

論文 藻場再生を目的にしたフライアッシュ高含有ポーラスコンクリートの研究開発

吉田 匠吾*1・吉田 晴信*2・参納 千夏男*3・三木 理*4

要旨: 本研究は、北陸地方で問題となっている磯焼けの防止対策として、地域産の骨材を用いたフライアッシュ高含有ポーラスコンクリートを開発し、その工学的諸性質を調べた。まず、耐久性に及ぼす骨材の影響を把握するために、3種類の環境下での暴露試験を実施した。同時に、藻類の生育状況を水槽実験にて確認した。その結果、砕石及びスラグ骨材はポーラスコンクリートとしての適用が可能であり、水槽実験においても藻類が順調に発生・生育することが明らかとなった。この結果に基づき、輪島市の名舟海岸にて安山岩砕石を使用したフライアッシュ高含有ポーラスコンクリートの漁礁ブロックを使用した実証実験を開始した。

キーワード: ポーラスコンクリート, 地産地消, フライアッシュ, アルカリシリカ反応, 藻場再生

1. はじめに

我が国の沿岸海域では、埋め立てや磯焼けにより広大な藻場が消失しており、水産資源が減少する大きな要因となっている。この「磯焼け」とは、沿岸域の藻類の生育場所（藻場）の減少により、魚類や貝類のえさや住処がなくなる現象である。北陸地方においても「磯焼け」が問題となっており、能登地方ではアワビやサザエなどの漁獲量が激減している。この問題を解決するためには、海洋生物の住処となる藻場を再生させなければならない。そのため、植物の生育や微生物の生息が可能となるポーラスコンクリートを用いることで、磯焼けの防止対策に効果のある藻類の生育を促進し、藻場を再生することを目的とした実験を開始した。ポーラスコンクリートを開発するにあたり、「地産地消」の観点から、北陸地方で未利用である、安山岩砕石やチャート砕石、製鋼スラグの活用を念頭に、それらの骨材とフライアッシュとの組み合わせを検討することにした。

一方、北陸地方では、原子力発電所の再稼働が不透明な現在、石炭火力発電による電力供給に依存せざるを得ない事情がある。この際、北陸地方の石炭火力発電所では、燃焼時に発生する石炭灰（石炭の約10%が発生）の増大が課題となっており、その有効利用の研究開発が急務となっている事情もあった¹⁾。

そこで本研究では、能登半島の「磯焼け」の防止対策として、藻場の再生を目的として大型ブロックの開発も行った。フライアッシュを多量に混合（セメントに対して40%を置換）したフライアッシュ高含有ポーラスコンクリートの工学的諸性質とその基盤材への藻類の発生・生育状況について実験的に検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料およびコンクリートの配合

ポーラスコンクリートには、普通ポルトランドセメント（T社製）と分級フライアッシュ（七尾大田火力発電所産、JIS II種灰、ブレン値：4610cm²/g）を使用した。使用骨材は、砕石骨材が2種類、スラグ骨材が2種類である。砕石骨材は石川県産の安山岩砕石（以下「砕石A」と略記）と福井県産のチャート砕石（以下「砕石B」と略記）、スラグ骨材は富山県産の低炭素フェロクロムスラグ（以下「スラグA」と略記）と愛知県産の電気炉酸化スラグ（以下「スラグB」と略記）である。

フライアッシュ高含有ポーラスコンクリートの配合を表1に示す。金沢大学で実施した研究成果²⁾を参考にして、目標圧縮強度を10N/mm²以上、目標空隙率を25%、フライアッシュ置換率を40%とした。なお、フライアッシュ40%置換は締固め性状の改善とASR防止の両面で有効であるとともに、生物への悪影響が懸念される水酸化カルシウム（灰汁の溶出）を大きく低減できることが確認されている。また、空気量およびスランプは管理を行わないものとした。コンクリート試験体（直径10cm、高さ20cmの円柱体）は型枠脱型後、前養生として温度20℃の水中浸漬養生（14日間）を実施した。その後、水中浸漬養生（温度20℃）、人工海水浸漬養生（温度20℃）、屋外暴露養生（福井市内）の3種類の環境条件下に暴露した。試験体の暴露期間は、前養生終了後を基準として、暴露0日、28日、56日、91日および1年とした。

