

沖縄県のコンクリート構造物の 劣化の特徴と耐久設計の変遷

日時：令和6年7月10日（水）

会場：アイム・ユニバース てだこホール

琉球大学工学部工学科
社会基盤デザインコース
富山 潤

講習内容

- 沖縄県のコンクリート構造物がおかれた環境
 - 地理的特徴
 - 環境作用
 - 劣化事例（塩害、ASR）
 - 骨材事情（塩害とASRに関連して）
 - 耐久設計の変遷
- 海砂に起因したASRについて
 - 海砂に起因したASR劣化事例
 - 亜硝酸リチウム圧入工法による補修と課題
- ASR劣化したプレテンションPC桁の耐荷性能評価
 - 県外産のプレキャスト部材（プレテンション方式）のASR劣化
 - 耐荷力評価の結果

沖縄県のコンクリート構造物 がおかれた環境

地理的特徴と環境作用

(地理的特徴)



沖縄 = 島嶼環境 約1,000km

離島苦解消



完成離島架橋：21橋

- ①本土復帰前に完成した橋：1橋 ※多くの離島架橋を抱えている！
 ②本土復帰後に完成した橋：20橋
 ・うち国土交通省所管：17橋（国直轄：2橋、県施工：13橋、市町村施工：2橋）
 ・うち農林水産省所管：2橋（県施工：2橋）
 ・うち経済産業省所管：1橋（市町村施工：1橋）

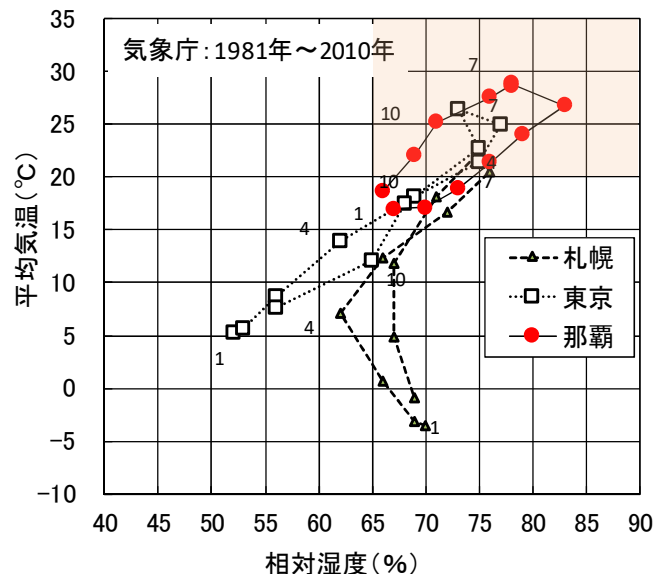
番号	橋名	市町村名
1	桃原橋	うるま市
2	奥武橋	南城市
3	羽地奥武橋	名護市
4	伊計大橋	うるま市
5	瀬底大橋	本部町
6	板地大橋	うるま市
7	慶留間橋	座間味村
8	池間大橋	宮古島市
9	屋敷地大橋	名護市
10	糸間大橋	宮古島市
11	宮城橋	大宜味村
12	浜比嘉大橋	うるま市
13	奥武橋	久米島町
14	世間橋	うるま市
15	平安座海中大橋	うるま市
16	塩屋大橋	大宜味村
17	阿嘉大橋	座間味村
18	野南大橋	伊平屋村
19	古平利大橋	今帰仁村～名護市
20	ワルミ大橋	名護市～今帰仁村
21	伊良部大橋	宮古島市



多くの離島架橋が建設されている

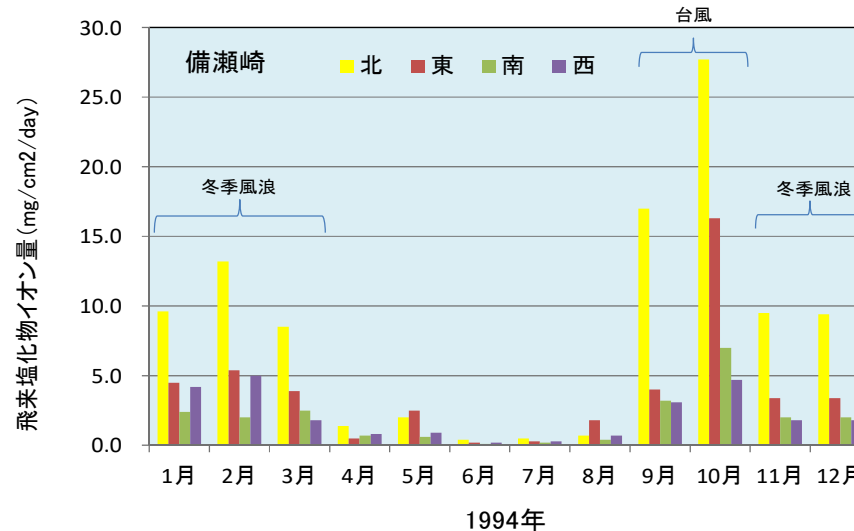
→ 現状を把握する点検・診断技術の高度化

(環境作用)



クライモグラフ

+



飛来塩分量

構造物にとって過酷な自然環境

劣化速度が速い

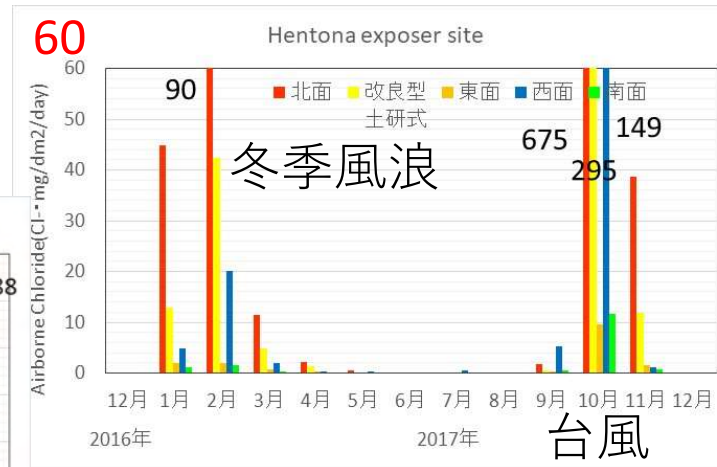
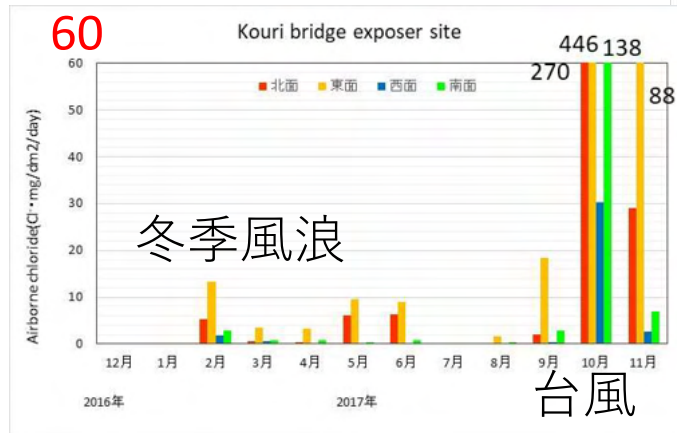


※亜熱帯海洋性気候：高温・多湿

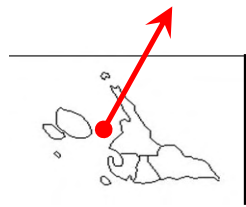
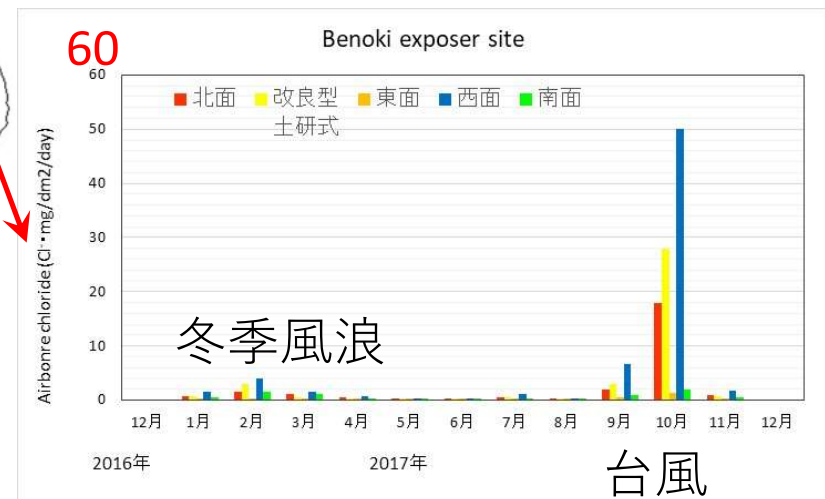
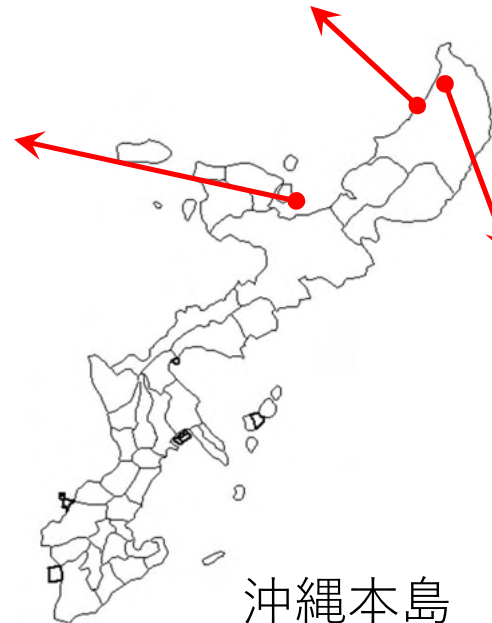
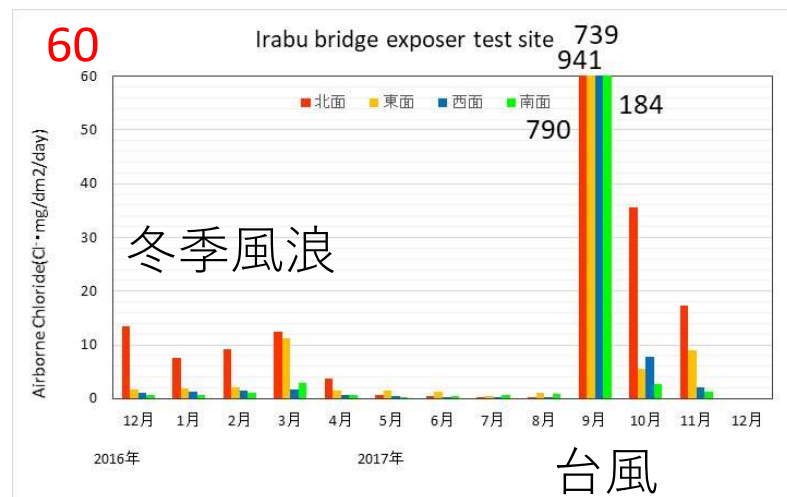
※台風と冬季風浪→大量の飛来塩分が襲来（供給）

飛来塩分環境調査（土研式タンク：2017年）

飛来塩分 (Cl:mdd)



4方向捕集可能な土研式タンク



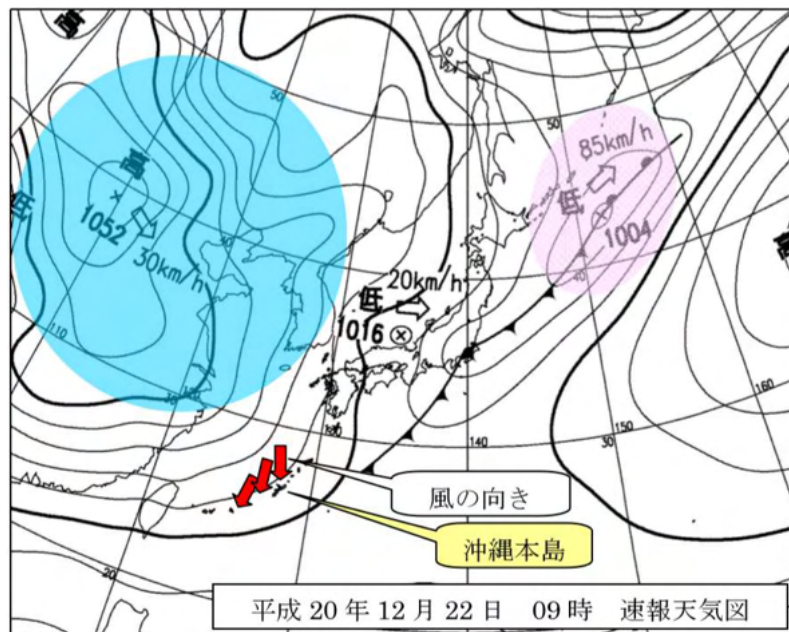
宮古島

冬季風浪と台風により，多くの塩分が海から供給される環境である。

琉球大学，沖縄県建設技術センター，アール・アンド・エー共同調査

気象と飛来塩分の関係

冬季: 典型的な西高東低の冬型気圧配置 (風速は気圧の高低差に比例)



