論文　コンディションレーティング（評点法）に基づく劣化ＲＣ橋の簡易性能評価

狩野　裕之*1・森川　英典*2

要旨：構造物の維持管理において，一般に日常・定期点検として行われる目視を主体とした外観調査結果による簡易な性能評価の位置づけとその重要性について述べた。また，簡易性能評価の一手法としてコンディションレーティング（評点法）を取り上げ， RC 橋梁上部工の塩害劣化事例について，性能評価の観点から改良を加えて試算した評点に基づく簡易性能評価結果と実構造物の点検結果および鉄筋の腐食減量を考慮した RC 梁供試体の曲げ破壊試験結果を比較した。その結果，評点法における簡易性能評価パラメータは点検結果の不確定性に関するパラメータも含めた値で評価できる可能性のあることがわかった。

キーワード：コンディションレーティング，評点法，塩害，性能評価，RC 橋梁

1.　はじめに

長期にわたり供用されているコンクリート構造物の増加に伴い，今後，その維持補修費の増大が予想されることから，より安価に合理的な維持管理を行うための研究･技術開発が急務の課題として維持管理に関わる各分野において進められている。本論は日常・定期点検から詳細点検の要否について有用な判定指標となるような簡易性能評価手法の開発のため， CEB コンディションレーティング(評点法)[1)]を取り上げ，簡易性能評価手法としての適用性の検討，および改良を試みたものである。

2.　日常･定期点検結果に基づく簡易性能評価の位置づけとその重要性

コンクリート構造物の維持管理は，対象となる構造物の重要度，第三者影響度，環境条件を考慮した劣化予測に基づき維持管理計画を策定し，実施される [2)]。維持管理フローの一例を**図-1** に示す。構造物の現状把握は点検によって行われ，日常･定期点検では目視を主体とした点検が行われる。これはコンクリート構造物の特徴である，性能低下による外観変状の発生，あるいは性能低下を助長するような因子の有無に着目した最も基本となる点検方法である。この点検結果に基づく，詳細点検の要否についての評価・判定を行う手法として，日常・定期点検レベルで得られる定性的なデータを変状・劣化因子の発生程度でいくつかのグレードに分類し，半定量的に取り扱うグレーディングによる評価手法の研究開発がなされてきた [3)]。しかし，その精度や不確定性の問題から現状では日常・定期点検レベルで得られるデータから耐荷力などの構造物の性能について十分な検討・評価ができるものとはなっていない。

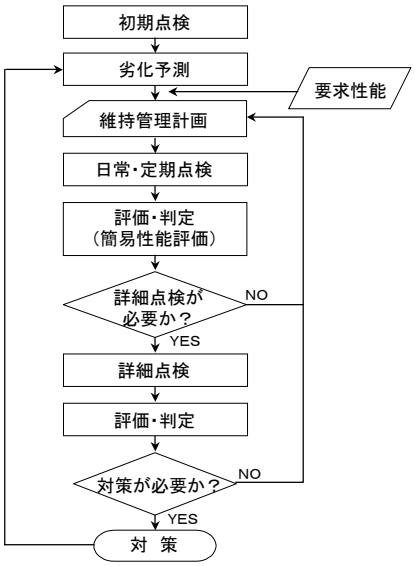


図-1　維持管理フローの一例

（株）鴻池組　土木本部技術部　工修（正会員）
神戸大学工学部　建設学科　助教授　工博（正会員）

また，詳細点検が必要と判定されると，点検を行うために大がかりな仮設足場を伴うことも多く，コストの関係から詳細点検結果の如何によらず何らかの補修・補強対策が実施され，無対策となることはほとんどないのが実状であると思われる。上述のことから，今後，維持管理対象となる構造物が増加するにつれ，詳細点検の要否の判定は，より適切なタイミングでなされる必要がある。このため，日常・定期点検データから得られる情報の精度向上は重要であり，簡易性能評価手法の開発が望まれる。

3. 評点法を用いた簡易性能評価手法

日常・定期点検結果による簡易性能評価手法の一例として評点法を取り上げ，基本的な考え方および計算方法を示す。

3.1 評点法の概要

コンディションレーティング(評点法)は既設コンクリート構造物の劣化の程度の評価および詳細点検や，対策を行う予備的な順位付けのため，劣化の程度の定量化を目的として発展してきた手法である [1)]。評点法の特徴としては，次の 2 点が挙げられる。

