の FS コンクリートの調査結果

1. EPMA 分析
2. 組成像観察
3. 骨材界面の EPMA 分析結果
4. 圧縮強度の経時変化

付録 D 細孔空隙分布

付録 E 暴露供試体の塩化物イオン分布

付録A 配合および試験一覧

表-A.1にFSコンクリートの配合を、表-A.2に各検討に用いた供試体配合の一覧を示す。また、表-A.3に普通コンクリートの配合を、表-A.4に各検討に用いた供試体配合の一覧を示す。なお、いずれの配合もフレッシュ性状の検討に用いたものを除いたものである。今回の検討では、FSコンクリートの単位水量を170kg/m³または185kg/m³とした。

表-A.1 FSコンクリートの配合

配合 No.	使用材料			ss/s (%)	W/C (%)	W/P (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					SP (P*%)	AE (P*%)
	C	FA	SS					W	C	FA	S(SS)	G		
1	O	B	I	70	60	34.5	49.5	185	308	227	808	872	0.58	0.000
2	O	B	I	70	70	37.1	50.0	185	264	234	832	881	0.58	0.005
3	O	B	I	70	80	39.4	50.0	185	231	238	845	895	0.39	0.005
4	O	B	I	70	40	28.1	46.0	185	463	196	696	866	0.91	0.007
5	O	B	I	70	50	31.7	48.0	185	370	214	760	872	0.82	0.006
6	O	B	I	70	90	41.5	50.0	185	206	241	855	905	0.23	0.005
8	O	B	I	60	60	30.1	50.0	185	308	306	699	864	0.85	0.010
7	O	B	I	70	60	34.4	50.0	185	308	230	816	864	0.79	0.010
9	O	B	I	80	60	40.1	50.0	185	308	153	932	864	0.71	0.010
10	O	B	I	70	70	37.1	50.0	185	264	234	832	881	0.64	0.030
OBA	O	B	A	70	70	35.4	52.0	170	243	237	875	851	0.50	0.018
OBB	O	B	B	70	70	35.4	52.0	170	243	237	888	851	0.55	0.012
OBC	O	B	C	70	70	35.4	52.0	170	243	237	970	851	0.55	0.018
OAB	O	A	B	70	70	32.7	52.0	170	243	277	888	851	0.25	0.008
OCB	O	C	B	70	70	35.3	52.0	170	243	238	888	851	0.55	0.018
BBA	B	B	A	70	70	35.5	52.0	170	243	236	872	847	0.50	0.018
BBB	B	B	B	70	70	35.5	52.0	170	243	236	884	847	0.50	0.018
BBC	B	B	C	70	70	35.5	52.0	170	243	236	966	847	0.50	0.018
OBB	O	B	B	70	70	35.4	52.0	170	243	237	888	851	0.65	0.012
OAB	O	A	B	70	70	32.7	52.0	170	243	277	888	851	0.25	0.008
OCB	O	C	B	70	70	35.3	52.0	170	243	238	888	851	0.55	0.018
BBB	B	B	B	70	70	35.5	52.0	170	243	236	884	847	0.50	0.018
OAD	O	A	D	70	70	32.4	52.0	170	243	281	911	883	0.35	0.004
OAE	O	A	E	70	70	32.4	52.0	170	243	281	890	883	0.35	0.004
OAF	O	A	F	70	70	32.4	52.0	170	243	281	898	883	0.48	0.004
OBD	O	B	D	70	70	35.2	52.0	170	243	240	911	883	0.80	0.012
OBE	O	B	E	70	70	35.2	52.0	170	243	240	890	883	0.75	0.012
OBF	O	B	F	70	70	35.2	52.0	170	243	240	898	883	0.80	0.012
OCD	O	C	D	70	70	35.1	52.0	170	243	241	911	883	0.85	0.014
OCE	O	C	E	70	70	35.1	52.0	170	243	241	890	883	0.80	0.014
OCF	O	C	F	70	70	35.1	52.0	170	243	241	898	883	0.80	0.014
OCG	O	C	G	70	70	35.1	52.0	170	243	241	784	883	0.85	0.014
BBH	B	B	H	70	70	34.1	52	170	243	256	976	864	0.55	0.004

※使用材料の記号

C (セメント) O: 普通ポルトランドセメント, B: 高炉セメントB種

FA (フライアッシュ) 「表-3 実験で使用したフライアッシュの品質」の記号と同じ

SS (製鋼スラグ) 「表-2 実験に使用した製鋼スラグの品質」の記号と同じ

表-A.2 試験の一覧 (FSコンクリート)

