

# 論文 練混ぜ工法を変えたコンクリートの微細構造の分析と評価

塩永 亮介\*1・戸田 勝哉\*2・伊藤 祐二\*3・高橋 晴香\*4

**要旨：**同一配合で練混ぜ工法が異なるコンクリートにおいて、ブリーディングや強度特性といったマクロな材料特性に差が生じる要因を、コンクリート中の結合水量や SEM や EPMA による骨材周囲の組織・成分観察といったミクロな分析評価によって検証した。その結果、骨材とともに分割練混ぜを行う SEC コンクリートでは、従来の一括練混ぜに対して骨材周囲に形成される脆弱な遷移帯の領域が顕著に減少し、これが強度特性の差に大きな影響を及ぼしていることがわかった。また、SEC コンクリートはペースト部分の結合水量が比較的多く、材齢の進行に伴う水和物の生成も顕著であることを把握した。

**キーワード：**SEC コンクリート, 分割練混ぜ, 微細構造, 遷移帯, EPMA

## 1. はじめに

SEC コンクリート<sup>1)</sup>とは、分割練混ぜ工法の一つである SEC (Sand Enveloped with Cement) 工法により製造されたコンクリートである。通常のコンクリートの練混ぜでは必要水量が一括で投入されるが、SEC 工法では後述のように水を一次水、二次水と分割投入して練り混ぜるのが大きな違いである。本工法で製造されたコンクリートは、ブリーディングが顕著に減少するほか、強度特性が 5~10%の範囲で向上し、収縮ひび割れ低減や耐久性向上が図れることも既往の研究で実証されている<sup>2),3),4)</sup>。

これらの諸性能が向上する機構(メカニズム)として、主に①キャピラリーペーストの生成と②ペースト-骨材間のミクロな領域に形成される脆弱層(以下、遷移帯)の品質改善が要因と考えられているものの、これらについて微細構造(マイクロストラクチャー)の観点から詳細に検討されていない。そこで本論文では、異なる練混ぜ工法によって製造されたコンクリートの基本物性を把握するとともに、硬化後のコンクリート試験片の成分分析や骨材周囲の微細構造の観察評価から、性能向上のメカニズムに対して検討した結果を報告する。

## 2. SEC コンクリート

図-1 に各種練混ぜ工法の練混ぜ手順の比較を示す。水の投入を 2 回に分ける分割練混ぜ工法の一つであるダブルミキシング工法<sup>5)</sup>は、セメントペーストの練混ぜを一次水、二次水と分けて練り混ぜるのに対し、SEC 工法は骨材と一次水を入れた調整練りの後にセメントを投入して一次練りを行う。これによって図-2 に示すように骨材の表面に低水セメント比のペーストをまぶす、いわゆる「造殻」の工程を一度経由し、さらに二次水を投入した二次練りを行うことにより、キャピラリーペーストの

生成と遷移帯の品質改善をはかる。ここでキャピラリーペーストとは、セメント粒子の間が水で満たされ粒子間結合力が最大になる“キャピラリー状態”を経たペーストのことであり、この状態時は練混ぜトルクが最大となる。この理論をもとに SEC コンクリートの配合設計では、事前の予備試験で一次水量を決定している。

