

論文 アミノ酸の混入が再生コンクリート中の鉄筋腐食に与える影響

萩原 達朗^{*1}・相原 慶輔^{*1}・上田 隆雄^{*2}・飯干 富広^{*3}

要旨: アミノ酸の一種であるアルギニン混入したコンクリートを用いた消波ブロックなどは、海洋環境においてコンクリート表面への藻類の付着が促進され、魚類等の生物生息環境を改善できることが報告されている。本研究では、アミノ酸を混入した再生コンクリートの海洋構造物への適用を想定し、アルギニン混入再生コンクリートを用いた鉄筋コンクリートの塩害抵抗性を検討するため、塩水浸漬試験とモルタル細孔溶液の化学分析を実施した。この結果、再生コンクリートではアルギニンを添加することによる鉄筋防食効果は小さかったが、フライアッシュ外割混和との組み合わせで鉄筋防食性能が向上する傾向を示した。

キーワード: アルギニン, 塩害, 鉄筋腐食, 電気化学的腐食指標, フライアッシュ

1. はじめに

沿岸域において整備が進められてきた防波堤や護岸などの多くのコンクリート港湾構造物は、海洋環境において、周辺の水質や生物生息機能に大きな影響を与えるものと考えられることから、このような環境との調和が重要な課題となってきた。これに対して近年、港湾構造物に環境調和機能を持たせるための新しいコンクリートの一つとして、アミノ酸の一種であるアルギニンを添加したコンクリートが開発されている^{1), 2)}。アルギニンは天然に存在するアミノ酸の一種で、生体内において余剰アンモニアの除去や免疫力向上などの生理機能を有する。また、魚類はアルギニンを含む一部のアミノ酸に高い感受性を持つことが報告されている³⁾。アルギニンを混入したコンクリートはその表面上における微細藻類の生長促進効果が確認^{1), 2)}されており、海洋生態系の形成が期待される。

従来、アルギニン混入コンクリートは消波ブロックなどの無筋コンクリートとして利用されてきたが、ケーソン式護岸などの海洋構造物への利用展開を考えると、鉄筋コンクリート構造物としての過酷な塩害環境への耐久性の確保が課題となる。これまでの著者らの検討によると、コンクリートにアルギニンを添加すると、アルギニンの有する高い塩基性により、コンクリート中の鉄筋に対しては、防食効果が期待できることから、鉄筋コンクリートとしての適用可能性は高いと考えられる⁴⁾。

一方、東日本大震災からの復興事業が進む東北地方では、多量のコンクリート需要に対して骨材の供給が不足しており、震災で発生した大量の廃棄コンクリートを有効利用した再生骨材の活用も含めて検討が進められている⁵⁾。このようなコンクリートは、厳しい塩害環境に対する耐久性が確保されれば、護岸や防波堤などの防災

機能を有する港湾構造物への適用も可能となるものと考えられる。

そこで本研究では、アルギニンを添加した再生コンクリートの基礎物性について検討するとともに、鉄筋コンクリート供試体を作製し、塩水浸漬試験によって塩化物イオン（以下 Cl^- とする）の浸透とそれに伴う鉄筋腐食に対する抵抗性能を確認することとした。さらに、モルタル供試体から抽出した細孔溶液の分析を行うことで、アルギニンの添加が細孔溶液中のイオンバランスとアミノ酸溶出に与える影響について考察を加えた。なお、震災後の電力供給を支える火力発電所からの副産物であるフライアッシュを細骨材代替で混和したコンクリートについても併せて検討を行った。

2. 実験概要

2.1 コンクリート配合及び使用材料

本実験で用いたコンクリートの配合を表-1に示す。ここに示した6配合の内、配合名の最初にNが付いた3配合は普通骨材を用いた配合で、Rが付いた3配合は再生骨材を用いた配合とした。水セメント比は一定の55%とし、配合名にAの付いたアルギニンを添加した配合には、セメント質量の3%の粉末アルギニンを細骨材代替として添加した。本実験では、アルギニンの添加方法として練混ぜ水に溶解させる方法を標準としたが、配合名NAPの場合だけは、アルギニンを粉末の状態でも添加した。また、配合名RFAのコンクリートについては、アルギニンに加えて、細骨材体積の20%のフライアッシュを混和した。なお、モルタル配合はコンクリート配合から粗骨材を除いたものとし、初期塩分としてコンクリート体積換算で Cl^- 濃度が 3.0 kg/m^3 となるようにNaClを練混ぜ水に溶解して混入した。