配合 No.	4.2 製鋼スラッグの膨張試験方法				5.1 配合強度について					6.2 FSコンクリート内部構造の安定性について				8.1 塩害に対する抵抗性			8.2 凍害に対する抵抗性
	ボンプアゲ率 (%)				FSコンクリートの強度特性					電子 組成像 観察	XRD	EPMA 400× 400μm	EPMA 400× 400mm	海中 部	干満 帯	飛沫 帯	
	オート クレープ	80℃ 養生	気中 3年	水中 3年	7日	28 日	91 日	730 日	オート クレープ								
1					30.5	46.6	58.8										
2					24.8	39.1	53.1										
3					19.4	32.0	46.5										
4					54.9	70.2	86.2										
5					37.5	53.0											
6					12.8	24.4	38.2										
8					31.4	48.9	67.1										
7					27.6	42.7	58.8										
9					25.3	38.7	54.3										
10					19.7	33.5											
OBA	0.08					32.4					52.7						
OBB	1.65					33.1					53.3						
OBC	0.53					39.1					60.5						
OAB	0.55					36.2					53.8						
OCB	0.74					36.3					55.9						
BBA	0.30					34.9					51.2						
BBB	0.86					35.7					50.0						
BBC	0.72					41.4					57.2						
OBB						39.2											○
OAB						39.7											○
OCB						38.2											○
BBB						37.5											○
OAD	0.07	0.27	0.009	0.000	20.8	34.8	48.7	74.3	41.3		○	○	○	○	○	○	
OAE	3.51	4.13	0.016	0.006	19.8	33.1	47	75.6	38.8								
OAF	14.45	14.67	0.061	0.107	22.8	35.4	50.2	78.7	35.3								
OBD	0.63	0.57	0.026	0.000	19.5	30.8	46.0	70.7	62.2	○	○	○	○	○	○	○	
OBE	6.81	3.98	0.006	0.029	18.9	30.2	44.9	69.3	55.7								
OBF	7.83	15.01	0.025	0.108	22.6	36.3	53.1	76.6	64.7								
OCD	1.14	0.32	0.003	0.000	22.5	35.6	51.5	75.9	60.9	○	○	○	○	○	○	○	
OCE	2.96	5.99	0.040	0.015	20.6	31.9	47.2	71.4	56.7	○	○	○	○	○	○	○	
OCF	14.04	10.67	0.115	0.023	23.0	35.7	50.3	74.8	61.4	○	○	○	○	○	○	○	
OCG	破壊	破壊	0.089	0.112	21.8	34.3	48.9	70.2	破壊	○	○	○	○	○	○	○	
BBH						36.6											
鹿島					15.8	27.5	37.6			○	○	○	○	○	○	○	
備考	n=3				7,28,91日, オート:n=3 730日:n=9 (3環境×3本)					材齢2年時に調査				暴露期間:1, 2年 n=3			n=3

表-A.3 普通コンクリートの配合

記号	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単用量 (kg/m ³)						Ad1 P×wt% 0.25	Ad2 P×wt% 0.009
				W	C	SI	S2	G			
ON1	4	45	43	160	356	748		1031			
ON2	5	45	43	160	356	759		1046			
BN1	4	45	43	160	356	744		1024			
BN2	4.5	47.9	44.7	160	335	597	199	1004		-	

ON：普通ポルトランドセメントを使用したコンクリート

BN：高炉セメントB種を使用したコンクリート

材料は、「表-7 比較用天然骨材使用の普通コンクリートの使用材料」に示す

表-A.2 試験の一覧（普通コンクリート）

配合 No.	5.1 配合強度について				6.2 FSコンクリート内部構造の安定性について				8.1 塩害に対する抵抗性			8.2 凍害に対する抵抗性	
	6.3 FSコンクリートの強度特性				電子組成像観察	XRD	EPMA 400×400μm	EPMA 400×400mm	海中部	干満帯	飛沫帯	凍害に対する抵抗性	
7日	28日	91日	730日	凍結融解試験								凍結融解試験	
ON1	34.1	46.7	53.6	66.1	○			○	○				
ON2		45.6		46.6									○
BN1		42.2		42.6									○
BN2		31.2											
備考	7,28,91日, 凍: n=3 730日: n=9 (3環境×3本)				材齢2年時に調査				暴露期間: 1, 2年 n=3			n=3	

付録B 防波堤上部コンクリートに使用された供用10年目のFSコンクリートの調査結果

実際に防波堤上部コンクリートに使用された供用10年目のFSコンクリートを用い、長期材令のFSコンクリートの健全性調査を行った。

1. EPMA分析

図-B.1にコンクリートのEPMA分析結果(測定範囲78×78mm)を示す。Clの浸入深さにはばらつきがあり、最表面から約20mmの部分から大きなところで45mm深さまで浸入していた。

コアの表面から1~2mmほどはClおよびCaO濃度が低くなっていることから炭酸化領域と思われる。中性化深さを2mm/10年とすると、中性化速度係数kは0.63となった。大量のフライアッシュを混入したコンクリートであるが、供用50年の中性化深さの予測値は4.5mmとなる。FSコンクリートを港湾構造物に適用した場合も中性化の進行は非常に遅いと考えられる。

非炭酸化領域の内部ペースト部分において、CaO、SiO₂、およびAl₂O₃はほぼ均一な濃度分布を示していた。ただし、研磨試料の表面において、内部のCl未浸入範囲で粗骨材/ペースト界面のペースト部が暗青色になっている部分や、ペースト部に若干の色ムラが見られたが、各元素濃度の差異は確認できなかった。ただし、SO₃に関しては、粗骨材/ペースト界面に濃縮層が確認でき、また、研磨試料表面にも同様に白色の変色箇所が確認できる。高炉スラグ内には、硫黄分が少ないことから、モルタル分から供給される硫黄が、高炉スラグから溶出した物質と界面で何らかの物質またはゲルを生成しているものと推察される。

