

コンクリートの劣化機構を理解して 維持管理に活かす

一般社団法人コンクリートメンテナンス協会

江良 和徳

<https://www.j-cma.jp/>

1. 劣化機構を理解する

- 塩害
- 中性化（と水の浸透による鋼材腐食）
- 凍害
- 化学的侵食
- 疲労（道路橋床版）
- ASR
- DEF

2. 維持管理に活かす

- 調査診断の着目点
- 複合劣化
- ASRとDEFの判別
- 水分浸入の抑制

1. 劣化機構を理解する

● 塩害



塩害の劣化メカニズム

【原因】

- ・ 種々の原因で塩化物イオンがコンクリート中に浸入
- ・ 侵入した塩化物イオンはコンクリート表面から内部へ浸透



【劣化の進行】

- ・ 塩化物イオンが鉄筋位置に到達
- ・ 鉄筋位置の塩化物イオン量が一定量（腐食発生限界）を超えると、鉄筋の不動態皮膜が破壊される
- ・ そこに水、酸素が供給されることにより鉄筋が腐食



【性能低下】

- ・ ひび割れ、コンクリートの浮き・はく離、鉄筋露出など
- ・ コンクリートと鉄筋との付着が低下
- ・ 鉄筋断面の減少

塩害の劣化事例



塩害の劣化事例



● 中性化（と水の浸透による鋼材腐食）



中性化（と水の浸透による鋼材腐食）の劣化メカニズム

【原因】

- ・ 大気中の二酸化炭素がコンクリート中に浸入
- ・ 二酸化炭素がセメント水和物と炭酸化反応
- ・ 細孔溶液中のpHが低下（pH=11以下）



【劣化進行】

- ・ 中性化領域がコンクリート表面から内部に向かって進行
- ・ 中性化領域が鉄筋付近まで到達すると不動態皮膜が破壊
- ・ そこに水、酸素が供給されることにより鉄筋が腐食



【性能低下】

- ・ ひび割れ、コンクリートの浮き・はく離、鉄筋露出など
- ・ コンクリートと鉄筋との付着が低下
- ・ 鉄筋断面の減少

中性化（と水の浸透による鋼材腐食）の劣化事例



不動態皮膜と鉄筋腐食

- ・ 塩害、中性化は共にコンクリート内部の鋼材腐食による性能低下
- ・ 鋼材が腐食環境（不動態皮膜の破壊）となる原因が塩害と中性化で異なる

【塩害】

高い塩化物イオン量
により不動態皮膜が破壊される



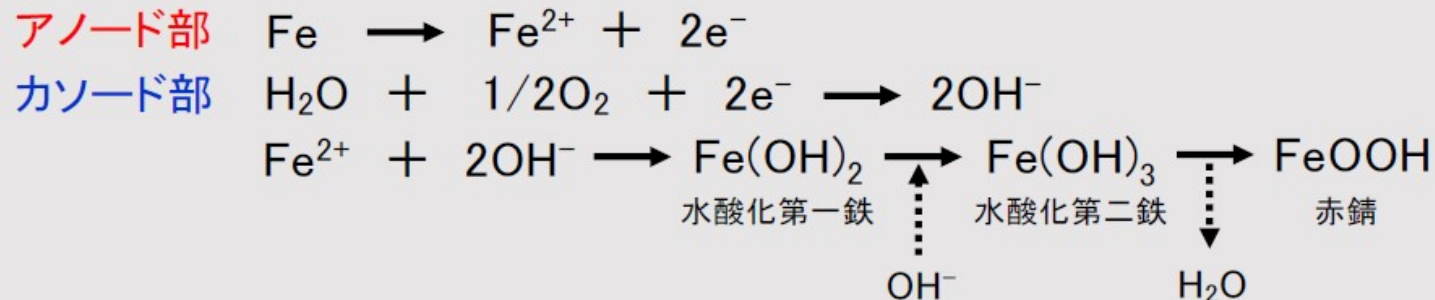
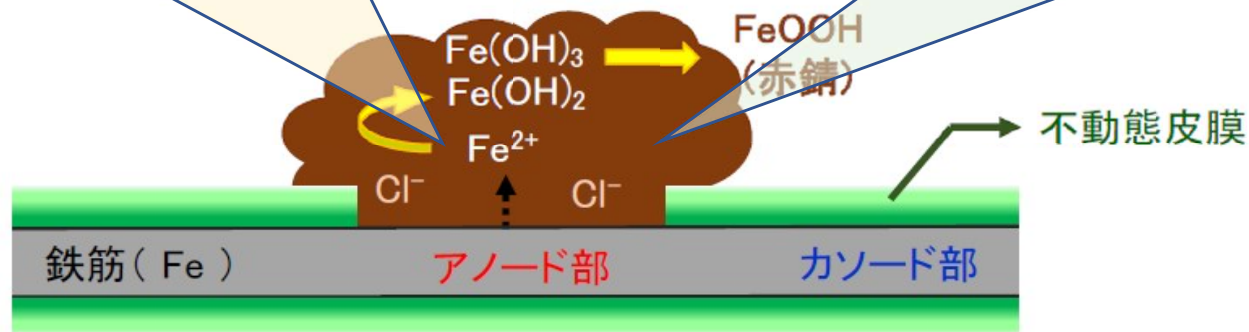
鋼材腐食 → ひび割れや浮き剥離

【中性化】

コンクリートのpHの低下
により不動態皮膜が破壊される



鋼材腐食 → ひび割れや浮き剥離



参考：コンクリート診断士試験では（塩害）

【ERA調べ】

年度	設問	出題内容
2023年	択一式	<ul style="list-style-type: none"> ・鉄筋腐食と分極曲線の概念 ・電位差滴定法の手順 ・腐食速度の経年変化から腐食量推定 ・塩化物イオン量規準の変遷 ・塩害補修選定(写真) ・鉄筋防錆処理 ・脱塩工法の留意点
	記述式	<ul style="list-style-type: none"> ・(土木)PCポストテン桁の変状 凍結防止剤 PC鋼材腐食 桁端
2022年	択一式	<ul style="list-style-type: none"> ・高炉セメントの塩分浸透 ・塩害の調査項目 ・塩化物イオン抽出方法 ・飛来塩分調査方法(ドライガーゼ法) ・断面修復工(マクロセル腐食) ・予防保全としての表面被覆工 ・塩害補修のLCC
	記述式	<ul style="list-style-type: none"> ・(土木)鉄道高架橋 塩害と中性化の複合劣化、塩分濃縮
2021年	択一式	<ul style="list-style-type: none"> ・不働態皮膜とアノード反応、カソード反応 ・見かけの拡散係数と塩分濃縮 ・分極抵抗法(交流インピーダンス法)の原理 ・塩分濃縮の将来予測 ・ひび割れ補修 ・断面修復工 ・電気防食の留意点
	記述式	<ul style="list-style-type: none"> ・(土木)RC中空床版橋 防水層なし 凍結防止剤散布 塩害の影響
2020年	択一式	<ul style="list-style-type: none"> ・腐食生成物の形成プロセス ・電位差滴定法の試料処理方法 ・栈橋上部工の塩分浸透予測 ・電気防食工法 ・塩害補修工法選定 ・規準の変遷 ・断面修復材の特性 ・脱塩工法 ・塩害補修のLCC
	記述式	<ul style="list-style-type: none"> ・(土木)スノーシット 海砂 塩分濃縮 再劣化

参考：コンクリート診断士試験では（中性化）

【ERA調べ】

年度	設問	出題内容
2023年	択一式	・中性化速度係数 ・表面被覆後の中性化進行予測(\sqrt{t} 則)
	記述式	—
2022年	択一式	・中性化速度係数 ・RC壁の中性化進行予測(\sqrt{t} 則)
	記述式	・(土木)鉄道高架橋 塩害と中性化の複合劣化、塩分濃縮
2021年	択一式	・中性化進行の特徴 ・見かけの拡散係数と塩分濃縮 ・けい酸塩系含浸材塗布後の中性化進行予測(\sqrt{t} 則) ・塩分濃縮の将来予測
	記述式	—
2020年	択一式	・中性化速度係数と相対湿度 ・中性化深さの測定(骨材の影響) ・中性化深さと鉄筋腐食状況
	記述式	・(土木)スノーシート 海砂 塩分濃縮 再劣化

