

保温養生による外部拘束ひび割れの抑制効果の評価

Assessment of Suppression Effect of Insulated Curing on Cracking Induced by External Restraint

小林 剛^{*1} 槇島 修^{*1} 石塚 健一^{*2}
Takeshi Kobayashi Osamu Makishima Kenichi Ishizuka

【要旨】

打込まれたコンクリートの温度降下速度は、保温養生を実施すると緩やかになる。そのため、クリープによる応力緩和の進行と引張強度の発現により、外部拘束ひび割れの抑制効果が大きくなると考えられている。しかし、現状の温度応力解析手法では、コンクリートの温度降下速度が異なっても温度降下量が同じであれば発生応力は同じ結果となるため、保温養生の実施による外部拘束ひび割れへの抑制効果は評価出来ない。

そこで、コンクリートの保温養生の違いによるひび割れ抑制効果を適切に評価するためには、温度降下速度の違いが内部に生じるひずみに与える影響を実験的に把握する必要があると考え、温度降下速度が異なる実験条件を設定してコンクリート内部の温度およびひずみの計測を行った。

本報告は、温度降下速度が外部拘束ひずみに与える影響と現状の温度応力解析結果との差異について考察し、今後の検討課題を提案するものである。

【キーワード】 外部拘束 ひび割れ 保温養生 ひずみ 温度降下速度 クリープ

1. はじめに

打込まれたコンクリートの温度が外気温と平衡に達するまでの温度降下速度は、最高温度到達後から保温養生を実施すると緩やかになる。そのため、クリープによる応力緩和の進行と引張強度の発現により、外部拘束ひび割れの抑制効果が大きくなる¹⁾とされており、その効果を確認した事例もある²⁾。ただし、現状の温度応力解析手法では、クリープの影響は有効弾性係数を用いることで考慮されているものの、温度降下速度の影響は考慮されていない。

その一例として、コンクリートの温度降下速度が異なる条件で温度応力解析を実施した結果を図-1に示す。この例は、壁部材(壁厚0.5m、壁長12m)を底板が拘束するモデルで評価したものである。なお、壁部材表面の熱伝達条件は、合板型枠を材齢1日で脱型し、以降はコンクリートの露出面の状態と熱伝達率が $2.0\text{W/m}^2\text{C}$ となる保温養生を実施した2つの条件を設定した。図に示すように、壁部材の中心温度が外気温と同程度になる期間は保温条件の違いによって異なり、温度降下速度に変化が生じるが、ひび割れ指数は同一となった。このように、温度応力解析では、保温養生の違いによる外部拘束ひび割れの発生に与える影響は評価できていない。

