

高経年化技術評価の高度化

- コンクリート構造物の長期耐久性評価 -

Study of System Safety Evaluation on LTO of National Project - Long Term Durability Evaluation of Concrete Structures -

首都大学東京

橘高 義典

Yoshinori KITSUTAKA

Non-Member

In this paper, method on the aging evaluation in nuclear power plant concrete structures was investigated. Problems on the durability evaluation of reinforced concrete structures were pointed out and an evaluation framework was considered. In view of the importance of evaluating the degree of deterioration of reinforced concrete structures, relationships should be formulated among the number of years elapsed, t , the amount of action of a deteriorative factor, F , the degree of material deterioration, D , and the performance of the structure, P . Evaluation by $PDFt$ diagrams combining these relationships may be effective. A detailed procedure of durability evaluation for a reinforced concrete structure using $PDFt$ concept is presented for the deterioration factors of thermal effect, irradiation, neutralization and penetration of salinity by referring to the recent papers.

Keywords: Durability, Concrete, Structure, Thermal effect, Irradiation, Neutralization, Penetration of salinity

1. はじめに

原子力発電所施設などの重要な鉄筋コンクリート構造物（以下、RC構造物）は長期の耐久性が求められる。RC構造物の耐久性の評価は、多くの劣化要因を含むこと、部材が鉄筋とコンクリートより構成される複合体であることなどから一般的に難しい課題である。評価法の一つに、RC構造物の劣化度評価ダイアグラムにより、実際の劣化度測定データに基づいたRC構造物の健全性評価法[1]がある。この方法では、経過年 t 、劣化因子の作用量 F 、材料の劣化度 D 、構造物の性能 P それぞれの関係を明確にすることで、RC構造物の性能低下を合理的に評価するものである。

本稿は、RC構造物の劣化度評価に必要な評価基本式について、熱、放射線、中性化、塩害の劣化現象について、既往の文献を調査整理し提示提案するものである。

2. 劣化評価の枠組み

RC構造物の耐久性評価の課題は以下のとおりである。

- (1) 外的要因の多様性：自然の環境下に長期間おかれ外的要因が多岐にわたり地域によっても異なる。
- (2) 複合材料：鉄筋とコンクリートとの複合材であり、材料単体の作用因子、劣化度評価だけでなく複合的な作用を考慮しなければならない。

(1)のRC構造物の「外的要因の多様性」の課題を解決する方法の一つとして、劣化関数の基本形を予め定め、構造物の実際の劣化度測定データを外挿し、劣化関数の係数を帰納的に決定し、劣化関数を決定し劣化予測を行うことが有効である。劣化関数の係数により様々な環境下の構造物の耐久性に関する特性を共通的な尺度で評価できる。一方で多数の劣化因子を取り込んだ演繹的な推定式の確立も重要であり、その場合も必ず実測値との対応ならびに外挿手法による推定評価が必要と考えられる。

(2)の「複合的な作用」に関しては、劣化因子の作用量 F と経過年 t との関係 ($F-t$ 曲線)、材料の劣化度 D と劣化因子の作用量 F との関係 ($D-F$ 曲線)、構造物の性能 P と材料の劣化度 D との関係 ($P-D$ 曲線) を明確にする。それらを統合すると、図-1に示すRC構造物の劣化度評価ダイアグラム(以下、 $PDFt$ 曲線と呼ぶ)が得られる[1]。

本図のレベルIVが構造性能の時間変化を評価する $P-t$ 曲線となる。現在の健全性評価での諸規定値は、劣化因子の作用量 F あるいは材料劣化度 D について定めているがその根拠はあまり明確ではない。しかしながら、 $PDFt$ 曲線を用いることで、構造物の性能 P に基づく規定値から、劣化因子の作用量 F 、材料劣化度 D の規定値を定めることができる。 $F-t$ 曲線、 $D-F$ 曲線は基本式と α 、 β 等の環境境界条件を表す係数により評価する。そのために基本式の妥当性を広範囲の条件で確認する必要がある。また、 $P-D$ 曲線については劣化後の材料特性を用いた数値解析、設計式などで評価するのが現実的である。

