

コンクリート構造物の補修ひびわれ幅の評価

EVALUATION ON CRACK WIDTH REQUIRED TO REPAIR RC STRUCTURES

松島 学*・関 博**・金子雄一***・松井邦人****

By Manabu MATSUSHIMA, Hiroshi SEKI, Yuichi KANEKO and Kunihito MATSUI

A procedure to determine crack width of RC structures, which are required to repair, is presented based on a questionnaire to professionals. Questions are asked on the following items; (1) depth of crack, (2) classification on crack pattern, (3) cover of reinforcement and (4) environment conditions. Distribution of crack width judged unnecessary to repair is defined by $f_d(W)$ and that necessary to repair by $f_b(W)$. Then distribution of certainty for repairing $f_c(W)$ is introduced. Delimitation of crack width whether or not to require repairing is determined by the distribution of certainty and loss function. The loss function depends on an importance of RC structures, for which analytic hierarchy process is introduced to decide.

Keywords: questionnaire, repairing-required crack width, factor analysis, analytic hierarchy process

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の耐久性が大きな問題¹⁾として取り上げられてきている。耐久性評価の基準の1つにコンクリート構造物に発生するひびわれがある。構造物にひびわれが発生している場合、ひびわれを通して水分、酸素、塩素イオンなどが侵入し、コンクリート中の鋼材に腐食を発生させるが、ひびわれと関連する因子の劣化への影響程度、因子間の相互作用などはまだ明確になっていない。Bažant^{2),3)}はコンクリート中の鋼材の腐食現象をモデル化して、構造物の耐用年数を算出する方法を提案している。Browne^{4),5)}はコンクリート表面より内部に浸透する塩化物量に基づき、非破壊試験の調査データから構造物の健全度や耐用年数を求める手法を提案している。しかし、実構造物への適用に対しては問題点も多く、現時点ではこれらの手法を適用することは困難であると思われる。

一方、前述のような物理モデルに対するアプローチに対して、統計的なアプローチに基づく方法が研究されている。白石ら⁶⁾はプロダクションシステムを用いた構造物の健全度評価法を提案している。西村ら⁷⁾⁻⁹⁾は過去の橋梁の損傷データをもとに、耐久性に階層構造モデルを構築し、エキスパートシステムを導入することによって実橋の耐久性診断を試みている。著者ら¹⁰⁾もRC橋を対象に、塩害を受けた構造物の耐久性に関連する因子を、既設のRC橋から得られた調査データから数量化理論Ⅱ類を用いて分析し、その結果を用いた評価方法を提案した。また、著者ら¹¹⁾は、アンケート調査に基づきコンクリート構造物の補修ひびわれ幅について分析を試みた。これらの研究は物理的な耐久性モデルの中に含まれる説明できないばらつきを、専門家の知識および経験で補い、統計的な手法に基づき、構造物の耐久性診断を行う比較的新しいアプローチである。このように、現時点では物理現象を容易に評価できない問題を、専門家の知識や経験で補ったり、実構造物の損傷に関するデータを統計的手法で整理することが実用的であると思われる。

本研究では、高度の知識を有する専門家の知見に基づき、既存のひびわれに関して実施されたひびわれ補修の要・否のアンケート調査をもとに、ひびわれ幅に関する各因子の影響度の評価を行った。その結果をもとに対象

* 正会員 工修 東電設計(株)技術開発本部耐震技術課長 (〒100 千代田区内幸町1-3-1)

** 正会員 工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科 (〒169 新宿区大久保3-4-1)

*** 正会員 工修 東電設計(株)第二土木本部地中線土木部 (〒100 千代田区内幸町2-1-1)

**** 正会員 Ph.D. 東京電機大学教授 理工学部建設工学科 (〒350-03 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

をライフライン等の地下構造物として、定量的な補修判断の評価について若干の解析を試みた。さらに、解析によって得られた補修を必要とするひびわれ幅と既存の基準類との比較を行った。

2. アンケート調査の方法

コンクリート構造物の補修の要否を判断するために、各種の調査項目¹²⁾が考えられる。アンケート調査では、①ひびわれの深さ、②鉄筋のかぶり、③環境条件および④ひびわれパターンの4つの項目が選ばれた。表一に、各調査項目とその区分を示す。アンケート調査は、大学関係者、官公庁、民間技術者ら全12名に対して行われた。アンケート調査は、一般のコンクリート構造物の補修を対象に、補修の要・否の境界となるひびわれ幅について1つだけ答えるようにすれば良いが、そのようなアンケートに答えることは非常に難しい。そのため、許容ひびわれ幅の考え方を拡張して必ず補修を必要とするひびわれ幅と補修を必要としないひびわれ幅の2つの回答をしてもらうこととした。その質問の回答数は4因子の組合せにより3⁴=81通りとなる。

3. 補修を必要とするひびわれ幅の確からしさの分布の設定

一般に、ひびわれによって生じる耐久性の低下は、ひびわれ幅が大きくなるにつれて、急激に顕著になる傾向があるが、ひびわれ幅がある程度以下では実用上ほとんど問題とならない。したがって、補修の要否の判定を行う場合には、ひびわれ幅の大小は重要な判断基準となる。一方、表面のひびわれ幅と内部のひびわれ幅が異なるこ