そこで、コンクリートの温度降下速度の違いによるひび割れ抑制効果を適切に評価するためには、コンクリートの温度降下速度がコンクリート内部に生じるひずみに

与える影響を把握する必要があると考え、温度降下速度が異なる小型試験体を用いて温度およびひずみの計測を行った。

本報告は、温度降下速度が異なる条件が内部に生じるひずみに与える影響と温度応力解析結果との差異について考察するものである。

2. 実験および解析の実施概要

小型試験体の寸法および計器設置位置を図-2に示す。小型試験体は、底板(厚さ300mm)と壁部材(壁厚500mm、壁長1100mm)で構成した。

実験では、壁部材の温度が最高温度に達してから外気

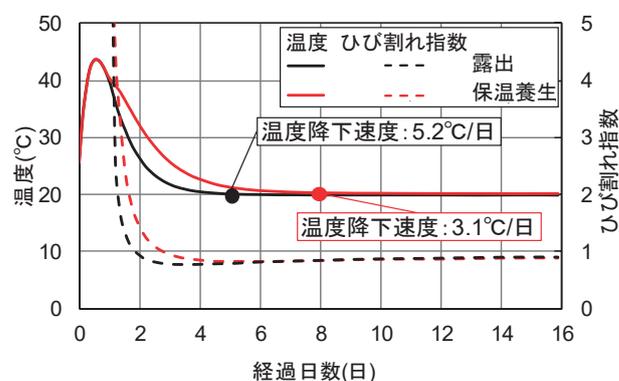


図-1 コンクリートの温度降下速度が異なる条件で温度応力解析を実施した結果

1. 技術研究所 研究開発 G 第三研究室
2. 土木事業本部 土木 DX 推進部 土木 CIMG

温と同等の温度に低下するまでの温度降下速度の違いを設定するため、保温効果の異なる養生方法と打設時期の異なる条件とした。設定した保温方法と実施時期を表-1に示す。いずれの試験体も型枠に保温効果の高い断熱型枠（合板+厚さ200mmのスタイロフォーム）を用い、最高温度に達した以降の保温方法を変化させることで温度降下速度の異なる条件を設定した。最高温度到達後の保温方法は、コンクリートの露出面のままとしたケース（以降、「露出」と示す）と、気泡シート3枚を設置したケース（以降、「保温」と示す）と、断熱型枠を存置したケース（以降、「断熱」と示す）の3水準とした。また、打込み温度や外気温が異なれば同一の保温方法でも温度降下速度の違いが生じると考えられることから、秋期（10月～11月）と冬期（2月～3月）に実験を実施した。

使用したコンクリートは、普通ポルトランドセメントを用いた、水セメント比50.8%、単位セメント量339kg/m³、細骨材率44.8%の配合とした。使用したコンクリートの配合を表-2に示す。

温度およびひずみは、図-2に示すように外部拘束の影響を受ける壁部材の下部から150mmの高さ、壁厚中央から55mmの位置に設置した埋設型ひずみ計を用い、10分間隔で計測した。

温度応力解析の実施にあたっては、実測の温度結果に基づく応力状態を評価するため、断熱温度上昇特性に関するパラメータと熱伝達率を、温度計測結果と一致するように同定解析を行って設定した。

3. 実験結果および考察

3.1 温度降下速度の評価

秋期に実施した温度計測結果を図-3に、冬期に実施した温度計測結果を図-4に示す。打込み温度は、秋期が19.0℃、冬期が13.8℃であり、最高温度は秋期が41.4℃、冬期が34.6℃であった。

秋期における異なる保温方法とした時点（材齢2日）から外気温と同程度となるまでの期間は、「断熱」が約12日、「保温」が約4日、「露出」が約3日であった。さらに、最高温度からの温度降下量を前述の日数で除した温度降下速度は、「断熱」が2.1℃/日、「保温」が6.8℃/日、「露出」が9.1℃/日となり、「断熱」、「保温」、「露出」の順に大きく、保温効果が高いケースほど温度降下速度が小さくなることを確認した。また、冬期における異なる保温方法とした時点から外気温と同程度となるまでの期間は、「断熱」が約14日、「保温」が約6日、「露出」が約5日であり、温度降下速度は、「断熱」が1.6℃/日、「保温」が4.0℃/日、「露出」が4.6℃/日となり、温度降下速度の大きい順は秋期と同様であった。

温度降下量と温度降下速度の関係を図-5に示す。図に示すように、温度降下量が大きいほど温度降下速度が

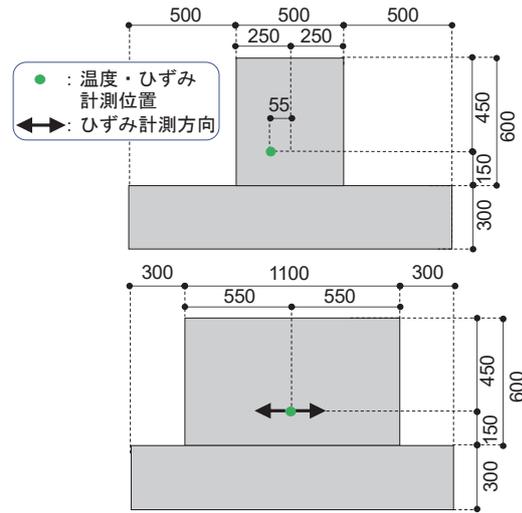


図-2 小型試験体の寸法および計器設置位置

表-1 保温方法と実施時期

実施時期	実験ケース	保温方法
秋期・冬期	露出	断熱型枠脱型後、露出面
	保温	断熱型枠脱型後、気泡シート3枚設置
	断熱	断熱型枠存置

表-2 使用したコンクリートの配合

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
		水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
50.8	44.8	172	339	558	1007	3.39

