

# 論文 アミノ酸の添加がフライアッシュコンクリートの塩害抵抗性に与える影響

上田 隆雄\*1・河野 惇平\*1・飯干 富広\*2・江里口 玲\*3

**要旨:** アミノ酸の一種であるアルギニンを混入したコンクリートを消波ブロックなどに用いた場合、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、アルギニンの高い塩基性に着目し、フライアッシュコンクリートにアルギニンを添加した場合の基礎物性および鉄筋コンクリートとしての塩害抵抗性を検討した。この結果、アルギニンを添加することによって、フライアッシュコンクリートの長期強度増加率が大きくなるとともに、塩水浸漬を行った供試体中の鉄筋分極抵抗が増大する傾向を示した。

**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

天然に存在するアミノ酸の一種であるアルギニンは、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が、特に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<sup>1)</sup>。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、このアルギニンを添加したコンクリートが開発されている<sup>2)</sup>。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<sup>2)</sup>されており、今後、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防波堤や護岸などの港湾コンクリート構造物に利用することで、海洋生態系形成の観点から環境との調和が期待される。

一方で、従来、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アルギニン混入コンクリートを、ケーソン式護岸などの鉄筋コンクリート構造物にも適用することを想定し、著者らは塩害抵抗性に関する検討を進めてきた<sup>3), 4)</sup>。この結果、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、鉄筋コンクリートとしての適用可能性は高いことが分かった。

ただし、厳しい塩害環境での適用を想定した場合、塩化物イオン（以下  $\text{Cl}^-$  とする）の浸透・拡散に対する高い抵抗性が必要となる。さらに、アルギニンの有する高い塩基性がボゾラン反応の活性化に寄与する可能性もあることから、本研究では、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混和したコンクリートにアルギニンを添加した時の基礎物

性と塩害抵抗性を確認することとした。

研究手法としては、アルギニンを添加したフライアッシュコンクリートのフレッシュ性状と強度特性をアルギニンあるいはフライアッシュ無添加の場合と比較確認するとともに、鉄筋コンクリート（以下 RC とする）供試体を作製し、塩水浸漬と乾燥の繰返し試験による  $\text{Cl}^-$  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に与える影響と細孔溶液中のアミノ酸存在形態について考察を加えた。

## 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配合は普通セメントを用いたフライアッシュ無混和配合で、FAが付いた2配合は普通セメントを用いたフライアッシュ混和配合、BBが付いた2配合は高炉セメントB種を用いた配合とした。また、末尾の「0」はアルギニン無添加、「3」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ことを示す。

水セメント比は一定の55%とし、FA配合のコンクリートについては、細骨材体積の20%をフライアッシュで置換した。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  $\text{Cl}^-$  濃度が  $3.0 \text{ kg/m}^3$  となるように NaCl を練混ぜ水に溶解して混入した。

セメントは普通ポルトランドセメント（密度：3.16

\*1 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）

\*2 徳島大学工学部 建設工学科（非会員）

\*3 日建工学（株）技術部（正会員）

\*4 太平洋セメント（株）中央研究所第2研究部インフラ保全技術チームリーダー（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 <sup>3</sup> )								スランブ (cm)	空気量 (%)
			W	C	S	G	FA	Arg	WRA*	AEA**		
N0	55	48	170	309	842	942	—	—	2.47	0.00309	14.5	4.7
N3	55	48	170	309	824	942	—	9.27	0.93	0.00155	18.0	5.0
FA0	55	48	170	309	674	939	154	—	2.47	0.185	10.0	2.6
FA3	55	48	170	309	657	939	154	9.27	0.93	0.185	11.0	3.0
BB0	55	48	170	309	838	939	—	—	2.47	0.00309	17.5	3.5
BB3	55	48	170	309	821	939	—	9.27	0.93	0.00155	16.0	4.5

