

論文

[1198] マスコンクリートのひび割れ幅予測の提案

小柳光生*1・中根 淳*2

1. はじめに

マスコンクリートの水和熱による温度ひび割れ問題については、“マスコンクリートの温度応力研究委員会”（日本コンクリート工学協会）を始めとして、多くの研究者が、精度の高い解析法を確立すべく研究している。^[1] 本報ではごく単純なモデル化により、乾燥収縮ひび割れを対象に考案した実用式『建物外壁ひび割れ解析法』^[2] を利用して、①水和熱による温度履歴、②誘発目地の有無や③鉄筋比の影響要因を評価できる簡易な温度ひび割れ（幅と本数）算定法を提案する。

2. 温度ひび割れ予測式の概要

2.1 本算定法の特徴

本算定法の特徴を以下に示す。

- ①乾燥収縮、クリープおよび弾性係数の経時的な変化を増分法で逐次的に解析している。
- ②ひび割れ発生毎に、付着すべり剛性を取込んだ構成式に組み直し、経時的に追跡計算する。
- ③ひび割れ要素の付着すべり剛性を非線形体（弾塑性バネ）として提案している。
- ④スパン分割要素毎に取扱うため、開口部、誘発目地など変断面をもつ場合にも適用できる。

2.2 仮定条件と算定定数の設定

- ①本解析法は略算法であり、部材のモデル化は、図-1に示すように、一軸方向部材が、両端の外的拘束を受けるものと設定する。本来は、梁（あるいはスラブも含む）という連続的な拘束を受けるため、両端で拘束するという考え方には、おのずと限界がある。しかし、前述の『建物外壁ひび割れ解析法』でもこのモデル化（図-1）を用いて、大まかな予測が可能であったため、これに準じた。ただし、解析対象部位はスパンの長い壁状マスコン構造物で外的拘束が卓越するケースを対象とする。
- ②解析の便宜上、壁断面は一様応力分布、歪分布とする。計測データ（ひび割れ幅）は、高さ中央部付近のデータを使用する。
- ③外力（荷重）に相当する収縮ひずみの設定は、躯体の平均温度測定値（表面と中心部の平均）を使い、 $10 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ に換算して求める。
- ④硬化開始を打込み後8時間と考え、温度上昇開始は、打込み後4時間から直線勾配で上昇すると考える。そのため、材令1日の場合に限り

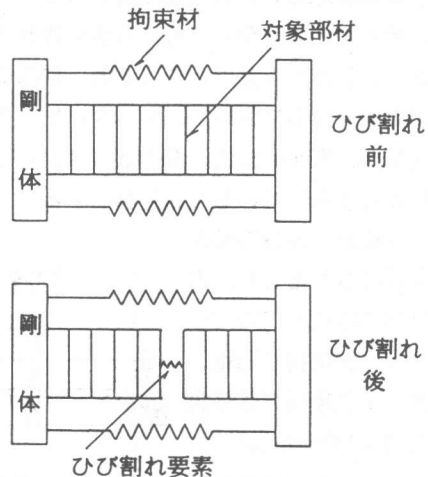


図-1 部材モデル化

*1 大林組（株）技術研究所 建築第二研究室主任研究員、工博（正会員）

*2 同上 室長（正会員）

0.8・Δθ (Δθ：材令1日での温度上昇測定値) で表されるとする。

⑤クリープ係数、弾性係数の経時変化に関する関数は、Neville の式を使用する。クリープ係数は圧縮側、引張側とも同一の関数式(1)を使用し、Davis-Glanville の法則、Whitney の法則が成立つとする。コンクリート弾性係数は図-2に示す曲線式を使用する。これは、 $F_c=298\text{kg/cm}^2$ (4週) の設定である。^[2]

なお、算定に使用するコンクリート材令は、温度を考慮した有効材令を用いる。

クリープ係数 $\Phi(\tau, t) = 3 \times 0.132 \cdot \rho_n(t - \tau + 1) \cdot 10.3 / (5 + \sqrt{\tau})$ (1)

τ ：載荷材令(日数) t ：コンクリート材令(日数)

⑥ひび割れ発生条件は、引張応力 10kg/cm^2 とする。コンクリートの引張強度は一般に 20kgf/cm^2 程度を有するが、ここでは持続引張応力を対象にしていることや外的な拘束のみを取扱っており、断面内外の温度差による若干の応力差を無視していることなどから、ひび割れ発生条件を引張応力として 10kg/cm^2 と設定した。なお、これまで報告された事例でも有効応力計による最大強度は、 $10\sim 15\text{kgf/cm}^2$ の場合が多い。

