

# 伊良部大橋の施工

## — 耐塩害性向上に対する事例と今後の展望 —

宜保 勝\*1・親川 賢一\*2・渡久山 直樹\*3

沖縄県は国内でもっとも塩害に対する環境が厳しい地域であり、インフラ整備において耐塩害性の向上は重要な課題となっている。本稿では新設構造物に対する高耐久化・長寿命化を図るための取組みに主眼を置き、伊良部島と宮古島を結ぶ伊良部大橋の施工における事例紹介と今後の展望について紹介する。

キーワード：離島架橋、塩害、ASR、フライアッシュコンクリート

### 1. はじめに

沖縄県は四方を海域に囲まれ年間を通して高温多湿な環境となっている。夏季は台風の常襲地帯となっており高い波浪と強風により内陸部まで塩分濃度の高い状態になる。

また冬季には北風が強い状況が断続的に続くため、一年を通し沿岸、内陸を問わずつねに飛来塩分を受け、塩害に悩まされている状況にある。

こういった状況のなか、沖縄県ではとくに沿岸部の橋梁においてコンクリート橋の架替えを必要とする程度の塩害が確認され、それまでメンテナンスフリーと考えられてき

たコンクリート橋においても適切なメンテナンスと地域にあった施工時の塩害対策が重要であることが認識された(写真-1)。

沖縄県における土木構造物の長寿命化のための重要な課題は塩害対策・アルカリ骨材反応(以下「ASR」)である。

本稿では宮古島と伊良部島を結ぶ海上架橋「伊良部大橋」において100年耐久性を目指して実施している塩害・ASR対策を紹介をする。

### 2. 伊良部大橋の概要

#### 2.1 建設経緯

沖縄本島から南西に約290kmの位置にある宮古島のさらに離島である伊良部島は、医療、教育、福祉等の面において不利・不便を余儀なくされており、過疎化の進行や産



写真-1 旧野補大橋（現在は架替え済）



図-1 伊良部大橋位置図



\*1 Masaru GIBO

沖縄県宮古土木事務所伊良部大橋建設現場事務所 主幹



\*2 Kenichi OYAKAWA

沖縄県宮古土木事務所伊良部大橋建設現場事務所 主任技師



\*3 Naoki TOKUYAMA

沖縄県宮古土木事務所伊良部大橋建設現場事務所 主任

業の衰退等といった離島特有の諸問題を抱えている。

このような離島苦の解消を図るため昭和 49 年に当時の伊良部村長から沖縄開発庁（当時）への架橋要請活動を皮切りに継続的に要請活動が展開され、平成 18 年 3 月に起工式を行い本格着工したところである。

伊良部大橋の建設は、平成 17 年に伊良部町を含む 5 市町村の合併により誕生した宮古島市の一体化と効率的な行政を支援するとともに、伊良部島の医療・教育・福祉の向上や架橋による物流コストの低減、市場拡大による地域経済の活性化等、宮古圏域の地域振興を図ることを目的とし建設を行っている（図 - 1）。

## 2.2 工事概要

本橋の諸元を以下に示す。

路線名：一般県道平良下地島空港線

事業年度：平成 13～24 年度

道路規格：第 3 種 3 級（V=60 km），A 活荷重

延長：6 500 m（本橋部 3 540 m，海中道路部 600 m，取付部橋梁 170 m，取付道路 2 190 m）

幅員：橋梁部 8.5 m

上部工形式：PC 連続箱桁橋（一般部），鋼床版箱桁橋（主航路部），中空床版（取付部橋梁）

下部工形式：RC 橋脚（一般部），T 型橋脚（主航路部）逆 T 型橋台

基礎形式：直接基礎（2 基），鋼管杭基礎（30 基），鋼矢板基礎（18 基）（図 - 2）

## 2.3 耐塩害性の向上のために

沖縄県ではとくに海域や沿岸部において塩害の被害が多く、とくにコンクリート橋梁においては、塩害の発生状況の確認が困難であるうえに PC 橋においては補修・補強に大きな費用がかかること、また場合によっては架替えを余儀なくされるケースなどさまざまな問題が出てきた。さらに離島架橋においては、海上橋であること、島民の唯一の交通手段となっており代替路がないことなどから、現在の技術で考えられる塩害対策を設計施工において十分に検討し高耐久化・長寿命化に取り組むこととした。

対策については、維持管理をできるかぎり低減することを目的として「ミニマムメンテナンス PC 橋の開発に関する共同研究報告書」（平成 13 年 3 月）を参考とし、平成 14

