

報 告

[1158] 膨張コンクリートを用いたマスコンクリートの施工

玉野富雄 (大阪市・下水道局)

福井 聡 (日本下水道事業団大阪支社)

正会員○青景平昌 (フジタ・技術本部)

正会員 広野三夫 (フジタ・大阪支店)

1. はじめに

下水処理施設としてのポンプ場は、耐久的にも機能的にも極めて高い水密性が要求される大規模な地下構造物である。特に、地下水に接する底板及び側壁の設計と施工には、温度ひびわれを抑制するためにマスコンクリートとしての対応が要求される。この種の構造物がさらに大規模化し施工深度が大きくなるにつれ、施工時の温度ひびわれを制御するための知見を蓄積していくことが重要である。大阪市千島処理場の築造工事に際して、マスコンクリートの事前検討を行い、水和熱による温度応力を低減させるために発熱の少ない高炉セメントC種を使用するとともに、部分的に膨張コンクリートを打設して、膨張効果を現場計測によって調べたので、その結果を報告する。

2. 施工試験の概要

図-1に示した千島処理場第3ポンプ場築造工事において、部分的に膨張コンクリートを使用して、部材厚250cmの底板部と180cmの側壁部の温度変化とひずみ変化を測定し、この種の構造物のコンクリート温度応力と膨張コンクリートによる温度ひびわれの抑制効果について検討した。

2.1 計測位置

計測対象は、図-1の斜線部で示すように、底板と側壁のそれぞれにおいて、外的な拘束条件がほぼ等しいと考えられる2つの施工区画を選定し、普通コンクリートと膨張コンクリートを打設し、温度およびひずみの変化を計測し両者を比較した。計測器は、カールソン型

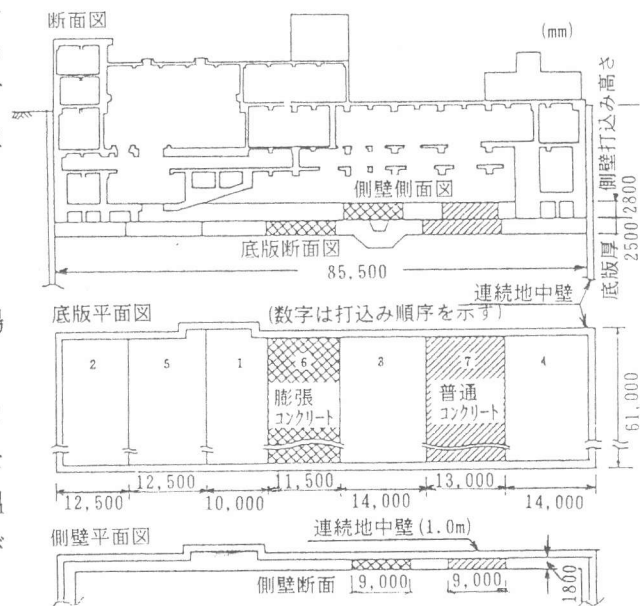


図-1 千島ポンプ場の形状寸法と打込み区画図

表-1 コンクリートの示方配合

部位	種類	呼び強度	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
					セメント	膨張材	水	細骨材	粗骨材	AE減水剤
底板	普通	180	61	45.7	295	0	180	809	993	0.74
	膨張		61	45.7	265	30	180	809	993	0.74
側壁	普通	210	57	44.9	318	0	181	789	985	0.80
	膨張		57	44.9	288	30	181	789	985	0.80

セメント: 高炉 C種、粗骨材最大寸法: 20mm、空気量: 4%、目標スラブ=15cm
 細骨材: 比重=2.56、F.M.=2.63、粗骨材: 比重=2.63 F.M.=6.61、
 膨張材: CSA 系水和熱抑制型膨張材

のコンクリート埋込みひずみ計と熱電対温度計を部材中央と表面部に、主として外的な拘束の大きい方向に設置した。また、外部拘束の影響が小さい厚さ方向にもひずみ計を設置して、測定値を自由膨張ひずみを評価するためのデータとした。

