

コンクリート構造物の劣化度データに対するワイブル分布の適用

渡嘉敷勝* 長束勇* 森充広* 石村英明* 石神暁郎**

Reliability Analysis of Deterioration Data of Concrete Structures using Weibull Distribution

by

Masaru TOKASHIKI*, Isamu NATSUKA*, Mitsuhiro MORI*, Hideaki ISHIMURA*
and Akio ISHIGAMI**

A reliability analysis using the two parameter Weibull distribution was applied to a nationwide deterioration survey data of concrete structures to investigate the deterioration characteristics of the structures under the specification condition, the working condition, and the environmental condition. The following results were obtained: (1) The Weibull distribution has almost suited the deterioration data. (2) The condition of the completion year, the regulation of total content of chloride, the distance from coast, and the use of antifreezing agent did not cause the difference in a deterioration characteristic. (3) The condition of the deterioration status, the structure kind, and the deterioration factor caused the difference in a deterioration characteristic. (4) In the interpretation of the result of the reliability analysis, it is necessary to consider the apparent failure time of the deterioration data.

Key words: Reliability analysis, Deterioration data, Concrete structure, Weibull distribution, Agricultural facility

1 緒 言

戦後、各種の農業農村整備事業により造成された、ダム、頭首工、揚排水機場、用排水路などの農業水利施設は膨大な量に達しており、その資産価値は2002年の再建設費ベースで25兆円と算定されている。これらの施設の中には劣化が進行している施設も多数存在することから、補修、補強あるいは更新によるこれら施設の機能維持が社会的課題となっている。その課題に応えるためには、農業水利施設の多数を占めるコンクリート構造物の機能の現況把握および将来予測のための物理的根拠の一つとして、コンクリート劣化の現状を把握し、その経年的特性を明らかにしておく必要がある。

コンクリート構造物の劣化の現状に関する報告としては、1999年に山陽新幹線福岡トンネルで発生したコンクリート塊崩落事故を契機として発足した旧3省(建設省、運輸省、農林水産省)の共同設置による「土木コンクリート構造物耐久性検討委員会」による提言¹⁾がある。これは、旧3省所管のコンクリート構造物の劣化状況に関する全国的な実態調査(以降、3省調査と略記)に基づく報告である。また、3省調査のうち、農林水産省所管のコンクリート構造物の劣化状況に関する詳細な分析結果については長束ら²⁾の報告がある。

しかしながら、これら報告では、コンクリート構造物の劣化は経年による影響が最も大きいと指摘するに留まっており、定量的な分析までには至っていない。そこで本論においては、3省調査のコンクリート構造物の劣化度データに対して、信頼性解析で用いられるワイブル分布を適用し、コンクリート構造物の劣化の経年的特性を定量的に把握することを試みた。

2 解析データ

2.1 3省調査の概要

3省調査における調査対象構造物は、旧3省所管のコンクリート構造物のうち、構造物の種別、構造物の竣工年、地域および周辺環境などの条件に偏りがないように選定された。対象構造物の種類は、橋梁上部工、橋梁下部工、高架橋、擁壁、カルバート、河川構造物、トンネルの7種である。また、竣工年代については4区分(～1964、1965～1974、1975～1984、1985～1999)に分け、各々の区分が同程度の数となるよう選定された。その結果、旧建設省所管の構造物については計2,099件、旧運輸省所管の構造物については計235件、農林水産省所管の構造物については計311件、総計2,645件が選定された。

調査項目は、構造物の概要と目視調査結果に大別され、構造物の概要では、構造物形式、構造物寸法、竣工年、コンクリートの設計基準強度、点検の有無および点検内容、補修の有無および補修内容、海岸からの距離、周辺環境、凍結防止剤の使用、などから構成されている。また、目視調査結果では、外観、ひび割れの有無、はく離の有無、さび汁の有無、鋼材露出の有無、ハンマーによるたたき調査、などから構成され、その他に図面、変状箇所の写真の添付が求められた。

