# 論文 外部拘束が主体となる壁状構造物の温度ひび割れ幅評価式の構築

網野 貴彦<sup>\*1</sup>·上谷 秀一<sup>\*2</sup>·岩谷 理<sup>\*3</sup>·羽渕 貴士<sup>\*4</sup>

要旨:マスコンクリート構造物の築造にあたっては温度ひび割れを制御することが重要であ るが、現状では簡易にひび割れ予測を行うことが難しく、対策の必要性や具体的な計画を立 案するために、多くの時間と労力の掛かる FEM による温度応力解析を行う場合が多い。そ こで、筆者らは簡易に温度ひび割れ幅の予測を行うために、過去に施工した外部拘束を受け る壁状構造物を対象にひび割れ調査データを収集し、そのデータに基づく簡易なひび割れ幅 評価式を構築した。本稿では、評価式構築の考え方および適用範囲を示し、提案した評価式 をひび割れ制御鉄筋による対策検討に活用した結果を示す。

キーワード:温度ひび割れ,壁状構造物,外部拘束,ひび割れ幅,ひび割れ本数

## 1. はじめに

マスコンクリート構造物においてはセメント の水和熱に起因する温度ひび割れを制御するこ とが重要であり,近年の「公共工事の品質確保 の促進に関する法律」の施行によってその重要 性はさらに高まっている。

温度ひび割れには、断面内外の温度差によっ て生じる内部拘束ひび割れと、先に打設された コンクリートや地盤などの拘束を受けて生じる 外部拘束ひび割れがある。このうち、外部拘束 ひび割れは部材の内部温度が外気温に平衡する 打設1~2週間後に発生し、断面を貫通して開口 したままの状態となることが多い。そのため、 外部拘束を受ける構造物に対しては、ひび割れ 発生の可能性やひび割れ幅などを予測し、構造 物の要求性能(防水性や鉄筋腐食に対する耐久 性など)を考慮した適切な対策を事前に検討し ておくことが重要になる。しかし、現状では簡 易に温度ひび割れ幅を予測できる手法がないた め,FEM による温度応力解析に時間と労力を費 やす場合が多く、さらに高度な知識や十分な経 験を有する専門家による対応が必要となるケー

スも多い。そのため,対策の立案が施工段階ま で先送りされるケースも少なくない。

そこで、本稿では、簡易に温度ひび割れ幅の 予測を行うために、過去に施工した壁状構造物 (ボックスカルバート,擁壁など)の施工後の 温度ひび割れ発生状況の調査結果を収集し、そ れらの結果を統計処理することによって、外部 拘束が卓越する壁状構造物の簡易な温度ひび割 れ幅の評価式を構築した。また、この評価式を ひび割れ制御鉄筋による対策検討に適用した結 果について述べる。

#### 2. 検討事例

検討事例を表-1に示すが、これらは中部地 域にて施工された壁状構造物におけるものであ り、打設数日以内の型枠取外し時にひび割れが 確認されたものである。なお、これらには内部 拘束の影響を強く受けると思われる壁厚1.5m以 上のもの、曲線状の特殊断面を有するもの、壁 両端が柱部材などにより拘束されるものは含ま れておらず、フーチングなどにより壁底面から の拘束のみを受ける構造を抽出している。

\*1 東亜建設工業(株) 技術研究開発センター 新材料・リニューアル技術室 (正会員) \*2 東亜建設工業(株) 名古屋支店土木部 設計積算課課長

\*3 東亜建設工業(株) 名古屋支店土木部 設計積算課

\*4 東亜建設工業(株) 技術研究開発センター 新材料・リニューアル技術室長 博(工) (正会員)

