



7. 劣化要因と診断③

Deterioration factor and assessment (3)

維持管理システム工学研究室

松本 浩嗣

A5-09室, 内線6219

km312@eng.hokudai.ac.jp



劣化現象と要因 — 腐食 —

Deterioration and factors – Corrosion –

- 鋼材の腐食とは，その酸化現象 Corrosion is oxidization of steel since ferric oxide is more stable on earth
 - 地球上では，酸化鉄がより安定した状態
- 腐食には，酸素と水が必要 O₂ and H₂O is necessary for oxidization

アノード(陽極) anode: $2\text{Fe} \rightarrow 2\text{Fe}^{2+} + 4\text{e}^-$

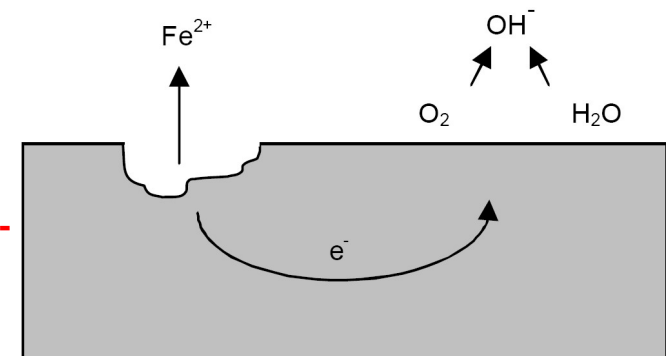
カソード(陰極) cathode: $2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$

上記をまとめると, combining above

$2\text{Fe} + 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{Fe}^{2+} + 4\text{OH}^- \rightarrow 2\text{Fe}(\text{OH})_2$

これに，酸素がさらに反応して，Fe(OH)₃となり，H₂Oを放出して，酸化鉄(Ⅲ) (赤錆) Fe₂O₃となる. Further process to create Fe₂O₃ is as below

$4\text{Fe}(\text{OH})_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2(\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}) + 2\text{H}_2\text{O}$



電池のように電気が流れる
Electric current as in battery

劣化現象と要因 — 腐食 —

Deterioration and factors – Corrosion –

錆は、錆を防ぐ rust to prevent rust

– 鋼材の表面に腐食速度が遅い酸化鉄の膜(不導態被膜)が形成され, 内部の腐食に対する保護層となる. Ferric oxide whose corrosion rate is slow (stable film) is formed on surface of steel becomes protection layer.

- 赤錆(酸化鉄(III))は腐食速度が遅く, 鋼材の表面にできた場合, 内部の腐食を遅らせる効果がある. Ferric oxide III grows slow and prevent inner part from being corroded fast

これを積極的に利用したのが, 耐候性鋼 **Weathered steel**である. →表面に安定錆を形成させるために銅, クロム, ニッケル, 燐が含有されている.

Weathered steel contains copper, chrome, nickel and phosphorus in order to utilize ferric oxide III being formed on surface for corrosion protection.



劣化現象と要因 – 腐食 –

Deterioration and factors – Corrosion –

錆は、錆を防ぐ。 Rust prevent steel from rusting

– ステンレスstainlessは、表面に強固な酸化膜(不導態被膜)を形成することにより、内部の錆を防いでいる。 Stainless steel forms stable ferric oxide (stable film) on surface to prevent inner part from being corroded

