

V-22

コンクリート構造物の維持管理のための劣化予測の検討

北見工業大学工学部 正員 桜井 宏 正員 鮎田 耕一
 北見工業大学客員教授 (日鐵セメント(株)) 正員 藤田 嘉夫
 北海道大学工学部 正員 佐伯 昇
 北見工業大学大学院 学生員 ○中尾 和武

1. はじめに

鉄筋コンクリートは、主要な構造材料として多種多様な構造物に用いられており、また、それらの構造物の置かれる環境也多岐にわたっている。コンクリート構造物は、元来耐久性に富む構造物であり、従来よりメンテナンスフリーの考え方が支配的であった。しかし、コンクリート構造物の劣化の現状を考慮すると、維持管理を必要とするものが多数を占めるようになりつつある。従って、コンクリート構造物の維持管理が重要視されてきている。¹⁾

本研究の目的は、耐久性に関する既往の研究データ等を用いて劣化予測方法を検討し、各劣化機構、コンクリート構造物(特に部材)の性能に与える影響を明確にし、劣化予測を導入した維持管理の技術を開発することである。

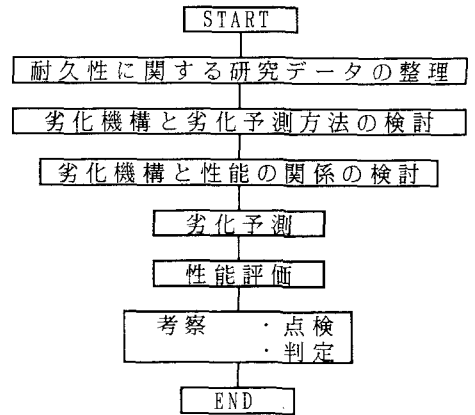


Fig.2.1コンクリート構造物の維持管理のための劣化予測の検討方法のフロー

2. 検討方法

Fig.2.1にコンクリート構造物の維持管理のための劣化予測の検討方法のフローを示す。

始めに、耐久性に関する研究データの整理を行い、劣化機構と劣化予測方法を検討する。次に、劣化機構と性能との関係を検討する。実際に、劣化予測と性能評価を行い点検方法や劣化判定について検討を行う。

Table.3.1.1中性化の劣化予測のための劣化指標、劣化現象、劣化要因等

3. 検討

3.1 劣化機構の検討

コンクリート構造物に影響を及ぼす劣化機構について、塩害、中性化、凍害、アルカリ骨材反応、化学的コンクリート腐食、疲労、その他²⁾項目を挙げた。本研究では一例として、この中の中性化と化学的侵食について検討を行う。Table.3.1.1に中性化、Table.3.1.2に化学的コンクリート腐食の劣化予測のための劣化指標、劣化現象、劣化要因等を示す。

劣化機構 劣化の評価項目	劣化が影響を 与える性能	劣化指標	劣化現象	劣化要因 内因要因 外因要因	劣化予測
中性化 耐鉄筋腐食 耐強度低下 耐荷重	中性化深さ (mm) 中性化深さ 率(%) ^{*)} 鉄筋位置 (かぶり)の pH	中性化深さ 率(%) 鉄筋腐食	中性化(アルカリ性の低下) 鉄筋腐食 養生条件 施工条件 D: かぶり(mm)	W/C: 水セメント比 (%) R: 中性化比率 セメントの種類 添加剤の種類 骨材の種類 使用年数(年) ①: 湿度 ②: 温度 ③: 湿度・温度の影響がない(a=1/2) ④: 降雨の影響がある(a=1/2)	$W/C \geq 0.03$ $x = \sqrt{\frac{R^2 \cdot 0.01W/C - 0.25}{0.3(1.15 + 3 \cdot 0.01W/C)}} \cdot t$ $W/C < 0.03$ $x = \sqrt{\frac{R^2 \cdot 0.046W/C - 1.75}{7.2}} \cdot t$ $X = \frac{x}{\text{かぶり}} \cdot (\%) \cdot k_1 \rightarrow t^*$ ①: 外的及び内因的要因に影響を受ける

