

論文 季節変動条件を考慮した RC 部材の鉄筋腐食進行モデルと評点法による性能評価手法

森田 祐介^{*1}・森川 英典^{*2}・小林 秀恵^{*3}

要旨：異なる季節における実 RC 部材の点検データを用いて季節変動を考慮した鉄筋腐食速度を評価し、鉄筋腐食進行モデルの構築を行った。また、鉄筋腐食を表現した RC はり供試体を作成し、荷重試験および試験データを導入した解析を行うことで、鉄筋腐食による RC 部材の性能低下の評価を行い、既往の研究との比較を行った。そして、これらの結果に基づき、著者らが従来の研究において構築した評点法による性能評価方法の高精度化を検討し、実 RC 部材の性能評価を行い、評価手法の信頼性を検証した。

キーワード：季節変動、自然電位、分極抵抗法、鉄筋腐食、RC 部材、評点法、性能評価

1. はじめに

近年、RC 構造物の劣化が社会問題化し、合理的な維持管理法の実用化が望まれている。

本研究では、既往の研究の課題¹⁾をふまえ、異なる季節における実 RC 部材の点検データを用いて、季節変動を考慮した鉄筋腐食速度の評価を行い、鉄筋腐食進行モデルの構築を行った。また、鉄筋腐食を考慮した RC はり供試体を作成し、曲げ破壊試験および試験データを導入した解析を行い、鉄筋腐食による RC 部材の性能低下を評価し、既往の研究との比較を行った。そして、著者らが従来の研究で構築した評点法の高精度化を検討し、実 RC 部材の性能評価を行った。また、同じ部材の異なる時期に行われた点検データによる性能低下の予測結果を比較することで、評点法の信頼性を検証した。

2. 季節変動を考慮した RC 部材の鉄筋腐食進行モデルの構築

2.1 季節変動を考慮した腐食電流密度式の構築

(1) 鉄筋腐食性状の概念

部材点検データより、鉄筋腐食速度を正確に

評価することは、評点法の信頼性のため重要であるが、分極抵抗値は観測時の温度や水分量等の条件で大きく変化するため、現状では分極抵抗法から正確な腐食速度を評価することは難しい²⁾。ある季節の分極抵抗値だけでは、鉄筋腐食量を過大・過小評価してしまう可能性が高い。

図-1 に、鉄筋腐食量・鉄筋腐食速度と時間の関係を示す。鉄筋の腐食速度は、時間の経過により、周辺環境や内在塩分などの影響を受けて増加し始め、それに伴い鉄筋腐食量も増加する。既往の研究¹⁾では、腐食速度は図の平均値のように増加し続けるものとして捉えていたが、腐食速度は、季節により活性期と不活性期を繰り返す、その値が変化することが明らかとなっている（図中の実際の挙動）。それにより、腐食量の増加量にも変化が生じる。平均挙動は、図のように実際の腐食速度の時間平均を取ったものである。図に示した腐食速度の変動性により、一つの季節の点検データだけで腐食速度の実際の挙動を捉えることは、困難である。

図-2 は、鉄筋腐食量、腐食速度、ひび割れ幅の関係である。係数 a および α の関係³⁾は、平均的な腐食速度の挙動を対象とした実験データに

*1 神戸大学大学院 自然科学研究科建設学専攻（正会員）

*2 神戸大学助教授 工学部建設学科 工博（正会員）

*3 神戸大学 工学部建設学科（正会員）

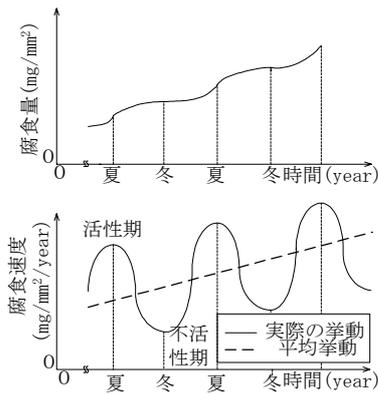


図-1 季節による鉄筋腐食量・腐食速度の変動の概念

基づいており、季節変動をもつデータを平均的な腐食速度に対応させる補正をせず、図-2 の関係に持ち込むことは、大きな誤差を含むと考えられる。また、係数 α は、季節変動の影響を受け、係数 a は、材料強度に起因する係数であり、かつ α の影響も受ける係数である。ここで、式(1)に季節変動を考慮した腐食電流密度式を提案する。この式では、 k_{v0} の値は 33mV^4 で一定の値とし、補正係数 η で季節変動を考慮する。

