

論文

[1107] 信頼性理論によるコンクリート構造物の劣化の評価

正会員 ○ 桜井 宏 (北見工業大学工学部)
 正会員 鮎田 耕一 (北見工業大学工学部)
 正会員 佐伯 昇 (北海道大学工学部)
 正会員 鈴木 明人 (大成建設生産技術本部)

1. はじめに

コンクリート構造物の耐久設計や維持管理を適切にする上で経年変化や劣化の発生する確率を把握することが必要となってきた。これには、管理限界値(劣化限界値)設定やそれを超過する確率の把握が必要である。本検討ではこれらの検討を信頼性理論を用いて行なう。

2. 方法

2.1 解析方法

2.1.1 解析理論

観測期間に故障が発生していないデータ(右側打ち)を含むような故障(生存)時間に対して以下のモデルを仮定する。

$$Y = Xb + \sigma \varepsilon \text{-----式(1)}$$

Yはベクトルで通常故障時間の対数を用いられる。Xは共変量(独立変数)を並べた行列とする。本検討では共変量Xとして劣化の主要な要因と考えられる水セメント比と養生日数を選定した。bは未知の回帰ベクトルで共変量Xの係数に相当する。σは母数、εは仮定された分布に従う誤差のベクトルとする。

このモデルは、共変量が基準故障分布の尺度を変化させる様に作用させるため加速故障時間モデル(The accelerated failure time model)とも呼ばれる。本モデルにおいては、各共変量は、故障時間に対して乗法的に作用すると仮定される。共変量値が0の個体に対応する故障時間、即ち基準分布の確率分布からの確率変数を T_0 としたとき、共変量のベクトルがXの個体の故障時間は、以下のような確率変数として仮定される。

$$T = \exp(X'b) \times T_0 \text{-----式(2)}$$

ここで、 $Y = \log(T)$, $Y_0 = \log(T_0)$ とすると以下のようなになる。

$$Y = Xb + Y_0 \text{-----式(3)}$$

式(3)は、 Y_0 が誤差項の役割をはたして対数線形モデルである。上記のモデルには、定数(切片)項と尺度を表す係数が含まれる。対数を取る前の故障時間では、定数項は、尺度を変える働きを持ち、尺度を表す係数は、故障時間を中乗する効果がある。ゆえに、係数 μ と σ で下式を仮定する。

$$Y = \mu + \sigma Y_0 \text{-----式(4)}$$

Tと、 T_0 の関係は下式で表される。

$$T = \exp(\mu) \times T_0^\sigma \text{-----式(5)}$$

生存確率を用いて表せば、この加速故障時間モデルは、下式となる。

$$\text{Prob}(T > t | X) = \text{Prob}(T_0 > \exp(-X'b)t) \text{-----式(6)}$$

式(6)の左辺は、共変量値としてXを仮定して計算される値である。右辺は時間tを共変量値に応じて定数倍した後で基準分布から計算される値であり、右辺は、基準生存関数を $\exp(-X'b)t$ で評価した値である。

ここで、基本分布をF(t)とし一般に任意の故障時間分布にたいする適合性が良い2母数ワイブル分布(Weibull distribution)と仮定すると[1][2],

$$F(t) = \exp\left(-\left(\frac{t}{\beta}\right)^{\alpha}\right) \text{-----式(7)}$$

ここで、 α をワイブル分布の形状母数、 β をワイブル分布の尺度母数とする[3]. 式(5)の確率密度関数(p.d.f.:probability density function)は下式となる.

$$f(t) = \frac{\alpha}{\beta} \cdot \left(\frac{t}{\beta}\right)^{\alpha-1} \exp\left(-\left(\frac{t}{\beta}\right)^{\alpha}\right) \text{-----式(8)}$$