年の道路橋示方書（以下「道示」）を基に対策を行った。

下記に伊良部大橋における主な塩害対策の一覧を示す。

表 - 1 塩害対策一覧表

材 料	
鉄筋	エポキシ樹脂塗装鉄筋、ステンレス鉄筋（地覆部）CFCC（下床版、沓座モルタル内配筋）
PC 鋼より線	エポキシ樹脂被覆鋼より線
シーす	ポリエチレンシーす
構 造	
かぶり	箱桁外部（7.0 cm）箱桁内部（3.5 cm）下部工（9.0 cm）
コンクリートの配合	上部工 ASR 対策として砕砂のみを使用（※ 1）水セメント比の低減（配合表参照）フライアッシュコンクリートの使用（下部工）
支承	AIMg 溶射による防食
伸縮継手	橋梁に設置する個数が少なくなるような設計（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監視
コンクリートの配合	水セメント比の確認

※ 1：ASR 発生に伴いコンクリートにひび割れが生じ、鉄筋の腐食も同時進行することからひび割れ抑制効果が期待でき、塩害対策としても有効であると考えている。

## 3. 上部工（一般部設計）の特徴

上部工一般部の設計についての特徴は、まず塩害に強い断面形状として側面が飛来塩分の付着面積の少ない箱桁断面とした（図 - 3）。

また、大きな特徴は上部工を 32 径間および 14 径間連続橋としている点にある。連続径間橋とする長所としては

- ① 下部工に与える地震力の軽減
- ② 伸縮装置の減少によるコスト縮減と維持管理費の低減
- ③ 端部以外に伸縮継手がないことによる走行時の快適性の向上と交通振動、騒音の低減
- ④ 継目がないことによりセグメント内部への漏水の影響が低減

また短所としては

- ① クリープ・乾燥収縮による桁の伸縮量の増大
- ② 必要支承体積の増加

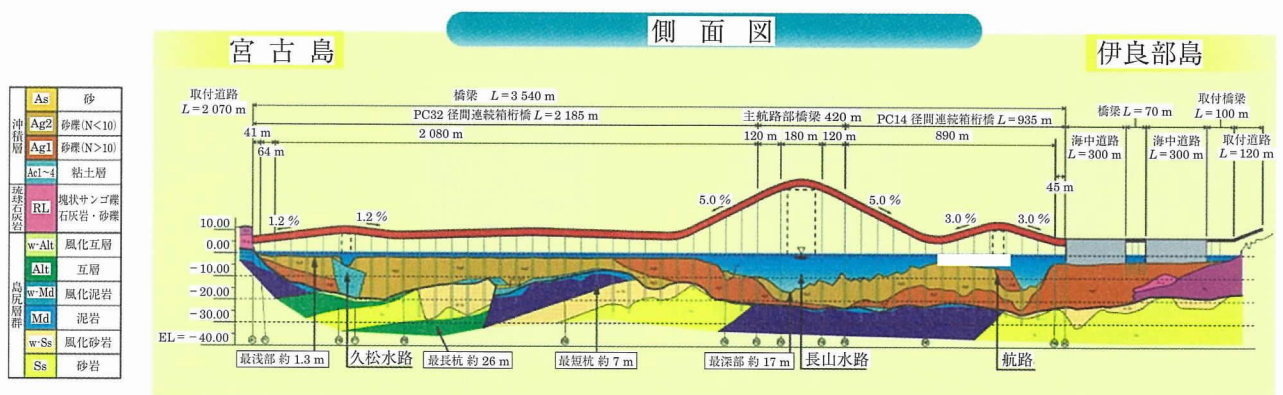


図 - 2 橋梁側面図

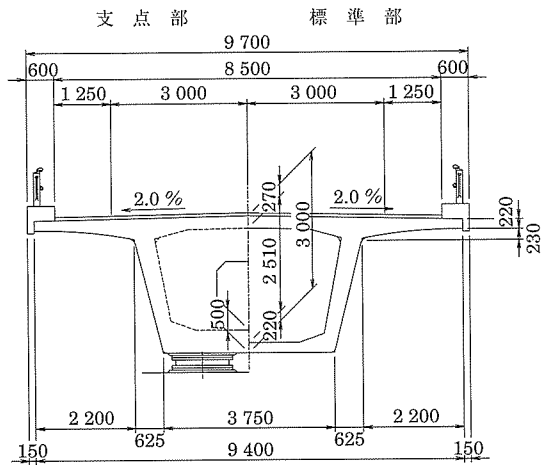


図 - 3 一般部断面図

③ 支承の最大変位は温度変化が支配的

④ 温度変化による桁内軸力の増加

以上の長・短所を考慮し検討を重ねた結果、維持管理の合理化によるLCCの低減を考慮し多径間連続橋とした。ただし支承は完成後、温度変化のみをせん断変形で対応するポストスライド方式を採用した。

