

V-24

曝露供試体のデータの信頼性解析による耐久性評価の検討

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○阿部 誠

1.はじめに コンクリートの寒冷地海洋環境下の耐久性評価を行うためには、剥離被害についての曝露供試体の被害状況と凍結融解回数などの外的要因や水セメント比などの内的要因が与える影響を把握することが重要である。本研究はコンクリートの寒冷地海洋環境下で曝露実験を行い、その結果を重回帰分析や信頼度関数を用いた信頼性解析を行い耐久性を評価することを検討する。また、信頼度関数の形を詳細に検討し、特に共変量ベクトルの切片の項を考慮した。

2.検討方法

2.1.検討方法

2.1.1検討手順 検討方法のフローをFig.2.1に示す。検討方法として劣化の定義、限界値とそれに達する前の段階の設定値を仮定する。理論式の導入を行う。2.2で述べる実験を実施しデータのインプットを行う。重回帰分析等により劣化の主要な要因を抽出する。適切な確率密度関数を求め、その主要因を共変量として設定値に達したものを故障(hazard)と仮定して信頼性解析(解析プログラム:SAS.LIFEREG)により確率密度関数を求め、それを積分して信頼度関数を求める。また、適切な確率密度関数と信頼度関数の選定を行う。さらに信頼度関数の共変量を変動させて信頼度関数の形状を検討し、信頼度の経年変化を考察する。

2.1.2劣化限界値の設定 曝露供試体のかぶりを8cmと仮定し、許容される限界の剥離深さ(剥離深さの劣化限界)を20mmと仮定した。剥離深さの各段階の設定値(hazardと仮定)を1/1, 1/10, 1/20とすると、各値はTable.2.1.2.1ようになる。

2.1.3信頼性解析のための理論式

主な確率密度関数には次に述べる型がある。

(1)指数分布 事象の発生をポアソン過程と見なせるとき、事象がはじめて発生するまでの時間 t (反応変数)は指数分布にしたがう。

確率密度関数: $f(t)=\alpha \exp(-\alpha t) \cdots \cdots$ 式(2.1.3.1)

ここで $\alpha=\exp(-x'b)$

Study on Concrete Durability Assessment with Exposing Specimen Data by Reliability Theory

by H.SAKURAI,K.AYUTA,Y.FUJITA,N.SAEKI and M.ABE

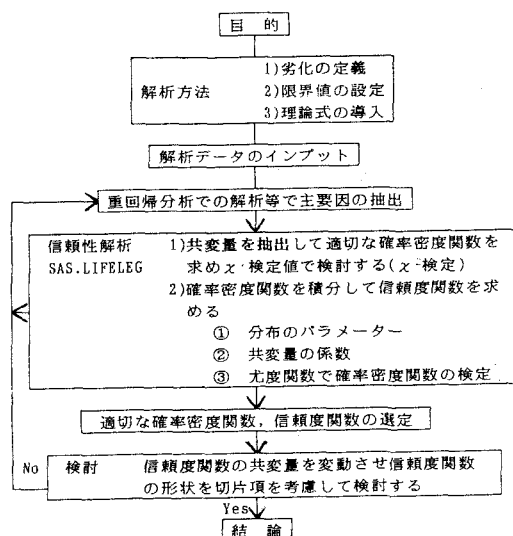


Table.2.1.2.1劣化限界の設定値

劣化限界に対する 設定値の水準	1/1	1/10	1/20
剥離深さ	20mm	2mm	1mm

(2)対数正規分布 反応変数 t があり、 $\log(t)$ が正規分布に従うとき、 t の分布を対数正規分布とい次式で与えられる。

$$\text{確率密度関数: } f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma t} \exp \left(-\frac{(\log t - \mu)^2}{2\sigma^2} \right) \quad \cdots \cdots \text{式(2.1.3.2)}$$