表一 ひびわれの調査因子とカテゴリ

項目	区分
1. ひびわれの深さ	表面 ^{*1}
	中間 ^{*2}
	貫通 ^{*3}
2. 鉄筋のかぶり	4cm以下
	4~7cm
	7cm以上
3. 環境条件	特に厳しい腐食環境
	腐食性環境
	一般環境
4. ひびわれのパターン	鉄筋と直角方向 ^{*4}
	鉄筋に沿う ^{*5}
	部材軸とある傾斜を有する ^{*6}

(参考) 表中の1., 4. の各項目を設定した背景には、たとえば次のような条件が考えられる。

- *1: 主に乾燥収縮に起因するひびわれを仮定した。
- *2: 主に曲げに起因するひびわれを仮定した。
- *3: 主に床板などのひびわれを仮定した。
- *4: 主に曲げに起因するひびわれを仮定した。
- *5: 主に鉄筋の腐食による膨張ひびわれを仮定した。
- *6: 主にせん断に起因するひびわれを仮定した。

とが多いことや、温湿度等の変化に応じてひびわれ幅が変化することなどより表面のひびわれ幅が必ずしも判断基準とならないという意見もある。しかしながら、ひびわれの調査を行う場合を考えると、深さ方向のひびわれ幅を調査することは容易ではないのに対して、表面のひびわれ幅は容易に測定できる利点がある。このため、実用上の判断基準としては表面のひびわれ幅の方が有用であると考えられ、本研究では表面のひびわれ幅を対象とした。

調査項目の組合せごとに、補修の要・否のひびわれ幅の回答を整理した。結果の一例として、ひびわれが表面、鉄筋かぶりが4.0 cm、環境条件が厳しい場合に対する補修の要・否のひびわれ幅の分布を図一(1)に示す。本図によると、各専門家の意見はかなりばらつきがあり、補修要と補修不要の2つの分布の間には曖昧さがあるものの、両者を区分できると考えられる。補修の要・否に関するこの2つの状態を区分するために、これらの分布を対数正規分布として近似させ、補修を不要とする場合の確率密度関数を $f_d(W)$ 、補修を必要とする場合の確率密度関数を $f_b(W)$ と設定した。さらに、 W_c に対する $f_d(W)$ および $f_b(W)$ による期待確率の和 $C_T(W_c)$ を式(1)で定義する。

$$C_T(W_c) = C_d(W_c) + C_b(W_c) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、



$$C_d(W_c) = \int_{W_c}^{+\infty} f_d(W) dW$$

$$C_b(W_c) = \int_0^{W_c} f_b(W) dW$$

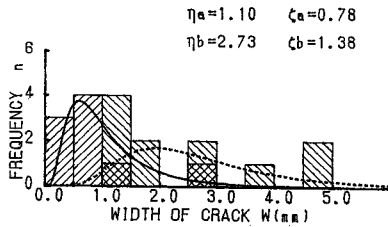
ここで、式(1)における W_c を補修の要・否の判断基準とすれば、 $C_d(W_c)$ は補修が不要であるにもかかわらず必要と判断する確率である。 $C_b(W_c)$ は、補修が必要であるにもかかわらず不要と判断する確率である。このようにして求めた $C_T(W_c)$ の分布は図一2のような形状になる。

$C_T(W_c)$ の関数から、補修を必要とするひびわれ幅の確からしさは次のようにして求めることができる。補修を必要とするひびわれ幅は、図一2で $C_T(W_c)$ の値が最小のとき、最も確からしい値となる。また、 $C_T(W_c)$ の値は最大1.0を取り、そのときは最も不一致となっていることを意味する。したがって、補修を必要とするひびわれ幅の確からしさの分布は、不一致のときを示す値1.0と $C_T(W_c)$ の差分の値を取って、式(1)より式(2)のように求められる。ただし、10.0 mm 以上のひびわれ幅は実際のアンケート調査では皆無であるために、10.0 mm 以下の打切り分布を採用した。

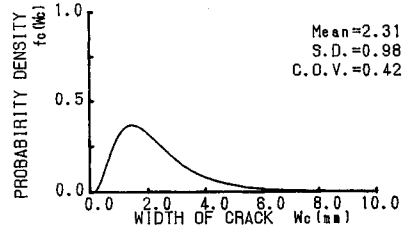
$$f_d(W_c) = \frac{1.0 - C_T(W_c)}{\int_0^{10.0} [1.0 - C_T(W_c)] dW_c} \dots \dots \dots (2)$$

 : unnecessary to repair, — : $f_a(W)$
 : necessary to repair, - - - - : $f_b(W)$

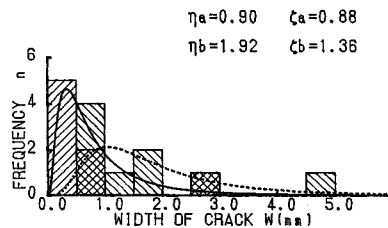
(条件) ひびわれの深さ : 表面
鉄筋のかぶり : 4cm以下
環境条件 : 厳しい