ポストスライド方式の採用により最大約40cmの移動が算出された。ここで下部工側の支承鋼板により変位量への対応をとる場合下部工の断面が大きくなり不経済となることから上部工側の支承鋼板をスライドすることにより対応することとしている(図-4、5、写真-2)。

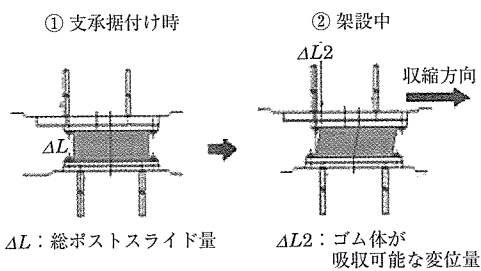


図 - 4 ポストスライド手順①

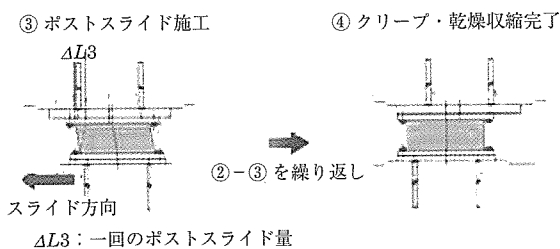


図 - 5 ポストスライド手順②

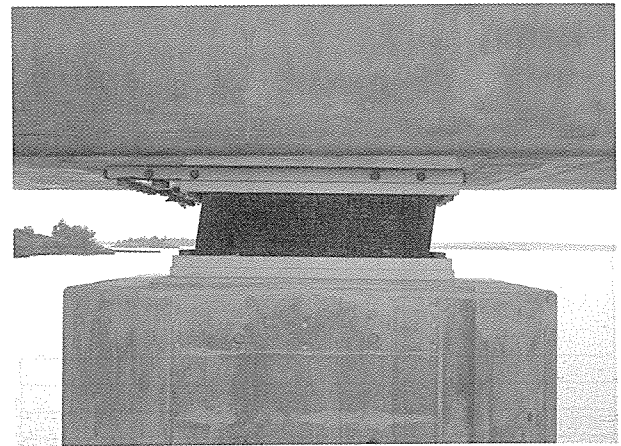


写真 - 2 変形しているゴム沓の状況

## 4. 使用材料

伊良部大橋では100年耐久性を目指し塩害に強い材料を使用している。PC上部工においては一度塩害等における損傷を受けると、作用しているプレストレス力の変動が生じることから断面変化を伴う修復が難しく、建設当初において2重、3重の塩害対策を施すことで将来のLCC低減につながると思われた。本橋においては平成14年に改定された道示に基づいたかぶり(上部工7cm、下部工9cm)を確保するとともに、以下の材料を使用することで塩害対策としている。

### 4.1 塩害に強い材料

#### 1) ポリエチレンシース

沖縄県内の老朽橋においては、塩分浸透量の多さから従来の鋼製シースでは、塩害による腐食、劣化に伴いシース内部のPC鋼より線まで塩分が浸透し腐食している状況となっていた。

そのためシースを腐食に強いポリエチレン製品を採用している(写真-3)。



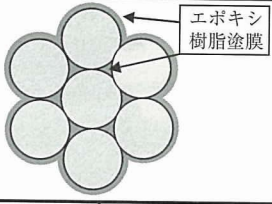
写真 - 3 ポリエチレンシースの配置状況

#### 2) エポキシ樹脂被覆PC鋼より線

緊張用の鋼材は上部工の構造上もっとも重要な部材となる

ためエポキシ樹脂で皮膜された鋼材を使用するとともにシー  
ース内へのグラウトを注入することで塩分浸透による PC  
鋼材より線への影響を軽減している（表 - 2）。

表 - 2 PC ケーブルの仕様

断面図		
	種別	内ケーブル
基本外径(mm)	13.7	16.4
被覆材	エポキシ樹脂	
膜厚(μm)	400~1 200	400~1 200
0.2%永久伸びに対する荷重(kN以上)	156	222
伸び(%以上)	3.5	3.5
単体積重量(g/m)	813	1 155

3) 下床版のひび割れ対策

沖縄県においては、伊良部大橋と同様な PC 箱桁橋を現  
在までに数橋建設している。その下床版の一部において橋  
軸方向に原因不明のひび割れが生じている。同様の構造形  
式である離島架橋を調査した結果、ひび割れ幅は、発生が  
確認された時点からほとんど変化がない調査結果を得て  
いるが、塩害が厳しい沖縄において原因の特定と対策は重  
要な課題になっている。

