

化学的腐食を受けた コンクリート構造物の診断事例

2026年11月13日
(株)太平洋コンサルタント
西日本技術部

■ 本日の内容

- ① 硫酸劣化
- ② 炭酸による侵食
- ③ 溶脱
- ④ ソーマサイト生成

■ インフラの老朽化と建設コンサルタント

(1) インフラの老朽化は大きな社会問題

インフラの老朽化で問題になっている社会資本には、主に道路、橋、トンネル、上下水道、送電線、河川、ダム、砂防、海岸・港湾、鉄道、空港、病院、公園、公営住宅、官庁施設がある。

これらは、**コンクリートや鋼材等を材料**とする様々な部材を使って作られており、経年、環境や車両荷重の影響で徐々に劣化が進んでいる。

コンクリートや鋼材の劣化による**インフラの老朽化**は社会に及ぼす影響が大きく、官民が連携して取り組むべき**重要な社会課題**となっている。

2012年の笹子トンネルでの事故等が契機となり、**2014年よりインフラ長寿命化計画(国土交通省)**が本格始動した。

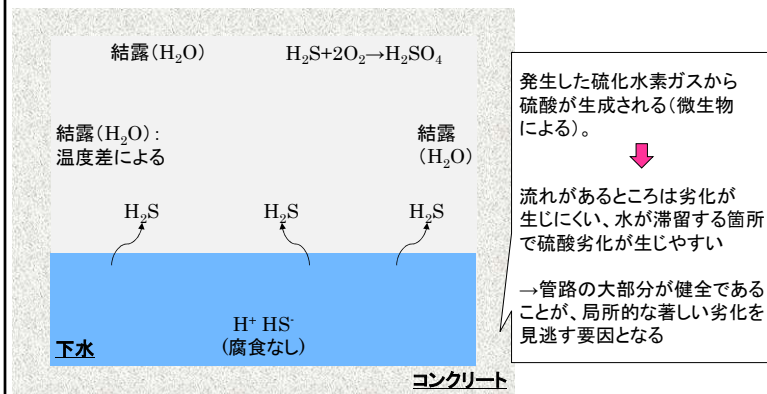
(2) 2025年1月 埼玉県 道路陥没事故

埼玉県八潮市の主要地方道 松戸草加線(県道54号)の交差点内で、**道路に陥没**が生じ1台のトラックが転落し、運転手が亡くなる。周辺の12市町の120万人に下水道の使用自粛要請。バイパス工事による仮復旧は雨水排水管は1月、下水管は4月に完了しているが、本復旧は2029~31年度の見通し。**下水道管の硫化水素による腐食**が原因と推定されている。**下水道管の2022年の簡易点検では「ランクB」(骨材が露出)と過小評価が指摘されている。**



【埼玉県 原因究明委員会】資料より

■ 下水道施設で硫酸が生成される仕組み



■ コンクリートの硫酸劣化

硫酸劣化: コンクリート外部からのSO₄²⁻により、コンクリートのCa分がセッコウ化し、脱落する劣化



～JCI コンクリート構造物の劣化事例写真集～

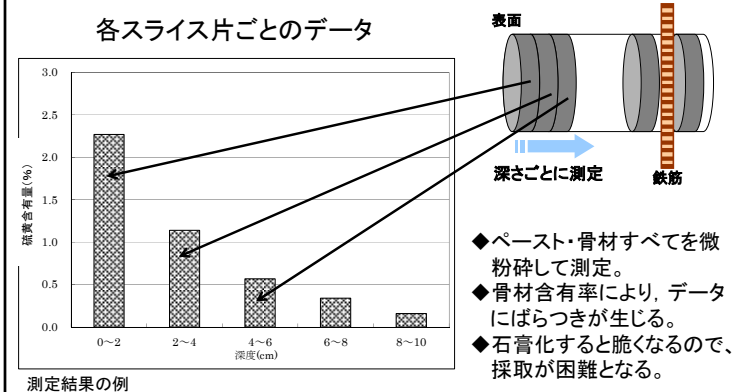
対象: 主に下水道施設の水路・施設など。温泉設備(水路)、酸性土壌と接する構造物など
 硫黄(S)の分布: 表面から内部方向へS濃度が変化 劣化が激しいと、表面は剥落し、減肉する

分析方法:

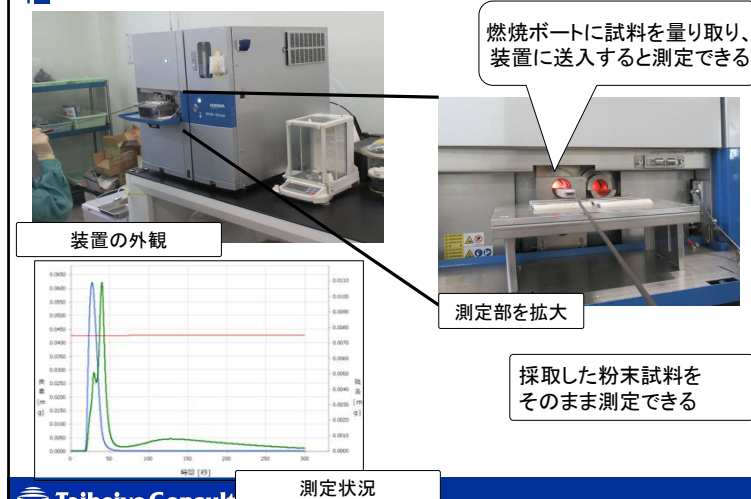
塩分のスライス法のように、表面からのS濃度を測定 全硫黄 (Total-S)

表面の劣化生成物は粉末X線回折分析で確認(セッコウ、エトリンガイトなど)
 Sの分布(侵入深さ)はEPMAが有効

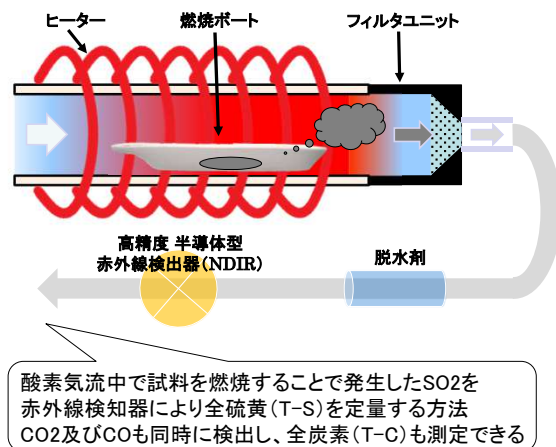
■ スライス法による含有量試験



■ 炭素・硫黄分析計による含有量試験



装置内部の模式図



コンクリートの硫酸劣化

硫酸劣化：コンクリート外部からのSO₄²⁻により、コンクリートのCa分がセッコウ化し、脱落する劣化



～JCI コンクリート構造物の劣化事例写真集～

対象：主に下水道施設の水路・施設など。温泉設備（水路）、酸性土壌と接する構造物など
硫黄（S）の分布：表面から内部方向へS濃度が変化 劣化が激しいと、表面は剥落し、減肉する
分析方法：

塩分のスライス法のように、表面からのS濃度を測定 全硫黄（Total-S） JIS M 8850

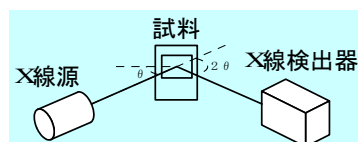
表面の劣化生成物は粉末X線回折分析で確認（セッコウ、エトリンガイトなど）

Sの分布（侵入深さ）はEPMAが有効

XRD = 粉末X線回折 Powder X-ray Diffraction Method

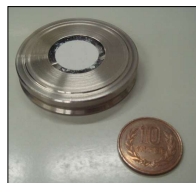
原理

- X線を結晶に照射すると
- 結晶の面間隔に応じた角度にX線の散乱が生じる
- 散乱の見られる角度は物質により一定であり、散乱が見られた角度の組合せから物質を同定する