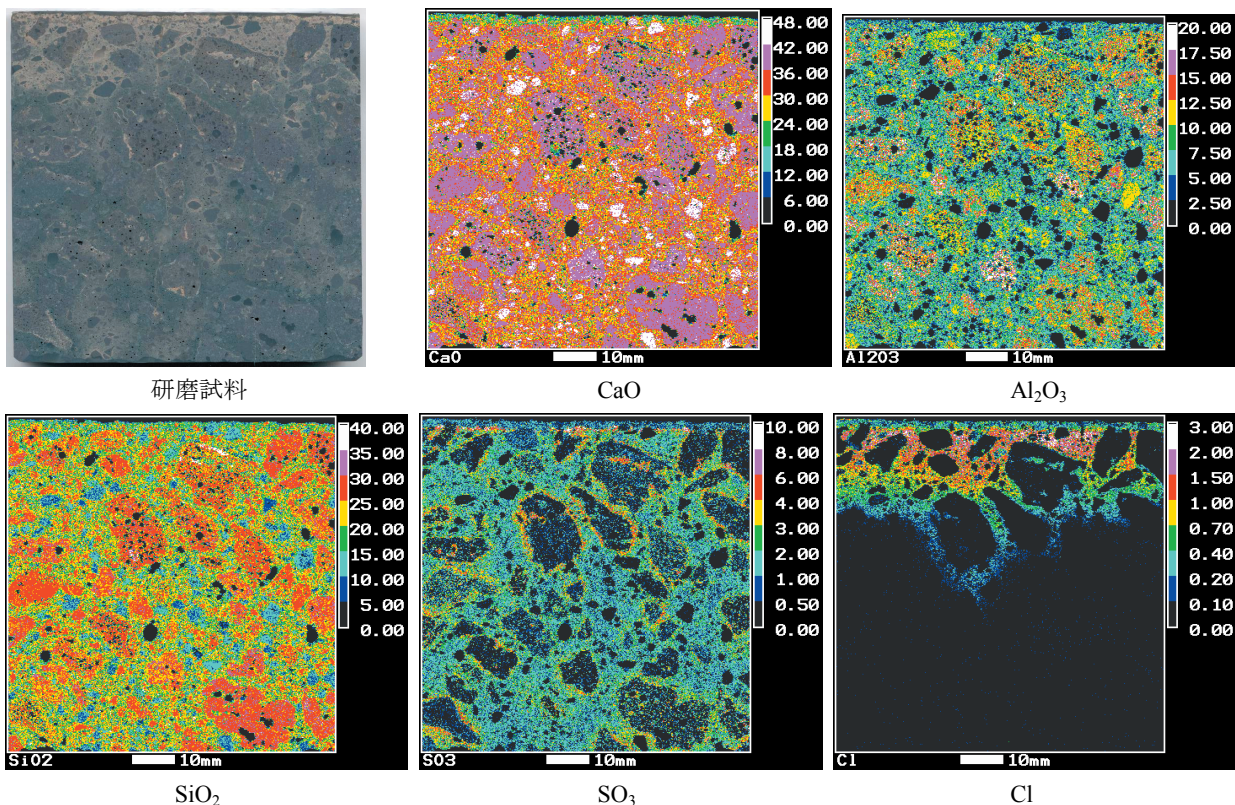


図-B.1 コンクリートのEPMA分析結果(測定範囲78×78mm)

2. 組成像観察

組成像観察結果を写真-B.1~写真-B.10に示し、観察時に認められた特徴を付記する。組成像は物質を構成する鉱物の平均原子番号の違いによりコントラストが生じ、それが大きいものほど明るく観察される。すなわち、細骨材に用い

られている製鋼スラグのうち、鉄(Fe)等の金属元素を多く含む粒子は、白く明るく輝いて観察されている。反対に暗く観察されている部分は、空隙やひび割れなどである。観察用試料は、外部環境の影響の少ないと思われるコンクリートコア表面より深さ約70~80mm付近より採取しており、ペースト部に一部認められるひび割れは、試料調製時（切り出し、乾燥等）に発生したものと考えられる。

図-B.1 に示したように、コンクリートの EPMA 分析用研磨試料において骨材/ペースト界面の色の変化（暗緑色や白色）が確認されたが、組成像ではそれは明確に確認されなかった。骨材のいくつかに骨材粒子の周縁部で組成や組織が変化しているものが見られた（写真-B.4, B.5, B.6, B.9）。また、写真-B.7 に示すように、骨材界面において、ペースト部が緻密な組織になっている範囲も観察された。

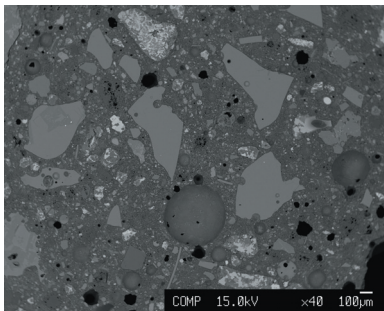


写真-B.1 モルタル部分の様子

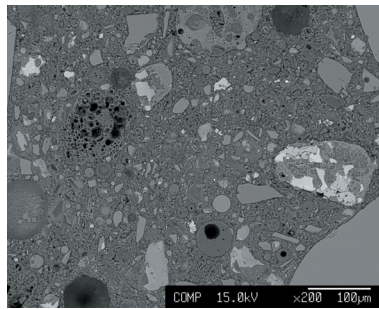


写真-B.2 ペースト部分
球状フライアッシュは $\phi 10\mu\text{m}$ 前後のものが多く見られ、 $\phi 50\mu\text{m}$ ほどの大きな粒子もある