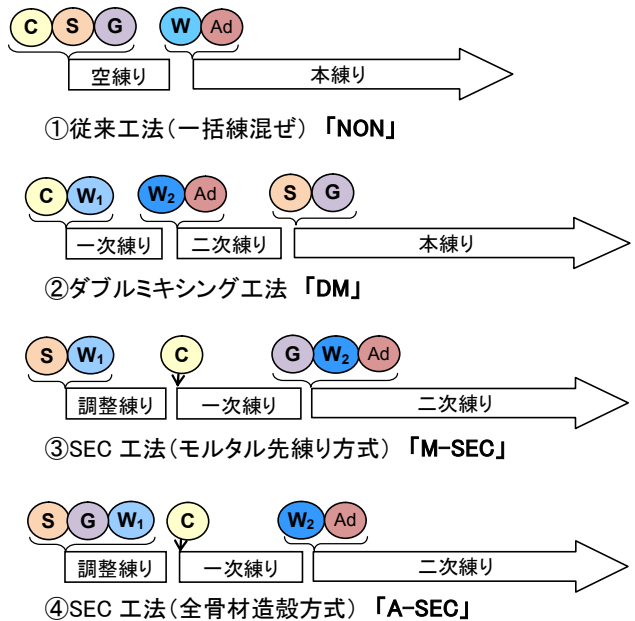


図-1 各種練混ぜフローの比較

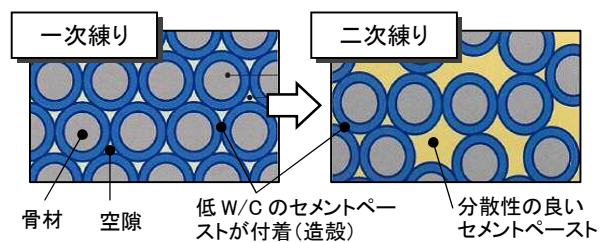


図-2 SEC コンクリートの原理

\*1 (株)IHI 技術開発本部 基盤技術研究所構造研究部 主任研究員 工修 (正会員)

\*2 (株)IHI インフラシステム 開発部 課長 工博 (正会員)

\*3 リブコンエンジニアリング(株) 代表取締役社長 工修 (正会員)

\*4 太平洋コンサルタント(株) 解析技術部 (正会員)

また SEC 工法の中でも、細骨材のみを造殻させる「モルタル先練り方式」と、細骨材・粗骨材ともに造殻させる「全骨材造殻方式」の 2 種類がある。これらは使用するミキサのトルク（負荷）容量の関係から従来使いわけされており、既往の実験では両者に大きな性能差はないことが確認されていた。しかし近年の砕石・砕砂を使用するコンクリートに対しては、その性能差が生じることも考えられたことから本実験では両者を分けて検討した。

### 3. 実験概要

#### 3.1 目的と実施項目

本実験では、図-1 に示した 4 種の異なる練混ぜ工法（以下、「NON」、「DM」、「M-SEC」、「A-SEC」と記す）により製造されたコンクリートに対し、ブリーディングや圧縮強度・引張強度といった材料的にマクロな特性と、コンクリート中の結合水量や SEM, EPMA によるペーストや遷移帯の組成といったミクロな分析でわかる特性と

表-1 実施項目と評価内容

	試験・分析項目	評価内容
マクロ (試験)	ブリーディング試験	ブリーディング量
	圧縮強度試験	圧縮強度
	割裂引張強度試験	引張強度
ミクロ (分析)	熱重量示差熱分析	結合水量
	走査線電子顕微鏡 (SEM)による反射電子像	微細空隙や水和生成物の判別
	電子線マイクロアナライザー (EPMA)による元素マッピング分析	遷移帯や未水和部の判別

の関係性を見出すことを目的に、表-1 に示す試験および分析を実施した。なお、ブリーディングを除くいずれの試験・分析は、材齢 7 日および材齢 28 日の試験片を用いて評価を行った。

#### 3.2 使用材料と配合

本実験で用いたコンクリートの示方配合を表-2 に、使用した材料の種別や特性値を表-3 に示す。基準とするコンクリートは、橋梁等で多く用いられる配合をベースに目標圧縮強度 30N/mm<sup>2</sup> の普通コンクリートとし、水セメント比 55.0%、細骨材率 47.0%のもので統一した。一次水・二次水の設定においては、DM のケースでは笠井らの研究<sup>5)</sup>をもとに、SEC のケースでは技術資料<sup>1)</sup>をもとに決定した。

#### 3.3 練混ぜ方法

コンクリートの練混ぜ量は 80L とし、強制二軸練りミキサ（定格容量 100L）を用いた。各ケースの練混ぜ手順は図-1 に示す通りであり、NON のケースでは、各材料をミキサに投入し 15 秒の空練りをした後、水を投入し 90 秒の本練りを行った。DM のケースでは、ペーストの一次練り 120 秒、二次練り 45 秒を経て、骨材を投入し 45 秒の本練りを行った。SEC のケースでは、調整練り 30 秒の後、セメントを投入して一次練り 45 秒、二次水を投入して二次練り 45 秒を行った。