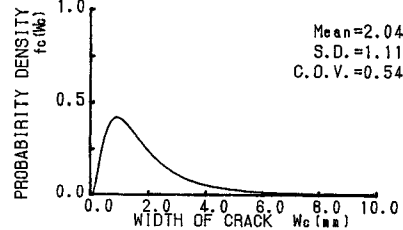
(a) 鉄筋と直交方向のひびわれ



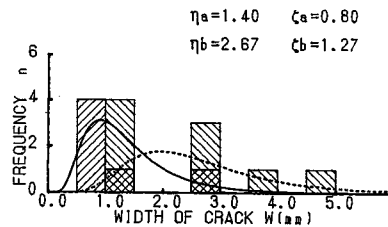
(a) 鉄筋と直交方向のひびわれ



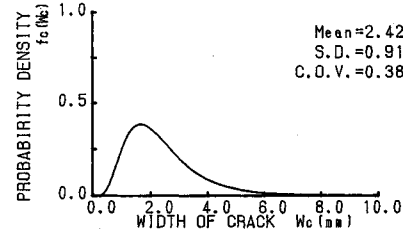
(b) 鉄筋に沿ったひびわれ



(b) 鉄筋に沿ったひびわれ



(c) 部材軸とある傾斜を有するひびわれ



(c) 部材軸とある傾斜を有するひびわれ

(1). アンケート結果からの補修の要否のひびわれ幅の分布の例 (2). 補修ひびわれ幅の確からしさの分布の例

図-1 補修の要否のひびわれ幅の分布の例

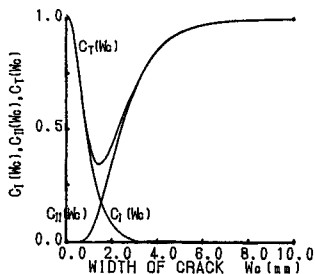


図-2 $C_1(W_c)$ の関数

ここで、式(2)の $f_a(W_c)$ の分布は、ピーク値に対する W_c の値は最も確からしい補修ひびわれ幅を意味し、分布のばらつきはその値の不確実性を表わしている。図-1(2)に図-1(1)での例から補修を必要とするひびわれ幅の確からしさの分布を示す。同図中には、各ひびわれ幅を対数正規分布としたときの $\ln W$ の平均値 η_a , η_b と標準偏差 ζ_a , ζ_b を示す。ここで、 a , b はおのの $f_a(W)$, $f_b(W)$ に対応している。図にみられるように(a),

(c) の分布のピーク値に対するひびわれ幅は、おのの 1.45 mm, 1.67 mm であり、(b) では 0.95 mm と (a), (c) よりも小さいが、その確からしさのばらつきは (a), (c) に比較して大きいことがわかる。

4. 補修を必要とするひびわれ幅の判断に及ぼす各因子の影響

補修を必要とするひびわれ幅に及ぼす各因子の影響をみるために、3.の方法により補修ひびわれ幅の確からしさの分布の平均値 \bar{W}_c と標準偏差 σ_{wc} を求めた。両者の工学的意味は次のように考えられる。平均ひびわれ幅 \bar{W}_c は、補修が必要か否かを区分するための目安を意味し、標準偏差 σ_{wc} は、 \bar{W}_c の不確実性を表わす値となり、その値が大きいかほど意見の一致度が低いことを示している。ここでは、平均値 \bar{W}_c に対するばらつきの大きさがむしろ問題となるので、標準偏差 σ_{wc} の代わりに変動係数 $\delta_{wc} (= \sigma_{wc} / \bar{W}_c)$ を用いることにする。

表-1 に示す各因子の \bar{W}_c および δ_{wc} に対する影響を

調べるために、 \bar{W}_c および δ_{wc} を外的基準とし、数量化理論 I 類¹³⁾を用いて解析を行った。表-2(a), (b) に解析結果を示す。同表にはカテゴリに対する基準化数量とアイテムに対するレンジの値が示されている。カテゴリに対する基準化数量は、表-2(a) ではこの値が大きいほど補修を必要とするひびわれ幅が大きくなることを意味し、表-2(b) では意見の一致度が低くなることを意味している。また、レンジの値は、各アイテム内において基準化数量の最大値と最小値の差で与えられるもので、各表ごとにアイテムの影響の大きさを示している。平均値 \bar{W}_c の各因子の評価から、次のようなことが明らかとなった。

- (1) ひびわれの深さは、表面と中間ではおおむね同じようであるが、貫通するとより厳しく評価されている。
- (2) 鉄筋のかぶり厚は、4 cm 以下と 4~7 cm ではおおむね同じような補修を必要とするひびわれ幅を与えているが、7 cm 以上では大きな値となっている。
- (3) 環境条件は、表中の各項目のレンジが最大となっており、最も影響度が高い因子である。
- (4) ひびわれパターンは、鉄筋に直角方向のひびわれに比べて鉄筋に沿ったひびわれ、および部材軸とある傾斜を有するひびわれの場合には厳しく評価されている。

