

論文 コンクリート構造物の劣化診断システムの構築

伊代田 岳史^{*1}, 矢島 哲司^{*2}, 魚本 健人^{*3}

要旨: コンクリート構造物に発生しているひび割れや表面劣化等の劣化現象から劣化原因を推定するシステムを構築した。また、推定された原因別に劣化予測と劣化レベルを判定するためのシステムを構築することを目指し、その第1段階として塩害に注目して内部鉄筋の腐食に関して、環境条件、材料条件、構造条件等の情報から腐食因子の浸透に始まり耐荷性・たわみ性の評価までを統一的に検討できるシステムを構築した。また、塩害によるひび割れを基に新たな劣化レベル判定手法を提案した。

キーワード: 劣化診断支援システム, 劣化原因推定, 劣化予測, 劣化レベル, 鉄筋腐食

1. はじめに

日本の経済成長も終わりを告げ、既設構造物をメンテナンスして使途する考えが必要不可欠となってきた。コンクリート構造物は様々な劣化原因により耐力低下するが、その全ての構造物に対してメンテナンスするのは非合理的である。より合理的に構造物のメンテナンスを行うためには、劣化度を定量的に把握し、いつ、どの構造物にメンテナンスを行うかを判定する必要がある。現在、劣化診断はJRやJHなどの各機関ごとに行われており、それぞれ独自の維持管理や点検等を行っている。しかし、その多くは主に輪荷重等の物理的要因に着目しており、塩害等の化学的要因で検討している例はほとんどない。また、劣化診断に関する考え方が各機関ごとに統一的でないために、実際の構造物の診断には多くの専門家が必要となっているのが現状である。

本研究では、劣化要因の中で化学的要因に注目し、構造物の環境条件と簡易な目視検査により得られるひび割れや表面劣化等の劣化現象から劣化原因を推定するシステムを構築することを目的とした。また、推定された劣化原因のうち、鉄筋の腐食を例にとり、劣化予測が可能で劣化レベルを判定できる統一的なシステムを構築した。

2. 劣化診断支援システムの概要

劣化診断支援システムは、環境条件や目視検査等の情報から劣化原因の推定と劣化予測・劣化レベルの判定が可能な総合システムである。その内容は劣化原因の推定と劣化度の判定である。劣化原因推定では、コンクリート構造物に対して環境立地条件と簡易目視検査によるひび割れや表面劣化等の劣化現象を基に、劣化原因を推定する。劣化度判定では、推定された原因別に劣化予測曲線を取得し、各種原因を考慮して総合的に構造物を診断し、劣化レベルを判定する。

本研究はその第1段階として、総合的な劣化原因の推定の確立と、劣化要因として最も多いと考えられる鉄筋腐食に関する劣化予測曲線を取得し、劣化レベル判定を確立する手法を提案した。

3. 劣化原因推定システム

劣化原因推定システムは、構造物の立地環境条件、構造形態、誰でも行える簡易な目視検査の結果を基に劣化原因を推定できるシステムである。このシステムは非専門家にも推定できるように視覚的にわかりやすく、簡易な質問のみで構築した。劣化原因を推定する方法として、知識一覧表を作製しその表とパターンマッチングを行う。

*1 東京大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (正会員)

*2 芝浦工業大学教授 工学部土木工学科 工博 (正会員)

*3 東京大学国際・産学共同研究センター教授 工博 (正会員)

3.1. 知識一覧表の構築

コンクリート構造物は、施工条件、環境要因(内的・外的)、構造設計、コンクリートの品質等により劣化原因を誘発し、様々な劣化現象を引き起こす。これを逆問題としてとらえれば、現時点で発生している劣化現象と環境要因を組み合わせることで劣化原因を推定できる。そこで、教科書や文献をもとに、劣化原因が起これる環境条件、劣化原因が誘発されることで発生する劣化現象を調査した。その調査結果をもとに、構築した知識一覧表の一部を表1に示す。表中の●はその劣化原因では起こり得ない劣化現象を示している。

3.2. 推定方法

先ほどの知識一覧表を用いて劣化原因を推定するために環境条件と劣化現象の質問事項に上から回答する。当てはまる場合には○、よく分からない場合には△、当てはまらない場合には×をつけていく。パターンマッチングにおいては×のつけられた項目に関しては、●のつけられている劣化原因の可能性がないものとしてその劣化原因を除外する。一方、○、△をつけられた項目に関しては可能性があるものと考え、その劣化原因を考慮する。そのような方法で最後まで診断していくことで最終的に残ったものが劣化原因の可能性のあるものと判定する。その一例を表1に示した。構

