

沖縄県における高耐久コンクリートへの取り組み

— 塩害・ASR・温度ひび割れ抑制・施工性改善 —

富山 潤*

沖縄県は、東西約 1 000 km、南北約 400 km に及ぶ広い海域に約 160 の島々が点在する島嶼（とうしょ）県である。また、日本唯一の亜熱帯海洋性気候に属し、個性豊かな自然環境や文化、歴史遺産など異国を感じさせる地域であり、年間を通して多くの観光客が訪れる。また、島嶼環境という地理的特性を土木構造物の観点から見ると、本島と離島あるいは離島と離島を結ぶ海上橋（離島架橋）が多く建設され、県民の生活を支え、また、観光名所として選定されている橋梁も少なくない。

沖縄県の地理的条件、自然環境は、構造物にとって、非常に厳しい環境作用として影響を与える。したがって、構造物の劣化速度は他府県に比較し著しく早い。また、小さな島々からなる島嶼県ということから、良質な建設材料が豊富とはいえ、コンクリート構造物の長寿命化に関する課題が多く、劣化現象との戦いが続いている。そのような背景のなか、2015 年 1 月に開通した橋長 3 540 m の離島架橋である伊良部大橋は、100 年耐久性を目指し、高耐久性設計が検討され、フライアッシュコンクリートが使用されている。そこで本解説では、沖縄県におけるコンクリート構造物の耐久性向上への取り組み、とくにフライアッシュコンクリートの利用実績、配合設計の思想について概説する。

キーワード：塩害、アルカリシリカ反応（ASR）、温度ひび割れ、耐久性、フライアッシュ

1. はじめに

沖縄県は、東西約 1 000 km、南北約 400 km に及ぶ広い海域に約 160 の島々が点在する島嶼県である。また、日本唯一の亜熱帯海洋性気候に属し、個性豊かな自然環境や文化、歴史遺産など異国を感じさせる地域であり、年間を通して多くの観光客が訪れる。島嶼環境という地理的特性を土木構造物の観点で見ると、本島と離島あるいは離島と離島を結ぶ海上橋（離島架橋）が多く建設され、県民の生活を支え、また、観光名所として選定されている橋梁も少なくない。

沖縄県の地理的条件、自然環境は、構造物にとって、非常に厳しい環境作用として影響を与える。したがって、構造物の劣化速度も他府県に比較し、早いことが知られている。また、小さな島々からなる島嶼県ということから、良質な建設材料が豊富とはいえない。

本解説では、沖縄県におけるコンクリート構造物の耐久性向上への取り組み、とくにフライアッシュコンクリートの利用実績、配合設計の思想について概説する。

2. 沖縄県のコンクリート構造物を取り巻く環境

本章では、沖縄県のコンクリート構造物を取り巻く環境について述べる。

2.1 島嶼環境・高温多湿

先に述べたように沖縄県は、約 160 の島々からなる島嶼県であり、すべての島々は周囲を海に囲まれている。

島嶼県であることから、本島と離島あるいは離島と離島を結ぶ海上橋（離島架橋）が多く建設されている。表 - 1 に平成 29 年 4 月現在の離島架橋名と図 - 1 に表 - 1 に示した離島架橋の位置図を示す¹⁾。

また、沖縄県は日本唯一の亜熱帯海洋性気候に属し、一年を通して高温多湿環境である。図 - 2 は、国内の代表的な 3 都市の 1981 年から 2010 年までの月平均気温と月平均相対湿度の関係である。なお、図中の数字は月を表す。同図で示した気温 20℃ 以上、湿度 65% 以上（図中着色領域）は一般に鋼材の腐食が早くなる環境といわれており、札幌・東京に比べて那覇（沖縄県）は長い期間がこの領域にあることから、高温多湿な厳しい鋼材腐食環境であることがこの図からも分かる。

