

第 2 章 長寿命化改修各論

～耐久性向上編～

第2章 長寿命化改修 各論（耐久性向上編） 目次

1. 躯体の老朽化対策

- Q9 鉄筋コンクリートに生じる劣化現象にはどのようなものがありますか？
- Q10 鉄筋コンクリートの劣化対策はどのように行いますか？
- Q11 劣化状況の違いにより補修費用はどのように変わりますか？

2. 外壁・屋上の老朽化対策

- Q12 外壁の劣化とその対策方法について教えてください。
- Q13 屋根材や外壁材で、耐久性の高い材料にはどのようなものがありますか？
- Q14 屋上の防水改修はどのように行えばよいですか？
- Q15 劣化に強い防水材にはどのようなものがありますか？

3. 設備の老朽化対策

- Q16 設備の劣化状況はどのように調査・診断すればよいですか？
- Q17 設備の老朽化対策の具体的な方法を教えてください。
- Q18 設備の維持管理や更新の容易性を確保するにはどうすればよいですか？

Q9：鉄筋コンクリートに生じる劣化現象にはどのようなものがありますか？

A：コンクリートの劣化により発生するひび割れのほか、内部の鉄筋が腐食し膨張することで、コンクリートにひび割れやはく落を生じさせる劣化現象があります。しかし、これらの劣化現象が発生しても、Q10で紹介する適切な対応を講じることにより、鉄筋コンクリートの耐久性の低下を防ぐことが可能です。

【解説】

鉄筋コンクリートに生じる劣化には、①コンクリートの変質・組織崩壊・ひび割れ・欠けなどのコンクリート自身の劣化と、②鉄筋の腐食とに大別できます。

通常、これらの劣化現象は単独で発生しますが、個々の劣化現象は互いに助長し合う関係にあります。例えば、鉄筋がコンクリートの中酸化や塩分の浸入によって腐食すると、コンクリートのひび割れやはく落などの劣化を招きます。また、コンクリートに組織崩壊やひび割れが生じると、鉄筋の腐食が促進されます。

■コンクリートのひび割れ

コンクリートに含まれる水分が、経年により蒸発し、乾燥することでコンクリートは収縮します。しかし、内部の鉄筋や地盤などによって拘束されているため、部材間に引張力が生じますが、これが引張強度を超えるとひび割れ（乾燥収縮ひび割れ）が発生します（写真1）。



写真1 コンクリートの乾燥収縮ひび割れ

ひび割れの発生は、美観的な問題や漏水を引き起こすだけではなく、ひび割れを通じて、酸素、二酸化炭素、水分などのコンクリートや鉄筋を劣化させる物質が浸入しやすくなり、鉄筋コンクリートの耐久性が低下します。

■コンクリートの中酸化と鉄筋の腐食

中酸化は、大気中の二酸化炭素がコンクリート中に侵入していき、セメントが水と反応してできた水酸化カルシウムと反応して炭酸カルシウムとなり、表面部分から、コンクリートをアルカリ性から中性に変えていく現象です。中酸化の進む深さは、時間の平方根に比例することが知られています。

中酸化は、コンクリートの強度には大きな影響を及ぼしませんが、鉄筋周囲のコンクリートが中性になることで、鉄筋の腐食が始まります。鉄筋が腐食すると、その生成物であるさびは元の鉄の体積の2.5倍程度に膨張するため、鉄筋を覆っているコンクリートには、鉄筋に沿ったひび割れやはく落が生じます。ひび割れを放置しておきますと、ひび割れを通じて酸素や水が容易に浸入しやすくなるため、鉄筋の腐食反応は加速度的に進行し、鉄筋コンクリートの耐久性の低下にまで至るようになります。

屋内と屋外とを比較すると、屋内の方が、二酸化炭素濃度が高いため中酸化の進行は速いのですが、鉄筋が腐食するには水分が必要なため、乾燥している屋内の方が鉄筋の腐食の進行は遅いというのが一般的です。

