

平成30年5月2日



山口県コンクリート診断士会例会

誰でもわかるコンクリートの劣化メカニズム


九州産業大学 松尾 栄治




1. コンクリートの変状 ←


2. コンクリートの劣化メカニズム

豆板(ジャンカ)




変状

- 初期欠陥
 - 施工不良
 - 豆板 
 - コールドジョイント
- 経年劣化
 - 内部欠陥
 - 砂すじ
 - 表面気泡(あばた)



20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers


豆板(ジャンカ)



どの地域でも発生

定義

打設されたコンクリートの一部に粗骨材が多く集まってできた空隙の多い構造の不良部分



発生要因

- 材料の分離
- 締固め不足
- 型枠下端からのセメントペーストの漏れ

コンクリートが打ち込みにくい場所に発生しやすい。

20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

豆板(ジャンカ)

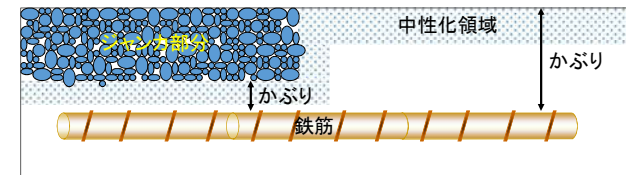


20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

豆板(ジャンカ)



豆板部分 → 空隙部分と同じ
炭酸ガス } を通す
水 }
中性化抑制効果がほとんどない。



20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

豆板を防ぐには



- ワーカビリティが良好な配合にする。
- 材料分離しないように打設する。
- バイブレーターで十分に締め固める。
- 叩きなどで念入りに充填する。



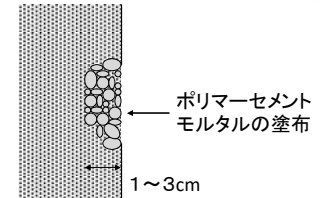
20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

豆板の補修方法 程度により補修方法が違う。



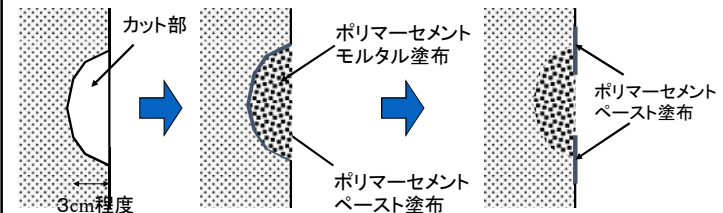
等級Bのジャンカの補修例

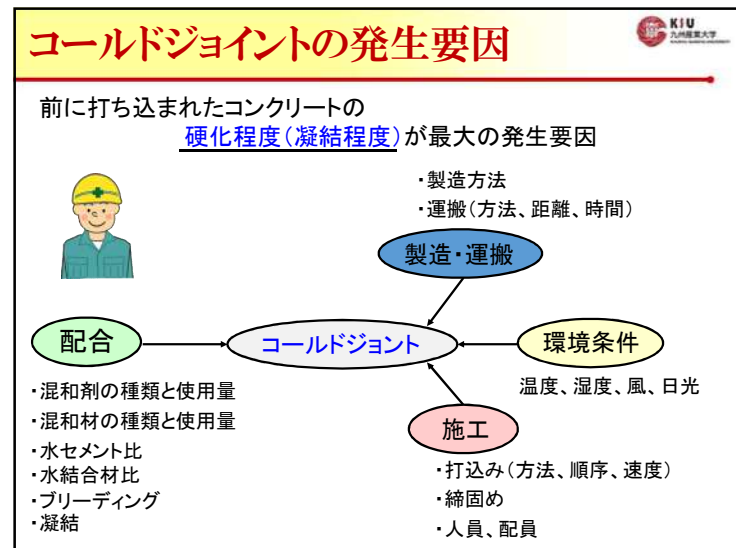
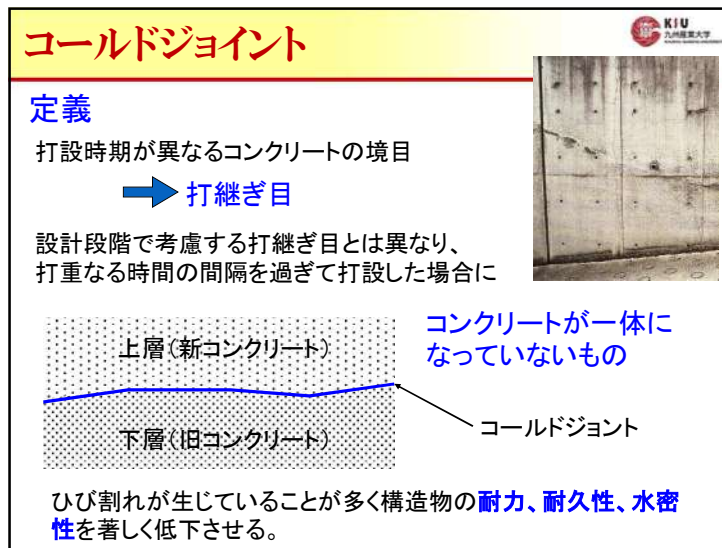
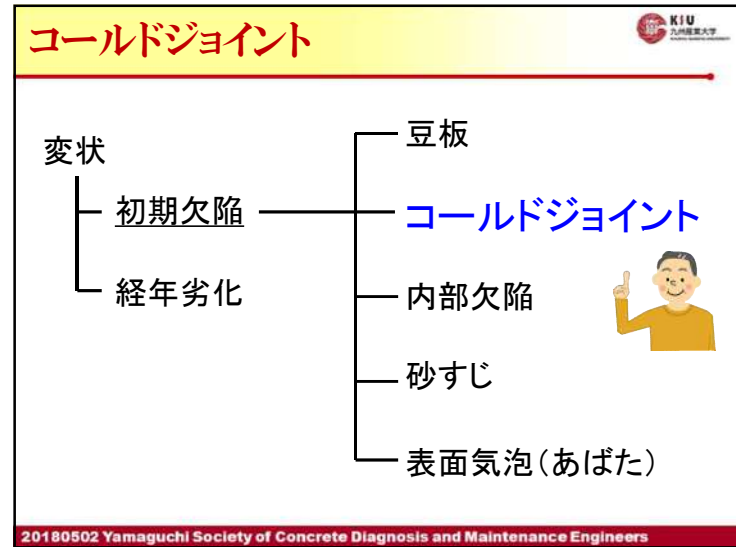
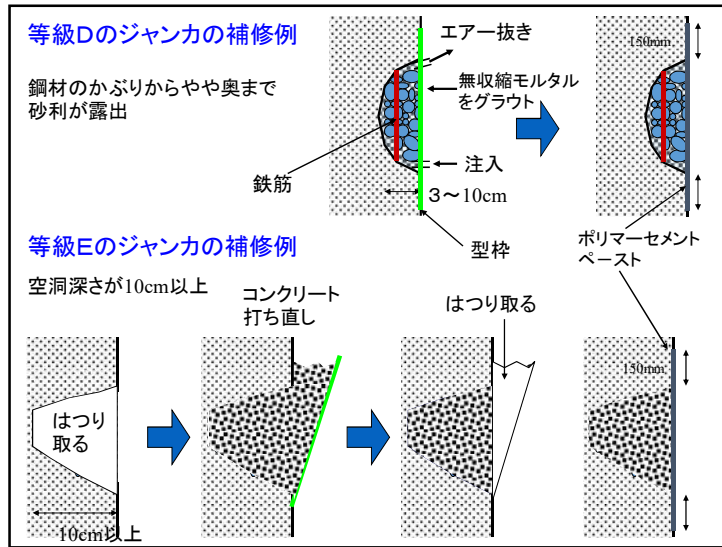
砂利が露出しているが、叩いても剥離しない。



