

PC 型枠を用いたコンクリートキャスク伝熱試験

株式会社ピーエス三菱 本社技術本部 開発技術第二部 正会員 ○杉本 昌由 正会員 藤元 安宏
法政大学工学部 満木 泰朗 溝淵 利明

1. 背景・目的

原子力発電所からの使用済み燃料は、再処理工場の完成の遅れから再処理するまでの間、施設に中間貯蔵することが計画されている。キャスク (図1) による使用済燃料の貯蔵は、中間貯蔵の有効な方式であり、コンクリートキャスクによる方法は海外では既に実用化されており我が国においても実現の可能性が大きいと期待されている。コンクリートキャスクの製造では、従来の型枠による方法や、各種構造物で多く採用されているプレキャスト型枠を用いる方法があります。株式会社ピーエス三菱では、地下の貯水槽を合理的に建設するためにプレキャストプレストレストコンクリートセグメントによる方法を開発した。この方法がキャスクコンクリート用の型枠として使用できることに着目し、プレキャストプレストレストコンクリート型枠 (PC型枠) を用いたコンクリートキャスクの製造についての研究を始めた。

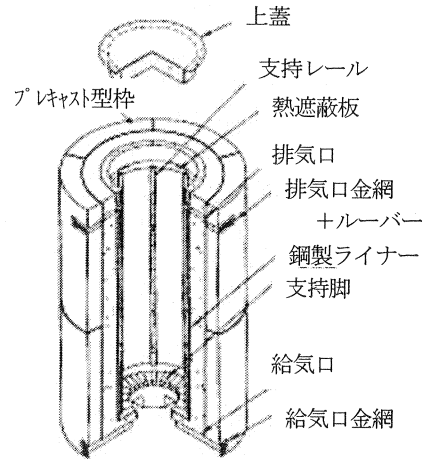


図1. コンクリート製貯蔵容器の例

本試験は、このような背景のもと、品質の点で優れたPC型枠を用いて長期にわたり耐久的なコンクリートキャスクを経済的に製造することを目的としており、PC型枠をコンクリートキャスク外側に設け、内部コンクリートを施工、内蔵される使用済み燃料発熱体により発生するコンクリートキャスクの熱応力 (設計温度 $T = 65^{\circ}\text{C}$) を、セグメントの内ケーブルおよび型枠外側のPC鋼材の外ケーブルの緊張力により拘束しひび割れが発生しないようにすることが可能性であるかを検証する。

2. 実験の経過と結果

PC型枠を用いたコンクリートキャスクの製造についての研究に着手し、以下の実験および解析を行った。

1) PC型枠による拘束効果確認試験

PC型枠による拘束効果の確認を目的としているため、試験に用いる型枠 (外径 2350mm×厚さ 175mm×長さ 2430mm) は円筒4分割のプレキャスト型枠にプレストレスを導入して一体化したもの (以下PC型枠) と比較のためのコンクリート製の円筒型枠 (以下比較型枠) である。この型枠にコンクリートを打設し約1ヶ月間、温度およびひずみを測定し

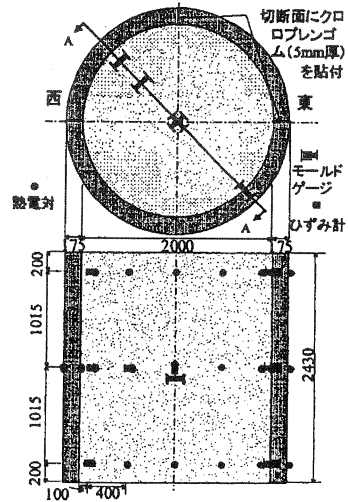


図2. 試験体の概要図

た(図2)。また、予備的な解析によりPC型枠への水和熱の影響は中実、中空ともほぼ同等と確認できたので、実験では中実の縮尺模型とした。

イ) 解析概要

マスコンクリートの温度応力専用プログラムソフト (ASTEAMACS for windows Ver. 2) を用いて、温度・応力解析を行った。解析では半円柱モデルでコンクリートの熱特性値、表面熱伝導率、力学的特性値をパラメータとした。