2.2 海砂（細骨材）の利用

沖縄県は、地理的条件から良質な骨材の確保が困難であり、海砂が細骨材として使用されてきたが、この海砂の内塩分による塩害が大きな社会問題となっている。図 - 3 は、沖縄本島における生コン工場から採取した海砂の塩分（NaCl）含有量の試験結果である²⁾。この図は、細骨材の塩分含有量および規格を満足する工場の割合の推移を表わしている。このうち、土木学会の規格は、1974 年（昭和 49 年）発行の「コンクリート標準示方書」³⁾ に塩分に対する規定が設けられ、海砂に含まれる塩分の許容限度は海砂の絶乾重量に対し、NaCl 換算で 0.1% 以下となっている



* Jun TOMIYAMA

琉球大学工学部
工学科 准教授

県の塩害は、冬季季節風による飛来塩分の蓄積が主要因と考えられる。

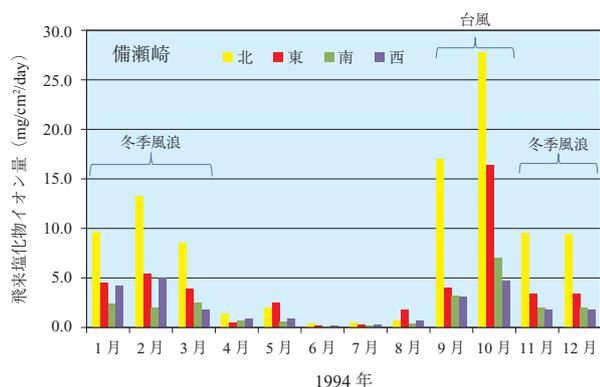


図 - 4 本島北部西海岸（備瀬海岸）の飛来塩分量

2.4 耐塩害を考慮した台湾花蓮産骨材（川砂利・川砂）の失敗

上記にも示したように、未洗浄の海砂に含まれる塩分により、コンクリート構造物が早期に塩害劣化を生じたことから、昭和 60 年頃から近隣国である台湾から川砂利、川砂をコンクリート用骨材として輸入し、当時は塩害の生じない骨材として、多くの重要構造物において使用された。しかし、台湾産骨材を使用した構造物で塩害とは異なる変状がコンクリート表面に表れ始め、詳細な調査研究の結果、遅延膨張性のアルカリシリカ反応（ASR）であると分かった。この ASR 劣化は、平成元年頃から顕在化し始め、鉄筋破断などの大きな被害も生じ始めたことから、平成 20 年ごろには台湾産骨材の使用を禁止した。

2.5 遅延膨張性骨材 ASR に起因した劣化の可能性

沖縄自動車道（NEXCO 西日本（旧日本道路公団））では、1975 年に開催された沖縄国際海洋博覧会に合せ、高速道路を整備した。開催年から分かるように塩化物総量規制以前である。このため、未洗浄の海砂が細骨材に用いられ、内在塩分による塩害劣化が多くみられた。一方で、ASR 劣化事例も多くみられ、平成 18 年度に調査委員会を立ち上げ ASR 劣化の詳細調査が行われた。その結果、ASR 劣化に起因した骨材のほとんどが上述した台湾花蓮産骨材によるものであったが、沖縄の海砂による ASR 劣化が新たに確認された。海砂の岩種構成や含有鉱物は、調査結果から台湾花蓮産骨材と類似しており、遅延膨張性を示す隠微晶質石英と微晶質石英が確認された⁶⁾。遅延膨張性骨材の問題点は、JIS の ASR 試験法（化学法、モルタルバー法）では安全と判定され、その危険性が検出できないことである。そこで、沖縄県では、沖縄総合事務局と琉球大学工学部の二者で包括的研究協定を利用し、さらに関連組織と連携し「沖縄県アルカリ骨材反応に関する研究プロジェクト（代表：伊良波繁雄 琉球大学名誉教授、当時は教授）」を設立し、遅延膨張性 ASR を対象とした研究活動を行い、沖縄県におけるアルカリシリカ反応の劣化事例、遅延膨張性 ASR に適した試験方法の検討を行っている⁷⁾。

