

コンクリートの劣化機構を理解して 維持管理に活かす (Part1)

一般社団法人コンクリートメンテナンス協会

専務理事/技術委員長 江良和徳

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)
- ASR
- 凍害
- 化学的侵食(下水道の硫酸劣化)
- 疲労(RC床版の疲労)

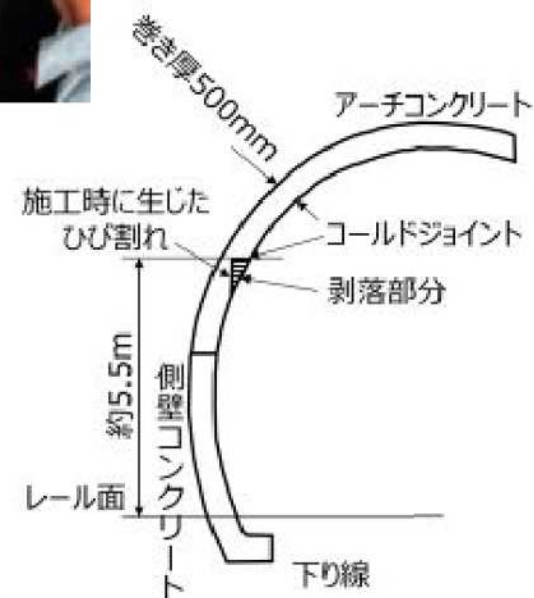
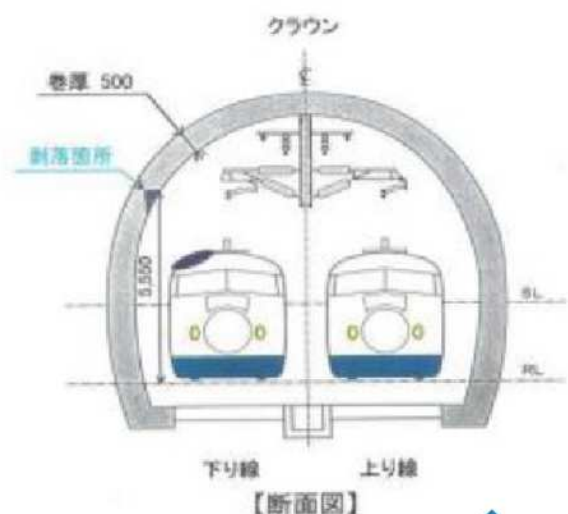
2. 維持管理に活かす

- 補修工法選定の考え方
- 維持管理のシナリオ
- 橋梁延命化シナリオ研究会の取り組み

はじめに

コンクリート構造物の老朽化

1999年 山陽新幹線福岡トンネルでのコンクリート片落下事故

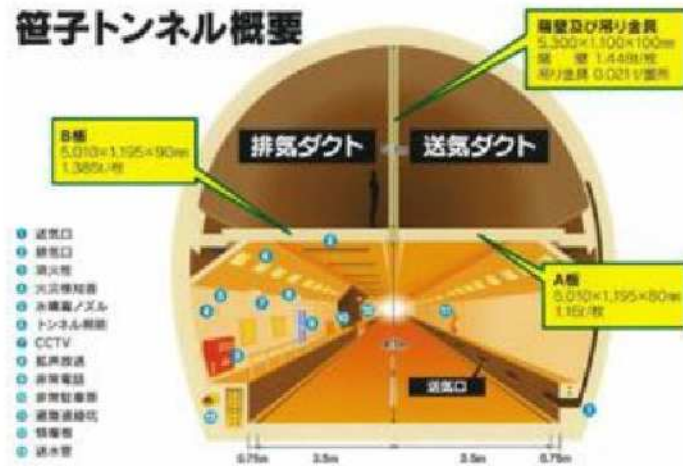


1999年福岡トンネルにおいて
走行中の新幹線の上に
約200kgのコンクリートが落下

コンクリート構造物の老朽化

2012年 中央自動車道 笹子トンネルでの天井版落下事故

笹子トンネル概要



コンクリート構造物の老朽化

2025年 埼玉県八潮市で起きた道路陥没事故(下水道管の劣化)