(3)ワイブル分布 故障する(hazard)が発生する)時間を表す反応変数を t として、工学的によく用いられかつ分布形状を的確に表すことのできるワイブル分布を確率密度関数と仮定し共変量を考慮し、信頼度関数を求めた。以下にその式を表す。

信頼度関数と確率密度関数の母数と共変量の関係式

$$\text{信頼度関数: } R(t) = \exp \left(-\left(\frac{t}{\beta} \right)^\alpha \right) \quad \cdots \cdots \text{式(2.1.3.3)}$$

ここで $\alpha=1/\sigma$, σ は尺度母数

$$\text{確率密度関数: } f(t) = \frac{\alpha t^{\alpha-1}}{\beta^\alpha} \exp \left(-\left(\frac{t}{\beta} \right)^\alpha \right) \quad \cdots \cdots \text{式(2.1.3.4)}$$

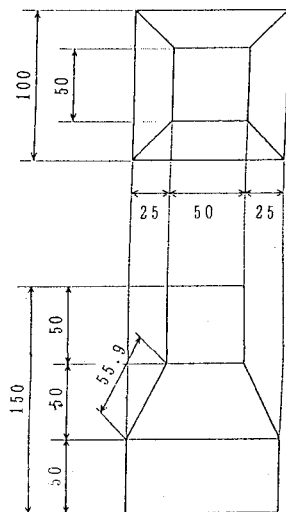
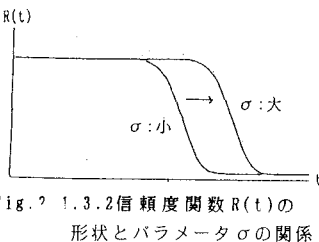
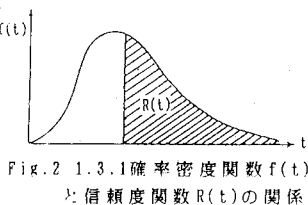
$$\beta = \psi(x) = \exp(x' b) = \exp(b_0 + x_1 b_1 + x_2 b_2 + \cdots + x_n b_n) \quad \cdots \cdots \text{式(2.1.3.5)}$$

x' は共変量のベクトル

b は未知パラメータのベクトル

なお、共変量は式(2.1.3.1)の b 及び式(2.1.3.2)の $\mu=x'b$ にも含まれる。また確率密度関数と信頼度関数の関係をFig.2.1.3.1に示す。信頼度関数の形状とパラメータの関係はFig.3.1.3.2のように $t/\beta \geq 1$ かつ $\sigma > 1$ のとき、 σ が大きくなると $R(t)$ は大きくなる。

2.2.実験方法 Fig.2.2.1に紋別大型供試体の形状寸法を示す。測定は、各供試体ごとに天頂・上段・中段・下段の高さ別、さらに東西南北の方向別に分けて行った。剥離深さの測定方法は、最初に黒マジックインクで測定面の縁どりをを行う。剥離をスケールによる剥離とポップアウトによる剥離に分けて行った。供試体の端部は、測定誤差が生じやすいので除き、スケールによる剥離については、最大35箇所ポップアウトによる剥離については最大12箇所を選んで測定した。剥離深さの経年変化を正確に追うために、前年度測定した剥離部分の座標に合わせ



最大剥離深さを測定した。深さは、ダイヤルゲージ式のデプスゲージ(製造 TECLOCK KK. DM-201型)を用いて測定した。表面剥離面積の測定方法は、前述のスケールを固定して写真撮影を行い剥離面積を測定した。写真から剥離部が 1cm^2 マスで半分以上の面積に相当するマスの数を数えて剥離面積とした。ただし、下部面の下端から 10cm 以下の範囲は、打ち込んだときの締め固め不良部分と剥離部分が明確に区別できないので、測定の対象から除外した。剥離度の算出方法は、剥離を表す尺度として剥離度を用いる。剥離度は、表面剥離面積と剥離深さの2つのパラメータを用いて算出する。その算出方法は次の通りである。

$$\text{剥離度} = (\text{剥離面積} \times \text{剥離深さ}) / (\text{対象とした全面積}) \quad \cdots \cdots \text{式(2.2.1)}$$

