

論 文

[1078] 底面で連続拘束を受ける壁状マスコンクリート構造体の温度応力とひびわれに関する基礎実験と解析

正会員 山崎敏敏(鹿島建設技術研究所)

1. はじめに

マスコンクリートの温度ひびわれの検討に際し、ひびわれ幅の予測を行いたいことがある。以下は、このような場合のひびわれ幅の算定方法に関する試みである。

JCI ひびわれ制御委員会によるひびわれ制御指針(*1)の資料1(*2)に報告されている17体の試験体のうち鉄筋比をパラメーターにしたものでは、無筋の場合を含めて実施しているが、その結果は無筋の領域も含めて鉄筋比とひびわれ幅の関係が、図-1に示すように、鉄筋の増加とともに、ひびわれ幅が低減する傾向を示している。参考文献(*3)

なお本報告で述べるひびわれ幅の解析は全て無筋の場合のみである。無筋の場合を取り上げたのは、鉄筋比をパラメーターとして考えた場合に、無筋の場合のひびわれ幅が検討の基本に成り得るとの予測の下に、鉄筋量の効果を含めない場合をまず検討するためである。なお、既往のひびわれ幅予測式に関しては、若干の式が前記指針に紹介されているが、予測式の分母に鉄筋比の項を有するものでは鉄筋のない場合には使うことが出来ない。

解析の対象としては、初めに参考文献(*2)による大形マスコンクリート実験の試験体による結果にひびわれ幅解析法の適用を試み、次に筆者が実験した小型試験体による(*3)マスコンクリート実験に適用した。

解析の順序として、温度応力解析を行い、次いで、ひびわれ幅解析を実施した。

2. 応力解析

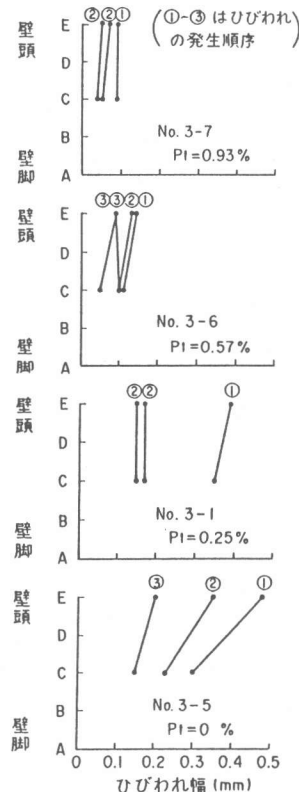
解析の方法は日本コンクリート工学協会のマスコンクリート温度応力研究委員会によって作られた温度応力解析プログラムを用い、ヤング係数に有効ヤング係数を用いることで若材令クリープの効果を考慮したものである。

2.1 ひびわれ制御指針の資料1の

No.3-5試験体に関する検討

2.1.1 解析対象とモデル

マスコンクリートのひびわれ制御指針(*1)の資料1(*2)に示されている17体の試験体のうち、無筋の試験体(試験体No.3-5)を解析の対象とした。なお残りの16体の試験体は全て有筋であり、本論文の検討対象から外した。図-1 ひびわれ幅上下方向分布と鉄筋量



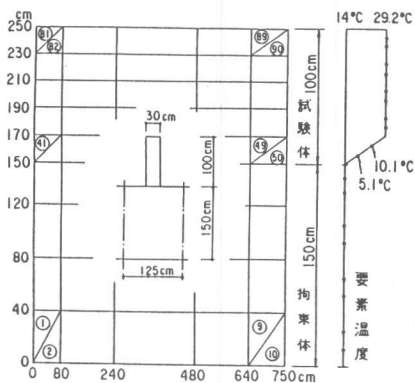


図-2 解析モデルと温度分布

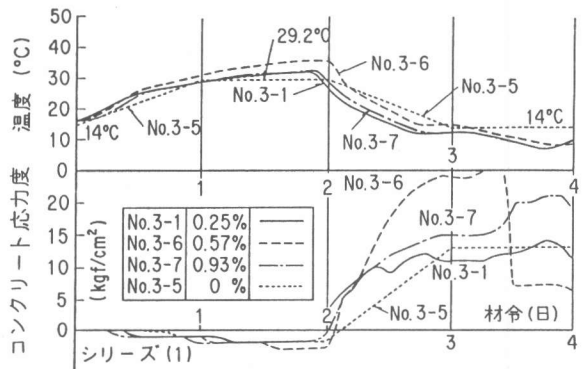


図-3 温度履歴と応力履歴

(No.3-5のみ温度は推定値、応力は解析値)