	畄 位	日本日本	日本	+寸 ∋∿				打动		ζ	トび割れ粘	犬況 <sup>注3)</sup>		
構造物	半 位 セメント量 C <sup>注 1)</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	壁 厚 B (m)	壁 長 L (m)	打 設 リフト高 H' (m)	L/H 注 2)	鉄筋比 p (%)	外気温 To (℃)	扣設 温度 Tc (℃)	最大 幅 w <sub>max</sub> (mm)	本 数 N	合計 幅 Σw (mm)	平均 幅 w <sub>ave</sub> (mm)	単位幅 w (mm/m)	対 策 注4)
±*	370	0.65	13.8	5.2	2.34	0.19	14.5	15.5	0.35	1	0.35	0.35	0.025	無
か ツクハ カルハジート	370	0.65	13.8	2.9	1.59	0.23	11.0	14.5	0.10	2	0.20	0.10	0.014	無
<i>MW</i>	370	0.65	13.8	5.2	2.34	0.19	14.5	15.5	0.30	1	0.30	0.30	0.022	無
ホ゛ックス	311	0.40	12.3	3.0	4.10	0.50	27.0	29.0	0.25	4	0.90	0.23	0.073	無
カルハ゛ート	311	0.40	12.3	3.0	4.10	0.50	20.5	23.0	0.35	2	0.65	0.33	0.053	無
ホ゛ックス	278	1.00	18.6	4.9	3.80	0.69	23.5	24.5	0.25	5	0.78	0.16	0.042	制
カルハ゛ート	278	1.00	18.6	4.9	3.80	0.69	23.5	24.5	0.25	4	0.82	0.21	0.044	制
橋台	296	1.20	26.7	6.0	4.45	0.19	27.5	29.5	0.35	7	1.64	0.23	0.061	誘
	331	1.50	20.2	5.4	3.74	0.27	29.0	30.5	0.50	5	1.90	0.38	0.094	誘
U 型	331	1.30	20.2	4.1	2.13	0.32	26.5	29.0	0.30	5	1.10	0.22	0.054	誘
擁壁	331	1.50	20.2	5.4	3.74	0.27	29.0	30.5	0.40	6	1.65	0.28	0.082	誘
	331	1.30	20.2	4.1	2.13	0.32	26.5	29.0	0.40	5	1.40	0.28	0.069	誘
逆 T 型 擁壁	339	0.80	20.2	2.0	3.37	0.40	8.5	15.0	0.25	3	0.50	0.17	0.025	誘
ホ゛ックス	252	0.60	9.6	3.9	2.46	0.22	6.0	12.0	0.10	2	0.18	0.09	0.019	誘
カルハ゛ート	252	0.60	9.6	3.9	2.46	0.20	6.0	12.0	0.15	2	0.23	0.12	0.024	誘
±*	331	0.85	19.7	3.4	5.79	0.17	10.5	13.5	0.20	3	0.50	0.17	0.025	誘
ホー ツクハ カルハ・ート	331	0.85	19.7	3.4	5.79	0.17	10.5	13.5	0.30	3	0.70	0.23	0.036	誘
	331	0.50	19.7	3.9	5.05	0.29	10.5	13.5	0.20	3	0.50	0.17	0.025	誘

表-1 検討事例一覧

注1) 上表の事例では,セメントの種類として「普通ポルトランドセメント」または「高炉セメント B 種」が使用されている。 注2) 壁延長と拘束体底面から対象リフトの打設面までの高さの比

注3) 合計幅とは「壁全長に発生したひび割れ幅の合計」,平均幅とは「合計幅をひび割れ本数で除した値」,単位幅とは「合計幅を壁 長で除した値」を表す。

注4) 「誘」「制」は実施工において、それぞれ「ひび割れ誘発目地」、「ひび割れ制御鉄筋」による対策を実施したものを示す。



図-1 温度ひび割れ幅評価式の構築までの検討フロー

## 3. 温度ひび割れ幅評価式構築のための検討方法

## 3.1 検討フロー

温度ひび割れ幅評価式の構築までの検討フロ ーを図-1に示すが、本評価手法の特徴は単位 ひび割れ幅とひび割れ本数を別々に評価して最 大ひび割れ幅を予測することにある。両者を区 別した理由として、制御鉄筋による対策におい てひび割れの分散効果を定量的に評価できるこ と、誘発目地の設置本数の立案を推定されるひ び割れ本数から簡易に行うことが可能と考えた ことによる。

また、本検討では文献 1) を参考にして、温度 ひび割れに関連するパラメータ(単位セメント 量,壁厚,延長,打設リフト高さ,L/H,鉄筋比, 外気温)を抽出した。なお、打設温度と外気温 には強い相関があり、両方をパラメータとする と、重回帰分析において多重共線性を生じる可 能性が高いこと、評価式利用の観点から理科年 表等による外気温の入手の方が容易であること から、本検討では打設温度をパラメータから除 外した。また,表-1に示すひび割れ調査は型 枠取外し時の打設後早期に実施されたものであ るので,外気温は打設日のものを使用した。

