

2.2 簡易な温度ひび割れ照査法の事例

2.2.1 外部拘束が卓越する場合の方法

(1) はじめに

現行の標準示方書[1]においては、自己収縮の影響を考慮しない場合には、ひび割れ指数 $I_{cr}(t)$ を以下の式で算定してもよいとされている。

$$I_{cr} = 10 / (R \cdot \Delta T_o) \quad (\text{外部拘束が卓越する場合}) \quad (2.2.1)$$

ここに、 ΔT_o ：部材最高平均温度と外気温平衡時温度との差 (°C)

R：外部拘束の拘束度 (柔らかい岩盤 0.5, 中程度の硬さの岩盤 0.65, 硬い岩盤 0.8, 既設のコンクリート 0.6)

この式は、最も一般的に貫通ひび割れの発生が問題とされる、底版上に構築される比較的壁厚の大きい壁構造などを対象とした場合には、外部拘束と内部拘束が組み合わされた状態で温度応力が発生すること、外部拘束の影響が最も大きいと考えられる壁の長さが高さがこの式の中に直接取り入れられていないことなどから、必ずしも適用が妥当でない場合がある。現実には、上述の壁状構造物をこの式によって評価すると、ほとんどの壁構造物でひび割れが発生すると評価されてしまい、簡易照査式として限界のあるのが実状である。係数の 10 がかなり保守的に設定されているものと考えられる。また、この簡易照査式では、温度差 ΔT_o を算出する必要があるが、現在では既に、パソコンを用いて、温度は言うに及ばず、簡易な応力計算も容易に実施できることから、簡易照査式としての意味合いが薄らいでいることも事実である。

しかし、設計を考える場合、パソコンを用いずに簡易に温度ひび割れの発生を評価する方法の実用的意義は大きく、多くのマスコンクリート技術者からの要望も大きい。ここでは、このように簡易に温度ひび割れの発生を評価する実務的な方法を紹介する。なお、ここで紹介する方法には、マスコンクリート構造物のひび割れ現象にも大きな影響を与えていることが明らかになってきている自己収縮および乾燥収縮も考慮に入れている[2]。

ひび割れ指数の簡易評価式について、以下の構成で紹介する。

- ①対象をスラブ上に打設される壁状構造物とし、コンクリートの配合、物性を設定し、マスコンクリートのひび割れ制御指針[3] (以下、ひび割れ制御指針) に示される温度応力解析法により応力、ひび割れ指数を算出する。
- ②既存のデータにより①の方法によるひび割れ指数の評価が妥当であることを確認する。
- ③検証された方法により、施工時期、壁厚、壁長さ/高さ比、乾燥収縮や自己収縮の考慮の有無等をパラメータとして解析し、壁構造物の各位置のひび割れ指数の図表を作成する。本文では、使用材料、配合の相違をパラメータとしていないが、同様なパラメータとしての検討は別途実施している。
- ④上記パラメータを説明変数とする重回帰分析を行い、ひび割れ指数の評価式を求める。
- ⑤ひび割れ指数評価式を用いて、外気温、壁長さ、壁厚のひび割れ指数への影響を図化する。

(2) 検討条件

ここでは、拘束の小さいスラブ (たとえば、土丹基礎、栗石基礎、杭基礎上の底版) 上に構築される任意の幅・長さの壁状構造物を対象として、高炉セメント B 種を使用した一般的な水密コ

ンクリートを施工した場合の温度ひび割れ指数を検討した。評価に取り入れたパラメータは、壁厚、壁長（勝発目地間隔）、打込み温度、外気温である。壁高さは3.5mとした。

コンクリートの仕様と発熱特性、自己収縮特性、乾燥収縮特性を表-2.2.1に示す。単位セメント量を300kg/m³、水セメント比を55%とし（単位水量165kg/m³）、断熱温度上昇特性は、