2. 2 コンクリートの配合

底版および側壁に使用したコンクリートの示方配合を表-1に示す。セメントは、水和熱を抑制するため高炉セメントC種を、また膨張材は、CSA系水和熱抑制型膨張材を使用した。膨張材は単位セメント量のうち30kg/m³を置き換え添加した。なお、この膨張コンクリートの使用は収縮補償を目的とし、膨張材の添加量は実績を考慮して定めたものである[1]。

3. 試験および計測結果

3. 1 強度特性

使用したコンクリートの圧縮強度と材令の関係式を、表-2に示す。これは、材令と圧縮強度の関係を最小自乗法で求めたもので、材令28日の

表-2 圧縮強度の経時変化

種類		圧縮強度の経時変化(実験式) $\sigma_c(t):(\text{kgf}/\text{cm}^2)$	相関係数	$\sigma_c(28)$ (kgf/cm^2)
底版	普通	$\sigma_c(t)=t/(0.0596+0.0018 \cdot t)$	0.989	255
	膨張	$\sigma_c(t)=t/(0.0339+0.0026 \cdot t)$	0.964	262
側壁	普通	$\sigma_c(t)=t/(0.0384+0.0019 \cdot t)$	0.982	306
	膨張	$\sigma_c(t)=t/(0.0306+0.0020 \cdot t)$	0.968	323

t: 有効材令(日)

圧縮強度もあわせて示している。これによると、同一の水セメント比であっても、高炉セメントC種の内30kg/m³を膨張材に置換えた方が、材令28日における圧縮強度は大きくなっており、膨張材の使用が強度面での品質に悪影響を与えないことが確認された。

表-3 断熱温度上昇温度上昇試験結果

コンクリートの種類		練り上がり温度 ($^{\circ}\text{C}$)	断熱温度上昇式 $T=k(1-e^{-\gamma t})$	
			K($^{\circ}\text{C}$)	γ
底版	普通	15.0	37.5	1.024
	膨張	16.2	38.0	1.005
側壁	普通	17.8	39.0	1.159
	膨張	17.8	39.8	1.138

3. 2 コンクリートの断熱温度上昇

実施した断熱温度上昇試験の結果を表-3に示す。得られたKおよび γ から判断して、実施工で最高温度を示す材令2日前後における膨張コンクリートの断熱温度上昇量は、普通コンクリートのそれとほぼ同程度であることが認められる。従来の膨張材には、これを使用することにより水和反応時の発熱が大きくなり、逆に温度応力を助長させるものも認められ、温度ひびわれ防止に不利な点とされていた[1]。今回使用した膨張材は、水和反応時の発熱が大きくな

表-4 線膨張係数の測定結果

コンクリートの種類		線膨張係数 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	
		温度上昇域 α_1	温度下降域 α_2
底版	普通	12.1	10.7
	膨張	49.1	9.9
側壁	普通	8.4	11.5
	膨張	24.7	10.9

3. 3 コンクリートの線膨張係数 (α)

コンクリートの線膨張係数は、一般に外的な拘束がない状態におけるひずみ変化と温度変化の関係から求められるが、ここでは拘束の影響が少ない底版及び側壁の面外方向に配置したひずみ計の測定値からこれを推定した。膨張コンクリートは、打設直後の温度上昇時に大きな膨張(勾配 α_1)を示すが、温度上昇時の途中からその勾配が小さくなり(勾配を α_2 とする)、温度下降時もほぼこの勾配に沿って変化していることが認められた。一方、普通コンクリートの場合に

は、温度上昇時（勾配 α_1 ）と下降時（勾配 α_2 ）でそれぞれ直線的な勾配が認められる。それぞれの打設コンクリートの平均値としての α_1 と α_2 を表-4に示す。

3.4 温度とひずみの測定データの相互関係

コンクリートの温度とひずみの測定結果を整理する際の、測定データの基本的な関連を以下のように考える[2]。すなわち、

$$\sigma(t) = \Sigma (\Delta \varepsilon_m(t) - \Delta \varepsilon_o(t)) \cdot E_{eff}(t) = \Sigma \Delta \varepsilon_{eff}(t) \cdot E_{eff}(t) \quad (1)$$

