

# コンクリート維持工学

－沖縄県のコンクリート構造物を事例に－

琉球大学 工学部 工学科  
社会基盤デザインコース

富山 潤

- ・コンクリート構造物の劣化の症状としくみ
- ・沖縄県の地理的特徴と環境作用
- ・塩害劣化＆アルカリシリカ反応(ASR)事例
- ・沖縄県の耐久設計の変遷
- ・100年耐久性を目指した取り組み
- ・まとめ

# コンクリート構造物の劣化の症状としくみ

## <言葉の定義>

- **劣化**

時間の経過に伴って、材料や構造の性質に衰えが生じ、進行するものを指す。

- **初期欠陥**

施工時に発生するひび割れ、豆板、コールドジョイントなどを指す。

- **損傷**

外力による短時間に生じるひび割れ剥離などを指す。

- 劣化
- 初期欠陥
- 損傷
- その他症状

**変状**

# コンクリート構造物の劣化の症状としくみ

## <コンクリートそのものの劣化と異常>

- **アルカリシリカ反応(ASR)**: 反応性骨材による劣化現象
- **凍害**: 凍結融解作用による劣化現象
- **化学的侵食**: 酸性物質や硫酸イオンによる劣化現象

## <鉄筋の異常>

- **塩害**: 塩化物イオンによる鉄筋（鋼材）の腐食
- **中性化**: 二酸化炭素による鉄筋（鋼材）の腐食

## <初期欠陥>

- 豆板（ジャンカ），コールドジョイント，収縮ひび割れ，温度ひび割れ，など



## <その他>

- **疲労**: 大型車通行量や繰り返し荷重による
- **すり減り**: 摩耗による

疲労による床版下面のひび割れ

# 初期欠陥によるひび割れの例



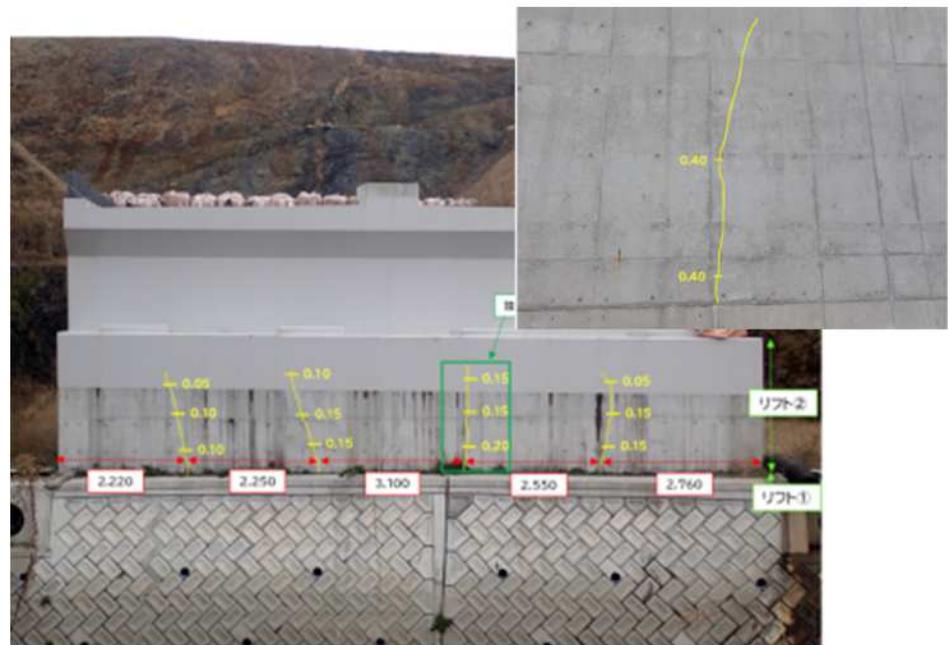
ジャンカ（豆板）



コールドジョイント



乾燥収縮ひび割れ



# 沖縄県の地理的特徴と環境作用

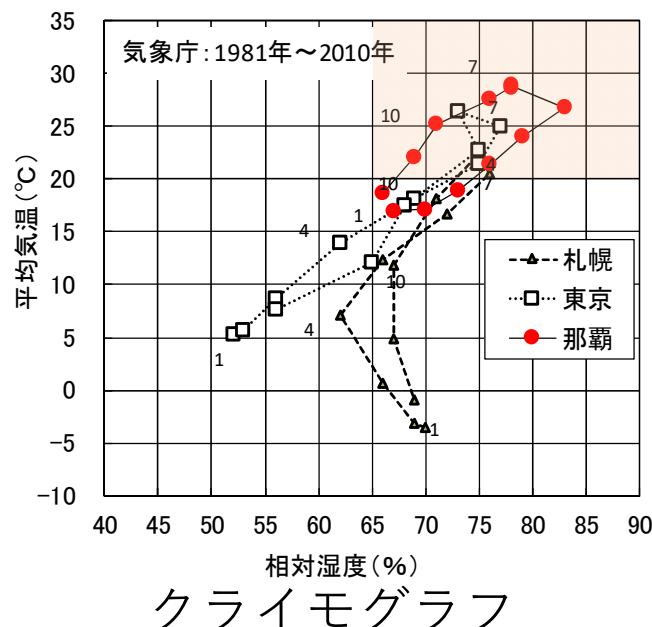
## (地理的特徴)



→ 離島苦解消

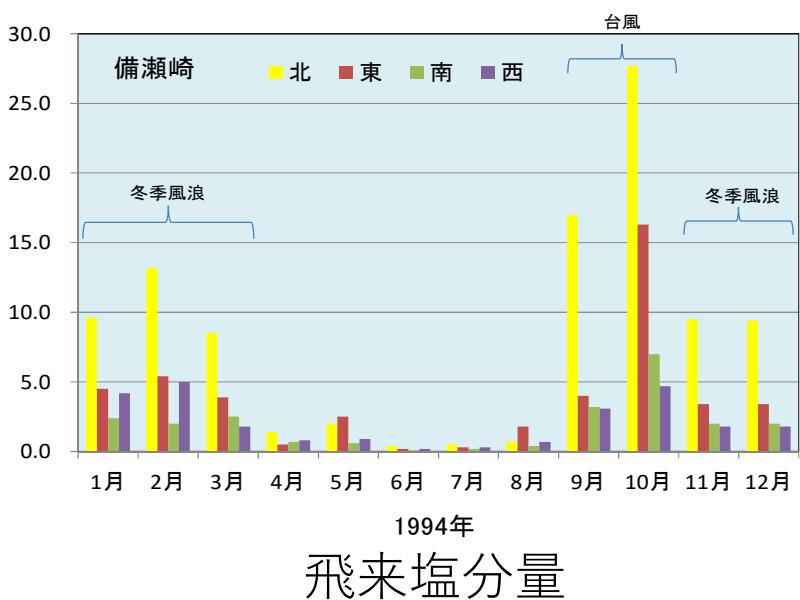
沖縄→島嶼環境

## (環境作用)



+

飛来塩化物イオン量 (mg/cm<sup>2</sup>/day)



※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）

## 完成離島架橋：21橋

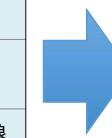
- ①本土復帰前に完成した橋：1橋
- ②本土復帰後に完成した橋：20橋
  - ・うち国土交通省所管：17橋（国直轄：2橋、県施工：13橋、市町村施工：2橋）
  - ・うち農林水産省所管：2橋（県施工：2橋）
  - ・うち経済産業省所管：1橋（市町村施工：1橋）

※多くの離島架橋を抱えている！

番号	橋名	市町村名
1	桃原橋	うるま市
2	奥武橋	南城市
3	宮地奥武橋	名護市
4	伊計大橋	うるま市
5	頭廻大橋	本部町
6	斎地大橋	うるま市
7	慶留間橋	座間味村
8	波間大橋	宮古島市
9	星袋大橋	名護市
10	美間大橋	宮古島市
11	宮城橋	大宜味村
12	添比嘉大橋	うるま市
13	奥武橋	久米島町
14	世間橋	うるま市
15	平安座島中大橋	うるま市
16	塔屋大橋	大宜味村
17	阿嘉大橋	座間味村
18	野舟大橋	伊平屋村
19	古宇利大橋	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  
→大規模かつ海上橋



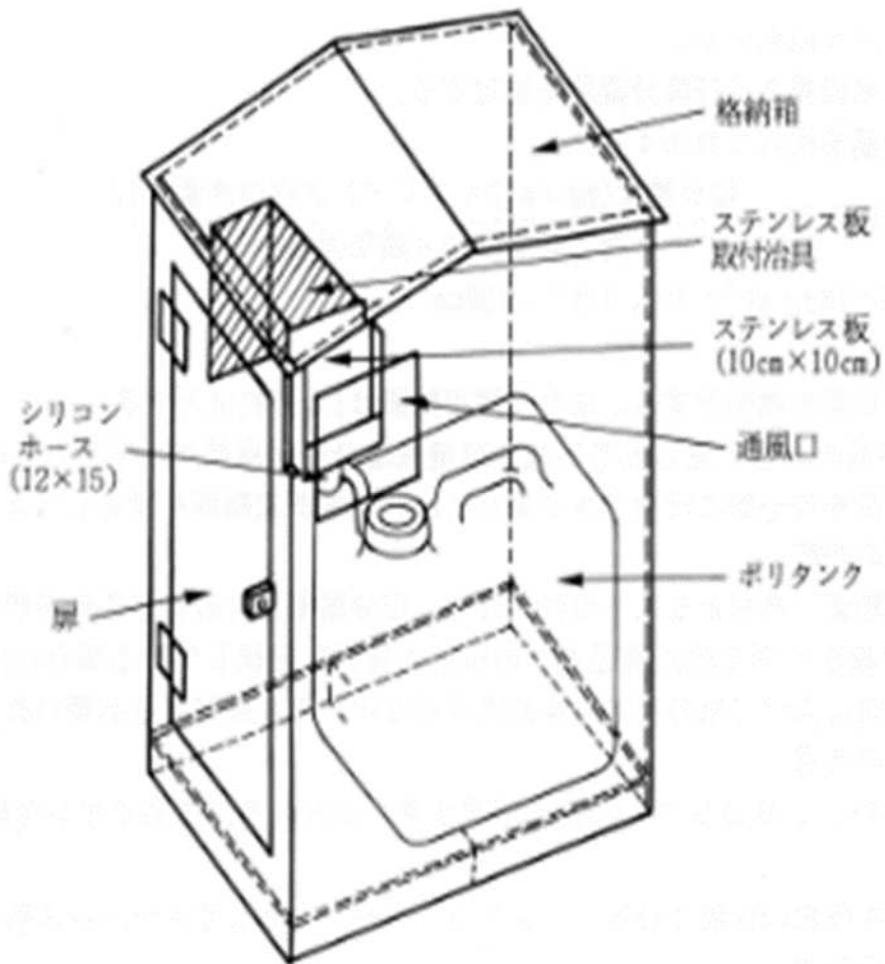
構造物に  
とって過酷  
な自然環境



劣化速度が速い



# 土研式飛来塩分捕集器



## 土研式飛来塩分捕集器（原理）

通風口から侵入した塩分が、奥の $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ のステンレス版に付着する。付着した塩分を内部に設置したポリタンクに水で洗い流す。ポリタンクを回収し、回収した塩分を電位差滴定法で分析する。



土研式飛来塩分捕集器（1方向）

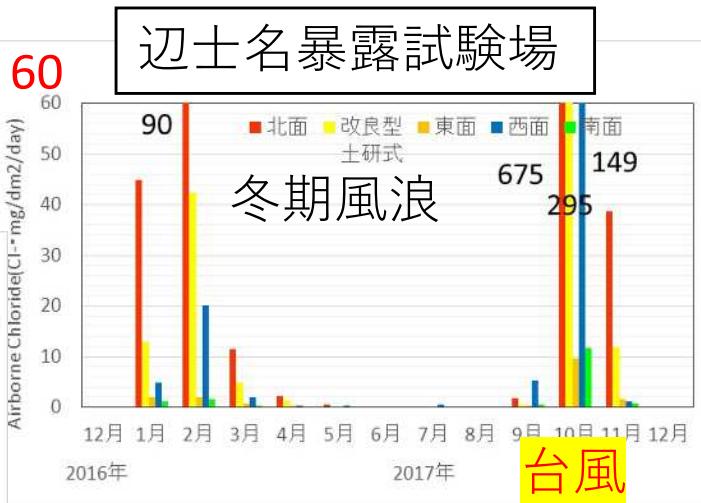
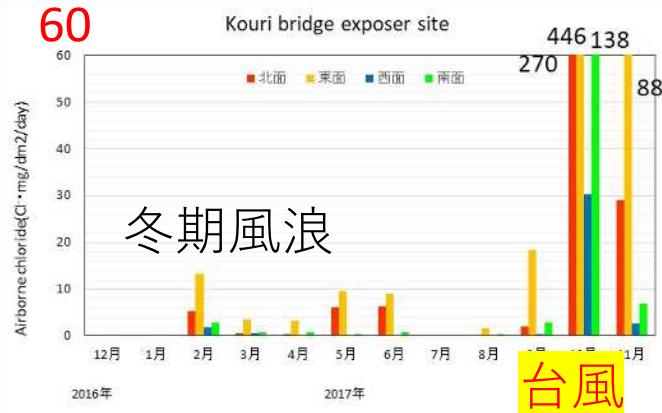