*1 徳島大学大学院 知的力学システム工学専攻建設創造システムコース (学生会員)

*2 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部エコシステムデザイン部門教授 工博 (正会員)

*3 日建工学(株) 技術部 (正会員)

表-1 コンクリートの配合

配合名	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)										スランプ(cm)	空気量(%)
			W	C	NS	RS	NG	RG	FA	Arg	WRA*	AEA**		
N	55	48	170	309	852	—	949	—	—	—	2.47	0.01	17.0	4.6
NA	55	47	170	309	834	—	949	—	—	9.27	0.93	0.01	20.0	3.5
NAP	55	47	170	309	834	—	949	—	—	9.27	0.93	0.01	18.0	3.5
R	55	48	170	309	—	734	—	835	—	—	3.40	0.02	15.5	4.4
RA	55	47	170	309	—	718	—	835	—	9.27	1.24	0.02	12.5	3.2
RFA	55	42	170	309	—	571	—	835	235	9.27	1.54	0.02	8.0	1.0

*WRA : AE減水剤, **AEA : AE剤

セメントは普通ポルトランドセメント（密度：3.15 g/cm³，比表面積：3280 cm²/g）を用い，普通細骨材 NSは大井川水系陸砂（密度：2.59 g/cm³，吸水率：2.0%），普通粗骨材 NGは青梅産砕石（密度：2.66 g/cm³，吸水率：1.6%，Gmax：20 mm）を用いた。これに対して，再生骨材については，構造物の解体に伴って引抜いた PC 既存杭（打設後 27 年経過）を破碎処理して得たものであり，5mm 以下のものを再生細骨材 RS（密度：2.23 g/cm³，吸水率：10.8%），粒径が 5-20 mm のものを再生粗骨材 RG（密度：2.34 g/cm³，吸水率：7.0%）として使用した。これらの再生骨材の品質は JIS A 5023 の再生骨材 L の品質に該当し，再生骨材の粒度分布は，JIS の再生骨材 L の標準粒度範囲内におさまっている。またフライアッシュは，JIS A 6201 で規定されたⅡ種フライアッシュ（密度：2.33 g/cm³，比表面積：4150 cm²/g，強熱減量：1.8%，活性度指数：84（28 日），100（91 日））を使用した。

各配合のコンクリートについて，フレッシュ性状を表-1 に示す。過去の検討⁴⁾より，アルギニンを添加することでコンクリートの流動性が向上する結果が得られていたため，アルギニンを添加した配合については混和剤使用量を減じているが，それでもアルギニン無添加配合と同程度以上の流動性が得られている。特に普通骨材を用いた N シリーズでは比較的大きなスランプを示しているが，コンクリートの材料分離は見られなかった。フライアッシュを外割で混和した RFA については，粉体量が他配合より多いため，粘性が高く，スランプも小さくなった。また，フライアッシュ混和の影響で混和剤による空気連行量が大きく低下した。

2.2 供試体の作製および養生

本研究で作製した鉄筋コンクリート供試体は 100×100×300 mm の角柱コンクリートの長軸方向に対して，みがき丸鋼φ13 mm（長さ：350 mm）をかぶり 25 mm で埋め込んだものとした。鉄筋の一端はエポキシ樹脂で絶縁した上でコンクリートから露出させ，コンクリート内の鉄筋埋込み長は 270 mm とした。また，φ100×200 mm の円柱コンクリート供試体を別途作製し，コンクリート

の圧縮強度測定および塩水浸漬試験後の Cl⁻浸透深さ測定に供した。モルタル供試体はφ50×100 mm の円柱モルタルとした。これらの供試体はコンクリート打設日翌日に脱型し，20℃の恒温室中で 28 日間または 91 日間の封緘養生を行った。塩水浸漬試験を行う鉄筋コンクリート供試体および円柱コンクリート供試体は，暴露面 1 面を除いて他の面についてはエポキシ樹脂を塗布した。

