

(31) PC卵形消化タンクにおける初期温度ひび割れについて

オリエンタル建設(株)	技術部	正会員	○大谷 悟司
同上	技術部	正会員	森下 昭吾
同上	技術研究所	正会員	吉岡 民夫
宇都宮大学	工学部	正会員	佐藤 良一

1. はじめに

プレストレストコンクリート (以下「PC」と呼ぶ) 卵形消化タンクは、汚泥消化効率の良さおよび供用時におけるメンテナンスの容易さ等により、1983年ごろから日本で建設されるようになった¹⁾。PC卵形消化タンクは、下水処理場の立地条件から、川または海の近くの埋立地のような軟弱地盤に建設されることが多く、ほとんどが杭基礎である。また、地震に対する安全性により、杭基礎の構造が決定され、一般的には、杭基礎とタンクの接合に、図-1に示すような比較的マッシブなコンクリートリングを必要とする。

PC卵形消化タンクのように鉛直方向に数段に渡ってコンクリートを打設する場合、コンクリートの水和熱および先に打設されたコンクリートの拘束に起因して、鉛直方向にひび割れが発生する可能性がある。これらのひび割れは構造物の水密性および耐久性を損なう恐れがあり、避けることが望ましいにもかかわらず、これらのひび割れを避けることは、特別な方法を用いない限り容易ではないと言ってよいであろう。これらのひび割れ発生を予想する計算方法として、「コンクリート標準示方書」(土木学会、以下「標準示方書」と呼ぶ)²⁾に提案されている方法があるが、温度応力を求める際に拘束係数を仮定する必要がある。この拘束係数をどのように仮定するかによって、温度応力に大きな影響を与えることとなるが、卵形消化タンクのような特殊な構造の拘束係数をどのようにするかについては、十分な研究が行われているとは言い難い。また、「標準示方書」に従った方法では、若材齢コンクリートのヤング係数を経験的に定められており、クリープとの関係が明確に評価されていない。本論では、従来の方法により熱伝導解析を行った後、クリープの影響を忠実に考慮した方法³⁾により求めたヤング係数(以下「有効ヤング係数」と呼ぶ)を用い、有限要素法(以下「FEM解析」と呼ぶ)を用いて温度応力の計算を行った。また、実際の温度応力を知るために、図-1に示す施工中のPC卵形消化タンクにおいて、円周方向の温度応力および温度の測定を行った。これらより得られた結果と計算結果を比較したところ、それらは概ねよい一致を示した。

2. 施工順序および現場測定

2.1 施工順序

対象とするPC卵形消化タンクは赤道までを4分割で施工した。最初の目地は下部円錐部と杭頭リングの接合部に位置している。但し、この目地は解析上は考慮していない。2番目の目地は地盤より1.0mの高さで杭頭