2.2 測定項目

(1) 骨材のアルカリシリカ反応性試験

*1 清水建設（株）（正会員）

*2 （株）ホクコン 水とみどりグループ

*3 北陸電力（株）土木部 土木技術チーム 博（工）（正会員）

*4 金沢大学 理工研究域 サステナブルエネルギー研究センター教授 博（工）

表-1 フライアッシュ高含有ポーラスコンクリートの配合

	W/B(%)	単体量(kg/m ³)					密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)
		W	C* ¹	FA* ²	G	AD* ³		
砕石A	20	43	129	86	1548	3.5	2.53	1.99
砕石B	20	51	152	101	1529	4.1	2.60	0.73
スラグA	17	47	163	109	1521	3.7	2.64	3.17
スラグB	18	49	161	107	2121	4	3.67	0.84

- * 1 セメント：普通ポルトランドセメント（T社製）
- * 2 FA：七尾大田石炭火力発電所産（JIS II種灰）
- * 3 減水剤：ナフタレンスルホン酸系高性能減水剤

化学法（JIS A1145）、モルタルバー法（JIS A1146）および促進モルタルバー法（ASTM C1260）を実施した。また、実証実験にて使用する砕石Aに関しては、海水域でのASRによる影響を調べるために、フライアッシュを置換したモルタルのデンマーク法（飽和 NaCl 浸漬）による試験を実施した。

(2) ポーラスコンクリートの圧縮強度、静弾性係数および超音波パルス速度の測定

3種類の環境条件に暴露した円柱供試体の圧縮強度、静弾性係数および超音波パルス速度を測定した。圧縮強度の測定時には石膏によるキャッピングを実施し、コンプレッソメータを用いてひずみを測定した。超音波パルス速度の測定はパンジットを用い、キャッピングを施した供試体の両端中央部で測定を行った。測定回数は両端を入れ替えそれぞれ2回とした。

(3) DSCとXRDによる水和生成物の分析

ポーラスコンクリートと同一のセメントペースト供試体を作製し、示差走査熱量分析(DSC)とX線回折分析により、フライアッシュのポゾラン反応の程度と水和生成物の特徴を調べた。

(4) 藻類（ヤツマタモク）の生育状況の観察

屋内での水槽実験の外観と試験条件の詳細を表-2に示す。試験槽の容量との関係より、幼胚着生後の基盤材は寸法：100mm×200mm×30mmとした。基盤材は砕石Aを使用した平板コンクリート（普通ポルトランドセメント）とフライアッシュ高含有ポーラスコンクリート、スラグAを使用したフライアッシュ高含有ポーラスコンクリートの3種類とした。どちらも北陸地方で利用促進が課題となっている骨材である。

3. 実験結果および考察

3.1 骨材のアルカリシリカ反応性試験

ポーラスコンクリートのASRの事例はこれまで報告がほとんどない³⁾。また、ポーラスコンクリートの連続

表-2 試験室内の水槽実験での環境条件

水槽	50L水槽（基質4種を同一水槽）
海水	福井県福井市海域で採取、1μmフィルターでろ過後冷暗所に保管
水温	20℃以下（7/4～）、18℃以下（8/6～）に制御（夏場の成長不足を防ぐために水温を抑制）
光量子量	約70 μmol/m ² /s
明暗周期	12L:12D
栄養塩	PES* ¹ 0.1%（体積比）を海水に添加 1回/週、PESを0.1%追肥するとともに 1回/月、50Lの海水を全量交換
初期pH	8.15（制御無し）
曝気	フロアにて空気を供給、連続攪拌

*1 PES: Enriched Seawater by Provasoli 海藻の培養に広く用いられる

的な空隙構造はASRによる膨張を緩和するのに有利に働くことが考えられる。さらに、フライアッシュを使用することにより、反応性のある骨材（例えば、砕石Aや砕石B）をポーラスコンクリート用骨材として活用することも期待できる⁴⁾。

