

信頼性解析によるコンクリートの劣化予測に関する考察

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
 北見工業大学 学生員 阿部 誠

1. はじめに

コンクリート構造物の耐用年数予測評価は、コンクリート構造物の耐久性設計や維持管理に必要不可欠である。この時の中心的な検討内容として劣化予測がある¹⁾。本研究では信頼性解析を用いてRCモデル化供試体の促進及び曝露試験結果、海岸曝露大型供試体での曝露実験結果、長期強度試験用モルタル供試体²⁾での長期強度の結果から信頼性解析の適用性について検討するとともに、その信頼度関数による劣化予測とその判断について考察する。

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図-1に示す。解析条件の選定として劣化の定義、限界値とそれに達する前の段階の設定値を仮定する。信頼性解析のため理論式の導入を行う。2.1.3で述べる実験より得た解析データのインプットを行う。重回帰分析などにより劣化の主要な要因を抽出する。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:被害)と仮定して信頼性解析(解析プログラム:SAS.LIFEREG)により適切な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。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、各々のケースの劣化の信頼度の経年変化を考察する。

2.1.2信頼性解析のための理論式

故障する(被害が発生する)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、信頼度関数を以下の式で求めた。

信頼度関数と確率密度関数の母数と共変量の関係式を以下に示す。

$$\text{信頼度関数: } R(t) = \exp\left(-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha\right) \cdots \cdots \text{式(1)}$$

ここで $\alpha=1/\sigma$ 、 σ は尺度母数であり、また不信頼度関数は $F(t)=1-R(t)$ である。確率密度関数は以下となる。

$$\text{確率密度関数: } f(t) = [F(t)]' = \frac{\alpha t^{\alpha-1}}{\beta^\alpha} \exp\left(-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha\right) \cdots \cdots \text{式(2)}$$

$$\beta = \exp(\mu) \cdots \cdots \text{式(3)}$$

$$\text{ここで } \mu = \exp(b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \cdots + b_nx_n) \cdots \cdots \text{式(4)}$$

b :未知パラメータ, x :共変量ベクトル

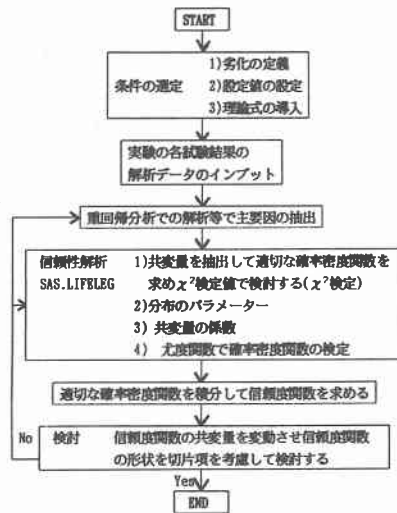
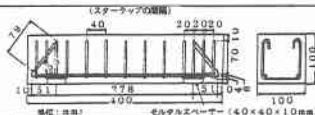
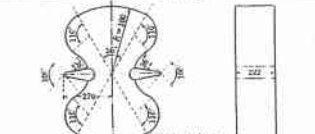


図-1 検討方法のフローチャート

表-1 コンクリートの配合とフレッシュコンクリートの性状(RCモデル化供試体、海岸曝露大型供試体)

検討ケース	配合	セメントの種類	W/C (%)	S/a (%)	単位量(kg/m ³)				フレッシュコンクリートの性状		
					水	セメント	粗骨材	細骨材	AE剤(cc)	スランプ(cm)	空気量(%)
1	451	普通ポルトランドセメント	45	31	152	338	564	1277	48.5	6.3	3.5
	452	普通ポルトランドセメント	45	31	152	338	564	1277	39.7	8.0	4.8
	55	普通ポルトランドセメント	55	34	152	276	634	1258	46.9	8.0	4.5
	65	普通ポルトランドセメント	65	34	152	234	647	1279	52.9	9.2	5.1
2	N45F5	普通ポルトランドセメント	45	—	135	300	718	1177	—	3.9	4.5
	N55F5	普通ポルトランドセメント	55	—	136	248	770	1166	—	4.5	5.6
3	配合比(重量比)		水量の組み合わせ		2.1.3実験方法						
	セメント	火山灰	砂	種類	表-1に各々の検討ケースのコンクリートの配合とフレッシュコンクリートの						
	0.6	0.4	3	7	性状(RCモデル化供試体、海岸曝露大型供試体)、代表的な配合						
	0.8	0.2	3	9	例ごとの水の配合比の種類と組み合わせの数(長期強度試験用モルタル供試体)を示す。また、表-2にRCモデル化供試体、海岸						
	1.0	0	2	1	曝露大型供試体、長期強度用モルタル供試体の実験方法と供試						
	1.0	0	3	13	体の形状と寸法を示す。						
	1.0	0.5	3	9							
	1.0	1.0	3~4	18							
	1.0	1.0~2.0	5~6	12							
	上記以外			173							
	合計			491							