● 凍害



凍害の劣化メカニズム

【原因】

- ・ コンクリート中には水分が含まれている
- ・ 寒冷地にあるコンクリート中の温度が0℃以下になると水分が凍結し体積が膨張する



【劣化の進行】

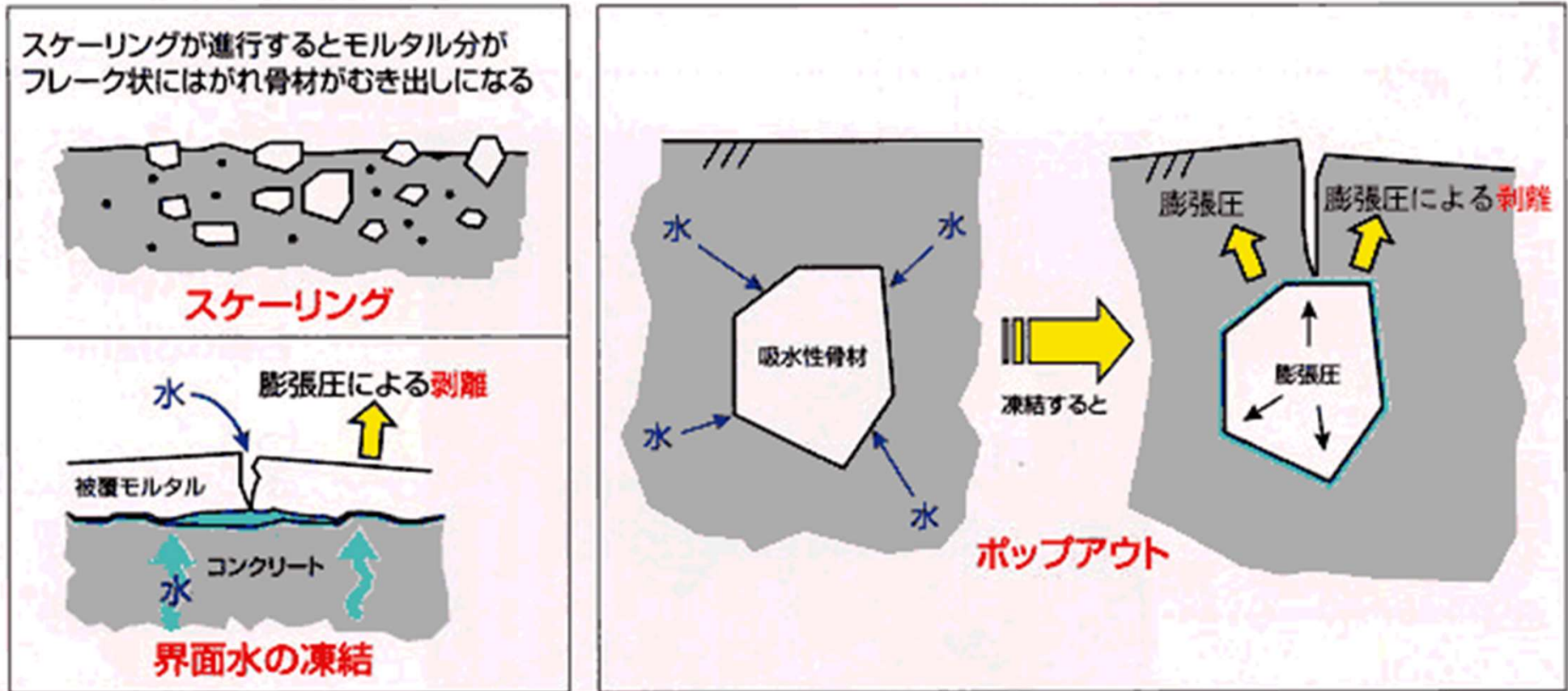
- ・ コンクリート中の水分が凍結と融解を繰り返すことによって、コンクリート自体が徐々に脆弱化する
- ・ コンクリート表面にスケーリング、ポップアウトなどの形で変状が現れる



【性能低下】

- ・ ひび割れ進展、スケーリング、ポップアウト
- ・ 圧縮強度、相対動弾性係数の低下など
- ・ コンクリート表層部の脆弱化が鉄筋腐食の原因となる

凍害の劣化メカニズム



【スケーリング】

コンクリート表面の湿潤 ⇒ 膨張圧や移動圧 ⇒ コンクリート表面がフレーク状に剥がれる

【ポップアウト】

吸水性骨材の使用 ⇒ 骨材が吸水 ⇒ 凍結 ⇒ 膨張圧の発生 ⇒ モルタル部の剥離 ⇒ 骨材のポップアウト

水圧説

- ・コンクリート中では、径の大きい細孔から水が凍結する。
- ・この体積膨張により未凍結水がより微細な細孔に移動することによって圧力が生じる。

浸透圧説

- ・コンクリート中の水は強アルカリ溶液であり、溶液が冷却すると残留する未凍結水のアルカリ濃度が高まる。
- ・すると濃度が高まっていない周囲の溶液が引き寄せられることで圧力が高まる。

凍害の劣化事例



参考：コンクリート診断士試験では（凍害）

【ERA調べ】

年度	設問	出題内容
2023年	択一式	・浸透圧説による凍害メカニズム ・凍害のスケリングとポップアウト ・超音波透過法による凍害深さ測定
	記述式	—
2022年	択一式	・水圧説による凍害メカニズム ・凍害による劣化事例(写真) ・凍害の特徴(日射、温度) ・凍害の補修工法選定(写真)
	記述式	—
2021年	択一式	・凍害劣化の特徴 ・ポップアウトの原因
	記述式	・(土木)RC中空床版橋 防水層なし 凍結防止剤散布 凍害の影響
2020年	択一式	・フライッシュコンクリートの耐凍害性 ・ASRと凍害の複合劣化メカニズム
	記述式	・(建築)市庁舎 凍結融解作用 日射の影響

● 化学的侵食



化学的侵食の劣化メカニズム

【原因】

- ・ コンクリートが外部から化学的作用を受け、コンクリート中の水和生成物が変質・分解して結合能力を失う
- ・ 主な要因は酸類、アルカリ類、塩類、油類、腐食性ガスなど多岐にわたり、それに応じて劣化状況も一様ではない。



【劣化の進行】

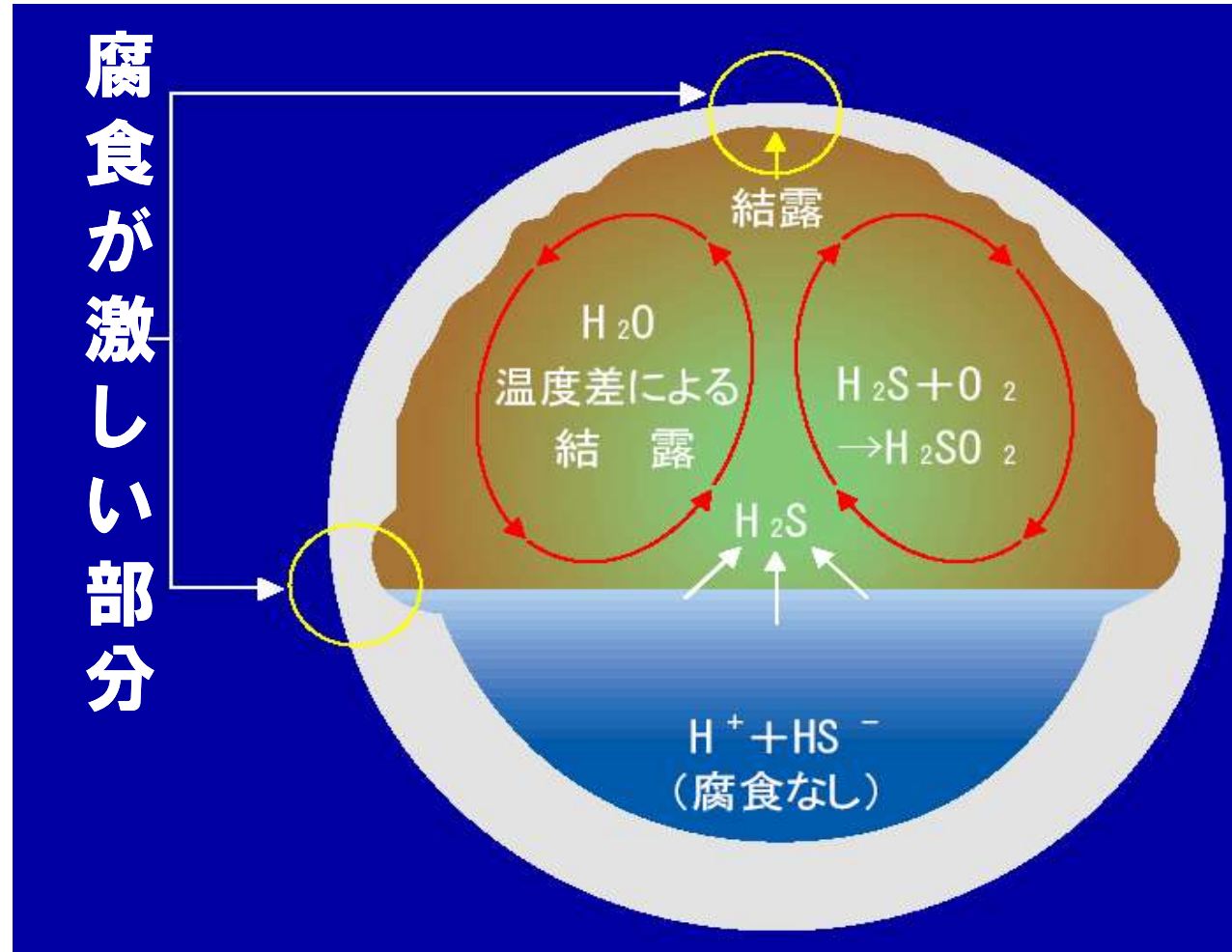
- ・ (例えば) 下水から発生した硫化水素が硫酸に変化してコンクリートを劣化させ、かぶりコンクリート部分が脆弱化して欠落



【性能低下】

- ・ コンクリートの脆弱化、断面欠損
- ・ コンクリート表層部の脆弱化が鉄筋腐食の原因となる

化学的浸食の劣化メカニズム



- ① 下水中の硫酸塩還元細菌で、硫化水素が発生
- ② 気相部で硫酸に変化し、C-Hと反応
- ③ 二水石こうとなり、その体積膨張により脆弱化

化学的浸食の劣化事例



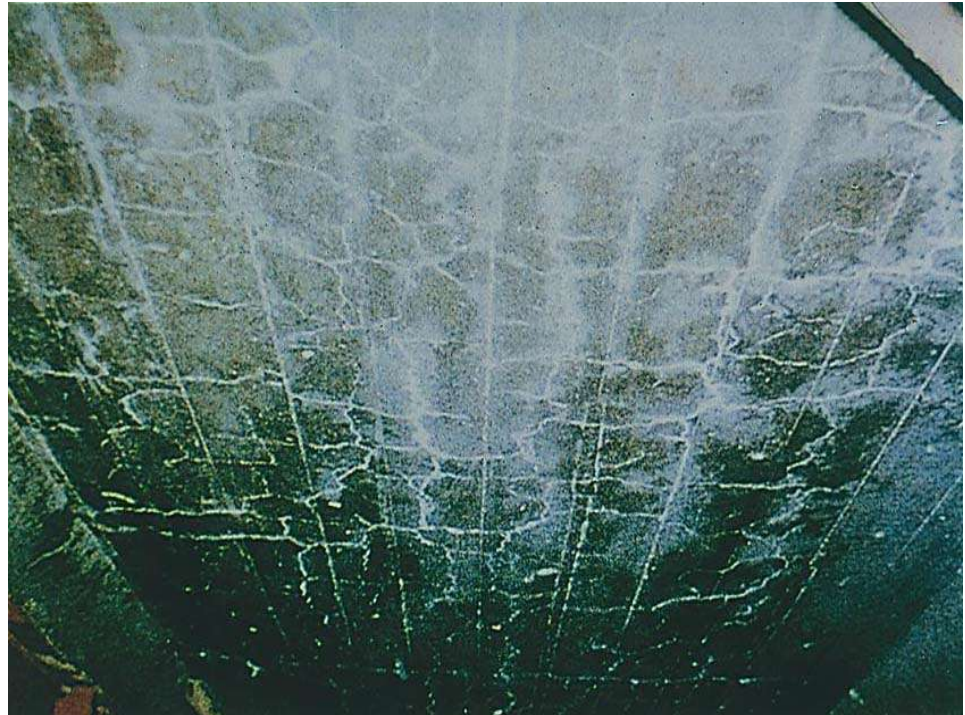
(出典「コンクリート構造物の劣化および補修事例集」日本コンクリート工学協会)

