

マスコンクリートの温度ひびわれ特性の数量化に関する検討

正会員 小野 定 (清水建設(株)土木本部)

1. はじめに

マスコンクリートの温度ひびわれ制御を検討する場合、水密性、耐久性等を検討するために必要なひびわれ特性としては、幅、長さ、面積および間隔の4つが重要と考えられる。幅は水密性や耐久性と密接な関係を持っており、また、面積は美観、ひびわれの補修費用等に大きく寄与する。

ひびわれ長さと同様、幅と面積が推定できればこれらの結果から推定できると考えられるので、ここでは、温度ひびわれ特性を解析するためのステップとして、ひびわれ幅と面積の数量化について検討した。

2. ひびわれ面積の数量化

図-1 にブロック長 L 、ブロック高(幅) H の領域に発生した温度ひびわれの模式図を示す。 W_i は各々のひびわれの平均ひびわれ幅で、図-2 に示すようにある間隔(20~100 cm)で切られたメッシュの水平線を横切る箇所で測定したひびわれ幅の平均値である。 W_i は式(1)によって与えられる。

$$\bar{W}_i = \frac{\sum_{j=1}^n W_{ij}}{n} \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 W_{ij} : i 番目のひびわれで j 点で測定したひびわれ幅 (mm)
 n : i 番目のひびわれ幅測定数

ひびわれ幅を前述のように定義すると、領域 $L \times H$ の中で発生したひびわれの最大ひびわれ幅は次のようになる。

$$W_{\max} = \text{MAX} (W_{ij})$$

ただし、 $\text{MAX} (W_{ij})$ は W_{ij} の中での最大値を意味する

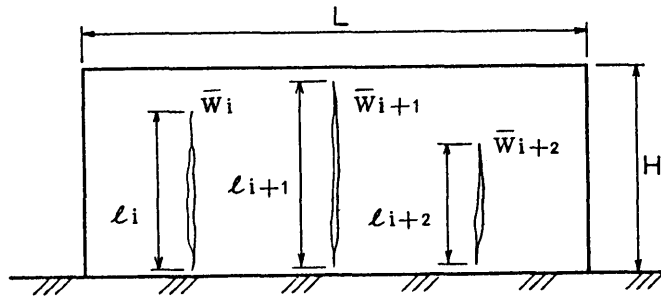
平均ひびわれ幅を定義することで、ひびわれ長は測定値から既知とすれば、面積 $L \times H \text{ m}^2$ の領域内に発生した全ひびわれ面積は次式によって近似できる。

$$\sum_{i=1}^N A_i \approx \sum_{i=1}^N (\bar{W}_i \times l_i)$$

ここに、 N : $L \times H$ の領域に発生したひびわれ本数
 l_i : 個々のひびわれ長

この全ひびわれ面積をブロック面積で除した、単位面積当たりのひびわれ面積をひびわれ面積に関する特性値とする。これを UCA とすると、 UCA は次のように定義される。

$$UCA = \frac{\sum_{i=1}^N (\bar{W}_i \times l_i)}{L \times H} \quad \dots\dots\dots(2)$$



- L : ブロックの長さ (m)
- H : ブロックの高さ (m)
- \bar{W}_i : 各ひびわれの平均ひびわれ幅 (mm)
- l_i : 各ひびわれの長さ (m)
- A_i : 各ひびわれの面積 (mm^2)
- $\sum_{i=1}^N A_i$: $L \times H$ (m^2) の領域に発生した
全ひびわれ面積 (mm^2)
- $\text{MAX}(\bar{W}_i)$: $L \times H$ (m^2) の領域に発生した
最大平均ひびわれ幅 (mm)
- R : 外部拘束度
- N : $L \times H$ (m^2) の領域に発生したひびわれ本数