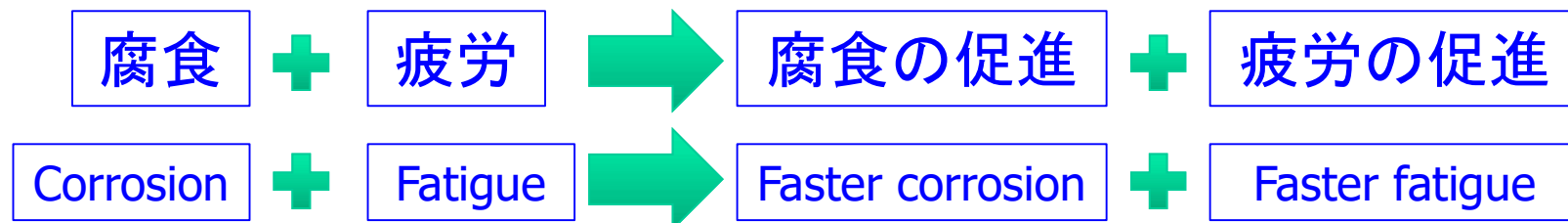
- 強固な錆は、鉄に、クロム、ニッケル、モリブデンなどを混ぜ、合金にすることにより形成される。 Stable and firm film can be created by mixing chrome, nickel and molybdenum in steel
- つまり、ステンレスは錆びないのではなく、腐食速度が大変遅いことになる。 Stainless steel would be corroded but its speed would be very slow

劣化現象と要因 – 腐食 –

Deterioration and factors – Corrosion –

腐食と疲労の複合劣化 Deterioration under combined effects of corrosion and fatigue

- 腐食が生じると、疲労による劣化が促進される。
Fatigue deterioration would be accelerated after being corroded
- 疲労のように力が継続的に作用すると、腐食が促進される。
Corrosion is accelerated when stress is continuously acting like fatigue effect



劣化現象と要因 — 腐食 —

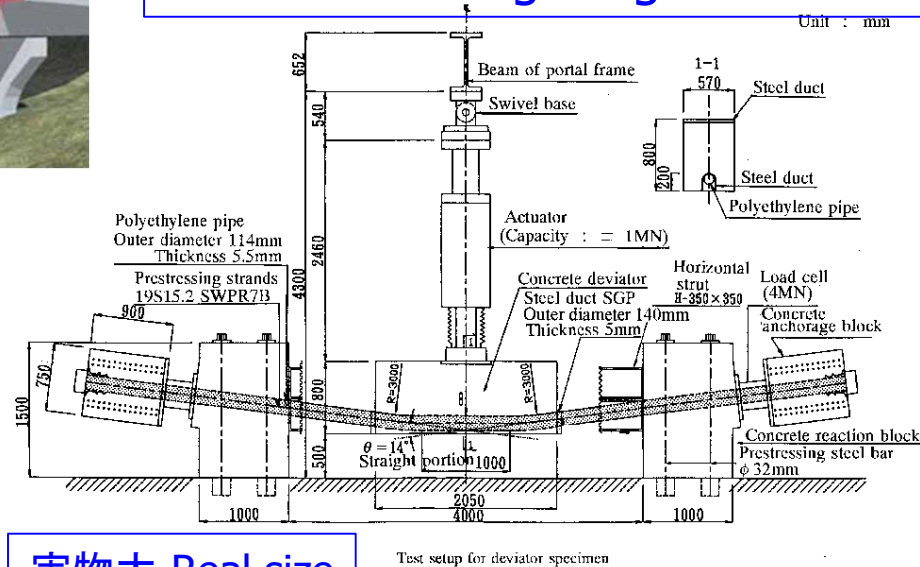
Deterioration and factors – Corrosion –

- フレッチング疲労 **fretting fatigue** (繰返しこすれ合う現象) は, 腐食を起こす. また, 疲労強度が低下する.
Fretting fatigue, which is abrasion through contact causes corrosion and reduces fatigue strength