等級Cのジャンカの補修例

砂利が露出しており、叩くと剥離するものもある。





コールドジョイントを防ぐには



コンクリートを連続して打ち込むことが重要



輸送・運送時間の限度

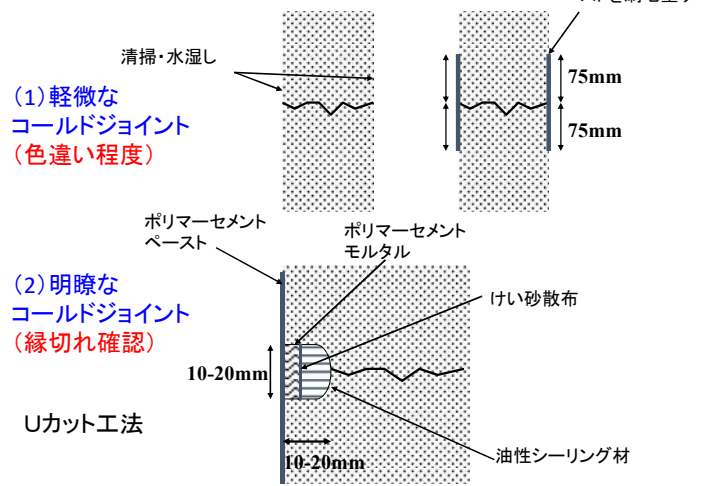
区分	JIS A 5308	土木学会 コンクリート標準示方書	日本建築学会 JASS 5
限定	練混ぜから荷下ろし地点到着まで	練混ぜから打込みまで	練混ぜから打込みまで
限度	1.5時間	外気温が25°Cを超える時	1.5時間
		外気温が25°C以下の時	2.0時間
		外気温が25°C以上	90分
		外気温が25°C未満	120分

POINT 土木と建築で25°Cの扱いが異なる。「建築が土木よりも厳しい」と覚えよう。

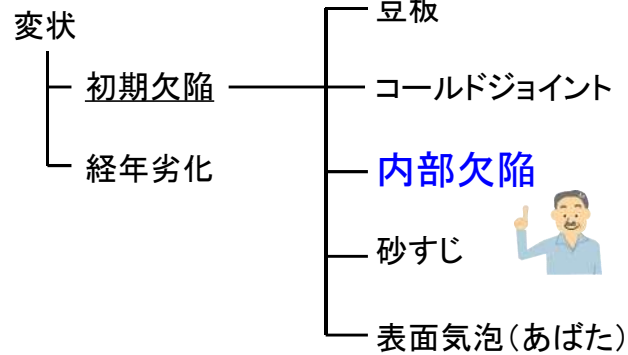
コンクリート打込み時の中断は避ける。

補修方法

主に2つに区分される。



内部欠陥

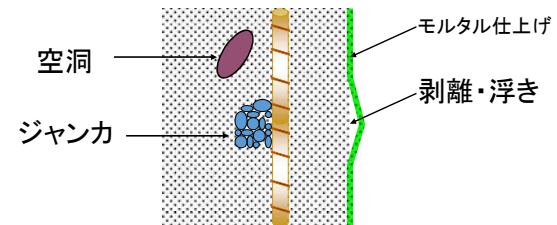


内部欠陥



定義

- 覆工コンクリートの背面空洞
- コンクリートとモルタルとの界面の浮き・剥離
- タイル張付けモルタルとの界面の浮き・剥離
- コンクリート内部に生じたジャンカや空洞



内部欠陥の発生要因



- 内部に生じるジャンカ、空洞 → 施工不良
 - 覆工コンクリートの変形、ひび割れ → 背面の空洞
 - シース管内の空洞 → グラウトの注入不良
 - タイル仕上げやモルタル塗仕上げの浮き、剥離
- { 相対ムーブメント(ズレ)
外力により界面に発生する応力
躯体に発生したひび割れ



20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

内部欠陥を防ぐには

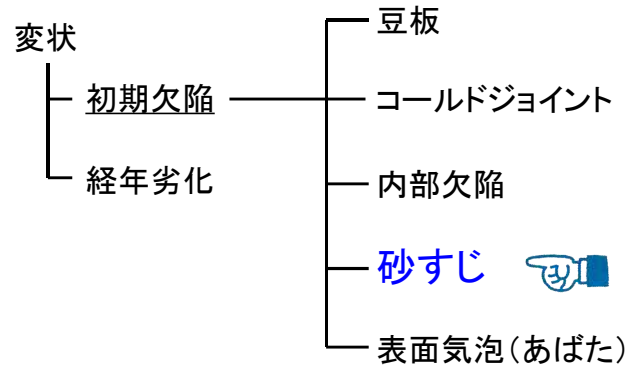


- 十分な施工管理
- グラウト注入材料の品質管理、施工管理



20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

砂すじ



20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

砂すじ



定義

コンクリート表面に
細骨材が縞状に露出



せき板に接するコンクリート表面に、コンクリート中の水分が分離して上に流れ出す場合に生じる

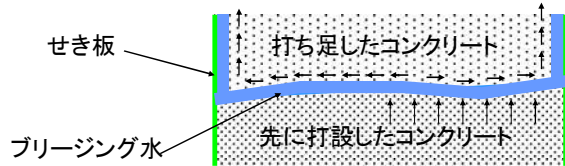


20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

砂すじの発生要因



- ブリージングの多いコンクリートの浮き水を取り除かないで打ち足した場合



- 軟練りコンクリートを過度に締め固めた場合



20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

砂すじ



防止策

- ブリージングが少なくワーカビリティの良好なコンクリートを使用
- 打設速度の管理をしながら、振動機を型枠に沿ってゆっくり打ち上げる
- 化粧型枠や透水性型枠を使用する

補修方法

- ① ワイヤブラシで健全な部分までケレン
- ② ポリマーセメントペーストなどを均一に塗布



20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

表面気泡



変状

初期欠陥

経年劣化

豆板

コールドジョイント

内部欠陥

砂すじ

表面気泡(あばた)



20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

表面気泡



定義

コンクリート表面に打込み時に巻き込んだ空気やエンラップドエアがなくならずに残ったままで硬化したもの

コンクリート表面にできた、空気や水泡の痕

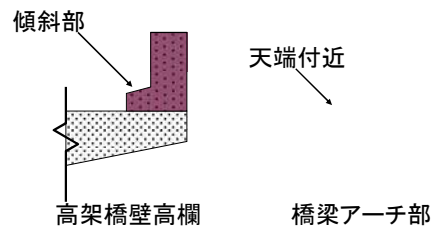
20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

