初期温度履歴をうける壁状マスコンクリート構造体の ひびわれ発生実験

EXPERIMENTAL STUDY ON THERMAL CRACKS OF MASS CONCRETE WALL WITH EARLY AGE THERMAL HISTORY

山崎 敏敏*

Masatoshi YAMAZAKI

The object of this experimental study is to clarify the effect of temperature declining rate of mass concrete on thermal crack occurrence of mass concrete wall structure restricted by foundation with high rigidity.

Three specimens are prepared, and they have same experimental conditions except their cooling rates from high temperature to room temperature. Cracks observed when shutterings were removed from the specimen after the temperature history finished. Ages of crack occurrence were detected through the concrete strain gages embedded in the foundation.

As a result, it is deduced that the temperature declining rate did not affect on the crack formation of the mass concrete.

Keywords : mass concrete, thermal stress, thermal crack, cooling rate
マスコンクリート, 温度応力, 温度ひびわれ, 冷却速度

1. 序

底面から連続拘束を受ける壁状マスコンクリートでは温度降下時に生じる冷却収縮が、底面から拘束される事によって引張応力を生じ、往々にして温度ひびわれを発生させる。

本実験研究では、壁状マスコンクリートの温度ひびわれの発生の状況を実験的に検討したものであり、とくに、温度降下速度をパラメーターとして、温度降下速度の違いによるひびわれの発生のしやすさを評価することを主眼として、実験的に検討したものである。

2. 既往研究の概観

壁状マスコンクリートの温度ひびわれについては、筆者が、温度降下量と L/H (壁長と壁高さの比) との関係、およびひびわれ状況について実験検討した結果を報告した¹⁾。その際に既往の研究のうち、特に底面から連続拘束を受けるマスコンクリートの研究について概観しているのでここでは省略する。

温度降下速度については、既往のいくつかの文献(工事報告・実験研究報告など)について温度降下速度を算定し、統計的に検討した報告²⁾が一件あるが、実験的に

検討したものはまだないようである。

3. 実験方法・試験体

マスコンクリートの実験は、温度条件を再現させる必要から、必然的に大規模な実験となるのが一般的であるが、規模の大きい実験は実験の実施に当たって費用や実験場所等の色々な面で困難である。

本実験では、若干の工夫により小型のマスコンクリート試験体によって実験した。試験体の形状寸法を図一1

図一1 試験体形状

本論文の一部は、参考文献3)4)に発表した。また、参考文献1)の一部を再掲した。

* 鹿島技術研究所第二研究部 専門部長

Chief Research Engineer, Building Engineering Department, Kajima
Technical Research Institute

写真一 実験状況

に示す。試験方法は参考文献1)で詳述したものと同様であるのでここでは概略を述べるに止める。

マスコンクリートを模擬する壁状(あるいは基礎梁状)の試験部分は、壁厚10 cm、壁高40 cm、長さ8 mとし、この壁に比べて十分に剛な断面を持つ拘束体の上に打設するものとした。試験体の長さは、ひびわれ間隔のばらつきを考慮して、十分長くってひびわれ発生数を多く得られるように配慮した。拘束体としては、幅80 cm、高さ45 cmの断面を持つ基礎ブロックを設けている。

実験状況を写真一に示す。

壁部に面状発熱体を取付け、温度を外部からコントロールするとともに、壁部を断熱板で包み、マスコンクリートを模擬した温度(後述)を履歴させた。

4. 実験計画とパラメーター

今回新たに実施した試験体は、温度急降下試験体と緩降下試験体の二体であり、温度降下速度をパラメーターとした実験である。参考文献1)のNo.4試験体を温度降下速度が標準の試験体として含めて計三体としている。後述するように、温度降下速度には、標準的な速度といったものは存在しないので急降下・標準・緩降下と名付けても実構造体とのダイレクトな対応を想定したものではない。

温度降下速度をパラメーターとするにあたり、温度降下開始までの温度履歴は各試験体に共通となるようにし、温度降下開始以後の速度のみをパラメーターとした。鉄筋量などもパラメーターとしては採用しない。水平方向はすべて無筋である。

