

論文

[1191] 壁状構造物の温度ひびわれ幅の推定に関する研究

正会員○今井智満（名古屋工業大学大学院）

正会員 梅原秀哲（名古屋工業大学社会開発工学科）

正会員 上原 匠（名古屋工業大学社会開発工学科）

正会員 田辺忠顕（名古屋大学土木工学科）

1. はじめに

R C 構造物の温度ひびわれに対する基本的な考え方は、ひびわれを完全に防止しようとするものから、耐久性などに支障のない範囲内でひびわれを許容し、積極的にひびわれを制御していく方向へ移行してきている。その際重要となるのは、ひびわれ幅をいかに精度よく評価できるかということである。このような背景から、ひびわれ幅の算定法に関する研究が盛んに行われてきており、いくつかの簡易手法が提案されている。賀茂らによるコンペンセーション・プレーン法を拡張した方法（以下、C P ひびわれ幅法と略す）もその1つであり、この方法によれば被拘束体が矩形の壁状構造物については、比較的精度のよい評価が可能となることが確認されている[1]。ところで、この解析手法において鉄筋の付着消滅領域 l_s およびひびわれ影響領域 l_c のみが解析パラメータとして用いられ、 $l_s = 15 \sim 20 \text{ cm}$ 、 $l_c = 2.5 \sim 3.0 \text{ m}$ と報告されている。しかし、これらは図-1 に示すような、壁中央部に発生する1本の貫通ひびわれに対しての値であり、図-2 に示すようなひびわれが2本以上発生し、ひびわれ影響領域が重複する場合に対して、 l_c の値をそのまま用いてよいかが問題となる。

そこで本研究では、ひびわれ間隔を変化させた場合の有限要素法による温度ひびわれ幅解析結果および壁状構造物の実物大の実験結果[2]と、C P ひびわれ幅法によるひびわれ幅の解析結果とを比較することにより、解析および実測との比較の両方から、ひびわれ間隔がひびわれ影響領域 l_c の値に与える影響について検討することを目的とした。

2. C P ひびわれ幅法と有限要素法による温度ひびわれ解析との比較

ここでは、森本らが行った離散型ひびわれモデルを導入した有限要素法[3]によるひびわれ間隔を変化させた場合のひびわれ幅の解析結果に対して、C P ひびわれ幅法のひびわれ幅の解析結果が一致するようなパラメータ l_c の値を求めることにより、ひびわれ間隔がひびわれ影響領域 l_c の値に与える影響について検討する。

2. 1 解析モデルおよび解析条件

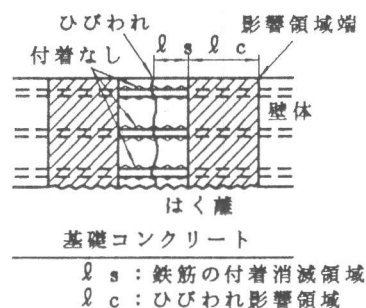


図-1 C P ひびわれ幅法の基本モデル

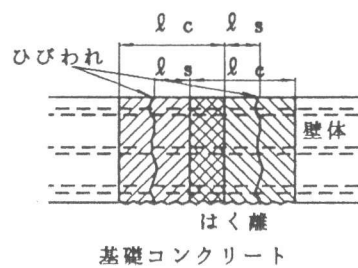


図-2 ひびわれ影響領域の重複

解析の対象とした構造物は、図-3に示すような壁状構造物である。本構造物は、強固な岩盤上にある厚さ1.5mの基礎フーチングに打込まれた厚さ0.6m、高さ2m、長さ18mの鉄筋コンクリート壁である。なお、壁部の全断面に対する鉄筋比を0.4%としている。解析