$$\begin{aligned} i_{corr} &= k_v / R_p \\ k_v &= \eta \cdot k_{v0} \\ \eta &= f(a, \alpha) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 i_{corr} : 腐食電流密度 (A/cm^2)
 k_v : 金属の種類、環境によって決定する係数 (V)
 R_p : 分極抵抗 (Ωcm^2)
 k_{v0} : 33mV で一定
 η : 補正係数
 a : 鉄筋径とかぶりによる係数
 α : かぶりによる係数

(2) 腐食速度を求める係数の定量化

以下に補正係数 η を求める方法を示す。評価対象となる部材を点検し分極抵抗等の値を得る。次に、対象部材から採取した鉄筋より鉄筋腐食量を求め、図-2 の関係より、次の関係が導かれる。

$$\sigma = \frac{\alpha}{a} y \quad (2)$$

ここで、 y : 鉄筋腐食量 (mg/mm^2)
 式(2)より求めた腐食速度は図-1 の平均値であり、季節変動考慮のため、式(3)に示

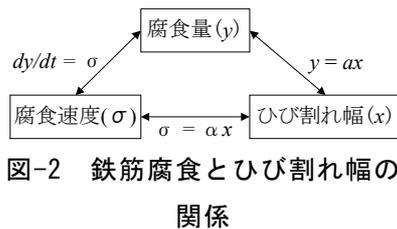


図-2 鉄筋腐食とひび割れ幅の関係

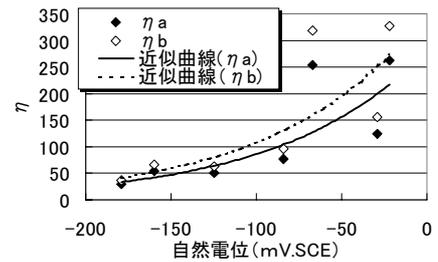


図-3 η - 自然電位関係

す新たな補正係数 η' を式(2)に導入する。

$$\sigma = \eta' \frac{\alpha}{a} y \quad (3)$$

η' の値は、本来詳細な点検に基づき決定すべきものだが、本研究ではとりあえず、冬期のデータに関しては 0.8 、夏期のデータに関しては、 1.2 と仮定した。そして、式(3)で求まる腐食速度に対応する η を求める。この際に求まる 2 つの η の値を、 η' に 0.8 もしくは 1.2 を用いて求めた η を η_a (季節変動を考慮)、季節変動を考慮しないものを η_b とした。分極抵抗は、鉄筋採取と同時期に点検された鉄筋採取位置における値の最小値を用いる。そして、季節変動を考慮した値・考慮しない値のそれぞれより、図-3 のような η と自然電位の近似関係を得る。分極抵抗と自然電位は電気化学的に直接関係ないものであり、季節条件である温度・水分から評価するのが本来の目的であるが、それらのデータを測定箇所ごとに把握することは労力を伴うため、温度・水分の影響を受けると考えられる自然電位を間接的な指標とし研究を行った。これが、腐食電流密度式の補正係数 η を表す関係式となる。 η と自然電位との間に十分な相関が得られない際は、さらに η と他の点検データの関係を調べ、得られた有用な関係より、腐食電流密度式の精度向上の必要性がある。

2.2 実 RC 部材による補正係数の決定

実 RC 部材の点検データを用いて、以上で検討した手法により補正係数 η を決定する。部材は道路施設の RC 天井版である。点検項目は、分極抵抗・自然電位など現場