表面気泡の発生要因



■ 傾斜を有する型枠面をもつ場合

十分な締固めを行っても、
材料分離した余剰水や空気泡が残る



20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

表面気泡の発生要因

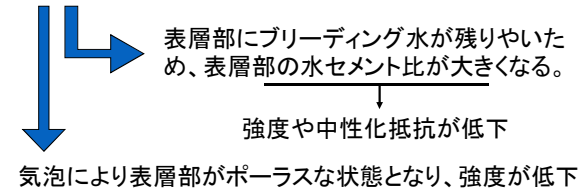


型枠傾斜角度が小さくなるほど
スランプが大きいほど
コンクリートの温度が高いほど } 発生しやすい

↓
凝結が早くなるので、気泡が上昇できないまま硬化



表面気泡により耐久性が低下



表面気泡



防止策

- 気泡が残らないように打込み速度や締固め管理を行う
- 予想される箇所にあらかじめ空気孔等を設置する
- 透水性型枠や吸水性型枠を使用する

表面が緻密化し、中性化の進行が抑制される

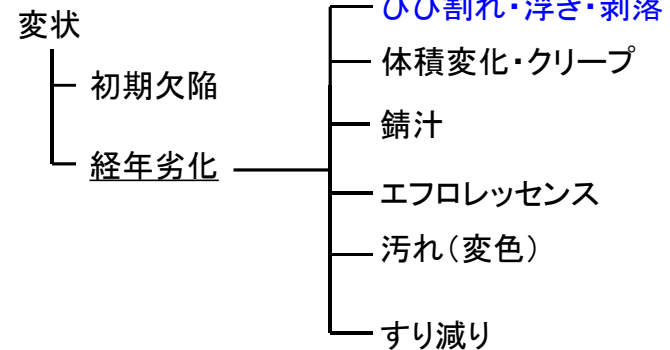


補修方法

- ① 表面気泡部にポリマーセメントペーストを塗布
- ② ポリマーセメントモルタルを押し込むように充填

20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

ひび割れ・浮き・剥落



20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

ひび割れ・浮き・剥落



ひび割れの発生を完全に防止することはできない。
RCの耐久性上有害となるひび割れについて解説

浮き・剥離
↓

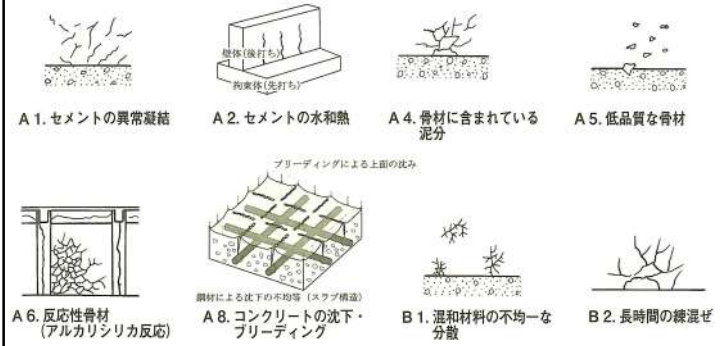
鉄筋腐食によってコンクリート片が押し出された状態

「剥落」はコンクリート片が落ちた後の状態



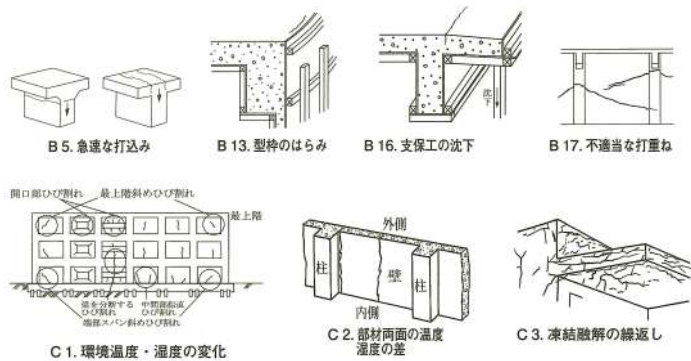
20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

ひび割れのパターン



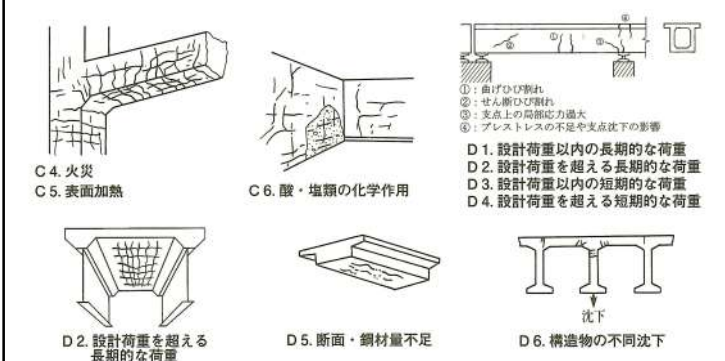
20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

ひび割れのパターン



20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

ひび割れのパターン



20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

耐久性上有害なひび割れの種類

- **鋼材(鉄筋)腐食先行型**
鋼材腐食が進行した結果、生じたひび割れ
中性化や塩害などが原因
- **ひび割れ先行型**
鋼材腐食を促進させる原因となるひび割れ
何らかの原因
- **劣化ひび割れ**
コンクリート自体の劣化を表す進行性のひび割れ
乾燥収縮ひび割れと異なり、ASR、凍害、化学的浸食、疲労など

20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

鋼材(鉄筋)腐食先行型

中性化 }
塩害など } → 鋼材(鉄筋)に腐食が生じる

↓

かぶりコンクリートがひび割れる

↓

かぶりコンクリートの剥落

中性化によるひび割れ
多くは、かぶり不足が原因
柱では帯筋に沿って、梁ではあばら筋に沿って生じている。

塩害によるひび割れ
主筋に沿って生じている。

20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

ひび割れ先行型


何らかの原因で生じたひび割れが
鋼材(鉄筋)位置に達する

↓

鋼材(鉄筋)腐食に有害な幅まで成長

↓

劣化因子の進入により鋼材(鉄筋)腐食
が進行



ひび割れが先にあると、鋼材(鉄筋)周辺に腐食による膨張圧が蓄積されにくく、かぶりコンクリートの剥離は、生じにくい。

20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

劣化ひび割れ

アルカリシリカ反応、凍害、化学的腐食、疲労等


↓

進行性の劣化現象

↓

コンクリートの強度低下が生じる


- (a) アルカリシリカ反応
- (b) 凍害によるひび割れ
- (c) 疲労によるひび割れ




20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

ASRによるひび割れ

鉄筋による拘束が小さい場合
↓
マップ状(亀甲状)のひび割れ



鉄筋による拘束が大きい柱や梁
↓
軸方向のひび割れとして発生




進行中のものは、補修が極めて困難

20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

ASR対策

「レディーミクストコンクリート」で奨励されている事項

- アルカリシリカ反応性に関して無害と判定された骨材を使用する。
- 高炉セメントB種、C種、またはフライアッシュセメントB種、C種などの混合セメントを使用する。
- コンクリート中のアルカリ総量を Na_2O 換算で、**3.0kg/m³**以下に抑える。



20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers




凍害によるひび割れ

凍害によるひび割れやスケーリング

凍害を受ける骨材を使用しない。

連行空気をコンクリートに導入して圧力の発生を抑制する。

水セメント比を小さくし、コンクリートの水密性を高める。






20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

体積変化・クリープ

変状

- 初期欠陥
 - ひび割れ・浮き・剥落
 - 体積変化・クリープ**
 - 錆汁
- 経年劣化
 - エフロレッセンス
 - 汚れ(変色)
 - すり減り



20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

考慮すべき体積変化



✓温度ひずみ(水和熱)

✓自己収縮ひずみ

収縮ひび割れ

✓乾燥収縮ひずみ

✓膨張ひずみ(膨張材)



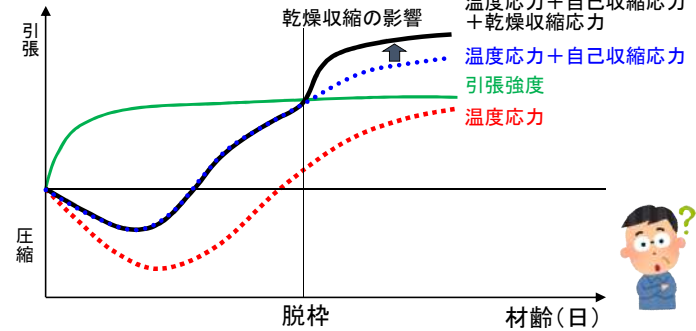
20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

ひび割れって複雑



自己収縮, 乾燥収縮, 温度応力の複合+拘束・クリープ

拘束条件下での応力



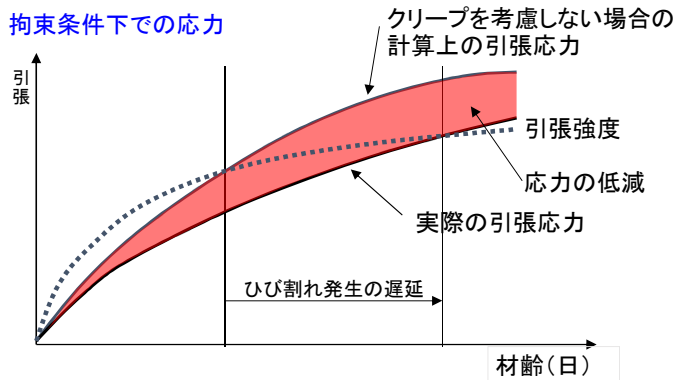
20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