造物を観察して回答欄に診断結果を示していくことで、最終的にこの場合では中性化とアル骨、乾燥収縮の可能性があると推定できた。

4. 劣化予測(塩害編)

4.1. 塩害による劣化の進行過程

従来から塩害による構造物の劣化進行過程は図1に示すモデルが一般的に用いられてきている¹⁾。

このモデルでは塩害による構造物の劣化進行過程を潜伏期、進展期、加速期、劣化期の4ステージに分けて説明するものである。ステージⅠは、構造物の供用開始を起点としてコンクリート中の鉄筋が腐食するまでの期間を指す。つまり外部環境から鉄筋腐食を誘発する因子がコンクリート中に浸透し、その浸透量が鉄筋周辺で許容量を超えるまでの期間である。ステージⅡは鉄筋の腐食開始を起点としてコンクリートに腐食ひび割れが発生するまでの期間を指す。鉄筋が腐食することで生じる腐食生成物が、膨張圧によりかぶりコンクリートにひび割れを生じさせる期間である。その後のステージⅢ、Ⅳではコンクリート構造物を供用する上で、腐食によるひび割れの拡大による明らかな問題が生じるまでの期間である。ここでは鉄筋の腐食量、腐食速度がひび割れの影響を受けることになる。本研究ではこのようなモデルを解析的に検討して統一的に劣化予測を行う。

表1 知識一覧表と推定例

		回答	中性化	塩害	アル骨	凍害	乾燥収縮	温度応力	化学腐食	疲労
Q1	海岸・海洋環境	×		●						
Q2	水の供給がある	○	●	●	●	●				
Q3	高温下	○	●	●	●					
Q4	凍結・融解を繰り返す	×				●				
Q5	交通量の多い	×								●
Q6	温泉・酸性雨・噴気孔	×							●	
Q7	下水道施設	×							●	
Q8	大断面構造物	×						●		
Q9	亀甲状 or 軸方向	○			●	●				
Q10	鉄筋に沿ったひび割れ	△	●	●					●	●
Q11	梯子状	×								●
Q12	斜めひび割れ or 縦ひび割れ	○					●			
Q13	ハの字型・逆ハの字型 or 水平方向	×						●		
Q14	その他のひび割れ	×				●				
Q15	スケーリング	×				●				
Q16	錆汁の流出	△	●	●						
Q17	白色ゲル・黄土色・黒ずんだ汚れ	△			●					
Q18	藍色	×							●	
Q19	漏水	×								●
Q20	遊離石灰	×								●
Q21	骨材露出	×							●	
Q22	脆弱化	×				●			●	

4.2. 解析手法

まず、ステージⅠの外部環境からの腐食誘発因子（酸素、水、塩化物イオン）の浸透について考える。本研究においては簡易に考えるために塩化物イオンのみに注目した。塩化物イオンの浸透は丸屋らの拡散方程式²⁾(1)を適用することで塩化物イオンの浸透深さを経時的に求めた。

$$C(x, t) = S\sqrt{t} \left\{ \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right) - \frac{x\sqrt{\pi}}{2\sqrt{Dt}} \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right\} \quad \dots(1)$$

ここに、

S : 表面塩分量係数, t : 供用期間(days)

D : 塩分の見かけの拡散係数(cm^2/day)

x : コンクリート表面からの距離(cm)

また、かぶり位置（鉄筋下面）に蓄積される塩分量と腐食量の関係については、森永の練り混ぜ水に含まれる NaCl 量から鉄筋腐食速度を予測できる腐食速度推定式³⁾を適用した。本研究では、浸透してきた塩化物イオン量が鉄筋下面に到達した時に森永の提案している鉄筋腐食速度になると仮定した。そこで、ある濃度の塩化物イオンが到達したときの速度 q を持つものとした。

次にステージⅡにおける腐食開始と腐食ひび割れの発生過程を考える。腐食開始時期に関しては、かぶり位置においてある濃度 $CI1$ （コンクリート重量で 0.05wt%）の塩化物イオンが到達した時点と仮定し、 Δt_1 後に濃度 $CI2$ がかぶり位置に到達するとして、腐食過程を経時的にモデル化した。ここで、 Δt_1 間は濃度 $CI1$ が作用すると考えて腐食量 $\Delta Q = q \cdot \Delta t_1$ を算出し、 t years 後の総腐食量 Q をその積分値として算出した。

