

長期供用の旧基準鉄筋コンクリート部材を想定した鉄筋腐食ひび割れに関する予防保全診断技術の検討

予防保全,鉄筋腐食,色彩,強度低下

岡晴貴*1,田村雅紀*2

1. はじめに

現在では,建物の寿命を 3 倍にするという日本建築学会の地球環境憲章における声明から,建物の長寿命化の動きがより一層強まり,建物の目的や機能,性能といった健全性評価の見方が強まった。木造住宅はもちろん,鉄筋コンクリート造などの公共用施設など,長期にわたり供用することが活発である。一方,建築ストックが増大していることと,古い建物への使用者による耐用年数の低下傾向もある。その為,個々の建物の専門技術者による維持管理が容易ではなく,使用者傾向の点検・調査の仕組みが必要である。

本研究では,鉄筋コンクリート造建築物の維持保全性評価について,昭和 38 年に竣工し,50 年近くの供用期間を経ている建物をモデルとした。ひび割れや錆汁の溶出など様々ある,長期供用の旧基準鉄筋コンクリート部材を想定した鉄筋腐食ひび割れに関する予防保全診断技術の検討を行う。そこで,1 号館をモデル建物とし,研究 1 でひび割れ幅,錆汁を評価した後,旧基準を想定した試験体を作製する。研究 2 より,研究 1 での結果を元にコンクリートフレッシュ性状試験から腐食減量の測定までを行い,研究 3 で結果を元に予防保全診断技術検討の確立を狙う。

2. 研究概要

2.1. 旧基準鉄筋コンクリート構造物の劣化性状調査

2.1.1 鉄筋腐食の状況

表 1 にモデル建物概要と調査結果を示す¹⁾。モデル建物である 1 号館の 4 階及び地下 1 階のひび割れ調査をし,どの部位・箇所が危険かを評価した²⁾。錆汁箇所は多数確認でき,表面の塗装自身の劣化や錆色による変色,仕上げ材のひび割れなど様々な錆汁を確認した。全体を調査し,ひび割れが多く危険と判断した所は,南西隅部のボイラー室外壁及び基礎部分である。表 1 写真はボイラー室の外壁の様子とボイラー室の基礎部分の様子となる。①~⑥の箇所が最も劣化が進行し,ひびからは錆汁が多く目

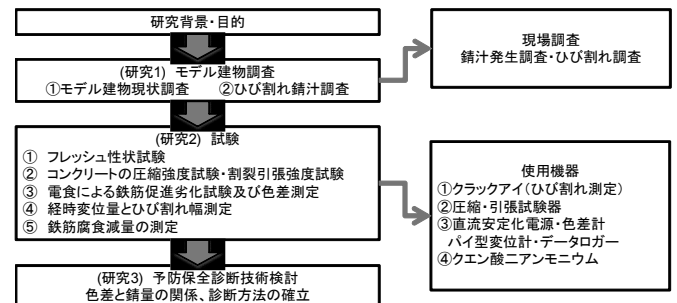


図 1 研究概要図

表 1 モデル建物調査概要と調査結果(研究 1)

項目	調査概要	写真(上:1号館,下:ボイラー室)	モデル建物概要				
研究 1 モデル建物 調査	調査実施:平成 23 年 10 月 場 所:東京都八王子市 中野町 2665-1 使用材料:表 1 に記載 調査箇所:地下 1 階~地上 4 階		建物名称	工学院大学外王子校舎 1 号館			
	所在地		東京都八王子市中野町 2665-1				
	竣工	1963 年(昭和 38 年)					
	構造形式	鉄筋コンクリート造ラーメン構造					
	階数	地下 1 階,地上 4 階					
	延床面積	5,040 m ²					
	建築面積	1,008 m ²					
	丸鋼は 1965 年廃止(JIS G 3110 廃止 1965 年)						
	モデル建物調査概要						
	① 結 果: ボイラー室の外壁に錆汁 が発生		場所	測定範囲 (cm)	測定箇所	測定間隔 (cm)	ひび割れ幅 平均(mm)
② 基礎部分にひび発生 の兆候はないが錆汁が浮出	①ひび割れなし		30	30	1	0	
	②錆汁溶出のみ		30	30	1	0	
	③錆汁溶出のみ		30	30	1	0	
③ 基礎部分のひび割れは 錆汁の跡が目立つ		④錆汁溶出のみ	30	30	1	0	
		⑤仕上材ひび割れ	30	30	1	0.23	
		⑥ひび割れ漏水部	30	30	1	0.37	