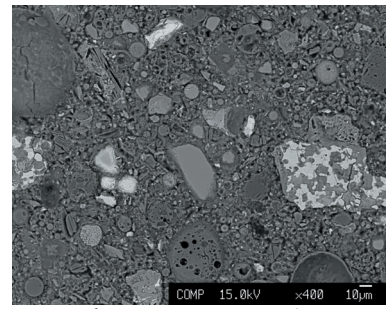


写真-B.3 ペースト部分
板状の水和生成物が見られる

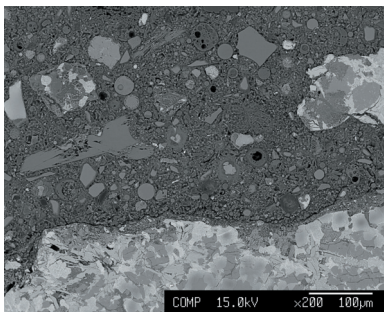


写真-B.4 細骨材周囲
骨材の周縁で組成・組織が変化しているように見える。界面のペーストはややポーラスな組織

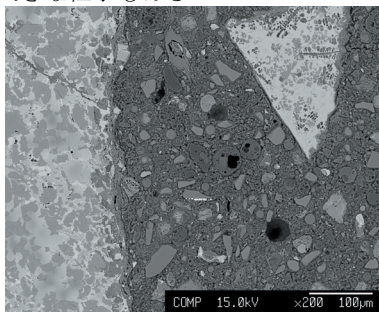


写真-B.5 細骨材周囲
写真4同様、骨材の周縁部に組成・組織の変化あり。界面のペーストはややポーラスな組織。

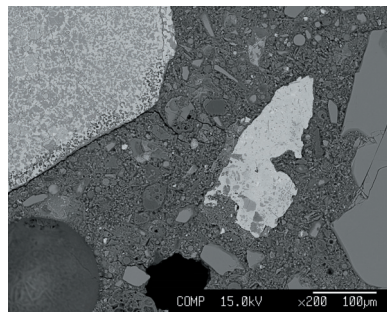


写真-B.6 細骨材周囲
骨材の周縁部に組成の変化あり。界面のペースト部のひび割れは試料調製時に発生したと思われる。

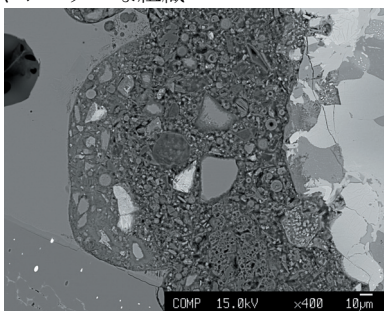


写真-B.7 細骨材周囲
ペースト部に粗密のばらつきが見られ、左側の骨材との界面では緻密な組織となっている。骨材により反応過程（速度）が異なる可能性あり。

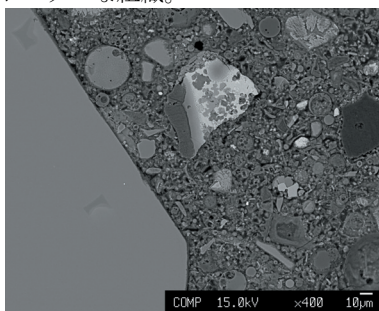


写真-B.8 細骨材周囲
骨材周縁に組成の変化はなく、ペースト/骨材の付着よし。

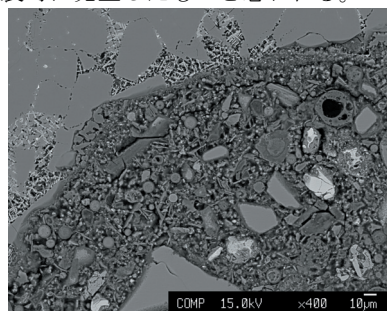


写真-B.9 細骨材周囲
骨材の周縁に組成・組織の変化が見られ、界面部ペーストはややポーラスな組織となっている

3. 骨材界面の EPMA 分析結果

骨材界面の EPMA 面分析結果を図-B.2 および図-B.3 に示す。

図-B.2 について、写真左側が細骨材粒子、右側がセメントペーストである。写真中央や下方に見られる Al_2O_3 濃度が 17.5%以上（白色表示）のものはフライアッシュと考えられる。この視野に見られる球状フライアッシュ（写真中で丸い形状）の粒径は $50\mu\text{m}$ 以下であった。骨材粒子のペースト界面では、 CaO 濃度および SiO_2 濃度に変化が認められたが、骨材/ペースト界面の付着はよく、ペースト部においては、骨材近傍でも顕著な濃度変化は見られなかった。

図-B.3 について、写真右下が細骨材粒子、左上がセメントペーストである。写真中央の Al_2O_3 濃度が 17.5%以上（白色表示）のものはフライアッシュで、粒径 $50\mu\text{m}$ 以上の大きなものが存在している。骨材粒子のペースト界面では、組成像においてやや暗く観察され、 CaO 濃度および SiO_2 濃度にも変化が見られた。セメントペーストとの何らかの反応が起こっているのではないかと思われる。この物質は骨材界面において層状に CaO や SO_3 および SiO_2 が分布しており、 Al_2O_3 は存在していない。現状では、各骨材/ペースト界面の付着がよい状態である。