2.3 各種試験

養生終了後の供試体を用いた塩水浸漬試験は，20℃環境で 10%NaCl 溶液への浸漬 10 日間，気中乾燥 4 日間で 1 サイクルとし，各サイクル終了時に電気化学的鉄筋腐食指標の測定を行った。4 か月間の塩水浸漬試験終了後に塩水中のアミノ酸溶出量をアミノ酸分析計により測定した。

塩水浸漬試験の期間中，定期的に供試体中鉄筋の自然電位，分極抵抗とコンクリート抵抗を測定した。電気化学的鉄筋腐食指標の測定を行う際の照合電極は，飽和銀塩化銀電極（Ag/AgCl），対極にはチタンメッシュを用いて供試体中の鉄筋全長の平均値として測定を行った。分極抵抗は矩形波電流分極法で印加電流 10 μA，周波数 800 Hz と 0.1 Hz のインピーダンス値の差から求め，コンクリート抵抗は高周波数側（800 Hz）のインピーダンス値として求めた。

91 日間の封緘養生が終了したモルタル円柱供試体を用いて，高圧抽出法により 5 ml 以上の細孔溶液抽出を行った。さらに，抽出された細孔溶液に対して，Cl⁻濃度をイオンクロマトグラフ法，OH⁻濃度を 0.01 mol/l 塩酸による直接滴定法により求めた。また，細孔溶液中のアミノ酸の濃度をアミノ酸分析計により測定した。

3.コンクリートの圧縮強度

各配合コンクリートの材齢 91 日における圧縮強度とフレッシュ時の空気量の関係を図-1 に示す。これまでの検討⁴⁾によると，アルギニンを添加することでコンクリートの圧縮強度は 3～10%程度低下する傾向を示したが，図-1 によると，普通コンクリートの N シリーズでは，ア

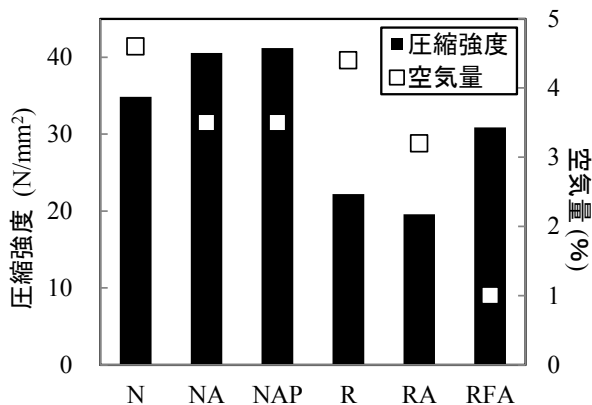


図-1 コンクリートの圧縮強度と空気量の関係

ルギニンを添加することで 10 %程度強度が増加している。今回の実験では、流動性を考慮してアルギニン添加コンクリートでは混和剤量を減少させたため、空気量が 1%程度低下したこと、および水中養生ではなく封緘養生を行ったことが影響しているものと考えられる。

一方、再生コンクリートの R は、骨材の品質低下に伴って N よりも強度が大きく低下しており、さらにアルギニンを添加する (RA) ことによって若干の強度低下が見られる。ただし、フライアッシュを混和した RFA については、R と比較して大きな強度上昇が見られる。著者らの過去の検討⁶⁾で、低度処理再生骨材を用いたコンクリートの細骨材代替でⅡ種フライアッシュを混和した場合も、やはり 17%程度の強度増進が認められたが、本実験では 37%と顕著に大きな強度増進となった。図-1 に示したように、フライアッシュの影響で空気量が確保できなかったことも一因と考えられるが、材齢 91 日であることからフライアッシュのポゾラン反応による影響が大きいものと考えられる。特に今回の配合では、アルギニンを添加しており、塩基性の高いアルギニンがフライアッシュのポゾラン反応の刺激剤として寄与した可能性も考えられる。

4. 塩水浸透試験

4.1 電気化学的鉄筋腐食指標

塩水浸透試験に供した RC 角柱供試体に関して、試験期間中の鉄筋自然電位、分極抵抗およびコンクリート抵抗の経時変化をそれぞれ図-2～図-4 に示す。各要因について供試体は 3 体ずつあり、グラフのプロットは 3 体の平均値を示した。