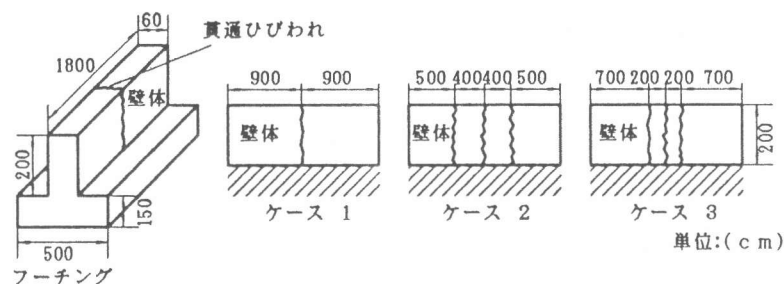


図-3 解析対象構造物および解析ケース

ケースとしては、図-3に示すように壁体中央部に貫通ひびわれが1本生じた場合と3本生じた場合で、3本の場合はその間隔が400 cmおよび200 cmの合計3ケースである。図-4に二次元有限要素法温度解析およびCPひびわれ幅法に用いた要素分割および境界条件を示す。解析においては、構造物の対称性を考慮し、断面の1/2を解析モデルとした。また、境界条件としては、側壁部表面およびフーチング上面を熱伝達境界とし、フーチング側面、底面および側壁中心断面を断熱境界とした。解析条件としては、森本らが行った解析と同じ条件を用いた。なお、その解析条件を表-1に示す。解析においては、フーチングは打込み後1ヶ月以上経過したもので発熱はしないものとし、弾性係数は $3.0 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ で一定とした。壁体の力学的特性値は、土木学会「コンクリート標準示方書」に記載されている有効弾性係数係数および引張強度を用いた[4]。こ

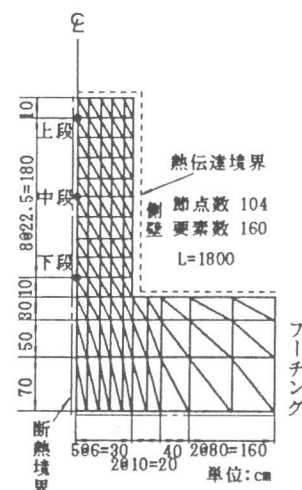


図-4 要素分割図

こで用いる91日の圧縮強度は 240 kgf/cm^2 とした。また、岩盤の影響に対して外部拘束係数を用いるが、著者らが提案した壁状構造物に対する外部拘束係数の修正法を用い、 $R_N = 1.00$ 、 R_M （ピーク前）=1.13、 R_M （ピーク後）=2.76とした[5]。ひびわれは、壁体の中央断面の温度ひびわれ指数が1.0以下となった場合に発生するものとした。また、鉄筋の付着消滅領域 ℓ_s の値は20 cmとした。 ℓ_c / ℓ_s については、ひびわれ発生時は $\ell_c / \ell_s = 10$ とし、ひびわれ発生後を $(\ell_c / \ell_s)_t = 2$ として、ひびわれ発生時と区別すると報告されている[6]。これは、2本目以降のひびわれの影響で、ひびわれ影響領域 ℓ_c が変化するとの考えからである。ところが、本解析では3本のひびわれは同材令で発生するものとし、ひびわれ発生後は他のひびわれは発生しないとの仮定より、ひびわれ発生時の ℓ_c / ℓ_s で複数ひびわれの影響を考慮し、 $(\ell_c / \ell_s)_t$ にも同じ値を用いた。

表-1 解析条件

比熱	0.22 kcal/kg℃
熱伝導率	0.02 kcal/cmh℃
熱伝達率	0.001 kcal/cm ² h℃
密度	0.00230 kg/cm ³
初期温度	20℃
外気温度	10℃
単位セメント量	300 kg/m ³
断熱温度上昇式	$0(t) = 40 \times (1 - e^{-0.0000t})$
線膨張係数	$10 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
設計強度	240 kgf/cm ² (91日)
コンクリートの弾性係数	示方書に準ずる
フーチングコンクリートの弾性係数	$3.0 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$
引張強度	示方書に準ずる
ひびわれ発生条件	ひびわれ指数が1.0以下
鉄筋の弾性係数	$2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$
鉄筋比	0.4%
鉄筋の付着消滅領域 ℓ_s	20 cm
外部拘束係数	$R_N = 1.0$
	R_M (ピーク前) = 1.13
	R_M (ピーク後) = 2.76