表 2 使用材料(研究 2)

材料	種類	吸水率 (%)	絶乾密度 (g/cm ³)	表乾密度 (g/cm ³)	実績率 (%)	単位容積質量 (Kg/L)	粗粒率 F・M
細骨材	大井川産陸砂(標準)	1.78	2.54	2.59	66.73	1.69	2.54
粗骨材	青梅産砕石	0.74	2.63	2.65	61.8	1.62	6.8
細骨材	大井川産陸砂(荒目)	2.15	2.53	2.58	60.6	1.53	4.36
微粉末	硬質砂石砕石粉	-	-	2.59	-	-	-

表 3 要因と水準(研究 2)

要因	水準
水セメント比(%)	40,55,70
かぶり厚(mm)	10,20
鉄筋径	φ10,D10,D13
微粉置換量(%)	0,5,10,20
砂の粒度	標準,荒目(1.2mm 以上)

表 4 コンクリート計画調合(研究 2)

要因	W/C(%)	s/a(%)	単位量(kg/m ³)				
			W	c	s	g	p
40p0	40	41.88	185	463	704	999	0
55p5	55	44.82	185	336	793	999	14
70p20	70	45.24	189	270	807	999	44
70p10		45.91	189	270	829	999	22
70p10L			189	270	829	999	22

表 5 フレッシュ性状(研究 2)

要因	スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	単位容積質量 (kg/m ³)
40p0	18	2	20	2364.73
55p5	21	0.1	20	2373.62
70p20	17.5	0	20	2401.72
70p10	19	0.3	20	2378.92
70p10L	16.5	0	20	2357.99

備考: 1. 試験用材料はすべて新製のものを使用

立つ。基礎部分には長期にわたる日変動の大きい熱負荷に伴う、熱膨張・伸縮の繰り返しにより錆汁が浮出ている。現状調査から、最もひび割れや錆汁の状況が深刻であったボイラー室外壁のひび割れ調査を行った。ひび割れ測定器はクラックアイ³⁾を用いて測定を行い、表 1 写真にある①～⑥は測定箇所を示している。測定範囲は、各箇所 30cm とり、測定 30 箇所、測定間隔 1cm とした。①～④の場所はひび割れ発生なしから錆汁が溶出している。⑤と⑥はひび割れが発生し、塗装部分のひび割れと基礎部分のコンクリートひび割れの 2 種類がある。表 1 の結果から塗装部分⑤のひび割れ幅平均は 0.23mm であり、基礎部分のひび割れ幅は 0.37mm であった。この調査から錆汁が発生しているひび割れ部が最も大きいと確認できた。

2.1.2 鉄筋腐食部外壁の色彩特性

色差測定は、ひび割れ測定箇所 30 に対し定 30 箇所とした。色差の測定方法は物理的な視覚への刺激を測定器で読み取り、 $L^*a^*b^*$ 表色系を測定し、ひび割れ表面の錆汁の色差の測定値とする。 $L^*a^*b^*$ 表色系は、 L^* 値が明るさを表現する明度であり、 $L=0$ が最暗(黒色) $L=100$ が最明(白色)である。 a^* 値 b^* 値は色味と鮮やかさを表現し、 $\tan\theta(a^*/b^*)$ が色相(hue)で $+$ がある。 a^* 値がプラス