図-1 温度ひびわれ発生模式図

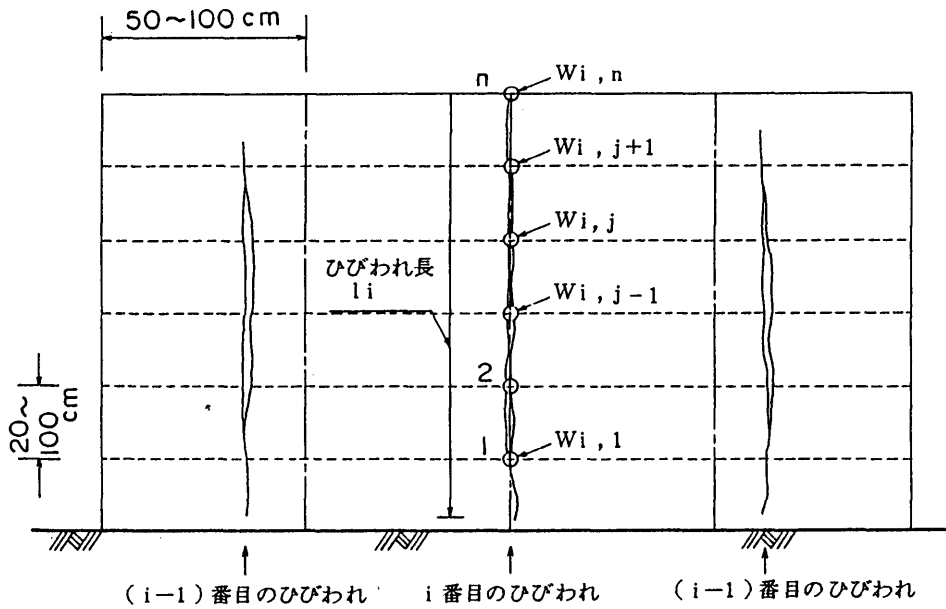


図-2 ひびわれ幅、長さの測定方法

3. ひびわれ幅の数量化

一般に、ひびわれ幅の表示法としては最大ひびわれ幅、平均ひびわれ幅などが使われている。温度ひびわれ幅に関する特性値についても、最大ひびわれ幅および平均ひびわれ幅を与えるように数量化した。

単位拘束・単位長さ当たりの最大平均ひびわれ幅を温度ひびわれの幅に関する特性値とし、これをMACとする。MACは次式で定義した。

$$MAC = \frac{MAX(\bar{W}_i)}{LR} \dots\dots\dots(3)$$

ここに、MAX(\bar{W}_i) : W_i の最大値

最大ひびわれ幅 W_{max} と最大平均ひびわれ幅MAX(\bar{W}_i) との間に

$$W_{max} = K \times MAX(\bar{W}_i) \dots\dots\dots(4)$$

なる線形関係が成り立つとすると、式(3)から W_{max} は次のようになる。

$$W_{max} = K \times L \times R \times MAC \dots\dots\dots(5)$$

4. 温度ひびわれ特性

4.1 ひびわれ調査

温度ひびわれの発生原因には、図-3に示すような数多くの要因が複雑に関連している。このため、温度ひびわれ特性(面積、幅等)を理論的に解明するには多くの問題点が考えられる。このことから、著者は実構造物におけるひびわれの調査結果に基づいて、統計的方法により温度ひびわれ特性の数量化を検討した。