2.2 劣化度判定

3省調査では、以下に示すように5段階に区分された劣化度判定基準¹⁾が用いられ、7名の専門家によって写真と図面を主体とした劣化部位の外観によって劣化度が判定された。

(1) 劣化度Ⅰ：劣化の兆候が認められず、健全な構造

+ 原稿受理 平成15年9月30日 Received Sep.30, 2003

* (独)農業工学研究所 〒305-8609 つくば市観音台, National Institute for Rural Engineering, Kannondai, Tsukuba, 305-8609

** ショーボンド建設(株)補修工学研究所 〒305-0003 つくば市桜, Tsukuba Technical Research Institute, Sakura, Tsukuba, 305-0003

物。

- (2) 劣化度Ⅱ：劣化の兆候が認められる。軽微なひび割れや錆汁などが認められ、条件によっては劣化が進行することも予想されるもの。
- (3) 劣化度Ⅲ：劣化が認められ、追跡調査を行う必要がある。現時点では即座に構造物の耐力や使用性に影響を与えないが、将来的には劣化が進行することも予想されるもの。
- (4) 劣化度Ⅳ：劣化が著しく、詳細調査を行い、補修するかどうか検討する必要がある。劣化のため構造物の耐力や使用性に悪影響が出ているおそれがあるもの。あるいは、放置するとさらに劣化が進行することが十分に予想されるもの。
- (5) 劣化度Ⅴ：劣化が著しく、補修・補強を行う必要がある。劣化のため構造物の耐力や使用性が低下していることが明白なもの。

なお、トンネルについては、コンクリート片剥落などによる第三者被害の防止を重視しており、上記の劣化度判定基準とは異なる判定基準を採用している。

2.3 解析データの抽出および補修データの扱い

3省調査では、総計 2,645 件のデータが収集されたが、以下に述べる方針で 2,246 件のデータを抽出した。

- (1) 竣工年が不明、または、劣化度が不明なデータは除外した。
- (2) トンネルは、他の構造物の判定基準と異なる判定基準が用いられていることから、除外した。
- (3) 高架橋は、劣化度Ⅲ以上のデータが存在せず、また、他の構造物に比べてデータが少数であることから除外した。

また、補修履歴のある構造物のデータについては、その劣化度をⅢと修正した。ただし、調査時点でⅢ以上のものはそのままとした。このような修正を施した理由は、上述のように、写真を主体とした外観によって劣化度が判定されているため、補修による外観の改善により、構造物の実際の劣化度がより低く判定された可能性があるためである。本データでは、補修された構造物における補修部位と劣化度判定に用いられた部位との位置関係が不明であり、補修が劣化度判定に与えた影響が評価できない。しかし、補修が施されている以上、その構造物には何らかの劣化が存在したと考えるのが妥当である。修

正値を劣化度Ⅲとしたのは、上述の劣化度判定基準で、劣化が認められるとするのが劣化度Ⅲとされているからである。

以上の結果、Table 1 に示すデータが抽出された。

2.4 データの制約

3省調査のデータは実使用条件下におけるフィールドデータであるため、信頼性解析を適用する上で、以下のような制約があると考えられる。したがって、結果の解釈においては、その制約に留意する必要がある。

- (1) 調査対象箇所の抽出条件が不明確である。

調査は、旧 3 省所管のコンクリート構造物の全数調査ではなく、抽出調査となっている。しかし、その抽出条件は明確にされていない。例えば、農林水産省による調査では、“調査箇所の選定は、構造物の竣工年、地域および周辺環境（工場、住宅・商業地、農地、山地、雪寒地）のばらつきを考慮して抽出”³⁾とされているだけで、個々の調査対象箇所が選定された理由についての情報がない。そのため、収集されたデータに関してどのような偏りが生じているかが評価できない。このため、解析結果が全体を代表しているかどうかを判断するためには、今後さらに詳細な調査を必要とする。

