

V-23

RCモデル化実験データの信頼性解析 による耐久性評価

北見工業大学工学部 正員 桜井 宏 正員 鮎田耕一 正員 岡田包儀
北見工業大学客員教授(日鐵セメント(株)) 正員 藤田嘉夫
北見工業大学大学院 学生員 ○荒井浩昭

1.はじめに

コンクリート構造物の耐久生を評価するためには定量的かつ確率的なデータ解析を行う必要がある。筆者らは信頼性解析でコンクリートの耐久性に関する信頼度¹⁾を表した。本研究はRCモデル化供試体で各種実験を行ない、凍結融解回数に対するRCモデル化供試体の耐力低下を安全率の低下として考え、これに対する信頼性解析を行いコンクリート部材の耐久性評価を検討することを目的とする。

2.検討方法

2.1.信頼性解析のための理論式

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hazardの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。

$$\text{確率密度関数: } f(t) = \frac{\alpha t^{\alpha-1}}{\beta^\alpha} \exp\left(-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha\right) \dots \text{式(2.1.1)}$$

$$\text{信頼度関数: } R(t) = \exp\left(-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha\right) \dots \text{式(2.1.2)}$$

ここで $\alpha = 1/\sigma$, σ は尺度母数

$$\beta = \psi(x) = \exp(x'b) = (b_0 + x_1b_1 + x_2b_2 + \dots + x_nb_n) \dots \text{式(2.1.3)}$$

x は共変量のベクトル

b は未知パラメータのベクトル

2.2.検討手順

検討方法のフローをFig.2.2に示す。まず設計断面力 M_d を以下の式(2.2.1)で設定し、設計曲げ耐力 M_{ud} を式(2.2.2)と式(2.2.3)より求めた。以下に計算の手順を表す。

$$M_d = \frac{P \times L}{4} \dots \text{式(2.2.1)}$$

$$M_{ud} = A_s \cdot f_{yd}(d - y_c) \dots \text{式(2.2.2)}$$

ここで、 $y_c = A_s \cdot f_{yd} / (1.70 \times f'_c d \times b) \dots \text{式(2.2.3)}$

ただし $L=27.8\text{cm}$ とし、 f_{yd} は鉄筋の材料強度の平均値とする。また $f'_c d$ は実験データからの各水セメント比での材令28日圧縮強度試験 f'_c より求めた。ただし、実験室内の試験結果であるためばらつきが少ないため材料係数を考慮しなかった。2.3で述べる実験より各水セメント比ごとの材令28日曲げ耐力を初期値としてRCモデル化部材の見かけの安全率(γ'_{RC})を求めた。

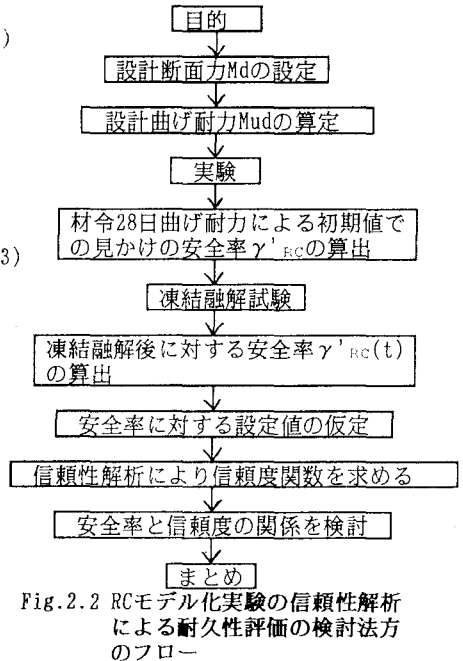


Fig.2.2 RCモデル化実験の信頼性解析による耐久性評価の検討方法のフロー

$$\gamma_b = \frac{Mud}{Md} \quad \dots\dots\text{式(2.2.4)}$$

ここで材令28日曲げ耐力による初期値の見かけの安全率(以下安全率と略す) γ'_{RC} を求める式を(2.2.5)に示す。 $Mu(t=0)$ γ_b :部材係数 Mu :実際の曲げ耐力

$$\gamma'_{RC} = \frac{Mu(t=0)}{Md} \quad \dots\dots\text{式(2.2.5)} \quad \alpha$$