土研式飛来塩分捕集器（4方向）

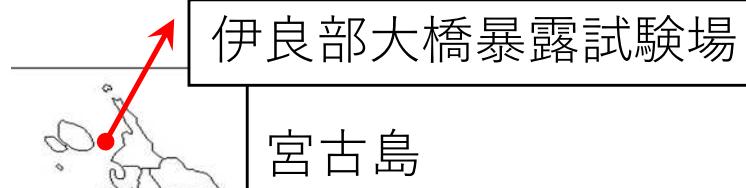
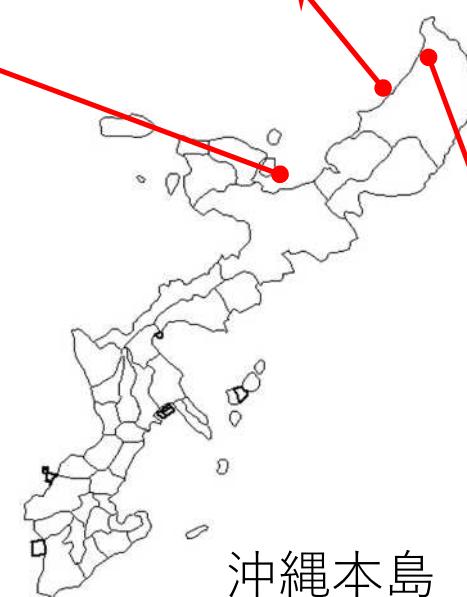
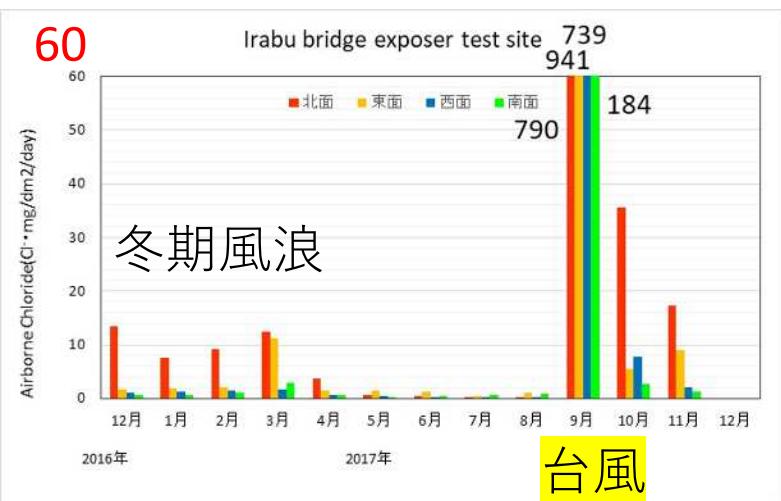
# 塩害環境調査（暴露試験場）（2017年）現在も継続

飛来塩分 (Cl<sup>-</sup>:mdd)

古宇利大橋暴露試験場



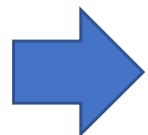
土研式タンク（4方向）



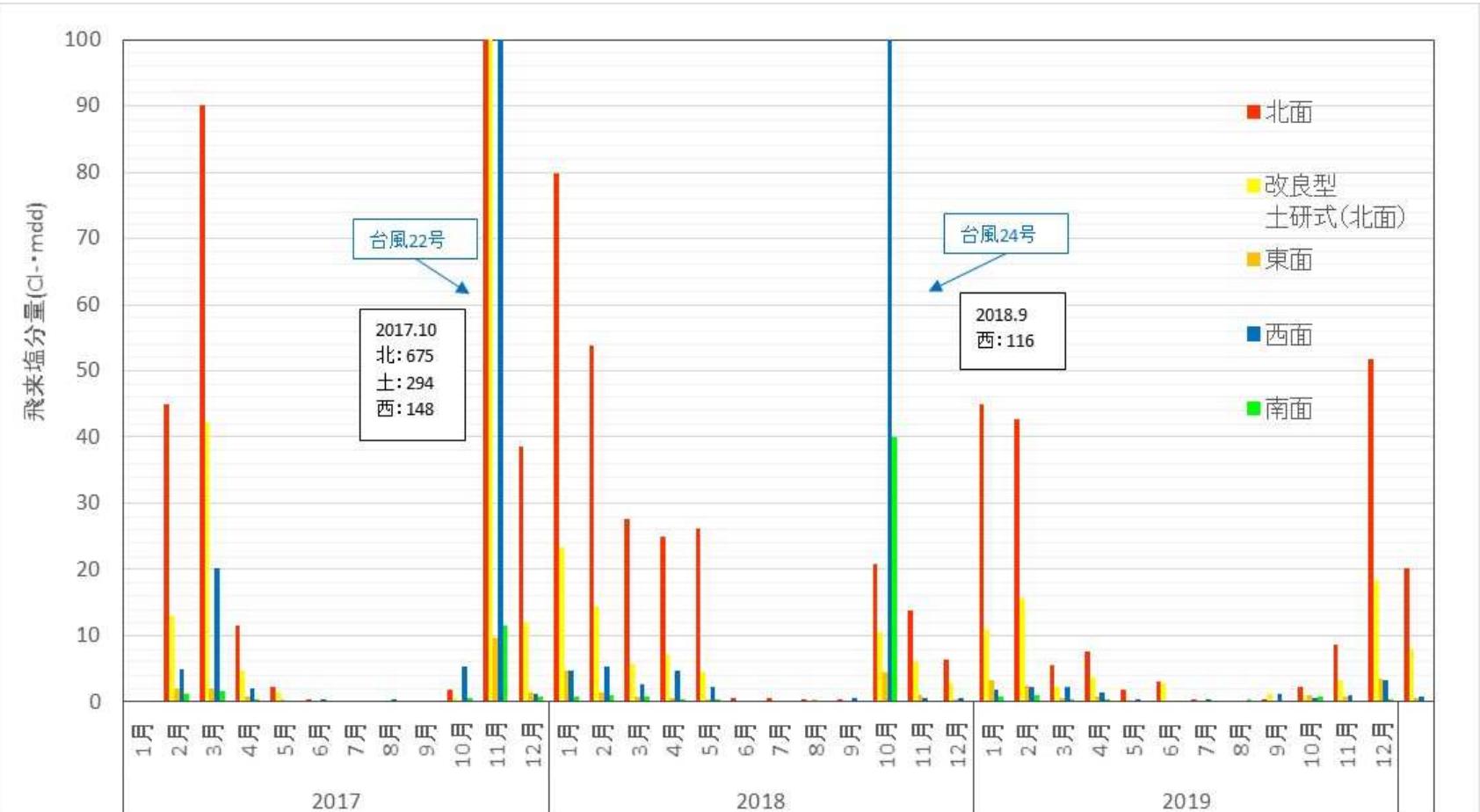
冬季風浪と台風により、多くの塩分が海から供給される環境である。

# 塩害環境調査（2017年～2019年）

- 冬季風浪と台風により大量の飛来塩分供給環境



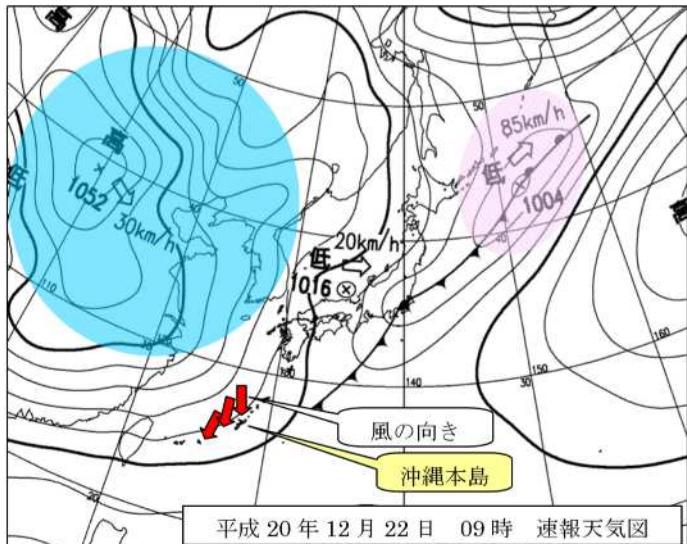
鋼材腐食開始が速い



土研式飛来塩分捕集器を用いた塩害環境調査（辺土名暴露試験場）

# 気象場の豆知識（飛来塩分発生について）（付録）

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）

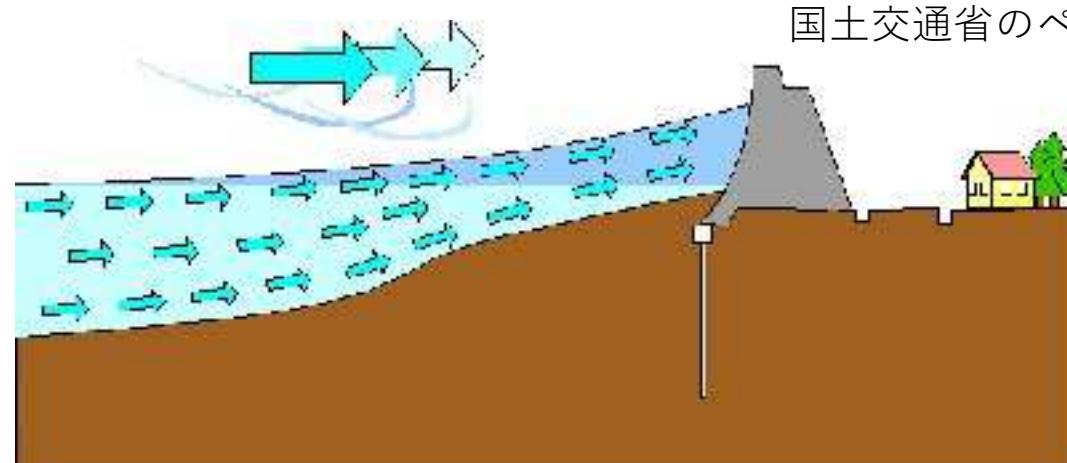
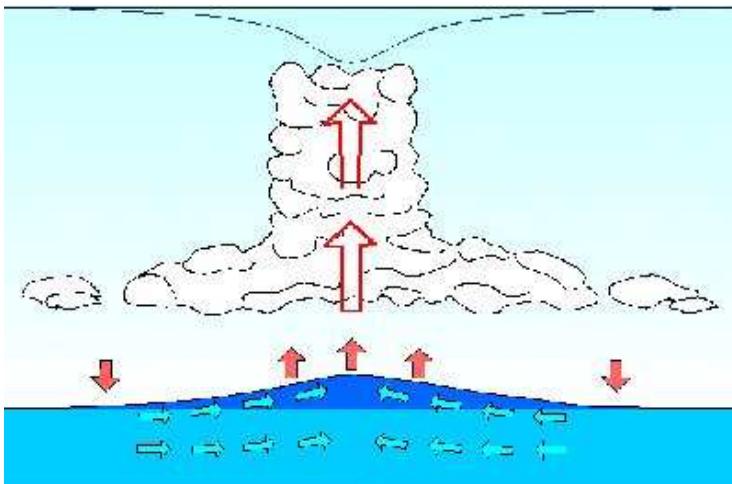


冬季の西海岸（沖縄県）

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

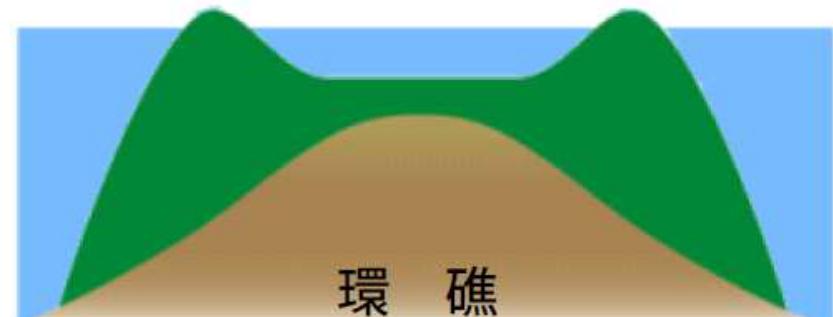
※気圧が1hPa低下すると、海面が約1cm上昇する。※風は気圧の高いところから低いところに流れる性質がある。

# サンゴ礁と飛来塩分の関係

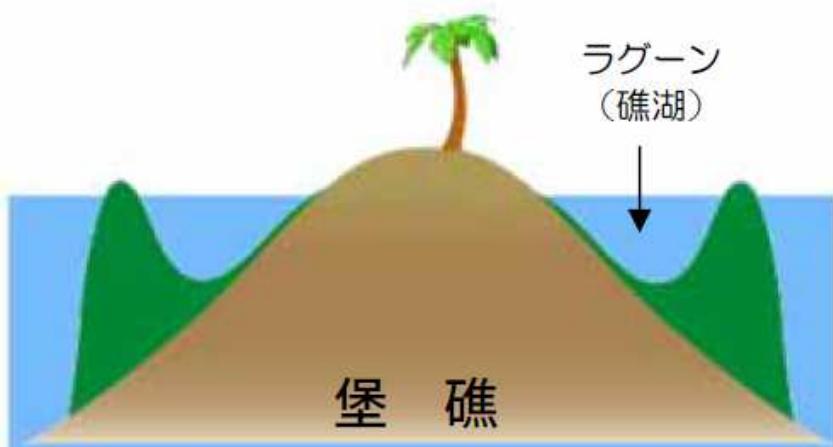
サンゴ礁が作る3つの地形、**裾礁（きょしょう）**・**堡礁（ほしょう）**・**環礁（かんしょう）**  
沖縄で最も多い**裾礁（きょしょう）**の断面模式図と代表的な育成サンゴ



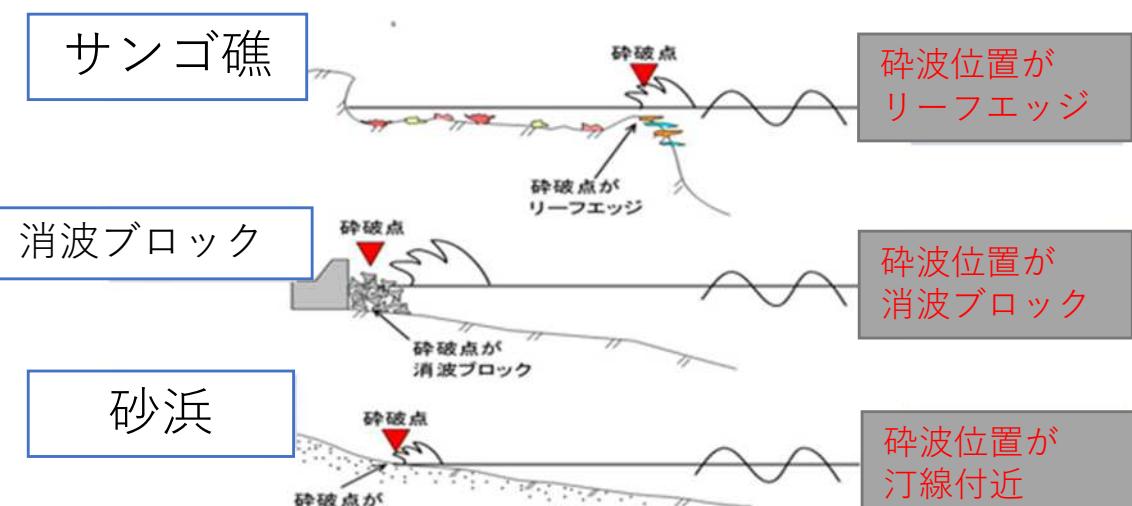
島の周囲をサンゴ礁が囲んでいます。  
サンゴは沖へ沖へと成長していきます。



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）ができるています。



海岸の種類と碎波位置

# リーフエッジ+海岸線の2段階碎波の例



## 劣化事例（塩害，ASR）

# 沖縄県の経年劣化の主要因のまとめ

- 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】

2,500m<sup>3</sup>の砂を積み上げ約3,000 tの工業用水を4日間連續散水。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、飛沫などの海由來の塩分

