

# 参 考 资 料

## 参考資料-1 劣化のメカニズム

### (1) 乾燥収縮・温度変化

#### 1) 概要

コンクリートは、内部の水分が乾燥すると、収縮現象が生じる。この収縮変形が梁・柱部材などの外部のフレームや部材内部または鉄筋によって拘束されると、コンクリートに引張応力が発生し、コンクリートの引張強度または、伸び能力を超えた場合にひび割れが発生する。

#### 2) 劣化のメカニズム

##### ① 乾燥による収縮の発生

硬化コンクリートのセメント水和組織の細孔中には自由水と呼ばれる水和反応に消費されない水が存在する。コンクリートの内部は、外部の相対湿度（日本の場合、年平均：約 60%）に比べて湿度が高いため、硬化後の時間の経過とともに、外部の相対湿度とつり合うように表面から水分が逸散して乾燥が生じる。そして、水分が乾燥すると、図に示すメカニズムによって毛細管張力が発生し、セメント水和物生成物が引っ張られ、収縮現象が生じるとされている。

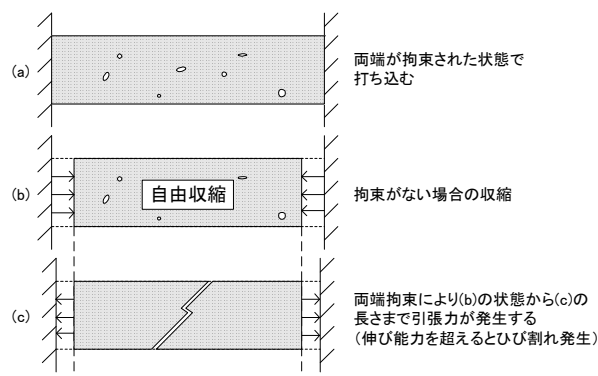


図 外部拘束によるひび割れ発生概念図

##### ② 収縮によるひび割れの発生

コンクリートが乾燥による収縮を起こしても、それが拘束されない場合には自由収縮となりひび割れは発生しない。図に示す梁、柱部材による外部拘束や、図に示す部材内部の鉄筋や、乾燥による収縮量の違いによる内部拘束によって収縮変形が拘束されると、コンクリートに引張力が発生し、ひび割れが生じる。

- ・収縮などによるひび割れの進展と劣化因子の浸透
- ・劣化因子の浸透による鉄筋腐食の発生
- ・鉄筋腐食の進行と剥落、鉄筋の断面欠損等の発生

#### 3) 劣化に対する対応策

乾燥収縮・温度変化によって発生したひび割れを介して、コンクリート内部への劣化因子（水分等）の侵入を抑制するため、ひび割れ補修工法などが用いられる。

## (2) 中性化

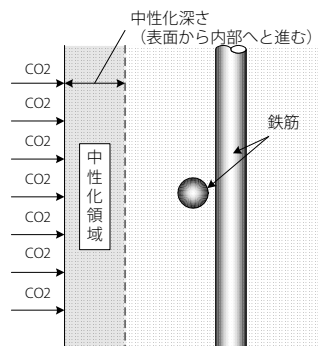
### 1) 概要

中性化とは大気中の二酸化炭素がセメント水和物と炭酸化反応を起こし、pHを低下させることで、コンクリート内部の鋼材腐食を促進させ、コンクリートのひび割れや剥離、鋼材の断面減少を引き起こす劣化現象である。

### 2) 劣化のメカニズム

#### ① 中性化の進行

最も一般的で代表的な中性化は、大気中の炭酸ガスがコンクリートへの拡散による炭酸化である。コンクリートが大気中にある場合、大気中の炭酸ガスがコンクリート内部へと拡散し、中性化がコンクリート表面から内部へと進行していく。



#### ② 鉄筋の腐食

コンクリートが炭酸化により中性化したとしても、基本的要求性能である強度の低下は生じない。中性化が劣化現象のひとつに含まれるのは、コンクリート自体の劣化ではなく、コンクリート内部の鉄筋の腐食保護機能の低下のためである。