連絡先: 橘高義典、〒192-0397 東京都八王子市南大沢
1-1、大学院都市環境科学研究科建築学域
E-mail: kitsu@tmu.ac.jp

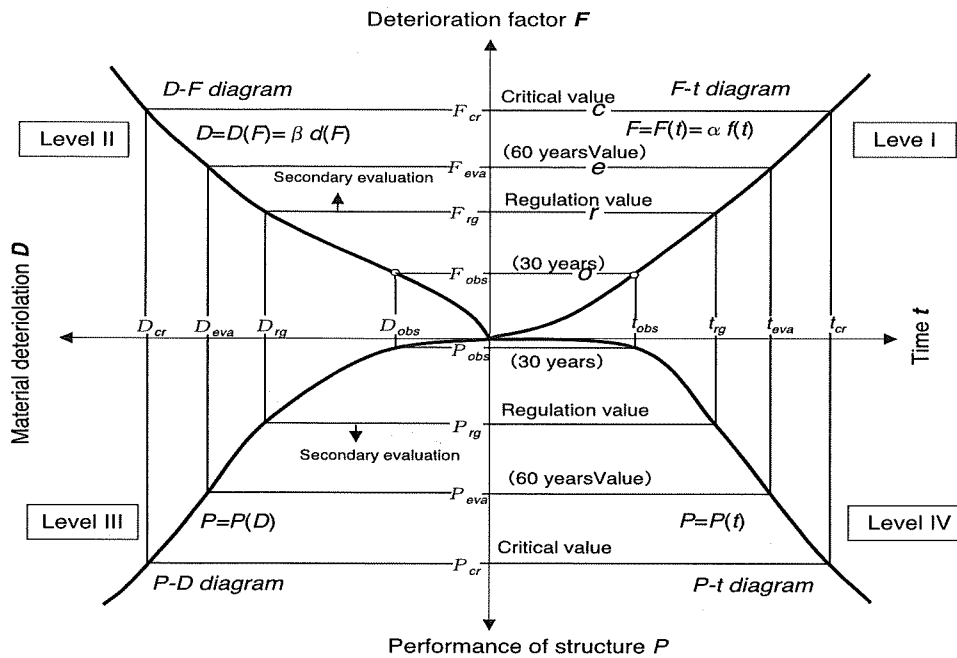


Fig.1 Integrity evaluation diagram of reinforced concrete structures (PDFt diagram)

原子力施設RC構造物に関する、劣化因子 F、材料の劣化度 D、構造物の性能を Table1 に示す。

Table1 Example of parameters

Deterioration factor F	Material deterioration D	Performance of structure P
F_1 Carbonation(depth)	D_1 Compressive strength	P_1 Stiffness
F_2 Chloride ion	D_2 Young's modulus	P_2 Bearing capacity
F_3 Heating	D_3 Rebar corrosion	P_3 Earthquake response
F_4 Radiation	D_4 Rebar strength	P_4 Constitutive law
F_5 Alkali aggregate reaction	D_5 Tensile strength	P_5 Crack
F_6 Vibration	D_6 Crack resistance	P_6 Bolt strength
F_7 Freeze-thaw	D_7 Bolt corrosion	P_7 Airtightness
F_8 Chemical attack	D_8 Water content	P_8 Permeability
F_9 -	D_9 -	P_9 -
F_{10} Others	D_{10} Others	P_{10} Others

3. 現状の健全性評価例

(独) 原子力安全基盤機構の高経年化技術評価審査マニュアル[2]に示されている原子力発電施設の熱、放射線、中性化、塩害によるコンクリートの強度低下に関する健全性評価例を以下に示す。

①熱

コンクリート部位の温度が、温度制限値(一般部 65℃、局部 90℃)以下であることを温度解析結果などで評価しているか審査する。

②放射線照射(中性子、ガンマ線)

60年時点の放射線照射量(中性子、ガンマ線)予測値がコンクリート強度に問題となるようなレベルとなっていないか、または経年劣化事象が生じているが軽微であることなどを Hilsdorf らの論文[3]などを参照して評価しているか審査する。