何ができるか？

- 物質の種類を調べる＝定性分析
- 未知試料の正体を同定できる
- 含まれている物質の量を測定する（結晶性物質のみ）

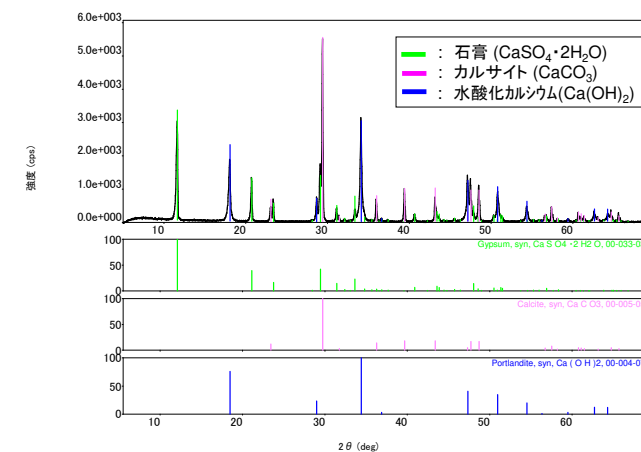


専用のサンプルホルダーに充填



粉末X線回折装置

XRD分析例



コンクリートの硫酸劣化

硫酸劣化：コンクリート外部からの SO_4^{2-} により、コンクリートのCa分がセッコウ化し、脱落する劣化



～JCI コンクリート構造物の劣化事例写真集～

対象：主に下水道施設の水路・施設など。温泉設備（水路）、酸性土壌と接する構造物など
 硫酸（S）の分布：表面から内部方向へS濃度が変化 劣化が激しいと、表面は剥落し、減肉する
 分析方法：

塩分のスライス法のように、表面からのS濃度を測定 全硫酸（Total-S）JIS M 8850
 表面の劣化生成物は粉末X線回折分析で確認（セッコウ、エトリンガイトなど）

Sの分布（侵入深さ）はEPMAが有効

分析装置：電子線マイクロアナライザー (EPMA: Electron Probe Micro Analyzer)

<代表的な用途>

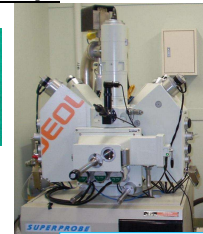
- 微小部位の観察（SEM）
- 観察部位の元素分析（定性・定量）
- マッピング分析

<SEMとの違い>

- 観察倍率 ⇒ SEMの方が高倍率
- 元素分析精度 ⇒ EPMAの方が良好
- 広範囲マッピング分析 ⇒ EPMAのみ可
 （最大80×80mm）

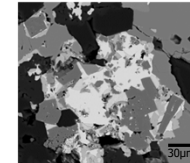


研磨された試料



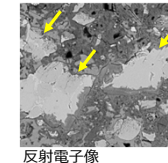
EPMA装置
 日本電子製 JXA-8100

金属や鉱山資源分野での利用例

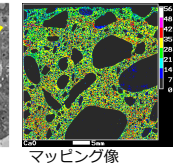


硫化鉱物（天然）

セメント・コンクリート分野での利用例



反射電子像
 ：組成を反映した像
 ベース中の未水和セメント

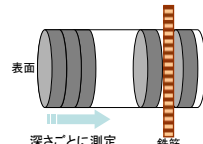
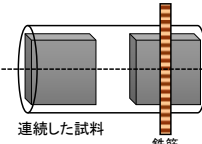
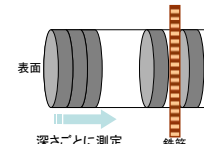


マッピング像
 ：元素の分布
 硬化コンクリート中のCaの分布

よく適用される事例：塩害・硫酸劣化・溶脱

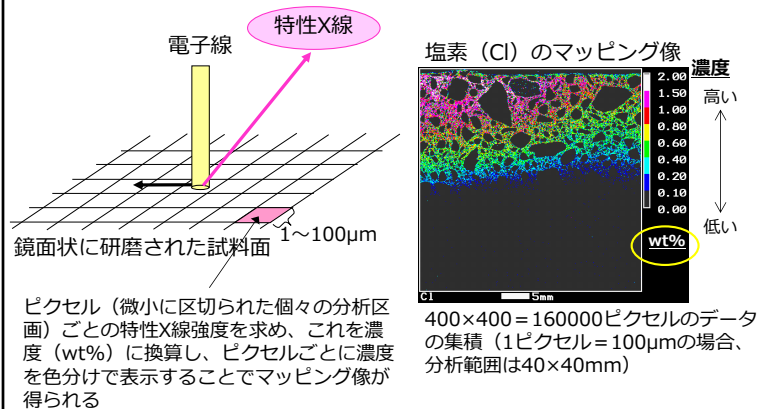
劣化事象	試験目的・方法
塩害 コンクリート中のCl ⁻ により、内部の鉄筋が錆びてコンクリートがひび割れる劣化	外部からのCl ⁻ 浸入深さ、濃度分布 化学分析・ EPMA ・XRF
硫酸劣化 コンクリート外部からの SO_4^{2-} により、コンクリートのCa分がセッコウ化し、脱落する劣化	外部からのS浸入深さ、濃度分布、反応生成物 化学分析・ EPMA ・XRD
溶脱 コンクリートのCa分等が水などに溶解・流出する劣化	表面からの変質深さ、組織、強度（硬度） EPMA ・SEM