これにより、測定面積全体の平均的な剥離の度合いを表すことができる¹⁾。

3.1 解析結果

3.1.1 共変量とする要因について 重回帰分析等⁴⁾で抽出した主要因等を反応変数や共変量にとり、以下の解析結果を得た。Table.3.1.1.1 に指数分布, Table.3.1.1.2に対数正規分布, Table.3.1.1.3にワイブル分布の設定値:剥離深さ2mmの信頼性解析結果を示す。共変量の係数において有意水準1%以内に入っているものは、酸化第二鉄、水セメント比であることがわかる。

3.1.2 適切な確率密度関数 Fig.3.1.2.1に剥離深さの度数分布, Fig.3.1.2.2に指数分布, 対数正規分布, ワイブル分布の確率密度関数を示す。これらを比較するとFig.3.1.2.1では、10年目で度数が高く、Fig.3.1.2.2では、ワイブル分布が10年でピークをむかえていることから、ワイブル分布がよく適合している。

Table.3.1.1.1 設定値:剥離深さ2mmの信頼性解析結果(指数分布)

設定値2mm	推定値	PR>CHI
切片 (μ)	3.5383	0.0001
酸化カルシウム	.....	.....
酸化マグネシウム	.....	.....
酸化アルミニウム	.....	.....
酸化第二鉄	0.3400	0.0034
水セメント比	-0.0439	0.0079
養生水の塩分濃度	0.0075	0.9068
養生日数	0.0112	0.4472
基準強度	.....	.....
圧縮強度	.....	.....
凍結融解回数	.....	.....
高さ	.....	.....
方向	.....	.....
尺度母数 (δ)	1.0000	.....
最大化対数尤度	-332.0324	.....

Table.3.1.1.2 設定値:剥離深さ2mmの信頼性解析結果(対数正規分布)

設定値2mm	推定値	PR>CHI
切片 (μ)	3.0842	0.0001
酸化カルシウム	.....	.....
酸化マグネシウム	.....	.....
酸化アルミニウム	.....	.....
酸化第二鉄	0.3343	0.0001
水セメント比	-0.0397	0.0001
養生水の塩分濃度	-0.0253	0.5479
養生日数	0.0118	0.2157
基準強度	.....	.....
圧縮強度	.....	.....
凍結融解回数	.....	.....
高さ	.....	.....
方向	.....	.....
尺度母数 (δ)	0.6964	.....
最大化対数尤度	-286.0317	.....

Table.3.1.1.3 設定値:剥離深さ2mmの信頼性解析結果(ワイブル分布)

設定値2mm	推定値	PR>CHI
切片 (μ)	3.1708	0.0001
酸化カルシウム	.....	.....
酸化マグネシウム	.....	.....
酸化アルミニウム	.....	.....
酸化第二鉄	0.2625	0.0001
水セメント比	-0.0319	0.0005
養生水の塩分濃度	0.0101	0.7710
養生日数	0.0072	0.3793
基準強度	.....	.....
圧縮強度	.....	.....
凍結融解回数	.....	.....
高さ	.....	.....
方向	.....	.....
尺度母数 (δ)	0.5438	.....
最大化対数尤度	-283.6496	.....