一方、腐食ひび割れの発生時期に関しては、森永のひび割れ発生時の腐食量を求める式(2)³⁾により腐食ひび割れが発生するための総腐食量を算出し、先ほど求めた総腐食量 Q が、ひび割れ発生時の腐食量 Q_{cr} に達したときにひび割れが発生すると考えて腐食ひび割れ発生時期を算出した。

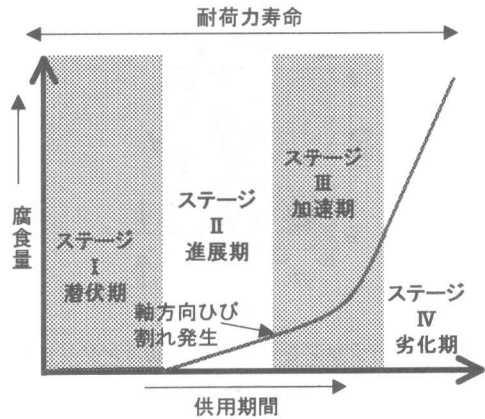


図1 塩害による劣化進行過程⁴⁾

$$Q_{cr} = q \cdot t = K \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^\beta r_1 \quad \dots(2)$$

ここに、 Q_{cr} : ひび割れ発生時の腐食量

r_1 : 内筒（鉄筋）半径

r_2 : 外筒（シリンドー）半径

K, β : コンクリートでは $K=1.204$,
 $\beta=0.85$

腐食ひび割れが軸方向に発生した後の腐食速度に関しては対象とするコンクリート構造物が腐食性環境下にあることから、濱田らの文献¹⁾より $10.2\text{mg}/\text{cm}^2/\text{year}$ で一定とした。ステージⅢ、Ⅳでは構造物の供用性を確かめるために耐荷性、たわみ性の評価をする。腐食による生成物の膨張と鉄筋径の減少を考え、鉄筋径の減少から耐荷力がどのような経時変化をするかを計算した。耐荷性、たわみ性には JCI の「コンクリート構造物のリハビリテーション研究委員会報告書」⁴⁾で提案されている曲げ引張破壊耐力の算定式と断面二次モーメントの算定式を適用した。これらを一連の塩害環境下における劣化予測モデルとして解析手法を構築した。

5. 解析結果

5.1. 解析のモデルと解析条件

図2に示す $10 \times 15\text{cm}$ のスターラップのない

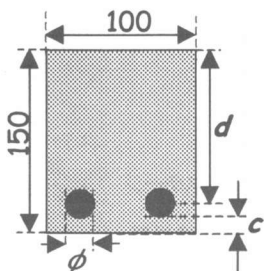


図2 スターラップをもたない鉄筋コンクリート
断面モデル

鉄筋コンクリート断面を想定し4章の手法により塩分浸透から腐食の開始時期、腐食ひび割れの発生時期と耐力力の低下の様子を求める解析を行った。解析条件は表2に示す材料条件のそれぞれの値を用いた。パラメータとして表3に示すように環境条件と構造条件のうちかぶりと鉄筋径を取り上げた。また、図3に示すスターラップを有する断面においても検討を行った。

5.2. 解析結果とその考察

解析により得られた腐食開始、ひび割れ発生時期の一覧を表4に示す。

【環境条件】

かぶり 2cm, 鉄筋は径 13mm を使用し、環境条件として海上栈橋を取り上げ、杭などにおける干満部を感潮部、栈橋スラブ下面等を飛沫帯、栈橋スラブ上面を海上大気中として3種類を取り上げた。この区分により式(1)中の S が変化し、塩分浸透速度に大きく影響を与えることとなる。腐食の開始時期からひび割れ発生までに要する時間はどの環境においてもさほど変わりはない。しかし、腐食開始までに要する時間が海上大気中では大幅に増大することがわかる。これは表面に存在する塩分濃度により浸透速度が変化するためである。耐力力、たわみ性に関しては感潮部と飛沫帯では差がみられなかった。

【かぶり】

環境条件を感潮部、鉄筋は径 13mm を使用し、かぶりを 1cm~5cm まで 0.5cm 刻みで変化

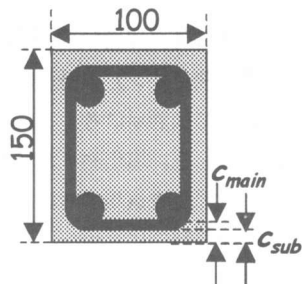


図3 スターラップを有する鉄筋コンクリート
断面モデル

表2 解析条件一覧

配合 (kg/m ³)				
W/C	W	C	S	G
0.53	180	340	962	948

コンクリート	
塩化物拡散係数(cm ² /day)	2.74×10^{-3}
圧縮強度(MPa)	30
弾性係数(N/mm ²)	28000

鉄筋	
降伏強度(MPa)	295
弾性係数(N/mm ²)	210000
鉄筋密度(mg/cm ³)	7850
鉄筋錆密度(mg/cm ³)	3140

表3 パラメーター一覧

環境条件	表面塩分量係数		海上大気中	7.43×10^{-4}
			飛沫帯	4.76×10^{-3}
			感潮部	6.91×10^{-3}
構造条件	かぶり	c	1.0cm~5.0cm (0.5cmきざみ)	
	鉄筋径	φ	9,13,19,25mm	