- (2) 劣化度に達した真の経過年数が不明である。

信頼性解析においては、故障までに要した時間のデータが重要となる。本データでは、経過年数を構造物の竣工時から劣化度判定が実施された 1999 年時点までとした。しかし、ある劣化度に達した真の時点は、調査時点以前と考えるのが妥当である。このことを図示すると Fig. 1 となる。したがって、解析に用いた見かけの経過年数が真の経過年数より過大評価されている可能性を考慮する必要がある。

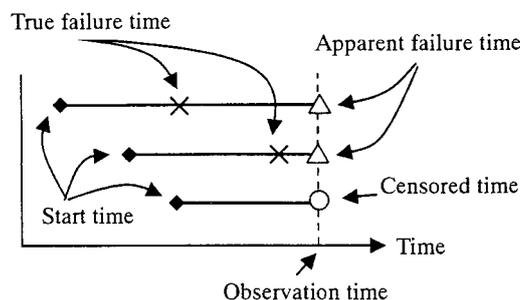


Fig. 1 Concept of apparent failure time and true failure time

- (3) 構造物の環境条件・使用条件・劣化要因が異なる。

本データは、実験室における試験データとは異なり、構造物の仕様や施工条件、また、供用後の環境条件や使用条件、さらに、同程度の劣化度と判断された場合においてもその劣化要因が異なるなど、各種条件が混在したデータとなっている。そのためデータ解析に当たっては、異なる条件のデータを正確に分類し、評価することが必要となる。しかしながら、分類が詳細に過ぎると解析に用いられるデータ数が少なくなることから、解析結果の精度を低下させる可能性がある。

Table 1. Number of structures of each deterioration status.

Deterioration status	Concrete structure					total
	Bridge super-structure	Bridge sub-structure	Retaining wall	Culvert	River structure	
I	266	442	339	257	374	1,678
II	89	74	63	94	139	459
III	27	20	7	16	18	88
IV	5	3	4	3	3	18
V	2	1	0	0	0	3
total	389	540	413	370	534	2,246

3 解析

3.1 故障の定義

使用したデータは、劣化度データであるため、機械のように明確な故障の定義が存在しない。そのため、ここでは各劣化度を故障の閾値として設定し、その閾値未満の劣化度データを打ち切りデータ、閾値以後の劣化度データを故障データとして扱った。つまり、劣化度Ⅱを閾値とした場合、劣化度Ⅰのデータを打ち切りデータとし、劣化度Ⅱ以上（劣化度Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ）のデータを故障データとして用いた。同様に、劣化度Ⅲ以上（劣化度Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ）、劣化度Ⅳ以上（劣化度Ⅳ、Ⅴ）を故障データとし、計3種の故障データを定義して解析した。なお、劣化度Ⅴについては、全データ数が3件と少ないため劣化度の閾値としては用いなかった。

また、時間データとしては、竣工時点から調査時点（1999年）までの経過年数を用いた。竣工時点は各構造物によってずれることから、本データは、データごとに打ち切り時間が異なるランダム打ち切りデータとなっている。

3.2 手法

信頼性解析には、次に示す2母数ワイブル分布を適用した。

$$F(t) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m\right\} \quad (1)$$

ここに、 $F(t)$ はワイブル分布の信頼度関数、 t は時間、 m は形状母数、 η は尺度母数である。

形状母数 m および尺度母数 η の推定方法としては、用いたデータがランダム打ち切りデータであることから、累積ハザード法⁹⁾を適用した。累積ハザード法による m および η の推定例を Table 2 に示す。

Table 2 の左列の図に示したように得られたデータを故障データと打ち切りデータに区別せずに時間の小さい順に並べ替え、故障データのみについて逆順位 k_i からハザード値 $h(t_i)$ を求める。次に、ハザード値 $h(t_i)$ の和から累積ハザード値 $H(t_i)$ を計算する。そして、それらの値を累積ハザード紙（両対数軸グラフ）にプロットし、その回帰直線の傾きをワイブル分布の形状母数 m 、回帰直線の切片を尺度母数 η として推定する。

