

[6] マスコンクリートの温度応力に関する研究

正会員 ○佐藤 孝一(熊谷組技術研究所)
 正会員 松浦 光男(熊谷組技術研究所)
 佐谷 靖郎(熊谷組技術研究所)
 林 徹(熊谷組原子力開発室)

1. まえがき

マッシブなコンクリート部材に発生する温度応力に関しては現在まで多くの研究がなされているが、その発生メカニズムについてはいまだ充分には解明されていない。これらの解明を進めるためには、若材令時を含めたコンクリートの物性値や、クリープ、拘束等の経時的な変化量を正確に把握することが重要であり、そのためには豊富な実測データの蓄積が不可欠となってくる。本研究は上記観点に立ち、実構造物を対象としたマスコンクリートの温度応力計測結果について検討を行なったものである。

2. 計測概要

計測を行なった構造物は図-1に示す様に、厚さ1m、高さ3.9m~4.73m、長さ15mの壁体であり、厚さ1.5mの底盤上に打設されている。計器の埋設位置は図-1に示す通りである。各計器の埋設位置には表-1に示す計器が1セットになっており、各計器は長手軸方向に50cm間隔で配置されている。計測は昭和59年6月12日より開始し、材令3日までは1時間、それ以降7日までは3時間、8日以降は6時間のインターバルで計測を行なった。なおデータの取り込みは自動ひずみ測定器、パソコンを用いた自動計測により行なった。

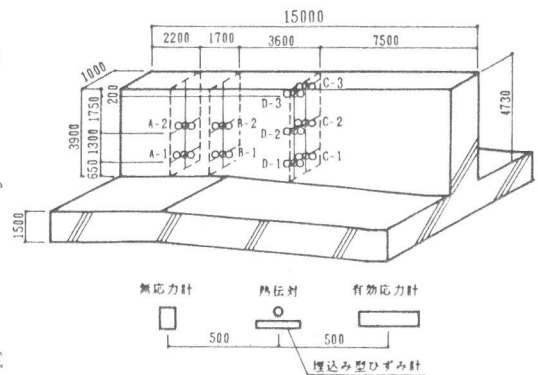


図-1 部材形状及び計器埋設位置(単位:mm)

3. 計測結果

3.1 コンクリートの物性

コンクリートの調査を表-2に示す。コンクリートの物性試験は、標準養生試験体と、実際の部材に近似させた高温養生試験

表-1 埋設計器一覧

有効応力計	測定範囲 ±100kgf/cm ² L=500mm
埋込み型ひずみ計	見掛けの弾性係数=400kgf/cm ² L=100mm
無応力ひずみ計	同上 ケース直径=100mm
熱電対	銅コンスタンタン熱電対

表-2 計画調査

呼び強度 (kg/cm ²)	粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	水セメント 比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
						W	C	S	G	AE剤
210	25	8	4	59.8	43.0	159	266	804	1092	0.086

