

論文

[2021] 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

正会員○松島 学（東電設計(株)技術開発本部）
 正会員 松井邦人（東京電機大学理工学部）
 正会員 金子雄一（東電設計(株)第二土木本部）
 正会員 関 博（早稲田大学理工学部）

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として取り上げられてきている¹⁾。耐久性評価の一つの基準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、 O_2 、 Cl^- などが侵入するためコンクリート中の鋼材に腐食を生じさせることは、明らかなことであるが、ひびわれに寄与する因子がどの程度劣化を促進させるものであるのか、因子間の影響度合がどのようになっているかなどは、まだ明確に示されていない。この問題については、概念的手法を用いて数多くの研究^{2), 3)}がなされているが、現時点では、解析モデルを用いて構造物への応用するに至っていない。

本研究は、高度の知識を有する専門家の知見を借りて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結果をもとに、ひびわれ幅に関する各因子の影響度合の評価を行い、その結果から定量的な補修判断の評価について若干の解析を試みたものである。さらに、解析によって得られたひびわれ幅の許容値とコンクリート標準示方書⁴⁾との比較をおこなった。

2. アンケート調査

一般に、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⁵⁾が考えられる。選ばれた因子は、①ひびわれの深さ、②鉄筋のかぶり深さ、③環境条件、及び④ひびわれパターンの4因子である。表1に、各調査因子とそのカテゴリー区分を示す。ただし、表中の環境条件の区分は、コンクリート標準示方書の環境条件に従うものとした。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。アンケート調査の形式は、一般土木構造物を対象に、4因子の組合せ81通りに対して補修の要否のひびわれ幅の値について質問を行った。

3. 耐久性影響因子の評価

ひびわれによって生じる耐久性の低下は、一般に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。一方、ひびわれ幅がある程度以下に小さい場合は、実用上有害な現象をほとんど生じないと考えられる。従って、補修の要否の判定を行う場合、ひびわれ幅の大小は重要な判断基準となる。しかし、構造物の表面のひびわれ幅は、

表1 コンクリート構造物の耐久性因子

アイテム	カテゴリー
1. ひび割れの深さ	表面
	中間
	貫通
2. 鉄筋のかぶり	4cm以下
	4~7cm
	7cm以上
3. 環境条件	Severe (厳しい腐食環境)
	Medium (腐食環境)
	Mild (一般環境)
4. ひび割れのパターン	鉄筋と直角方向
	鉄筋に沿う
	部材軸とある傾斜を有する

内部のひびわれ幅とは相関はあるものの、表面のひびわれ幅が必ずしも有害と判断するひびわれ幅の基準にならない場合もある。本研究では、これらの問題について専門家は暗黙の内に高度な技術的判断をしているものと考え、耐久性因子の評価を行った。

図1 a, b, cでは、表1の各項目について、ひびわれのパターンごとに、各専門家の解答を表面のひびわれ幅の補修の要否について整理した分布の代表例を示す。図に見られるように、各専門家の意見は大きくばらつくが、2つの間には曖昧ではあるが両者を区分できることが明かである。そのため、この2つの状態を区分するために、これらの分布を両方とも対数正規分布として近似させ、補修が必要な場合の確率密度関数を $f_a(W)$ 、不必要な場合の確率密度関数 $f_b(W)$ とする。次に、 $f_a(W)$, $f_b(W)$ を利用して補修の必要性を評価するための評価関数 $P_\theta(W)$ を次式のように定義する。

$$P_\theta(W) = 2(f_\theta(W) - 0.5) \quad (1)$$

ここで、

$$f_\theta(W) = \frac{f_a(W)}{f_a(W) + f_b(W)}$$

$P_\theta(W)$ は、 $-1.0 \leq P_\theta(W) \leq 1.0$ の値を取り、 $P_\theta(W)$ が -1.0 に近くなれば補修の必要性が小さくなり、 $P_\theta(W)$ が 1.0 に近づくれば補修の必要性が大きくなることを意味する。この評価関数は、補修の要否を分か

