コンクリートの劣化

鶴巻　広一
技術士（建設部門、総合技術監理部門）
コンクリート診断士

コンクリート

- 圧縮力には強いが、引張力に弱い（圧縮力の1/10程度で脆性破壊）
- 強アルカリ性（pH12以上）

鉄筋コンクリート

- 引張力は鉄筋が分担（設計上、コンクリートの引張力は考慮しない）
- 強アルカリ性のため、鉄筋は錆びない（不働態被膜の形成）

コンクリートの変状

a. 豆板
b. コールドジョイント
c. 内部欠陥
d. 砂すじ
e. 表面気泡
f. ひび割れ・浮き・はく落
g. 体積変化・クリープ
h. 錆汁
i. エフロレッセンス
j. 汚れ（変色）
k. すり減り

豆板

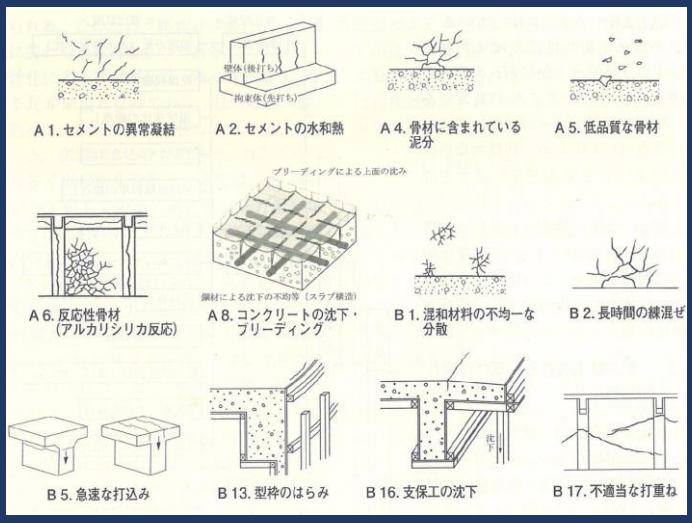
コールドジョイント

砂すじ

表面気泡

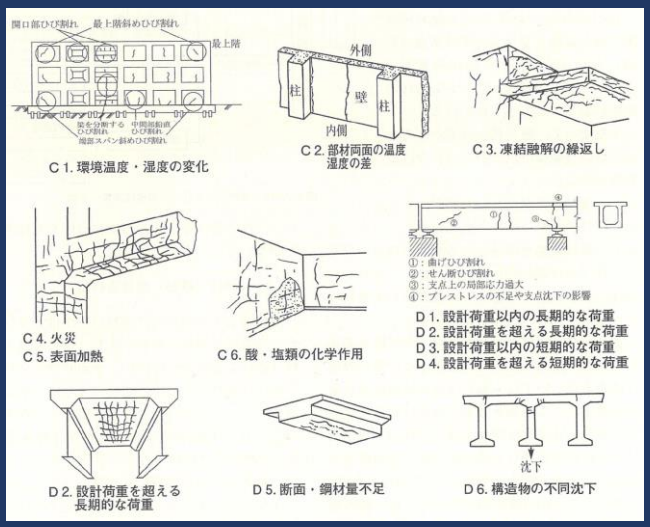
錆汁・エフロレッセンス

ひび割れのパターン①



日本コンクリート工学会：コンクリートのひび割れ調査.補修・補強指針－2013－.技報堂.2013.4

ひび割れのパターン②



日本コンクリート工学会：コンクリートのひび割れ調査.補修・補強指針－2013－.技報堂.2013.4

劣化の機構

① 中性化
② 塩害
③ アルカリシリカ反応
④ 火災
⑤ 凍害
⑥ 化学的浸食
⑦ 材料の疲労
⑧ 風化・老化

※黄色：日本国内の原発で、発生可能性があるもの

中性化

コンクリートに大気中の二酸化炭素が浸入することによってコンクリートのpHが低下する現象である。

中性化が進行し、鋼材近傍に達すると鋼材の防錆機能が低下する。鋼材近傍に水分と酸素が供給されると鋼材が腐食し始める。

鋼材の腐食が進行すると、腐食生成物（＝さび）の体積膨張がコンクリートにひび割れやはく離を引き起こす。また、鋼材の断面減少を伴うことにより、構造物の性能が低下する。

