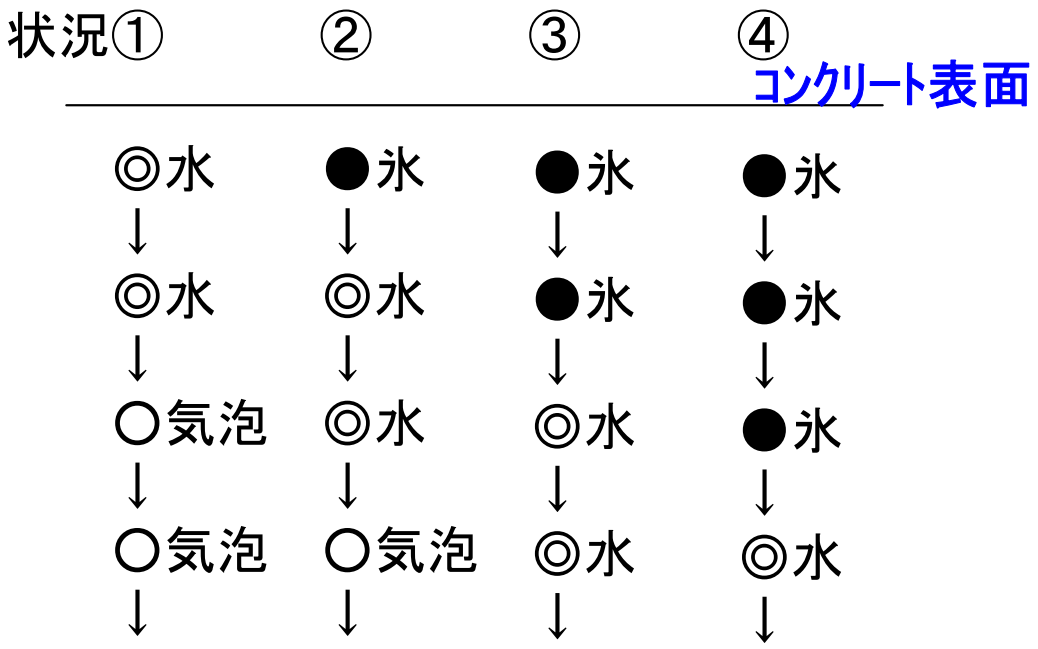
10. コンクリートの耐久性

(1) 気象作用に対する耐久性

・土木構造物は、建築物と異なって、通常、屋外に置かれている。
このため、気象作用の影響が大きい。
特に、凍結融解の繰返し、炭酸ガスの作用が大きい。

・凍結融解作用のメカニズム
コンクリート中の水分が気象条件によって、凍結・融解する。
0℃の水の密度は0.917g/cm^{3}であるので、体積は1/0/917=1.09　倍となる。
このため、コンクリートには凍結・融解の度に、膨張圧が繰り返して作用する。



内部空隙の凍結の模式図

① コンクリート表面が水の凍結点以上。
② コンクリート表面が水の凍結点以下となり、表面に近い気泡中の水が凍結。
水の凍結による体積膨張で、凍結していない水は内部の気泡に押し込まれる。
しかし、気泡がなかったり、遠かったりすると、大きな膨張圧がコンクリートに作用。
③ さらに内部に凍結が進行する。
④ さらに内部に凍結が進行する。
結果的に、コンクリートが内部から崩壊していく。 → 凍結融解による耐久性の低下。