ここで、式(4)、式(5)の関係より係数 μ と σ は、

$$\sigma = 1/\alpha \quad \text{及び} \quad \mu = \ln b \text{-----式(9)}$$

2.1.2 コンクリート構造物の劣化の評価への適用

寒冷地のコンクリートの構造物の劣化である表面剥離の表面剥離面積率がある基準を越える事を故障(ハザード)と仮定する. 表面剥離面積率は最近のコンクリートに付加価値として要求されるようになった性能の一つである美観に大きな影響を与えるものとする. そこで、劣化限界を表面剥離面積率で25%として、その劣化限界の1/20である表面剥離面積率が1.25%を超過した時をコンクリート表面に被害(故障またはハザード)が発生したとし、何らかの補修を必要とするとする. そこで設定値の1.25%を超過することに対する信頼性解析を行う.

2.2 検討データ

筆者らが寒冷地の海洋環境下の紋別で継続している表-1に示す条件の曝露試験の2年から11年までの測定値を用いた. これらの測定値をデータとして2.1.1で示した数学モデルの σ , μ , b を求める. 解析結果の検定は小標本において一般に信頼できると考えられている対数尤度に基づく検定を行った. 解析にはSAS(Statistical Analysis System)のLIFEREGプロシジャを使用した.

2.3 検討手順

検討手順を図-1に示す.

表-1 曝露した供試体の環境条件から決まる外的要因と材料、配合、施工等の内的要因全セメントケース

外的要因		内的要因														
年凍結融解回数(回)	海岸(汀線)からの距離(m)	No				No				No						
		セメント	W/C	養生条件	養生日数	セメント	W/C	養生条件	養生日数	セメント	W/C	養生条件	養生日数			
59.4 (8年間の平均)	30~50 (時期により変動)	1	N	55	F*	0	8	FB	55	F	0	15	BB	55	F	0
		2	N	55	F	5**	9	FB	55	F	5	16	BB	55	F	5
		3	N	55	F	14	10	FB	55	F	14	17	BB	55	F	14
		4	N	55	S*	5	11	FB	55	S	5	18	BB	55	S	5
		5	N	45	F	5	12	FB	45	F	5	19	BB	45	F	5
		6	N	45	F	14	13	FB	45	F	14	20	BB	45	F	14
		7	FA	55	F	5	14	FC	55	F	5					