コンクリート構造物の老朽化の現状

例えば、国内の道路橋は約73万橋

道路トンネルは約1万本が存在

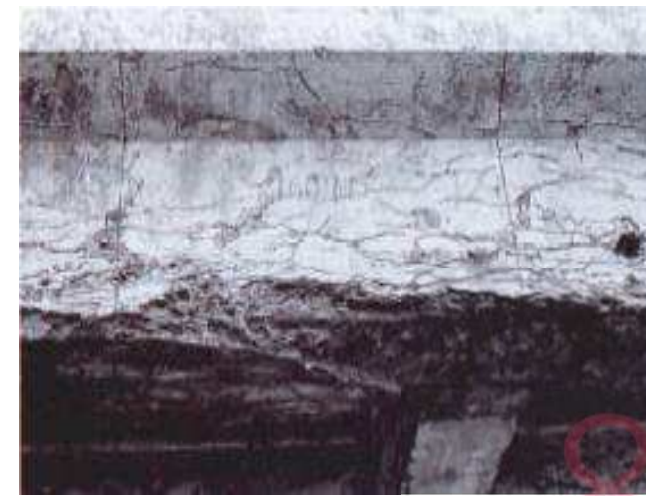
これらのインフラが急速に老朽化しつつある

直ちに補修や補強を施す必要のある構造物が増加



維持管理(調査・点検・診断・補修・補強)の重要性が今後ますます増加する

コンクリート構造物に生じるさまざまな変状



変状の分類 ～土木学会 コンクリート標準示方書[維持管理編]より～

- ・『**変状**』とは、構造物に生じた様々な不具合の総称。
- ・下記の3種類に分類される。

【初期欠陥】

施工時に発生した変状のうち、有害となる可能性のある変状

例) 乾燥収縮, 温度ひび割れ, コールドジョイント, かぶり不足, etc.



【損傷】

短時間のうちに発生し、時間経過によっても進行しない変状

例) **地震や衝突**などによるひび割れや剥離, etc.



【劣化】

時間の経過に伴って進行する変状

例) 塩害, 中性化, ASR, 凍害, 化学的侵食, 疲労, etc.



1. 劣化機構を理解する

1.1 塩害



塩害による劣化のメカニズム

【原因】

- ・海水、飛来塩分、凍結防止剤などの外部要因、または材料(除塩不足の海砂など) に由来する塩化物イオンがコンクリート中に浸入
- ・浸入した塩化物イオンはコンクリート表面から内部へ水分とともに浸透・拡散



【劣化の進行】

- ・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濃度を超えると、鉄筋表面を保護している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で鉄筋腐食が進行し、腐食生成物による体積膨張が生じる



【性能低下】

- ・腐食生成物の膨張圧により、ひび割れ、コンクリートの浮き・はく離、鉄筋露出が発生
- ・コンクリートと鉄筋との付着が低下
- ・鉄筋断面の減少 ⇒ 最終的には耐荷性能の低下

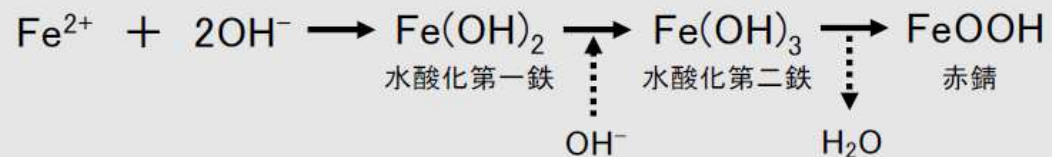
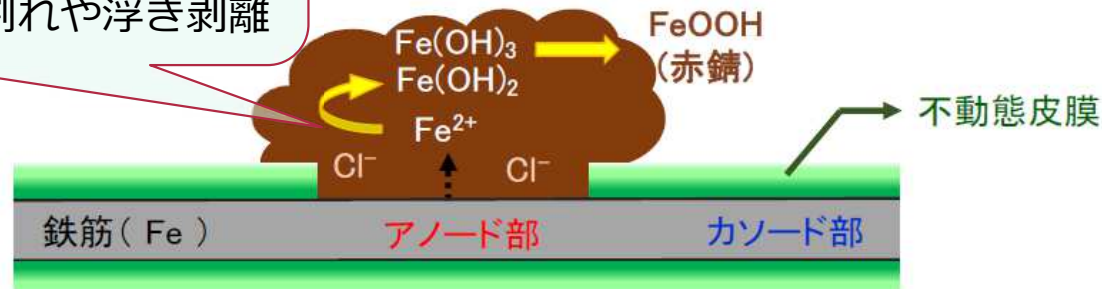
不動態皮膜と鉄筋腐食 (塩害)

- ・コンクリート中(強アルカリ環境)にある鉄筋は、**不動態皮膜**によって腐食から保護されている
- ・しかし、腐食発生限界を超えた**塩化物イオン**の存在下では、不動態皮膜が破壊され、鉄筋は腐食しやすい環境に晒される
- ・そこに**水と酸素**が供給されると鉄筋は腐食する(腐食生成物の体積膨張)