コンクリートの中酸化深さは、鉄筋コンクリートから抜き取ったコンクリートにフェノールフタレインの1%エタノール溶液を吹きかけ、赤紫色（＝

アルカリ性)に発色せず無色(=中性)である部分の表面からの距離を測定することで評価します。(写真2)

■塩害

塩害は、コンクリートの表面に付着した塩分が内部に浸透していき、鉄筋周辺の塩化物イオン(CI)濃度が高まって限界値を超えると、アルカリ性環境下であっても鉄筋の不動態被膜が破壊され、鉄筋に腐食反応が生じる現象です。

鉄筋が腐食し始めた後は、中性化と同様にコンクリートにひび割れやはく落などの損傷を生じさせますが、中性化による場合よりも鉄筋の腐食速度は大きく、鉄筋コンクリートの耐久性をより低下させる劣化現象です(写真3)。

【参考】外部塩害と内部塩害

塩分は、コンクリートの外部からもたらされる場合(外部塩害)とコンクリートの内部に最初から含まれている場合(内部塩害)とがあります。

外部塩害の場合、海岸地域では、海水滴・海水飛まつによって塩分がもたらされ、海岸近接地域では、飛来する海塩粒子によってもたらされます。また、寒冷地域でも、塩化物イオンを含む凍結防止材等の散布によって塩分がコンクリート中にもたらされます。

一方、内部塩害は、コンクリート材料として、水洗いしていない海砂や多量の塩化物イオンを含む促進形の化学混和剤等を使用した場合に生じます。

■凍害

寒冷地域においては、冬季の夜間に気温が低下すると、コンクリート中の水分が空隙内で凍結します。その際に9%の体積膨張を生じますが、それによって未凍結水の移動が生じて、空隙内に水圧が発生します。昼間は凍結した水分が融解し、夜間に再び凍結するというように、凍結融解が繰り返し起きると、コンクリートの組織が破壊され、表層部にスケーリ



写真2 コンクリートの中酸化深さ



写真3 塩害による鉄筋の腐食



写真4 凍害によるはく離・ひび割れ

ング(うろこ状のはく離現象)やひび割れを発生させます(写真4)。このような劣化現象を凍害と呼んでいます。

最低気温が低いほど、年間の凍結回数が多いほど、凍害による劣化は激しく生じます。また、建物の北面よりも凍結融解が繰り返し生じる南面の方が、凍害はより進行しやすい状況にあります。

■アルカリシリカ反応によるひび割れ

コンクリートの骨材中に、 Na^+ や K^+ などのアルカリ金属イオンとの反応性を示すシリカ鉱物が含まれていると、アルカリシリカ反応を生じてゲルを生成し、それがコンクリートに含まれる水分を吸水して膨張し、コンクリートにひび割れやポップアウト¹⁴を生じさせます。鉄筋のない場合や鉄筋量の少ない場合には、方向性のない亀甲状のひび割れとなります（写真5）。アルカリ金属イオンは、粘土鉱物を原料とするセメントや化学混和剤に含まれており、また、海からの飛来塩分によってももたらされます。



写真5 アルカリシリカ反応によるひび割れ

¹⁴ コンクリートの表面部分に存在する反応性骨材が膨張して、コンクリート表面が部分的に飛び出すように剥がれる現象

Q10：鉄筋コンクリートの劣化対策はどのように行いますか？

A：鉄筋コンクリートに劣化が生じた場合には、劣化の種類・原因・程度に応じた適切な補修工事を実施する必要があります。コンクリートにひび割れが生じている場合、鉄筋が腐食している場合などにより対策は様々ですが、劣化の原因となる物質を取り除くとともに、塗膜での被覆等により以後の原因物質の浸入を防ぎます。

【解説】

■劣化が生じた鉄筋コンクリートへの処置

Q9で述べたような劣化現象が生じてしまった鉄筋コンクリートは、劣化原因物質を取り除くとともに、以後、劣化原因物質がコンクリート中に浸入しないような補修・改修を施す必要があります。以下、劣化現象ごとに、具体的な補修・改修方法について説明します。