- 評点は対象構造物の変状の種類，程度や範囲などに関して設定した点数のテーブルに基づく加点合計ではなく，対象構造物の環境条件において発生しうる最大の劣化状態に対する調査時点の劣化状態の比率で表される。
- 評点により分類される劣化等級に基づく耐力低減係数算定式を定義し，部材の安全率 RF を評価することで簡易性能評価指標を与える。

3.2 計算方法

評点の一般式は式(1)のように定義される。

$$V_D = B_i \times K_{1i} \times K_{2i} \times K_{3i} \times K_{4i} \qquad (1)$$

ここに, V_D:変状の種類別の評点で本論で取り上げた変状項目についてのみ**表-1** に示した, B_i:変状の種類"i"に関する基本値で構造要素への安全性･耐久性の潜在的な影響度を表す(1～4 の範囲),本論で取り上げた変状項目についてのみ**表-1** に示した, K_{1i}:部材が構造構成要素全体の安全性･耐久性に及ぼす影響度を表す因子(構造構成要素全体で 1 程度になるように各部材に割り振る),K_{2i}:変状の程度に関する因子,0.5～2.0 の 4 段階で表される（**表-1**）, K_{3i}:発生範囲に関する因子,0.5～2.0 の 4 段階で表される（**表-2**）, K_{4i}:構造物あるいは第三者に対する安全性に関して,対策の緊急性を強調する因子,1～5 の範囲で程度に応じ任意に与えられる。

構造物の評点 R_C は式(2)で定義される。

$$R_C = \frac{\sum V_D}{\sum V_{D.ref}} \times 100 = \frac{\sum_1^k K_{1m} \times M_m}{\sum_1^k K_{1m} \times M_{m.ref}} \times 100 \qquad (2)$$

$$M_m = \sum_1^n B_i \times K_{2i} \times K_{3i} \times K_{4i} \qquad (3)$$

$$M_{m.ref} = \sum_1^t B_i \times K_{2i} \times K_{3i} \times K_{4i} \qquad (4)$$

ここに, ΣV_D:対象部材や構造要素の変状の種類別の評点の合計, $\Sigma V_{D.ref}$:変状の有無にかかわらず,対象部材あるいは構造要素に発生しうる最大の値(参照値), k:対象となっている構造物の部材"m"の総数, n:部材"m"において発見された変状のタイプ"i"の総数, t:部材"m"に発生しうる変状のタイプの総数

調査結果から算定された評点 R_C に基づき,構造要素や部材の劣化等級が判定される（**表-3**)。また,コンクリートや鋼材に深刻な変状が見られない場合,式(5)により耐力低減係数 Φ を算定し,式(6)により部材の安全率 RF を評価する。

$$\Phi = B_R \times e^{-\alpha_R \times \beta_c \times V_R} \qquad (5)$$

$$RF = \frac{\Phi \cdot U_d - \gamma_G \cdot G_n}{\gamma_Q \cdot Q_n (1+I)} \qquad (6)$$

ここに, Φ:着目部材の耐力低減係数,B_R:着目部材の耐力比($B_R=U_a／U_d$),U_a:実耐力,U_d:設計耐力, α_R:評点により判定された劣化等級に応じて与えられる値(**表-3**),V_R:調査,点検結果の不確定性により与える変動係数, β_C:目標安全性指標,RF:安全率,I:衝撃係数,G_n,Q_n γ_G, γ_Q:照査断面の死荷重,活荷重および部分安全係数。

表-1　変状の種別ごとの基本値 B_i とその程度 K_{2i} の判定基準 [1)]

