

シールドトンネルの RC セグメントの鉄筋腐食による 保有性能の低下の予測に関する提案

Study proposal on prediction method that actual performance degradation of RC segment of shield tunnel caused by the reinforcement corrosion

木谷 理志¹, 木村 定雄²
Takashi KITANI¹, Sadao KIMURA²

¹ 金沢工業大学大学院 工学研究科 環境土木工学専攻 (〒924-0838 石川県白山市八束穂 3-1)

E-mail: t.kitani@venus.kanazawa-it.ac.jp

² 金沢工業大学環境・建築学部教授 地域防災環境科学研究所 (〒924-0838 石川県白山市八束穂 3-1)

E-mail:s.kimura@neptune.kanazawa-it.ac.jp

Abstract

When conducting asset management on the premise of existing tunnels to prolong their service life, it is required to clarify performance-based criteria for tunnel structures and it is need to be developed a method to predict a change over time of actual performance. Concept of performance requirements represents performance requirements for shield tunnel by Japan Society for Civil Engineering. We focused on structural user safety and stability out of performance requirements for shield tunnel and developed a method to predict a change over time of actual performance. The simplified evaluation method that predicts the exfoliation on the standardization of visual inspection, crack density, corrosion product was proposed for user safety. The method of the possibility of predicting decreased flexural strength and flexural rigidity was estimated from reinforced corrosion level was proposed for structural stability.

Key Word; Tunnel, exfoliation, asset management, performance criteria, degradation prediction

1. はじめに

日本では、1960年代からの高度成長時代にあわせて急速に社会資本となるインフラストラクチャーが建設された。現在では多くの構造物が50年以上の使用状態にあり、地下鉄などの地下構造物も例外ではない。近年では、地下鉄トンネルの鉄筋腐食による劣化がいくつか報告されている。そのため、今後の社会資本整備では構造物を新設する

技術とともに、既設の構造物を適切に管理し長く供用する技術の重要性が指摘されている。このような中、「性能規定に基づくトンネルの設計とマネジメント」¹⁾が発刊され、性能規定に基づくマネジメントの考え方が議論されつつある。すなわち、トンネルの用途（目的）に応じて、計画段階、設計段階、施工段階、維持管理段階の各々の段階で要求性能を明確にして性能照査を行うことが求められつつある。また、トンネルの用途に応じた機

表-1 試験体の概要と実験パラメータ

試験体名	試験体寸法			実験パラメータ			スター ラップ間隔	電食期間 (日)	積算電流量 (A・h)
	幅B (mm)	長さL (mm)	高さH (mm)	腐食形態	腐食速度	主筋			
D16局No.1	345	1700	200	局部腐食	遅い (電流量0.2A)	D16×2	250	287	1375
D16局No.2						D16×2	250	281	1347
D16局No.3						D16×2	250	0	0
D16全No.1	345	1700	200	全面腐食	速い (電流量1.0A)	D16×2	250	120	2889
D16全No.2						D16×2	250	78	1877
D16全No.3						D16×2	250	0	0
D13全No.1						D13×3	250	78	1877
D13全No.2						D13×3	250	3	2889
D13全No.3						D13×3	250	0	0

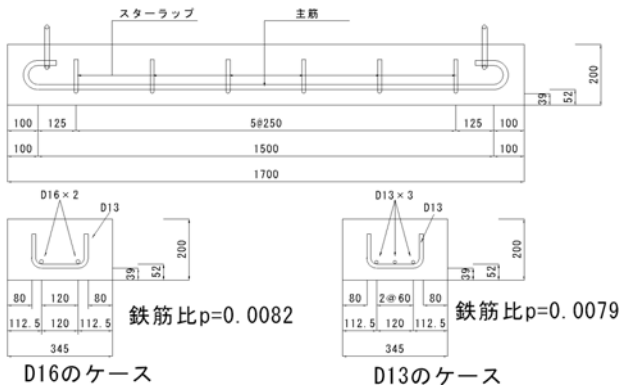


図-1 試験体の形状寸法

表-2 鉄筋の諸元

鉄筋の規格	鉄筋径	弾性係数 (kN/mm ²)	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)
SD345	D16	2.0×10 ²	398	558
	D13	2.0×10 ²	398	567