ひび割れって複雑



自己収縮, 乾燥収縮, 温度応力の複合+拘束・クリープ

拘束条件下での応力



20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

収縮ひび割れの発生メカニズム



コンクリートの自己収縮および乾燥収縮に伴う変形が、内的あるいは外的に拘束されると、コンクリートに引張応力が作用し、ひび割れが発生

自己収縮

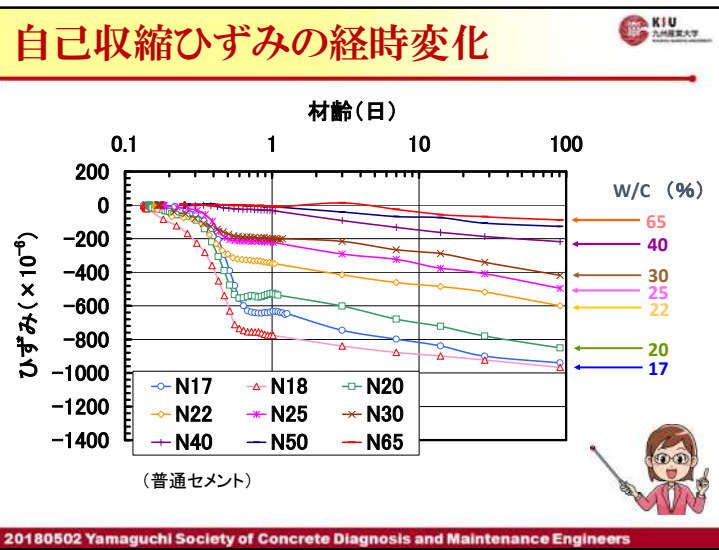
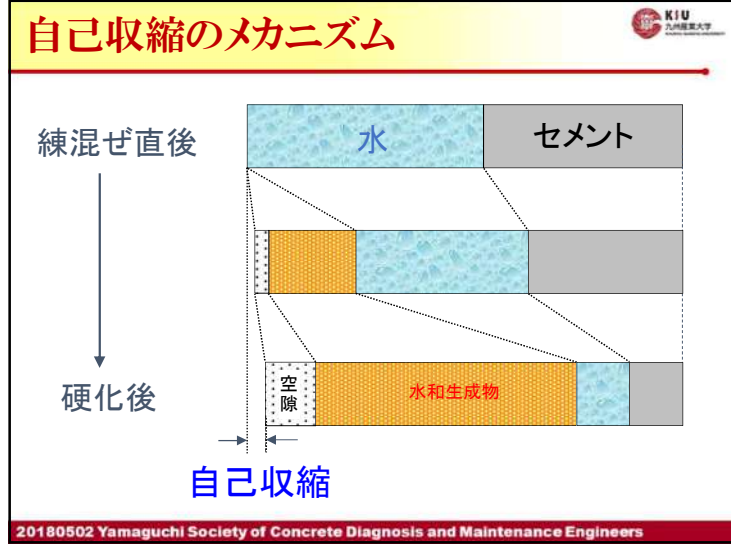
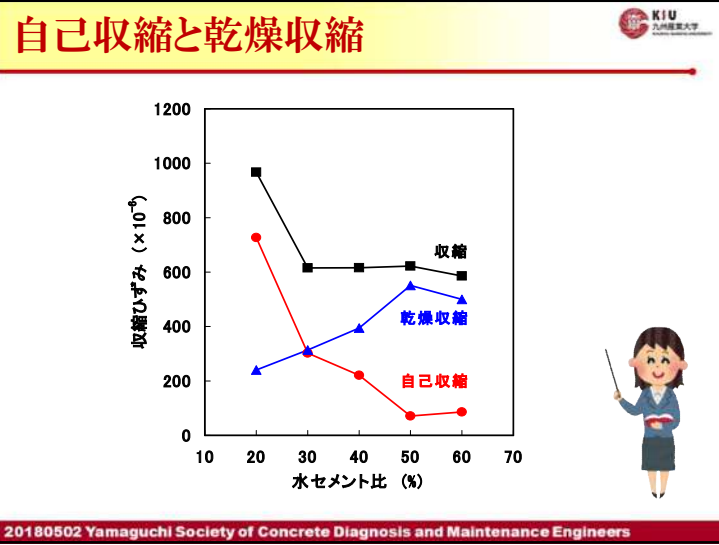
セメントの水和反応の進行によりコンクリートの体積が減少し、収縮する現象 (W/C小→自己収縮大)

乾燥収縮

乾燥によるコンクリート中の水分の蒸発により、コンクリートの体積が減少し、収縮する現象 (W, W/C大→乾燥収縮大)

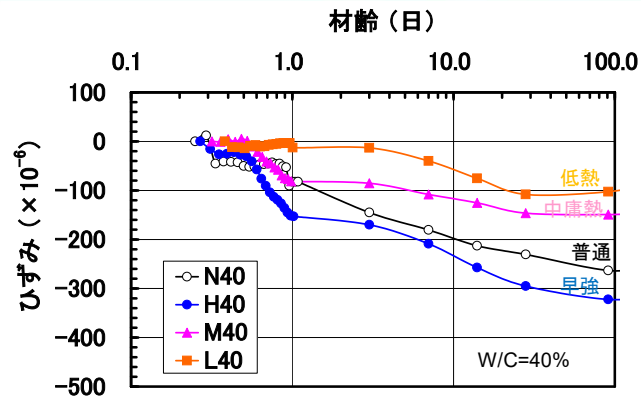


20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers



- ### 自己収縮ひずみの特徴
- ✓ 自己収縮の進行速度は水セメント比の影響を受ける。
 - ✓ 水セメント比が小さい場合、若材齢時に著しく増加し、長期材齢ではその増加が遅くなる。
 - ✓ 水セメント比が大きい場合は、長期間にわたり、徐々に自己収縮が増加する。
- 20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

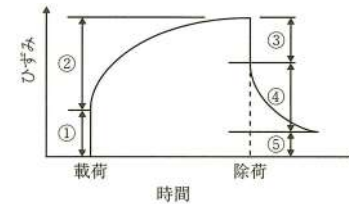
自己収縮ひずみに及ぼすセメント種類の影響



20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

クリープ

持続荷重が作用した場合、時間の経過とともに、ひずみ量が増大する現象

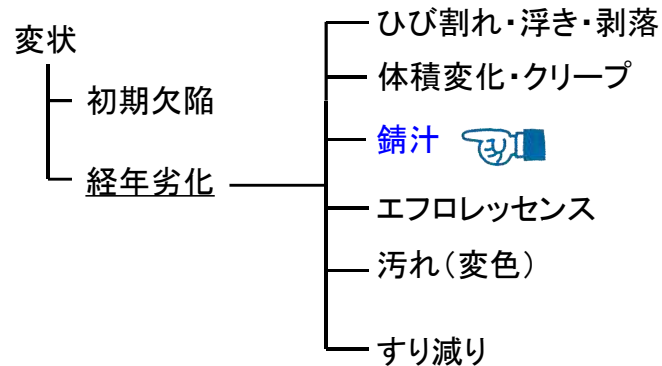


ゴムに重りを吊したときのイメージ

重りの重さは変えてないのに、時間とともにゴムが伸びる

20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

錆汁



20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

錆汁

錆汁は、コンクリート表面を汚染し美観上の問題を生じる。

コンクリート表面の錆汁



- コンクリート近傍の鋼材が腐食し、その錆が雨水などと共にコンクリート表面を流れた場合
- コンクリート中の鉄筋が腐食して生じる場合

錆汁の発生は、コンクリート内部の変状を示す重要な情報！

鋼材の腐食が進行していても錆汁の発生がないこともあるため、錆汁の有無のみで腐食の判定をしてはならない。


20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

エフロレッセンス

変状

- 初期欠陥
- 経年劣化

- ひび割れ・浮き・剥落
- 体積変化・クリープ
- 錆汁
- エフロレッセンス
- 汚れ(変色)
- すり減り



20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

エフロレッセンス

白華(白華現象)とも称され、コンクリート表面の析出物や、析出することを指す。


表面を汚染し美観上の問題を生じる。

析出物そのものが構造物の信頼性を損なうことはない。

エフロレッセンスの発生 → 水の移動と関係が深い

↓

コールドジョイントなどの初期欠陥
ひび割れなどの変状の有無について検討する必要がある。



20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

エフロレッセンス





20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

エフロレッセンスの組成

セメントの主成分であるカルシウム分が乾燥により析出

$$\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 \quad \text{空気中の炭酸ガスと反応}$$

