

マスコンクリートの温度ひび割れ幅計算法の提案

小柳 光生 中根 淳

Proposal of Calculation Method for Crack Widths Due to Heat of Hydration of Massive Concrete

Mitsuo Koyanagi Sunao Nakane

Abstract

A calculation method using a simple one-way model is presented for the purpose of predicting thermal crack widths due to heat of hydration when concrete temperature hysteresees are known. This method involves a simple model so that its use is limited to cases considered to be of uniform stress distributions in sections, but it is possible to obtain crack widths and numbers, while the effects of steel ratios and control joints can be estimated. Analysis results are compared with actual structures and the general approximateness of the method confirmed.

概要

水和熱による温度ひび割れ幅を予測する目的で、コンクリート温度履歴が既知な場合に、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、応力分布が断面内で一様と考えられるケースに制約されるものの、ひび割れ幅と本数が得られるとともに、鉄筋比や誘発目地の効果を考慮できる。構造物の実例と比較し、大まかな近似性が確認された。

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は、耐久性上の他、機能上も問題になることが多く、一般に、ひび割れ対策を検討する必要がある。この場合、ひび割れ防止あるいは幅や本数を制御するための対策として、①水和熱制御の他、②誘発目地の設置や③鉄筋比の割増などがあげられる。そのため、これらの対策の効果を適切に評価できる『温度ひび割れ予測式』の提案が望まれている。しかし、これらの要因を考慮しつつ、ひび割れ後の挙動を解析の上から詳細に追跡することは、なかなか困難であり、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現状である。ここでは、大まかな目安を得る目的で、ごく単純なモデル化ではあるが、上述の要因を評価できる簡易な温度ひび割れ（幅と本数）算定法を提案している。