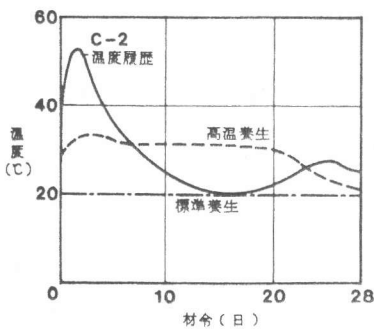


図-2 養生温度履歴

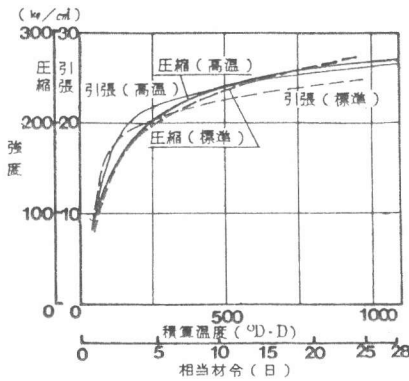


図-3 材令と圧縮及び引張強度

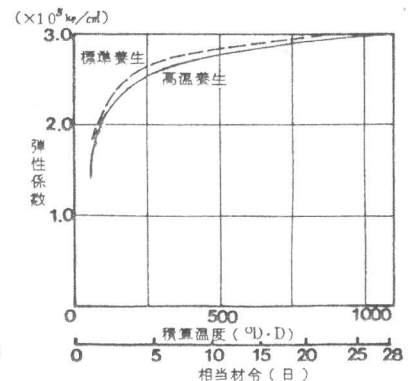


図-4 材令と弾性係数

験体について行なった。各々の養生温度履歴を図-2に、物性試験結果を図-3、図-4に示す。なお引張強度は割裂強度試験により、弾性係数はコンプレッソメーターを用いて求めた。試験結果は実構造物の各材令における積算温度をもとに、各養生履歴試験体の積算温度を、実構造物における同一積算温度に相当する材令に換算した相当材令で表示している。なお、積算温度の算定方法は下式によった。

$$M = \sum_{z=1}^Z (\theta_z + 10) \quad (^\circ\text{D}\cdot\text{D}) \dots\dots\dots (1)$$

M: 積算温度、Z: 材令、 θ_z : z日におけるコンクリート養生温度

図-3、図-4によれば同一積算温度でも、20℃一定の温度履歴と高温履歴を受けたものでは強度、弾性係数とも若干異なった値となる。実構造物の物性値は高温履歴養生試験体に近いと考えられ、本報ではこの値を採用した。次にコンクリートの熱膨張係数については図-5に示す無応力ひずみ計の値より図-5表中の値となった。また熱拡散率はGlover法により試験を行ない、その値は $3.3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{h}$ であった。

3.2 温度履歴

コンクリート部材の温度履歴、および断面温度分布を図-6に示す。この図に示す様にコンクリートの打込み温度は25℃、部材最高温度は、部材高さ中段の中心部(C-2)で54℃、表面部(D-2)で42℃となっている。また部材最高温度に達する時間は約2.4時間であった。また材令2.3日で再び温度がピークを示しているのは材令16日目に上部リフトの壁が打設された影響である。

3.3 ひずみと応力

材令と応力、ひずみの関係を図-7~10に示す。なおこの図では上部リフトの壁打設による影響を考慮し、材令2.0日までの値を示している。マスコンの温度応力計測では初期値の設定が重要となるが、本計測では生データグラフより計測値のふらつきを見て、その値が一応安定した時点をもって初期値とすることとした。竹下ら¹⁾の研究では、初期値設定時期をコンクリート打設後、ひずみ計で6時間、応力計で8時間程度としているが、本計測ではひずみ計、応力計ともコンクリート打設後約6時間で安定しており、この時点の値を初期値とした。図-9~10で応力の履歴を見ていくと、高さ中段までは最初圧縮応力が生じ、後に引張側へと移行していくが、上段では逆に最初引張応力が生じ、その後圧縮側へ移行している。またC-1~C-2とD-1~D-2を比較すると表面部Dの方が中心部Cに比べて圧縮で65%、引張で30%程度応力が小さくなっている。引張応力の最大値は部材底部C-1で 18.5 kg/cm^2 、その発生速度は平均で $2.5 \text{ kg/cm}^2/\text{day}$ であった。なお材令1.2日目においてC-1~C-2、D-1~D-2の応力、ひずみに急激な変化が見られるが、これは部材中心部にひびわれが発生したためである。次に上記データを時間軸を無視して、応力とひずみ関係で示したのが図-11~図-14である。