注. 各供試体につき3面の測定面がある

N: 普通ポルトランド, FA:フライッシュA種, FB:フライッシュB種, FC: フライッシュC種, BB: 高炉B種

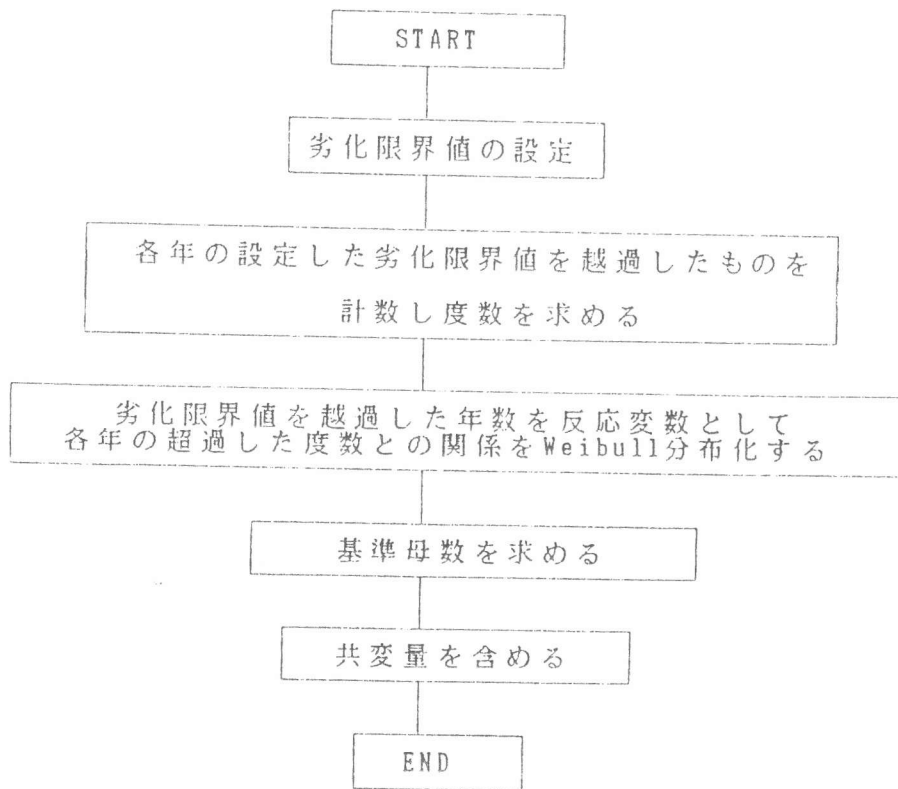


図-1 検討方法

3. 検討結果

図-2に全供試体の各年の設定値を越えたデータの度数のヒストグラムを示す。また一番右側に11年目でも、設定値を越えないデータのヒストグラムを示す。設定値を越えるものは初期が多く経過年数とともに減少する傾向がある。

図-3に普通ポルトランド(N), 高炉B種(BB), フライアッシュB種(FB)の主なセメント別のヒストグラムを示す。Nに比べ、BBとFBは設定値を早く超過する傾向がある。

劣化の設定値(表面剥離面積率1.25)%を
超過する度数

全セメントケース(N, FA, FB, FC, BB)

