


参考資料- 1 2

詳細調査の方法及び 劣化のメカニズム

1 詳細調査方法

1.1 磁粉探傷試験 (MT)

調査方法	磁粉探傷試験 (MT)
使用器具	磁化機 (ハンドマグナ)、ブラックライト、蛍光磁粉スプレー、発電機、暗幕 等
把握できる内容	部材表面、又は表面付近の亀裂指示模様の検出に有効
亀裂検出性能	亀裂寸法の精度は適正值である
適用範囲	鋼製橋脚隅角部 応力集中が予想される溶接部 等
使用方法	<ul style="list-style-type: none"> • 一般的手法：極間法 1) 洗浄剤を用いて試験面を清掃する。 2) 亀裂に対して直角にハンドマグナ (電磁石) を設置し、磁粉剤 (乾式、湿式) を噴き付ける。 3) 乾式の磁粉剤を用いた場合は試験部に息を吹きかけ余分な磁粉を除去する。 4) 試験面を適度に暗くし、ブラックライトを照射することにより亀裂の指示模様が発現する。
利点	<ul style="list-style-type: none"> • 方法が簡易で亀裂の検出に優れている
問題点	<ul style="list-style-type: none"> • 表面が著しく凸凹している場合は測定が困難 • 内部損傷は測定不能 • 亀裂の深さが測定不能
備考	<div style="text-align: center;">  <p>鋼材表面の微細な亀裂の検出に用いる。</p> <p>蛍光磁粉深傷法による亀裂指示模様検出の例</p> <p>※NDI (非破壊検査技術者) 2種以上塗膜を丁寧に除去し、亀裂発生方向を予測しながら磁粉探傷することがポイント</p> </div>


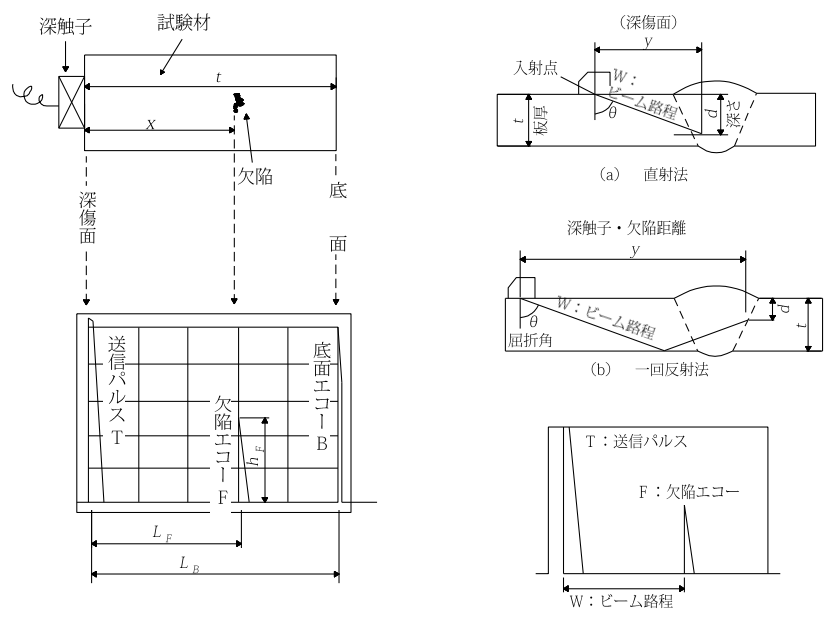
【注意事項】

磁粉探傷試験では、ブローホールやアンダーカット、ビード割れなどの初期欠陥に対しても亀裂指示模様が生じるため注意が必要である。

1.2 浸透探傷試験 (PT)

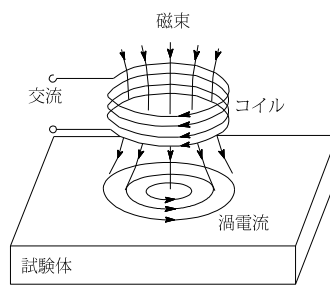
調査方法	浸透探傷試験 (PT)
使用器具	浸透液、洗浄液、現像液、ウェス
把握できる内容	部材表面、又は表面付近の亀裂の検出に有効
亀裂検出性能	亀裂寸法の精度は過小評価となる
適用範囲	鋼製橋脚隅角部 応力集中が予想される溶接部 等
使用方法	<ul style="list-style-type: none"> 作業手順 1) 前処理 洗浄剤を用いて試験面を清掃する。 2) 浸透処理 試験面に浸透液を軽く吹きかけ、浸透するまで放置する。 3) 洗浄処理 乾いたウェスで浸透液を拭い取る。 4) 現像処理 現像剤を試験面に噴き付ける。 5) 観察 欠陥部から浸透液が現像剤皮膜中に吸い出され、指示模様を形成する。
利点	<ul style="list-style-type: none"> 材料を比較的選ばない 写真などによる記録が容易
問題点	<ul style="list-style-type: none"> 表面の亀裂のみ検出 微小な亀裂の検出には不向きである 多孔質材料および表面の粗い材料は不可
備考	<p>The diagram illustrates the five steps of Penetrant Testing (PT) in a cross-sectional view of a material with a crack:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 前処理 (Pre-treatment): A hand uses a brush and a container labeled '洗浄剤' (Detergent) to clean the surface of the material. 2) 浸透処理 (Penetration): A hand uses a brush to apply '浸透液' (Penetrant) into the crack. The liquid fills the defect. 3) 洗浄処理 (Cleaning): A hand uses a cloth to wipe away the excess penetrant from the surface, leaving it inside the crack. 4) 現像処理 (Development): A hand uses a brush to apply '現像剤' (Developer) to the surface. The developer forms a '現像剤皮膜' (Developer film) on the surface, which draws the penetrant out of the crack. 5) 観察 (Observation): The final state shows a '指示模様' (Indication pattern) on the surface, which is the dried penetrant that has been drawn out of the crack.