である場合は赤色となり、マイナスの場合は緑色となる。 b^* 値がプラスである場合は黄色となり、マイナスの場合は青色となる。本研究ではこの $L^*a^*b^*$ 表色系を用いて色彩の特性を評価する。図 2 から、測定した L^* 値を汚れ度、 a^* 値を錆色とする。 L^* 値は④の通常箇所を基準に、錆発生箇所は明度が約 40~60 の間を示している。 a^* 値は、錆の発生箇所は色味が濃い為、値が高くなる。錆発生なしの箇所は大きな変化を見せない。

3. 実験結果及び考察

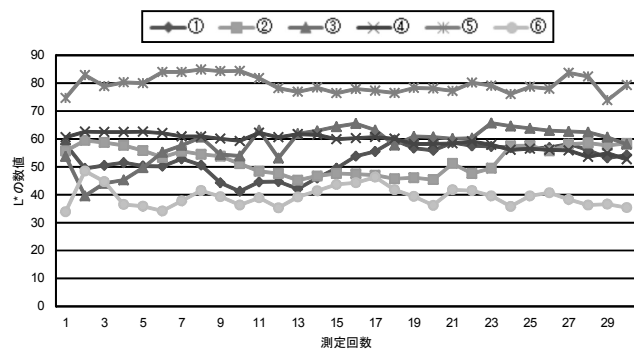
3.1. 旧基準鉄筋コンクリート構造物の劣化性状分析

3.1.1 汚れ度(L^* 値)とひび割れ幅の関係

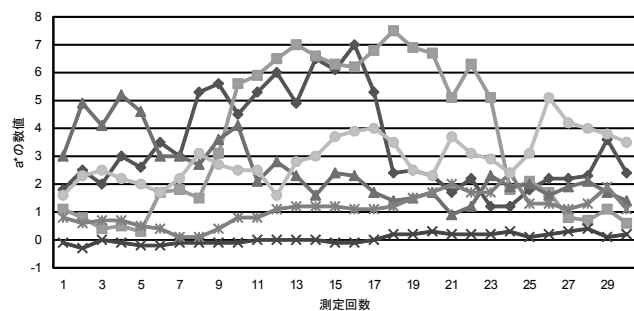
図 3 に色彩とひび割れ幅の色彩特性の関係を示す。表 1 写真から①～④はひび発生なしの箇所、⑤、⑥はひび割れ発生箇所を測定している。ここでは汚れ度と錆色は同じものと仮定し、表 1 のひび割れ結果と図 2 の結果から図 3 の関係図を示した。関係図は、汚れ度とひび割れ幅との関係を示したもの、棒グラフの結果は、各色差の平均をグラフ化し、ばらつきを示している。ここでは相関が 1 になるようなところを目指したシステムの構築はしていない。その為、相関はばらつきがあるものであり、中央値をとるような仕組みを考えている。関係図から①～④はひび割れ発生なしの為色差のみの表示になる。⑤、⑥を見ると

表 4 供試体記号説明(研究 2)

要因	鉄筋径	かぶり (mm)	微粉置換量 (%)	砂粒子
40p0	D10,D13, ϕ 10	10,20	0	標準粒度
55p5	D10,D13, ϕ 10	10,20	5	標準粒度
70p20	D10,D13, ϕ 10	10,20	20	標準粒度
70p10	ϕ 10	10,20	10	標準粒度
70p10L	ϕ 10	10,20	10	標準粒度(50%) 荒目粒度(50%)



a) 汚れ度(L^* 値)



b) 錆色(a^* 値)