③中性化

中性化程度の確認のために中性化深さの測定を実施し、鉄筋腐食に結びついていないか評価していることを審査する。さらに、現状の中性化深さを中性化速度予測式で評価し、採用した予測式が安全側評価となることを確認した上で、60年時点の中性化深さを中性化速度予測式により推定し、鉄筋が腐食し始めるときの中性化深さに達しないことを確認しているか審査する。

④塩分浸透

塩分浸透による鉄筋への影響を評価するために、取水構造物の場合であれば、海中帯、干満帯、気中帯での塩化物イオン濃度の測定結果を用いて、塩分浸透予測式により、60年の供用を仮定し、鉄筋腐食減量を予測しているか審査する。

4. 健全性評価の基本式

劣化度評価ダイアグラム (Fig. 1) による健全性評価を行う場合での評価基本式を既往の文献等より調査し、熱、放射線、中性化、塩害の場合について以下に示す。

4.1 熱

(1) $F-t$ 曲線 (時間と熱の作用の関係)

熱によるコンクリート中の水和物の組織の変化に関する作用量を熱劣化作用量 F_3 とし、熱劣化定数 α_3 と時間 t との積で表す。

$$F_3 = \alpha_3 \cdot t \quad (1)$$

α_3 は、温度・組織の変化に関する係数であり、たとえば、一般的に用いられている反応速度式の数理論に基き以下の式(2)が考えられる。

$$\alpha_3 = a \cdot \exp\left(-\frac{b}{T}\right) \quad (2)$$

ここで、 a 、 b : 定数、 T : 温度 (°C) である。

(2) $D-F$ 曲線 (熱の作用とコンクリートの圧縮強度低下率の関係)

高温下に暴露されたコンクリートの強度の低下は Fig. 2[4] に示すような傾向がある。

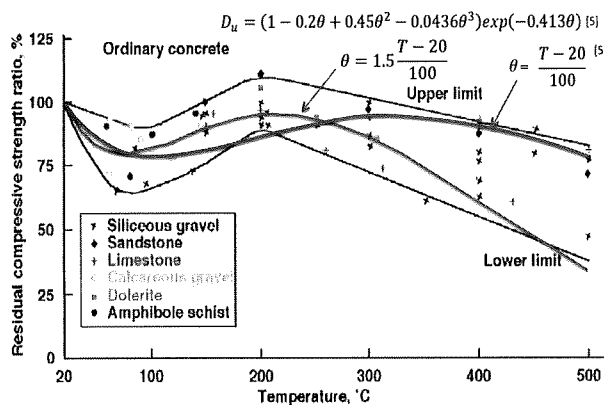


Fig.2 Residual compressive strength ratio and temperature [4]

加熱温度と強度低下率 D_u との関係は、阿部らの表示式 [5] を参考に、下式により表す。

$$D_u = (1 - 0.2\theta + 0.45\theta^2 - 0.0436\theta^3) \exp(-0.413\theta) \quad (3)$$

$$\theta = 1.5 \frac{T - 20}{100}$$

ここで、 T は温度 (°C) (ただし、 $T = 20$ °C から 400°C) また、高温下に暴露されたコンクリートの強度低下率 D_1 は、初期に急激に低下し Fig. 2 に示す収束値 D_u に収束する傾向がある。これらの関係は下式で表わせる。

$$D_1 = e^{-F_3}(1 - D_u) + D_u \quad (4)$$

4.2 放射線

(1) $F-t$ 曲線 (時間と放射線照射量の関係)

放射線(中性子・ γ 線)照射量の積算値を F_4 とし(以下、放射線照射量とする)下式で表す。

$$F_4 = \alpha_4 \cdot t^n \quad (5)$$

ここで、 F_4 : 放射線照射量、 α_4 : 放射線特性(線種、累積量、スペクトル分布等)線源と構造体の位置関係に依存する定数、 t : 時間(year)、 n : 定数(=1)

(2) $D-F$ 曲線 (放射線照射量とコンクリートの圧縮強度低下率の関係)