能および性能の明確化と維持管理段階における既存トンネルの定量的な保有性能評価手法の提案およびそれを用いたアセットマネジメントに関する方法論が研究されている。ここで、既存のトンネルの長寿命化を前提としてアセットマネジメントを実施する場合、トンネルに要求される性能を規定するとともに、保有性能の将来の変化を予測する技術を開発する必要がある。筆者らは、トンネルの要求性能のうち、利用者の安全性能および構造安定性能の観点から、保有性能の経時的変化を予測する手法を開発した²⁾。また、利用者の安全性能を確保する上での目視点検基準、ひび割れ密度および腐食析出物といった簡易予測指標を用いてはく落現象を予測する手法の基本的な考え方を提案した。さらにひび割れ密度の増加が小さくなり腐食析出物が急激に増加する状態では、はく落現象より先に曲げ耐力が大きく低下する可能性があることを報告した。

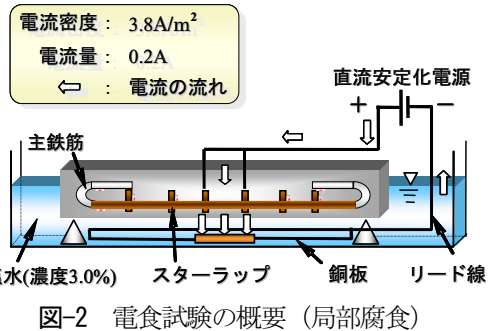


図-2 電食試験の概要 (局部腐食)

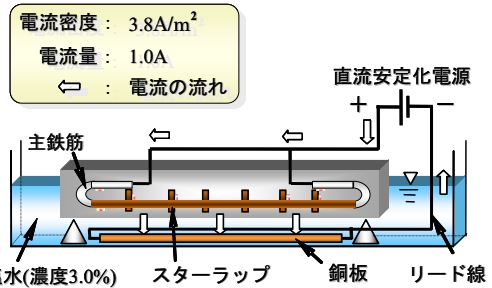


図-3 電食試験の概要 (全体腐食)

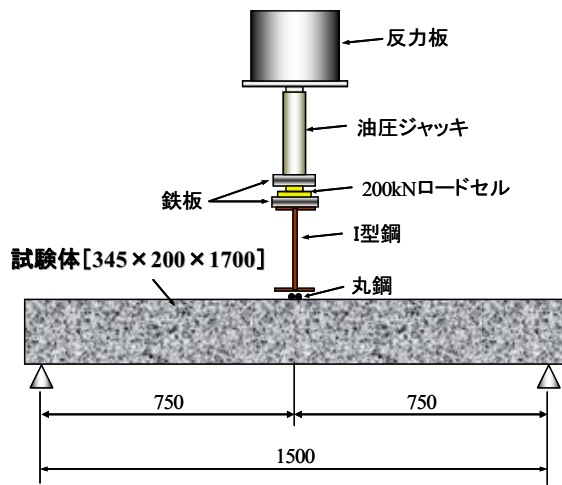
本文は前述したはく落現象の予測手法や曲げ耐力等の性能低下をより定量的にするための実験とその結果について述べている。0

2. 実験概要

(1) 試験体の概要と実験パラメータ

鉄道トンネルの鉄筋コンクリート製セグメントをモデル化し、試験体を作製した。試験体の形状および寸法を図-1、表-1に示す。試験体は200mm×345mm×1700mmの梁部材とした。また下面からのスターラップまでの純かぶりを39mmとし、主筋の芯かぶりを60mmとした。せん断補強筋を250mm間隔で配置した。

