

# 論文 壁状構造物の応力緩和状態を考慮した温度ひび割れ幅解析

服部 鋭啓\*1・上原 匠\*2・梅原 秀哲\*3

要旨：壁状構造物の温度ひび割れ幅を精度よく推定することを目的に、CPひび割れ幅法への台形モデルの適用を試みた。台形モデルの応力解放領域を定量的に表す方法がないため、3次元有限要素法を用いて推定を行った。さらに、その結果を基に台形モデルを用いたCPひび割れ幅法での解析を行い、実構造物を対象とした適用性について検討を行った。その結果、壁部に発生するひび割れによる応力解放領域は下部から上部にかけて大きくなるのが解析より明らかになった。また、台形モデルを適用した場合従来の矩形モデルに比べてひび割れ幅を精度よく解析できることが明らかになった。

キーワード：応力解放領域、3次元有限要素法、CPひび割れ幅法

## 1. はじめに

壁状構造物においては、セメントの水和熱による温度ひび割れが壁部に発生する場合はしばしば見られる。この場合、ひび割れ幅は壁下部では小さく上部へいくほど大きくなっていることが多い。このような壁部に発生するひび割れ幅をJCIマスコンクリート温度応力研究委員会で開発されたCPひび割れ幅法〔1〕を用いて解析を行うと、壁の高さ方向へのひび割れ幅の分布を厳密に解析できない場合がある。この原因として、ひび割れの発生によりひび割れ付近のコンクリートの応力が緩和される領域（応力解放領域）を簡略的にモデル化していることが考えられる。すなわち、実際にはこの応力解放領域は壁下部では小さく上部へ行くにしたがって大きくなる台形型であるのに対し、解析では応力解放領域を下部と上部が同じ大きさである矩形モデルを採用しているためである。

本研究では、応力解放領域に矩形モデルと比べ実際の挙動に近い台形モデルを適用して、CPひび割れ幅法（以下、台形CPひび割れ幅法）〔1〕での解析を行った。この場合、台形モデルの応力解放領域が定量的に把握されていないため、実験〔2〕が行われた壁状供試体を対象とし、3次元的な応力の分布性状を把握できる3次元有限要素法〔3〕を用いた解析結果から、ひび割れの発生による応力緩和状態の把握を行った。その結果を基に応力解放領域を定め、台形CPひび割れ幅法を用いてひび割れ幅の解析を行い適用性を検討した。

## 2. 実験概要

実験は図-1に示す小型化された高さ40cm幅10cmの壁状供試体で行われた。この供試体は壁厚が薄く、

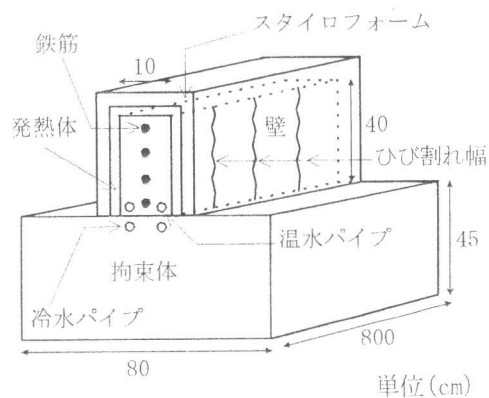


図-1 供試体

- \*1 名古屋工業大学大学院 工学研究科社会開発工学専攻 (正会員)
- \*2 名古屋工業大学講師 工学部社会開発工学科、工博 (正会員)
- \*3 名古屋工業大学教授 工学部社会開発工学科、Ph.D. (正会員)

セメントの水和熱の発生による温度が逃げ易いため、水和熱の代わりにヒーター（面状発熱体）で加熱・保温して外部から温度をコントロールしている。その際の計画温度履歴を図-2に示す。面状発熱体は片面だけに張り付けてあるため1~2℃の温度差が生じたが、断面内の温度はほぼ一定であった。ひび割れ幅に影響する壁部の配筋筋は、無筋、D6、D13およびD25の4通りの供試体を考え、いずれの供試体も上下10cm間隔で配筋された。