アルカリ分が乾燥により析出

$$\text{NaCO}_3 \text{ (アルカリ炭酸塩)} \quad \text{Na}_2\text{SO}_4, \text{K}_2\text{SO}_4 \text{ (アルカリ硫酸塩)}$$


地下水や土壌の影響を受ける場合

$$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}, \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \text{ (硫酸塩鉱物)}$$

20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

汚れ(変色)

変状

- 初期欠陥
 - ひび割れ・浮き・剥落
 - 体積変化・クリープ
- 経年劣化
 - 錆汁
 - エフロレッセンス
 - 汚れ(変色)** 
 - すり減り

20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers


汚れ(変色)

表面に付着する汚れ
 エフロレッセンス、錆
 真菌類などの微生物が死滅 → 炭化し黒い汚れ

コンクリートの変色
 硫酸イオンとの反応 → 褐色から黄色、白色

火災 {


- ~ 300°C すずの付着
- 300~ 600°C 桃色
- 600~ 950°C 灰白色
- 950~1200°C 淡黄色



20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

すり減り

変状

- 初期欠陥
 - ひび割れ・浮き・剥落
 - 体積変化・クリープ
- 経年劣化
 - 錆汁
 - エフロレッセンス
 - 汚れ(変色)
 - すり減り** 

20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

すり減り



Key Words

- ・2物体間接触
- ・3物体間接触
- ・キャビテーション
- ・限界流速
- ・流速7.5m/s




20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers



1. コンクリートの変状
2. コンクリートの劣化メカニズム ←

コンクリートの劣化

- 鉄筋腐食(塩害、中性化)
- アルカリシリカ反応
- 凍害
- 化学的侵食
- 材料の疲労
- 風化・老化
- 火災




20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

鉄の腐食反応

$$2(3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2)+6\text{H}_2\text{O}\rightarrow 3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}+3\text{Ca}(\text{OH})_2$$

体積 253.1 **→** 225.6

$$\frac{(253.1-225.6)}{253.1}\times 100=10.84(\%)$$


セメント(C₃S)は、水和することで10.87%の体積が減少(硬化収縮)

↓

収縮に見合った空隙(細孔)が硬化体内部に形成される

20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

鉄の腐食反応

一般に、コンクリート中の空隙満たしている溶液(細孔溶液)のpHは12~13の高アルカリ

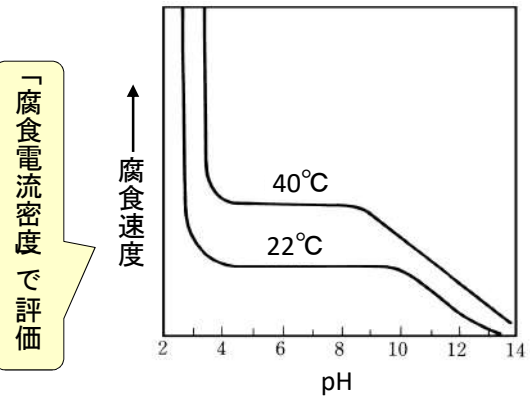
↓

鉄鋼は強いアルカリ性の環境下で、その表面に20~60 Å程度の薄い酸化皮膜(γ-Fe₂O₃·nH₂O)を形成(不動態皮膜)

この不動態皮膜が鉄鋼を腐食から保護している

20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

pHと鉄の腐食速度の関係



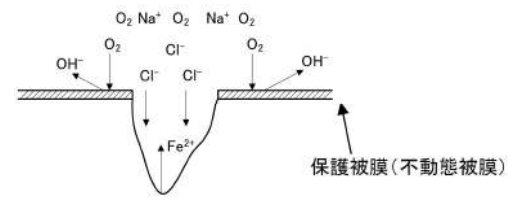
「腐食電流密度で評価」



鉄の腐食反応

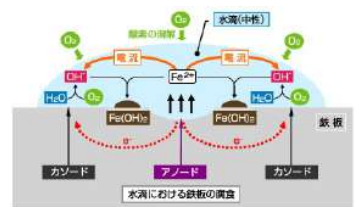
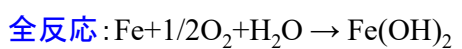
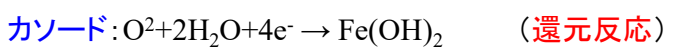
鉄筋の**不動態皮膜**が破壊されるのは・・・

- ✓鉄筋の雰囲気**強いアルカリ性**でなくなったとき
コンクリートの**中性化(炭酸化)**
- ✓鉄筋の雰囲気に**塩化物**などの有害成分が存在する
コンクリートの**塩害**

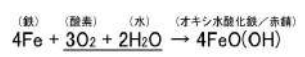


鉄の腐食反応

鉄の腐食反応は、**電気化学的反応(酸化還元反応)**



さらに酸化されて、
FeO(OH)
Fe₂O₃ · nH₂O



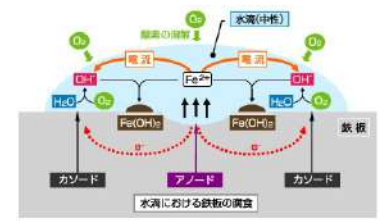
鉄の腐食反応

アノード反応とカソード反応は鋼材の同位置で発生

・・・マイクロセル腐食

塩化物イオンが腐食に関係する場合には離れた位置でも発生

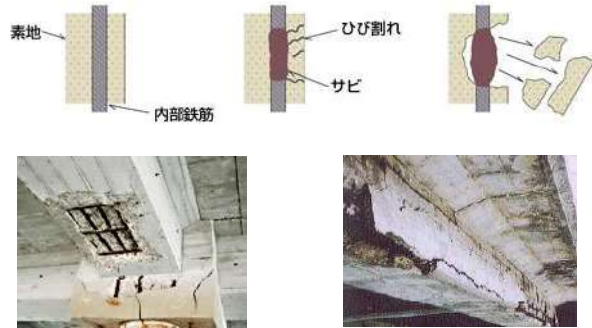
・・・マクロセル腐食



鉄の腐食反応



鉄筋はさびると体積が2~3倍に膨張

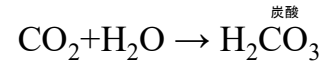


20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

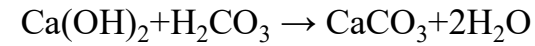
中性化による鉄筋腐食



中性化(炭酸化)



シンプルに書くと
 $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$



アルカリ性 → 中性

細孔溶液のpH低下 + 細孔構造変化

中性化



20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

中性化による劣化進行過程



(1) 潜伏期

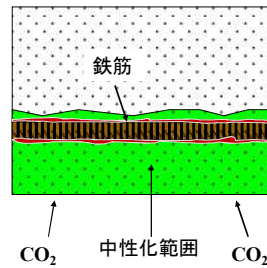
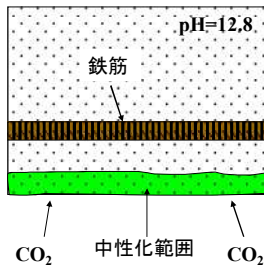
(2) 進展期

中性化深さが鋼材の腐食発生限界に到達するまでの期間

鋼材の腐食開始から腐食ひび割れ発生までの期間

中性化進行速度

鋼材の腐食速度



20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

中性化による劣化進行過程



(3) 加速期

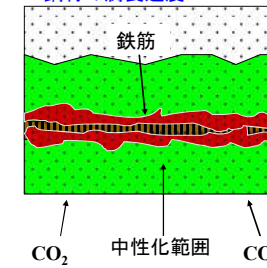
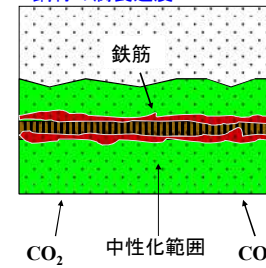
(4) 劣化期