また、当社の各種コンクリート施工法研究開発グループで実施した実構造物の計測結果などを用いて、算定法の妥当性を検討している。

2. 温度ひび割れ幅算定法の概要

2.1 既往の温度ひび割れ幅算定法

既往の温度ひび割れ幅の算定方法については、国内では、日本コンクリート工学協会“マスコンクリートの温度応力研究委員会（田辺忠顕委員長）”を中心に、精力的

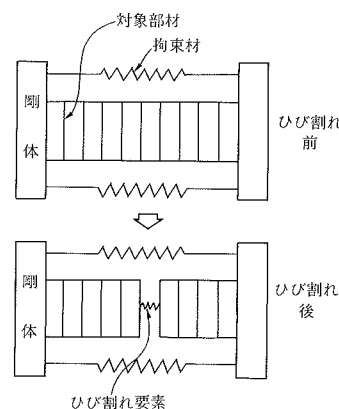


図-1 部材モデル

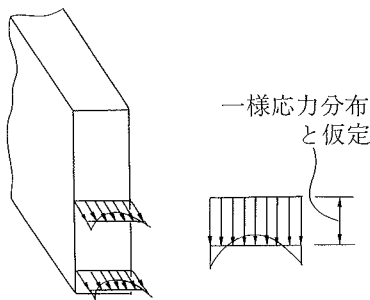


図-2 断面応力の仮定

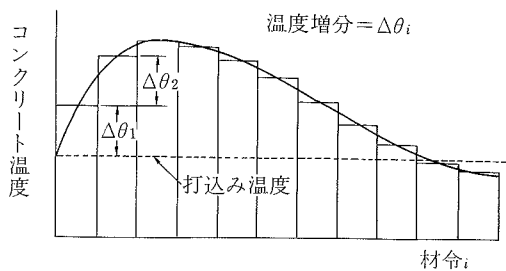


図-3 計算に使用するコンクリート温度の変化

$\Delta\theta$: 材令1日までの温度上昇分

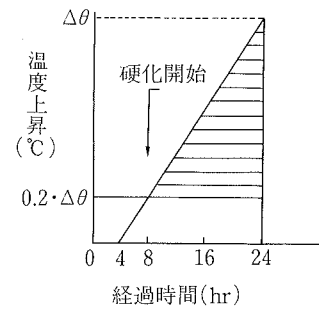


図-4 応力に関わる温度

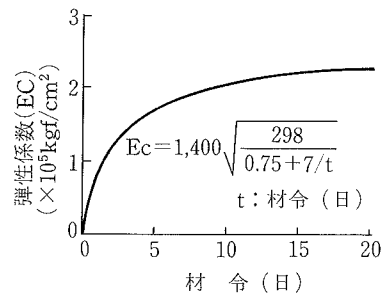


図-5 コンクリート弾性係数

に研究を進めており、既往の研究はおおまかに以下のよう
に分類されるようである¹⁾。

- a. 統計的方法
- b. 一軸法
- c. 構造体全体の応力再配分を考慮する方法
- d. FEM による方法

また、同委員会では、『温度ひび割れ幅の算定方法
(CP ひび割れ幅法)』を提案し、精度の高い解析法の確立
をめざしている。

2.2 本算定法の特徴

本算定法は、乾燥収縮ひび割れを対象に、既に考案し
た実用式『建物外壁ひび割れ解析法』²⁾を利用して、熱収
縮問題への適用を試みたものである。本法は既往の算定
法のうち b. 一軸法に相当するが、本解析法の特徴を以
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 ひび割れ発生ごとに、付着すべり剛性を組込んだ
構成式に組直し、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 スパン分割要素ごとに取扱うため、開口部、誘発
目地など変断面をもつ場合にも適用できる。

2.3 仮定条件と解析定数の設定

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、ひずみ分
布とする（図-2 参照）。そのため、解析と比較する計測
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 応力に関わ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。すなわち $\Delta\theta_i$: (i-1) 日から i 日
における温度増分に $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ を乗じる（図-3 参照）。

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、図-4 に示すように材令 1 日の場合に限り、
 $\Delta\theta_1 \cdot (8 \text{ h} - 4 \text{ h}) / (24 \text{ h} - 4 \text{ h}) = 0.2 \cdot \Delta\theta_1$ だけ、応力
に関わる温度増分が小さくすると仮定する。

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を使用し、Davis-Glanville の法
則、Whitney の法則が成り立つとする。コンクリート強
度を $F_c = 298 \text{ kgf/cm}^2$ （4 週）と設定し、その時の 弾
性係数は図-5 で表される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。

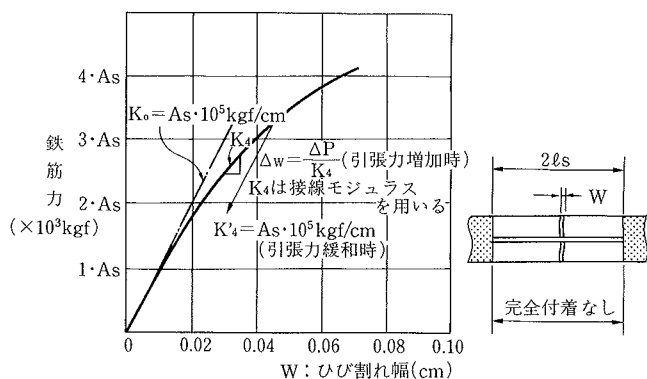


図-6 ひび割れ幅と鉄筋力の関係

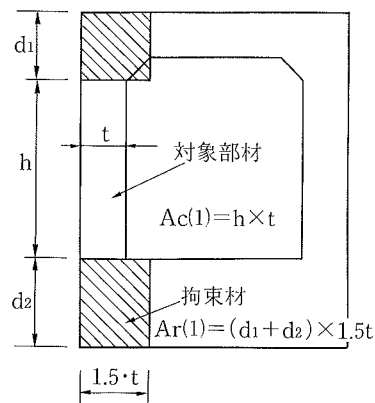


図-7 拘束材の考え方

クリープ係数

$$\phi(\tau, t) = 3 \times 0.132 \cdot \ln(t - \tau + 1) \cdot 10.3 / (5 + \sqrt{\tau})$$