実験パラメータを表-1に示す。実験パラメータとして主筋およびスターラップの全面腐食と局部腐食の2水準、鉄筋の腐食速度の速いパターン(電流量1.0A)と遅いパターン(電流量0.2A)の2水準および鉄筋の配筋はD16×2本と、D13×3本のパターンの2水準とした。



単位: mm

図-4 荷重方法および測定機器の設置概要

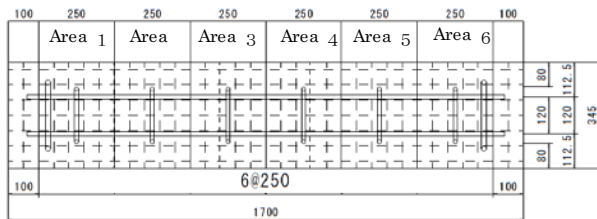


図-5 試験体のエリア区分

(2) 使用材料の諸元

コンクリートの設計基準強度は 24N/mm^2 とした、コンクリートの圧縮強度および静弾性係数の試験結果は $f_{c28}=27.8\text{N/mm}^2$, $E_{c28}=20.9\text{kN/mm}^2$ である。表-2に鉄筋の諸元を示す。

(3) 鉄筋の腐食方法

本実験では、鉄筋の腐食を早期に再現するために電食による方法を採用した。電食試験の概要を図-2, 3に示す。試験体は塩水濃度3%の水溶液の水槽に設置し、直流安定化電源の陽極側に鉄筋を、陰極側に銅板を接続した。単位鉄筋表面積あたりの電流密度は 3.8A/m^2 ³⁾として通電した。

鉄筋腐食の評価指標は主筋の残存率とした。主筋の残存率は、単位長さあたりの質量を一定と仮定した腐食前の鉄筋の質量 M_1 と、荷重試験終了後に試験体からはつりだした鉄筋の質量 M_2 を計測し式(1)により求めた。

$$\left(1 - \frac{M_1 - M_2}{M_1}\right) \times 100(\%) \quad (1)$$

(4) 曲げ実験の荷重方法および測定項目

荷重方法を図-4に示す。支点間距離は1500mmとし、荷重は1点荷重として0.5kNピッチで行った。測定項目は、荷重、スパン中央部の鉛直方向の変位とした。

表-3 目視点検評価基準 (梁構造)

グレード	外観の状態
状態 I	鉄筋 (最もかぶりの小さい鉄筋, 一般にスターラップ) に沿ったひび割れと腐食痕が見られる
状態 II	底面に鉄筋に沿ったひび割れが複数本確認でき, 腐食痕が拡大している
状態 III	鉄筋に沿ったひび割れが進展しそれと交わる方向の鉄筋に沿うひび割れと腐食痕が見られる
状態 IV	鉄筋に沿ったひび割れとそれに交わる方向にひび割れがつながる
状態 V	鉄筋に沿ったひび割れとそれに交わる方向のひび割れがつながり, 閉じている

3. 簡易予測指標を用いたはく落現象の予測

(1) 簡易予測指標の設定

乾川, 木村²⁾らは現行の維持管理で適用されている目視点検基準等⁴⁾を参考に鉄筋腐食によるはく落現象を最終段階として、簡易的な外観の劣化状態から具体的に定めた目視点検基準を提案した。しかし、外観状態の変化のみから、コンクリート片のはく落現象や曲げ性能の低下を予測するのは難しく、ひび割れ密度や腐食析出物密度を新たに予測指標として検討した。

