

論文 外部拘束を受けるカルバート構造物のひび割れ抑制対策

添田 政司*¹・出光 隆*²・百田 国広*³・成田 久平*⁴

要旨：側壁が薄いカルバート構造物は底版に拘束されるため、セメントの水和熱に起因する温度ひび割れが発生しやすい状況になっている。そのため、実構造物における温度測定や温度応力解析を行い、温度ひび割れ抑制対策として膨張材の使用やひび割れ補強鉄筋量の増加を試みた。この対策の効果を検証するため、施工時期や施工業者の異なる約100箇所における実構造物でひび割れ発生状況の調査を行った。その結果、コンクリート打設温度が高いほどひび割れ本数や幅は多くなるが、膨張材の使用や補強鉄筋量を増加すれば、温度ひび割れの抑制効果が大きいことが明らかとなった。

キーワード：カルバート構造, 温度ひび割れ, 温度応力, 膨張材, 補強鉄筋

1. はじめに

カルバート構造である共同溝は、上水道、ガス、電力等のライフラインを設置し、道路下の地中に築造される構造物である。そのため、構造物としての重要性、施設としての利用の継続性および再構築の困難さを考慮すると、この構造物には高い耐久性が要求され、構造物に発生するひび割れに対して、耐久性向上のための対策が急務となっている。

一般的なカルバート構造物の施工は、最初に底版を構築し、その後側壁、頂版を構築する方法がとられているが、側壁、頂版コンクリートを打設する際に底版が拘束体となり、側壁部には外部拘束による温度ひび割れが発生しやすい状況となっている。従来、マスコンクリートの温度ひび割れに対しては、低熱型セメントの使用、プレクーリング・パイプクーリングの実施、ひび割れ誘発目地の設置、ひび割れ制御鉄筋の設置が実施されている。しかし、本論文での対象構造物は、壁厚は40～55cmと薄肉部材であること、福岡市南西部の都市部に構築されるため、施工時期や施工期間が異なること、さらには複数の施工業者により施

工されること等から、従来のマスコンクリートと同様な対策を講じられない状況にあった。

このような状況から、ひび割れ抑制対策は温度ひび割れに対して行うこととし、温度応力の低減を目的とした膨張材の使用、ひび割れ幅の抑制を目指したひび割れ補強筋の増加を採用し、約100箇所の実構造物を対象として対策効果の検証を行った。今回の調査対象区間は全長約3kmであり、施工業者数は17社、生コン業者数は12社と多く、調査結果は施工方法、施工時期、コンクリート配合の違いによるバラツキをも包含しているものと考えられる。

本論文では、外部拘束を受けるカルバート構造物に発生するひび割れの発生状況の現状、発生要因、実施した抑制対策の効果について述べるものである。

2. 構造物の断面形状および配合

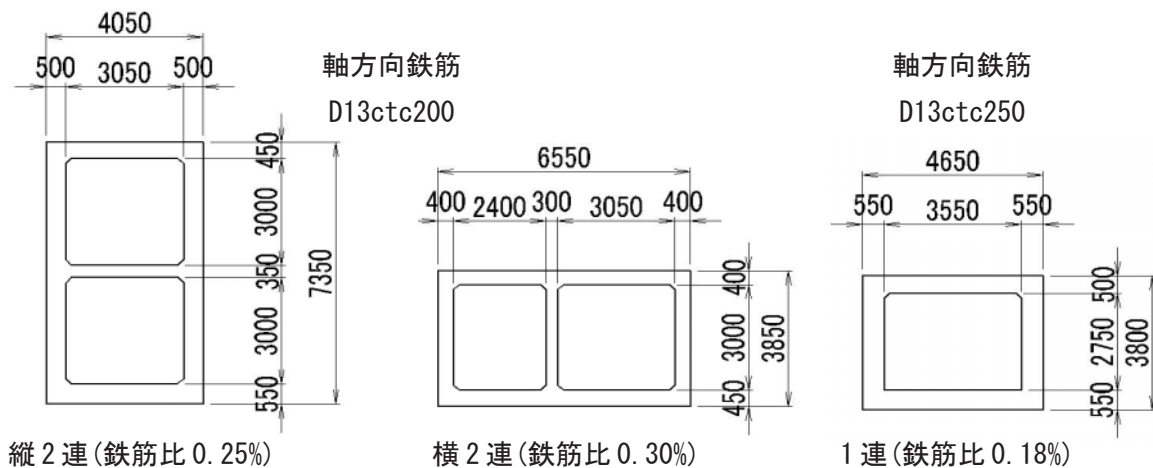
温度ひび割れ制御対策を施した共同溝の一般的な断面を図-1に示す。なお、本構造物は、主要幹線道路に開削工法により施工されるため、構造断面は大きく3断面に分類され、1ブロック当た