図 2 鉄筋腐食部外壁の色彩特性

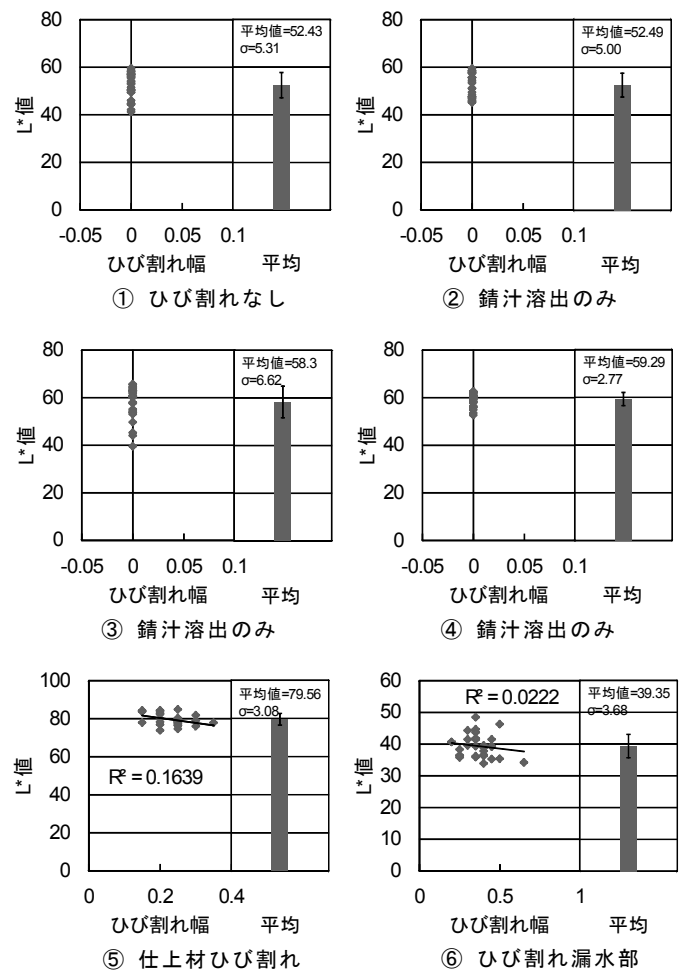


図 3 汚れ度(L^* 値)とひび割れ幅の関係

L*値とひび割れの関係から右下がりの傾向がみられる。このことから、ひび割れ幅が大きくなると汚れ度が 0 に近づいていき、錆汁が濃くなる。

3.2 鉄筋腐食ひび割れ試験による検討

3.2.1 コンクリートの基礎的物性

(1) フレッシュ性状

表 5 にフレッシュ性状、図 4 にブリーディング量を示す。本研究では、旧基準コンクリートを想定したことから、ブリーディングの増加が予想できる。その為、材料分離を抑える為、水セメント比 55%と 70%について微粉末を混ぜ、分離を抑制させた。結果から、70%が最も増加している。70p20 と 55 は通常、水セメント比 55%の方がブリーディングしないが、70p20 は微粉末量を 20%混ぜている。そのため、55 より分離が抑制された。このことから微粉末を混ぜたことで材料分離が抑制されていることがわかり、性状の良いコンクリートが作製されている。

(2) 圧縮強度試験・割裂引張強度試験結果

圧縮強度試験(JIS a 1108)、割裂引張強度試験(JIS a 1113)は JIS に準じて試験を行った。図 5 に割裂引張強度試験結果、図 6 に圧縮強度試験結果と静弾性係数の関係を示す。圧縮強度と引張強度は水セメント比が高くなるにつれ、強度が落ちている。圧縮強度と静弾性係数の関係では、圧縮強度は水セメント比が高くなるにつれ強度が落ちており、静弾性係数は水セメント比 40%が高く、70%が最も低いことがわかる。

3.2.2 鉄筋腐食試験体の物性変化と色彩変化の関係

図 7 に鉄筋促進劣化試験概要を示す。試験体は、ひび割れ測定面が上面になるように水槽内に配置する。5%濃度の NaCl 水溶液に浸し、鉄筋を陽極、銅板を陰極として直流安定化電源 30V を用い、電圧 30V、電流 0.1A で一定の通電を行う⁴⁾。試験体は表 3 の要因と水準に示している各条件から、66 本の試験体を作製し試験を行う。試験体は図 7 の b) のように 100×100×100mm とし、鉄筋の露出部分は、腐食を防ぐためエポキシ樹脂でシーリングする。また、鉄筋促進劣化試験と同時にデータロガーを使用し、試験体の上面にパイ型変位計を取付け、ひび割れ発生部分の変位経時変化も同時に測定する。色差測定には色差計を用いて測定時間を 2 時間ごととした。測定箇所は、試験中は 2 箇所の測定、試験終了後は 5 箇所測定した。鉄筋腐食減量の測定は、積算電流量から確定するのは困難である為、実験に用いた鉄筋の腐食前後の鉄筋量を測定し、腐食減量を算出する。その際に用いた質量減少率(1)、鉄筋腐食減量(2)の算定式を以下に示す⁵⁾。