そのため、現在建設中の伊良部大橋においては、FEM 解  
析（図 - 6）を行い、引張応力の厳しい箇所においてひび割  
れを防止するための対策を検討した。

【下床版下面側】

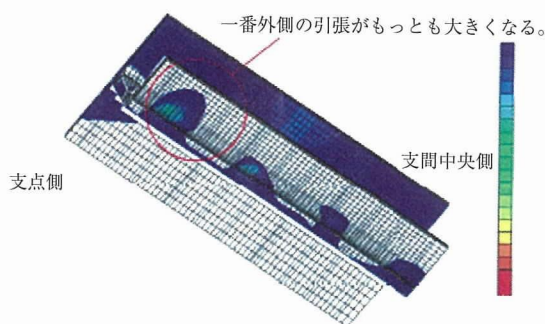


図 - 6 FEM 解析結果

FEM 解析の結果などから下床版においてひび割れの発生  
は外ケーブルの定着部周辺の応力集中に起因している可能  
性に着目し、ひび割れ防止材（CFCC：炭素繊維複合材ケ  
ーブル）を PC ケーブルの定着突起があるセグメントの下  
床版のかぶり内に配置している。

また、合わせて施工時の応力の状態を確認するため、セ  
グメントの下床版にひずみ計を設置しセグメントの運搬か  
ら外ケーブル緊張まで応力状態を調査している。

現在のところ、外ケーブル緊張後の課程において目視に  
よる調査の結果ひび割れ等は発生していない。

4) エポキシ樹脂塗装鉄筋、ステンレス鉄筋

上部工のセグメントの鉄筋は、エポキシ樹脂塗装鉄筋を  
使用している。なお、エポキシ被覆は紫外線に弱く長期間  
紫外線下にあると塗装部の劣化により、その機能は低下す  
る。そのため上部工セグメント架設後地覆コンクリート打  
設までの間、露出する地覆鉄筋についてはステンレス鉄筋  
を使用することで対応している（写真 - 4）。

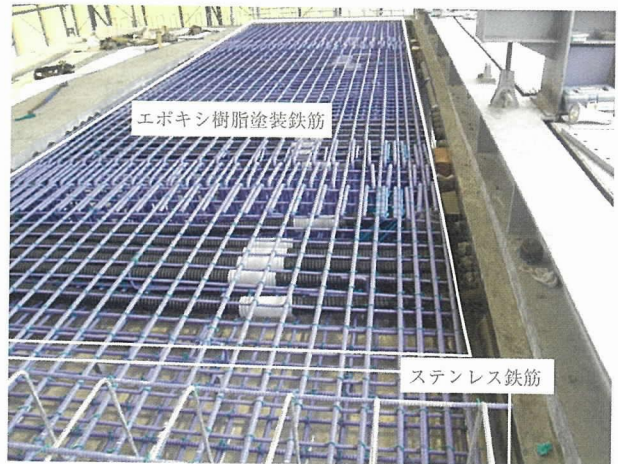


写真 - 4 配筋状況

5) 沓座モルタル部のかぶり不足対策

沓座補強筋については、沓座モルタル部においてかぶり  
が不足する。そのため腐食せず鉄筋より引張強度のある  
CFCC を設置することで鉄筋の代替とした（図 - 7）。

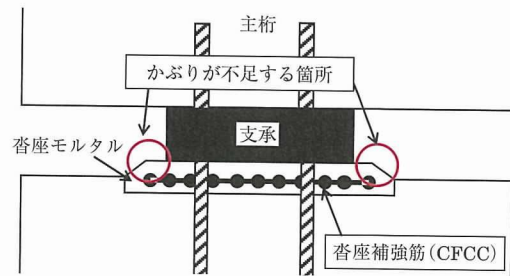


図 - 7 支承部詳細図

6) コンクリート

従来、宮古島で使用されている細骨材は海砂と砕砂の混  
合で配合されていた。しかし海砂に ASR 発生の可能性が確  
認されたため上部工コンクリートについては砕砂のみの配  
合としたが、夏季の高温時においてスランプロスが大きく  
配筋のピッチの密なセグメントの打設において、施工性に  
大きな影響となった。

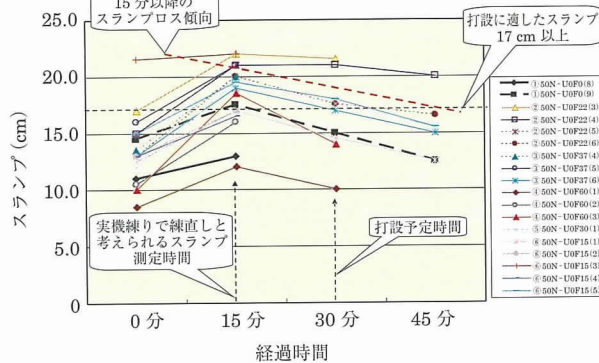
そのため、スランプロスの低減と施工性の向上を目的と  
して、フライアッシュを細骨材と一部置き換え配合試験を  
行った。フライアッシュが球形であることなどから適量の  
添加は施工性の向上が図られることが文献等で報告され  
ており、同効果を期待し配合を行った。その結果スランプロ