ひびわれの詳細調査(幅、長さ、間隔等)を行った現場数は13、また、部材数は130である。

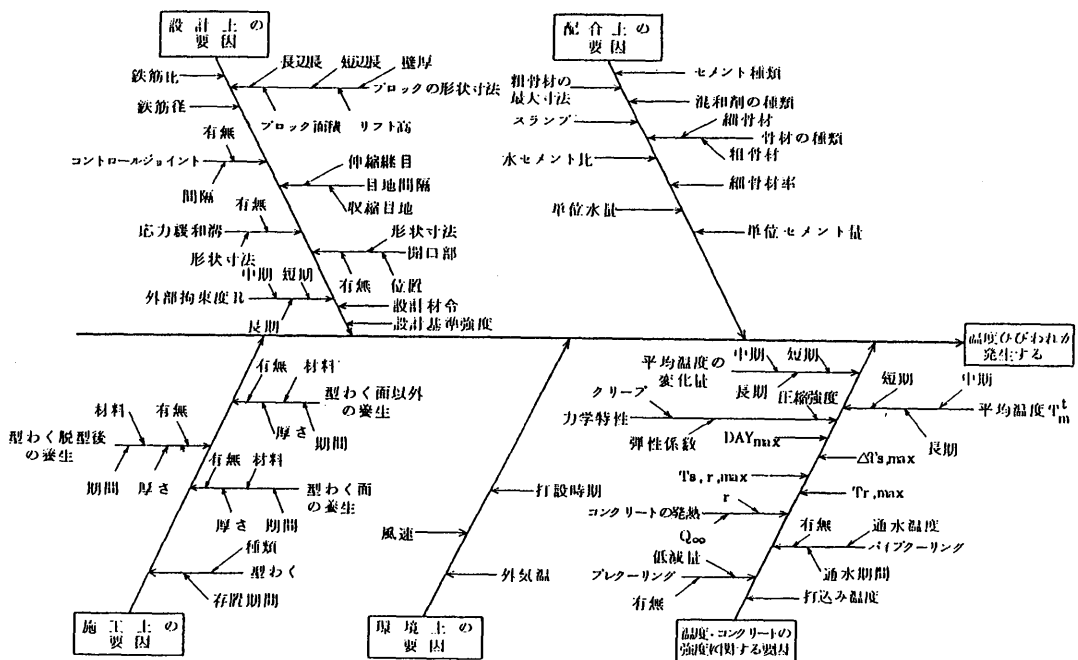


図-3 温度ひびわれ発生特性要因図

ひびわれの調査方法は図-2を基本にしている。

4.2 ひびわれと諸要因の関係

図-3の特性要因図で挙げた要因について定性的な検討を行い、比較的ひびわれ発生に関係がありそうと考えられる要因をとり上げて、それらの要因とUCAおよびMACとの関係を単回帰分析により検討した。解析に使用したデータ数は130であり、この中、壁状構造物が95個、スラブ状構造物が35個である。

なお、解析で質的データは以下のようなカテゴリに分けた。

- ① コントロールジョイント…………… 0 : 無 1 : 有
- ② 開口部…………… 0 : 無 1 : 有
- ③ セメントの種類…………… 1 : 普通セメント 2 : 中庸熱セメント
3 : フライアッシュセメント 4 : 高炉セメントB種
5 : 低発熱型高炉セメントB種
6 : 低発熱型高炉セメントB種にフライアッシュ混入
- ④ 打設時期…………… 1 : 夏(6, 7, 8月) 2 : 秋(9, 10, 11月)
3 : 冬(12, 1, 2月) 4 : 春(3, 4, 5月)
- ⑤ 養生パターン…………… 1 : メタルフォーム(養生なし) 2 : 合板
3 : メタルフォーム+シート 4 : 断熱コンクリート
5 : メタルフォーム+シート+アイランプ
6 : メタルフォーム+発泡スチロール 7 : 合板+シート
8 : 合板+シート+アイランプ 9 : 合板+発泡スチロール
- ⑥ 養生期間…………… 1 : 7日未満 2 : 7日以上14日未満 3 : 14日以上

解析はまず各要因のヒストグラム、各要因とUCAおよびMACの散布図を作成して各要因の分布傾向、UCAおよびMACとの定性的な関係を調べた。図-4および図-5にUCA, MACと鉄筋比の散布図を示す。鉄筋比が大きくなるにしたがって、UCAおよびMACは双曲線的に減少する傾向が認められる。このことから、鉄筋比の増加に伴ってひびわれ面積は小さくなり、