なお、解析目的に応じて、データの故障モード別化あるいは層別化を選択した。故障モード別解析では、全データを母集団とし、解析対象以外の故障モードを打ち切りデータとして扱った。また、層別化解析では、区分けさ

れた層ごとのデータを母集団として扱った。

4 解析結果および考察

4.1 劣化度別のワイブルプロット

すべてのデータを用いて、劣化度Ⅱ、Ⅲ、Ⅳを各々閾値とした劣化度別のワイブルプロットを Fig. 2 に示す。図には近似直線も併せて示した。データに対してワイブル分布が適合するか否かは、確率紙上でプロットが直線で近似できるかで判断される。したがって、この図から、各々のデータにワイブル分布が適合することが読み取れる。ただし、劣化度Ⅱを閾値とした場合には、経過年数50年あたりに折点が存在し、その前後でプロットの勾配が変化することが示されている。また、劣化度Ⅲを閾値とした場合には、同じく50年あたりと、10年付近にも折点があることが示されている。この原因の推定については後述する。

図には、劣化度が高くなるに従い、プロットが時間軸の大きい側へ移動していくことが示されている。これは劣化度が高いほどその進行には時間を要することを意味している。これは、経験的な知識とも一致する。しかし、このようにワイブルプロットを用いることによって、その程度を定量的に把握することが可能となる。

各プロットの勾配は、ワイブル分布の形状母数 m の値として Table 3 に示した。この表から、すべてのプロットについて $m > 1$ の関係があり、データが摩耗故障型であることがわかる。つまり、時間の経過とともに劣化が発生する確率が高くなることを示している。また、劣化度がⅡ～Ⅳと高くなるに従い、 m 値も増加している。これ

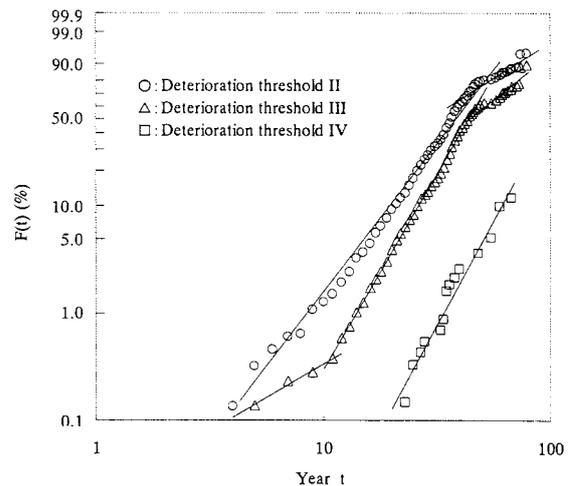


Fig. 2. Weibull probability plot of the each deterioration threshold.

Table 2. Example of multiply censored data and hazard calculations

Example of multiply censored data	Years	Rank i	Reverse Rank k_i	Hazard $h(t_i) = 1/k_i$	Cumulative Hazard $H(t_i)$
	t_1	1	5	1/5	1/5
	t_2	2	4	-	-
	t_3	3	3	1/3	1/5+1/3
	t_4	4	2	1/2	1/5+1/3+1/2
	t_5	5	1	-	-

Table 3. Shape parameter of each deterioration threshold.

Deterioration threshold	Shape parameter m
II (The former plots)	2.80
II (The latter plots)	1.35
III (The former plots)	1.25
III (The middle plots)	3.69
III (The latter plots)	1.72
IV	3.93