ロ) 温度

試験結果を(図3)に示す。PC型枠と比較型枠の温度履歴はほぼ同等であり、試験体中央部では、コンクリート温度は比較・PC型枠ともに材例1日で約90℃のピークに達し、約15日後常温に戻っている。また、型枠表面の温度は、コンクリートの水和熱のみならず外気温にも影響することがわかった。これに対し、試験体各部の温度解析を行ったところ、上面・側面・下面の表面熱伝達率を各3, 10, 6 [W/m²℃] と適切に設定することにより日変化も含めて再現できることが確認できた。

ハ) ひずみ

試験体各部のひずみ測定結果により、PC型枠中央部のひずみ、ピーク時で比較型枠と比べ約70μ小さく、PCの効果が認められた。ひずみは、材齢約1日でピークに達し、それまでは膨張し、それ以降は収縮する。これは、温度変化に伴う熱膨張および収縮による影響と判断できる。また、実験により求めた初期の弾性係数と圧縮強度の関係 ($E=4296 \times f_c^{0.616}$)、線膨張係数 (6 μ/℃) 等を入力条件として解析を行った。なお、実測値は、凝結時間を考慮し、ひずみの零点を打設後6時間とした結果、PCを導入していないものについては実験値と一致した(図4)。

以上の結果より水和熱による温度変化についてはPCによる影響はほとんどなく解析結果とほぼ一致した。ひずみに対しては、PCによる拘束効果が存在することが確認できた。

2) 温度・応力解析

イ) 解析概要

本解析では、これまで検討されているキャスクを用いて円筒部が1/2および1/3の縮尺モデルで温度・応力解析を行った。温度上昇速度は、2℃/hでコンクリート内表面温度が65℃まで上昇させ、外気温は25℃一定とした。解析では、内部コンクリートの熱伝導率 (2.4W/m℃)、線膨張係数 (6 μ

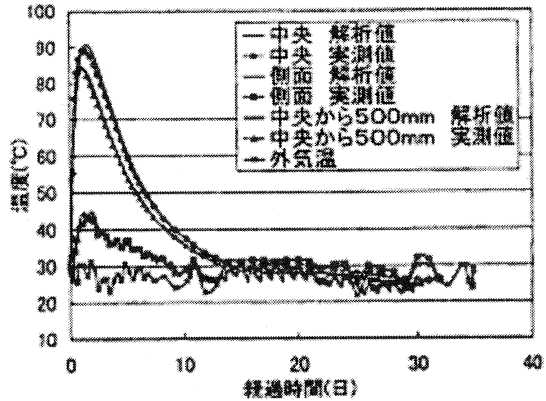


図3. 温度の実測値および解析値

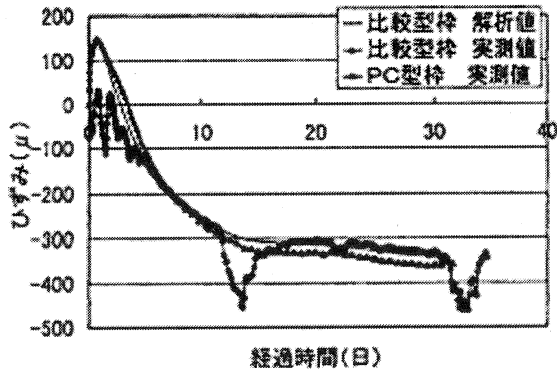


図4. ひずみの実測値および解析値 (中央)