補修を必要とするひびわれ幅の変動係数 δ_{wc} に対する各因子の評価から、次のようなことが明らかとなった。

- (1) ひびわれの深さは、表面および中間では意見が

一致しているが、貫通すると意見の不一致が大きくなる。

- (2) 鉄筋のかぶり厚が小さくなるにつれて意見の一致度は低くなる。

- (3) 環境条件は、厳しい腐食環境の場合には意見は分かれ、腐食環境、普通環境の条件下では意見の一致度は高い。

- (4) ひびわれパターンのうち、鉄筋に沿うひびわれ幅の評価は大きく意見が分かれているが、他の条件では意見の一致度は高い。

このように、ひびわれ幅の平均値 \bar{W}_c が小さく評価されている場合は、変動量 δ_{wc} が大きくなり、意見の一致度が低いといえる。

5. 建造物の重要度に対する評価方法

建造物の重要度は、損傷時の社会的影響、損傷後の復旧の困難等から定められるもので、定量的にその値を求めることは困難である。本研究では、耐久性に関する建造物の重要度を、一対比較^{14)~16)}を行うことにより、対象建造物の階層構造から求めることとした。

一対比較は、図-3 に示すように耐久性について評価項目、対象建造物の順番の関係でとらえて、階層構造を作り上げる。そして、耐久性からみて評価項目に重みをつけ、次の評価項目からみて対象建造物の重要度を評価する手法である。具体的には各評価項目 $S_1, S_2, S_3 \dots S_n$ 、その重要度を $E_1, E_2, E_3 \dots E_n$ とする。このとき、

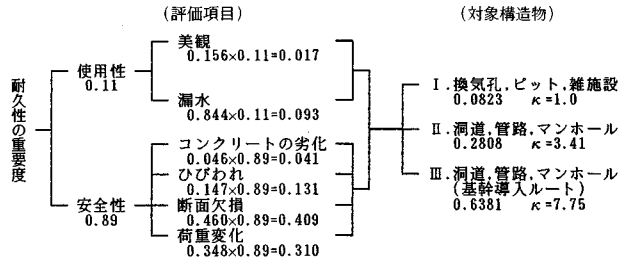
表-2 数量化理論 I 類による補修を必要とするひびわれ幅の解析結果
(a) ひびわれ幅の平均値 (\bar{W}_c)

アイテム	カテゴリ	基準化数量	レンジ
ひびわれ深さ	表面	0.118	0.712
	中間	0.095	
	貫通	-0.600	
鉄筋のかぶり	4 (cm) >	-0.132	0.393
	4~7 (cm)	-0.123	
	7 (cm) <	0.262	
環境条件	厳しい	-0.488	1.103
	中間	-0.107	
	ゆるやか	0.617	
ひびわれパターン	O.R.*	0.425	0.775
	A.R.**	-0.351	
	S.D.R.***	-0.322	

(b) ひびわれ幅の変動量 (δ_{wc})

アイテム	カテゴリ	基準化数量	レンジ
ひびわれ深さ	表面	-0.018	0.079
	中間	-0.006	
	貫通	0.063	
鉄筋のかぶり	4 (cm) >	0.040	0.088
	4~7 (cm)	0.005	
	7 (cm) <	-0.048	
環境条件	厳しい	0.076	0.129
	中間	-0.026	
	ゆるやか	-0.053	
ひびわれパターン	O.R.*	0.005	0.107
	A.R.**	0.047	
	S.D.R.***	-0.060	

* O.R. : 鉄筋と直角方向のひびわれ, ** A.R. : 鉄筋に沿うひびわれ, *** S.D.R. : 部材軸とある傾斜を有するひびわれ



図—3 構造物区分と重要度係数 κ の値

表—3 重要度分類

比較値	意味
1	両者の項目が同じくらい重要
3	前の項目の方が後の方より若干重要
5	前の項目の方が後の方より重要
7	前の項目の方が後の方よりかなり重要
9	前の項目の方が後の方より絶対に重要
2, 4, 6, 8	補間的に用いる
上の数値の逆数	後の項目から前の項目を見た場合

表—4 耐久性についての評価項目

	耐久性の項目	項目の意味
使用性	美観	遊離石灰の溶出、ひびわれ(軸方向・軸切りひびわれ)、漏水、コンクリートの部分損傷(コンクリートのはげ落ち、欠け)、さびの溶出等
	漏水	通路の滞水等
安全性	コンクリートの劣化	コンクリートの変質、コンクリート成分の溶出等
	ひびわれ	軸切りひびわれ(曲げ・せん断・ねじり)、軸方向のひびわれ(鉄筋腐食、付着・定着の劣化)等
	断面欠損	コンクリート(鉄筋腐食による剥離)、鉄筋(局部・全面腐食)等
	荷重変化	土圧の変化、地下水の変化等

表—5 対象構造物の重要度区分

重要区分	対象構造物
I	換気孔、ピット、雑施設(排水施設、昇降施設)
II	洞道、管路、マンホール
III	洞道、管路、マンホール(基幹導入ルート)