試料調製の方法

化学分析	機器分析	
JIS A 1154（電位差滴定法）	EPMA	蛍光X線分析
JIS試験規格	土木学会規準	
セメントペースト・骨材を粉砕 深さごとに測定	構造物表面から内部へ 連続して測定可	セメントペースト・骨材を粉砕 深さごとに測定
		
表面 深さごとに測定	連続した試料 鉄筋	表面 深さごとに測定
骨材含有割合によりデータにばらつきが生じる	セメントペースト部分のデータのみで濃度分布表示	骨材含有割合によりデータにばらつきが生じる
迅速に結果を得られる	結果が出るまで時間が必要 特殊技術を要する	迅速に結果を得られる

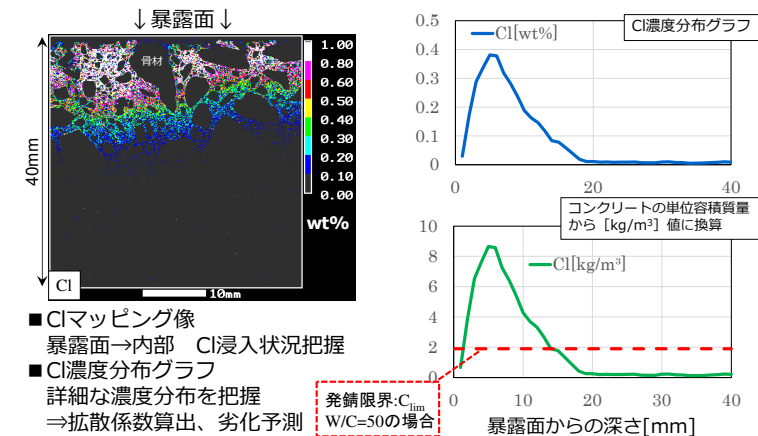
EPMAによるマッピング分析

＜マッピング分析の測定原理＞

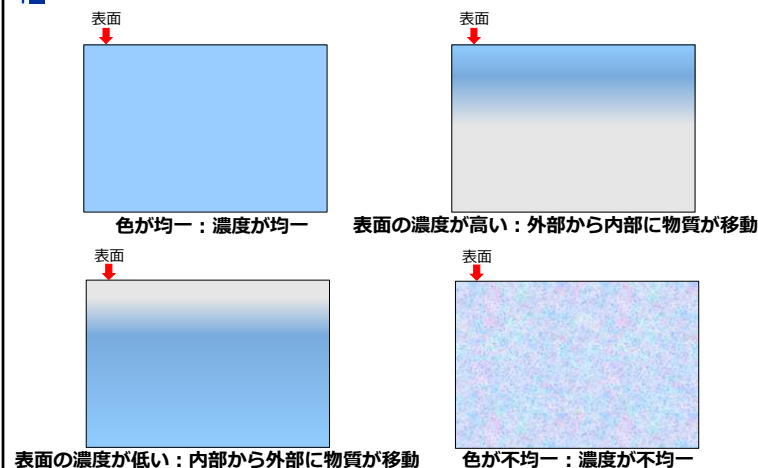


EPMAによるマッピング分析（濃度分布）

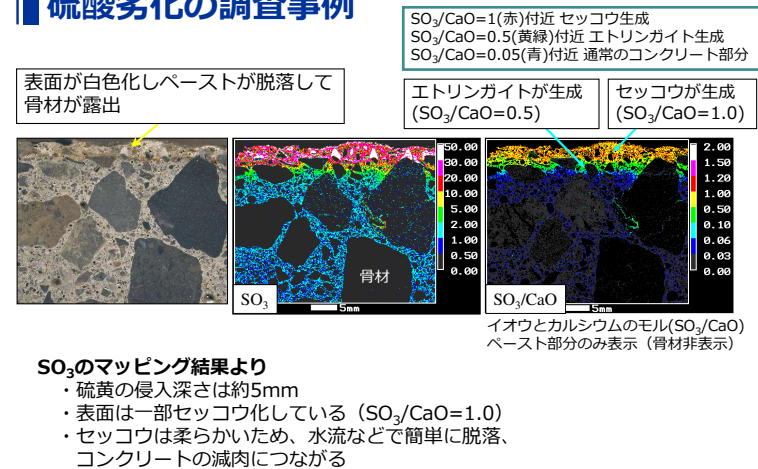
＜海洋環境に暴露されたコンクリート＞



EPMAの結果からわかること（まとめ）

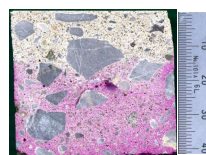


硫酸劣化の調査事例

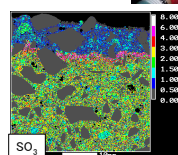


炭酸による侵食の調査事例

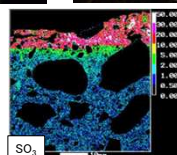
下水処理場コンクリート反応槽
の表面の劣化
竣工から1年程度でもボロボロ



中性化深さ



SO₂のマッピング



SO₃

硫酸酸性水による表層のセッコウ化の例

本件のコンクリート

※硫酸ではなく炭酸による侵食と推定

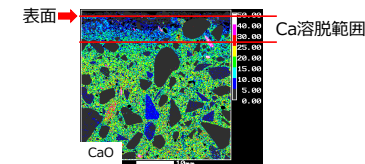
生物反応によって生成される二酸化炭素によって気相部では炭酸ガスによる中性化、液相部では侵食性遊離炭酸の形態でコンクリートの溶脱を引き起こす

溶脱の調査事例

対象：河川水水路、ダム、貯水槽、浄水場設備など、真水と接するコンクリート

- ・セメントペースト部での溶脱：溶脱範囲でCa濃度低下
溶脱が進むとペースト部が逸失し、強度低下
- ・骨材の選択溶解：石灰石骨材の溶解・脱離 強度低下

<Ca分の溶脱 面分析測定例>
表面からCaO濃度が低くなっている領域が溶脱範囲



表面

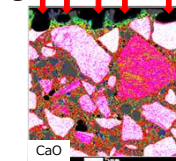
Ca溶脱範囲