⑦ひび割れ幅:Wは、ひび割れ部の鉄筋応力： σ_s (kg/cm^2) の関数式(2)式を使用する。^[2]

$$W = 2 \cdot \sigma_s / (257 - 35 \cdot \sigma_s) \quad (\text{cm}) \quad (2)$$

この式は、鉄筋応力が大きくなるほどコンクリートとの付着が切れてくるという現象を反映したもので、鉄筋力(鉄筋断面積 $A_s \times$ 鉄筋応力)との関係曲線として図-3に示す。この図から付着が完全に切れる長さ $2\ell_s$ 。という見方からすると、鉄筋応力が大きくなるに従い、この $2\ell_s$ 。は大きくなるが、例えば応力初期では $2\ell_s = 20\text{cm}$ 程度を使用していることに相当する。

⑧ 拘束は、部材両端から受けることとし、拘束材の剛性は $E_r \cdot A_r$ (A_r ：拘束材断面積、 E_r ：拘束材弾性係数($2.1 \times 10^5 \text{kgf/cm}^2$))とする。この時拘束材断面積 A_r は、これまでの実用式『建物外壁ひび割れ解析法』と

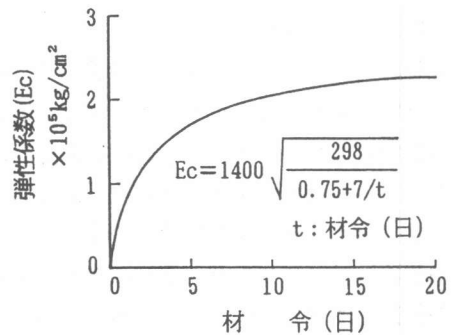
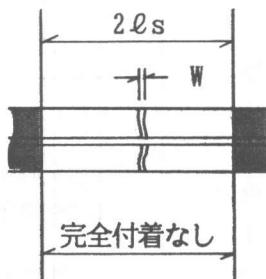


図-2 コンクリート弾性係数の設定

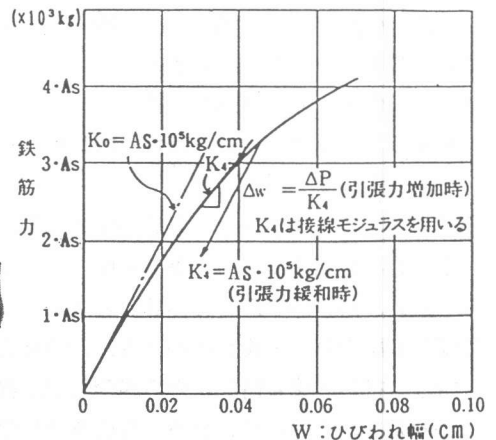


図-3 ひび割れ幅と鉄筋力の関係

同様、壁厚さ×上下支持梁せい×1.5 から求めるとする（図-4参照）が、対象壁断面面積 A_c との拘束比： $R = A_r / (A_c + A_r)$ は、今回の場合、0.5～0.7 の範囲であった。

- ⑨スパン分割要素（ひび割れ影響範囲） $L_{cr} = 25\text{cm}$ とする。この L_{cr} とは、ある要素にひび割れが発生すると、その要素のコンクリート剛性が付着バネに置換されることを意味する。ただし付着バネ特性は（2）式であり L_{cr} の長さに影響されない。
- ⑩計算ピッチは、0.5 日ピッチとし、最大20日までとする。

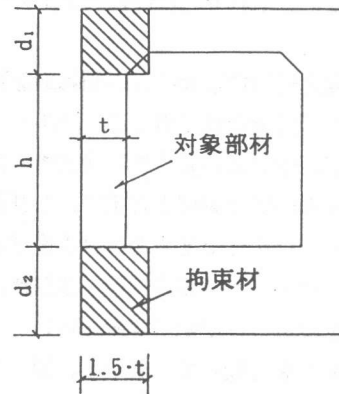


図-4 拘束材の考え方

- ⑪乾燥収縮の影響は無視する。これはマスコンクリートを対象としている上に、若材令（20日程度）での比較検討が主であることによる。

2. 3 ひび割れ幅算定式

算定式の誘導については、既報^[2]に載せているのでここでは省略し、釣合い式を示す。

(1) ひび割れ発生前の釣合い式

自由歪増分が拘束されることによる拘束力の釣合いは、下式で表される。

$$K_2 \cdot (\Delta \varepsilon_0 - \Delta CR) \cdot L + (K_1 + K_3) \cdot \Delta \varepsilon_0 \cdot L = 0 \quad (3)$$