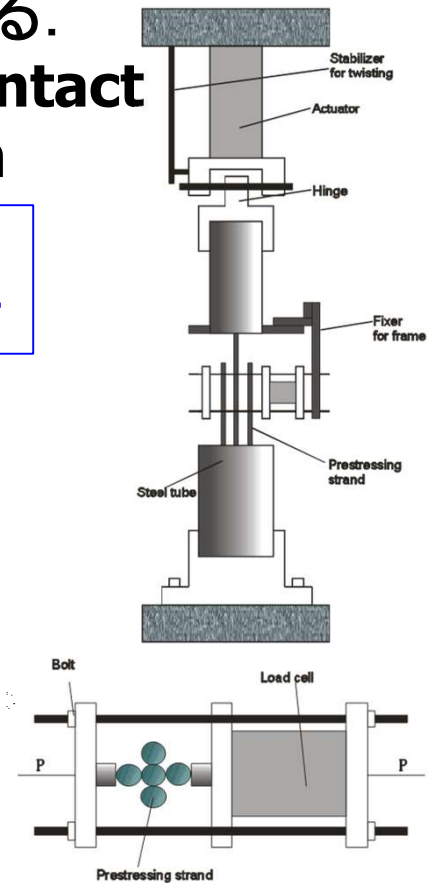


外ケーブル偏向部
Deviator for external cable

偏向部のフレッチング疲労試験
Test for fretting fatigue of deviator



実物大 Real size



要素試験
Element test

劣化現象と要因 — 塩害 —

Deterioration and factors – Salt attack –

- 塩害とは、「塩化物イオンの存在によって、不導態被膜（酸化膜）が破壊されることによって、鋼材の腐食が促進されることにより生じる構造物の劣化」をいう。 **Salt attack is the deterioration of structures due to accelerated steel corrosion induced by destruction of stable film that is caused by chloride ion.**
 - 鋼材を含まないコンクリート構造物では、塩害は生じない。 **Salt attack would not occur in structures containing no steel.**
 - アルカリ性であるコンクリート中では、本来腐食は起こりにくい（不導態被膜が形成されるので）ので、その意味では塩化物イオンは天敵である。 **Corrosion is less likely to occur in alkali environment of concrete because stable film is created more firmly. Chloride ion therefore is natural enemy.**

劣化現象と要因 — 塩害 —

Deterioration and factors – Salt attack –

- 塩化物イオンはどこから来るのか？ Where does chloride ion come from?
 - 海水 sea water
 - 直接，水しぶきなどで構造物に運ばれるだけでなく，空気中を浮遊して数百メートルは運ばれる. Splash reaches to structure on coastal line and can float in air over hundreds of meter.
 - 海から強い風（季節風）が吹きつける日本海側が，太平洋側より問題. The Japan Sea side is more problematic because of strong monsoon from sea
 - 凍結防止剤（融氷・融雪剤） deicing agent
 - 雨が凍る，雪が融けて凍るという状況のときに使われる. 液体としての水が存在しない極寒地，乾燥地では不要. It is for climate freezing rain drops and thawing/freezing snow. It is not necessary for extremely cold climate or dry area where no ice can be thawing due to friction of tire.

劣化現象と要因 — 塩害 —

Deterioration and factors – Salt attack –

- 塩害の調査法 investigation for salt attack
 - 腐食が生じているかを，肉眼などで調査
investigation by naked eyes to observe corrosion
 - 鋼構造物の場合は腐食そのもの，もしくは，腐食汁の染み出し corrosion itself or brownish substance leaching out through coating layer in steel structures



劣化現象と要因 — 塩害 —

Deterioration and factors – Salt attack –

– 塩化物イオン量を測定 measurement of chloride ion content

- 腐食を生じさせる限界値以下であるかどうかを調査
Investigation on whether content is below the limit for triggering corrosion or not.
- 表面付近のコンクリート小片を取り出し, 分析する.
A small piece of concrete near surface of structure is taken for chemical analysis.
- 塩化物イオン量を測定するセンサーを埋め込んでおく.
Sensor of chloride ion is implemented in concrete.