コンクリート中の鉄は pH10 以上では表面に不動態皮膜を形成し、発錆することはないが、中性化により pH10 以下になると発錆する。

中性化による鉄筋腐食には、中性化残りが重要な判断材料となる。下表に中性化残り と鉄筋腐食の可能性の評価を示す。

表 中性化残り と鉄筋腐食の可能性の評価

判定	中性化残り	鋼材の腐食性
D	20 mm以上	損傷なし
E	10～20 mm	軽微
F	10 mm未満	著しい

中性化残りが 10 mm以上では構造物の機能を損なうような重大な腐食が生じた例が非常に少ないため、通常環境の下では、10 mm確保すればよいとしている。尚、塩化物イオンが存在する場合は鉄筋腐食が開始する可能性がある中性化残りを、土木学会「コンクリート標準示方書（施工編）」では 10 mm～25 mmと設定している。

③ ひび割れの発生と発展

発錆によって、鉄は腐食生成物を生じ、体積が約 2.5 倍に膨張する。この膨張圧によってかぶりコンクリートにひび割れや剥離といった損傷が引き起こされる。

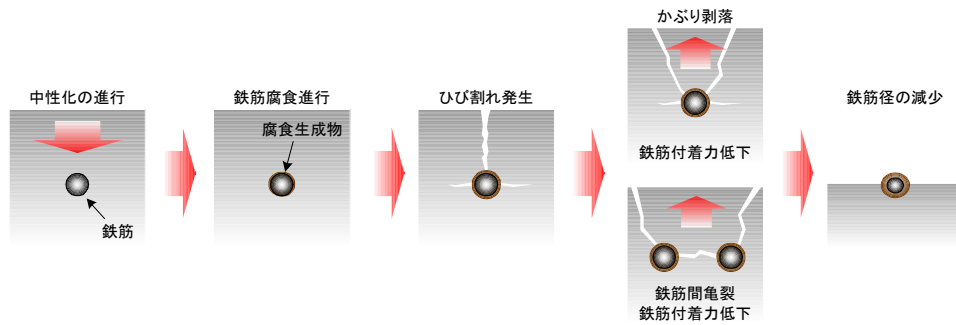


図 劣化の進行過程

【中性化による損傷例（壁高欄）】



- ・中性化の進行によるひび割れの発生  
鉄筋間隔に沿ったひび割れが確認できる。



- ・うきの発生  
中性化の進行により、コンクリート表面にうきが確認できる。  
(鉄筋発錆による付着力の低下)



- ・鉄筋露出  
中性化の進行による鉄筋表面の腐食が確認できる。

3) 劣化に対する対応策

対策工法としては、中性化残りを確保するために、劣化因子の遮断や劣化速度の抑制を目的とした表面被覆工法やひび割れ補修工法が用いられる。また、劣化因子を除去するための工法として断面修復工法や、電気防食などが用いられる

### (3) 塩害

#### 1) 概要

塩害とは、コンクリート中の鋼材（鉄筋や PC 鋼材など）が、塩分（以下、塩化物イオンと表記）の作用によって腐食し、鋼材の腐食に伴う膨張力によって、コンクリートにひび割れや剥離が生じたり、鋼材の断面が減少したりして、コンクリート構造物の耐荷重や使用性、美観などが低下する劣化する劣化現象である。

#### 2) 劣化のメカニズム

##### ① 塩化物イオンの浸透

コンクリート中に侵入する塩化物イオンには、骨材や混和剤などに初期から混入する塩分と、海洋環境に浮遊している、飛来塩分や凍結防止剤（融雪剤）などの建設後に侵入する塩分がある。

##### ② 鉄筋の腐食

塩化物イオンがコンクリート中に侵入し、ある一定量を超えると鉄筋を腐食させる。鋼材が腐食すると体積が 2~4 倍に膨張するため、コンクリートに膨張圧が生じる。この膨張圧による引張応力が、コンクリートの引張強度を超えると、かぶり部分にひび割れが発生する。

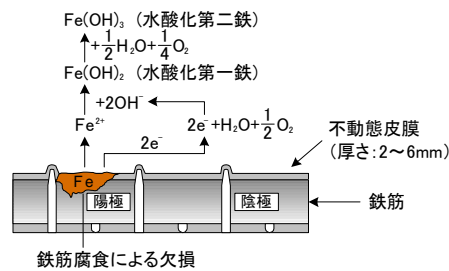


図 鉄筋腐食のメカニズム

##### ③ コンクリートの剥落

鉄筋腐食が進行すると、徐々にひび割れ幅が大きくなる。また、ひび割れ部から塩化物イオン、酸素、水分などの腐食因子が浸入するため、腐食の進行は一段と速くなる。腐食が進行すると、鉄筋とコンクリートの付着力が低下したり、内部の鉄筋間にもひび割れが発生したりして、かぶり部分が剥落する。この段階になると、鉄筋は外気に曝されている状態であるため、さらに腐食が進行する。また、鉄筋断面が減少しているため、部材としての耐力が低下する。