1.3 超音波探傷試験 (UT)

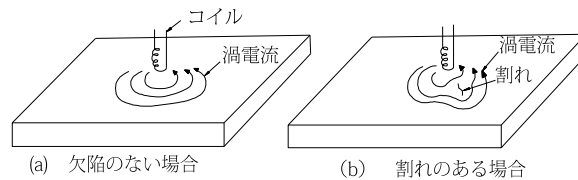
調査方法	超音波探傷試験 (UT)
把握できる内容	部材欠陥、特に亀裂の判別に適する。また、欠陥の位置を判別しやすい
適用範囲	鋼製橋脚隅角部 応力集中が予想される溶接部 等
亀裂検出性能	亀裂寸法の精度は過大評価となる
使用方法	・ 一般的手法：パルス反射法
利点	<ul style="list-style-type: none"> ・ 小さな欠陥は検出しにくい、材料の厚さには制限が少ない ・ 持ち運びが容易 ・ 使用実績が豊富 ・ 経済的である
問題点	<ul style="list-style-type: none"> ・ 記録が保存しにくい ・ 測定に熟練を要する (測定者の技量に左右されやすい) ・ 損傷の形状種類が把握しにくい (欠陥との区別が困難) ・ 塗膜が厚いと精度が悪い
備考	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>斜角深傷法による 超音波探傷検査の例</p> <p>※NDI (非破壊検査技術者) 2種以上 塗膜を丁寧に除去し素地を整える。 溶接の種類や板組状況を熟知した技 術者が検査することが重要。</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>溶接品質の検査に用いる隅 角部溶接内部の溶け込みや 内部欠損の検出に用いる</p> </div> </div> <div style="margin-top: 20px;">  </div>

1.4 渦流探傷試験

鋼材に交流を流したコイルを近づけると、あるいは、交流磁束が鋼材を貫くようにすると、電磁誘導による起電力のために、鋼材に円形電流が誘導される（渦電流という）。鋼材表面にきず（欠陥）があると、渦電流の流れが変わり、磁束が変化してコイルのインピーダンスも変化する。この性質を利用して、コイルの起電力の変化から鋼材の表面の傷が検出できる。但し、渦電流は傷の有無や大きさだけにより変化するのではなく、対象物の形状、材質、コイルの寸法、部材端部のコバによっても変化するもので、これらのノイズの影響を除去する必要がある。参考図 5-1 に渦電流誘導の現象図、参考図 5-2 に試験の基本原則を示す¹⁾。



参考図 5-1 渦流探傷機を用いた渦電流誘導現象の概念図



参考図 5-2 渦流探傷機を用いた渦流探傷試験の基本原則

1) 土木学会：鋼橋における劣化現象と損傷の評価、鋼構造シリーズ7、平成8年

1.5 超音波によるボルト軸力の測定

(1) はじめに

鋼橋では、高力ボルトの軸力を管理することは維持管理の観点から重要であり、従来から種々の検討がなされている。文献²⁾では、軸力測定法として①点検ハンマーによるたたき点検法、②磁気軸力計による測定法、③超音波軸力計による測定法、④電気抵抗線ひずみゲージを用いた測定法、⑤戻しトルク法について調査・検討を行い、通常点検には①の方法が、軸力の確認には④の方法が実用的であると説明している。

現在では、①の方法と並行して機械的な測定方法である⑥トルク（コントロール）法や⑦ナット回転角法が多方面で使用されているが、種々の要因でトルク係数がばらつき、正確な軸力を測定できない場合がある。特に、維持管理において、ボルトが回転し始める時点のトルクから軸力を推定することを試みても、多くの場合、トルク係数のばらつきから測定結果の信頼性は低い。

舟山³⁾は、④の方法を改良して、ゆるみの発生を検出して外部に表示する、ゆるみ検出機能付ボルト（センサーボルト）を開発し、種々の性能評価試験を実施して、その実用化への第一歩を踏み出している。長期のモニタリングが可能であることから連結部等の代表的な箇所にセンサーボルトを取り付け、軸力の経時変化、特にゆるみを追跡調査する上では有効なツールであると考えられるが、鋼橋のように膨大な本数の高力ボルトの軸力を対象とする場合にはその適用が困難である。