腐食ひび割れ発生により鋼材の腐食速度が増大する期間

鋼材の腐食量の増加により耐力の低下が顕著な期間

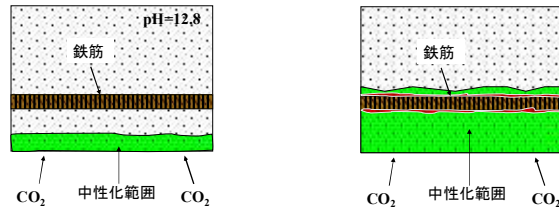
ひび割れを有する場合の鋼材の腐食速度

ひび割れを有する場合の鋼材の腐食速度



20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

中性化による劣化進行過程



(1) 潜伏期

(2) 進展期

外観上の変化はなく、目視観察による評価は不可能

外観上に変化がなければ、劣化過程が「(3) 加速期」以前

20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

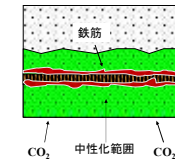
中性化による劣化進行過程



コンクリートライブラリー 2001年制定 コンクリート標準示方書[維持管理編]制定資料より引用



加速期(前期)の例



腐食ひび割れは発生してるけど、腐食量がそれほど増大していない期間です。



20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

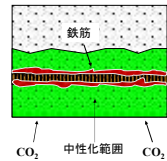
中性化による劣化進行過程



コンクリートライブラリー 2001年制定 コンクリート標準示方書[維持管理編]制定資料より引用



加速期(後期)の例



腐食の進行により錆汁がみられ、さらに部分的な剥離・剥落がみられます。

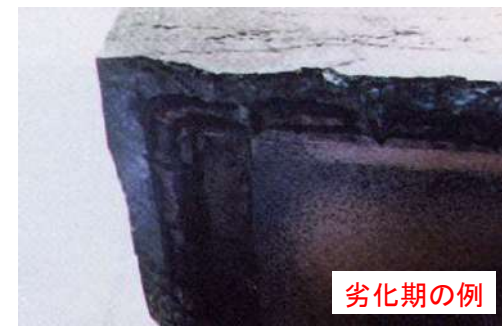


20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

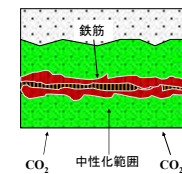
中性化による劣化進行過程



コンクリートライブラリー 2001年制定 コンクリート標準示方書[維持管理編]制定資料より引用



劣化期の例



多数の腐食ひび割れが発生し、広範囲ではく離・はく落がみられます。

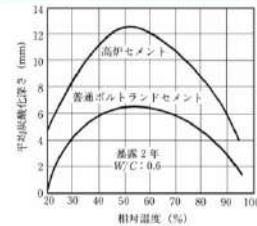


20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

炭酸化反応

炭酸化反応には水分が必要

「二酸化炭素の侵入」と「炭酸化反応」が両方起こる中程度の湿度(50~60%)で中性化速度が最大になる。



セメント量が多くて湿潤養生で十分に水和を進行 ➡ 中性化速度の低減

内部に塩分を含むコンクリート ➡ 中性化が進行

中性化しても、コンクリートの強度は低下しない。
 中性化(炭酸化)した領域は硬度が大きくなる。



中性化速度に影響を及ぼす因子

①炭酸ガス濃度

濃度:大 → 中性化速度:大

②温度

温度:高い → 中性化速度:大

③湿度

相対湿度50~60% → 中性化速度:最大



✓ 屋内と屋外を比較すると、炭酸ガス濃度が高い(人の呼吸)などの条件以外にも屋内の環境条件の方が中性化速度が大きくなる。

✓ コンクリートが著しく乾燥している場合や、ぬれている場合は中性化しにくい。

中性化速度に影響を及ぼす因子

①水セメント比

水セメント比:大 → 中性化速度:大

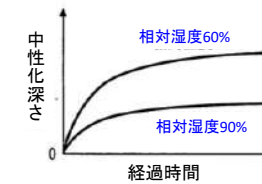
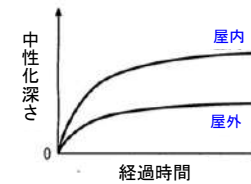
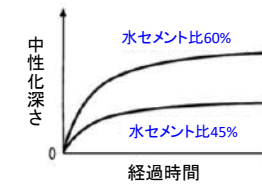
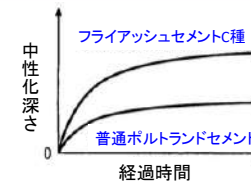
②アルカリ量

アルカリ量:大 → 中性化速度:大

塩化ナトリウム(NaCl)の存在はコンクリート中のアルカリ量を増すので炭酸化を促進させる



中性化速度に影響を及ぼす因子



中性化深さと経過時間の関係

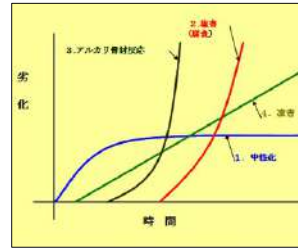


$$y = b\sqrt{t}$$

y : 中性化深さ (mm)

t : 暴露期間 (年)

b : 中性化速度係数 (mm/年)



コンクリート中の塩化物イオン



全塩化物イオン

(1) 固定塩化物イオン

フリーデル氏塩 (=C-S-Hに固定される)

★鉄筋腐食に関与しない

(2) 自由塩化物イオン

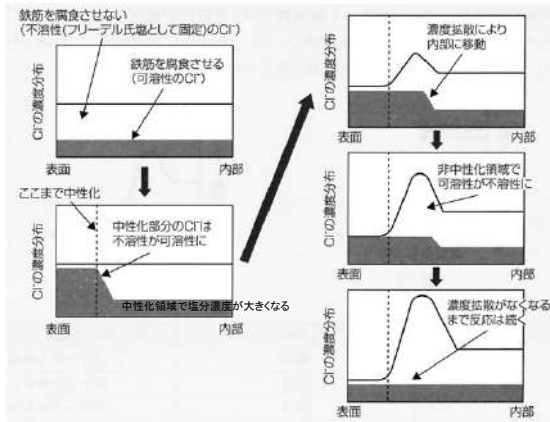
細孔溶液中に存在する塩化物イオン

★鉄筋腐食に関与する可能性あり!



Charles Friedel
(1832-1899, 仏)

中性化による塩化物イオンの濃縮現象



中性化による塩化物イオンの濃縮現象



コンクリート中に存在する塩化物

- ◆ 溶解して存在しているもの (鉄筋を腐食させる)
- ◆ フリーデル氏塩として固定されているもの (セメント量の約0.4%)

中性化フロント現象

炭酸化 → フリーデル氏塩として固定されていた塩化物イオンが分解

↓
中性化領域で塩分濃度が大きくなる

↓
濃度拡散により中性化領域より内部のコンクリートへ移動

中性化深さの測定

KIU 九州工業大学

フェノールフタレイン法による
中性化深さの測定 → pH 8.2~10以下の
未着色部

pH10以上では赤紫色
中性化していないところはピンク

鉄筋の腐食は、pH11以下で始まる

鉄筋の腐食可能範囲は、中性化部分より若干内部まで存在する。

腐食の開始と中性化の関係 → **中性化残り**

鉄筋のかぶり厚さ - 中性化深さ

塩分を含まないコンクリート	中性化残り < 10mm	} 腐食開始
塩分を含むコンクリート	中性化残り < 20mm	

20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

中性化残り

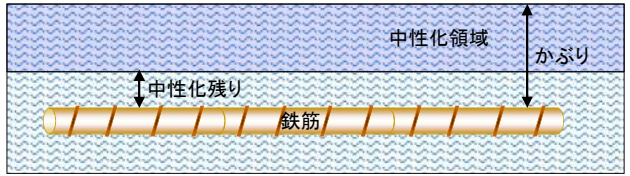
KIU 九州工業大学

中性化残り → かぶりと中性化深さの差

中性化深さが鋼材位置に到達する前に、鋼材の腐食が始まること、多くの研究や実構造物の調査から明らかになっている。

腐食開始時期は、中性化残りによって整理される場合が多い。

通常環境下: 10mm
塩害環境下: 10~25mm



20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

中性化深さ(はつり法・コア法)

