

[4] マッシブなコンクリート構造物の温度ひびわれ発生に及ぼす日射の影響

清水 昭男 (熊谷組 原子力開発室)
 正会員 伊藤 洋 (熊谷組 原子力開発室)
 正会員 ○坂口 雄彦 (熊谷組 原子力開発室)

1. はじめに

マッシブなコンクリート構造物における温度ひびわれ発生に関する研究は、今日のコンクリート構造物の大型化や多様化に伴って活発に行われるようになり、その発生予測・要因分析もなされつつある¹⁾。そういった中で、一般に建築構造物のごとき比較的薄い壁においてひびわれ要因の一つとされている日射の影響に対し、マスコンクリートの分野では少なくとも温度変化の上ではそれが表面部に限られ、水和熱による温度上昇・降下過程に本質的にはそれほど関与せず、また日射による影響のみを抽出することも容易でないことも加わってあまり注目されていなかったように思われる。

本論文は、こういった背景にあって、マッシブな壁体構造物が日射を受ける場合のコンクリート温度応力の挙動に焦点を当て、実大構造物を用いた実験を行い、それがセメントの水和熱に起因する温度ひびわれ発生に及ぼす影響について、数値解析結果と併せ検討を加えたものである。その結果いくつかの興味ある知見を得たのでそれらをここにまとめ報告する。

2. 実験概要

実験は、図1に示すような壁厚0.7m、高さ1.8m、長さ18.0mの南北に長い壁体が厚さ0.8mの既設スラブ上に打ち継がれた構造物において実施された。壁体部の打設は昭和59年9月22日午前10時から12時にかけて行われ、打設温度は27℃で、型枠は厚さ12mmの木製型枠を使用している。また、使用したセメントは普通ポルトランドセメントであり、コンクリートの配合は表1に示すとおりである。鉄筋は長手方向に配筋筋がD13で300mm間隔、かぶり100mmで配置されている。日射は、隣接する構造物の影になるため同図中の上面と西側側面の一部(図中斜線部④、⑤)に当たる。本実験では日射の影響をみるため材令2日の時点で脱型が行われた。

計測は、同図右側に示した壁体長手方向中央断面において温度、コンクリート応力、ひずみが各々熱電対(T型)、有効応力計、モールドゲージにより測定される。また、日射量は壁体の上に設置したロビッチ日記日射計により観測される。

3. 日射の評価法

実験結果を基に数値シミュレーションするに当たって、温度場は熱伝導解析、応力は線型弾性解析をいずれも3次元有限要素法により行うこととするが、温度場解析における日射の影響は、それを等価の外気温に換算する「相当外気温」の考え方をを用いて考慮する²⁾。

相当外気温 t_e は、観測された日射量 J を用いることによって次式のように表すことができる。

$$t_e = t_o + A_{su} \cdot J / \alpha_o \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$J_{④} = J_t / 12.0, \quad J_{⑤} = J_t \cdot \cosh \cdot \cos(p-f) / \sinh \quad \dots\dots\dots (2)$$

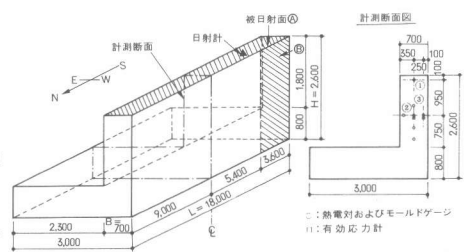


図1 構造物の概要(単位:mm)

表1 コンクリートの配合

呼び強度 (kgf/cm ²)	粗骨材の 最大寸法 (mm)	スラブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単 位 量 (kgf/m ³)			
						W	C	S	G
210	25	15	1.2	55.0	49.0	198	360	854	1,020

$$\sin h = \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \tau, \quad h > 0 \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$\cos p = (\sin h \cdot \sin \varphi - \sin \delta) \cdot \operatorname{sech} \cdot \sec \varphi, \quad |p - f| \leq \pi/2 \quad \dots \dots \dots (4)$$