昇温速度は参考文献1) No.4試験体のそれに合わせた。これは参考文献1)のNo.1～4試験体において、昇温速度大なNo.4試験体が大い引張応力を生じさせることを考慮し、ひびわれの発生しやすいように選んだものである。

計画温度履歴を図一2に示す。試験体の一覧を表一に示す。

温度降下速度の定義としては、文献2)に次の式(1)

図一2 計画温度履歴

表一 試験体一覧(計画値)

	昇温速度	最高温度	降温速度
急降下試験体	35℃/0.25day	55℃	35℃/1day
標準試験体	〃	〃	35℃/2day
緩降下試験体	〃	〃	35℃/6day

標準は参考文献1)報告実験のNo.4試験体で代用

のような定義例がある。ここでは、本実験に合わせて式(2)の形にして用いることとした。

$$\text{温度降下速度} = \{(\text{コンクリート最高温度}) - (\text{平常に戻った温度})\} / \{(\text{平常時に戻った材令}) - (\text{コンクリート温度最高時材令})\} \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{温度降下速度} = \{(\text{冷却開始時温度}) - (\text{平常に戻った温度})\} / \{(\text{平常に戻った材令}) - (\text{冷却開始時材令})\} \dots\dots\dots (2)$$

実部材では温度履歴の曲線は、ピーク付近では上に凸その後の大部分では上に凹の特性を持っており、曲線の特性は逆S字状である。また、安定温度付近の温度履歴曲線はかなりなだらかな勾配を持っているものであり、安定時温度到達時刻の評価はかなり恣意的にならざるを得ないものである。このため、ピークと安定温度時とを直線で結ぶ温度降下速度という概念はかなりマクロなものである。

以上の事から、実験計画における温度降下速度と実部材における温度降下速度との対応は、この実験で降下速度が意味ある結果を持った時に降下に必要とあれば考慮することとし、直線で代用するというで十分と判断した。

温度降下速度の設定に当たっては、実際の構造物における温度降下速度を設定の基本とするべきであるが、実際のマスコンクリートでは温度降下速度は主として構造物の規模(断面最小寸法など)で決まってしまうものである。実部材との対応を考えるためには、実部材の

図-3 埋込み型ひずみ計配置図

規模を限定する必要がある。また、広い範囲の実部材を対象とし、それぞれに標準降下速度と急降下・緩降下速度を採るとすると実験上、極めて多数のケースを考慮しなければならないが、これは、温度降下速度がひびわれ抑制の点から意味を持つパラメーターであることが本実験により確認された場合に、必要に応じて改めて考慮することで十分と判断し、今回のようなパラメーターの設定とした。

参考文献2) で扱っている既往文献からの温度降下速度と、本実験における温度降下速度(実験結果)の範囲との関係は次のとおりである。

参考文献2) (全事例) 13.9~0.73 °C/day

同 (壁状構造のみ*) 13.9~3.5 °C/day

* 高速道路側壁、L型けい船岸など

本実験結果(降下開始以降) 21.6~6.7 °C/day

5. 測定項目・測定位置

測定項目はひびわれ(目視による観察)のほか、コンクリートなどの温度、および拘束体コンクリートのひずみである。

温度測定は、いずれも銅コンスタンタン熱電対を埋設することにより行った。補償導線はエナメル被覆0.2mmφのものである。測定はデジタルひずみ測定器(T測器社製TDS 501型)を用い自動計測を行った。測定間隔は30分である。

ひびわれ観察は、試験体が冷えて、温度が室温に達した時、型枠を外して行った。ひびわれパターン・ひびわれ間隔・ひびわれ幅を観察・測定した。ひびわれ幅測定はペーパークラックゲージにより行った。