表 - 3 上部工コンクリートの配合表

上部工コンクリート配合表 (50-20-18)

W/(C + F1) (%)	sF2/a (%)	単体量 (kg/m <sup>3</sup> )						AE 減水剤 (高性能) (C + F1) %	AE 助剤 (C + F1) %
		水	セメント	普通膨張剤	フライアッシュ	細骨材	粗骨材		
		W	C	H-EX	外割り	砕砂	2005		
33.5	42.9	156	446	20	22	723	1 004	0.85	-

表 - 4 スランプ確認試験結果



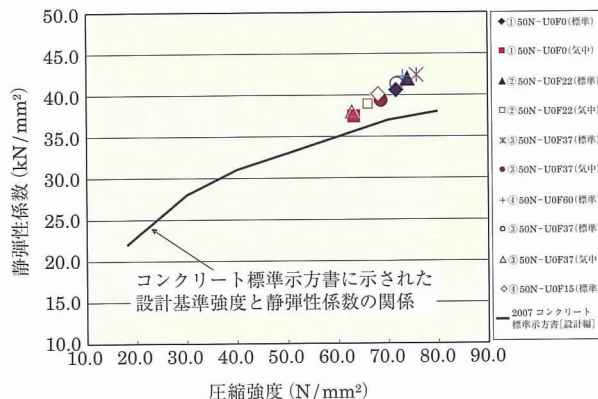
スの少ないコンクリートとなり施工性が向上した (表 - 4)。

また 2007 年に改定されたコンクリート標準示方書では、スランプの規定が現場到着に合わせられるよう変更になったことから、スランプの規定を 18.0 ± 2.5 cm とし打設を行っている。

また、PC 上部工の設計はコンクリートの圧縮強度およびヤング係数等の基本性状を考慮し設計されている。そのためフライアッシュを配合したコンクリート供試体において静弾性係数の試験を行いその性状がフライアッシュ添加前と比較し問題がないか確認した。

その結果フライアッシュを添加しないコンクリートと同等の結果が得られ問題がないことが分かった (表 - 5)。これは、今回配合したフライアッシュの量が細骨材の置換えであったこと、添加量が m<sup>3</sup> あたり 22 kg と少なかったことなどが要因であったと思われる。

表 - 5 静弾性係数確認試験結果



### 6) 支承部鋼板への AIMg 溶射

支承部の鋼板の腐食防止のため塗装には AIMg プラズマ溶射を採用し塗替等補修回数低減による LCC の低減を図っている。

AIMg 溶射はアルミマグネシウム合金などをアークやプラズマで溶解し、鋼材表面に吹き付け防食層を形成する工法であり、鋼板部の劣化対策としている (写真 - 5 参照)。



写真 - 5 AIMg 溶射実施状況

## 5. 下部工における塩害対策

下部工の塩害対策を行うにあたり、宮古島内の同様な環境下にある橋梁を調査したところ建設後約 10 年で塩分の浸透濃度は鉄筋付近で鋼材の腐食発生限界濃度である 1.2 kg/m<sup>3</sup> 以上であることが判明した (表 - 6)。

また、アルカリ総量規制以降に建設された宮古島管内の橋梁において JIS 規格品である骨材を使用したにもかかわらず ASR が発生していることが確認された。

以上のことから、伊良部大橋では道示の塩害対策を適用し、かぶり 9 cm を確保したうえでエポキシ樹脂塗装鉄筋を

表 - 6 塩分量測定試験結果

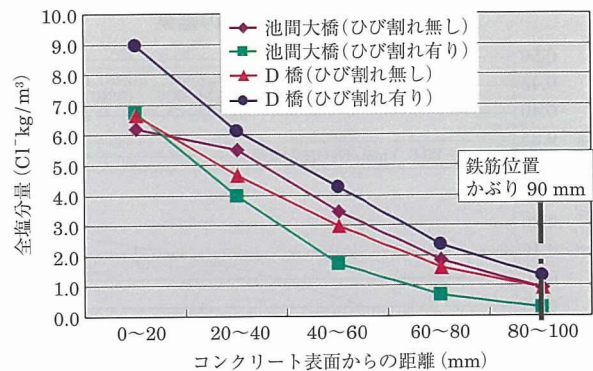


表-7 下部工コンクリートの配合表

下部工コンクリート配合表 (27-12-40)