セメントメーカーの技術資料[4]に基づいている。これは、標準示方書に示されている発熱特性の標準値が小さいので、より実状に合ったものを採用したことによる。また、自己収縮ひずみ関数についても、実際のマスコンクリートを対象とした測定値[5]を使用した。乾燥収縮は土木学会式[6]により、相対湿度を65%とし、スラブと壁部の収縮量の差を壁部に作用させた（壁とスラブの打継間隔は1か月を設定）。温度応力の解析は、ひび割れ制御指針に示される増分法(式(2.2.2))により、自己収縮と乾燥収縮も、温度による体積変化と同様に拘束されるとした。型枠は木製パネルとし、脱型材齢は7日とした。その他の条件には、ひび割れ制御指針に示されている一般的な値を用いた。

このような前提による解析方法は、下水処理施設9現場の38構造部位（壁厚：0.25～1.73m、壁長/壁高(L/H)：2.7～34（勝発目地がない場合）、0.8～2.7（勝発目地がある場合））に適用された結果、自己収縮、乾燥収縮を考慮した場合、現行の標準示方書のひび割れ発生確率におおむね適合することが確認された[7]。すなわち、図-2.2.1 および図-2.2.2 に示すように、ひび割れ指数1.45程度以上で温度ひび割れは発生せず（勝発目地のない壁部材）。また勝発目地間にひび割れが発生する確率は、標準示方書のひび割れ発生確率に近い分布を有している。（勝発目地のある壁部材）。

表-2.2.1 コンクリートの配合と特性の設定値

コンクリート		施工 時期	打込 温度 ℃	外 気温 ℃	断熱温度上昇	
C kg/m ³	W/C %				Q _∞ ℃	γ /日
300	55 水密	春	20	15	49.9	0.817
		夏-秋	30	20	48.6	1.091
		秋-冬	20	5	49.9	0.817

自己収縮関数: $\epsilon_{sg} = 76.4(1 - \exp(-0.10 \times t_{eff}^{0.87}))$
 t_{eff} : 硬化原点以降の有効材齢, 硬化原点材齢: 0.5日

$$\epsilon'_{cs}(t, t_0) = [1 - \exp\{-0.108(t - t_0)^{0.56}\}] \cdot \epsilon'_{sh}$$

$$\epsilon'_{sh} = -50 + 78[1 - \exp(RH/100)] + 38 \log_e W - 5[\log_e(V/S/10)]^2$$

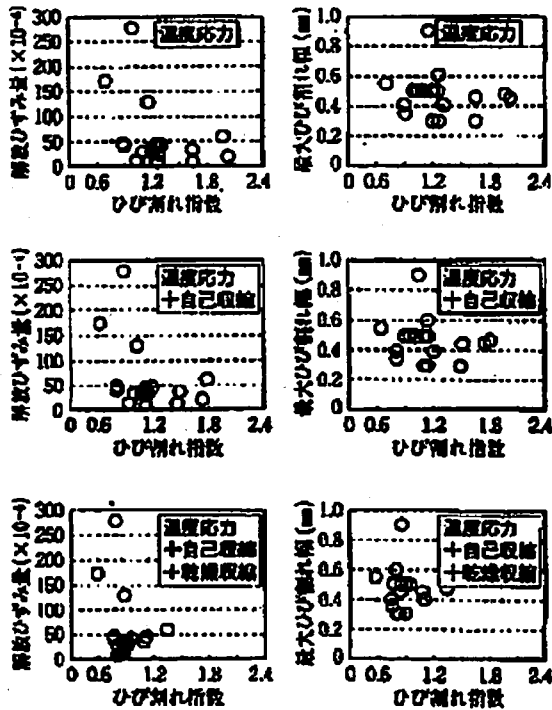
ここに、 ϵ'_{sh} : 収縮ひずみの最終値、RH: 相対湿度、
V/S: 体積表面積比
 $\epsilon'_{cs}(t, t_0)$: t_0 からt日までの収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)
ただし、 $100 < V/S < 300 \text{mm}$, $45 < RH < 80$, $130 < W < 230$

$$\sigma_i = S (\Delta \sigma_{Di} + \Delta \sigma_{Ri}) \quad (2.2.2)$$

$$\Delta \sigma_{Di} = K_c \cdot l / (1 - \nu) \cdot E_{ci} \cdot \alpha_c \cdot \Delta T_{Di} \quad (\text{内部拘束応力成分})$$

$$\Delta \sigma_{Ri} = K_R \cdot E_{ci} \cdot \alpha_c \cdot \Delta T_{Ri} \quad (\text{外部拘束応力成分})$$