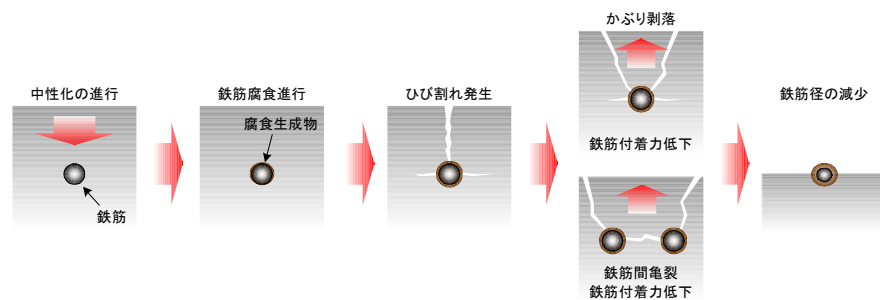


図 劣化の進行過程

#### 3) 劣化に対する対応策

対策工法としては、鋼材の腐食因子の遮断を目的とした表面被覆工法やひび割れ補修工法が用いられる。また、腐食因子を除去する工法としては、断面修復工法や脱塩工法が用いられる。

## (4) アルカリ骨材反応 (ASR)

### 1) 概要

アルカリ骨材反応は、骨材中に含まれる反応性シリカ鉱物や炭酸塩岩を有する骨材がコンクリート中のアルカリ水溶液と反応して、コンクリートに異常膨張やひび割れを発生させる劣化現象である。

### 2) 劣化のメカニズム

アルカリシリカ反応が生じるためには、適量のアリカリと、反応性鉱物を有害量含有する骨材および水分の存在が必要となる。

アルカリシリカ反応に関するアルカリの供給源としては以下のものが想定される。

- ① セメントから  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  や  $\text{K}_2\text{SO}_4$  の硫酸塩の形で供給されるもの。
- ② 海産骨材（海砂など）に付着している  $\text{NaCl}$  や  $\text{KCl}$  として供給されるもの。
- ③ 骨材に含有されるアルカリゼオライトなどの  $\text{Na}^+$  がセメント中の  $\text{Ca}^{2+}$  とイオン交換して供給されるもの。
- ④ コンクリート用混和材料中に含有されるアルカリ成分から供給されるもの。
- ⑤ 外部環境（海水、土壌など）から供給されるもの。

アルカリシリカ反応のメカニズムに関しては不明な点も多いが、次のことが確認されている。結晶性の良くない  $\text{SiO}_4$  四面体構造を持つシリカは、周囲に水が存在すると、アルカリシリカゲルを形成する。形成されたゲルが吸水、膨張することによりコンクリートにひび割れが発生する。

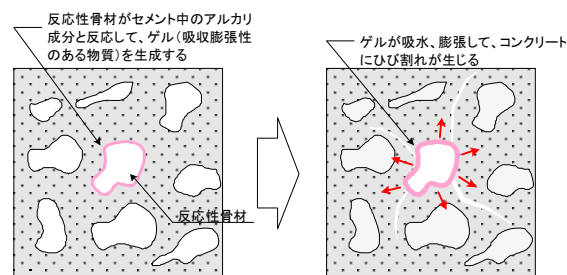


図 劣化進行のイメージ

### 3) 劣化に対する対応策

対策工としては、劣化因子の遮断や劣化速度を抑制することを目的とした、表面被覆工法やひび割れ補修工法が用いられる。劣化部を取り除く方法としては、断面修復工法が用いられる。

## (5) 腐食

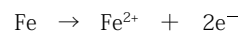
### 1) 概要

鋼材の原料である鉄鉱石は、エネルギー的に安定した酸化化合物の状態では自然界に存在している。鋼材はこの酸化化合物を還元・精錬して製造される。つまり、鋼材は自然界の中では不安定な存在であり、酸素や水と結合して安定な状態である錆に戻ろうとする。この現象を腐食と呼ぶ。