τ : 載荷材令 (日数) t : コンクリート材令 (日数)

……………(1)

⑥ ひび割れ発生条件は、引張応力 10 kgf/cm^2 とする。コンクリートの引張強度は一般に 20 kgf/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 10 kgf/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引張強度は、 $10 \sim 15 \text{ kgf/cm}^2$ の場合が多い^{3),4)}。

⑦ ひび割れ幅: W は、ひび割れ部の鉄筋応力: σ_s (kgf/cm^2) の関数式で表される弾塑性付着バネ(2)式を使用する。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消失してくるという現象を反映したもので、この式を鉄筋力(鉄筋断面積 $As \times$ 鉄筋応力)との関係曲線として図-6に示す。

$$\text{ひび割れ幅 } W = 2 \cdot \sigma_s / (257 - 35 \cdot \sigma_s) \text{ (cm)}$$

……………(2)

具体的には、 K_4 : 付着すべり剛性(後述)の値は、図-6の中で示すように、鉄筋応力増大時は任意の応力時点での接線弾性係数で表し、応力減少時は、 $As \times 10^5$ (kgf/cm) で表している。

ひび割れ後、付着が完全に切れる長さ: $2l_s$ という見方からすると、この図-6から鉄筋応力が大きくなるに従い、この $2l_s$ は大きくなるが、例えば、初期応力時では $2l_s = W / (\sigma_s / Es) = As \cdot Es / K_4 \approx 20 \text{ cm}$ 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 $Ec \cdot Ar$ (Ar : 拘束材断面積, Ec : 拘束材コンクリート弾性係数 ($= 2.1 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$)) とする。今回のように一軸モデルという単純化した形式の場合、拘束材の有効範囲の設定は、難しい問題である。拘束材断面積 Ar は、これまでの実用式『建物外壁ひび割れ解析法』と同様、図-7に示すように、梁の有効幅(壁厚の1.5倍) \times

上下支持梁せいとみなす。

なお、後述する調査事例への適用の場合、この拘束比: $R = Ar / (Ac + Ar)$ は、 $0.5 \sim 0.7$ 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、任意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)式で表される関係であり、 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。

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、若材例(20日程度)での比較検討が主であることによる。

2.4 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、算定式のみを示す。

(1) ひび割れ発生前の釣り合い式

$$K_2 \cdot (\Delta \epsilon_0 - \Delta CR) \cdot L + (K_1 + K_3) \cdot \Delta \epsilon_0 \cdot L = 0$$

……………(3)

ΔCR : 自由ひずみ増分(熱ひずみ増分とクリープひずみ増分の和)

$\Delta \epsilon_0$: コンクリート位置ひずみ増分

$K_1 = Ar \cdot Er / L$ $K_2 = Ac \cdot Ec / L$ $K_3 = As \cdot Es / L$

Ec : コンクリート弾性係数(経時変化考慮)

Er : 拘束材弾性係数 L : スパン長さ

Ac : コンクリート断面積 Ar : 外部拘束材断面積

As : 内部鉄筋材断面積

(2) ひび割れ発生直後の釣り合い式

m 本のひび割れ発生時における釣り合い式は、下式となる。

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

……………(4)

$W = PN' / K_4$

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解析

$$K_2 \cdot (\Delta\epsilon_0 - \Delta CR) \cdot (L - m \cdot L_{cr}) + (K_1 + K_3) \cdot (\Delta\epsilon_0 \cdot (L - m \cdot L_{cr}) + m \cdot \Delta PN / K_4) = 0 \quad \dots\dots\dots(5)$$