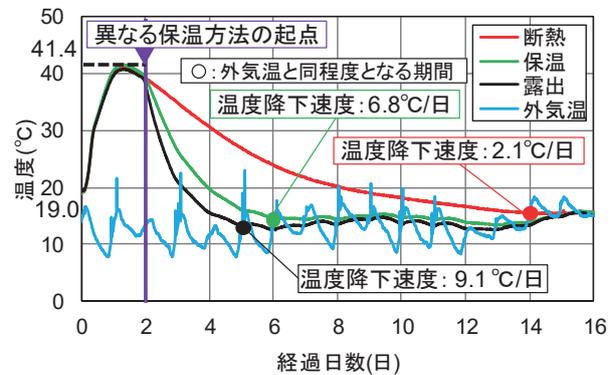


図-3 温度計測結果（秋期）

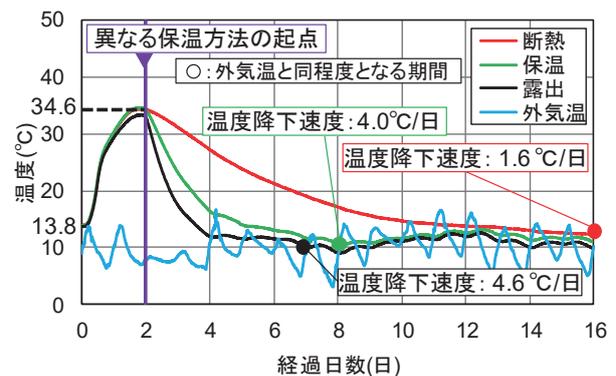


図-4 温度計測結果（冬期）

大きくなる傾向であり、冬期に比べて秋期の温度降下速度が大きい傾向になった。なお、「断熱」では、実施時期の違いによって温度降下量に差異は生じているが、温度降下速度は同程度であった。

このことから、設定した保温方法の違いと実施時期の違いによって、異なる保温方法とした後の温度降下速度は幅広い範囲（1.6～9.1℃/日）で変化させることができた。

3.2 温度降下速度がひずみに与える影響

秋期に実施したひずみの計測結果を図-6に、冬期に実施したひずみの計測結果を図-7に示す。すべての実験ケースにおいて、打込みから最高温度到達時点までは圧縮側にひずみが増加し、最高温度到達後は時間とともに減少し、部材の温度が外気温と同程度となる期間とほぼ同じ期間にひずみが収束することを確認した。秋期における温度が外気温と同程度となる期間のひずみは、「断熱」が35μ、「保温」が-35μ、「露出」が-130μであり、冬期では、「断熱」が28μ、「保温」が-4μ、「露出」が-43μであった。この結果から、秋期および冬期の「断熱」はいずれも圧縮側のひずみとなっており、「露出」のひずみが最も小さい値を示した。

次に、コンクリート温度が外気温と同程度となる期間のひずみと温度降下速度の関係を図-8に示す。両者には、相関が見られ（ $R^2=0.899$ ）、温度降下速度が大きいほど発生する引張ひずみは大きくなることが確認された。