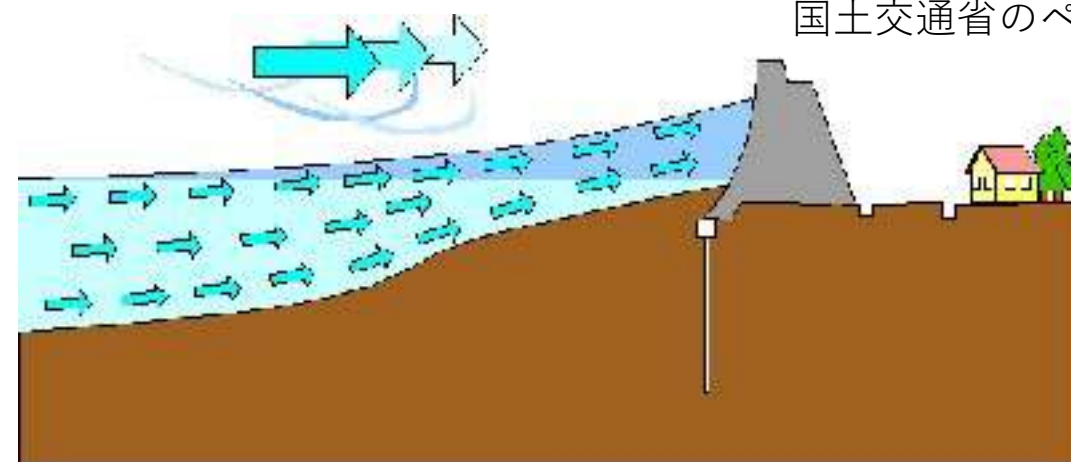
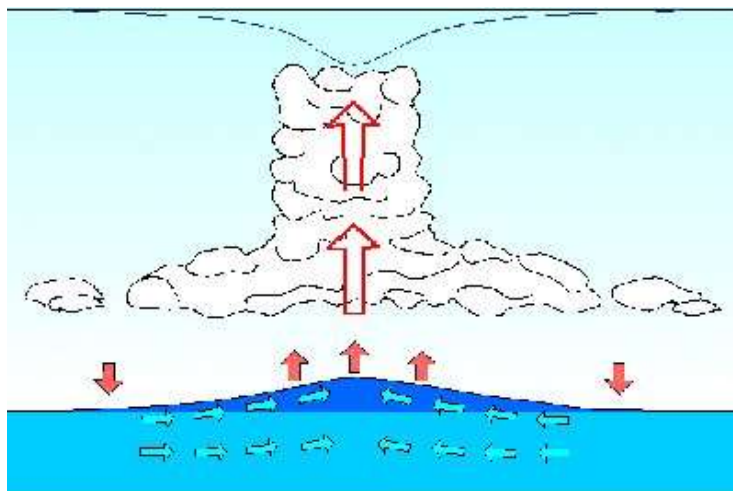
冬季の西海岸 (沖縄県)



大量の飛来塩分が発生

<http://www.city.ginowan.okinawa.jp/DAT/LIB/WEB/1/fuyunokisetufuu.pdf>

台風・高潮: 気圧低下による海面上昇 + 風による吹き寄せ効果



国土交通省のページより

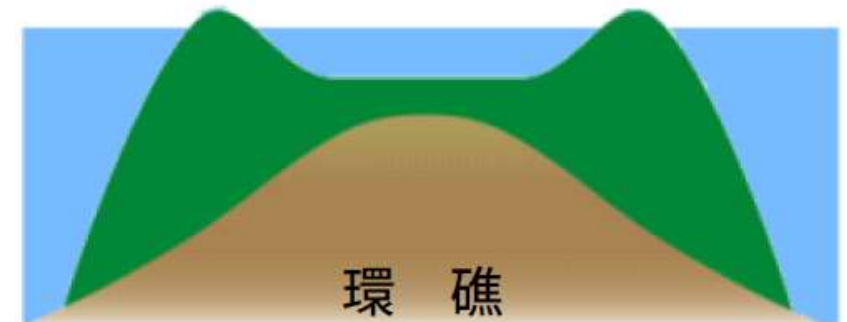
※気圧が1hPa低下すると、海面が約1cm上昇する。 ※風は気圧の高いところから低いところに流れる性質がある。

サンゴ礁と飛来塩分の関係

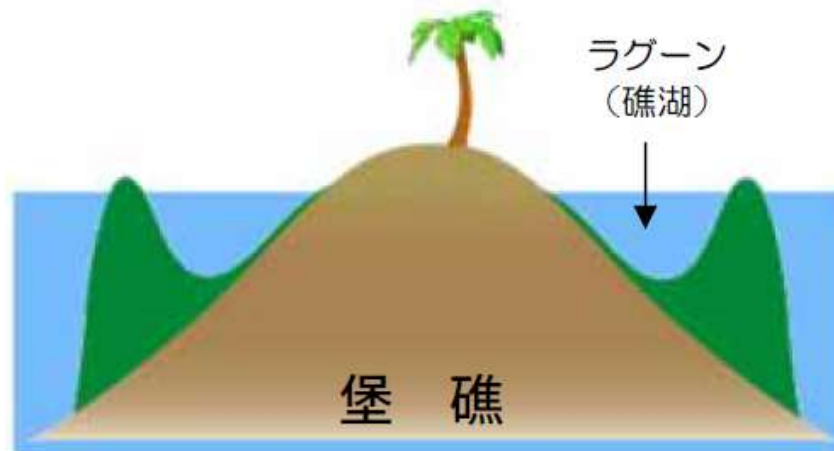
サンゴ礁が作る3つの地形、**裾礁（きょしょう）**・**堡礁（ほしょう）**・**環礁（かんしょう）**
沖縄で最も多い**裾礁（きょしょう）**の断面模式図と代表的な育成サンゴ



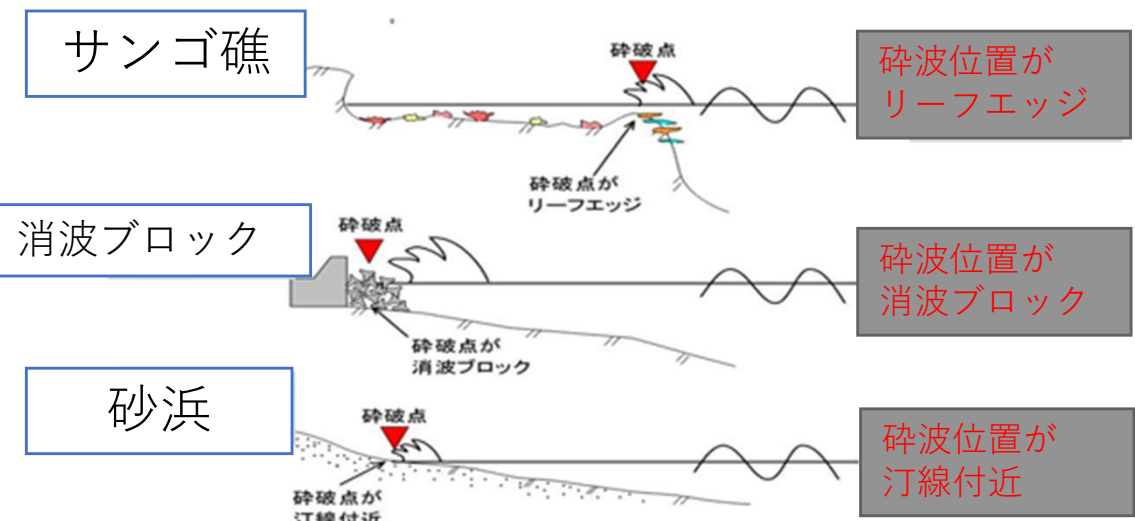
島の周囲をサンゴ礁が囲んでいます。
サンゴは沖へ沖へと成長していきます。



島が沈んだあと円形のサンゴ礁だけが海面に残り、中央に陸地がありません。

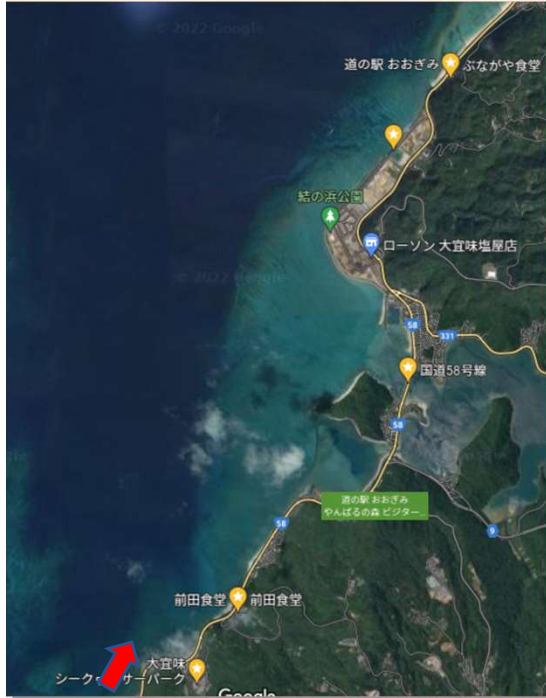


裾礁と似ていますがサンゴ礁の内側に
10m～100mの深い海（礁湖）が
できています。



海岸の種類と砕波位置

リーフエッジ＋海岸線の2段階砕波の例



沖縄県のコンクリート構造物の経年劣化の主要因

- 塩害

内在塩分：未洗浄の海砂に含まれる塩分（1986年以前に建設）



海砂除塩状況：散水法

【5日 = 1工程】

2,500m³の砂を積み上げ約3,000 t の工業用水を4日間連続散水。
24時間で排水し、塩化物量（NaClとして）0.04%以下を確認

外来塩分：飛来塩分，飛沫などの海由来の塩分

- アルカリシリカ反応（ASR）

急速膨張性：県外骨材（県外産プレキャスト製品）
本部産石灰岩に貫入したヒン岩
（輝石安山岩）

遅延膨張性：輸入骨材（台湾花蓮産川砂利・川砂）
海砂（新川沖産）

※確認されている海砂起因の劣化は軽微かつ限定的である。
そうも言えなくなってきた？



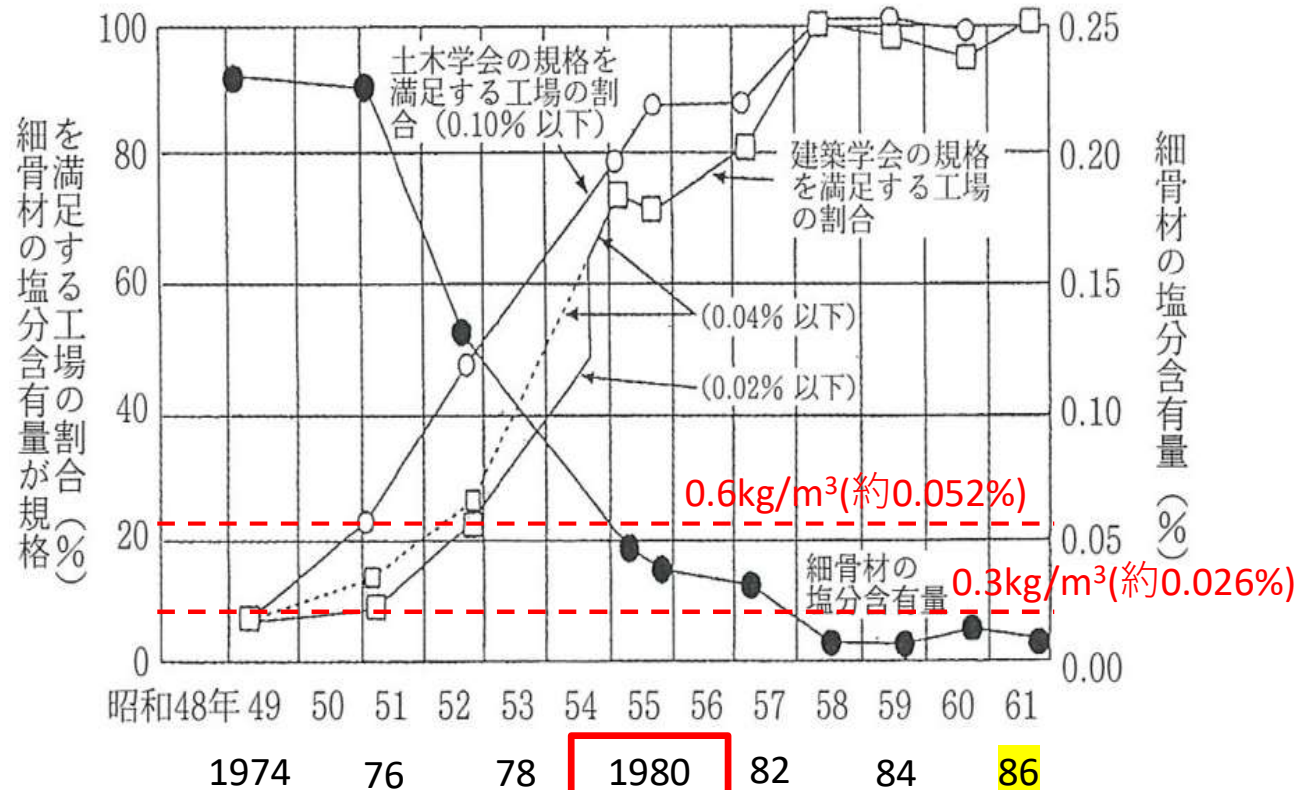
海砂に起因した
ASR劣化事例

塩害劣化

コンクリート用細骨材としての海砂と塩害

(財)沖縄県建設技術センター:試験年報, 第5号, p.134,1986

海砂除塩状況：散水法



沖縄県内の細骨材の塩分含有量経時変化

1986年 (S61) : コンクリート中の塩化物量の総量規制
RC, ポステンPC : 0.6kg/m³(約0.052% : Cl)
プレテンPC : 0.3kg/m³(約0.026% : Cl)

参考 : NaCl 分子量 : 58.44 g/mol
Cl原子量 : 35.45
Na原子量 : 22.99

【5日 = 1工程】

2,500m³の砂を積み上げ約3,000 t の工業用水を4日間連続散水.