表2 評価関数 $P_\theta(W)$ の定義

区分	$P_\theta(W)$	評価
I	$1.0 > P_\theta(W) > 0.5$	補修不要 大
II	$0.5 > P_\theta(W) > 0.0$	補修不要
III	$0.0 > P_\theta(W) > -0.5$	補修要
IV	$-0.5 > P_\theta(W) > -1.0$	補修要 大

りやすくするものであり、表2のように区分した。図2 a, b, cは、図1 a, b, cの分布から(1)式を利用して評価関数を求めたものである。さらに、表2の評価から $P_\theta(W)=0.0$ の時を平均ひびわれ幅 \bar{W} 、 $P_\theta(W)$ が -0.5 から 0.5 まで変化した時のひびわれ幅の変動量をひびわれ幅の変動量 W_L と定義する。 \bar{W} および W_L 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} は、補修が必要か否かを区分するための目安を意味し、ひびわれ幅の変動量 W_L は、 \bar{W} の値の不確実性を表す値となり、その値が大きいほど意見の一致度が悪いことを示している。

表3 a, bに今求められた \bar{W} , W_L の値と表1の各因子との関係を数量化理論I類⁶⁾を用いて解析した結果を示す。ここで、 \bar{W} および W_L を外的基準とおき、 W_L については \bar{W} で除して無次元量 $V_w (=W_L/\bar{W})$ として解析を行った。同表のスコアの値は、 \bar{W} では、大きな値になるほどひびわれ幅の許容できる値が大きくなることを意味し、 V_w では大きな値になるほど意見の一致度が悪くなることを意味する。

ひびわれ幅の平均値 \bar{W} 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な評価を与えているが、貫通すると大きな問題となる。
- ② 鉄筋のかぶり厚さは、7cm以上であれば問題はない。
- ③ 環境条件は、最も影響度が高い因子である。
- ④ ひびわれパターンは、鉄筋に沿ったひびわれの場合には、問題となる。

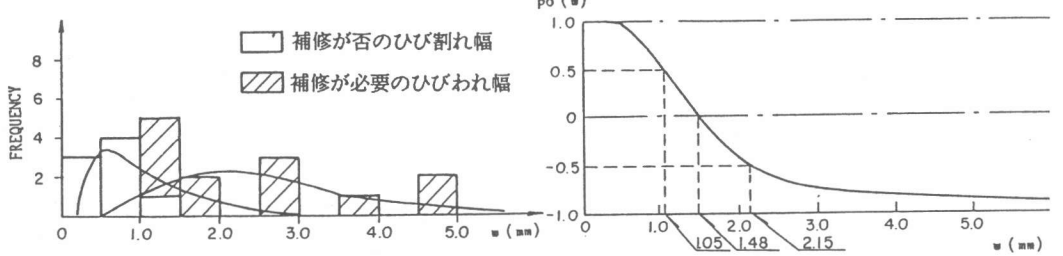
ひびわれ幅の変動量 $V_w (=W_L/\bar{W})$ の各因子の評価から、次のようなことが明らかとなった。

- ① ひびわれの深さは、表面および中間では意見の一致は高いが、貫通すると意見の不一致度が高くなる。
- ② 鉄筋のかぶり厚さが大きくなるにつれて意見の一致度は高くなる。
- 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