表-2 実験方法(RCモデル化供試体、海岸曝露大型供試体、長期強度試験用モルタル供試体)

検討ケース	供試体	①曝露条件②測定項目(劣化指標)③測定期間(サイクル数)	供試体の形状と寸法
1	RCモデル化供試体	①海水の影響を受ける曝露試験、及び急速凍結融解試験 ②重量、超音波伝播時間、曲げ耐力(重量変化率、超音波伝播速度変化率、曲げ耐力比) ③凍結融解試験の急速凍結融解は1日6サイクルで300サイクル 曝露試験による凍結融解回数は年平均で56サイクルで3年間	
2	海岸曝露大型供試体	①Y線から約40mの寒冷地の海岸 ②剥離をスケリングによる剥離とポップアウトに分け測定(剥離深さ) ③曝露経過15年目(年平均凍結融解回数は56サイクル)	
3	長期強度試験用モルタル供試体	①空気中、海水中、淡水中 ②細棒型のテストピースの両端をつかんで引張力をかけ切断時の荷重を測定(引張強度) ③試験は延べ1万回行われ、材令1週間、4週間、3ヶ月、6ヶ月、1年、2年、4年、5年、7年、10年、それ以降5年ごとに実施 最長で約95年	

2.1.4設定値の仮定

信頼性解析の前提となる故障(被害)を定義するため、コンクリートが劣化したと判断する値を定めそれを設定値とした。ケース1のRCモデル化供試体での重量変化率、超音波伝播速度変化率、曲げ耐力比の各々の設定値は、それぞれの劣化指標の材令28日を基準とし、これを1と仮定し、各々の劣化指標に対して故障と仮定する値を定め設定値とした。各々の故障と仮定する設定値を表-3に設定した。また、ケース2の海岸曝露大型供試体については供試体のかぶり深さを80mm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。剥離深さの各段界の設定値を1/5、1/10、1/20とすると、各値は表-3に示ようになる。ケース3の長期強度試験用モルタル供試体については引張強度の変動係数が10%、15%、20%を越える場合と材令28日、3ヶ月、1年の引張強度を下回る場合を設定した。

検討ケース	実験供試体	測定値(劣化指標)	設定値のレベル	設定値の仮定
1	RCモデル化供試体	重量	I	(材令28日の重量に対する値) 0.95
		超音波伝播速度	I	(材令28日の超音波伝播速度に対する値) 0.90
		曲げ耐力	I	(材令28日の曲げ耐力に対する値) 0.95
2	海岸曝露大型供試体	剥離深さ	I	(設定値の水準1/20) 1mm
			II	(設定値の水準1/10) 2mm
			III	(設定値の水準1/5) 4mm
3	長期強度試験用モルタル供試体	長期引張強度の変動係数	I	(抗張力の変動係数10%を越えた年数) 10%
			II	(抗張力の変動係数15%を越えた年数) 15%
			III	(抗張力の変動係数20%を越えた年数) 20%
		長期引張強度の低下	I	(材令1年の抗張力を下回るまでの年数) 1年
			II	(材令3ヶ月の抗張力を下回るまでの年数) 3ヶ月
			III	(材令28日の抗張力を下回るまでの年数) 28日