解析モデル図を図-2に示す。このモデルは、日本コンクリート工学協会マスコンクリート温度応力研究委員会によるマスコンクリートの温度・応力計算用パソコンプログラム(*4)のうち、FEM(2次元)温度応力解析用のものである。

2.1.2 インプットデータ

温度履歴を図-3に示す。原論文の図中には試験体No.3-5の温度履歴グラフが無かったが、試験体No.3-1, No.3-6, No.3-7は鉄筋量が異なるだけで、他の条件は試験体No.3-5と同一であるので、試験体No.3-5もこのような温度履歴をしたものと推定できる。このため、試験体No.3-5の温度履歴として図-3に点線で示す様なものを設定した。解析の簡単化のためにインプットデータは図中に示すように台形に設定してある。

断面の厚み方向の温度差は無いものとした。これは、試験体の両側面が断熱板で断熱してあり、厚み方向の温度差が小さくなっていると見なせるからである。断面内の上下方向の温度分布を図-2中に示す。上下方向の温度分布は、報告によると、壁の下部25cm程度が温度が低くそれより上の部分は一定であると述べられていることに基づき簡単化してある。

実験において、拘束体は、幅が5mあるが、拘束体の上に4体の同等試験体(鉄筋比が異なる)が乗り、同時に試験されるため拘束体の有効幅を全体の1/4とした。拘束体の温度は不明であるが、実験期間中変わらないものと仮定した。

ヤング係数は、ステップ毎の入力データで示すと表-1の通りである。これらの値は、マスコンクリートひびわれ制御指針の5.3.1の解説に基づいて求めた。すなわち、標準養生28日のコンクリート強度をもとに材令と強度の関係をひびわれ制御指針の図3.2-7(pp.68)の有効材令と強度との関係を示す係数を用いた。有効材令の評価も指針により下式を用いた。ヤング係数は指針に基づき圧縮強度から下式で求めた。

$$t_e = \sum (T + 10) / 30 \cdot \Delta t$$

$$T: ^\circ\text{C}, t_e, \Delta t: \text{day}$$

$$E_c = 1.53 \times 10^4 \sqrt{f_c'}$$

$$E_c, f_c': \text{kg/cm}^2$$

$$f_c'_{28} = 271 \text{ kg/cm}^2 \quad \text{標準養生28日強度}$$

ただし、クリープの効果を考慮して、上式で得た値を基に有効ヤング係数を設定した。この際、クリープ係数として材令 2日迄は $\phi=2$ ，以後を $\phi=0.5$ とした。ごく若材令の時のヤング係数は 0に近似させたが、解析の遂行上ゼロdivを避けるため表-1のような値とした。

線膨張係数は実験結果の値 $7.76\mu/\text{℃}$ を用いた。解析のステップは、表-1に示すように若材令で細かく、以後次第に粗く設定した。

表-1 応力計算入力データ(No.3-5)

step	t day	T ℃	fc' kg/cm ²	Ee kg/cm ²
0	0.0	14.0	0	-
1	0.25	17.8	0	1
2	0.5	21.6	0	2
3	0.75	25.4	26	26100
4	1	29.2	57	38600
5	1.5	29.2	95	49800
6	2	29.2	124	56800
7	3	14.0	153	126300
8	4	14.0	169	132500

2.1.3 解析結果とまとめ

解析の結果を前掲の図-3の下図中に点線で示す。試験体No.3-1, No.3-6, No.3-7の応力測定結果も図中に示し比較できるようにした。この結果から、解析結果は、大体よい一致を示したと云える。以上の解析から、入力データの設定は、上記の様な内容でほぼ満足すべき結果を得たと云える。

2.2 ミニマスコンクリートに関する実験と解析

壁高40cm、壁厚10cm、壁長8mのコンクリート試験体に、底面で連続拘束を与えながらマスコンクリートの温度履歴を与える実験を行った。詳細は既に文献(*3)で発表済である。これに上記と同様の解析を行い、応力履歴を求めた。重複発表を避けるため詳細は省略するが図-3に示した方法と同様にして解析を行った。なお、この実験では、応力測定はしていないので応力解析結果との比較は出来ない。

2.3 応力解析方法のまとめ

応力解析の結果から、全長モデルのFEMにより実測に近い応力が得られることが解った。すなわち、解析に用いる材料常数に上記の様な値を用い、解析の方法もJCI温度応力研究委員会によるFEMで妥当な応力値が得られた。以上の結果を、次章のひびわれ幅解析に利用した。