表4 解析結果

			腐食開始時期ひび割れ発生	
			years	years
Case1	環境条件	感潮部	2.70	6.29
		飛沫帯	3.32	6.76
		海上	25.00	28.97
Case2	かぶり	1.0cm	1.26	1.93
		1.5cm	1.97	3.77
		2.0cm	2.70	6.29
		2.5cm	3.39	9.53
		3.0cm	4.07	13.55
		3.5cm	4.71	16.81
		4.0cm	5.34	24.06
		5.0cm	6.52	37.36
Case3	鉄筋径	9mm	2.69	7.40
		13mm	2.69	6.29
		19mm	2.69	5.60
		25mm	2.69	5.23

させた。図4に示したように腐食の開始時期はかぶりが厚くなるほど比例的に遅くなっていくのがわかる。一方、腐食ひび割れの発生時期は指数関数的に遅くなっていく。これはかぶりが厚いほどひび割れを発生させるために必要な膨張力が大きくなり、そのためにより多くの腐食量が必要となるためである。図5は供用開始時の構造物の耐力力を1としたときの耐力比を表したものである。図から耐力はひび割れ発生とともに大きく低下し始めることがわかる。これはひび割れの発生後は、鉄筋が直接外部環境にさらされると仮定して同値の腐食速度を与えているためである。たとえば5%の耐力低下を終局と仮定するとかぶり3cmではひび割れ発生から5年で終局状態に移行するといえる。

【鉄筋径】

かぶり2cm、環境条件を感潮部として鉄筋径を変化させた。表4の解析結果より腐食の開始はかぶりが同じため同じである。しかし、ひび割れの発生は径が大きくなるにつれて早くなることがわかる。これは今回のモデルが鉄筋の周りに均一に腐食生成物が発生し膨張すると仮定しているためであり、鉄筋径が大きくなるほど腐食量は多くなるためである。耐荷性やたわみ性に関しては、ほとんど相違はない結果となった。

【スターラップを有する構造物】

図3のようにスターラップを有する構造物は、一般的にスターラップの方が鉄筋の径は小さい。解析においてはスターラップに9mm筋を、主鉄筋には13mm筋を用いた。これによりスターラップのかぶりを2cm、主鉄筋のかぶりが2.9cmとなる。この二つの鉄筋を有する構造物を独立的に考えて解析した結果を図6に示す。かぶりの違いによりスターラップの方が主鉄筋に比べて早く腐食すると考えられる。図よりスターラップを有する構造物は、スターラップが先に腐食しひび割れを発生させ、その後主鉄筋がひび割れを発生させるという二段階の腐食ひび割れが発生することがわかる。構造物において配筋方向に発生するひび割れは耐力的に大きな影響はない。しかし、

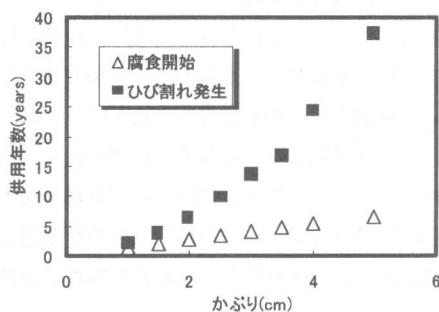


図4 かぶりによるひび割れ発生時期の比較

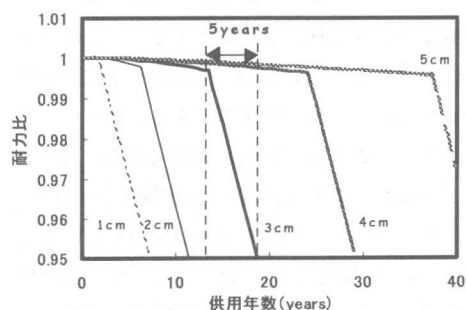


図5 かぶりによる耐力比の経時変化

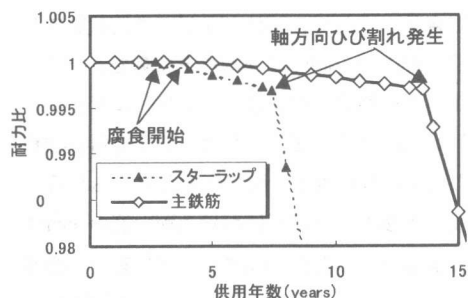


図6 スターラップを有する構造物の耐力比変化

配筋方向のひび割れから塩分浸透が促進され、主軸方向にひび割れが発生すると配筋ひび割れと交差した部分のかぶりコンクリートの剥離・剥落を招き、構造物の耐力に大きな影響を与えると考えられる。