参考：コンクリート診断士試験では（化学的侵食）

【ERA調べ】

年度	設問	出題内容
2023年	択一式	・下水道施設の硫酸劣化
	記述式	—
2022年	択一式	・鉄道高架橋RC橋脚基部の硫酸塩劣化 ・RC煙突内部の化学的侵食
	記述式	・(建築)RC污水处理施設の化学的侵食
2021年	択一式	・酸による化学的侵食のメカニズム ・建築外壁基部の硫酸塩劣化
	記述式	—
2020年	択一式	・下水道施設の硫酸劣化 ・戸建て住宅布基礎の硫酸塩劣化 ・戸建て住宅布基礎の硫酸塩劣化とその促進
	記述式	

● 疲劳 (道路橋床版)



疲労の劣化メカニズム

【原因】

- ・ 道路橋RC床版には繰り返し荷重が作用する
- ・ 交通量増大、床版厚さ不足、凍結防止剤散布などが原因となる



【劣化の進行】

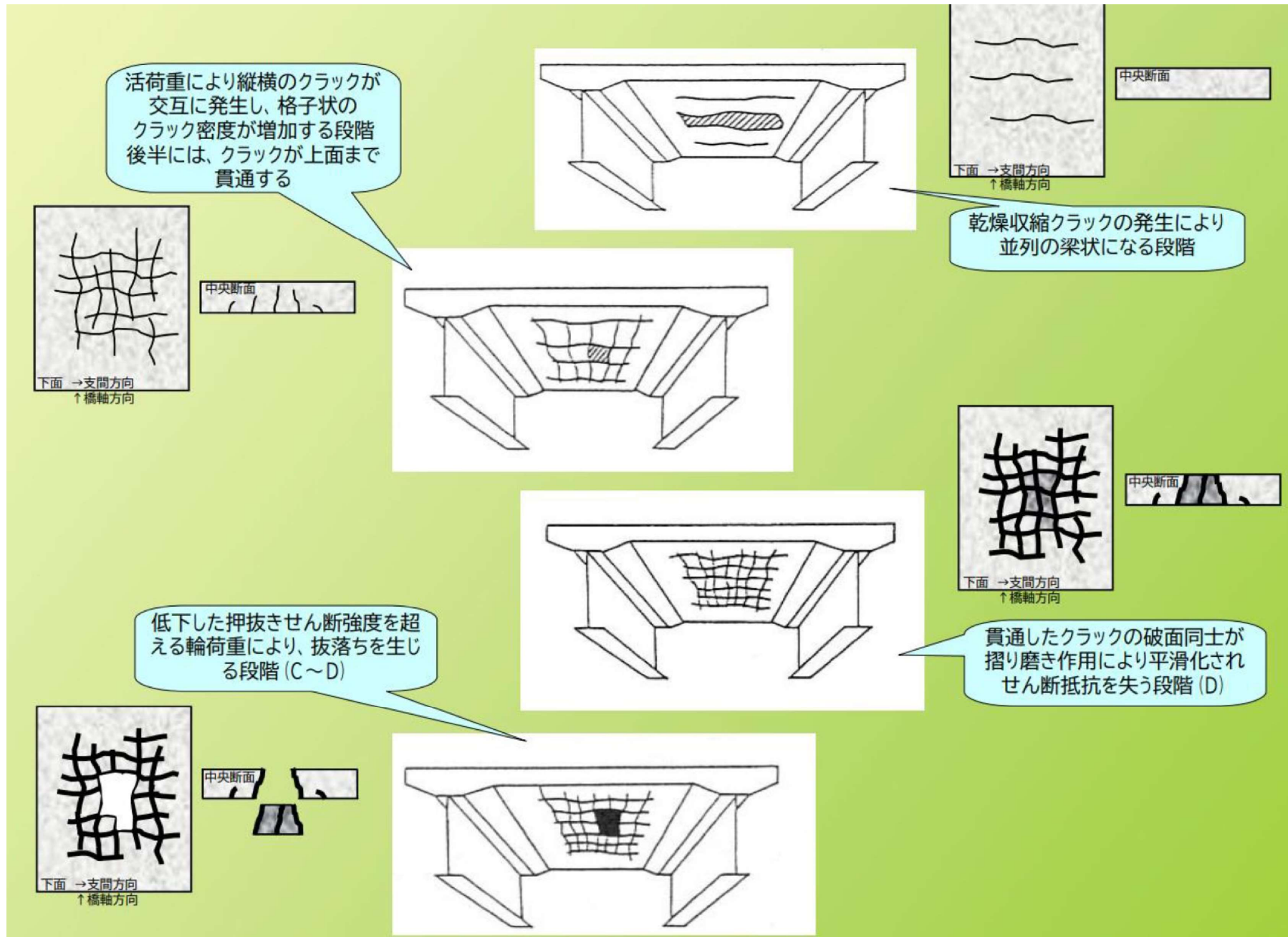
- ・ 主に乾燥収縮により、橋軸直角方向に一方向ひび割れ発生
- ・ 曲げによるひび割れが橋軸方向に発生し、格子状ひび割れを形成
- ・ ひび割れが床版を貫通し、水分供給によるすり磨きが生じる
- ・ 床版の連続性を失い、押し抜きせん断破壊による陥没が生じる



【性能低下】

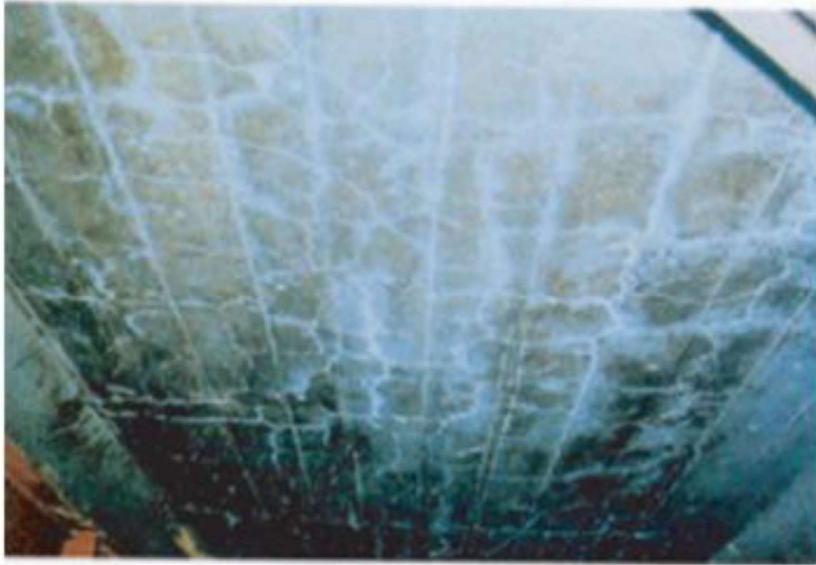
- ・ ひび割れ進展
- ・ 輪荷重への抵抗性喪失
- ・ 床版コンクリートの抜け落ち、路面陥没など

疲労の劣化メカニズム

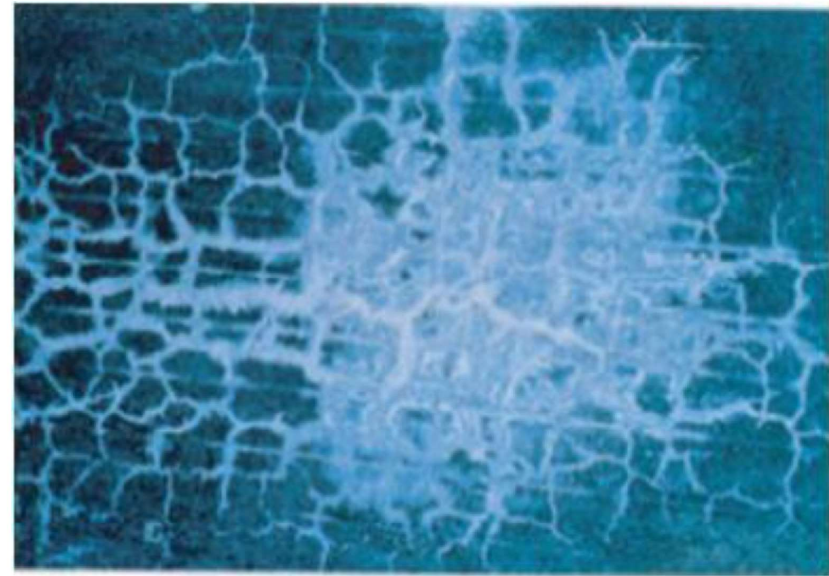


(出典「橋梁床版の疲労」独立行政法人土木研究所)

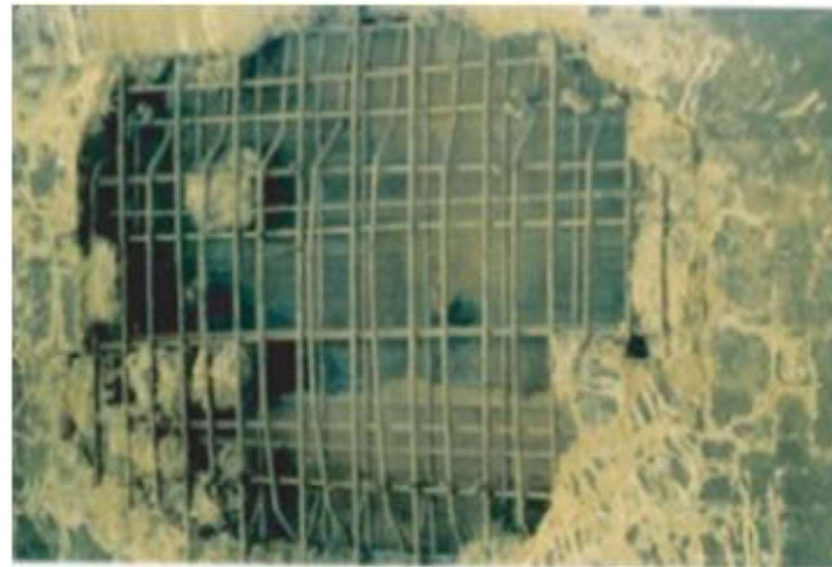
疲労の劣化事例



二方向のひび割れ



亀甲状のひびわれ



陥没・崩落

(出典「コンクリート構造物の劣化および補修事例集」日本コンクリート工学協会)