W/(C+F1) (%)	sF2/a (%)	単位置 (kg/m <sup>3</sup> )								AE 減水剤 (高機能) (C+F1) %	AE 助剤 (C+F1) %	
		水	セメント		フライアッシュ		細骨材		粗骨材			
			W	C	F1	F2	S1	S2	2005			4020
49.5	38.6	156	250	65	25	399	273	687	458	1.575	—	

- ① F = F1 + F2
- ② S = S1 - S2

使用すること、あわせてコンクリートの塩害、ASR 対策などコンクリートの耐久性向上を図ることとした。

コンクリート耐久性向上の検討にあたっては、平成 17 年に「伊良部大橋コンクリート耐久性検討委員会」(委員長：大城武琉球大学名誉教授)による議論を重ね、対策として以下の事項が提言された。

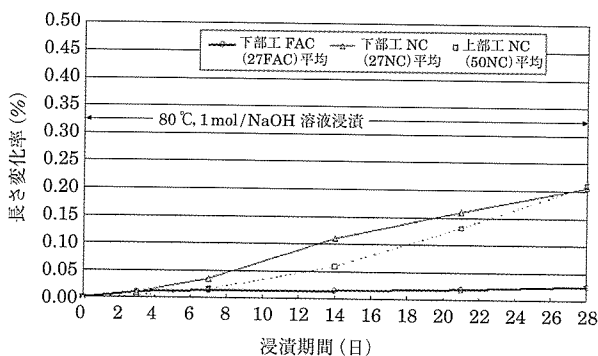
- ① 骨材は、過去にアルカリ骨材反応による劣化事例のない骨材を使用することが望ましい。
- ② 耐久性を向上させる観点から、フライアッシュの下部工での使用は推奨されるが、コスト面等の課題を十分考慮することが必要である。

委員会からの提言を受けて下部工に使用するコンクリートの耐久性向上対策として、ASR の劣化事例のない骨材を使用すること、またフライアッシュコンクリートを使用し、耐海水性 (塩害)、アルカリ骨材反応の抑制を図ることとした。沖縄県内においてダム以外の重要構造物に使用された事例はなく施工性、価格、流通性などの課題があったが宮古、伊良部島内の生コン工場等の協力もあり前述の課題は解決することとなった。また施工性については、数種類の配合について試験練り、打設試験を行い良好な結果が得られた配合の内から経済性等を考慮し、セメントとの置換えを 65 kg (20%)、細骨材との置換えを 25 kg として下部工の配合とした (表-7)。

また下部工に使用した骨材を岩種判定した結果、ASR 発生の疑いが生じたためコンクリートコアにより JCI-DD2 法、NaCl 浸漬法 (デンマーク法に準拠)、NaOH 浸漬法 (カナダ法に準拠) ASR の促進膨張試験を行った。

その結果もっとも厳しい促進手法である NaOH 浸漬法においても、フライアッシュを添加したコンクリートは膨張が抑制された (表-8)。

表-8 NaOH 浸漬法の結果



現在、下部工においてフライアッシュコンクリートによる施工を行っているが、何ら問題もなく通常のコンクリートと同様な施工性が確保されている

## 6. 施工における塩害対策

### 6.1 架設工法

伊良部大橋の上部工はセグメント製作がショートラインマッチキャスト工法によるプレキャスト製作、架設が架設桁によるバランスドカンチレバー工法で施工を行っている (写真-6)。



写真-6 架設桁

### 6.2 セグメント製作

製作架設工法の最大の利点は、セグメントを屋根付ヤードで製作することで天候に左右されず品質のよいセグメントを製作できる点にある (写真-7)。

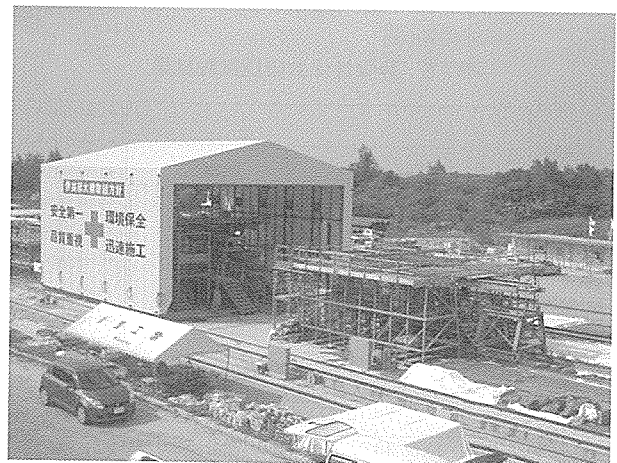


写真-7 セグメント製作ヤード

### 6.3 かぶり

塩害に対して大きな効果があると期待できるかぶりについては、セグメント外側を鉄筋が配筋された後に入念に立会いし確認している（写真-8）。



写真-8 鉄筋かぶり確認状況

### 6.4 単位水量の管理

コンクリート打設時においては、打設前の現場試験において塩化物量、空気量、スランプと合わせて、水セメント比をエアメーター法において確認することで品質確保に努めている（写真-9）。