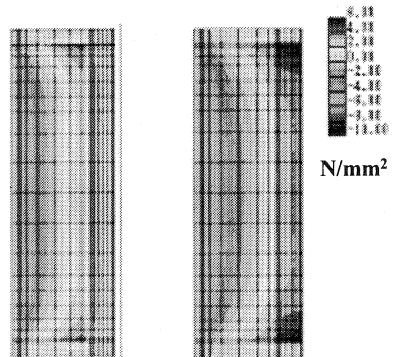


図5. 応力分布解析結果

°C)、表面熱伝達率(側面・上面10、下面6W/m²C)とした。

ロ) 解析結果および考察

1/2, 1/3 縮尺モデルとともに内部コンクリートとPC型枠が一体構造である場合、無い場合とも内部コンクリートの端部に高引張応力が発生していた(図5)。PC型枠と打設コンクリートとの付着がない場合は内部コンクリートに比較的大きな引張応力が発生し、ひび割れ発生の可能性があると考えられる。一方、一体構造の場合、中間部で円筒外側に高引張応力が発生しているが内部コンクリートの引張応力を小さくでき、さらにPC型枠にプレストレスを導入すると、PC型枠の引張応力が小さくできるかまたは圧縮にすることが可能である。したがって、PC型枠と内部コンクリートを一体構造にすることは重要なことであると考えられる。また、実験に用いる縮尺モデルの寸法として、長さとしては2m程度以上が望ましいことがわかった。

3) 中空モデルによるコンクリートキャスク伝熱試験

イ) コンクリートの使用材料および配合

使用したセメントは、太平洋セメント社製の早強ポルトランドセメント、細骨材は足柄上郡中井町産(粗砂)、千葉県市原産(細砂)および足柄上郡山北町産(川砂)であり、混合比(質量)は6:2:2である。粗骨材は神奈川県山北町産(砕石)および足柄上郡中井町産(山砂利)であり、混合比(質量)は、4:6である。混和剤はAE減水剤標準形1種 ポソリス78Sである。使用したコンクリートの配合を表1に示す。

表1. 使用コンクリートの配合

| 目標 圧縮強度 (N/mm ²) | 粗骨材の 最大寸法 (mm) | スランブ (cm) | 水セメント比 W/C (%) | 空気量 (%) | 細骨材率 s/a (%) | 単位水量 W (kg/m ³) |
|------------------------------------|----------------------|--------------|----------------------|------------|--------------------|-----------------------------------|
| 30 | 25 | 12 | 44.7 | 4.5 | 42.9 | 174 |

ロ) 水和熱によるコンクリートキャスクの温度・ひずみ測定

試験に用いるPC型枠(外径φ3400mm×厚さ200mm×長さ1800mm)は(株)ピーエス三菱社製のPCNetセグメントを高さ方向に2リング使用して組み立てた。組み立てにあたって、1.69MPaのプレストレスを導入した。インナーライナーは(鋼製・直径1640mm×厚さ9mm)を用い、これらを型枠としコンクリートを打設し、中空円筒体を作成した。PCNetセグメントと場所打ちコンクリートを一体構造とするためにセグメント内側にはチップング処理をほどこした。測定は温度・変位・ひずみ・プレストレス力とし、打設後水和熱による温度が下降して常温になるまでは1時間間隔で行った(図6)。なお、コンクリートの打ち込み時からの外気温の変化は6.7°Cから16.2°Cであった。