ひびわれ発生材令は直接には測定しなかった。これを測定するためには、ひずみ計・応力計の類を埋設する必要があるが、断面が小さい試験体でこの種の計器の埋設をするとひびわれの誘発原因となるため行わなかった。ひびわれの発生材令と順序は、下部拘束体内に埋込み型ひずみ計を埋設して測定した。すなわち、ひびわれ発生による影響が拘束体に及ぼす影響を、拘束体のひずみ変化として検出したものである。埋込み型ひずみ計の配置を図-3に示す。

6. コンクリート調合

コンクリートは普通コンクリートとした。調合は建築工事でマスコンクリート工事に一般に用いられる程度のセメント量のコンクリートとし、一種類とした。3体と

も同一調合である。

調合表を表-2に示す。

7. 材料試験結果

コンクリート関係の材料試験はコンクリート圧縮およ

表-2 使用材料と調合計画

材料	セメント：普通ポルトランドセメント		
	骨材：普通骨材		
	粗骨材最大寸法：20mm		
	混和剤：リグニンスルホン酸塩系AE減水剤		
	セメントの0.25%		
スランブ	18 cm	水	179 kg/m ³
調合強度	305 kg/cm ²	セメント	317 kg/m ³
水セメント比	56.5 %	細骨材	840 kg/m ³
細骨材率	47.4 %	粗骨材	956 kg/m ³
空気量	4.0 %	混和剤	0.792 kg/m ³

表-3 強度発現状況および線膨張係数

[急降下試験体]

	標準養生		温水養生					
試験材令	7	27	1	2	4	7	27	
引張強度	14.1	23.3	13.8	15.1	18.8	19.8	23.3	
圧縮強度	147	233	113	155	186	193	208	
ヤング率	1.92	2.51	1.77	1.84	2.02	2.11	2.26	
線膨張係数	7.51×10 ⁻⁶							

[緩降下試験体]

	標準養生		温水養生					
試験材令	6	27	2	3	4	6	27	
引張強度	17.9	23.1	20.3	17.4	21.8	24.2	25.3	
圧縮強度	159	254	172	200	210	234	231	
ヤング率	2.05	2.61	2.08	2.19	2.34	2.34	2.51	
線膨張係数	7.50×10 ⁻⁶							

試験材令は 日

強度の単位は kg/cm²

ヤング率の単位は 10⁵ kg/cm²

線膨張係数の単位は /°C

び引張強度・ヤング係数・線膨脹係数について行った。材料試験結果を表—3に示す。供試体はいずれも10φ*20cmのシリンダーである。各々の試験体のコンクリートについてそれぞれ材料試験を実施した。

表中の温水養生とは、温水槽中にテストピースを打設直後から浸漬しておいたものである。この温水槽は試験体部分の温度を計画温度に保つための温水循環パイプに供給する温水を貯留しておくものであり、試験体と同一の温度履歴をさせたものである。

8. 実験結果

8.1 温度履歴と断面内温度分布

温度履歴について図—4に示す。打ち込み時コンクリート温度・平坦部温度（後述）の平均温度・最終安定温度などの一覧を表—4に示す。

なお、本実験では温度履歴曲線がほぼ台形であり、温度降下開始以前の高原状温度ではその平均値に意味があるので、これを平坦部温度と唱えることにした。標準試験体の温度履歴曲線において、昇温から平坦部に移るときに小さなピークが発生したが、このような温度は無視することとした。

断面内の温度分布の一例を図—5に示す。面状発熱体と壁の高さがほぼ同じ寸法であったため、コンクリートは均等に加熱され、断面の温度分布はほぼ一様である。他の試験体の温度分布は図を省略したが、これもほぼ同じである。試験体厚方向の温度差は試験体にもよるが約3°Cであった。以後のコンクリート温度は断面中心の温

図—4 温度履歴実測結果

表—4 試験の実施経過と温度関係データ一覧

	打込温度	平坦部温度	最終安定温度	降温速度
急降下	14.4	61.0	13.1	21.6
標準	12.9	61.1	12.2	12.3
緩降下	11.7	59.7	11.6	6.7