ΔCR ：自由歪増分（熱歪増分とクリープ歪増分の和） $\Delta \varepsilon_0$ ：コンクリート位置歪増分

$$K_1 = A_r \cdot E_r / L \quad K_2 = A_c \cdot E_c / L \quad K_3 = A_s \cdot E_s / L$$

E_c ：コンクリート弾性係数（経時変化考慮） E_r ：拘束材弾性係数 L ：スパン長さ

A_c ：コンクリート断面面積 A_r ：外部拘束材断面面積 A_s ：内部鉄筋材断面面積

(2) ひび割れ発生直後の釣合い式

ひび割れが発生すると、ひび割れ幅の伸び分だけ拘束力が緩む。そのため、力と変形の釣合い式は（4）式で表される。この式を整理すると、 m 本のひび割れ発生に対して（5）式となる。

$$W - (PN - PN') / K_2 = (PN - PN') / (K_1 + K_3) \quad ; \quad W = PN' / K_4 \quad (4)$$

$$PN' - PN = PN / (K_4 / K_2 + K_4 / (K_1 + K_3) + m) \quad (5)$$

PN ：ひび割れ直前の軸力 PN' ：ひび割れ直後の軸力 W ：ひび割れ幅 K_4 ：付着すべり剛性

(3) ひび割れ発生以降の釣合い式

ひび割れ後の釣合い式は、付着すべり剛性が加わるため（3）式の代わりに（6）式で表される。

$$K_2 \cdot (\Delta \varepsilon_0 - \Delta CR) \cdot (L - m \cdot L_{cr}) + (K_1 + K_3) \cdot (\Delta \varepsilon_0 \cdot (L - m \cdot L_{cr}) + m \cdot \Delta PN / K_4) = 0 \quad (6)$$

ΔPN ：軸力増分 L_{cr} ：影響範囲

なおこの算定式は、誘発目地などの変断面にも適用できる。これは、スパン方向に分割して取

扱うため変断面でも剛性 K_2 の計算が可能であることや算定式で得られた釣合い軸力を使って、分割部分毎に、それぞれひび割れ発生のチェック（引張応力の算定）を行っていることによる。

3. 実大壁体構造物のひび割れ調査事例との比較

3. 1 実構造物（ボックスカルバート）との比較

ひび割れ予測式の妥当性を検討するため、これまで報告されている実構造物（ボックスカルバート）4件の調査事例を対象に、ひび割れ挙動の比較を行った。このうち、A～C事例は、当社の施工・調査物件であるが、D事例は他社報告^[3]の引用である。これらの事例は、いずれも算定に必要なデータ（温度履歴、鉄筋比、断面形状）とひび割れ計測値が整っているものである。2章に基づき、ひび割れ解析を行い、ひび割れ幅（高さ中央部）、ひび割れ間隔や鉄筋応力（高さ中央部）を比較して、表-1、図-5に示す。なお計算に使用する温度履歴定数は、実測データをもとに、前述の2.2の③、④の考え方で処理した数値を用いた。断面形状、鉄筋比はデータ値をそのまま用いた。材料特性など