(1) 自然電位

図-2 によると、普通コンクリートの N シリーズ (N, NA, NAP) は、塩水浸透促進期間が長くなるにしたがって、徐々に自然電位が低下し、試験期間が 4 ヶ月に達した時には、すべての場合で ASTM C876-91 の判定基準で

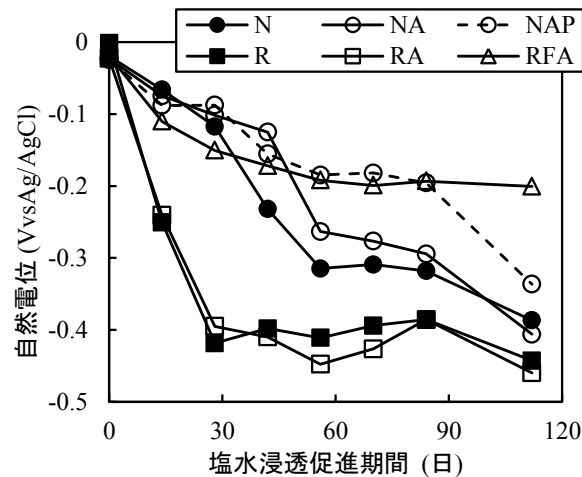


図-2 塩水浸透試験期間中におけるコンクリート中の鉄筋自然電位経時変化

90%以上の確率で腐食ありと判定される $-0.24 \text{ V vs Ag/AgCl}$ よりも卑な値となっている。ただし、アルギニンを添加した NA および NAP については、電位の低下勾配が緩やかであり、塩基性の高いアルギニンの添加によって、コンクリート中の鉄筋腐食環境が改善されていることが分かる。また、その効果はすべてのアルギニンを練混ぜ水に溶解させて添加した NA よりも粉末状態のままコンクリートに練り込んだ NAP の方が高いことがわかる。

一方、再生コンクリートの R および RA は、1 ヶ月程度の塩水浸透試験によって、自然電位が大きく低下し、早期に ASTM 判定基準の腐食領域に入っている。今回使用した再生骨材は低度処理の L クラス骨材であり、圧縮強度も普通コンクリートより大きく低下していることから、骨材界面部分を中心に Cl^- の浸透速度が大きかったものと考えられる。これに対して、細骨材代替でフライアッシュを混和するとともにアルギニンを添加した RFA については、自然電位の低下が小さく、4 ヶ月の塩水浸透期間が経過しても、ASTM 判定基準の腐食領域には入っていない。普通コンクリートにフライアッシュを外割混和した場合には、高い Cl^- 浸透抵抗性能を発揮することが、既往の検討⁷⁾でも確認されているが、アルギニンと組み合わせることで、L クラス再生骨材を用いているにも関わらず、普通コンクリートを上回る耐塩害性能を達成していることは特筆すべき実験結果と言える。

(2) 分極抵抗

図-3 によると、分極抵抗の経時変化は図-2 に示した自然電位の経時変化との相関性が高く、自然電位が卑変し、腐食確率が高くなるにしたがって、分極抵抗も低下し、分極抵抗の逆数に比例する鉄筋腐食速度は大きくなる傾向を示している。特に、再生コンクリートの R と RA は、自然電位の低下傾向に大きな違いは見られなか