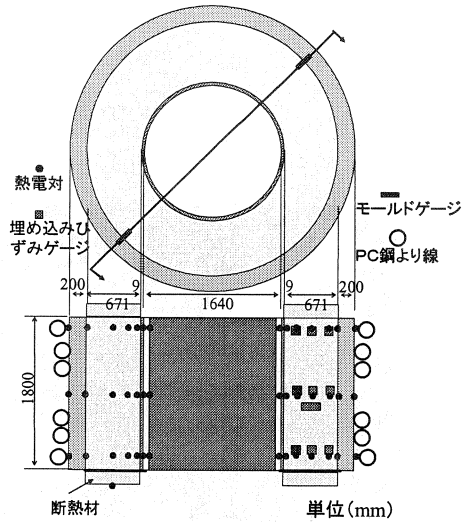


図6. 供試体概要図

ハ) 結果と考察

温度は、材齢約1.2日でピークに達し、内部コンクリート中央部で60°C、型枠側面24°C、型枠と内部コンクリート接触面で39°Cであった。また、内部コンクリートでは中央よりライナー側の温度が、高い傾向にあった。これは、ライナーの内側に伝熱試験用のヒーターが設置されており、このため、ライナー内面の表面熱伝達率が、型枠側面と比べ小さいためと考えられる。また、材齢約16日で常温になることがわかった。内部コンクリートを含めて温度の日変化は外気温に起因しており、特に型枠側面では、外気温の日変化とほぼ同等に変化した(図7)。ひずみは、上段内部コンクリート型枠側、内部コンクリート中央から270mmライナー側で最も大きく約400μ、内部コンクリート中央部のピーク時で325μであった。また、材齢約1.3日でピークに達し、それまでは膨張し、それ以降は収縮した。これは、温度変化に伴う熱膨張および収縮による影響と判断できる(図8)。なお、水和熱によるひび割れは観察されなかった。

3. まとめ

①製造時を想定したコンクリートキャスク実験

断熱温度上昇式、表面熱伝達率、線膨張係数を適切に設定することにより、温度、ひずみの実測値と解析値はほぼ一致した。

②貯蔵時を想定した温度応力解析

PC型枠と内部コンクリートを一体構造にすることによって内部コンクリートの中間部の引張応力を小さくできる。

③コンクリートキャスク伝熱試験

コンクリート製造時におけるセメントの水和熱によるコンクリートキャスクの温度およびひずみ履歴を得ることができた。

今後は、使用済み燃料貯蔵時を対象とした伝熱試験を続ける予定である。

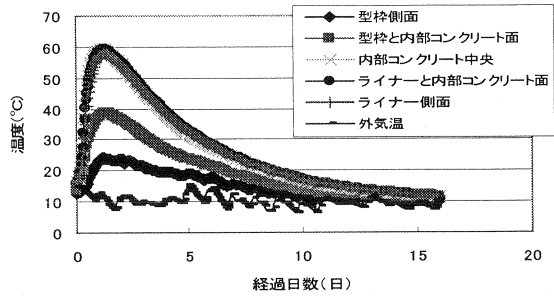


図7. 温度と経過時間の関係

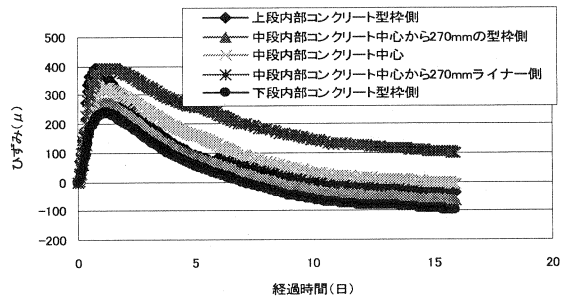


図8. ひずみと経過時間の関係

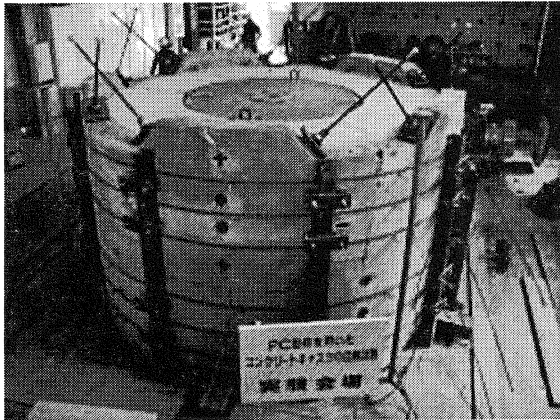


図9. 供試体写真

参考文献

- 1) 満木泰朗ほか：プレキャストPC型枠を用いたコンクリート製使用済み燃料貯蔵容器の開発 (その1) 日本原子力学会「2002年春」
- 2) 三枝利有ほか：コンクリートキャスクの確証試験 (1) -コンクリート製貯蔵容器の製作- 日本原子力学会「2002年秋」
- 3) 使用済み燃料貯蔵用コンクリート容器の温度応力特性に関する検討 土木学会第57回年次学術講演会 (平成14年9月)