ここに、 $\sigma(t)$: 温度応力 $\Delta \varepsilon_m(t)$: 実測ひずみの変化量
 $\Delta \varepsilon_o(t)$: 自由伸縮ひずみの変化量 ($\Delta \varepsilon_o(t) = \alpha \cdot \Delta T(t) + \Delta \varepsilon_E(t)$)
 $\Delta \varepsilon_{eff}(t)$: 有効ひずみの変化量 ($\Delta \varepsilon_{eff}(t) = \Delta \varepsilon_m(t) - \Delta \varepsilon_o(t)$)
 α : 線膨張係数 $\Delta \varepsilon_E(t)$: 膨張ひずみの変化量
 $\Delta T(t)$: 温度変化量 $E_{eff}(t)$: 有効弾性係数

本計測では、上記項目の内 $\Delta \varepsilon_m(t)$ 、 $\Delta \varepsilon_E(t)$ 、 $\Delta T(t)$ 、 α について実施したことになる。

3.5 膨張コンクリートの膨張ひずみ ($\varepsilon_E(t)$)

底版と側壁における膨張コンクリートの膨張ひずみの経時変化を図-2と図-3に示す。これは、普通コンクリートと膨張コンクリートの自由膨張ひずみの経時変化曲線の差を膨張材による膨張ひずみとしたものである。膨張ひずみは、材令が1.5~2.0日の初期に急激に増大し、それ以降においても、その変化は小さくなるものの僅かではあるが増加傾向も認められる。膨張効果の大部分は温度上昇中に発揮されるが、温度下降域にも或る程度の膨張が持続していることを示している。材令30日時点での膨張ひずみをみると、底版で約 490×10^{-6} 、側壁で約 390×10^{-6} 程度である。この両者の差は測定方向に配置した鉄筋による拘束の影響を受けた結果と考えられる[3]。

4. 外部拘束度 (K)

温度応力の発生程度の目安として、外部拘束度の値によって評価するのが便利であるが、影響因子が複雑なために正確に予測するには不明瞭な点が多い。そこで、実測ひずみをもとに、底版と側壁の外部拘束度Kを検討してみる。一般に、拘束度は次式で定義される。すなわち、

