

(5) エジプトにおけるPCタンク築造工事のひび割れ抑制について

大日本土木 (株) 海外事業部 非会員 波多野 秀美
 同 上 非会員 古谷 明彦
 同 上 非会員 川上 茂
 (株) 安部工業所 ○正会員 出川 寛和

1. はじめに

近年の鉄筋コンクリート構造物やプレストレストコンクリート構造物は大型化し、マスコンクリート化や富配合コンクリートの使用によるひび割れの発生が問題になるケースが増加してきている。

今回エジプト国ギザ市にて施工したポストテンション方式円筒形プレストレストコンクリート配水池は、上水の貯水を目的とする施設であることから、当然の事ながら水密性が要求され、ひび割れの処理や防水の信頼性また酷暑地での構造物の耐久性を考慮すると、有害なひび割れの発生は可能な限り低減する必要がある。当工事は、第1期と第2期でほぼ同じ規模の配水池を2池(第1期:14,000t 写真-1、第2期:11,000t 写真-2)築造したが、第1配水池で実施したひび割れ抑制対策が準備不足であったために側壁にひびわれが確認された。

本報告はこれを受けて第2配水池、特にPC配水池各部の施工において最もコンクリートの温度上昇が大きく、下端部が拘束されることでコンクリートの収縮が抑制されることから温度応力ひび割れが最も発生しやすい側壁の1段目に特定してひび割れ制御のために計画・実施した対策をとりまとめたものである。

2. 工事概要

この工事は、ギザ市の上水道供給施設改善のための日本国無償援助工事として実施されたもので、送配水システムの構築を通して地域住民の生活環境を改善することを目的としている。ここではPC配水池に限定してその概要及び完成写真を示す。

表-1 配水池概要

	第1配水池	第2配水池
有効容量	14000 t	11000 t
内径	34.3 m	31.7 m
有効水深	15.2 m	14.0 m
壁厚下端部	59 cm	59 cm
壁厚上端部	35 cm	35 cm
縦縮本数	420 本	306 本
横縮段数	104 段	84 段



写真-1 第1配水池完成写真

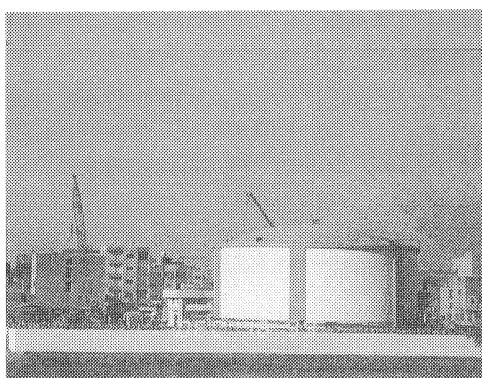


写真-2 第2配水池完成写真

3. 環境条件

ギザ地区はデルタ地帯と砂漠地帯の中間的な位置にあり半砂漠気候に属する。夏期の月別平均最高温度が38℃、最低温度が19℃と寒暖の差が大きく、最高温度は40℃以上になることもある(図-1)。湿度は年間を通じて低く(図-2)、夏期には50%程度になる。例年の年間総降雨量は20mm程度であるが1998年は6mm程度であった(図-3)。このような気候条件の中、使用するコンクリート用骨材は絶乾状態となっており、また夏期には暑中コンクリートの対策も必要となる。