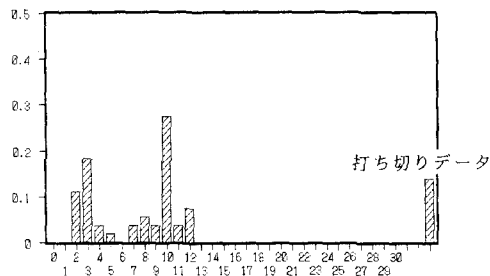


Fig.3.1.2.1 設定値2mmを上回る 経過年数(t)
剥離深さの度数分布

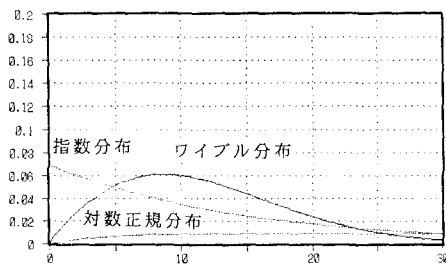


Fig.3.1.2.2 指数分布, 対数正規分布, 経過年数(t)
ワイブル分布の確率密度関数

3.1.3 信頼性解析結果 Table.3.1.3.1, Table.3.1.1.3にそれぞれ設定値:剥離深さ1mm, 2mmの信頼性解析結果を示す。設定値:剥離深さ1mmにおいて有意水準1%以内に入っているものは、酸化第二鉄、水セメント比、養生日数、高さであり、設定値:剥離深さ2mmにおいて有意水準1%以内に入っているものは、酸化第二鉄、水セメント比である。ここで設定値:剥離深さ2mmにおいて高さは有意水準が5%以内に入っていないので共変量から除いた。これは高さが地面からの水の供給の状態を示し、1mmの発生したときに比べ、2mmの被害が発生しているときの地面からの水の供給状態が変わったことを示していると思われる。また、設定値:剥離深さ1mm, 2mmについての普通ポルトランドセメントで水セメント比45%, 淡水養生、養生日数5日間(N45F5)と同様に、水セメント比55%(N55F5)の信頼度関数をFig.3.1.3.1とFig.3.1.3.2, 確率密度関数をFig.3.1.3.3とFig.3.1.3.4に示す。水セメント比が低くなると信頼度が高くなる傾向がみられ、Fig.3.1.3.1の設定値:剥離深さ1mmでは5年でN45F5の信頼度は30%, N55F5の信頼度は15%である。同様にFig.3.1.3.2の設定値:剥離深さ2mmでは5年でN45F5の信頼度は85%, N55F5の信頼度は75%であり、10年ではN45F5の信頼度は55%, N55F5の信頼度は35%である。そしてFig.3.1.3.3の設定値:剥離深さ1mmの確率密度関数のN45F5は3.5年で、N55F5は2.5年でピークを示している。Fig.3.1.3.4の設定値:剥離深さ2mmの確率密度関数のN45F5は10年で、N55F5は6年でピークを示していることがわかる。

Table.3.1.3.1設定値:剥離深さ1mmの

信頼性解析結果		
項目	推定値	PR>CHI
切片 (t)	1.2022	0.0036
酸化カルシウム	.....	.....
酸化マグネシウム	.....	.....
酸化アルミニウム	.....	.....
酸化第二鉄	0.2266	0.0001
水セメント比	-0.0233	0.0016
養生水の塩分濃度	-0.0212	0.4762
養生日数	0.0186	0.0080
基準強度	.....	.....
圧縮強度	.....	.....
凍結融解回数	.....	.....
高さ	0.0076	0.0001
方向	.....	.....
尺度母数 (δ)	0.4870	.....
最大化対数尤度	214.6744	.....