24時間で排水, 塩化物量 (NaClとして) 0.04%以下を確認

※NaCl 0.04% -> Cl $0.04 \times 35.35 / 58.44 = 0.024\%$

海砂起因の塩害劣化事例

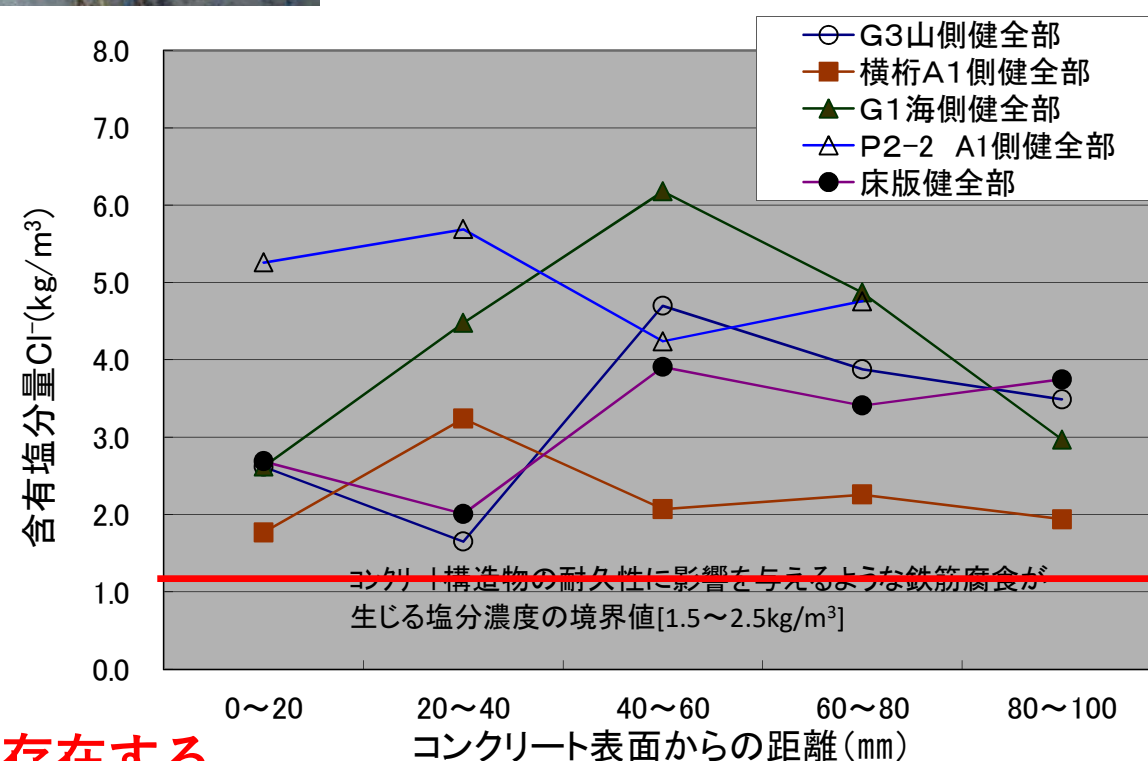
内在塩分による塩害劣化事例

アール・アンド・エー 風間洋氏提供



塩害例: 旧漢那橋(RC橋)

- ・昭和47年(1972年)以前架設
- ・平成13年(2001年)度調査時の劣化状況
- ・撤去済み

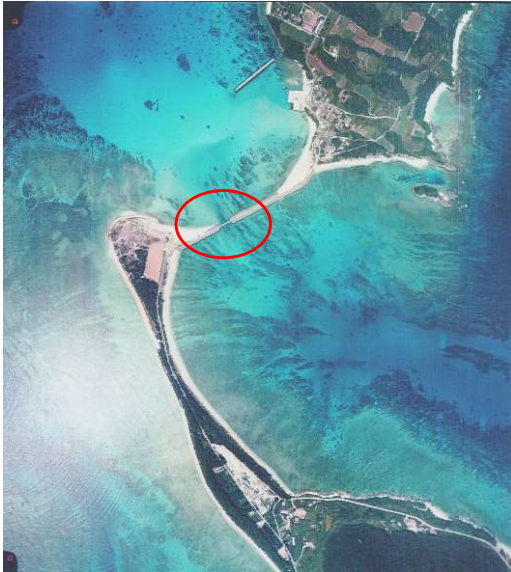


コンクリート内部まで高濃度の塩分が存在する

コンクリート構造物の劣化事例（塩害）

外来塩分による塩害劣化事例

アール・アンド・エー 風間洋氏提供



伊平屋島と野甫島を結ぶ橋



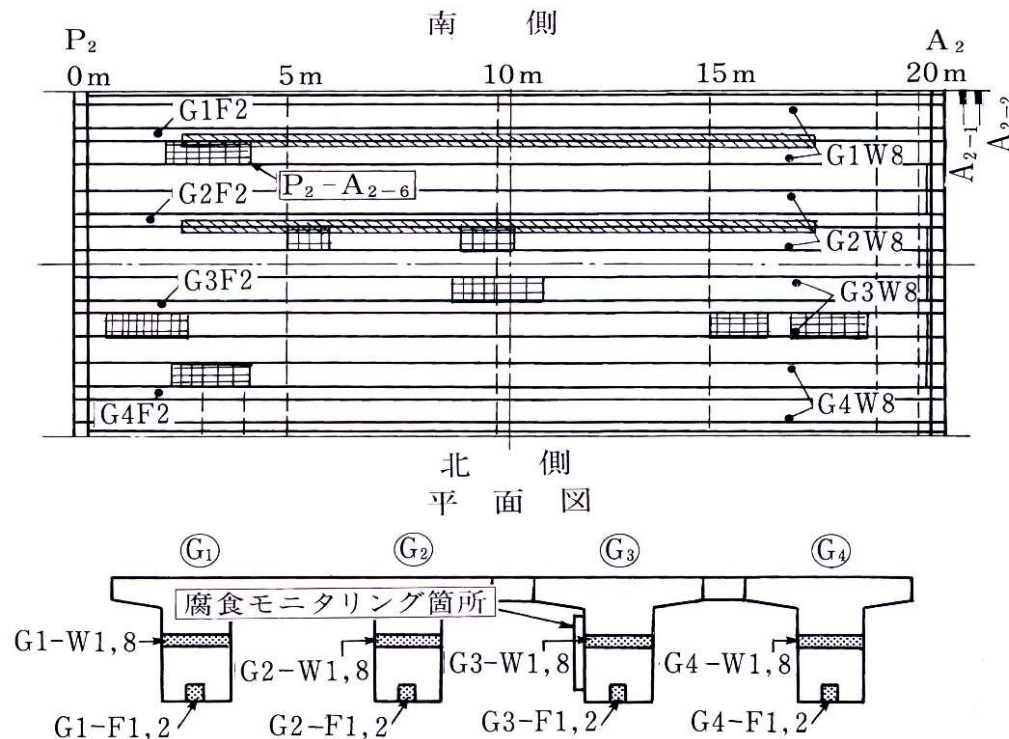
竣工：昭和53年（1978年）
撤去：平成11年（1999年）

沖縄が日本に復帰してから初めての離島架橋：
架設から21年で塩害による老朽化が進み、架け替えに至る

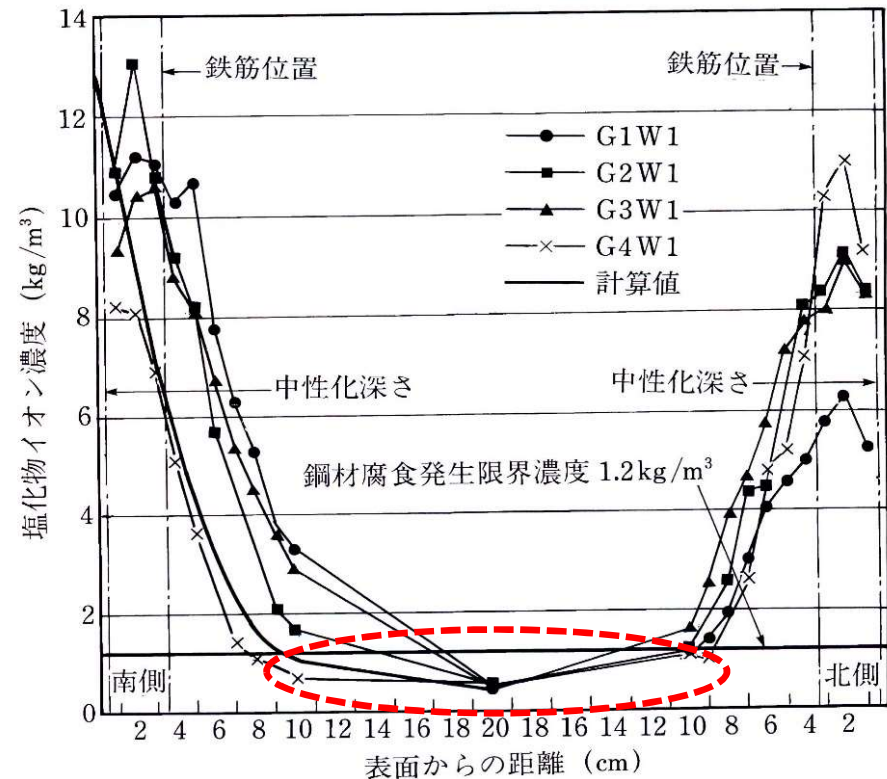


コンクリート構造物の劣化事例（塩害）

塩分量調査結果



コア採取位



塩化物イオン濃度の分布

内部の塩分量は少ない
⇒ 外来塩分による塩害

ASR劣化

ASRに起因したひび割れパターン



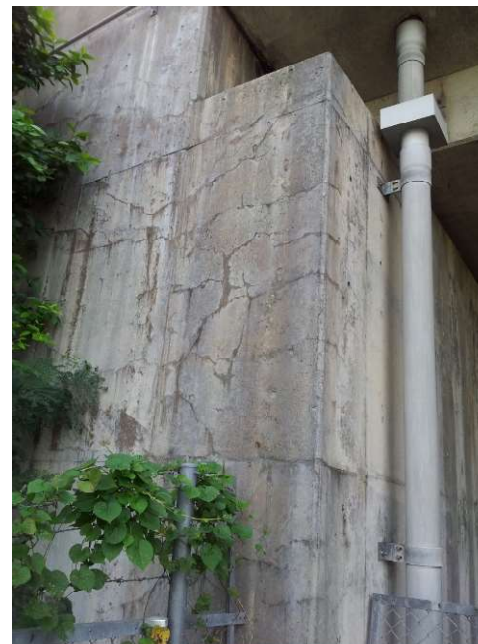
内部拘束力が小さい場合



内部拘束力が大きい場合



非反応性骨材と反応性骨材の影響



水掛かりの影響

コンクリート用骨材とASR

沖縄県のASR劣化構造物と要因

構造物名（部位）	ASRの要因
泊大橋（フーチング）	台湾花蓮産 川砂利・川砂 (遅延膨張性)
山下垣花高架橋（上・下部工）	
沖縄県総合運動公園（梁・柱）	
名蔵大橋（上・下部工）	
山原大橋（下部工）	
世渡橋（A1橋台）	
明治橋（上・下部工）	台湾花蓮産 川砂 (遅延膨張性)
池間大橋（上・下部工）	
基幹水利施設多良間村B溜池（斜壁）	
来間大橋（下部工）	
新垣橋（下部工）	
新垣橋（擁壁）	
登又高架橋（下部工）	
安谷屋高架橋（下部工）	
普天間川橋（下部工）	
柳橋（下部工）	本部産碎石 ひん岩 (急速膨張性)
北中城高架橋（橋脚）	新川沖産海砂 (遅延膨張性)
上地橋（上部工）	
松本橋（上部工）	

※県外産プレキャスト部材にもASR劣化（急速膨張性）が確認されている。

遅延膨張性ASR（台湾花蓮産骨材）

台湾産粗骨材による A S R 損傷例

アール・アンド・エー 風間洋氏提供



フーチング側面・上面のひびわれ



2000年頃の調査



フーチング鉄筋破断状況



急速膨張性ASR劣化事例（輝石安山岩（ひん岩））

アール・アンド・エー 風間洋氏提供

柳橋

下部1983年竣工
上部1984年竣工

輝石安山岩
(ひん岩)



使用骨材の変遷

コンクリート用細骨材産地の変遷

表4 細骨材産地の変遷

産地	種類	S49	S50	S51	S52	S53	S54	S55	S56	S57	S58	S59	S60	S61	S62	S63	H2	H4	H6	H8	H10	H12	H14	H16	H18
チービシ・前島	海砂	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●												
那覇空港地先	海砂	●																							
豊見城村与根沖	海砂	●	●	●																					
中城湾久高沖	海砂	●	●	●	●	●	●																		
屋ヶ名	海砂			●	●	●																			
具志川宇堅沖	海砂	●	●	●	●	●	●																		
石川沖	海砂		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●												
金武湾	海砂	●	●	●	●	●																			
名護市仲尾次沖	海砂	●																							
名護市三原	海砂		●	●																					
大宜味村大保沖	海砂		●	●																					
今帰仁村大井川	川砂	●	●	●	●	●																			
今帰仁村今泊	陸砂		●	●	●	●																			
東村慶佐次	川砂		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●												
東村川田沖	海砂						●	●	●	●	●	●	●												
東村有銘沖	海砂						●	●	●	●	●	●	●												
伊是名・伊平屋	陸砂	●	●	●	●	●	●	●	●																
国頭村辺土名	陸砂		●	●																					
国頭村安田	陸砂				●	●	●	●	●	●	●	●	●												
国頭村安波沖	海砂										●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
国頭村佐手沖	海砂								●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
東村新川沖	海砂											●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
鹿児島県沖永良部	陸砂		●	●																					
鹿児島県大島	陸砂		●	●																					
鹿児島県屋久島	川砂		●	●																					
台湾産	川砂	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
本部産	砕砂	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
国頭村平地	砕砂												●	●	●	●	●	●	●	●	●	●			
座間味村阿佐	陸砂	○	○																						
座間味村阿嘉	海砂	○	○	○																					
伊江島産	海岸	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
宮古島産	海砂	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
伊良部産	陸砂				○	○	○	○	○	○	○	○	○												
久米島産	陸砂	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○													
西表産	海砂											○	○												
与那国産	陸砂											○	○	○	○	○	○								
南大東産	砕砂															○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
徳之島産	陸砂											○	○	○	○								○		
石垣島産（白保）	陸砂	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
石垣島産	砕砂					○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
中国産	川砂																						○	○	○

沖縄県生コンクリート工業組合：
「三〇年の歩み」，2008(平成20年)

ほとんどが，海砂
品質と採取量との関係で増減し，2000年(平成12年)から佐手沖と新川沖に落ち着き，現在は，新川沖が使用されている。

1975年（昭和50年）以降，
粒度調整用として本部の石灰岩砕砂が使用され始めた。

1975年（昭和50年）から昭和1986年（昭和61年）まで，
一部台湾産川砂が使用された（本島）。離島は骨材不足により，これ以降も使用されていた。

コンクリート用粗骨材産地の変遷

表5 粗骨材産地の変遷

沖縄県生コンクリート工業組合：
「三〇年の歩み」，2008

産地	岩石名	色	S49	S50	S51	S52	S53	S54	S55	S56	S57	S58	S59	S60	S61	S63	H2	H4	H6	H8	H10	H12	H14	H16	H18
糸満市大里	石灰石(トラバーチン)	炎白色	●	●																					
玉城村堀川	石灰石(トラバーチン)	炎白色	●																						
勝連村平敷屋	石灰石(トラバーチン)	炎白色	●																						
勝連村平安名	石灰石(砂状)	炎白色	●																						
読谷村座喜味	石灰石(砂状)	黄褐色	●																						
本部産	石灰石(古生層)	暗灰色	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
国頭村半地	石灰石(古生層)	暗灰色	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●													
台湾産	—	—		●	●	●	●	●	●	●	●	◎	◎	◎	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
宮古島	石灰石(塊状)	炎褐色	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
伊良部産	石灰石(塊状)	炎褐色		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
石垣産	石灰石(古生層)	暗灰色	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
久米島産	石灰石(トラバーチン)	炎白色	○																						
座間味阿嘉産	粘板岩	黒褐色	○																						
伊江村産	石灰石(トラバーチン)	炎白色	○	○																					
南大東産												○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
中国産																							○		