3. フライアッシュコンクリートの有効活用

沖縄県では、2015 年 1 月に開通した橋長 3 450 m の伊良部大橋（離島架橋）において、塩害、ASR、温度ひび割れ抑制さらには施工性改善を目的にフライアッシュコンクリートが使用されている。伊良部大橋建設以降、多くの重要コンクリート構造物において、フライアッシュの使用が検討され、使用実績も増えつつある。ここでは、はじめに沖縄県におけるフライアッシュコンクリートの利用状況について紹介し、次に伊良部大橋の耐久性設計について述べる。

3.1 フライアッシュ事情

沖縄県では、3 箇所の石炭火力発電所が稼働している。そのうち 2 箇所は沖縄電力(株)管理、残り 1 箇所は電源開発(株)管理である。

沖縄電力(株)の平成 24 年度の石炭発生量は、約 10 万 2 千 t である。その処理として、セメント原料やリサイクル資材としての再資源化に 9.9 万 t、残りは土地造成材として公有水面の埋立てに利用されて、再資源化率は 100% となっている⁸⁾。しかし、将来的には埋立てが不可能になる可能性もあり、べつの再資源化を考える必要があると思われる。ところが、沖縄電力には、コンクリートの混和材などに使用できる JIS に定められた灰を採取する設備（分級設備）がなく、現状では、生産された灰をそのままコンクリートに利用することはできない。

一方で、電源開発(株)石川石炭火力発電所は、分級設備があり、コンクリート材料に使用可能な JIS II 種灰が生成され、ポストミックスとして伊良部大橋などで用いられている。また、琉球セメント(株)では、このフライアッシュを用いて B 種のフライアッシュセメントを生産している。

このほか、未燃カーボンを再燃焼した高品質のフライアッシュ（加熱改質フライアッシュ：JIS II 種灰）の製造を目的とした事業所が平成 24 年 1 月に県内に整備され、その高品質のフライアッシュを配合したフライアッシュコンクリートが県内公共土木・建築工事や民家住宅に使用された実績もある。これら 2 種類の JIS II 種灰いずれかを用いて、沖縄県生コンクリート共同組合加盟の 11 工場では、フライアッシュコンクリートの JIS 認証を受けており（2017 年 4 月現在）、今後も JIS 認証工場の拡大を予定している。

このように沖縄県では、フライアッシュをコンクリートに使用するための環境が整ってきているといえる。また、日本コンクリート工学会の特集では、「沖縄県におけるフライアッシュコンクリートの利用促進について」⁹⁾ が取り上げられており、そのなかで沖縄県内産出のフライアッシュの品質が比較的安定していることが報告されている。

3.2 フライアッシュコンクリートの採用実績および使用検討事例

沖縄県では、内閣府沖縄総合事務局管理 2 橋および沖縄県管理 9 橋、合計 11 橋梁に対してフライアッシュコンクリートの使用あるいは検討がなされている。

図 - 5 にそれらの構造物（橋梁）の位置図を示す¹⁰⁾。このように、沖縄県ではフライアッシュコンクリートの利

用実績が増えており、現在は後述する「沖縄県におけるフライアッシュコンクリートの配合及び利用指針（案）」（沖縄県土木建築部）の作成が進んでいることから、今後も利用促進が図られると考えられる。