KIU 九州工業大学

原理による分類

- ①フェノールフタレイン法 → 最も一般的
- ②示差熱重量分析による方法
- ③その他(粉末X線回折装置・X線マイクロアナライザ装置による方法等)

調査方法による分類


- ①はつりによる方法
- ②コア採取による方法 → コア側面での測定は避け、割裂面を測定対象とすべき

評価

- ①かぶりとの比較
- ②中性化速度式による予測値との比較

✓ 採取コアは、中性化が進行するため、採取後すぐに試験する。

✓ コア側面ではカッティング時の摩擦や水冷による影響を受ける可能性がある。



20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

中性化深さ(ドリル法)


KIU 九州工業大学

利点

破壊程度が小さく、簡易で多量の試験データを得ることが可能

コアによる方法との比較

コアの割裂面を対象とした方法よりも若干大きめとなるが、その差はわずかである



20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

塩害

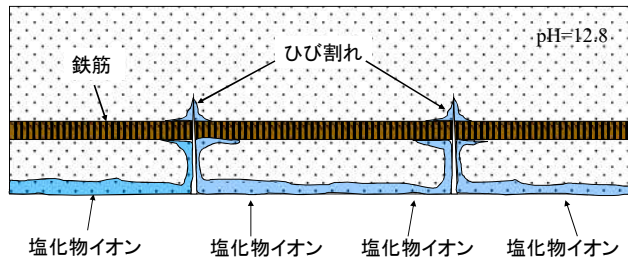


塩化物イオンの存在により、鋼材の腐食が促進



腐食生成物の体積膨張によるひび割れ、剥離
鋼材の断面減少

腐食発生限界塩化物イオン濃度 1.2kg/m³



20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

鉄筋腐食



鉄筋は、コンクリート中の塩化物イオンの増加あるいはpHの低下により、表面の不動態皮膜が破壊されて腐食する。腐食生成物の体積が膨張し、コンクリートにひび割れや剥離を引き起こしたり、鉄筋の断面が減少して、構造物の性能が損なわれる。

- ✓ 鉄筋の腐食がひび割れの発生に及ぼす要因は、鉄筋の腐食量のほかに鉄筋の径、かぶり、あきなども関係している。
- ✓ 鉄筋のヤング係数は、腐食による質量減少率が10%以上になると孔食の影響で低下が顕著となる。
- ✓ アノード反応やカソード反応が、鉄筋の同位置で生じている場合は**ミクロセル**腐食反応、離れて生じる場合は**マクロセル**腐食反応という。

20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

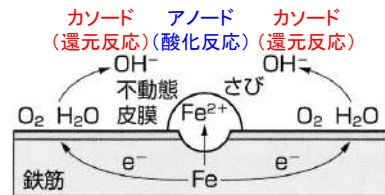
鋼材腐食のメカニズム



腐食反応は**アノード反応**と**カソード反応**に分けて考えられている。

アノード反応は、塩化物イオンによって鋼材表面の不動態皮膜が破壊されることにより、鋼材表面から鉄イオンが細孔溶液中に溶け出す反応である。

カソード反応とは、溶けだした鉄イオンが残した鋼材中の電子が酸素と水と反応するものである。

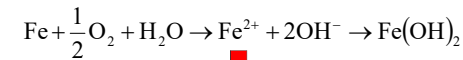
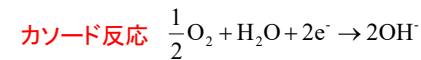


20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

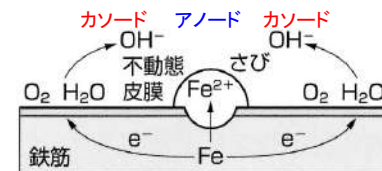
鋼材腐食のメカニズム



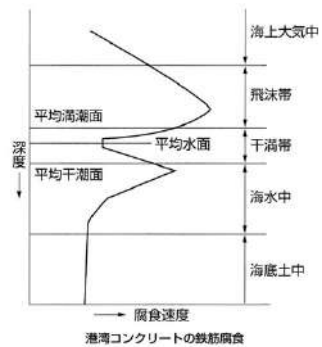
鋼材表面の不動態皮膜が塩化物イオンにより破壊



Fe(OH)₂が酸化し、アノード部で錆 (Fe₂O₃, Fe₃O₄等) が生成



干満帯における鉄筋腐食



海中部にあるコンクリート中の鉄筋は、塩化物イオン濃度が高いにもかかわらず、腐食の進行が極めて遅くなる。

これは海水に溶存している酸素が少ないからである。

一方、飛沫帯では塩化物イオンの浸透のほかに乾湿繰り返しの影響で酸素も十分に供給されるため、鉄筋の腐食進行が速くなる。



20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

塩害による劣化進行過程

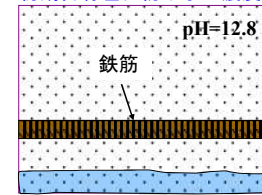


(1) 潜伏期 → (2) 進展期 →

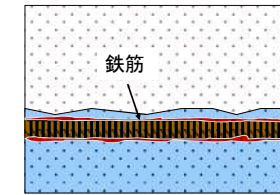
鋼材のかぶり位置における塩化物イオン濃度が腐食発生限界濃度に達するまでの期間

鋼材の腐食開始から腐食ひび割れ発生までの期間

塩化物イオンの拡散
初期含有塩化物イオン濃度



鋼材の腐食速度



20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

塩害による劣化進行過程

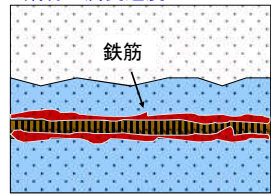


→ (3) 加速期 → (4) 劣化期

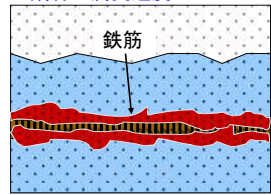
腐食ひび割れ発生により鋼材の腐食速度が増大する期間

鋼材の腐食量の増加により耐力の低下が顕著な期間

ひび割れを有する場合の鋼材の腐食速度

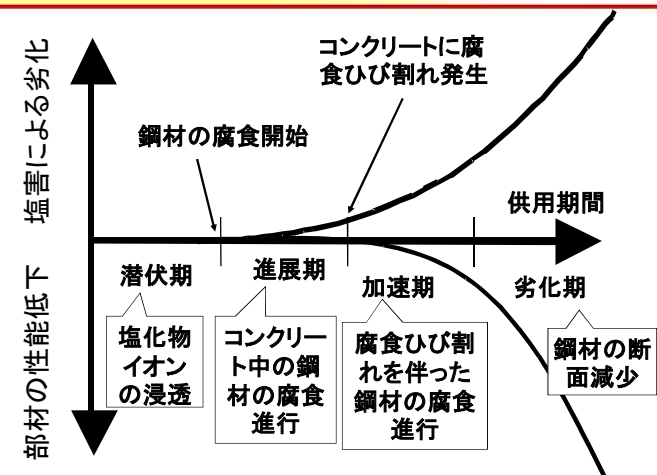


ひび割れを有する場合の鋼材の腐食速度



20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

塩害による劣化進行過程



塩害に関する確認事項



- ✓ 水セメント比の大きいコンクリートほど、塩化物イオンの拡散係数は大きい。
- ✓ 普通ポルトランドセメントと高炉セメントB種を比較すると、後者の方が塩化物イオンの拡散係数は小さい
- ✓ 外来塩分による塩害は、飛沫帯のような乾湿繰り返しの条件下の方が生じやすい。
- ✓ 海面下などでは塩化物イオン量が多くあっても腐食はあまり促進しない。
(溶存酸素が少ないことやコンクリートの含水率高いとコンクリート中の酸素移動がしにくいいため)
- ✓ 鋼材の腐食反応で、鋼材が溶出する部分はアノード(陽極)となっている。
- ✓ 塩化物イオン量規制量
練混ぜ時: 0.30kg/m^3 以下
腐食発生限界塩化物イオン量: 1.2kg/m^3



20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

アルカリシリカ反応(ASR)