砕石Aは、能登半島の代表的な反応性骨材であり、火山ガラスとクリストバライトを含む。また、砕石Bは比較的大きな結晶質の石英粒の組織中にアルカリシリカ反応性を有する隠微晶質石英または玉髄（カルセドニー）の存在が確認されている⁵⁾⁶⁾。また、2種類のスラグ骨材はいずれもアルカリ濃度の減少量および溶解シリカ量が小さく、反応性を示すシリカ鉱物やガラス相をほとんど含んでいない。

4種類の使用骨材の化学法における試験結果を図-1に示す。試験の結果から砕石Aと砕石Bは「無害でない」と、スラグAとスラグBは「無害」と判定された。モルタルバー法および促進モルタルバー法の試験結果を

図-2および図-3示す。モルタルバー法ではすべての骨材で「無害」と判定された。しかし、促進モルタルバー法では砕石Aのみが「有害」と判定された。砕石Bはチャート質骨材であるために、促進モルタルバー法は適用できないとされている⁷⁾。砕石Aはアルカリシリカ反応性骨材とされているが、既往の研究⁶⁾において、フライアッシュの使用によりASRを大幅に抑制できるということが実証されている。砕石Aや砕石Bのようにアルカリシリカ反応性を有する骨材を使用するにあたり、フライアッシュ高含有ポーラスコンクリートとしての適用性はこれまでのフライアッシュの実績および研究結果より十分に可能であると判断された。

3.2 フライアッシュ高含有ポーラスコンクリートの暴露試験結果

フライアッシュ高含有ポーラスコンクリートの圧縮強度試験の結果を図-4に示す。ポーラスコンクリートは粗骨材の粒子間でのみ接着している組織構造のために、普通コンクリートのような高強度は確保できないとされている。しかし、実際に海洋環境で使用する際には、運搬や設置、潮流などの影響を考慮することが必要とされる。4種類の骨材を使用したフライアッシュ高含有ポーラスコンクリートは、いずれの暴露条件においても暴露初期および長期（材齢1年）における圧縮強度が目標強度である10N/mm²以上をほぼ満足していた。材齢初期において強度が低下するものや長期における強度増進が見られない供試体も見られた。原因として石膏キャッピングの端面の成形がうまくいかなかったことが考えられる。しかし、大型の人工漁礁ブロックとして適用するにあたり強度発現での問題はないと考えられた。

一方、フライアッシュ高含有ポーラスコンクリートは、上記に示す原因により強度増加があまり見られないものもあったが、いずれの暴露条件において概ね材齢の経過とともに圧縮強度が増加しており、セメントの水和反応およびポズラン反応の進行による強度増加が期待された。また、スラグ系骨材と砕石系骨材を比べると、スラグ系骨材の方が圧縮強度はかなり大きくなった。これはスラグ系骨材と砕石系骨材の表面組織の差であると考えられる。平滑な砕石系骨材に比べてスラグ系骨材は表面に凹凸を多く有するために、セメントペーストと骨材粒子との付着が良好となり強度が大きくなったものと推察された。また、スラグ系骨材を用いた配合ではW/Bが若干小さいことも影響していると考えられる。

フライアッシュ高含有ポーラスコンクリートのペースト試験体のDSC曲線を図-5に示す。水中浸漬養生ではエトリンサイト（110℃）および水酸化カルシウム（460℃）の吸熱量が大きくなっていることから、水和反応が順調に進行しているということが確認できた。一方、