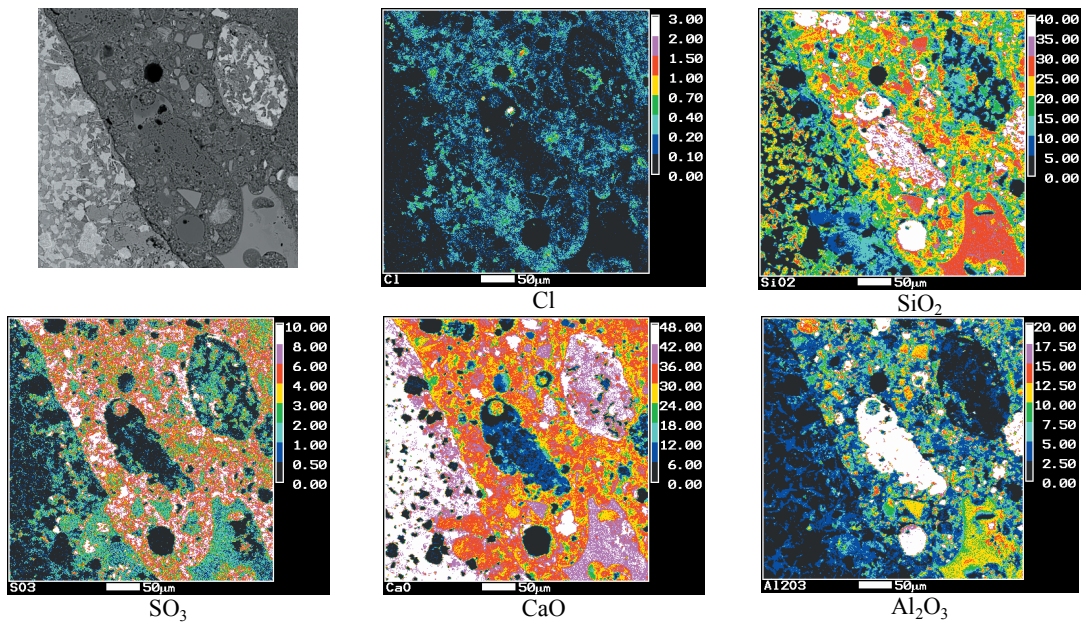


図-B.2 骨材界面の EPMA 分析結果① ($400\times 400\mu\text{m}$)

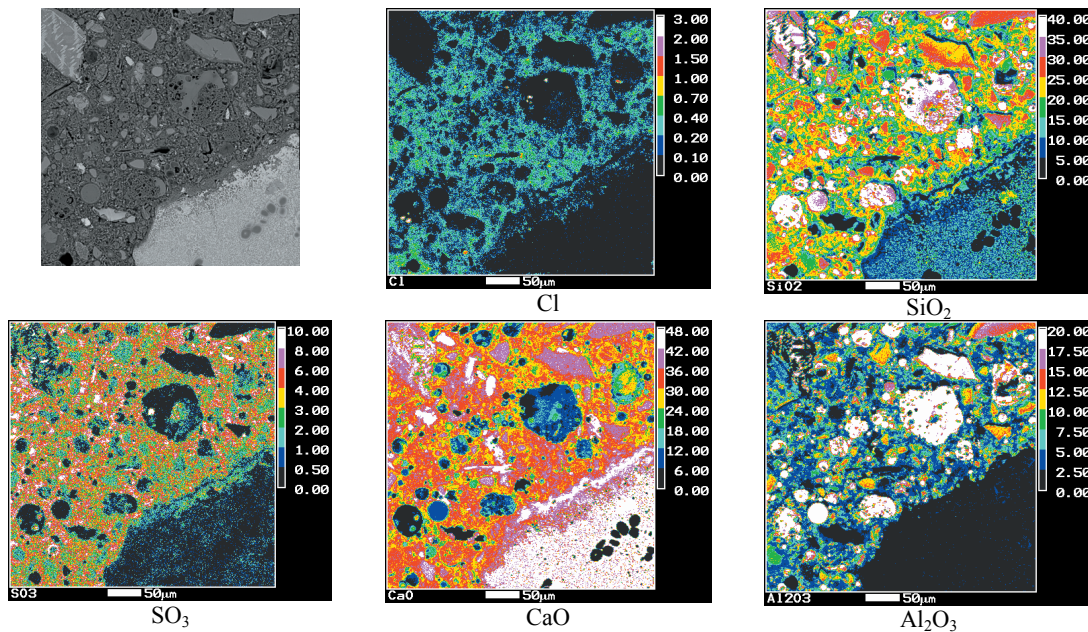


図-B.3 骨材界面の EPMA 分析結果② ($400\times 400\mu\text{m}$)

4. 圧縮強度の経時変化

材齢10年までの圧縮強度の経時変化を図-B. 4に示す。材齢が進むにつれて圧縮強度にばらつきが見られるが、平均圧縮強度は、材齢の対数と比例関係にある。図-B. 5に圧縮強度の標準偏差の経時変化を示す。材齢が進むにつれて、ほぼ線形で標準偏差が増加していることが分かる。

同時期に設置されたFSコンクリートで製作された根固めブロックの圧縮強度の経時変化を図-B. 5に、標準偏差を図-B. 6に示す。海中部に暴露されたFSコンクリートは、圧縮強度に大きなばらつきはなく、材齢が10年経過した場合でも、強度の増進が認められる。

配合が異なるため、一概に比較はできないが、大気中に暴露されたFSコンクリートの場合は、何らかの環境外力が作用し、コンクリートの品質にばらつきが生じている可能性がある。これについては、今後の課題であると思われる。