表-1 採取鉄筋ごとの腐食減量率・腐食速度

点検年月	腐食減量率 (%)	腐食速度 (η' :1.0) (mg/mm ² /year)	η_b (η' :1.0)	腐食速度 (η' :0.8 or 1.2) (mg/mm ² /year)	η_a (η' :0.8 or 1.2)
H.11 9月	6.38	0.91	9.7	1.09	11.6
	5.82	0.83	14.4	0.99	17.2
	6.05	0.86	25.9	1.03	31.1
H.12 11月	5.62	0.80	327.6	0.64	262.1
	1.92	0.27	96.6	0.22	77.3
	3.25	0.46	66.9	0.37	53.5
11月	5.03	0.71	37.2	0.57	29.7
	3.94	0.56	317.8	0.45	254.2
	0.00	0.00	0.0	0.00	0.0
	7.83	1.11	156.0	0.89	124.8
	2.46	0.35	63.8	0.28	51.0

におけるもの、現場から採取された鉄筋の引張試験・重量測定から求まる鉄筋腐食量がある。鉄筋腐食減量率は降伏強度の低下率より式(4)⁵⁾を用いて評価した。

$$\sigma_{cy} = (1 - 1.98(\Delta w / 100)) \cdot \sigma_{sy} \quad (4)$$

ここで、 Δw : 腐食減量率(%)

σ_{cy} : 腐食後の降伏強度

σ_{sy} : 健全時の降伏強度

表-1 に各鉄筋データより求めた2つの腐食速度と η の値を示す。そして、自然電位と η の関係より、以下に示す関係式を得た。この際、用いた自然電位は該当する鉄筋採取箇所において最も卑な値である。

$$\eta_a = 54.2 \exp(0.0059E), R^2 = 1.00 \quad (9月) \quad (5)$$

$$\eta_b = 45.2 \exp(0.0059E), R^2 = 1.00 \quad (9月) \quad (6)$$

$$\eta_a = 282.6 \exp(0.012E), R^2 = 0.77 \quad (11月) \quad (7)$$

$$\eta_b = 353.2 \exp(0.012E), R^2 = 0.77 \quad (11月) \quad (8)$$

ここで、 E : 自然電位(mV.SCE)

R^2 : 相関係数

高い相関があるこれらの関係式を腐食電流密度式の補正係数 η の式とし、分極抵抗・自然電位の観測値から腐食速度を求め、鉄筋の点検データより求めた腐食速度と比較を行った。図-4に腐食速度の比較を示す。良い精度で腐食速度の推定ができています。

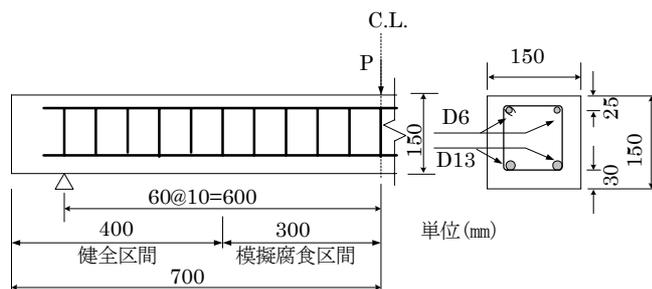


図-5 RCはり供試体側面図・断面図

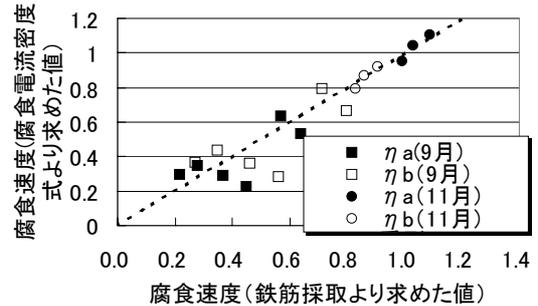


図-4 腐食速度の比較

表-2 RCはり供試体の種類

供試体 No	コンクリート強度 (N/mm ²)	付着低下	腐食減量率(%)
RC-LN	15	健全	0
RC-LB-15	15	有り	15
RC-LB-25	15	有り	25