## 3.2 最適な重回帰式の選択方法

最適な重回帰式の選択は以下の3点を考慮し て総合的に判断した。

a) 温度ひび割れの発生メカニズムから必 要と思われるパラメータを含んでいる

b) 重相関係数が高く AIC が小さい

c) 各パラメータの有意確率が 95%以上

以下に,回帰式の選択に用いた指標について 簡単に説明する。

# (1) 重相関係数 R

重相関係数 R は式(1)のように表され、この値 が大きいほど重回帰分析の予測精度が高いこと を示す。なお、式中の各記号は n:標本数、 $y_i$ : 実測値、 $\overline{y}$ :実測値の平均値、 $\hat{y}_i$ :回帰式によ る推定値を表す。

$$R = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (\hat{y}_i - \overline{y})^2 / \sum_{i=1}^{n} (y_i - \overline{y})^2}$$
(1)

#### (2) AIC(赤池の情報量基準)

本検討における評価式を線形重回帰式(式(2) 参照)で表すとすると、AIC はパラメータ数 N を用いて式(3)のように表される。AIC はモデル 選択の際に使われる情報量基準の一つであり、 同一の従属変数に対して複数の重回帰分析モデ ルを考える場合に AIC が最小となったモデルが 最適と判断される。

$$y = \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \dots + \alpha_i x_i + \varepsilon$$
 (2)

$$AIC = n \ln \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (y_i - \hat{y}_i)^2 + 2N$$
(3)

# (3) 各パラメータの偏回帰係数の有意確率

式(2)中の偏回帰係数 $\alpha_i$ は標本データによって 変化する統計量であり、標本数が小さい場合はt 分布に従う。そこで、本検討では有意水準95%、 帰無仮説H<sub>0</sub>:  $\alpha_i$ =0,対立仮説H<sub>1</sub>:  $\alpha_i \neq 0$ とし た両側検定により、偏回帰係数の有意確率判定 を行った。

#### (4) 多重共線性

線形重回帰分析において、独立変数間に強い

相関関係が存在すると,重回帰式の偏相関係数 の符号と単相関係数の符号が一致しない「多重 共線性」が発生する。多重共線性が発生した場 合は,そのパラメータは実現象と反する解を導 くため,重回帰式から多重共線性となったパラ メータのいずれかを取り除く必要がある。そこ で,本検討では多重共線性が発生したパラメー タの組合せを除外して検討を進めた。

## 4. 温度ひび割れ幅評価式の構築

## 4.1 単位ひび割れ幅の評価式

各パラメータと単位ひび割れ幅について単回 帰分析を行った結果を表-2に示す。この結果 によれば,経験的に正となるべき単位セメント 量との相関係数が負となった。これは1.5m以下 の比較的小さい壁厚の構造物を対象としたため 単位セメント量の増加が部材の温度上昇やひび 割れ発生に影響しにくかったこと,サンプル数 が現状では少ないことなどが原因と考えられる。 なお,以下の検討では負の相関を示した単位セ メント量をパラメータとするのは不適切と判断 し,検討から除外することとした。

次に,各パラメータの組合せを変化させ重回 帰分析を行った結果を表-3に示す。なお,表 -2において相関係数の高かった壁厚,外気温 を固定パラメータとして組合せを検討した。こ の結果によると,全てのケースにおいて偏回帰 係数の有意水準95%を満足する結果は得られな かったが,温度ひび割れのメカニズムから必要 と思われる L/H が組み込まれ,各パラメータの 有意確率が高い式(4)が,単位ひび割れ幅 wの評 価式として妥当であると判断された。

表-2 単回帰分析による各パラメータと 単位ひび割れ幅との相関係数

半位のの割れ幅とり	
パラメータ	相関係数
単位セメント量	-0.04
壁厚	0.65
壁長	0.41
打設リフト高	0.38
L/H	0.14
鉄筋比	0.23
外気温	0.90

			独立	上変数 <sup>注)</sup> の約			偏回帰係数の			
ケース	壁厚 B(m)	延長 L(m)	リフト高 H'(m)	L/H	鉄筋比 n(%)	外気温 To(℃)	定数項	R	AIC	有意確率判定
	D(III)		II (III)	L/11	P(70)	10(0)				
1	0			0		0		—	_	—
2	0	×	×	0		0		—	_	—
3		0	0	×	0	0		-		—
4	0	×	×	0		0		-	—	—
_	0	×	X	0	X	0		0.01	100	To のみ有意水準
3	(61%)			(75%)		(99%)	(79%)	0.91	-106	95%を満足
6	0	×	×	X	×	0		0.00	107	To のみ有意水準
0	(58%)					(99%)	(47%)	0.90	-107	95%を満足