\*WRA : AE減水剤, \*\*AEA : AE剤

g/cm<sup>3</sup>, 比表面積 : 3290 cm<sup>2</sup>/g) または高炉セメント B 種 (密度 : 3.04 g/cm<sup>3</sup>, 比表面積 : 3830 cm<sup>2</sup>/g) を用い, 細骨材 S は山砂 (密度 : 2.56 g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 : 2.39%), 粗骨材 G は砂岩碎石 (密度 : 2.64 g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 : 0.91%, Gmax : 15 mm) を用いた。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/cm<sup>3</sup>, 比表面積 : 3240 cm<sup>2</sup>/g, 強熱減量 : 2.8%) 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。また, 混和剤を用いないモルタルのフロー値を図-1 に示す。過去の検討<sup>3)</sup>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おり, 今回の実験でも図-1 に示すように, セメント種類によらず, アルギニンの添加によってモルタルフロー値は大きくなった。このため, アルギニンを添加したコンクリート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。特に普通セメントを用いた N 配合では比較的大きなスランブを示しているが, 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 FA 配合については, 粉体量が他配合より多いため, 粘性が高く, スランブも小さくなった。また, FA 配合については, フライアッシュ用 AE 剤を用いたが, 空気連行量が低下した。

## 2.2 供試体の作製および養生

本研究で作製した RC 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 φ 13 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, φ 100×200 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<sup>-</sup>浸透深さ測定に供した。モルタル供試体は φ 50×100 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, 91 日間, または 120 日間の封緘養生を行った。塩水浸漬試験を行う RC 供試体お

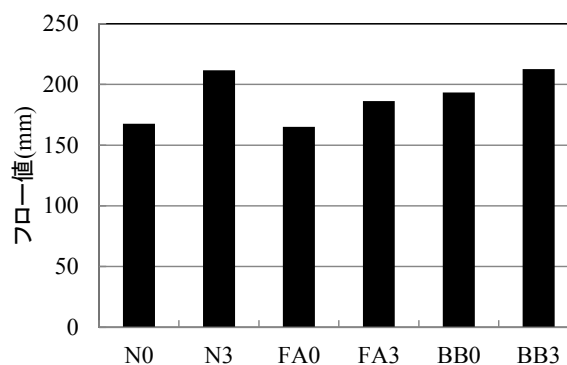


図-1 各配合モルタルのフロー値

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 3 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として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, 1200kN を上限とする載荷と除荷を繰返す高圧抽出法により 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<sup>-</sup>濃度をイオンクロマトグラフ法, OH<sup>-</sup>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。さらに, 別途作製したモルタル円柱供試体を用いて, アセトンによる水和停止処理後に, 水銀圧入法による細孔径分布測定と TG-DTA 法による熱分析を行った。細孔径分布測定用の試料はモ

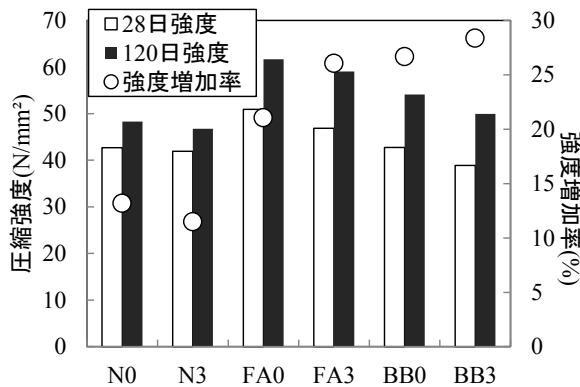


図-2 コンクリートの圧縮強度と強度増加率の関係

ルタル供試体を 5 mm 角程度まで粉碎して作製した。一方、熱分析はモルタルを 0.15 mm ふるいを全通するまで粉碎後、Ca(OH)<sub>2</sub> 含有率を測定した。熱分析の際の昇温速度は 10°C/min とし、室温から 500°C まで加熱した。熱分析と細孔径分布の測定は同一試料に対して 3 回行い、その平均値を測定値とした。