$$K = (\alpha - \beta) / \alpha \quad (2)$$

ここに、

α : 自由伸縮ひずみと
 温度変化の勾配
 β : 拘束を受けた状態での実測
 ひずみと温度変化の勾配

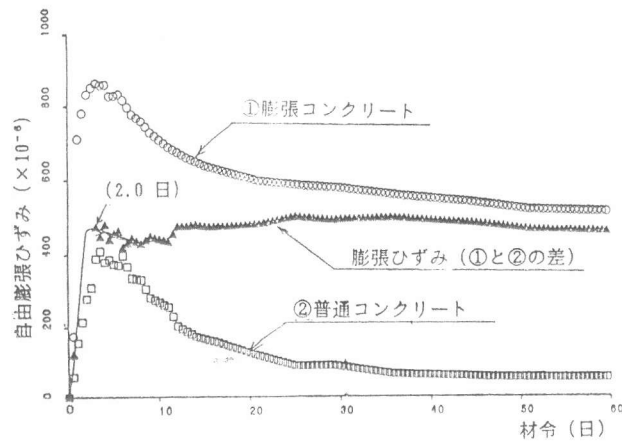


図-2 底版部の膨張ひずみの経時変化

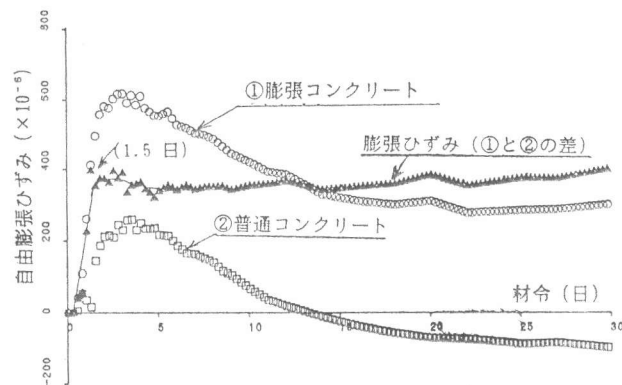


図-3 側壁部の膨張ひずみの経時変化

個々の測点での測定ひずみは、外部拘束と内部拘束の影響を同時に受けた値が示されている。そこで、内部拘束の影響を消去するために(2)に代入する β としては、測定断面内の平均ひずみ変化量と平均温度変化量の関係から勾配を算定する必要がある。ここでは、測定断面内の3測点の平均値を断面内の温度とひずみの平均として、その勾配を求めた。底版と側壁に置く普通コンクリートの長辺方向の結果を図-4と図-5にそれぞれ示す。これによると、温度下降時における外部拘束度は、底版で $K=0.2$ 、側壁で $K=0.67$ 程度となった。使用した2種類のコンクリートの強度発現と発熱はほとんど同じであるので、拘束度に関してもほぼ同程度と推定できる。

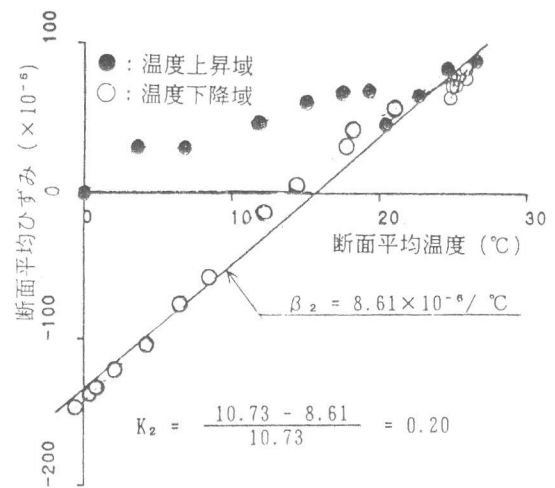


図-4 測定断面内の平均ひずみと平均温度の関係(底版部)

5. 温度応力の算定

5.1 温度応力の解析

温度履歴計算は、一次元のシュミット法によった。解析に用いた外気温度および断熱上昇温度は実測したデータを用い、コンクリートの熱特性値として、比熱は $0.24 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C}$ 、熱伝導率は $2.2 \text{ kcal/mhr } ^\circ\text{C}$ 、単位体積重量は 2300 kg/m^3 の値を仮定した。養生期間は7日間とし、底版では養生マットと散水、側壁では、合板 12 mm の型枠の存置を想定し、熱伝達率を $5 \text{ kcal/m}^2 \text{ hr } ^\circ\text{C}$ とした。また養生終了後の熱伝達率は $10 \text{ kcal/m}^2 \text{ hr } ^\circ\text{C}$ とした。温度応力は、実測値の分析手順に従って内部拘束応力と外部拘束応力とに分離したメカニズム[4]を考え、これに膨張ひずみの影響を重ね合わせ、時間ステップごとの逐次計算を行った。なお、線膨張係数、膨張材による膨張ひずみおよび外部拘束度の値には、実測値を用い、コンクリートの有効弾性係数は、クリープを考慮して静的弾性係数を 0.63 に低減した値を用いた[5]。

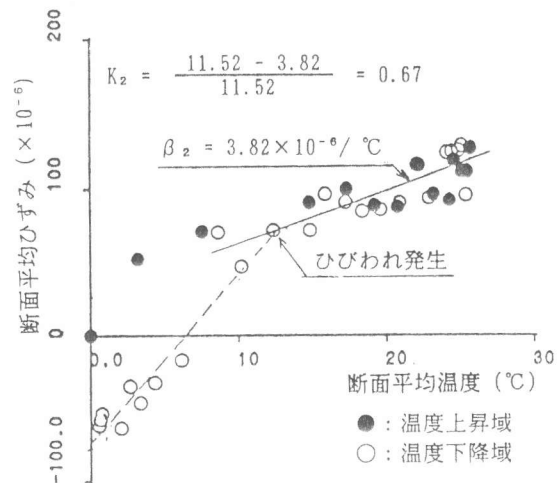


図-5 測定断面内の平均ひずみと平均温度の関係(側壁部)