劣化現象と要因 — 塩害 —

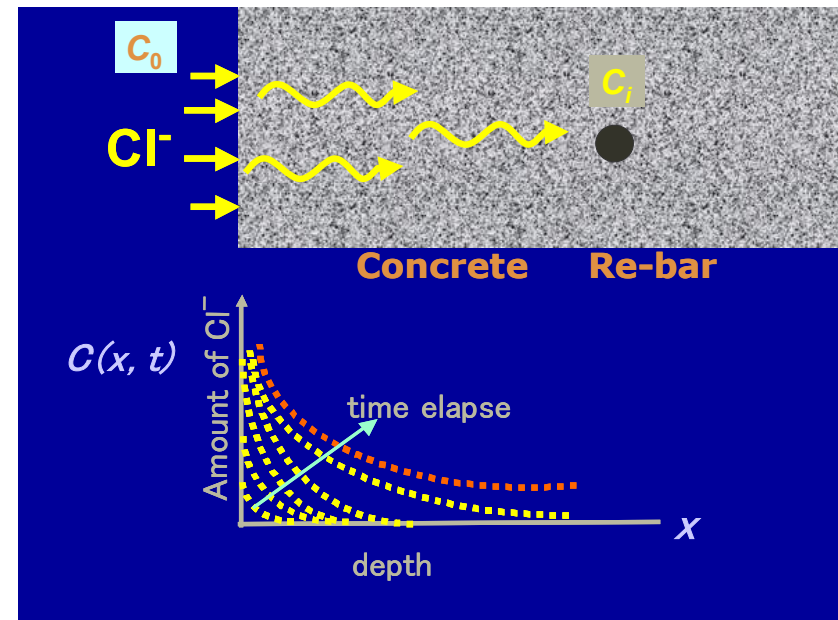
Deterioration and factors – Salt attack –

- 塩化物イオン量の予測
Prediction of chloride ion contents

- 物質移動則(フィックの法則)を使った予測式 **prediction formula based on mass transport law (Fick's law for diffusion)**

- 時間後のイオン濃度 C を予測
prediction of chloride ion content, C after time, t

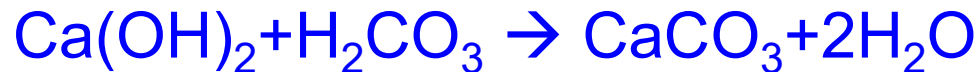
$$C(x, t) = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_{ap} t}} \right) + C_{initial}$$



劣化現象と要因 — 中性化 —

Deterioration and factors – Carbonation –

- 中性化とは、コンクリートのアルカリ性が、空気中の二酸化炭素の影響で、中性化する現象を言う。コンクリート中の鋼材の不導態被膜が破壊されやすくなり、腐食が発生しやすくなる。 **Carbonation is the neutralization of alkali environment in concrete under effects of CO₂ in air and triggers steel corrosion since stable film would become less stable.**



セメント水和物の水酸化カルシウムが、二酸化炭素が水に溶けてできる炭酸と反応し、炭酸カルシウムとなる。 Calcium hydroxide, as cement hydrate, reacts with carbonic acid that is made of carbon dioxide dissolving in water and becomes calcium carbonate.