その他の算定定数は、前述の2.2の算定定数をそのまま使用した。

計測値と実測値の比較から全体的な傾向として良好な近似であった。参考に、A事例の構造物でのコンクリート応力の比較とひび割れ幅の比較をそれぞれ図-6、7に示す。

なお表中の計測材令は20～45日である（B-3のみ約1年半時点）。

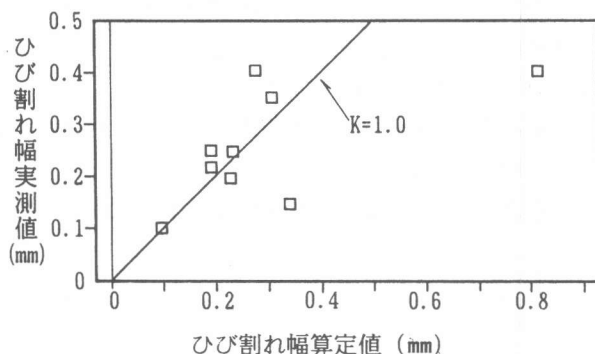


図-5 ひび割れ幅算定値と実測値

表-1 ボックスカルバート構造物の温度ひび割れ幅計測値と算定値

名称	壁の寸法			配力筋 鉄筋比 (%)	誘発目地 間隔 (cm)	断面欠損 率 (%)	計測結果			解析結果			
	幅 (cm)	高さ (cm)	長さ (cm)				ひび割れ 幅 (mm)	鉄筋応力 (kgf/cm^2)	ℓ_{max} (m)	ひび割れ 幅 (mm)	鉄筋応力 (kgf/cm^2)	ℓ_{max} (m)	
A	150	360	2000	0.31	500	20	0.35	2780	5.0	0.290	2566	5.0	
B	1	160	600	1500	0.12	500	20	0.4	2040	5.0	0.524	3815	5.0
	2	〃	〃	〃	0.50	〃	〃	0.25	1230	5.0	0.173	1654	5.0
C	3	〃	〃	〃	1.00	〃	〃	0.10	440	5.0	0.092	922	5.0
	1	125	480	1600	0.39	—	—	0.15	—	5.6	0.339	2275	4.0
	2	〃	〃	〃	〃	—	—	0.20	—	5.0	0.229	2223	8.0
	3	〃	〃	〃	〃	—	—	0.25	—	4.9	0.232	2339	5.3
D	4	〃	〃	〃	〃	—	—	0.40	—	2.7	0.276	2311	5.3
	90	510	1500	0.51	—	—	0.22	—	7.5	0.193	1881	7.5	

3. 2底面で拘束を受ける壁状構造物実験との比較

ここで扱う事例は、佐藤良一博士が行った『底面で拘束を受け鉄筋コンクリート壁状構造物の温度ひび割れ制御実験』^[4]である。試験体形状は、図-8に示すような基礎からの一面拘束を受ける壁状構造物である。壁厚は30cm（ただし側面に断熱材10cm使用し温度上昇を確保）、100cmの2種類があり、この実験は2年間、I、IIシリーズにわたって実施された。試験体総数は、20体以上に及ぶが、このうち必要な解析データが記載されている計8体について比較を行った。本来、底面のみで拘束を受ける壁状構造物の場合、高さ方向で応力が一定とは考えにくく従って、一様応力という条件の本算定法を適用するには、無理があると言わざるを得ない。しかしひび割れ発生後は、ある程度、均一な応力状態に近づくという推論の下に、参考として、前述の仮定や算定定数を用いて、検討した。

算定定数で多少異なる点は、Iシリーズ（壁厚30cm）の温度が供試体の平均値でなく、中心部の温度である点である。ただし、支持梁接合面から高さ25cm離れるとほぼ一様な温度分布であったと記述されており、その影響は小さいと判断される。なお拘束度の設定は、図-4の考え方をを用いて、支持梁の拘束を取込んだ。

ひび割れ本数、ひび割れ幅の比較を行い、表-2に示す。この時、ひび割れ幅実測値は高さ中央位置での両側面平均値（材令14日）が比較対象であるが参考に、高さ上部位置のひび割れ幅も示し、比較した。高さ中央位置では算定値（同14日）の方がやや大きい傾向にあるものの大まかに、近似性は良好といえよう。上部位置ではむしろ実測値の方が大きくなった。