6. 劣化診断への応用

6.1. 目視検査を目的とした劣化診断への適用

コンクリート構造物を診断して劣化レベルを判

定するためには最も簡易な方法として目視検査があげられるが、その手法のほとんどは、ひび割れ幅やひび割れ密度といった数値的に表現できる指標によって劣化レベルを定量的に表している。しかし、それらの判定基準の多くはさほど大きな意味を持っていない。たとえば配筋が密な構造物であれば粗な構造物に比べ、同時期に腐食を開始したとすると、腐食ひび割れによるひび割れ密度は大きくなる。

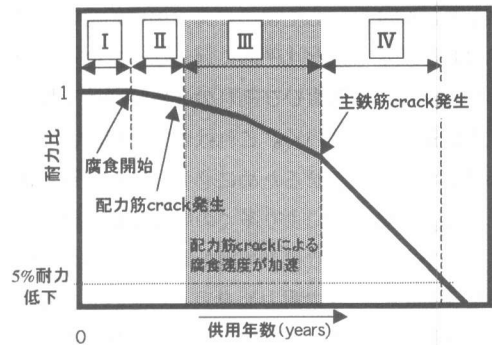


図7 劣化レベル評価

6.2 劣化レベル判定手法

スターラップを有する構造物で二段階に発生する腐食ひび割れを基に想定した劣化レベルのランク分けを図7に示す。図は5%耐力低下に至るまでの耐力比を、ひび割れを利用することでランク分けしたものである。実際、実構造物ではスターラップの腐食によるひび割れは、鉄筋径が小さく、また軸力・曲げによる軸方向力が作用しているため小さなひび割れとなることが多く、また曲げひび割れ等と区別しにくい為、認識するのが難しい。また一般に腐食開始時期は目視検査ではわからないが、腐食が開始すると錆汁が表面に現れるため認識できる。そこで、錆汁が発見できた状態をレベルII、配力筋方向のひび割れを認識できたらレベルIII、主鉄筋方向のひび割れでレベルIVとランク分けした。この手法によれば、簡易な目視検査によりの確に構造物を診断できると考えられる。

今後、図9のレベルIIIにおける配力筋の crack による腐食速度の変化を確かめる解析を行う必要がある。また、曲げや乾燥収縮等による初期ひび割れや施工不良が存在する場合の腐食の進行を明らかにするとともに、中性化やコンクリートの弾性係数が劣化とともに経時的に変化するアルカリ骨材反応、凍害等の劣化原因についても劣化レベルを構築する必要がある。それにより、さらに現実的な劣化レベルのランク分けが可能となり、劣化診断に役立てられると考えられる。

7. まとめ

本研究における成果を以下にまとめる。

- ①構造物の設置されている環境条件と簡易な目視検査により劣化原因を推定できる方法を構築できた。これにより、補修・補強工法選択支援や原因別の劣化予測の可能性を示した。
- ②様々な研究の成果を組み合わせることで、鉄筋コンクリート構造物の塩害による鉄筋腐食を経時的に評価できるシステムの基本を構築できた。
- ③塩害による鉄筋腐食予測システムから新たな劣化レベルの判定手法を考え、より現実的な診断方法を考えることができた。

謝辞

本研究をまとめるにあたり、千葉工業大学卒論生飯塚康弘君、東大生研の加藤佳孝助手にご助力いただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 濱田宏, 丸山久一, 下村匠, 青山敏幸: 腐食性環境下における鉄筋コンクリート構造物の劣化予測モデル, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.811-816, 1997
- 2) 丸屋剛, 宇治公隆: コンクリートへの塩分の拡散浸透に関する表面塩分量の定式化, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.11, No.1, pp.597-602, 1989
- 3) 森永繁: 鉄筋の腐食速度に基づいた鉄筋コンクリート建築物の寿命予測に関する研究, 東京大学博士論文,
- 4) JCI: コンクリート構造物のリハビリテーション研究委員会報告書, 1998.10