

V-15

信頼性理論を用いたコンクリート構造物の耐久性評価

北見工業大学	正員	桜井 宏
北見工業大学	正員	鮎田 耕一
北海道大学	正員	佐伯 昇
北海道大学	正員	藤田 嘉夫
大成建設	正員	鈴木 明人

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がいられる。 X は共変量(独立変数)を並べた行列とする。 b は未知の回帰ベクトル, 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時間故障モデルとも呼ばれる。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、 $Y = \log(T)$ 、 $Y_0 = \log(T_0)$ とすると以下ようになる。

$$Y = Xb + Y_0 \text{ ----- 式(3)}$$

式(3)は、 Y_0 が誤差項の役割をはたしてる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。

$$T = \exp(\mu) \times T_0 \text{ である。 ----- 式(5)}$$

生存確率を用いて表せば、この加速故障モデルは、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、

Durability evaluating of concrete structure by reliability
by Hiroshi SAKURAI, Koichi AYUTA, Noboru SAEKI, Yoshio HAJITA
and Aketo SUZUKI

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2母数ワイブル分布(Weibull distribution)と仮定すると³⁾、

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

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。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、

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

なお、ワイブル分布に対しては、加速故障時間モデルは比例ハザードモデルと同等であり比例ハザードモデルで共通に使われている。比例ハザードモデルの係数表現と加速故障時間モデルの係数表現は比例ハザードモデルの共変量の係数を b 、加速故障時間モデルを b 、尺度の係数 σ として以下のように表される。

$$b = b/\sigma \text{-----式(10)}$$

2.1.2 コンクリート構造物の耐久性評価への適用

一つの劣化現象がコンクリートに生ずる現象を考えると、これが発生しない信頼度を考えるときこの信頼性のモデルが直列系であると仮定する。また、コンクリート構造物の劣化による性能低下に係わるモデルは、直列系と並列系の組み合わせられたモデルのシステムであると考えられる。

いま、寒冷地のコンクリートの構造物の劣化現象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)と仮定しモデルを直列とする。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仮定する。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考え。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³⁾を使用した。

2.2 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(N,FA,FB,FC,BB)

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)	供試体 No.	セ	W	養生	養生	供試体 No.	セ	W	養生	養生	供試体 No.	セ	W	養生	養生
			メント	/C	条件	日数		メント	/C	条件	日数		メント	/C	条件	日数
59.4 (8年間の平均)	30~50 (時期により変動)	1	N55F0				7	FB55F0				13	BB55F0			
		2	N55F5				8	FB55F5				14	BB55F5			
		3	N55F14				9	FB55F14				15	BB55F14			
		4	N45F0				10	FB45F0				16	BB45F0			
		5	N45F5				11	FB45F5				17	BB45F5			
		6	N45F14				12	FB45F14				18	BB45F14			

注. 各供試体につき12面の測定面がある

N:普通ポルトランドセメント
FB:フライアッシュセメントB種、 F:淡水養生
BB:高炉セメントB種

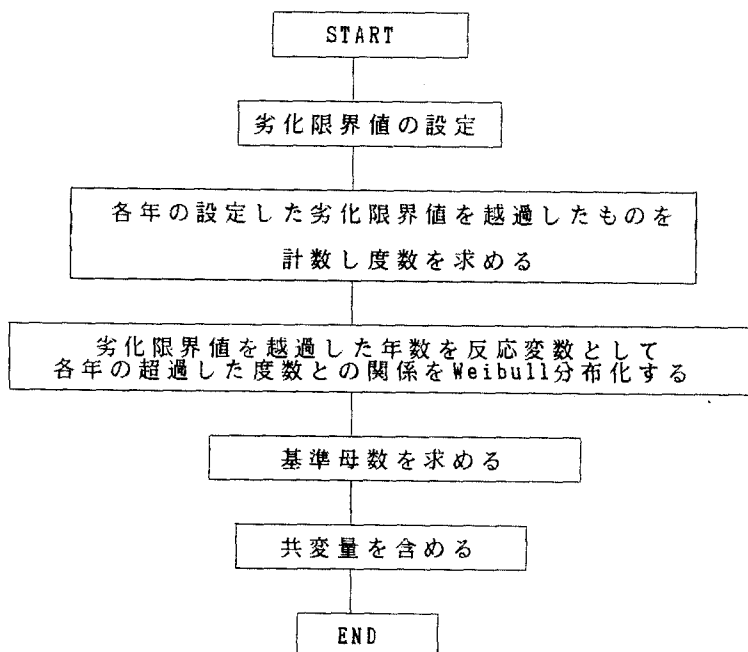


図-1 検討方法

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、設定値を越えない度数のヒストグラムを示す。設定値を越えないデータも本解析では打ち切りデータとして解析値に含まれる。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。