ΔPN ：軸力増分 L_{cr} ：影響範囲

なお、ひび割れ幅算定のフローチャートを図-8に示す。

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・調査物件であり、『各種コンクリート施工法研究開発グループ』で取りまとめた計測データを引用している。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）とひび割れ計測データが整っているものである。2章に基づき、ひび割れ算定を行い、材令20日でのひび割れ幅（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-9に示す。圧縮強度など個々の数値については、上述の2.3の算定定数に符合しない点もあるが、2.3の算定定数をそのまま使用した。比較した結果、全体的な傾向としては、良好な近似が得られた。参考に、A事例の構造物でのコンクリート応力の比較、ひび割れ幅の比較をそれぞれ図-10、11に示す。また、ひび割れ幅計測材令はB-3事例を除き20～45日である。

なお、ちなみにひび割れ発生条件の引張応力として15 kgf/cm²の場合もケーススタディしたが、この場合、上記9事例のうち、C-1の1件（ひび割れ幅0.315 mm）しかひび割れ発生が無かった。実構造物との対応と言う

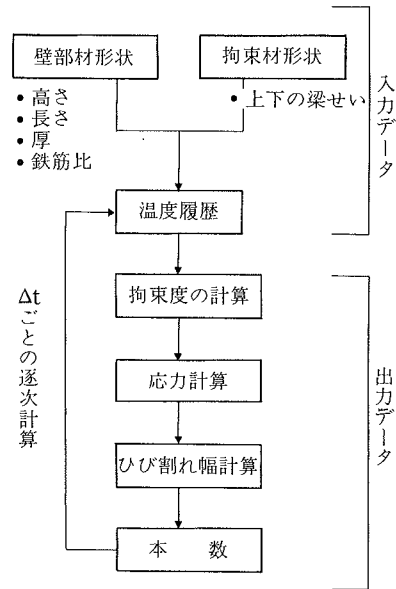


図-8 ひび割れ計算のフローチャート

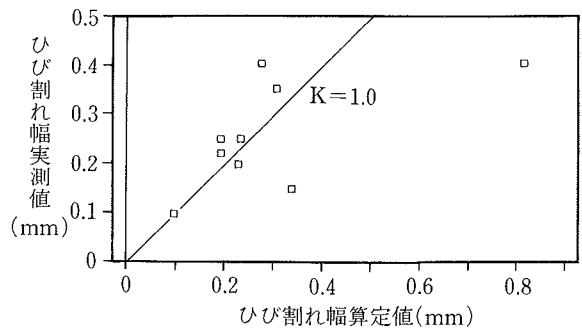


図-9 ひび割れ幅算定値と実測値

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			配筋筋 鉄筋比 (%)	拘束断面比R	誘発目地		計測結果			算定結果		
	幅 (cm)	高さ (cm)	長さ (cm)			間隔 (cm)	断面欠損率 (%)	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	2,000	0.31	0.58	500	20	0.35	2,780	5.0	0.305	2,510	5.0
1	160	600	1,500	0.12	0.55	500	20	0.40	2,040	5.0	0.814	4,902	5.0
B2	"	"	"	0.50		"	"	0.25	1,230	5.0	0.191	1,816	5.0
3	"	"	"	1.00	"	"	0.10	440	5.0	0.096	925	5.0	
1	125	480	1,600	0.39	0.61	-	-	0.15	-	5.6	0.339	2,275	4.0
2	"	"	"	"		-	-	0.20	-	5.0	0.229	2,223	8.0
C3	"	"	"	"		-	-	0.25	-	4.9	0.232	2,339	5.3
4	"	"	"	"		-	-	0.40	-	2.7	0.276	2,311	5.3
D	90	510	1,500	0.51	0.50	-	-	0.22	-	7.5	0.193	1,881	7.5

点では、当初に設定した 10 kgf/cm² の場合の方が、実構造物との対応は良かった。次に、拘束断面比 R をあえて完全拘束に近い 0.80 とみなし、ひび割れ発生応力 15 kgf/cm² としてケーススタディしてみた。その結果を図-12 に示すが、この場合、かなりの事例でひび割れが発生したものの依然としてひび割れが無いケースもある。