表-3 単位ひび割れ幅に関する重回帰分析結果

注) 括弧内の数値は偏回帰係数の有意確率を示す。「○」はパラメータとして考慮し多重共線性を示さなかったもの, 「●」は多重共線性を示したもの、「×」はパラメータとして用いなかったことを示す。



$$w = 0.00869 \times B + 0.00253 \times L/H + 0.00227 \times T_a - 0.01372$$
(4)

式(4)による推定単位ひび割れ幅と実測のひび 割れ幅の関係を図-2に示すが,重相関係数0.91 と良い近似が得られており,本評価式は単位ひ び割れ幅の予測に利用できるものと考えられる。 今後,データを蓄積することにより各パラメー タの偏回帰係数の有意確率が改善され,予測精 度は向上するものと考えられる。

## 4.2 ひび割れ本数の評価式

各パラメータとひび割れ本数について単回帰 分析を行った結果を表-4に示す。なお、この 検討では、ひび割れ誘発目地対策を適用した事 例は計画的にひび割れ本数を制御したものであ るので、これらを除いた7事例の調査結果を用 いた。この結果から、単位セメント量との相関



図-3 ひび割れ本数の実測と推定の比較

表-4 単回帰分析による各パラメータと

ひび割れ本数との相関係数

パラメータ	相関係数
単位セメント量	-0.88
壁厚	0.47
壁長	0.62
打設リフト高	-0.06
L/H	0.68
鉄筋比	0.90
外気温	0.81

が負となり,打設リフト高との相関係数もほぼ0 (相関がない)であったことから,これら2つ のパラメータを除外することとした。

続いて,各パラメータの組合せを変化させ重 回帰分析を行った結果を表-5に示す。なお, 表-4において相関係数が最も高い鉄筋比を固 定パラメータとして組合せを検討した。その結

		独立	立変数 <sup>注)</sup> の約			信回帰係数の				
ケース	壁厚	延長		鉄筋比	外気温	外気温 完粉頂	R	AIC	一個四冊 (示数 0)	
	B(m)	L(m)	L/H	p(%)	To(°C)	足效項			有总滩平村足	
1	$\bullet$	0		0	0		—	—	_	
2	0		×	0	0		—	_	—	
3	0	×	Х	0	0		0.02 22.2		全てに対し有意水準	
	(49%)			(45%)	(51%)	(53%)	0.92	22.3	95%を満足できず	
4	×	0	×	0	0		0.02	22.4	全てに対し有意水準	
4		(48%)		(37%)	(50%)	(52%)	0.72	22.4	95%を満足できず	
5	×	×		0	0		—	-	—	
6	0	×	×	0	Х		0.01	21.6	p のみ有意水準	
0	(25%)			(98%)		(21%)	0.91	21.0	95%を満足	
7	×	0	×	0	×		0.00	21.7	p のみ有意水準	
/		(24%)		(96%)		(24%)	0.90	21.7	95%を満足	
8	×	×		0	×		-		_	

# 表-5 ひび割れ本数に関する重回帰分析結果

注) 括弧内の数値は偏回帰係数の有意確率を示す。「○」はパラメータとして考慮し多重共線性を示さなかったもの、 「●」は多重共線性を示したもの、「×」はパラメータとして用いなかったことを示す。



果,全てのケースにおいて偏回帰係数の有意水 準 95%を満足する結果は得られなかったが、ひ び割れ本数に影響が大きいと考えられる壁長, 鉄筋比を含む式(5)が得られ、ひび割れ本数 Nの 評価式を得ることができた。

 $N = 0.0537 \times L + 6.032 \times p - 0.6542 \tag{5}$ 

この式(5)による推定のひび割れ本数と実測の ひび割れ本数の関係を図-3に示すが,重相関 係数 0.90 が得られており,式(5)によりひび割れ 本数の予測を行うことは可能であると考えられ る。ただし,単位ひび割れ幅と同様,今後デー タを蓄積して予測精度の向上を図る必要がある と考えられる。