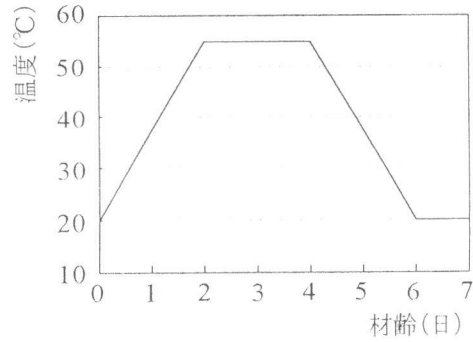


図-2 計画温度履歴

### 3. 解析手法

#### 3.1 3次元有限要素法

応力およびひび割れ幅解析は、長手方向の温度は一定とした。ひび割れモデルは図-3に示す離散型ひび割れモデルを用い、ひび割れ発生位置にあらかじめ二重節点を設けた。この2つの節点は、ひび割れ発生前は大きな力で連結されており、ひび割れ節点まわりの応力が引張強度を超えたときに2つの要素を結合していた力は0となる。このときに、ひび割れが発生すると考え、ひび割れ幅はこの2つ節点の相対的変位で表す。

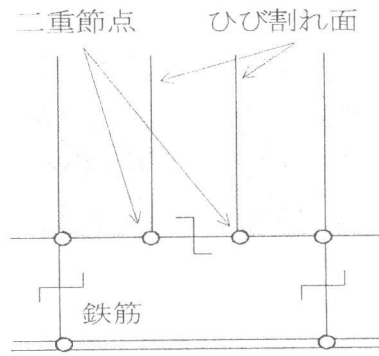


図-3 ひび割れモデル

#### 3.2 台形CPひび割れ幅法

図-4に示す台形モデルにおけるコンクリートひずみ $\Delta \epsilon_c$ と鉄筋ひずみ $\Delta \epsilon_s$ の求め方を以下に示す。図-4のようにデカルト座標 $(x, y)$ と一般座標 $(\xi, \eta)$ を定めるとデカルト座標と一般座標の関係は

$$\begin{aligned} x &= N_1(\xi, \eta)x_1 + N_2(\xi, \eta)x_2 + N_3(\xi, \eta)x_3 + N_4(\xi, \eta)x_4 \\ y &= N_1(\xi, \eta)y_1 + N_2(\xi, \eta)y_2 + N_3(\xi, \eta)y_3 + N_4(\xi, \eta)y_4 \end{aligned} \quad (1)$$

$$N_1 = \frac{1}{4}(1-\xi)(1+\eta), N_2 = \frac{1}{4}(1-\xi)(1-\eta), N_3 = \frac{1}{4}(1+\xi)(1-\eta), N_4 = \frac{1}{4}(1+\xi)(1+\eta)$$

とおける。すなわち、

$$x = N_3(\xi, \eta)l_{cb} + N_4(\xi, \eta)l_{cu} \quad y = N_1(\xi, \eta)h + N_4(\xi, \eta)h \quad (2)$$

となる。また、節点③、④は固定とし、節点①、②がひび割れの発生によって変位すると考え、それぞれの変位を $u_1$ 、 $u_2$ とする。この時、任意の点の変位 $u$ は次式で表される。

$$u = N_1(\xi, \eta)u_1 + N_2(\xi, \eta)u_2 \quad (3)$$

したがって、任意のコンクリートのひずみ $\Delta \epsilon_c$ は

$$\Delta \epsilon_c = \Delta \epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial u}{\partial \xi} \times \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial \eta} \times \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad (4)$$