### 3. コンクリートの圧縮強度およびモルタル細孔径分布

各配合コンクリートの圧縮強度と強度増加率の関係を図-2 に示す。なお、強度増加率 V は下式で計算した。

$$V = (f_{120} - f_{28}) / f_{28} \times 100 \quad (\%) \quad (2)$$

ここに、 $f_{28}$ ,  $f_{120}$  : 材齢 28 日, 120 日の圧縮強度

既往の検討<sup>3)</sup>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-2 より、本実験でもアルギニンを添加することでセメント種類やフライアッシュ混和の有無に関わらず、数% 程度の強度低下が見られる。

一方、強度増加率に関しては、セメント種類やフライアッシュ混和の顕著な影響が見られる。普通セメントを用いた N 配合では、アルギニン添加によって、13.2% から 11.5% に低下しているが、FA 配合では、アルギニン添加によって 21.0% から 26.0% に上昇している。高炉セメントを用いた BB 配合も、26.7% から 28.4% に上昇したが、強度増加率の観点からは、アルギニンの効果が最も顕著に表れたのは FA 配合と言える。

著者らの過去の検討<sup>4)</sup>では、低度処理再生骨材を用いたフライアッシュコンクリートにアルギニンを添加することによって、37% と大きな強度増進が認められた。この場合は、再生コンクリートの強度が小さいため、強度増進率が大きかったが、本研究のように、普通骨材コンクリートの場合でも、塩基性の高いアルギニンの添加がフライアッシュや高炉スラグ微粉末の混和による長期強度増進に寄与することがわかる。

実際にアルギニンの添加がフライアッシュのポズラン反応等を与える影響を明確にするために測定した、材

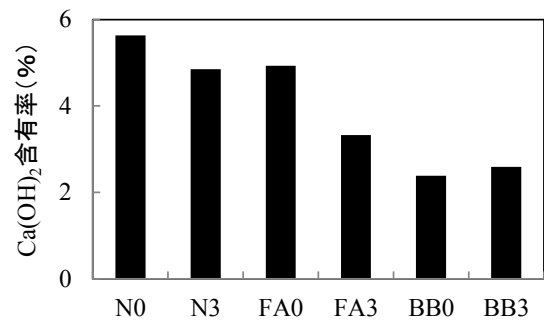


図-3 モルタルの Ca(OH)<sub>2</sub> 含有率 (材齢 91 日)

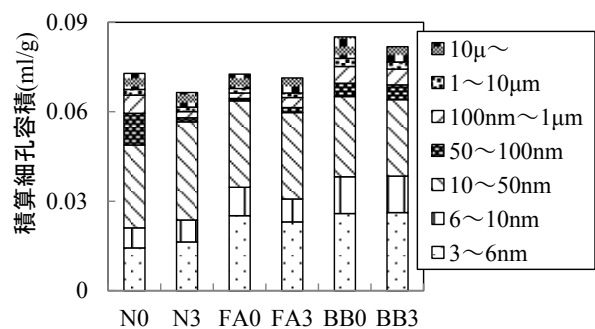


図-4 モルタルの細孔径分布 (材齢 91 日)