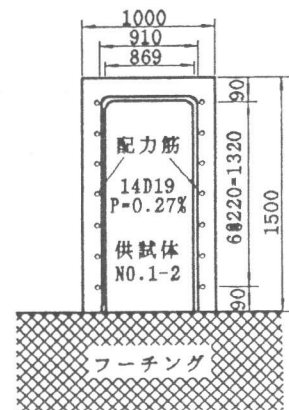
2. 2 解析結果および考察

表-2 に森本らが行った有限要素法によるひびわれ幅の解析結果と、CP ひびわれ幅法による解析結果およびその解析に用いた ℓc の値を示す。なおひびわれ幅の比較は、図-4 に示す上中下段の3点について行い、ひびわれ発生時の値を対象とした。有限要素法によるひびわれ幅解析値は、下段より上段のほうが大きい。これに対して、CP ひびわれ幅法による解析値は、上中下段ともほぼ同じ値である。これは、有限要素法では壁体底面とフーチングが完全に付着しているものと考えているのに対して、CP ひびわれ幅法では、図-1 に示すようにひびわれ影響領域で壁体底面とフーチングが完全にはく離しているものと考えていることが原因である。これに対しては、台形のひびわれ影響領域を用いることによりCP ひびわれ幅法においても、フーチングと壁部の付着の程度を表現することができるが、簡単のため、図-1 に示すように矩形のひびわれ影響領域を用いた。ここでは、CP ひびわれ幅法による上中下段のひびわれ幅の平均値が、有限要素法によるひびわれ幅の平均値に一致するように ℓc を変化させた。ひびわれ本数が1本の場合、平均ひびわれ幅は0.22mmであり、 ℓc の値は149cmとなる。これに対して、3本のひびわれ間隔が400cm、200cmと狭くなるにつれて、平均ひびわれ幅は0.16mm、0.13mmと小さくなり、 ℓc の値を104cm、91cmと低減させていくことによりひびわれ幅の平均値を一致させることができる。これは、ひびわれ間隔が狭くなることによりひびわれ影響領域が重複し、互いに干渉し合うことが原因と考えられる。

表-2 ひびわれ幅解析結果

		有限要素法	CP ひびわれ幅法	ℓc (cm)
ケース 1 ひびわれ1本 ひびわれ間隔 900 cm	上段	0.32	0.19	149
	中段	0.27	0.22	
	下段	0.06	0.25	
	平均	0.22	0.22	
ケース 2 ひびわれ3本 ひびわれ間隔 400 cm	上段	0.31	0.13	104
	中段	0.21	0.16	
	下段	0.05	0.19	
	平均	0.16	0.16	
ケース 3 ひびわれ3本 ひびわれ間隔 200 cm	上段	0.17	0.11	91
	中段	0.18	0.14	
	下段	0.05	0.17	
	平均	0.13	0.14	

ひびわれ幅の単位: mm



単位: mm

図-5 供試体の断面形状

3. 壁状構造物の温度ひびわれ実験結果との比較

ここでは、ひびわれ幅を詳細に計測した壁状構造物の実物大の実験結果とCP ひびわれ幅法のひびわれ幅の解析結果とを比較し、解析結果が実験結果に近くなるような解析パラメータ ℓc の値を求めることにより、ひびわれ間隔がひびわれ影響領域 ℓc の値に与える影響について検討する。

3. 1 解析対象構造物、実験条件および実験結果

解析の対象とした構造物は、文献に記載されている合計16ケースのひびわれ供試体である[2]。供試体は、砂地盤上にある

表-3 実験条件および実験結果 (シリーズ 2)

供試体	鉄筋比 (%)	ひびわれ 本数	ひびわれ 間隔 (m)	測定時間 位置	発生時間 (時間) 幅 (mm)					鉄筋応力度		温度 上昇 (℃)	温度 降下 (℃)
					W ₁	W ₂	W ₃	W ₄	W ₅	上段	中段		
NO.1-2	0.27	1	7.75,7.75	発生	—	—	174	—	—	—	2436	24.2	28.3
				上段	—	—	0.48	—	—				
				中段	—	—	0.37	—	—				
NO.3-2	0.65	4	5.1,0.8 1.9,5.6 1.6	発生	241	171	171	171	292	—	1029	26.5	33.4
				上段	0.03	0.12	0.16	0.04	—				
				中段	0.06	0.08	0.10	0.05	0.06				

各測定値は材令14日の東西両面の平均値

W₁, W₂, W₃, W₄, W₅

測定時間は打設終了後からの時間で材令に一致している。

幅5m、長さ15m、厚さ1.5mの基礎フーチングに打込まれた鉄筋コンクリート壁である。供試体の形状としては、シリーズ1では、厚さ0.3m、高さ1m、長さ15mであり、シリーズ2では厚さ1.0m、高さ1.5m、長さ15mである。その1例として、図-5に供試体N0.1-2(シリーズ2)の断面形状を示す。また、表-3に供試体N0.1-2とN0.3-2の実験条件および実験結果を示す。N0.1-2では、ひびわれ本数は供試体中央に1本のみであり、ひびわれ幅は上段で0.48mmとかなり大きい。これに対して、N0.3-2では、材令171時間で3本のひびわれ幅が同時に発生し、そのひびわれ幅は上段で0.12、0.16、0.04mmと小さい値を示している。また、この3本のひびわれ間隔も1.9、1.6mと小さい。他の供試体においても特に、複数のひびわれが狭いひびわれ間隔で発生する場合には、1本のみの貫通ひびわれのひびわれ幅に対して、比較的ひびわれ幅は小さい。