参考：コンクリート診断士試験では（疲労）

【ERA調べ】

年度	設問	出題内容
2023年	択一式	<ul style="list-style-type: none"> ・RC床版の土砂化の調査方法 ・RC床版の土砂化の発生原因 ・線形累積損傷則(マイナー則)による疲労安全性(S-N曲線) ・RC床版の維持管理LCC
	記述式	—
2022年	択一式	<ul style="list-style-type: none"> ・RC床版の疲労に対する調査方法 ・鉄道橋の線形累積損傷則(マイナー則)による疲労安全性(S-N曲線) ・RC床版疲労の補修工法選定(写真)
	記述式	—
2021年	択一式	<ul style="list-style-type: none"> ・鋼橋RC床版の疲労と撤去
	記述式	<ul style="list-style-type: none"> ・(土木)RC中空床版橋 防水層なし 凍結防止剤散布 疲労の影響
2020年	択一式	<ul style="list-style-type: none"> ・鋼橋RC床版の劣化メカニズム ・鉄道橋の線形累積損傷則(マイナー則)による疲労安全性(S-N曲線)
	記述式	

● ASR (アルカリシリカ反応)



ASR（アルカリシリカ反応）の劣化メカニズム

【原因】

- ・ コンクリート中は**高アルカリ**環境
- ・ コンクリート構造物は雨水や地下水などによる**水分**供給
- ・ コンクリートの骨材としての**反応性骨材**の使用



【劣化の進行】

- ・ 反応性骨材がアルカリ分と反応して**アルカリシリカゲル**を生成
- ・ コンクリート内部へ**水分**が侵入
- ・ アルカリシリカゲルの**吸水膨張**によりコンクリートにひび割れ発生



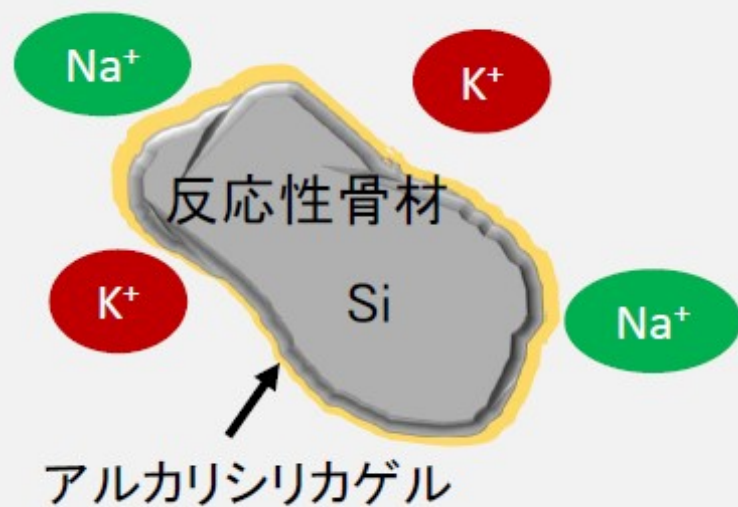
【性能低下】

- ・ ひび割れ進展、白色ゲル析出、段差、異常変形など
- ・ 圧縮強度、静弾性係数の低下、鉄筋破断など
- ・ ASRによるひび割れが鉄筋腐食の原因となる

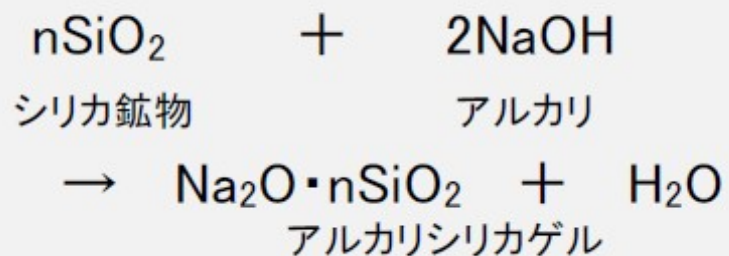
アルカリシリカゲルの生成と膨張

第1ステージ

『アルカリシリカゲルの生成』



《化学式》

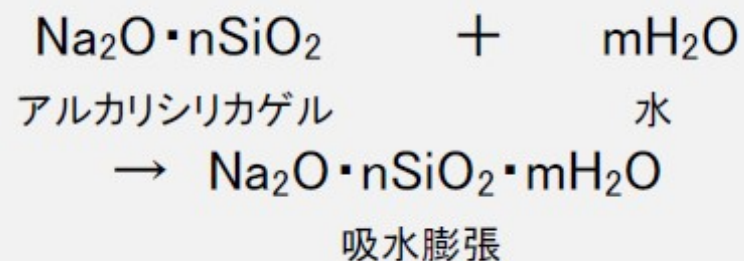


第2ステージ

『アルカリシリカゲルの膨張』

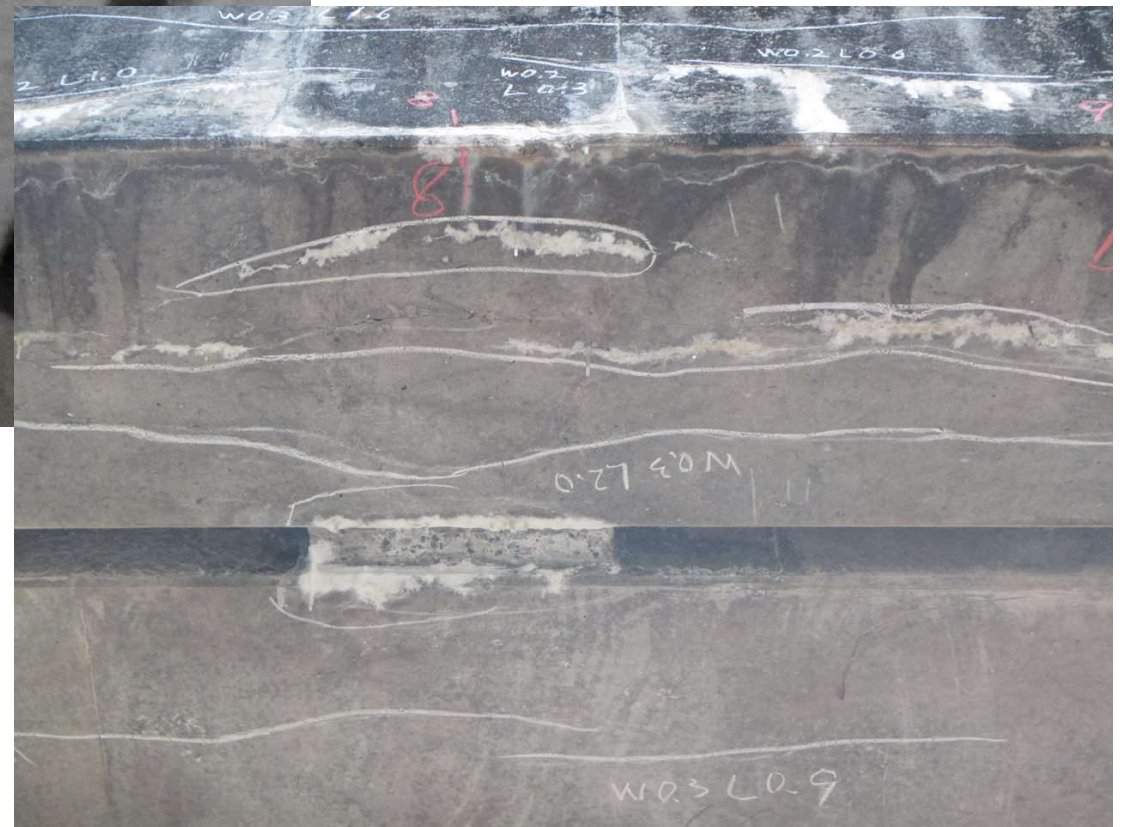


《化学式》













参考：コンクリート診断士試験では（ASR）

【ERA調べ】

年度	設問	出題内容
2023年	択一式	<ul style="list-style-type: none"> ・ペシマム現象の特徴 ・全アルカリ量（等価Na₂O換算量）の計算 ・漏洩磁束法による鉄筋破断の検出 ・塩害とASRの複合劣化
	記述式	<ul style="list-style-type: none"> ・（建築）市民ホールのASRによる変状
2022年	択一式	<ul style="list-style-type: none"> ・ASRの劣化調査方法 ・促進養生試験（JCI-S-011法） ・掛違い橋脚のASR補修工法選定（写真）
	記述式	—
2021年	択一式	<ul style="list-style-type: none"> ・モルタルバー法による膨張性評価 ・ASRの劣化調査方法 ・反応性鉱物の調査方法 ・PC桁のASR劣化（写真） ・ASR関連基準の変遷 ・ASR補修工法と補修材料
	記述式	—
2020年	択一式	<ul style="list-style-type: none"> ・反応性骨材の種類と特徴 ・ASRと凍害の複合劣化メカニズム ・ASRの劣化調査方法 ・促進養生試験（JCI-S-011法） ・ASRの劣化事例（写真） ・プレテン中空床版橋のASR補修（写真）
	記述式	—

● DEF (エトリングタイトの遅延生成)



DEF（エトリンガイトの遅延生成）の劣化メカニズム

【原因】

- ・ 蒸気養生を実施したコンクリートにて生じることが多いとされる
- ・ DEFの発生条件は「**高温の蒸気養生**」「**過剰な硫酸塩**」「**水分**」



【劣化の進行】

- ・ コンクリート製品の製造過程において、65℃以上の温度で**蒸気養生**した場合、セメントの練り混ぜ直後に生成するエトリンガイトが分解し**SO₄²⁻**が放出される。
- ・ このSO₄²⁻はC-S-Hにいったん吸着されるが、後に離脱し、水分を供給されると**ふたたびエトリンガイトを生成**する。
- ・ この**結晶成長圧**でコンクリートにひび割れが発生する。