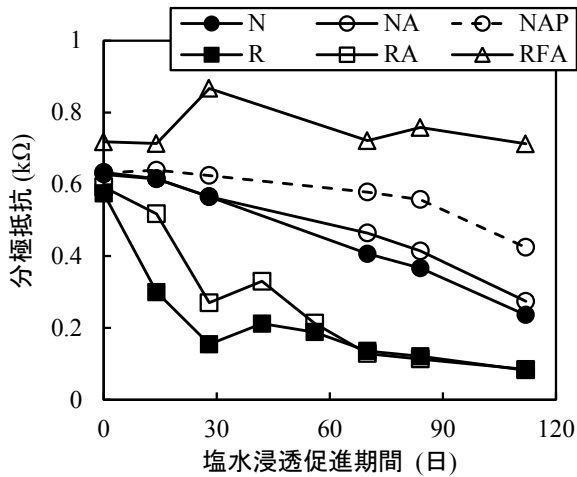


図-3 塩水浸透試験期間中におけるコンクリート中の鉄筋分極抵抗経時変化

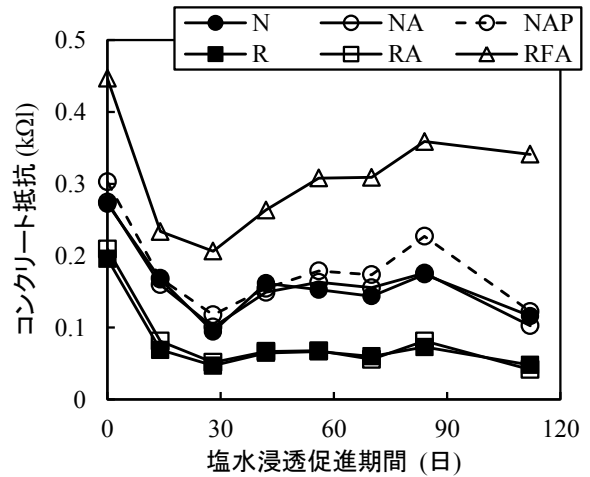


図-4 塩水浸透試験期間中における供試体のコンクリート抵抗経時変化

ったが、分極抵抗の低下は、RA よりも R の方が早く進行していることがわかる。これより、普通コンクリートだけではなく、再生コンクリート中においても、ある程度の Cl^- 濃度まではアルギニンの添加によって鉄筋腐食速度が抑制されるものと考えられる。また、自然電位の低下が最も小さかった RFA については、塩水浸透開始時から、分極抵抗の低下はほとんど見られないことから、コンクリート中の鉄筋腐食は開始していないものと推定される。

アミノ酸の添加がコンクリート中の鉄筋腐食に与える影響についてはいくつかの検討^{8),9)}がなされており、アミノ酸の種類によっては防食効果が期待できる場合があることが報告されている。また、アルギニンの添加によって塩水中¹⁰⁾やコンクリート中⁴⁾の鉄筋腐食が抑制されるとの報告もある。そのメカニズムについては不明確な部分が多いが、鉄筋表面にアミノ酸が吸着されることで孔食の形成が抑制される⁸⁾とともに、腐食反応の進行も抑制¹⁰⁾されるとの報告もある。ただし、アミノ酸がコンクリート中の鉄筋腐食に与える影響に関しては検討例が極めて少ないことから、今後のさらなるデータの蓄積が必要である。

(3) コンクリート抵抗

コンクリート抵抗はコンクリートの電気抵抗であり、腐食電流の流れやすさを表している。図-4によると、コンクリート抵抗の値は骨材種類の影響を強く受けており、再生骨材を用いた R シリーズは普通骨材を用いた N シリーズよりも小さな値を示している。これは、R シリーズでは骨材界面部分などで比較的疎な細孔構造となっていることを示している。ただし、RFA については、N シリーズよりも顕著に大きなコンクリート抵抗を示しており、また、経時的な増大も見られる。これは、アルギニン添加の影響も受けながらフライアッシュのポゾ

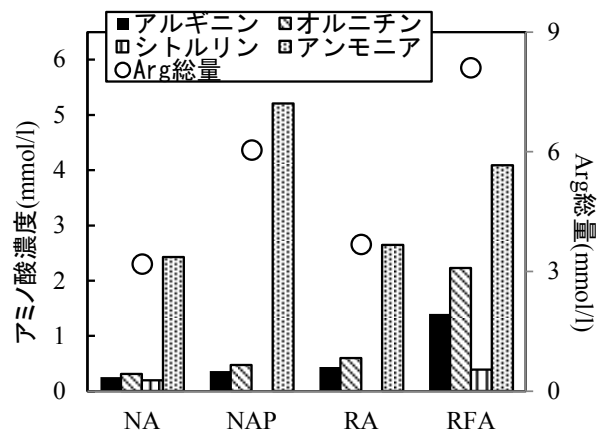


図-5 塩水浸透試験後の塩水中アミノ酸濃度

ラン反応が長期的に進行することで、緻密な細孔構造が形成されたものと考えられ、このような結果は、自然電位や分極抵抗の測定結果と整合している。

著者らの既往の検討結果⁴⁾では、アルギニンを添加することで、コンクリート抵抗が増大する傾向を示した。本研究では、図-4に見られるように、アルギニンの添加がコンクリート抵抗に与える影響は小さいようであるが、アルギニンの添加がコンクリートの細孔構造や電気的物性に与える影響については、今後さらに検討を進める必要がある。