3. 2 解析モデルおよび解析条件

図-6に、二次元有限要素法温度解析およびCPひびわれ幅法に用いた解析モデル(シリーズ2)の1例を示す。解析においては、構造物の対称性を考慮し、断面の1/2を解析モデルとした。次に、境界条件としては、側壁部表面およびフーチング上面を熱伝達境界とし、フーチング側面、底面および側壁中心断面を断熱境界とした。また、解析条件の1例として、表-4に供試体N0.1-2(シリーズ2)の解析条件を示す。解析においては、フーチングは打込み後1ヶ月以上経過したもので発熱はしないものとし、弾性係数は $3.0 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ で一定とした。また、初期温度、外気温度、線膨張係数、側壁部コンクリートの弾性係数、圧縮強度および引張強度は実測値を基に定めた。なお、若材令時のクリープの影響を考慮して、材令3日までは、コンクリートの弾性係数を実測値の5~7割とした。

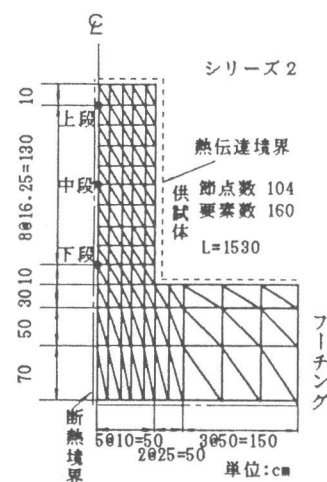


図-6 要素分割図

表-4 解析条件 N0.1-2(シリーズ2)

比熱	0.22 kcal/kg℃
熱伝導率	0.02 kcal/cmh℃
熱伝達率	0.0008 kcal/cm ² h℃
密度	0.0023 kg/cm ³
初期温度	16.25 ℃
外気温度	15 ℃
単位セメント量	320 kg/m ³
断熱温度上昇式	$Q(t)=72.0 \times (1-e^{-0.030t})$
線膨張係数	$5.46 \times 10^{-6} / \text{℃}$
弾性係数 (28日)	$3.0 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$
圧縮強度 (28日)	280 kgf/cm ²
引張強度 (28日)	23 kgf/cm ²
弾性係数 (フーチング)	$3.0 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$
ひびわれ発生条件	ひびわれ指数が1.0以下
鉄筋比	$P_s=0.27 \%$
鉄筋の弾性係数	$2.1 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$
外部拘束係数	$R_N=0.03$
	R_M (ピーク前)=0.60
	R_M (ピーク後)=1.10
ℓs	18 cm
ℓc/ℓs	10
ℓc/ℓs (ひびわれ後)	10
ℓc	180 cm
ひびわれ本数	1 本
ひびわれ間隔W/壁高さH	4.83, 5.17 (平均 5.00)

3. 3 実験値と計算値の比較および考察

実験値と解析値の比較の例として、シリーズ2のN0.1-2とN0.3-2の温度経時変化、応力経時変化、鉄筋ひずみ経時変化およびひびわれ幅経

時変化を図-7～図-14に示す。ここで、コンクリート温度の比較は供試体断面内の平均温度を用い、コンクリート応力、鉄筋ひずみおよびひびわれ幅は、中段のみ比較の対象とした。図-7および11に示すように、コンクリート温度は実測値と解析値とで良好な一致を示している。また、図-8および12に示すように、コンクリート応力はひびわれ発生材令までは、実測値と解析値は比較的良好に一致している。一方、ひびわれ発生後は、急激に応力の解析値が減少するが、これはひびわれによる応力緩和が原因である。ところで、解析値に対して実測値の応力が大きい、これは応力の測定位置がひびわれ断面から離れているため、ひびわれによる影響が少なかったと考えられる。次に、鉄筋ひずみおよびひびわれ幅については、図-9および10に示すように、供試体NO.1-2の解析値と実測値は比較的良好に一致している。また、図-13および14に示すように、NO.3-2についても、ひびわれの発生材令は1日のずれはあるものの、ひびわれ幅については、実測値と解析値は比較的良好に一致している。また、他の供試体についても同様な結果が得られた。このようにして、ひびわれ幅の実測値と解析値とが良好な一致を示す時に用いた解析パラメータ βc の値を、表-5に示す。表に示すように、ひびわれ間隔が325cm以上では βc は約180cmとほぼ一定の値を示す。これに対して、ひびわれ間隔が300、170cmと小さくなる場合は、 βc の値を138.6、90cmと低減させることにより、実測値と解析値が一致することがわかる。これも、有限要素法との比較の場合と同様に、ひびわれ間隔が狭くなることにより