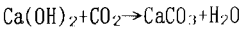
*) 中性化深さ率(%)は、中性化深さ(mm)をかぶり(mm)で割ったものである。

3.2劣化機構と劣化予測についての検討

劣化機構のコンクリート部材の性能に与える影響を検討し、劣化予測を行う。ここでは、中性化²⁾ ³⁾ ⁴⁾ と化学的コンクリート腐食³⁾ ⁵⁾ について検討した。

3.2.1中性化の劣化機構と劣化予測についての検討

通常のポルトランドセメントでは、生成する水酸化カルシウムはセメントの約1/3である。水酸化カルシウムは、pH12～13の強アルカリ性を示す。一方大気中には、弱酸性の炭酸ガスが約0.03%含まれている。その結果、水酸化カルシウムと炭酸ガスとが、



のように反応して炭酸カルシウムを生成する。炭酸カルシウムは、pH8.5～10程度である。

このように、中性化がコンクリートに与える主な影響は、アルカリ性の低下である。

ここでは、水セメント比：W/C<60%で一般に多く用いられているの以下の式²⁾を例としてあげ、経過年数(供用年数)にともなう中性化深さ率を求めた。

$$x = \sqrt{\frac{R^2(0.046 \cdot W/C - 1.76)^2}{7.2}} t \quad \dots \text{式(3.2.1.1)}$$

$$X = \frac{\text{中性化深さ}}{\text{かぶり}} \quad \dots \text{式(3.2.1.2)}$$

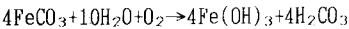
x：中性化深さ(mm)，X：中性化深さ率(%)，t：供用年数(年)
R：中性化比率，W/C：水セメント比(%)

Fig.3.2.1.1に中性化によるコンクリート部材の劣化のフローを示す。

また、中性化比率 1.0、かぶり 2cm として検討を行った。

(1)中性化による鉄筋腐食

中性化がコンクリートの性能低下に与える影響は、直接的に中性化という現象がコンクリートの劣化を生じさせることは少なく、中性化によるアルカリ性の低下によってコンクリート中の鉄筋が発錆し、耐力低下を生じるというものである。健全なコンクリートである場合、コンクリート中の水酸化カルシウムは、pH12～13の強アルカリ性を示し、鉄筋表面に保護的な被膜ができ鉄筋は腐食しない。しかし中性化が進行するにつれてpHが低下しpH<11になると水分と炭酸ガスによって、



のように反応して鉄筋が腐食される。

Table.3.1.2化学的コンクリート腐食の劣化予測のための劣化指標、劣化現象、劣化要因等

劣化機構 劣化の評価項目	劣化が影響を与える性能	劣化指標	劣化現象	劣化要因		劣化予測
				内部的要因	外的要因	
化学的コンクリート腐食	美観	平均被食深さ(mm)	表面劣化	W/C：水セメント比(%)	一般的な塩(硫酸、塩酸等)	実験データの回帰線 W/C=55% S=-100-EXP(-0.2482+0.0732-5)S-4) S：硫酸濃度(%) t：供用年数(年)
	耐鉄筋腐食 耐荷性	被食深さ率(%) 強度低下率(%) 動弾性係数変化率(%)	断面劣化	Re：透水係数 H：部材断面寸法(mm) D：かぶり(mm)	硫酸塩 硫酸マグネシウム 海水 亜硫酸塩 硝酸塩 ふっ化物 酢酸塩 乳酸、タンニン酸 その他	

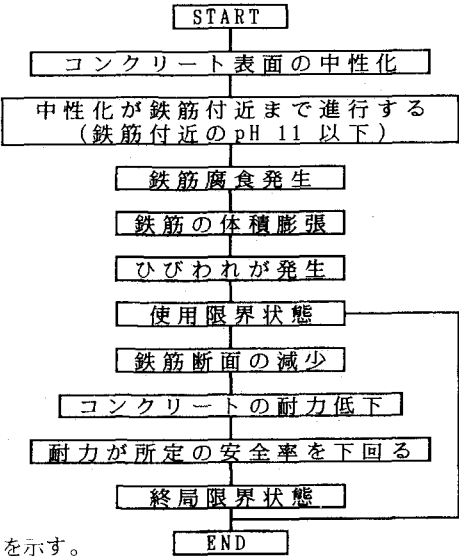


Fig.3.2.1.1中性化によるコンクリート部材の劣化

ここでは、中性化の進行による鉄筋位置のアルカリ性の低下を主要因とした経過年数にともなう鉄筋の発錆面積率を求めた。 ϕ を正規分布関数とする次式³⁾を示す。

$$P = (1 - \phi((D-x)/0.41x)) \cdot 100 \quad \text{.....式(3.2.1.3)}$$

x : 中性化深さ(平均値)(mm), D : かぶり(mm)