三上⁴⁾は、自動ハンマーを用いた高力ボルト自動緩み検知機によって得られた波形データをもとに、ニューラルネットワークが持つパターン認識機能を利用して、高力ボルトの残存軸力または導入軸力の大きさを推定するシステムを構築した。同軸力推定システムの誤差は±5%程度であり、従来の方法と比較して高精度である。しかしながら、実用化・汎用化については、今後の課題であり、その対応が待たれるところである。

一方、超音波によりボルト軸力を測定する方法も幾つか試みられているが、実用化されている方法は、高力ボルトの軸方向の超音波の伝搬時間の変化から軸力を算定するものである。この方法では、ボルトの端面を精密に仕上げ、精密な音速測定を行うなど、初期値を必要とし、装置も比較的大型となり、現場での測定は困難となる⁵⁾。

このような問題点を解決したのが、次項の超音波を用いた新しい測定方法であり⁵⁾、その原理や実際の構造物への適用結果等について以下に述べる。

2) 西村、加藤、神田、山崎、米谷：既設高力ボルトの各種非破壊検査の特質、橋梁と基礎、Vol. 17、No.11、昭和 58 年

3) 舟山、池田、西島：ゆるみ検出機能付ボルトの開発、共和技報、No. 493、平成 11 年

4) 三上、田中、樋渡、山浦：鋼橋の高力ボルトの軸力推定システム、土木学会論文集、No.549/I-37、平成 8 年

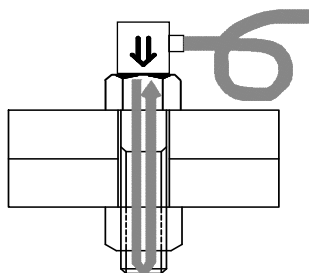
5) 池ヶ谷靖：超音波によるボルト軸力計、検査技術、Vol. 3、No.1、平成 10 年

(2) 測定原理

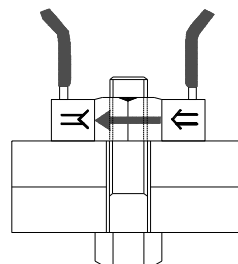
超音波を用いた従来のボルト軸力の測定方法は、参考図 5-3 に示すようにボルトの軸方向の音速の変化及び伝搬時間の変化を測定するものである。この変化は非常に小さいため、ボルトの両端で高い精度の仕上げと、精密な音速測定を必要とし、さらに軸力が 0 となる初期値も必要で、現場での測定は困難であった。超音波による新しい測定方法は、参考図 5-4 に示すようにナット対面での超音波の透過パルスの大きさからボルト軸力を評価する方法である。

この方法では、超音波の経路はボルト軸力が十分な場合（参考図 5-5(a)参照）、ナットとボルトのネジ山を通してナット → ボルトと伝搬するが、軸力が低下すると、ナット対面の最短距離での超音波の送受は減少し、軸力が 0 になると（参考図 5-5(b)参照）、ナット部で超音波が反射や回折で伝搬するだけである。

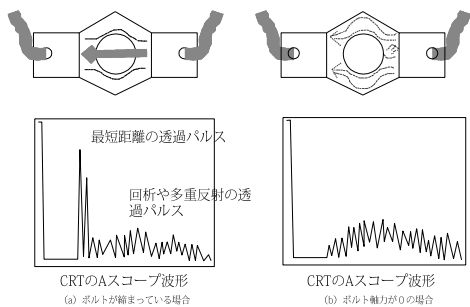
そこで、測定しようとするボルトと同形状・同寸法のボルト・ナットで軸力と、ナット対面の最短距離における超音波の透過パルスの大きさの関係（参考図 5-6）を予め求めておけば、初期値なしでボルトの軸力を推定することができる。



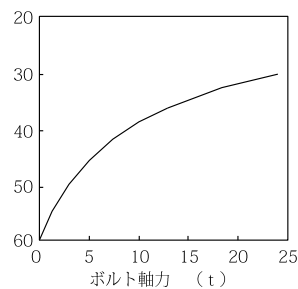
参考図 5-3 従来の測定方法



参考図 5-4 新しい測定方法



参考図 5-5 測定原理



参考図 5-6 ボルト軸力と透過パルスの関係

(3) 計測システムの構成とその特徴

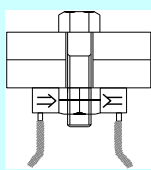
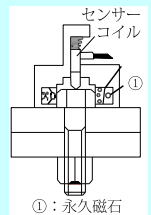
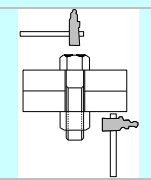
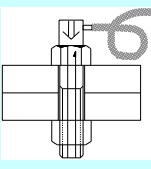
計測システム（超音波ボルト軸力計）の構成を参考写真 5-1 に示す。本体が CPU を内蔵することによって、試験片による感度校正のためのゲイン調整や透過パルスからの軸力換算が自動的になされ、各データが記憶・出力される。専用探触子（センサー）は、ボルトの大きさ毎に製作され、M24 対応のものでは、先端部φ61 mm、ハンドリング部 81 mm、長さ 10 mm、重さ約 1.7 kg である。

