

# 委員会報告 鉄筋腐食したコンクリート構造物の構造・耐久性能評価の 体系化研究委員会

三島 徹也\*1・山本 貴士\*2・大下 英吉\*3・金久保 利之\*4・国枝 稔\*5・佐藤 靖彦\*6

**要旨:** 本研究委員会は、鉄筋腐食を生じたコンクリート構造物の構造性能に関する耐久性能（以下、構造・耐久性能）を時空間で数値的に表現可能な評価手法としての数値構造解析の利用ならびに構造全体系を評価できる構造・耐久性能指数の確立を目的とし、材料劣化の時空間軸での取り扱いを検討し、腐食鉄筋および腐食鉄筋とコンクリートの付着に関する力学挙動のモデル化を行った。また、構造・耐久性能指数の提案ならびに定式化を行うとともに、鉄筋腐食部材の補修・補強事例をとりまとめ、補修・補強効果の評価への構造・耐久性能指数の利用を検討した。

**キーワード:** 鉄筋腐食、構造・耐久性能指数、材料劣化予測、劣化材料の構成則モデル、補修・補強

## 1. はじめに

鉄筋腐食をはじめとするコンクリート構造物の材料劣化と性能の変化、すなわち耐久性能の関係は、ここ数十年で活発に議論され、時間軸に沿った性能評価手法も多く提案されている。なかでも、構造性能の評価手法に関する研究が熱心に行われてきている。特に、有限要素解析に代表される数値構造解析技術の発展が目覚しく、これに利用するための腐食鉄筋の力学モデル、腐食膨張に伴うコンクリートのひび割れあるいは腐食鉄筋とコンクリートの相互作用のモデル化が進められている。しかし、点検結果を利用できる鉄筋腐食コンクリート構造物の現時点での保有性能の算出だけでなく、将来の性能あるいは寿命予測を可能とするツールとして確立するためには、時間軸における劣化材料のモデル化が必要である。また、構造物において一様に進行することのまれな劣化現象において、腐食劣化のばらつきが構造性能に大きく影響していることが指摘されつつあり、腐食の空間的な分布を力学挙動の把握に適用するための手法が望まれている。

一方、構造性能に関する耐久性能（以下、構造・耐久性能）を評価する手法には、半定量的といわれるグレーディング手法や上記の数値解析に基づく手法が利用されている。グレーディング手法は、多くの構造物を管理する立場で、簡便かつ効果的に性能を評価できるが、技術者の高度な工学的判断に委ねられる場面も多く、評価が統一的でないこともある。これに対し、数値解析を利用する手法は、力学的な根拠をもつ性能の数値表現が可能であるが、構造物の所有者や管理者の技術レベルによっては、未だ必ずしも利用が一般化していない現状もある。

そこで本研究委員会では、鉄筋腐食を生じたコンクリート構造物の構造・耐久性能を時空間で数値的に表現可

能な評価手法としての数値構造解析の利用ならびに構造全体系を評価できる構造・耐久性能指数の確立を目的とし、表-1に示す委員会およびWG構成に基づき、材料劣化の時空間軸モデルを検討(WG1)するとともに、腐食鉄筋および腐食鉄筋とコンクリートの付着の力学モデルとそれらを適用した有限要素解析の利用手法の統一化を検討(WG2)した。また、構造・耐久性能指数の定式化を行う(WG3)とともに、鉄筋腐食部材の補修・補強事例をとりまとめ、補修・補強効果の評価への構造・耐久性能指数の利用について検討(WG4)した。

表-1 委員会およびWG構成

	WG1	WG2	WG3	WG4
委員長	三島徹也	前田建設工業		
幹事長*1	山本貴士	京都大学		
幹事長*2	大下英吉	中央大学	主査	
幹事	国枝稔	岐阜大学	主査	
幹事	金久保利之	筑波大学		
幹事	佐藤靖彦	北海道大学		主査
委員	秋山充良	早稲田大学	○	○
	上原子晶久	弘前大学		○
	大屋戸理明	鉄道総合技術研究所	○	○
	鹿毛忠継	国土技術政策総合研究所		○
	加藤絵万	港湾空港技術研究所		○
	兼松学	東京理科大学	○	
	斉藤成彦	山梨大学		○
	篠原保二	東京工業大学		○
	千田峰生	ショーボンド建設		○
	武田均	大成建設	○	
	田嶋和樹	日本大学		○
	野口貴文	東京大学	○	○
	野島昭二	高速道路総合技術研究所		○
	福山智子	東京大学	○	
	細田暁	横浜国立大学		○
	松尾豊史	電力中央研究所	○	○
	松島学	香川大学		○
	村上祐貴	長岡工業高等専門学校		○
	渡辺博志	土木研究所		○
	足助美岐子	中央大学	○	○

\*1: 2012年8月から \*2: 2012年7月まで

\*1 前田建設工業(株) 技術研究所 工博 (正会員)

\*3 中央大学 教授 博士(工学) (正会員)

\*5 岐阜大学 教授 博士(工学) (正会員)

\*2 京都大学大学院 准教授 博士(工学) (正会員)

\*4 筑波大学大学院 准教授 博士(工学) (正会員)

\*6 北海道大学大学院 准教授 博士(工学) (正会員)