Hilsdorf らの論文[3]で示されている放射線の照射量と圧縮強度の関係が、現状では唯一、制限値の目安値以上の放射線の長期照射となっている(Fig. 3)。

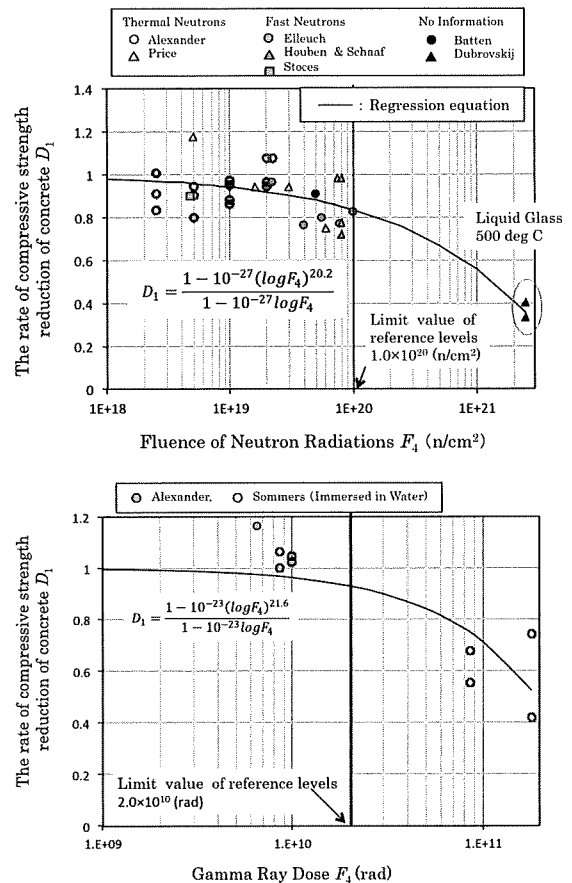


Fig. 3. Relation between the fluence of radiations and the strength reduction of concrete [3]

この図では試験体条件、温度条件等が異なるが、安全側を考慮し、全ての実験結果の回帰式を求め、これを、コンクリートの強度の低下率 D_1 の評価式とする。中性子・ γ 線の回帰式は以下に示す通りである。

中性子の場合の回帰式

$$D_1 = \frac{1 - 10^{-27} (\log F_4)^{20.2}}{1 - 10^{-27} \log F_4} \quad (6)$$

ここに、 D_1 : 圧縮強度の低下率(-)、 F_4 : 中性子照射量 (n/cm^2)

γ 線の場合の回帰式

$$D_1 = \frac{1 - 10^{-23} (\log F_4)^{21.6}}{1 - 10^{-23} \log F_4} \quad (7)$$

ここに、 D_1 : 圧縮強度の低下率(-)、 F_4 : γ 線照射量 (rad)

4.3 中性化

(1) $F-t$ 曲線 (時間と中性化の作用の関係)

中性化の進行による構造物の劣化に関して、鉄筋の発錆に及ぼす酸素の作用量が、劣化因子の作用量として考えられるが、その計測は難しく、その代替値として中性化深さを劣化因子の作用量 F_1 とする。中性化深さと時間 t との関係は、一般的に \sqrt{t} 則に従うとされており [6, 7]、材料や施工、環境因子を表す α_1 を用いて、以下の外挿式で表すことができる。

$$F_1 = \alpha_1 \sqrt{t} \quad (8)$$

ここに、 F_1 : 中性化深さ (mm)、 α_1 : コンクリートの特性 (調合、材料、施工条件等) 環境条件 (温度、湿度、炭酸ガス濃度等) により定まる中性化速度定数 (mm/\sqrt{y}) である。

(2) $D-F$ 曲線 (中性化深さと鉄筋の断面欠損率の関係)