(1) ひび割れ対策

コンクリートに発生した乾燥収縮ひび割れは、劣化原因物質の通り道となります。特に、ひび割れ幅が0.3mm以上あると、劣化原因物質がコンクリートの内部まで容易に浸入しやすいので、ひび割れ部にエポキシ樹脂を注入して塞いだり（図1）、コンクリートの表面全体を樹脂製の塗膜で覆ったりする必要があります（図2）。温度変化によって、ひび割れ幅が変動する状況下では、ひび割れに沿ってコンクリートの一部を削り取り、ポリマーセメントモルタルなどで埋め戻す工法（図3）が採用されます。

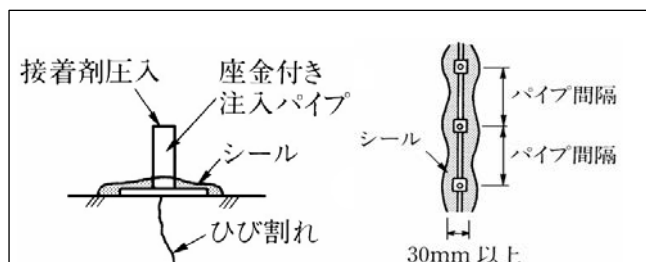


図1 ひび割れへのエポキシ樹脂の注入

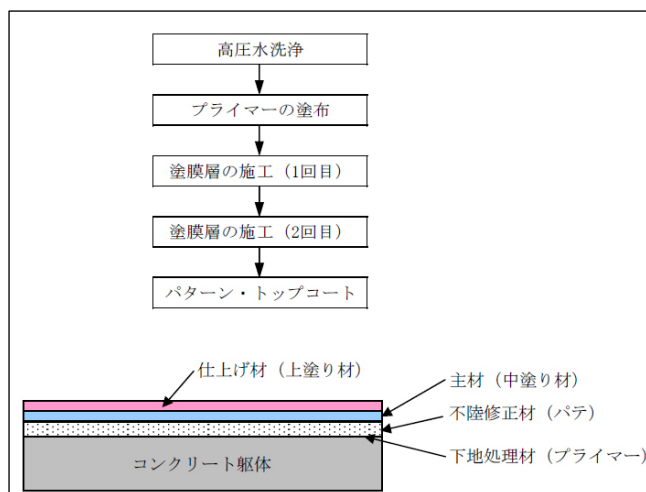


図2 樹脂製塗膜によるコンクリート表面の被覆

(2) 中性化対策

通常、中性化自体は、コンクリートにとって有害な訳ではありません。鉄筋周辺のコンクリートが中性化しても、酸素と水分が存在していなければ、鉄筋が腐食することはありません。したがって、屋内であれば、コンクリートが中性化しているからといって、緊急に補修する必要はないのですが、例えば屋外に位置する鉄筋コンクリートの場合には、雨水がコンクリート中に浸透してくるので、鉄筋は容易に腐食します。以下では、条件や劣化状況等に応じた4つの対策方法を紹介します。

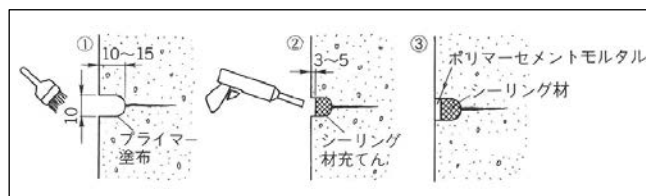


図3 ひび割れ部のカット及び埋戻し

○樹脂製塗膜やタイル仕上げなどの防水対策

屋外に位置する鉄筋コンクリートでは、雨水が中性化したコンクリート中に浸入することによる鉄筋の腐食を防止するために、コンクリートの表面に樹脂製の塗膜¹⁵やタイル仕上げを施すなどの防水対策が必要となります。樹脂製の塗膜やタイルは、水分の浸透だけでなく、二酸化炭素や酸素の浸入をも防ぐことができるため、中性化の進行と鉄筋の腐食の両方を防止することができます。