各評価項目の重要度に関し、表—3のどの比較値(E_i/E_j , $i, j=1 \sim n$)が該当するかを専門家に質問する。その結果、この E_i/E_j を行列要素とした式(3)の n 行 n 列の行列 E が得られる。

$$E = \begin{bmatrix} 1.0 & E_1/E_2 & E_1/E_3 & \dots & E_1/E_n \\ E_2/E_1 & 1.0 & E_2/E_3 & \dots & E_2/E_n \\ E_3/E_1 & E_3/E_2 & 1.0 & \dots & E_3/E_n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ E_n/E_1 & E_n/E_2 & E_n/E_3 & \dots & 1.0 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (3)$$

しかし、 E_i/E_j はある2つの項目のみに注目して、一対比較により得られた結果であるために、その関係に矛盾が生じることがある。そこで、一貫性をもたすために

式(4)の固有値解析を行うことで妥当な v を求める。

$$E \cdot v = \lambda \cdot v \dots \dots \dots (4)$$

ここで、

$$v = [E_1, E_2, E_3 \dots E_n]^T \dots \dots \dots (5)$$

λ は E の実数固有値の最大値である。このとき式(4)を解いて得られる各固有ベクトル v_i を各項目に対する重要度と考えることができる。そして、一対比較の精度が高くなるほど、最大固有値は n に近くなる。一般に、その精度は、Consistency Index $C.I. = (\text{固有値} - n) / (n - 1)$ で評価され、通常、 $C.I.$ が 0.15 以下であれば整合性があるとされている¹⁶⁾。

対象をライフライン等の地下構造物として、耐久性に関する構造物の重要度を求めることとした¹⁷⁾。表—4に対象構造物の耐久性の各項目の意味を示す。表—5に構造物の重要度区分を示す。表中の区分では、区分がIからIIIとランクが大きくなるほど構造物が損傷したときの社会的影響が大きくなる。本研究では、構造区分Iでは社会的な損失がなく、構造物が損傷したときの費用のみが必要なものと考えた。その場合の重要度係数 κ を $\kappa = 1.0$ と仮定して、II, IIIの重要度係数 κ の値を求めるものとする。計算した結果は図—3のようになった。図中の各値は、一対比較で求められた各項目の重要度である。この図から、評価項目のうち、重要な項目は断面欠損と荷重変化であることを指摘しており、他の項目はそれほど考慮を払う必要のないことがわかる。このとき、各項目の整合比は最大でも $C.I. = 0.147$ となり、十分な整合性があると考えられる。各重要度係数は、I. 換気孔、ピット、雑施設では $\kappa = 1.0$ とするとII. 洞道、管路、マンホールでは $\kappa = 3.41$ 、III. 洞道、管路、マンホール(基幹導入ルート)では $\kappa = 7.75$ となった。したがって、以下の解析ではおのおのの重要度係数 κ を 1.0, 3.0, 8.0 と仮定することとした。

6. 補修を必要とするひびわれ幅の最尤値

(1) 設定方法

4. では補修を必要とするひびわれ幅の確からしさの分布の平均値と変動係数を求めた。しかし、アンケート調査から直接求めたデータの中には回答が得られなかつ

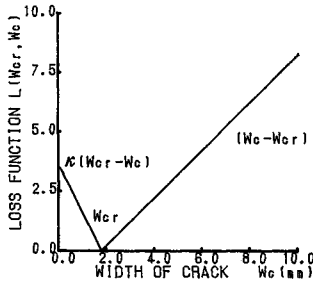


図-4 損失関数 $L(W_{cr}, W_c)$ の定義

た場合などもある。そのため、その分布は各推定値の不陸を修正することも考慮して、数量化理論 I 類の解析結果から補修を必要とするひびわれ幅の評価を行うものとした。補修を必要とするひびわれ幅の確からしさの分布の平均値 \bar{W}_c と変動係数 δ_{wc} の推定値は、表-2 に示された各区分に付与された基準化数量からスコア X_i, Y_i を求め、式 (6) のようにそれらの和で求められる。

$$\left. \begin{aligned} \bar{W}_c &= X_1 + X_2 + X_3 + X_4 \\ \delta_{wc} &= Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

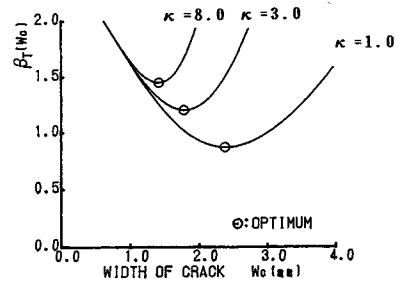
ただし、式 (2) の $f_c(W_c)$ は本来対数正規分布ではないが、図-1(2) にみられるように対数正規分布で精度良く近似できる。したがって、 $f_c(W_c)$ を式 (6) で求めた平均値 \bar{W}_c 、変動係数 δ_{wc} の対数正規分布とした。