- 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

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）

※海砂に起因したASR劣化は軽微かつ限定的である。

# コンクリート中の鉄筋はなぜ腐食する？

- 一般的にコンクリート中は pH12-13の高アルカリ環境である。
- そのような環境では、コンクリート中の鋼材表面に不働態被膜（酸化被膜）が形成され、鋼材腐食を抑制する。



不働態被膜

なぜコンクリート中の鋼材は腐食するのか？

塩化物イオン

不働態被膜の破壊・消失により、鋼材腐食がスタートする。

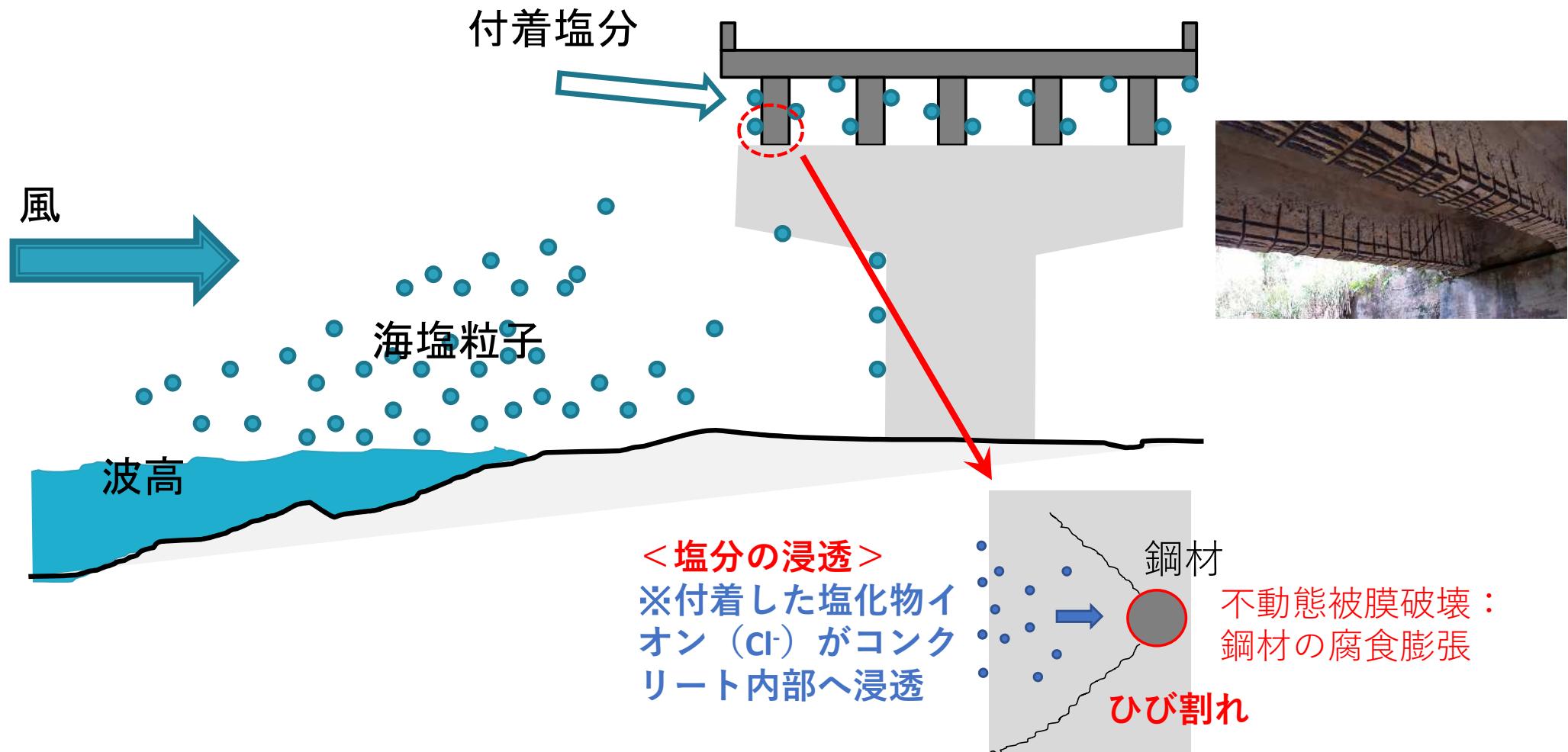
中性化

※腐食反応に必要な水と酸素はコンクリート中に存在する。

# 外来塩分による塩害の模式図

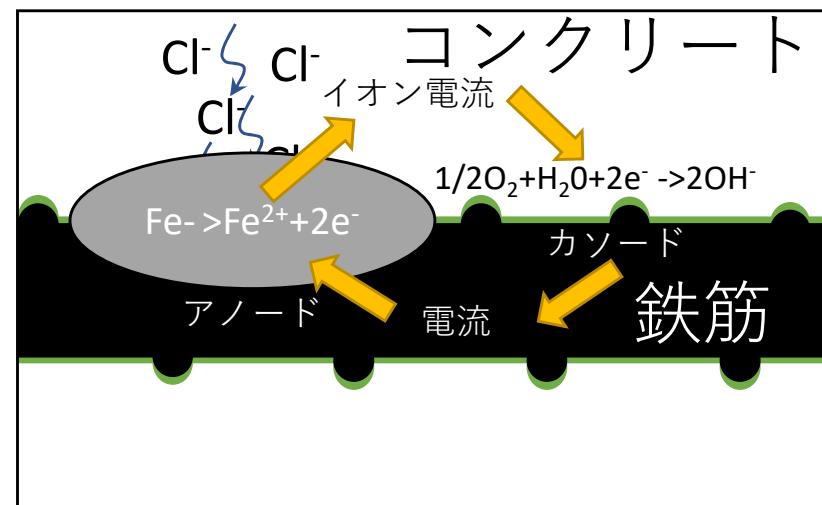
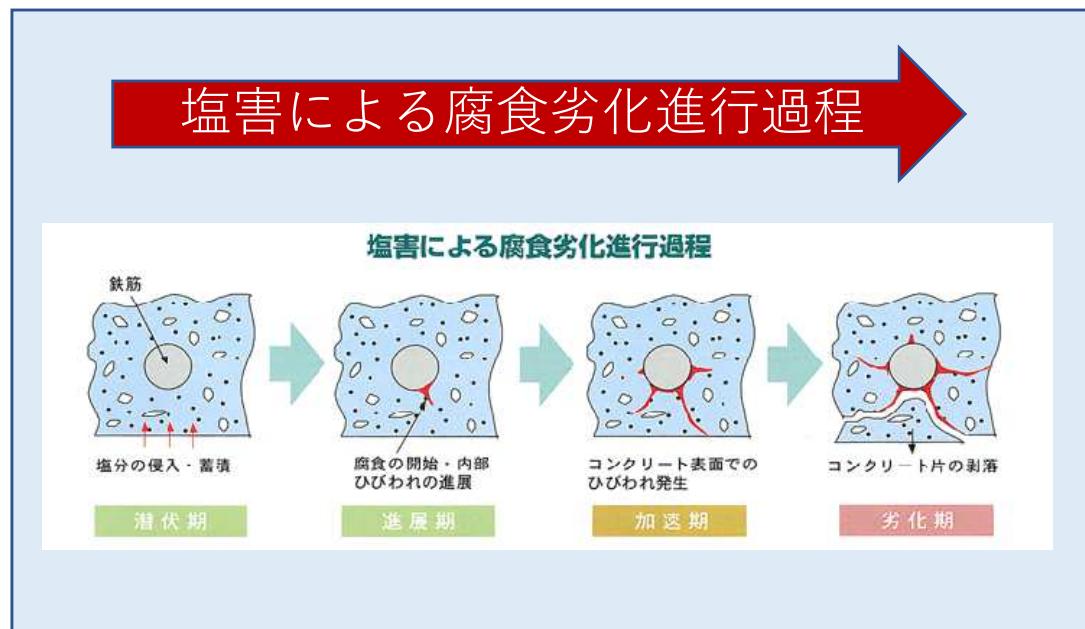
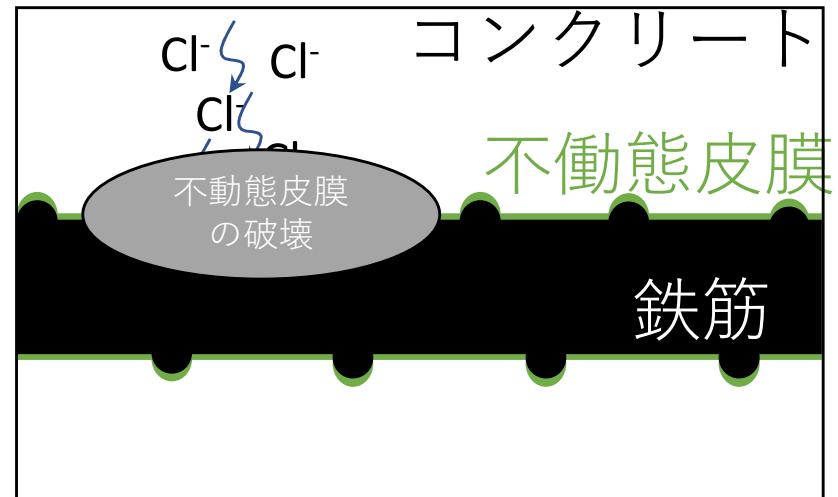
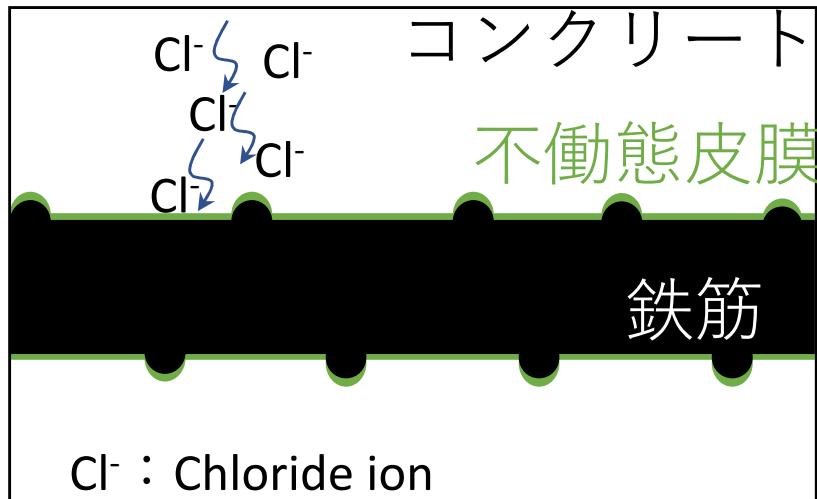
塩化物イオンは、どこから供給されるのか？