変状の種類	B_i	変状の程度			
		Ⅰ（K_{2i} =0.5）	Ⅱ（K_{2i} =1.0）	Ⅲ（K_{2i} =1.5）	Ⅳ（K_{2i} =2.0）
表面の微細なひび割れ,収縮,沈下,打継ぎに起因するひび割れ	1	単一 小さい	数個 小さい	多少の はっきりした	多くの はっきりした
供用荷重による変形あるいは拘束を強いられたことに起因するひび割れ	3	単一 0.5mm 以下	数本 0.5mm 以下	単一 0.5mm 以上	数本 0.5mm 以上
物理的な損傷,浸食,衝突	1	I. 発生の初期段階で軽微とみなせるもの II. 部材の性能への影響は小さいが今後の進行によっては問題となるとみなせるもの III. 部材の性能への影響が高いとみなせるもの Ⅳ. 部材の性能への影響が重大であり危険とみなせるもの			
浸出物,ポップアウト	1				
コンクリートを通じての漏水	2	Ⅰ.軽度・中間　Ⅱ.重度 塩化物 0.4%以下のセメント		Ⅲ.軽度・中間　Ⅳ.重度 0.4%以上のセメント	
ひび割れ,ジョイント,埋設物からの漏水	2	同上		同上	
表面の濡れ	1	同上		同上	
鉄筋腐食による被覆不良	2	錆汁 軽度	錆汁 重度	スターラップ 上にひび割れ	スターラップ上 に剥離
鉄筋の腐食によるはく離・はく落	3	I.隅角部の鉄筋あるいは PC 鋼材にそった明確なひび割れ II.他の鉄筋あるいは PC 鋼材に沿った明確なひび割れ,隅角部に沿った軸方向の幅の広いひび割れ，あるいは鋼材の露出 III.他の鉄筋や PC 鋼材に沿った幅の広いひび割れや鋼材の露出 Ⅳ.断面欠損や表面のはく離・はく落			

注）本論で取り上げた変状の種類のみ抜粋した。

表-2　K_{3i}－変状の発生範囲に関する一般的な基準 [1)]

基　　準	K_{3i}
変状は同じ部材では単一の狭い部分である	0.5
変状は同じ部材では数カ所（例えば 1/4 以下）現れている	1.0
変状は同じ部材の多くの部分（例えば 1/4～3/4）に現れている	1.5
変状は同じ部材のほぼ全面（例えば 3/4 以上）に現れている	2.0

表-3　劣化等級と Rc，α_R [1)]

劣化等級	状態の説明，対策の必要性	評点 Rc	α_R
I	補修の必要はなく通常の維持管理が必要	0～5	0.3
II	軽度の劣化，適当な時に修繕をしなければ長期間の後には供用性，耐久性を損なう原因となる可能性がある。劣化の発生状況は低予算で通常の維持管理の一部として修繕できる程度。	3～10	0.4
III	中程度の劣化，供用性，耐久性を損なう原因となりうるが，まだ構造物の使用に対する制限の必要はない。補修は短期間のうちに必要となる。	7～15	0.5
IV	重大な劣化，供用性や耐久性が低下しているが，直ちに使用制限する必要はない。 直ちに補修を行い設計上の供用性と耐久性を確保する必要がある。	12～25	0.6
V	とても重大な劣化，直ちに使用を制限する必要がある，変状の発生している部材を仮受けするなどして保護する。直ちに構造物の補修および耐力低下分に相当する補強が必要。	22～35	0.7
VI	限界の劣化，早急に構造物の仮受けを行い，大幅に使用制限する必要がある（例えば橋梁を通行止めにする）。早急に広範囲の補修が必要，コスト比較の結果によっては再構築。	30 以上	－

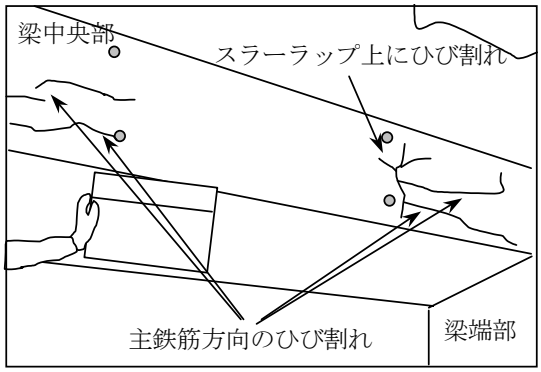
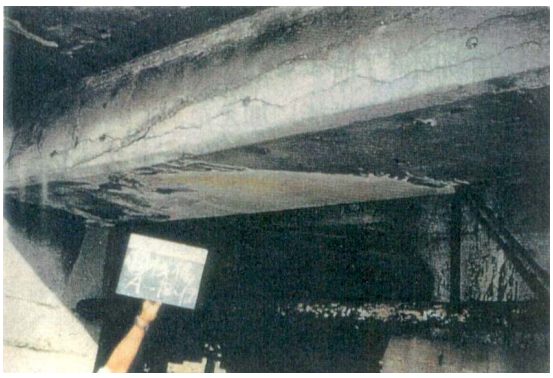