となる。ここに、

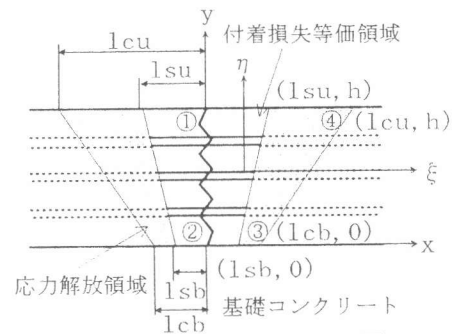


図-4 応力解放領域

$$\frac{\partial x}{\partial x} = 1 = \left( \frac{\partial N_3}{\partial \xi} \times \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\partial N_3}{\partial \eta} \times \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) \times l_{cb} + \left( \frac{\partial N_4}{\partial \xi} \times \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\partial N_4}{\partial \eta} \times \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) \times l_{cu} \quad (5)$$

$$\frac{\partial y}{\partial x} = 0 = \left( \frac{\partial N_1}{\partial \xi} \times \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\partial N_4}{\partial \xi} \times \frac{\partial \xi}{\partial x} \right) \times h + \left( \frac{\partial N_1}{\partial \eta} \times \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial N_4}{\partial \eta} \times \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) \times h \quad (6)$$

より、

$$\frac{\partial \xi}{\partial x} = \frac{4}{l_{cb} + l_{cu} + \eta(l_{cu} - l_{cb})}, \quad \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

となり、式(4)より $\Delta \varepsilon_c$ が求まる。

次に、鉄筋のひずみ $\Delta \varepsilon_s$ を求める。上部( $\eta = +1$ )と下部( $\eta = -1$ )のひずみは式(2)から

$$l_{su} = \frac{2}{4}(1 + \xi) \times l_{cu} \quad (\text{上部}) \quad l_{sb} = \frac{2}{4}(1 + \xi) \times l_{cb} \quad (\text{下部}) \quad (8)$$

となり

$$\xi = 2 \times \frac{l_{su}}{l_{cu}} - 1 \quad (\text{上部}) \quad \xi = 2 \times \frac{l_{sb}}{l_{cb}} - 1 \quad (\text{下部}) \quad (9)$$

となる。したがって、任意の一般座標 $\xi^*$ は

$$\xi^* = \left( 2 \times \frac{l_{su}}{l_{cu}} - 1 \right) \times \frac{y}{h} + \left( 2 \times \frac{l_{sb}}{l_{cb}} - 1 \right) \times \frac{h - y}{h} \quad (10)$$

すなわち、

$$u = N_1(\xi^*, \eta) \times u_1 + N_2(\xi^*, \eta) \times u_2 \quad (11)$$

よって、

$$\Delta \varepsilon_s = \frac{l_c}{l_s} \left[ N_1(\xi^*, \eta) \times u_1 + N_2(\xi^*, \eta) \times u_2 \right] \quad (12)$$

以上のように $\Delta \varepsilon_c$ 、 $\Delta \varepsilon_s$ が求められれば、以下は矩形モデルと同様にひび割れ幅を求めることができる。

#### 4. 解析概要および結果

##### 4.1 矩形CPひび割れ幅法

応力解放領域に矩形モデルを用いてCPひび割れ幅法で解析を行った。表-1に解析条件を示す。また、温度は計画温度を用い、断面内の温度は一定とした。図-5にD13の供試体の高さ方向のひび割れ幅の分布を示す。ここで、矩形モデルにおける応力解放領域 $l_c$ は、後に示す台形モデルに用いた値を平均化した値とし、付着損失等価領域 $l_s$ は、ひび割れ幅に大きな影響を与えるため5cm、10cm、20cmの3通りとした。なお、CPひび割れ幅法は、奥行き長さの中央にひび割れが生じる条件で解析を行うため、複数のひび割れが生じる場合は、奥行き長さを変える必要がある。