α :他の要因の係数 t :凍結融解回数

ここで $\gamma'_{RC} = \gamma_b \times \alpha \dots\dots\text{式(2.2.6)}$

曝露試験及び促進試験後の耐力を材令28日曲げ耐力に対する安全率を凍結融解回数で変化するものとして $\gamma'_{RC}(t)$ として以下の式によって求めた。なお、 α はコンクリートの材料係数 γ 等の要因も含まれると考える。

$$\gamma'_{RC}(t) = \frac{Mu(t)}{Md} \quad \dots\dots\text{式(2.2.7)}$$

2.3設定値の仮定

信頼性理論の故障を定義するため、材令28日曲げ耐力を基準とし設計断面力Mdで除した値を健全な状態と仮定した。ここで設定値の判断として安全率 γ'_{RC} を凍結融解した後何%低下するかで判断した。ここに設定値を仮定した表をTable.2.2.1に示す。Table.2.2.1により求めた故障と仮定する安全率の低下(設定値)に対して理論式(2.1.2)により信頼性解析を行った。そこで安全率の低下を信頼度で評価し凍結融解回数に対する安全率の低下を検討する。

Table.2.2.1 設定値の仮定

設定値	故障と仮定する安全率
1.00	$\gamma'_{RC}(0) \times 1.00$
0.95	$\gamma'_{RC}(0) \times 0.95$
0.90	$\gamma'_{RC}(0) \times 0.90$
0.85	$\gamma'_{RC}(0) \times 0.85$

2.4.実験方法

Table.2.4.1にコンクリートの配合とフレッシュコンクリートの特性を示し、水セメント比の水準を45%, 55%, 65%とし解析の際これを共変量とした。Fig.2.4.1にモデル供試体の形状と寸法を示す。また耐力を求めるための載荷試験方法をFig.2.4.2に示す。なお急速凍結融解試験の開始材令は28日とし、ASTMのC666に準拠した。曝露試験は凍結融解と海水の影響を受けるオホーツクの釧路海岸で行った。凍結融解試験は急速凍結融解は一日6サイクルとした。曝露試験による凍結融解回数は実測データと網走地方気象台のデータを比較して年平均で56サイクルであった。

Table.2.4.1 コンクリートの配合とフレッシュコンクリートの特性

配合の種類	セメントの種類	w/c/s/a		単位量					フレッシュコンクリートの性状		材料強度 f'c (kg/cm ²)
		(%)	(%)	水 (Kg/m ³)	セメント (Kg/m ³)	粗骨材 (Kg/m ³)	細骨材 (Kg/m ³)	AE剤 (cc)	スランプ (cm)	空気量 (%)	
N451	普通ポルトランドセメント	45	31	152	338	564	1277	48.5	6.3	3.5	313.0
N452	普通ポルトランドセメント	45	31	152	338	564	1277	39.7	8.0	4.8	313.0
N55	普通ポルトランドセメント	55	34	152	276	634	1258	46.9	8.0	4.5	308.0
N65	普通ポルトランドセメント	65	34	152	234	647	1279	52.9	9.2	5.1	223.0

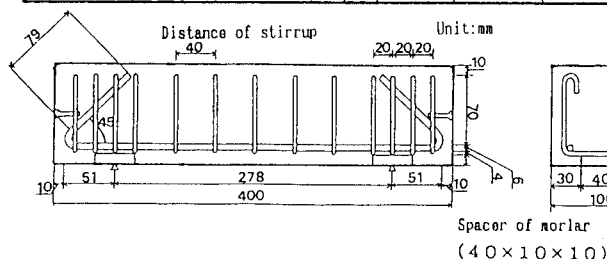


Fig. 2.4.1 モデル供試体の形状と寸法

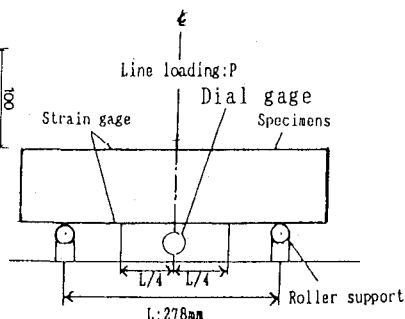


Fig. 2.4.2 載荷試験方法

3. 結果及び考察

3.1. 各凍結融解回数に対する安全率

解析データ数は169個でその内材令28日による初期値は40個、促進試験は89個、曝露試験は40個である。Fig. 3.1.1に各凍結融解回数と安全率 γ'_{RC} の関係を示す。およそ150サイクルでばらつく傾向がみられるがこれは材令による強度の発現がみられたものと思われる。