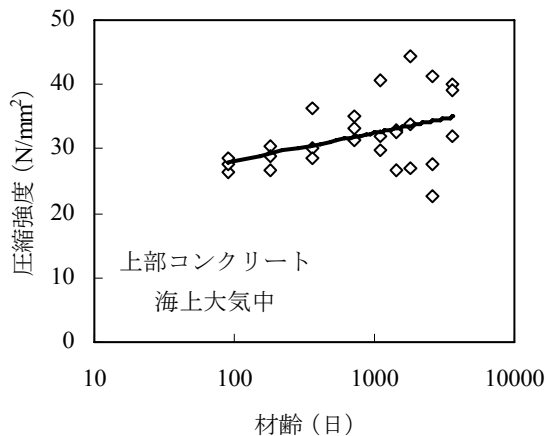


図-B. 4 圧縮強度の経時変化

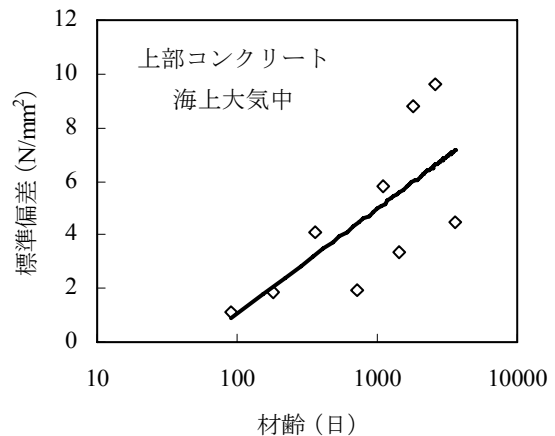


図-B. 4 圧縮強度の標準偏差の経時変化

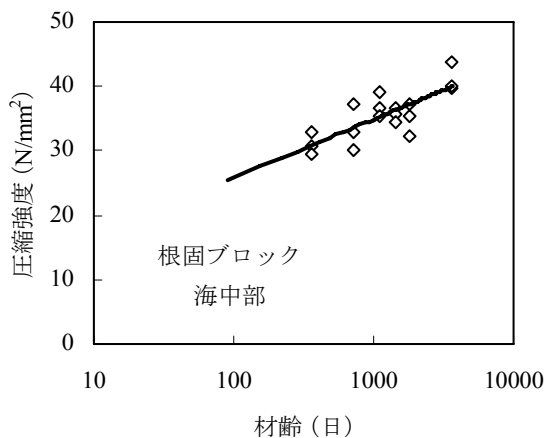


図-B. 5 圧縮強度の経時変化

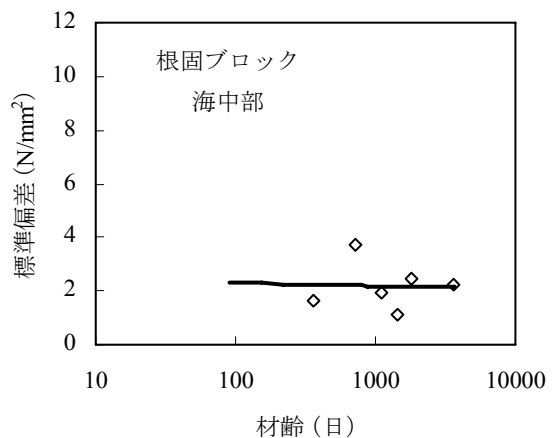


図-B. 6 圧縮強度の標準偏差の経時変化

付録 C 粉化率試験方法

FS コンクリートで用いる製鋼スラグは、細骨材として使用するため、骨材粒径が 5mm 以下のものとなる。したがって、細粒分が多いため、粉化率の測定では、測定値に誤差が生じる可能性が高い。FS コンクリート用細骨材として使用する製鋼スラグの膨張性評価試験方法では、鐵鋼スラグ水和固化体技術マニュアルで示される方法を改良した以下の方法が望ましいと考える。今後、データを蓄積する必要があるが、試験方法（案）として、付録に示す。

1) 骨材のふるい分け

試験をしようとするロットを代表するように製鋼スラグを採取し、ほぼ所定量（約 10kg）となるまで縮分する。その後、2.5mm および 5mm ふるいに留まった骨材を試験試料とする。

2) 膨張促進試験の実施

ふるい分けした試料を絶乾状態に調整後、初期重量（ m_0 ）を測定する。その後、80℃高温水槽またはオートクレーブ装置で膨張促進試験を行う。

3) 粉化スラグの除去

膨張促進試験後の試料を同じふるいを用いて、粉化したスラグを除去する。それぞれのふるいに留まった骨材を絶乾状態に戻し、重量（ m_1 ）を測定する。

4) 粉化率の計算

式（A-1）によって粉化率を求める。

$$\begin{aligned} \text{粉化率 (\%)} &= \text{粉化スラグ質量} / \text{初期試料質量} \times 100 \\ &= (m_0 - m_1) / m_0 \times 100 \end{aligned} \quad (\text{A-1})$$