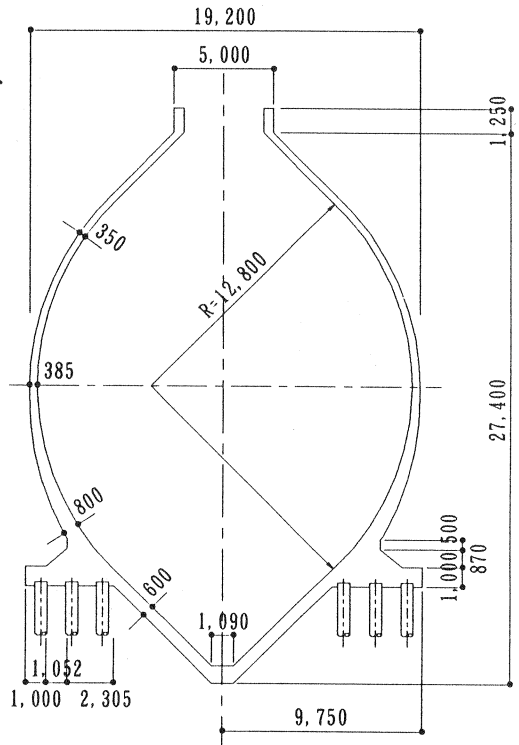


図-1 断面図

リング部に位置し、3番目の目地は地盤より約4.2mの高さで側壁部に位置する。図-2に解析に用いたメッシュ図とともに、コンクリートの目地の位置およびコンクリート打設リフト数を示す。また、表-1にコンクリートの配合を示す。コンクリートの配合では、高性能減水剤を使用し、単位セメント量をできるだけ小さくし、温度上昇をできるだけ抑制した。このPC卵形消化タンクは、厚さ27mmの木製型枠とこれを支持する鋼製フレームよりなる、従来とは異なる型枠で施工された。コンクリート打設後2週間以上型枠を残したが、湿潤養生または温度を制御する等の特殊な養生は施していない。

2.2 測定

温度応力および温度は有効応力計および熱電対を同じ位置に埋め込んで測定した。測定点は図-2に●で示す。これらは、温度応力解析の節点番号47, 64および88と一致する。

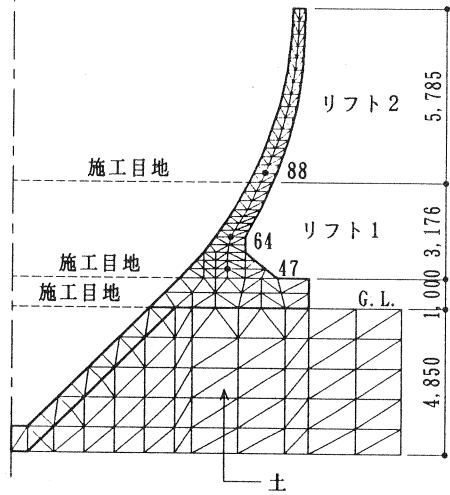


図-2 メッシュ図

3 数値計算

3.1 温度解析

2次元熱伝導解析は、「マスコンクリートの温度・応力計算用パソコンプログラム」(コンクリート工学協会)4)を用いて、図-2に示すメッシュ図に対して行った。型枠の熱伝達率は、木製パネルの厚さを考慮し、「標準示方書」2)を参考にして決定した。計算に用いた材料特性値および他の特性値について表-2に示す。

表-1 コンクリートの配合

コンクリートの断熱温度上昇は「標準示方書」2)より次式より求めた。

$$Q(t) = Q_{\infty} (1 - e^{-\gamma t}) \quad \text{----- (1)}$$

ここに、

Q_{∞} : 実験により定まる終局断熱温度上昇量(°C)

γ : 実験により定まる温度上昇速度に関する定数

C : 単位セメント量

t : 材齢(日)

Q(t) : 材齢t日における断熱温度上昇量(°C)

実験によらない場合の普通ポルトランドセメントの Q_{∞} および γ を、打設温度25°Cに対して次式で求めた。

$$Q_{\infty} = 0.11 \cdot C + 12.5 = 0.11 \times 390 + 12.5 = 55.4^{\circ}\text{C}$$

$$\gamma = 3.9 \cdot C + 0.151 = 3.9 \times 390 + 0.151 = 1.672$$

ここに、

C : 単位セメント量

3.2 温度応力解析

温度応力解析は軸対称ソリッド要素を用いて、図-2に示すメッシュに対してFEM解析により行った。但し、図-2の土の要素は解析には用いていない。このPC卵形消化タンクは、半径および鉛直方向を杭に

粗骨材の最大寸法	スラフ	空気量	水と砂の比	細骨材率	単 位 量				
					水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
mm	cm	%			kg/m ³				
25	8.0	-	38	41.1	149	392	720	433	5.88

表-2 材料特性値および他の特性値

	単位		摘要
熱伝導率	kcal/mh°C	2.0	コンクリートおよび土
比熱	kcal/kg°C	0.22	
単位体積重量	kg/m ³	2.5	
熱伝達率	kcal/m ² h°C	5.0	型枠
		10.0	コンクリート
気温	°C	22	リフト1打設時
		18	リフト2打設時
		27	リフト1打設時
コンクリート打設温度		25	リフト2打設時