以下に、11 橋の概要を示し、伊良部大橋については、本橋で考慮された耐久性確保について紹介する。

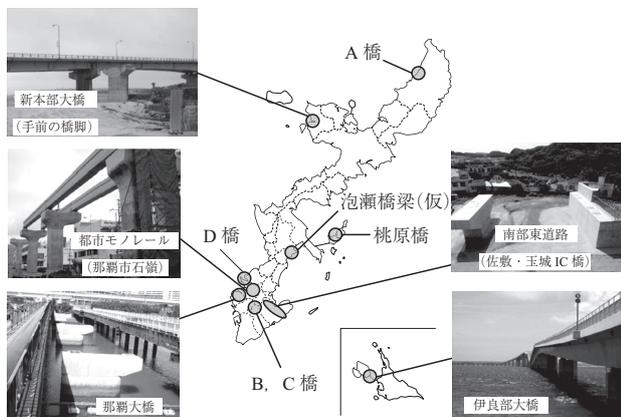


図 - 5 フライアッシュコンクリートが使用された、あるいは検討中の構造物の位置図

(1) 沖縄総合事務局の取組みと実績

沖縄総合事務局では、平成 26 年度に「コンクリート構造物の長寿命化に関する検討業務」として、コンクリート構造物の長寿命化に関する劣化因子やその対応方法の基礎資料を作成している。その資料では、コンクリート用混和材としての高炉スラグ、フライアッシュなどの適用性と使用範囲などについて検討を行っている。作成した基礎資料に基づき、混和材を使用した長寿命化に関する沖縄県版の活用指針（案）を作成している。なお、混和材として、高炉スラグとフライアッシュの性能に大差はないとしているが、沖縄県内生産拠点の有無や、県産品の有効利用の観点から現時点ではフライアッシュを優先的に検討し、有効利用の促進を図ることが望ましいとしている。

フライアッシュコンクリートの採用実績としては、佐手橋（国頭村、国道 58 号）、豊見城高架橋（豊見城市上田、国道 331 号）の 2 橋がある。また、上記以外に、現在建設中の港川高架橋下部工（下り P6、P7）に伊良部大橋下部工に使用された配合を参考としたセメント置換（以下、内割り）20%（65 kg/m³）と細骨材置換（以下、外割り）25 kg/m³）が併用された耐久性の高いフライアッシュコンクリートが使用されている。

(2) 沖縄県の取組みと実績

沖縄県は、将来の社会基盤設備の維持管理の負担軽減のために、今後建設される構造物の耐久性向上を図ることの重要性を認識し、フライアッシュコンクリートの利用促進を検討している。その一歩として、耐久性の求められる重要な道路構造物に対して、フライアッシュコンクリートの利用を積極的に検討するよう、平成 26 年 1 月に事務連絡（道路街路課・道路管理課名）により各出先機関に通知している。フライアッシュの利用実績が増えるなか、伊良部大橋

での検討内容や現在の状況などを踏まえ、平成 28 年度には、「沖縄県におけるフライアッシュコンクリートの配合及び利用指針（案）」の原案が作成され、平成 29 年度中に運用を開始する事を目標に委員会にて議論されている。

フライアッシュコンクリートの採用実績としては、伊良部大橋（宮古島市）、新本部大橋（本部町、国道 449 号）、桃原橋（うるま市、伊計平良川線）、那覇大橋（那覇市、3・2・4 号那覇市内環状線）、南部東道路（地域高規格道路）、県道 20 号線の橋梁（泡瀬連絡橋（仮称）、沖縄市、泡瀬工区）、浦添西原線の橋梁（西原町、翁長～嘉手刈工区）、渡久地橋（本部町、渡久地地域内）、沖縄都市モノレール軌道桁（延伸区間）の 9 橋である。

3.3 伊良部大橋のコンクリート配合

橋長 3 540 m の伊良部大橋（写真 - 1）の中央航路部以外はコンクリートセグメントが使用されている。現在沖縄県では、細骨材として粒度調整のため石灰岩砕砂と海砂の混合砂が用いられるのが一般的である。伊良部大橋の上部工（箱桁）には、遅延膨張性を示す台湾花蓮産骨材や新川沖産海砂による ASR のリスクを排除するために、粗骨材には本部産石灰岩砕石、細骨材には、本部産石灰岩砕砂のみを使用している。この場合、細骨材の粒度分布が悪くなり、ワーカビリティも低下するため、流動性改善の観点から、外割り 22 kg/m³ のフライアッシュを使用し、施工性を改善している。また、下部工には、塩分浸透抑制、ASR 抑制、温度ひび割れ抑制の目的で、設計基準強度 27 N/mm² 配合には、内割り 20%（65 kg/m³）、外割り 25 kg/m³ の計 90 kg/m³ のフライアッシュコンクリートを、設計基準強度 36 N/mm² 配合には、内割り 20%（80 kg/m³）、外割り 20 kg/m³ の計 100 kg/m³ のフライアッシュコンクリートを使用している。