表-1 解析条件

熱膨張係数	( $^{\circ}\text{C}$ )	0.00001		
圧縮強度	( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	30t/(4.5+0.95t)		
引張強度	( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	0.44 $\times\sqrt{f_c}$ (t)		
弾性係数	( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	4740 $\times\sqrt{f_c}$ (t)		
付着損失等価領域(cm)		5	10	20
応力解放領域	(cm)	35	38	43
外部拘束係数	$R_N$	0.851		
	$R_{M1}$	0.646		
	$R_{M2}$	2.677		

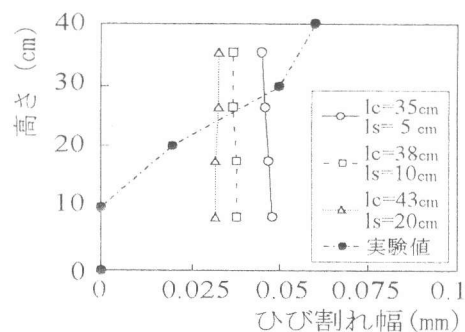


図-5 矩形モデル (D13)

ここでは、ひび割れが複数生じているため、奥行き長さをひび割れ間隔とした。壁下部のひび割れ幅は実験結果より大きく安全側に評価しているが、上部のひび割れ幅は危険側の評価となった。これは、ひび割れ発生に伴いひび割れ付近の応力は緩和されるが、壁状構造物の場合、拘束体付近では応力緩和が小さく拘束体から離れるに従って大きくなるためである。しかし、矩形モデルでは、応力解放領域が壁の下部も上部も同じで応力緩和を充分表現できないため適用限界が生じ、台形CPひび割れ幅法での推定が必要と思われる。

#### 4. 2 3次元有限要素法

ひび割れの発生による壁部の応力の緩和を把握するために3次元有限要素法（以下、3次元解析）を用いた。解析条件は矩形モデルと同様とし、付着損失等価領域は5 cm、10cm、20cmの3通りとした。また、3次元解析では、ひび割れの発生箇所にあらかじめひび割れ要素を複数設定できるため、ひび割れ本数は実験で生じたひび割れ本数と同じとし、無筋の供試体においては3本、D13の供試体においては6本とした。図-6、図-7にそれぞれ3次元解析を用いた無筋およびD13の供試体の高さ方向のひび割れ幅の分布の一例を示す。無筋の供試体においては、解析上鉄筋要素を設定していないため、鉄筋の付着損失等価領域による違いはみられずほぼ同一となった。D13の供試体においては、鉄筋の付着損失等価領域が大きくなるほどひび割れ幅が大きくなった。また、ひび割れは壁の下部で小さく上部へいくほど大きくなっており、実験結果とほぼ一致した。次に、図-8、図-9に無筋およびD13の供試体の長手方向のひび割れ発生後のコンクリートの応力分布を示す。ここで、本解析においては応力分布は鉄筋の付着損失等価領域の影響を受けなかったため、一例として10cmにおける解析結果を示す。壁の下部ではひび割れの付