3. ひびわれ幅解析

無筋のマスコンクリート壁のひびわれ幅の算定をするにあたって、前述の図-2のようなFEMモデルを用い、壁長さをひびわれ間隔に設定しなおして、温度履歴を入力することで、応力・変位が求められる。壁端部の残留変位の2倍をひびわれ幅とする着想である。しかし、図-2に示すモデルのまま温度履歴を与えて計算すると、温度が打ち込み時の温度に復した時、端部変位はほとんど0となり、ひびわれ幅の解析方法として利用できない。一例を図-4に示す。

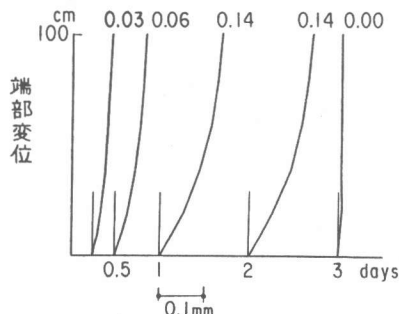


図-4 ひびわれ幅解析結果

試験体No.3-5について

(モデルを途中変更しない場合)

この原因は、ひびわれの発生した位置において昇温過程ではひびわれ発生以前のためひびわれの両側は連続しており、長手方向に圧縮応力が発生しているのに対し、解析上は自由端扱いとなっていて、圧縮応力が生じていない為である。応力履歴が異なり、またそれに伴うクリープ歪みが違うためである。

試験体全体長さをモデル化し、ひびわれ発生時刻以後はひびわれ位置の要素の特性を変えて解析を続けるような複雑・高級なプログラムも考えられるが、ここでは当面入手の簡単なプログラムツールによる開発を目指した。つまり、現場などにおいてパソコンを用いて出来る解析を考えたいものである。

ひびわれ解析には、さきの温度応力解析で得た応力をもとに、圧縮応力と引張応力の大きさから、応力ゼロ以降の温度降下量を按分して求め、これをもとにして、それまでの応力解析を正しいとし、それまで用いた全長モデルからひびわれ間隔でできる短いモデルに切り替えて、解析し、端部変位の2倍をひびわれ幅とするものである。

応力は、壁の中央位置の断面のもので代表させているので、ひびわれが中央より離れるに従ってこの計算の前提からずれる筈である。これは、誤差として、あらかじめ承認するものとしている。

3.1 No.3-5試験体のひびわれ幅解析

3.1.1 解析対象とモデル

応力解析に用いたものと同じである。ただし、上に述べたように、ひびわれ間隔をモデルの長さを選んである。No.3-5試験体ではひびわれが3ヶ所に生じているのでひびわれ間隔は試験体の全長の1/4となる。

モデルは、図-2に示すものの壁長さを短くしただけでメッシュ割は変更していない。

3.1.2 インプットデータ

温度差：高温安定温度から、放冷後の安定温度までの温度降下量を用いる。

ただし、高温域で発生していた圧縮応力をキャンセルする分だけ、温度差を低減している。低減の方法は、応力解析結果の圧縮分と引張分とから温度降下量を按分して求めたものである。つまり、材令2日から、3日へかけての温度降下分（15.2℃）を、圧縮応力キャンセル分と、引張応力発生分とに按分し引張分として、13.3℃の値を用い、経時解析とせず1ステップで解析をした。

ヤング係数：材令2、3日前後にひびわれが発生しているので、材令3日におけるヤング係数（E3）をコンクリートのヤング係数とし、クリープを考慮して $E3/1.5$ を有効ヤング係数とし、1ステップの解析とした（経時変化を追従する解析とはしていない。）

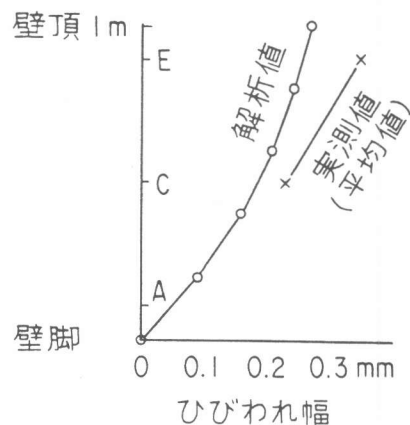


図-5 ひびわれ幅 (No.3-5試験体)

3.1.3 解析結果とまとめ

解析結果を図-5に示す。なお、脚部（打ち継ぎ位置）で0.01mm程の僅かの変位があったがこの値を差し引いてから2倍してひびわれ幅と見なしている。脚部の変位とは、拘束体の伸びであり、これは、ひびわれ幅に関係ないためである。結果として、比較的良好一致を示していると見なせよう。