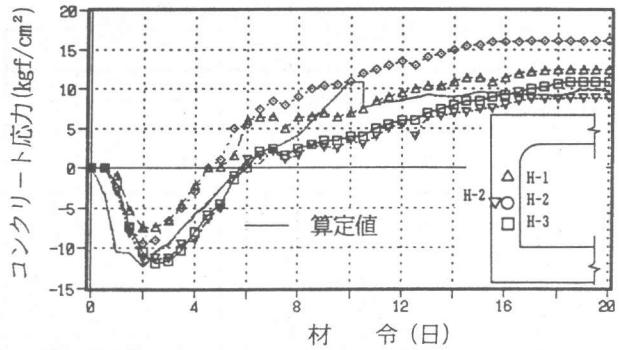


図-6 コンクリート応力の動き（A事例）

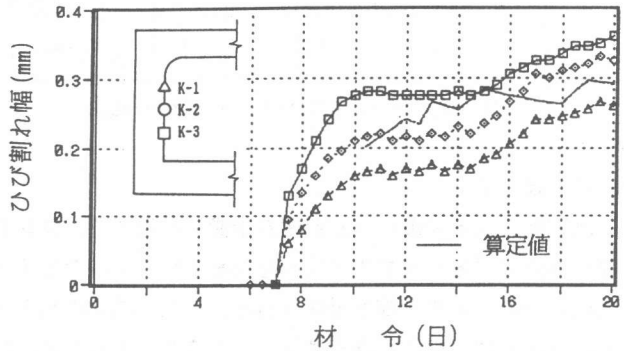


図-7 ひび割れ幅の動き（A事例）

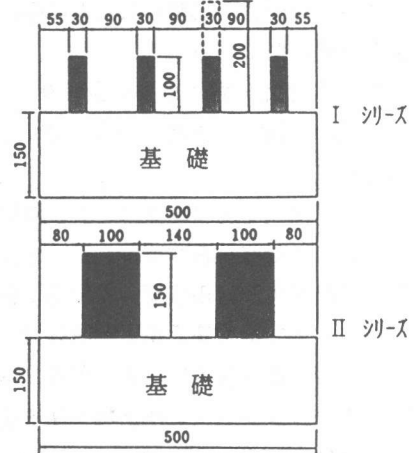


図-8 供試体と基礎の断面形状

表-2 底面で拘束を受ける構造物の温度ひび割れ幅計測値と算定値

シリーズ	供試体	鉄筋比 (%)	ひび割れ本数		測定位置	ひび割れ幅測定値 (mm)					ひび割れ幅解析値 (mm)
			測定値	解析値		W ₁	W ₂	W ₃	W ₄	W ₅	
I	No.1-1	0.25	3	2	E	0.25		0.44		0.23	0.229
					C	0.18		(0.32)		0.18	
	No.1-3	0.25	1	1	E				0.18		0.186
					C				0.09		
	No.1-4	0.25	3	3	E	0.30		0.37		0.43	0.373
					C	0.25		(0.30)		0.30	
	No.2-11	0.25	2	3	E	0.25		0.47			0.338
					C	0.15		(0.27)			
	No.3-1	0.25	3	1	E	0.15		0.39		0.17	0.374
					C	0.15		(0.35)		0.17	
	No.4-10	0.25	3	1	E	0.15		0.26		0.13	0.212
					C	0.09		(0.21)		0.09	
II	No.2	0.27	4	2	E	0.18		0.53	0.20	—	0.632
					C	0.20		0.41	0.15	0.09	
	No.1-2	0.27	1	1	E			0.48			0.459
					C			(0.37)			

()で囲んだ数値はC位置における最大ひび割れ値を示す。 E:部材上部 C:部材中央部

4. まとめ

水和熱による温度ひび割れ幅を予測する目的で、コンクリート温度挙動が既知な場合に、簡便な一方向部材モデルでの算定法を提案した。単純なモデル化であるため、温度分布や応力分布が断面内でおおよそ一様と推察されるケースに制約されるものの、ひび割れ後の鉄筋応力の大きさとひび割れ幅の関係を弾塑性体として取り扱えること、誘発目地や鉄筋比の効果を考慮できることなどの特徴をもつ。各種ボックスカルバート構造物の実例と比較検討した結果、この簡易算定法は全体的なひび割れの傾向を把握できることが分かった。さらに、参考として、底面で拘束を受ける模擬構造物の実験データを引用して本算定法の適用を試みた。ひび割れ幅や本数ともにおおまかな近似性が認められたものの、論理的な適合性の検討など拘束の形態に応じた今後の検討課題も残されている。

謝辞：本論文をまとめるに当たり、宇都宮大学佐藤良一博士には資料を提供して頂くとともに貴重なご助言を頂戴し、厚くお礼を申し上げます。

参考文献

- [1] 例えば マスコンクリートの温度応力研究委員会：報告書、温度応力ひびわれ幅算定方法についての提案、日本コンクリート工学協会、1992年 9月
- [2] 小柳光生・増田彦彦・中根淳：乾燥収縮による外壁のひび割れ幅予測に関する研究、コンクリート工学論文集、第2巻第2号、pp.59～69、1991.7
- [3] 河野一徳・谷直樹・大下英吉：ボックスカルバート側壁部における温度ひびわれ幅に関する研究、コンクリート構造物の体積変化によるひびわれ幅制御に関するJCI コロキウム 論文集 pp.1097～1102、1990.8
- [4] 佐藤良一・金津努：底面で連続拘束を受ける鉄筋コンクリート壁状構造物の温度ひびわれ制御実験、マスコンクリートのひび割れ制御指針（資料1）、日本コンクリート工学協会