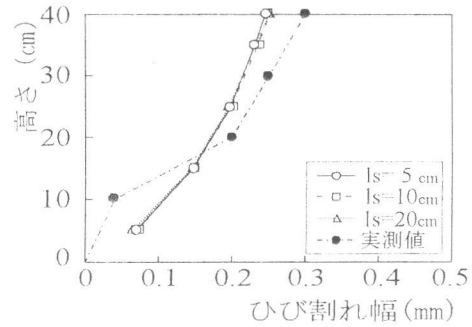


図-6 3次元解析（無筋）

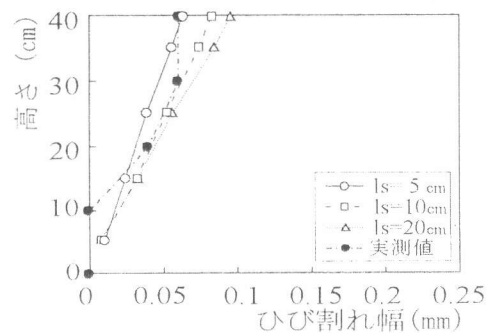


図-7 3次元解析（D13）

びD13の供試体の高さ方向のひび割れ幅の分布の一例を示す。無筋の供試体においては、解析上鉄筋要素を設定していないため、鉄筋の付着損失等価領域による違いはみられずほぼ同一となった。D13の供試体においては、鉄筋の付着損失等価領域が大きくなるほどひび割れ幅が大きくなった。また、ひび割れは壁の下部で小さく上部へいくほど大きくなっており、実験結果とほぼ一致した。次に、図-8、図-9に無筋およびD13の供試体の長手方向のひび割れ発生後のコンクリートの応力分布を示す。ここで、本解析においては応力分布は鉄筋の付着損失等価領域の影響を受けなかったため、一例として10cmにおける解析結果を示す。壁の下部ではひび割れの付

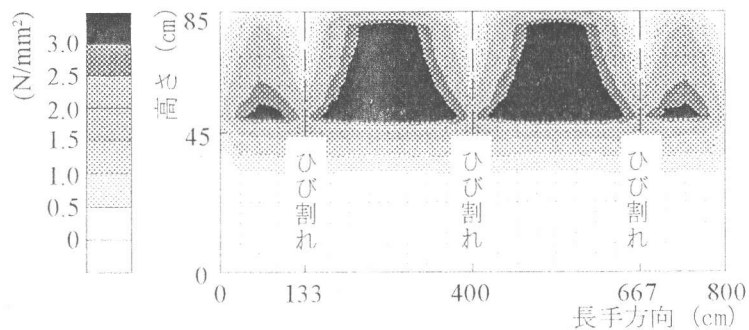


図-8 応力分布（無筋  $l_s=10\text{cm}$ ）

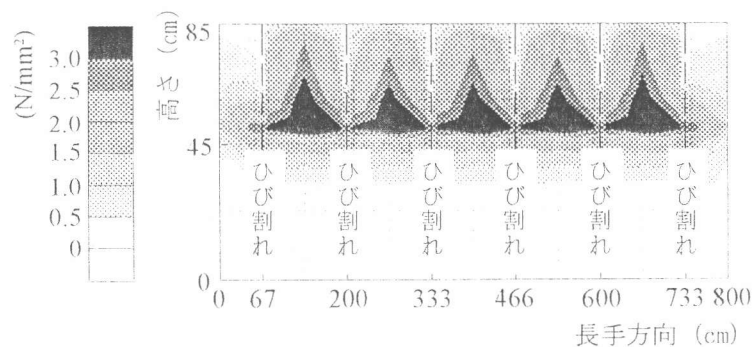


図-9 応力分布（D13  $l_s=10\text{cm}$ ）

近でも大きな応力が存在しているのに対し、壁の上部では下部と比べ応力は小さく、ひび割れの発生による応力の緩和が大きいことがわかる。これは、下部においては基礎コンクリートから拘束を受けるのに対し、上部ではこの拘束が小さいためである。また、応力はひび割れの付近では小さくなっており、ひび割れから離れるにしたがって大きくなっている。ここで、無筋の供試体において、ひび割れから離れた箇所に引張強度より大きな応力が生じているにも関わらずひび割れが発生していないのは、本解析において設定した3本のひび割れ要素以外の箇所では解析上ひび割れが発生しないためである。この大きな応力が、無筋の供試体では壁の上部でも存在しているが、D13の供試体では壁の上部では存在していない。これは、D13の供試体では上部で隣のひび割れによる応力解放領域が重なり合っているためと考えられる。すなわち、ひび割れ間隔が小さいため互いに応力解放領域は干渉し合っている。以上より、応力解放領域の上部の大きさは、無筋の供試体で約100cm、D13の供試体はひび割れ間隔の1/2の66cmと推測される。ここで、マスコンクリート温度応力研究委員会では矩形モデルにおける応力解放領域を定める時、ひび割れ間隔と高さの比  $L/H < 3.75$  の時は応力解放領域が互いに干渉するとしている。本実験において、無筋およびD13の供試体のひび割れ間隔はそれぞれ267cm、133cmであり、 $L/H$ はそれぞれ6.6 ( $> 3.75$ )、3.33 ( $< 3.75$ )となり、このことと一致する。