*1 福岡大学助教授 工学研究科資源循環・環境専攻 博士（工学）（正会員）

*2 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科 工博（正会員）

*3 国土交通省 福岡国道事務所

*4 (株)千代田コンサルタント 九州支店技術部



図－1 断面図

りの目地間隔は30mが標準となっている。なお、ひび割れ幅抑制のための補強筋は、軸方向鉄筋間隔の2倍を配置した。

コンクリートの配合は、粗骨材最大寸法20mm、呼び強度24（一部21）、W/C55%以下、目標スランプ 8 ± 2.5 cm、空気量 4 ± 1.5 %、セメントは高炉セメントB種である。膨張材には、銘柄の異なる2種類の水和熱抑制型膨張材（A：密度 $2.85\text{g}/\text{cm}^3$ 、比表面積 $3500\text{cm}^2/\text{g}$ 、B：密度 $2.71\text{g}/\text{cm}^3$ 、比表面積 $2900\text{cm}^2/\text{g}$ ）を $30\text{kg}/\text{m}^3$ 使用した。

3. ひび割れ発生状況調査

3.1 ひび割れ発生位置および深さ

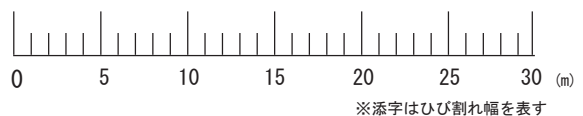
ひび割れ発生状況の調査は全てのブロックについて行った。その中で代表的な6～9月に施工された30mおよび20mブロックにおけるひび割れ発生位置を図－2に示す。ひび割れの発生位置は、ブロック長にかかわらず、ほぼ5m間隔に規則的に発生していた。このことから、ブロック長の低減は、ひび割れ抑制に効果がないことが推察された。次に、そのひび割れ深さを確認するため、コアを採取した。その状況を図－3に示す。ひび割れは、側壁の内面から外面まで側壁断面を貫通しており、貫通ひび割れであることが確認された。また、そのひび割れ幅は、コア表面では0.2mm程度であったが、中央部では0.35mm程度と大きくなっていった。

3.2 ひび割れ発生時期および進行状況

ひび割れ発生時期および進行状況を確認するた

側壁	0.40	0.15	0.30	0.25	0.35
頂版	30m ブロック				
側壁	0.35	0.30	0.35	0.30	

側壁	0.35	0.30	0.30
頂版	20m ブロック		
側壁	0.35	0.20	

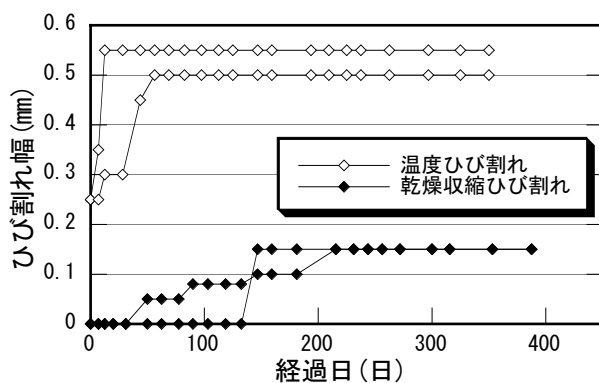


図－2 ひび割れ発生位置(横2連 右断面)



図－3 採取コア状況(横2連 30mブロック外外壁)

め、側壁・頂版コンクリートの脱型直後から調査を行った。その結果を図－4に示す。ひび割れは、脱型直後にすでに0.25mm幅程度のものが発生しており、その後ひび割れ幅は徐々に進展し、最大幅で約0.55mmまで増加した。そのひび割れの進展は約2～3ヶ月で停留状態となった。このひび割れは、コンクリートの水和熱に起因する温度ひび割れにより発生しその後は乾燥収縮によると考えられる。また、測定開始50日目ごろから微細なひび割れが発生し、200日目以降に、最大幅



図－４ 経過日数とひび割れ幅の関係

0.15mm 程度で停留状態となった。このひび割れは、ひび割れ幅および発生時期より判断して、乾燥収縮により発生したひび割れと思われる。

これらのことから、共同溝に発生しているひび割れは、ひび割れパターン、発生時期、深さおよびひび割れ幅などから判断して、主要因としては初期においては水和熱に起因する温度ひび割れと判断され、その後は温度ひび割れと乾燥等による収縮ひび割れとの複合ひび割れと判断された。