3. 鉄筋腐食を考慮したRCはりの曲げ破壊性状と性能低下評価

3.1 実験および解析の概要

本章では、鉄筋腐食を表現させたRCはりの曲げ破壊試験、また二次元弾塑性有限要素解析(以下、FEM解析と略す)を行い、鉄筋腐食によるRC部材の性能低下を評価した。

まず、鉄筋腐食の表現方法による付着性能の低下度合いを調べるために鉄筋の引抜試験を行い、その結果をふまえて鉄筋腐食を表現させたRCはりの曲げ破壊試験を行った。そして、試験より得られたコンクリートの材料特性およびコンクリートと鉄筋の付着特性を考慮したFEM解析を行い、はり試験との比較、検討を行い解析での性能評価の精度検証を行った。RCはり供試体の種類を表-2、側面図・断面図を図-5に示す。鉄筋の腐食減量は図-6に示すように鉄筋を切削し表現した。鉄筋とコンクリートの付着低下は、図-5に示す模擬腐食区間の主鉄筋にテープを帯状に2枚対称に貼付け表現した。このテープ2枚の貼付幅と健全鉄筋の周長との割合を付着断絶率とする。引抜試験は、JSCE-G503に準じて行い、数種類の切削量とテープ貼付量に

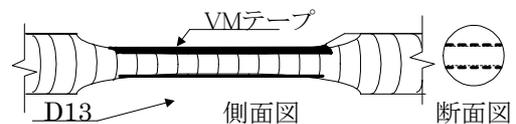


図-6 模擬腐食鉄筋

対応した荷重と鉄筋とコンクリートとのすべりの関係を求めた。目標とする付着強度比は、式(9)⁵⁾を適用し求め、曲げ試験に適用する鉄筋切削量とテープ貼付量を決定した。

$$\text{付着強度比} = \frac{\exp(-1.2220\Delta w) + \exp(-0.0641\Delta w)}{-\exp(-2.8188\Delta w)} \quad (9)$$

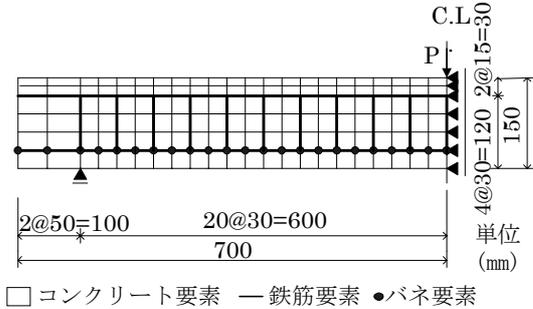


図-7 解析モデル図

表-3 腐食鉄筋の力学特性の算定式

弾性係数	$E_{cs} = (1 - 1.13(\Delta w/100)) \cdot E_{ss}$
降伏強度	$\sigma_{cy} = (1 - 1.98(\Delta w/100)) \cdot \sigma_{sy}$

E_{cs} :腐食後の弾性係数, E_{ss} :健全時の弾性係数
 σ_{cy} :腐食後の降伏強度, σ_{sy} :健全時の降伏強度

表-4 引抜試験の結果

供試体 No	鉄筋切削量(%)	付着強度 (N/mm ²)	低下率	目標低下率
B-L	0	8.0	-	-
B-L-15B	15	3.5	0.43	0.38
B-L-25B	25	1.8	0.23	0.20

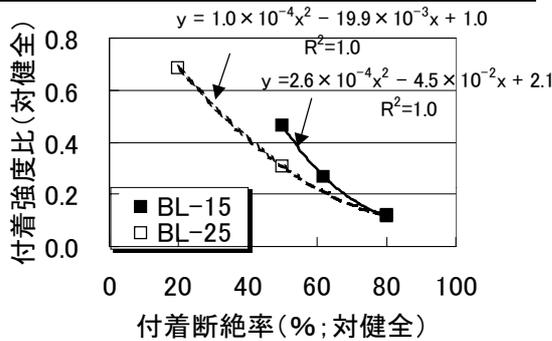


図-8 付着強度比-付着断絶率関係

次に解析概要を示す。解析モデルを図-7に示す。解析対象モデルは、前述の実験モデルを想定し、コンクリートを平面応力要素、鉄筋要素を線要素、コンクリートと引張鉄筋の付着は、接触節点でのバネ要素で表現している。コンクリートの引張構成則として、引張ひび割れ発生後、応力-ひずみ関係が直線関係になる