#### 4. 3 台形モデル

3次元解析で求めた応力解放領域を用いて、台形CPひび割れ幅法で解析を行った。解析条件は矩形モデルと同様とした。また、鉄筋の付着損失等価領域を表す  $l_{su}$  と  $l_{sb}$  を設定する必要があるが、パラメータが多くなり煩雑になるため、 $l_{su} = l_{sb} (=l_s)$  として解析を行った。したがって、3次元解析と同様に5cm、10cm、20cmとした。奥行き長さは、矩形モデルと同様にひび割れ間隔とした。また、応力解放領域の下部の大きさは、式(12)より解析上  $l_c/l_s$  がパラメータとなっていることから、1.0、1.5、2.0の3通りとした。図-10にD13の供試体において  $l_{cu} = 66\text{cm}$  とし、 $l_c/l_s$  をパラメータとして解析を行った結果を示す。 $l_c/l_s = 1.0$  の時に下部のひび割れ幅は、他のケースより実験結果に近い値を示している。また、上部のひび割れ幅に与える影響は少なく、いずれの場合もほぼ同じ値を示した。このことから、次に、 $l_c/l_s = 1.0$  とし、 $l_s$  をパラメータとして解析を行った。図-11に  $l_{cu} = 100\text{cm}$  の時の無筋の供試体の解析結果および、図-12に  $l_{cu} = 66\text{cm}$  のとしたD13の試験体の解析結果を示す。無筋の供試体では付着損失等価領域による違いは見られなかった。また、上部のひび割れ幅は実験結果より大きく評価し

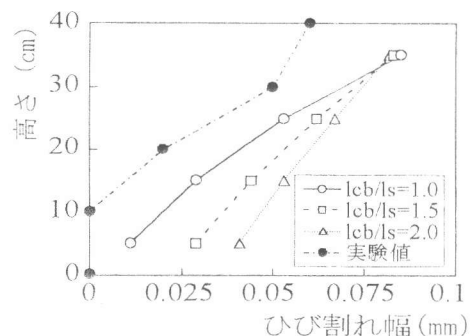


図-10 台形モデル ( $l_c/l_s$ の比較)

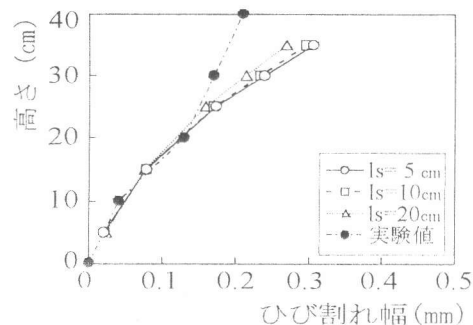


図-11 台形モデル (無筋)

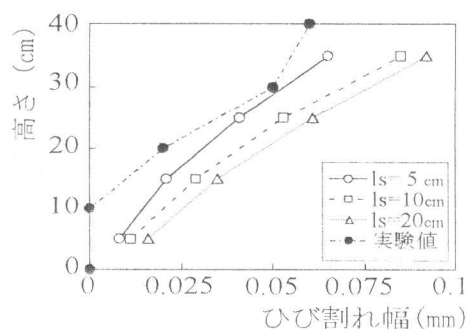


図-12 台形モデル (D13)

ているが、ほぼ一致していると言えよう。D13 の供試体は付着損失等価領域が大きくなるにつれてひび割れ幅も大きくなっており、上部へ行くほど付着損失等価領域の影響は大きくなっている。実験結果との比較を行うと、いずれの付着損失等価領域の場合も実験結果より大きく安全側に評価しているが、高さ方向のひび割れ幅の傾きはほぼ同じとなった。