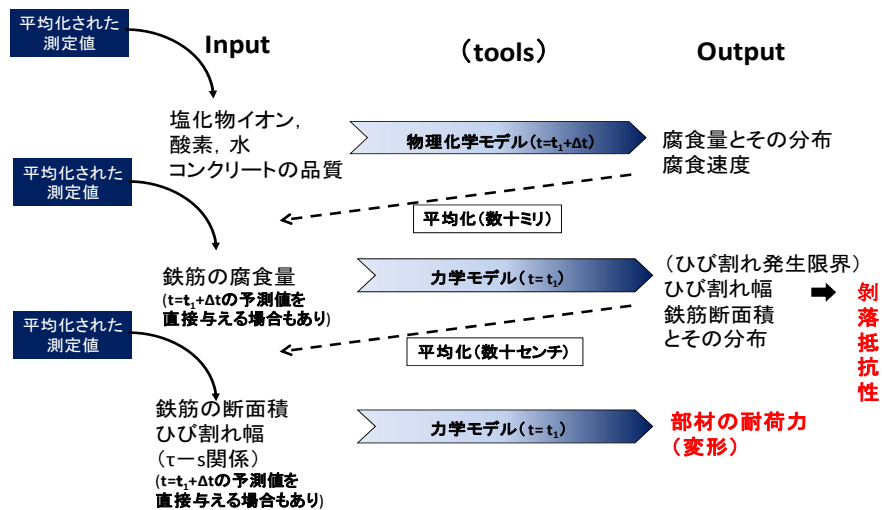


図-1 ミクロスケールからマクロスケールまでの情報の流れと情報の平均化

## 2. 材料劣化の評価

材料劣化 WG (WG1) では、現時点での性能評価だけでなく、10 年後、20 年後のコンクリート構造物について、鉄筋腐食を要因として劣化する際の構造性能の評価を行うためのフレームワークのあり方について審議を行うとともに、それに関連する文献調査を実施した。特に、構造性能の評価にあたっては、マクロモデルではなく、数値解析などを駆使した精緻なモデルを使用することを前提に議論を行った。

日本コンクリート工学会においても、「コンクリート構造物の長期性能照査支援モデル研究委員会 (2002-2003)」などの委員会が設置され、環境外力の評価、各種物理化学モデルの整理およびミクロからマクロモデルへの展開を目指し整理されている。また、「既存コンクリート構造物の性能評価指針作成委員会」では、劣化したコンクリート構造物の性能評価を行うにあたって必要な情報や評価の手順等が示されている。

さて、文献調査によれば、鉄筋腐食の反応をはじめとする物理化学モデルに立脚した研究 (ミクロスケール)、鉄筋腐食により生じる膨張圧に伴うひび割れの幅等を予測する研究 (メゾスケール)、鉄筋とコンクリートの付着の低下等に着眼して部材の耐荷力や変形を予測する研究 (マクロスケール) の 3 つのフェーズに大別できる。すなわち、ミクロスケールにおける反応モデルに立脚した構造性能評価を目指すためには、それぞれのフェーズ間で情報のやりとりが必要となるため、現象の整合性を担保しつつ、空間的なスケールを調整 (平均化) する必要がある。本 WG の議論だけでは、最終的な方法について結論を得ることはできなかったが、今後、平均化に関する研究の進捗が必要であることが明らかとなった。

また、本 WG では、現時点 ( $t=t_1$ ) において性能評価を行う場合、将来 ( $t=t_1+\Delta t$ ) の性能を予測する場合の 2

つのケースを想定して議論を行った。

現時点での性能評価を行う場合、有限要素法などを用いて性能を推定することになるため、その為の入力値としては、腐食した鉄筋の断面積や付着応力係数関係となる。はりなどの部材であれば、それらの軸方向の分布も必要となる。ただし、実際には軸方向の分布に関する情報は、点検等によって得られた離散的な情報であり、数十センチ間隔であることが多い。従って、離散的な情報を有限要素法で使用できる平均化された連続的な情報に置き換える必要があるが、現実問題としてどのように情報を変換するかを示した調査研究事例は少ない。

将来の性能評価を行う場合には、 $\Delta t$  経過後のデータをツールに入力する必要がある。現時点では、 $\Delta t$  後の鉄筋の断面積や付着応力係数関係にある許容誤差の下で予測し、直接性能評価を行う試みはあるが、ひび割れ幅を予測する段階や、物理化学モデルを用いて腐食量やその分布を予測する部分までフィードバックすることはほとんど行われていない。ここでも、点検等により得られたデータ (現時点での状態量) をミクロスケールでのインプットとする際には、空間的な情報量に差がありそのままでは使用することができない。例えば、ある箇所での腐食量や塩化物イオン量が分かっているが、せいぜい数十センチオーダーでの情報であり、鉄筋の腐食反応を解析する際の要素の代表寸法に比べるとあまりに大きすぎる。この場合のミクロスケールでのモデリングへの入力方法をどうするかについても、今後の検討が必要である。

以上のように、本 WG での調査および審議によって、点検等により得られた離散化された入力データを空間的なスケールを越えて引き渡す場合の問題点が浮き彫りとなり、今後これらに関する調査研究が進められることが期待される。

### 3. 有限要素解析における構成モデルの評価

腐食した鉄筋と、鉄筋腐食にもなうひび割れたコンクリートを有する部材や構造物の力学挙動を予測する手法として、有限要素解析に代表される数値解析手法は、非常に有用なツールの一つである。有限要素解析の適用にあたっては、鉄筋およびコンクリートの構成則モデルおよびそれらの相互作用を表現する付着構成則モデルの設定が重要となる。本章では、腐食鉄筋の応力-歪関係、腐食鉄筋とコンクリートの付着応力-すべり関係、および実際に鉄筋腐食の生じた部材の実験結果に対する有限要素解析の適用についての検討結果を、簡単に紹介する。

#### 3.1 腐食した鉄筋の構成則モデル

腐食鉄筋の構成則モデルに対する検討は、今までにも数々の報告が見られるが、対象鉄筋は電食による実験供試体によるものが多い。本委員会の検討では、実構造物から採取した実際の腐食鉄筋に対して検討を行い、実構造での腐食の程度およびその分布を基にした応力-歪関係の評価を行うことを念頭に置いた。