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、佐藤らが行った『底面で拘束を受ける鉄筋コンクリート壁状構造物の温度ひび割れ制御実験』⁹⁾ である。試験体形状は、図-13 に示すような基礎からの一面拘束をうける壁状構造物である。壁厚は 30 cm (ただし側面に断熱材 10 cm 使用し温度上昇を確保) 100 cm 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様とは考えにくく、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、上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 30 cm) 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 25 cm 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、拘束材断面積の設定は、図-14 に示すように、拘束梁せい×壁厚×1.5 とした。

ひび割れ本数、ひび割れ幅の比較を行い、表-2 および図-15 に示す。この時、ひび割れ幅実測値は、高さ中

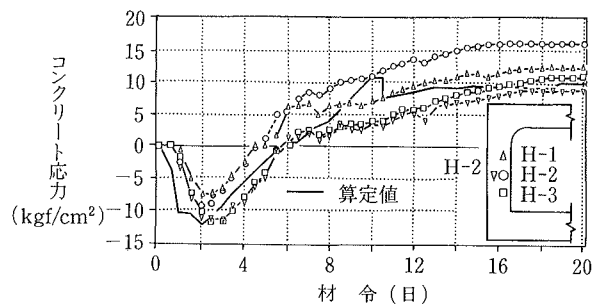


図-10 コンクリート応力の動き (A 事例)

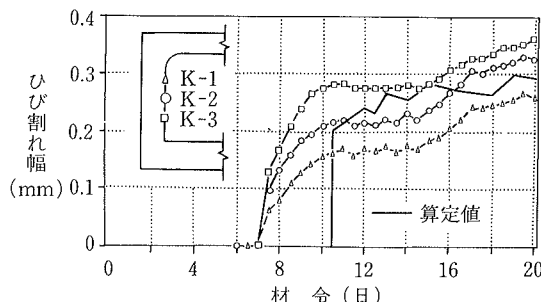


図-11 ひび割れ幅の動き (A 事例)

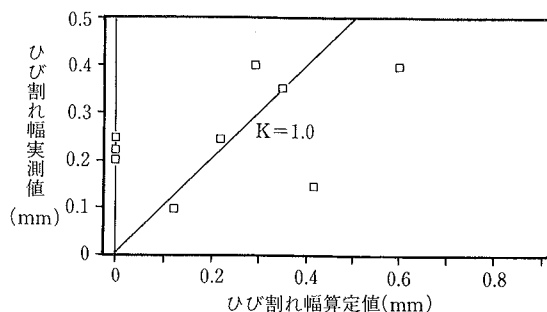


図-12 ひび割れ幅算定値と実測値
($\sigma_{cr} = 15 \text{ kgf/cm}^2$ 拘束 R=0.80)

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 (%)	拘束断面比 R	ひび割れ本数		測定位置	ひび割れ幅計測値 (mm)					ひび割れ幅算定値 (mm)	鉄筋応力 (kgf/cm ²)	
				計測値	算定値		W ₁	W ₂	W ₃	W ₄	W ₅		C 計測値	算定値
I	No1-1	0.25	0.69	3	2	E	0.25		0.44		0.23	0.229	2,495	3,061
						C	0.18		<u>0.32</u>		0.18			
	No1-3	0.25	0.69	1	1	E				0.18		0.186		2,564
						C				<u>0.09</u>				
	No1-4	0.25	0.69	3	3	E	0.30		0.37		0.43	0.373		3,062
						C	0.25		<u>0.30</u>		0.30			
No2-11	0.25	0.69	2	3	E	0.25		0.47			0.338	2,778	3,526	
					C	0.15		<u>0.27</u>						
No3-1	0.25	0.69	3	1	E	0.15		0.39		0.17	0.374	2,423	3,503	
					C	0.15		<u>0.35</u>		0.17				
No4-10	0.25	0.69	3	1	E	0.15		0.26		0.13	0.212	1,481	2,410	
					C	0.09		<u>0.21</u>		0.09				
II	No2	0.27	0.60	4	2	E	0.18		0.53	0.20	—	0.632	2,537	3,599
						C	0.20		<u>0.41</u>	0.15	0.09			
No1-2	0.27	0.60	1	1	E			0.48			0.459	2,436	3,616	
					C			<u>0.37</u>						