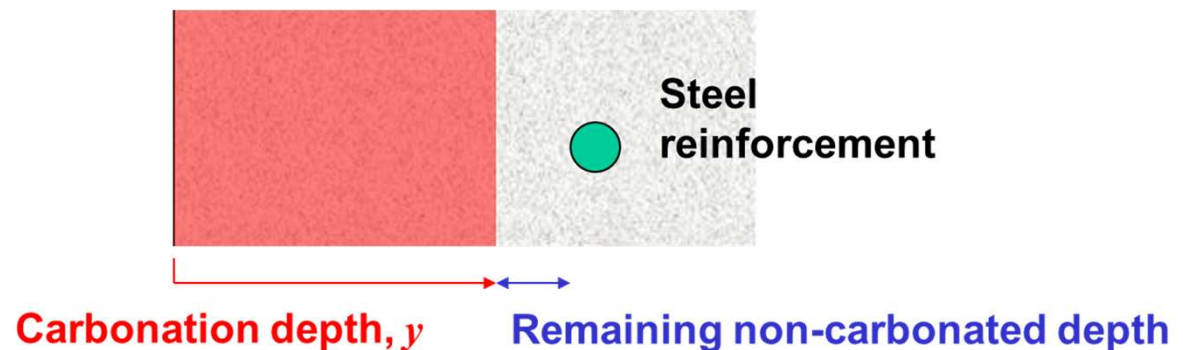
劣化現象と要因 – 中性化 –

Deterioration and factors – Carbonation –

- 中性化の程度は，中性化深さで測る．中性化深さが鉄筋の位置まで到達すると鉄筋の腐食が開始する可能性が高まる． Carbonation depth is the index for extent of carbonation. When the carbonation depth reaches the steel reinforcement location, corrosion is likely to occur.
- 中性化深さ y は，通常時間 t の関数である以下の式で予測できる． Carbonation depth, y can be predicted by the following formula as a function of time, t :

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

α は環境条件や材料特性に依る． α depends on environmental condition and material property



劣化現象と要因 — 塩害と中性化 —

Deterioration and factors – Salt attack & Carbonation –

- 塩化物イオン侵入も中性化もコンクリートの特性への影響は小さい **negligible effects on concrete property by chloride ion ingress and carbonation**
- 中性化によって、塩化物イオン侵入が促進^{注)} **chloride ion ingress can be accelerated by carbonation ***
- 腐食ひび割れにより、塩化物イオンや中性化が促進 **chloride ion ingress and carbonation can be accelerated by corrosion-induced cracking**

注) 中性化により、固定化されていた塩化物イオンが電離し、未中性化領域に濃縮される

*) chemically bound chloride ion is released by carbonation and moved to non-carbonated zone

レポート課題

Report Assignment

建設後10年が経過した既設コンクリート構造物の塩分浸透状況を調査したところ、以下の結果を得た。 From an investigation of an existing concrete structure 10 years after the completion on the chloride penetration condition, following results were obtained.

- ✓ 表面からの距離 $x = 3\text{cm}$ の位置の塩化物イオン濃度 Chloride ion concentration at the location 3 cm away from the surface

$$C(x = 3\text{cm}, t = 10\text{years}) = 1.0 \text{ kg/m}^3$$

- ✓ 拡散係数 Diffusion coefficient, $D_{ap} = 0.5 \text{ cm}^2/\text{year}$

$$C(x, t) = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_{ap} t}} \right) + C_{\text{initial}}$$

1. 上式を用いて、表面の塩化物イオン濃度 C_0 を推定しなさい。ただし、初期値 $C_{\text{initial}} = 0$ とし、拡散係数は一定であったとする。 Calculate the estimated value of C_0 (chloride ion concentration at the surface) using the above equation. You can assume $C_{\text{initial}} = 0$ and constant D_{ap} in the past 10 years.

ヒント Hint: erf関数はエクセルに入っている。 erf function is available in EXCEL.

レポート課題（続き）

Report Assignment (cont.)

2. 表面から鉄筋までの距離を5cm, 腐食発生限界濃度 $C_{lim} = 1.2 \text{ kg/m}^3$ とする. あと何年で鉄筋位置の塩化物イオン濃度が C_{lim} に達するか, 寿命を予測しなさい. ただし, 調査で得た拡散係数 D_{ap} と1.の C_0 は, 今後も変わらないものとする. Distance from the surface to the location of rebar is 5 cm. Critical chloride ion concentration for steel corrosion, $C_{lim} = 1.2 \text{ kg/m}^3$. Predict how many years does it take until the chloride ion concentration at the location of rebar reaches the value of C_{lim} . It is assumed that D_{ap} and C_0 will not change in the future.

ヒント: t は厳密解ではなく, 繰返し計算等により得られる近似解でもよい.

Hint: It is allowed that you find an approximate solution for t by iteration process, etc.

提出期限: 2020年7月20日

Due date: 20th July, 2020