検討の対象とした鉄筋の概要を表-1に示す。対象とした鉄筋は、4種類の異なる実構造物および自然暴露試験体から採取した異形鉄筋および丸鋼で、文献1)の3Dスキャナによる断面積分布測定および検長を $16d$  ( $d$ は鉄筋径)とした変位計による歪計測が行われている。

検討結果の一例として、鉄筋を軸方向に要素分割し、要素の寸法を $1\text{mm}$ から $16d$ と変化させて、素材の応力-歪関係(健全鉄筋に近いと思われる断面減少の少ない供試体の歪ゲージによる計測結果で、降伏強度 $368\text{N/mm}^2$ 、引張強度 $556\text{N/mm}^2$ )を各要素に適用して全体伸びを算出し、それを検長の $16d$ で除した平均歪による応力-歪関係を、図-2に示す。供試体はD10異形鉄筋(sh15)で、断面積の最小値は $48.4\text{mm}^2$ 、平均値は $66.1\text{mm}^2$ である。計算における各要素の断面積は、着目要素寸法内における断面積の最小値としている。

要素寸法が小さいと、実験結果と比較して剛性が大きくなり、降伏後の変形を小さく評価する。特にこの傾向は異形鉄筋において顕著である。逆に要素寸法が大きいと降伏後の変形を過大に評価し、破断歪に大きな差が現れる。丸鋼も含めて、鉄筋の応力-歪関係のモデル化における要素寸法は、強度および変形の両面から $2d$ 程度が適当であると考えられる。

有限要素解析への簡易な適用を考慮し、対象区間を $16d$ および $8d$ として、バイリニア型モデルによる近似を行った。近似方法は、要素寸法 $2d$ による前述の計算結果を基に、計算結果と等しい初期勾配と破断点を持ち、応力の偏差の和が0になるように2次勾配を決定した。モデル化の例を図-3に示す(併記は文献2)によるモデル)。

委員会報告書においては、対象とした全供試体の検討

結果およびモデル化における特性値を記載しているの、参照されたい。

表-1 対象とした鉄筋の概要

シリーズ	呼び名	供試体数	立地条件	腐食要因
sh	D10	6	飛沫地帯	塩害
to	$\phi 22$	3	都市部	中性化
sa	$\phi 19$	3	汀線	塩害
ok	D13	2	初期塩分	塩害

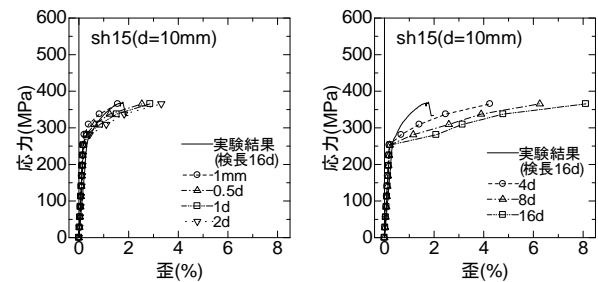


図-2 応力-歪関係における要素寸法の影響

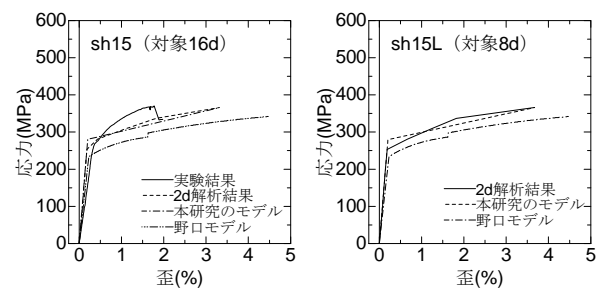


図-3 バイリニア型モデルによるモデル化の例

#### 3.2 腐食した鉄筋とコンクリートの付着構成則モデル

鉄筋腐食がRC部材の耐荷性能に及ぼす影響については、有用な知見が蓄積されつつあるが、変形性能については未解明な部分が多い。鉄筋腐食したRC部材の変形性能評価が耐荷性能に比べて進まない主たる要因は、腐食した鉄筋の力学的特性(3.1節)が未解明であることや鉄筋とコンクリートの付着劣化性状が未解明であることなどが挙げられる。本節では、腐食した鉄筋とコンクリートの付着性状について既往の知見を整理し、特に有限要素解析を実施する上で重要となる鉄筋腐食したコンクリート部材の付着構成則モデル(付着応力-すべり関係)について重点的に検討する。

鉄筋腐食がRC部材の付着性状に及ぼす要因は、腐食に伴う断面減少、腐食生成物による弱層の形成、リブの欠損による有効支圧面積の減少、かぶりコンクリートのひび割れなどが挙げられる。

腐食ひび割れや腐食減量などの付着劣化因子と付着強度との関係については数多くの検討がなされてきたが、付着応力-すべり関係と付着劣化因子との関係について

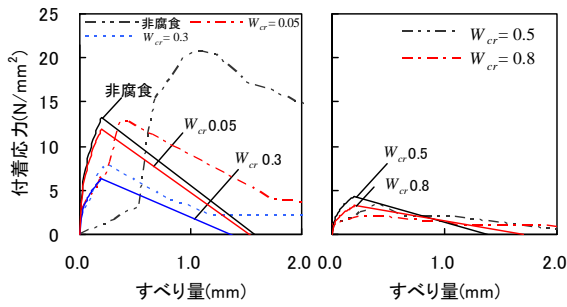


図-4 式(1)適用結果

は、検討事例が少なく体系的な整理はほとんどなされていない。しかしながら、近年では鉄筋腐食した RC 部材の付着応力-すべり関係について検討した事例も散見される。

例えば、長岡らは、式(1)に示すような CEB モデルをベースとした付着割裂破壊を呈する鉄筋腐食した RC 部材の付着構成則モデルを提案している<sup>3)</sup>。