よって外部拘束されているので、これらは「道路橋示方書・下部構造編」⁵⁾を参考にして弾性バネとしてモデル化した。図-3に温度応力算定の概念を示す。この場合、j 時間に発生する温度 T_j は、j 時間区間の最初の温度 T_i と最終の温度 T_{i+1} の平均値とし、j 時間区間に発生する温度上昇量 ΔT_j は、j 時間区間の最初の温度 T_i と最終の温度 T_{i+1} の差分とする。

載荷時材齢のクリープの影響を考慮した有効ヤング係数は、CEB-FIP MODEL CODE 1990⁶⁾ (以下、「CEB/M C90」と呼ぶ) におけるクリープ関数の逆数に相当し、次式で得られる。

$$E_e(t, t_0) = \frac{E_c(t_0) \cdot E_{c28}}{E_{c28} + E_c(t_0) \cdot \phi(t, t_0)} \quad (2)$$

ここに、

t : 問題としている材齢 (日)

t₀ : 載荷時材齢 (日)

E_e(t, t₀) : 材齢 t₀ の材齢 t における有効ヤング係数

E_c(t₀) : 式 (3) より求まる材齢 t₀ におけるヤング係数

E_{c28} : 材齢 28 日におけるヤング係数 = 実測値より $3.63 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ とする。

$\phi(t, t_0)$: 式 (8) より求まるクリープ係数

なお、材齢は、コンクリートの温度上昇によるコンクリートの成熟度に及ぼす影響を考慮するため、式 (7) により補正する。

材齢 t₀ におけるコンクリートのヤング係数および引張強度はそれぞれ式 (3) および式 (4) より求める。

$$E_c(t_0) = \beta_E(t_0) \cdot E_{c28} \quad (3)$$

$$f_{ctm} = \beta_{cc}(t_0) \cdot f_{ctm} \quad (4)$$

および

$$\beta_E(t_0) = \{\beta_{cc}(t_0)\}^{0.5} \quad (5)$$

ここに、

$\beta_E(t_0)$: コンクリートの材齢 t₀ における係数

$f_{ctm}(t_0)$: コンクリートの材齢 t₀ における引張強度 (kgf/cm²)

$\beta_{cc}(t_0)$: 次式による係数

$$= \exp \left[S \left\{ 1 - \left(\frac{28}{t_0/t_1} \right)^{1/2} \right\} \right] \quad (6)$$

S : セメントの種類による係数

= 普通セメントの場合 0.25

t₁ : 1 日

t₀ : 次式より補正されたコンクリートの材齢 (日)

$$= \sum t_j \cdot \exp \left[- \left\{ \frac{4000}{273 + T_j} - 13.65 \right\} \right] \quad (7)$$

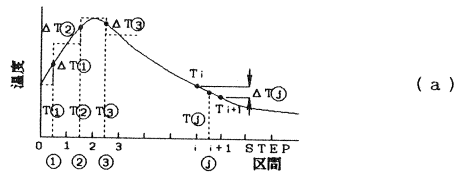
T_j : 期間 t_j における温度 (°C)

t_j : 温度 T_j が生じる日数 (日)

クリープ係数は CEB/MC90 より次式より求める。

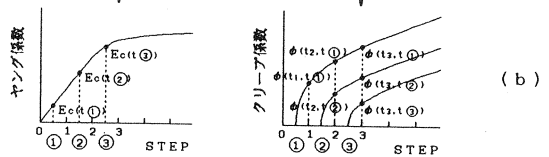
$$\phi(t, t_0) = \phi_0 \cdot \beta_c(\tilde{t} - \tilde{t}_0) \quad (8)$$