ここに、 t_o : 外気温、 J : 日射量 (J/m^2h)、で添字④、⑥は各々図1の被日射面でのそれを表す、 A_{su} : 表面の日射吸収率であり本実験構造物のように打設直後の明るい色のコンクリートの場合は0.6程度の値をとる。³⁾ α_o : コンクリート表面の熱伝達率 ($=41.84 J/m^2h^{\circ}C$ 、一定)、 J_t : ロビッチ日射計により測定された1日の総日射量 (J/m^2d)、 h : 太陽高度、 p : 太陽方位、 f : 垂直面方位 ($=\pi/2$ 、西向)、 φ : 解析対象地点の緯度 ($=34^{\circ}50'$ 、愛知県豊川市)、 δ : 太陽赤緯 ($=0^{\circ}00'$ 、秋分9/23前後)、 τ : 時角 ($=15 \Delta t$ 、 Δt : 任意時刻と正午との時間差 (hr)、午前を負、午後を正とする) である。ここで、熱伝達率については解析値が実測値によく対応するように従来の値を参考にしつつ決めた。また、温度場はセメントの水和熱による温度上昇を加味した上で日射による影響を区別して考えるため、1) 上面④のみに日射を受ける場合、2) 側面⑥のみにそれを受ける場合、3) 外気温変動のみを受ける場合の3つに分けて計算される。

一方、応力解析については、その日変化に注目し、ひびわれ発生前の数日について上述した成分別に午前6時から最大引張応力となる正午までの応力増分を計算することになる。

4. 結果と考察

実験および数値解析の結果から代表的なものを示しつつ、温度ひびわれ発生に対する日射の影響について検討を加えることとする。まず、図2はロビッチ日射計より得られた打設日より20日間の各日の日射総量を示したものである。また、その間の代表的な数日(図2中*)における日射量の日変化

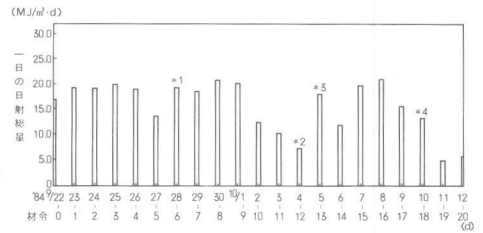


図2 日射総量の変化

および天候を図3に示した。日射量の日変化の波形および日射量はその日の天候により大きく変わることになる。図4はこの結果を用い、上述の式(1)~(4)より計算された④、⑥面(図1参照)における相当外気温の経時変化を外気温の実測値と併せ示したものである。日射による相当外気温の日変化は外気温のそれに比べいずれも数倍程度大きくなっており、特に水平面である④面において著しい。たとえば材令3日に当たる9月25日には外気温の日変化が10°C程度であるのに対しそれは36°Cにも達している。当然であるが、相当外気温は常に外気温より大きくなり、コンクリートの被日射面が急激な温度変化を受けることが示唆される。

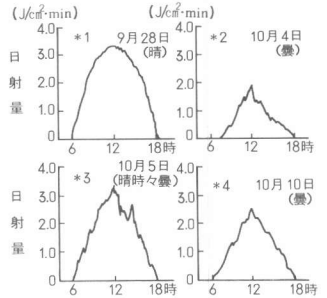


図3 代表的な日射量の日変化

つぎに、図4で得られた外気温、および相当外気温を用いて、上述の3ケースについて各々温度場解析を行うわけであるが、図5は計算された代表的なⅡ-①、Ⅱ-②、Ⅱ-③点でのコンクリート温度の経時変化を示したものである。また、同図には測点Ⅰ-②、Ⅰ-③で実測されたコンクリート応力の経時変化、およびひびわれ発生前日(後述)の材令6日の午前6時から12時までの要因別の応力変化値を同時に示している。ここで有効弾性係数は、日変化のみを考える場合は高々数時間程度の変化であるから、クリープ等による応力緩和は十分小さいと考え、材令6日の弾性係数をそのまま用い、 $E_e = 2.35 \times 10^6 \text{ tf/m}^2$ とする。温度は水和熱により温度上昇・降下過程をたどるが、その日変化は、上面④、⑥に近い測点Ⅱ-①、Ⅱ-③において