$$\begin{aligned}
 0 \leq S \leq S_{\max} & \quad S_{\max} < S \\
 \tau &= \tau_{\text{cor}} \left( S / S_{\max} \right)^{\gamma} & \tau &= -I(S - S_{\max}) + \tau_{\text{cor}} \\
 \tau_{\text{cor}} &= \sigma_n \cdot \cot 54.1^\circ + 2.60 & I &= 2.16 \sigma_n^{0.509} \\
 S_{\max} &= 1.51D / 100 \\
 \gamma &= 0.431 \\
 I &= 2.16 \sigma_n^{0.509} \\
 \sigma_n &= \exp(-\alpha \cdot W_{\text{cr}}) \cdot \sigma_{n-\max} \\
 \sigma_{n-\max} &= 4.05 \frac{C_1}{\phi} + 0.103 f'_c - 3.65 \\
 \alpha &= (-0.407 \ln C_2 + 2.12) \cdot f'_c{}^{2/3} \\
 & \left( \begin{array}{l} 1.32 \leq \frac{C_1}{\phi} \leq 4.19, 22.6 \leq f'_c \leq 55.5 \\ \frac{C_2 + \phi/2}{C_1 + \phi/2} > 1.50 \text{ の場合 } C_2 = 1.50 C_1 + \frac{\phi}{4} \end{array} \right)
 \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 $\tau$ : 付着応力(N/mm<sup>2</sup>)、 $\tau_{\text{cor}}$ : 腐食 RC 部材の付着強度(N/mm<sup>2</sup>)、 $S$ : すべり量(mm)、 $S_{\max}$ : 付着強度時のすべり量(mm)、 $\gamma$ : 付着応力の増加勾配に関する係数、 $I$ : 軟化勾配、 $\sigma_n$ : 拘束圧(N/mm<sup>2</sup>)、 $W_{\text{cr}}$ : 最小かぶり面のひび割れ幅(mm)、 $\alpha$ : 最大拘束圧からの低下割合に関する係数、 $\sigma_{n-\max}$ : 最大拘束圧(N/mm<sup>2</sup>)、 $C_1$ : 最小かぶり(mm)、 $C_2$ : 最小かぶりに次いで小さいかぶり(mm)、 $f'_c$ : コンクリートの圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)、 $\phi(D)$ : 鉄筋径(mm)である。

このモデルでは、鉄筋軸に沿った腐食ひび割れ幅に加えて、かぶり、圧縮強度、鉄筋径の影響をコンクリートの拘束圧として加味している。

図-4 は既往の研究結果<sup>4)</sup>に式(1)を適用した結果の一例(破線: 実験値, 実線: 評価値)である。評価モデルは実験結果と比較的良好な一致を示している。本節では、

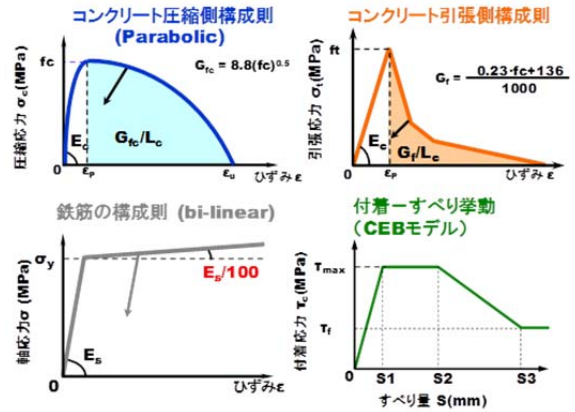


図-5 解析者 A で使用している材料の構成モデル

このモデル以外にも、海外の論文で提案された付着構成則モデルと引抜試験結果を比較し、モデルの適用限界や残された課題について整理を行う。また、3.3 節では本節で提案した付着構成則モデルを用い、鉄筋腐食した RC 梁部材の有限要素解析を行っている。

### 3.3 鉄筋腐食したコンクリート部材の有限要素解析

#### (1) 解析の概要

鉄筋腐食の生じた RC、PC 部材を対象にして、その残存性能を予測する事例が数多く公表されている。そのことを踏まえて、本委員会では 2 人の委員(解析者 A・B)により有限要素解析を行った。解析の対象は、鉄筋腐食を生じた RC 部材の構造性能に関する共通試験の結果である<sup>5)</sup>。

#### (2) 解析モデル

解析者 A で使用している材料の構成モデルを図-5 に示す。解析者 B でもほぼ同様の構成モデルを使用している。ただし、主筋とコンクリートとの付着バネに与える付着応力-すべり関係については、解析者 A が CEB モデル、解析者 B が前節のモデルを使用している。有限要素モデルは、図-6 に示したように解析者 A・B ともに 3 次元モデルである。主筋についてはトラス要素で離散配置している。いずれの解析においても、腐食ひび割れは直接モデル化せず、その損傷は主筋とコンクリートとの付着作用の弱まりとしてモデル化されている。

#### (3) 解析結果と考察

解析結果の一例を図-7 に示す。この図より、いずれの解析者においても、実験で見られたような荷重-中央変位関係を解析で概ね再現できることを確認した。これは、解析で対象とした実験結果では、終局時において腐食後の主筋が破断せずに圧縮側コンクリートが圧壊する傾向が強いためと理解している。しかしながら、解析者 A においては、解析が終局まで追えずに発散する結果が見られた。これについては、解析者 A で適用している付着応力-すべり関係に原因があるものと考えている。