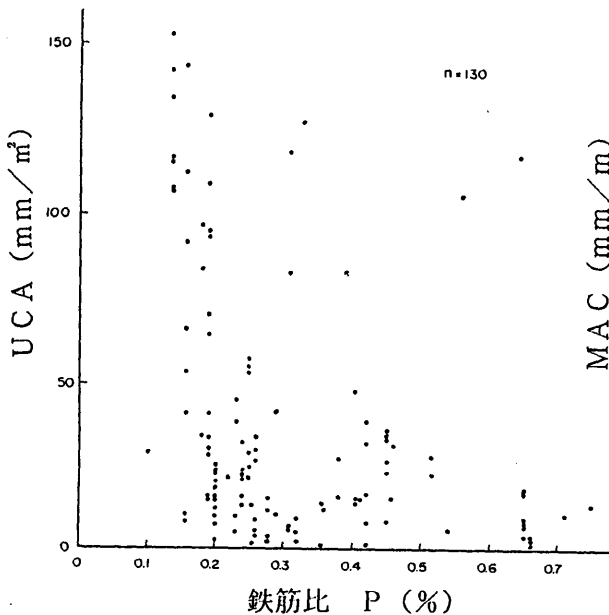


図-4 UCAと鉄筋比の散布図

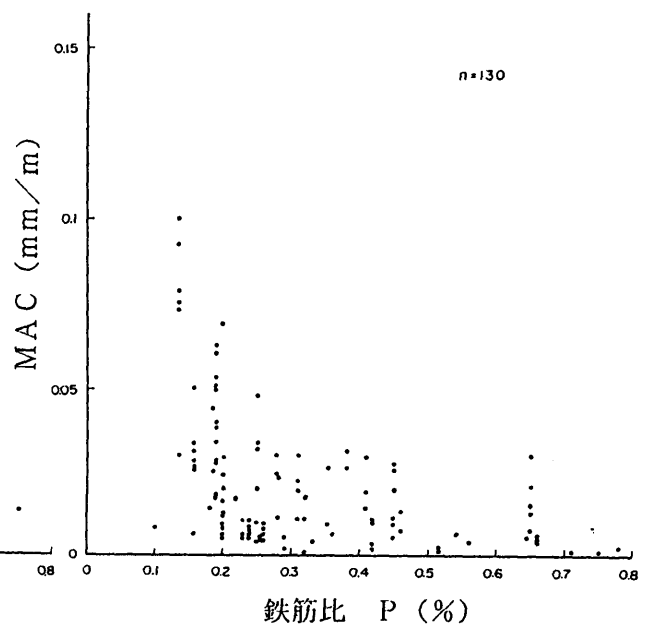


図-5 MACと鉄筋比の散布図

また、最大ひびわれ幅も小さくなることが推察される。このことは、従来マスコンクリートの温度ひびわれ対策の1つとして、ひびわれ幅を制御するために鉄筋を配置しているが、この対策の妥当性を裏づける結果であると考えられる。

UCAおよびMACと諸要因との関係は表-1に示すとおりである。同表 \nearrow では、要因が増加あるいは有の場合にUCA, MACが大きくなることを示している。 \searrow はその反対である。この結果により、ひびわれ特性と諸要因との関係を実施工の面から明らかにすることができた。

4.3 ひびわれ面積の予測モデル

単回帰分析の結果、UCAと12要因との間に相関が認められた。この結果により、ここでは単相関係数に有意性（有意水準1%、5%で）が認められた要因をとり込んで、ひびわれ面積の予測モデルの解析を行った。ひびわれ面積の代用特性には先に定義したUCAを用いた。

12要因のなかには、量的な表現が困難な質的要因がいくつか含まれている。このような要因を含んだ多変量解析には数量化理論^{1)・2)}がよく用いられている。この数量化理論は、林がガットマンの予測の理論から出発し理論化したもので、I類からIV類までのモデルが存在する。本研究ではこのなかの数量化I類のモデルを採用してひびわれ面積および幅の予測モデルの解析を行った。

解析の結果、次のようなUCAを外的規準とした回帰モデルが得られた。

$$UCA = -44.40 - 0.52x_1 - 19.08x_2 - 54.72x_3 + 3.52x_4 + 0.17x_5 \\ + 0.81x_6 - 26.30x_7 - 18.37x_8 + 0.82x_9 + 1.88x_{10} + 0.78x_{11} \dots\dots(6)$$

ここに、 x_1 : 短辺長H (m)

x_2 : 鉄筋比p (%)

x_3 : コントロールジョイント 1 : 有、0 : 無

x_4 : スランプ (cm)

x_5 : 打込み温度 T_p (°C)

x_6 : 打設時期 1 : 夏, 0 : 夏以外

x_7 : 打設時期 1 : 秋, 0 : 秋以外

x_8 : 打設時期 1 : 冬, 0 : 冬以外

x_9 : 表面温度上昇量の最大値 $T_{s,r,max}$ (°C)

x_{10} : 内部温度と表面温度の差の最大値 $\Delta T_{s,max}$ (°C)

x_{11} : 短期の温度低下量 ΔT_m (°C)