・凍結融解作用に対する抵抗性の改善

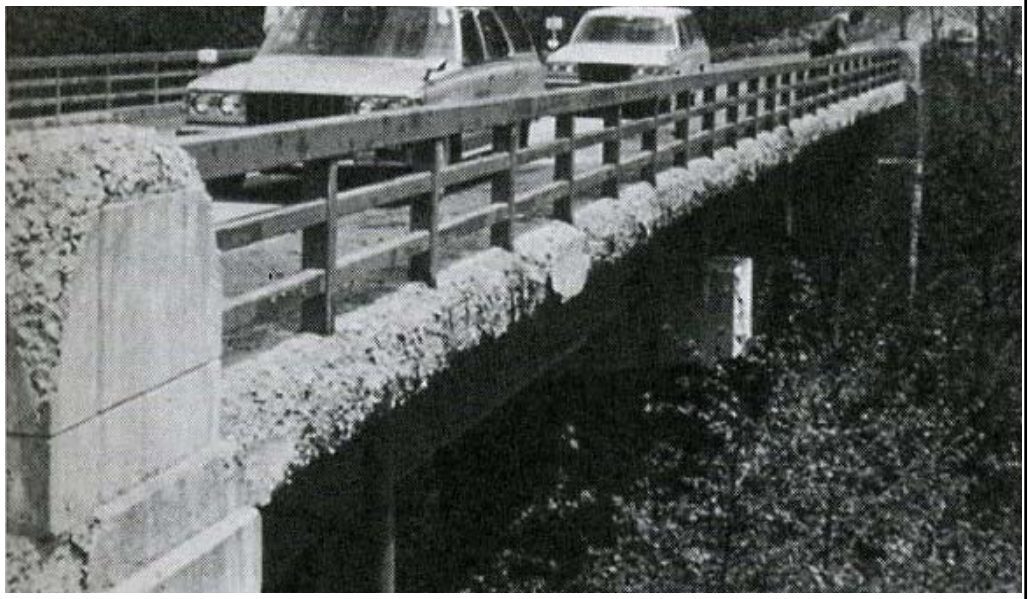
①空気（気泡）をコンクリート中に連行する。

➡ AEコンクリートとする。

→ 3～8%の空気（エントレインドエアー：微細な空気）があれば抵抗性は飛躍的に改善される。

②水セメント比を小さくして、高強度で密実なコンクリートを造る。

③吸水量の小さい、高強度で品質のよい骨材を使用する。



凍結融解でボロボロになったコンクリート橋

・炭酸ガスの影響

コンクリートは水酸化カルシウムの存在により、本来は強いアルカリ性を示す。
しかし、コンクリートが長期間、大気にさらされると、空気中の炭酸ガス（CO_2）の作用を受け、徐々に水酸化カルシウム（$Ca(OH)_2$）が炭酸カルシウム（$CaCO_3$）に変化する。
炭酸カルシウムは中性であり、この過程をコンクリートの中性化と称する。
中性化で何が問題かと言えば、アルカリ性環境では、鉄筋は腐食しないが、中性や酸性の環境では、鉄筋が腐食するのである。

炭酸ガス（CO_2）→ コンクリートの中性化 → コンクリート中の鉄筋の腐食

・中性化に対する対策：

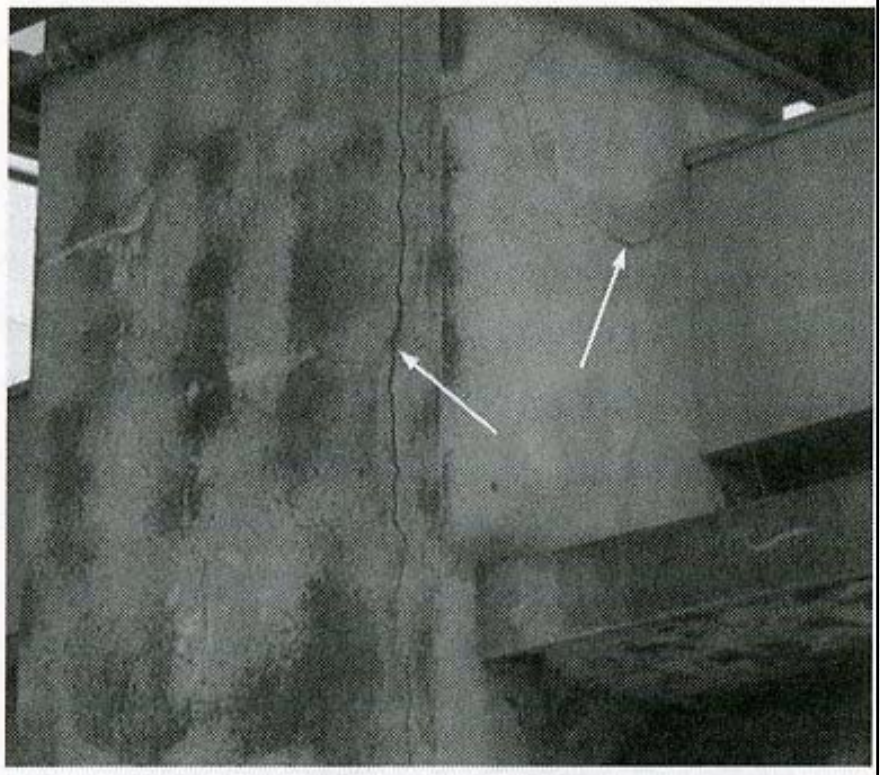
①水セメント比を小さくし、コンクリートを密実にして、炭酸ガスの浸透や拡散に抵抗する。