公益社団法人日本コンクリート工学会：コンクリート診断技術'21 基礎編.2021.3

中性化深さの予測　$\sqrt{t}$則　$C = A\sqrt{t}$

ここに、C：中性化深さ
A：係数
t：時間（年数）

施工後9年の中性化深さをCとする。
2Cとなるのは施工後36年、3Cとなるのは施工後81年と予測できる。

中性化の外観上のグレードと劣化の状態

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。腐食開始前
グレードⅡ	進展期	外観上の変状が見られない。腐食が開始
グレードⅢ－1	加速期前期	腐食ひび割れが発生
グレードⅢ－2	加速期後期	腐食ひび割れの進展とともにはく離・はく落が見られる。鋼材の断面欠損は生じていない。
グレードⅣ	劣化期	腐食ひび割れとともにはく離・はく落が見られる。鋼材の断面欠損が生じている。

土木学会：2018 年制定コンクリート標準示方書[維持管理編]．2018.10

中性化の外観上のグレードと対策

外観上のグレード	劣化過程	点検強化	補修	供用制限	解体･撤去
グレードⅠ	潜伏期	○**	○**		
グレードⅡ	進展期	○	○		
グレードⅢ－1	加速期前期	◎	◎		
グレードⅢ－2	加速期後期	◎	◎*	○	
グレードⅣ	劣化期		◎*	○	○

◎：標準的な対策（◎*：力学的な性能の回復を含む）
○：場合によっては考えられる対策
○**：予防的に実施される対策

土木学会：2018 年制定コンクリート標準示方書[維持管理編]．2018.10

塩害

コンクリート中の鋼材の腐食が、塩化物イオン（＝Cl^-）により促進される現象である。腐食生成物の体積膨張がコンクリートのひび割れやはく離を引き起こしたり、鋼材の断面減少が発生する。結果として、構造物の性能が低下し、構造物の所定の機能を果たすことができなくなる。

土木学会コンクリート標準示方書は、2007年制定版までは、鋼材腐食発生限界濃度を1.2kg/m^3としてよいと見なしてきた。このため、土木構造物の維持管理では、この値が参考にされている場合が多い。

一方、港湾構造物では、既往の実験結果に基づき、日本港湾協会「港湾の施設の技術上の基準・同解説」に示される2.0kg/m^3を鋼材腐食発生限界濃度とする事例が多い。

公益社団法人日本コンクリート工学会：コンクリート診断技術'21 基礎編.2021.3

海岸における高さの区分と塩害の進行

	概要	塩害の進行
海上大気中	平均満潮面（満潮時の海水面の平均）で生じる波の高さよりも上部の位置。海水が直接当たることは稀である。	中程度
飛沫帯	平均満潮面からその位置で生じる波の高さまでの範囲。波が構造物に直接あたる。	早い
干満帯	平均干潮面（干潮時の海水面の平均）から平均満潮面までの範囲。干潮時には海水に浸っていないが、満潮時は海水に浸る。	早い
海中	平均干潮面よりも下の範囲。常時海水に浸っている。	鋼材の腐食を進行させる溶存酸素が少ないため、最も遅い

塩害の外観上のグレードと劣化の状態

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。鋼材腐食発生限界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。鋼材腐食発生限界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はく離・はく落が見られる。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はく離・はく落が見られる。鋼材の著しい断面減少が見られる。変位・たわみが大きい

土木学会：2018 年制定コンクリート標準示方書[維持管理編]．2018.10

塩害の外観上のグレードと対策

外観上のグレード	劣化過程	点検強化	補修	供用制限	解体･撤去
グレードⅠ	潜伏期	○**	○**		
グレードⅡ	進展期	○	○		
グレードⅢ－1	加速期前期	◎	◎		
グレードⅢ－2	加速期後期	◎	◎*	○	
グレードⅣ	劣化期		◎*	○	○