#### 3.4 養生と試験片の切り出し

強度試験や分析評価用には φ100×200mm の円柱供試体を作製した。これらは打設後 20℃の恒温室に保管後、材齢 1 日目に脱型し、その後 20℃の水中養生を施した。また分析用の試験片については、対象材齢になった時点で円柱供試体を必要な所定寸法に切断し、観察面等はアセトンに浸漬させて水和停止の処置をした。

表-2 コンクリートの示方配合

ケース名	練混ぜ工法	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
				水		セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
				W <sub>1</sub>	W <sub>2</sub>	C	S	G	Ad
NON	一括練混ぜ	55.0	47.0	165		300	841	976	2.40
DM	ダブルミキシング			75	90	300	841	976	2.40
M-SEC	SEC (モルタル先練)			82	83	300	841	976	2.40
A-SEC	SEC (全骨材造殻)			82	83	300	841	976	2.40

表-3 使用材料と特性値

材料名	記号	種別 (産地), 特性値	比重	備考
セメント	C	普通ポルトランドセメント	3.16	
細骨材	S	S <sub>1</sub> : 砂岩砕砂 (厚木市華厳産), [F.M.=2.90, 吸水率 3.71%] S <sub>2</sub> : 石灰砕砂 (佐野市仙波産), [F.M.=3.27, 吸水率 1.27%]	2.57	S <sub>1</sub> :S <sub>2</sub> =0.71:0.29 [吸水率 3.00%]
粗骨材	G	硬質砂岩・砕石 2005 (飯淵産), [F.M.=6.72, 吸水率 0.85%]	2.65	
減水剤	Ad	AE 減水剤・標準型 (I 種) (リグニン酸系)	1.00	

#### 4. 実験結果

##### 4.1 ブリーディング

ブリーディング試験は、JIS A 1123 に準じて実施し、同バッチからの 2 回の試験の平均値で整理した。図-3 に 150 分までのブリーディング水量の経時変化を示す。ブリーディング水量は、全般通して NON が最も大きく、次いで M-SEC、A-SEC、DM の順に減少した。DM では最終的な水量は NON の 1/2 程度となった。

SEC コンクリートのブリーディングが減少する要因は、骨材周囲の造殻層がブリーディング水の移動を阻害するためであり、このことは 2 種類の SEC コンクリートのうち A-SEC の方が少なかったことから説明できる。また、DM が最も少ない理由としては、ペーストの先行する分割練り混ぜによって粉体粒子間の拘束水が多く、余剰水としての浮き上がりが少なかったためと考えられる。

##### 4.2 圧縮強度・引張強度

強度特性の把握として、 $\phi 100 \times 200$  の円柱供試体により、圧縮強度試験 (JIS A 1108) および割裂引張強度試験 (JIS A 1113) を行った。それぞれの結果を図-4 および図-5 に示す。

強度の発現性は、両試験とも NON、DM、M-SEC、A-SEC の順に増加する結果となり、その傾向は材齢 7 日と材齢 28 日の供試体でもほぼ同様であった。これらの結果は同一配合であっても、練混ぜ工法の違いで大きく強度特性が変わることを示しており、とくに A-SEC においては通常の一括練り (NON) に対して圧縮強度で約 13%、引張強度で約 11% 上昇した。これは既往の天然骨材をベースとしていた試験結果 (5~10%)<sup>6)</sup> よりも大きく、碎石・砕砂を用いた場合には、練混ぜ工法の違いが強度特性に及ぼす効果がより顕著となることが分かった。

##### 4.3 コンクリート中の結合水量

コンクリート中の結合水量は、熱重量示差熱分析装置 (TG-DTA) により、試験片をディスクミルで粉砕した試験片を用いて実施した。自由水は水和停止のためのアセトン処理で取り除かれているものと仮定し、温度範囲が室温~600℃までの質量減少率を求め、これを結合水量とした。表-4 に試験結果を示す。