$$C = \Delta w / w \times 100 \quad (\%) \quad \dots \dots \dots \text{式(1)}$$

$$C_g = \Delta w / (\pi R_0 L) \quad (g/mm^2) \quad \dots \dots \dots \text{式(2)}$$

C: 質量減少率 w: 腐食前の質量 w₂: 徐錆後の質量

Δw : 腐食に伴う質量減少分 $\Delta w = w - w_2$

Δw : 腐食に伴う質量減少分(g) R₀: 公称径(mm)

L: 測定片の長さ(mm)

以上の式を用いて質量減少率、鉄筋腐食減量を算出した。錆の除去には 10%濃度にしたクエン酸二アンモニウムを使用する。

(1) 色彩(a)とひび割れ幅(b)の関係

図 8 は各要因の鉄筋腐食による試験体汚れ度である。図 7 の a)写真にあるように試験終了後に 5 箇所測定し、ひび割れ幅と図 8 の結果から汚れ度とひび割れ幅の関係図を図 9 に示した。図 9 からひび割れ幅が大きくなると汚れ度が 0 に近づき、錆色が濃くなる。回帰が右下がりになり、色彩からひび割れ幅を特定することが可能になる。

(2) ひび割れ幅(b)と変位量(c)の関係

パイ型変位計から測定した変位量と試験後に測定したひび割れ幅から、ひび割れ幅と変位量の関係図を図 10 に示す。パイ型変位計は 5cm 区間の変位量を測定した値である。ひび割れ幅と部材要素全体の変位量は比例関係にあり、変位推定が可能である。

(3) 変位量(c)と腐食量(d)の関係

測定結果から図 11 の変位量と腐食量の関係を示す。変化が生じない所を a、変化が生じる所(傾き)を b とし、各要因の a と b の平均を算出、図 11 の b)の関係図を作成した。関係図から 40%が最も傾きが大きくひび割れが急激に発生し、70%は傾きが小さく、ひびが緩く発生する。

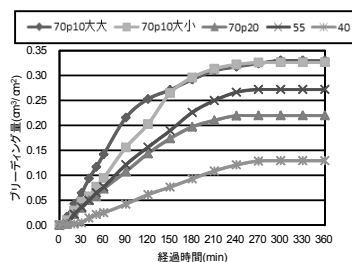


図 4 ブリーディング量

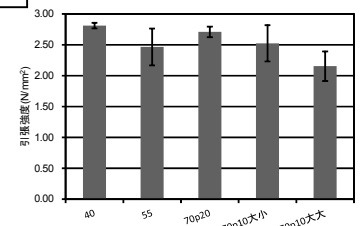
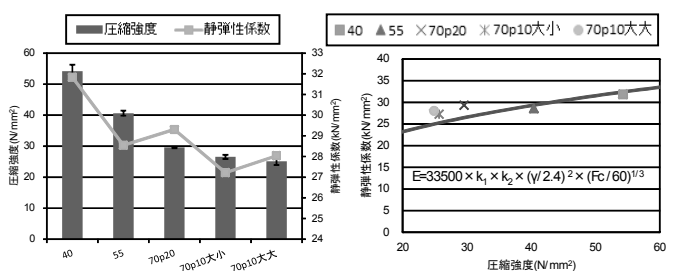
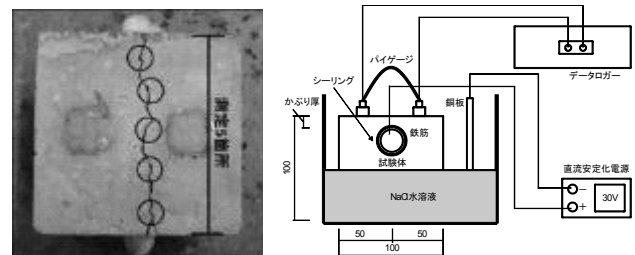