次に、補修を必要とするひびわれ幅の最尤値 W_{cr} を求める。最尤度の評価関数として、図-4 に示す損失関数¹⁸⁾と上記の補修ひびわれ幅の確からしさの分布 $f_c(W_c)$ を用いて定義する。そして、期待費用最小¹⁹⁾の概念に基づき、この最尤値を求めるものである。本損失関数は、式 (7-a, b) で表わすことができる。

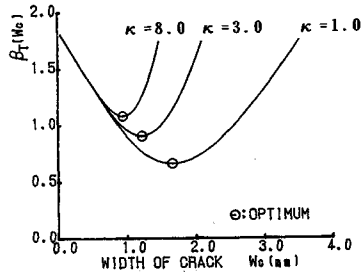
$$L(W_{cr}, W_c) = x(W_{cr} - W_c) \quad W_c < W_{cr} \dots\dots\dots (7-a)$$

$$L(W_{cr}, W_c) = (W_c - W_{cr}) \quad W_c > W_{cr} \dots\dots\dots (7-b)$$

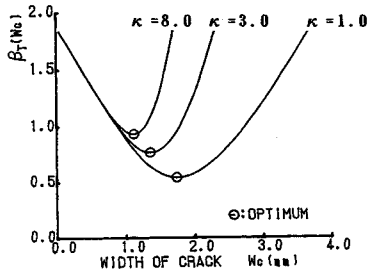
式 (7-b) は元来補修が不要であるにもかかわらず、要と判断することによる損失である。 W_c が大きくなるに従い、損失が線形に増加すると仮定している。式 (7-a) は補修が必要であるにもかかわらず、不要と判断したことによる損失である。その結果、構造物の崩壊につながる危険性もあると考え、 x 倍 (>1.0) している。 x の値は単に崩壊した構造物に対する損失だけでなく、広く社会的な影響も含むべきものと考えられるが、そのような条件で適切な x を設定することは非常に困難である。議論はいろいろあると思うが、ここでは 5. で述べてきた重要度係数を用いるものとする。図-4 では W_{cr} より小さい側で補修が要、 W_{cr} より大きい側で補修不要に対応しており、一見矛盾しているように見える。これは、補修ひびわれ幅の確からしさの分布 $f_c(W_c)$ の中で $W_c > W_{cr}$ は補修不要の分布 $f_d(W)$ に対応しており、 $W_c < W_{cr}$ は補修要の分布 $f_b(W)$ に対応しているからである。



(a) 鉄筋と直交方向のひびわれ



(b) 鉄筋に沿ったひびわれ



(c) 部材軸とある傾斜を有するひびわれ

(条件) ひびわれ: 表面, 鉄筋のかぶり: 4 cm 以下, 環境条件: 厳しい

図-5 補修を必要とするひびわれ幅の例

補修を必要とするひびわれ幅の最尤値 W_{cr} は式 (8) のように定義できる。

$$\text{find } W_{cr} = \text{opt. } \{W_c\} \text{ such that min. } \{\beta_r\} \dots\dots\dots (8)$$

ここで、

$$\beta_r = \int_0^{+\infty} \{L(W_{cr}, W_c) \cdot f_c(W_c)\} dW_c$$

図-5 は、重要度係数 $x=1.0, 3.0, 8.0$ としたときの補修を必要とするひびわれ幅の計算例を示している。この図より重要度係数 x が大きくなるほど、補修を必要とするひびわれ幅が小さくなり、 x に対する補修を必要とするひびわれ幅の感度は、 x の値が小さいほど補修を必要とするひびわれ幅に及ぼす感度が高いことがわかる。

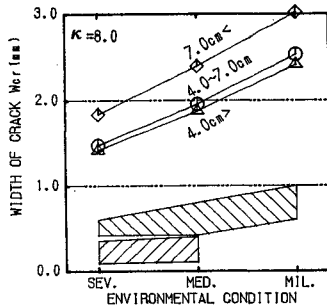
(2) 補修を必要とするひびわれ幅

図-6(a)~(g) は、(1) の方法を用いて重要度係数 $x=8.0$ の場合について、補修を必要とするひびわれ幅の最尤値を示したものである。ただし、ひびわれが貫通

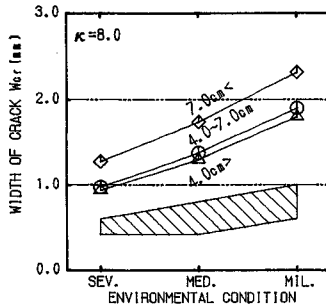
した場合について鉄筋に沿ったひびわれおよび部材軸にある傾斜をもったひびわれは、補修を必要とするひびわれ幅の検討から除外した。これは、両者のひびわれが発生するときには、部材としての性能を保持できなくなるからである。すなわち、前者は、鉄筋のかぶりコンクリートがはく落してしまうと考えられること、後者は部材のせん断破壊が生じることになるためである。同図には、参考までに、本研究と同一環境における土木学会コンクリート標準示方書²⁰⁾（以下、示方書と略称する）に示された方法による許容曲げひびわれ幅の計算値を示している。ただし、鉄筋のかぶりを2.0~10.0 cmとしたとき