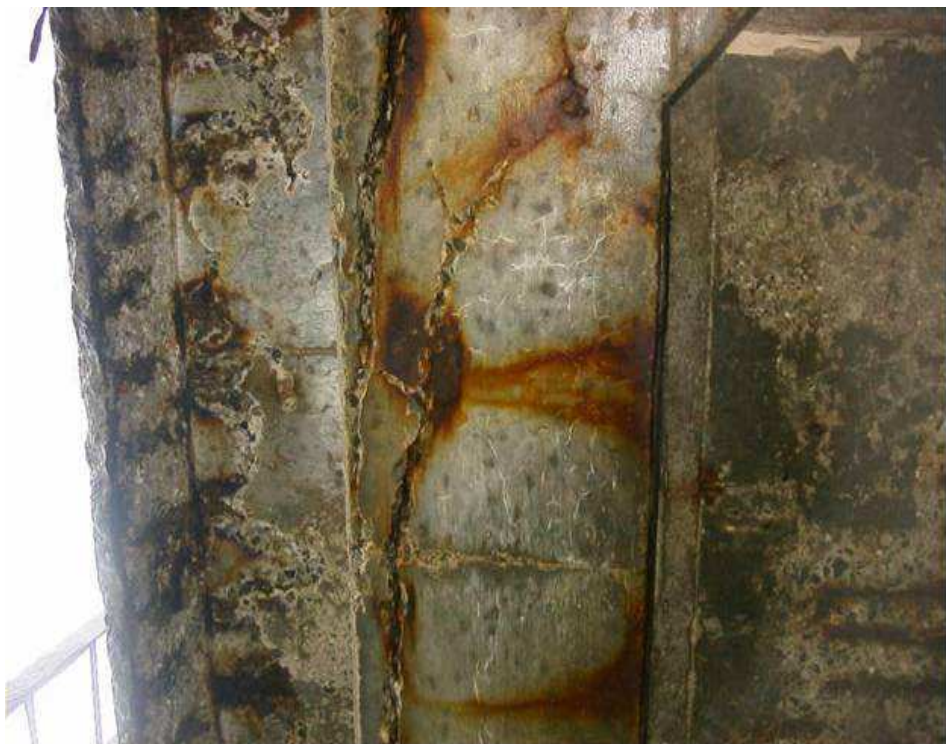
【塩害】

高い塩化物イオン量により不動態皮膜が破壊

鉄筋腐食による膨張圧 ➡ ひび割れや浮き剥離



塩害による劣化の事例



錆汁を伴うひび割れ



コンクリートの浮き、剥離

塩害による劣化の事例



コンクリートの剥落、鉄筋露出



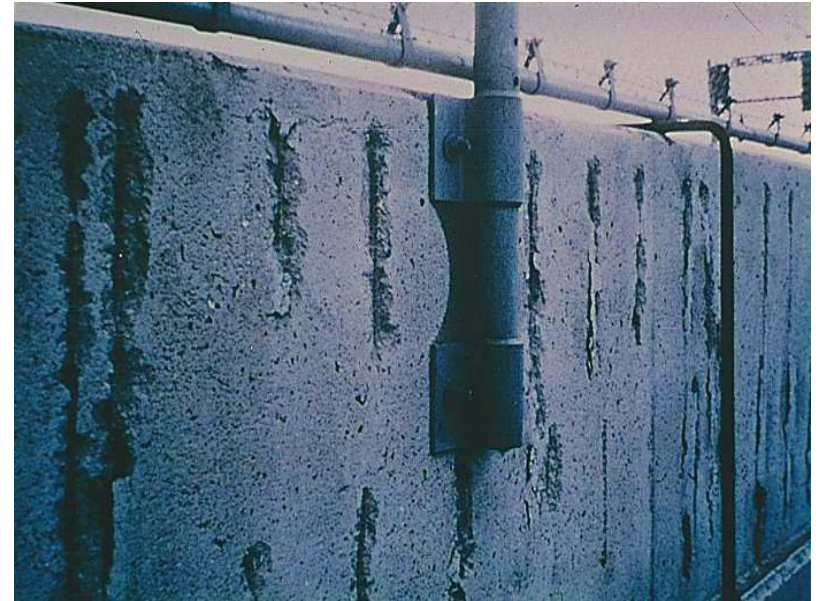
再劣化

コンクリート診断士試験での出題傾向 (塩害)

【ERA調べ】

年度	設問	出題内容
2025年	択一式	・分極曲線の概念 ・分極抵抗法の原理 ・塩化物イオン濃度分布 ・塩化物イオンの拡散 ・電気防食工法
	記述式	・(土木)RC橋台 縦壁;塩害と中性化の複合劣化、塩分濃縮 翼壁;ASR
2024年	択一式	・鉄筋腐食反応式 ・塩化物イオン浸透深さ試験 ・自然電位法 ・RC中空床版橋の変状 ・凍結防止剤によるRC床版下面の変状 ・電気防食の管理
	記述式	・(建築)RC建造物 塩害と中性化の複合劣化、塩分濃縮
2023年	択一式	・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 ・鉄筋防錆処理 ・脱塩工法の留意点
	記述式	・(土木)PCポストT桁の変状 凍結防止剤 PC鋼材腐食 桁端
2022年	択一式	・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 ・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	・(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	・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	・(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