式(6)の回帰モデルの重相関係数0.718, 寄与率は0.515である。

式(6)をF検定により検定した結果、

$$F \text{ 値} = 11.41 > F(11, 118; 0.01) = 2.42$$

となり有意水準1%で有意であることが確認された。

単回帰分析の結果では、UCAと12要因との間に相関があったが、変数増減法により数量化I類で解析した結果、最終的には9つの要因がひびわれ面積を予測するための要因として残った。

式(6)の予測モデルを用い、11個の説明変数を与えることにより、ある条件下で施工した場合に発生する温度ひびわれ面積を予測することができる。

表-1 温度ひびわれ特性と諸要因との関係

№	要 因	要因の変化の傾向	U C A	M A C
1	長 辺 長 L (m)	長くなると	↗	↘**
2	短 辺 長 H (m)	〃	↘*	↘*
3	ブロック面積 L・H (m ²)	大きくなると	↘	↘**
4	R (短期)	〃	↗	↘**
5	R (中期)	〃	↗	↘*
6	R (長期)	〃	↗	↘*
7	鉄筋比 P (%)	〃	↘**	↘**
8	コントロールジョイントの有無	存在すると	↘**	↘
9	開口部の有無	〃	↘	↘
10	セメントの種類	低熱性のセメントになると	↗**	↗*
11	ス ラ ン プ (cm)	高くなると	↗**	↗**
12	水セメント比 W/C (%)	大きくなると	↘	↘
13	単位セメント量 (kg/m ³)	多くなると	↗	↗**
14	打込み温度 T _p (°C)	高くなると	↗**	↗**
15	打 設 時 期	春, 冬になると	↘*	↘*
16	養生のパターン	保温性のある養生になると	↘	↘**
17	Q _∞ (°C)	大きくなると	↘	↘
18	r	〃	↗	↗
19	T _{r, max} (°C)	〃	↗**	↗
20	T _{s, r, max} (°C)	〃	↗*	↘
21	ΔT _{s, max} (°C)	〃	↗**	↗*
22	DAY max (日)	〃	↗**	↘
23	ΔT _m ^t (短期) (°C)	〃	↗**	↗
24	ΔT _m ^t (中期) (°C)	〃	↗**	↗*
25	ΔT _m ^t (長期) (°C)	〃	↗**	↗*
26	養生期間	長くなると	↗	↘
27	壁厚(リフト高) (m)	大きくなると	↗	↘**

注) ↗印は要因が変化すると特性値が大きくなり, ↘印は小さくなる。

* : 有意水準 5 % で有意

** : 有意水準 1 % で有意

4.4 ひびわれ幅の予測モデル

単回帰分析の結果、MACと14要因との間に相関が認められた。ひびわれ面積と同様に、単相関係数に有意性が認められた14要因をとり込んで、ひびわれ幅の予測モデルの解析を行った。解析手法はひびわれ面積の場合と同じである。また、ひびわれ幅の代用特性には先に定義したMACを用いた。

解析の結果、次のようなMACを目的変数とした回帰モデルが得られた。

$$\begin{aligned}
 MAC = & -5.62 \times 10^{-4} - 2.19 \times 10^{-5} x_1 - 5.48 \times 10^{-4} x^2 \\
 & - 1.77 \times 10^{-2} x_3 - 2.44 \times 10^{-2} x_4 + 1.54 \times 10^{-3} x_5 \\
 & + 7.00 \times 10^{-5} x_6 + 8.13 \times 10^{-3} x_7 - 3.71 \times 10^{-3} x_8 \\
 & - 6.21 \times 10^{-3} x_9 + 3.31 \times 10^{-4} x_{10} - 3.18 \times 10^{-3} x_{11} \dots\dots\dots(7)
 \end{aligned}$$