齢 91 日におけるモルタルの Ca(OH)<sub>2</sub> 含有率および細孔径分布をそれぞれ図-3 および図-4 に示す。図-3 によると、普通セメントを用いた N 配合および FA 配合の Ca(OH)<sub>2</sub> 含有率は、高炉セメントを用いた BB 配合よりも大きくなっている。これは、水和反応による Ca(OH)<sub>2</sub> 含有率増加に寄与する単位セメント量が大きいと考えられる。これに対して、FA 配合では、アルギニン無添加の FA0 に対して、FA3 の Ca(OH)<sub>2</sub> 含有率は顕著に低下している。この低下程度は、アルギニン無添加の N0 から FA0 への低下程度よりも大きいことから、アルギニンの添加によってフライアッシュのポズラン反応が促進・活性化されたものと推定される。ただし、図-4 を見ると、アルギニンの添加が FA 配合および BB 配合の細孔構造に与える影響は比較的小さく、各モルタルの積算細孔容積はアルギニンの添加によって小さくなっているが、ポズラン反応や潜在水硬性の促進によって、細孔径分布が大きく変化する状況は見られない。これに対して、N 配合では、アルギニンの添加によって 50~100 nm の細孔量が減少し、10~50 nm の細孔量が増加しているので、緻密化の方向の細孔径分布の変化が見られる。この原因は、現時点では不明であるが、アルギニンの添加が、セメントの水和反応やフライアッシュのポズラン反応に何らかの影響を与える可能性は高いことから、今後さらに詳細な検討を継続する予定である。

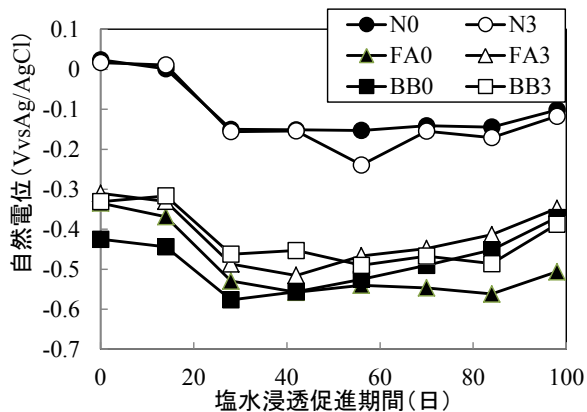


図-5 塩水浸漬と乾燥の繰返し試験期間中におけるコンクリート中の鉄筋自然電位経時変化

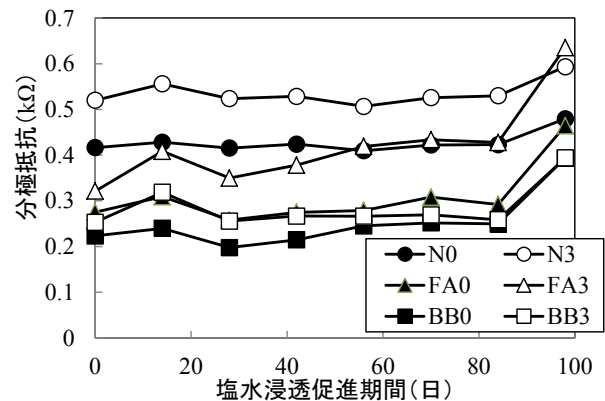


図-6 塩水浸漬と乾燥の繰返し試験期間中におけるコンクリート中の鉄筋分極抵抗経時変化

#### 4. 塩水浸漬と乾燥の繰返し試験

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-5～図-7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。

##### 4.1 自然電位

図-5によると、普通セメントを用いた N 配合は、塩水浸透促進期間が長くなるにしたがって、塩水浸漬開始後1か月間は自然電位が低下しているが、その後は電位の大きな変化は見られない。ASTM C876-91の判定基準で「不確定」と判定される  $-0.09 > E > -0.24$  V vs Ag/AgCl の範囲に入っており、経時的な電位低下も見られないことから、軽微な腐食状態を維持しているものと推定される。また、アルギニン添加の明確な影響も見られない。これに対して、FA 配合および BB 配合の供試体については、塩水浸漬開始直後から  $-0.3$  V を下回る卑な自然電位を示しており、ASTM 判定基準の腐食領域 ( $E < -0.24$  V vs Ag/AgCl) に入っている。しかし、塩水浸漬開始直後からコンクリート中の鉄筋が腐食を開始することは考えられないので、他の原因により鉄筋電位が卑な値を示しているものと考えられる。