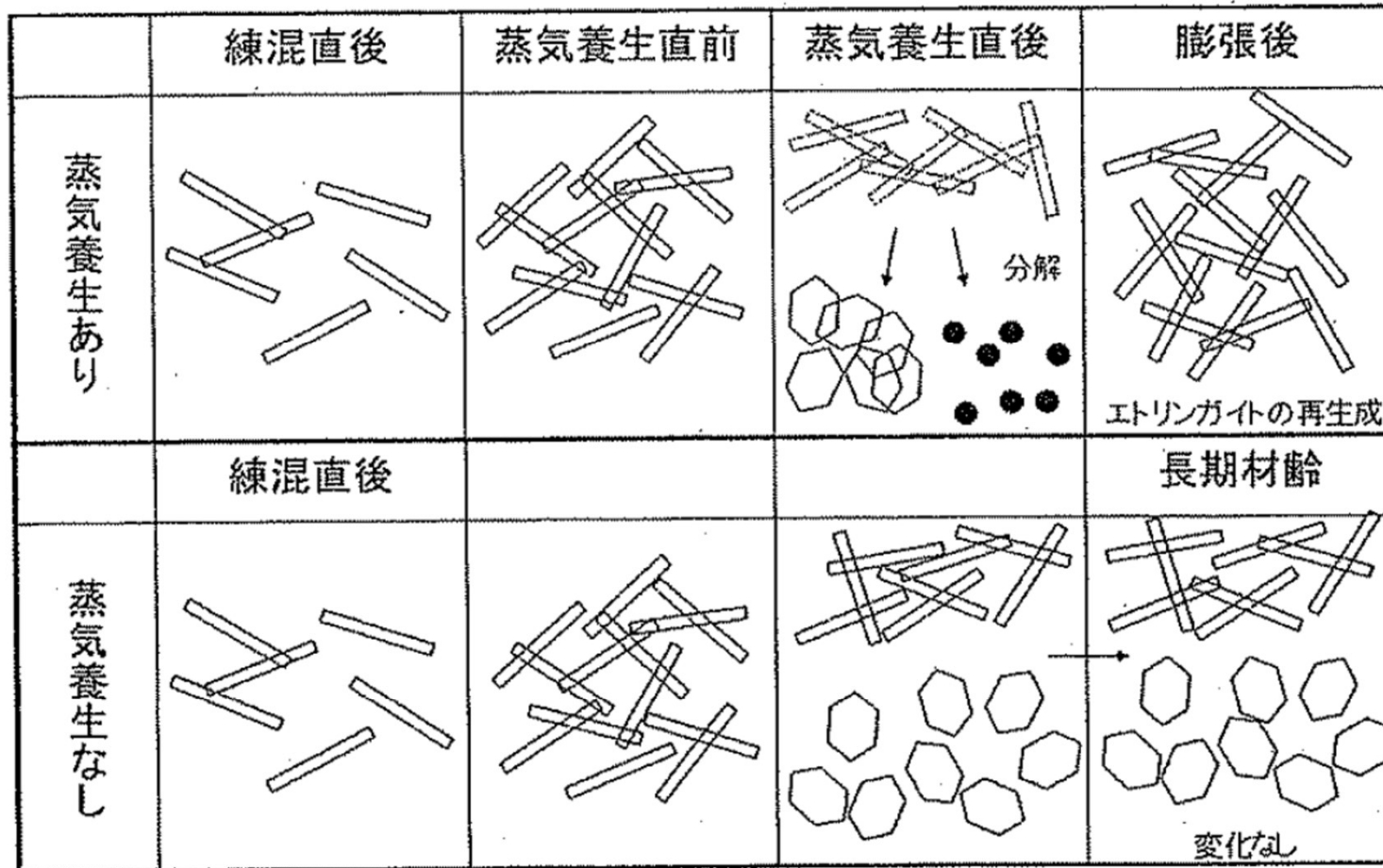


【性能低下】

- ・ ひび割れ進展
- ・ セメント硬化体の剛性低下

DEFの劣化メカニズム

蒸気養生時に分解されたエトリンガイトが再生成し、異常膨張を引き起こす



(出典 「作用機構を考慮したアルカリ骨材反応の抑制対策と診断研究委員会」
日本コンクリート工学協会)

DEFの劣化事例



縁石ブロックのDEF膨張(九州北部)

(出展 ; 川端雄一郎, 松下博通, 「高温蒸気養生を行ったコンクリートにおけるDEF膨張に関する検討」, 土木学会論文集E2, Vol.67, No.4, pp.549-563.2011.

2 . 維持管理に活かす

● 調査診断の着目点

塩害、中性化の診断の着目点

【①劣化原因の特定（劣化の原因は？）】

- ・ 環境条件の確認（沿岸地域，凍結防止剤散布地域）
- ・ 外観目視調査（ひび割れパターン，錆汁の有無，浮き・はく離）
- ・ 塩化物イオン含有量試験（深さ方向の濃度分布を測定）
- ・ 中性化深さ試験（フェノールフタレイン溶液噴霧）

【②劣化程度の評価（現時点での塩害の劣化程度は？）】

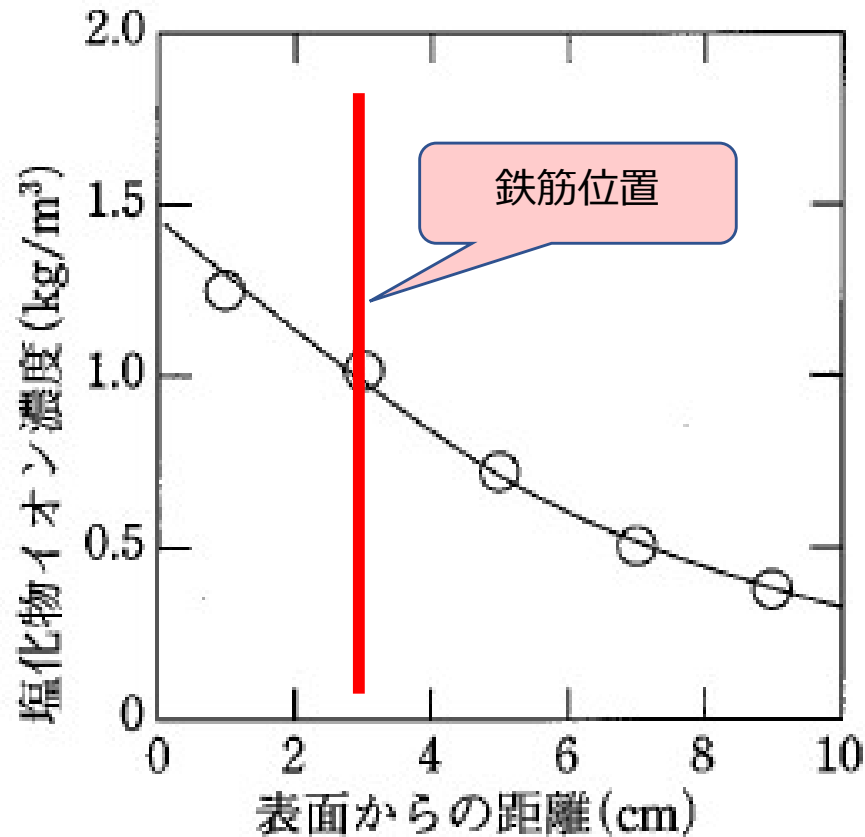
- ・ 外観目視調査（外観上の劣化グレード判定）
- ・ 鉄筋腐食度調査（はつりによる目視調査，自然電位法）

【③将来予測（今後どうなるのか？）】

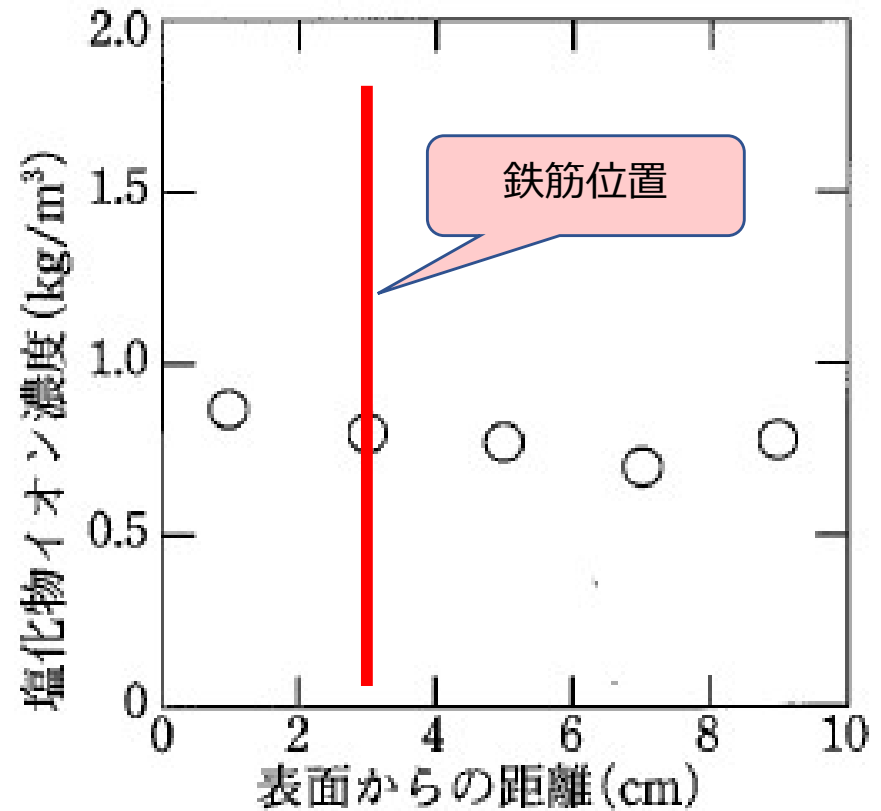
- ・ 塩化物イオン拡散予測（Fickの拡散方程式）
- ・ 中性化の進行予測（ \sqrt{t} 則）
- ・ 鋼材腐食の進行予測（点検結果の腐食量、腐食速度など）
- ・ 腐食ひび割れの発生予測（腐食量、力学モデルなど）
- ・ 剥離、剥落の発生予測（腐食量、力学モデルなど）
- ・ 過去の点検結果との比較（変状の進展度合い）