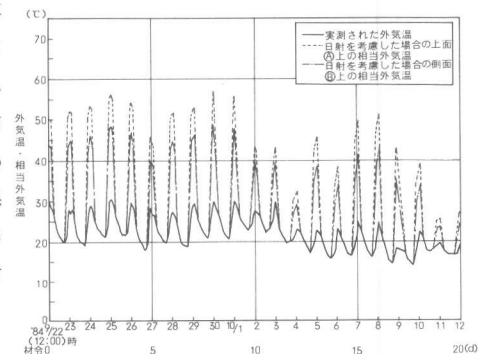


図4 外気温・相当外気温の経時変化

大きくなっているが、断面中心部の測点Ⅱ-②では小さくなっていることが分かる。これは、本構造物のように壁厚が大きいとコンクリート表面で短周期の温度変化を受けても表面部付近の熱収支に限定されることを示唆しているものと考え得る。一方、断面中心部測点Ⅰ-②のコンクリート応力は、巨視的には温度上昇・降下過程において圧縮から引張へと変わるが、その日変化は温度のそれに対応して正午から14時の間に最大となるような周期で昇降していることが認められる。また材令7日正午頃には中心部および表面部(Ⅰ-②, Ⅰ-③点)共に応力が急変しており、ひびわれが発生したものと思われる。実際材令12日においてひびわれの発生が確認されている(後述図8参照)。材令8日以降は水和熱による温度支配が小さくなるため日変化は材令7日までより一層大きくなっている。ここで、材令6日におけるⅠ-②点の応力の日変化に着目すると、応力は午前6時から正午にかけて 2kgf/cm^2 程度引張側に増加していることが認められる。実測値と計算値はよく一致しているが、要因別にみると外気温および上面④への日射による応力増分は各々 1kgf/cm^2 程度引張側に増加しているのに対し、側面⑥の日射による影響はほとんどみられないことが分かる。

つぎに、こういった日射による見かけの外気温変動が構造物全体の応力変化に与える影響度をさらに詳しく調べるため、上述の材令6日における応力の増分量の分布を3次元的に表したものが図6, 7である。図の応力分布は、(a)外気温のみを考慮した場合、(b)上面④に日射を考慮した場合、および(c)それらの合計、に分けて示している。まず、壁体の断面Pにおける壁厚方向の応力増分分布を示した図6に着目する。その応力は(a)では中心部が引張側、表面部は圧縮側、(b)では一様に引張側に増加しているが、(c)では直接日射を受ける南側よりの中心部で引張応力が大きいものの、それから離れるとかなり小さくなっている。