ここに、 $\Delta \sigma_{Di}$ 、 $\Delta \sigma_{Ri}$: 材齢 i-1～材齢 i における内部および外部拘束応力増分
 K_c : 温度分布形状による係数（放物線分布時、表面で 2/3、内部で 1/3）
 ν : ポアソン比
 E_{ci} : 材齢 i-1～材齢 i における有効ヤング係数 ($E_{ci} = E_{ci} / (1 + f_i)$)
 E_{ci} : 材齢 i-1～材齢 i でのクリープを考慮しないヤング係数
 f_i : 材齢 i-1～材齢 i でのみかけのクリープ係数（一般値として温度降下期に 0.5、温度上昇期にその 2.5 倍）



注1) 解放ひずみ量; 平均ひび割れ幅と本数の積を壁長さで除したもの
 注2) 最大ひび割れ幅は実測値

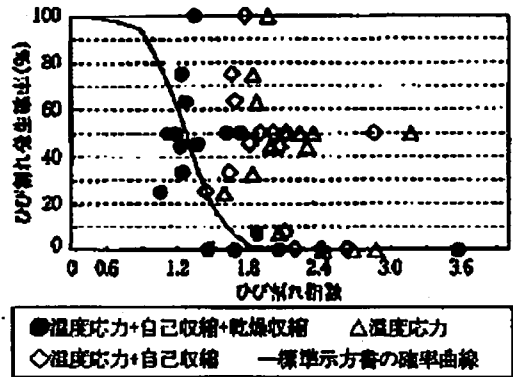


図-2.2.1 ひび割れ指数と解放ひずみ量および最大ひび割れ幅の関係[7] (ひび割れ誘発目地がない場合)

図-2.2.2 ひび割れ指数とひび割れ発生確率の関係[7] (ひび割れ誘発目地がある場合)

- α_c : 熱膨張係数 (一般値として $1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$)
- K_R : 外部拘束度係数(修正係数を含む)
- ΔT_{si} : 材齢 $i-1$ ~ 材齢 i における断面内温度差,
- ΔT_{mi} : 材齢 $i-1$ ~ 材齢 i における断面平均温度の変化量

(3) 温度応力解析結果

図-2.2.3 には、秋-冬施工 (打込み 20°C , 外気温 5°C), 夏-秋施工 (打込み 30°C , 外気温 20°C), 春施工 (打込み 20°C , 外気温 15°C) の施工時期ごとに、温度応力のみの場合、自己収縮を考慮した場合の温度応力、自己収縮と乾燥収縮を考慮した場合の温度応力を計算し、各々のひび割れ指数を壁長と壁厚さとの関係において示した。図中、ひび割れを防止できると考えられるひび割れ指数 1.75 を一点鎖線で、ひび割れの発生が概ね制限されると考えられるひび割れ指数 1.5 (≈ 1.45) を点線によって示した

施工時期によってひび割れ指数は大きく変化し、春施工に対して夏-秋施工が、夏-秋に対して秋-冬施工が、ひび割れの発生に対してより厳しい環境にあることが分かる。温度応力のみの場合、自己収縮を考慮した場合は、壁長が小さいほど、壁厚が小さいほどひび割れ指数が大きくなるが、自己収縮と乾燥収縮を考慮した場合は、壁厚が 0.6m 以下では概ね同等のひび割れ指数となる傾向にある。壁厚 0.8m 程度以下であれば、誘発目地によって壁長さを 4~5m に制限すればひび割れの発生を抑制できるが、これ以上の壁厚では、誘発目地間隔を 4m 程度にしないと、目地間にひび割れが発生する可能性があるという結果は、この種の建造物の多くの施工実績に一致した判断基準と思われる。