使用周波数は 5MHz であり、400 件のデータを記憶することができる。本体はバッテリーを内蔵し、サイズが 90 mm×160 mm×27 mm で重さが約 3 kg と小型・軽量であるので、可搬性に富む。超音波ボルト軸力計の特徴を参考表 5-1 に示す。ここで、比較のためにハンマーによるたたきの点検法、従来の超音波法、『(1) はじめに』では触れなかったが、有力な方法の一つと考えられる複合法（電磁波+超音波）も併記する。



参考写真 5-1 超音波ボルト軸力計の構成

参考表 5-1 超音波ボルト軸力計の特徴と他の方法との比較

方法	原 理	特徴・利点	欠 点
超音波軸力計	 <p>ナットの表面に超音波センサーを取り付け、対抗するナット表面に受信センサーを取り付けて超音波の透過量を想定する。 軸力が大きくなると、ナット対向面の超音波の透過量も増え、小さいと、透過量も少なくなる。</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) ボルトの原寸法の数値不要 2) ボルト両端の仕上げ・初期値設定不要 3) 速い検査速度 (30 秒/箇所) 4) 軽量・小型で作業性良好 5) 塗装・多少の錆→測定可能 6) 軸力直読可能・データ記録 7) パソコンへのデータ転送可 <p><測定精度：軸力±15%></p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) ナット側からのみ検査可能 2) 著しい錆・ごみ・砂等除去 3) ボルト軸力と超音波透過量の校正曲線必要
複 合 法	 <p>①：永久磁石</p> <p>センサー部の永久磁石とコイルによってボルト部に励起された渦電流に軸力線の相互作用でボルトに振動が発生する。渦電流発生機の発信機でこの振動を 10KHz～35KHz に変動させ、ボルトの共振周波数を求める。軸力と共振周波数が比例関係にあることから評価する。</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) 塗装・多少の錆→測定可能 2) ボルト原寸法の数値不要 3) ボルトの両端の仕上げ不要 4) データ記録 	<p>測定精度 ↓</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 軸力 10t 未満 or 以上の判別 2) 軸力 10t 以上では共振周波数の変化微小 3) 塗装条件により除去不要 4) ボルトを挟む鋼板の板厚の影響大 5) 装置比較的大→AC 電源不要
たたき点検	 <p>点検ハンマーでボルト・ナットを叩き、音響の差で検出する。</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) 簡便・最も早い検査方法 	<ol style="list-style-type: none"> 1) 信頼性→問題 2) データ記録不可 3) 軸力数 t 以下のみ判別 <p>↑ 測定精度</p>
超音波法	 <p>軸力導入によりボルトの軸力方向変化量(軸方向の長さの変化、縦波と横波の音速比の変化等)を超音波で捉える。</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) ボルト頭・底部からの検査可能 2) 亀裂の検出可能 	<ol style="list-style-type: none"> 1) ボルト原寸法(初期値)必要 2) ボルト頭・底部仕上げ必要 3) ボルト材質・温度の影響大 4) 検査速度→遅い <p><測定速度></p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 不明→なし 2) 未実施→なし

1.6 基盤目・クロスカットテープ付着試験

現場で塗膜の付着性能を診断する手法として、トルク付着試験法や引張付着試験法があるが、一般に粘着テープとカッターナイフで簡単に塗膜の付着性能を評価できる基盤目・クロスカットテープ付着試験が広く利用されている。

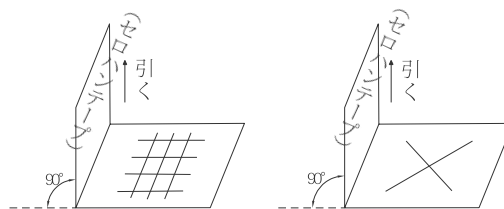
基盤目状もしくはクロスカットに素地に達する傷をいれた塗膜を、セロハンテープの粘着力を用いて強制剥離することにより、塗膜の素地への付着性および塗膜の層間付着性を評価する。

(1) 使用器具および材料

- 1) カッターナイフ (JIS K 5400 塗料一般試験方法)
- 2) セロハン粘着テープ [24 mm] (JIS Z 1522)
- 3) 切り込み用ガイド (JIS K 5400 8.5.1) (2 mmと 5 mm間隔)

(2) 測定方法

- 1) 切り込み用ガイドを用いて素地に達する切り込みを縦横おのおの 6 本 (2 mm間隔) 又は 4 本 (5 mm間隔) ずつ入れる。
- 2) 切り込み部にセロハンテープを貼り丸みのある棒などでこすり、テープを十分に貼り付ける。
- 3) テープの一端を参考図 5-7 に示すように、90° 程度の角度で勢いよく引きはがす。
- 4) 『2) →3) 』の操作を再度繰り返し評価基準と照合する。
- 5) 基盤目カットに不都合が生じる場合は、60° クロスカットを行う。カットの要領及びテープの貼り付け、引き剥がしは基盤目と同じように行う。



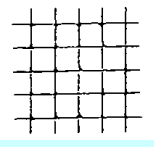
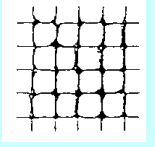
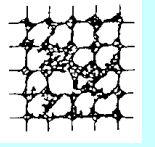
参考図 5-7 テープ付着試験⁶⁾