竣工時 (健全な状態) の鉄筋に対する腐食量の重量減少の割合を鉄筋の断面欠損率 D_3 とする。鉄筋の位置までコンクリートの中性化が進行すると、鉄筋の腐食保護機能を持つ不動態皮膜が失われ、この時点から鉄筋腐食が開始される。中性化後の鉄筋の腐食減量に及ぼす温度・湿度・酸素濃度の影響について、友沢ら [8] は腐食実験を行い下式を提案している。

$$W_c = \frac{1}{38.1} (1.35T + 2.76H + 1.800O_2 - 163) \cdot \sqrt{t} \quad (9)$$

ここで、 W_c : 腐食による鉄筋の質量減少量 ($10^{-4}g/cm^2$)、 T : 温度 ($^{\circ}C$)、 H : 相対湿度 (%)、 O_2 : 酸素濃度 (%)、 t : 鉄筋部分へ中性化達成後の期間 (day) である。

本式より腐食量 W_c は、中性化速度式に用いられる \sqrt{t} と線形関係にあることより、暴露環境条件を β_3 として、 D_3 を以下の外挿式で表す。

$$D_3 = \beta_3 \cdot \sqrt{F_1^2 - F_0^2} \quad (10)$$

ここに、 D_3 : 鉄筋の断面欠損率(-)、 β_3 : 環境条件 (温度、湿度、酸素濃度等)、材料条件 (鉄筋、コンクリート等) による定数、 F_0 : かぶり厚さ (mm) である。

4.4 塩分浸透

(1) $F-t$ 曲線 (時間と塩化物の作用の関係)

塩害では鉄筋周辺の塩化物イオン濃度 C_I を劣化因子として評価する例が多いが、濃度は作用量としては適当でないため、塩化物イオン濃度の時間積算量を塩化物イオンの作用量 F_2 とする (添字の 2 は塩害を表す)。評価を行う場合は 1 年毎の積算とする。

$$F_2 = \int_0^{t_n} C_t dt, \quad C_t \geq C_{cr} \quad (11)$$

ここに、 F_2 : 塩化物イオンの作用量 ($kg/m^3 \cdot year$)、 C_t : 塩化物イオン濃度 (kg/m^3)、 t : 年数 (year)、 t_n : 評価年 (year)、 C_{cr} : 鉄筋腐食開始塩化物イオン濃度 = $1.2kg/m^3$ である。

コンクリート中の塩化物イオンの推定には拡散方程式に基づいた下式が用いられる [9, 10]。

$$C_t = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \right) \quad (12)$$

ここに、 C_0 : コンクリート表面の塩化物イオン濃度 (kg/m^3)、 x : かぶり厚さ (mm)、 D : みかけの拡散係数 ($mm^2/year$) である。

式(12)の誤差関数 erf に近似式 [11] を適用すると式 (13) が得られる。

$$C_t = C_0 \left\{ 1 - \sqrt{1 - \exp \left(-\frac{\alpha_2 \cdot x^2}{t} \right)} \right\}, \quad \alpha_2 = \frac{1}{\pi D} \quad (13)$$

α_2 は材料条件などに影響される劣化因子の作用量に関する定数である。 C_0 および α_2 は各評価年での塩化物イオン濃度の深さ方向の分布の実測値などから求める。

(2) $D-F$ 曲線 (塩化物作用量と鉄筋の腐食減量の関係)

材料の劣化度 D_3 は鉄筋表面の腐食減量とする (添字の

3 は鉄筋腐食を表す)。\$D_3\$は鉄筋の腐食速度 \$V_t\$により式 (14)で表せる。

$$D_3 = \int_0^{t_n} V_t dt \quad (14)$$

\$D_3\$: 鉄筋の腐食減量 (mg/cm²) \$V_t\$: 鉄筋の腐食速度 (mg/cm²/year)である。

\$V_t\$は一般式(15)で表せる[12]。ここに、\$a, b\$ は定数である。

$$V_t = \frac{1}{\sqrt{x}}(a C_t + b) \quad (15)$$

(15)を式(14)に代入すると式(16)の \$D-F\$関係式が得られる。定数 \$a, b\$ を求めた例には以下がある[12]。

$$D_3 = \frac{1}{\sqrt{x}}(a F_2 + b t_n) \quad a = 6.0, b = 0.4W/C - 31.7 \quad (16)$$