### 2) 劣化のメカニズム

腐食反応を起こす環境には、水分が存在する場合と存在しない場合があるが、一般的に腐食による損傷が問題となるのは水分が存在する場合の湿食と呼ばれる現象である。

腐食は鋼材の表面部分で反応する現象であり、その表面にはエネルギーの大きい部分と小さい部分が存在し、乾燥状態においては、これらは反応しないが、表面に水分が付着するとエネルギーの移動が始まることとなる。すなわち、表面における水の部分で局部電池が生じ、電池の一方の極である陽極（アノード）では、金属が溶けて酸化され錆が発生する。これを化学式で表現すると次式のとおりとなる。



つまり、鉄がイオンになって溶出し、酸化することで酸化鉄、すなわち錆を生じる。一方の極、陰極（カソード）では陽極で生じた電子が消費される還元、すなわち次式に示す反応が生じる。



なお、自然環境におかれた鋼構造物は水（H<sub>2</sub>O）だけではなく、飛来塩分をはじめとして酸性となる物質が含まれている条件化のため、この腐食反応は促進されることとなる。また、いったん錆が発生し、酸化膜が形成されると、それ以上の腐食が進行しなくなり、錆が止まることになるが、アルミニウムなどとは異なり鋼材の酸化膜はあらく、一般的にはそのまま放置すれば腐食は進行するものである。

### 3) 劣化に対する対応策

腐食のメカニズムから、腐食反応の進行を抑制するための条件は下記のとおりである。

- ① 水、酸素、その他の性能条件となる物質の遮断
- ② 腐食電流の遮断
- ③ 鋼材面のアルカリ化
- ④ 鉄のイオン化による溶出防止

上記の性能を満足するために、最も一般的に用いられている手法が塗料による防食である。

## (6) 亀裂

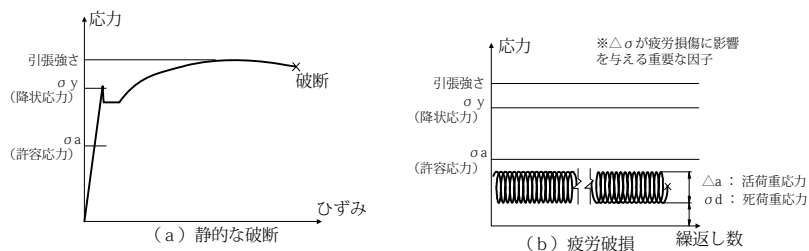
### 1) 概要

疲労亀裂には低サイクル疲労と高サイクル疲労の2種類の損傷が存在する。

低サイクル疲労とは、地震のように、非常に大きな外力が数回作用することにより構造物が損傷する現象である。

高サイクル疲労とは、交通振動や風荷重のように小さな応力が数多く作用することにより構造物が損傷する現象である。

この高サイクル疲労が、一般的な鋼橋において問題とされる疲労損傷である。



### 2) 劣化のメカニズム

疲労のメカニズムとしては、鋼材に外力が静的に作用し、鋼材内に発生する応力が降伏応力を下回る場合、鋼材は降伏に至ることはない。しかし、交通荷重に代表されるような繰返しして外力が鋼構造物に作用する場合、発生する応力が鋼材の静的耐力に比べて相当に小さい場合でも、構造的な応力集中部から亀裂が発生し、最終的には、部材の破断に至る場合がある。このような繰返し荷重により亀裂が発生、進展して部材が損傷する現象を疲労損傷という。

表一〇〇に疲労損傷の主な因子を示す。

表 疲労損傷の要因

要因	内容
供用期間	供用期間による繰返し履歴の大小
橋梁支間	一般的に橋梁支間の大小による、活荷重影響の大小
継手形状	疲労強度の低い継手の採用の有無

### 3) 劣化に対する対応策

損傷発見後の対策としては、緊急的な措置、応急対策、および恒久対策の3つに分類される。ここでいう緊急的な損傷とは、点検の結果、例えば、支承ソールプレート溶接部および主桁、主構内に亀裂が進展している場合などがこれに該当する。

これらの損傷が発見された場合は、まず、安全対策を第一とし、仮受け台やベント等を設置し、万が一、何らかの問題が生じた場合に支持できるようにすることが望ましい。

応急対策とは、主に損傷状況の詳細な調査が実施された後に実施する対策であり、恒久的な対策を検討するのに時間を要する場合、その間、一時的に亀裂の進展防止や脆性破壊への移行を抑制するために実施する対策である。