なお、ここでの x は平均値を代入するものとする。

Fig.3.2.1.2に発錆面積率と供用年数の関係を示す。

また、一例として中性化促進試験における鉄筋腐食について、かぶり厚さ2cmの位置の鉄筋で中性化深さ率を平均値で示すと中性化深さ率70~100%にかけて発錆が始まり、中性化深さ率120~140%まで進行してくると発錆率20~50%となった報告⁴⁾がある。

(2)鉄筋腐食によるひびわれ

中性化によるアルカリ性の低下によって、鉄筋は発錆し体積膨張する。やがて錆の進行とともにその膨張圧によってかぶりコンクリートに剥離や縦ひびわれが生ずる。この段階からアルカリ性の低下に加えて空気や水分の供給が自由になり加速度的に腐食が進行する。この時点で補修の必要性が生じ使用限界と考えることができる。

(3)中性化による耐力低下

中性化が耐力に及ぼす影響については、鉄筋の腐食による鉄筋断面の減少が原因として挙げられる。

中性化による鉄筋断面の減少について、ここでは鉄筋としての機能から推察する。発錆面積率が増加するとその機能は低下する。従って、発錆面積率と断面の減少率を同じ値になると仮定して経過年数にともなうコンクリートの曲げ耐力 Mud の低下を算定する。

$$Mud = As \cdot f_{yd} \cdot (d - y_c) \quad \text{.....式(3.2.1.4)}$$

As : 鉄筋総断面積(cm^2), f_{yd} : 鉄筋降伏強度(kgf/cm^2)

d : 有効高さ(cm), $y_c = 0.416x$, x : 中立軸

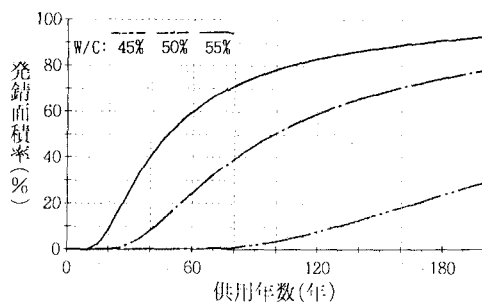


Fig.3.2.1.2 発錆面積率と供用年数の関係

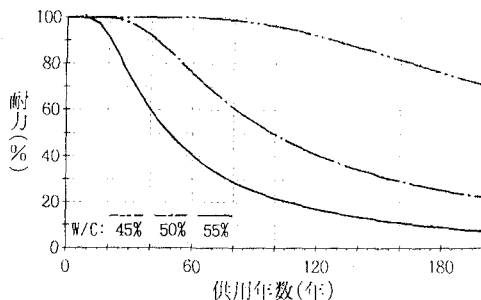


Fig.3.2.1.3 耐力低下と供用年数の関係

Fig.3.2.1.3に耐力低下と供用年数の関係を示す。

3.2.2 化学的コンクリート腐食の劣化機構と劣化予測についての検討

化学的コンクリート腐食によるコンクリートの劣化は、まず表面部分に膨張性のひびわれを生じ、その部分が剥離するといった現象を繰り返す。しかし、強酸により侵食されたコンクリートでは、表層の劣化部分を除去するとそれより内部は健全な状態を維持しているというのが一般的であるが、コンクリートにひびわれがあるときは溶液はひびわれを伝って内部に侵入し、コンクリートを内部から侵食することもある。なお、表面剥離によりかぶりが劣化し鉄筋腐食を生じることもあるが、ここではコンクリート自体の腐食を主に考える。