は、劣化度が高いほど、故障率の増加率が大きくなる、つまり、高い劣化度ほど時間経過とともに急激に劣化が発生することを意味する。

前述のように劣化度IIについては経過年数50年時点、劣化度IIIについては50年および10年時点に折点が存在し、その前後では m 値が異なっている。最初に劣化度II、IIIにおける50年の折点について考えると、このような結果が得られた原因としては、次の3点が考えられる。第一は、50年以上前に竣工した構造物のコンクリートの品質がそれ以降に竣工した構造物の品質より良質であり、そのために m 値が低い結果となったことである。本データ中には構造物の設計基準強度の項目があり、50N/mm²以上とされたのは、経過年数50年以上の構造物では、約20%であるのに対し、50年未満では2%となっている。第二は、環境条件や使用条件が異なることである。しかしながら、経過年数50年以上の構造物と50年未満の構造物とで環境条件や使用条件について特に異なる点は見られなかった。第三は、データの偏りである。Fig. 3に劣化度IIを閾値とした場合の経過年数の各カテゴリ中の故障データ数と打ち切りデータ数を示す。この図から、経過年数40年以上のデータ数は、それ以前のデータ数に比べて極端に少ないことがわかる。データ数が少ないことから、調査対象の構造物に偏りがあれば、それが全体の結果に大きく影響を及ぼす可能性がある。以上、3つの観点から50年の折点について考えたが、実態がどうかは今後の検討を要する。また、劣化度IIIの10年時点の折点についても要因は特定できなかった。

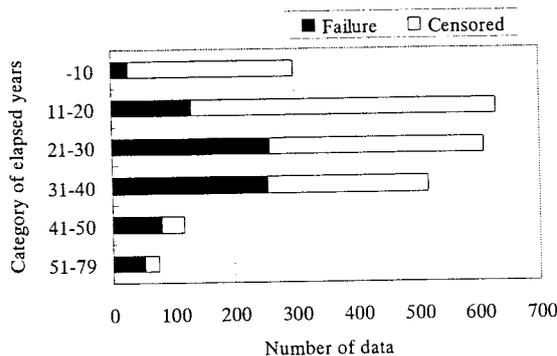


Fig. 3. Number of failure data and censored data with each elapsed years category at deterioration threshold II.

なお、以降の解析においては、劣化度IIIを閾値として使用した。その理由は、3省調査の劣化度判定基準においては、劣化が認められ、その進行が予想される劣化度をIIIと定義しているためである。ただし、層別化によって十分な故障データが得られない場合は劣化度IIを閾値として用いた。

4.2 構造物種別のワイブルプロット

データを構造物種別に層別化し、各々の構造物ごとにプロットしたのが、Fig. 4である。この図から、河川構造物を除けば、プロットの傾きおよび位置はほぼ一致していると判断され、これらの構造物種による劣化の発生に相違は無いように判断される。河川構造物については、他の構造物よりも劣化の発生が早いように読み取れる。しかし、その原因については、特定できなかった。

4.3 竣工年代別のワイブルプロット

データを竣工年代別に4区分に層別化し、各々の年代ごとのプロットをFig. 5に示す。経過年数10年以前と50年以降を除けばプロットの m 値は7.1~10.5の間であり、ほぼ一致している。このことから、この範囲にある構造物については、竣工年代別の劣化の発生確率には相

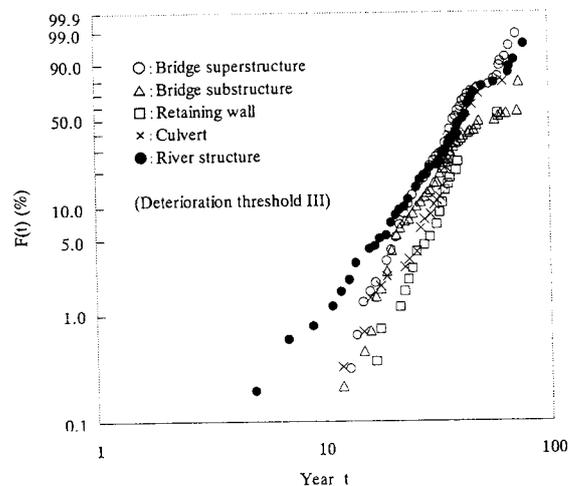


Fig. 4. Weibull plot of the each structure.