1.2 中性化(と水の浸透に伴う鋼材腐食)



中性化による劣化のメカニズム

【原因】

- ・大気中の二酸化炭素がコンクリート内部に侵入
- ・二酸化炭素とセメント水和物(水酸化カルシウム)が炭酸化反応を起こし、炭酸カルシウムを生成
- ・コンクリートのpHが強アルカリ性(pH=12~13程度)から低下(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
- ・中性化深さが鉄筋付近まで到達すると、鉄筋を保護している不動態皮膜が破壊
- ・水、酸素が供給されることで鉄筋腐食が進行し、腐食生成物による体積膨張が生じる



【性能低下】

- ・腐食生成物の膨張圧により、ひび割れ、コンクリートの浮き・はく離、鉄筋露出が発生
- ・コンクリートと鉄筋との付着が低下
- ・鉄筋断面の減少 ⇒ 最終的には耐荷性能の低下

不動態皮膜と鉄筋腐食（中性化）

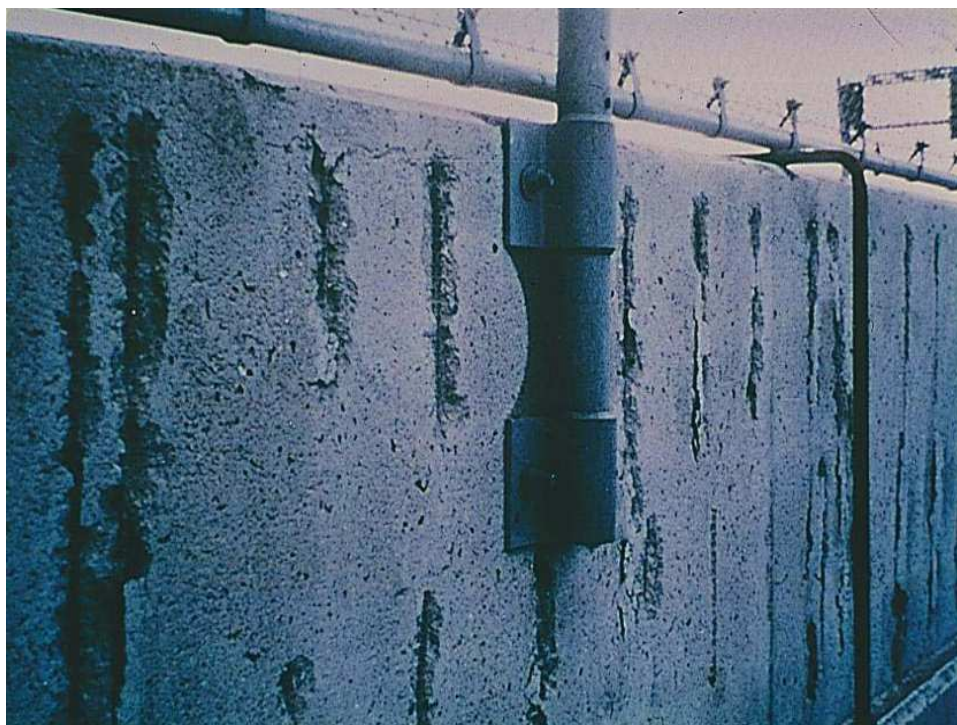
- ・コンクリート中(強アルカリ環境)にある鉄筋は、**不動態皮膜**によって腐食から保護されている
- ・しかし、**鉄筋周囲のpH低下(中性化残り10mm未満)**により不動態皮膜が破壊され、鉄筋は腐食しやすい環境に晒される
- ・そこに**水と酸素**が供給されると鉄筋は腐食する(腐食生成物の体積膨張)



【水の浸透の影響】

- ・中性化によりpHが低下しても、水の影響がなければ腐食しにくい
- ・同一部材、同一コンクリート品質であっても中性化深さに差が生じる
- ・塩害環境では中性化残り10mm以上であっても腐食開始

中性化による劣化の事例



鉄筋に沿ったコンクリート剥離



鉄筋露出(かぶり不足)

コンクリート診断士試験での出題傾向 (中性化)

【ERA調べ】

年度	設問	出題内容
2025年	択一式	・中性化メカニズム(化学平衡論) ・ひび割れと中性化 ・中性化の補修
	記述式	・(土木)RC橋台 縦壁;塩害と中性化の複合劣化、塩分濃縮 翼壁;ASR
2024年	択一式	・中性化の特徴 ・建築構造物の変状 ・RC構造物の中性化進行予測($\sqrt{t}$ 則)
	記述式	・(建築)RC建造物 塩害と中性化の複合劣化、塩分濃縮
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 ・塩分濃縮の将来予測 ・けい酸塩系含浸材塗布後の中性化進行予測($\sqrt{t}$ 則)
	記述式	—