よう引張軟化モデルを導入した。腐食鉄筋の力学特性算定式には表-3に示す式⁵⁾を、また、付着要素構成則は文献^{3), 5)}を参考に、式(10)を採用した。

$$k = 1.0 \quad (0 \leq \Delta w \leq 0.68)$$

$$k = 0.54 \times 11620 (\Delta w + 1.32)^{-1.014} + 166.6 / 3245.5 \quad (0.68 \leq \Delta w) \quad (10)$$

ここで、 k : 解析での付着剛性残存率
 尚、理想的な条件で実験を行ったため、載荷前には供試体にひび割れは発生していなかったため、理想的なモデルで解析を行った。

3.2 実験・解析結果および考察

(1) 引抜試験の結果

あらかじめ決定した鉄筋切削量とテープ貼付量を有する鉄筋の付着性能の低下率を確認するため、引抜試験を行った。表-4、図-8、図-9に作成した供試体の種類・試験結果を示す。目標付着強度比に近い有用な結果が得られている。

(2) はり試験および解析の結果

表-5に曲げ破壊試験の結果を示す。耐力低下率は、ほぼ算定値と対応している。曲げひび割れ発生荷重についても、模擬腐食鉄筋供試体においてかなり低下している。また、切削量の増加に伴いひび割れ分散性が低下し、ひび割れ幅が大きくなる傾向がみられた。表-6に解析結果の一覧および対

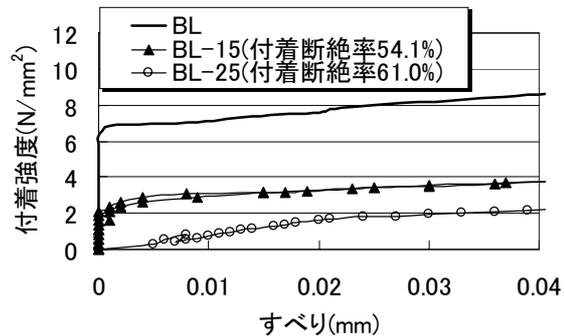


表-5 曲げ破壊試験の結果

供試体番号	コンクリート圧縮強度 (N/mm ²)	耐力算定値(kN)	ひび割れ発生荷重 (kN)	引張鉄筋降伏耐力 (kN)	最大耐力 (kN)
RC-LN	13.5	24.8	8.8	29.2	31.8
RC-LB-15-1	13.5	18.4(0.74)	5.9(0.67)	23.3(0.80)	25.7(0.81)
RC-LB-15-2	13.5	18.4(0.74)	5.9(0.67)	23.3(0.80)	26.9(0.85)
RC-LB-25-1	13.5	15.8(0.64)	4.9(0.56)	16.2(0.55)	20.8(0.65)
RC-LB-25-2	13.5	15.8(0.64)	4.9(0.56)	17.6(0.60)	21.3(0.67)

() 内数値は RC-LN に対する比率

表-6 FEM 解析・実験による耐力・たわみ・区間剛性の結果

		耐力 (kN)	終局 たわみ (mm)	引張鉄筋 降伏耐力 (kN)	引張鉄筋 降伏時のた わみ(mm)	10kNから15 kN間の剛性 (kN/mm)
健全 時	実験値	31.8	10.8	29.2	3.6	7.96
	解析値	32.8	10.5	31.7	4.4	7.88
15% 腐食	実験値	26.3	13.0	23.3	3.3	6.41
	解析値	25.9	7.8	25.6	4.0	5.75
25% 腐食	実験値	21.0	18.3	16.9	2.6	5.31
	解析値	20.4	13.6	20.1	3.7	5.19

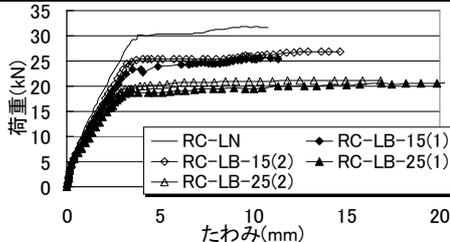


図-10 荷重-たわみ関係 (実験値)

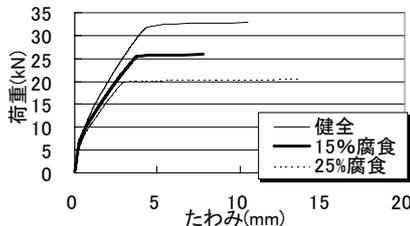


図-11 荷重-たわみ関係 (解析値)