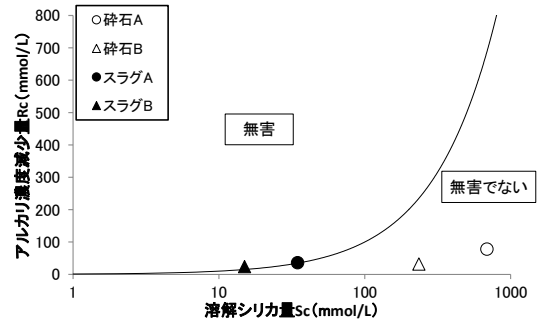


図-1 使用骨材の化学法(JIS A1145)の結果

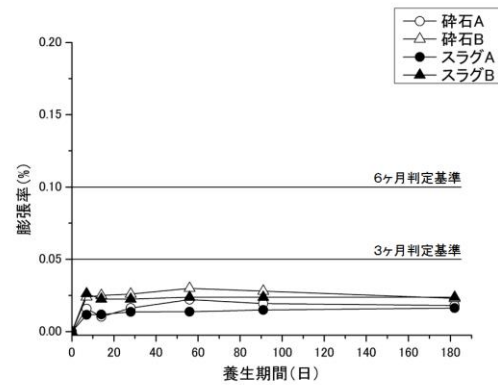


図-2 使用骨材のモルタルバー法 (JIS A1146) の結果

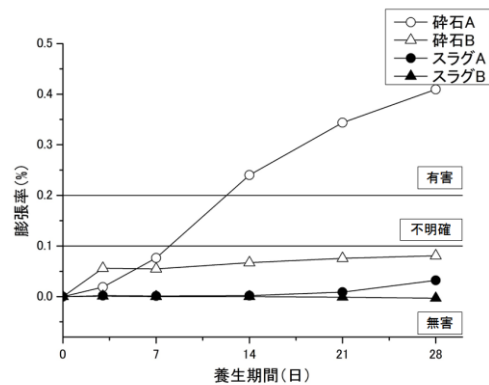


図-3 使用骨材の促進モルタルバー法 (ASTM C1260) の結果

人工海水浸漬養生では、エトリンサイトの生成とフリーデル氏塩(350℃)の生成を確認することができた。また、屋外暴露養生では、炭酸カルシウム(750℃)の生成も確認することができた。これらのDSCの分析結果は、圧縮強度の増加傾向とも一致していた。すなわち、水中浸漬養生における強度を基準とすると、人工海水浸漬養生は、フリーデル氏塩やエトリンサイトの生成による空隙充填効果⁷⁾により強度が若干増加したものと考えられる。屋