付録D 細孔空隙分布

図-D.1 に2年間海中部に暴露したFSコンクリートの細孔径分布を示す。

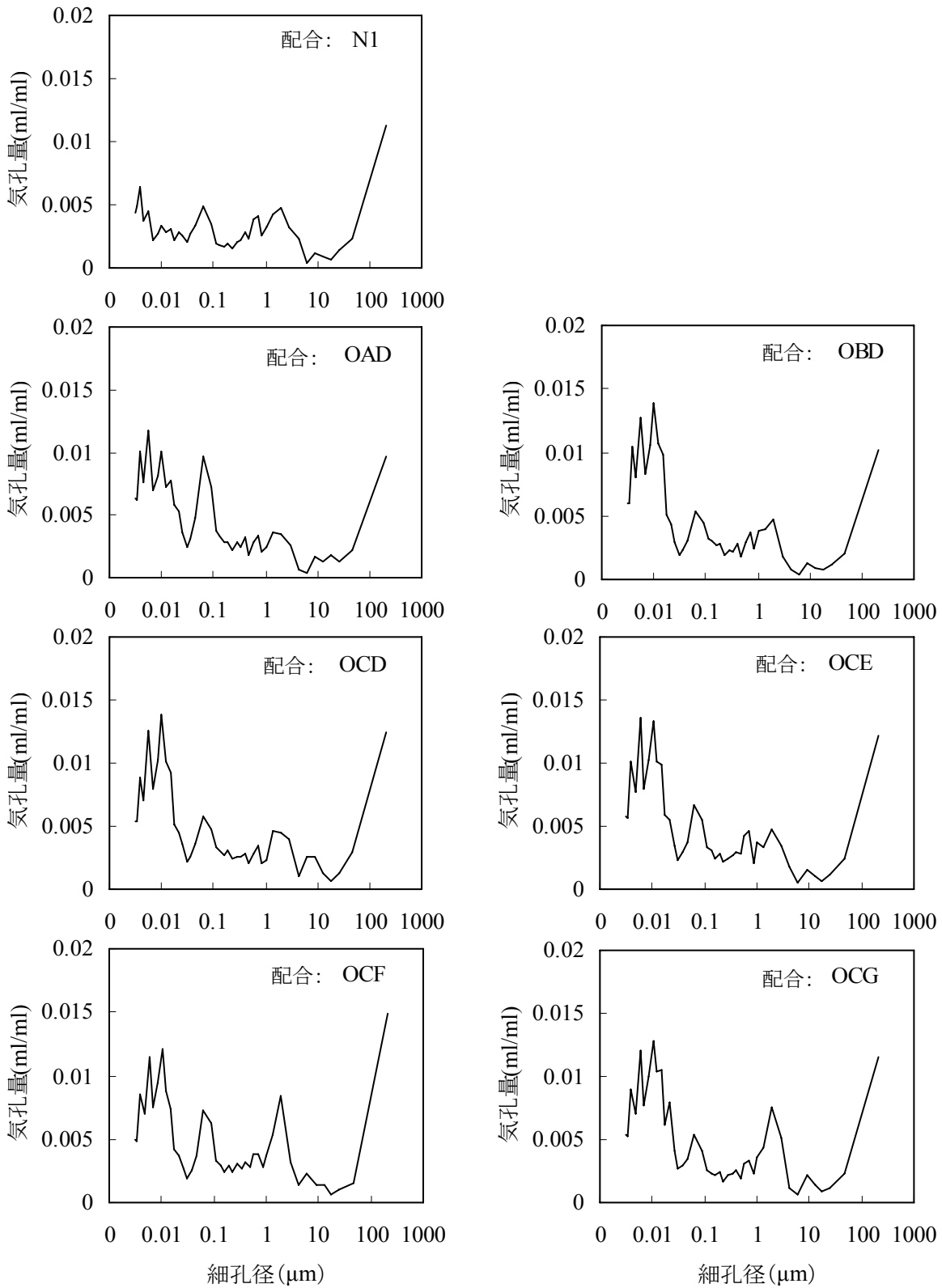


図-D.1 FSコンクリートの細孔径分布

付録 E 暴露供試体の塩化物イオン分布

図-E.1 および図-E.2 に2年間循環水槽内で暴露したFS コンクリートの塩化物イオン分布を示す。

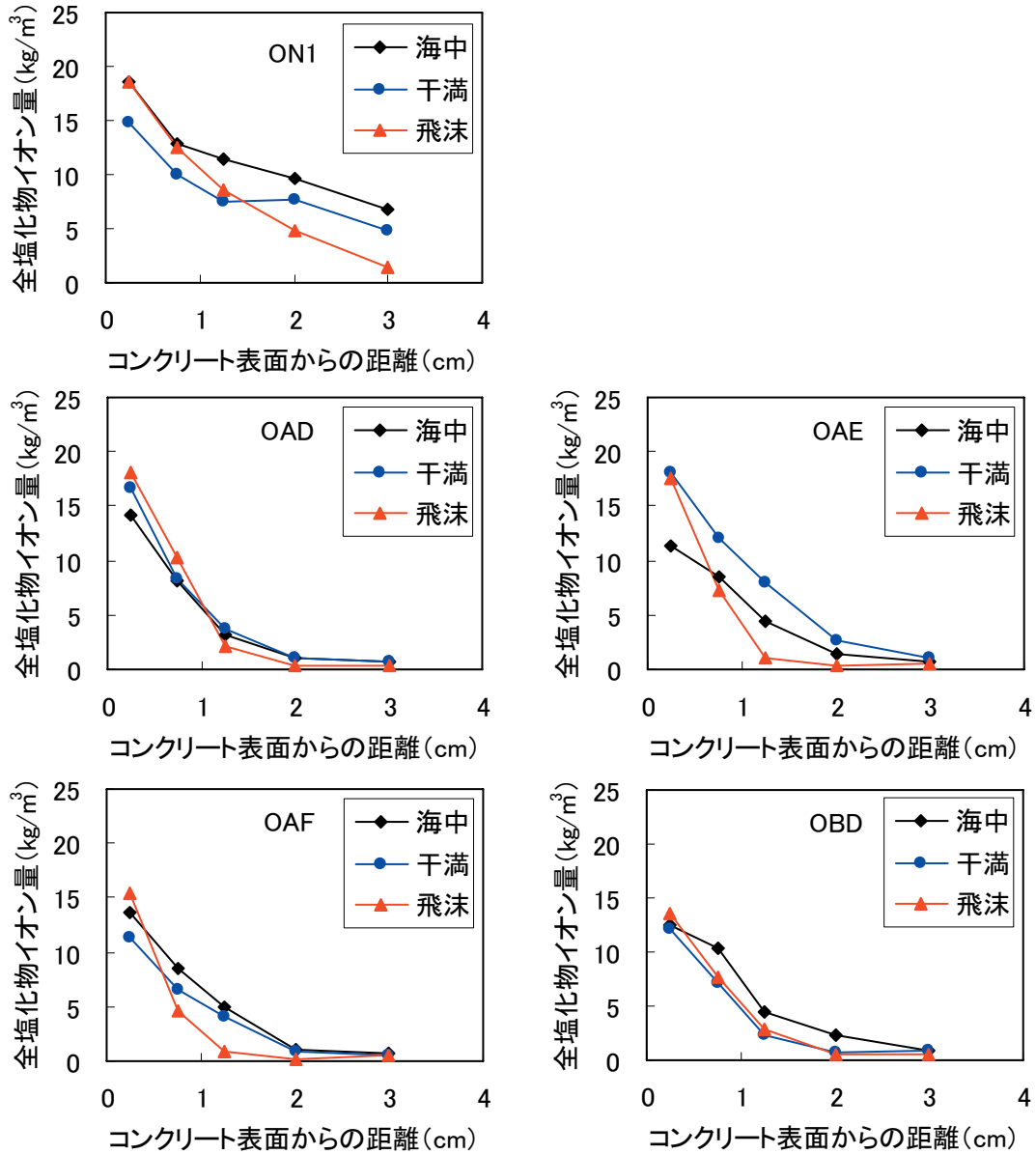


図-E.1 循環水槽暴露供試体の塩化物イオン分布 (1)