5.2 解析結果と膨張材の効果

図-6~図-9にそれぞれのケースの温度応力解析結果を示す。底版コンクリートは、内部拘束型の応力が卓越し、普

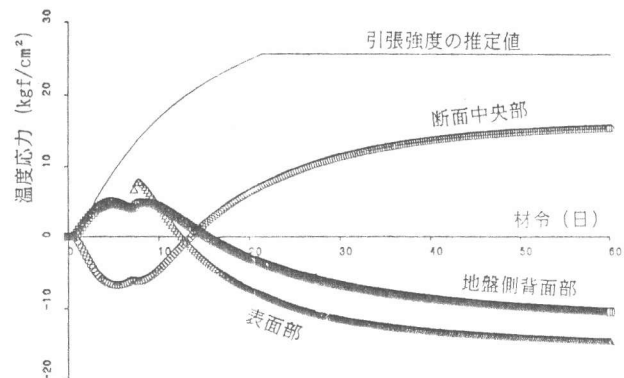


図-6 普通コンクリートの温度応力計算結果(底版部)

通コンクリートの温度上昇時には、表面部の温度応力はコンクリートの引張強度を越える結果となり、表面ひびわれが発生する可能性が認められる。しかし、膨張コンクリートを適用することにより、初期に発生する引張応力を低減しており、初期ひびわれ防止に対する効果が認められる。一方、側壁の場合には、温度応力発生パターンは外部拘束応力が卓越する典型的な形になっており、底版のそれとは際立った違いを見せている。普通コンクリートを側壁に用いた場合には、材令とともに引張応力がコンクリートの引張強度に接近しており、貫通ひびわれの発生の可能性が高くなっていることが認められる。また、膨張コンクリートの場合には材令初期の膨張ひずみによる圧縮応力が残留して、最終的な引張応力をかなり低く抑えており、膨張材の効果が認められる。膨張材により導入される材令30日時点までの圧縮応力は、底版の中央部で3.9 kgf/cm²、側壁の中央部で13.6 kgf/cm²程度と推定された。

底版および側壁の施工後の調査によると、膨張材の使用によっても完全に温度ひびわれを防止するには至っていないものの、ひびわれ幅とその本数を減少させる効果を確認することができた。また、発生したひびわれの一部が時間経過とともに消失するなど、膨張作用によるものと思われる治癒効果も認められた。膨張コンクリートの膨張効果を精度良く評価するためには、材令初期に導入される圧縮応力に直接影響する初期材令における強度特性値に関するデータの蓄積がさらに必要と思われる。

6. まとめ

下水処理ポンプ場築造工事において、水和熱による温度応力の検討と計測を行ない、マスコンクリートとしての挙動とひびわれ対策としての膨張コンクリートの効果について定量的に検討して、以下の知見を得ることができた。

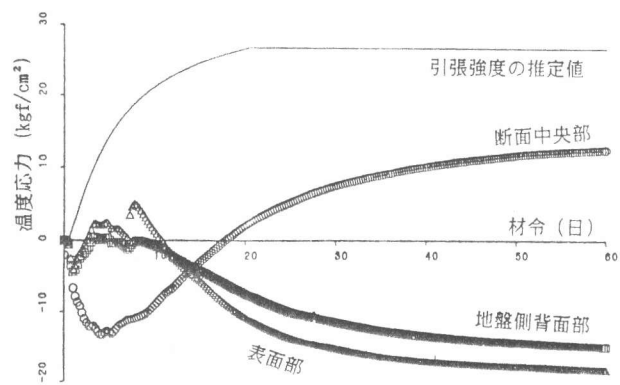


図-7 膨張コンクリートの温度応力計算結果
(底版部)

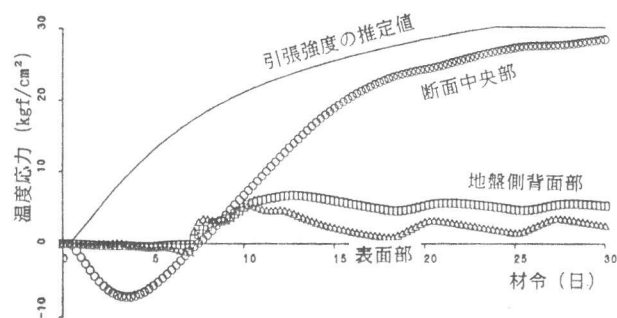


図-8 普通コンクリートの温度応力計算結果
(側壁部)