1.3 アルカリシリカ反応(ASR)



ASRによる劣化のメカニズム

【原因】

- ・高アルカリ環境：セメント等の材料に由来するアルカリ金属イオンによる高pH環境
- ・水分の供給：雨水や地下水などが反応を進行・継続させる
- ・反応性骨材：アルカリ反応性鉱物(反応性シリカ)を含む骨材の使用



【劣化の進行】

- ・骨材中の反応性シリカがアルカリ分と反応し、骨材周囲にアルカリシリカゲルを生成
- ・コンクリート内部に供給された水分をアルカリシリカゲルが吸収し、体積膨張
- ・この局所的な膨張圧より、骨材やコンクリートにひび割れが発生し、進展する



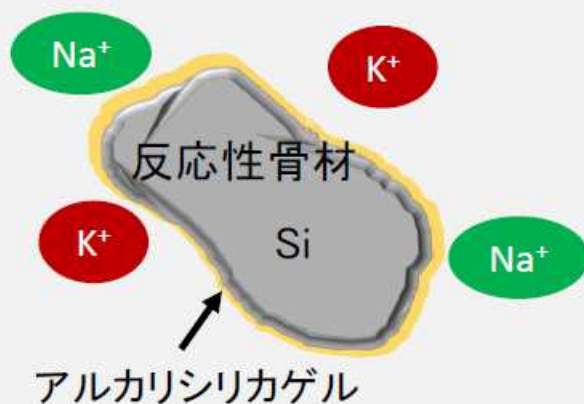
【性能低下】

- ・外観の変状：亀甲状ひび割れ、主筋に沿ったひび割れ、白色ゲル、目地部の段差など
- ・力学特性の低下：圧縮強度、静弾性係数の低下、鉄筋破断など
- ・複合劣化の誘発：ASRのひび割れから劣化因子が侵入し、鉄筋腐食の原因となる

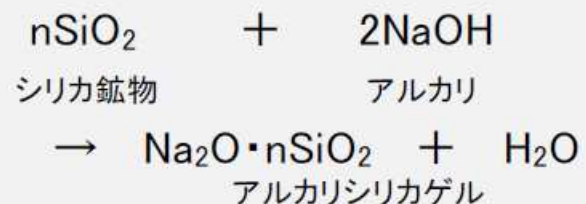
ASRによる劣化のメカニズム

第1ステージ

『アルカリシリカゲルの生成』



《化学式》

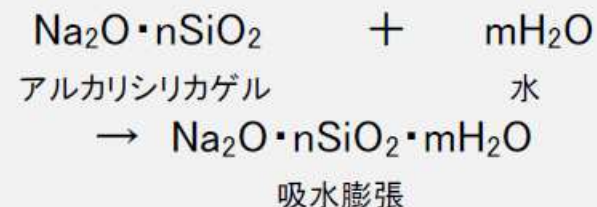


第2ステージ

『アルカリシリカゲルの膨張』



《化学式》



ASRによる劣化の事例



橋脚の亀甲状ひび割れ



PC桁の橋軸方向ひび割れ

ASRによる劣化の事例



ASRによる鉄筋破断



再劣化

コンクリート診断士試験での出題傾向 (ASR)

【ERA調べ】

年度	設問	出題内容
2025年	択一式	・アルカリ金属量の推定 ・PC中空床版橋のASR
	記述式	・(土木)RC橋台 縦壁;塩害と中性化の複合劣化、塩分濃縮 翼壁;ASR
2024年	択一式	・ASR膨張の特徴 ・アルカリシリカゲルの識別方法 ・促進養生試験(JCI-S-011法) ・アルカリシリカゲルとエフロレンスの識別方法 ・コア破断面の観察 ・反応性骨材の地域特性
	記述式	—
2023年	択一式	・ペーシング現象の特徴 ・全アルカリ量(等価Na ₂ O換算量)の計算 ・塩害とASRの複合劣化 ・漏洩磁束法による鉄筋破断の検出
	記述式	・(建築)市民ホールのASRによる変状
2022年	択一式	・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
	記述式	—
2021年	択一式	・モルタルバー法による膨張性評価 ・ASRの劣化調査方法 ・反応性珪物の調査方法 ・PC桁のASR劣化 ・ASR関連基準の変遷 ・ASR補修工法と補修材料
	記述式	—

1.4 凍害



凍害による劣化のメカニズム

【原因】

- ・コンクリート内部の含水率が高く、凍結に伴う移動水を受け入れる空隙が不足した状態(臨界飽和度を越えた状態)にあること
- ・外気温が0℃以下になることで細孔溶液が凍結し、水から氷への相変化に伴って約9%の体積膨張が生じること