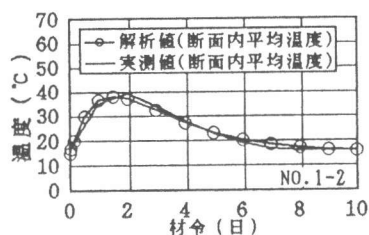


図-7 温度経時変化 (NO.1-2)

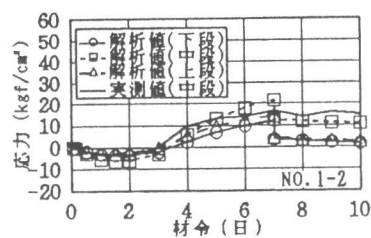


図-8 応力経時変化 (NO.1-2)

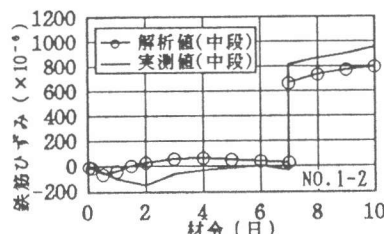


図-9 鉄筋ひずみ (NO.1-2)

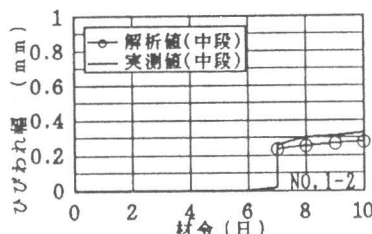


図-10 ひびわれ幅 (NO.1-2)

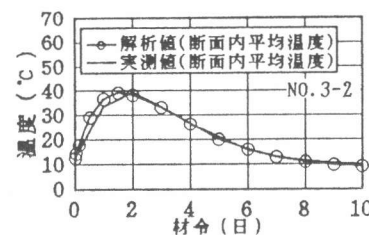


図-11 温度経時変化 (NO.3-2)

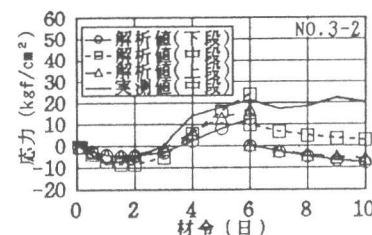


図-12 応力経時変化 (NO.3-2)

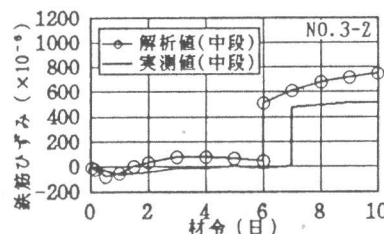


図-13 鉄筋ひずみ (NO.3-2)

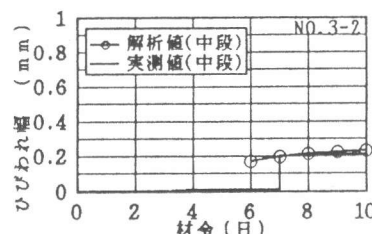


図-14 ひびわれ幅 (NO.3-2)

表-5 解析結果

供試体	W	βc	供試体	W	βc
NO.1-1(1)	350	180	NO.3-5(1)	300	138.6
NO.1-2(1)	750	180	NO.3-6(1)	200	90
NO.1-3(1)	750	54	NO.3-7(1)	190	90
NO.1-4(1)	320	162	NO.4-10(1)	325	180
NO.2-8(1)	175	90	NO.1-2(2)	500	180
NO.2-9(1)	170	90	NO.2 (2)	207	135
NO.2-11(1)	525	180	NO.3-2(2)	116	99
NO.3-1(1)	355	180	NO.4 (2)	134	108