沖縄県の場合は、四方を海に囲まれているため、海から供給される。

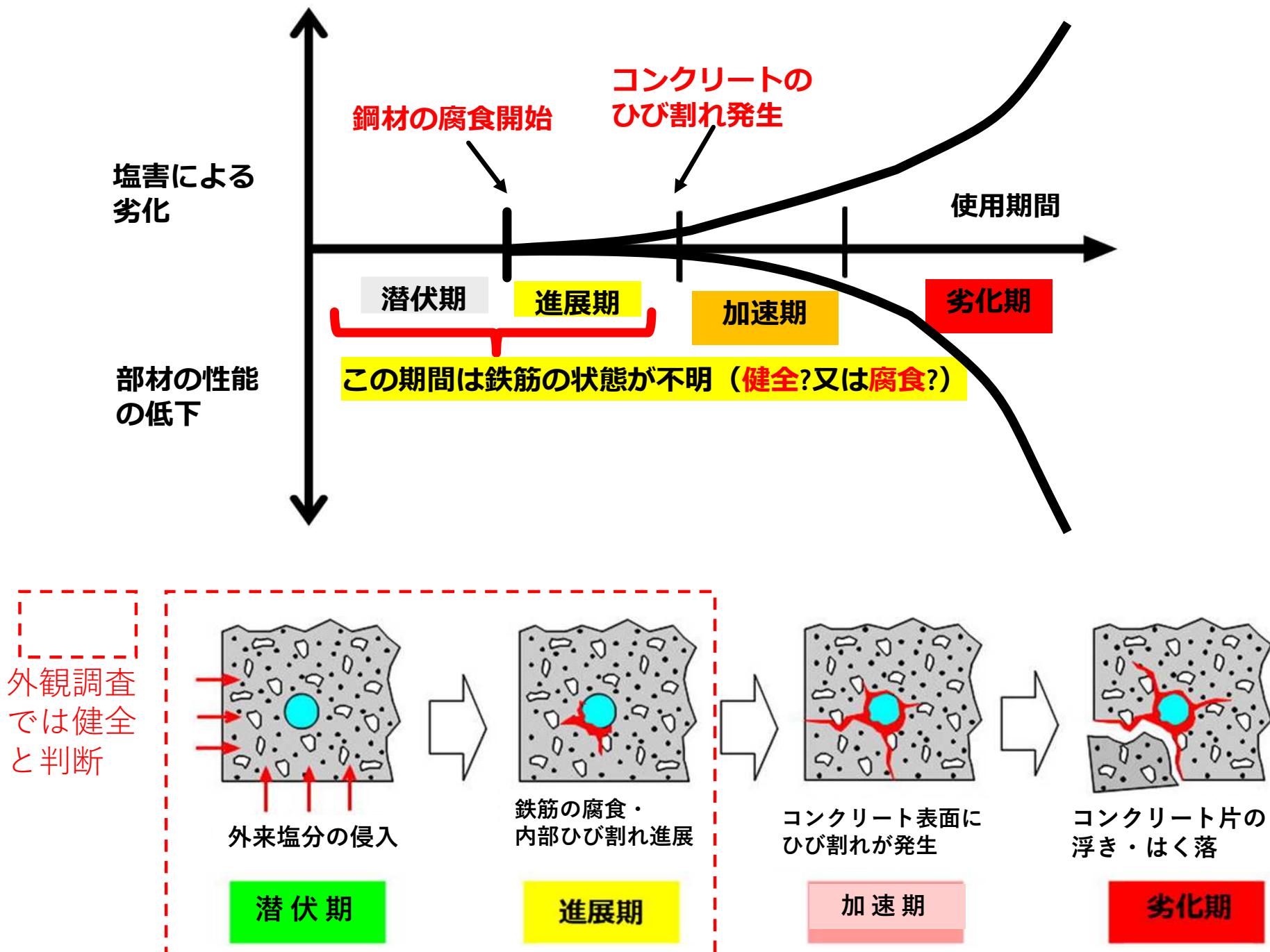


# 塩害劣化のしくみ

Cl<sup>-</sup> 塩化物イオン



# 塩害劣化の劣化進行過程



# 塩害の劣化過程の例



## 【潜伏期】および【進展期】

- ・まだ変状は生じていない



## 【加速期前期】

- ・軽微なひび割れや浮きが発生



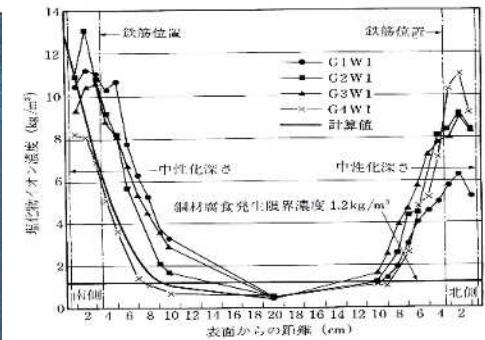
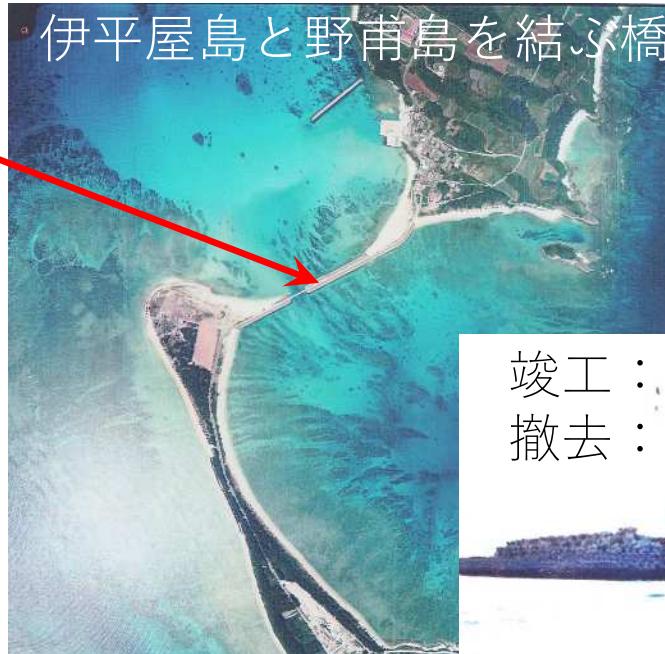
## 【加速期後期】

- ・ひび割れや浮き、剥離が多数発生

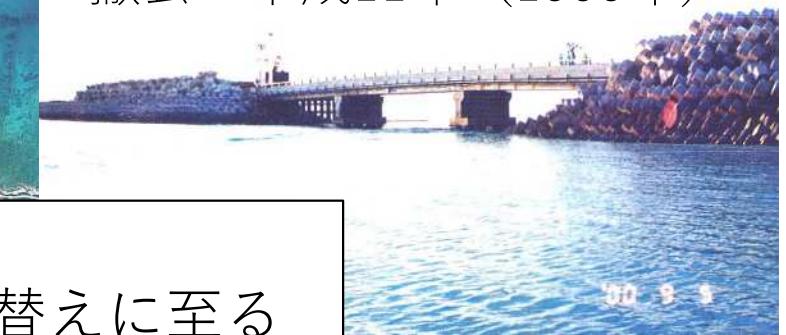
## 【劣化期】

- ・大規模な剥落、鉄筋断面減少

# 塩害劣化事例（旧野甫大橋）



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



# 新野甫大橋の耐久性設計

アール・アンド・エー 風間洋氏 提供

新野甫大橋  
(2004年3月開通)

PC5径間連続変断面箱桁橋  
橋長320m (54.25+3@70+54.25)



- 塩害対策：
1. かぶりの確保 70mm
  2. エポキシ樹脂塗装鉄筋の採用
  3. エポキシ樹脂塗装PC鋼材の採用
  4. ポリエチレンシースの採用

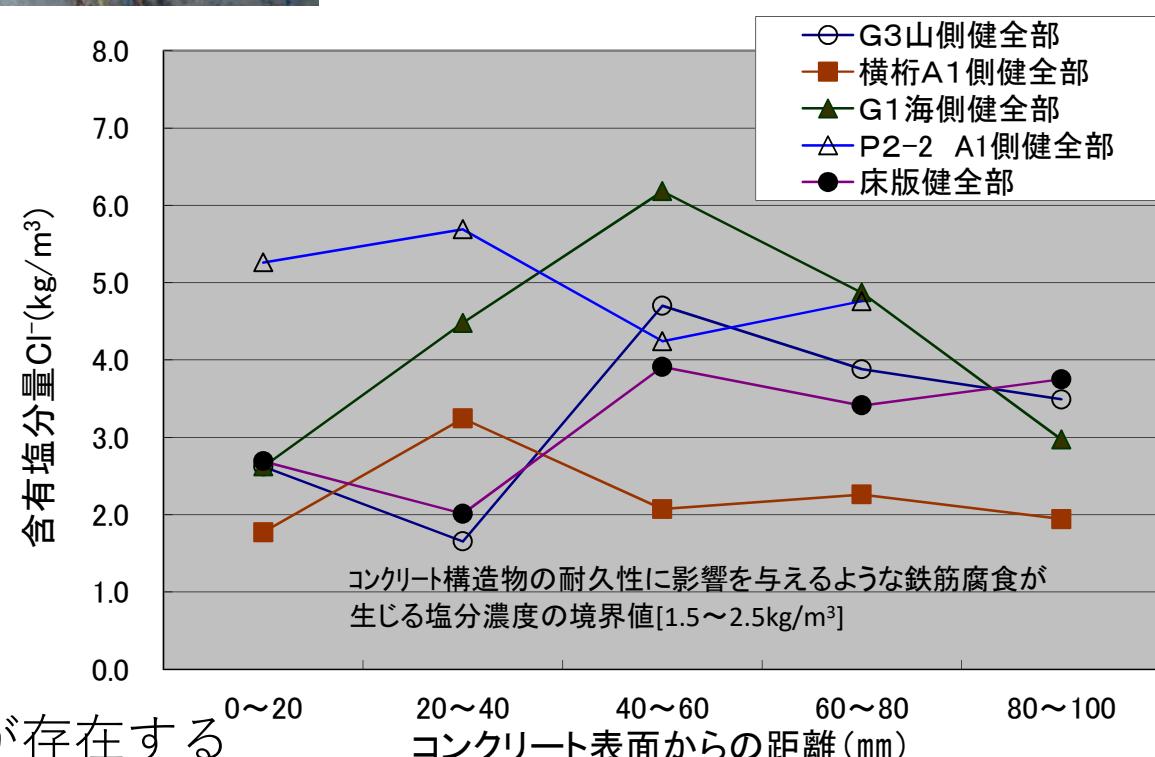
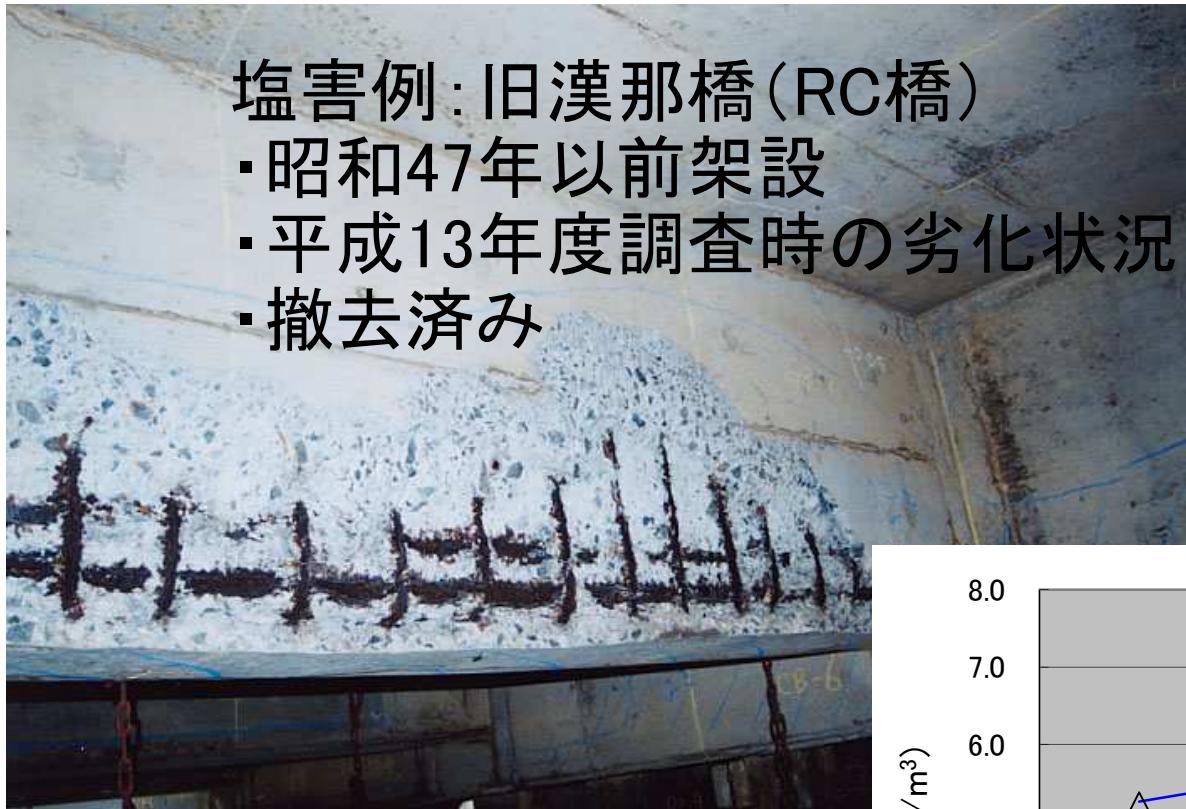
# コンクリート構造物の塩害劣化事例

## 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年以前架設
- 平成13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:PC橋

復帰直後（昭和50年）に海洋博関連工事で建設された



平成4年度調査時の劣化状況

# 塩害劣化事例（その他）



# 沖縄の現場打ち函渠で観られる劣化事例

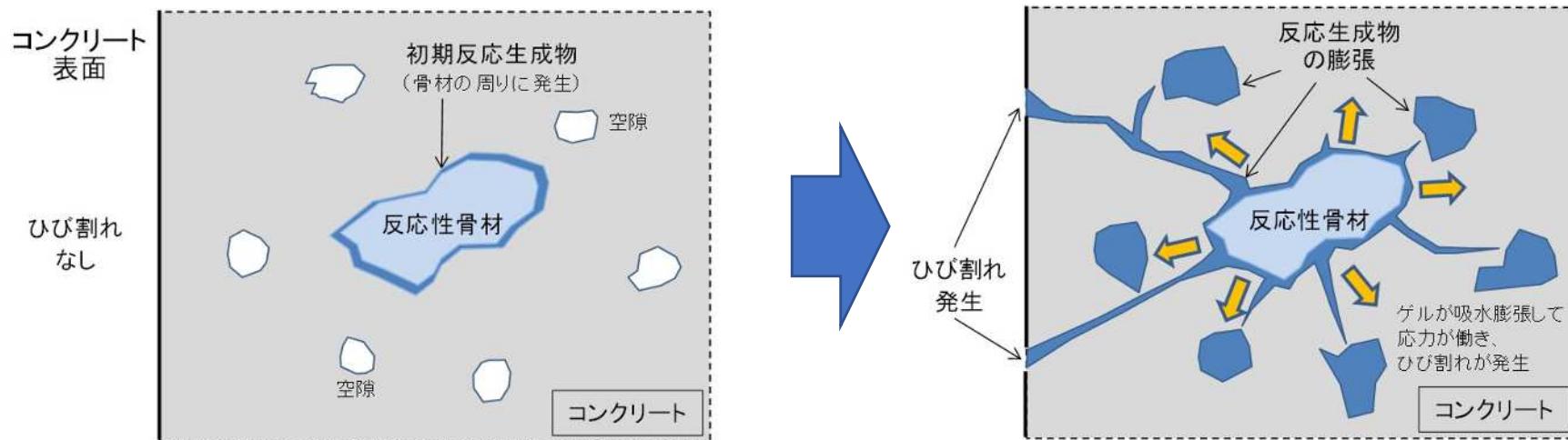


➤ 側壁は見た目健全で、頂板下面の劣化が著しい事例が多い。



# 沖縄県におけるASR劣化の問題点

## ASR劣化の模式図



## ASR劣化事例（台湾産骨材起因:遅延膨張性）



コンクリートに  
有害なひび割れ  
+  
場合によっては  
鉄筋破断

## 反応速度によるASRの分類

- 急速膨張性
- 遅延膨張性

## 沖縄県のASRに対する問題点

細骨材に使用している海砂に遅延膨張性を示す鉱物が含まれている。



遅延膨張性ASRの危険性を、現行のJIS ASR試験(化学法、モルタルバー法)では検出できない。

# ASR劣化に起因したひび割れパターン



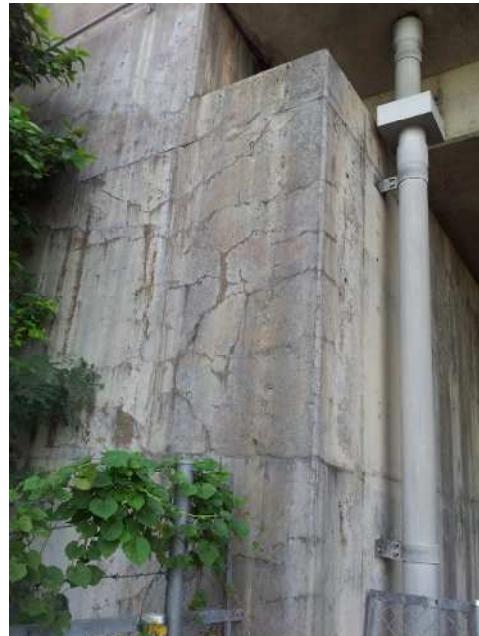
内部拘束力が小さい場合



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



水掛けりの影響



# 遅延膨張性ASR劣化事例

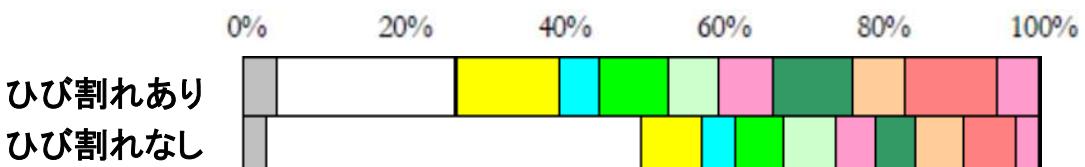


A 高架橋

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。



■ サンゴ	□ 石灰岩	■ 石灰岩（不純物）
■ ドロマイトイ質	■ 安山岩	■ 砂岩
■ シルト岩	■ 泥岩、頁岩	■ 珪質頁岩
■ チャート	■ 粘板岩、千枚岩	■ 再結晶チャート
■ コーサイト	■ 石英	■ 緑岩