ここに、\$W/C\$: 水セメント比 (%) である。

(3) \$P-D\$ 曲線 (鉄筋の腐食減量とコンクリート表面のひび割れ幅の関係)

構造性能 \$P\$はコンクリート表面のひび割れ幅とする。

ひび割れ発生と鉄筋の腐食減量との関係は下式 [13]となる。

$$D_u = -(0.19d + 0.06x + 2.0) \cdot \ln(F_c) + 0.1d + 47 \quad (17)$$

ここに、\$D_u\$: FEM 解析によるひび割れ発生時(幅 0.1mm)の鉄筋の腐食減量(mg/cm²)、\$d\$: 鉄筋の直径(mm)、\$F_c\$: コンクリートの圧縮強度 (N/mm²) である。筋の腐食量とひび割れの開口とはほぼ線形関係にあることより[14]、鉄筋の腐食減量 \$D_3\$とひび割れ幅(mm) \$P_8\$との関係は下式となる (添字の 8 はひび割れを表す)。

$$P_8 = 0.1 \frac{D_3}{D_u} \quad (18)$$

4.5 劣化評価ダイアグラム (PDFt 曲線) の例

Fig. 5 に、前節 4.4 塩分浸透に示す各式より作成した PDFt 曲線を示す。本図は塩分濃度が過酷な条件 (海水) での、時間 \$t\$、塩化物作用量 \$F\$、腐食減量 \$D\$、コンクリート表面のひび割れ幅 \$P\$ の関係を示した。本図右下 \$P-t\$ 曲線より、表面ひび割れが発生する時期、供用期間での表面ひび割れの有無等が推定評価できる。