#### 4.3 実測と推定最大ひび割れ幅の比較

これまで検討した式(4),式(5)を用いることに よって平均ひび割れ幅の推定が可能となった。 しかし,一般には最大ひび割れ幅によって評価 されるので,実測の最大ひび割れ幅と実測の平 均ひび割れ幅の関係を図-4にプロットした。 この図から,最大ひび割れ幅(Wmax)と平均ひ び割れ幅(Wave)には良い相関があり(単相関係 数 0.91),最大ひび割れ幅は式(6)により予測可能 と考えられる。

$$W_{\rm max} = 1.232 \times W_{ave} \tag{6}$$

図-5に式(4),(5),(6)により最大ひび割れ幅の実測と推定の比較を示す。なお,ひび割れ誘

	実	施工におり	ける条件	ひび割れ幅 0.2mm に制御するための対策試算結果			
壁厚 B(m)	壁長 L(m) L/H		鉄筋比 p(%)	外気温 To(℃)	対策後の推定ひび割れ本数	必要鉄筋比 p(%)	
0.65	13.8	2.34	0.19	14.5	2.6	0.42	
0.65	13.8	1.59	0.23	11.0	1.8	0.28	
0.40	12.3	4.10	0.50	27.0	4.7	0.77	
0.40	12.3	4.10	0.50	20.5	3.5	0.58	
1.00	18.6	3.80	0.69	23.5	6.6	1.04	
1.20	26.7	4.45	0.19	27.5	11.6	1.79	
1.50	20.2	3.74	0.27	29.0	9.3	1.47	
1.30	20.2	2.13	0.32	26.5	7.9	1.23	
0.80	20.2	3.37	0.40	8.5	2.6	0.36	
0.60	9.6	2.46	0.22	6.0	0.7	0.13	
0.85	19.7	5.79	0.17	10.5	3.9	0.58	
0.50	19.7	5.05	0.29	10.5	3.3	0.48	

表-6 評価式によるひび割れ制御鉄筋対策の検討結果

発目地対策を行ったものは,誘発目地の全数に ひび割れが発生し,目地間にはひび割れが発生 しなかった 9 事例を抽出し,誘発目地本数をひ び割れ本数として推定したものである。この結 果を見ると比較的良い近似が得られているため, この評価方法により最大ひび割れ幅の予測が可 能であるものと考えられる。

## 5. 温度ひび割れ幅評価式の活用方法

上記の評価式をひび割れ制御のための必要鉄 筋比の算出に用いる場合,式(6)による最大ひび 割れ幅が許容値以下となる平均ひび割れ幅を求 め,式(4)による単位ひび割れ幅と組み合わせて, 推定ひび割れ本数を求める。そのひび割れ本数 を式(5)に代入して必要鉄筋比を算出する。

一方, ひび割れ誘発目地を検討する場合, 壁 長とひび割れ本数から平均ひび割れ間隔を求め, その間隔で誘発目地を設置する。しかし, ひび 割れ本数と同数の誘発目地を設置すると, ひび 割れが入らない目地があるなど不経済となる可 能性もある。今後, 誘発目地の効果について適 切に評価できる情報を収集する必要がある。

表-6に、表-1に示した事例を用いて、最 大ひび割れ幅を許容ひび割れ幅以下に制御する ための必要鉄筋比の試算を行った。ここでは、 文献 2)を参考に、補修を必要としないひび割れ 幅 0.2mm (環境:きびしい、その他の要因:小) を許容ひび割れ幅と想定した。この結果による と、壁厚、延長が大きいほど、外気温が高いほ ど、必要鉄筋比は大きくなる結果となった。こ のことから,当初計画から打設時期に変更が生 じた場合,または対策を緊急に見直す必要が生 じた場合などにも,この評価式の有効性が発揮 されるものと考えられる。

# 6. まとめ

本検討で得られた結論を以下にまとめる。

- (1) 実構造物のひび割れ調査結果に基づき,単位 ひび割れ幅および本数の評価式を構築し,温 度ひび割れ幅の推定方法を提案した。
- (2)最大ひび割れ幅の推定と実測の比較から,評 価式によりある程度の精度を有する最大ひ び割れ幅予測が可能であることを確認した。
- (3) 温度ひび割れ評価式を用いたひび割れ制御 鉄筋による対策立案方法を提案した。

なお、今回の評価式構築に用いた事例は普通 ポルトランドセメントまたは高炉セメント B 種 を使用した壁厚 1.5m 以下の壁状構造物に限られ ていたため、評価式中にセメントの単位量や種 類のパラメータが含まれていない。今後、事例 収集を継続し、上記パラメータを考慮できる信 頼性の高い評価式にしていく必要がある。

## 参考文献

- (社)日本コンクリート工学協会:マスコン クリートのひび割れ制御に関する研究委員 会報告書,2006.6
- (社)日本コンクリート工学協会:コンクリートのひび割れ調査,補修・補強指針-2003.,
   p.61, 2003.6