◎：標準的な対策（◎*：力学的な性能の回復を含む）
○：場合によっては考えられる対策
○**：予防的に実施される対策

土木学会：2018 年制定コンクリート標準示方書[維持管理編]．2018.10

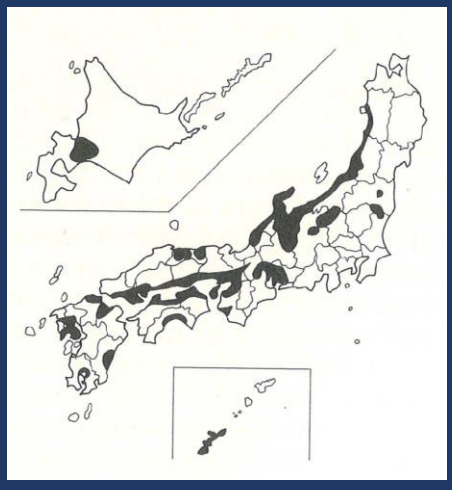
アルカリシリカ反応（ASR）

セメントに含有されるアルカリ（主にNa_2SO_4およびK_2SO_4）は、セメントの水和反応の過程でコンクリートの空隙内の水溶液に溶け出し、水酸化アルカリ（NaOHおよびKOH）を主成分とする、強アルカリ性（pH=13）を呈する。アルカリシリカ反応性鉱物を含有する骨材（反応性骨材）は、コンクリート中の高いアルカリ性を示す水溶液と反応して、コンクリートに異常な膨張およびそれに伴うひび割れを発生することがある。これがアルカリシリカ反応と呼ばれる現象である。

上記の劣化現象はアルカリ骨材反応と呼ばれ、アルカリ骨材反応には、アルカリシリカ反応、アルカリ炭酸塩反応、およびアルカリシリケート反応の3種類があると考えられていた。しかし、最近の研究ではいずれもアルカリシリカ反応であるという説が有力である。