6) (社)日本鋼構造協会「鋼橋塗膜調査マニュアル JSS IV-03」1993 年

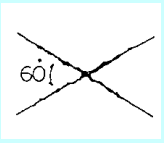
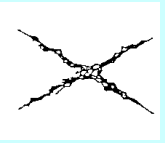
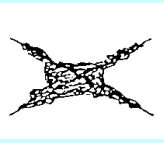
基盤目の幅は、塗膜厚、塗膜の劣化度、および第1層目の塗料に対応して2又は5mm間隔の選択をする。

評価基準⁶⁾は参考図5-8～参考図5-9に示す剥離状態と評価基準、評価点に従う。

この試験法によって得たデータは、塗膜の付着性（劣化度）を判定する上に大変重要な情報をもたらす場合が多いので、測定結果の記録には詳細にわたって剥離の状態を記載することが望ましい。

剥離状態				剥離 50%以上
評価点 (RN)	3	2	1	0

参考図 5-8 基盤目試験評価点⁶⁾

剥離状態				評価点 1以上の 剥離
評価点 (RN)	3	2	1	0

参考図 5-9 クロスカット試験評価点⁶⁾

1.7 引張付着試験（アドヒージョンテスト）

塗膜の付着力を測定するため、垂直引張力のみによる付着性を評価する。塗膜の付着性能を具体的な数字（例えば MPa）で示すことができるので、詳細観察を行うときに用いられることが多い。

端子を塗膜面に接着剤で接着し、垂直引張力のみによる引張試験を行い、塗膜を剥離させることにより、塗膜の付着力を求める。塗膜と素地および塗膜の層間の最も弱い箇所を剥離させることになる。

(1) 使用器具および材料

- 1) アドヒージョンテスタ（エルコメータ社製）
- 2) 接着剤（エポキシ樹脂系を主とする）
- 3) サンドペーパー（#240 程度）
- 4) カッターナイフ

(2) 測定方法

- 1) 測定位置の塗膜表面をウエスなどで清掃した後、サンドペーパーで軽く研磨して清浄な状態にする。
- 2) 接着剤を端子（ドーリー）に少し過剰に塗り、塗膜表面に端子を押しつけ過剰な接着剤を端子表面から押し出す程度に、塗膜表面に貼り付ける。
- 3) 接着剤が固化した後、端子周辺に沿って、塗膜をカッターなどで素地に達するまで傷を入れる。
- 4) アドヒージョンテスタで端子を引き剥がし、そのときの強度を読む。剥離した層とその比率を記録する。

引張試験の値はばらつくことが多いので最低 3 個のサンプルをとり、その 3 つの平均値を記録する。塗膜引張付着力と評価点の関係⁷⁾を参考表 5-2 に示す。

参考表 5-2 引張付着力の評価基準の一例⁷⁾

(1MPa ≒ 10 kg f/cm²)

評価点 (RN)	引張付着力 (MPa)
3	2.0 ≤ X
2	1.0 ≤ X < 2.0
1	0.0 < X < 1.0
0	X = 0

塗膜の付離を評価する場合、実際の塗膜層間剥離に対する問題などよりも、学術的な塗膜の付着力を評価することや塗膜の耐久性を評価する場合に用いられることが多い。

7) (社)日本鋼構造協会「鋼橋塗膜調査マニュアル JSS IV-03」1993 年

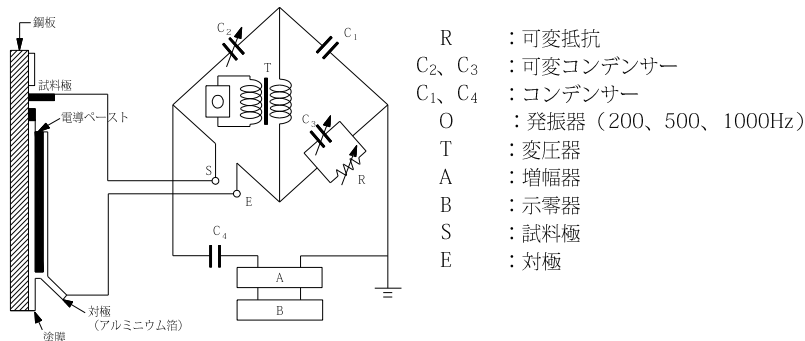
1.8 インピーダンス測定

塗膜の劣化度を定量的に評価する一項目として、インピーダンス測定を行う。

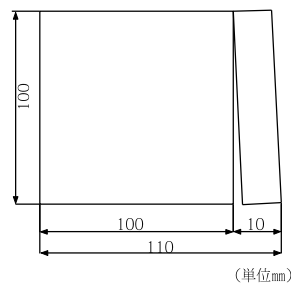
ポータブル形インピーダンスブリッジを用いた測定器により、各周波数（通常、0.2、0.5、1.0kHz）における交流抵抗値と電気容量値を測定し、各周波数に対する抵抗値と電気容量値の変化もしくは抵抗値の経時変化から、塗膜劣化度を評価する。