表 - 2 に伊良部大橋のコンクリート部の耐久性向上に関する取り組み一覧を示す。このように伊良部大橋には、フライアッシュコンクリート以外の耐久性として、かぶり厚の確保、エポキシ樹脂塗装鉄筋、エポキシ樹脂被覆 PC 鋼より線、ポリエチレンシース、ポリエチレンシースカップラーが使用されて、おそらく国内でもっとも耐久性を考慮された橋梁であると考えられる。写真 - 2 に上部工の箱桁に使用されたエポキシ樹脂塗装鉄筋の配筋状況などを示す。

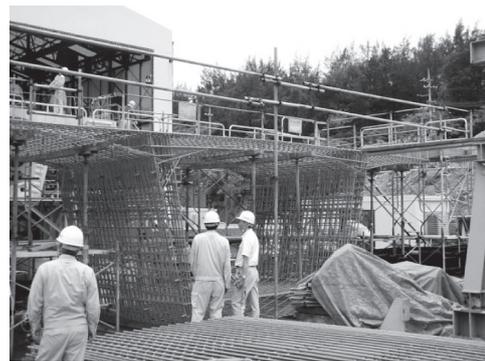
繰り返しになるが以下に上・下部工の配合について述べる。



写真 - 1 伊良部大橋

表 - 2 伊良部大橋コンクリート部の耐久性向上に関する取組み一覧

材料	鉄筋	エポキシ樹脂塗装鉄筋, ステンレス鉄筋 (地覆部), CFRP 筋 (下床版, 沓座モルタル配筋)
	PC 鋼より線	エポキシ樹脂被覆 PC 鋼より線
	シーす	ポリエチレンシーす ポリエチレンシーすカップラー
構造	かぶり	箱桁外部 (7 cm), 箱桁内部 (3.5 cm), 下部工 (9 cm)
	コンクリート配合	上部工: ASR 対策として, 細骨材は砕砂のみ使用 (外割り配合フライアッシュ使用) 下部工: フライアッシュコンクリート使用 (内割り配合 20%, 外割り配合)
	支承	Al (アルミニウム) -Mg (マグネシウム) 溶射による防食
	伸縮継手	橋梁に設置する個数を少なくするような設計 (32 径間連続)
施工	鉄筋	エポキシ樹脂塗装鉄筋は組立て後の損傷箇所をタッチアップ 曲げ機械はウレタン樹脂製ローラーを使用
	かぶり	セグメントは全個数においてかぶり確認を管理
	コンクリート配合	水セメント比の確認



(a) エポキシ樹脂塗装鉄筋の配筋状況



(b) 上部工セグメント



(c) セグメント架設状況

写真 - 2 建設途中の伊良部大橋

(1) 下部工コンクリート配合の考え方

伊良部大橋の下部工コンクリートは、文献¹¹⁾によると図 - 6 に示すように、種々の検討の上、塩害・ASR・温度ひび割れの対策をすべて満足するフライアッシュ内割り 20% 配合としており、初期強度発現を狙い施工性を確保できる範囲で外割りでもフライアッシュを配合している。ここでの ASR 対策は、前述した細骨材に海砂を用いているためである。ここで、伊良部大橋建設にあたっては、100 年耐久性を確保すべく、過去に ASR の発生事例のない骨材を使用することとし、宮古島で一般に用いられていた台湾花蓮産川砂利と同川砂を排除し、沖縄本島本部産石灰岩砕石および同砕砂に加え新川産海砂の使用を決められている。しかし、建設直前になって新川産海砂に軽微な ASR の発生事例が確認されたことから、その対策を検討し、前述のフライアッシュ内割り配合で海砂の ASR が抑制されることを確認したため、当初計画どおりのフライアッシュコンクリートが用いられた。