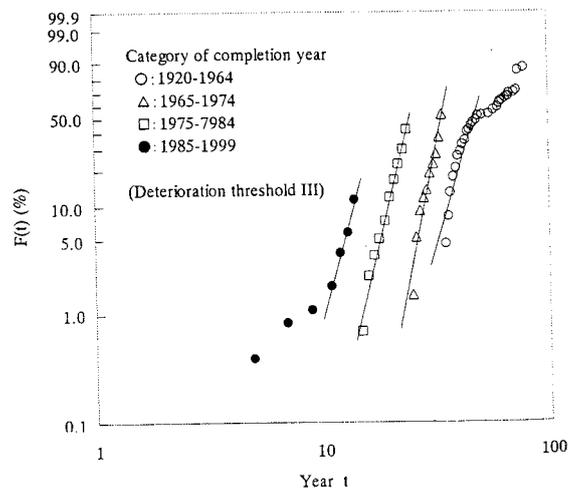


Fig. 5. Weibull plot of the each completion year.

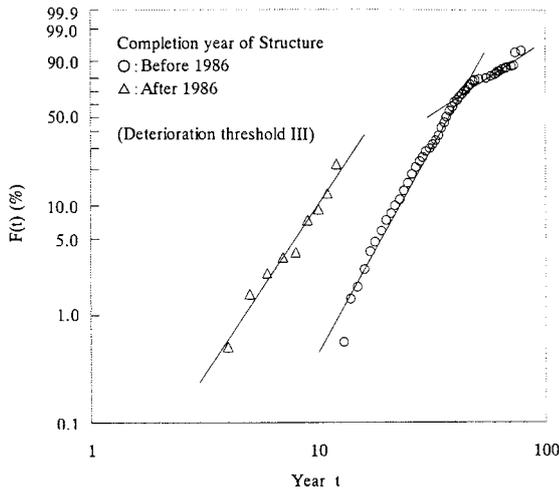


Fig. 6. Weibull plot of the effect of the regulation of total content of chloride.

違が無いと判断できる。経過年数 10 年以前と 50 年以降については、先の 4.1 節で述べたように、その原因は特定できていない。

各カテゴリのプロットが、竣工年代の古いカテゴリから新しいカテゴリへ時間軸の小さな側へ水平移動しているようになっている理由としては、Fig. 1 で示したデータ特性にあると考える。つまり、竣工年代の古い構造物ほど、その見かけ経過年数が大きく評価されるためである。

4.4 塩化物総量規制前後別のワイブルプロット

塩化物総量規制（旧建設省，1986 年通達）が実施された 1986 年以前の構造物と以後の構造物に層別化したプロットを Fig. 6 に示す。1986 年以前の折点前部と 1986 以後のプロットの m 値は 3.8 と 3.2 であり、ほぼ一致している。なお、プロットが互いに時間軸に対して水平移動した位置にあるような結果となった原因としては、4.3 節と同様に見かけ経過年数が評価されているためであると考えられる。したがって、この部分については、劣化の経年特性に差はないと判断できる。

4.5 劣化要因別のワイブルプロット

コンクリートの各々の劣化要因を故障モードとして解析した結果を Fig. 7 に示す。アルカリ骨材反応、塩害、凍害の 3 要因の故障データ数が少ないことから、ここでは、劣化度閾値を II に設定して解析した。この図より、プロットが混合型ワイブル分布を示していることがわかる。また、経年的特性として、コンクリート低品質、配筋不良、アルカリ骨材反応、塩害、凍害の順に劣化が発生するように見える。この原因として、コンクリート低品質や配筋不良（かぶり厚が小さい）が初期欠陥に起因し、コンクリート表面に変状として認識されるのが比較的早いのにに対し、アルカリ骨材反応、塩害、凍害などはコンクリート内部における化学反応および物理現象に起因しているため、外観上認識できるまでに時間を要することが考えられる。