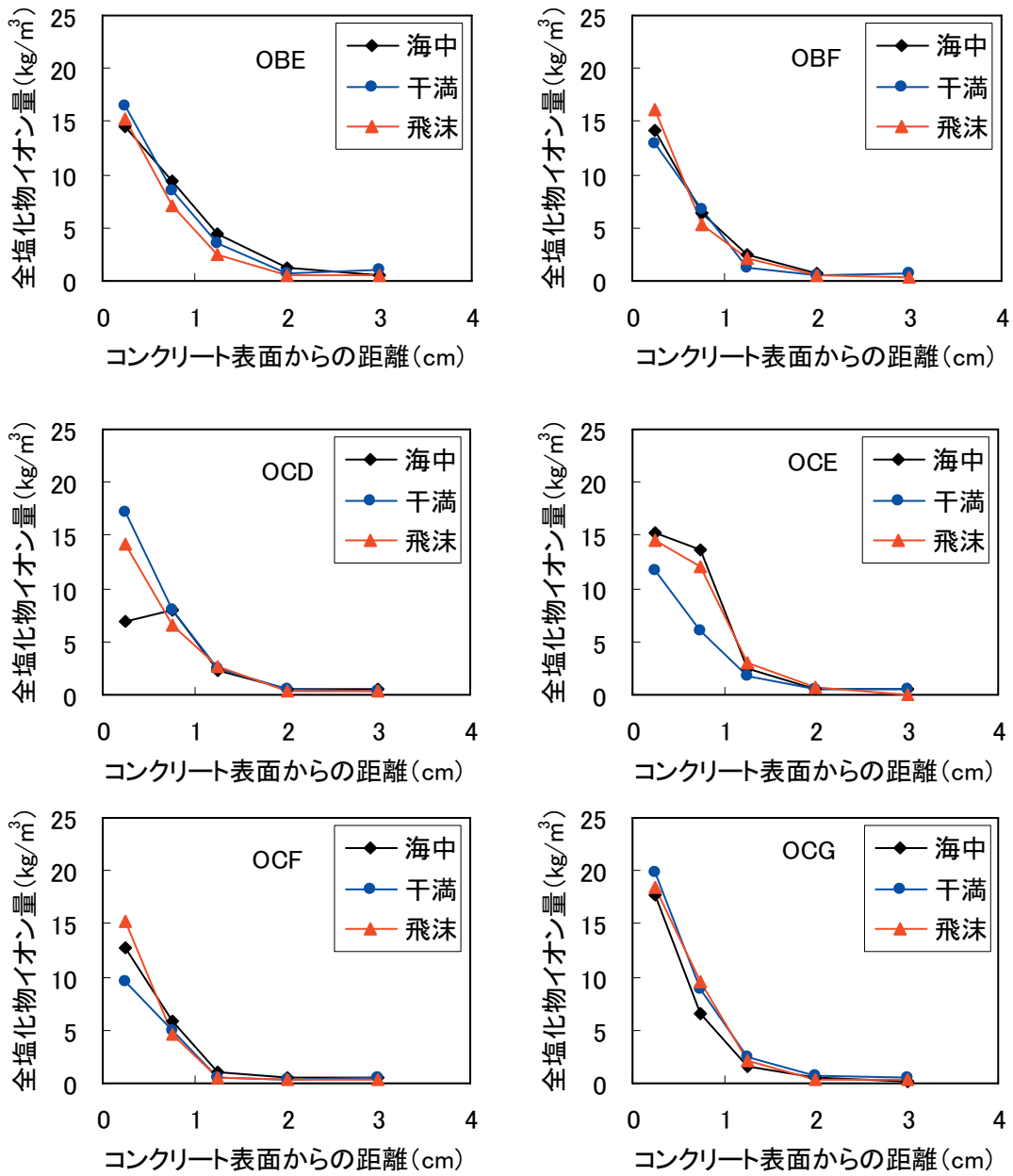


図-E.2 循環水槽暴露供試体の塩化物イオン分布 (2)

港湾空港技術研究所報告 第47巻第2号

2008.6

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

TEL.046(844)5040 URL.<http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社 大成社

Copyright © (2008) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

CONTENTS

Characteristics of the Observed Offshore Data by the Northern Pacific GPS Buoys Toshihiko NAGAI, Katsuyoshi Shimizu, Makoto Sasaki	1
Bearing Capacity of T-shaped or Floating-type Sand Compaction Pile Improved Ground Hidenori TAKAHASHI, Eitoku ICHIKAWA, Masaki KITAZUME	53
A Rational Design of Foot-Protection Block and Armor Block Covering Rubble Mound of Composite Breakwaters Ken-ichiro SHIMOSAKO, Shin-ichi KUBOTA, Masashi HAMAGUCHI, Akira MATSUMOTO, Minoru HANZAWA, Fumitake NAKANO	89
Research on Quality and Durability of the By-Products Concrete Using Steel Making Slag, Fly ash and Blast Furnace Slag Yoshikazu AKIRA, Toru YAMAJI, Hidenori HAMADA	111