塩化物イオン含有量試験

コンクリート表面からコアを採取し、20mm毎にスライス。
各試料中に含まれる塩化物イオン量を分析し、グラフ化。
鉄筋位置の塩化物イオン量が腐食発生限界塩化物イオン量を超えているか。



外来塩分の影響を受けた例

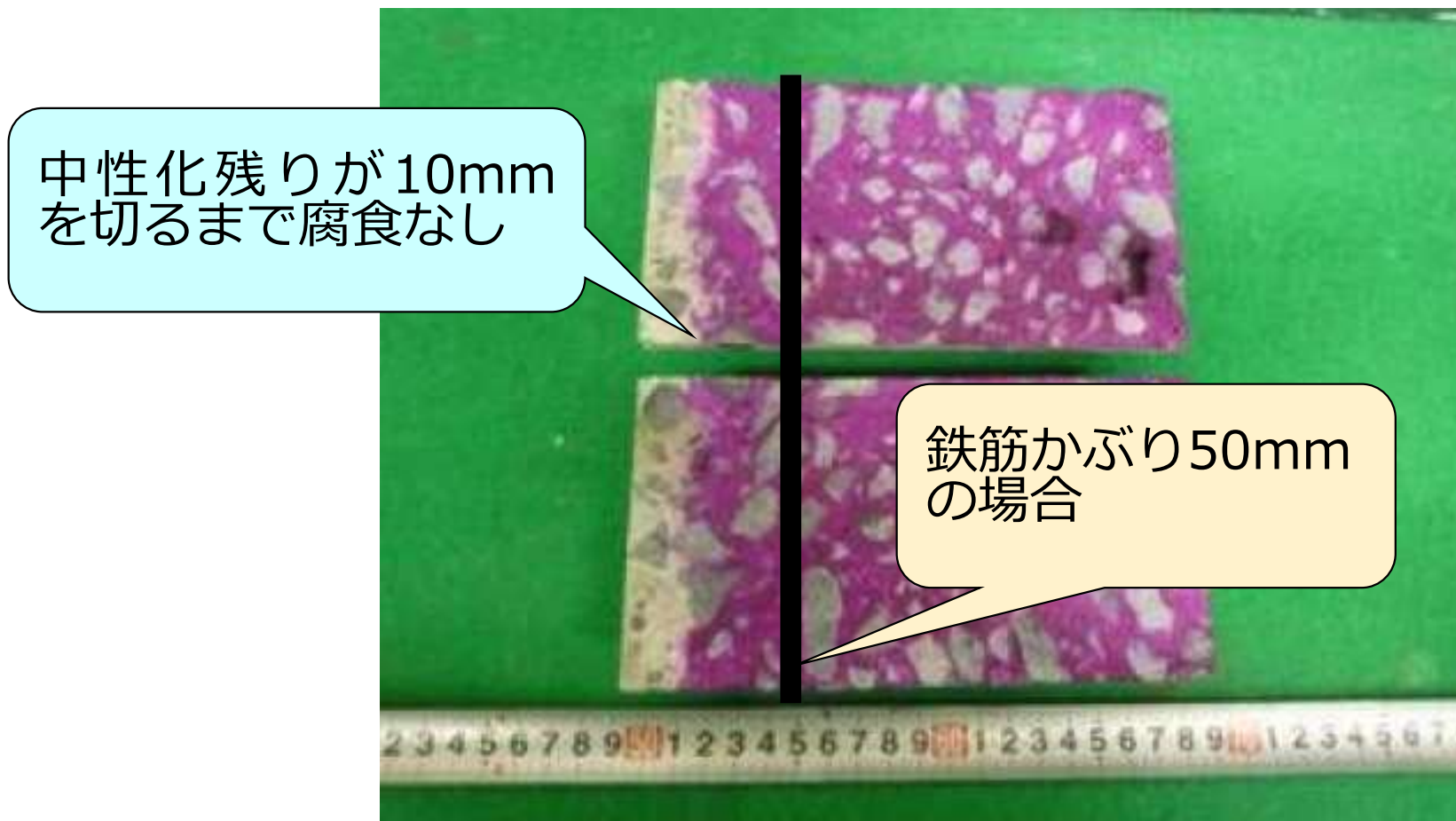


内在塩分の影響を受けた例

『非破壊試験を用いた土木コンクリート構造物の健全度診断マニュアル』より

中性化深さの測定

フェノールフタレイン溶液を噴霧したときの非発色部を中性化深さと判定
鉄筋位置と中性化深さとの関係により中性化の影響を評価
中性化残り10mm未満の場合、鉄筋は腐食環境にある



中性化深さ測定値と鉄筋位置との関係

劣化過程（塩害の場合）

外観上のグレード	劣化過程	劣化の状態
グレードⅠ	潜伏期	外観上の変状が見られない，鋼材腐食発生塩化物イオン濃度以下
グレードⅡ	進展期	外観上の変状が見られない，鋼材腐食発生塩化物イオン濃度以上，腐食が開始
グレードⅢ-1	加速期前期	腐食ひび割れや浮きが発生，さび汁が見られる
グレードⅢ-2	加速期後期	腐食ひび割れの幅や長さが大きく多数発生，腐食ひび割れの進展に伴うかぶりコンクリートの部分的な剥離・剥落が見られる，鋼材の著しい断面減少は見られない
グレードⅣ	劣化期	腐食ひび割れの進展に伴う大規模な剥離・剥落が見られる，鋼材の著しい断面減少がみられる，変位・たわみが大きい



塩化物イオンの拡散予測 (Fickの拡散方程式)

『あと何年後に鉄筋位置の塩分量が腐食限界を超えるか』を推定する

$$C(x, t) = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D \times t}} \right) \right) + C_i \quad (4.1)$$

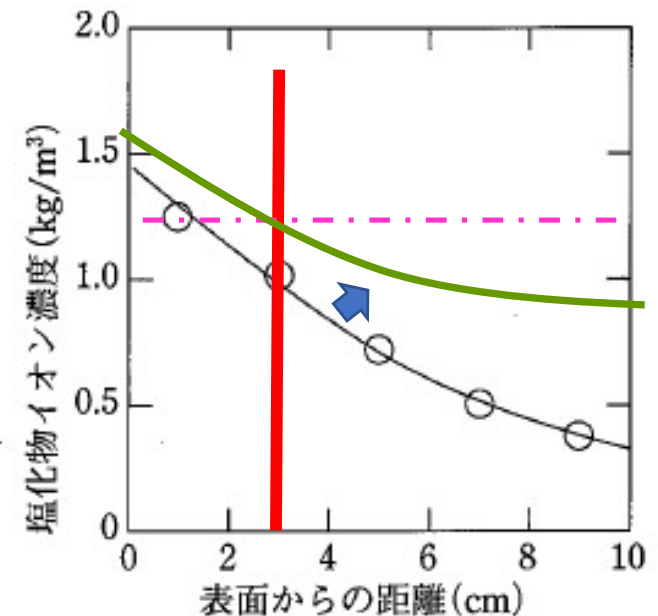
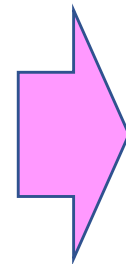
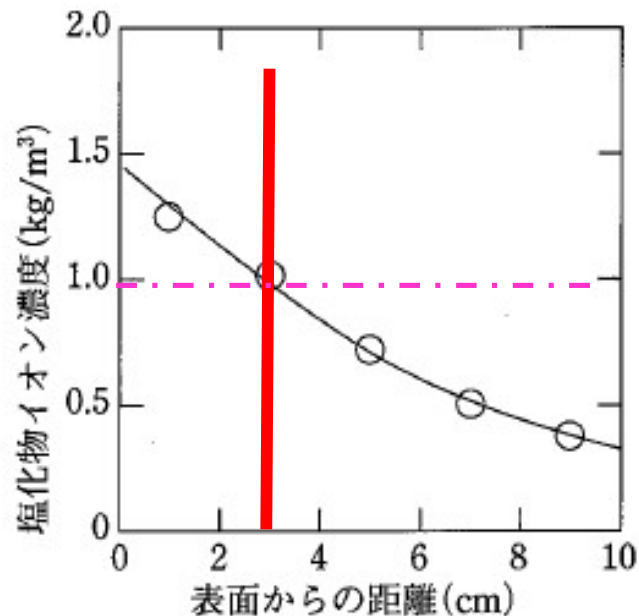
ここで、 $C(x, t)$: 表面からの深さ x (cm)の時刻 t (s)における塩化物イオン濃度 (kg/m^3),

C_0 : コンクリート表面における塩化物イオン濃度 (kg/m^3),

C_i : コンクリート材料に当初から含まれていたと考えられる塩化物イオン濃度 (kg/m^3),

D : コンクリート中で塩化物イオンの見掛けの拡散係数 (cm^2/s)

$\operatorname{erf}()$: 誤差関数。



中性化の進行予測 (√ t 則)

『あと何年後に中性化残りが10mmを切るか』を推定する

コンクリートの中性化深さC

$$C = k \sqrt{t}$$

ここに、k : 中性化速度係数
t : 供用年数

供用年数 t_1 のコンクリート構造物の中性化深さ C_1 を測定すれば、中性化深さ係数 k が得られる



将来の年数 t_2 を代入すれば、供用年数 t_2 における中性化深さ C_2 を推定することができる

過去の点検結果との比較

- ・ 2014年より、5年に1度の定期点検が義務化された
- ・ 既に過去2回の点検結果がある
- ・ 今回の点検結果（写真、変状図など）と前回の点検結果とを比較することができる



- ・ 前回に比べて変状が大幅に増大している場合、今後も塩害、中性化による劣化の進行性が高いと判断することができる



ASRの診断の着目点

【①劣化原因の特定（劣化原因はASRなのか？）】

- ・ 外観目視調査
（ひび割れパターン, 白色ゲル析出など）
- ・ コア観察
（ASRゲル, 反応リム, 骨材の割れ）
- ・ ASR関連試験
（偏光顕微鏡観察, X線回折分析, SEM観察）