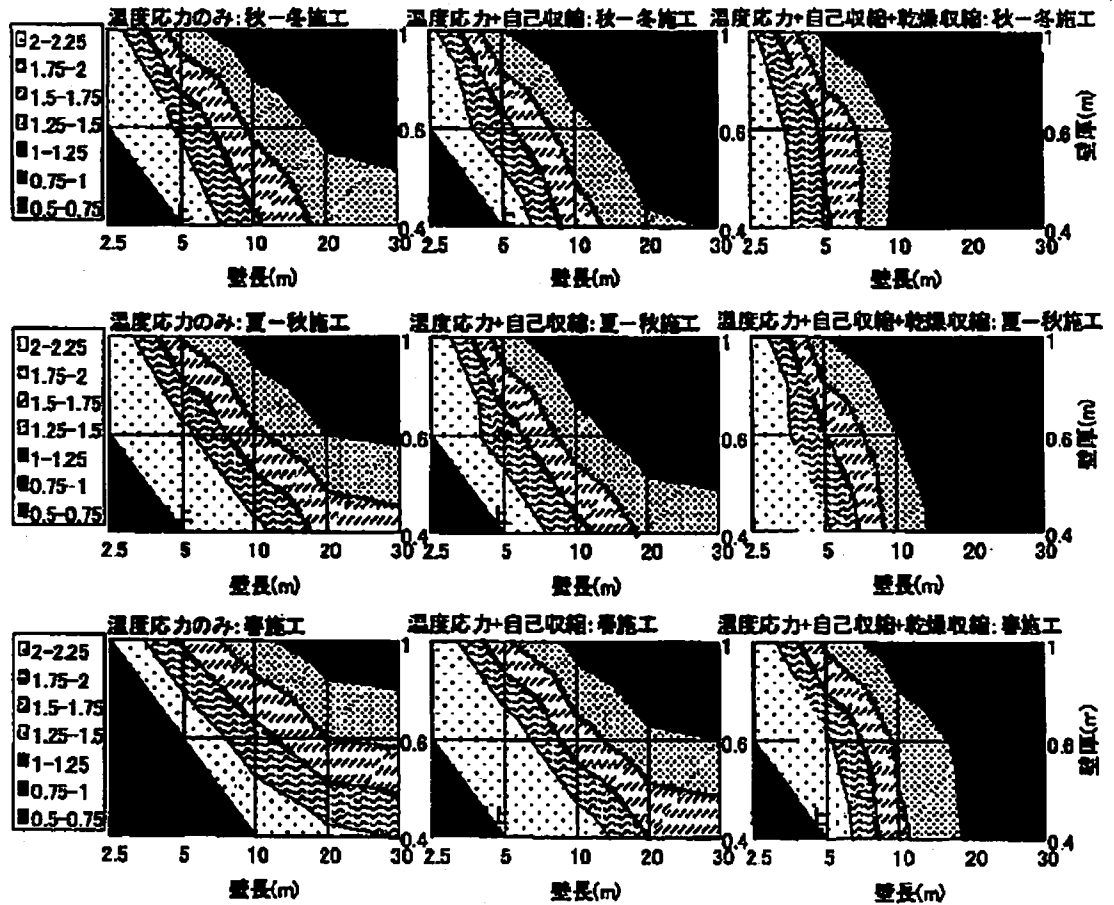


図-2.2.3 壁長、壁と施工時期によるひび割れ指数の変化

(4) 線形重回帰分析によるひび割れ指数簡易算定式の算出

(3)の解析結果で得られた各要因とひび割れ指数の関係のうち、壁厚Bの影響および壁長Lの影響について、各々図-2.2.4および図-2.2.5に示す。壁厚Bでは、ひび割れ指数との間に下に凹の関係(乾燥収縮の影響が入るとやや傾向が異なるが)、壁長ではひび割れ指数との間に双曲線関係が認められた。線形重回帰分析を行うにあたり、壁厚Bについては逆数に、壁長Lについては、壁高との比(L/H)の逆数を1.2乗した値に変換し、ひび割れ指数との間に線形性を持たせた。