温度の単位は °C

降温速度の単位は °C/day

度で代表させた。

8.2 ひびわれの状況

脱型は、温度の安定した時点（試験体の温度履歴によりそれぞれ材令6, 8, 11日）で、温度が室温にほぼ等しいことを確認してから実施した。この時のひびわれパターンを観察結果を図—6に、ひびわれ間隔などの概要を表—5に示す。

図—5 断面内温度分布の一例

図—6 ひびわれパターンとひびわれ位置（脱型時）

表—5 脱型時ひびわれ幅の実測値（最大幅*）など

試験体名	急降下	標準	緩降下
全温度降下量	°C 48	49	48
ひびわれ数	本 5	5	6
平均ひびわれ間隔	cm 133	133	114
平均L/H **	3.33	3.33	2.86
ひびわれ幅最大値	mm 0.25	0.40	0.35
ひびわれ幅の和	mm 1.05	1.40	1.33
平均ひびわれ幅	mm 0.21	0.28	0.22

*ひびわれ幅は本表では試験体頂部での値

**ここにL/Hは壁長L（ここでは平均ひびわれ間隔）を壁高Hで除した値

図-7 脱型時ひびわれ幅

ひびわれは、上下方向に生じ、壁厚を貫通しており、上部で広く、下部で狭いV字形であった。ひびわれの形状として各ひびわれを脚部から頂部までの5カ所で実測した結果の詳細を図-7に示す。ひびわれが頂部で広く、下端で0の三角形分布をしているのは、上下方向に温度が一定であることと、拘束が底辺からのみであることによるものであろう。

これらの結果を見ると次のことが言える。

- 1) ひびわれの本数については、温度降下速度の大小とは関係が認められない。
- 2) ひびわれ幅については、最大幅・平均幅ともに温度降下速度の大小とはなんら関係が認められない。

8.3 ひびわれ発生時刻の推定

拘束体下面7カ所に埋設した埋め込み型ひずみ計の測定結果を図-8.1.1～8.3.3に示す。図中の曲線の錯綜を避けるため、1試験体の曲線を3枚の図に分け、さらに若干の測定点については温度降下開始点以前のデータを省略してある。

なお、埋め込み型ひずみ計のうち、拘束体上ば側に埋設したひずみ計は次に述べる段差の検出が鈍感であるので掲載を省略した。

図中で曲線に段差のあるところはひずみが急激に変化したところであり、ひびわれが試験体に発生したことによる拘束体のひずみ変化と見なせる。したがって、ひずみ測定値の出力が段差を示す時刻と、脱型後に観察したひびわれ発生位置、および埋め込みひずみ計の位置とから、それぞれのひびわれは図中に示す時刻に発生したことが推定される。ひびわれ発生時刻・発生順序・発生までの温度降下量をまとめて表-6に示す。

なお、図-8.2.3中の*マークについては、6本目のひびわれは目視では確認されていない。近傍のひびわれの拡幅かとも推定される。発生順序は別の組み合わせも検討したが図中記入のものが最も妥当と判断した。また、図-8.3.1の3本目については前後の関係から、約8時間生じた停電中に発生したものと推定した。

ひずみ計の測定結果を用い、試験体を連続梁と見なし、ひびわれ発生による解放モーメント量の評価、解放

図-8.1.1 埋め込みひずみ計測定結果(急降下試験体)

図-8.1.2 埋め込みひずみ計測定結果(急降下試験体)

図-8.1.3 埋め込みひずみ計測定結果(急降下試験体)

モーメント量からひびわれ位置の算定なども試みたが、見るべき結果は得られなかった。拘束体の支持条件がコンクリートブロックを束石とした、あいまいな支持による不静定構造であったためと思われる。

8.4 ひびわれ過程終了までの温度降下量と温度降下速度との関係

ひびわれ発生の結果である本数・幅と温度降下速度との関係が認められなかった(8.2項)ので、ここではひびわれ発生の途中経過における初ひびわれと温度降下速度との関係を検討する。