写真-1，図-2 加速期後期の塩害劣化事例



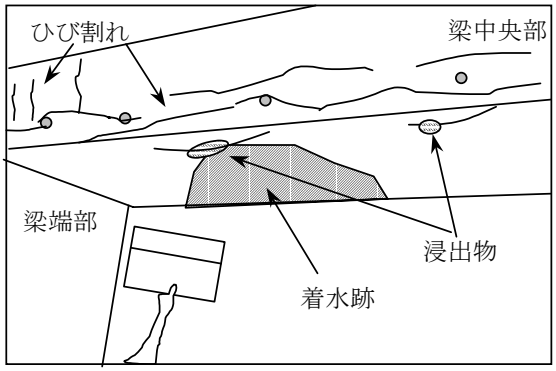


写真-2，図-3 劣化期の塩害劣化事例

表-4 評点法試算結果

変状の種類	B_i	(1)加速期後期				(2)劣化期			
		K_{1i}	K_{2i}	K_{3i}	K_{4i}	K_{1i}	K_{2i}	K_{3i}	K_{4i}
表面の微細なひび割れ,収縮,沈下,打継ぎに起因するひび割れ	1	1.0	—	—	1.0	1.0	—	—	1.0
供用荷重による変形あるいは拘束を強いられたことに起因するひび割れ	3		—	—			—	—	
物理的な損傷,浸食,衝突	1		—	—			—	—	
浸出物,ポップアウト	1		—	—			0.5	0.5+0.5	
コンクリートを通じての漏水	2		—	—			—	—	
ひび割れ,ジョイント,埋設物からの漏水	2		—	—			—	—	
表面の濡れ	1		—	—			—	—	
鉄筋腐食による被覆不良	2		1.5	1.0			1.5	1.5+0.5	
鉄筋の腐食によるはく離・はく落	3		0.5	1.5+0.5			0.5	2.0+0.0	
評点試算結果		$M_{m(1)}$=3.0+3.0=6.0,$M_{m,ref(1)}$=64 $Rc_{(1)}$=6.0／64×100=9.4%				$M_{m(2)}$=0.5+6.0+3.0=9.5,$M_{m,ref(2)}$=64 $Rc_{(2)}$=9.5／64×100=14.8%			

4. 評点の試算

4.1 評価テーブルの一部改良

簡易性能評価手法として評点法を適用する場合，変状発生部位が性能に与える影響についても考慮する必要がある。例えば，梁部材の曲げに着目した評価では，大きな曲げモーメントの作用する場所の方が他の場所に発生している変状よりも性能に与える影響は大きいと考えられる。本論では評価テーブルに一部改良を加え，発生部位に関する重みを変状の発生範囲に関する因子 K_{3i} に持たせ，変状発生箇所が部材の性能に与える影響の大きい場所である場合には，2.0 を超えない範囲で K_{3i} の評価値を 1 ランク（+0.5）上げ，その影響を考慮することとした。

4.2 試算方法

コンクリート標準示方書［維持管理編］制定資料 [4]に掲載されている加速期後期および劣化期の塩害劣化事例写真より，以下の仮定に基づき日常・定期点検を想定した評点 R_C を試算した。

- 写真は RC 上部工梁部の劣化状況とし，曲げモーメントに関する簡易性能評価を想定した。
- 写真では一部分の状態しか確認できないが，梁全長の半分,半面（梁全体の 1/4）の変状状況とみなし,写真に見られる変状が全体的に及んでいるとした。
- 式(2)の参照値 $M_{m.ref}$ の定義は発生しうる全ての変状に関する合計 [1]であるが,構造物の環境条件等は不明のため,**表-1** に示すもののみ考慮した。
- 梁部材に対する検討のため，部材の重要度に関する因子 K_{1i} および対策の緊急性に関する因子 K_{4i} はすべて K_{1i}=K_{4i} =1 とした。

写真-1，**図-2** に加速期後期，**写真-2**，**図-3** に劣化期の塩害劣化事例を，また，**表-4** に評点試算結果，**表-5** に評点による劣化等級を示す。