4. 温度応力解析

4.1 解析条件

温度解析および温度応力解析には、岩盤の上に2連ボックスの半断面が拘束されているような解析モデルとし、3次元のFEMにより算定した。その解析モデルを図－5に、温度応力解析条件を表－1に示す。膨張材特有の性状である膨張効果の算定にあたっては、既往の文献^{1), 2)}より温度降下時の線膨張係数が見かけ上低減されるとの仮定で、普通コンクリートの70%で計算した。材料特性は、実構造物コンクリートの試験室での測定値を用いた。その特性値を表－2に示す。

4.2 温度計測結果

コンクリート内部温度の経時変化を図－6に示す。コンクリートの温度は熱電対により、構造物長手方向応12m位置の側壁中央部の内側、中央、外側の3カ所における測定結果である。最高温度は、材齢1.5日目でピークを示し、中央部で40.7℃になり、側壁内側、外側、中央部の順に高くなった。その後は徐々に降下し、打設後材齢10日

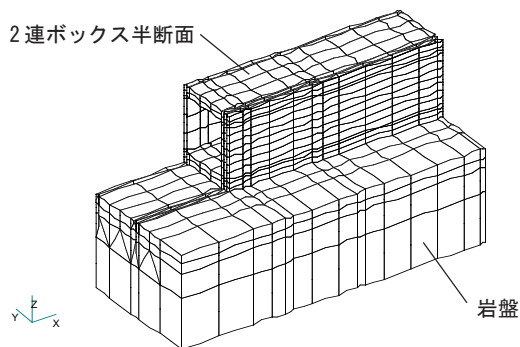
表－1 解析条件

項目	単位	コンクリート	地盤
熱伝導率	W/m℃	2.275	3.49
比熱	kJ/kg℃	1.185	0.795
密度	kg/m ³	2350	2650
初期温度	℃	18	—
断熱温度	℃	T=47.1	—
上昇式		$\times (1 - \exp^{-0.927t})$	
外気温	℃	10	10～18
弾性係数	N/mm ²	下表による	41
ポアソン比	—	0.167	0.2
熱膨張率	1/℃	8.57×10^{-6} (6.00×10^{-6})	10×10^{-6}

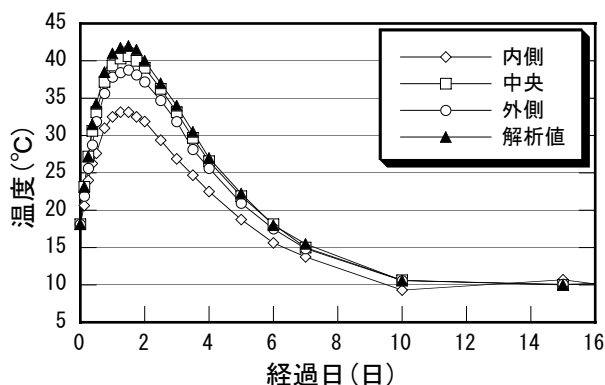
()は膨張コンクリートの値であり、通常コンクリートの70%とした。

表－2 材料特性

材齢(日)	$E_e \times 10^4$	f'_c	単位 : (N/mm ²)
0	0	0	0
1	1.26	5.25	0.689
3	1.44	10.99	0.693
5	1.85	11.81	1.500
28	2.60	22.25	2.033