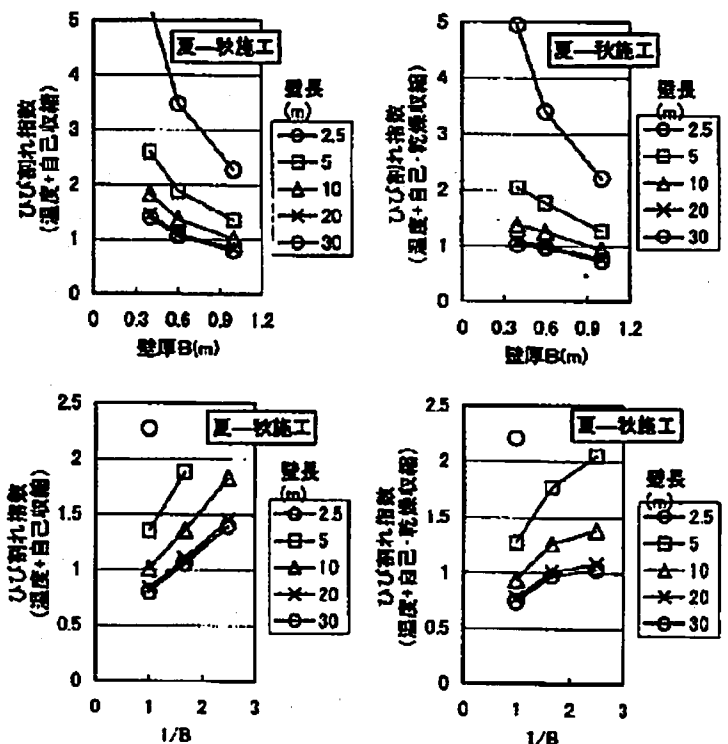


図-2.2.4 壁厚(1/B)とひび割れ指数の関係

(1/B), $(1/(L/H)^{1.2})$, $T_o/20$ (打込み温度の20℃に対する比), $T_s/20$ (外気温の20℃に対する比)を独立変数とし、ひび割れ指数を従属変数として線形重回帰分析を行なった結果を、表-2.2.2 および図-2.2.6 に示す。重相関係数は十分大きい値が得られ、誤差がやや大きくなる範囲はあるものの、ひび割れ指数0.75から1.75の範囲で回帰結果が解析結果と概ね一致するものとなった。実際には、式(2.2.3)によりひび割れ指数を予測することができる。

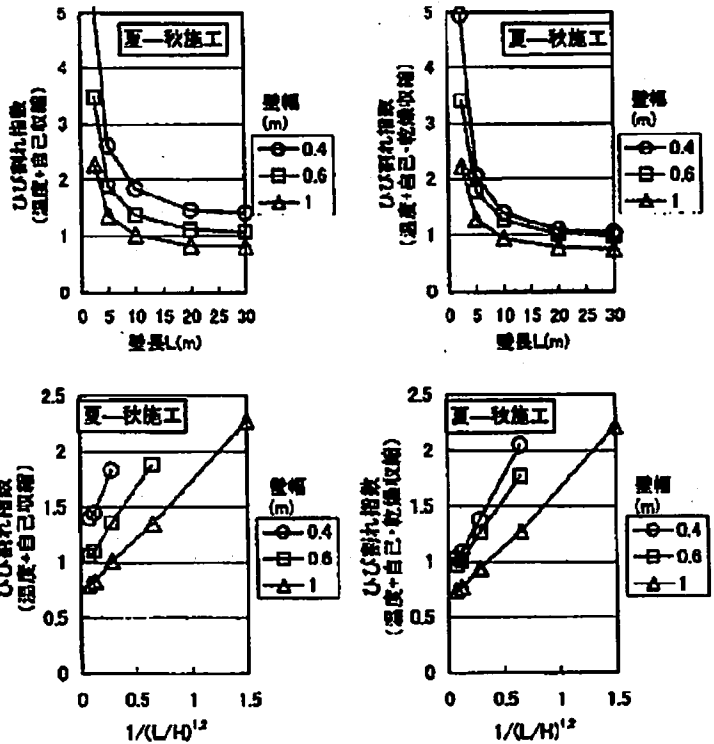


図-2.2.5 壁長 $(1/(L/H)^{1.2})$ とひび割れ指数の関係

ひび割れ指数評価式 (Icr)

$$I_{cr} = 0.77 + 0.53(1/B) + 1.07(1/(L/H)^{1.2}) - 0.80(T_o/20) + 0.71(T_s/20) \quad (\text{温度応力のみ})$$

$$I_{cr} = 0.69 + 0.52(1/B) + 1.14(1/(L/H)^{1.2}) - 0.78(T_o/20) + 0.61(T_s/20) \quad (\text{自己収縮を考慮})$$

$$I_{cr} = 0.71 + 0.30(1/B) + 1.16(1/(L/H)^{1.2}) - 0.60(T_o/20) + 0.53(T_s/20) \quad (\text{自己収縮, 乾燥収縮を考慮})$$