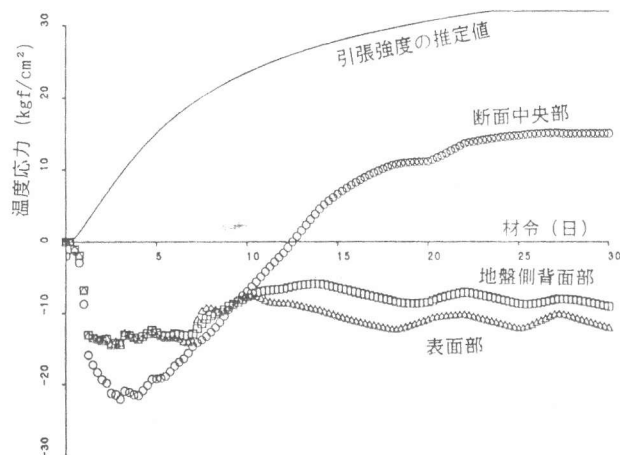


図-9 膨張コンクリートの温度応力計算結果
(側壁部)

(1) 高炉セメントC種の一部を $30\text{kg}/\text{m}^3$ の水和熱抑制型の膨張材で置換した膨張コンクリートの断熱温度上昇量は、通常のコンクリートとほぼ同じ値を示し、膨張材の使用が温度上昇を助長する原因とならないこと、また膨張コンクリートの圧縮強度は、普通コンクリートの場合よりも大きくなっており、膨張材の使用が強度面で問題のないことが確認された。

(2) 膨張材による膨張ひずみは、温度上昇中の材令1.5～2.0日までに急激に増大し、それ以降においても、その変化は小さくなるものの僅かな増加傾向が認められた。したがって、膨張効果の大部分は温度上昇時に発揮されるが、下降域においても或る程度の膨張は持続しているものと考えられる。

(3) 底版および側壁の膨張コンクリートの自由膨張量は、材令30日の時点で見ると、それぞれ約 490×10^{-6} と 390×10^{-6} であった。この膨張量の差は、主として鉄筋による拘束状態の差に起因しているものと考えられる。したがって、膨張材の効果を事前に予測するためには、外的な拘束のほかに鉄筋による内的な拘束の影響も把握しておくことが重要である。

(4) 底版は、隣接する先行打設底版、場所打ち杭(直径2.2～2.8m)・床付地盤、連続地中壁等の外的拘束を受けるが、この状態での温度下降域の外部拘束度は $K=0.2$ 程度と推定された。一方側壁は隣接する底版と連続地下壁の外的な拘束を受け、温度下降域の外部拘束度は $K=0.67$ 程度と推定された。

(5) 実測された既知条件をインプットデータとして、コンクリートの温度応力を逆算した。その結果、底版では内部拘束型の応力が卓越し、普通コンクリートの温度上昇時に表面ひびわれの可能性が高いこと、また膨張材を適用すると初期の引張応力を低減することができ、初期ひびわれの防止に効果があることが認められた。また、側壁の場合には、外部拘束型の応力が卓越し、断面を貫通するひびわれ発生の可能性が高いこと、また、膨張材によって材令初期に導入された圧縮応力が残留して最終的な引張応力をかなり低く押える効果が認められた。この効果を定量的にみると、膨張材により導入された圧縮応力は、材令30日時点において底版中央で $3.9\text{kgf}/\text{cm}^2$ 、壁体中央部で $13.6\text{kgf}/\text{cm}^2$ 程度と推定された。

参考文献

- 1) 土木学会コンクリート委員会：膨張コンクリート設計施工指針(案)、土木学会コンクリート・ライブラリー、第45号、1979.11
- 2) 前野宏司・青景平昌・伊藤祐二：大断面ボックスカルバートの硬化時温度応力について 第二回マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集、1984.3
- 3) 辻和幸：コンクリートにおけるケミカルプレストレストの利用に関する基礎研究、土木学会論文報告集、第235号、1975.3
- 4) 青景平昌、伊藤祐二：マスコンクリートの情報化施工システム、フジタ技術研究所報、第22号、1986.11
- 5) 塚山隆一：マッシュな鉄筋コンクリート構造物の温度ひびわれ発生条件、セメント技術年報、1977