凡例 ●：沖縄本島 ◎：沖縄本島+離島地域 ○：離島地域

1974年（昭和49年）までは沖縄本島中南部の石灰石も使用されていたが、品質（密度、吸水等）との関係で1975年（昭和50年）以降本島本部半島産に集約された（本島）。

1975年（昭和50年）から1985年（昭和60年）まで、一部に台湾産川砂利が使用されていた。離島は骨材不足により、それ以降も使用されていた。

台湾花蓮産骨材と海砂のASR劣化の可能性

台湾骨材のASR劣化事例



フーチングのひび割れ



隅角部での鉄筋破断

平成18年(2006年)3月、西日本高速道路(株)(沖縄)の調査結果において新川産海砂が台湾産川砂と同様の岩種構成比であり、**海砂によるASR発生構造物が確認**されたことを受け、確認試験に基づき決定

「伊良部大橋コンクリート耐久性検討業務報告書」

2006年3月(平成18年3月)、委員長：大城武琉球大学名誉教授



日本コンクリート工学会で報告

風間洋，渡久山直樹，砂川勇二，山田義智：伊良部大橋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.**

5. まとめ

本報告では、伊良部大橋の耐久性向上を目的として、コンクリート材料の検討、配合の決定、決定配合のASR抑制効果を確認した。以下に本報告の結果をまとめる。

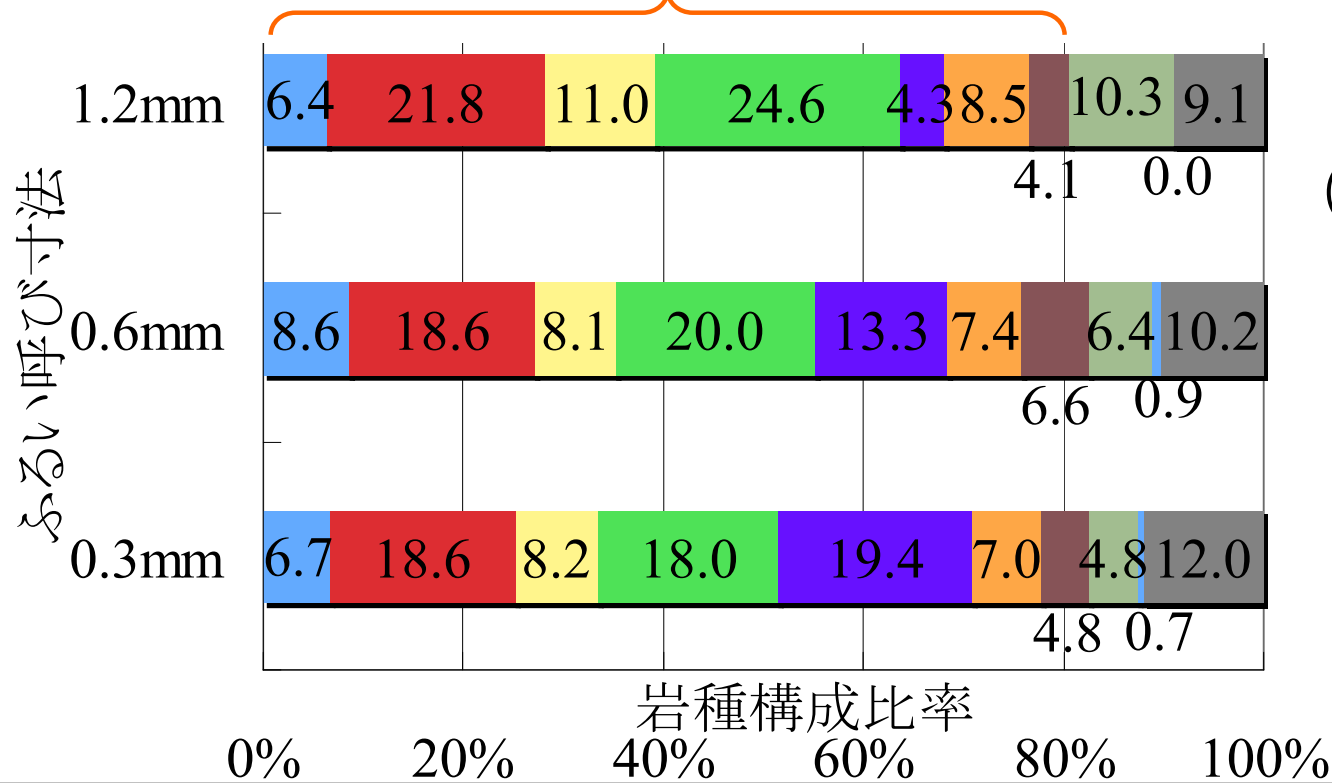
- 1) 伊良部大橋で用いる骨材は、これまで宮古島で一般的に用いられていた台湾産川砂利および川砂にASR問題があるため使用せず、沖縄本島本部産砕石および同砕砂、新川沖産海砂を用いる方針とした。
- 2) 各種配合試験結果から、下部工コンクリートには、沖縄本島石川火力発電所から産出するFA(JISⅡ種灰)を内割配合 65kg/m^3 (セメントの20%)、外割配合 25kg/m^3 で用いることとした。
- 3) 2)の決定後、細骨材として用いる沖縄本島新川沖産海砂に、ASRの反応性鉱物が含まれ、海砂によるASR発生構造物が確認された。よって、下部工27FAC対しASR促進膨張試験(NaOH浸漬法)を実施したところ、FAによるASR抑制効果が確認された。

新川沖産海砂のASRについて

- 細骨材に海砂使用 ➡ 遅延膨張性ASRのリスク

本部産石灰岩砕砂 + 新川沖産海砂 混合砂

反応性（80%以上）



珪質粘板岩	珪岩	砂岩
弱変成砂岩	粘版岩	頁岩
泥岩	緑色片岩	結晶質石灰岩
炭酸塩生物遺骸		

新川沖産海砂の岩種構成比

堆積岩

（珪質粘板岩，珪岩等）

変成岩

（砂岩，泥岩等）

微晶質石英や隠微晶質石英

遅延膨張性ASRが生じる可能性あり

現行のアルカリシリカ反応(ASR)抑制対策

- 国土交通省通知（H14）（土木では①、②を優先）

①コンクリート中のアルカリ総量の抑制

コンクリート中のアルカリ総量を、 Na_2O 換算で **$3\text{kg}/\text{m}^3$ 以下**

②抑制効果のある混合セメント等の使用

高炉スラグや**フライアッシュ**をポルトランドセメントと混ぜて

ASRを抑制 ⇒ 沖縄県では現在**フライアッシュ**を利用

⇒ 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施工指針

③安全と認められる骨材の使用

化学法もしくは**モルタルバー法**で**無害**と確認された**骨材**を使用

⇒ 沖縄県の**海砂**や**台湾産骨材**はすり抜ける

※遅延膨張性骨材であるため.

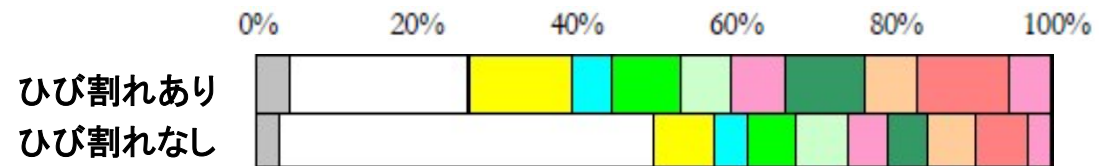
新川沖産海砂のASRについて



A 高架橋



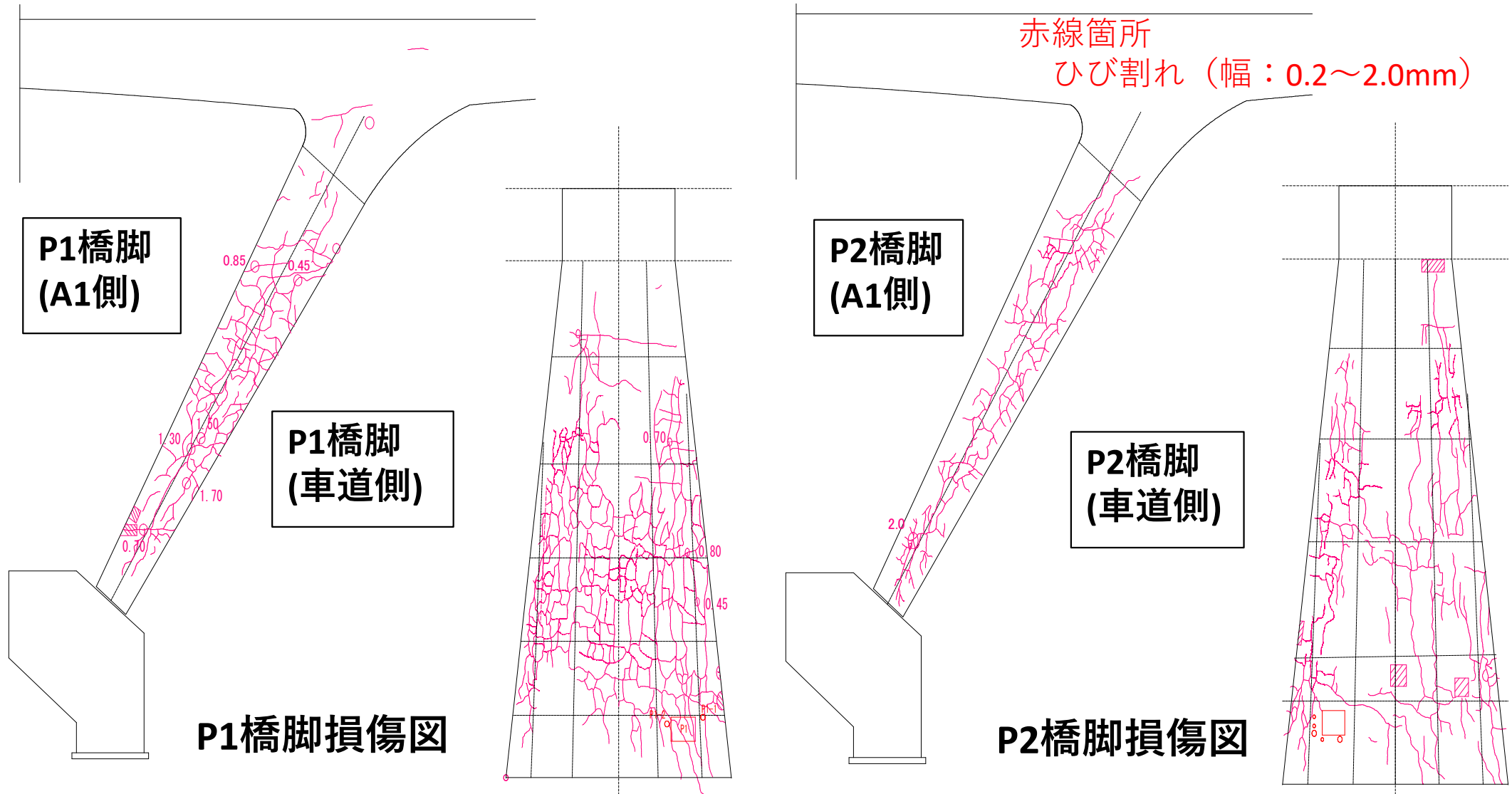
軽微かつ限定的であり，将来的に必ずしも有害な劣化になるとは言えないが，沖縄県のような塩害の厳しい環境下では，塩害との複合劣化も懸念される．このため，何かしらの対策が必要である．



Katayama, T., et al: 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

平成18年3月，西日本高速道路（株）の調査結果をまとめた論文

海砂のASRについて（新たに）

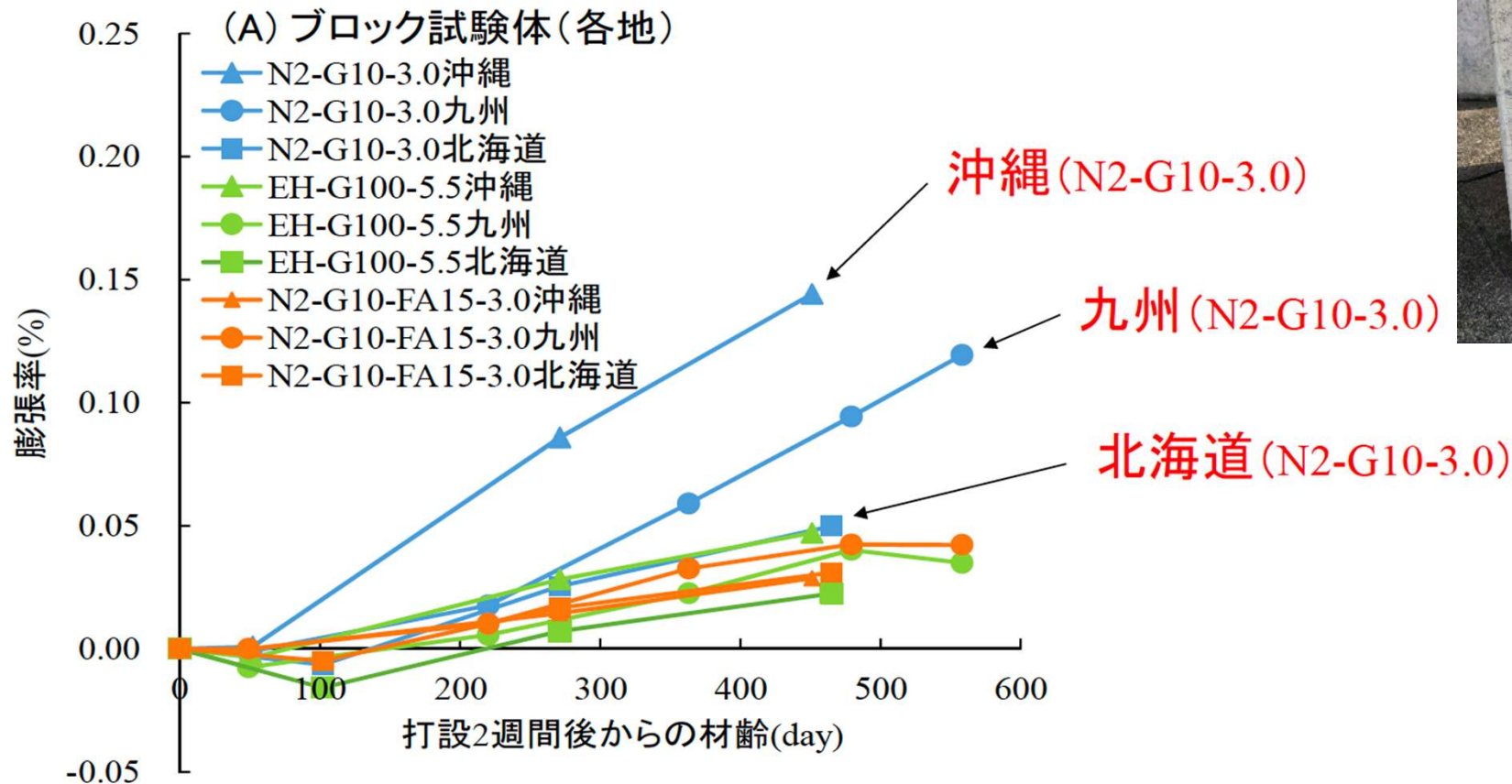


- 調査の結果， P1 および P2 橋脚ともに全体にわたって，ひび割れ幅が 0.2mm～2.0mm の ASR とされる亀甲状のひび割れの発生が確認された。
- ひび割れが繋がっている箇所は部分的にコンクリートの浮き剝離が生じていることも確認された。