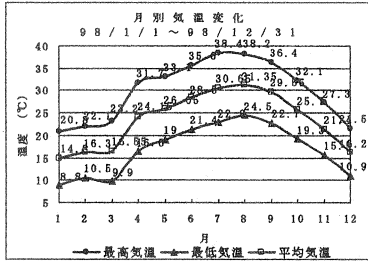


図-1 月別平均気温

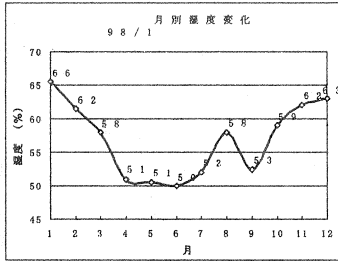


図-2 月別平均湿度

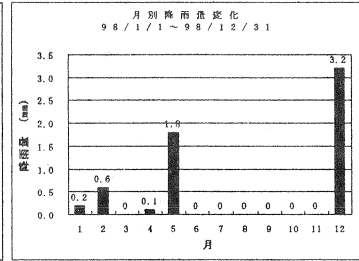


図-3 月別平均降雨量

4. 第2配水池におけるひび割れ抑制対策

第2配水池におけるひび割れ抑制対策の検討フローを図-4に示す。

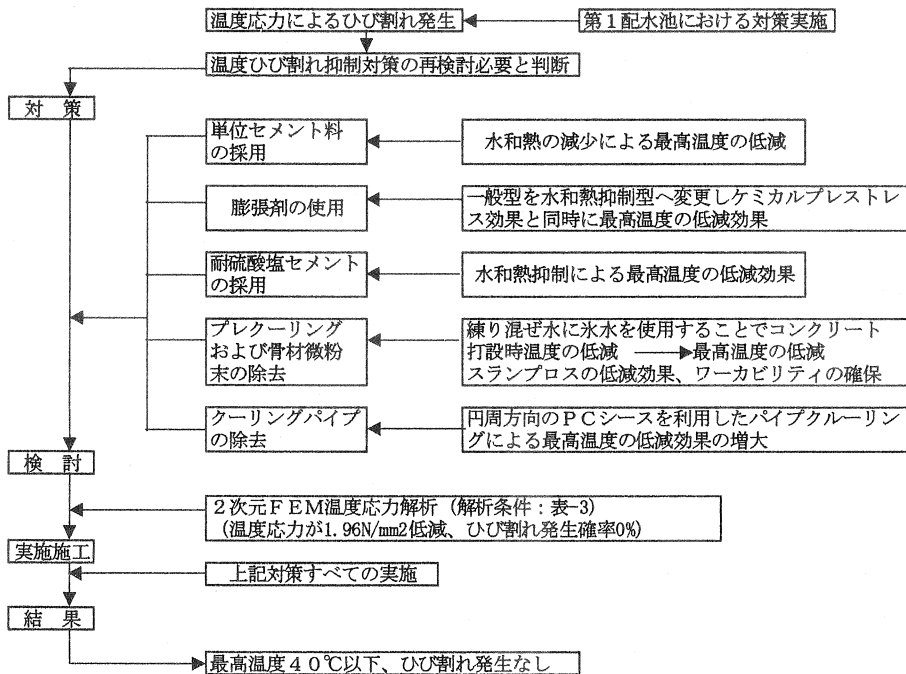


図-4 第2配水池におけるひび割れ抑制対策検討フロー

4.1 単位セメント量の低減

1期工事の圧縮強度試験結果の実績から単位セメント量のある程度減らしても必要強度は確保できると判

断し、2期工事に関してはより水和熱を抑えるために単位セメント量を低減させる方針を打ち出し試験練りを行った。

混和材を変えたりするなど幾度かの試験練りを行い、スランブは維持しつつかつ所定強度を確保するのに第1配水池施工時の $400\text{kg}/\text{m}^3$ に対し $380\text{kg}/\text{m}^3$ の単位セメント量まで減らすことに成功した。同時に水量も $10\text{kg}/\text{m}^3$ 低減可能となった。標準示方書によれば「単位セメント量 $10\text{kg}/\text{m}^3$ でコンクリートの温度上昇を 1°C 低減可能である」とあり、したがって、 2°C の温度低減効果が期待できる。経済効果から言えばかなりのセメント量の節約ができることになる。

4.2 水和熱抑制型膨張材の検討

単位セメント量が決まった後、セメントの一部を置換するための膨張材の選定を行った。第1配水池に使用した乾燥収縮対応型の普通膨張材を、同メーカーから販売されている水和熱抑制型膨張材への変更を検討した。エジプト産セメントでの施工実績及び実験データが全く無かったため、埋め込み形の温度計を使用して温度履歴および強度発現状況に関する調査試験を繰り返して行った。結果として最高発生温度を 8°C 前後低減させられることが判明した。

また強度発現状況も期待通りの結果が得られ、どの試験練りにおいても初期硬化速度が遅延材を投入したように遅くなることも判った。同時に、材料の膨張性に関しては拘束膨張試験をメーカーに依頼し良好な結果を得たことを確認した。