FREQUENCY

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)

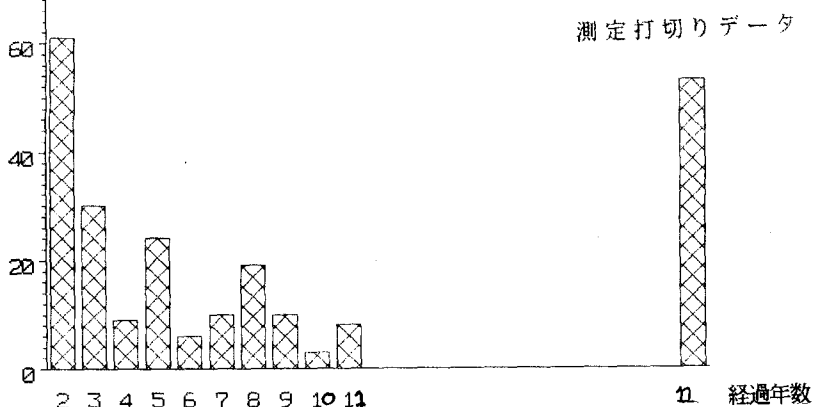


図-2 全供試体の各年の設定値を越えたデータの度数のヒストグラム

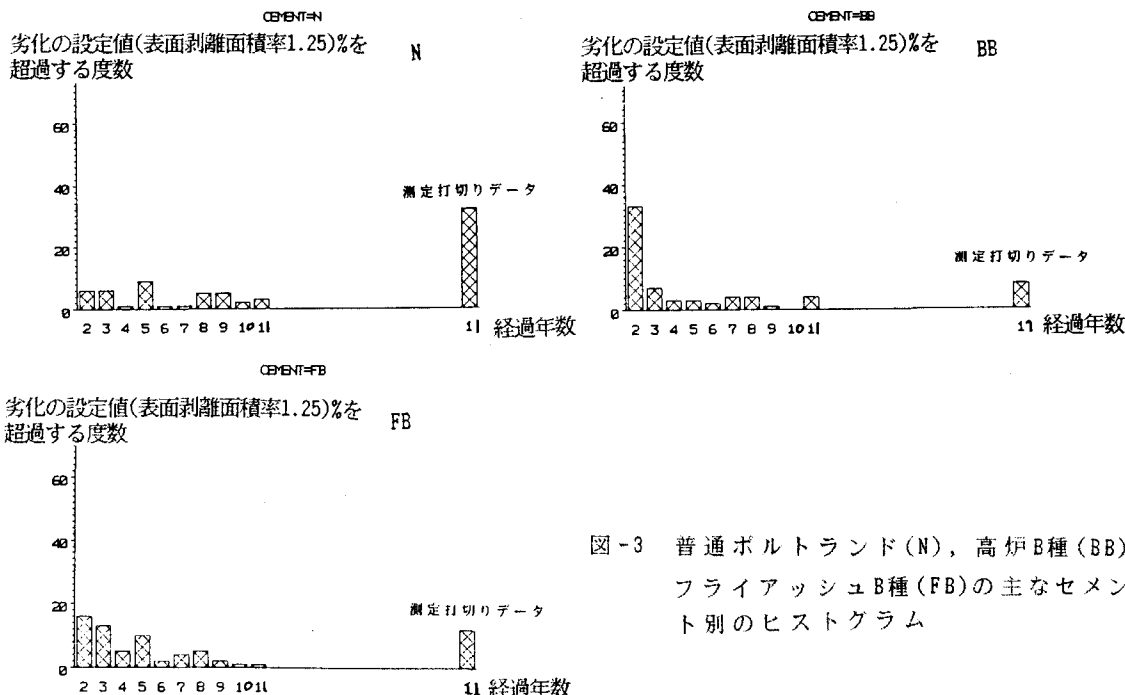


図-3 普通ポルトランド(N), 高炉B種(BB), フライアッシュB種(FB)の主なセメント別のヒストグラム

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。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。

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 ($PR > \chi^2$)
切片(μ)	4.765	0.690	47.65	0.0001
共変 量(b)	w/c	-0.056	0.013	19.65
	養生日数	0.026	0.011	5.59
尺度(σ)	0.688	0.042	-	-
最大化対数尤度	-277.5	-	-	-

今後、要因をさらに数値化することにより解析の精度を向上できると思われる。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。

4.まとめ

コンクリート構造物の劣化である表面剥離面積率に劣化限界値を設定すると信頼性理論が適用できる。

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, 1989, pp499-504

なお、本研究は文部省科学研究費・総合(A)[コンクリート構造物の維持管理システムの確立]の助成を受けているここに謝意を表する。