ASRに対する環境作用の影響

共通暴露試験体
40cmx40cmx60cm

＜結果＞ 暴露地比較(北海道/九州/沖縄)



1年を通して高温多湿環境である沖縄県は、九州、北海道に比べて、ASRの反応速度が早く、早期に膨張量が大きい結果となった。

耐久設計の変遷

コンクリート構造物の耐久設計の変遷

(1986年～1992年)

沖縄県の耐久性への取り組み

2. 塩害対策かぶり確保後の離島架橋

池間大橋
1986年(S63年)3月着工
1992年(H4年)2月開通
橋長: 1,425m

上部工かぶり: 70mm
下部工かぶり: 90mm
鉄筋: 普通鉄筋

粗骨材: 本部半島産石灰岩
細骨材: 台湾産川砂

2000年度調査: 飛来塩分による塩害劣化確認
2009年度調査: 台湾産川砂によるASR発生確認

● H26年度までに上部工のひび割れ注入等の補修が完了
● 現在は下部工の補修・補強が行われている

R&A 風間洋氏提供

上部工かぶり: 70mm
下部工かぶり: 90mm
鉄筋: 普通鉄筋

(1993年～1998年)

沖縄県の耐久性への取り組み

3. エポキシ樹脂塗装鉄筋の使用

阿嘉大橋
1998年(平成10年)5月完成
PC3径間バランスドアーチ+PC4径間連続箱桁@2
橋長: 530m

塩害対策: 上・下部工のかぶり厚70mm
エポキシ樹脂塗装鉄筋
亜鉛メッキシース
アルミ高欄の支柱基部塗装

R&A 風間洋氏提供

上・下部工かぶり: 70mm
鉄筋: エポキシ樹脂塗装鉄筋
シース: 亜鉛メッキシース
その他: アルミ高欄の支柱基部
塗装

(1996年～2005年)

沖縄県の耐久性への取り組み

3. 国内で初めて100年耐久性を目指して塩害対策を実施

古宇利大橋
1996年(平成8年)着工
2005年(平成17年)2月開通

- 箱桁橋の採用
- 鉄筋最小かぶり
(上部工70mm、下部工90mm)
- 上・下部工にエポキシ樹脂塗装鉄筋の採用
- ポリエチレンシースの採用
- ポリエチレンシースカップラの採用
- エポキシ樹脂塗装PC鋼材の採用
- 高強度コンクリート採用により高耐久化
- 防錆処理(エポキシ樹脂塗装)定着具の採用

橋長: 1,960m

R&A 風間洋氏提供

<国内初100年耐久性>

上部工かぶり: 70mm
下部工かぶり: 90mm
鉄筋: エポキシ樹脂塗装鉄筋
シース: ポリエチレンシース
ポリエチレンシースカップラ
PC鋼線: エポキシ樹脂塗装PC鋼材
コンクリート: 高強度コンクリート
その他: 防錆処理定着具

(2007年～2015年ー現在)

沖縄県の耐久性への取り組み

6. 塩害・ASR・温度応力対策としてフライアッシュコンクリートを採用

伊良部大橋 開通: 2015年1月31日
橋長: 3,540m

◆ コンクリート
下部工: 内割り20%のフライアッシュ
コンクリート
上部工: 砕砂100%+外割り3%の
フライアッシュコンクリート

◆ コンクリート以外の塩害対策:
古宇利大橋と同様

古宇利大橋と同様の100年耐久性を
求められた離島架橋

2015年3月撮影

R&A 風間洋氏提供

<100年耐久性>

高耐久性コンクリートとして **フライアッシュコンクリート**を採用
(塩害, ASR, 温度ひび割れ対策)
下部工: 内割り20%のフライアッシュコンクリート
上部工: 砕砂100%+外割り3%のフライアッシュコンクリート
(空気量: 規定しない)
コンクリート以外の塩害対策: 古宇利大橋と同様

耐久性向上にフライアッシュを用いる理由

- かぶりの確保だけでは不十分：池間大橋
- エポキシ塗装鉄筋も場合によっては腐食する：



日本大学
岩城一郎教授提供

上田洋・飯土井剛・子田康弘・佐伯竜彦・岩城一郎・鈴木基行：厳しい塩害環境下において架替え後15年が経過したPC道路橋の詳細調査および今後の維持管理に関する提案、土木学会論文集E2(材料・コンクリート構造)、Vol.71、No.2、pp161-180、2015.)

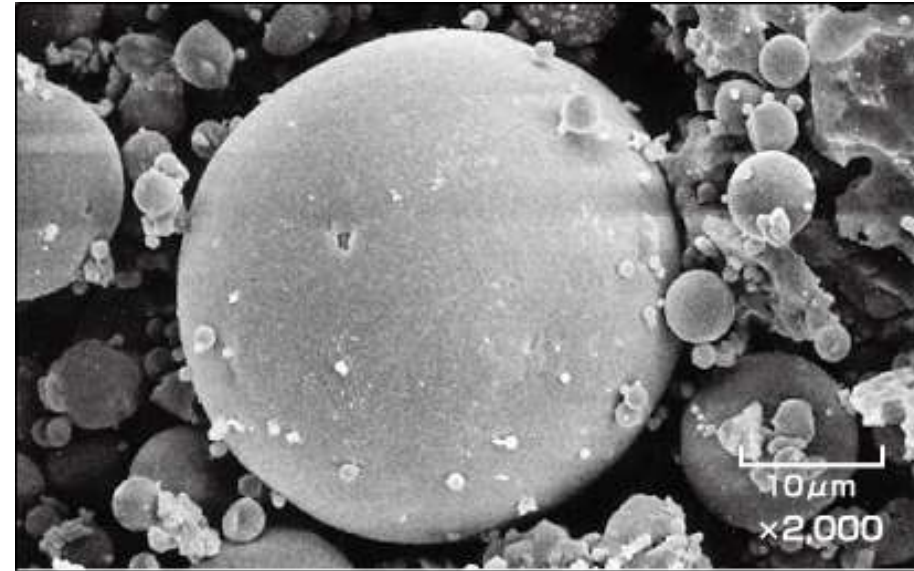
- 海砂の遅延膨張性ASRへの懸念

フライアッシュとは

[日本フライアッシュ協会](#)



フライアッシュ

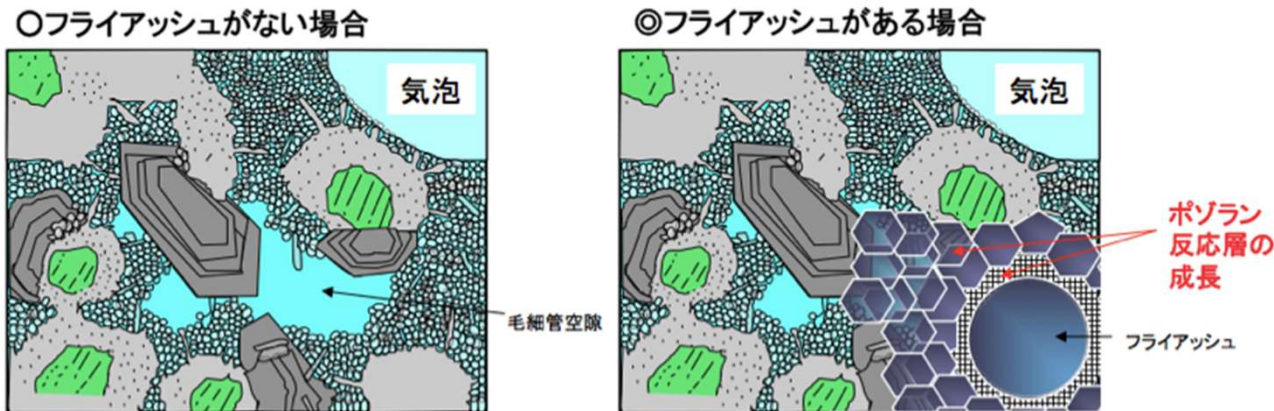


電子顕微鏡写真

- **フライアッシュ**：石炭灰のうち約**90%**は非常に細かく，燃焼ガスとともに運ばれる．これをフライアッシュと言う．
- **クリンカアッシュ（ボトムアッシュ）**：ボイラーの中は**1,000°C**を超えるため，灰のうち**10%**程度は溶けてお互いにくっついてしまうため，ボイラーの底に落ちる．これをクリンカアッシュもしくはボトムアッシュと言う．

ポゾラン反応

- セメントの水和により生成した $\text{Ca}(\text{OH})_2$ とフライアッシュ中の SiO_2 , Al_2O_3 がゆっくり反応し安定的な水和物（ポゾラン反応相）を生成する反応



(金沢大学 鳥居教授提供)

二酸化炭素や塩化物イオンなどコンクリートの耐久性に影響を与える物質の移動に関係する毛細管空隙を充填するようにポゾラン反応相が成長

=> セメント組織を緻密化 => 長期強度増進
=> 耐久性向上



フライアッシュの周囲に放射状に生成されたポゾラン反応相
(電力中央研究所)

フライアッシュ混和によるASR抑制効果

- ✓ セメントとの置換により、コンクリート中のアルカリ総量が減る効果
- ✓ フライアッシュのポゾラン反応により、コンクリートが密実になる効果
- ✓ フライアッシュのポゾラン反応の際に、細孔溶液中のアルカリがポゾラン反応層に吸着される効果

沖縄県独自のフライアッシュコンクリートの指針

100年耐久性を目指して

伊良部大橋でフライアッシュコンクリート(FAC)を採用
(沖縄県土木建築部管理橋梁で初)

(主な目的)
3つの耐久性向上

- 塩分浸透抑制
- アルカリシリカ反応(ASR)抑制
- 水和熱による温度応力の低減

沖縄県発注の重要構造物においてFACの利用推進が図られてきたが、
沖縄県にはFACの配合や施工に関する指針やマニュアル等がないため、
各現場で個別に検討・採用

沖縄県建設技術センター 比嘉正也氏 提供

沖縄県におけるフライアッシュコンクリートの 配合及び施工指針（案）策定

(平成29年12月) **令和6年3月改定**

コンクリート構造物の
耐久性向上・長寿命化

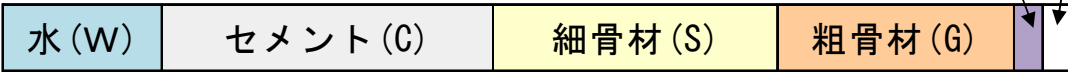
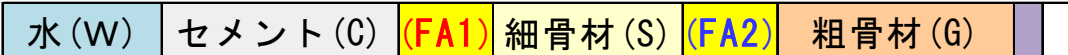
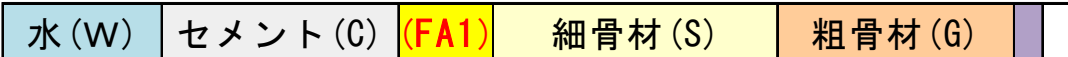
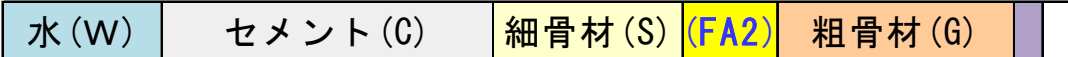
産業廃棄物の有効利用による
環境負荷低減効果

フライアッシュコンクリートの配合パターン

■ フライアッシュコンクリートを3つの配合タイプに分類

3つの配合タイプの概念図

内割り：セメントの一部置換
外割り：細骨材の一部置換

配合タイプ	主な使用目的	対象構造物
(例) 一般的な普通コンクリート配合 (FA無混和) 		
① 内割り + 外割り 配合タイプ  - FA1 (内割り) : (C) の20%質量置換 - FA2 (外割り) : (S) の一部と質量置換 ※ $F1 + F2 = 100\text{kg/m}^3$ 以下	- 水和熱による温度上昇の抑制 - A S Rの抑制 - 塩害抑制	温度応力が発生しやすい構造物 ※マスコンクリート
② 内割り 配合タイプ  FA1 (内割り) : (C) の10~20%質量置換 ※ A S R抑制の場合は15~20%	- A S Rの抑制 - 塩害抑制	温度応力の発生が少ない比較的小規模な構造物
③ 外割り 配合タイプ  FA2 (外割り) : (S) の3~5%と質量置換 ※ この時の(S)は砕砂のみ	- A S R対策 - 流動性の改善	プレキャストPC桁やPCセグメント桁等の脱型・吊り上げを早期に行う構造物

※ C+FA1 : 結合材, S+FA2 : 細骨材

内割り配合と外割り配合の特徴

内割り配合の特徴

- 発熱量が抑制され、マスコンに有効
- FAのポゾラン反応により強度増進及び組織の緻密化が図られ遮塩性、耐久性が向上する
- 初期強度の発現が遅いが、長期強度は大きくなる
- 置換量が増大した場合、セメント単体のコンクリートに比べ強度や耐久性が低下、使用量に限界がある