②フライアッシュや高炉スラグ微粉末の使用

→ フライアッシュは、常温で、水の存在のもと、水酸化カルシウムと反応し、不溶性の化合物を形成する（ポゾラン反応）。これによって長期強度を発現し、中性化に抵抗する。高炉スラグ微粉末は潜在水硬性により、長期強度を発現し、中性化に抵抗する。

コンクリート中の鋼材（鉄筋）の腐食

コンクリートは本来pHが13程度の強アルカリ性。この中に鉄筋が埋め込まれていると、鉄筋の表面には不動態皮膜と呼ばれる酸化皮膜が生じており、錆が発生しない。コンクリートが中性化すると不動態皮膜を防御できなくなり、これが破れて、鉄筋には錆が発生する。鉄筋の錆（酸化鉄）は鉄の体積の2.5倍に膨張するので、コンクリートにひび割れが発生する。



鉄筋の腐食にともなってコンクリートにひび割れが発生した状況

・酸性雨の影響

工場の排ガス中のNO_xやSO_xを含んだ、酸性の強い雨を「酸性雨」と称する。わが国では公害対策が進んできたので、大きな問題はない。しかし、対策が不十分で、このような酸化物を大量に排出する国があり、これがわが国に飛来して酸性雨の影響が深刻になっている。

・硫酸や硝酸等の強い無機酸は、コンクリート中の水酸化カルシウムを溶解し、中性化する。

・また硫酸塩（硫酸ナトリウム、硫酸マグネシウム）等は、コンクリート中のC_3Aと反応して、エトリンガイトを形成する。エトリンガイト生成時には大きな体積膨張を伴うので、コンクリートが破壊されてしまう。

・酸性雨に対する対策：

①水セメント比の小さい密実なコンクリートを造る。

②フライアッシュ等の添加により長期強度を高める。

③セメント中のC_3Aの含有量を減じた、耐硫酸塩セメントの使用。

(2) 塩害に対する耐久性

・コンクリート中の鉄筋が塩分（塩化物イオンCl^-）によって腐食する問題を総称して、「塩害」という。

・コンクリート中に含まれる塩化物イオン、あるいは環境から供給される塩化物イオンがコンクリート表面を経由して、コンクリート中の鉄筋表面まで到達した結果、鉄筋表面の不動態皮膜が破れる。この箇所に空気中の水と酸素が作用して、鉄筋が腐食する（水酸化第二鉄、$Fe(OH)_3$の形成）。

・腐食した鉄筋は体積膨張し、かぶりコンクリートが剥落し、さらに腐食が加速する。

・たわみやひび割れ幅の増加など、使用性が低下する。

・腐食により鉄筋が破断すると構造物としての、耐力も低下する。

○塩害の発生要因

①内在塩分（コンクリートの使用材料に塩化物イオンが含まれている場合）。

②外来塩分（コンクリートの硬化後に塩化物イオンが侵入してくる場合）。

①内在塩分の例:

海砂の使用にともなう塩化物イオンの侵入。

許容限度を超える海砂の塩化物イオンは、水洗い等により、十分に除塩して使用しなければならない。これは人為的に制御可能。現在では大きな問題とはなっていない。

②外来塩分の例:

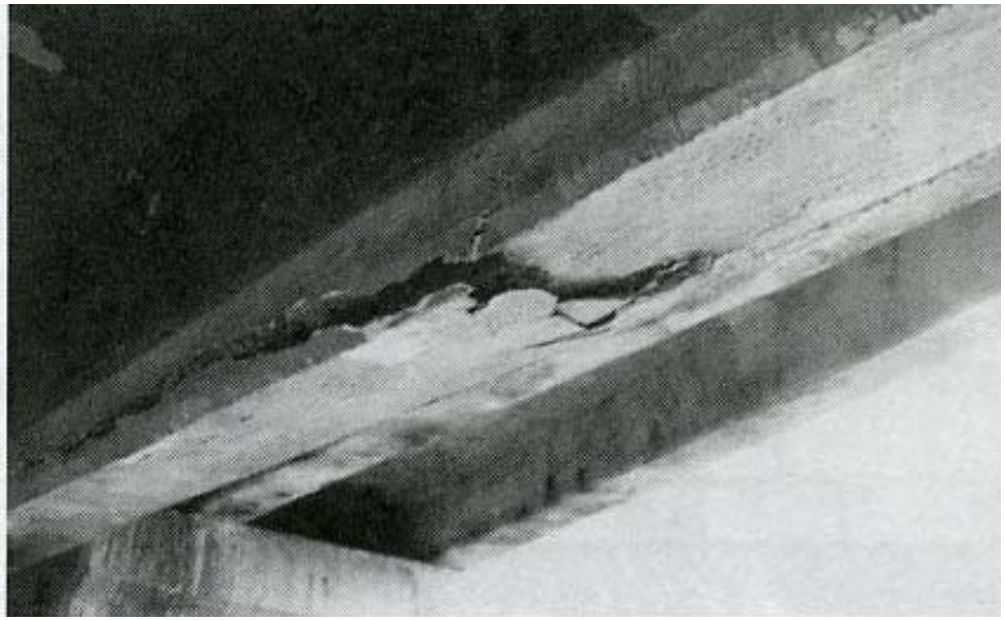
港湾構造物、海岸構造物あるいは海岸付近の構造物では、塩化物イオンが飛来、侵入してくる場合がある。また内陸部では、道路に散布される凍結防止剤に含まれる塩化物イオンが侵入してくる場合がある。