図 5 割裂引張強度



a) 圧縮強度と静弾性係数 b) RC 構造計算規準の分布

図 6 圧縮強度と静弾性係数の関係



a) 色彩ひび割れ幅測定位置 b) 腐食試験概要図

図 7 鉄筋促進劣化試験概要

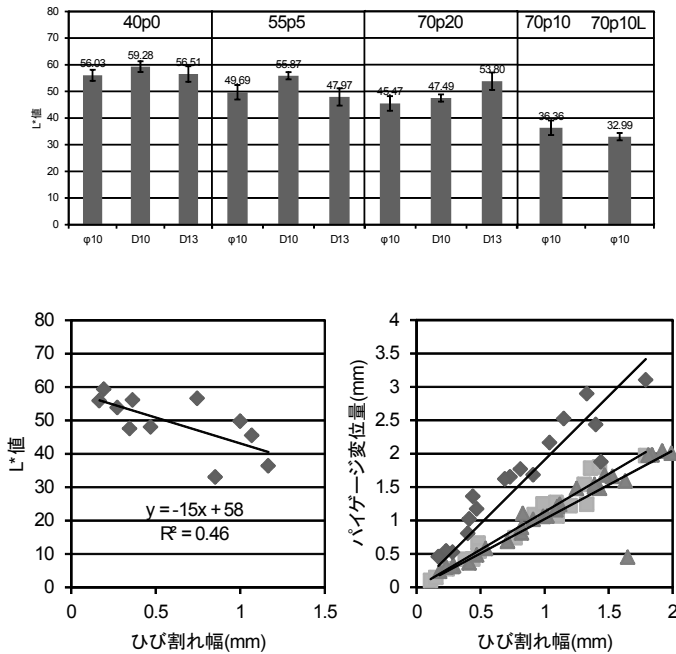


図 9 汚れ度(a)とひび割れ幅(b) 図 10 ひび割れ幅(b)と変位量(c)

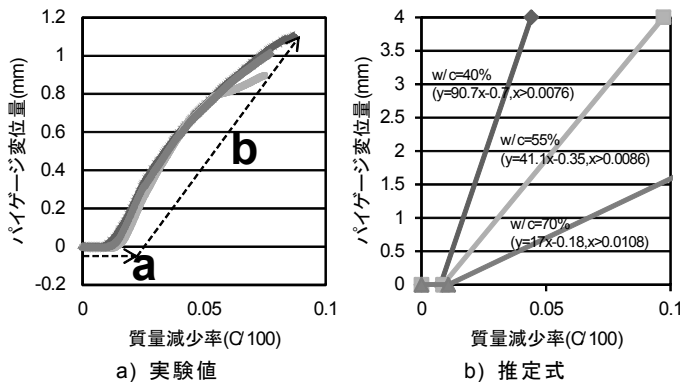


図 11 腐食ひび割れによる変位量(c)と腐食量(d)の関係

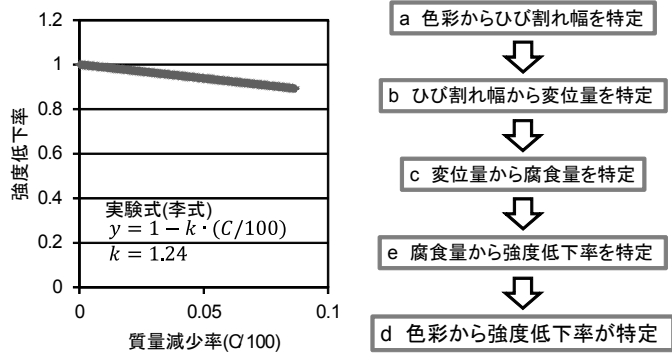


図 12 腐食量(d)と強度低下率(e) 図 13 評価プロセスフロー

従い、変位量と腐食量の関係がわかり、特定が可能である。

(4) 腐食量(d)と強度低下率(e)の関係

コンクリートの破壊は、微細要素の引張抵抗力により決まる為、引張抵抗力の低下度を評価することで、コンクリートの力学特性の変化を安全側で評価できる。ここでは引張強度比は鉄筋の質量減少率に関係があるとし、既往の実験式(李式)⁵⁾により、引張強度低下率(3)を算定し、強度低下率とした。

$$y = 1 - k \cdot (C/100) \quad \dots \dots \dots \text{式(3)}$$

C: 質量減少率(%) k: 1.24(係数)