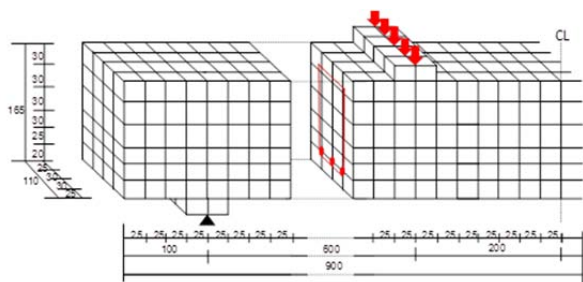
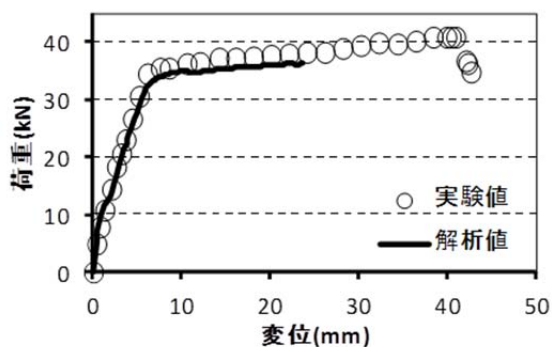
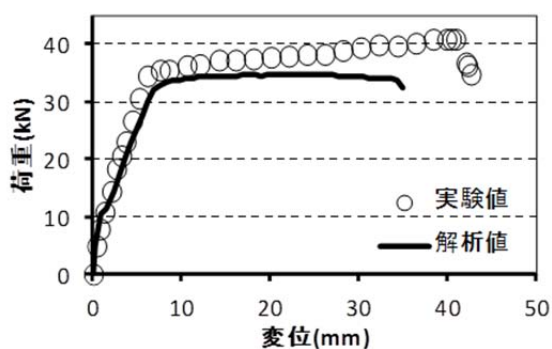


図-6 解析者Aの解析モデル



(a) 解析者A



(b) 解析者B

図-7 解析結果の一例

#### 4. 構造・耐久性能の評価

鉄筋腐食により劣化したコンクリート構造物の健全性（劣化度）あるいは保有性能を表現する方法として、グレーディングや前章の有限要素解析の利用が考えられる。前者のグレーディング手法は、技術者の練度が要求される場合も多いが、点検結果をもとに比較的簡易に性能を評価できる手法で、多数の構造物群をマクロにマネジメントする場面で、対策を必要とする構造物のスクリーニングに適しているといえる。しかし、グレーディングによる評価には、力学的な裏付けあるいは根拠が乏しく、対策にあたって現状の性能を同定する場合や、対策の効果を表現したい場合において、必ずしも十分でない手法でもある。一方、後者の数値解析を用いる手法は、適切な力学モデルを利用して性能を直接数値化できることから、判断が容易である。しかし、技術力をもったインハ

ウスエンジニアが十分でない管理者や事業者で、きわめて多くの構造物群を管理している状況にあつては、その利用がまだまだ一般的でない。

これに対し、本委員会で提案する構造・耐久性能指数は、上記の両手法の中間レベルに位置するもので、例えば力学的な根拠として設計に用いるような簡易式を利用しつつ、部材のみならず構造系の健全性の指標となりうる数値を算出しようとするもので、建築分野で利用されている耐震診断基準（Is 値）を参考とするものである。

定式化にあつての議論では、指数算出の基本方針として、構造物への作用と抵抗の比率（安全率）の時間的な変化を利用するもの、構造物の初期の性能からの低下率を利用するものについて検討した。構造物の余裕度を工学的に判断するならば、前者の作用と抵抗の比率を利用する手法が適しているという意見もあった。しかし、部材や構造物ごとに相違する安全率を含めた指標とすると、その構造物が持つ真の性能指標の評価を困難にすることもありえる。そこで、後者の低下率で表現する方法を採り上げ、構造物全体系（以下、全体系）の健全（初期）状態の指数を1として、劣化の程度に応じて1から0の間の値を採るものとした。その際、部材や部位への外力作用の大きさを考慮した係数を与えることで、前者の作用の要素を考慮することを検討した。すなわち、腐食が著しい断面でも、その断面への作用が小さければ影響が小さいのであつて、その断面の性能指標を著しく小さく評価しないように配慮するものである。

#### 4.1 構造・耐久性能指数の定義

供用期間の任意の時点  $t$  における、構造物中の部材  $j$  の任意断面  $x_i$  の構造・耐久性能指数を  $id_j(x_i, t)$ 、これをすべての部材について統合し全体系の構造・耐久性能指数としたものを  $ID(t)$  と表現する。なお、種々の性能を対象とした算出を可能とする枠組みとしているが、紙面の都合上、本報告では安全性（曲げ、せん断）に着目してその定式化を紹介する。

##### (1) 断面の構造・耐久性能指数

曲げ耐力の健全（初期）状態からの低下率  $\eta_M(x_i, t)$  を次式(2)で表す。なお、曲げ耐力の算定手法は特定せず、様々な評価式を用いることができる枠としている。また、グレーディングを数値化（状態 IV で 0.25 など）したものを利用することもできると考えられる。

$$\eta_M(x_i, t) = M_u(x_i, t) / M_u(x_i, 0) \quad (2)$$

ここで、 $M_u(x_i, t)$ : 断面  $x_i$ , 時間  $t$  の曲げ耐力

$M_u(x_i, 0)$ : 断面  $x_i$ , 時間  $t=0$  (初期) の曲げ耐力

また、作用曲げモーメントの大きさを考慮した係数  $\alpha_M(x_i, t)$  を次式(3)で表す。

$$\alpha_M(x_i, t) = 1 - W_{corr} \times M_u(x_i, 0) / M_{max} \quad (3)$$

ここで、 $W_{corr}$ : 断面  $x_i$ , 時間  $t$  の鉄筋腐食率 (0~1)

$M_u(x_i, 0)$ : 断面  $x_i$  の設計作用曲げモーメント (腐食に応じて変化しないものとして取り扱う。)

$M_{max}$ : 対象部材の設計最大曲げモーメント

この係数は、作用する曲げモーメントが大きいほど、かつ腐食率が大きいほど影響が大きい、すなわち断面の指数が小さくなることを表現するものである。なお、腐食によって、作用力の分布が初期の設計時に想定したものと相違する可能性もあるが、簡便のため、作用の分布については変化しないものとして取り扱った。