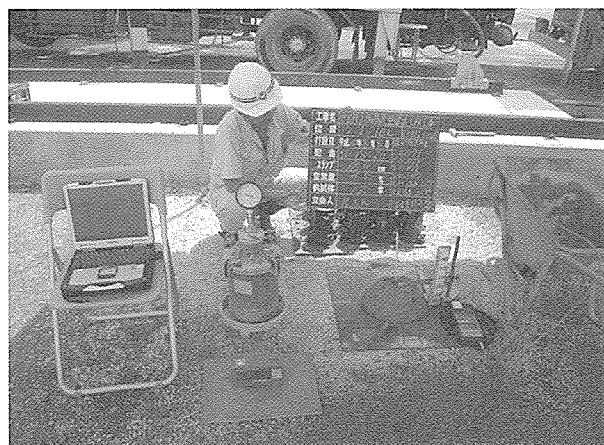


写真-9 コンクリート現場試験状況

### 6.5 径間中央連結部

径間中央の連結部は張出しの最終セグメントを架設後に現場打ちで施工している。そのため、塩害など構造上の弱点部となりやすく、コンクリート打設継目とシースの継目が重なることから最終セグメントのシースを連結用のねじ式シースを配置することで継目が弱点とならないようにした（写真-10）。



写真-10 連結部シーソ配置状況

## 7. 現場見学会

沖縄県と伊良部大橋工事連絡協議会は「土木の日」にちなみ一般市民約500名を対象とした現場見学会を開催した。普段は入ることのできない工事現場で担当者より説明を受けた参加者の多くは、初めて目にする架設桁の大きさや橋を造っている現場を見学し歓声を上げていた。

昨今公共事業に対する投資やその必要性が厳しく問われる状況のなか、架橋現場を見学することによって事業の必要性はもとより、社会基盤を支える高度な技術力や公共事業に対する理解が少しでも得られればと考える。

またセグメント製作ヤードでは、未来の技術者（子供達）によるコンクリート打設体験や測量実習、セグメントへの寄書きなどを行い地域住民との交流を行った。

### 7.1 上部工架設方法の説明

上部工の架設桁の直近で行われた説明においては、市民の多くがその大きさに驚きの声を上げていた（写真-11）。



写真-11 架設工法説明状況

### 7.2 セグメントに寄書き

子供達から大人まで思い思いに寄書きを行った。このセグメントはそのまま架設される（写真-12）。



写真 - 12 セグメントへの寄書き状況

### 7.3 コンクリート打設体験

生コンの製作から打設、敷き均しまで子供達自身で行い、土間コンとして打設後は記念に手形や寄書きを行った(写真 - 13)。

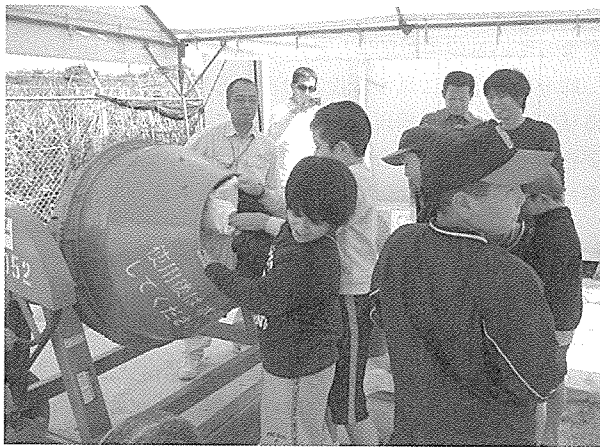


写真 - 13 コンクリート打設体験状況

## 8. 今後の展望

### 8.1 土木研究所との協定について

沖縄県では、独立行政法人土木研究所、財団法人沖縄県建設技術センターとともに離島架橋の調査研究を行うこととし、平成 21 年に三者協定を締結した(図 - 8)。

全国でも類を見ない厳しい塩害条件にある沖縄県において、暴露供試体や実橋における調査データの蓄積を行うことにより、塩害環境下で橋梁を 100 年供用するための維持管理手法、技術基準の確立を行っていくこととしている。

土木研究所からは全国的な知見や新技術の情報提供を、沖縄県から調査フィールドの提供を行い、建設技術センターにおいては調査データの取りまとめや技術の発信を行うこととしている。