4.2 塩水へのアミノ酸の溶出

4ヶ月間の塩水浸透試験に用いた塩水中にコンクリートから溶出した各種アミノ酸濃度の測定結果を図-5に示す。アルギニンはコンクリート中のような高アルカリ環境下で徐々に分解され、オルニチンやシトルリンといった他のアミノ酸やアンモニアに変化していく。図-5において Arg 総量として示した値は、検出されたオルニチン、シトルリンとアンモニアがすべてアルギニン由来であると仮定してアルギニン溶出量の総和を算出したも

のである。これによると、コンクリートからのアルギニンの溶出量は NA と RA は同程度であり、NAP が次に多く、RFA が最も溶出量が多いことがわかる。特に RFA は分解があまり進まず、アルギニンそのものの形で検出された量も多く、オルニチンやシトルリンといった多様な形態のアミノ酸もある程度の量で検出されている。

一般にコンクリート中の物質移動は、コンクリートの細孔構造の影響を強く受け、緻密な細孔構造の方が物質移動は抑制されるが、この場合は、 Cl^- の浸透を抑制し、鉄筋防食性能が高いと予想される RFA でコンクリートからのアミノ酸溶出が大きくなっている。このようなアミノ酸の溶出がコンクリート表面の藻類付着等に影響するため、溶出メカニズムの解明は重要な課題と言える。

5. 高圧抽出されたモルタル細孔溶液の化学分析

5.1 陰イオン濃度

あらかじめ 3.0 kg/m^3 の Cl^- を混入したモルタルから材齢 91 日で抽出した細孔溶液中の OH^- および Cl^- 濃度を 図-6 に、 Cl^-/OH^- モル比を 図-7 に示す。図-6 より、骨材種類によらず、アルギニンを添加した場合には細孔溶液中の OH^- 濃度が大きく上昇していることがわかる。このような OH^- 濃度上昇は、アルギニンの有する高い塩基性に起因するものと考えられる。またアルギニンを添加した配合は、無添加の配合よりも概ね細孔溶液中の Cl^- 濃度が低下している。その具体的なメカニズムは現時点では不明であるが、アルギニンのようなアミノ酸はエトリンガイトなどのセメント水和物結晶構造に影響することが指摘¹¹⁾されており、このようなアルギニンの影響を受けた水和物が Cl^- を取り込んで固定化した可能性が考えられる。さらに OH^- 濃度が大きく上昇したことから、電気的中立を保つために Cl^- の固定化が促進された可能性もある。

アルギニン添加方法に関しては、全量練混ぜ水に溶解させた NA より、粉体として添加した NAP の方が OH^- 濃度が高くなり、 Cl^- 濃度は大きく低下している。アルギニンを粉体として添加した場合には、一部のアルギニンが溶解するが結晶の状態に残るものもあり、この結晶状態のアルギニンが細孔溶液のイオン組成に大きく影響しているものと考えられる。

骨材種類に関しては、再生骨材を用いた R 配合は普通骨材の N 配合より OH^- 濃度と Cl^- 濃度が低下している。この原因として、炭酸化した再生骨材付着モルタル混入の影響が考えられる。ただし、アルギニンを添加した RA では R よりも OH^- 濃度が大きく上昇し、 Cl^- 濃度は低下している。さらに、フライアッシュを混和した RFA では、RA に比べてポゾラン反応の影響⁶⁾で OH^- 濃度が若干低下するが、 Cl^- 濃度がさらに低下している。これは、前