外割り配合の特徴

- セメント量が一定なため、コンクリート最低強度が確保
- FAのポゾラン反応により強度増進及び組織の緻密化が図られ遮塩性、耐久性が向上する
- FAの増加に伴いスランプロスが大きくなる傾向があるが、FAのボールベアリング効果で流動性向上の可能性あり
- FAの増加に伴い混和材の量が増加、価格的に高価
- 内割配合より多量に使用可能

フライアッシュコンクリートの使用実績

新本部大橋
(下部工：内割・外割)



佐手橋
(上部工：内割)



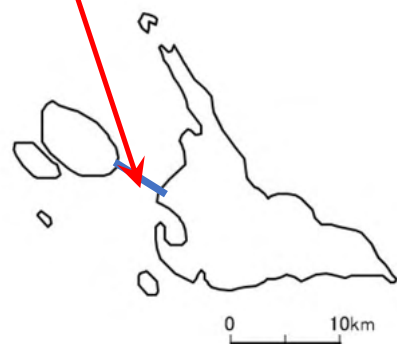
上部工・外割 (海砂未使用)

- 東風平高架橋
- 豊見城高架橋
- 沖縄都市モノレール軌道桁 (延伸区間)

港川高架橋P6
(内割・外割)



伊良部大橋
(上部工：外割, 下部工：内割・外割)



桃原橋
(下部工：内割・外割)



泡瀬連絡橋 (仮称)
(上部工：外割, 下部高：内割・外割)



那覇大橋
(下部工：内割・外割)



南部東道路
(上部工：外割, 下部工：内割・外割)



ここまでのまとめ

- 沖縄の環境について

1年を通した高温多湿に加え，冬季風浪と台風により大量の塩分が供給され，構造物にとって過酷な環境である．

- 塩害について

内在塩分，外来塩分に起因したものや，その両方に起因したものがある．塩化物総量規制の1986年以降に建設された構造物の塩害は外来塩分によるものである．

- ASRについて

急速膨張性，遅延膨張性がある．沖縄県では遅延膨張性ASRの対策が必要である．

- コンクリート構造物の耐久設計について

沖縄県のコンクリート構造物の耐久性向上にフライアッシュコンクリートを積極的に採用する方向にある．

海砂に起因したASRについて

コンクリート構造物の補修，補強，アップグレードシンポジウム（2023）

遅延膨張性ASRにより劣化したコンクリート橋における亜硝酸リチウムの膨張抑制効果検証

Verification of Expansion Effect of Lithium Nitrite on Concrete Deteriorated by Delayed Expansion ASR

琉球大学大学院 理工学研究科 博士前期課程工学専攻 社会基盤デザインプログラム

宮里 昂志

琉球大学 工学部 工学科 社会基盤デザインコース 教授

富山 潤

（株）沖縄建設技研 代表取締役

宮城 敏明

極東興和 （株）営業本部 営業部 補修営業課

森 裕介

MicroRange 代表

知念 正昭

はじめに

沖縄県のアルカリシリカ反応（**ASR**）の問題点

➡ 細骨材の海砂に遅延膨張性をもつ鉱物が含まれている

A橋 橋脚の損傷状況



既往の報告において、細骨材に起因する**ASR**による被害は限定的かつ軽微



最大ひび割れ幅が**2mm**の比較的大きなひび割れが生じた沖縄県内のコンクリート構造物（A橋）が海砂によるものだと判定

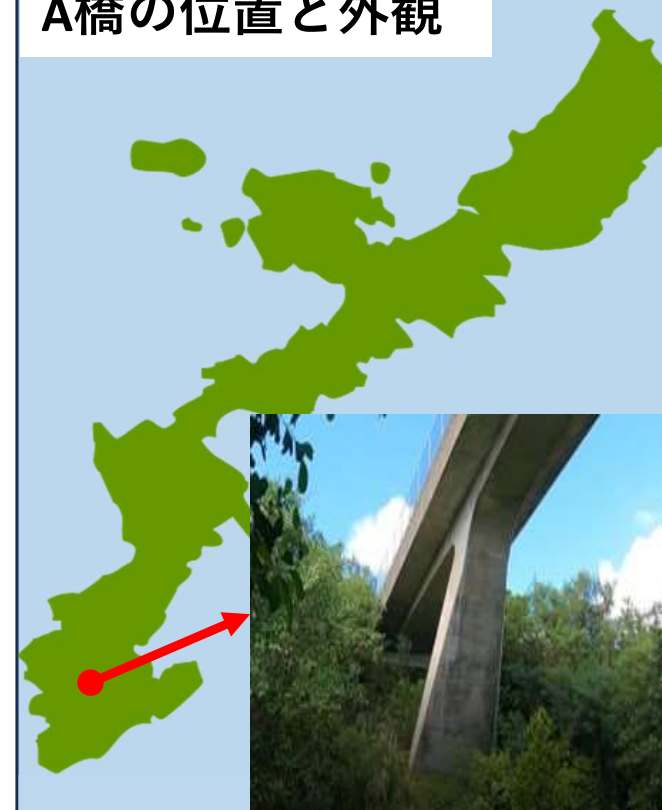
本研究の目的

- ① 対象コンクリート構造物（A橋）に対する詳細調査により、**遅延膨張性ASR**による劣化であるかを確認
- ② 沖縄県産の細骨材（海砂）に起因した**遅延膨張性ASR**に対する亜硝酸リチウム内部圧入工法の補修効果を検証

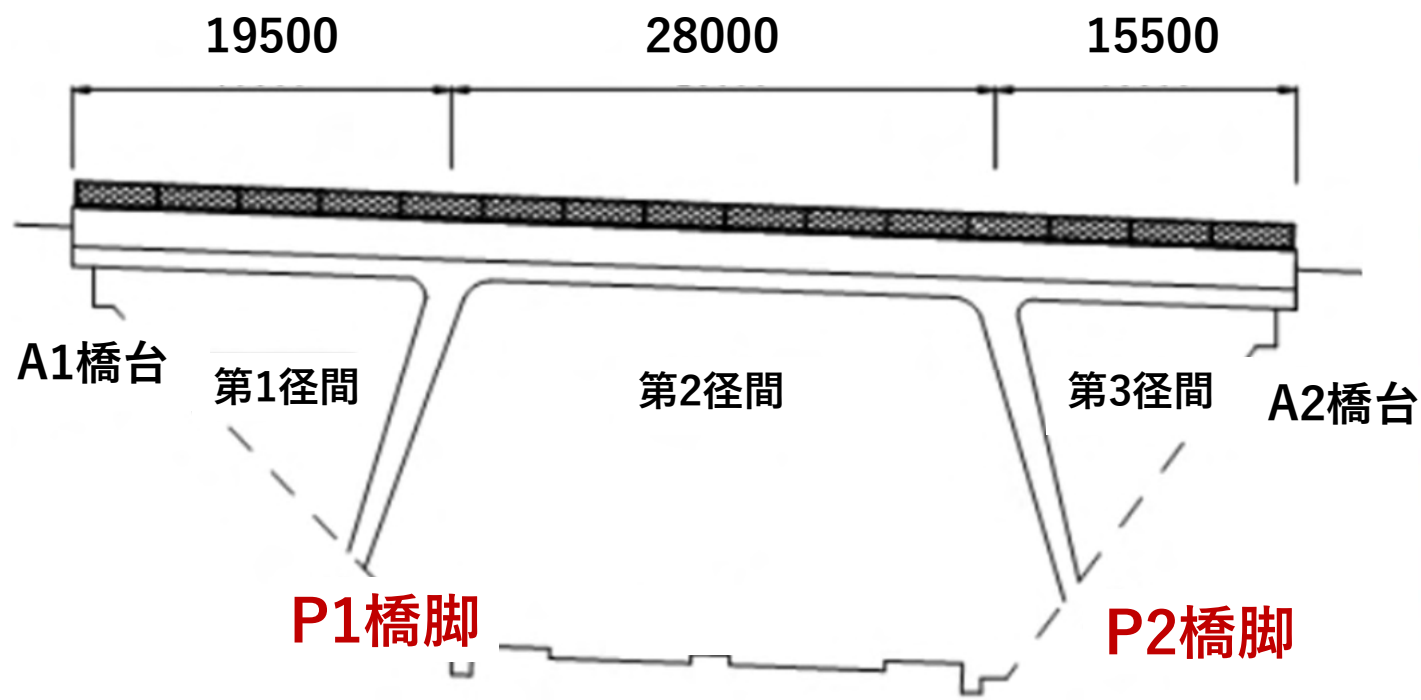
対象橋梁（A橋）概要

場所	沖縄県
全長・幅	63m ・ 5m
構造形式	ポストテンション方式PC3径間連続中空床版
竣工年	1993年（平成3年）
施工内容	橋脚のASR補修
補修工法	亜硝酸リチウム内部圧入工法 （P2橋脚の1部のみ）

A橋の位置と外観



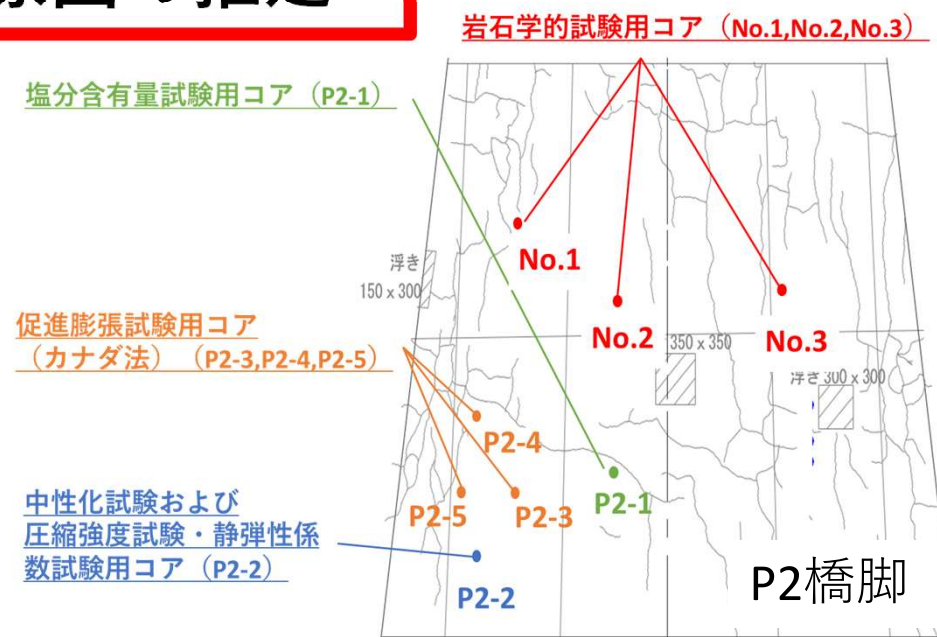
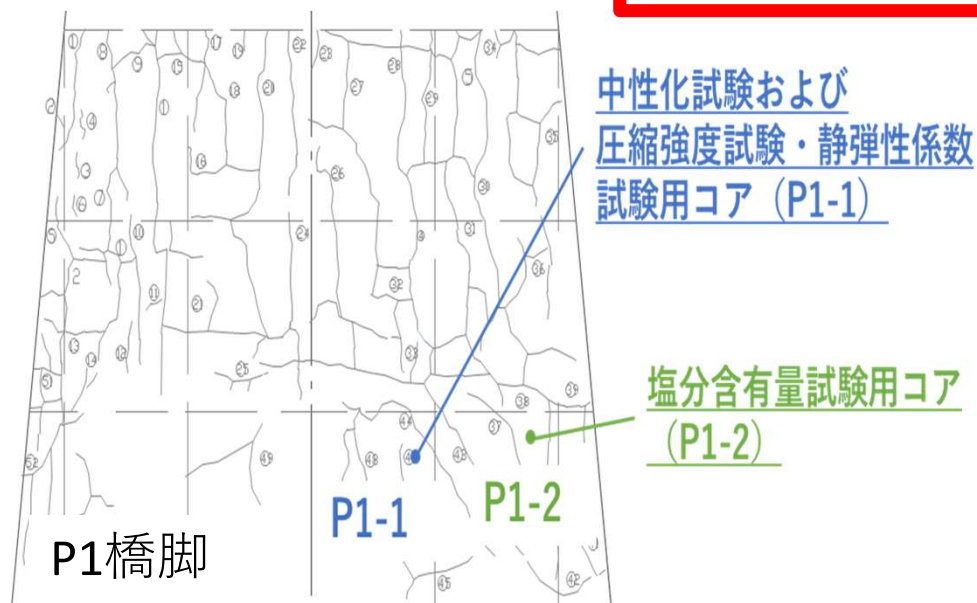
A橋 側面図