### 8.2 暴露供試体

伊良部大橋では橋梁の適切な維持管理手法の確立を目的として上・下部工で使用している配合の暴露供試体(図 - 9)

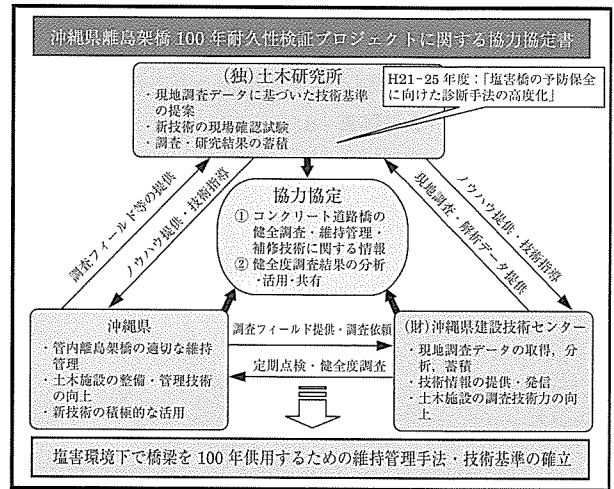


図 - 8 三者協力協定のフロー図

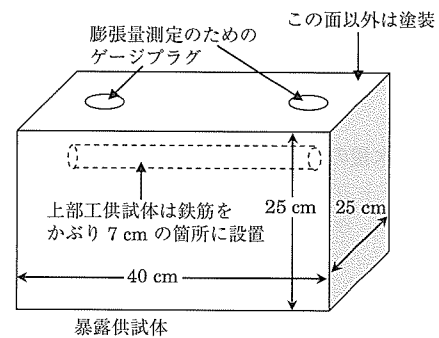


図 - 9 暴露供試体の模式図

を作成するとともに、本体部でコア抜きを行っても構造上、問題の無いよう増打ち橋脚を設置し継続的な調査が行えるよう工夫している。

なお暴露供試体は塩害促進用の供試体、ASR 促進用の供試体などを作成し、圧縮強度、静弾性係数、膨張量、鉄筋腐食状況などの計測を行い今後 100 年間データの収集を行う計画である(写真 - 14)。



写真 - 14 超音波伝播速度の初期値計測状況



とくに塩害促進や ASR 促進用の供試体から得られるデータにより橋梁の劣化を予測し、適切な時期に適切な維持修繕ができるものと期待できる。

### 8.3 施工時データの蓄積

伊良部大橋の工事（橋梁部）はすべて電子納品対象工事であることより、すべての工事のデータを長期にわたり蓄積し維持管理を行う際の資料として活用していくこととしている。とくに下部工のひび割れについては、どの時期にどういった状況下においてひび割れが発生したのかデータを収集することを目的に、下記の事項について施工時にデータ収集をしている。

- ① 打設時間（アジテータ車ごとの打設時間や待機時間）
- ② 打設時の状況（人員の配置、機材状況、打設高等）
- ③ 現場試験（空気量、スランプ、温度、塩化物量、単位水量等）
- ④ 打設ロッド
- ⑤ 圧縮強度
- ⑥ ひび割れ図

これらのデータを構造物単位で記入し維持管理時にいつ、どの時点でひび割れができたのかを確認できるようにしている。

今後、土木研究所の協力のもと塩害の厳しい地域における基準の改定や新たな補修・調査技術が確立されていくことで、県内の離島架橋を適切に維持管理していきたい。

## 9. おわりに

ここまで伊良部大橋においては、設計から材料選定に至るまで、現在考えられる最善の塩害対策を施してきた。しかし、これで 100 年の耐久性が確保できるものではない。

設計での思想が現場に伝わらなければ良い構造物はできず、また現場においての施工精度によってその品質・耐久性が大きく変わるであろうことも容易に推測できる。

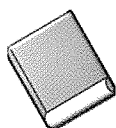
伊良部大橋では 100 年の耐久性という目標をあえて公言することで発注者も含めた現場の意識を高め品質・耐久性に優れた構造物にすることを目的としている。

上記までに報告した塩害対策は個々の対策としては、全国的に見れば特殊な工法ではない。しかし、海上における長大橋として維持管理の困難性を踏まえた 2 重、3 重の予防を行うことで長期にわたってメンテナンスの少ない橋梁となり維持管理費が少なく、長い期間地域に貢献できる橋梁としたい。

### 参考文献

- 1) 土木学会：フライアッシュコンクリートを用いたコンクリートの施工指針（案）
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編、III コンクリート橋編（平成 14 年 3 月）

【2010 年 1 月 20 日受付】



刊行物案内

## コンクリート構造診断技術

コンクリート構造診断技術講習会テキスト

2009年 5 月

定価 7,500 円/送料 500 円

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会