Fig.3.2.2.1に化学的コンクリート腐食によるコンクリート部材の劣化のフローを示す。

また、供試体寸法 $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ 、かぶり 1cm、コンクリート強度 344kgf/cm^2 、鉄筋径 0.6cm、鉄筋の降伏強度 3500kgf/cm^2 と仮定して検討を行った。

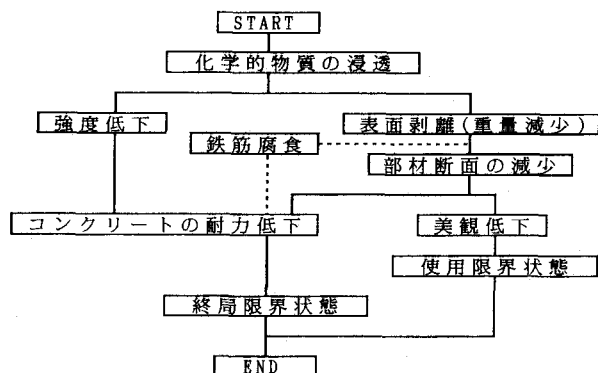


Fig.3.2.2.1化学的コンクリート腐食によるコンクリート部材の劣化

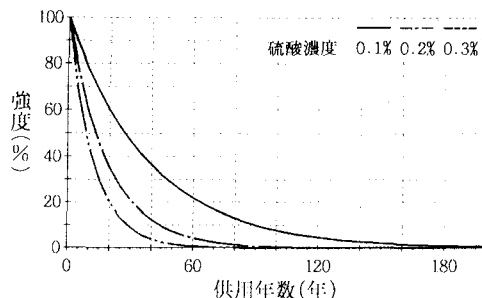


Fig.3.2.2.2コンクリートの強度低下と供用年数の関係

(1)化学的コンクリート腐食によるコンクリートの強度低下

コンクリートが化学的コンクリート腐食を受ける場合、まず表面部に膨張性のひびわれを生じる。そのひびわれにより内部が侵食されコンクリート自体の強度は低下する。それ故、コンクリートの強度低下SN(%)は、硫酸濃度により著しく異なると考えられる。既往の実験データ⁵⁾の回帰より硫酸濃度を考慮した次式を得た。

$$SN=100 \cdot \exp((-0.2482 \cdot S - 0.0732 \cdot S^2)t) \quad \cdots \text{式(3.2.2.1)}$$

S: 硫酸濃度(%) t: 供用年数(年)

Fig.3.2.2.2にコンクリートの強度低下と供用年数の関係を示す。

(2)化学的コンクリート腐食による美観の低下

コンクリートが化学的コンクリート腐食を受け、表面部が剥離するといった現象は、美観の低下につながると考えられる。

化学的コンクリート腐食によるコンクリートの剥離度は、重量変化率から推定できる。つまり、剥離面積が増加すると体積は減少し、コンクリート自体の重量も減少する。

コンクリートの剥離度を美観の低下EA(%)と定義し、硫酸の濃度を考慮した次式を得た。

$$EA=(0.1476+0.1927 \cdot \log(S+0.17)) \cdot t \quad \cdots \text{式(3.2.2.2)}$$

S: 硫酸濃度(%) t: 供用年数(年)