【②劣化程度の評価（現時点でのASRの劣化程度は？）】

- ・ 外観目視調査
（外観上の劣化グレード判定）
- ・ 圧縮強度試験, 静弾性係数試験, 超音波伝播速度

【③将来予測（膨張は今後も進行する？）】

- ・ 促進養生試験
（JCI-S-011法, アルカリ溶液浸漬法など）
- ・ 過去の点検結果との比較
（直近の劣化進行度合い, 再劣化の有無）

ASRの診断の着目点

・ 外観目視調査

ひび割れパターン, 白色ゲル析出など



・ コア観察

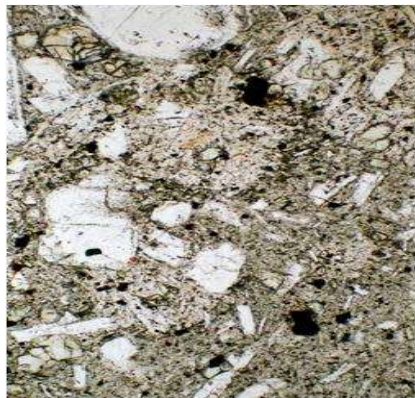
ASRゲル, 反応リム, 骨材の割れ



・ 岩種判定

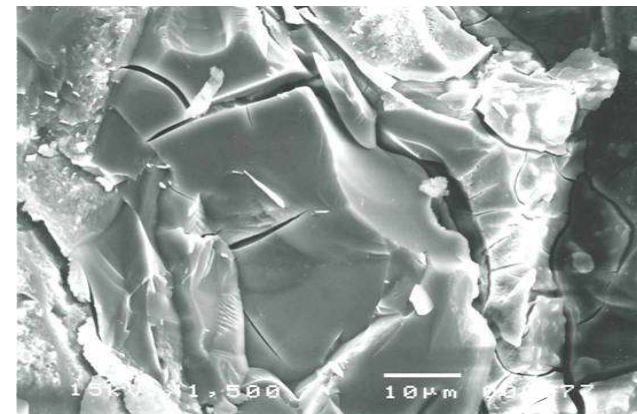
有害鉱物を含む岩種が認められた場合, ASRを生じる可能性が高い.

偏光顕微鏡⇒火山ガラス, 微小石英など
X線回折 ⇒クリストバライトなど



・ アルカリシリカゲルの観察

化学分析⇒生成している白色ゲルの成分に,
SiO₂が30%以上含まれる場合,
その白色ゲルはASRゲルである
SEM観察⇒ASRゲルの特定



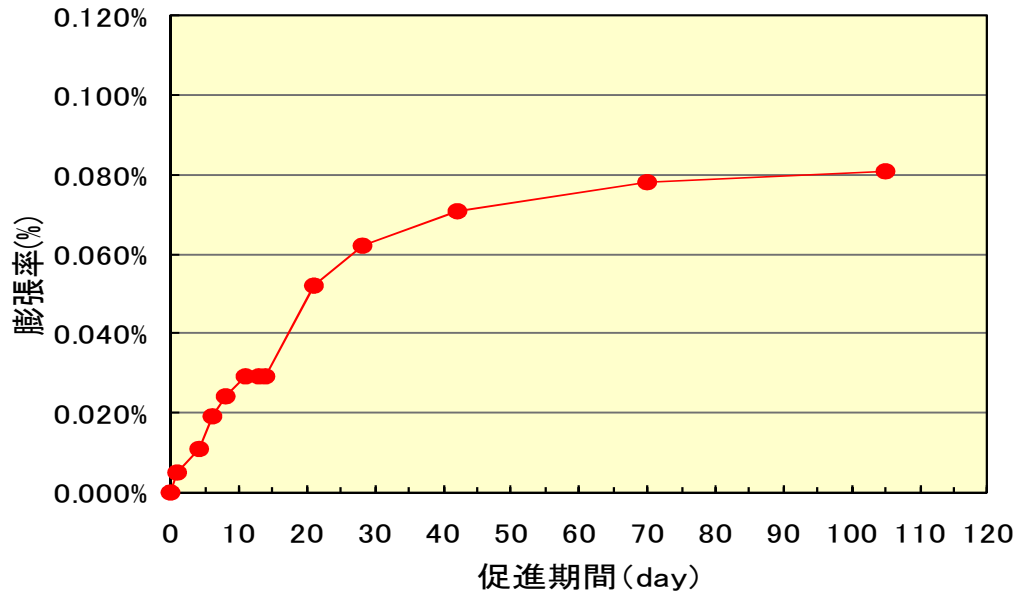
ASRの劣化過程

外観上のグレード	劣化過程	劣化の状態
グレードⅠ	潜伏期	ASRによる膨張およびそれに伴うひび割れがまだ発生せず，外観上の変状が見られない
グレードⅡ	進展期	水分とアルカリの供給下において膨張が継続的に進行し，軽微なひび割れが発生する。変色，アルカリシリカゲルの滲出が見られる場合もある。しかし，鋼材腐食によるさび汁は見られない。
グレードⅢ	加速期	ASRによるひび割れが進展し，ひび割れの幅および密度，範囲が増大する。また，鋼材腐食によるさび汁が見られる場合もある。
グレードⅣ	劣化期	ひび割れの幅および密度がさらに増大し，段差，ずれや，かぶりの部分的な剥離・剥落が発生する。鋼材腐食が進行し，さび汁が見られる。外力の影響によるひび割れや鋼材の損傷が見られる場合もある。変位・変形が大きくなる。



ASRの将来予測

- ・ 促進養生試験 (以後のASR膨張の可能性を定量的に評価)




環境 : 40℃, 95%RH
期間 : 3カ月
判定例 : 0.05% 以上を有害 (全膨張)

JCI-S-011法の測定例

促進養生試験の種類

試験方法	養生条件	測定期間	コア径
JCI-S-011法 (旧JCI-DD2法)	40℃ 湿度95%以上	3ヶ月~6ヶ月	Φ100mm
アルカリ溶液浸漬法 (旧カナダ法)	80℃ NaOH溶液	14日~28日	Φ50mm
飽和NaCl溶液浸漬法 (旧デンマーク法)	50℃ NaCl溶液	3ヶ月	Φ50mm

ASRの将来予測

- 2014年より、5年に1度の定期点検が義務化された
 - 既に過去2回の点検結果がある
 - 今回の点検結果（写真、変状図など）と前回の点検結果とを比較することができる
- 
- 前回に比べて変状が大幅に増大している場合、今後もASR劣化の進行性が高いと判断することができる



● 複合劣化

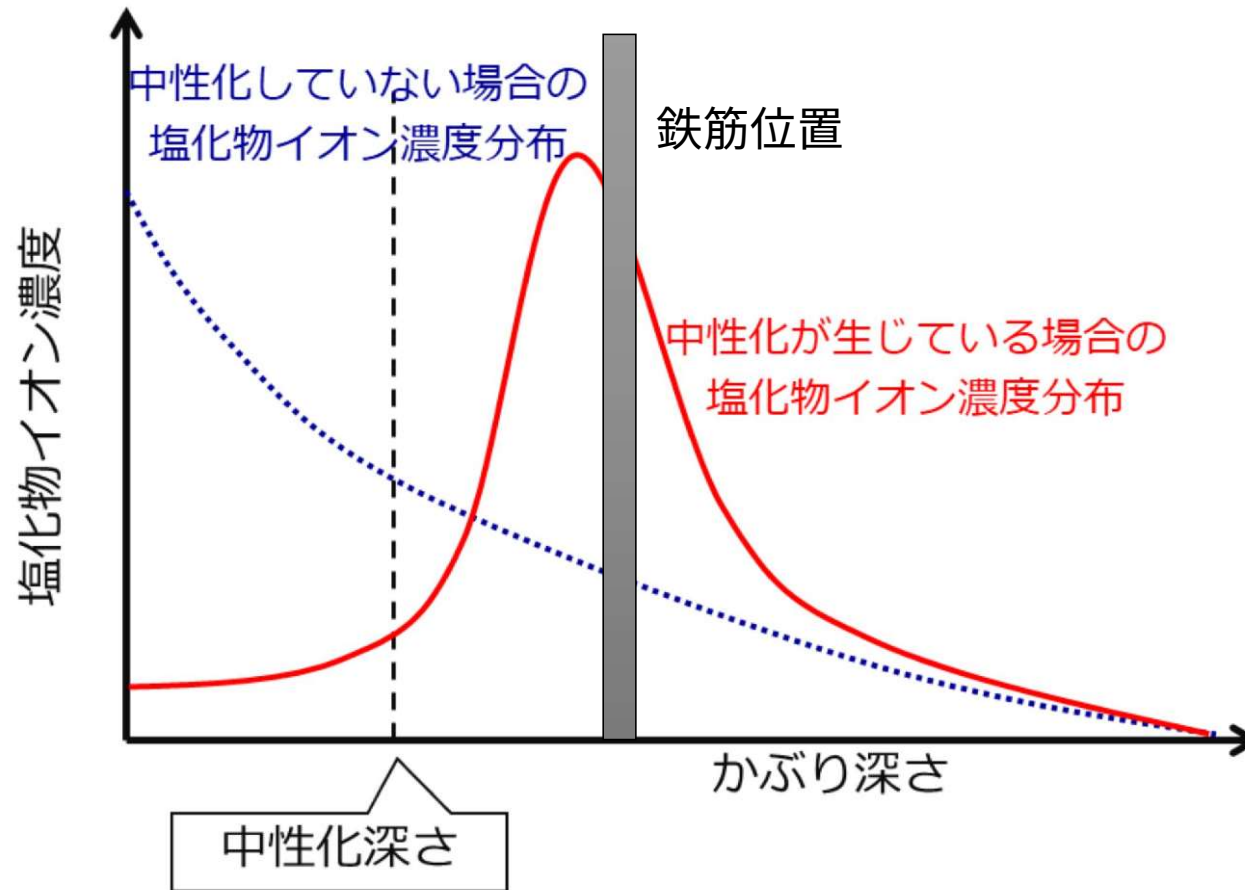
複合劣化

- ・実環境におけるコンクリート構造物の劣化形態は複雑であり、必ずしも単独の劣化機構で説明できない場合も多い。
- ・そこでコンクリート標準示方書[維持管理編]2022年版では「複合劣化」の章を新設し、「複数の劣化機構が生じることで経時的に進行する変状」として記述されている。