ただし、樹脂製の塗膜は、太陽光線（紫外線と熱）の影響を受けて徐々に劣化し、二酸化炭素が通過するようになっていきます。タイルも、気温や湿度の変化によってコンクリートから離れてしまうことがあります。その場合にはコンクリートの表面から二酸化炭素が浸入するようになってしまいます。したがって、定期的に、塗膜は塗り直し、タイルは浮きが生じていないことを確認する必要があります。

○中性化抑制剤やアルカリ性付与剤の塗布

中性化深さが鉄筋位置まで到達していない場合には、薬剤塗布による対策が有効です。

コンクリート表面にアルカリ性付与剤を塗布して浸透させ、中性部分をアルカリ性に回復させた後、中性化抑制剤を塗布します。

コンクリートの表面に中性化抑制剤を塗布して含浸させると、コンクリート中の物質と反応した生成物が空隙を埋め、表層部を緻密化して、二酸化炭素などの物質が中に入らないようにします。

このような薬剤の塗布と、上で述べた樹脂製の塗膜やタイル仕上げ等のコンクリート表面の被覆とを併せて行うことにより、より効果的に中性化の進行を抑制することができます。

¹⁵ 打放しコンクリート面に樹脂製の塗膜を施すと校舎の印象がガラリと変わってしまう。打放し仕上げを継続したい場合、費用は高くなるが、図4の再アルカリ化工法により、コンクリートを中性の状態からアルカリ性の状態へと回復させる必要がある。

○再アルカリ化工法（図4）

鉄筋の腐食が軽度で、コンクリートにひび割れが生じていない場合には、費用は高くなりますが、コンクリートを中性の状態からアルカリ性の状態へと回復させる再アルカリ化工法が有効です。

○断面修復工法（図5）

中性化によって鉄筋の腐食が進行し、コンクリートにひび割れを生じさせる状態にまでなっている場合には、鉄筋位置までのコンクリートを除去した後、鉄筋からさびを除去して防さび処理を施し、ポリマーセメントモルタルで埋め戻すといった補修を施す必要があります。具体的には、以下のような一連の補修工事（断面修復工法）となります。

- ①鉄筋の裏側まで、劣化したり腐食原因物質を含んだりしているコンクリートを除去して鉄筋を露出させ、さびをブラシなどで除去
- ②鉄筋の腐食状態や腐食原因によっては、新たな鉄筋を追加したり、既存の鉄筋に防さび処理を施したりするなどの処置を施す
- ③ポリマーセメントモルタル等で断面を修復