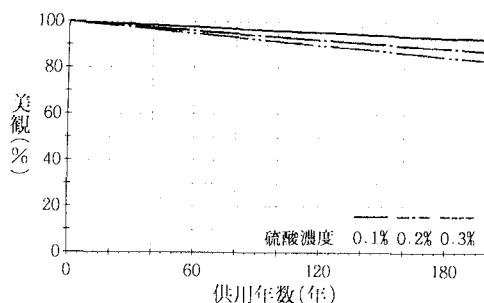


Fig.3.2.2.3美観の低下と供用年数の関係

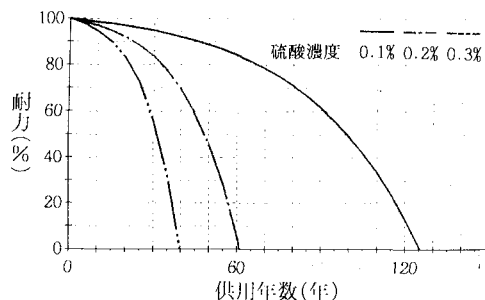


Fig.3.2.2.4耐力低下と供用年数の関係

Fig.3.2.2.3に美観の低下と供用年数の関係を示す。

使用限界状態⁶⁾に関しては、構造物の美観が重要な場合には、美観的な使用目的に適合する使用限界状態を設定して適切な方法によって必要な検討を行わなければならない。

(3)化学的コンクリート腐食による耐力低下

鉄筋コンクリートの曲げ耐力を検討するにあたって、化学的コンクリート腐食という劣化機構を挙げた場合、有効高さの減少と中立軸の変動を考える必要がある。コンクリートが化学的コンクリート腐食を受けたとき、上部(圧縮面)が侵食されることによって、有効高さの減少を生じる。また、側面部が侵食され断面

幅が減少し、さらにコンクリートの強度が低下することによって、中立軸が変動する。

これらのことを考慮した上で、経過年数にともなうコンクリートの曲げ耐力の低下を式(3.2.1.4)を用いて算定する。

Fig.3.2.2.4に耐力低下と供用年数の関係を示す。

3.3考察

3.3.1中性化について

中性化によるコンクリート構造物の劣化予測については、アルカリ性の低下に伴う鉄筋腐食による鉄筋断面の減少に着目して耐力の低下を算定したところ、下に凸のグラフを得ることができた。ここでは、鉄筋の腐食面積100%を鉄筋の断面0%と仮定して算定したが、今後この関係をもっと確率論的に明らかにする必要があると思われる。

(1)中性化の点検方法

中性化の点検は、コア採取等により中性化深さ率、鉄筋位置の等を測定する。中性化の進行によるかぶりコンクリートの炭酸化和鉄筋腐食の可能性の有無の確認を主な目的として点検方法をあげた。

Table.3.3.1に中性化の点検方法を示す。

Table.3.3.1中性化の点検方法

劣化機構 劣化の評価項目	劣化指標	点検方法
中性化	中性化深さ(mm) 中性化深さ率(%) 鉄筋位置(かぶり)のpH	1.コア採取やコンクリートの表面のはつり等により試料を採取しフェノールフタレインアルコール1%溶液の噴霧による赤紫色の発色判定 2.ドリル等により採取した試料の鉄筋位置付近までのpH試験 3.採取試料によるEDとDTAによる分析

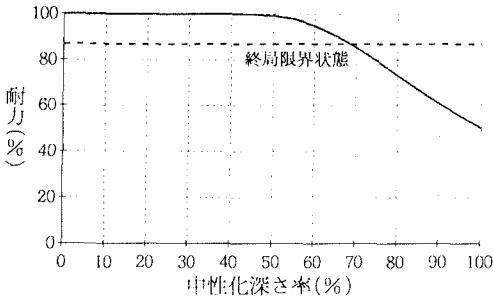


Fig.3.3.1中性化深さ率による判定

(2)中性化における劣化判定の検討

式(3.2.1.2)より求めた中性化深さ率の増加に伴う鉄筋断面の減少率を式(3.2.1.4)に代入して曲げ耐力の低下を求めた。

Fig.3.3.1に中性化深さ率に伴う耐力低下の関係を示す。これによると、点検時の中性化深さ率から構造物としての性能低下を推定できると思われる。また設計時の安全率を仮に1.15と仮定した構造物は、耐力低下が87.0%で終局限界状態に達すると仮定される。即ち終局限界状態は、曲げ耐力の低下により安全率<1.0となったときである。これは、中性化深さ率で68.6%であると推定できる。

なおここで述べる安全率とは、安全係数では材料等の不確実性を分割して割りつけているのに対し、これらをまとめて取扱っているものである。⁷⁾

3.3.2化学的コンクリート腐食について

化学的コンクリート腐食によるコンクリート構造物の劣化予測については、化学的コンクリート腐食によるコンクリートの強度低下及び表面剥離に着目して耐力の低下を算定したところ、上に凸のグラフを得ることができた。これより、化学的コンクリート腐食による経過年数にともなうコンクリートの強度低下がコンクリート構造物の耐力等の性能に大きな影響を与えていると思われる。