3.2. 各安全率(γ'_{RC})の信頼性解析結果

安全率に対する各設定値と凍結融解回数に対する信頼性解析結果をTable.3.2.1～Table.3.2.4に示す。共変量に水セメント比をとり、どの解析結果も有意水準5%以内に入った。水セメント比は共変量として有効である結果が得られた。ここで設定値0.85未満でのケースは解析データに設定値0.85を下回るもの(hazard)がほとんどないため、有意水準内に入らなかった。したがって本解析は設定値0.85までとする。Fig.3.2.1に設定値1.00を下回るものを故障と仮定した信頼度関数を示す。水セメント比45%のものでもおよそ250サイクルでほとんど信頼度を失う結果が得られ、当初の γ'_{RC} の水準を維持するのはかなり難しいといえる。Fig.3.2.2に設定値0.95での信頼度関数を示す。 γ'_{RC} より5%低下したものであるがこの水準を維持するのも難しいといえる。Fig.3.2.3とFig.3.2.4は設定値0.90、0.85に対しての γ'_{RC} の信頼度関数であるが、水セメント比45%のものは凍結融解回数が増加してもかなり信頼度があるのに対し、水セメント比65%では信頼度を失うのが早い結果が得られた。ゆえに水セメント比が大きくなると γ'_{RC} の信頼度に著しく小さくなる。

□.....W/C=45% +.....W/C=55% ◇.....W/C=65%

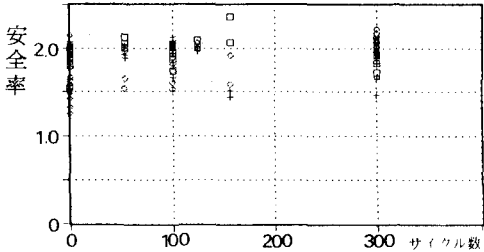


Fig.3.1.1 凍結融解回数に対する安全率

Table.3.2.1 設定値1.00に対する安全率 γ'_{RC} の信頼性解析結果

安全率 (設定値:1.00)	係数	T検定値
切片(μ) $\mu=\ln\beta$	6.09946	0.0001
共変量 水セメント比	-0.025908	0.0213
尺度簿数	0.31289	
最大化対数尤度(σ)	-3.43404	

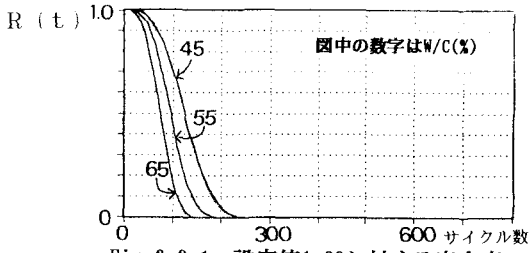


Fig.3.2.1 設定値1.00に対する安全率 γ'_{RC} の信頼度関数

Table.3.2.2 設定値0.95に対する安全率 γ'_{RC} の信頼性解析結果

安全率 (設定値:0.95)	係数	T検定値
切片(μ) $\mu=\ln\beta$	8.38302	0.0001
共変量 水セメント比	-0.057217	0.0001
尺度簿数	0.1989	
最大化対数尤度(σ)	-2.01525	

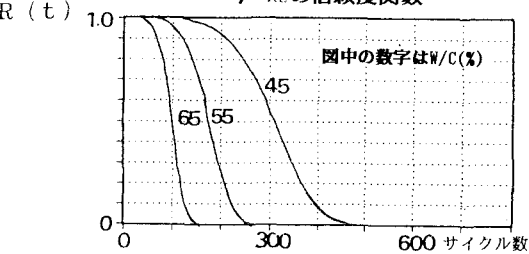


Fig.3.2.2 設定値0.95に対する安全率 γ'_{RC} の信頼度関数

Table.3.2.3 設定値0.90に対する安全率 γ'_{RC} の信頼性解析結果

安全率 (設定値:0.90)	係数	T検定値
切片(μ) $\mu=\ln\beta$	8.74064	0.0001
共変量 水セメント比	-0.056567	0.0149
尺度簿数	0.34942	
最大化対数尤度(σ)	-5.395786	

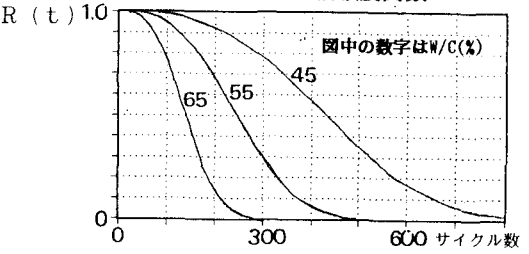


Fig.3.2.3 設定値0.90に対する安全率 γ'_{RC} の信頼度関数

Table.3.2.4 設定値0.85に対する安全率 γ'_{RC} の信頼性解析結果

安全率 (設定値:0.85)	係数	T検定値
切片(μ)	$\mu=\ln\beta$	11.3339
共変量	水セメント比	-0.08928
尺度係数		0.64041
最大化対数尤(σ)		-4.754832