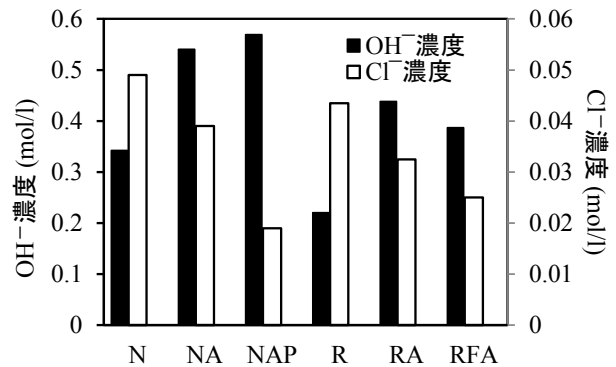


図-6 モルタル細孔溶液中の OH^- および Cl^- 濃度

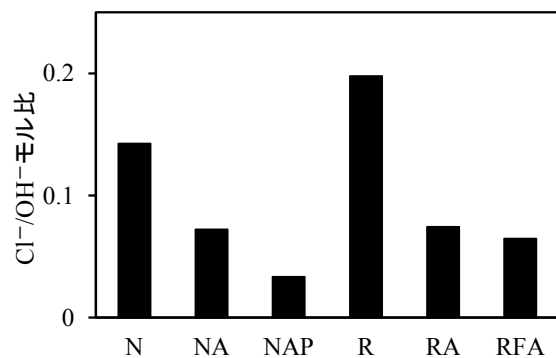


図-7 モルタル細孔溶液中の Cl^-/OH^- モル比

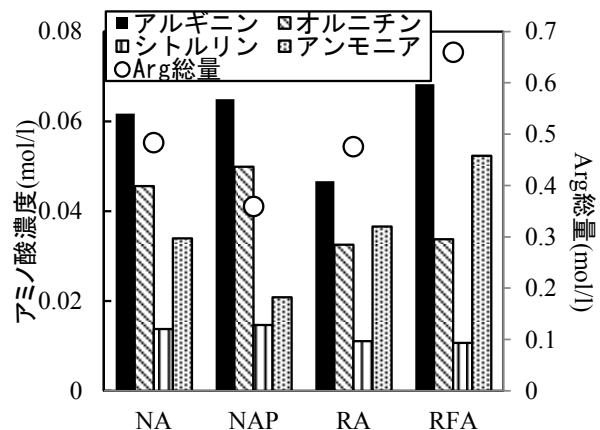


図-8 モルタル細孔溶液中のアミノ酸濃度

述したようにアルギニン添加の影響を受けながらフライアッシュのポゾラン反応が活性化され、生成した反応生成物に細孔溶液中の Cl^- が取り込まれたものと推定される。

Cl^-/OH^- モル比はコンクリート中の鉄筋腐食状態を表す指標であり、この値が大きいほど厳しい鉄筋腐食環境であることを表している。図-7によると、前述したようにアルギニンを添加した場合には、 OH^- 濃度が上昇し、 Cl^- 濃度が低下するため、 Cl^-/OH^- モル比は小さくなる。今回の結果より、コンクリート中の全 Cl^- 濃度が同じで

あっても、鉄筋の腐食状態はアルギニンの添加で緩和されるものと推定される。塩水浸透試験結果で確認された、アルギニン添加供試体の防食効果は、このような細孔溶液中のイオン組成の変化が一因となっているものと考えられる。また、フライアッシュを混和した場合、一般に細孔溶液中の OH^- 濃度が低下するため、 Cl^-/OH^- モル比は大きくなるが、本実験ではアルギニン添加の影響で、フライアッシュを混和しても Cl^-/OH^- モル比は低下している。このような点から、アルギニンはフライアッシュコンクリートの性能改善に有効な添加材であると言える。

5.2 アミノ酸濃度

モルタル細孔溶液中の各種アミノ酸濃度の測定結果を図-8 に示す。これによると、各配合モルタルの細孔溶液中アミノ酸濃度から算出される Arg 総量と比較すると、アルギニンを粉体で添加した NAP が最も少なく、次いで NA および RA で、最も Arg 総量が大きいのは RFA である。図-5 において塩水へのアミノ酸溶出量が最も大きかった配合も RFA であり、細孔溶液中に高濃度で存在したアミノ酸がコンクリート表面から溶出しているものと推定される。ただし、フライアッシュの混和がこのような細孔溶液中のアミノ酸濃度を上昇させるメカニズムについては、フライアッシュのポゾラン反応促進効果と併せて今後の検討課題としたい。