4.3 耐硫酸塩セメント使用の検討

硫酸塩は、中近東広範囲に渡り土中、特に石膏中に多く含まれる成分でセメント成分中のアルミン酸三石灰と化学反応を起こすとコンクリートを膨張させ最終的に破壊の原因になったり、また硫酸塩の溶解水は、コンクリートを浸食させる性質がある。現在エジプトでは、地中構造物に関しては全てタイプ5と呼ばれる耐硫酸塩セメントを使用するように定められている。耐硫酸塩セメントは、普通ポルトランドセメントに比べ成分中のアルミン酸三石灰含有量が少なく、硫酸塩に対して効果がある。この耐硫酸塩セメントは、普通セメントよりもエトリンガイトの形成反応を後進させる性質があるため膨張性に欠け、強度の発生(凝結)が多少遅れがちになりばらつきも出やすくなる。しかし、ゆっくりと水和反応をおこす性質は、水和熱の発生及び急激な反応を抑制することができると考え、この性質を利用し(膨張率の低減は水和熱抑制型膨張材で補うことで)側壁1段目に使用できないか検討した。

数回にわたる温度調査と、実物大供試体のハンチ部における温度調査を行った結果、耐硫酸塩セメント(Type5)を使用した硬化時のコンクリート温度履歴は、中庸熱セメントに似た挙動(図-5参照)が確認された。また試験練りと過去の実績から強度も多少のばらつきがあっても全て必要強度を確保できることも確認することができた。

これらのことから、第2配水池の側壁1段目には、耐硫酸塩セメントを使用することとした。

表-2にその示方配合を記す。

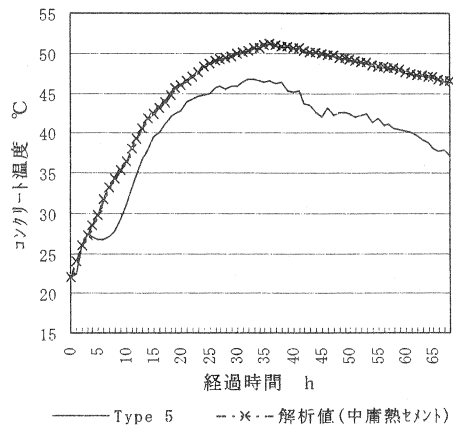


図-5 水和熱抑制型を使用した普通・耐硫酸塩コンクリートの温度履歴

表-2 第2配水池側壁工事コンクリート現場配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント 比 W/C (%)	空気量 (%)	細骨材率 s / a (%)	単 位 量 (kg/m ³)					
					水 W	セメント C	混和材 F	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 A
25	12	44.7	3.0	38.5	170	350	30	699	1117	3.8

*粗骨材は、実際水洗いしているので1.5%の吸水量を見込んで水の現場投入量は153 l/m³
 *耐硫酸塩セメント使用

4.4 パッチャープラントでの改善点

夏季のコンクリートでは、スランプロスが発生し作業性が低下することがあった。これは、粗骨材に付着している大量のダスト（微粉末）が水分を吸収するためと考えられたため骨材のふるい場を設けて事前にふるいに掛け、さらに少量水をベルトコンベア上で霧吹き状にして散布した。したがって、練り混ぜ水は1.5%の骨材の吸水量を見込んで減らすことにした。また、練り混ぜ水を冷水として蓄えるための水槽を2池に増やした。

これらの改善方法によりブリーキングの効果を維持しつつスランプロスの少ないコンクリートの製造に成功した。

4.5 パイプクーリングの改善点

側壁中においては、第1配水池と同様奇数段のシースを利用してパイプクーリングを行う事にした。ただし、側壁1段目の解析結果をもとに、より効果的なものとするため図-6に示したようにハンチ部内側にも3本のシース管を追加して、クーリング用パイプとして利用した。これにより側壁1段目のハンチ全域にパイプクーリングの効果的対策を施せることになった。