材齢 7 日の結果では DM が最も高く、次いで A-SEC、M-SEC、NON という順であった。この傾向は図-3 に示したブリーディング水量の少ない順と同傾向であり、DM がペーストの先練りによって初期の拘束水を多く保持したという想定の説明がつく。図-4、図-5 の強度特性との相関をみた場合、DM は結合水量が多いにもかかわらず材齢 7 日強度が比較的小さい。これはコンクリート強度がペーストの結合水量だけで決まるのではなく、骨材周囲の造殻による骨材とセメントマトリクス間の強度の影響も受けることを示唆している。

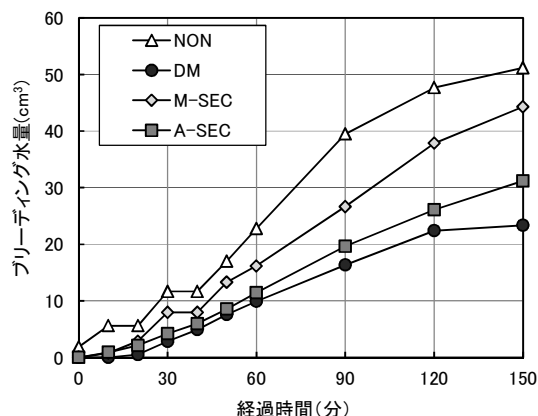


図-3 ブリーディング試験結果

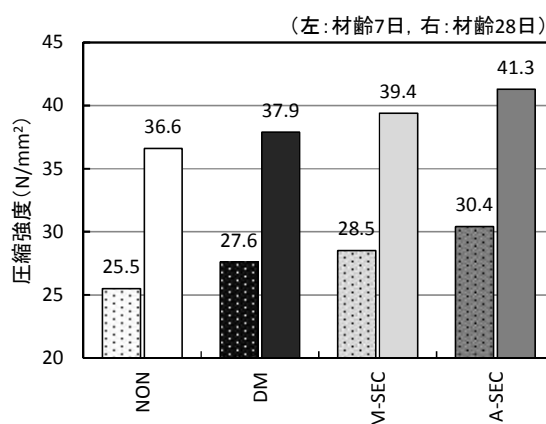


図-4 圧縮強度試験結果

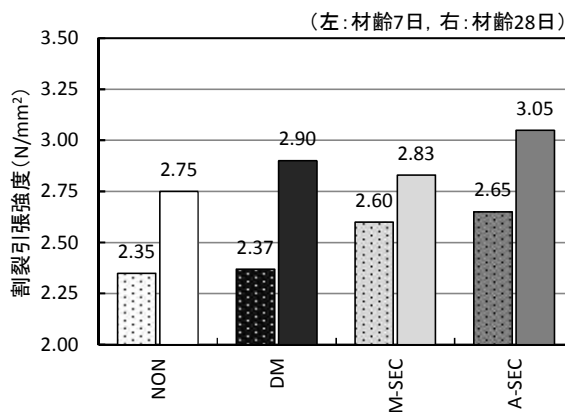


図-5 引張強度試験結果

表-4 結合水量の試験結果

	結合水量 (mass%)	
	材齢 7 日	材齢 28 日
NON	4.53	5.61
DM	5.41	5.73
M-SEC	4.62	6.18
A-SEC	4.86	6.25

材齢 28 日の結果では A-SEC が最も高くなり、次いで M-SEC, DM, NON という順になった。とくに DM は、材齢 7 日から材齢 28 日にかけての増加が他に比べ少なく、材齢の進行に伴う反応性は鈍いことがわかった。一方で SEC 工法の 2 ケースは、材齢間の結合水量の増加はいずれも 1.5% 程度と NON と比較しても大きいことから、材齢の進行に伴うセメントの水和反応が顕著に進んだと考えられる。

#### 4.4 骨材周囲の遷移帯構造

##### (1) SEM 観察 (反射電子像)

SEM 観察により骨材界面の組織観察するため、円柱供試体を鉛直に切断し、そこから細骨材・粗骨材をランダムに含む 20mm 角程度の小片試料を切断・採取した。水和停止処置後、試料表面にカーボン蒸着し、これを観察試料とした。