著者らの過去の検討<sup>3)</sup>においても、高炉セメントを用いたコンクリートや、フライアッシュを混和したコンクリートの場合に、コンクリート中の鉄筋電位が養生終了後から著しく卑な値を示す場合があった。鉄筋電位は鉄筋表面の酸化被膜である不動態被膜の形成と密接に関わっており、不動態被膜が形成されることで電位が貴変すると考えられる。高炉セメントやフライアッシュを用いたコンクリートは、普通コンクリートと比べて空隙の少ない緻密なコンクリートであるために、養生終了直後の高含水状態から、乾燥に伴って酸素が鉄筋近傍に到達することが困難な状況となっているものと考えられる。

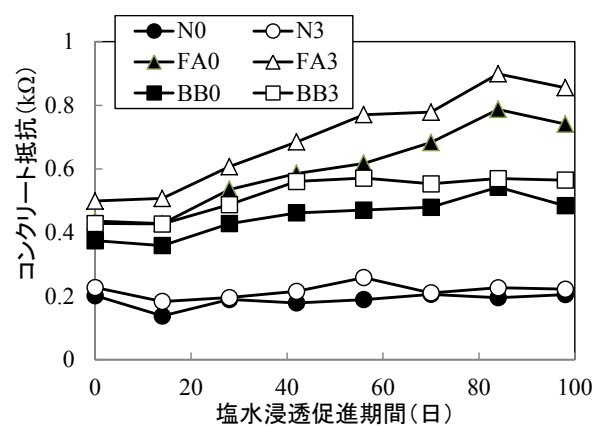


図-7 塩水浸漬と乾燥の繰返し試験期間中における供試体のコンクリート抵抗経時変化

これらの供試体の電位は徐々に貴変する傾向を示していることから、今後塩水浸漬と乾燥を繰り返しながら、電位がどこまで貴変するか、測定を続ける予定である。

##### 4.2 分極抵抗

図-6によると、分極抵抗の測定値には、配合やアルギニン添加の影響が強く表れている。全体的な傾向として、N 配合の分極抵抗が最も大きく、次いで FA 配合、BB 配合という順番となっている。分極抵抗は、その逆数が鉄筋腐食速度に比例することから、分極抵抗の定義からは BB 配合の鉄筋腐食が最も大きいことになる。ただし、前述したように、FA 配合と BB 配合は十分に不動態被膜が形成されていない状態であることを勘案すると、これらの配合では今後分極抵抗が増大するものと推定される。実際に図-6においても、3か月程度経過後に分極抵抗の顕著な増加が見られる。

また、特に FA 配合と BB 配合において、アルギニンの添加によって、分極抵抗の明確な増加が見られる。これまでの著者らの検討<sup>3), 4)</sup>においても、アルギニン添加による鉄筋防食効果が確認されており、ここでの分極抵

抗も同様の傾向を示した。そのメカニズムについては、不明な部分も多いが、アルギニンの持つ高い塩基性が腐食の進行を抑制していることや、鉄筋表面にアミノ酸が吸着されることで孔食の形成を抑制<sup>6,7)</sup>していることなどが考えられる。ただし、現時点では、塩水の浸透に伴う腐食状態は未だ軽微であると考えられることから、今後さらに長期的な検証が必要である。

### 4.3 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-7によると、コンクリート抵抗の値は混和材添加の影響を強く受けており、普通セメントを用いた N 配合と比較して、FA 配合と BB 配合は大きなコンクリート抵抗を示している。特に細骨材代替でフライアッシュを混和した FA 配合のコンクリート抵抗が最も大きく、また、経時的な増大も見られることから、フライアッシュのポゾ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る。

著者らの既往の検討結果<sup>3)</sup>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が、本研究でも、図-7に見られるように、FA 配合と BB 配合において、アルギニンの添加によってコンクリート抵抗が増大した。ただし、図-2 に示したように、アルギニンの添加によって、強度自体はやや低下しており、図-4 に示した細孔径分布からも、アルギニンの添加による細孔構造の顕著な変化は認められなかったため、アルギニンがフライアッシュや高炉スラグ微粉末の反応、および、コンクリートの物性に与える影響について、今後さらに検討を進める必要がある。