せん断耐力の低下率  $\eta_V(x_i, t)$  についても同様に、以下のように定義する。

$$\eta_V(x_i, t) = V_u(x_i, t) / V_u(x_i, 0) \quad (4)$$

ここで、 $V_u(x_i, t)$ : 断面  $x_i$ 、時間  $t$  のせん断耐力

$V_u(x_i, 0)$ : 断面  $x_i$ 、時間  $t=0$  (初期) のせん断耐力  
作用せん断力の大きさを考慮した係数  $\alpha_V(x_i, t)$  を次式(5)で表す。

$$\alpha_V(x_i, t) = 1 - W_{corr} \times V_u(x_i, 0) / V_{max} \quad (5)$$

ここで、 $W_{corr}$ : 断面  $x_i$ 、時間  $t$  の鉄筋腐食率 (0~1)

$V_u(x_i, 0)$ : 断面  $x_i$  の設計作用せん断力

$V_{max}$ : 対象部材の設計最大せん断力

これらの各断面耐力は、いずれかが大きく低下している場合、その断面の性能を決定付ける要因となりえることから、断面  $x_i$  の構造・耐久性能指数は、次式(6)のように積の形で表現することとした。

$$id_j(x_i, t) = \{ \alpha_M(x_i, t) \cdot \eta_M(x_i, t) \} \{ \alpha_V(x_i, t) \cdot \eta_V(x_i, t) \} \quad (6)$$

## (2) 部材の構造・耐久性能指数

以上のような断面を、部材  $j$  において  $m$  カ所選定する。部材単位では、一断面の破壊が部材の破壊に大きく影響すると考えられることから、次式(7)に示すように、算出された各断面の指数  $id_j(x_i, t)$  を掛け合わせ、抽出する断面数の影響を排除するために相乗平均をとって部材  $j$  の構造・耐久性能指数  $id_j(t)$  を算出することとした。なお、腐食分布をもつ部材においては、選定する断面の位置によってこの指数が変化する。委員会の議論では、断面選定のための方針を決めるまでには至らなかったものの、比較したい構造物同士にあっては、ある程度機械的に (部材軸方向に等間隔として) 抽出するなどの統一が必要と考えられる。

$$id_j(t) = \left( \prod_{i=1}^m id(x_i, t) \right)^{\frac{1}{m}} \quad (7)$$

## (3) 全体系の構造・耐久性能指数

著しい劣化を生じた部材があっても、不静定構造の構造冗長性などにより、全体系では必ずしもその部材の劣化の影響が大きい場合もある。一方で、第三者影響性能や補修・補強の観点からは、クリティカルな部材や断面の抽出が必要である。本指標では、単一部材の指数

を比較検討できるだけでなく、全体系の冗長性を考慮した表現を目指した。

部材から全体系に  $id_j(t)$  を統合するにあたっては、鉄筋定着部や部材の接合部といった構造細目の健全性に着目した係数  $\alpha_{Aj}$ 、全体系の中での部材ごとの荷重負担割合 (作用の大きさの違い) に着目した係数  $\alpha_{Dj}$  などを考慮することとした。例えば、全体系における部材ごとの負担割合に着目した係数  $\alpha_{Dj}$  を次式(8)に示す。すなわち、全体系における部材  $j$  の荷重負担割合が高く、かつ腐食量が大きい場合は、全体系の性能に大きく影響することを想定して指数を小さくすることになる係数である。

$$\alpha_{Dj} = 1 - W_{corr,j} \times p_j \quad (8)$$

ただし、負担割合と腐食率の数値によっては  $\alpha_{Dj} < 0$  となる状況も現れるが、その部材が負担割合の高い重要なものである場合やきわめて大きな腐食率になっている場合であるので、その際は  $\alpha_{Dj} = 0$  とするものとする。

ここで、 $W_{corr,j}$ : 部材  $j$  の鉄筋腐食率 (0~1)

$p_j$ : 部材  $j$  の負担割合 (作用する最大の曲げモーメントが他の部材の 1.2 倍のとき、1.2 とする。)

以上から、安全性に関する供用期間の任意の時点  $t$  における部材数  $n$  の全体系の構造・耐久性能指数  $ID(t)$  は、次式(9)で表される。

$$ID(t) = \frac{\sum_j^n \alpha_{Aj} \cdot \alpha_{Dj} \cdot id_j(t)}{\sum_j^n \alpha_{Aj} \cdot \alpha_{Dj} \cdot id_j(0)} = \frac{1}{n} \sum_j^n \alpha_{Aj} \cdot \alpha_{Dj} \cdot id_j(t) \quad (9)$$

使用性や他の性能も含めた統一的な  $ID(t)$  は、各々の性能について、それぞれの  $ID(t)$  を算出し、性能ごとに重み係数 (係数の総和が 1) を乗じた上でそれらを合計することで得られる。このときの重み係数は、構造物の所有者がどの性能に着目して管理するかによって決定できると考えられる。

## 4.2 構造・耐久性能指数の算出例

試算の対象とした構造物の荷重条件を図-8に示す。RC-5 主単純桁の構造で、支間中央に集中荷重が作用するものとする。G1 から G5 の各桁はすべて同じ諸元で、支間中央部の横桁で連結されている。なお、この横桁には変状がないものとする。

試算のケースは、初期の健全状態 ( $ID(t)=1$ ) に対して、劣化した桁が、一番外側 (G1) に位置する場合および幅員方向の中央 (G3) に位置する場合とした。劣化桁の腐食率とその分布を図-9に示す。この試算では簡単のため、各区間の腐食率分の曲げ耐力およびせん断耐力の低下が生じるものとする。すなわち、腐食率 20% の区間では、各耐力が初期の健全状態よりも 20% だけ低下しているものとする。また、一番外側の桁の荷重負担割合は、