(2.2.3)

ここに、B: 壁厚(m), L: 壁長(m), H: 壁高(m), T_o : 打込み温度(℃), T_s : 外気温(℃)

表-2.2.2 線形重回帰分析の結果

回帰係数	温度のみ	温度+ 自己収縮	温度+ 自己収縮+ 乾燥収縮	
重相関係数	0.971	0.968	0.947	
係数	切片	0.77	0.69	0.71
	壁厚	0.53	0.52	0.30
	壁長	1.07	1.14	1.16
	打込み温度	-0.80	-0.78	-0.60
	外気温	0.71	0.61	0.53

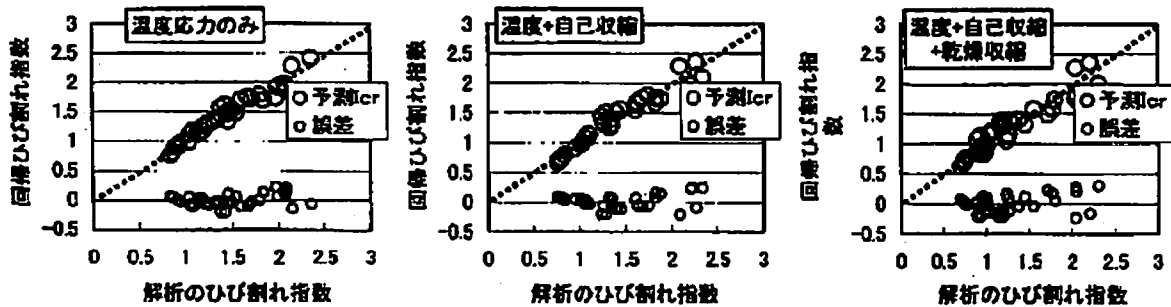


図-2.2.6 線形重回帰分析結果の適合性

壁厚 0.8m, あるいは壁厚 0.4m, 壁長さ 20m 場合, 打込み温度がひび割れ指数に及ぼす影響, 外気温がひび割れ指数に及ぼす影響をこの式によって評価し, 図-2.2.7 および図-2.2.8 に示す。打込み温度が低ければひび割れ指数は大きくなり (外気温 20°C に対して打込み温度 10°C は相当にプレクーリングを行なった状態), 打込み温度が高ければ, ひび割れ指数は小さくなる (夏場の状況)。壁厚は温度応力の発生に大きく影響を及ぼしているが, 壁厚が小さい場合には, 乾燥収縮の影響が相対的に高まるため, 乾燥収縮を考慮して評価したひび割れ指数の差は小さくなる。当然, 打込み温度一定の条件下で外気温が小さくなれば, これに応じてひび割れ指数は小さくなる。

図-2.2.9 に示す壁長とひび割れ指数の関係においても, 壁厚が 0.4m の場合には, 乾燥収縮の影響が大きくなることわかる。また, 図-2.2.10 に示す壁厚とひび割れ指数の関係において, 乾燥収縮の影響は, 壁厚が 0.6m 程度以下の場合に顕著になるようである。

誘発目地を設けてひび割れを制御しようとした場合, たとえば目地間隔を 5m とした場合には, 壁厚が 0.6m 程度以下ではひび割れが抑制されるが, これを超える壁厚の場合には, 目地間にひび割れの発生する確率が高くなるので, 誘発目地間隔をさらに小さくする必要が認められた。

(5) まとめ

ここで算定した簡易ひび割れ指数評価式は, 一般のひび割れ現象を概ね再現できていると考えられる。さらに, コンクリートの発熱特性 (Q_0, γ) などの材料特性や, 骨材の岩質による熱膨張係数の相違, あるいは型枠などの養生条件などを考慮して, 適用範囲を広げることが可