(1)化学的コンクリート腐食の点検方法

化学的コンクリート腐食の点検は、外観検査、コア採取等により、平均被害深さ、強度低下率、動弾性係数変化率等を測定する。化学的コンクリート腐食の進行によるコンクリートの強度低下と表面剥離の発生の有無の確認を主な目的として点検項目をあげた。

Table.3.3.2に化学的コンクリート腐食の点検方法を示す。

(2)化学的コンクリート腐食における劣化判定の検討

式(3.2.2.1)より求めた、化学的コンクリート腐食によるコンクリートの強度低下率を式(3.2.1.4)に代入して曲げ耐力の低下を求めた。

Fig.3.3.2に強度低下に伴う耐力低下の関係を示す。これによると化学的コンクリート腐食は、点検時の強度低下から構造物としての性能低下を推定することができると思われる。また設計時の安全率を仮に1.15と仮定した構造物は、耐力低下が87.0%で終局限界状態に達すると仮定される。即ち終局限界状態は、曲げ耐力の低下により安全率<1.0となったときである。これは、化学的コンクリート腐食による強度低下が75.1%であると推定できる。

Table.3.3.2化学的コンクリート腐食の点検方法

劣化機構 劣化の評価項目	劣化指標	点検方法
化学的コン クリート腐食	平均被害深さ(mm)	1.外観検査(目視、写真撮影(被害面積測定)、被害深さ測定) 2.超音波伝播速度測定による強度や弾塑性係数の推定 3.シュミットハンマーによる表層強度の測定 4.コア採取による圧縮強度測定 5.採取試料による化学分析(有害物質含有量の測定、XRD、DTA)
	被害深さ率(%)	
	強度低下率(%)	
	弾塑性係数変化率(%)	

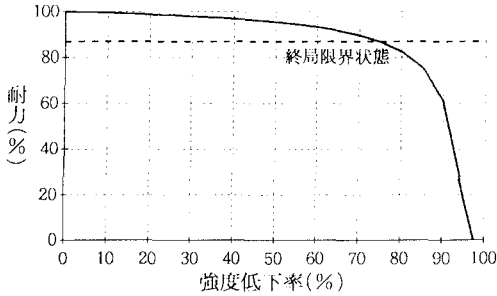


Fig.3.3.2強度低下率による判定

4.まとめ

中性化と化学的コンクリート腐食の内的要因と外的要因を整理して劣化機構を明らかにし、劣化指標である中性化深さ率、強度低下率等よりコンクリート構造物の部材の曲げ耐力等の性能低下を劣化予測することができた。

【謝辞】

本研究に際し、土木学会コンクリート標準示方書改定小委員会維持管理部会(関博委員長)の活動を通じて各委員の貴重な御助言を受けた。大成建設(株)情報化施工開発室鈴木明人室長他の御指導と御協力を受けた。また、北見工業大学岡田包儀技官、猪狩平三郎技官、北見工業大学コンクリート研究室卒論生伊藤篤、佐瀬勝明氏等の御協力を受けた。ここに感謝する。

【参考文献】

1)土木学会コンクリート工学ライブラリーNo.70, 1991, pp.277~302
2)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, pp.2~3, pp.147~153
3)桜井宏, 鮎田耕一, 藤田嘉夫, 佐伯昇, 鈴木明人: Prediction and Evaluation of Concrete Structure in cold Regions, 北見工業大学研究報告書, 第23巻第2号, 1992, pp.129~138
4)副島泰信, 杉田英明, 御手洗泰文: 鉄筋の発錆に及ぼす塩化物および中性化の影響について, セメント技術年報, No.42, 1988, pp.371~374
5)池永博威: 種類と濃度の異なる酸および塩の溶液に浸漬したコンクリートの劣化, セメント技術年報, No.37, 1983, pp.326~329
6)土木学会コンクリート標準示方書設計編: 使用限界状態に関する検討, 平成3年版, pp.82~93
7)土木学会コンクリート標準示方書設計編: 設計の基本, 安全係数と修正係数, 平成3年版, pp.10~15