および、



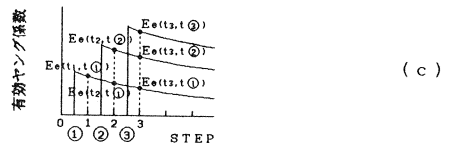
T_① による有効材齢により E_c(t_①) を計算する。

T_② による $\phi(t_i, t_{①})$ を計算する。



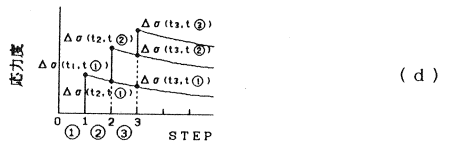
E_c(t_①) および $\phi(t_i, t_{①})$ より

E_e(t_i, t_①) を計算する。



各 STEP における ΔT_j および

E_e(t_i, t_①) より $\Delta \sigma(t_i, t_{①})$ を計算する。



$$\sigma(t_i) = \sum_{j=1}^i \Delta \sigma(t_i, t_{①})$$

図-3 温度応力算定の概念

$$\phi_o = \phi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_o) \quad \text{-----} \quad (9)$$

ここに、

ϕ_o : 基本クリープ係数

$$\phi_{RH} = 1 + \frac{1 - RH/RH_0}{0.46 (h/h_0)^3} \quad \text{-----} \quad (10) \quad \beta(f_{cm}) = \frac{5.3}{(f_{cm}/f_{cm0})^{0.5}} \quad \text{-----} \quad (11)$$

$$\beta(t_o) = \frac{1}{0.1 + (t_o/t_1)^{0.2}} \quad \text{-----} \quad (12) \quad h = \frac{2 \cdot A_c}{U} \quad \text{-----} \quad (13)$$

f_{cm} : 材齢 28 日におけるコンクリートの圧縮強度 (kgf/cm²) = 実測値より 400 kgf/cm² とする。

f_{ctm} : 材齢 28 日におけるコンクリートの引張強度 (kgf/cm²) = f_{cm} より推定値として 35 kgf/cm² とする。

f_{cm0} : 98 kgf/cm²

RH : 相対湿度 (%) = 70% とする。

表-3 A_c および U

RH_0 : 100%

h : 部材の仮想厚さ (mm)

A_c : 部材の断面積 (mm²)

U : 外気に接する部材の周長 (mm)

なお、表-3 に A_c および U を示す。

	A_c	U
リフト 1	4,174,700	8,525
リフト 2	3,190,120	12,418

h_0 : 100 mm

t_1 : 1 日

t_o : セメントの種類がコンクリートのクリープに及ぼす影響を考慮するため、式 (7) で求めた材齢を次式により補正した材齢

$$= t_{o,r} \left(\frac{9}{2 + (t_{o,r}/t_{1,r})^{1/2}} + 1 \right)^\alpha \quad \text{但し、} \geq 0.5 \text{ 日とする。} \quad \text{-----} \quad (19)$$

$t_{o,r}$: 式 (7) により補正した荷重時材齢

$t_{1,r}$: 1 日

α : セメントの種類による係数 = 普通セメントの場合 0

また、クリープの経時変化は次式より求める。

$$\beta_c(\tilde{t} - \tilde{t}_o) = \left\{ \frac{(\tilde{t} - \tilde{t}_o)/t_1}{\beta_H + (\tilde{t} - \tilde{t}_o)/t_1} \right\}^{0.3} \quad \text{-----} \quad (20)$$

および

$$\beta_H = 150 \left\{ 1 + \left(1.2 \frac{RH}{RH_0} \right)^{18} \right\} \frac{h}{h_0} + 250 \quad \text{但し、} \leq 1500 \text{ とする。} \quad \text{-----} \quad (21)$$

ここに、

\tilde{t} および \tilde{t}_o : 問題としている実材齢 (日) および荷重時実材齢 (日)

以上述べた計算の手順を図-3 (a) ~ (d) に示す。先ず、式 (3) より $E_c(t_o)$ を、式 (8) より $\phi_o(t_o)$ を求め、それらを式 (2) に代入すると $E_e(t, t_o)$ が得られる。次に、同図 (d) に示すように、例えばステップ 3 の温度応力は、区間①、②および③に依存する有効ヤング係数および温度変化により定まる温度応力を加算することにより得られる。即ち、ステップ 3 では、3 種類の構造モデルに対して解析を行いそれぞれを加算する必要がある。また、材齢 6 時間程度以下の若材齢のコンクリートのヤング係数には、不明な点も多いので、ここではコンクリートのヤング係数は、材齢 6 時間以降に発現するものとし計算を行った。