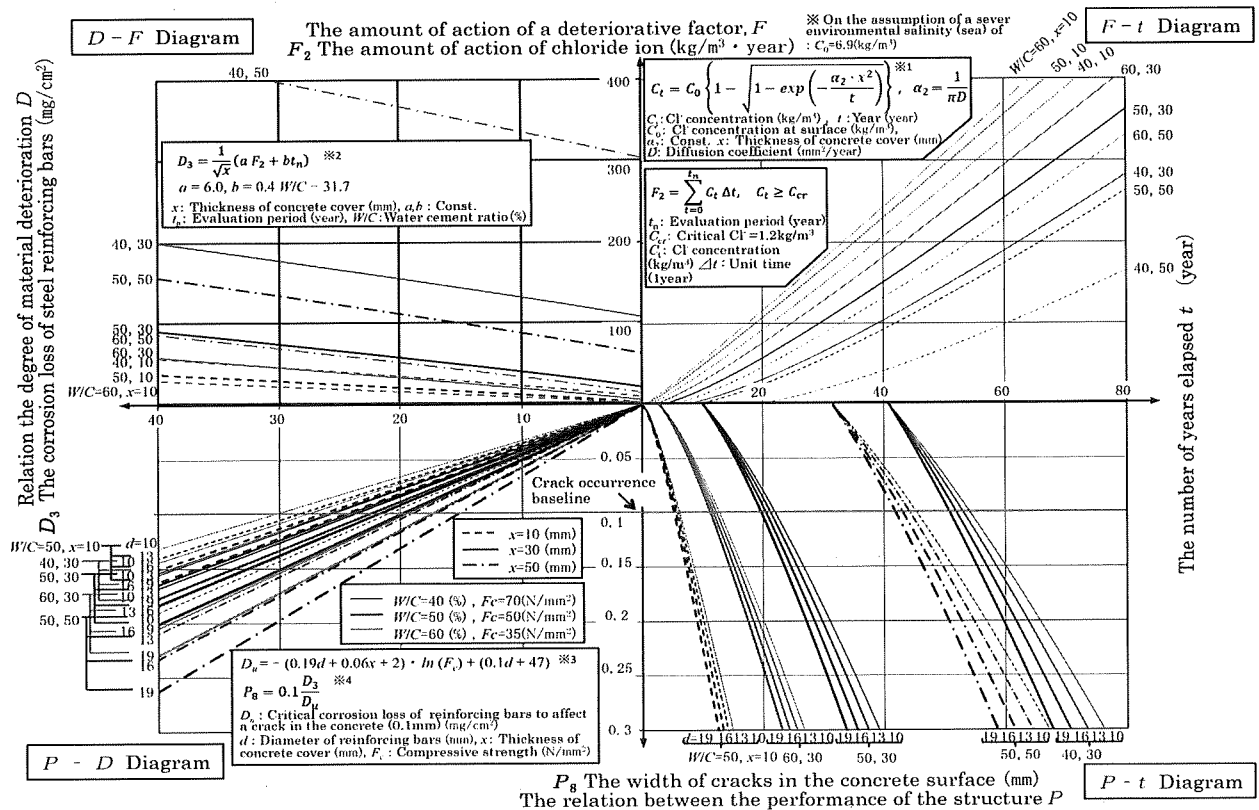


Fig.5 Example of a PDFt curve, saline penetration, rebar corrosion and concrete cracking

4. まとめ

RC構造物の劣化度評価の方法論について述べ、熱、放射線、中性化、塩害の劣化に着目し、それらの評価に必要な評価基本式を、既往の文献を調査整理し提示提案した。

本研究の一部は、原子力安全・保安院のプロジェクト「高経年化対策強化基盤事業（2006-2010）」の成果である。関係各位の協力を謝意を表す。

参考文献

- [1] 橘高義典:鉄筋コンクリート構造物の高経年化技術評価における健全性評価の方法日本建築学会技術報告集、No. 32、pp. 27-30、2010. 2
- [2] 独立行政法人 原子力安全基盤機構：高経年化技術評価審査マニュアル コンクリートの強度低下及び遮へい能力低下（含む鉄骨構造の強度低下）JNES - SS - 0512 - 04、2009. 4
- [3] Hilsdorf, H.K., Kropp, J., Koch, H.J., “The effects of nuclear radiation on the Mechanical Properties of concrete”, ACI SP-55, pp.223-254, 1978.8
- [4] U.S. Nuclear Regulatory Commission Office of Nuclear Regulatory Research Washington., “Primer on Durability of Nuclear Power Plant Reinforced Concrete Structures - A Review of Pertinent Factors”, 2006.
- [5] 安部武雄, 大塚貴弘, 小林裕, 道越真太郎：高温度における普通強度コンクリートの力学的特性、日本建築学会構造系論文集（615）、pp7-13、2007. 5
- [6] 浜田稔：コンクリートの中性化と鉄筋の腐食、セメント・コンクリート、No272、1969
- [7] 岸谷孝一：鉄筋コンクリートの耐久性、鹿島建設技術研究所出版部、1963
- [8] 友沢史紀, 福士勲, 森永繁：中性化および鉄筋腐食速度にもとづく鉄筋コンクリートの速度論的耐久性予測手法に関する予備的考察、学術講演梗概集、A、材料・施工、防火、海洋、電算利用 60、pp101-102、1985. 9
- [9] 丸屋剛：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 11-1、pp597-602、1989
- [10] 川上英男, 脇敬一：コンクリートへの塩分浸透と塩害環境の評価、日本建築学会構造系論文報告集（453）、pp9-14、1993. 11
- [11] 村山八洲雄, 須田久美子, 永田茂：塩分浸透における \sqrt{t} 則, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第5部 Vol. 58, pp9-10, 2003. 9
- [12] 日本コンクリート工学協会, コンクリート構造物の長期性能照査支援モデルに関するシンポジウム委員会報告書・論文, 鳥取式, pp. 204, 2004. 10
- [13] 橘高義典, L. P. Nguyen, 塚越雅幸, 松沢晃一: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報告集, 2011 CD-ROM, pp. 1145-1150., 2011. 7
- [14] 橘高義典：表面ひび割れ幅からの鉄筋腐食減量の推定に関する破壊力学的検討, 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に関するシンポジウム・論文集, pp. 21-28, 1998

(平成 24 年 6 月 21 日)