このことから、温度応力解析で、クリープの影響を適切に評価できれば、温度降下速度の違いによって変化する温度応力を適切に予測できるものと考えられる。

3.3 実験結果と温度応力解析結果との比較

秋期に実施したひずみの実測値と解析値を図-9に、冬期に実施したひずみの実測値と解析値を図-10に示す。最高温度到達時点における実測値と解析値には、秋期が最大107μ、冬期が最大128μの差が生じており、この時点のひずみの挙動は一致していない。また、温度応力解析では、解析値の温度が外気温と同程度となる期間のひずみは温度降下速度の違いに関わらず同程度であり、秋期は-17μ、冬期は-105μを示した。なお、ひずみの実測値と解析値が最も近い実験ケースは、秋期の「保温」であり、その差は5μと小さい。

このように、秋期に実施した「保温」の温度降下速度であれば、ひずみの実測値と解析値が概ね一致することから、これよりも温度降下速度が小さい条件（冬期の「断熱」など）では、実測値よりもひずみが小さく（引張側）なることが予測されるため、ひずみに対する評価に限っては、安全側の評価となっている。一方で、これよりも温度降下速度が大きい条件（秋期の「露出」）では、実測

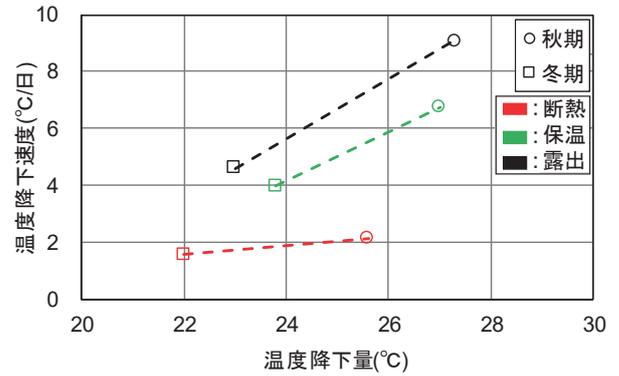


図-5 温度降下量と温度降下速度の関係

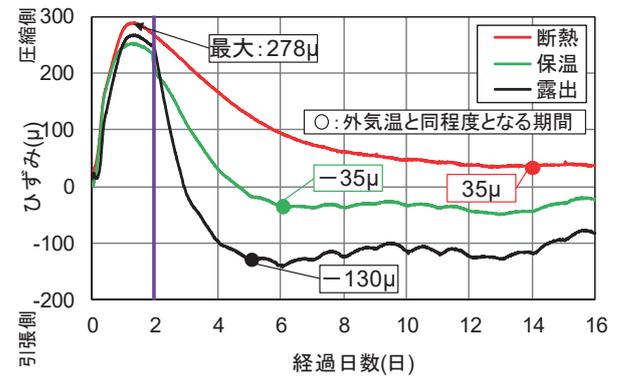


図-6 ひずみ計測結果（秋期）

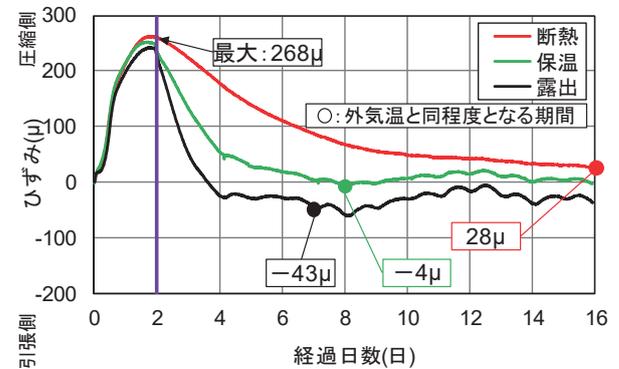


図-7 ひずみ計測結果（冬期）

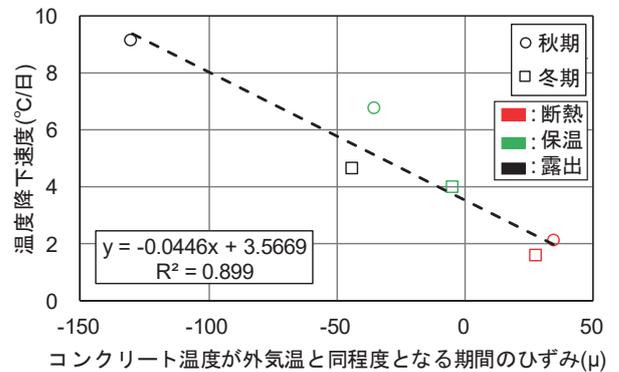


図-8 コンクリート温度が外気温と同程度となる期間のひずみと温度降下速度の関係

値よりもひずみが大きく（圧縮側）なることが予測されるため、ひずみに対する評価に限っては、危険側の評価となっている。したがって、温度応力解析では、温度降下速度に応じた適切な評価が今後の検討課題となるものと考えられる。

4. まとめ

以下に得られた結果をまとめる。

- ・温度降下速度とひずみには相関が見られ、温度降下速度が大きいほど発生する引張ひずみは大きくなることが確認された。
- ・温度降下速度が大きい条件では、温度応力解析によるひずみの解析値が危険側の判断となる可能性が認められ、温度降下速度に応じた適切な評価が今後の検討課題となるものと考えられる。

【参考文献】

- 1) 日本コンクリート工学会：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2016, p.32, 2016.
- 2) 國武昌人他：ボックスカルバート壁体の温度ひび割れ防止養生方法, 農業農村工学会, 農業土木学会論文集 第180号, 第63巻, 第6号, pp.741-749, 1993.

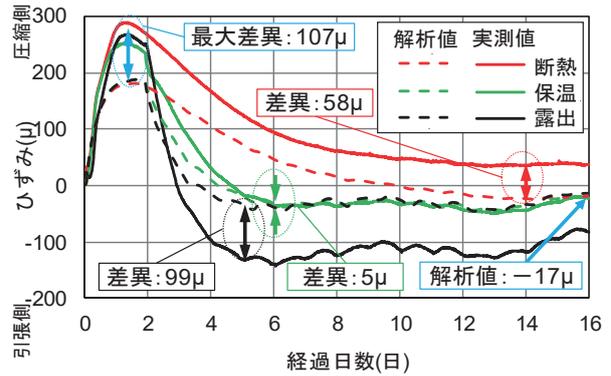


図-9 ひずみの実測値と解析値（秋期）