【劣化の進行】

- ・凍結に伴う膨張圧(水圧説)や、氷点降下の違いによる浸透圧(浸透圧説)により、セメントペースト組織に微細なひび割れが発生
- ・凍結と融解の繰り返しによって微細なひび割れが連結・進展し、コンクリート組織が徐々に脆弱化



【性能低下】

- ・力学特性の低下：微細ひび割れの蓄積により、圧縮強度や相対動弾性係数の低下
- ・外観の変状：ひび割れ進展、スケーリング、ポップアウト、断面欠損など
- ・複合劣化の誘発：表層品質の低下により劣化因子が侵入し、鉄筋腐食の原因となる

凍害による劣化の事例



橋台で生じた凍害



橋脚で生じた凍害

コンクリート診断士試験での出題傾向（凍害）

【ERA調べ】

年度	設問	出題内容
2025年	択一式	・水路の凍害の特徴(温度、環境)
	記述式	—
2024年	択一式	・初期凍害のメカニズム ・凍害の調査方法
	記述式	—
2023年	択一式	・浸透圧説による凍害メカニズム ・超音波透過法による凍害深さ測定 ・凍害のスケリングとポップアウト
	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 ・凍害の特徴(日射、温度) ・凍害の補修工法選定
	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 塩害との複合劣化

1.5 化学的侵食



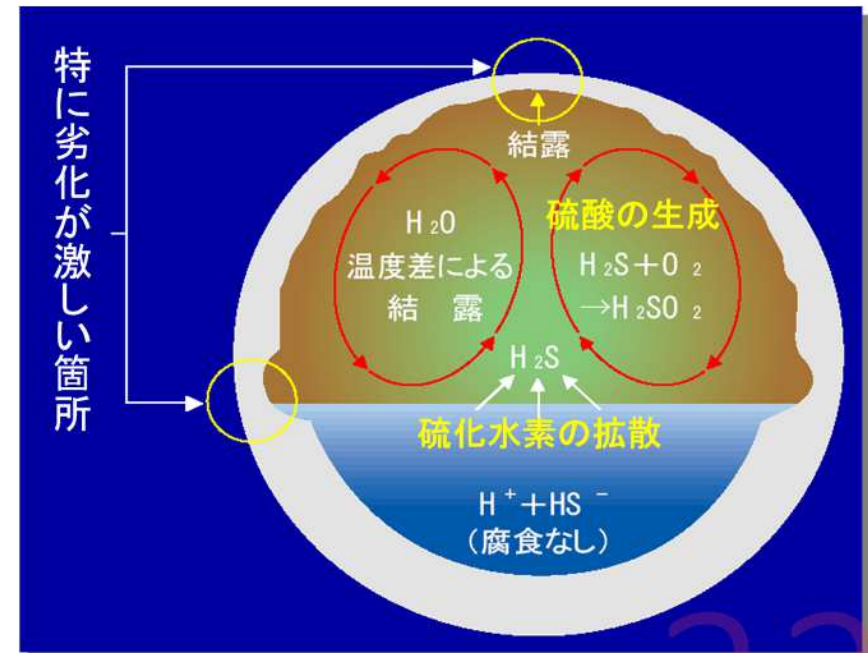
化学的侵食による劣化のメカニズム

【化学的侵食とは】

- ・コンクリートが外部から化学的作用を受け、水和生成物 が変質・分解して結合能力を失う
- ・主要要因は酸類、アルカリ類、塩類、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

【下水道における硫酸劣化】

- ・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する



化学的侵食による劣化のメカニズム

【硫酸劣化のメカニズム】

- ①下水中の汚泥などにおいて、嫌気性条件下で硫酸塩還元細菌の働きにより硫化水素(H_2S)が発生し、水面上の気相部へ拡散する。
- ②コンクリート表面の結露水などに硫化水素が溶解し、好気性条件で繁殖した硫黄酸化細菌の働きによって硫酸(H_2SO_4)に酸化され、コンクリート表面が強酸性環境(pH1～2程度)となる。
- ③硫酸がコンクリート中の水酸化カルシウムと反応して二水石こうを生成する。
二水石こうがセメント中のアルミン酸塩と反応してエトリンガイトを形成する。
- ④二水石こうやエトリンガイトの生成に伴う体積膨張により、コンクリートにひび割れや剥離・剥落が進行し、組織が脆弱化・破壊される。
- ⑤コンクリートの強度が大幅に低下し、最終的には下水道管などのコンクリート構造物が崩壊・破壊に至る。

化学的侵食による劣化の事例



コンクリート診断士試験での出題傾向（化学的侵食）

【ERA調べ】

年度	設問	出題内容
2025年	択一式	・下水道施設の硫酸劣化
	記述式	—
2024年	択一式	・侵食性炭酸のメカニズム ・戸建て住宅布基礎の硫酸塩劣化
	記述式	・(土木)山岳部の人道トンネル 化学的侵食 硫化水素 トンネル覆工
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	—