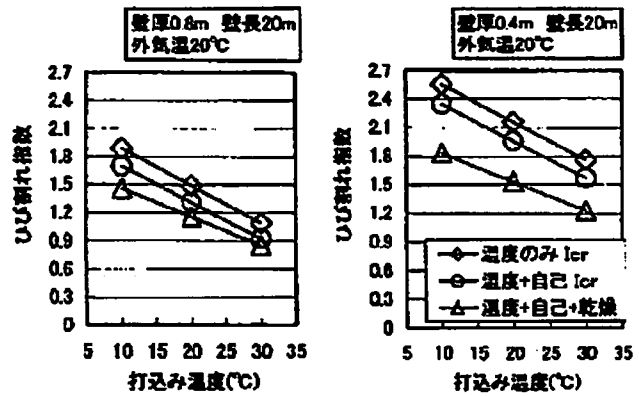


図-2.2.7 打込み温度がひび割れ指数に及ぼす影響

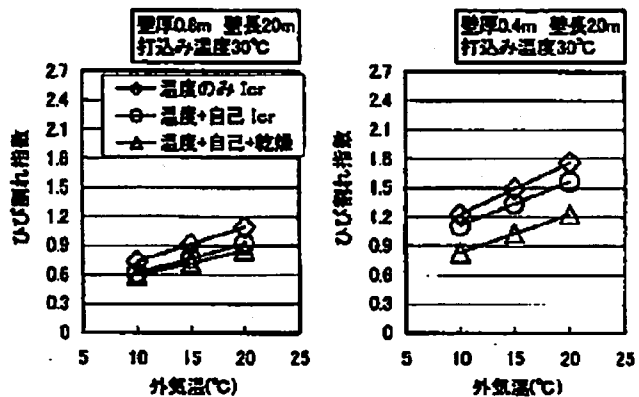


図-2.2.8 外気温がひび割れ指数に及ぼす影響

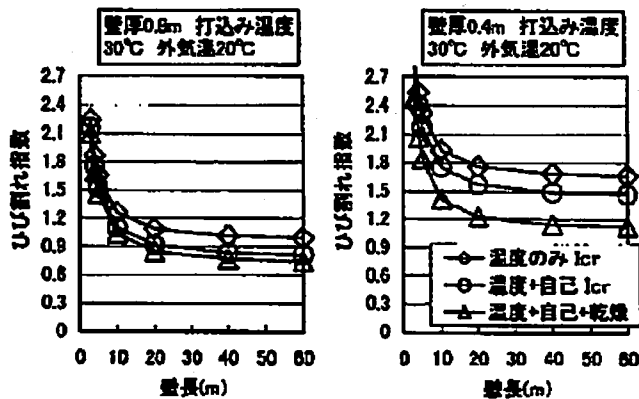


図-2.2.9 壁長がひび割れ指数に及ぼす影響

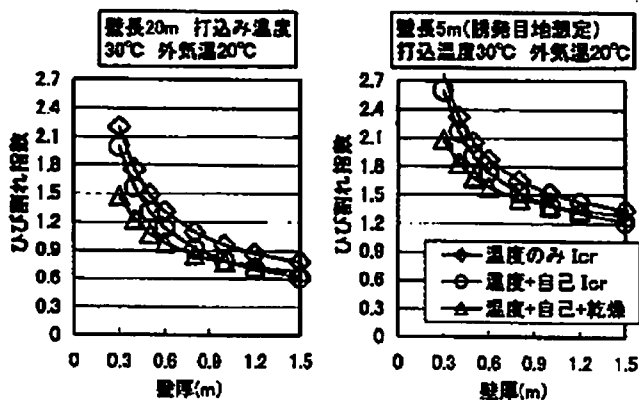


図-2.2.10 壁幅がひび割れ指数に及ぼす影響

能と考えられる。

また、標準示方書には、壁状構造物において、ある鉄筋比におけるひび割れ指数と最大ひび割れ幅の関係が例示されている。これを変形すると、任意の鉄筋比の壁構造において、ひび割れ指数を与えることでひび割れ幅が算出できる[8]ので、実務的には、ここで行った簡易なひび割れ指数算定をひび割れ幅算定まで拡張することも可能である。

なお、ここで紹介した簡易ひび割れ指数評価法は、収縮の評価式に関して、著者の既往の研究によって得られたものと土木学会式を使用しており、これらが見直される場合には、本文に示した検討と同様の手続きで簡易ひび割れ指数評価法を見直す必要がある。

[担当 大友 健]