3. 解析結果及び考察

3.1 解析結果

表-4に各ケースの各レベル

における信頼性解析結果を示す。ケース1のRCモデル化供試体については、共変量にそれぞれ水セメント比を抽出した。共変量の係数は負であり、有意水準は1%以内に入っている。ケース2の海岸曝露大型供試体については、共変量に酸化第二鉄、水セメント比を抽出した。各々の共変量の係数は、酸化第二鉄は正で、水セメント比は負であり、有意水準は1%以内に入っている。ケース3の長期強度試験用モルタル供試体については、共変量にセメントの配合比、火山灰材配合比、水セメント比を抽出し、セメントの配合比の有意水準が高い。図-3、図-4、図-5にケース1の重量変化率、超音波伝播速度変化率、曲げ耐力比の信頼度関数を示す。各々の設定値に対する水セメント比45%の信頼度は300サイクルで約70%、15%、80%の信頼度がある。図-6、図-7にケース2の設定値：剥離深さ1mm、2mmの信頼度関数(N45F5、N55F5)を示す。図-6の設定値：剥離深さ1mmでは5年でN45F5の信頼度は45%、N55F5の信頼度は25%である。同様に図-7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%である。図-8にケース3の長期強度試験用モルタル供試体についての抗張力の変動係数10%、15%、20%を越えた年数の信頼度関数を示す。100年後に変動係数10%を越えない信頼度は15%、変動係数15%を越えない信頼度は35%、変動係数20%を越えない信頼度は45%である。図-9に長期強度試験用モルタル供試体についての材令28日、3ヶ月、1年に引張強度を下回るまでの年数の信頼度関数を示す。100年後に引張強度が材令28日を下回らない信頼度は45%、材令3ヶ月を下回らない信頼度は3%、材令1年を下回らない信頼度はほぼ0%である。これらのことから、ケース1、ケース2の水セメント比が低くなると信頼度が高くなる。ケース3の長期強度試験用モルタル供試体については、土木構造物の変動係数に関して、建設省土木研究所が過去に調査した結果では、材令28日のデータで変動係数が最大21%、最小2%であり、全体で80%の構造物が10%以下との報告がある。これらと比較しても長期材令での引張強度のばらつきに対する信頼性はある程度確保されているものと思われる。また、モルタル供試体の寸法はコンクリート構造物の極表層部のかぶり部分の厚さに相当することを考えれば表層の強度の信頼性に影響があると思われる。

3.2 考察

土木構造物は補修可能ということから考え、信頼度を用いた判定について検討するために示方書等から設計基準強度を下回る確率が5%以下である判定基準であると仮定し、信頼度95%について検討を行う。また同様に、設計基準強度を下回る確率が25%以下であることとし、信頼度75%についても検討を行う。図-3、図-4、図-5、図-6、図-7の水セメント比45%の場合、図-8の変動係数10%の場合、図-9の材令28日の場合について各々の信頼度95%、75%について検討を行う。信頼度95%の時は、図-6において最も傾きが急となり、図-8において傾きが最も緩やかである。信頼度75%の時は、図-4において最も傾きが急となり、図-8において最も傾きが緩やかである。傾きが急であるときは、土木構造物の補修等の対策をとる期間の余裕が短くなり、傾きが緩やかなときは、余裕を持って補修ができる。これらのことから、信頼度95%、75%を一つの目安として劣化予測をすることによって耐用年数を判断する尺度となると思われる。

表-4 信頼性解析結果

検討 ケース	実験 供試体	信頼度関数 の係数の種類	劣化指標(レベル)と推定値及び有意水準					
			重量変化率 設定値:0.95		超音波伝播速度変 化率 設定値:0.90		曲げ耐力比 設定値:0.95	
			推定値	有意水準	推定値	有意水準	推定値	有意水準
1	RCモデル 化 供試体	切片	8.9112	0.0001	8.0995	0.0001	8.7036	0.0001
		共変量 水セメント比 の係数	-0.0664	0.0001	-0.0556	0.0001	-0.0526	0.0050
		尺度母数(σ)	0.2232		0.1614		0.3914	
2	海岸 曝露 供試体	剥離深さ	設定値:1mm (Ⅰ) 設定値:2mm (Ⅱ) 設定値:4mm (Ⅲ)					
		切片	2.6127	0.0001	3.4490	0.0001	有意水準を満た さない	
		共変量 酸化第二鉄 の係数	0.2300	0.0004	0.2766	0.0001		
		共変量 水セメント比 の係数	-0.0356	0.0001	-0.0366	0.0001		
		尺度母数(σ)	0.5953		0.5654			
3	長期強度試験 用モルタル 供試体	引張強度の変動係数を越えた年数	設定値:10% (Ⅰ) 設定値:15% (Ⅱ) 設定値:20% (Ⅲ)					
		切片	4.7036	0.0001	6.2940	0.0001	8.4673	0.0001
		共変量 セメントの配合比 の係数	-1.2636	0.0009	-1.8372	0.0003	-3.0598	0.0001
		共変量 火山灰材配合比 の係数	0.3409	0.0001	0.3478	0.0006	0.2147	0.1014
		共変量 水セメント比 の係数	-0.6343	0.1139	-1.6754	0.0025	-2.8483	0.0002
		尺度母数(σ)	1.0425		0.9393		0.8358	
		引張強度を下回る年数	材令1年 (Ⅰ) 材令3ヶ月 (Ⅱ) 材令28日 (Ⅲ)					
		切片	6.2559	0.0001	6.0699	0.0001	4.4132	0.0161
		共変量 セメントの配合比 の係数	-3.6654	0.0001	-3.8213	0.0116	-2.6761	0.1591
		共変量 火山灰材配合比 の係数	0.0626	0.6946	0.5159	0.3084	1.5559	0.0656
		尺度母数(σ)	0.5322		0.9201		1.1142	