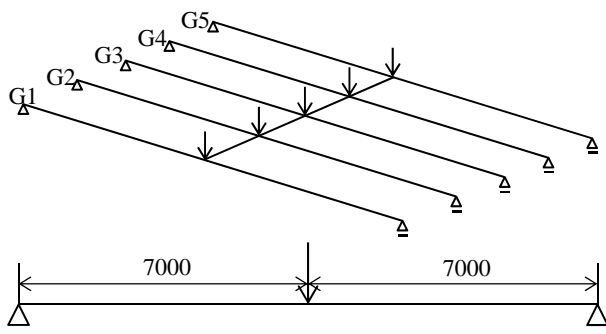


図-8 対象構造物の荷重条件 (単位:mm)

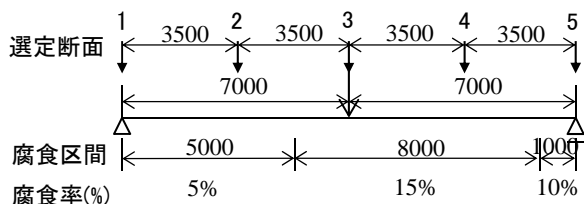


図-9 劣化桁の腐食率とその分布 (単位:mm)

G2~G4 の 1.2 倍であるとする。

断面の構造・耐久性能指数算出のための抽出断面の位置を図-9に示す。各桁の軸方向等間隔の5断面(3500mm間隔)とした。劣化桁の構造・耐久性能指数の算出結果を表-2に示す。また、劣化桁がG1, G3である場合のそれぞれの算出結果を、表-3および表-4に示す。

劣化桁の指数  $id_j(t)$  は 0.711 となり、断面ごとの指数は、曲げモーメントとせん断力の作用が大きく、腐食率の大きい断面4において小さい値となった。また、全体系の指数  $ID(t)$  は、G1 桁が劣化した場合が 0.917、G3 桁が劣化した場合が 0.921 で、負担割合が 1.2 倍程度では大きな差として現れなかったが、荷重条件の厳しい部位での腐食が影響することを数値で表すことができたといえる。

なお、委員会報告書では、荷重負担割合、腐食率あるいは選定断面箇所の影響についてパラメトリックに試算を行っている。今後は、実際の点検との整合性や数値の妥当性について、多くのケーススタディが必要である。

## 5. 補修・補強手法の評価

WG4 では、鋼材腐食に対する補修・補強マニュアル外に関する調査、実構造物を対象とした鋼材が腐食した構造物の性能評価の試みと補修・補強事例、鋼材が腐食した部材の補強効果、鋼材が腐食した構造物の補強の要否を判断する指標と補修・補強手法の選択、に関する調査・研究を行ってきた。以下にその代表的な成果を示す。

### 5.1 実構造物を対象とした鋼材が腐食した構造物の性能評価の試みと補修・補強事例

道路構造物、港湾構造物、建築物に対する性能評価事例と補修・補強事例に関する調査を進めた。ここでは、

表-2 劣化桁の構造・耐久性能指数

劣化桁	$M(x_i)/M_{max}$	$V(x_i)/V_{max}$	$W_{corr}$	$\alpha_M$	$\eta_M$	$\alpha_V$	$\eta_V$	$id(x_i)$
断面1	0.0	1.0	0.05	1.00	0.95	0.95	0.95	0.857
断面2	0.5	1.0	0.05	0.98	0.95	0.95	0.95	0.836
断面3	1.0	0.0	0.15	0.85	0.85	1.00	0.85	0.614
断面4	0.5	1.0	0.15	0.93	0.85	0.85	0.85	0.568
断面5	0.0	1.0	0.10	1.00	0.90	0.90	0.90	0.729
							$ID = \sum/n =$	0.711

表-3 G1 劣化桁のケース

桁	$\alpha_{Aj}$	$\alpha_{Dj}$	$id_j$	$\alpha_{Aj} \cdot \alpha_{Dj} \cdot id_j$
G1	1.0	0.8	0.711	0.583
G2	1.0	1.0	1.00	1.00
G3	1.0	1.0	1.00	1.00
G4	1.0	1.0	1.00	1.00
G5	1.0	1.0	1.00	1.00
			$ID = \sum/n =$	0.917

表-4 G3 劣化桁のケース

桁	$\alpha_{Aj}$	$\alpha_{Dj}$	$id_j$	$\alpha_{Aj} \cdot \alpha_{Dj} \cdot id_j$
G1	1.0	1.0	1.00	1.00
G2	1.0	1.0	1.00	1.00
G3	1.0	0.9	0.711	0.60
G4	1.0	1.0	1.00	1.00
G5	1.0	1.0	1.00	1.00
			$ID = \sum/n =$	0.921

紙面の都合から、その一つとして、港湾構造物に対する新しい定量評価の試みの事例を紹介する。

現在、栈橋 RC 上部工については、目視により判定された劣化度 d, c, b, a を部材の保有性能の評価値とし、これを基に補修・補強の方針が検討されている。栈橋 RC 上部工の保有性能を数値的に評価する試みは、これまで多数事例が存在する。その多くは、劣化度を近似的に間隔尺度(距離の等価性が保証されている)とみなして、0, 1, 2, …の様に等間隔の評点を与えたものである。