A橋の路面

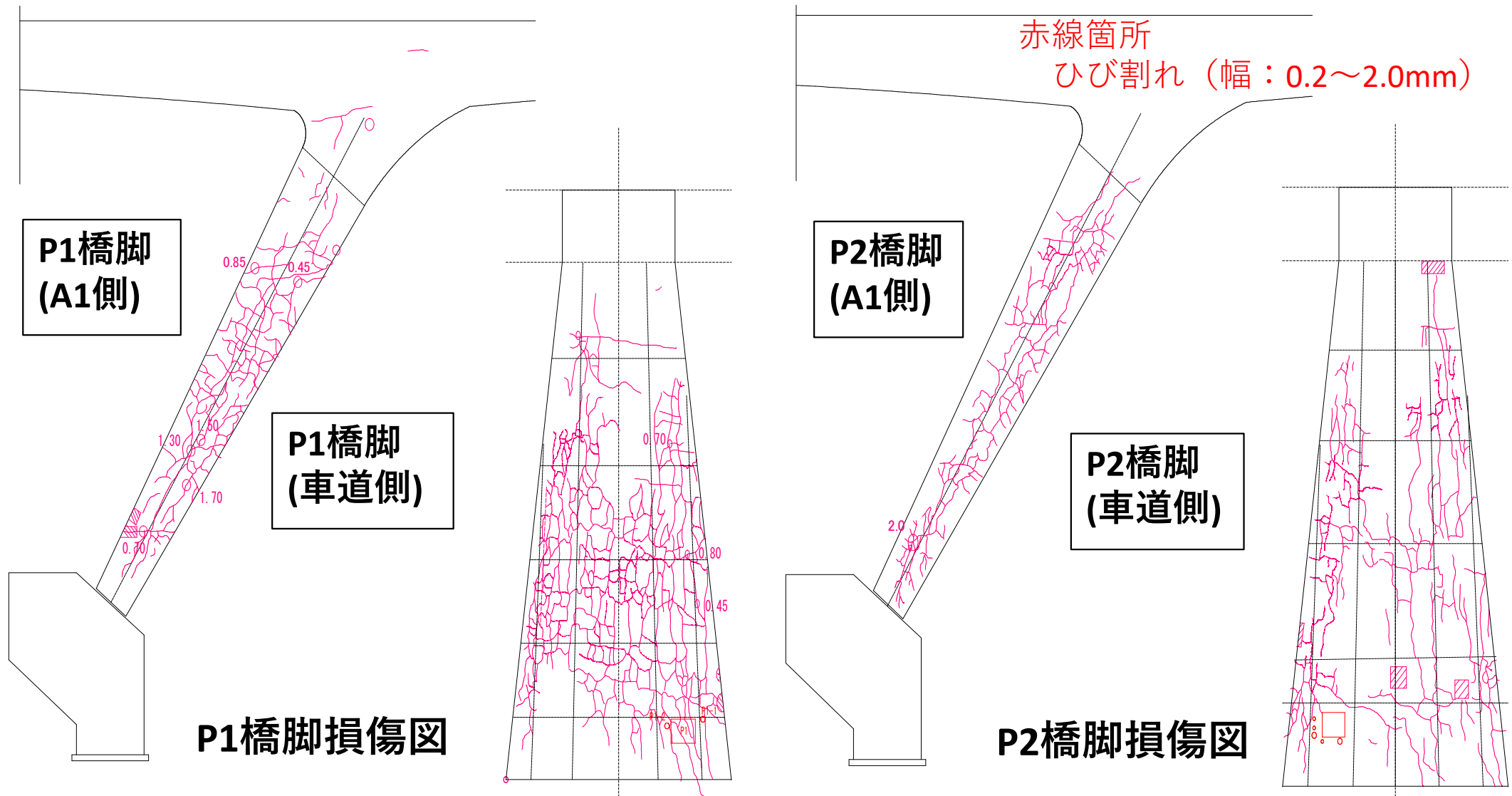
No	調査項目	試験方法
1	外観調査	目視調査, 打音調査
2	促進膨張試験	カナダ法
3	岩石学的試験	目視観察, 実体顕微鏡観察 偏光顕微鏡観察, SEM-EDX観察
4	中性化試験	JIS A 1152
5	塩分含有量試験	JIS A 1154
6	圧縮強度試験 静弾性係数試験	JIS A 1108 JIS A 1149

ひび割れの原因の推定



点検・詳細調査結果および考察

外観調査



- 調査の結果、P1 および P2 橋脚ともに全体にわたって、ひび割れ幅が 0.2mm~2.0mm の ASR とされる亀甲状のひび割れの発生が確認された。
- ひび割れが繋がっている箇所は部分的にコンクリートの浮き剝離が生じていることも確認された。

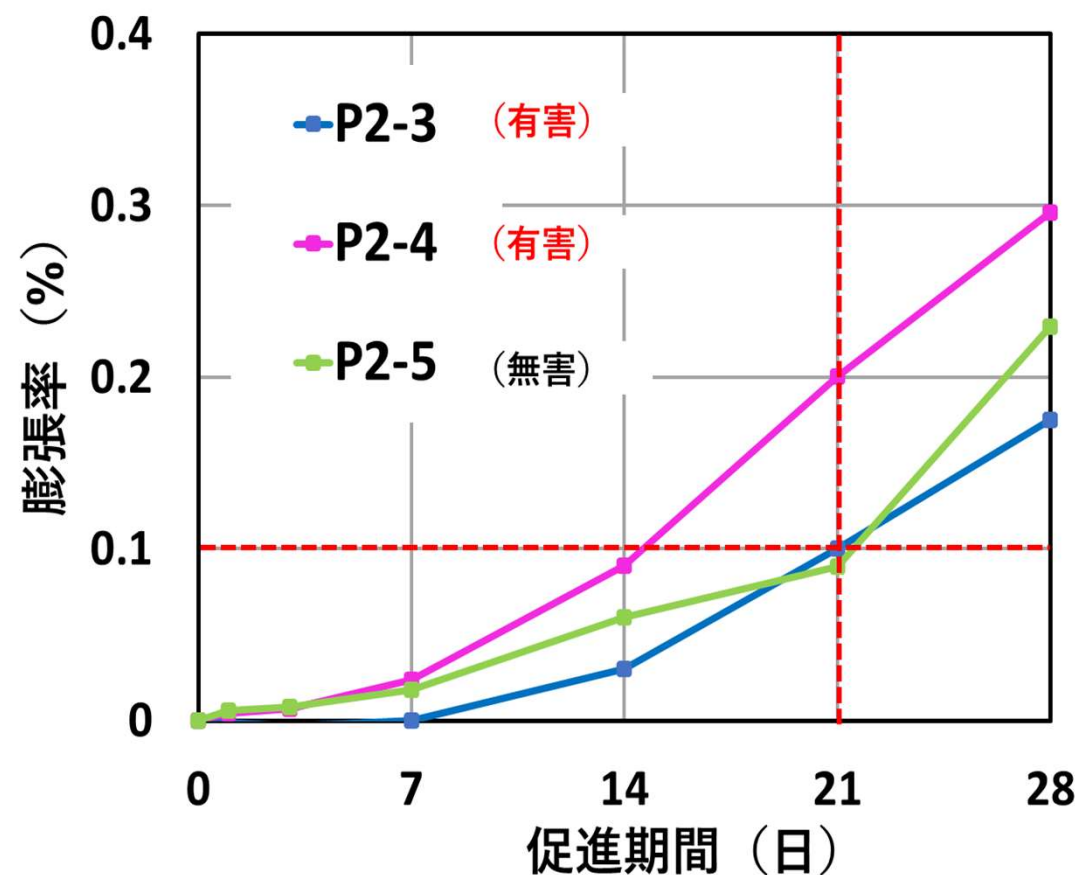
促進膨張試験

試験名	試験方法	判定基準
アルカリ溶液浸漬法 (カナダ法)	コンクリートコアを $80 \pm 2^{\circ}\text{C}$, 1NのNaOH溶液に浸漬し, 膨張率の 経時変化を測定	試験開始後21日の膨張率で 0.1%以下 : 無害 0.1~0.2% : 有害と無害な骨材が両方 含まれる 0.2%以上 : 潜在的に有害



コア試料測定状況

膨張率の経時変化を観察する。
測定は浸漬してから
(1, 3, 7, 14, 21日目)



岩石学の試験

試験項目		試料		
		No.1	No.2	No.3
岩石学の評価	目視観察	1試料	1試料	1試料
	実体顕微鏡観察	1試料	1試料	1試料
	偏光顕微鏡観察	1試料	1試料	1試料
	SEM-EDX観察	1試料	1試料	1試料



実体顕微鏡観察



偏光顕微鏡観察



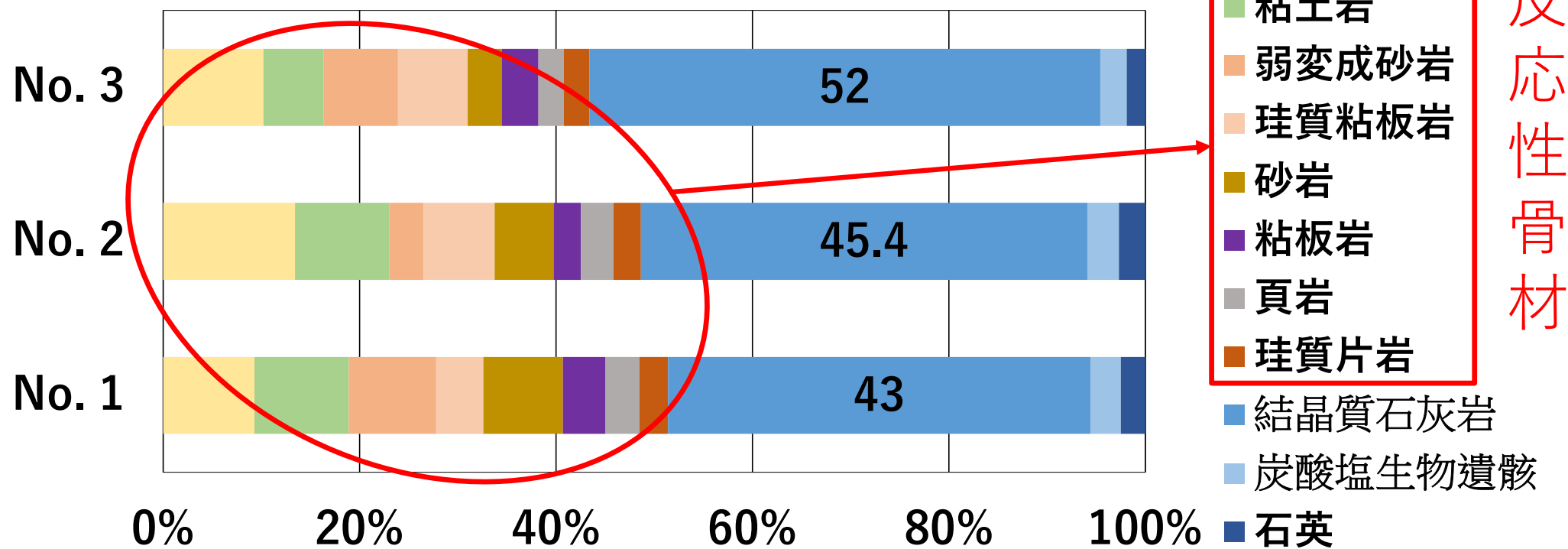
SEM-EDX観察

岩石学的試験（目視観察 実体顕微鏡観察）

粗骨材の岩種構成比



細骨材の岩種構成比



岩石学的試験

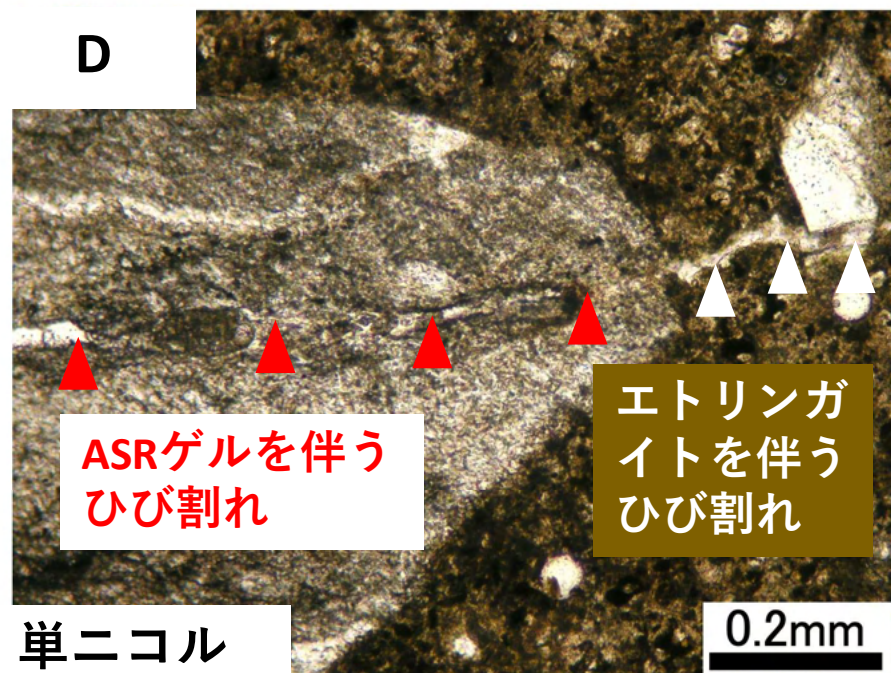
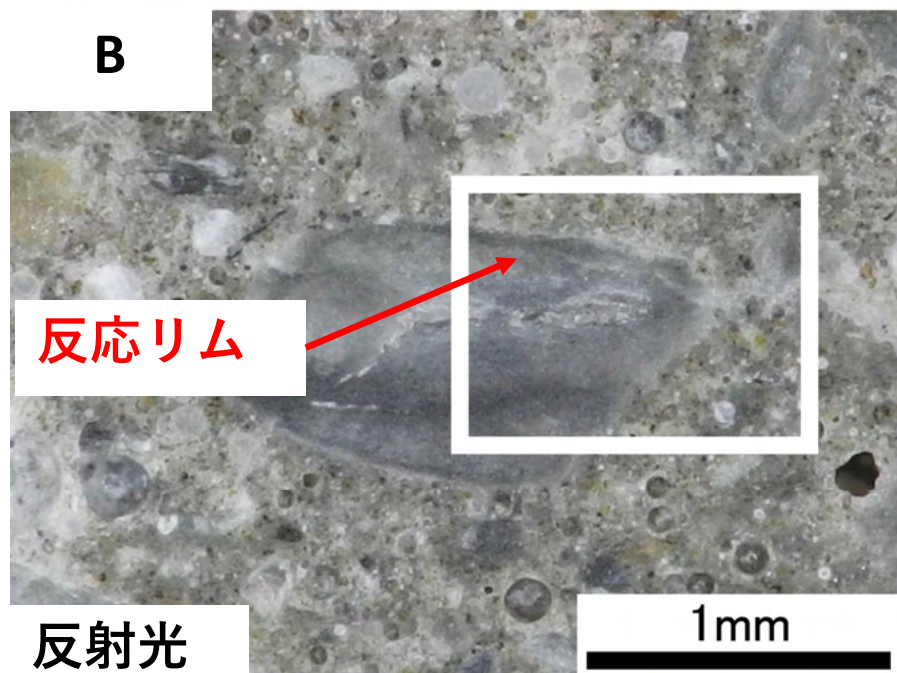
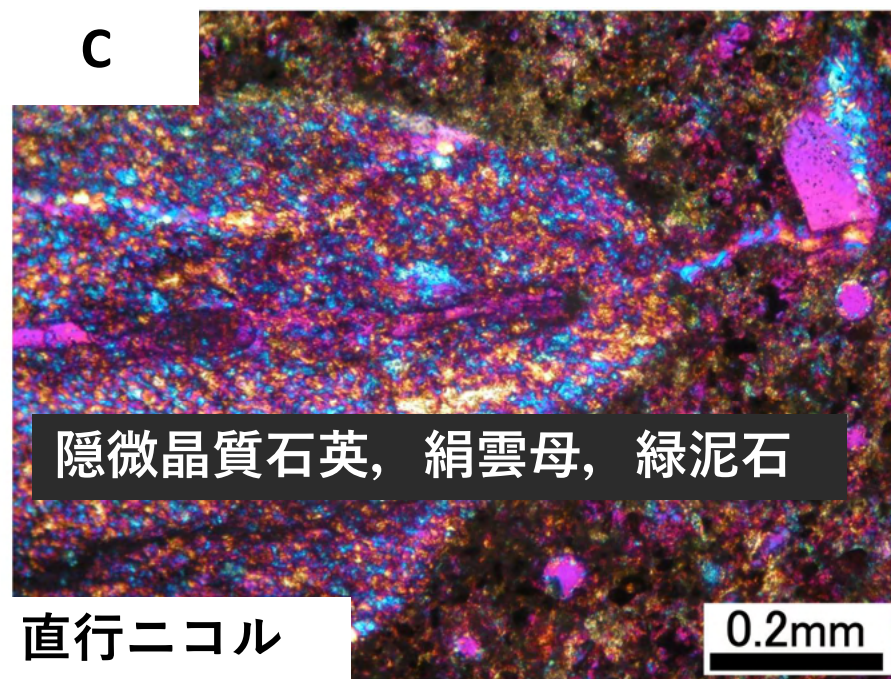
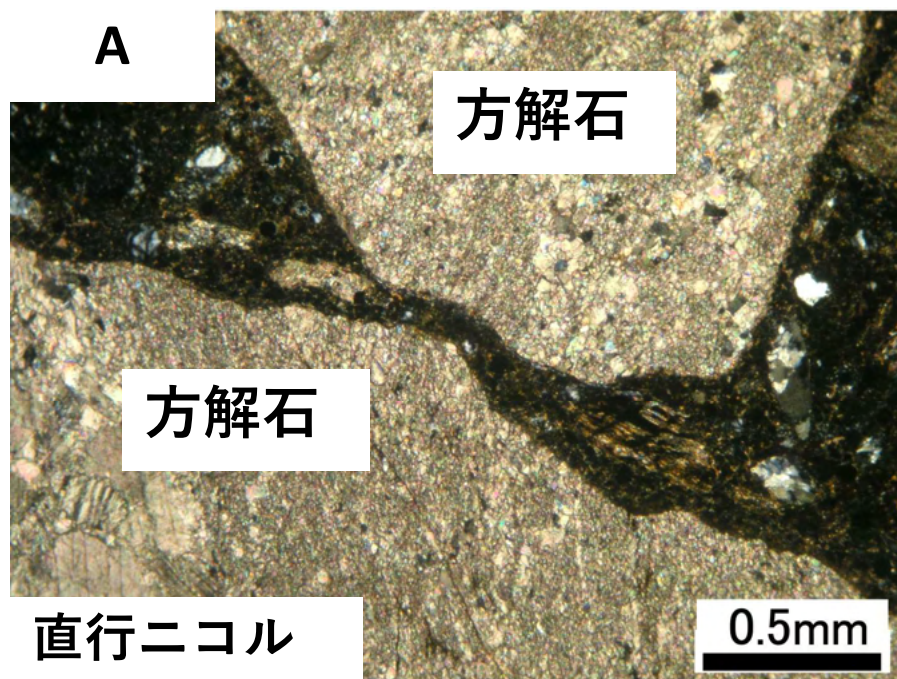
反応性骨材