4. 検討結果

図-4に外側から肉眼で観察できたひび割れを示す。図中の数字はひび割れ巾を示す。ひび割れは目地もしくは目地の少し上から上方に向かって発生しており、その巾は0.04mm～0.1mmの範囲である。

図-5に解析で求めた温度と実際に測定した温度の結果を示す。同図はすべての測定点において、計算で求めた温度と測定した温度が概ね一致していることを示している。測定結果を観察すると温度上昇は、コンクリート打設5～6時間は緩やかで、その後急激に上昇している。一方、計算結果は打設直後から急激に上昇している。この相違は、断熱温度上昇を計算するのに用いた式(1)に温度上昇の初期遅れ現象が考慮されていないためと考えられる。

ピーク時の温度に関しては、どの測定節点において解析温度の方がわずかではあるが測定温度に比べて高くなっている。また、ピーク時の温度を過ぎると解析温度の方が測定温度に比べて早く低下する。これは熱伝導率および熱伝達率の評価が実際のものと一致していないためと考えられる。

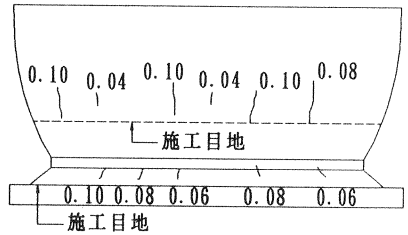


図-4 ひび割れ図

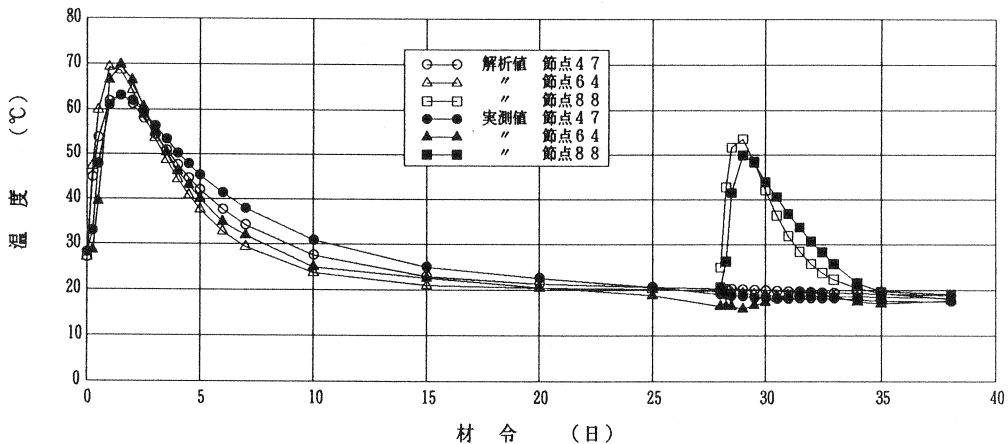


図-5 温度

図-6に解析で求めた温度応力と実際に測定した温度応力および式(4)より計算したコンクリートの引張強度の結果を示す。同図はすべての測定点において、解析で求めた温度応力は、定性的には測定結果と概ね一致していると言ってよいであろう。また、若材齢における圧縮応力度は定量的にもよく一致し、圧縮応力度から引張応力度へ変化する材齢もよく一致している。

最初のリフトのひび割れは、急激に応力が増加している6日目に発生したと考えられる。また、2番目のリフトのひび割れは、応力の増加が止まっている4～5日目の間に発生したと考えられる。測定した応力変化の傾向が異なるのは、ひび割れ位置が計測計器に対して異なる位置に発生したためと考えられる。ひび割れは材齢4～6日目にコンクリートの引張応力度が20 kgf/cm²以下で発生していることとなる。一方、式(4)により求めたコンクリートの引張強度は、1日目には既に20 kgf/cm²に達しており、測定結果と矛盾している。これは、有効応力度計の誤差および拘束応力下でのコンクリートの強度発現について、不明な点もあり、今後更に研究が必要と考えられる。