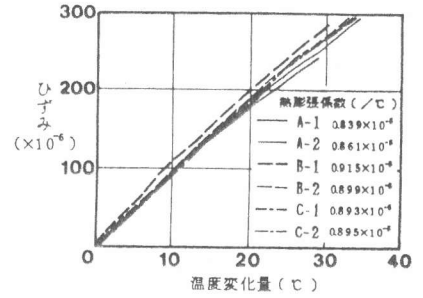


図-5 コンクリートの自由伸縮ひずみ

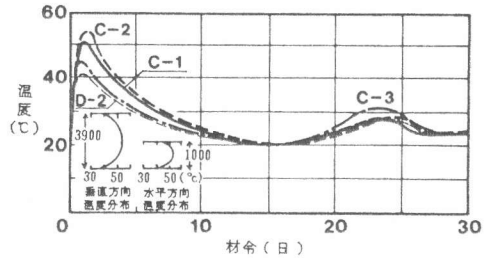


図-6 部材の温度履歴

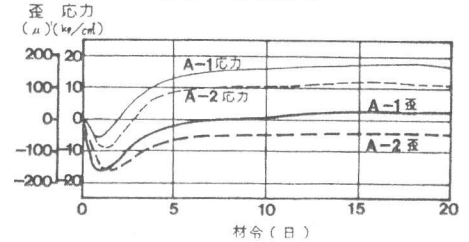


図-7 応力とひずみの経時変化(A)

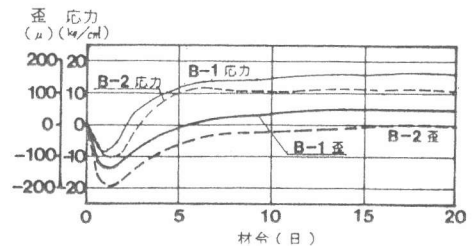


図-8 応力とひずみの経時変化(B)

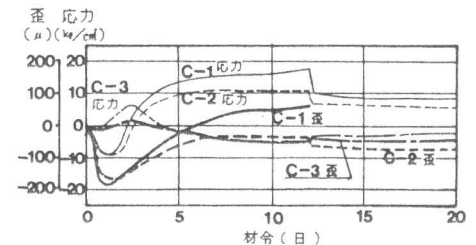


図-9 応力とひずみの経時変化(C)

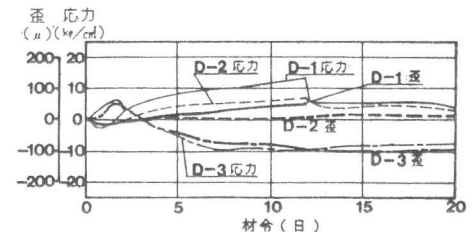


図-10 応力とひずみの経時変化(D)

上記実測データをもとに有効弾性係数、クリープ係数、弾性ひずみ、クリープひずみ、拘束度を求めた。ここで各算定の方法は以下のように考えた。なお図-13、図-14に示すように部材表面部においては、外気温の日変動や鉄筋の影響が大きいため、今回はそれらの影響の少ない部材中心部についてのみ解析を行った。

$$\epsilon_m = \epsilon_i + \epsilon_c + \epsilon_o \dots\dots\dots (2) \quad \epsilon_e = \epsilon_m - \epsilon_o = \epsilon_i + \epsilon_c \dots\dots\dots (3)$$

$$E_e = \frac{\sigma_t}{\epsilon_e} \dots\dots\dots (4) \quad \phi = \frac{E_c}{E_e} - 1 \dots\dots\dots (5) \quad \epsilon_c = \phi \cdot \frac{\epsilon_e}{1 + \phi} \dots\dots\dots (6)$$

$$\epsilon_i = \frac{\epsilon_e}{1 + \phi} \dots\dots\dots (7) \quad R = \frac{\epsilon_e}{\epsilon_o} \dots\dots\dots (8)$$

ϵ_m : 実測ひずみ (ひずみ計)、 ϵ_i : 弾性ひずみ、 ϵ_c : クリープひずみ

ϵ_o : 自由伸縮ひずみ ϵ_e : 有効ひずみ、 ϕ : クリープ係数

σ_t : 引張応力 (有効応力計) R : 拘束度 E_e : 有効弾性係数

E_c : 弾性係数 (テストピースより求めた値、図-4 参照)

1) 有効弾性係数

有効弾性係数の算定にあたっては、図-11~図-13の応力-ひずみ関係より、6時間ごとの有効応力、有効ひずみの値を用いて求めた。ただし温度下降時には初期の単性流動によるひずみが残留するため有効応力0の点でひずみも0となるように原点移動を行なっている。図-15に有効弾性係数の変化を示す。有効弾性係数の値は、材令2~3日で最大となりその後徐々に減少し、7日目で $1.0 \sim 1.5 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ となり以後この値でだいたい一定している。中央断面C-1に関しては、この部分がひびわれ発生部位であることから、クリープひずみの増大が著しく(図-18参照)、そのため材令4日目ごろから有効弾性係数が急激に減少してきている。また表面部については今回解析していないが、応力-ひずみの傾きでみると、表面部の方が傾きが大きく、前野ら²⁾の研究で述べられている鉄筋の影響による有効弾性係数の増加傾向が現われているものと思われる。