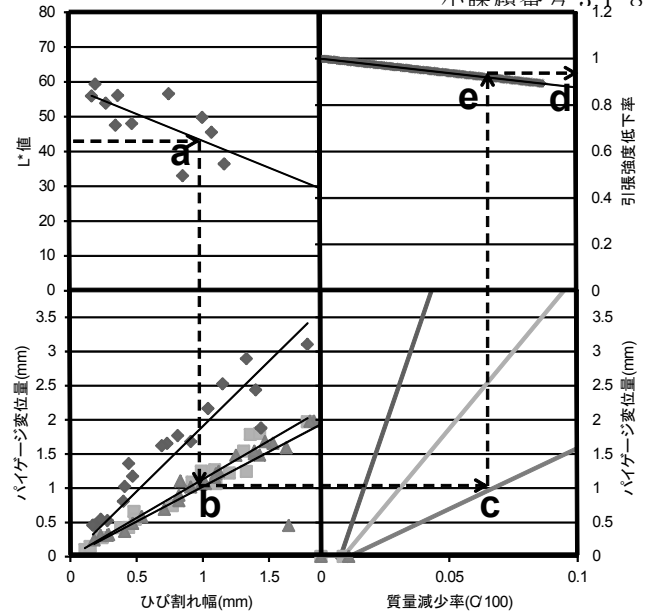


図 14 鉄筋腐食の予防保全診断技術の評価プロセス

以上の実験式より図 13 の関係図を示した。この図から腐食量が特定され、強度低下率を示すことが可能になる。

3.3 予防保全診断技術の検討方法

以上の(1)～(4)の関係から図 14 の予防保全段階における強度低下率の対策モデルが提案できる。汚れ度を測定しその数値からひび割れ幅を特定、ひび割れ幅から変位量を特定、変位量から腐食量を特定、腐食量から強度低下率を特定、色彩から強度低下率を示すことが可能となる。

4. まとめ

- 1) モデル建物の調査により、1963 年竣工の築 50 年の調査により、ひび割れ発生がなく錆汁が生じている潜伏期の箇所が確認できた。
- 2) 研究 1 の色彩とひび割れ幅との関係から、汚れ度である L*値が 0 に近づき汚れていくとひび割れ幅が大きくなる傾向が確認された。
- 3) 研究 2 から、部材要素実験により、水セメント比を含めたかぶり厚さでひび割れ発生時期の相違があること、丸鋼による拘束力低下に伴う、腐食劣化が生じやすいことが確認された。
- 4) a～e の連成システムの評価により、汚れ度から部材の鉄筋腐食に対する予防保全段階における強度低下の対策モデルが提案できた。

謝辞

本研究は、工学院大学 UDM・PJ 研究費の一部による。

参考文献

- 1) 八王子校舎 1 号館耐震診断に伴う構造調査報告書 1996 年 8 月
- 2) 工学院大学建築学科広沢研究室、工学院大学八王子校舎 1 号館耐震診断調査報告書 1997 年 3 月
- 3) 田村、近藤、茨田、長谷川、：コンクリート構造物に用いる光学式ひび割れ幅測定器の開発と性能評価、日本建築学会技術報告集第 19 号 2004
- 4) 橋高、LE、塚越、松沢：鉄筋コンクリート表面のひび割れ発生時の鉄筋腐食量に関する検討、コンクリート工学年次論文集、Vol.33, No.1, 2011
- 5) 土木学会コンクリート委員会：材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能研究小委員会(331 委員会)2009