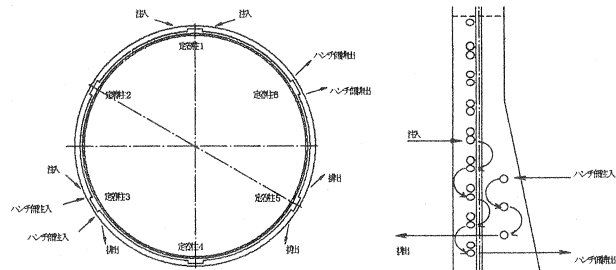


図-6 パイプクーリング通水方法詳細図

4.6 温度解析による確認

第2配水池での対策案を上記に示してきたが、物理的にこれらの改善が効果的であるのか確かめるため今一度第2配水池対応の配合及びひび割れ対策を条件として、2次元FEM温度応力解析を行った。

この時、水和熱抑制型膨張材と耐硫酸塩セメントの併用コンクリートは、幾度にも渉る試験から中庸熱セメントにおいて用いられる断熱温度上昇特定定数（示方書から引用）を使った解析結果の温度カーブより10度程度低い値で近似した温度カーブを表すことが判っていたため、解析には示方書の中庸熱セメントの断熱温度上昇特定定数を使用した。表-3にその解析条件を示す。また、解析結果として図-7に温度履歴、図-8に温度応力履歴を示す。

解析結果から、コンクリートの発生応力度は材令6日で1.64N/mm²の引張応力度が発生し、またその時のひび割れ指数は1.15を示しひび割れ発生確率は3%と予測できた。また膨張材の影響を0.49N/mm²の圧縮応力度と考慮するとひび割れ指数は、1.99となり発生確率は0%となる。

解析からは、耐硫酸塩セメントと水和熱抑制型膨張材を併用し、かつクーリング専用シースをハンチ部に配置することで効果的なひび割れ抑制ができることが判った。

またパイプクーリングの開始および終了時のタイミングは、最高温度の発生時間が打設完了後から18時間後となることを考慮して設定した。

表-3 解析条件

コンクリート打設直後温度 (°C)	28	
断熱温度上昇特性定数	QまたはK (°C)	50.8
	γまたはA	1.1
比熱 (kcal/kg°C)	0.27	
熱伝導率 (kcal/mmhr°C)	2.32E-3	
密度 (kg/mm ³)	2.45E-3	
型枠熱伝達率 (kcal/mmhr°C)	0.8E-5	
パイプクーリング時固定温度 (24h) (°C)	30.0	
外気温 (°C)	37.0	

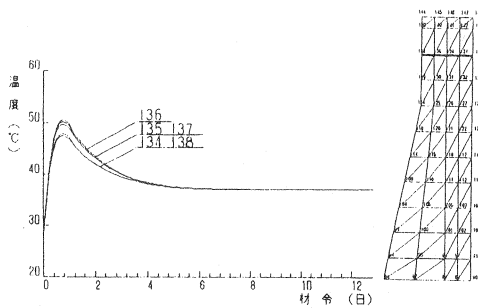


図-7 コンクリートの温度履歴

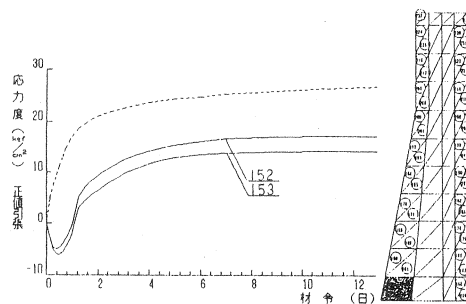


図-8 コンクリートの温度応力履歴

4.7 現場における対応策

コンクリートの打設時間帯は、作業員の作業効率や安全性から考えれば早朝の打設開始が好ましいが、氷やポンプ車の準備が早朝は困難であることや、打設終了時間が仮に午後までかかるようだと高い外気温は、コンクリートの水和反応時に起こる温度上昇の促進・ワーカビリティの低下・直射日光による露出面の乾燥収縮の促進及びコールドジョイントの発生などの有害な影響を及ぼす確率が高くなると考えられたためコンクリート打設は再び夜間作業で行うこととした。