応ずる実験値を，図-10，図-11 に実験および解析での荷重-たわみ関係を示す。この結果，鉄筋降伏によりたわみは急激に増加することが示されており，解析結果と実験結果はほぼ一致している。また，鉄筋腐食による剛性低下も同様の傾向が得られた。

(3) 既往の研究との比較

図-12 に，模擬腐食実験結果・解析結果の耐力比-腐食減量率関係と長谷川らの試験結果⁶⁾ および耐力算定値との比較を示す。実験結果，解析結果および耐力算定値は，ほぼ同一の直線であり，解析により模擬腐食実験の結果を評価できている。しかし，長谷川らの式は腐食減量率が大きくなるにつれ，他の関係との差が大きくなっている。長谷川らの式は実際に塩分を混入し暴露試験を行い腐食させたばかりでの載荷試験の結果であり，今回の実験・解析では評価できない性能低下があると考えられる。

4. 評点法による性能評価手法のコンクリート部材に対する適用および信頼性の検証

4.1 対象構造物の概要および点検データ

本章では，著者らが構築した評点法による性

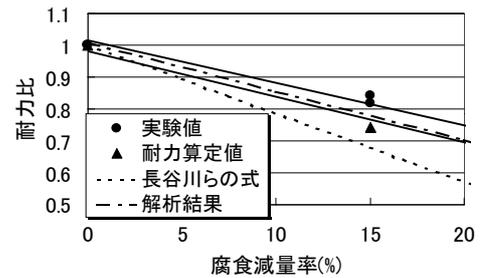


図-12 耐力比-腐食減量率関係

能評価手法¹⁾の高精度化を検討し，実 RC 部材での評価例を示し，評価の信頼性を検討する。

評価対象部材は，2 章で鉄筋腐食モデル構築時，使用した道路施設の RC 天井版である。施工材料として用いた海砂の洗浄不良のため，塩害による鉄筋腐食が進んでいる。部材の構造条件・点検データの一部をの表-7 に示す。点検結果より a, α ^{1),4)} をそれぞれ 1.799, 1.025 とした。

供用開始後 25 年目に部材の点検は行われ，分極抵抗，自然電位および鉄筋採取により鉄筋の降伏強度等の低下割合を調べており，降伏強度の低下割合から式(4)より腐食減量率を算定，図-2 より鉄筋腐食速度を推定できる。また，分極抵抗の点検データから，式(8)を用いて鉄筋腐食速度を推定することが可能である。両手法で求めた腐食速度には差が生じる。本研究では，性能評価を行う領域での分極抵抗の平均値を用いて腐食電流密度式で補正係数に η_b を使用し，鉄筋腐食速度を評価した。

4.2 評点化手法による性能評価

耐荷性能の評価は，各劣化機構の影響より発生する鉄筋腐食により低下する RC 構造物の曲げ耐力を間接的に評点化することで行う。耐荷性能評価値は，係数 K_1, K_2 の関数として表現し，健全状態を 100 ポイントとし，性能低下が進むにつれ値が低下するよう著者らが従来の研究¹⁾ で構築した式(11)を用いて部材評価を行う。

$$R_{loa} = 100 - K_1 \{ W_{lat} K_{2bc} + (W_{dev} + W_{acc}) K_{2ac} \} \quad (11)$$

ここで， R_{loa} ：耐荷性能評価値

K_1 ：劣化機構による影響の大きさを表す係数，最大値を 1.0 とする。

K_{2bc} ：鉄筋腐食発生前の劣化進行状態

表-7 点検データの概要

かぶり	30mm		
水セメント比	0.8	分極抵抗平均値(評価を行う領域)	778.1kΩcm ²
鉄筋径	D13	鉄筋断面減少率(はつり鉄筋データ)	0.0515
鉄筋表面塩化物量	5.0kg	鉄筋断面減少率(分極抵抗値より換算)	0.0528
鉄筋腐食速度(分極抵抗値より評価)			0.751mg/mm ² /year