今後は、コンクリートからのアミノ酸の長期的溶出挙動と、鉄筋防食性および生物付着性との相関性についても検討を進めていく予定である。

6. まとめ

本研究結果をまとめると次のようになる。

- (1) 今回の配合条件では、普通コンクリートはアルギニンの添加によって圧縮強度が上昇し、再生コンクリートはアルギニンの添加によって圧縮強度が若干低下したが、さらに細骨材代替でフライアッシュを混和した場合 (RFA) に、顕著な強度上昇が見られた。
- (2) 塩水浸透試験の結果、アルギニンを添加したコンクリートは無添加の場合より高い塩害抵抗性を示したが、特に RFA は普通コンクリートより高い鉄筋防食性能が確認された。
- (3) モルタル細孔溶液の OH^- 濃度はアルギニンの添加によって上昇し、 Cl^- 濃度は低下した。このことがコンクリート中の鉄筋防食効果向上に寄与したものと推定された。
- (4) モルタル細孔溶液中のアミノ酸濃度は RFA が最も大きく、このような傾向は、塩水浸透試験における塩水へのアミノ酸溶出量の傾向とも一致した。塩水浸透試験は今後 1 年程度継続した後に、コンクリ

ート中の鉄筋腐食状況を確認する予定である。

謝辞：

本研究を遂行するに当たり、味の素(株)佐藤和博氏、および、多良千鶴氏のご協力をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 上月康則ほか：アミノ酸混和コンクリート上の遷移初期の付着生物相に関する考察，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol. 67，No. 2，pp. 1126-1130，2011
- 2) 上月康則ほか：アミノ酸混和コンクリート表面上での付着微細藻類の生長特性に関する研究，土木学会論文集 B3(海洋開発)，Vol. 26，pp. 111-116，2010
- 3) 庄司隆行：魚類化学感覚器のアミノ酸に対する応答，日本味と匂学会誌，Vol. 6，No. 2，pp. 169-178，1999
- 4) 上田隆雄，佐藤和博，飯干富広，宮川豊章：アルギニンを混入したコンクリートの塩害抵抗性能に関する研究，セメント・コンクリート論文集，Vol. 68，pp. 330-336，2015.3
- 5) 土木学会：コンクリートライブラリー142号 災害廃棄物の処分と有効利用ー東日本大震災の記録と教訓ー，2014.5
- 6) 松坂祐介，宮崎健治，横井克則，上田隆雄：低度処理骨材を用いた再生コンクリートの性能向上に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 33，No. 1，pp. 1565-1571，2011.7
- 7) 上田隆雄，田中慎吾，進藤義勝，七澤 章：フライアッシュの混和が塩害によるセメント硬化体中の鉄筋腐食環境に与える影響，土木学会論文集 E，Vol.66，No.3，pp.255-267，2010.7
- 8) 津留 豊ほか：水酸化カルシウム飽和水溶液中での鋼板の腐食に及ぼす溶液 pH，塩化物イオンおよびアミノ酸の影響，材料，Vol. 51，No. 11，pp. 1197-1202，2002.11
- 9) M. Ormellesse et. al.: A study of organic substances as inhibitors for chloride-induced corrosion in concrete, Corrosion Science, Vol. 51, pp. 2959-2968, 2009.
- 10) K. F. Khaled and S. R. Al-Mhyawi: Electrochemical and Density Function Theory Investigations of L-Arginine as Corrosion Inhibitor for Steel in 3.5% NaCl, Int. J. Electrochem. Sci., Vol. 8, pp. 4055-4072, 2013.
- 11) A.M. Codya, H. Leeb, R.D. Codya, P.G. Spry: The effects of chemical environment on the nucleation, growth, and stability of ettringite $[\text{Ca}_3\text{Al}(\text{OH})_6]_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 26\text{H}_2\text{O}$, Cement and Concrete Research, Vol. 34, pp. 869-881, 2004.