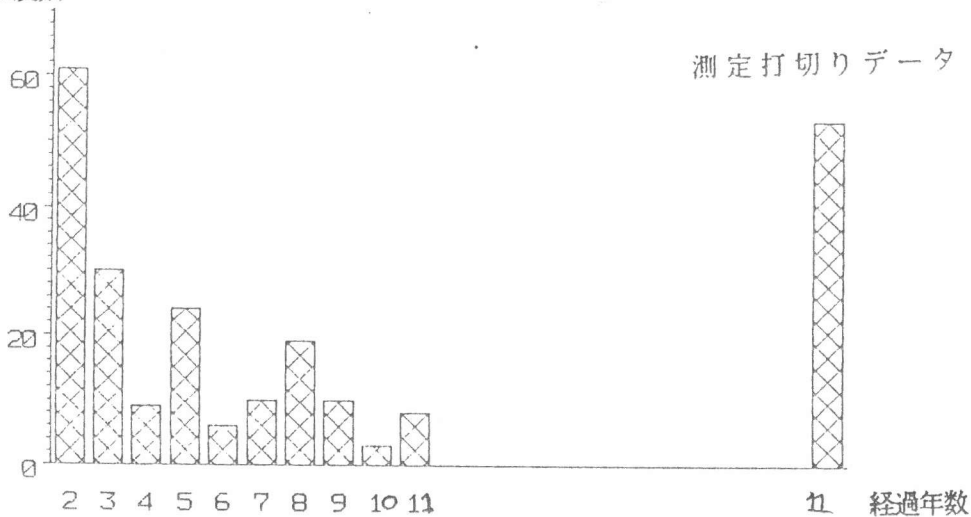


図-2 全供試体の各年の設定値を越えたデータの度数のヒストグラム

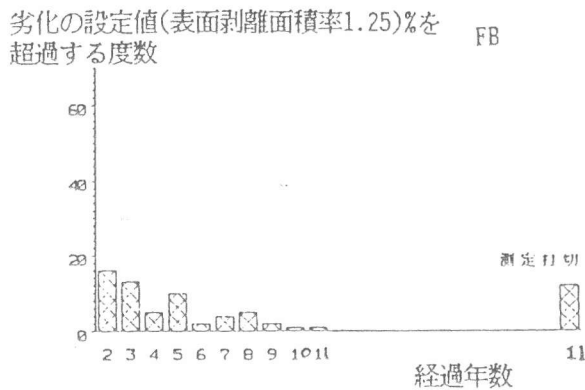
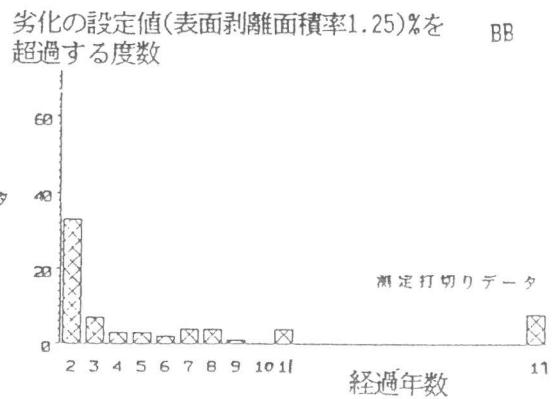
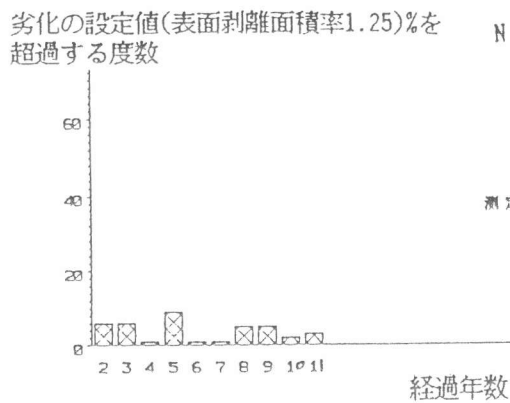


図-3 普通ポルトランド(N), 高炉B種(BB), フライアッシュB種(FB)の主なセメント別のヒストグラム

ここで水セメント比と養生日数を共変量にとり解析した結果を表-2に示す。表-2より $\lambda_0(t)=f(t)$ とおくと以下の故障率関数と信頼度関数の係数が求められる。

故障率関数 (hazard function): $\lambda(X, t) = \mu \times \lambda_0(t) \times \Psi(X)$ -----式(10)

信頼度関数 (reliability function): $R(t) = \exp(-\int_0^t \lambda(x) dx)$ -----式(11)

ただし, $\Psi(X) = \exp(X, b) = \exp(b_1 X_1 + b_2 X_2)$ -----式(12)

このようにコンクリートの劣化に対して適切な劣化限界値を設定することにより信頼性解析が可能である事が確認された。

今後、他の要因もさらに数値化し共変量として、適切な共変量の組合せを検討することにより、最大化対数尤度が高い解析式が求められると考えられる。また、他の劣化に対してもこの手法が適用できると考えられる。

表-2 解析結果

	推定値	標準誤差推定値	係数が0になる χ^2 統計値	より大きい χ^2 が出現する確率(PR> χ^2)	
切片(μ)	4.765	0.690	47.65	0.0001	
共変量(b)	w/c b_1	-0.056	0.013	19.65	0.0001
	養生日数 b_2	0.026	0.011	5.59	0.018
尺度(σ)	0.688	0.042	-	-	
最大化対数尤度	-277.5	-	-	-	

4. まとめ

信頼性理論によるコンクリート構造物の劣化の評価を表面剥離面積率を用いて検討した結果、コンクリート構造物にの劣化に劣化限界値を設定すると信頼性理論が適用できることが確認された。

参考文献

- 1) 真壁肇: 信頼性データの解析, 岩波書店, 1987年
- 2) 菅野文友: 信頼性工学, 電子通信学会編, コロナ社, 1980年
- 3) 桜井宏, 鮎田耕一, 佐伯昇, 鈴木明人: コンクリート構造物の経年変化推定のための確率密度関数化の検討, コンクリート工学年次論文報告集11-1, pp.499-504, 1989,