鉱物組成表

岩石名 \ 鉱物名	微晶質石英 隱微晶質	石英	白雲母	緑泥石	長石類	方解石	苦灰石	スメクタイト	絹雲母	炭質物	不透明鉱物
結晶質石灰岩	-/+	-/+	-	-/+	-	◎	-/+	-/+	-/+	-/+	-/+
シルト岩	◎	△/+	-	+/ Δ	-	-	-	-/+	+/ Δ	+	+
粘土岩	◎	△/+	-	+/ Δ	-	-	-	-/+	+/ Δ	Δ / +	+
弱変成砂岩	○/ Δ	◎/○	-/+	-/+	△/+	-/+	-	-/+	△	+	+
珪質粘板岩	◎	△/○	-	-/+	-	-	-	-/+	+/ Δ	-/+	+
砂岩	○/ Δ	○/ Δ	-	-/+	△/+	-/+	-	+/ Δ	+	+	+
粘板岩	△	△/+	△/+	△/+	-	-	-	+/ Δ	○/ Δ	△	+
頁岩	◎	△/+	-/+	+/ Δ	-	-	-	-/+	+/ Δ	+	+
珪質片岩	-/ Δ	◎	-/+	-/+	-/+	-/+	-	-/+	-/ Δ	-/+	-/+

概算量: ◎,多量(100~50%); ○,中量(50~20%); △,少量(20~5%); +,微量(5%以下);
-,確認できない. 赤枠, 反応性鉱物.

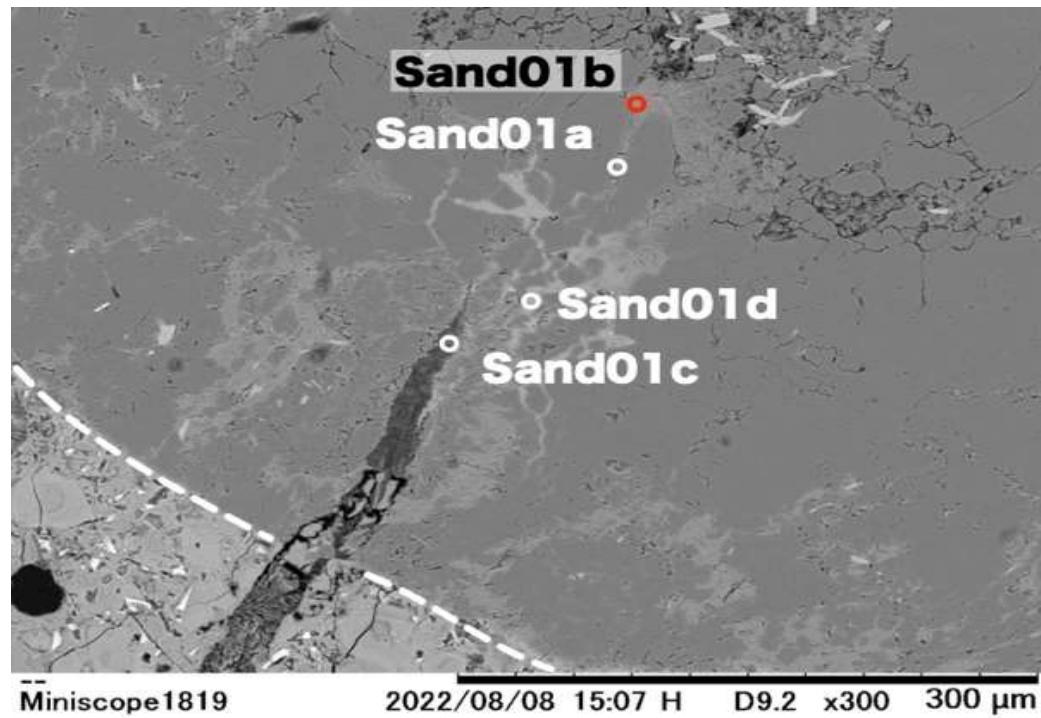
岩石学的試験（偏光顕微鏡観察）



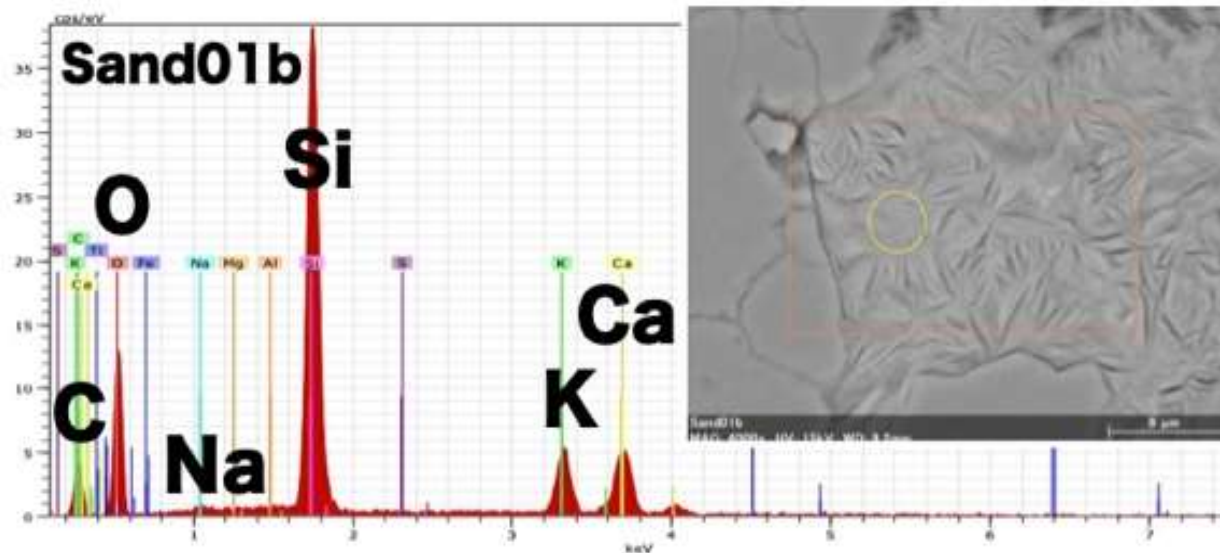
偏光顕微鏡写真（Aが結晶質石灰岩，B,C,Dがシルト岩）

岩石学的試験 (SEM-EDX観察)

ASRゲル生成状況



化学組成



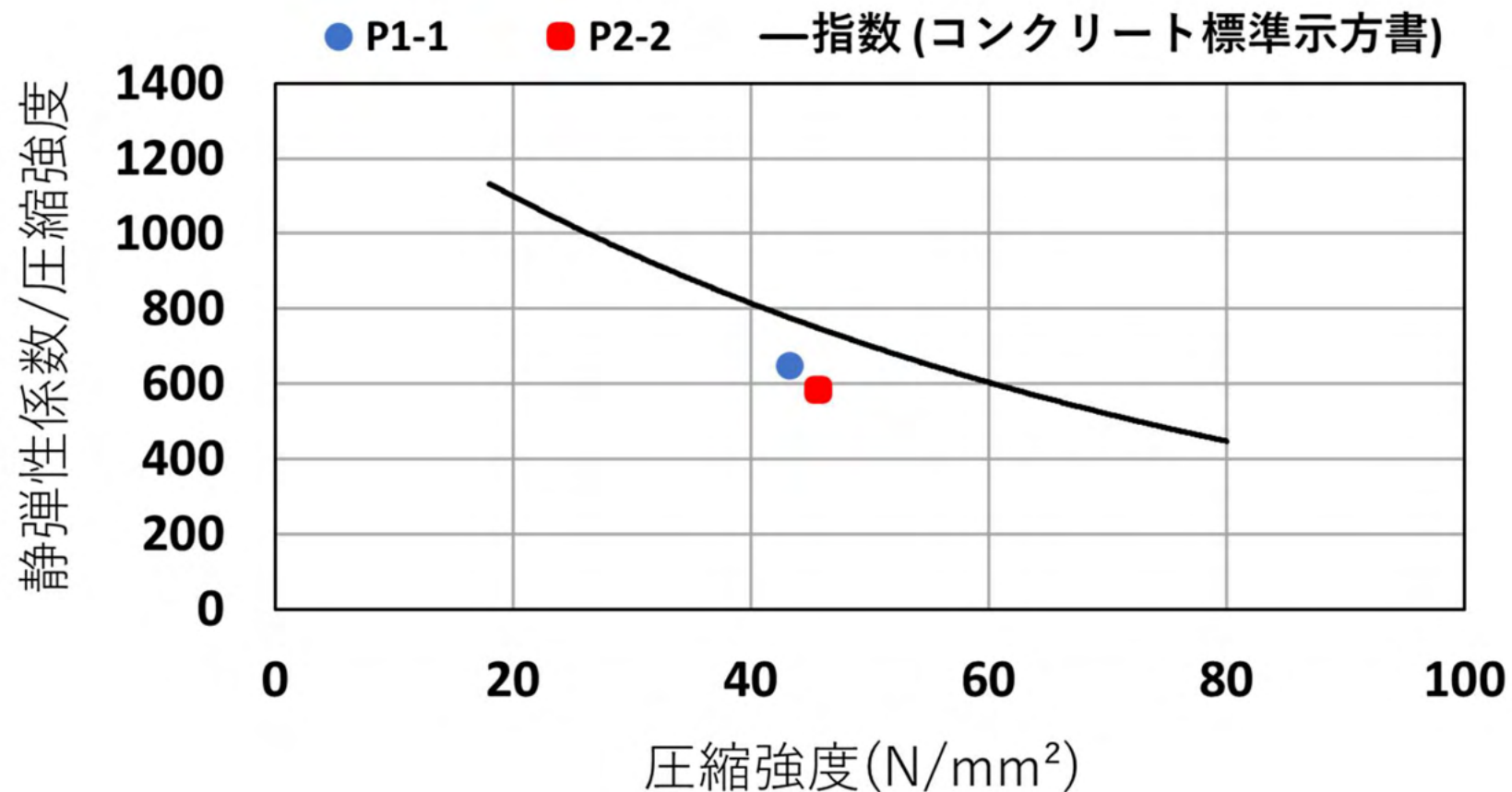
○中性化深さ

- ・ P1-1 : 0 mm
- ・ P2-2 : 0 mm

○塩化物イオン量（鉄筋位置）

- ・ P1-2 : 0.05kg/m³
- ・ P2-1 : 0.21kg/m³

○圧縮強度・静弾性試験



ひび割れの原因推定及び考察

No	調査項目	調査・試験結果
1	外観調査	ひび割れ幅0.2mm～2mmのASRと思われる亀甲状のひび割れの発生の確認
2	促進膨張試験	ASR膨張は有害と考えられる
3	岩石学的試験	細骨材中の各岩種には、遅延膨張性のポテンシャルを持つ隠微晶質～微晶質石英が多量に存在していた
4	中性化試験	中性化は認められない
5	塩分含有量試験	塩害は認められない
6	圧縮強度試験 静弾性係数試験	圧縮強度に比較して静弾性係数がわずかに低下していることを確認した

⇒細骨材（海砂）起因の遅延膨張性ASRであると推定される。