図-6 に各ケースの代表的な分析結果として、材齢 7 日試料における観察倍率 100 倍の反射電子像を示す。なお、いずれの図も上方が打設面側であり、観察視野はできる限り粗骨材 (G) と細骨材 (S) の界面がみえる箇所を選択した。反射電子像では、Ca や Fe などの比較的重い元素を多く含むものは明るく (白く) 表示され、逆に C などの軽元素を多く含むものは暗く (黒く) 表示される。さらに実態のない空隙は最も暗く表示される。

NON のケースでは、粗骨材の下側に厚さ 50 $\mu$ m 程度の黒い層 (→ の部分) が確認された。これは、骨材下面

に溜まったブリーディング水が抜けて形成された空隙と考えられ、NON では他ケースより多く観察された。

また各ケースで骨材の周囲にやや明るい灰色の層 (→ の部分) があり、これは骨材界面の水酸化カルシウム (以下、CH) を多く含む、いわゆる遷移帯の領域を示している。その厚みは場所によって異なるものの数~数十  $\mu$ m の範囲であった。他の分析視野の結果も踏まえて序列すると、この遷移帯の総量 (厚さ・数) は NON > DM > M-SEC > A-SEC といった傾向であり、図-4、図-5 で示した強度特性の低い順と同傾向であった。これより練混ぜ工法の違いは、骨材周囲の空隙や遷移帯の形成に差をもたせ、これが硬化コンクリートの強度特性に大きな影響を及ぼしたと考えられる。このことは遷移帯厚さとコンクリート強度との関係を評価した既往の文献<sup>7)</sup>とも一致する。さらに、4.2 節に記述したように、この遷移帯の改善効果は、骨材表面が比較的滑らかな天然骨材を使用した既往の実験より、表面性状が粗悪な砕石・砕砂を使用した本実験において強度に与える影響が顕著であったことから説明がつく。

##### (2) EPMA マッピング分析

SEM 用の分析試料と同様に、円柱供試体を鉛直に切断して採取した板状試験片 (観察面 40 $\times$ 40mm, 厚さ 20mm) を、エポキシ樹脂で包囲後、カーボン蒸着して分析試料とした。