今回の解析では、各劣化要因を単一の故障モードとし

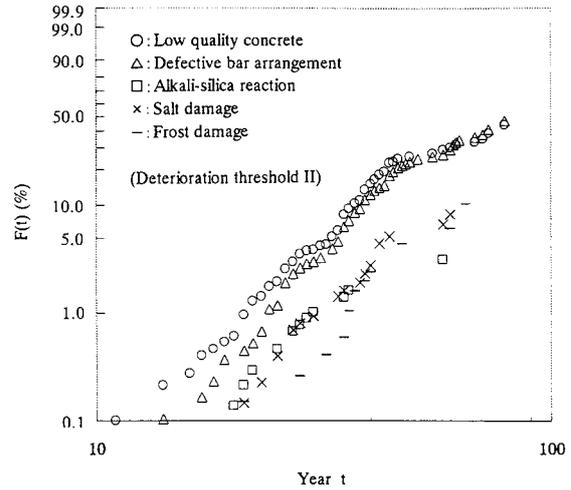


Fig. 7. Weibull plot of the each deterioration factor.

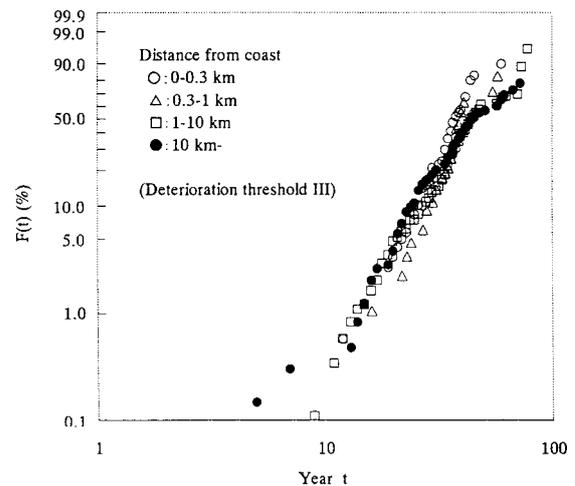


Fig. 8. Weibull plot of the effect of distance from coast.

て想定したが、実際は、複合した故障モードであった。このため、Fig. 7 が混合型ワイブル分布の形状を有していると考えられる。

4.6 海岸からの距離別のワイブルプロット

海岸からの距離別に 4 区分に層別化したプロットを Fig. 8 に示す。この図でプロットがほぼ重なっていることから、海岸からの距離による劣化の経年的特性に明確な差は見られないことがわかる。

4.7 凍結防止剤の使用別のワイブルプロット

凍結防止剤の使用別に層別化したプロットを Fig. 9 に示す。この図から、経過年数 30 年程度までは、凍結防止剤の使用がない構造物の方が劣化の発生が早く生じるように見て取れる。しかし、この結果だけでは、凍結防止剤の使用が原因で、経年的特性に差が出るとは言えない。そこで、元データを調べてみると、当然のことながら河川構造物では凍結防止剤の使用は皆無であった。このため、層別化により河川構造物の全てが無使用層に含まれていた。河川構造物は Fig. 4 に示したように原因は特定できないが、他の構造物に比べて劣化が早く生じるという結果が得られている。そのため、Fig. 9 においても

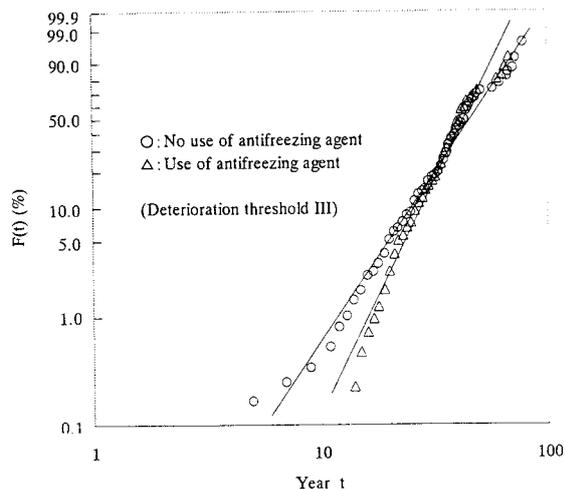


Fig. 9. Weibull plot of the effect of antifreezing agent.