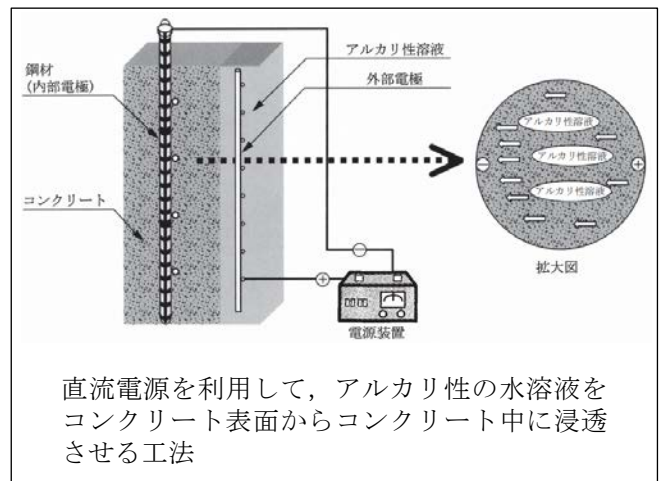


図4 再アルカリ化工法

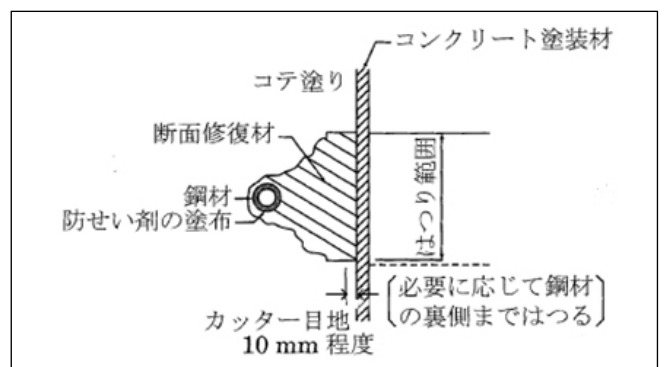


図5 断面修復工法

(3) 塩害対策

塩害については、海岸近くに建っている鉄筋コンクリート校舎が特に問題となります。

塩害による鉄筋の腐食がまだ生じていない場合には、中性化と同様に、コンクリート表面に樹脂製塗膜を施すなどして、それ以降、コンクリート表面から塩分が浸入しないようにする必要があります。

一方、既に鉄筋の周辺に高濃度の塩分が存在しており、鉄筋が腐食してしまっている場合（特に、鉄筋の腐食によってコンクリートにひび割れが生じている場合）には、中性化によって鉄筋が腐食している場合と同様に、鉄筋の裏側までのコンクリートを除去して、劣化原因物質である塩分を取り除くとともに、鉄筋からさびを除去して防さび処理を施した後、塩分や水分が浸入しにくいポリマーセメントモルタルで埋め戻す必要があります。

また、鉄筋の腐食が軽度でコンクリートにひび割れが生じていない場合には、劣化原因物質である塩分のみを除去することで、鉄筋コンクリートの延命化を図れるので、費用は高くなりますが、脱塩工法（図6）を適用することも検討に値します。

(4) 凍害対策

凍害を生じた鉄筋コンクリートについては、

- ①ひび割れが生じている場合は、エポキシ樹脂などを注入してひび割れを塞ぎます。
- ②断面欠損が生じている場合は、ポリマーセメントモルタルでの断面修復後、凍害の劣化原因物質である水分の浸透を防止するために、コンクリート表面に樹脂製の塗膜を施したり、コンクリート全体を金属製の板で覆ったりして、コンクリート中への雨水・雪水の浸透を防止する必要があります。

(5) アルカリシリカ反応によるひび割れの対策

アルカリシリカ反応によってコンクリートにひび割れが生じていたとしても、劣化原因物質であるアルカリ金属イオンと反応性シリカ鉱物は、コンクリート中のあらゆる箇所が存在するため、それらを除去する訳にはいきません。

したがって、アルカリシリカ反応を抑制するための薬剤（亜硝酸リチウム水溶液）をコンクリート中に注入（図7）または表面から浸透させ、アルカリシリカゲル中の Na^+ を Li^+ で置換して、吸水膨張を抑制するという工法が現状の最善策です。

さらに、コンクリートの表面に樹脂製の塗膜を施してコンクリート中への水分の供給を遮断することで、アルカリシリカ反応による劣化をよりいっそう抑制できます。

■劣化を未然に抑制・防止する対策

一方、鉄筋コンクリートに生じる様々な劣化現象を未然に抑制・防止して、校舎の物理的耐用年数を長くするには、コンクリートや鉄筋を劣化させる物質がコンクリート中に浸入するのを防ぐというのが基本です。鉄筋コンクリートの劣化現象はほぼ全て、水分が関与する化学反応を伴うため、コンクリートの表面（特に雨水の影響を受ける屋外側）には、水分の浸入を遮断できる仕上材を施すのが効果的です。