各ケースの代表的なマッピング分析結果を図-7 (材

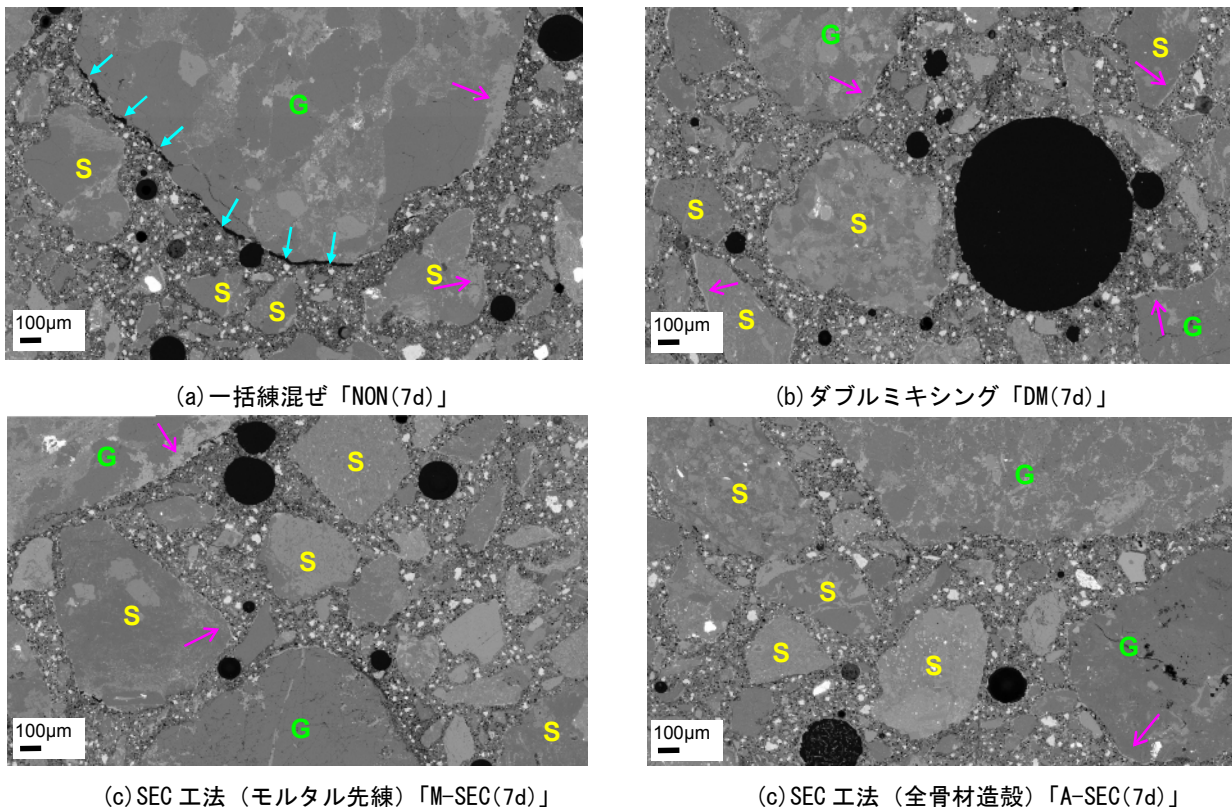


図-6 SEMによる反射電子像の観察結果 (材齢 7 日試料・ $\times$ 100 倍)



齢 7 日) および図-8 (材齢 28 日) に示す。各図は同一視野であり、左端より反射電子像、CaO 濃度 (mass%), CO<sub>2</sub> 濃度 (X 線強度) の順で示している。CaO 濃度において骨材周囲の高い箇所は CH であり、CH が遷移帯中に多く生成されることから、この濃度の高い (白~桃) 範囲が遷移帯と判別できる。また、CO<sub>2</sub> 濃度において濃度の高い (白~桃) 範囲は、微細空隙か水和生成物が形成されていない未水和部と判別できる。

材齢 7 日の分析結果 (図-7) より NON では図-6 の SEM 観察でも確認されたような骨材下側の空隙があり CaO 濃度をみるとその箇所は濃度が高く、CH を含む遷移帯が最大 60 $\mu$ m 程度の厚さで形成されていた。DM では反射電子像で骨材周囲に目立つ空隙はないものの、CaO 濃度が高い箇所 (遷移帯) は散見された。一方、SEC の 2 ケースの骨材周囲の CaO 濃度は比較的領域が小さく、骨材界面まで緑~青の領域が広がっていた。M-SEC では大きい骨材の下側に、いくつか遷移帯が確認されたが、A-SEC では細・粗骨材どちらの周囲でも 30 $\mu$ m を越すような遷移帯はほとんどなかった。このことより、SEC 工法が骨材周囲の遷移帯の厚さが低減、もしくは解消に効果があることが示され、練混ぜ段階で骨材周囲に造殻層を形成することが影響したものと考えられる。

また、図-7 の CO<sub>2</sub> 濃度 (材齢 7 日) の結果より、ペースト中の濃度分布に着目すると、DM ケースでは他に比べて高濃度の点在箇所 (未水和部分) が少なく、多くの領域が緑~青色の低濃度であった。これは、ダブルミキシングによりペーストが入念に練混ぜされており、初期材齢で水和が進行していた結果と考えられる。

材齢 28 日の分析結果 (図-8) において、CaO 濃度の結果によれば、NON では材齢が進行してにもかかわらず骨材下側には白色部である CH が析出した層 (遷移帯) の存在が確認された。DM ではその厚さは薄いものの、骨材下面にはまだいくつか遷移帯が確認された。M-SEC、A-SEC では骨材界面に白い領域は少なく、界面から少し離れた箇所に点在する赤い箇所がみられたが、これはカルシウムシリケート等の水和生成物と考えられる。