3.2 ミニマスコンクリートのひびわれ幅解析

3.2.1 解析対象とモデル

前章の応力解析に用いた試験体そのものである。モデルは、2.2.1と同じメッシュ割である。ただし、長手方向の寸法は、試験体によって発生ひびわれ数が異なるため、異なる。部材厚も試験体に合わせている。

発生ひびわれ数と解析モデルの寸法および入力値を表-2に示す。

表-2 ひびわれ本数と解析モデル長さ、有効ヤング係数

試験体番号	No.1	No.2	No.3	No.4
ひびわれ本数	3	3	6	5
平均ひびわれ間隔 cm	200	200	114	133
モデル長さ cm	100	100	57	67
有効材令によるヤング係数	222	221	227	224
有効ヤング係数 (E5/1.5)	148	147	151	149
引張相当温度降下量 °C	25.1	25.2	50.6	49.0

3.2.2 インプットデータ

インプットデータも応力解析の場合と同じである。この解析に用いた温度降下量を表-2中に示す。温度履歴を考慮したヤング係数の設定は、ひびわれ発生が材令4日ないし5日であるので、材令5日の有効ヤング係数を用いた。値を表-2に示す。

3.2.3 解析結果とまとめ

結果を図-6に示す。

ひびわれ幅は実測値と解析結果とが比較的良好一致したと云えよう。

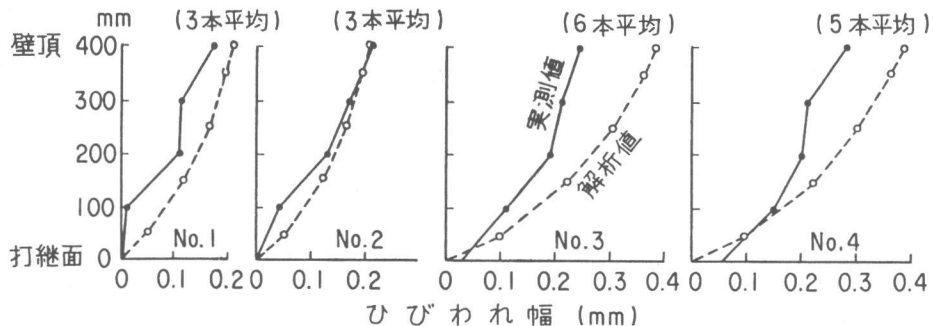


図-6 ひびわれ幅（ミニマスコンクリート試験体）

3.3 ひびわれ幅解析方法のまとめ

温度を按分して、引張応力度発生用と考えて求めたひびわれ幅は妥当な結果を得ることが出来た。

4. まとめと今後の問題点

ここで検討した方法については、次のようにまとめられよう。

- ① ひびわれ幅が鉄筋により影響されることは図-1からも明らかである。しかし、鉄筋の影響について考えるとき、無筋の解析により、少なくともひびわれ幅の上限が推定できる筈である（解析値が実測値よりも小さい場合の誤差はひびわれ幅予測解析の誤差として別途考慮の必要がある）。
- ② 予測解析においてひびわれ間隔をどう決めるかは問題であるが、応力解析によりどの程度の応力が発生するかを求めることで、決めることが出来よう。すなわち、温度応力の大きさがひびわれ発生応力に等しくなる L/H の値がひびわれ間隔算出の根拠となろう。ここでは、ひびわれ発生条件を応力のみに基づいて良いか否かは別問題とする。なお、ひびわれ発生応力を低めに（安全側に）設定すると、ひびわれ間隔が小となり、ひびわれ幅が小（危険側評価）となる。
- ③ 鉄筋によってひびわれ幅が影響を受けることは、当然であるが、ひびわれ間隔については、影響が小さいであろう。少なくとも、鉄筋比約1%迄のJCI実験の範囲ではそのように読み取れる。従って、ひびわれ間隔の設定に際しては、無筋の場合のひびわれ間隔を有筋の場合に用いることも可能であると考えられる。
- ④ 将来の展望として鉄筋量の影響を考えると、鉄筋によって、ひびわれの引き寄せ現象が起こりひびわれ幅が狭くなるであろう。この影響をなんらかの方法で評価し、外力として与えることでFEMで解けば有筋の場合の幅が計算で得られると考えられる。

5.参考文献

*1 マスコンクリートのひびわれ制御指針、日本コンクリート工学協会、ひびわれ調査研究委員会、昭和61.3

*2 同上〔資料1〕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、pp.127~155

*3 底面で連続拘束を受ける壁状マスコンクリート構造物の温度応力とひびわれに関する基礎研究（その1）（その2）、昭和63年度日本建築学会関東支部研究報告集、材料施工10、pp.249~252、同11、pp.253~256

*4 マスコンクリートの温度応力計算方法、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