そこで本実験では、簡易予測指標として、以下に示すa)目視点検基準, b)ひび割れ密度およびc)腐食析出物密度を評価項目とした。

a) 目視点検基準

表-3に示す鉄筋腐食によるはく落現象を最終段階として、簡易的な外観の劣化状態から具体的に定めた目視点検基準を提案²⁾した目視点検基準を用いて評価を行う。

b) ひび割れ密度

ひび割れ密度は、図-5に示すように、試験体を6つのエリアに区分し、その各エリアに生じた0.2mm以上のひび割れを対象として、エリア(250mm×345mm)に存在するひび割れの長さを総計し、式(2)により与えられる。

$$\frac{\sum l_{crack}}{A_n} (\text{cm/m}^2) \quad (2)$$

ここで、 l_{crack} :各エリアのひび割れ開口幅0.2mm以上のひび割れの長さ(cm), A_n :各エリアの面積(m^2)。

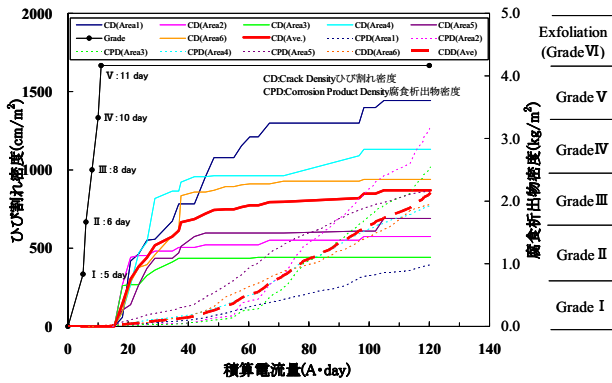


図-7 積算電流量と目視点検基準とひび割れ密度と腐食析出物密度の関係 (D13全No.2)

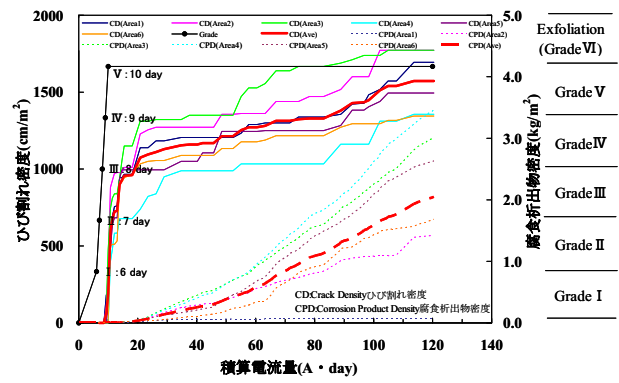


図-8 積算電流量と目視点検基準とひび割れ密度と腐食析出物密度の関係 (D16全No.2)



写真-1 外観状況 D13全No.2 (18A・day)



写真-4 外観状況 D16全No.2 (18A・day)



写真-2 外観状況 D13全No.2 (40A・day)



写真-5 外観状況 D16全No.2 (40A・day)



写真-3 外観状況 D13全No.2 (120A・day)



写真-6 外観状況 D16全No.2 (120A・day)

c) 腐食析出物密度

腐食析出物密度は、前述した6つのエリア内において鉄筋腐食によって発生した各エリアの面積から腐食析出物を採取し、式(3)により与えられる。

$$\sum \frac{m_n}{A_n} \text{ (kg/m}^2\text{)} \quad (3)$$

ここで、 m_n : 各エリア腐食析出物の質量(kg),
 A_n : 各エリアの面積(m²).

4. 実験結果および考察

(1) 積算電流量と主筋の質量減少量の関係

電食試験による積算電流量と主筋の質量減少量の関係を図-6に示す。積算電流量と鉄筋の質量減少量の関係は式(4)から求めた。

$$w = 0.766 \times IT \quad (4)$$

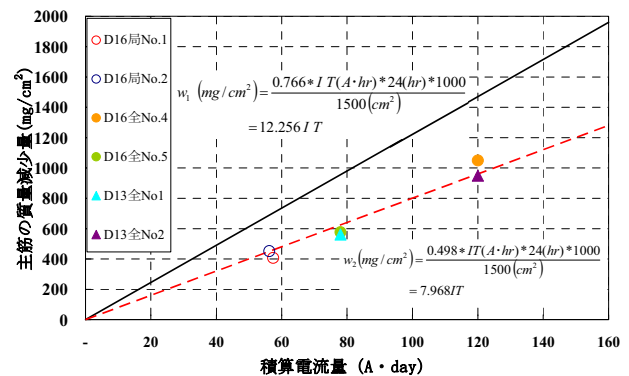


図-6 積算電流量と主筋減少量の関係

ここで、 w : 腐食減量, IT : 積算電流量 (A・hr)