3.3. 考察

本研究においてRCモデル化供試体の安全率 γ'_{RC} は各水セメント比ごとの平均値で1.92であった。一般にコンクリートの部材係数 γ_c は1.15~1.3であるので、およそ5割高い。3.2の結果より設定値1.00の時の信頼度は極端に低下するが設定値を下げ、一般の部材係数の水準に近づけるに伴って信頼度は増加している。また凍結融解回数が増すと共にコンクリートの強度の他に、鉄筋の付着の影響が出てくるものと思われる。このようにコンクリートの材料係数 γ_c 等が低下して安全率 γ'_{RC} の信頼度関数の形状に影響を与えていると思われる。水セメント比で γ'_{RC} に差が生じたのは材料係数 γ_c 等の低下が各水セメント比で差があると考えられる。安全率 γ'_{RC} は水セメント比を小さくすれば信頼度が高まると言える。ここで海洋コンクリートの場合 γ_c を仮定し、水セメント比45%とし凍結融解回数を6000サイクルまで計算した安全率 γ'_{RC} の信頼度関数をFig.3.3.1に示す。設定値0.85としたものでも信頼度が0に近くなるのは4000サイクル程度であり、凍結融解回数を1年56サイクルとして換算するとおよそ70年になる。この設定値でも、一般の部材係数 γ_c よりかなり安全側であるので、一般の部材係数 $\gamma_c=1.3$ の値を下回るのはさらに凍結融解回数が増加したときである。今後はコンクリート部材が劣化する要因は水セメント比のような内的要因の他に、海水の塩分等の外的要因もあり、他の要因を共変量に含めてコンクリートの信頼性解析による耐久性を評価していく予定である。

4. まとめ

RCモデル化実験データの信頼性解析による耐久性評価より以下の事が分かった。

- ①材令28日曲げ耐力による初期値に対するみかけの安全率 γ'_{RC} の低下を信頼度関数で評価できる。
- ②水セメント比が小さくなると安全率 γ'_{RC} の信頼度の低下が小さくなる。

【謝辞】本研究に対し北海道大学佐伯昇教授の御指導を受けた。北見工業大学猪狩技官、北見工業大学コンクリート研究室学生の阿部、田中、岩井氏の御協力を受けた。解析には東大及び北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、荒井浩昭:寒冷地環境下のコンクリートの耐久生に関する研究、セメント・コンクリート論文集第47巻;1993年
- 2)社団法人土木学会:コンクリート標準示方書、設計編(平成3年版)、PP.6-7、PP40-43;1991年
- 3)社団法人土木学会:コンクリート標準示方書、施工編(平成3年版)、PP.188;1991年
- 4)SAS User's Guide:Statistics (日本語版) Version 5 Edition、PP.509-522
- 5)H.SAKURAI,K.AYUTA,N.SAEKI,K.OKADA and H.ARAI:The Service Life Prediction of Concrete in Cold Region by Model Specimen and Reliability Theory,北見工業大学研究報告第25巻第1号、PP71-79,1993年

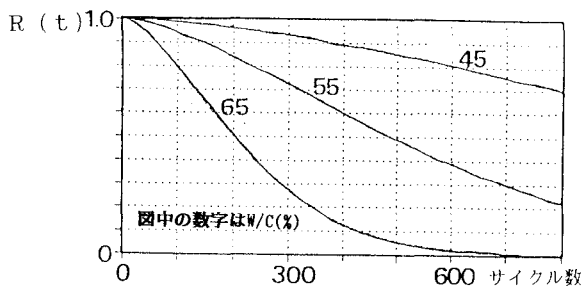


Fig.3.2.4 設定値0.85に対する安全率 γ'_{RC} の信頼度関数

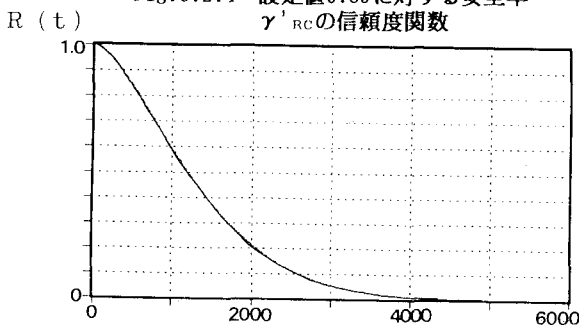


Fig.3.3.1 設定値0.85に対する水セメント比 45%での γ'_{RC} の信頼度関数