ロットが河川構造物の影響を受けて、無使用カテゴリの劣化が早めに生じるという結果が得られたと考えられた。そこで、河川構造物を除いてプロットしたのが、Fig. 10 である。ここでは、二つのカテゴリはほぼ重なっており、Fig. 9 で得られたような経年的特性の差は見られず、凍結防止剤の使用の有無は経年的特性に影響を与えないと言える。

5 結 言

1999年に旧3省（建設省、運輸省、農林水産省）が共同で実施したコンクリート構造物の劣化状況に関する全国調査で収集された劣化度データに対して、ワイブル分布を用いた信頼性解析を適用した。使用したデータがフィールドデータであることから解析上の制約があることが判明した。特に本データの見かけ故障時間は、解析結果に大きく影響することが考えられる。このような制約はあるものの、現時点で入手可能なデータの範囲内での解析結果をまとめると以下ようになる。

- (1) ワイブル分布が劣化度データに適合することが判明した。しかし、経過年数50年以上の構造物においては、折点が生じた。
- (2) 河川構造物を除いた構造物では、種別の劣化の経年的特性に差は見られなかった。河川構造物は、他の構造物に比べ、劣化が早く発生する傾向にある。
- (3) 構造物の竣工年代別による劣化の経年的特性に差は見られなかった。ただし、データの特性から、竣工年代の古いプロットほど時間軸の増加方向にプロットされる傾向があった。
- (4) 塩化物総量規制以前に竣工した構造物と以後に竣工した構造物では、経年的特性に差は見られなかった。
- (5) コンクリート低品質および配筋不良の劣化要因に

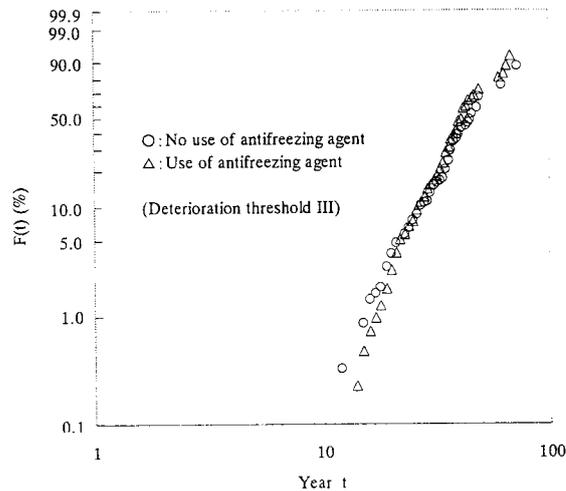


Fig. 10. Weibull plot of the effect of antifreezing agent

without river structure data.

よる劣化が他の要因（アルカリ骨材反応、塩害、凍害）に比べ、早く発生する傾向にあった。

(6) 海岸からの距離別による劣化の経年的特性に差は見られなかった。

(7) 凍結防止剤の使用の有無による劣化の経年的特性に差は見られなかった。

なお、3省調査は、全国的なコンクリート構造物の劣化実態調査であったということで、今後の構造物の補修・更新の指針として大きく役立つものと思われる。しかし、一回だけの調査では、劣化の経年的特性を把握することは困難である。したがって、今後は定期的により精度良くデータを収集する体制を確立するとともに、データ収集の指針として、今回の結果を基礎として、調査対象箇所の抽出方法、調査項目、調査手法、記録手法などについてさらに検討する必要がある。

最後に、本研究で用いたデータは、農林水産省農村振興局設計課より提供いただいたことを記し、感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) 建設省、運輸省、農林水産省、土木コンクリート構造物耐久性検討委員会の提言 (2000).
- 2) 長束勇、藤本直也、菅原教泰、重森篤、水と土、120, 22 (2000).
- 3) 関東農政局土地改良技術事務所、コンクリート構造物調査結果 (2000).
- 4) W. Nelson, “寿命データの解析” (1988) 日科技連.