図-6中の黒線は既往の研究⁵⁾の主筋の腐食減量と積算電流量の関係を示したものである。本実験で得られた結果を破線で示してある。本実験で得られた主筋の腐食減量は式(4)で示される量より小さくなっている。これは、試験体の諸元やかぶりおよび鉄筋径などの違いによるものと考えられる。

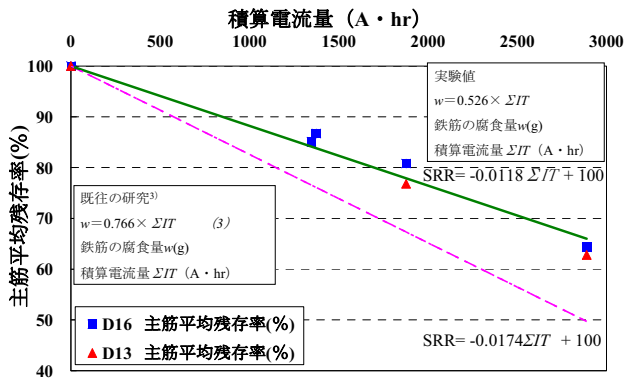


図-9 積算電流量と主筋平均残存率の関係

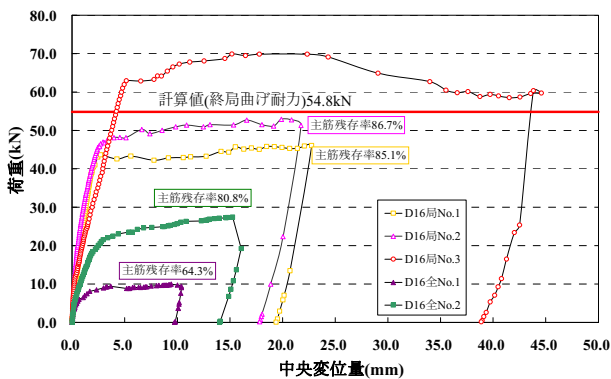


図-10 荷重と中央変位量との関係 (D16)

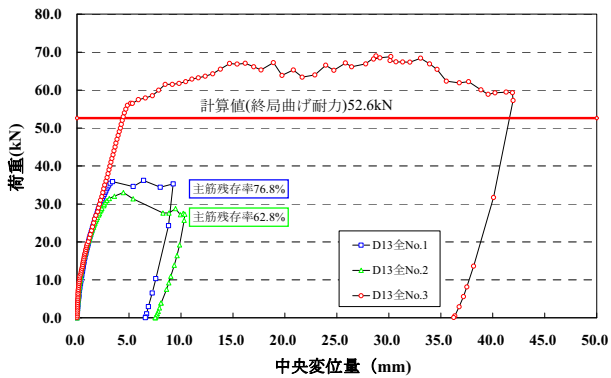


図-11 荷重と中央変位量との関係 (D13)

(2) 積算電流量と簡易予測指標

積算電流量と目視点検基準、ひび割れ密度および腐食析出物密度の関係を図-7 (D13全No.2)、図-8 (D16全No.2)にまた外観状況を写真1~3 (D13全No.2)、写真4~5 (D16全No.2)に示す。これらの指標の経時的な変化を以下に示す。①目視点検基準においては、積算電流量が約10(A·day)において、グレードVに相当する鉄筋に沿ったひび割れとそれに交わる方向のひび割れがつながり、閉じている状態となった。②ひび割れ密度はD13全のシ