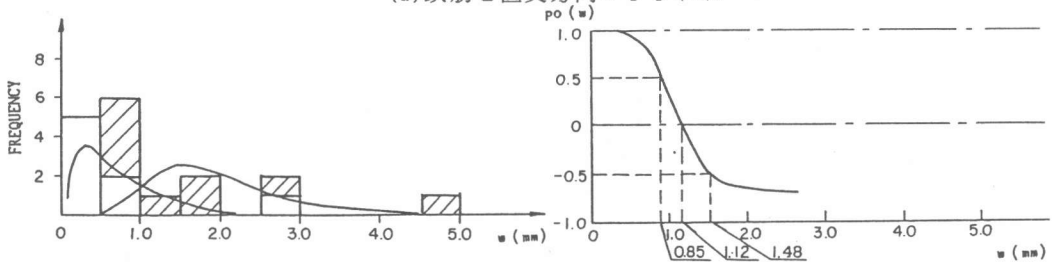
意見の一致度が高い。

- ④ ひびわれパターンの内、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。

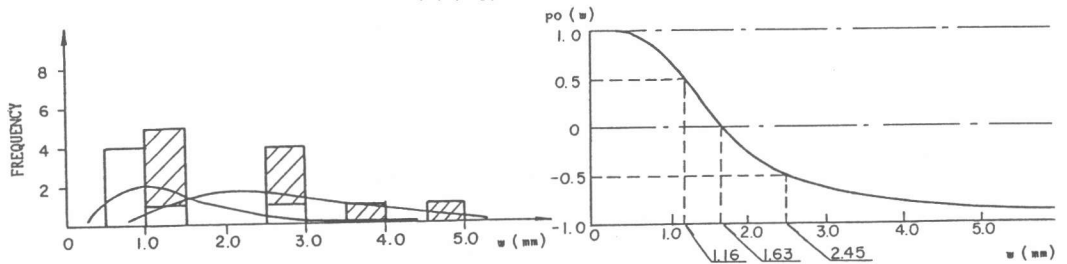
このように、ひびわれ幅の平均値 \bar{W} で耐久性の低下に大きく寄与する場合は、変動量 V_W が大きくなり、意見の不一致度が高いことが言え専門家でも判断に迷っていることがわかる。



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

図1 補修の有無のひびわれ幅の分布

図2 ひびわれ幅の評価関数

4. ひびわれ幅の許容値の評価

3. で求められた数量化理論 I 類の解析結果を用いて、ひびわれ幅の許容値の評価を行う。表 3 a, b に示された各因子に付与されたスコアの値を合計した値は、ひびわれ幅の許容値を定量的に評価するものであると考えられる。従って、ひびわれ幅の平均値 \bar{W} および変動量 V_W の推定式は次式のように表される。

$$\bar{W} = \bar{S}_1 + \bar{S}_2 + \bar{S}_3 + \bar{S}_4 \quad (2)$$

$$V_W = S_1 + S_2 + S_3 + S_4$$

ここで、 $\bar{S}_1 \sim \bar{S}_4$ は、表 3 a で示した因子 1~4 のカテゴリーごとに付与されたスコアである。 $S_1 \sim S_4$ は、表 3 b で示した因子 1~4 のカテゴリーごとに付与されたスコアである。

次に、 \bar{W} と V_W の推定式(2)を用いてひびわれ幅の許容値 W_{cr} を提案する。 V_W の工学的な意味

は、ひびわれ幅の不一致度を表す値であり、 V_w の値が大きくなると \bar{W} の不確実性が高くなることを意味する。

表3 a 数量化理論 I 類⁶⁾によるひびわれ幅の解析(\bar{W})

アイテム	分類	スコア	スコアの分布	レンジ
1. ひびわれ深さ	表層	0.0207		0.0518
	中間	0.0085		
	貫通	-0.0311		
2. 鉄筋のかぶり	4cm以下	-0.0185		0.0554
	4~7cm	-0.0162		
	7cm以上	0.0369		
3. 環境条件	Severe	-0.0522		0.1042
	Medium	0.0042		
	Mild	0.0520		
4. ひびわれパターン	鉄筋と直角方向	0.0313		0.0673
	鉄筋に沿う	-0.0361		
	部材と傾斜を有する	0.0054		

表3 b 数量化理論 I 類によるひびわれ幅の解析(V_w)

アイテム	分類	スコア	スコアの分布	レンジ
1. ひびわれ深さ	表層	-0.0326		0.2111
	中間	-0.8372		
	貫通	0.1273		
2. 鉄筋のかぶり	4cm以下	0.1328		0.2574
	4-7cm	-0.0228		
	7m以上	-0.1247		
3. 環境条件	Severe	0.0772		0.1238
	Medium	-0.0466		
	Mild	-0.0318		
4. ひびわれパターン	鉄筋と直角方向	-0.0642		0.2831
	鉄筋に沿う	0.1706		
	部材と傾斜を有する	-0.1125		