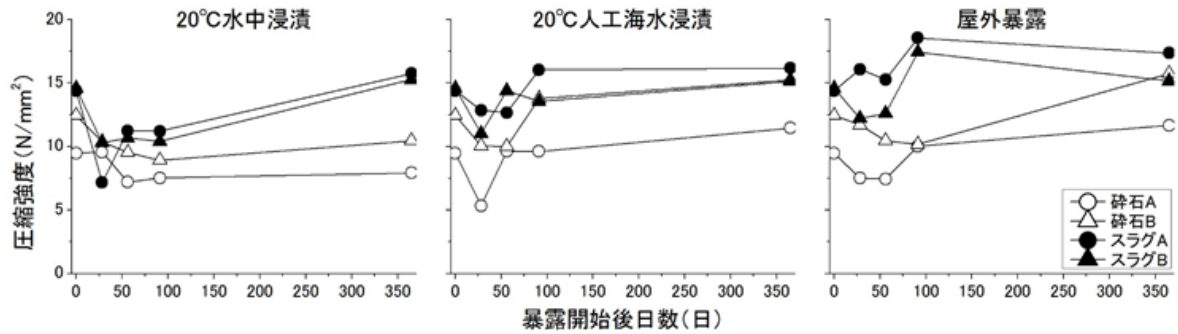


図-4 フライアッシュ高含有ポーラスコンクリートの圧縮強度と暴露期間との関係

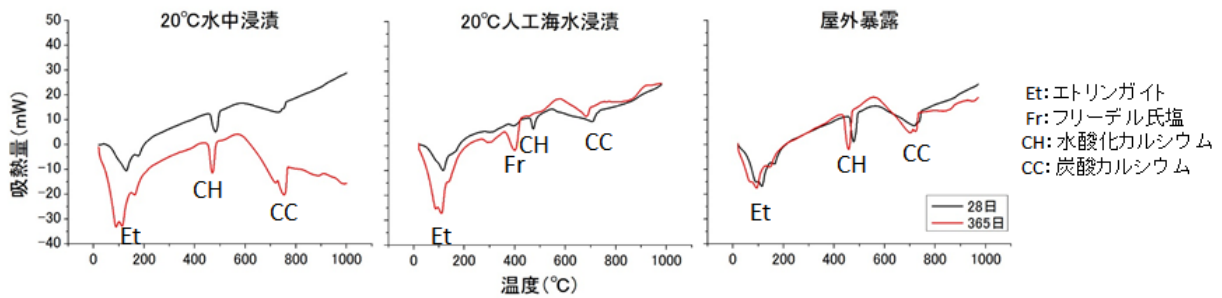


図-5 フライアッシュ高含有ポーラスコンクリート（セメントペースト試料）のDSC曲線

外暴露養生はもっとも強度発現が良好であり、水中浸漬養生に比べ全体的に2~3N/mm²強度が増加した。これは炭酸化による空隙充填効果が寄与していると考えられる⁸⁾。フライアッシュ高含有ポーラスコンクリートの圧縮強度と静弾性係数、超音波パルス伝播速度との関係に関して、図-6に示すように、圧縮強度と静弾性係数との間には明確な関係が認められなかった。これは、測定におけるデータのばらつきも含んでいるが、ポーラスコンクリートが連続空隙を有する組織構造のため通常のコンクリートと同様の圧縮強度と静弾性係数の関係は適用できないことが明らかとなった。測定時におけるデータのばらつきに関しては、コンプレッソメータの治具の装着面を石膏で装着できるように調整を行ったが、ポーラスコンクリート用の治具を用いることで抑えることができると考えられる。一方、フライアッシュ高含有ポーラスコンクリートの圧縮強度と超音波パルス伝播速度との間には図-7に示すように、両者には直線的な関係が認められた。測定時の位置を一致させることや測定点の数を増やすことなどに配慮することにより、ポーラスコンクリートの品質管理に超音波パルス伝播速度の測定が適用できると考えられる。

3.3 実験室内における藻類の着生・生育状況の観察結果

藻類の着生状況（実験開始後1ヶ月）の観察結果を写真-1に示す。写真-1に示すように、フライアッシュ高含有ポーラスコンクリートの方が平板コンクリートと

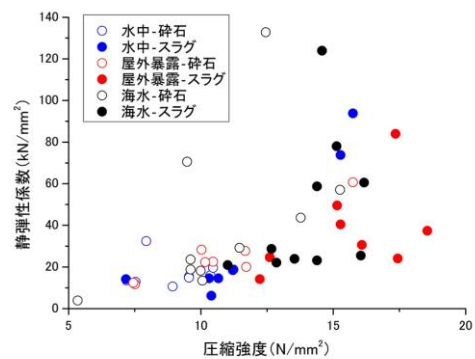


図-6 フライアッシュ高含有ポーラスコンクリートの圧縮強度と静弾性係数の関係

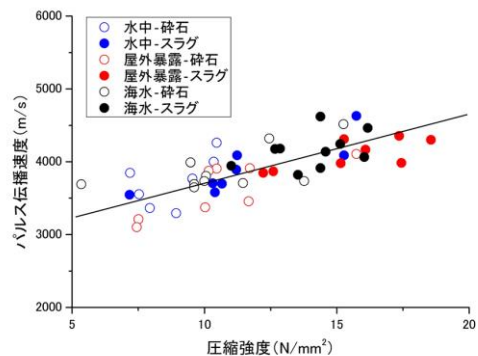
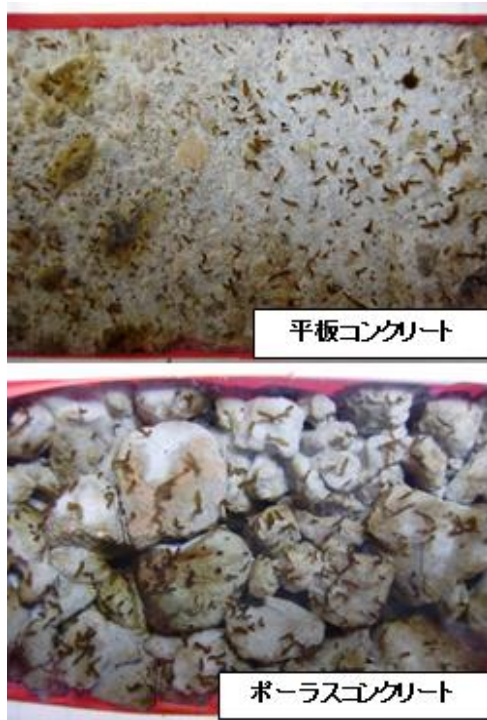