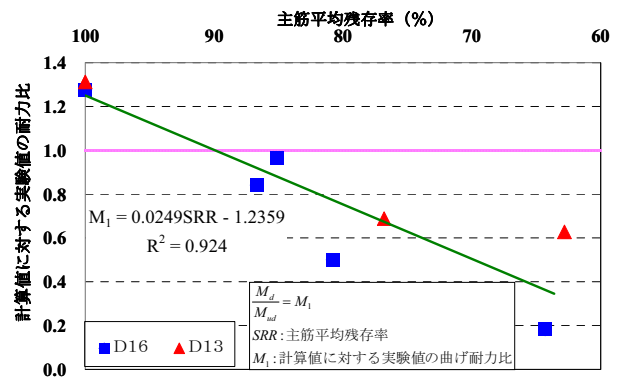


図-12 主筋平均残存率と計算値に対する実験値の曲げ耐力比の関係

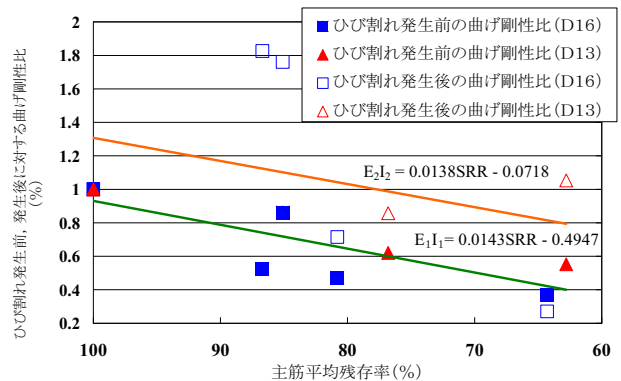


図-13 主筋残存率ひび割れ発生前と後の曲げ剛性比の関係

リーズは約20日間かけて増加し、その後の進展が一定値に収束する傾向がみられた。またD16全、D16局のシリーズはひび割れ密度が増加していく傾向がみられた後、バラつきはあるものの緩やかに増加していく傾向がみられた。③腐食析出物密度は、各ケースにおいてひび割れ密度が急激に増加した後に暫時的に増加していく傾向が見られた。

本実験では、鉄筋腐食によるコンクリートのはく落を想定していたが、コンクリート片のはく落にあたる現象は確認できなかった。これは、電食実験において鉄筋の腐食生成物が電解液に溶出することで膨張圧が減少したためと考える。

(3) 積算電流量と曲げ耐力

図-9に積算電流量と主筋平均残存率の関係を示す。図中には既往の文献⁵⁾から求まる鉄筋の質量減少量を主筋平均残存率に変換し示している。積算2889(A·hr)時の主筋平均残存率は既往の文献⁵⁾の知見と比較すると本実験の場合は約20%主筋平均残存率が大きいことがわかる。

図-10と図-11に曲げ実験により得られた荷重と中央変位の関係を示す。また、図中には計算値(終局曲げ耐力)および主筋平均残存率を示す。

電食を施していない健全な試験体は曲げ耐力の計算値に対して約 28%(D16 のケース)と約 31%(D13 のケース)上回った。一方、電食を施した腐食試験体は D16, D13 の両方のケースにおいて、主筋平均残存率の低下に伴い曲げ耐力はほぼ直線的な低下を示している。図-12 に主筋平均残存率と計算値(終局曲げ耐力)に対する実験値の曲げ耐力の比の関係を示す。主筋平均残存率が約 90%以下になる計算値(終局曲げ耐力)に対する実験値の曲げ耐力比が 1.0 以下になる。したがって、主筋断面が 10%以上減少すると、計算値(終局曲げ耐力)を下回る可能性があることが考えられる。

図-13 に主筋平均残存率とひび割れ発生前と発生後の健全試験体の曲げ剛性に対する腐食試験体の曲げ剛性の比を示す。主筋平均残存率の低下に伴い曲げ剛性比も低下した。また、主筋平均残存率が計算値(終局曲げ耐力)を下回る時点、すなわち、主筋平均残存率が 90%時の曲げ剛性比はひび割れ発生前と発生後ともに約 15%減少した。