表-5 評点法試算結果と劣化等級

劣化過程	評点 R_C (%)	劣化等級 (表-3 参照)
(1)加速期後期	9.4	II 又は III
(2)劣化期	14.8	III 又は IV

表-6 α_R, βc, V_R試算結果

	評点 R_c(%)	α_R 式(7)	U	$\beta c \cdot V_R$	βc	V_R
(1)加速期後期	9.4	0.47	0.88	0.272	2.3	0.118
					4.3	0.063
(2)劣化期	14.8	0.55	0.76	0.497	2.3	0.216
					4.3	0.115

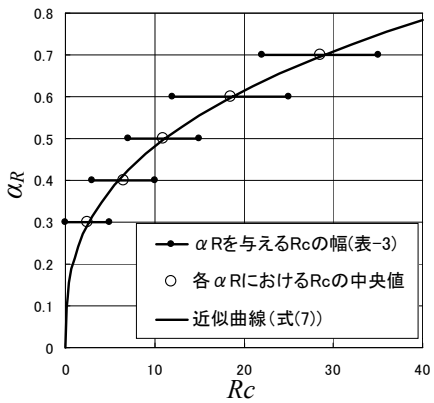


図-4 R_cの範囲とα_Rの近似曲線

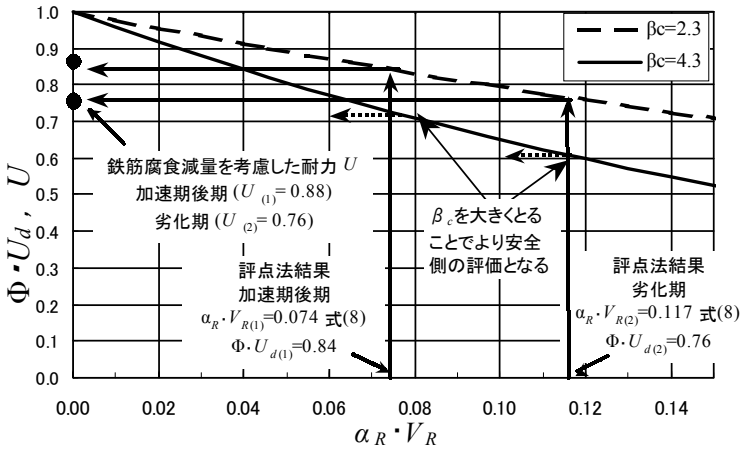


図-5 Φ・U_dの再計算結果およびβ_cによる安全率

評価された劣化等級の状態(**表-3**)はコンクリート標準示方書［維持管理編］における外観上の劣化グレードの定義[2)]と大過ない結果となった。

5. 詳細劣化予測結果との比較による簡易性能評価パラメータの検討

評点 R_c より得られる簡易性能評価結果と別途，塩害劣化 RC 構造物において実施された点検結果および鉄筋腐食減量を考慮した RC 梁供試体の曲げ破壊試験結果[5)]を比較し，R_cにより与えられる α_R，V_R の傾向と耐力低減係数Φの算定パラメータの与え方について検討した。

5.1 α_R算定式の提案

α_Rの値は**表-3**に示される評点R_cに応じた劣化等級により与えられるが，各劣化等級における R_cの範囲が重複しており，簡易性能評価を行う際には，1 つの R_cに対して 2 つの α_Rあるいは，Φの与えられる場合がある。しかし，性能評価の観点からはR_cと α_R は1対1の関係にある方が望ましい。このため，**図-4** に示すように各劣化等級における評点 R_c の範囲の中央値と α_R を最小二乗法により累乗近似し，式(7)に示す α_R算定式とした。

$$\alpha_R = 0.214 R_c^{0.353} \tag{7}$$

5.2 耐力低減係数Φの算定パラメータの妥当性の検討

評点より求まる簡易性能評価結果としてΦU_dと鉄筋腐食減量率を考慮した RC 梁供試体の曲げ耐力低下を比較し，Φ算定パラメータの傾向を検討した。一般に鉄筋の腐食減量とひび割れ幅およびひび割れパターン(はく離ひび割れ，鉄筋軸ひび割れ）はかぶりや鉄筋径により異なる[6),7)]ため，比較対象として十分とは言い難いが，構造物の外観上の劣化グレードと劣化の状態あるいは標準的な性能低下の定義[1)]を逸脱しない範囲で以下の条件を仮定した。