解析結果では、引張応力度が式(4)により計算したコンクリートの引張強度より大きくなる時期は、測定結果でひび割れが発生したと考えられる時期と概ね一致しており、ひび割れが発生するかどうかの予測という点に関しては、十分有用な方法と言ってよいであろう。

ひび割れ発生後は、測定結果の引張応力度はほとんど成長せず一定の値を示している。これは、ひび割れ

発生により応力が解放されたためと考えられる。よって、ひび割れ発生後の解析結果について定量的に考察することはできないが、引張強度を過大評価しているきらいもあるので、上述したひび割れ発生時のコンクリートの引張強度の問題と同様、更なる研究が必要と考えられる。

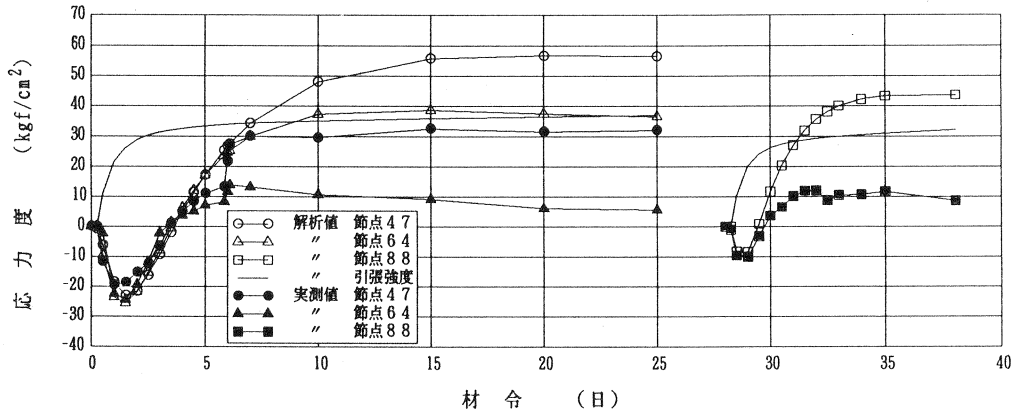


図-6 温度応力

5. 結論

P C 卵形消化タンクの熱伝導解析は2次元熱伝導解析により行った。これらの温度を用いてP C 卵形消化タンクの側壁のひび割れについて、クリープの影響を忠実に考慮した方法により求めたヤング係数を用い、F E M解析による温度応力を基にして検討を行った。その結果以下のような結論が得られた。

- 1) 解析によるピーク時の温度は測定結果と比較的によく一致していた。しかしながら、測定結果と解析結果では温度低下において若干の違いが認められた。これは、熱伝達率および熱伝導率をより正確に決定することが重要であることを示している。
- 2) 提案した解析方法は、若材齢における圧縮応力度および引張応力度の発現時期については、実測値のものとよく一致した。また、ひび割れ発生時期についても十分正確に予想できた。
- 3) 最終的に残留する引張応力度の予測や、拘束応力下における若材齢コンクリートの引張強度については、更に研究が必要なものと考えられる。

参考文献

- 1) 吉田・中田・斉藤・竹下・久保田・石原：横浜市における卵形消化タンク—P C 卵形消化タンクの設計について—，プレストレストコンクリート，第26巻第5号，pp. 7~20，1984. 9
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書 平成3年版
- 3) R. SATO・Walter H. DILGER・I. UJIKE：DEFORMATIONS AND THERMAL STRESSES OF CONCRETE BEAMS CONSTRUCTED IN TWO STAGES, RILEM International Symposium, 1994 in Munich
- 4) コンクリート工学協会：ユーザーズマニュアルマスコンクリートの温度・応力計算用パソコンプログラム集，1989. 6
- 5) 道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編 IV 下部構造編 平成6年2月
- 6) C E B : C E B - F I P M O D E L C O D E 1 9 9 0