## 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  $3.0 \text{ kg/m}^3$  の  $\text{Cl}^-$  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  $\text{OH}^-$  および  $\text{Cl}^-$  濃度を図-8 に、 $\text{Cl}^-/\text{OH}^-$  モル比を図-9 に示す。図-8 より、配合種類によらず、アルギニンを添加した場合には細孔溶液中の  $\text{OH}^-$  濃度が大きく上昇していることがわかる。このような  $\text{OH}^-$  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細孔溶液中の  $\text{Cl}^-$  濃度が顕著に低下しており、特に FA 配合と BB 配合でその効果が大きくなっている。アルギニンのようなアミノ酸はエトリンサ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<sup>8)</sup>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  $\text{Cl}^-$  を取り込んで固定化した可能性が考えられる。さらに  $\text{OH}^-$  濃度上昇の刺激を受けて生成したポゾラン反応生成物や高炉セメント水和物

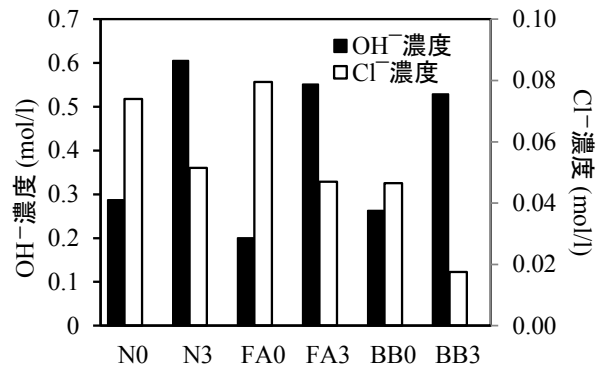


図-8 モルタル細孔溶液中の  $\text{OH}^-$  および  $\text{Cl}^-$  濃度

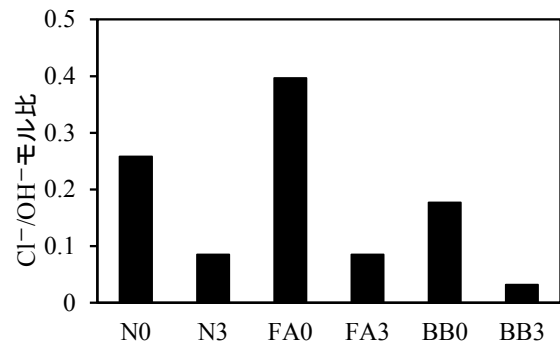


図-9 モルタル細孔溶液中の  $\text{Cl}^-/\text{OH}^-$  モル比

が  $\text{Cl}^-$  の固定化に寄与した可能性もある。

$\text{Cl}^-/\text{OH}^-$  モル比はコンクリート中の鉄筋腐食環境を表す指標であり、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-9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、 $\text{OH}^-$  濃度が上昇し、 $\text{Cl}^-$  濃度が低下するため、 $\text{Cl}^-/\text{OH}^-$  モル比は小さくなる。今回の結果より、コンクリート中の  $\text{Cl}^-$  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。塩水浸透促進試験結果で確認された、アルギニン添加供試体の分極抵抗増大効果は、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、ポゾラン反応の進行に伴ってコンクリート中の  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  が消費され、一般に細孔溶液中の  $\text{OH}^-$  濃度が低下するため、 $\text{Cl}^-/\text{OH}^-$  モル比は大きくなる<sup>10)</sup>。本研究でも N0 と比較して FA0 の  $\text{Cl}^-/\text{OH}^-$  モル比は増大しているが、アルギニンを添加した N3 と FA3 は共に N0 の 1/3 程度の小さい値を示している。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-10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