アンダーライン部はC位置における最大ひび割れ値を示す。 E: 部材上部 C: 部材高さ中央部

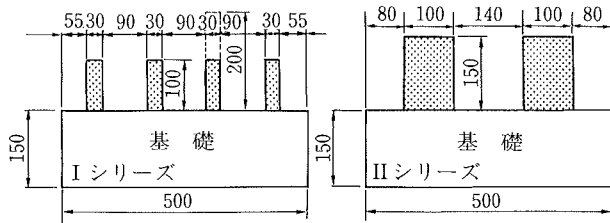


図-13 供試体と基礎の断面形状

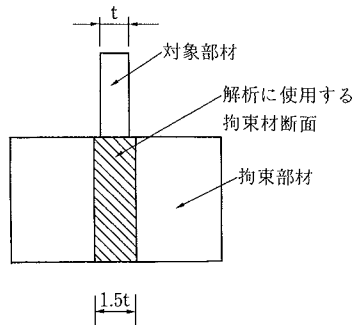


図-14 拘束材の定義

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、上部位置のひび割れ幅も示し、比較した。図-15の結果から、高さ中央位置では算定値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。

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場合に制約されるものの、ひび割れ後の鉄筋とコンクリートとの付着すべりの関係を弾塑性体として取扱えること、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、ひび割れ発生引張応力を 10 kgf/cm^2 と設定すれば、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。

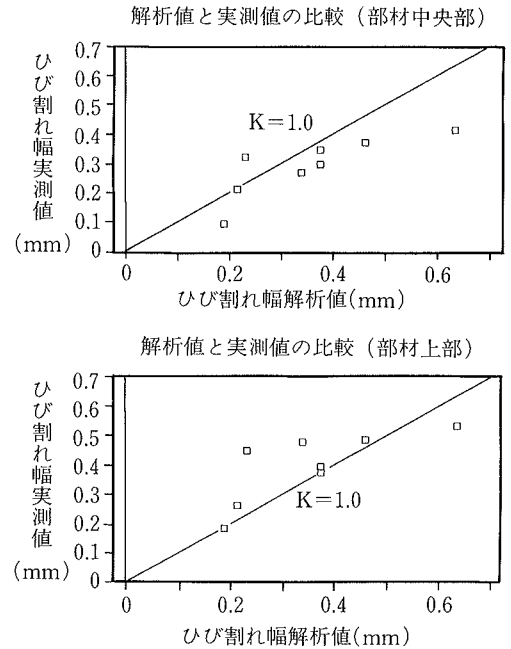


図-15 ひび割れ幅算定値と実測値
(底面で拘束を受ける壁状構造物)

謝辞

本論文をまとめるに当たり、宇都宮大学 佐藤良一助教授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) 小野 定：マスコンクリートの温度応力研究委員会報告、コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 14, No. 1, p. 1~6, (1992)
- 2) 小柳光生, 増田安彦, 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, Vol. 2, No. 2, p. 59~69, (1991. 7)
- 3) 河野一徳, 谷 直樹, 大下英吉：RC 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, p. 55~60, (1990. 8)
- 4) 前野宏司, 青景平昌, 伊藤祐二：大断面ボックスカルバートの硬化時温度応力について, 第2回 マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集, p. 15~20, (1984. 3)
- 5) 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