最高温度からひびわれ発生時までの温度降下状況と、ひびわれ発生時刻との関係の一例を図-9に示す。

図—8.2.1 埋め込みひずみ計測定結果（標準試験体）

図—8.3.1 埋め込みひずみ計測定結果（緩降下試験体）

図—8.2.2 埋め込みひずみ計測定結果（標準試験体）

図—8.3.2 埋め込みひずみ計測定結果（緩降下試験体）

図—8.2.3 埋め込みひずみ計測定結果（標準試験体）

図—8.3.3 埋め込みひずみ計測定結果（緩降下試験体）

今回の実験は、温度降下が始まるまでの温度履歴が三体の試験体において共通であって、温度降下プロセスのみが異なるので温度降下速度の影響が直接に把握できるものである。

初ひびわれ発生時刻、発生までの温度降下などをまとめた表—6 から次のことがいえよう。

- (1) 初ひびわれの発生は、比較的小さい温度降下量で起こることが示された。(参考文献1) で既述)
- (2) 初ひびわれと温度降下速度の関係を、初ひびわれ発生までの温度降下量の大小で見ると、ほとんど関係ないといえる。すなわち、ひびわれ発生のしやすさを降下開始から初ひびわれ発生までの温度降下量で指標とするな

図—9 温度履歴とひびわれ発生時刻

表—6 ひびわれ時刻の推定結果

	急降下試験体					標準試験体					緩降下試験体					
	Cr1	Cr2	Cr3	Cr4	Cr5	Cr1	Cr2	Cr3	Cr4	Cr5	Cr1	Cr2	Cr3	Cr4	Cr5	Cr6
発生位置* m	1.3	3.2	4.5	5.2	6.5	1.6	2.2	3.7	4.8	5.7	1.4	2.6	3.5	4.6	5.6	6.9
降下時間** day	0.6	0.4	0.5	0.3	0.5	0.6	1.4	0.4	1.6	1.1	5.1	2.4	0.5	5.0	1.9	4.4
発生順	⑤	②	④	①	③	②	④	①	⑤	③	⑥	③	①	⑤	②	④
発生温度 °C	37	42	40	46	41	52	36	55	31	42	26	41	53	27	44	31
降温量 *** °C	24	19	21	15	20	9	25	6	30	19	34	19	5	33	16	29
壁長 **** m	3.2	5.2	2.0	8.0	2.8	3.7	2.1	8.0	2.0	4.3	2.6	3.5	8.0	2.1	4.5	2.4
L/H	8.0	13.0	5.0	20.0	7.0	9.3	5.3	20.0	5.0	10.8	6.5	8.8	20.0	5.3	11.3	6.0

* 発生位置とは、全長8mの試験体の一端からひびわれ迄の距離(m)

** 降下時間とは、温度降下開始から初ひびわれ発生迄の時間(day)

*** 降温量とは降下開始時から初ひびわれ時迄の温度降下量(°C)

**** 壁長とは、そのひびわれの発生直前の両隣のひびわれ間の距離(m)

L/Hとは、壁長を壁高で除したもの

ら、表—6 より降下速度の早い方から順に 15°C, 6°C, 5°C となっており、降下速度の速くてもひびわれは生じやすくなるとはいえない。

9. 解析との比較検討

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コンペネンション法⁵⁾を用いて解析した結果を図—10 に示す。計算に用いたインプットデータは表—7 に示す材料データと図—2 の温度履歴である。表—7 のデータは材料試験結果データそのものではなく、四週圧縮強度のみを用いて、JCI ひびわれ制御指針に示された方法⁶⁾に基づいて定めた。これは、試験体ごとに若干のばらつきがあることを避けるために解析用データを統一したものである。表—7 に示すように、実測の試験値と大きな相違はない。なお、材令 3 日以前のヤング係数を 1/3 程度 (クリープ係数 $\phi=2$) に評価して計算に用いた。このプロセスは、参考文献 1) における解析方法を踏襲したものである。