従って、いくらひびわれ幅の平均値 \bar{W} が大きな値を示しているでもその変動量 V_w が大きな値を示せば、ひびわれ幅の許容値としては、小さな値を取らざるを得なくなる。そこで、式(2)より計算された \bar{W} 、 V_w よりひびわれ幅の許容値 W_{cr} は、次式のように定義される。

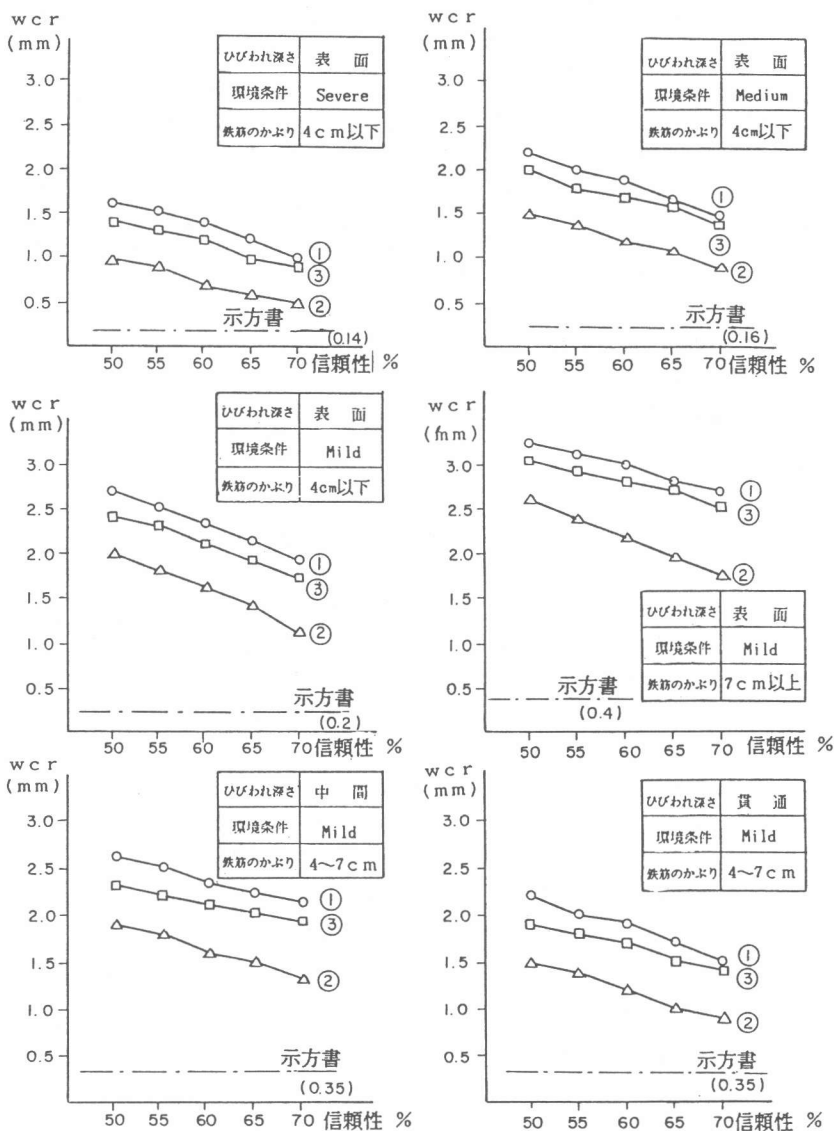
$$W_{cr} = (1.0 - \beta_c \cdot V_w) \bar{W} \quad (3)$$

ここで、 β_c の値は、ひびわれ幅のばらつきを考慮して、その安全余裕を見るための係数である。この裕度 β_c の設定については、次のようなことが言える。 \bar{W} のばらつきを正規分布と仮定できるならば、工学上の問題では、95%信頼性を取ることが一般的である⁷⁾。しかし、破壊などのように直接被害にむすびつくような場合には信頼度を高く取る必要があるが、耐久性問題を考える場合はそれほど高く設定する必要がないものと考えられる。そのため、 β_c を信頼度50% ($\beta_c=0.0$:変動量を見捨てた場合) から信頼度70% ($\beta_c=0.53$) まで5%きざみで変化させひびわれ幅の許容値 W_{cr} を算定した。図3に各因子の条件ごとに解析されたひびわれ幅の許容値の代表値を示す。同図にはコンクリート標準示方書による許容ひびわれ幅も示す。示方書の許容ひびわれ幅は、ひびわれ補修を対象としたものではないが、補修を規定した規準がないので、上述のように示方書の値と比較した。