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

# 沖縄県の海砂の遅延膨張性ASRについて

- 細骨材に海砂使用 → 遅延膨張性ASRのリスク

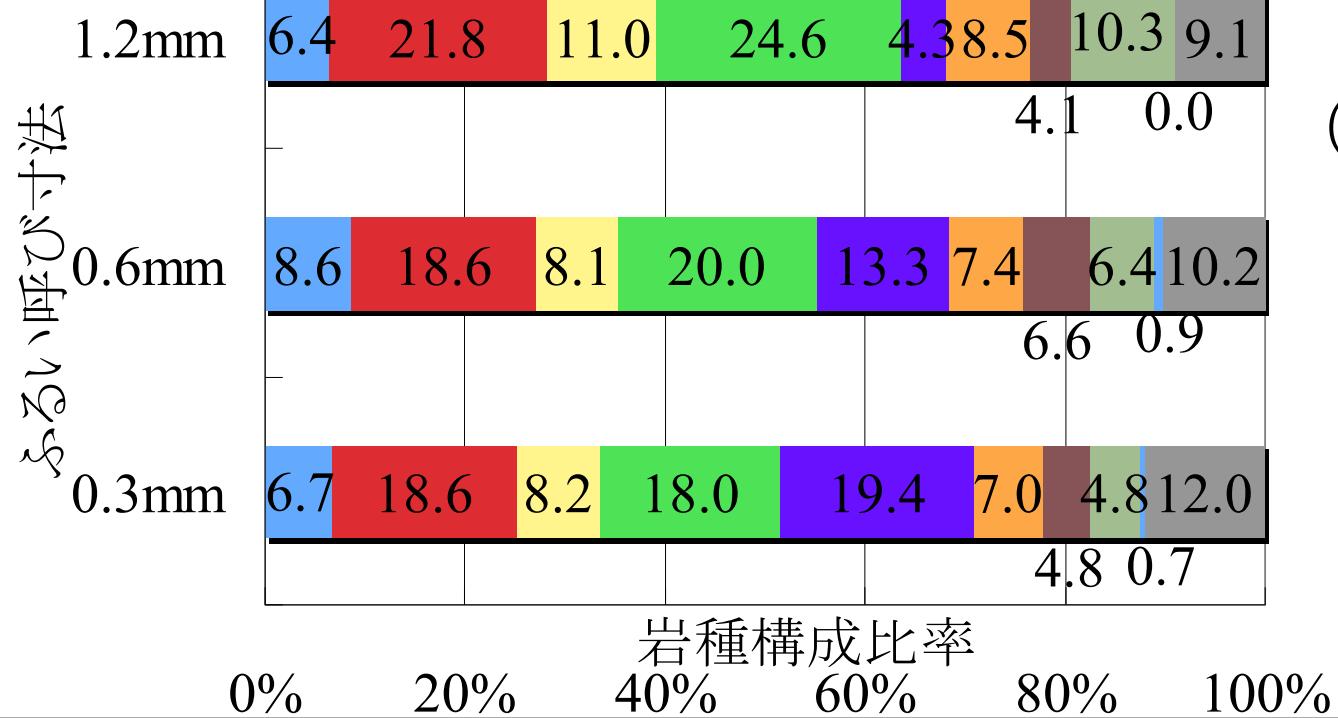
本部産石灰岩碎砂

+

新川沖産海砂

混合砂

反応性（80%以上）



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

堆積岩  
(珪質粘板岩, 珪岩等)

变成岩  
(砂岩, 泥岩等)

微晶質石英や隠微晶質石英

遅延膨張性ASRの可能性

新川沖産海砂の岩種構成比

# ASR劣化事例（A大橋）



台湾産粗骨材によるASR損傷例



フーチング上面・側面(ひびわれ)



フーチング鉄筋破断状況

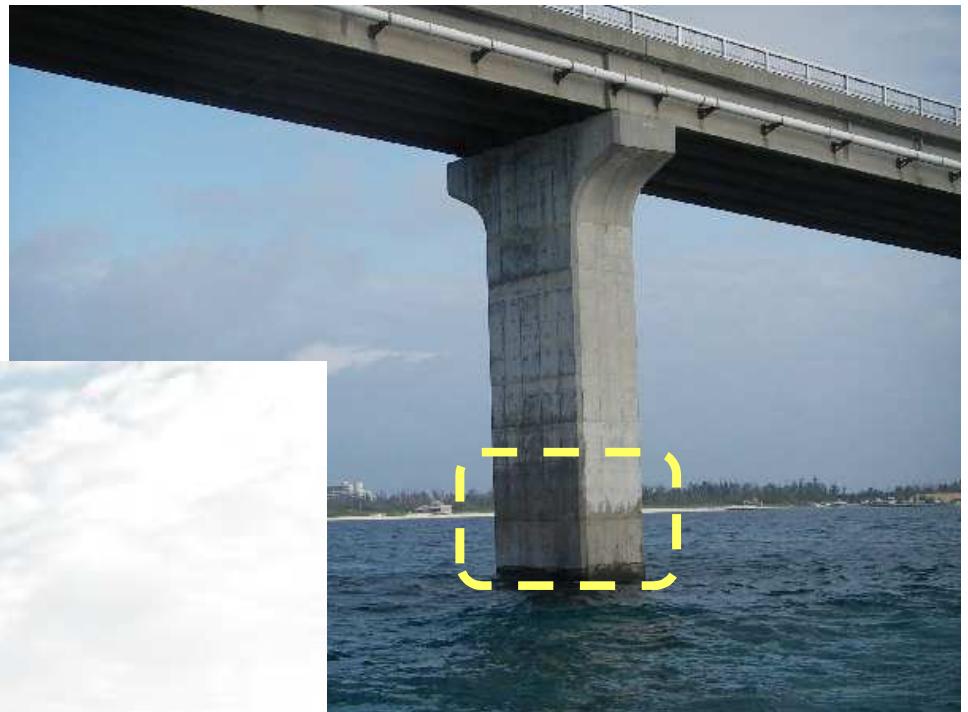
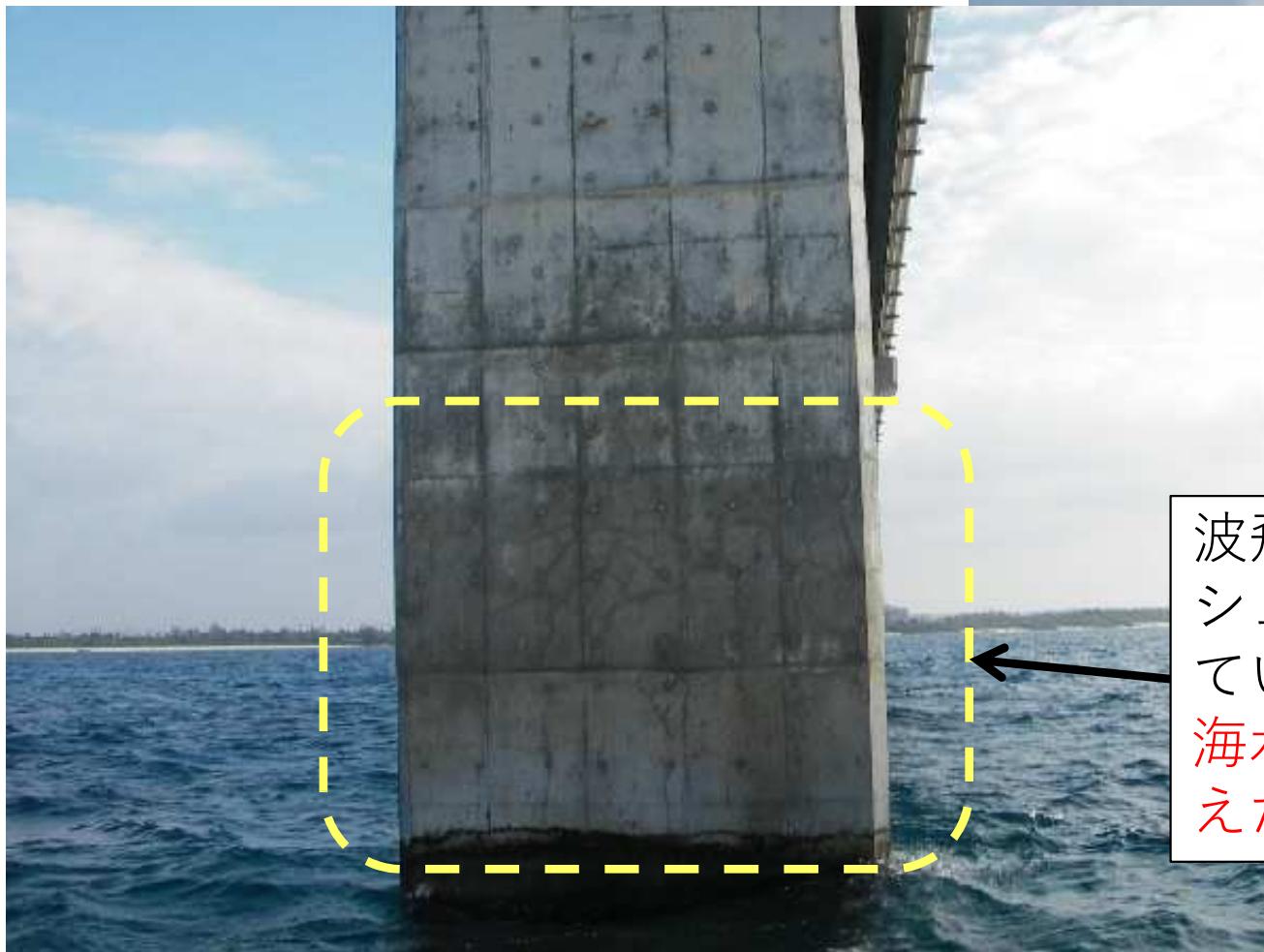
# ASR劣化事例（B大橋）