反応性シリカ鉱物や炭酸塩岩を有する骨材

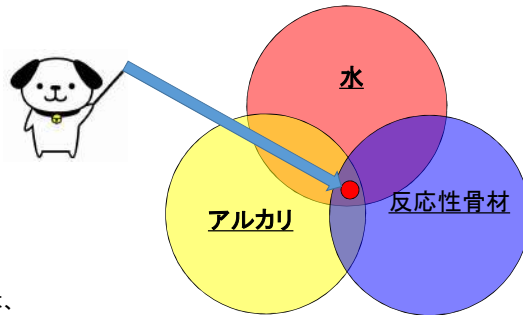
↓ コンクリート中のアルカリ水溶液と反応

体積膨張によりひび割れを発生



20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

ASRが発生する条件



ASRは、

- ①アルカリ反応性骨材の使用
 - ②限界値を超えるコンクリートのアルカリ量
 - ③コンクリートへの水の供給
- の3つの条件全てが揃ったときに起こる。

20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

反応性骨材



我が国で確認されている反応性骨材は

- ①火山岩が起源の岩石
(安山岩、流紋岩、玄武岩、石英安山岩など)
 - ②堆積岩が起源の岩石
(チャート、砂岩、頁岩など)
 - ③変成岩
(粘板岩、片麻岩、片岩)
- がある。



反応性骨材



岩石中のシリカ鉱物では

- ①無定型またはガラス質
(オパール、火山ガラスなど)
- ②クリストバライト、トリジマイトなどのシリカ鉱物
(石英の高温結晶形)
- ③微細な結晶粒やひずんだ結晶格子を持つ石英
などである



オパール



火山ガラス



クリストバライト



トリジマイト

20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

ASRによる劣化課程

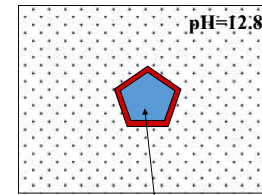


(1)潜伏期 → (2)進展期 →

ASRは進行するものの、膨張およびひび割れはまだ発生しない。

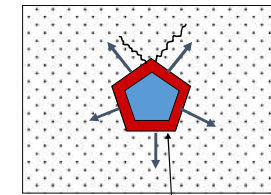
水分とアルカリの供給下で、膨張が進み、ひび割れが発生する。

ASRゲルの生成速度



反応性骨材

ASRゲルの吸水膨張速度



反応生成物

20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

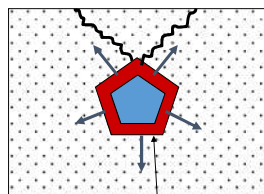
ASRによる劣化課程



→ (3)加速期 → (4)劣化期

膨張速度が最大を示す段階で、ひび割れが進展する。

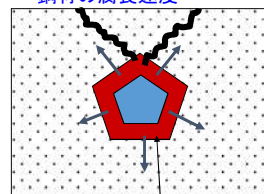
ASRゲルの吸水膨張速度



反応生成物

ひび割れ幅が増大し、鋼材腐食が進行する。

ASRゲルの吸水膨張速度
鋼材の腐食速度



反応生成物

20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

ASRによる変状の特徴



- ◆ひび割れ
無筋コンクリート: 網の目状、亀甲状
RC, PC構造物: 膨張が拘束されている方向に発生しやすい (PC鋼材に沿うなど)
※ひび割れ幅が大きい割には深さが比較的浅い
- ◆変位・変形
膨張に起因した変位・変形。継目部・目地部の閉塞・破損など
- ◆ゲルの滲出
ひび割れに白色ゲルが滲出することがある
- ◆変色
コンクリート表面が、茶褐色に変色することがある

20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

ASRによる変状の特徴



- ◆ **かぶりコンクリートの剥離・剥落**
鉄筋拘束の小さい部位やひび割れ損傷が著しい部位で生じる可能性がある
- ◆ **コンクリートの強度低下**
ひび割れの多発によりコンクリートの強度が低下することがある（弾性係数も低下する）
- ◆ **鉄筋の腐食**
ひび割れ発生により鉄筋腐食を促進させる可能性がある
- ◆ **鉄筋の降伏・破断**
低鉄筋比の構造物で鉄筋の降伏や破断を生じる可能性がある

20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

ASRの調査項目



- 目視観察(ひび割れ等の特徴をつかむ)
- 採取コアによる試験
 - ① **骨材の岩種および反応性鉱物の種類特定**
偏光顕微鏡観察、X線回折、SEM(電子顕微鏡観察)
赤外線吸収スペクトル分析
 - ② **骨材のアルカリシリカ反応性の判定**
化学法、モルタルバー法
 - ③ **アルカリシリカゲルの判定**
化学成分分析、SEM
 - ④ **アルカリ量**
化学成分分析
 - ⑤ **力学的性質**
圧縮強度試験(圧縮強度、弾性係数)
超音波法(音速、動弾性係数)
 - ⑥ **残存膨張量**
促進膨張試験



ASRの調査項目



項目	種類	備考
アルカリ量	粉末試料による分析	熱水抽出法、振とう法、強酸溶解法
	コア試料による分析	
ASR反応性	岩石学的試験	偏光顕微鏡、粉末X線回折、など
	化学法	溶解シリカ量とアルカリ濃度減少量の関係
	モルタルバー法	モルタル供試体、40℃、RH100%
	迅速法	モルタルバー、高温高圧
アルカリシリカゲル	偏光顕微鏡、傾向顕微鏡	コア
	化学成分分析、SEM	コア
	酢酸ウラニウム蛍光法	コア、酢酸ウラニウムは放射線物質
残存膨張量	JCI-DD2法	コアに金属製バンド、40℃、RH=100%、0.1%
	カナダ法	1STM-C-1260-94、2%、1%



ここはすべて重要なので、それぞれを丁寧にチェック！

20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

凍害



水は凍結すると**9%の体積膨張**を生じる。
この膨張を緩和する連行空気が十分に存在しない場合は、コンクリートに静水圧が作用しひび割れが発生する。
凍害はこの凍結と融解の繰返しによって徐々にコンクリート内部まで劣化していく現象である。

凍害による劣化形態

- ① **ポップアウト**
(吸水量が多い骨材が凍害を受けることによって膨張しコンクリート表面がはく離する。)
- ② **スケーリング**
(コンクリート表面が薄くはく離する。)
- ③ **微細ひび割れ**
(網状の細かいひび割れが発生する。)



20180502 Yamaguchi Society of Concrete Diagnosis and Maintenance Engineers

凍害を防ぐには



①内的要因

- ✓ 適切な水セメント比
- ✓ AEコンクリートであること
(気泡間隔係数は200~250μm以下)
- ✓ コンクリート中の水分量

②外的要因

- ✓ 最低気温(低い程小さい細孔径まで凍結)
- ✓ 日射量(凍結融解の繰返し作用)
- ✓ 水の供給(乾燥していれば発生しない)



凍害の事例



スケーリング



剥落



出典: コンクリート構造物の劣化事例写真集(CD-ROM)p.84

酸類による化学的侵食



塩酸, 硫酸, 硝酸などの無機酸

非常に激しい侵食

ぎ(蟻)酸, 酢酸, 乳酸などの有機酸

かなり激しい侵食

脂肪酸(1個のカルボキシル基を含む)

酸性が高いほど侵食が大きくなる



下水道施設の化学的侵食



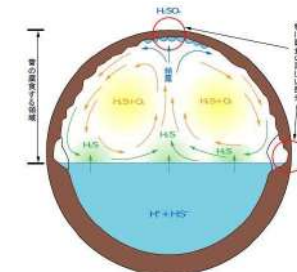
嫌気性細菌によって
硫化水素(H_2S)が生成



好気性細菌によって
硫酸(H_2SO_4)が生成



侵食



塩類による化学的侵食



硫酸塩
(海水中にも含まれる)

- ・硫酸ナトリウム
- ・硫酸カルシウム
- ・硫酸マグネシウム
- etc.



セメント中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$



二水石膏



← C_3A

エトリンガイトを生成
(膨張し崩壊)



火災



セメント硬化体と骨材の膨張収縮挙動が異なる



セメントペースト部は収縮(約600℃まで)

骨材は膨張



組織がゆるむ



劣化・剥落