また、図-8 の CO<sub>2</sub> 濃度の結果では、材齢 7 日との大きな違いは、M-SEC・A-SEC におけるペーストの領域が DM と比較してもほぼ青~黒になっている点であった。これは、微細空隙がセメントの水和生成物で充填していることを示しており、表-4 に示したコンクリート中の結合水量において SEC の 2 ケースが材齢の進行に伴う増分が大きかった点とも説明がつく。また A-SEC では骨材界面においてもそれら水和生成物がしっかり充填している箇所が多く見受けられた。

これらの観察結果から、NON では比較的大きな遷移帯が存在しペースト中の未水和部の残存も多いこと、DM

\* 左から「反射電子像」・「CaO 濃度」・「CO<sub>2</sub> 濃度」

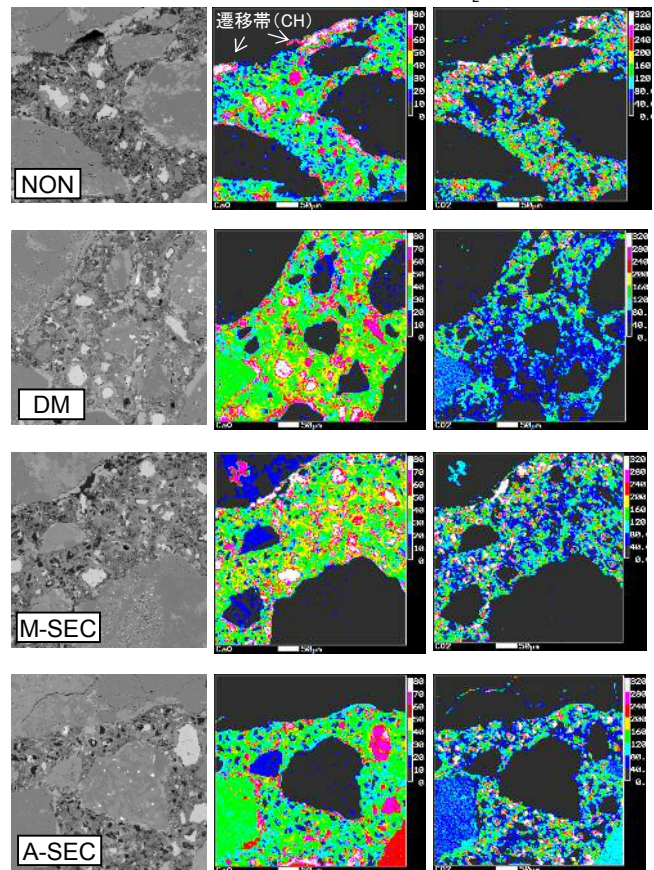


図-7 EPMA による面分析の結果 (材齢 7 日試料)

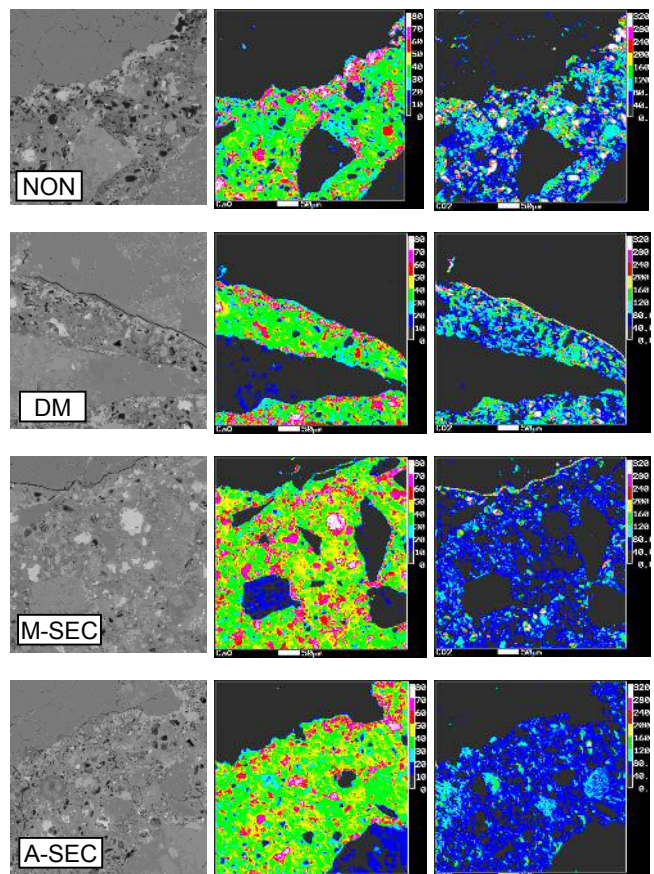


図-8 EPMA による面分析の結果 (材齢 28 日試料)