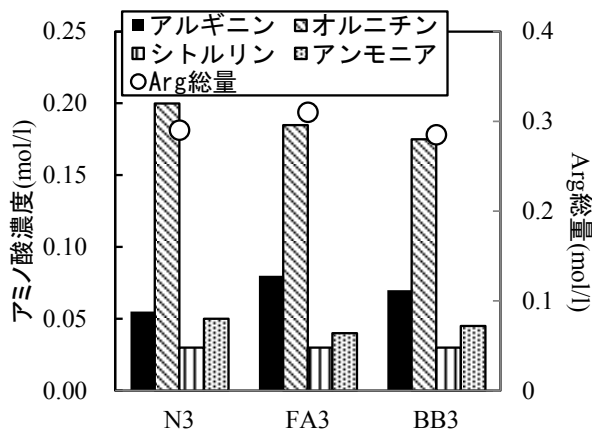


図-10 モルタル細孔溶液中のアミノ酸濃度

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-10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細孔溶液中に存在するアルギニン量の総和を算出したものである。3種類の配合条件で、細孔溶液中のアルギニン総量に大きな違いはないことから、添加したアルギニンの中でセメント水和物等に取り込まれた固定化アルギニンの割合は同程度であるものと推定される。ただし、細孔溶液中のアルギニンの存在形態には配合間で違いが見られ、N配合と比較してFA配合やBB配合では、アルギニンの分解が抑制され、オルニチン等の割合が低くなっている。これは、図-8に示したように、N3の細孔溶液中OH<sup>-</sup>濃度がFA3やBB3よりも高いことから、アルギニンの分解が進みやすかったものと考えられる。このようなアルギニンの存在形態がコンクリート表面からの溶出と藻類付着等に与える影響、および、コンクリート中の鉄筋防食性に与える影響の解明については今後の重要な課題と言える。

## 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、アルギニンの添加によって圧縮強度が若干低下したが、細骨材代替でフライアッシュを混和した場合には、アルギニンの添加によって材齢28日から120日への強度増加率が上昇した。
- (2) 今回の配合条件では、材齢91日のフライアッシュ混和モルタルのCa(OH)<sub>2</sub>含有率は、アルギニンの添加によって大きく減少したが、アルギニン添加の有無によるモルタル細孔径分布の変化は小さかった。
- (3) RC供試体の塩水浸漬と乾燥の繰り返し試験の結果、FA配合およびBB配合の供試体でアルギニンの添加による鉄筋分極抵抗およびコンクリート抵抗の増加が認められた。
- (4) モルタル細孔溶液のOH<sup>-</sup>濃度はアルギニン添加によ

り上昇し、Cl<sup>-</sup>濃度は低下した。その相乗効果によるCl<sup>-</sup>/OH<sup>-</sup>モル比抑制効果はFA配合が最も大きかった。  
 (5) FA配合およびBB配合では、モルタル細孔溶液中のアルギニンの分解進行が抑制される傾向を示した。  
 塩水浸透促進試験は今後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、四国電力(株)からフライアッシュのご提供をいただき、ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 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
- 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) 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
- 4) 萩原達朗，相原慶輔，上田隆雄，飯干富広：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.37, No.1, pp. 949-954, 2015.7
- 5) 上田隆雄，三浦健太，岩渕宏美，七澤章，塚越雅幸：混和材を用いたコンクリートおよびモルタル中の鉄筋発錆限界塩化物イオン濃度に関する研究，材料，Vol. 63, No. 10, pp. 716-721, 2014.10
- 6) 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
- 7) 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.
- 8) A.M. Codya, H. Leeb, R.D. Codya, P.G. Spry: The effects of chemical environment on the nucleation, growth, and stability of ettringite [Ca<sub>3</sub>Al(OH)<sub>6</sub>]<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> · 26H<sub>2</sub>O, Cement and Concrete Research, Vol. 34, pp. 869-881, 2004.
- 9) 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