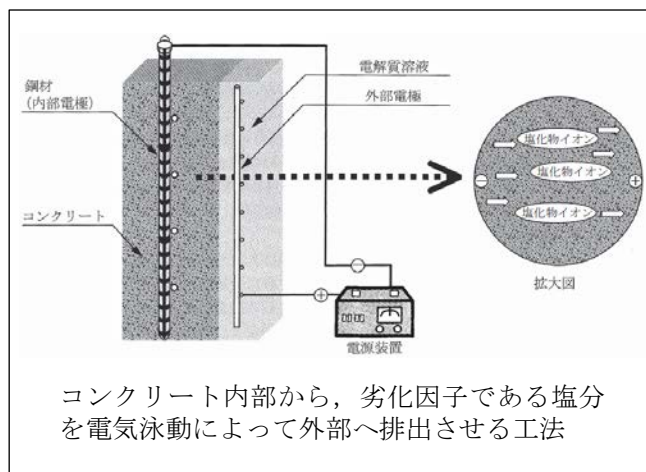


図6 脱塩工法

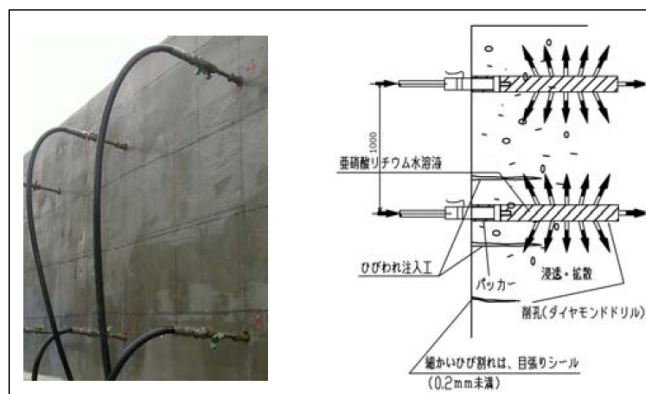


図7 アルカリシリカ反応抑制剤の注入

Q11：劣化状況の違いにより補修費用はどのように変わりますか？

A：劣化が軽度から中度、重度へと進行すると、劣化原因の推定や適切な補修・改修技術の選定のための調査に高度な技術と時間を要します。さらに、高額な技術が必要となり、対象範囲も増大するため、調査・工事費用は大幅に増加します。このため、予防保全型の維持管理を行い、劣化が生じても軽度のうちに補修・改修を行うことが肝要です。

【解説】

鉄筋コンクリートに生じる劣化現象としては、鉄筋の腐食が最も重要です。鉄筋が腐食すると、校舎の美観に影響を与えるひび割れやさび汁¹⁶が生じ、コンクリート・仕上材のはく落は生徒に危害を加えかねない上、更に腐食が進むと耐荷力¹⁷までもが衰えてきます。

特に、中性化による鉄筋の腐食は、日本全国どこにおいても、使用しているコンクリートがどのようなものであっても生じますので、最も一般的な劣化現象といえます。また、乾燥収縮ひび割れも、立地やコンクリートにかかわらず生じる可能性が高い劣化現象です。

■ひび割れを生じた鉄筋コンクリートにおける鉄筋の腐食の進行

乾燥収縮ひび割れを生じた鉄筋コンクリートで、中性化による鉄筋の腐食がどのように進行していくか段階を追って見てみます。

- ①まず、乾燥収縮によるひび割れが、コンクリートの柱やはり、壁、床などを貫通するような形で発生します（図1）。そして、大気中の二酸化炭素はコンクリート表面から浸入し、コンクリートをアルカリ性から中性にゆっくりと変えていきますが、乾燥収縮ひび割れがあると、その部分を通じて、二酸化炭素はコンクリート内部まで容易に浸入するため、ひび割れ周囲のコンクリートは中性化してしまいます（図2）。