台灣産川砂(細骨材)によるASR

海上橋の橋脚

※外来アルカリがASRの進行を

助長した事例



波飛沫のかかるスプラッシュゾーンにASRが発生している。  
海水がASR劣化に影響を与えた事例

## ASR劣化事例（C橋）

C橋

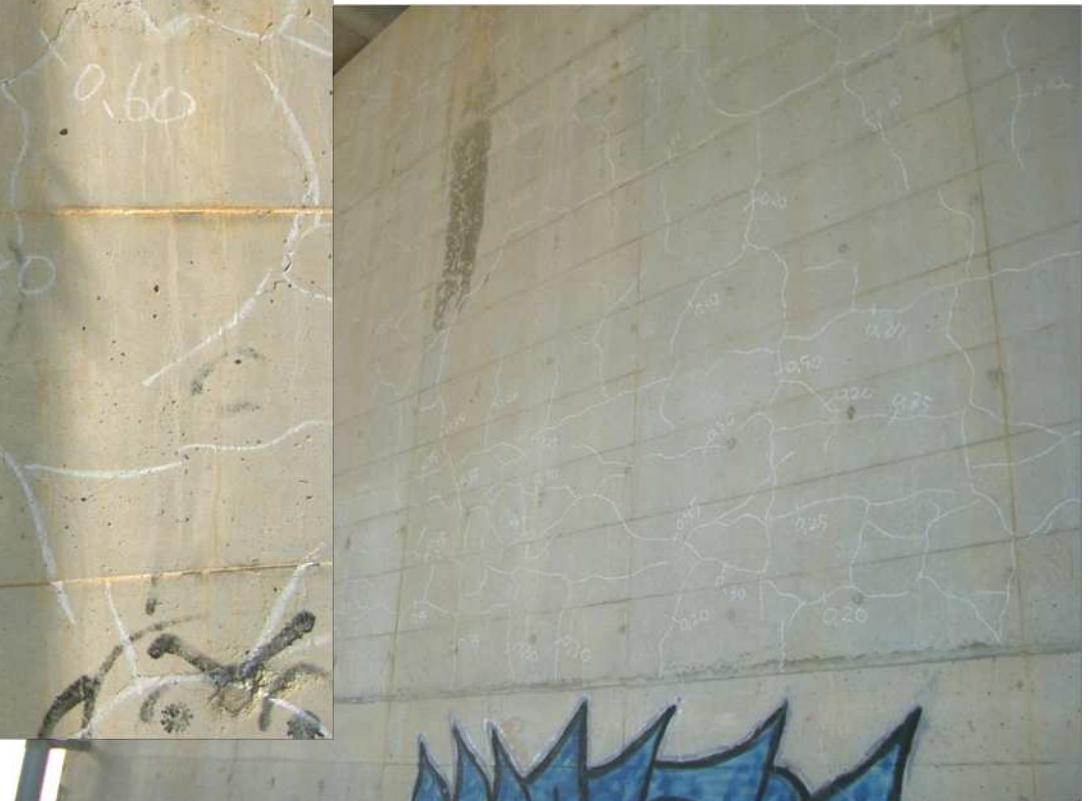
## 架設環境：內陸部

竣工年：下部1983年、上部1984年

## 損傷状況: 橋台, 橋脚にASRが発生

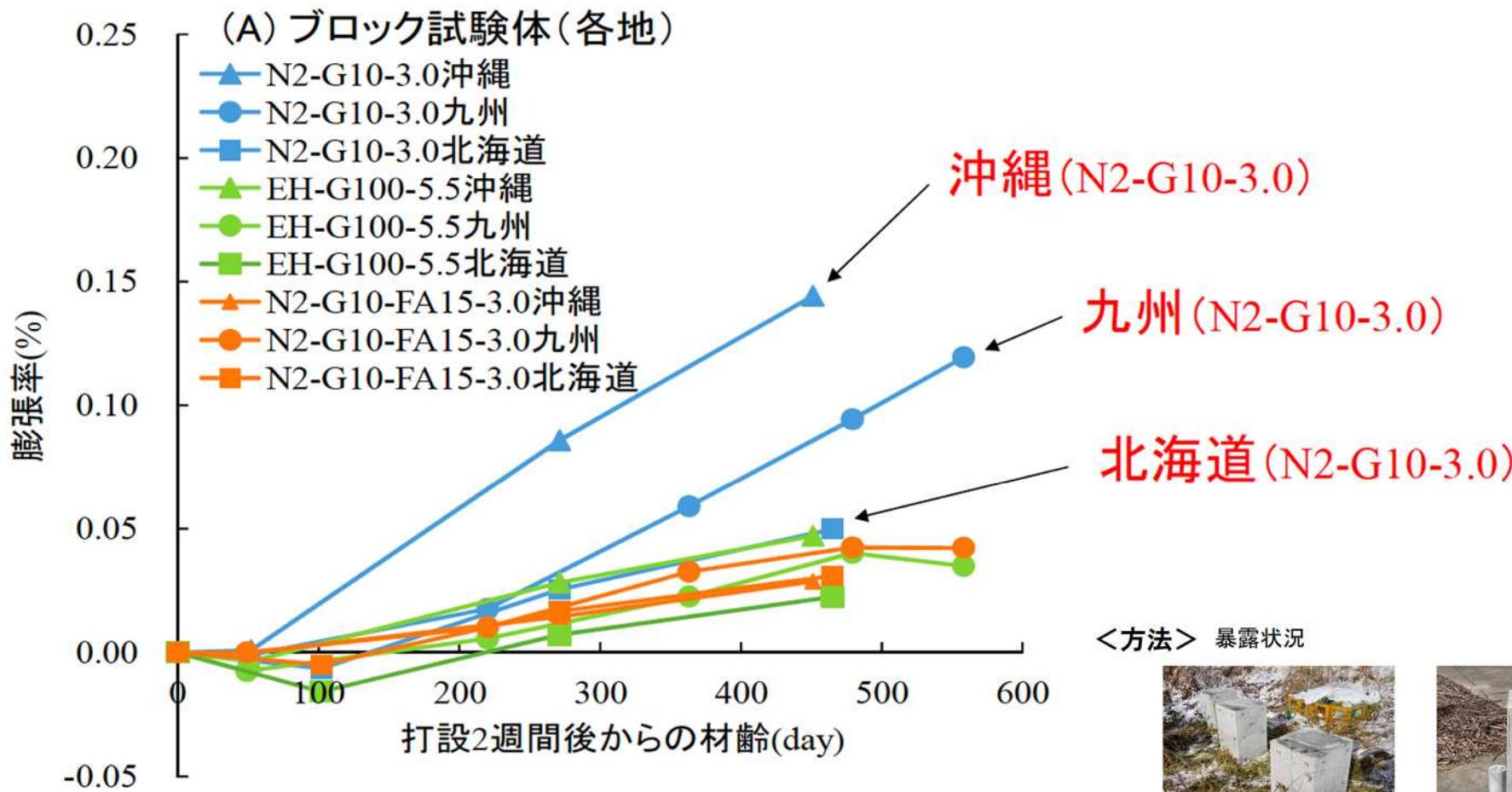


# 県内産ヒン岩(粗骨材) によるASR



# 沖縄県のASRは、進行が早い！

## <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、膨張量が大きい結果となった。



平均気温(過去10年間)  
北海道: 6.4°C  
九州: 16.7°C  
沖縄: 23.4°C



# 沖縄県のASR劣化構造物と要因（例）

昭和50年～60年前半

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）	
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）	
上地橋（上部工）	
松本橋（上部工）	
新垣橋（擁壁）	
登又高架橋（下部工）	新川沖産海砂 (遅延膨張性)
くばが橋（下部工）	

# 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: 飛沫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径間パランドアーチ+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  
橋長: 1,960m

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

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－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

伊良部島  
伊良部大橋  
古宇利島  
宮古島

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

# 塩害対策に使用される主な材料

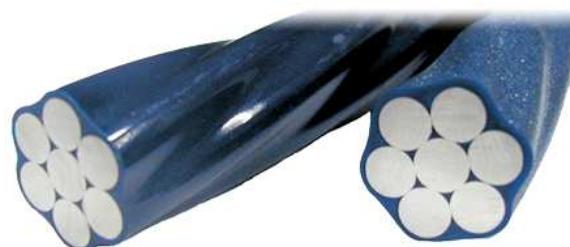


エポキシ樹脂塗装鉄筋

ステンレス鉄筋



全素線型エポキシ樹脂塗装PC鋼より線



エポキシ樹脂被覆PC鋼より線



亜鉛メッキシース



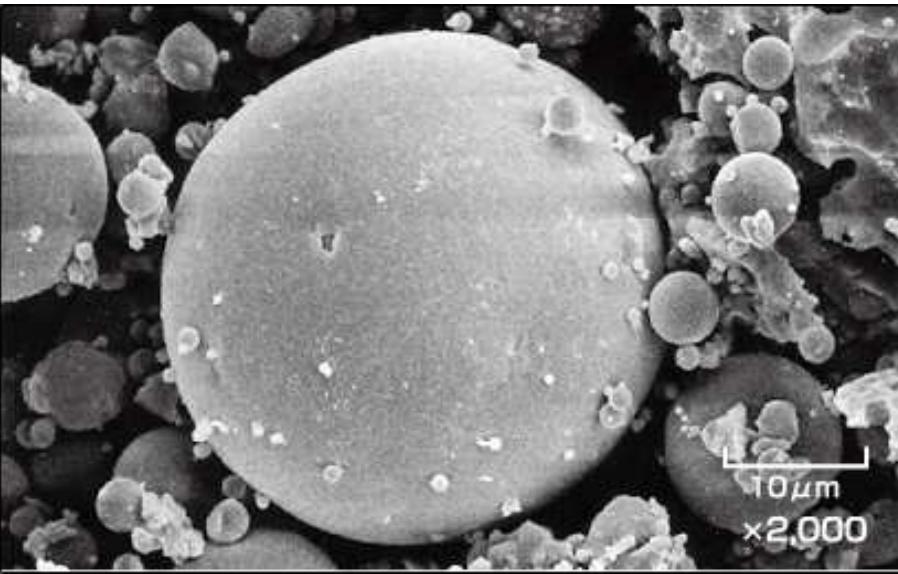
ポリエチレンシース

# 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



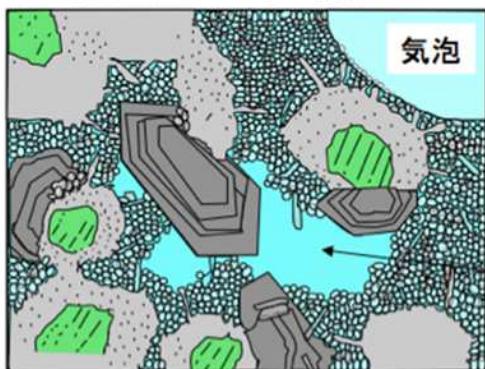
電子顕微鏡写真

- 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。
- クリンカッシュ（ボトムアッシュ）：ボイラーの中は $1,000^{\circ}\text{C}$ 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。

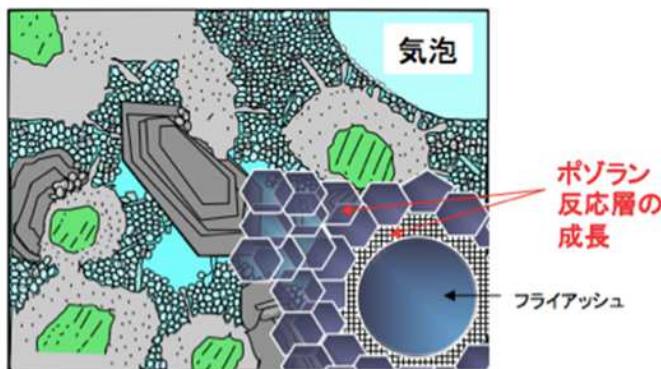
# ポゾラン反応

- セメントの水和により生成した $\text{Ca(OH)}_2$ とフライアッシュ中の $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 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

○フライアッシュがない場合



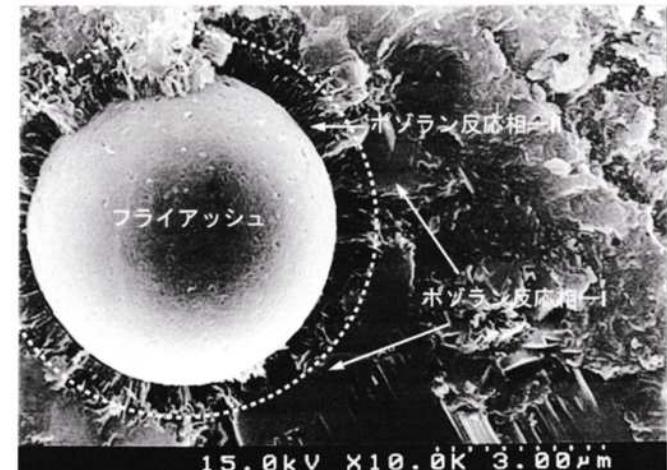
◎フライアッシュがある場合



(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)

コンクリート構造物の  
耐久性向上・長寿命化

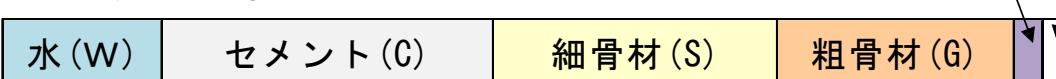
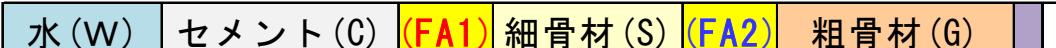
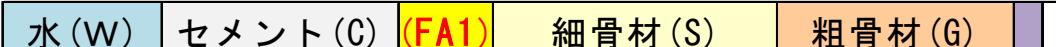
産業廃棄物の有効利用による  
環境負荷低減効果

# 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  <ul style="list-style-type: none"><li>FA1(内割り) : (C) の 20% 質量置換</li><li>FA2(外割り) : (S) の一部と質量置換</li></ul> <p>※ <math>F1+F2=100\text{kg}/\text{m}^3</math> 以下</p>	<ul style="list-style-type: none"><li>水和熱による温度上昇の抑制</li><li>ASRの抑制</li><li>塩害抑制</li></ul>	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  <ul style="list-style-type: none"><li>FA1(内割り) : (C) の 10~20% 質量置換</li></ul> <p>※ ASR抑制の場合は 15~20%</p>	<ul style="list-style-type: none"><li>ASRの抑制</li><li>塩害抑制</li></ul>	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  <ul style="list-style-type: none"><li>FA2(外割り) : (S) の 3~5% と質量置換</li></ul> <p>※ この時の (S) は碎砂のみ</p>	<ul style="list-style-type: none"><li>ASR対策</li><li>流動性の改善</li></ul>	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塞性、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塞性、耐久性が向上する
- FAの増加に伴いスランプ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)



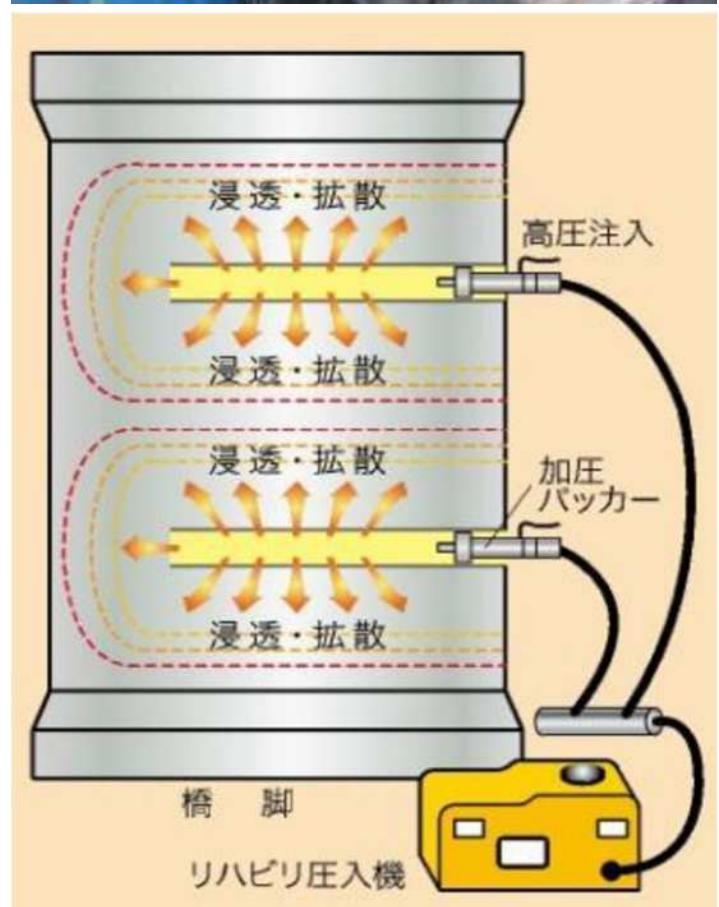
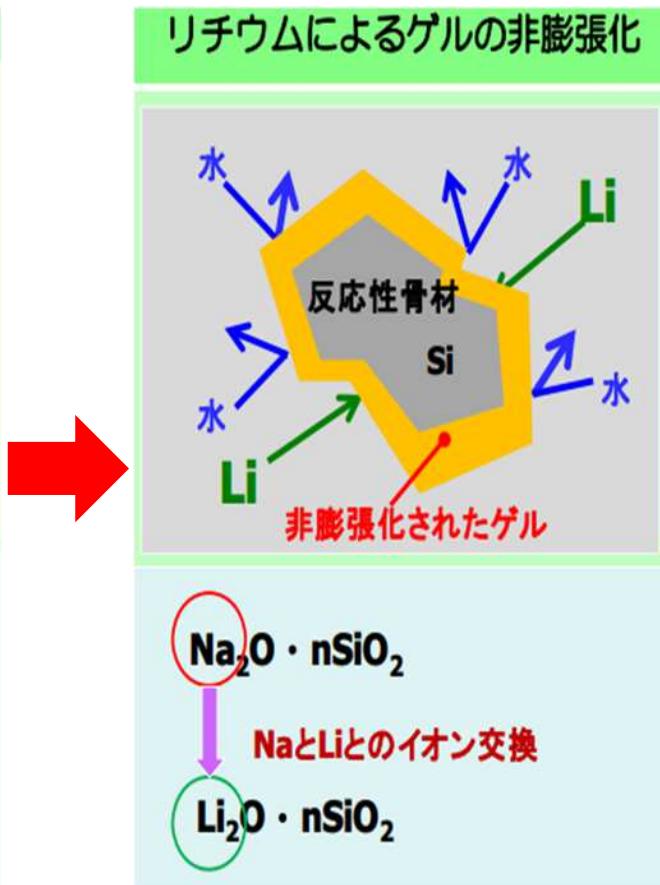
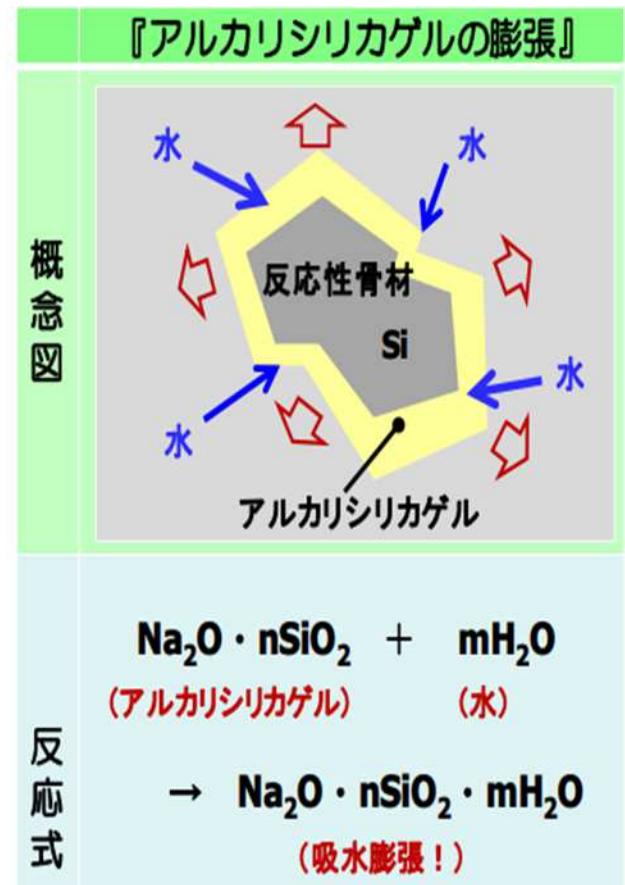
南部東道路  
(上部工：外割, 下部工：内割・外割)