(1) 使用器具および材料

- 1) 参考図 5-10 に示す回路を持つ測定器⁸⁾。
- 2) 電導ペースト：3%塩化ナトリウム水溶液に 3~5%の増粘剤〔カルボキシメチルセルロースナトリウム塩（CMC）を加えて、のり状にしたもの〕
- 3) 対極：厚さ 15 μ m 程度のアリミニウム箔を参考図 5-11⁸⁾に示す寸法に裁断したものを用いる。
- 4) 洗浄水：塗膜インピーダンス測定後に、塗膜面に付着した電導ペーストを洗い落とす（水道水、河川水で良い）。
- 5) スポンジまたはウエス：電導ペーストの水洗用に使用するもので、塗膜面を損傷しない柔らかい材質のもの。
- 6) 塗料：試料対極点として塗膜剥離した箇所の補修塗りに適した品種のもの。



参考図 5-10 インピーダンス測定回路



参考図 5-11 アルミニウム箔の形状と寸法⁸⁾

8) (社)日本鋼構造協会「鋼橋塗膜調査マニュアル JSS IV-03」1993年

(2) 測定方法

- 1) 塗膜面上に汚れ、損傷、水分等がないことを確かめてから、アルミニウム箔と塗膜界面に空気を巻き込まないように注意しながら、電導ペーストを塗布したアルミニウム箔を塗膜面に貼る。
- 2) 測定は、〔素地金属面／塗膜／電導ペースト／対極（アルミニウム箔）〕で構成される回路の内部インピーダンスを測定するので、試料対極点は十分鋼材面を露出させた面とし、対極の接点はアルミニウム箔の端部とする。
- 3) 電導ペーストを貼付けて 60 分以上経過してから、インピーダンス測定器を用いて、周波数 0.2、0.5、1.0kHz における低抗成分と容量成分を測定する。

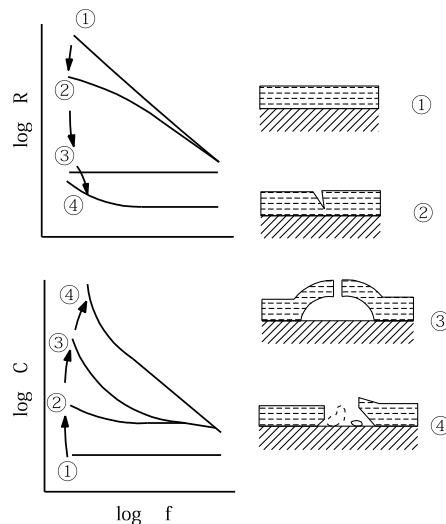
インピーダンスは、塗膜劣化が進行するとともに抵抗成分は減少し、容量成分は増加する。この変化の起こる時期を劣化開始時期とすることができる。

塗装鋼材のインピーダンスには、塗膜のインピーダンスと鉄素地面のインピーダンスが含まれる。塗膜の劣化により、塗膜下に水分が進入し、水が素地の鉄鋼面と直接接触場所を生じると、鉄鋼面と水溶液の界面電気二重層の容量が測定値に寄与するようになり、容量成分の測定値が急激に増加する。

一般に周波数特性は塗膜劣化の進行とともに、参考図 5-12 に示す様な経過をたどって変化する⁸⁾。

測定箇所は、肉眼で見られるような、錆、膨れ、割れ、剥れなどのような異常発生箇所を避けた部分を選定する。

実際の調査では抵抗成分と容量成分の測定値によって塗膜の劣化を定量的に判定する。但し、劣化は部位の種類や方向などによって差があり、測定点がかならずしも測定対象を代表しているとはいえないため、あくまでも参考値程度にとどめておくのが良い。



参考図 5-12 塗膜劣化状態と R・C 成分の周波数特性

1.9 反発度法（シュミットハンマー法）

(1) 機種を選定

シュミットハンマーの種類には、参考表 5-3 に示すように衝撃エネルギーの異なる N 型、L 型、P 型、M 型があり、この中、補修工事には直読式の N 型と自動記録式の NR 型が用いられる。両者の外観を参考写真 5-2～参考写真 5-3 に示す。

参考表 5-3 シュミットハンマーの種類と特徴

機種	適用コンクリート	衝撃エネルギー (kgf・cm)	強度測定範囲 (kgf/cm ²)	備考
ON 型	普通コンクリート	0.225	150 ～ 600	反発度直読式
ONR 型	〃	〃	〃	反発度自動記録式
L 型	軽量コンクリート	0.075	100 ～ 600	反発度直読式
LR 型	〃	〃	〃	反発度自動記録式
P 型	低強度コンクリート	0.09	50 ～ 150	振り子式
M 型	マスコンクリート	3.00	600 ～ 1000	反発度直読式



参考写真 5-2 N 型（普通コンクリート用）

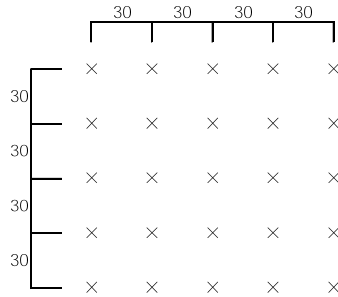


参考写真 5-3 NR 型（普通コンクリート用）

(2) 測定方法

1) 打撃点の選定

各測定箇所ごとの打撃点の点数は20点を標準とする。打撃点(×印)相互の間隔は3cmを標準として12cm×12cmの正方形または直径12cmの円内に収まるようにする(参考図5-13参照)。