の値である。さらに、同図にはコンクリートのひびわれ調査、補修、補強指針¹²⁾（以降ひびわれ補修指針と略称する）に提示された補修を必要とするひびわれ幅の値も示してある。この結果から、次のようなことが明らかとなった。

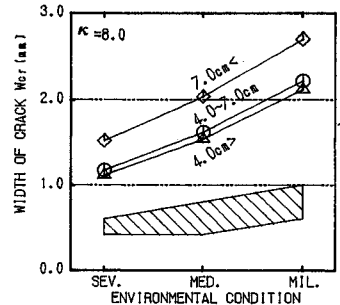
a) 本研究で提示した補修を必要とするひびわれ幅は、示方書の許容曲げひびわれ幅よりも大きな値となっている。これは、示方書の値は荷重によって生じる曲げひびわれを対象にしているのに対して、アンケートに基づいた解析結果は、温度ひびわれ、乾燥収縮、施工などの影響を考慮しているためと思われる。また、ひびわれ



(a) 鉄筋と直角方向の場合

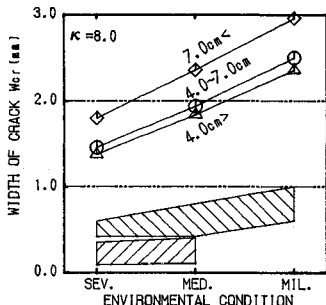


(b) 鉄筋に沿ったひびわれの場合

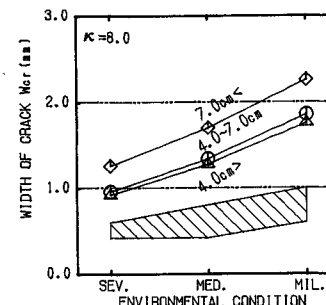


(c) 部材軸とある傾斜を有する場合

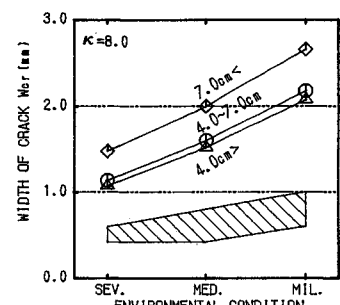
(1) ひびわれの深さ: 表面



(d) 鉄筋と直角方向の場合

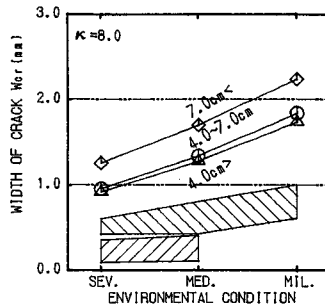


(e) 鉄筋に沿ったひびわれの場合



(f) 部材軸とある傾斜を有する場合

(2) ひびわれの深さ: 中間



(g) 鉄筋と直角方向の場合

(3) ひびわれの深さ: 貫通

▨ : ひびわれ補修指針
 ▧ : 示方書

図-6 補修を必要とするひびわれ幅

補修指針と比較しても、本研究で求められたひびわれ幅は大きな値となっており、ひびわれ補修指針は安全側の値が設定されていることがわかる。

b) 補修の要・否に対して環境条件は最も厳しい項目であり、当然のことであるが、環境が厳しい場合は補修を必要とするひびわれ幅としては小さな値を設定している。

c) 鉄筋のかぶり、補修を必要とするひびわれ幅に対して、7 cm 以下では同じような評価を与えているが、7 cm 以上であれば補修を必要とするひびわれ幅を大きく評価できる。

d) ひびわれ深さは、中間、表面ではほぼ同じような補修を必要とするひびわれ幅が評価されるが、貫通するとそれより小さな補修を必要とするひびわれ幅として評価される。

e) ひびわれパターンも、補修を必要とするひびわれ幅に影響する因子と考えられる。特に、部材軸とある傾斜を有するひびわれ、および鉄筋に沿ったひびわれでは、鉄筋と直交方向のひびわれに比べて、補修を必要とするひびわれ幅を小さく評価している。

7. 結 論

本研究では、高度の知識を有する専門家に対して実施されたひびわれの補修の要否のアンケート調査結果に基づき、ひびわれ幅に影響する因子に関する検討を行い、補修を必要とするひびわれ幅を評価する手法を提案した。本手法によって得られた補修を必要とするひびわれ幅の最尤値と既往の規準類との比較を行い、若干の考察を行った。以下に得られた結果を要約する。

(1) アンケート調査結果をもとに、補修を必要とするひびわれ幅の確からしさの分布 $f_c(W_c)$ と、その損失に関する関数 $L(W_c, W_c)$ を定義し、2つの関数を利用して各条件での補修を必要とするひびわれ幅を求める手法を提案した。

(2) 耐久性に最も影響する因子は環境条件であり、他の3つの因子(ひびわれの深さ、鉄筋のかぶり、ひびわれパターン)はほぼ同程度の影響因子である。鉄筋のかぶりは7 cm を越えると補修を必要とするひびわれ幅は大きくできること、ひびわれが部材を貫通したり、鉄筋に沿って発生する場合には、ひびわれ幅を小さい値に設定しなくてはならないことが明らかとなった。