<骨材選択溶解 面分析測定例>
石灰石骨材（粗骨材）が脱離している

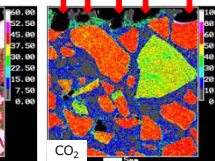
石灰石骨材の溶解



水路のコンクリート（製品）



CaO



CO₂

ソーマサイト生成の調査事例

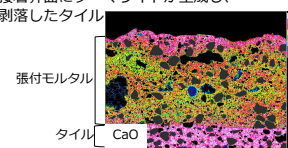
ソーマサイト：低温環境、水の存在下において、硫酸イオン（主に土壌中）、炭酸イオン（炭酸塩骨材）が供給されると、これらの物質とケイ酸カルシウム水和物（C-S-H）が反応して生成する物質。セメント組織を軟化させ、コンクリート表面のひび割れや崩壊を導く。



接着界面にソーマサイトが生成し、剥落したタイル

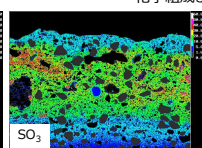
鉱物名	化学式	SO ₃ /CaOモル比
ジブサム	CaSO ₄ ・2H ₂ O	1
エトリンガイト	Ca ₃ Al ₂ O ₆ ・3CaSO ₄ ・32H ₂ O	0.5
ソーマサイト	Ca ₆ Si ₂ (CO ₃) ₂ (SO ₄) ₂ (OH) ₁₂ ・24H ₂ O	0.3

化学組成より鉱物種を推定

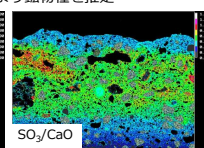


張付モルタル

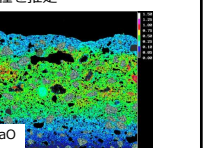
タイル



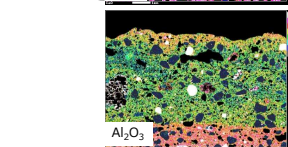
CaO



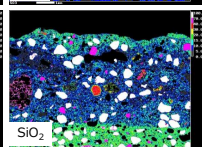
SO₃



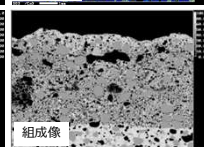
SO₃/CaO



Al₂O₃



SiO₂



組成像

まとめ

- ①下水道施設におけるコンクリートの硫酸劣化は、流れがあるところは劣化が生じにくく、水が滞留する箇所で見逃す要因となる
- ②EPMAを用いて元素濃度を面的に可視化することで、劣化物質の侵入深さや内部成分の流出状況を把握できる
- ③機器分析装置を用いることで、劣化原因と進行範囲を科学的に特定することができる
⇒劣化要因に応じた評価方法を選定することが重要となる

|| ご清聴ありがとうございました ||

何でも、お気軽にご相談下さい。

株式会社太平洋コンサルタント

広島営業所 TEL:082-225-7122

本 社 TEL:03-6630-3811



 Taiheiyo Consultant