2) クリープ係数

クリープ係数の変化を図-16に示す。クリープ係数は材令と共に徐々に大きくなっており、材令20日ではひびわれ発生位置のC-1を除いて1.0~2.0の範囲内にある。

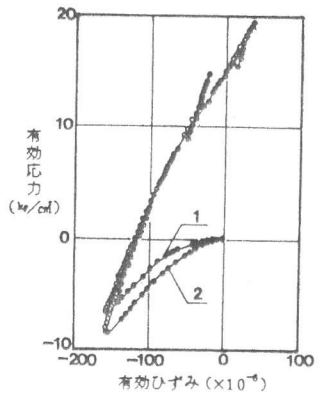


図-11 応力・ひずみ関係(A)

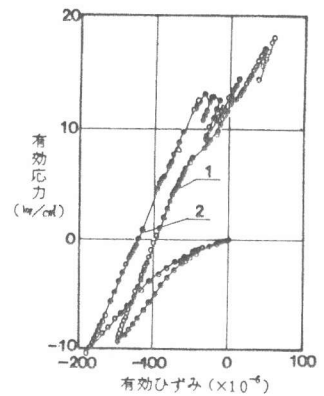


図-12 応力・ひずみ関係(B)

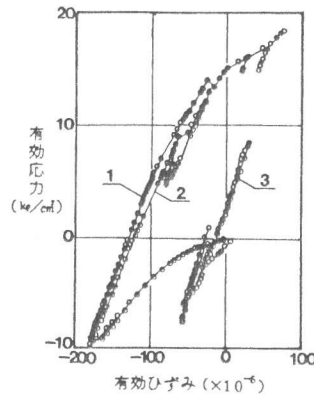


図-13 応力・ひずみ関係(C)

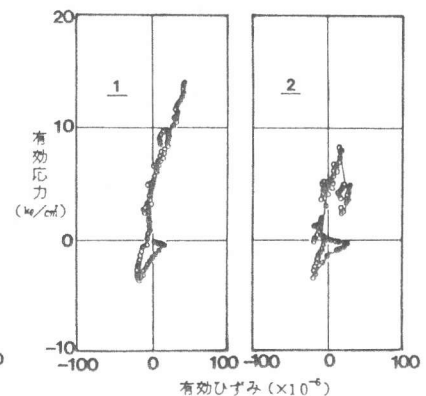


図-14 応力・ひずみ関係(D)