図-7 フライアッシュ高含有ポーラスコンクリートの圧縮強度と超音波パルス伝播速度の関係

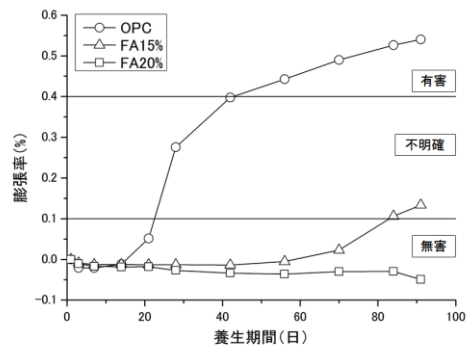


写真一 屋内試験開始後1ヶ月でのヤツマタモクの着生状況の比較



写真二 屋内試験開始後8ヶ月での生育状況の比較

比べて凹凸部により多くの藻類が着生しているのが観察できる。とくに、表面に凹凸形状のある基盤材であれば、実際の海洋下でも波浪や流水などでの着生が妨げられることが大きく低減できるものと期待できる。藻類の生育状況（実験開始後8ヶ月）の例を写真二に示す。生育状況の比較により、基盤材の形状（凹凸と空隙の有無）および骨材の種類によってヤツマタモクのその後の生育状況に大きな差が生じることが判明した。また、フライアッシュ高含有ポーラスコンクリートは、骨材の種類に関係なく着生状況が良好であった。しかし、その後の生



図一八 安山岩砕石（砕石A）のデンマーク法（飽和NaCl浸漬）の結果

育では砕石系骨材に比べてスラグ系骨材の方がヤツマタモクの生育が促進されていた。以上より、藻場再生の基盤材用骨材としての砕石AとスラグAはともに有効であり、とくにスラグ骨材は、含有鉄分の影響により藻類の生育促進の効果があつたものと推定される⁹⁾。

3.4 石川県輪島市名舟町での大型ブロックによる実証試験

大型漁礁ブロックの製作に際して、試験予定地が石川県輪島市名舟町であり、地域産材料の利用促進を考慮して、骨材は現地産の安山岩砕石（砕石A）を使用した。本骨材はASR対策のために使用が減少しており、新たな用途開発が求められていたものである。海水域でのASRを調べるために、本骨材に対してデンマーク法によりASR膨張に及ぼすフライアッシュの低減効果を調べた。デンマーク法の試験結果を図一八に示す。フライアッシュの置換率を20%以上とすることにより、海水中のような厳しい塩水環境下でもアルカリシリカ反応性の発生を完全に抑制することができた。

今回の実験計画は、コンクリートブロック2体（1mの立方体）にフライアッシュ高含有ポーラスコンクリートパネル（50cm×50cm×10cm）をそれぞれ12枚ずつ（上面に4枚、側面に4枚×2面）アンカーで固定し、カジメ母藻の仮根（根部）をコンクリートブロックに固定した。カジメの胞子は冬に散乱することから、平成25年11月にブロックをクレーンにて海底に設置した。コンクリートパネルの種類は、普通コンクリート平板、ポーラス普通コンクリート、フライアッシュ含有ポーラスコンクリート（フライアッシュ20%置換と40%置換）の4種類とした。コンクリートパネルの配合と圧縮強度を表一三に、ブロック全体の外観を写真三に示す。今後、定期的にかじめの生育状況を観察するとともに、アワビ、サザエの藻場としての適用性を調べていく予定である。