() 内はシリーズ W: ひびわれ間隔 (平均値) 単位: cm

同様な結果が得られた。このようにして、ひびわれ幅の実測値と解析値とが良好な一致を示す時に用いた解析パラメータ βc の値を、表-5に示す。表に示すように、ひびわれ間隔が325cm以上では βc は約180cmとほぼ一定の値を示す。これに対して、ひびわれ間隔が300、170cmと小さくなる場合は、 βc の値を138.6、90cmと低減させることにより、実測値と解析値が一致することがわかる。これも、有限要素法との比較の場合と同様に、ひびわれ間隔が狭くなることにより

ひびわれ影響領域が重複し、互いに干渉し合うことが原因と考えられる。

4. ひびわれ間隔と応力緩和領域との関係

有限要素法との比較および実測値との比較により得られた結果をまとめて図-15に示す。一般に壁が高くなるほどひびわれ間隔は大きくなる傾向が見られるため、ここではひびわれ間隔 W と壁高さ H の比 W/H として横軸

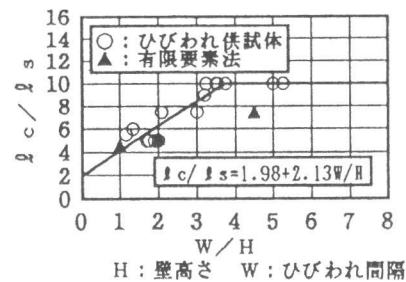


図-15 W/H と l_c / l_s の関係

にとる。また、 l_c / l_s を縦軸にとる。この図に示すように、多少のばらつきはあるものの、有限要素法および実測値はいずれも同じ傾向を示し、 W/H がほぼ3.5以上では $l_c / l_s = 10$ であり、 W/H が3.5から小さくなるにしたがって、 l_c / l_s は減少する。すなわち、 W/H が3.5以下では W/H と l_c / l_s は、ほぼ比例関係となり、 W/H が小さくなるほど l_c / l_s の値は低減されることがわかる。 W/H が3.5以下で1次回帰分析した結果は、以下のとおりである。

$$l_c / l_s = 1.98 + 2.13W/H \quad (\text{相関係数} = 0.778) \quad (1)$$

すなわち、ひびわれ間隔 W と壁高さ H との比 W/H が3.5以上の場合は、 $l_c / l_s = 10$ とし、また、 W/H が3.5以下の場合は、(1)に示す回帰式より得られた l_c / l_s の値を用いることにより、温度ひびわれ幅をより精度よく推定できる見通しが得られた。

5. まとめ

本研究で得られた結果を要約すると以下のとおりである。

- 1) CPひびわれ幅法を用いた温度ひびわれ幅の推定において、ひびわれ間隔が小さくなるほどひびわれ影響領域が重複することにより、 l_c の値を低減することの必要性が認められた。
- 2) ひびわれ間隔 W と壁高さ H との比 W/H が3.5以下のときは、式(1)より得られた l_c / l_s の値を用いることにより、温度ひびわれ幅をより精度よく推定できる見通しが得られた。

本研究は、実際に発生した複数の温度ひびわれを対象として、そのひびわれ幅を解析する際に必要となる l_c の値について検討したものである。したがって、設計においてひびわれ幅の予測を行う場合は、ひびわれ本数が未知数となるため W/H と l_c / l_s の関係を用いることはできない。しかし、温度ひびわれ幅はひびわれの本数が少なくなればそれだけ大きくなる傾向にあるため、最大ひびわれ幅を予測する場合において、壁の長さ L が壁高さ H の約3.5倍以内の比較的短い壁状構造物に対しては、 W を L に置きかえることにより式(1)を適用することが可能となる。今後はこのように、CPひびわれ幅法を設計に用いる場合の検討を行っていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 賀茂友裕、田辺忠願：マスコンクリートの温度ひびわれ幅算定法に関する研究、コンクリート工学年次講演論文集11-1、1989、pp. 457-462
- 2) JCI、ひびわれ調査研究委員会：マスコンクリートのひびわれ制御指針、JCI、1986
- 3) 横井謙二、森本博昭、小柳 治：有限要素法による温度ひびわれ幅算定法に関する研究、コンクリート工学年次講演論文集、1990、pp. 115-122
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書（施工編）、1991・10
- 5) 梅原秀哲、今井智満：CL法およびCP法における外部拘束係数に関する研究、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、1990・8、pp. 123-132
- 6) 高辻 康、梅原秀哲、田辺忠願：拡張CP法によるマスコンクリートのひびわれ幅の解析、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、1990・8、pp. 81-90