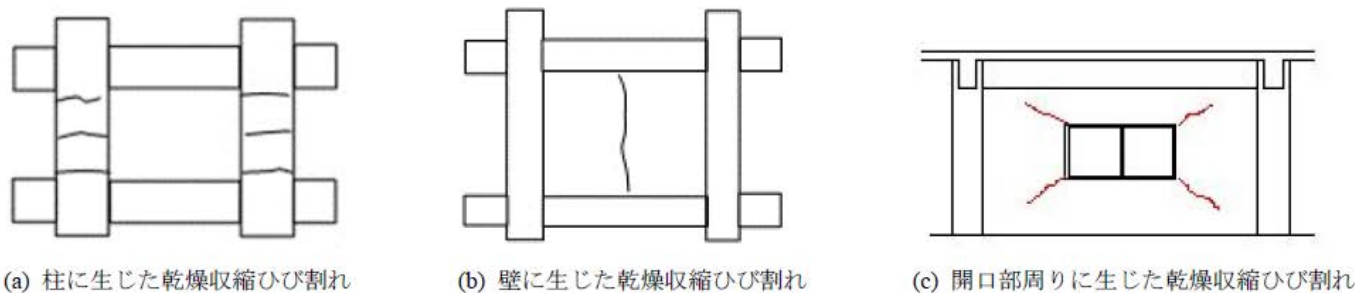


図1 乾燥収縮によるコンクリートのひび割れ



図2 ひび割れ周囲のコンクリートの中性化（赤紫色：アルカリ性，無色：中性）

¹⁶ 鉄筋の腐食によって生じたさびが、雨水などによってひび割れを通して運ばれ、コンクリート表面に固着したもの

¹⁷ 建築物そのもの、人間・家具・設備などの積載物、積雪などによって加えられる垂直方向の力に耐える力

②次に、ひび割れが生じている箇所が存在している鉄筋が最初に腐食し始めます。その後、腐食がある程度進むと、鉄筋を覆っているコンクリートに幅の広いひび割れが生じたり、ひび割れていない箇所でも中性化がコンクリートの内部まで進行し、複数の鉄筋で腐食が生じてしまい、腐食によるひび割れが連結してコンクリートをはく落させたりします。






③こうなると、鉄筋は酸素と水分を含む大気にさらされるため、腐食は加速度的に進行し、耐荷力の低下を来す状態にまでなってしまいます。

劣化の程度は表1のように4段階に大まかに分けられ、それぞれの段階での鉄筋の腐食は、表2のような状態にあります。

表1 鉄筋コンクリートの劣化度（腐食の場合）

劣化度の判定	評価基準	
	外観の劣化症状	鉄筋の腐食状況
健全	めだった劣化症状はない	鉄筋の腐食はグレードⅡ以下
軽度	乾燥収縮等による幅0.3mm未満のひび割れが認められる（腐食ひび割れはない）	腐食グレードⅢの鉄筋がある
中度	鉄筋腐食による幅0.5mm未満のひび割れが認められる（腐食ひび割れはない）	腐食グレードⅣの鉄筋がある
重度	鉄筋腐食による幅0.5mm以上のひび割れ、浮き、鉄筋の露出などがみとめられる	腐食グレードⅤの鉄筋がある、又は、大多数の鉄筋がⅣ

表2 劣化度ごとの鉄筋の腐食状態

腐食度	腐食状態	
I		腐食がなく、黒皮の状態
II		表面にわずかな点さびが生じている
III		表面に薄いさびがひろがっており、コンクリートにさびが付着している
IV		やや厚みのある膨張性のさびが生じているが、断面欠損は比較的少ない
V		鉄筋全体にわたって著しい膨張性のさびが生じており、断面欠損がある

■劣化状況に対応した補修・改修方法の変化

前項のように、劣化を放置したままにしておくと、年月の経過に伴って劣化状況が軽度から中度、重度へと進行し、劣化状況に対応した補修・改修方法も変わってきます（次ページ表3）。

つまり、軽度な劣化状態では、校舎の一部で生じている乾燥収縮ひび割れを覆うか塞げばよかった補修が、校舎の全面に渡って鉄筋が腐食し、腐食によるひび割れが発生しているだけでなく、各所でコンクリートや仕上材がはく落しているといった重度な劣化状態にまでなってしまうと、ひび割れを覆ったり塞いだりするだけでは不十分で、コンクリートをはつりとして、鉄筋の防さび処理を行い、ポリマーセメントモルタルで断面修復を行うといった時間・労力を要する補修が必要になってしまいます。

また、補修・改修しなければならない範囲も、劣化状況が軽度から中度、重度に変化するにつれて、加速度的に増加していきます。このことは、外壁の仕上材や屋上の防水層においても同様です。