(2) 上部工コンクリート配合の考え方

上部工セグメントのコンクリート (設計強度 50 N/mm²) は、当初フライアッシュ配合の予定はなかったが、施工直前に海砂の ASR 発生事例が確認されたことから、海砂の使用を止め、砕砂 100% で施工することとなった。なお、上部工でも下部工と同様、フライアッシュの内割り配合で海砂の ASR を抑制することも検討されたが、セグメントの施工は 1 日 1 セグメントを基本としていたため、初期強度発現の出にくい内割りフライアッシュコンクリートを止め、ASR 抑制対策として細骨材を砕砂 100% とした。しかし、砕砂 100% では、ワーカビリティが悪く、配筋が密な上部工セグメントでは打設が困難であったため、フライ

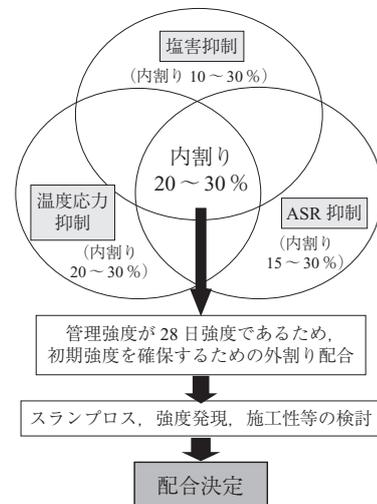


図 - 6 下部工コンクリート配合検討フロー

アッシュのボールベアリング効果を期待して外割りで細骨材の3% (22 kg/m³)を配合した。これにより、上部工50 N/mm²コンクリートでもワーカビリティが向上し、約1000セグメントの施工が改善された。

(3) フライアッシュコンクリートの配合パターン

図-7にフライアッシュコンクリートの配合パターンを示す。伊良部大橋建設以降、沖縄県の耐久性の必要なコンクリート構造物では、上部工では、施工性改善を主目的に「外割り配合」タイプが、下部工では、耐久性確保および施工性改善・初期強度確保を目的に「内割り配合+外割り配合」タイプが用いられる傾向にある。

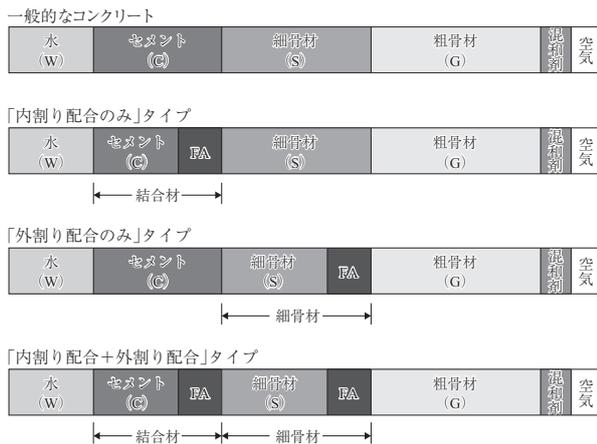


図-7 フライアッシュコンクリートの配合パターン

3.4 高耐久性プレテンション PC 桁の開発

研究段階ではあるが、大城武琉球大学名誉教授の研究グループでは、高耐久性プレテンション PC 桁の開発が行われている。その研究では、緊張材としての PC 鋼より線に、内部充填型エポキシ樹脂被覆 PC 鋼より線、全素線エポキシ樹脂塗装型 PC 鋼より線の使用の検討や、フライアッシュコンクリートの使用の検討が行われ、耐荷性能は従来桁と同等の性能があることが確認されており、実用可能性が見い出されている(たとえば12, 13, 14)。