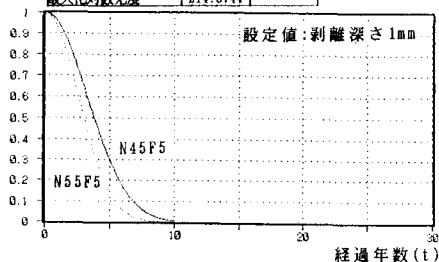


Fig.3.1.3.1設定値:剥離深さ1mmの信頼度関数

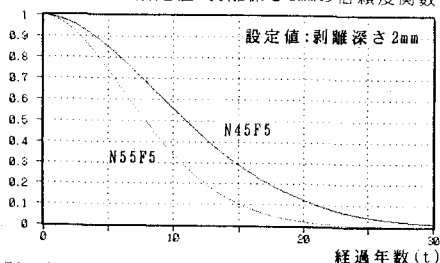


Fig.3.1.3.2設定値:剥離深さ2mmの信頼度関数

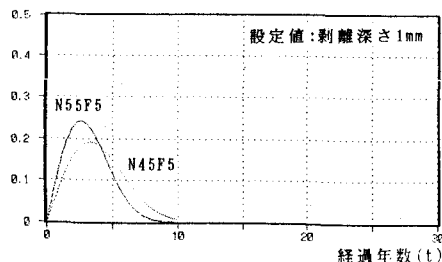


Fig.3.1.3.3設定値:剥離深さ1mmの確率密度関数

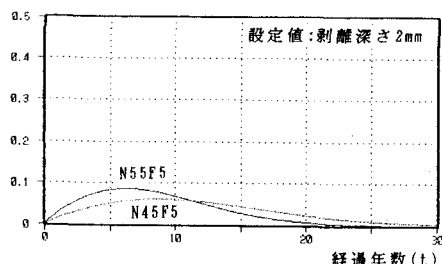


Fig.3.1.3.4設定値:剥離深さ2mmの確率密度関数

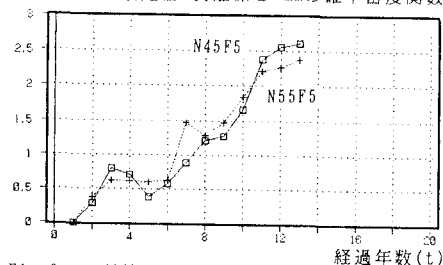


Fig.3.2.1剥離深さの経年変化の平均値

3.2 考察 曝露供試体の剥離深さに対する信頼度に影響を与えているものは、3.1.3から水セメント比である。Fig.3.2.1にN45F5、N55F5の剥離深さの経年変化の平均値を示す、Fig.3.2.1とFig.3.1.3.2を比較すると、N45F5でみるとFig.3.2.1で経年変化の剥離深さの平均値が10.5年で2mmに達し、Fig.3.1.3.2の設定値:剥離深さ2mmの信頼度関数が10.5年で信頼度が50%であるので、剥離深さの平均値と設定値:剥離深さ2mmの信頼度が50%で一致していることがわかる。このことから剥離深さの平均値と平均値と等しい信頼度50%がほぼ等しい年数で適合し信頼性解析の妥当性が確認できた。

4.まとめ 曝露供試体のデータの信頼性解析による耐久性評価の検討結果を以下に示す。

- ①設定値を上回る剥離深さの度数分布に対しワイブル分布の確率密度関数が最も適合した。
- ②剥離深さの経年変化平均値とワイブル分布の平均値と等しい設定値の信頼度関数の信頼度50%がほぼ等しい年数で適合し信頼性解析の妥当性が確認できた。
- ③共変量として酸化第二鉄、水セメント比、養生日数を取り、その中の水セメント比が低くなると信頼度が高くなる。

【謝辞】本研究に対し北見工業大学岡田技官、猪狩技官、北見工業大学大学院の荒井氏、同卒論生の岩井、田中各氏の御協力を得た。解析には北大及び東大大型計算機センターの御協力を受けHITACを使用した。ここに感謝する。

【参考文献】

- 1)桜井 宏、鮎田 耕一、佐伯 昇:寒冷地海洋環境化に曝露されたコンクリートの表層部の劣化とその要因の検討,セメント技術年報41,1987,pp.379~382
- 2)桜井 宏、鮎田 耕一、佐伯 昇、鈴木 明人、藤田 嘉夫:Concrete Durability Assessment for scaling by Reliability Theory,北見工業大学研究報告,第23巻第2号,1992,pp.123~131