表-3 安山岩碎石（碎石A）を使用したフライアッシュ含有ポーラスコンクリートパネルの配合

	W/B(%)	FA置換率 (%)	単体量(kg/m ³)					圧縮強度* ⁴ (N/mm ²)
			W	C* ¹	FA* ²	G	AD* ³	
セメント単味	18	0	48	298	0	1556	4.86	12.5
FA20%置換	18	20	49	217	55	1556	4.43	15.3
FA40%置換	18	40	47	157	105	1556	4.27	13.1

- * 1 セメント：普通ポルトランドセメント（T社製） * 2 FA：七尾大田石炭火力発電所産（JIS II 種灰）
 * 3 減水剤：ナフタレンスルホン酸系高性能減水剤 * 4 水中浸漬養生，材齢 28 日

4. まとめ

藻場再生を目的としてポーラスコンクリートに地域産骨材とフライアッシュを「地産地消」の観点より使用した。今回の一連の試験によって得られた結果をまとめると以下のものである。

- (1) 現地産骨材の ASR 試験の結果からフライアッシュを置換したことで、アルカリシリカ反応の影響をほとんど受けず、問題なく使用できることを確認した。
- (2) ポーラスコンクリートの圧縮強度試験の結果より、スラグ系骨材は凹凸を有し、セメントペーストの付着が良好となることや、若干の水結合材比の差による圧縮強度の増加が期待できた。
- (3) 水槽実験の結果より、地域産の骨材を使用したポーラスコンクリートはいずれも藻場再生の基盤材としての適用性が実証された。
- (4) 一連の実験を踏まえた上で、実地試験として石川県輪島市名舟町での大型漁礁ブロックの設置が実施できた。

謝辞：本研究は、産官学連携による「北陸地方におけるフライアッシュのコンクリートへの有効利用促進検討委員会」での研究開発の一環として実施したものである。輪島市名舟海岸での実証研究にご協力いただいた、(株)新出組、輪島市漁業協同組合の関係者各位に深く謝意を表す。

参考文献

- 1) Kazuyuki Torii, Tohru Hashimoto, Tetsuji Kubo, Chikao Sannoh : The effective utilization of classified fine fly ashes for production of highly-durable concrete mixtures, SCMT3, CD-ROM 10pages, Kyoto, 2013.8
- 2) 鳥居和之：ポーラスコンクリートの長期暴露性状とアルカリ成分の溶出抑制効果に関する研究，金沢大学工学部土木材料研究室共同研究成果報告書，2000
- 3) 玉井元治，水口裕之，畑中重光，片平博，国枝稔，
- 4) 中澤隆雄，柳橋邦生：ポーラスコンクリートの設計・施工法の確立に関する研究委員会の活動，コンクリート工学年次論文集，Vol.25, No.1, pp, 13-22, 2003.7
- 5) 小林隆芳，長岡誠一，君島健之：ポーラスコンクリートのアルカリ骨材反応特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.26, No.1, pp, 1443-1448, 2004.7
- 6) 西澤彩，蟹谷真生，山戸博晃，鳥居和之：能登半島産安山岩砕石のフライアッシュによる ASR 抑制効果の検証，コンクリート工学年次論文集，Vol.34, No.1, pp, 934-939, 2012.7
- 7) 山戸博晃，尾花祥隆，鳥居和之：堆積岩系骨材の岩石・鉱物学的特徴とアルカリシリカ反応性，セメント・コンクリート論文集，No.62, pp.326-333, 2008.2
- 8) Conjeaud, M.L. : Mechanism of Sea Water Attack on Cement Mortar, ACI SP-65, pp, 39-61, 1980.8
- 9) 玉井元治：まぶしコンクリートの動弾性係数と凍結融解に対する抵抗性，セメント・コンクリート論文集，No.43, pp.376-381, 1989.2
- 10) 植木千佳，加藤敏郎，三木理：ノリの生育に対するスラグ系放肥材の効果実証実験，海洋理工学会誌，Vol.17, No.1, pp.49-55, 2011.10



写真-3 現地試験の各種コンクリートパネルとカジメの植え込み状況