塩害による鉄筋腐食のメカニズム

・鉄筋の腐食自体は、水と酸素の作用により、水酸化第二鉄（$Fe(OH)_3$; 赤錆）が生成されることである。

・しかし、アルカリ環境では、鉄筋には不動態皮膜が存在しており、水酸化第二鉄は生成されない。ところが塩化物イオンが供給されると不動態皮膜が破れてしまう。

・不動態皮膜の破れた箇所に、水と酸素が供給されると、水酸化第二鉄が生成し、腐食が始まる。



塩害によるコンクリート構造物のひび割れ

・塩害への対策

①コンクリートからの対策:　密実で堅硬なコンクリートの施工。

・具体的には、水セメント比を小さくする。単位水量を小さくする（減水剤の使用）。
・AE剤の使用により、単位水量が小さくてもワーカブルなコンクリートとする。
・フライアッシュ、高炉スラグ微粉末の使用により、長期強度を改善する。
・鉄筋のかぶりを確実に確保する。

②鉄筋側の対策

・エポキシ樹脂塗装鉄筋

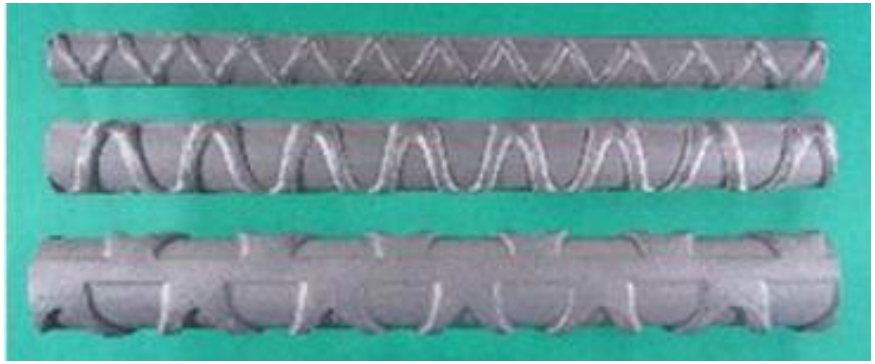
鉄筋の表面にエポキシ樹脂を薄く塗装した鉄筋。効果は強力だが、付着強度が減少するので定着長を長くする。施工時には傷が付かないように注意する。やや高価である。