その結果から、示方書での許容ひびわれ幅と比較して、次のようなことが言える。

- ① 全体的に本研究で評価したひびわれ幅の許容値よりも示方書での許容ひびわれ幅の方が厳しい値となった。
- ② 鉄筋のかぶりと環境条件のひびわれ幅の許容値に対する感度は、ほぼ同程度である。

- ③環境条件が厳しい場合、解析結果は、全体的に厳しい評価を与えている。それでも、示方書の方が厳しい値となっている。この理由として、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、解析結果はこの影響のほかに温度ひびわれ、施工等を考慮しているために、このような結果になった。
- ④ひびわれパターンは、一般にひびわれ補修を考える場合あまり考慮されない因子であるが、解析の結果よりひびわれ幅の許容値に大きく寄与することが明らかにされた。



(注) ひびわれパターン ①鉄筋と直角方向ひびわれ
 ②鉄筋に沿ったひびわれ
 ③部材軸とある傾斜を有するひびわれ

図3 アンケート調査によるひびわれ幅の許容値

5. まとめ

本研究では、高度の知識を有する専門家の知見を借りて、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結果をもとに、ひびわれ幅に関する各因子の影響について評価を行い、その結果を用いてひびわれ幅の許容値を評価する手法を提案した。そして、その手法によって得られたひびわれ幅の許容値とコンクリート標準示方書との比較をおこない、若干の考察を加えた。以降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、表面のひびわれ幅の補修の要否の必要性を評価するための関数 $P_0(W)$ を定義し、その関数を利用して各条件での平均ひびわれ幅 \bar{W} 及び変動量 W_L を求めた。
- (2) 平均ひびわれ幅 \bar{W} と各因子の関係から、ひびわれ深さは貫通した場合、鉄筋に沿ったひびわれの場合及び環境条件が大きく影響する。そして、平均ひびわれ幅で劣化に大きく寄与する因子は意見の不一致度が大きい。
- (3) 平均ひびわれ幅 \bar{W} と変動量 W_L からひびわれ幅の許容値 W_{or} を定義した。その結果、全体的に本研究での解析結果は、コンクリート標準示方書と比較して大きな値となり、示方書はかなり安全側の設定をしてあることがわかる。

しかし、示方書の許容ひびわれ幅は、荷重により生じる曲げひびわれを対象としているのに対して、本研究で検討している許容ひびわれ幅は、ひびわれ補修を対象としているため、温度ひびわれ、施工等の影響が原因で生じたひびわれを含むものと思われる。従って、補修が必要と判断されるひびわれ幅が示方書の許容ひびわれ幅より大きくなったものである。

6. 謝辞

アンケート結果の活用にあたり、ひびわれ調査研究会の委員長（東京工業大学：仕入豊和教授）ならびに委員各位、アンケートに御協力頂いた専門家の方々に感謝の意を表す次第であります。

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きました。ここに深く感謝を致します。また、元東京電機大学卒論生の浦田昌浩氏（現川田工業株式会社）には、計算に協力をいただいたことに対して深く感謝致します。

（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) Bazant, Z. P. :Physical model for steel corrosion in concrete sea structure -Theory. J. of the Str. Div. Vol. 105. No. ST6, pp. 1137～1153, June 1979.
- 3) Bazant, Z. P. :Physical model for steel corrosion in concrete sea structure -Application. J. of the Str. Div. Vol. 105. No. ST6, pp. 1155～1166, June 1979.
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書・設計編，昭和61年制定，pp. 76～77
- 5) 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会協会，pp. 17～39，昭和62年2月
- 6) 林知巳夫，駒沢勉：数量化理論とデータ処理，pp. 10～48, 1982, 6, 2, 朝倉書店
- 7) 岡村甫：コンクリート構造の限界状態設計法（第2版），pp. 9～10, 1986, 10, 5, 共立出版