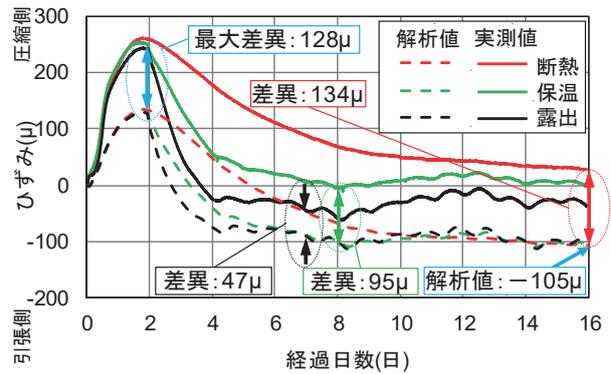


図-10 ひずみの実測値と解析値（冬期）

Summary The temperature drop rate of placed concrete slows down under insulated curing. Namely, progressive stress relaxation caused by creep and development of tensile strength are thought to enhance the effectiveness of suppressing cracking induced by external restraint. However, with the current temperature stress analysis method, the effectiveness of insulated curing for suppression of such cracking cannot be assessed because the generated stresses become the same as long as the amount of temperature decrease of the concrete is the same even when its rate of decrease is different. Consequently, appropriate assessment of the cracking suppression effect for different insulated concrete curing was thought to require experimental understanding of influences of differences in temperature drop rates on the stress occurring inside the concrete. Measurements of the temperature and strain inside the concrete were made by establishing experimental conditions, including different temperature drop rates. This paper discusses the differences between the effects of temperature drop rates on external restraint strain and the results of temperature stress analysis, and proposes subjects for future study.

Key Words : External restraint, Crack, Heat retention, Strain, Creep