古宇利大橋（沖縄県）1960m
2004年完成

エポキシ樹脂塗装鉄筋も万全ではない。樹脂は紫外線劣化するので、長期にわたって日光の直射下におくのは不適当。

・ステンレス鉄筋

鉄筋自体を炭素鋼ではなくて、ニッケル、クロム、モリブデンなどを加えた、錆にくいステンレス鋼で製作したもの。耐腐食性は抜群だが、問題はその価格。



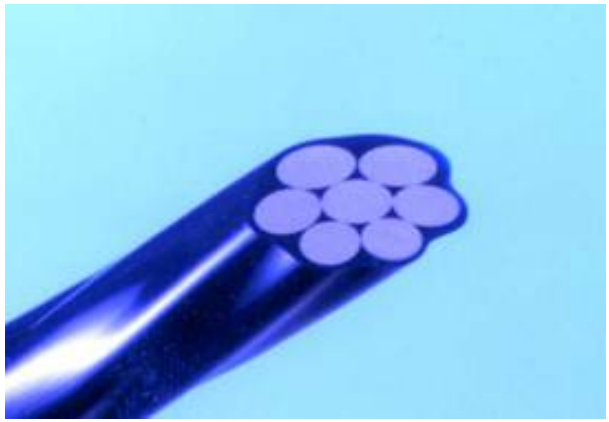
ステンレス鉄筋

香港：ストーンカッターズ橋で大量に使用

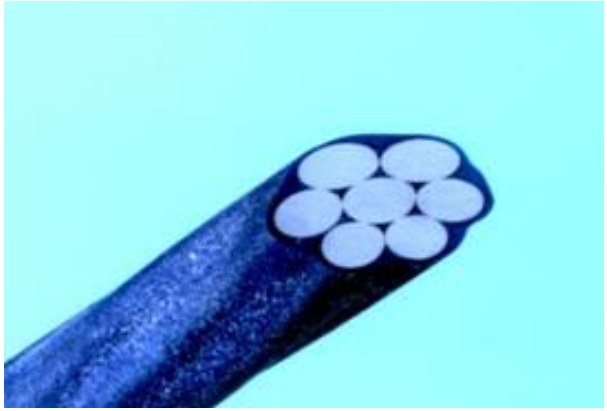
根津神社　神橋　に使用

・エポキシ樹脂被覆PC鋼材（ECFストランド）

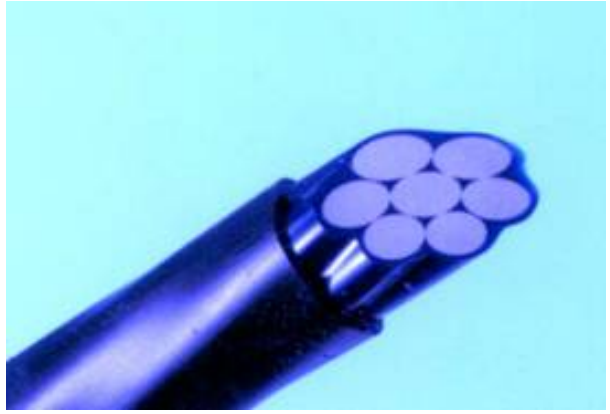
PC鋼材（PC鋼より線）の周囲および線材の隙間にエポキシ樹脂を静電吸着し、高度に防食したもの。



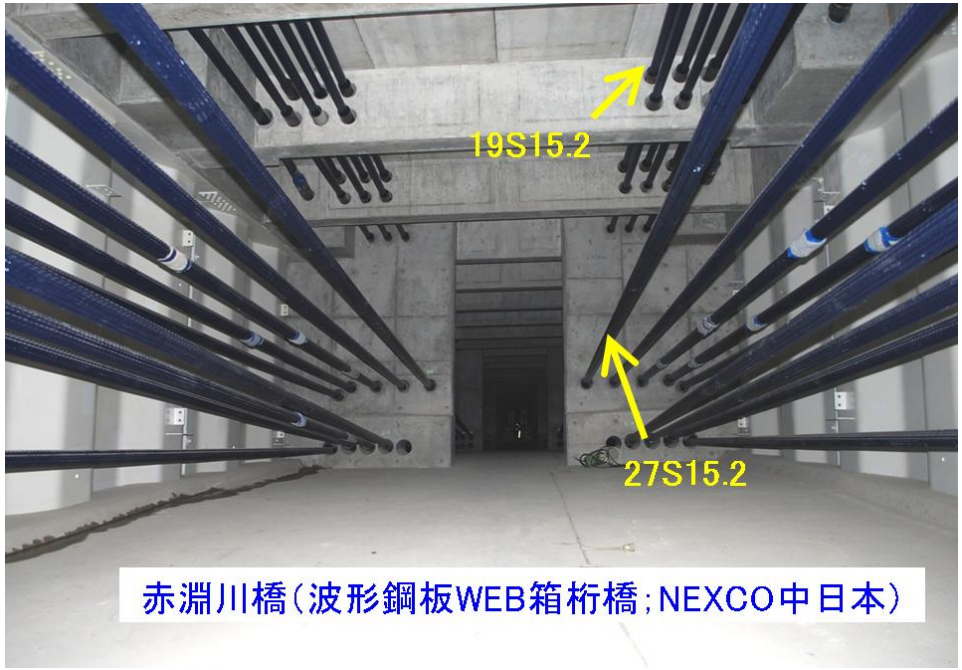
標準型



付着型



PE被覆型



赤淵川橋（波形鋼板WEB箱桁橋；NEXCO中日本）