4. おわりに

沖縄県では、伊良部大橋建設以降、多くの重要構造物で、耐久性や施工性を確保するためにフライアッシュコンクリートが利用されてきている。しかし、フライアッシュコンクリートを利用する際、骨材性状の違い、混和剤の違いなど、配合決定には配慮が必要である。また、打設直後や型枠脱型後の養生は普通コンクリートよりも重要である。以上のことから、前述したように沖縄県では、平成28年度に「沖縄県におけるフライアッシュコンクリートの配合及び利用指針(案)」を作成しており、平成29年度中にはその運用を開始する予定となっている。

これまで述べてきたコンクリート構造物の高耐久化に関

する取組みが、沖縄県民の暮らしを豊かにしていくものと考えている。

謝 辞

本解説をまとめるにあたり、沖縄県土木建築部 砂川勇二氏、アール・アンド・エー 風間洋氏、沖縄県建設技術センター 比嘉正也氏に資料の提供や有益なご意見をいただいた。また、大城武琉球大学名誉教授、伊良波繁雄名誉教授に学術的なご指導・ご意見をいただいた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 沖縄県土木建築部道路街路課：沖縄の道路2014, <http://www.pref.okinawa.jp/site/doboku/dorogai/kikaku/pamph-okinawadouro2015.html>
- 2) 財) 沖縄県建設技術センター：試験年報, 第5号, p.134, 1986
- 3) 財) 土木学会：コンクリート標準示方書(1974年度, 1986年度, 1991年度, 1996年度)
- 4) 阿波根庸夫, 神谷正哲, 大城芳樹, 仲村佳輝：海洋環境に位置するPC橋の劣化, コンクリート工学(テクニカルレポート), Vol.40, No.3, pp.36-42, 2002.3
- 5) 谷川伸, 山田義智, 大城武, 川村満紀：厳しい塩害環境下での鉄筋コンクリート構造物の耐久性に関する研究：日本建築学会構造系論文集, Vol.487, pp.11-19, 1996.9.
- 6) Katayama, T., Oshiro, T., Sarai, Y., Zaha, K., and Yamato, T.: Late-expansive ASR due to imported sand and local aggregates in Okinawa Island, southwestern Japan, Proceedings of the 13th International Conference on Alkali Aggregate Reaction in Concrete, Trondheim, Norway, pp.862-873, 2008
- 7) 富山潤, 大城武, 新城竜一, 金城和久：遅延膨張性を示す細骨材に起因したアルカリ骨材反応に関する基礎研究と抑制対策, 日本コンクリート工学会, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1049-1054, 2011.
- 8) 沖縄電力(株)：環境行動レポート2014, 2014.7
- 9) 砂川勇二：沖縄県におけるフライアッシュコンクリートの利用促進について, コンクリート工学, Vol.52, No.5, pp.454-458, 2014.5
- 10) 沖縄県建設技術センター主催 第8回「沖縄県におけるコンクリート耐久性」に関する研修会 資料
- 11) 風間洋, 渡久山直樹, 砂川勇二, 山田義智：伊良部大橋の主要部材に使用するコンクリート材料選定と配合, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.893-898, 2010
- 12) 崎原盛伍, 大城武, 富山潤, 平井圭：高耐久性プレテンションPC桁の耐荷性能に関する試験研究, 日本コンクリート工学会, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.2, pp.433-438, 2013
- 13) 宮野伸介, 大城武, 富山潤, 福地啓太：塗装PC鋼より線仕様のプレテンションPC桁の付着性能に関する研究, 土木学会第69回年次学術講演会, V-13, pp.25-26, 2014
- 14) 福地啓太, 宮野伸介, 富山潤：防食PC鋼材の付着性能とプレテンションPC桁のせん断耐力に関する研究, 公益社団法人プレストレスコンクリート工学会, 第23回シンポジウム, Vol.23, pp.605-610, 2014

【2017年8月31日受付】