ではペーストが入念に混ぜられたことから初期の未水和部は少ないものの骨材下面の遷移帯があること、M-SEC、A-SEC では NON に比べて骨材周囲の遷移帯が少なく、材齢の進行とともに水和が進み緻密化が図られていることがわかった。なお、M-SEC と A-SEC との性能差については、粗骨材周囲の遷移帯形成の違いによるものと考えられ、粗骨材の造殻工程も入る A-SEC の方がブリーディングおよび強度特性において高い性能を示した。

## 5. まとめ

以下に、練混ぜ工法変えたコンクリートの物性試験および微細構造（マイクロストラクチャー）の分析によって得られた知見をまとめる。

- 1) コンクリート中の結合水量の分析より、DM では初期材齢に拘束水を多く含んだものの材齢の進行に伴う水和が鈍かったのに対し、M-SEC、A-SEC では材齢間での水和の進行が顕著であった。このことは EPMA 面分析において、材齢とともにペースト部の未水和部が減少し、水和生成物が多く充填していた観察結果からも検証できた。
- 2) SEM による反射電子像の分析より、NON では骨材周囲の微細空隙や CH の析出といった脆弱層が多く観察され、他のケースでは NON と比較してその量が少なかった。DM や M-SEC では大きい骨材の界面にやや CH 層が確認されたが、A-SEC では微量であった。このような骨材界面の性状が、コンクリート強度特性に大きな影響を及ぼすことが示唆された。
- 3) EPMA 面分析では、骨材界面において CH を富む遷移帯が確認でき、その厚さは NON のケースで最大 60 $\mu$ m 程度であった。これに対し SEC ではその領域が少なく、とくに A-SEC では細・粗骨材どちらの周囲でも 30 $\mu$ m を越すような遷移帯はほとんど確認されなかった。

これら得られた知見より SEC コンクリートがブリーディング低減、強度増加をもたらす機構（メカニズム）として、主に以下が関係すると考えられる。

- ① 造殻の過程を経由することで、骨材周囲の微細空隙や脆弱な遷移帯の形成が少ないこと
- ② キャピラリーペーストは初期に拘束水を比較的多く含み、また材齢の進行に伴う水和物の生成が顕著なこと

## 参考文献

- 1) (一財) 土木研究センター：土木系材料技術・技術審査証明書 報告書「SEC コンクリート」（技審証第 1009 号），平成 10 年 8 月
- 2) 加賀秀治ほか：S.E.C.コンクリートの研究（特性と強度），日本建築学会大会学術講演概要集，pp.57-58，1980.9
- 3) 岸谷孝一，伊東靖郎，加賀秀治，山本康弘：SEC コンクリート工法，建築技術，No.380，pp.1-18，1983.4
- 4) 戸田勝哉，中村義彦，伊藤祐二：SEC コンクリートの橋梁床版への適用検討，土木学会第 67 回年次学術講演会，第VI部門，pp.711-712，2012.9
- 5) 笠井哲郎：コンクリートの新しい練混ぜ方法に関する研究，広島大学博士学位論文，1990.3
- 6) 加賀秀治，山本康弘，伊東靖郎：SEC コンクリートの特性と建築工事への適用，建築の施工技術，No.226，pp.53-64，1984.10
- 7) 内川浩，羽原俊祐，沢木大介：硬化モルタル及びコンクリート中の遷移帯厚さの評価並びに遷移帯厚さと強度の関係の検討，コンクリート工学論文集，Vol.4,No.2，pp.1-8，1993.7