- ここに、 x_1 : 長辺長 L (m)
- x_2 : 短辺長 H (m)
- x_3 : 短期の外部拘束度 R
- x_4 : 鉄筋比 p (%)
- x_5 : スランプ (cm)
- x_6 : 単位セメント量 C (kg/m³)
- x_7 : 打設時期 1 : 夏, 0 : 夏以外
- x_8 : 打設時期 1 : 秋, 0 : 秋以外
- x_9 : 打設時期 1 : 冬, 0 : 冬以外
- x_{10} : 短期の温度低下量 ΔT_m (°C)
- x_{11} : 壁厚 (リフト高) (m)

式(7)の回帰モデルの重相関係数は 0.592, 寄与率は 0.351である。式(7)をF検定により検定した結果、

$$F \text{ 値} = 5.79 > F(11, 118; 0.01) = 2.42$$

となり有意水準 1%で有意であることが確認された。

単回帰分析の結果では、MACと14要因との間に相関係数があったが、最終的にはひびわれ面積と同数の9つの要因がひびわれ幅を予測するための要因として残った。

式(7)の回帰モデルでMACを推定し、このMACを使うことにより、式(8)、(9)である条件下で施工した場合に発生する温度ひびわれの最大ひびわれ幅 W_{max} , 最大平均ひびわれ幅 $MAX (W_i)$ (W_{AVE} とする) を予測することができる。

(最大ひびわれ幅)

$$W_{max} = K \times L \times R \times MAC \text{ (mm)} \dots\dots\dots(8)$$

(最大平均ひびわれ幅)

$$W_{AVE} = L \times R \times MAC \text{ (mm)} \dots\dots\dots(9)$$

4.5 ひびわれ間隔の予測モデル

4.3および4.4で得られた結果を用いることにより、ひびわれ間隔の予測モデルが得られる。

ブロック長Lの間にN本の温度ひびわれが発生したと仮定すると、平均ひびわれ間隔は次式によって与えられる。

$$L_c = \frac{L}{N+1} \quad \dots\dots\dots(10)$$

ひびわれ本数Nは、ひびわれの総延長 $\sum_{i=1}^N \ell_i$ から推定することができる。

$$N \approx \frac{\sum_{i=1}^N \ell_i}{H} \quad \dots\dots\dots(11)$$

ひびわれの総延長 $\sum_{i=1}^N \ell_i$ は式(11)によって与えられると仮定する。

$$\sum_{i=1}^N \ell_i = \frac{\sum_{i=1}^N A_i}{W_{AVE}} \quad \dots\dots\dots(12)$$

ここに、 A_i : 1本のひびわれの面積
 $\sum_{i=1}^N A_i$ はUCAを用いると次式で求めることができる。

$$\sum_{i=1}^N A_i = L \times H \times UCA \quad \dots\dots\dots(13)$$

式(10)に式(11)から(13)を代入し、さらに、 $W_{AVE} = L \times R \times MAC$ を代入して整理すると平均ひびわれ間隔 L_c は次のようになる。

$$L_c = \frac{1000 L R \times MAC}{UCA + 1000 R \times MAC} \quad (m) \quad \dots\dots\dots(14)$$

式(14)が平均ひびわれ間隔の予測モデルである。

4.6 最大ひびわれ幅と平均ひびわれ幅の関係

ひびわれ幅の数量化で、最大ひびわれ幅 W_{max} と最大平均ひびわれ幅 W_{AVE} の間に、 $W_{max} = K \cdot W_{AVE}$ の線形関係が成り立つと仮定した。ここでは、この仮定について検定を行った。

図-6は実構造物における実測値で、 W_{max} と W_{AVE} の関係を調べた結果である。両者を直線関係で近似すると、回帰式は

$$W_{max} \approx 1.39 W_{AVE}$$

となる。この時の相関係数は0.972であり、また、相関係数を検定すると有意水準1%で有意になる。この結果から、最大ひびわれ幅と最大平均ひびわれ幅の間には線形関係が成立すると仮定してもよいと考えられる。