表-8 鉄筋腐食速度の上限設定

	腐食速度の上限の設定
Case1	上限値を設定しない
Case2	鉄筋を海水中に浸漬させた場合の腐食速度である 1.02mg/mm ² /yearとする

表-9 耐荷性能評価結果

供用開始後25年(設計耐用期間50年)		Case1	Case2
点検時	鉄筋腐食量(mg/mm ²)	1.32	
	鉄筋腐食速度(mg/mm ² /year)	0.751	
	R _{loa}	79.7	
最大腐食速度到達時点 (year)		なし	25.6
加速期終点 (year)		26.4	26.7
鉄筋腐食減量率40%時点 (year)		28.6	33.6

表-10 耐荷性能の限界到達年(Case2)の比較

点検時の供用開始後経過年	24年	25年	差
耐荷性能	33.0	33.6	-0.6

目の点検データより性能評価を行った。25年目の点検データの結果との比較を表-10に示す。ほぼ同じ年数で性能限界に到達しており、評点法による部材の性能評価に信頼性があると考えられる。

を表す係数，最大値を 1.0 とする。

K_{2ac} : 鉄筋腐食発生後の劣化進行状態を表す係数

W_{lat} , W_{lat} , W_{lat} : それぞれ潜伏期，進展期，加速期以降の重み付け係数

評価対象部材の点検の際，表面に変状が見られ，コンクリート片が落下する限界状態の箇所の鉄筋腐食減量率の平均が 11.8%であった。本研究ではコンクリート片の落下を加速期の限界とし，この値を設定した。耐荷性能の限界は，要求設定がないので，腐食減量率 40%を耐荷性能の限界とし，これを劣化期の終点とした。

評点法で RC 部材を評価するには，各劣化状態の評価に関する重み付け係数を設定する必要がある。潜伏期と進展期は期間が短く耐力低下への影響が小さいので， W_{lat} と W_{dev} は同値とし， W とおく。そして，耐荷性能の限界を $R_{loa}=0$ と設定するので，限界時の腐食減量率を 40%とした場合の評価式は，以下の式(12)となる。

$$0=100-W-(W+W_{acc})\cdot 40.0/11.8 \quad (12)$$

図-12 の耐力算定値による耐力比-鉄筋腐食減量率関係より， W_{acc} の値が求まり，式(12)より， W の値が決定する。今回， $W_{lat}=W_{dev}=8.2$ ， $W_{acc}=18.9$ となった。

4.3 評点法での性能評価と信頼性検証

以上の条件から部材断面の耐荷性能評価を行う。腐食速度は，既往の研究¹⁾同様，表-8に示す2通りの上限設定で評価を行った。表-9に性能評価にあたり重要な時点の年数を示す。次に，同一部材の供用後24年

5. まとめ

- (1)実 RC 部材の点検データより，季節変動条件を考慮した補正係数を導入した腐食電流密度の式により，現状より高精度である分極抵抗法による腐食速度の評価方法を示した。
- (2)鉄筋腐食を考慮した RC はり供試体の曲げ破壊試験より，最大耐力や鉄筋降伏荷重の低下，ひび割れ分散性の低下，ひび割れ幅増大等の性能低下を評価した。
- (3)鉄筋腐食による性能低下をパラメータとして FEM 解析を行い，耐力と剛性の低下の様子を調べ，試験結果および既往の研究と比較をし，解析による曲げ耐力の信頼性を確認できた。
- (4)同じ実 RC 部材の異なる時期に行われた点検データを用いて評点法による性能評価を行い，評点法の評価の信頼性を確認した。

参考文献

- 1)岸ほか：第 23 回コンクリート工学年次論文報告集，No.1，pp.1171-pp.1176，2001.6.
- 2)下澤ほか：第 20 回コンクリート工学年次論文報告集，No.2,pp.877-pp.882,1998.
- 3)日本コンクリート工学協会：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.
- 4)小林ほか：コンクリート構造物の耐久性診断シリーズ 3「鉄筋腐食の診断」，森北出版，1993.
- 5)李ほか：第 19 回コンクリート工学年次論文報告集，No.1，pp.1147-1152，1997.6.
- 6)長谷川ほか：土木学会第 55 回年次論文報告集，V-360，2000.9.