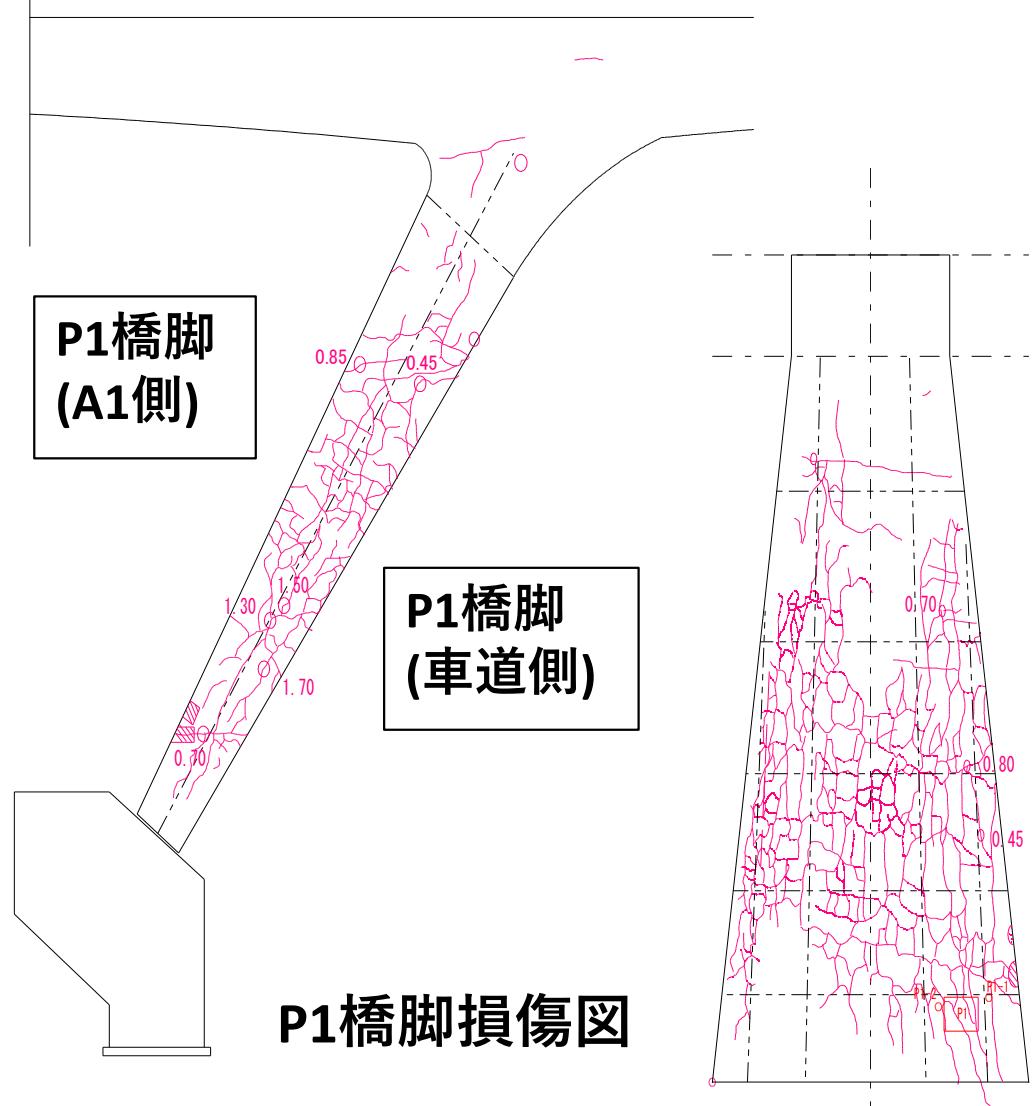
# ASRと塩害劣化に効果的な補修工法の例（付録）

## 亜硝酸リチウム水溶液の効果

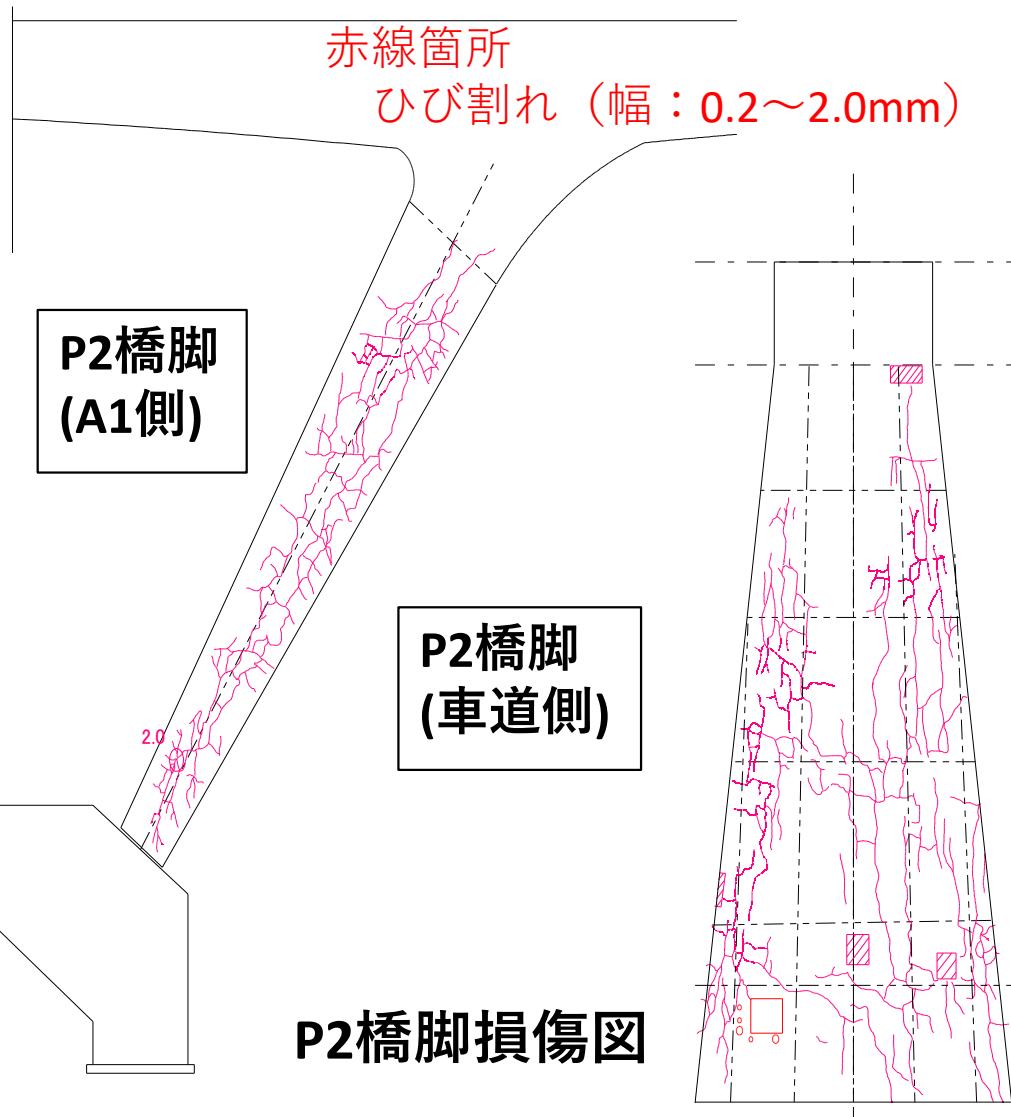
- ① 亜硝酸イオン $[NO_2^-]$ による鉄筋腐食抑制効果
- ② リチウムイオン $[Li^+]$ によるASR膨張抑制効果



# ASRと塩害劣化に効果的な補修工法の例（付録）



P1橋脚損傷図



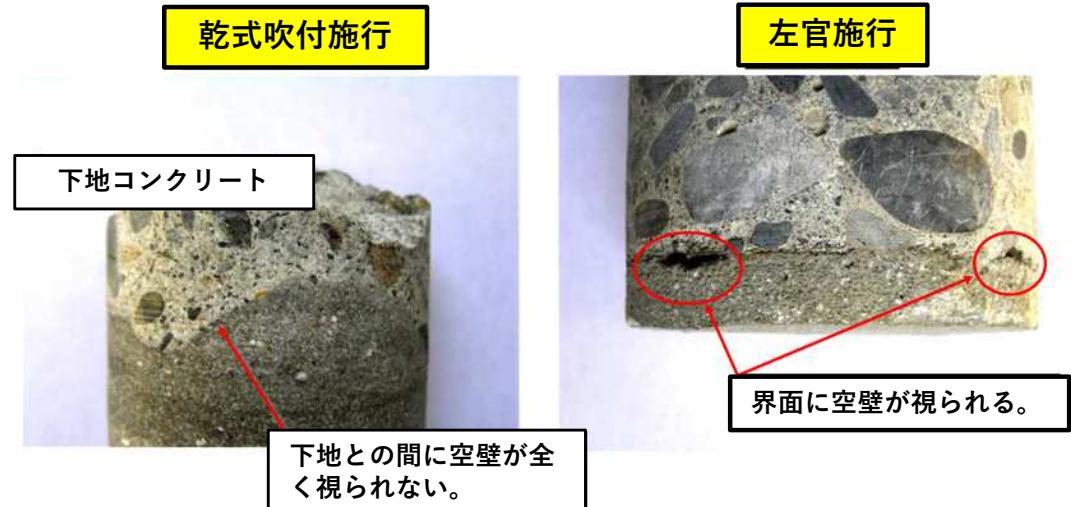
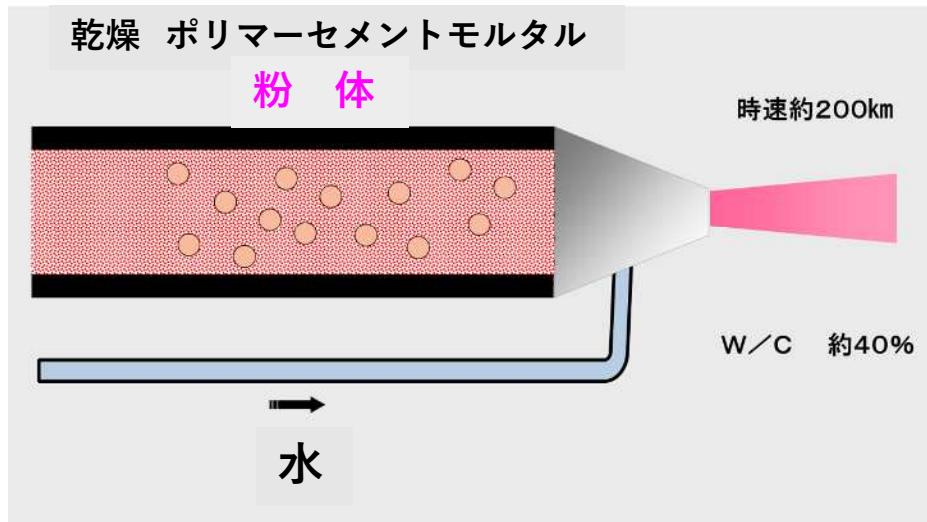
P2橋脚損傷図

- 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と思わ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剥離が生じていることも確認された。  
⇒この構造物に対して亜硝酸リチウムを圧入し、その効果確認を行っている。