1.6 疲労(RC床版の疲労)



疲労による劣化のメカニズム

【原因】

- ・道路橋RC床版に対する、大型車両などの輪荷重の繰返し作用
- ・繰返し応力に雨水などの水分の浸透が複合的に作用し、床版コンクリート内に微細な損傷が蓄積



【劣化の進行】

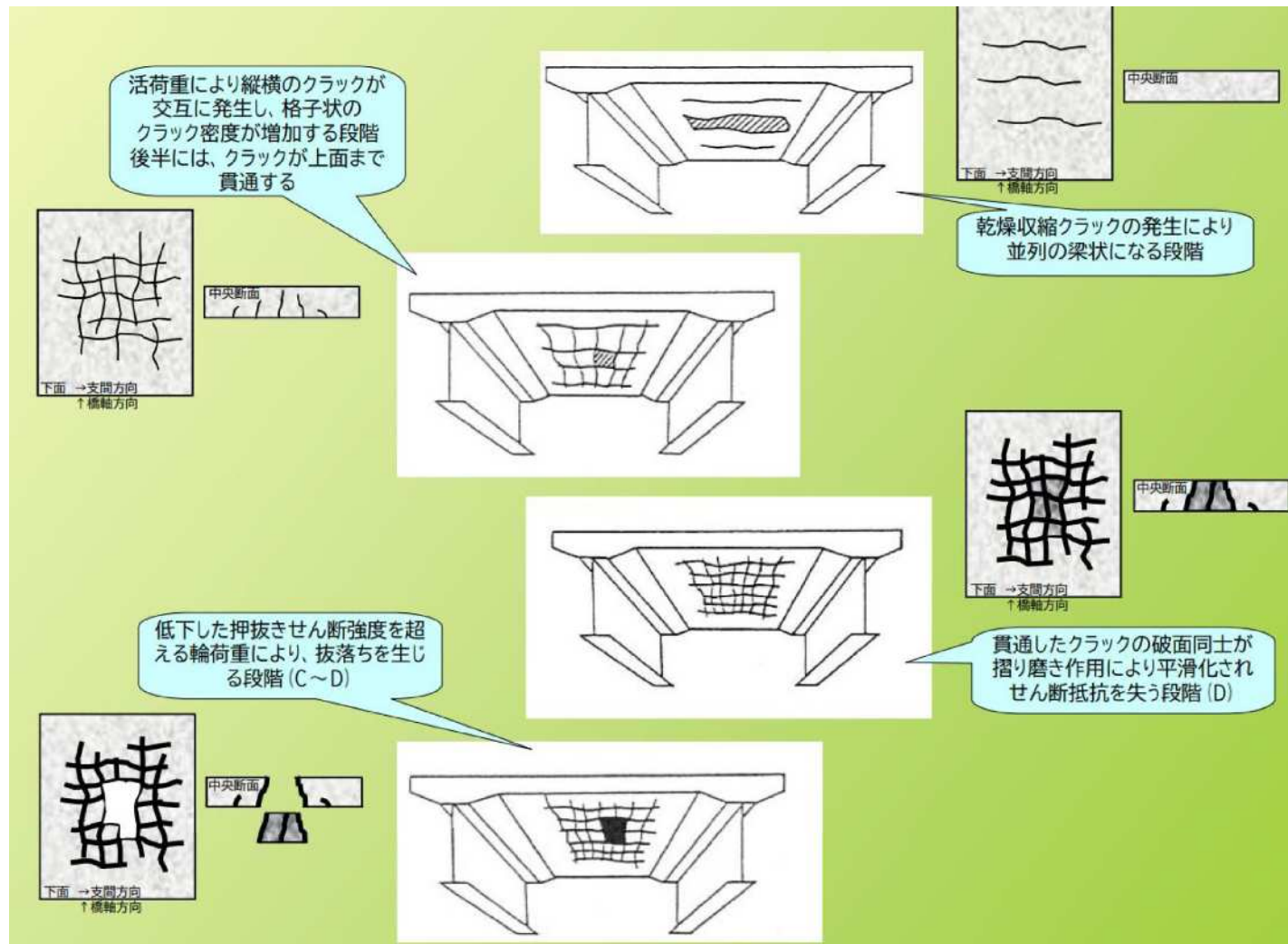
- ・初期段階として、主に乾燥収縮に起因する一方向（橋軸直角方向）のひび割れが発生
- ・輪荷重の繰返しによる曲げ応力によって橋軸方向にもひび割れが進展し、格子状のひび割れを形成
- ・ひび割れが床版下面まで貫通して水分が供給されると、ひび割れ面でのすり磨き現象が生じる
- ・ひび割れ面における骨材の噛み合わせ（せん断伝達能力）が失われて床版としての連続性が低下し、独立したブロック状となって最終的に押し抜きせん断破壊に至る