- 簡易性能評価結果（耐力ΦU_d）と RC 梁の実験結果（耐力 U）は同構造物の曲げ耐力に関するものとし，その健全時の曲げ耐力をΦU_d=U=1.0 とした。
- 実 RC 部材の点検結果において，加速期と劣化期の境界として設定されている，コンクリート片が落下する限界の箇所の鉄筋腐食減量率の実測平均値 11.8%[5)]より，**写真-1**，**図-2** の加速期後期の事例における鉄筋腐食減量率を 10%と仮定した。また，このとき

の耐力を鉄筋腐食減量率 10%に対する実験値より 0.88[5]と仮定した。

- **写真-2**，**図-3** の劣化期の事例では加速期後期の事例に比べ，ひび割れの増加や部分的なはく離は発生しているが，かぶり部分の大きなはく離やはく落は見られないため，劣化期の比較的初期の段階と考えられることから，鉄筋腐食減量率を 20%と仮定した。また，このときの耐力を鉄筋腐食減量率 20%に対する実験値より 0.76[5]と仮定した。

表-6 に式(5)，式(7)より求められた α_R，βc，V_R についてまとめた。ただし，βc は ISO／CD13822 構造物設計規準－既存構造物の評価における終局限界状態に対する目標安全指標の範囲(2.3～4.3)[8]の定数とした。**表-6** より，V_R は加速期後期より劣化期のほうが大きいことがわかる。これは点検結果の不確定性は一定ではなく，構造物の外観変状の程度が大きい程大きな値となるよう設定される必要を意味しているが，現状では点検結果の不確定性に影響を及ぼす主要因の一つである，外観変状の程度と V_R の関係を設定することは難しく，今後の研究によるところが大きい。しかし，**図-4**，**表-6** より，α_R，V_R はともに評点 R_c に応じて増加する関係にあるため，R_c により与えられる値を点検結果の不確定性も含めた βc=2.3 のときの $\alpha_R \cdot V_R$ で評価することで βc に応じた耐力の低減を評価できる可能性があると考えられる。βc=2.3 としたときの R_c と $\alpha_R \cdot V_R$ との最小二乗近似式を式（8）に示す。ただし，今回は 2 ケースの試算結果しかないため，近似関数は直線とし，R_c=0.0（変状無し）の点検結果にはばらつきはないとみなし，近似直線の切片は 0 とした。

$$\alpha_R \cdot V_R = 0.0079 R_c \quad (\beta c = 2.3) \qquad (8)$$

また，重要構造物の ΦU_d を評価する際，式(5)に対し，より大きな βc を適用することで，構造物の重要度を考慮した評価となり，βc=4.3 の場合には，βc=2.3 に対して 4.3／2.3≒1.87 の安全率を考慮することを意味する。式(5)，式(8)による $\Phi \cdot U_d$ の再計算結果および βc による安全側の評価のイメージを**図-5** に示す。

6. まとめ

構造物の日常･定期点検結果に基づく簡易性能評価手法の開発を目的として，外観変状の発生部位が耐荷力に与える影響の評点への反映方法を改良し，評点の試算，および別途行われた実構造物の点検結果および RC 梁供試体の曲げ破壊試験結果を参考に簡易性能評価における耐力低減係数算定パラメータの傾向を比較検討し，評点から与えられる性能評価パラメータを $\alpha_R \cdot V_R$ で表す提案を行った。しかし，現時点では多くの仮定のもとで数ケースの試算をおこなった段階であり，今後は妥当性の検討および精度向上のため，実構造物でのデータも含めた多くの事例について検討を進めていく予定である。

参考文献

1) CEB Bulletin 243：Strategies For Testing and Assessment of Concrete Structures Guidance Report,1998.5
2) 土木学会：2001 年制定コンクリート標準示方書［維持管理編］,2001.1
3) 例えば，土木学会：コンクリート構造物の維持管理指針(案)，1995
4) 土木学会：2001 年制定コンクリート標準示方書［維持管理編］制定資料，2001.1
5) 森田祐介,森川英典,小林秀惠：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による性能評価,コンクリート工学年次論文集,Vol.24, No.2, pp.1519-1524,2002
6) 武若耕司,松本進：コンクリート中の鉄筋腐食が RC 部材の力学的性状に及ぼす影響,第 6 回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.177-180,1984
7) 堤知明,松島,村上,関:腐食ひび割れの発生機構に関する研究,土木学会論文集,No.532, V-30,pp.159-166,1996.2
8) 星谷勝,石井清：構造物の信頼性設計法,鹿島出版会,1986