次ページ図3は、共同住宅の共用部分を補修・改修する場合に掛かる総費用を住戸数で割った「戸当たり費用」を試算したのですが、学校においても同じであり、劣化状況が重度になりますと、補修・改修にかかる工事費は、急激に増加してしまい、長寿命化改修自体が経済的に成り立たなくなってしまう可能性もあります。

鉄筋コンクリートを長寿命化するためには、劣化そのものが生じないように、予防保全型の維持管理を行っていくのが最も望ましいですが、たとえ劣化が生じてしまったとしても、鉄筋の腐食によるひび割れの発生を発見した段階など、軽度であるうちに、補修・改修工事を実施することが肝要です。

表3 劣化度ごとの補修・改修方法

	軽度	中度	重度
劣化状況	<p>【コンクリート】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・中性化は鉄筋位置まで到達していない。 ・軽微なひび割れが見られる。  <p>ひび割れ</p> <p>中性化は緩やかに進行 (ひび割れ部は早い)</p>	<p>【コンクリート】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・中性化が少数の鉄筋位置まで進行している。 ・一部ひび割れが見られる。 <p>【鉄筋】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ひび割れから鉄筋腐食による錆汁が見られる。  <p>ひび割れ</p> <p>中性化の進行</p>	<p>【コンクリート】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・中性化が半数以上の鉄筋位置まで進行している。 ・(鉄筋腐食による)ひび割れやかぶりコンクリートの剥落が見られる。 <p>【鉄筋】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・鉄筋腐食が進行し、鉄筋の断面欠損が生じている。  <p>ひび割れ</p> <p>中性化が半数以上の鉄筋位置まで進行</p> <p>鉄筋が腐食し、かぶりコンクリートが剥落(かぶり厚が薄い場合)</p>
主な適用技術	<p>【コンクリート】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ひび割れ補修工法(被覆工法、充てん工法) 	<p>【コンクリート】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ひび割れ補修工法(注入工法、充てん工法) ・表面処理工法(表面被覆工法、表面含浸工法)による中性化抑制 <p>【鉄筋腐食箇所】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・断面修復工法(左官工法)による鉄筋腐食補修※ ※周辺コンクリートのはつり、欠損したコンクリートの断面修復を含む 	<p>【コンクリート】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ひび割れ補修工法(注入工法、充てん工法) ・表面処理工法(表面被覆工法、表面含浸工法)による中性化抑制 ・断面修復工法によるコンクリート欠損部の打ち直し ・電気化学的防食工法(再アルカリ化工法) <p>【鉄筋腐食箇所】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・断面修復工法(左官工法、吹き付け工法)による鉄筋腐食補修※ ※周辺コンクリートのはつり、欠損したコンクリートの断面修復を含む
補修範囲等(広さ・深さ)の目安	・部分的	・部分的	・基本的に全面 (部分的な場合もある)

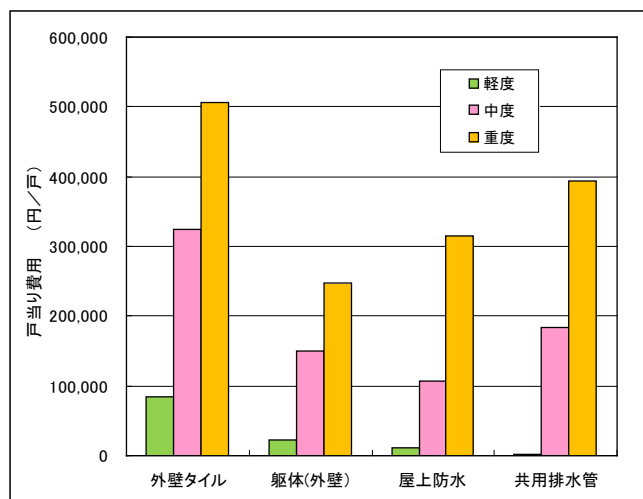


図3 劣化度の違いによる補修・改修の費用の比較