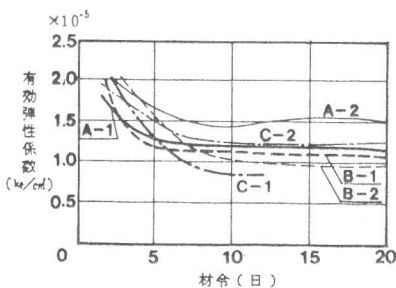


図-15 有効弾性係数の経時変化

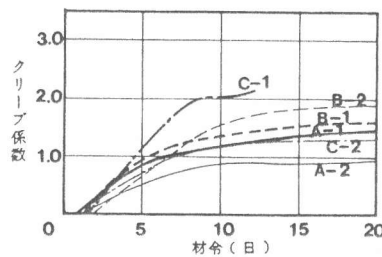


図-16 クリープ係数の経時変化

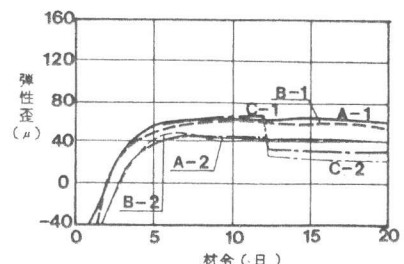


図-17 弾性ひずみの経時変化

これらを平均して考えると、クリープ係数は1.0程度までは直線的に伸び、その後漸増し材令15日頃で1.5程度となる。

3) 弾性ひずみ、クリープひずみ

有効ひずみを式(6)、(7)を用いて弾性ひずみ成分とクリープひずみ成分に分離して、その値の材令による変化を図-17、図-18に示す。弾性ひずみについて見ると、ひびわれ発生前までは下段底盤側のひずみが約60 μ 、中段のひずみが約40 μ となっており若干ではあるが高さ方向によるひずみ差がでている。ひびわれ発生後はC-2で約20 μ ひずみが低下している。C-1、C-2以外の測定点ではひびわれ発生後もひずみに大きな変化はみられない。次にクリープひずみについて見るとC-1のひずみは5日目ごろから急激に増大し、12日目でひびわれが発生している。ひびわれ発生時のクリープひずみは約140 μ である。なお同じ中央断面のC-2のひずみの伸びはそう大きくなく、ひびわれ発生後約15 μ 低下している。全体として見ると下段のクリープひずみの方が中段に比べて大きく、また下段長手方向では、中心部がいちばん大きく端部へ行くほど小さくなっている。

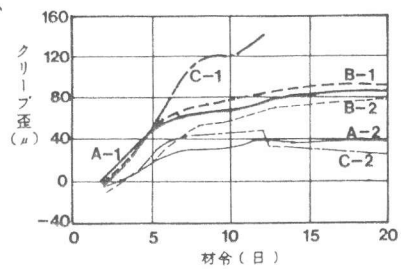


図-18 クリープひずみの経時変化

4) 拘束度

拘束度の変化を図-19に示す。拘束度の大きさを見ると、クリープひずみと同様下段の方が中段に比べて大きく、またひびわれ発生位置C-1では材令6.5日で拘束度が1.0以上になっており有効ひずみ量が自由伸縮ひずみ量を越えていることを示している。C-1以外の測定点では材令4日目から徐々に拘束度が低下しているが、これはコンクリートの剛性が材令とともに増してきたことによるものと思われる。なおひびわれ発生により、ひびわれ発生位置中段では0.12程度拘束度が低下している。

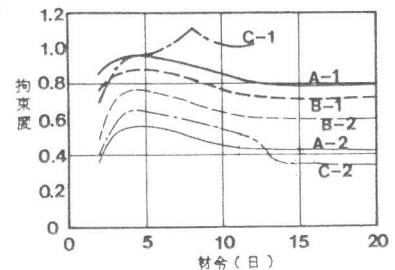


図-19 拘束度の経時変化

4. まとめ

本研究で得られた結果を要約すると以下の通りである。

- (1) 有効弾性係数は材令7日目ごろから一定となり、その値は $1.0 \sim 1.5 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ の範囲内であった。これを弾性係数低減率(E_c/E_c)で見ると、材令7日で38~58%、材令20日で35~52%となる。
- (2) クリープ係数は1.0程度までは直線的に伸び、その後漸増し材令15日目頃で1.5程度となる。
- (3) クリープひずみの進展を観察することにより、ひびわれ発生の危険性及びひびわれ発生位置を予測することが可能である。また今回の計測ではひびわれ発生時の有効ひずみは約200 μ であり、部材の引張強度と発生応力の比(発生応力/引張強度)は $1/1.2$ であった。
- (4) ひびわれ発生後、ひびわれ発生位置中段では拘束度で0.12、有効ひずみで35 μ 程度値が低下しており、ひびわれ発生による応力緩和がみられる。またクリープひずみの値は部材長手方向中心が最大となり、端部にいく程その値は小さくなる。

5. あとがき

本報告ではマスコン壁体の温度応力測定結果について述べたが、さらに多くの実測データによる検討が必要と思われる。現在、底盤および外部拘束を極力小さくした部材についても実験を行っており、これらの実験結果についても今後発表して行きたい。

〔参考文献〕

- 1) 竹下、浅沼、横田「マスコンクリートの計器特性について」第2回マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム S59・3 日本コンクリート工学協会
- 2) 前野、青景、伊藤「大断面ボックスカルバートの硬化時温度応力について」第2回マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム S59・3 日本コンクリート工学協会