# 吹付工法による断面修復の例（付録）

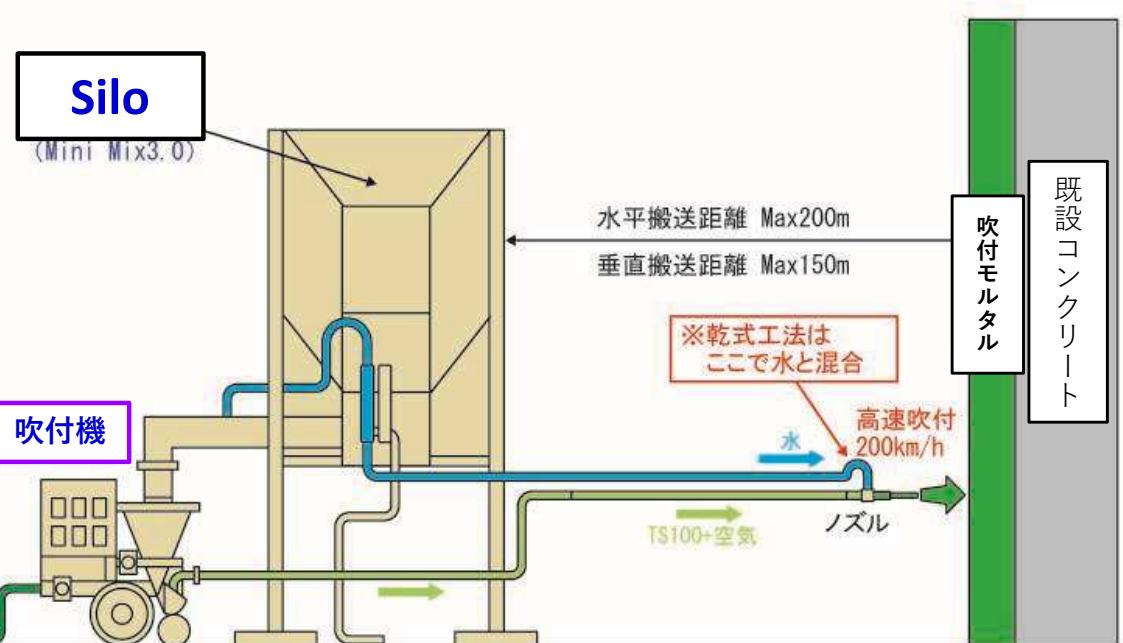
## Sto乾式吹付工法 システム概要

乾式吹付工法 ノズル先端部分の状況



### 乾式吹付設備

※単工 フラントの時、  
発電機を含め4tユニック車2台



# 吹付工法による断面修復の例（付録）

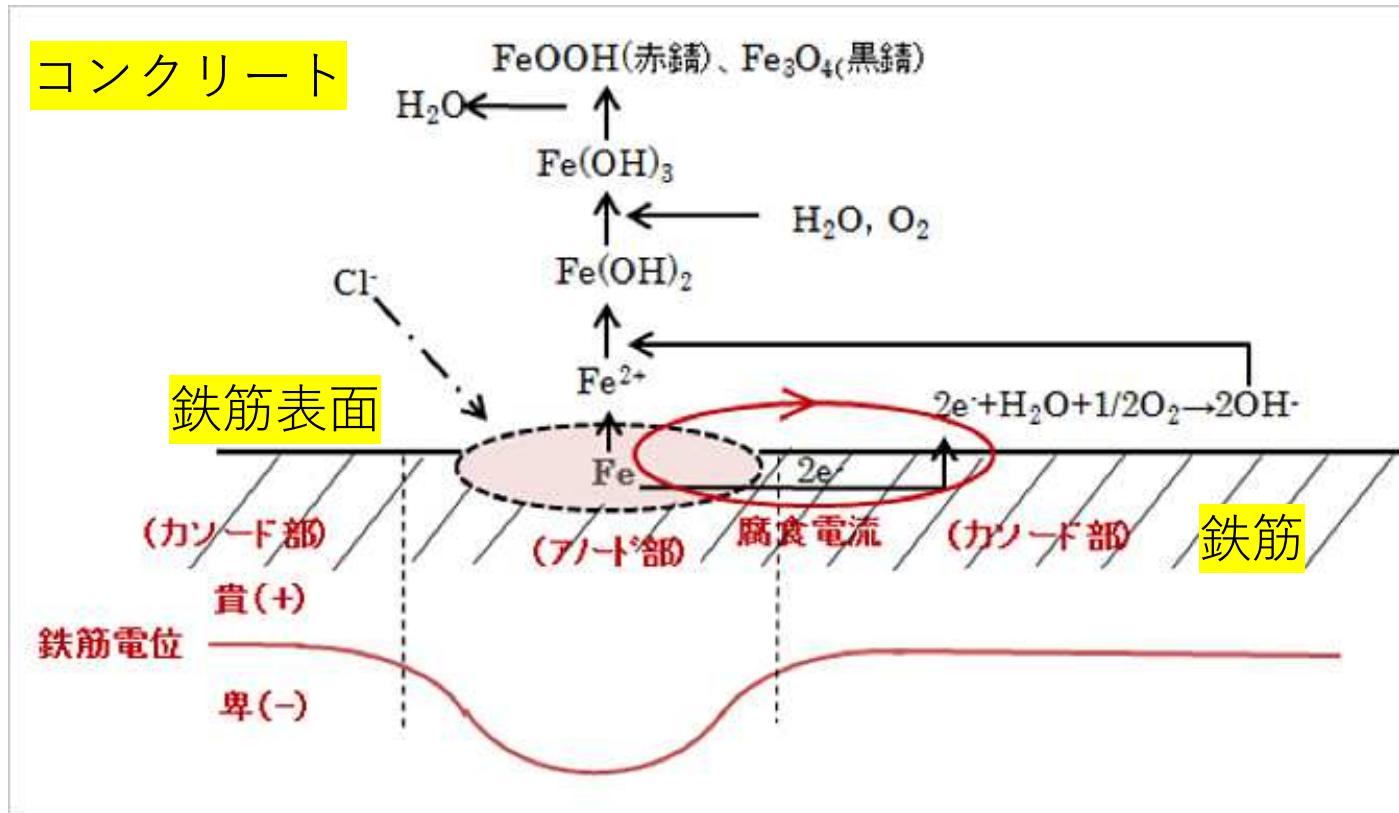


# 吹付工法による断面修復の例（付録）

## 亜硝酸リチウム添加型乾式吹付工法



# 電気化学的防食工法（付録）



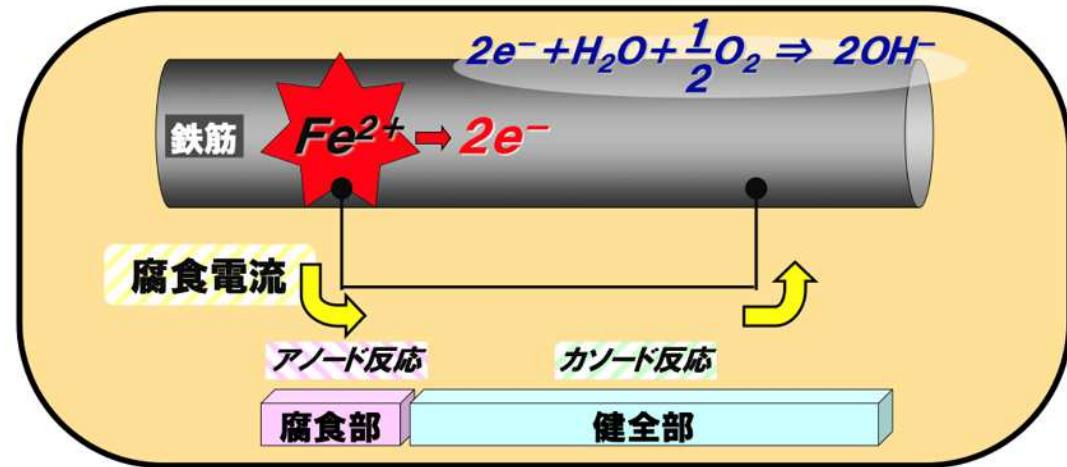
腐食反応（電気化学的反応）

電位差が生じなければ腐食を抑制できる！

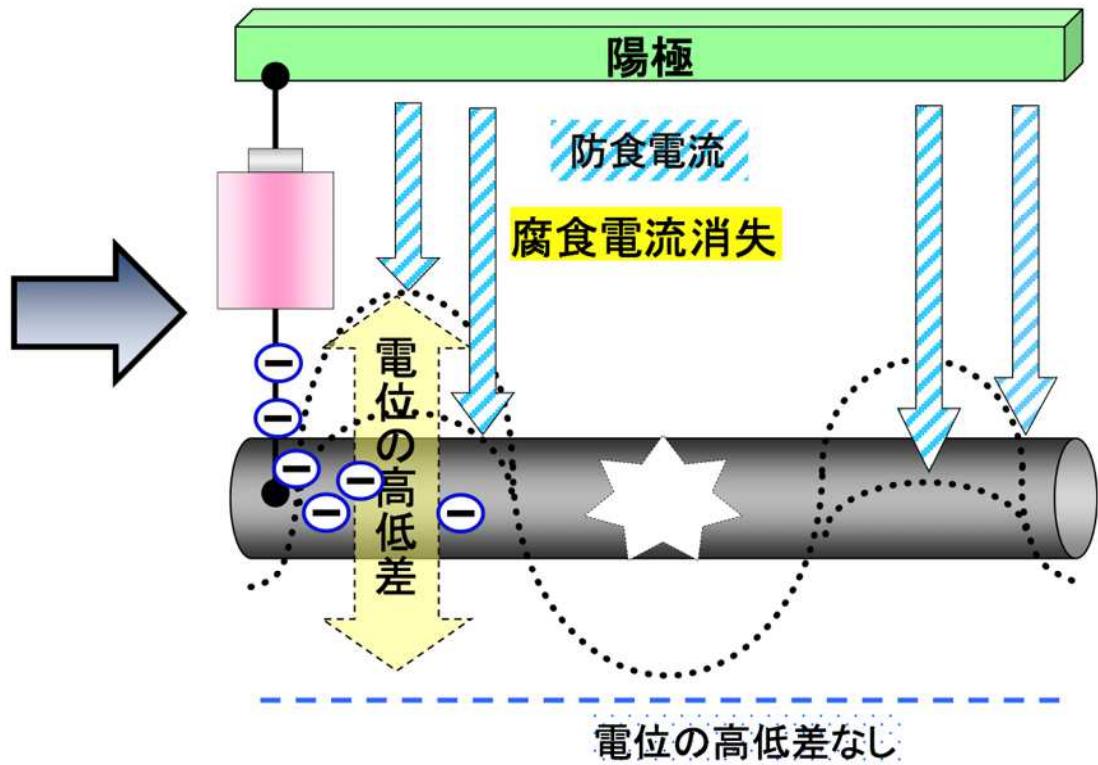
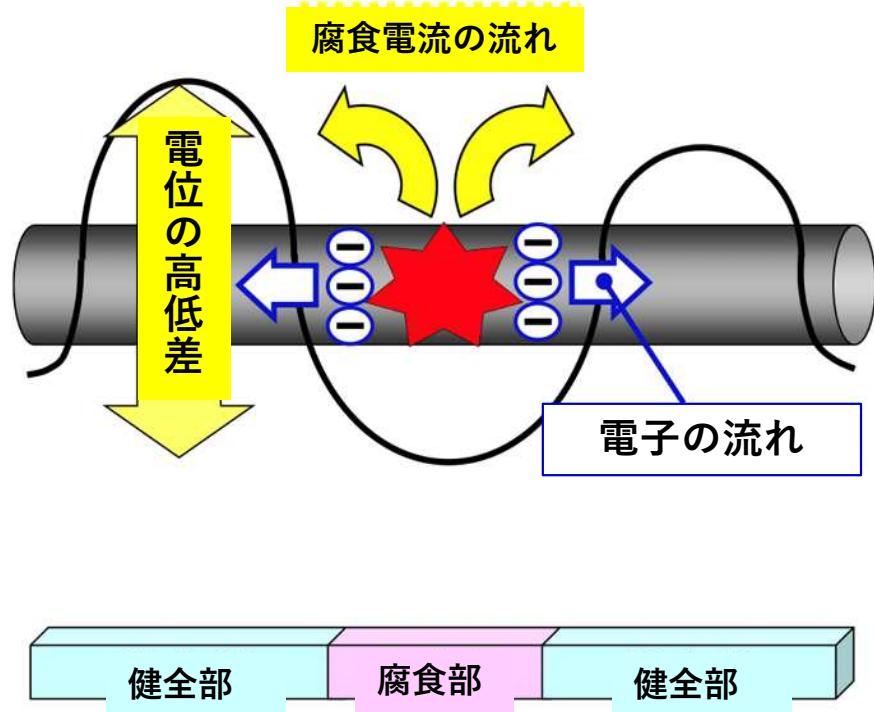
電気化学的に電位をコントロール！

# 電気防食工法

## 腐食反応

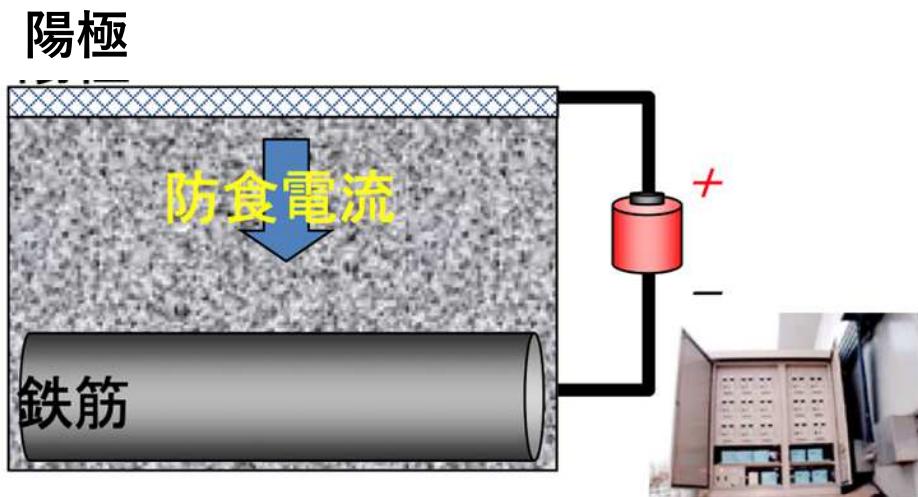


## 電気防食



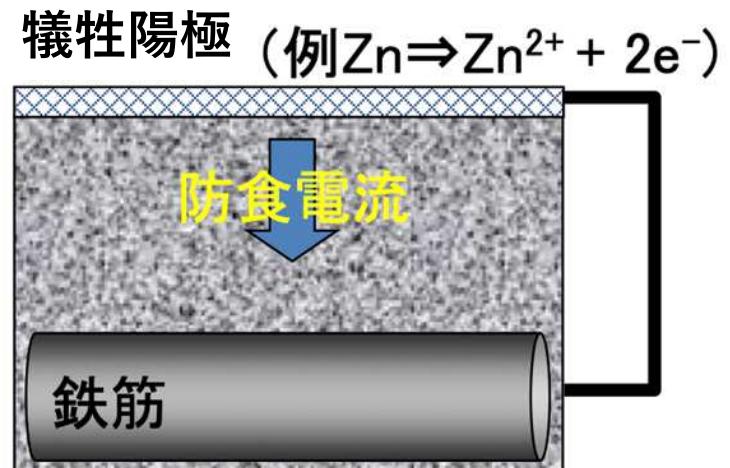
## 防食電流の供給方法で大きく 2 種類

### 外部電源方式



直流電源装置を用いる  
防食電流の調節可能

### 犠牲(犠牲)陽極方式



鉄筋と金属のイオン化傾向を  
利用する(直流電源不要)  
防食電流の調節不可能

# 外部電源方式の一例

[https://www.j-cma.jp/j-cma-pics/10005399.pdf?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.j-cma.jp/j-cma-pics/10005399.pdf?utm_source=chatgpt.com)



公共 橋梁



民間 栈橋



公共 立杭



公共 調節池

# 流電陽極方式の一例

[https://www.j-cma.jp/j-cma-pics/10005399.pdf?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.j-cma.jp/j-cma-pics/10005399.pdf?utm_source=chatgpt.com)



# 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。