複合劣化における代表的劣化機構の組み合わせと発生しやすい環境・部材

劣化機構の組合せ	発生しやすい環境・部材
塩害と中性化	除塩不足の海砂を使用した構造物 飛来塩分が供給される海岸地域、凍結防止剤散布環境、トンネルなど
塩害と凍害	凍結防止剤散布環境、寒冷地の海岸地域
塩害とASR	凍結防止剤散布環境、海岸地域
凍害とASR	凍結防止剤散布環境、寒冷地の海岸地域
塩害、凍害と疲労	凍結防止剤の散布を受ける鉄筋コンクリート床版

塩害と中性化の複合劣化の例



- 塩害環境にある構造物に中性化が進行すると、塩化物イオンの濃度分布が変わる
- 中性化による塩分濃縮によって中性化深さの奥の塩化物イオン濃度が上昇する
- 本来よりも早く腐食発生限界塩化物イオン濃度に達する可能性

ASRと凍害との複合劣化の例



凍害がASRを助長し、ASRが凍害を助長する ⇒ 劣化が加速

● ASRとDEFの判別

ASRとDEF

- ASRおよびDEFによるひび割れはともにコンクリート膨張性のひび割れとなるため、ひび割れ発生パターンが酷似する。
- DEFによる膨張量はASRに比べて大きい（約10倍ともいわれる）。
- ASRとDEFが混在する場合、DEFが先でASRが後という順序で生じる。
- ASRの膨張によるひび割れは骨材を起点として発生し、骨材自体の割れも生じる。
- それに対しDEFの膨張によるひび割れはセメントペースト部で発生し、骨材とは関連性がない。
- ASRひび割れにはアルカリシリカゲルで満たされることがある。
- それに対しDEFひび割れにはエトリンガイトが析出することがある。

●エトリンガイトの遅れ生成(DEF)とアルカリシリカ反応(ASR)の発生条件の違い

条件	DEF	ASR
反応性骨材	—	◎
アルカリ量	○	◎
硫酸塩	◎	—
蒸気養生	◎	—
反応温度	20℃程度	高いほど進行
水分の供給	◎	◎
膨張量の目安	1%	0.1%

◎:主要因 ○:どちらかといえば関係する
—:あまり関係しない

ASRとDEFの判別事例

論文『遅延膨張性の反応性骨材を使用したプレテンション方式PC ホロー桁に生じた劣化組織の特徴』；安藤 陽子・江良 和徳・高垣内 仁志・宮村 義之，コンクリート工学年次論文集，2023



【対象構造物と変状の状況】

- ・ S橋（1987年竣工）のPC上部工（プレテンション方式単純床版橋）の桁下面において、橋軸方向に卓越したひび割れが多数発生している。
- ・ ひび割れは3径間ある上部工のいずれの桁においても認められる。
- ・ ひび割れ幅は最大で3mmを超えるものもあり、構造物の耐久性能に影響を与える変状である。

ASRとDEFの判別事例

【促進膨張試験】

- ①アルカリ溶液浸漬法 : ASRによる潜在膨張性の検証
⇒ コアを80℃、1NのNaOH溶液に浸漬する
- ②飽和Ca(OH)₂溶液浸漬法 : DEFによる潜在膨張性の検証
⇒ コアを20℃の飽和Ca(OH)₂溶液に浸漬する

【偏光顕微鏡観察、SEM-EDS定性分析】

①ASRに着目した評価

- ・偏光顕微鏡観察にてひび割れパターンをみる。
- ・SEM観察にてASRゲル生成の有無、生成位置をみる。
- ・EDS分析にてASRゲルの組成かどうか確認する。
⇒骨材とペーストのひび割れが連続している場合、ASRの影響が大きいと判断

②DEFに着目した評価

- ・偏光顕微鏡観察にてひび割れパターンをみる。
- ・SEM観察にてエトリンガイトの生成位置をみる。
- ・EDS分析にてエトリンガイトの組成を調べる。
⇒骨材周囲にギャップが生じ、エトリンガイトで充填されていればDEFの影響が大きいと判断

●水分浸入の抑制

水分浸入の抑制

【水分浸入抑制の重要性】

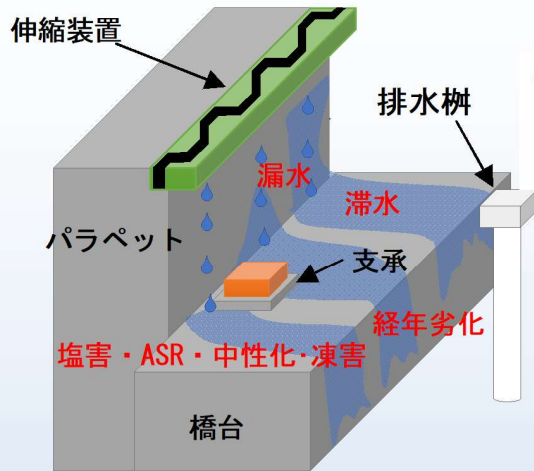
- 水分はあらゆる劣化に対する劣化因子
 - 塩害、中性化 ⇒ 水分供給によって鉄筋腐食
 - 凍害 ⇒ 水分の凍結融解作用の繰返しでコンクリート脆弱化
 - 疲労 ⇒ ひび割れへの水分侵入によりすり磨き作用
 - ASR ⇒ 水分供給によってアルカリシリカゲルの吸水膨張
 - DEF ⇒ 水分供給によってDEF進行

【水分浸入抑制のための方策】

- 補修工法
 - 表面含浸工、表面被覆工、ひび割れ注入工など
- 床版防水工
 - シート系、塗膜系、コンクリート舗装への対応
- 伸縮継手
 - 非排水型伸縮継手への更新
- 水切り、排水装置
 - 軽視できない

水分浸入の抑制 (水切りの活用事例)

◆ 橋台・橋脚の問題



新工法による対策
予防保全

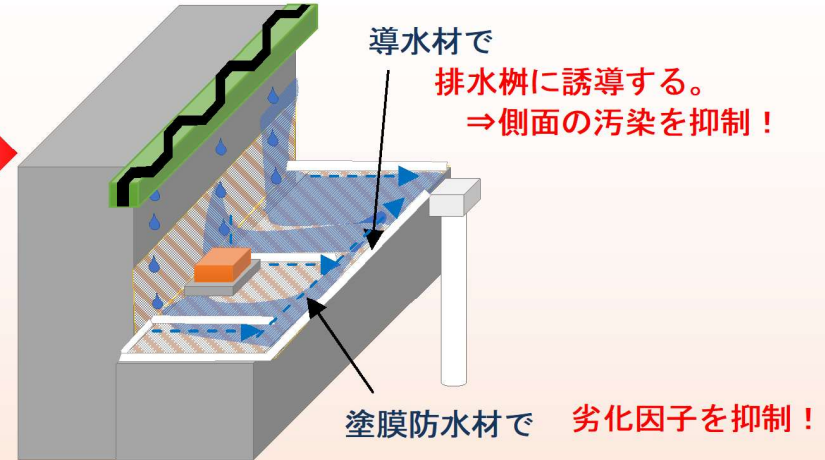
伸縮装置から雨水の漏水により橋台・橋脚が汚染され劣化する



滞水は躯体内へ劣化因子を供給し塩害・中性化・ASR・凍害などの劣化を促進する



◆ 橋座で受けて流す



- ☆ 塗膜防水材が劣化因子を含む水を防ぎ、
- ☆ 導水材が漏水垂れによる側面の汚染・劣化を防ぐ

新工法による
対策の結果



(出典; 「5M対策工法」アオイ化学工業, イタガキ建設コンサルタント)

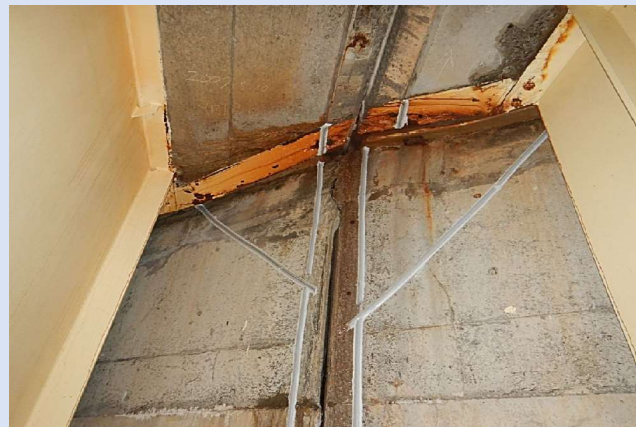
水分浸入の抑制 (水切りの活用事例)

中国自動車道 蓼野第4橋 A2橋台 試験施工

2018.11:伸縮装置からの漏水を確認
躯体前面は湿潤状態(苔、汚れが発生)



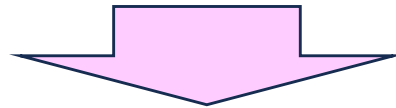
2023.09:橋座からの漏水無,躯体前面は乾燥状態



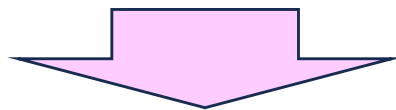
(出典 ; 「5M対策工法」アオイ化学工業, イタガキ建設コンサルタント)

【コンクリートの劣化メカニズム】

- 塩害 コンクリート中に侵入した塩化物イオンの作用により鉄筋周囲の不動態皮膜が破壊され、鉄筋が腐食
- 中性化 コンクリート中に侵入した二酸化炭素の作用により鉄筋周囲の不動態皮膜が破壊され、鉄筋が腐食
- ASR 反応性骨材周囲に生成したアルカリシリカゲルの吸水膨張作用によりコンクリートが膨張



『劣化原因が異なれば補修の要求性能も変わる』



『劣化機構を考慮して適切な補修工法選定を！』

ご清聴ありがとうございました



一般社団法人

コンクリートメンテナンス協会

<https://www.j-cma.jp/>

END