公益社団法人日本コンクリート工学会：コンクリート診断技術'21 基礎編.2021.3

ASRによる構造物の劣化が報告されている地域



公益社団法人日本コンクリート工学会：コンクリート診断技術'21 基礎編.2021.3

ASRの亀甲状のひび割れ①

コンクリートが膨張するため、無筋コンクリートや鋼材量が少ないコンクリート構造物では亀甲状のひび割れがコンクリート内部にまで発達する。

公益社団法人日本コンクリート工学会：コンクリート診断技術'21 基礎編.2021.3

ASRの亀甲状のひび割れ②

軸方向鋼材によりASRによる膨張が拘束されている鉄筋コンクリート構造物では、軸方向に直交する方向のひび割れは発生しにくい。

そのため、軸方向鋼材に沿った方向性のあるひび割れが亀甲状のひび割れとともに発生することが多い。

公益社団法人日本コンクリート工学会：コンクリート診断技術'21 基礎編.2021.3

ASRによる構造物の変状の特徴

箇所	変状の種類	劣化の状態
コンクリート	ひび割れ	拘束を受けていないコンクリート（無筋コンクリート）では、互いに 120°の角度で発生する網目状のひび割れが発生する。しかし、同様なひび割れは凍害でも生じることがある。一方、鋼材量の多い RC や PC の梁や柱では、軸方向鉄筋や PC 鋼材に沿った方向性のあるひび割れが生じる。
	変位・変形	コンクリートの膨張によるコンクリート構造物全体の移動の差異により変位・変形を生じることがある。
	ゲルの滲出	アルカリシリカ反応によって劣化したコンクリートのひび割れには白色のゲルが滲出していることがある。
	変色	アルカリシリカ反応が進行すると、コンクリートの表面が茶褐色に変色することがある。
	ポップアウト	湿度の高い条件下において、骨材のポップアウト（表層下の骨材粒子などの膨張による破壊でできた表面の円錐状のはく離・はく落）が生じることがある。しかし、我が国ではポップアウトの事例は極めてまれである。
	かぶりコンクリートのはく落・はく離	橋梁の梁端部などの鋼材による拘束の小さい部分や著しいひび割れ損傷が生じた箇所では、かぶりコンクリートのはく離・はく落が生じる可能性がある。
	コンクリートの強度低下	アルカリシリカ反応が長期にわたって進行すると、鋼材の内側のコンクリートにもひび割れが発生し、コンクリートの強度が低下することがある。
鋼　材	鋼材の腐食	アルカリシリカ反応によって発生したひび割れは、鋼材腐食を促進させる可能性がある。しかし、アルカリシリカゲルによるひび割れの充填硬化および不働態被膜の保護効果により、鋼材腐食が抑制されるとの報告もある。
	鋼材の降伏および破断	アルカリシリカ反応によってコンクリートが膨張すると、コンクリートには圧縮応力、鋼材には引張応力が発生する。アルカリシリカ反応によって過大な膨張が生じたとき、鋼材の降伏や破断を生じる可能性がある。

公益社団法人日本コンクリート工学会：コンクリート診断技術'21 基礎編.2021.3

ASRの外観上のグレードと劣化の状態

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、外観上の変形が見られない。
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がある。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、かぶりの部分的なはく離・はく落が発生する。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。

土木学会：2018 年制定コンクリート標準示方書[維持管理編]．2018.10

ASRの外観上のグレードと対策

外観上のグレード	劣化過程	点検強化	補修	供用制限	解体･撤去
グレードⅠ	潜伏期	○**	○**		
グレードⅡ	進展期	○	◎		
グレードⅢ	加速期	◎	◎	○	
グレードⅣ	劣化期	◎	◎*	◎	◎

◎：標準的な対策（◎*：力学的な性能の回復を含む）
○：場合によっては考えられる対策
○**：予防的に実施される対策

土木学会：2018 年制定コンクリート標準示方書[維持管理編]．2018.10

ASRの対策工法と期待する効果

期待する効果	工法例
ASR の進行を抑制	水処理（止水、排水処理）、ひび割れ注入、表面処理（被覆、含浸）
ASR の膨張を拘束	プレストレスの導入、巻立て（鋼板・PC・連続繊維）
劣化部を取り除く	断面修復
鋼材の腐食抑制	ひび割れ注入、ひび割れ充填、表面処理（被覆、含浸）
第三者影響度の除去	はく落防止
耐力の回復	接着（鋼板・連続繊維）、プレストレスの導入、巻立て（鋼板・PC・連続繊維）、外ケーブル、鋼材の損傷個所の補修

土木学会：2018 年制定コンクリート標準示方書[維持管理編]．2018.10

火災

火熱によりコンクリートが劣化、はく落する現象である。コンクリート中の自由水などが膨張する結果、内部応力が次第に増大し、内部組織が破壊されていくため、強度および弾性係数などの力学的性質が低下する。また、500℃～580℃の過熱でコンクリート中の遊離アルカリ分である水酸化カルシウム（$Ca(OH)_2$）が熱分解してアルカリ度が低下する。これによって中性化深さを調査することで、火害深さを知ることができる。 通常のコンクリート・鉄筋であれば、500℃以下なら継続利用が可能である。

コンクリートはおよそ1200℃以上で長時間加熱すると表面から溶融する。

公益社団法人日本コンクリート工学会：コンクリート診断技術'21 基礎編.2021.3

火災による爆裂

火災初期に、表面層のコンクリートがはく落して鉄筋が露出する現象が起こることがある。これを爆裂という。

コンクリートの含水率が高いほど、また、コンクリートが高強度化し、組織が緻密になるほど生じやすいと考えられている。

公益社団法人日本コンクリート工学会：コンクリート診断技術'21 基礎編.2021.3