【性能低下】

- ・外観の変状：ひび割れの進展・高密度化、貫通ひび割れからの遊離石灰の析出
- ・構造性能低下：床版全体の荷重分配機能の低下、および輪荷重に対する押し抜きせん断耐力の喪失
- ・終局状態：床版コンクリートの下面への抜け落ち、それに伴う路面陥没の発生

疲労による劣化のメカニズム



(出典「橋梁床版の疲労」独立行政法人土木研究所)

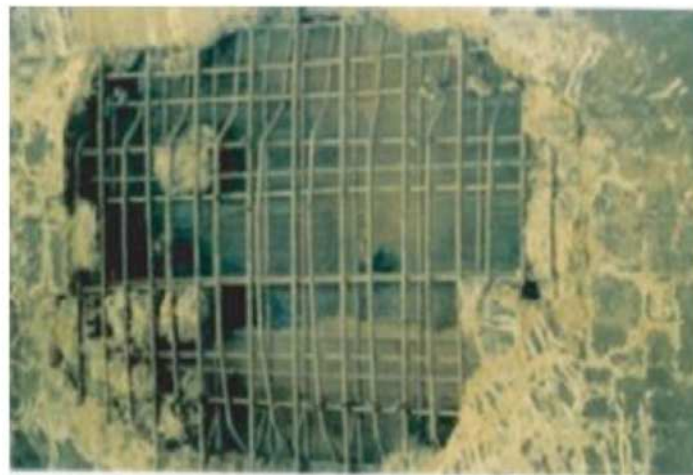
疲労による劣化の事例



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)

コンクリート診断士試験での出題傾向 (疲労)

【ERA調べ】

年度	設問	出題内容
2025年	択一式	・鉄筋の疲労破壊 ・線形累積損傷則(マイケル-則)による疲労安全性(S-N曲線)
	記述式	—
2024年	択一式	・RC床版疲労のメカニズム ・床版土砂化
	記述式	—
2023年	択一式	・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(マイケル-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	・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(マイケル-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	・鋼橋RC床版の疲労と撤去
	記述式	・(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

問 題 (診 断 士)

[解答作成の注意事項]

1. 試験監督者の試験開始の合図があるまで、試験問題を見てはいけません。
2. この試験問題は、四肢択一式および記述式です。試験問題は、全部で 43 ページです。
3. 解答用紙は、四肢択一式問題用(マークシート) 1 枚および記述式問題用 1 枚の計 2 枚です。
4. 四肢択一式問題は 30 問です。
5. 四肢択一式問題の解答用紙の所定欄に、受験番号、氏名および試験地を間違いのないように記入・マークしてください。受験番号は、受験番号の記入例を参照して間違いのないように記入・マークしてください。
6. 四肢択一式問題は、問題ごとに正解肢は 1 つしかありません。1 問につき 2 つ以上マークすると、その問題の解答は無効になります。正解と考える選択肢の番号をマークシートの解答欄①②③④から 1 つ選び、HB または B 程度の黒鉛筆(シャープペンシル可)で黒く塗りつぶしてください(解答用紙のマーク記入例参照)。
7. マークシートは光学的に読み取るので、記入の仕方が悪い場合、消し方が不十分な場合、あるいはボールペンで記入した場合等では二重解答や無解答となることがあります。
8. 記述式問題は、問題Ⅰおよび問題Ⅱの 2 つがあります。いずれか 1 題を選択して答えてください。
9. 記述式問題の解答用紙の所定欄に、受験番号、氏名および試験地を記入してください。
10. 記述式問題の解答に際しては、選択した問題の番号を解答用紙の所定欄に記入してください。所定欄に記入された番号に従って採点されます。選択した問題の番号が記入されていなかった場合は、採点の対象となりません。

まとめ

- 塩害 塩化物イオンの作用により鉄筋の不動態皮膜が破壊され、そこに水と酸素が供給されることにより鉄筋が腐食
- 中性化 二酸化炭素の作用により鉄筋の不動態皮膜が破壊され、そこに水と酸素が供給されることにより鉄筋が腐食
- ASR 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
- 凍害 水分の凍結融解作用の繰り返しによりコンクリートが脆弱化
- 硫酸劣化 硫化水素から生成された硫酸の作用によりコンクリートが化学的に腐食し、硬化体が組織崩壊して脆弱化
- 疲労 輪荷重の繰り返し作用と水分の侵入によりコンクリートのひび割れが進展し、最終的に押し抜きせん断破壊に至る



『劣化機構を理解したうえで、補修工法の要求性能を見極める』
『維持管理シナリオを考慮して総合的に補修工法を選定する』

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