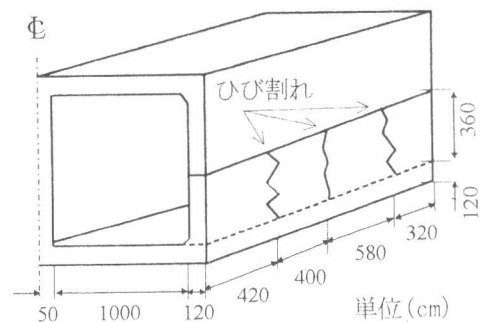


図-13 ボックスカルバート

## 5 実構造物への適用

得られた応力解放領域を基に、台形CPひび割れ幅法を用いて、実構造物での適用性について検討を行った。対象とした構造物は、図-13 に示す鉄筋コンクリートボックスカルバートであり、下床板、下壁部、上壁部およびスラブの3リフトに分けて施工された。ここで、ひび割れは下壁部に集中しているため、下壁部を対象として解析を行った。温度解析には2次元有限要素法を用いた。この時の $L/H=1.59 < 3.75$ より応力

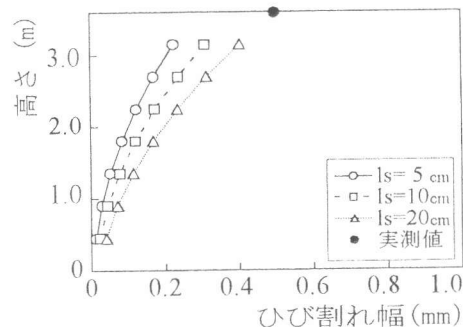


図-14 ひび割れ結果

解放領域は互いに干渉していると推測され、ひび割れ間隔の1/2の287cmと定めた。付着損失等価領域はこれまでと同様に5 cm、10cm、20cmとし、奥行き長さはひび割れ間隔として解析を行った。その結果を図-14に示す。ここで、実測結果のひび割れ幅は高さ方向の分布は計測されておらず、最大ひび割れ幅の計測が得られたことから、ひび割れ幅の最大値の比較を行った。実験結果の最大のひび割れ幅は0.5mmであるのに対して、解析結果の最大値は付着損失等価領域が5 cm、10cm、20cm、の時それぞれ0.22mm、0.31mm、0.40mmとなり、解析結果が若干小さくなった。これは、解析では鉄筋の配置してある場所で計測するため、壁の最上部までひび割れ幅を計測することができないためである。そこで、解析結果を壁の最上部まで延長していくと、今回対象とした構造物では、 $ls=20cm$ の時に実測値と最大ひび割れ幅は一致すると思われる。

## 6 まとめ

- (1) 3次元解析を行うことによって、高さ方向のひび割れ幅を精度よく把握でき、また、ひび割れの発生による応力解放領域は壁下部では小さく上部へ行くほど大きくなっていることが明らかになった。
- (2) 3次元解析から求めた応力解放領域を台形CPひび割れ幅法を適用することで従来の矩形CPひび割れ幅法と比べ、高さ方向のひび割れ幅をより精度よく推定できることが明らかになった。
- (3) ひび割れ間隔が小さいと上部の応力解放領域は干渉しあうため、台形CPひび割れ幅法においてひび割れ幅解析を行う場合ひび割れ間隔を考慮する必要があることが明らかになった。今後は、この領域が干渉しあうときのひび割れ間隔を、より一層明らかにする必要があると思われる。

### 参考文献

- [1] 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報告書 1992年
- [2] 山崎 敏敏：壁状マスコンクリート構造体の温度ひび割れに及ぼす鉄筋の影響に関する実験研究 日本建築学会構造系論文集 第470号 pp.1~10 1995年4月
- [3] 籠橋広文、森本博明、小柳治：壁体の3次元解析 コンクリート工学年次論文集 vol.16 No.1 pp.1359~1364