## (7) ボルトのゆるみ・脱落

### 1) 概要

ゆるみ・脱落とは、部材連結部において、高力ボルトがゆるみ、抜け落ち、もしくは破断している状態をいう。高力ボルトは単純なゆるみだけではなく、F11T以上の高強度ボルトが使用されている場合、遅れ破壊の危険性が考えられる。

遅れ破壊とは、一定の応力を受けた状態で、一定時間経過後に切欠き、疲労亀裂、腐食ピットなどの応力集中部からのクラックが発生、成長し、塑性変形を伴わず突然脆性的に破壊する現象である。

### 2) 劣化のメカニズム

発生要因としては、材料強度が高いこと、微視的な意味も含めて表面に応力集中があること、水素を含む環境下にあることである。

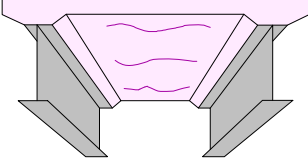
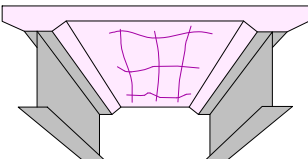
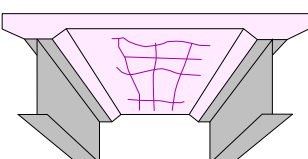
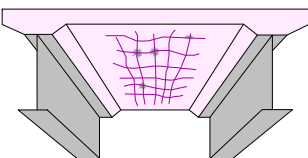
一般に主たる原因としては、鋼材中の水素、あるいは腐食反応で生じた水素の一部が素材中に侵入して生じる水素脆性と応力腐食による割れといわれているが本質的にはまったく機構の異なった二つの現象である。

### 3) 劣化に対する対応策

対策としては、F11T以上の高強度ボルトの取替えやボルトの締め直しがある。支承のセットボルト等に関しては、詳細な調査を要する対策検討が必要であるので注意が必要である。

## (8) 床版ひび割れ

- ① 1方向ひび割れの発生  
主桁作用や、乾燥収縮によって主鉄筋方向（橋軸直角方向）のひび割れが発生する。
- ② 2方向ひび割れの発生  
1方向ひび割れにより、版としての機能が失われると配力鉄筋方向のひび割れも発生する。
- ③ 亀甲状のひび割れ  
2方向ひび割れが輪荷重の繰り返し作用を受け、その長さ、幅、深さを増す。
- ④ ひび割れの貫通、遊離石灰  
ひび割れが床版上面まで貫通し、路面より雨水が浸入するとともに、遊離石灰が生じ、損傷の進行が加速する
- ⑤ 剥離・鉄筋露出、角落ち、ひび割れのスリット化

損傷段階	RC床版下面の損傷状況		補修・補強の考え方
I	<p>[幅広い並列梁構造化案] 床版コンクリートの硬化に伴う乾燥収縮によるひび割れが橋軸直交方向に大きな間隔で発生する段階。局部的にひび割れが貫通し、並列梁構造になる箇所もある</p>		<p>基本的に補修・補強の必要はないが、予防保全として、防水層を設けるなど各工法の適用を考える</p>
II	<p>[2方向に曲げひび割れが発生] 輪荷重により縦横のひび割れが交互に発生し、格子状のひび割れが増加する段階</p>		<p>防水層に加えて鋼板接措工法や炭素繊維シート接着工法など、下面からの工法が有効</p>
III	<p>[狭い並列梁構造化] 輪荷垂により、床版上面ではねじれモーメントを受けて橋軸直交方向にひび割れが発生。下面から発生したひび割れとつながって貫通し、IIの段階より狭い並列の梁状に在る段階</p>		<p>防水層に加えて上面増し厚工法や鋼板接着工法、炭素繊維シート接着工法など、上面および下面からの各工法が有効</p>
IV	<p>[すり磨き当による劣化] 貫通したひび割れ面のすり磨きや浸透水による石灰分の流出によって、ひび割れ幅が拡大し、せん断耐力を失う段階</p>		<p>せん断耐力も低下しているため、防水層に加え、上面増し厚工法および下面からの補強を併用したせん断補強が有効</p>