4.まとめ

RCモデル化供試体の促進及び曝露試験結果、海岸曝露大型供試体での曝露実験結果、長期強度試験用1/4供試体での長期強度の結果に信頼性解析を用いて劣化予測を行い、信頼性解析の適用性と、その信頼度関数による各劣化の経時的な特性の検討の結果を以下に示す。

- ①各劣化指標を被害と判定する設定値を考慮することにより信頼度関数で表すことができる。
- ②信頼度関数の共変量として水セメント比が重要であり、これが小さくなると信頼度が高くなる。
- ③信頼度95%,75%を一つの目安として劣化予測をすることによって耐用年数や、補修等の対策が必要な時期を判断する尺度となる。

<謝辞>本研究にあたり北見工業大学岡田技官、猪狩技官、北見工業大学大学院の田中氏、同卒論生の白山、八重樫氏の御協力を得た。本解析にあたり北海道大学及び東京大学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, 阿部 誠:信頼性解析によるコンクリートの劣化予測の検討, コンクリート工学年次論文, 第16巻第1号, 1994, pp.965~975
- 2)(社)寒地港湾技術研究センター:小樽港コンクリート耐久性試験調査委員会報告書, 1993.3.31
- 3)土木学会:コンクリート標準示方書施工編, 平成3年版, pp.120~122
- 4)土木学会:コンクリート標準示方書解説, 昭和49年度版, pp.116~117

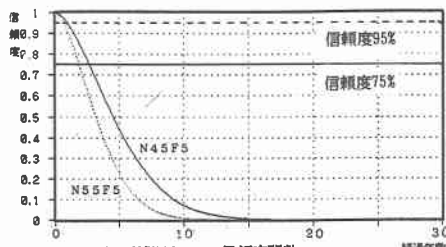


図-6 設定値:剥離深さ1mmの信頼度関数

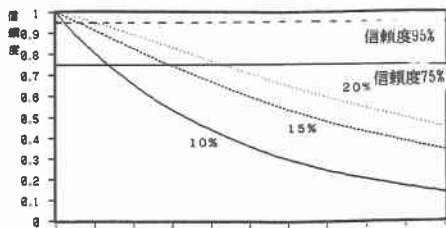


図-8 抗張力の変動係数10%,15%,20%を越えた年数の信頼度関数

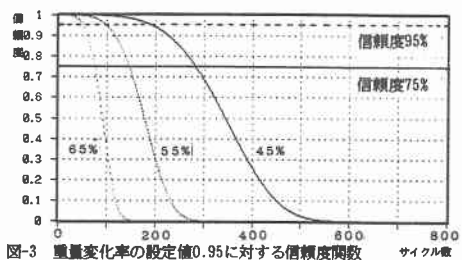


図-3 重量変化率の設定値0.95に対する信頼度関数

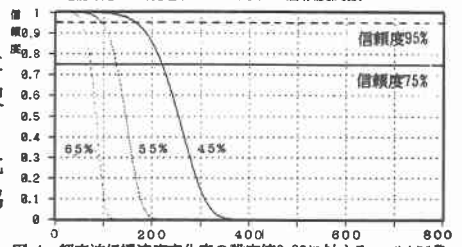


図-4 超音波伝播速度変化率の設定値0.90に対する信頼度関数

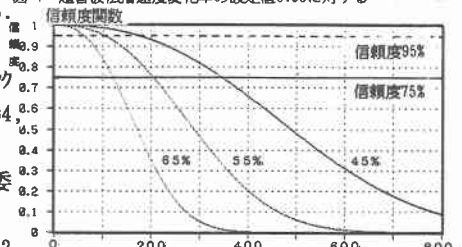


図-5 曲げ耐力比の設定値0.95に対する信頼度関数

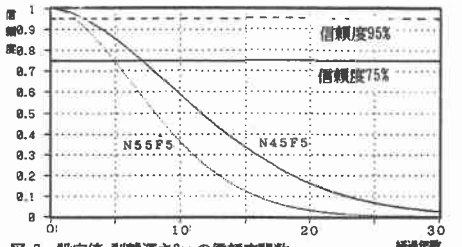


図-7 設定値:剥離深さ2mmの信頼度関数

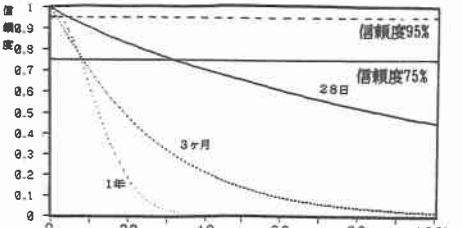


図-9 材齢28日, 3ヶ月, 1年に抗張力を下回るまでの年数の信頼度関数