最大ひびわれ幅と $L \times H$ のなかのN個の平均ひびわれ幅 \bar{W}_i との関係は、

$$W_{AVE} \geq \bar{W}_i$$

$$(W_{max})_A = K_1 \bar{W}_{AVE}$$

$$(W_{max})_B = K_2 \bar{W}_i$$

ここに、 $(W_{max})_A$: W_{ij} の中での最大値

$(W_{max})_B$: i 番目のひびわれの中での最大値

$$(W_{max})_A \geq (W_{max})_B,$$

とすると、

$$K_2 > K_1$$

となる。

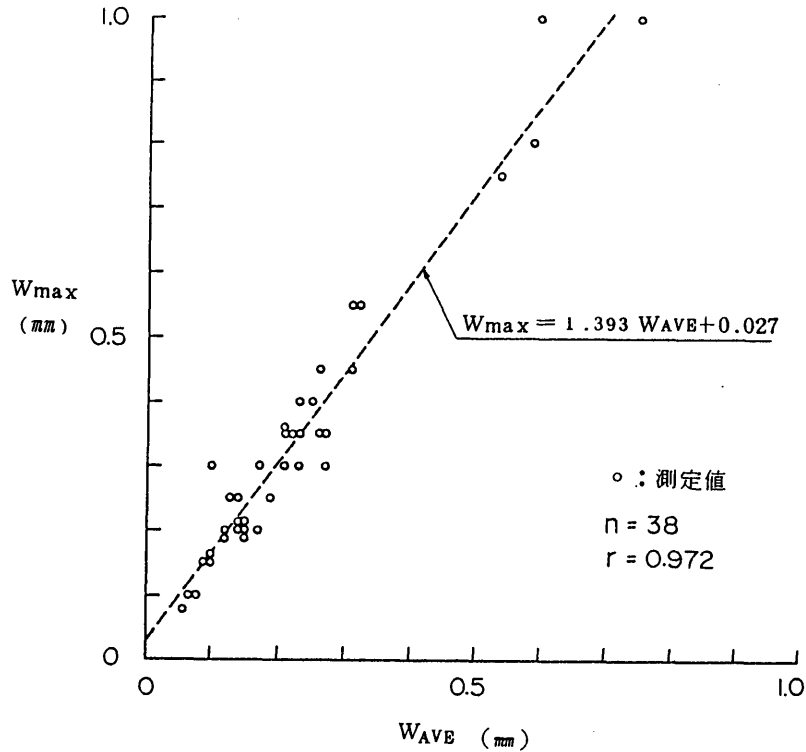


図-6 最大ひびわれ幅と平均ひびわれ幅の関係

このことから、 W_{max} の予測に使用する K は安全側の K_2 を使うのが適当であると考えられる。次に、4つの実構造物における実測値に基づいて係数 K_1 および K_2 を求めた。表-2 に各構造物で調査したデータ数を示す。これらの実測値から求めた各係数の平均値、標準偏差は次のようである。

$$K_1 = 1.56, \sigma = 0.309$$

$$K_2 = 1.59, \sigma = 0.320$$

前述のように、 $K_2 > K_1$ の傾向が認められる。

ACI 207委員会報告³⁾では、Hognestadの研究⁴⁾により最大ひびわれ幅は平均ひびわれ幅の1.5倍としている。この係数1.5はRC構造物で供用荷重により発生するひびわれを対象としたものであるが、著者が温度ひびわれを対象にして求めた1.56, 1.59と近い値になっている。

表-2 係数 K_1 、 K_2 の解析に使用したデータ数

No.	現場名	データ数
1	M	332
2	O	79
3	KA	80
4	KI	18

5. まとめ

本研究で得られた主な結論を列挙すると次のとおりである。

- (1) ひびわれ特性（幅、面積）と諸要因との関係を定性的に明らかにした。
- (2) 実構造物における温度ひびわれ幅の調査結果に基づいて数量化理論により温度ひびわれ特性を解析し、ひびわれ面積、ひびわれ幅およびひびわれ間隔の予測モデルを提案した。

(3) 最大ひびわれ幅と最大平均ひびわれ幅との間に線形関係が成り立つことを実証した。

(参考文献)

- 1) 林知己夫：数量化の方法，東洋経済新報社，1974
- 2) 福田俊郎：数量化理論の土木工学への応用についての研究，昭和47年12月
- 3) ACI 207 Committee:Effect of Restraint Volume Change and Reinforcement on Cracking of Massive Concrete, ACI, July 1973
- 4) Hognestad, Eivind:High Strength Bars As Concrete Reinforcement, PCA, 1962