5.まとめ

図-14に示すように、利用者の安全性能を確保する上で目視点検基準、ひび割れ密度および腐食析出物といった簡易予測指標を用いていはく落現象を予測する手法の有用性、および構造安定性能を確保するうえでは曲げ耐力、曲げ剛性の低下を予測できる可能性を鉄筋腐食の程度から推定する手法の有効性を検証した。以下に本実験で得られた知見を示す。

- (1)簡易予測指標のひび割れ密度については、ひび割れ密度の増加が小さくなり腐食析出物密度が急激に増加する状態では、はく落現象より先に曲げ耐力が大きく低下する可能性がある。
- (2)鉄筋腐食により主筋平均残存率が約 90%以下となると、終局曲げ耐力は計算値(終局曲げ耐力)を下回る。また曲げ剛性にも同様な傾向がみられた。

6.今後の展望

本実験により鉄筋腐食と曲げ耐力の関係は把握できたと考えている。今後、利用者の安全性能を確保する上で目視点検基準、ひび割れ密度および腐食析出物といった簡易予測指標を用いていはく落現象を予測するために、コンクリートのはく落を再現できる実験によって検証する予定である。

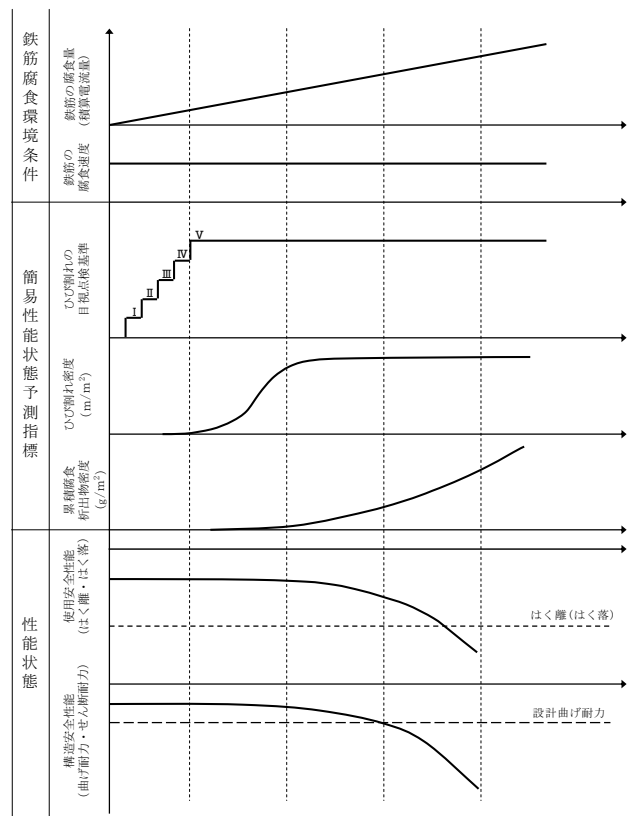


図-14 鉄筋腐食による性能低下と簡易性能状態予測指標の関係のイメージ図

参考文献

- 1) 土木学会：性能規定に基づくトンネルの設計とマネジメント、トンネルライブラリー 21, 2009.10.
- 2) 乾川尚隆, 木村定雄：RC セグメントにおけるかぶりコンクリートのはく落現象を予測するための目視点検評価手法の提案, 中国現代隧道技術
- 3) 花岡大伸, 矢野真義, 宮里心一：鉄筋コンクリート梁の腐食形態と腐食量が曲げ性状に及ぼす影響, 土木学会論文集 E, Vol.63, No.2, pp.300-312, 2007.6.
- 4) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等維持管理標準・同解説(構造物編)トンネル, p.28, 2007.1.
- 5) 田森清美, 丸山久一, 小田川昌史：鉄筋の発錆によるコンクリートのひび割れ性状に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.10, No.2, pp.505-510, 1988.