参考図 5-13 打撃点 (測定点)

2) 打撃方向

打撃は常に測定面に直角に行う。仮に、測定面が直角でない場合には、参考表 5-4 に基づき、測定値 R を補正する(ここに、補正量 ΔR)。

参考表 5-4 打撃角 α と補正量 ΔR の関係

R_0 \ α	+90°	45°	-45°	-90°	備 考
10	-	-	+2.4	+3.2	<p>角度の符号+は上向きを -は下向きを表わす</p>
20	-5.4	-3.5	+2.5	+3.4	
30	-4.7	-3.1	+2.3	+3.1	
40	-3.9	-2.6	+2.0	+2.7	
50	-3.1	-2.1	+1.5	+2.2	
60	-2.3	-1.6	+1.3	+1.7	

[注] 補正は下式による

$$R = R_0 + \Delta R$$

R: 補正した値、 R_0 : 測定値、 ΔR : 補正值

3) 測定値の処置

くぼみ等で異常と認められた時の値、あるいは測定部位の値で打撃値の平均値の±20%以上となった時は、異常値として処理し追加測定して20点まで補充する。

4) 強度の推定

シュミットハンマーの反発度 R を用いた強度 F_c の推定式は多数あり、打撃方法やコンクリートの材令による補正の方法も示されている。しかし、推定式にはバラツキがあり一つの式にまとめるまでに至っていない。2、3例を示すと次の通りである。

材料学会推定式 ⁹⁾	$F_c = 13. R - 184$	式(1)
-----------------------	---------------------	------

建築学会回帰式 ¹⁰⁾	$F_c = 7.3R + 100$	式(2)
------------------------	--------------------	------

(実験データ回帰式)	$F_c = 5.4R + 14$	
------------	-------------------	--

従って、圧縮強度 F_c を正確に知るためには、実コンクリート構造体の一部をコア抜きして圧縮試験を行い、シュミットハンマーによる値を補正する必要がある。なお、土木学会¹¹⁾では、材料学会の式(1)を推奨している。

9) 土木部会：硬化コンクリートのテストハンマー強度の試験方法（案）、コンクリート標準仕方書、基準編、平成8年

10) 日本材料学会：シュミットハンマー法による実施コンクリートの圧縮強度判定方法、昭和33年

11) 日本建築学会：コンクリート強度の推定のための非破壊検査方法マニュアル、昭和58年

2 劣化のメカニズム

2.1 乾燥収縮・温度変化

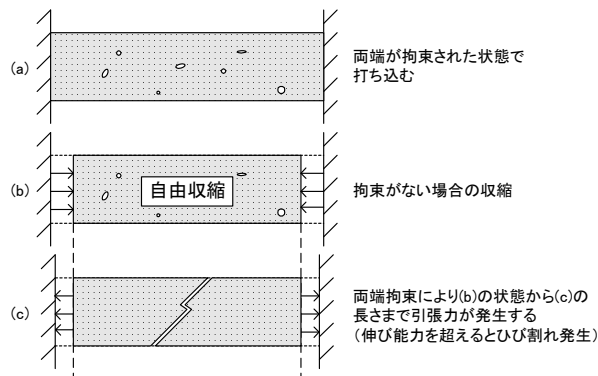
(1) 概要

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。



参考図 5-14 外部拘束によるひびわれ発生概念図

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。

2.2 中性化

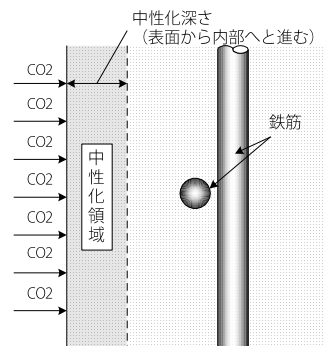
(1) 概要

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。



参考図 5-15 中性化進行イメージ

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。

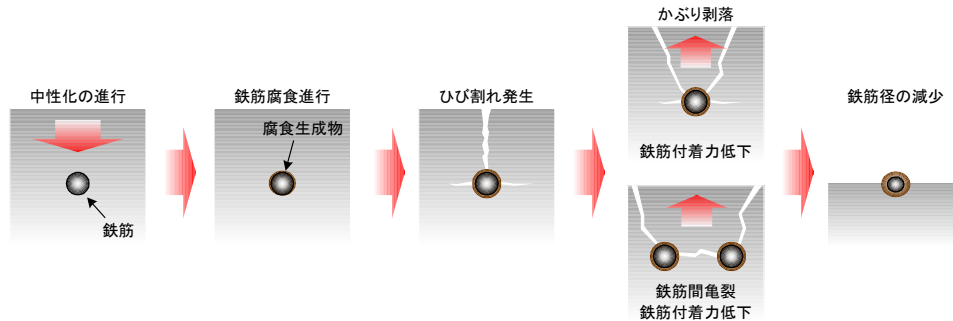
参考表 5-5 中性化残り と鉄筋腐食の可能性の評価

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。



参考図 5-16 劣化の進行過程



参考図 5-17 中性化による損傷例 (壁高欄)