解析用温度履歴に計画値を用いたのは、計算結果として得られる応力の、試験体間のわずかな相違を、傾向として検出しようと意図したためである。

解析結果の図—10 に示すように、温度降下が始まる

図—10 応力解析結果

表—7 応力解析のインプットデータ

		解析入力値	参考用実測結果
28日圧縮強度 *		256	233~272
ヤング係数 **		2.45	2.42~2.61
その他のデータ			
拘束係数	Rn	0.95	-
"	Rm1.2	1.0	-
線膨張係数 ***		7.8	7.5~7.9
クリープ係数 $\phi(t \leq 3)$		2.0	-
"	$(t > 3)$	0.5	-

* 圧縮強度の単位は kg/cm²** ヤング係数の単位は 10⁻⁵ kg/cm²*** 線膨張係数の単位は 10⁻⁶/°C

までは応力履歴は共通である。温度降下開始時以降は温度降下速度の相違により、異なった応力履歴となる。そして、緩降下ほど応力も大の傾向である。応力の大小は、それぞれの温度履歴の差によるマチュリティーの差がヤング係数の差となり、応力解析結果に表れたに過ぎない。そして、応力の最終値で比較すると急降下・標準・緩降下試験体で 37.7, 38.1, 39.2 kg/cm² とその差はわずかなものである。また、引張強度の増進量の試験体間の差もわずかである。このような差が、ひびわれ実験で検出されないとしても、ひびわれ発生現象のばらつきを考慮すれば、当然のことと考えられる。

なお、解析結果の引張応力の大きさと、実験結果の初ひびわれ発生状況とを比較すると、引張応力が引張強度よりも小さい状況でひびわれ発生が認められる。参考文献 1) では引張強度の 60 % 程度と評価しているが、この程度のものがここでも再現されていると見られる。

10. 結果のまとめ

温度降下速度をパラメータとした実験を行い、温度降下速度とひびわれの発生しやすさとの関係を求めた。本実験の範囲の結果をまとめると次のようである。

イ) 温度降下速度と冷却後のひびわれ(の幅と数)

今回の実験範囲でいえば、発生したひびわれ(の数と幅)と温度降下速度とは関係がなかった。

ひびわれ幅は温度急降下の試験体では最大 0.25 mm であったが、その倍の時間をかけてゆっくり温度降下させた標準試験体では最大で 0.4 mm、さらにゆっくりな緩降下試験体で 0.35 mm であった。ひびわれ幅は温度降下速度の最も速いほうがひびわれ幅の狭いものが発生したということでもある。

ロ) 温度降下速度とひびわれ発生までの温度降下量

ひびわれの発生しやすさをひびわれ発生までの温度降下量で示すと、温度降下速度の速いほうがひびわれは出やすいとはいえない。

温度降下速度とひびわれとの関係は、おそらく、引張応力の発生しやすさで決まると思われるが、温度降下速度が引張応力に影響するのは、降下速度がゆっくりな場合に引張応力の緩和にクリープの貢献するためであり、すでにかなり硬化しているコンクリートにおいては、クリープの寄与はわずか数日の違いではあまり効いてこないものと想像される。

参考文献

- 1) 山崎敏敏：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研究，日本建築学会構造系論文報告集，第 394 号，pp. 27～36，昭和 63 年 12 月
- 2) 森永 繁，桑原隆司：マスコンクリートの水和熱によるきれつ防止を目的とした施工法，コンクリート構造物のひびわれに関するシンポジウム発表論文集 2-10，日本コンクリート工学協会，pp. 113～118，昭和 52 年 3 月 16 日
- 3) 山崎敏敏：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(その 2)，日本建築学会大会学術講演梗概集(九州)材料施工 1302，pp. 603～604，1989 年 10 月
- 4) 山崎敏敏：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(その 3)，1989 年度日本建築学会関東支部研究報告集材料施工 6，pp. 213～216
- 5) 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：マスコンクリートの温度応力研究委員会：日本コンクリート工学協会 1989 年 6 月
- 6) マスコンクリートのひびわれ制御指針，p. 67，材料の力学的性質と熱膨張係数，日本コンクリート工学協会，1986 年

(1991 年 11 月 8 日原稿受理，1992 年 5 月 6 日採用決定)