加藤らは、劣化度 d, c, b, a と判定された栈橋 RC 上部工で、実際にどの程度の性能低下が生じているのかを把握するため、既存の栈橋等から採取した RC 部材 40 体の劣化度と部材の曲げ耐力の関係について調査を行った<sup>6)</sup>。その結果を図-10に示す。劣化度と耐力比の関係には、かなりばらつきが見られるものの、劣化度 c~a と判定された部材において、耐力比が 1.0 以下となるものが存在している。つまり、安全側の判断としては、外観に変状が認められる RC 部材の曲げ耐力は初期値を下回る可能性がある。図-11に RC 部材の劣化度判定結果と耐力性の関係に関するばらつきを効率よく取り扱うために、確率論を用いて上記の関係を整理した結果を示す。この図は、例えば、それぞれの劣化度で部材数の 95% が示す耐力比は、劣化度 c の部材では 0.72、劣化度 b の部材では 0.65、劣化度 a の部材では 0.35、のように使用することができる。

上記の簡易な性能評価指標は目視による劣化度判定のみであり、あくまで劣化度として表されたみなし性能を評点化するための手法にすぎない。しかし、これを用い

ることにより、例えば表-5 に示すごとく、劣化度判定結果を用いて複数について評点化された施設毎の保有性能を比較することにより、劣化進行程度からみた施設毎の対策優先順位を決定できる。これは、結果として、港湾の施設・構造物群の効率的な維持管理の実現に繋がるものと期待される。

### 5.2 鋼材が腐食した部材の補強効果

既設の RC、PC 構造物において鋼材腐食が発生した場合の補強については、断面修復や表面被覆、さらには連続繊維シート接着が広く適用されているものと考えられる。これまでに、腐食した鉄筋を有するはり供試体に対して正負交番荷重を行い、炭素繊維シートの横拘束量が補強後の曲げ変形特性に与える影響を検討した研究<sup>7)</sup>があり、短期の延命を目的に、腐食鉄筋をそのまま使用した場合であっても、一定の補強効果を期待できることが確認されるとともに、その評価の留意点などが明らかになりつつある。

### 6. おわりに

本委員会では、2 年間の活動において、鉄筋腐食を生じたコンクリート構造物の構造・耐久性能を時空間で数値的に表現可能な評価手法としての数値構造解析の利用手法と構造・耐久性能指数の枠組みを示した。予測手法としてこれらを実践的に利用するためには、点検等により得られた離散化された入力データを空間的なスケールを越え、かつばらつきのある時間変化を捉えつつ引き渡す場合の問題点について調査研究が進められる必要があることが分かった。また、構造・耐久性能指標を利用した補修・補強効果の定量化についても引き続き議論を深める必要があるといえる。

### 参考文献

- 1) 大屋戸理明, 金久保利之, 山本泰彦, 佐藤勉: 鉄筋の腐食性状が鉄筋コンクリート部材の曲げ性状に与える影響, 土木学会論文集 E, Vol.62, No.3, pp.542-554, 2006.8
- 2) 金螢来, 野口貴文, 長井宏憲: 腐食形態を考慮した腐食鉄筋の力学的特性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.1395-1400, 2007
- 3) 長岡和真, 阿部哲雄, 番場俊介, 村上祐貴: 主鉄筋の腐食膨張挙動に対するコンクリートの拘束圧に基づく付着割裂性状評価, コンクリート工学論文集, Vol.24, No.2, 2013 (掲載決定)
- 4) 米田直也, 丸山久一, 清水敬二, 柳益夫: 鉄筋の発錆による付着劣化機構, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.2, pp.81-86, 1992
- 5) 土木学会: 続・材料劣化が生じたコンクリート構造

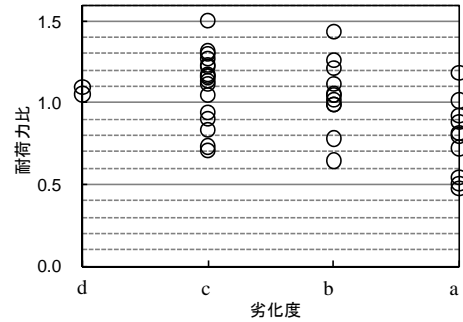


図-10 劣化度と耐荷力比の関係<sup>6)</sup>

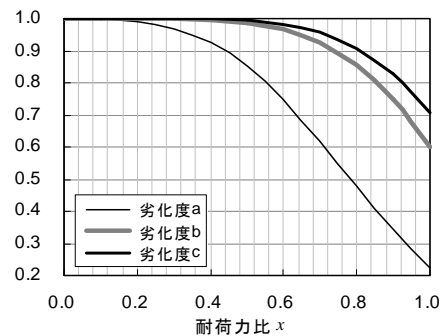


図-11 耐荷力比が  $x$  以上となる確率<sup>6)</sup>

表-5 期待最小耐荷力比 (累積確率 95%)<sup>6)</sup>

施設	劣化度の代表値		施設全体		ブロック最小値	
	はり	床版	はり	床版	はり	床版
①	c	c	0.716	0.758	0.709	0.684
②	c	c	0.875	0.885	0.790	0.797
③	c	c	0.697	0.710	0.674	0.696
④	c	c	0.714	0.707	0.703	0.687
⑤	c	c	0.709	0.705	0.680	0.684
⑥	c	c	0.695	0.700	0.658	0.678
⑦	c	c	0.700	0.709	0.663	0.678

物の構造性能, コンクリート技術シリーズ, No. 85, 2009

- 6) 加藤絵万, 川端雄一郎, 岩波光保, 横田弘: 港湾 RC 構造物の確率論に基づく保有性能評価の試行, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.67, No.1, pp.150-159, 2011
- 7) 山本貴士, 柚本真介, 服部篤史, 宮川豊章: 腐食鉄筋を有する炭素繊維シート横拘束曲げ部材の変形特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp.1093-1098, 2001.
- 8) 山本貴士, 服部篤史, 宮川豊章: 鉄筋腐食が炭素繊維シート補強 RC 曲げ部材の耐荷特性に与える影響, 第3回コンクリート構造物の補修・補強・アップグレード論文集, 第3巻, pp. -, 2003年10月