(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。

2.3 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性や使用性、美観などが低下する劣化する劣化現象である。

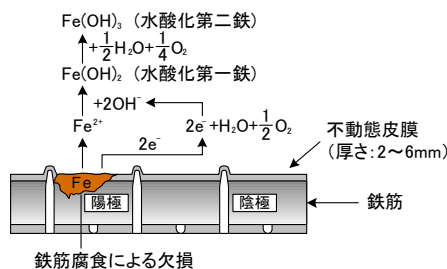
(2) 劣化のメカニズム

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

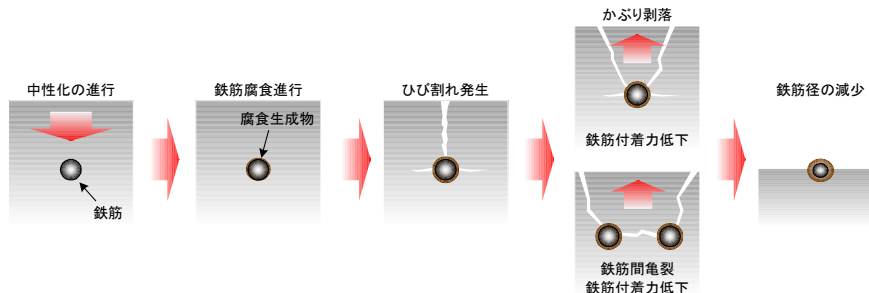
塩化物イオンがコンクリート中に侵入し、ある一定量を超えると鉄筋を腐食させる。鋼材が腐食すると体積が2~4倍に膨張するため、コンクリートに膨張圧が生じる。この膨張圧による引張応力が、コンクリートの引張強度を超えると、かぶり部分にひび割れが発生する。



参考図 5-18 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、鉄筋断面積が減少しているため、部材としての耐力が低下する。



参考図 5-19 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。

2.4 アルカリ骨材反応（ASR）

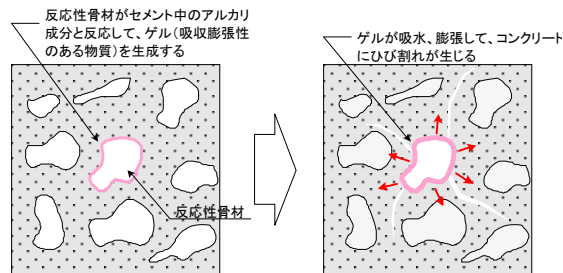
(1) 概要

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

- 1) アルカリシリカ反応が生じるためには、適当量のアルカリと、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。
- 2) アルカリシリカ反応に関係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。
- 3) セメントから Na_2SO_4 や K_2SO_4 の硫酸塩の形で供給されるもの。
- 4) 海産骨材（海砂など）に付着している NaCl や KCl として供給されるもの。
- 5) 骨材に含有されるアルカリゼオライトなどの Na^+ がセメント中の Ca^{2+} とイオン交換して供給されるもの。
- 6) 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。
- 7) 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 SiO_2 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。



参考図 5-20 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。

2.5 腐食

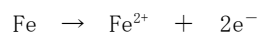
(1) 概要

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_2O ）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、アルミニウムなどは異なり鋼材の酸化膜はあく、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。

2.6 亀裂

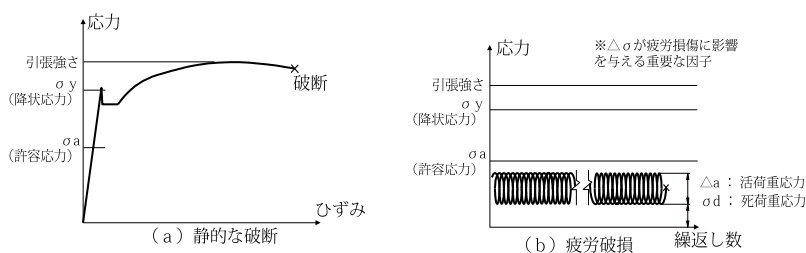
(1) 概要

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。



参考図 5-21 疲労損傷の種類

(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り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。このような繰り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。

疲労損傷の主な因子を参考表 5-6 示す。

参考表 5-6 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
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。

2.7 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。

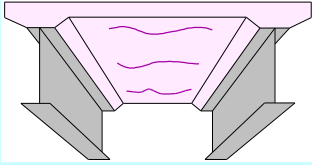
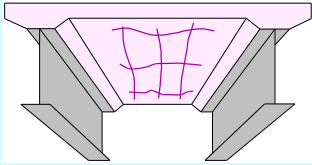
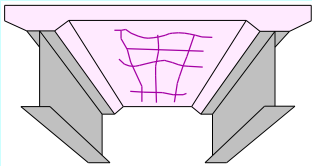
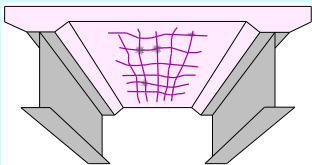
(3) 劣化に対する対応策

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。

2.8 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

参考表 5-7 床版ひび割れの考え方

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、並列梁構造になる個所もある</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] 輪荷重により、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>