作業前の準備としてまず直射日光によるメタルフォームの熱吸収を避けるためメタルの周りに養生シートを張り巡らし、散水を行うなどメタル自体の熱上昇を避けた。しかしながらこの養生シートは、コンクリートの反応熱の発散を妨げコンクリートの内部温度上昇の原因にも成りかねないので、打設直前にめくり上げ夜間はそのままの状態を維持し外気温が上がる前、もしくは解析から予想される水和反応が落ち着き、温度上昇が終了する頃に元に戻すようにした。その後コンクリートの最高温度発生時からの急激な冷却を防ぐため養生シートを張り巡らした状態で維持した。

また、打設カ所のプレクーリングの意味合いで、打設1時間前ぐらいからエバーフローホース（農業用穴あきホース）による散水を行い外気温の影響低減に務めた。これにより型枠内は27°Cまで冷却された。

一方、施工後における対応策は、パイプクーリングによる内部発熱の強制排出・メタル周囲の養生シートの保持・エバーフローホースによる上部露出面への散水養生・枠解体期間の延長等を行った。また、打設後打設箇所への直射日光を避けるため外部に遮光シートで全面を囲った。

4.8 施工結果

ひび割れ抑制対策を実施した結果、温度ひび割れと思われるクラックは全く発生せず、かつ乾燥収縮による表面のヘアークラックさえも全く発生しなかった。苦勞のかいがあるが目標以上の成果を上げることができた。

成功の要因は、水和熱抑制型膨張材と耐硫酸塩セメントの採用・フレッシュコンクリートのブレイキングおよびハンチ部に追加した3本のブレイキング専用シースだったと考えられる。

図-9には埋め込み式の温度計を打設開始部周辺に取り付け、その温度履歴を調べた結果を示す。（図-9においてNo.1、No.2ポイントは、ハンチ部パイプブレイキングが施されている所であり、No.3、No.4ポイントは、側壁部パイプブレイキングが施されていない部分を示す。）図より対策が効果的であり、最高温度が図-7の解析結果よりも低くなっていることが確認できる。

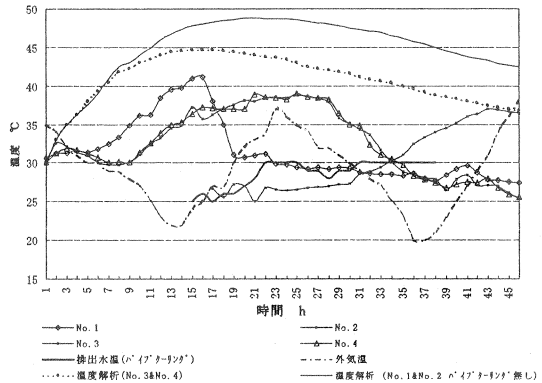


図-9 第2配水池側壁1段目コンクリート温度履歴

5. おわりに

以上にのべたように、エジプトなどの高温地域におけるマスコンクリートや富配合コンクリートのひび割れ（特に温度応力ひび割れ）制御のためには練り上がり時、打設直後のコンクリート温度を低減する事もっとも簡易的で効果的な対策であるといえる。それぞれの現場の条件に即したコンクリート材料の冷却用設備や打設方法を施工計画の段階から十分に検討し効果的な方法を見つけだしておくことが大切であると考えられる。

パイプブレイキング工法は部分的なコンクリート温度の低減には非常に効果的であるが、構造物の形状によってパイプの設置位置や通水時間等の管理が難しい場合があるため構造物の形状や温度解析結果を十分に確認・検討し、温度測定方法、通水時間管理方法を確立した上でこの工法が適しているか判断すべきと考えられる。

膨張材などの混和材の採用は、事前の調査や試験により使用材料との相性やコンクリートの性状を把握すれば、施工の段階で細かな管理を必要としない効果的な方法といえる。

コンクリート打設時の締め固めや打設後のコンクリート養生は、品質確保のために非常に重要な要素であるが、ひび割れ制御に関しては施工管理のみでコントロールできない要因も多い。特に機能・耐久・美観の面からひび割れの制御が重要となる構造物では設計、施工計画の段階より十分な検討を進めておくことが必要であると考えられる。

参考文献

- ・「コンクリート標準示方書・施工編」（土木学会）
- ・「中近東における耐硫酸塩セメント調査報告書」（川崎重工制作）
- ・「膨張コンクリート設計施工指針」（土木学会）
- ・「コンクリートのひび割れ調査・補修・補強指針」（土木学会）