(3) 構造物の耐久性に関する重要度を求めるために、地中構造物を対象に階層構造を作成し、一対比較により耐久性に関する構造物の重要度係数 α を設定した。本手法で求めた重要度係数を用いて補修を必要とするひびわれ幅を求めた。これによると、重要度係数が大きくなるほど補修を必要とするひびわれ幅は小さくなり、そ

の感度は α が小さくなるほど大きい。

(4) 本研究で求めた補修を必要とするひびわれ幅は、示方書の許容曲げひびわれ幅よりも大きな値となった。これは、本研究で検討している補修を必要とするひびわれ幅は曲げひびわれだけでなく、温度ひびわれ、乾燥・収縮、施工等の影響が原因で生じたひびわれを含むためと思われる。また、ひびわれ補修指針と比較すると、本研究で求めた補修を必要とするひびわれ幅は大きな値となった。ひびわれ補修指針の値は、示方書と比較すると大きな値であるが、安全側の値を設定しているものと考えられる。

謝 辞：アンケート結果の活用にあたり、日本コンクリート工学協会ひびわれ調査研究会の仕入豊和委員長(東京工業大学名誉教授)ならびに委員各位、アンケートにご協力頂いた専門家の方々に感謝の意を表わす次第である。

本研究を遂行するにあたり、奥村敏恵 東京大学名誉教授から常に適切な助言をいただいた。また、元・東京電機大学卒論生の洲鎌靖之氏(現・川田建設(株))には、計算に協力をいただいた。ここに深く感謝の意を表わす次第である。

参 考 文 献

- 1) 小林一輔：コンクリート構造物の耐久性，コンクリート工学，Vol.23，No.2，pp.4～12，Feb.，1985.
- 2) Bažant, Z.P. : Physical model for steel corrosion in concrete sea structures—Theory, J. of the Str. Div., Vol.105, No. ST6, pp.1137～1153, June, 1979.
- 3) Bažant, Z.P. : Physical model for steel corrosion in concrete sea structures—Application, J. of the Str. Div., Vol.105, No. ST6, pp.1155～1166, June, 1979.
- 4) Browne, R.D. : Design prediction of the life for reinforced concrete in marine and other chloride environments, Durability of Building Materials 1, pp.113～125, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 1982.
- 5) Browne, R.D., Geoghegan, M.P. and Baker, A.F. : Analysis of structural condition from durability results, Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction, pp.193～222, Ellis Horwood Limited, Chichester, 1983.
- 6) 白石成人・古田 均・橋本光行：プロダクションシステムを用いた構造物の健全度評価，第7回設計における信頼性工学シンポジウム，pp.164～169，日本材料学会，1985.12.
- 7) 西村 昭・藤井 学・宮本文穂・富田隆弘：橋梁診断のシステム化に関する基礎研究，土木学会論文集，第378号/V-6，pp.175～184，1987年2月.
- 8) 西村 昭・藤井 学・宮本文穂・小笠 勝：構造物の健全度診断へのファジー集合論の適用に関する基礎的研究，

- 土木学会論文集, 第380号/I-7, pp.365~374, 1987年4月.
- 9) 西村 昭・藤井 学・宮本文穂・富田隆弘: コンクリート橋損傷要因の階層化と耐用性判断, 第8回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.213~216, 日本コンクリート工学協会, 1986.
- 10) Seki, H., Matsui, K., Matsushima, M. and Kaneko, Y.: Chloride-induced damage evaluation of concrete bridges, Proc. of JSCE, No.402/V-10 (Concrete Eng. and Pavements), pp.179~188, February, 1989.
- 11) 松島 学・松井邦人・金子雄一・関 博: 数量化理論を用いたコンクリート構造物のひびわれ幅の評価, コンクリート工学年次論文報告集, 第11巻, 第2号, pp.139~144, 日本コンクリート工学協会, 1989.
- 12) コンクリートのひびわれ調査, 補修・補強指針, 日本コンクリート工学協会, 1987年2月.
- 13) 林知巳夫・駒沢 勉: 数量化理論とデータ処理, 朝倉書店, pp.10~48, 1982.6.
- 14) Saaty, T.L.: The Analytic Hierarchy Process, McGraw-Hill, New York, 1980.
- 15) Saaty, T.L.: A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structure, J. of Mathematical Psychology, 15, pp.234~281, 1980.
- 16) 刀根 薫: ゲーム感覚の意志決定法, 日科技連, 1986.1.
- 17) 洲鎌靖之・松島 学・松井邦人・関 博: 対比較による耐久性に関する構造物の重要度, 第17回関東支部技術研究発表会講演概要集, 1990年3月.
- 18) Ang, A. H-S. and Tang, W.H. (伊藤 学・亀田弘行・黒田勝彦・藤野陽三共訳): 土木建築のための確率・統計の応用, pp.53~82, 丸善, 1988.1.
- 19) 星谷 勝・石井 清: 構造物の信頼性設計法, 鹿島出版会, 1986.
- 20) 土木学会: コンクリート示方書・設計編, pp.76~77, 1986年制定.

(1990.2.19・受付)