結果的に、(a)~(c)を総合すると(d)に示すように応力は

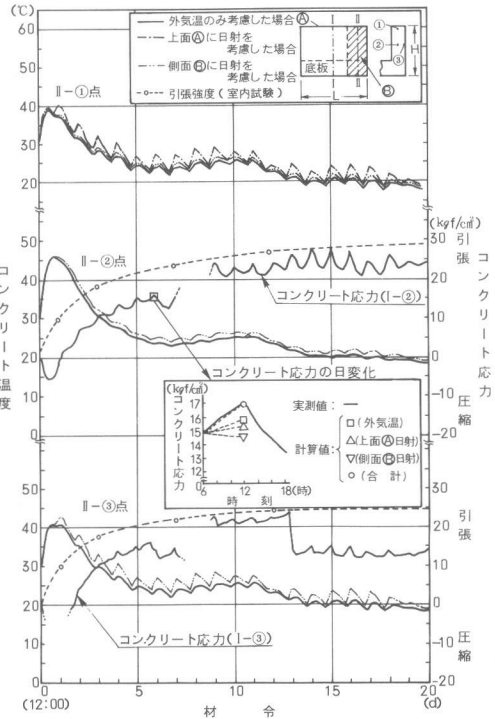


図5 コンクリート温度および応力の経時変化

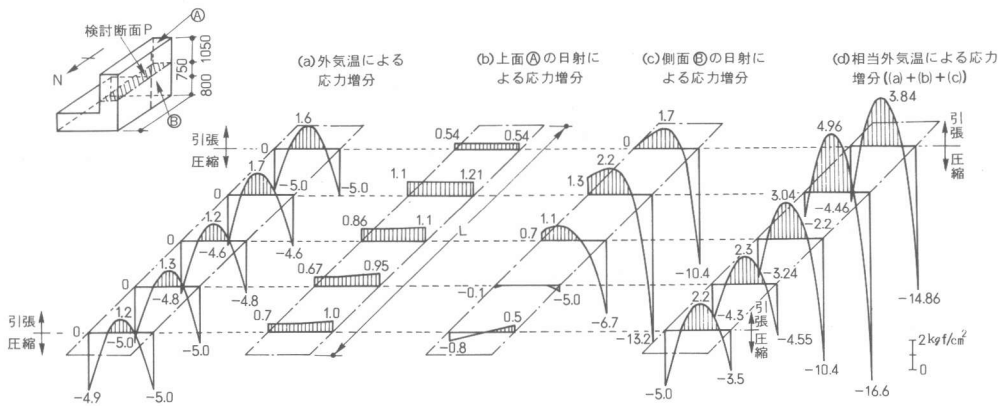


図6 断面Pにおけるコンクリート応力の増分分布

壁厚方向断面では表面部で圧縮側、中心部で引張側に増大することとなって、長手方向には日射の当たる南側部においてそれらが一層大きくなっている。つぎに、図7は断面Qにおける高さ方向の応力増分分布を示したものであるが、(a)、(b)共に応力は上端部で圧縮側、中心部および下端部で引張側に増加しており、特に日射を全面に受ける(b)の上端部において圧縮応力が大きくなっている。また、(c)では日射面である南側部でのみ引張応力の増大がみられ、結局、合計応力は(d)に示すように上面のみ圧縮で、それ以外は引張となり最大増加応力は 5.45 kgf/cm^2 となっている。ちなみにこの時の引張増加応力の各要因別比率は、(a) 34%、(b) 29%、(c) 37%であり、日射の影響は全体の66%を占めることになる。つまり、構造物が日射を受けると被日射表面付近は温度上昇し、躯体表面部が膨張することによって圧縮応力が作用するが、一方で温度変化の小さい中心部では応力平衡作用によって逆に引張応力が生じ、増大することになる。加えて、その変化は短時間で起こるためクリープによる応力緩和は小さく、壁体中心部に $2 \sim 5 \text{ kgf/cm}^2$ 程度の急激な引張応力の増大を生むことになったものと考え得る。

最後に、本構造物におけるひびわれ発生状況を図8に示したが、壁体中央および⑥面内にひびわれが確認されており、図5に示したひびわれ発生が日中であることと考え合わせると日射による急激な断面中心部引張応力の増大がひびわれ発生に関与していることは十分納得できる。

5. まとめ

壁体構造物の一部に日射を受ける場合のコンクリート応力の変動に注目し、それが温度ひびわれ発生に与える影響を調べるために実構造物による実験および数値解析を行った。その結果、日射による見かけ上の温度変化は外気温のそれよりもかなり大きく、表面部付近は急激に温度上昇することによって膨張し、圧縮応力が作用することになるが、温度変化の影響を受けない中心部は逆に応力平衡作用によって引張応力が作用・増大することが判明した。さらに、その温度応力変化は周期が短いためクリープによる応力緩和はあまり期待できず、本実験における引張応力は数時間で $2 \sim 5 \text{ kgf/cm}^2$ 程度増加したことが確認された。従って、日射を直接受けるマッシブなコンクリート構造物においては、日射の影響は水和熱に起因する温度ひびわれ発生の引き金的な役割を果たす可能性があると考えられ、ひびわれ予測・対策を行う上で無視できない要因の一つであると考え得る。

最後に、本研究を実施するにあたり多大な御協力を得た(株)熊谷組 西岡吉弘氏に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) マスコンクリートの温度応力研究委員会報告書、日本コンクリート工学協会、1985.11。
- 2) 建築学大系8、彰国社、p.p. 209~275、1969。
- 3) 日本建築学会編：建築設計資料集成 I 環境、丸善、p.122、1978。

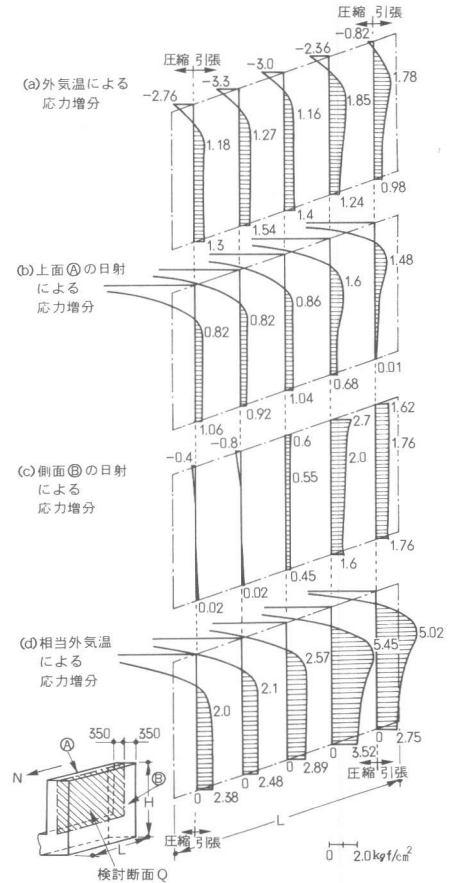


図7 断面Qにおけるコンクリート応力の増分分布

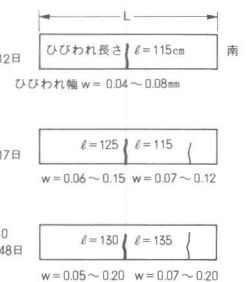


図8 ひびわれ発生状況