図－5 解析モデル

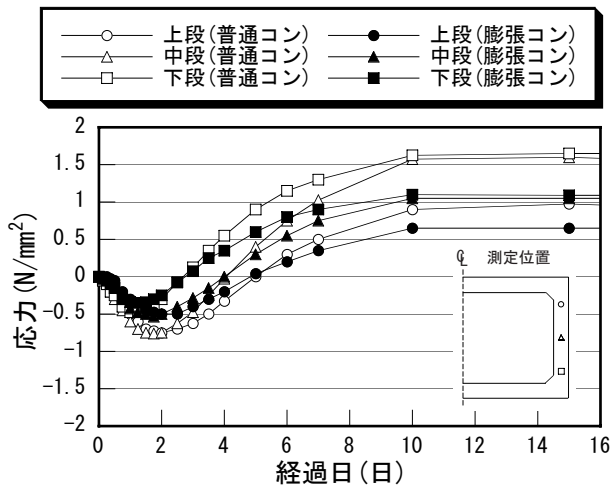


図－6 コンクリート内部温度の経時変化

目で定常状態となった。なお、温度履歴の解析値は測定値と同じ履歴となることを確認した。

4.3 コンクリート内部応力解析結果

側壁中央部の上段、中段、下段におけるコンク



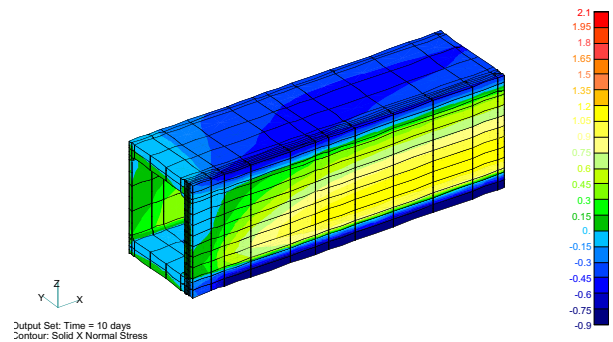
図－7 コンクリート内部の応力経時変化

リート内部応力の経時変化を図－7に示す。打設直後から圧縮応力が発生した後、コンクリート温度の下降に伴い引張応力に転じ、コンクリート温度が外気温と平衡状態となる打設後10日目に引張応力は最大となった。普通コンクリートと膨張コンクリートを比較すると、いずれの位置においても、膨張コンクリートの方が引張応力の発生は小さくなっている。その値は前者では $\sigma_{ct} = 1.6 \text{ N/mm}^2$ であるのに対し、後者では $\sigma_{ct} = 1.1 \text{ N/mm}^2$ あり約70%に減少している。これは、膨張材の収縮補償機能により、温度応力が低減されているものと考えられる。なお、その時の構造物長手方向応力分布状況は図－8に示すように、構造物長手方向端部から5m区間は小さく、中央部で大きくなっており、部材中央部で最大となる。さらに、部材断面方向応力分布状況は図－9に示すように、部材の中心部で最も大きくなっていることが判る。

このことから、ひび割れが部材の中央部から発生し、そのひび割れが部材の外側へと広がって、貫通ひび割れとなることを示唆したもので、前述したコアのひび割れ発生状況とよく一致している。

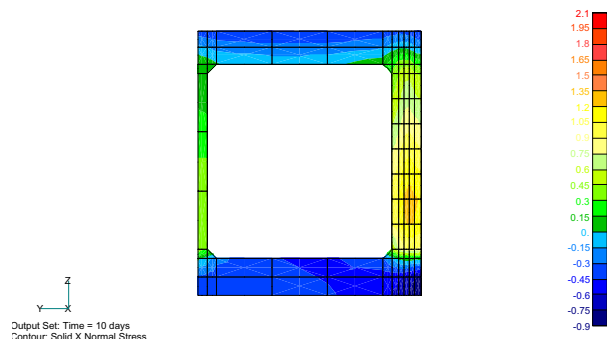
4.4 ひび割れ指数

ひび割れ指数の経時変化は、図－10に示すようにコンクリート温度が外気温と平衡状態となり、引張応力が最大となる打設後10日目に最小となった。普通コンクリートのひび割れ指数は



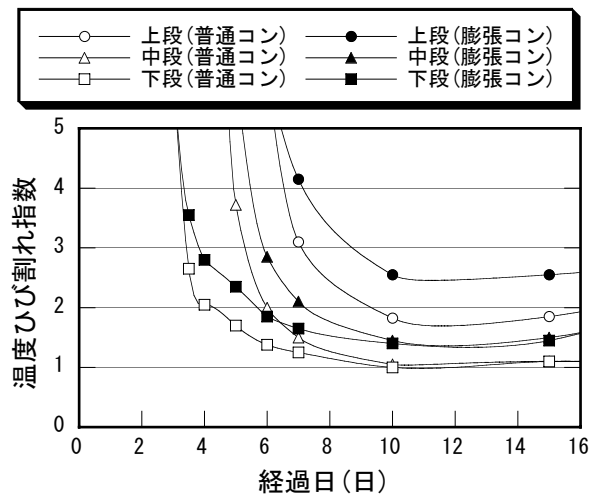
コンクリート引張応力最小時：打設10日

図－8 側面部材応力中央分布図



コンクリート引張応力最小時：打設10日

図－9 中央断面応力分布図



図－10 ひび割れ指数の経時変化

1.0（ひび割れ発生確率85%）であり、非常にひび割れが発生しやすい状態となっていることから、ほとんどの既設構造物にひび割れが発生していることと一致する結果となった。

また、膨張コンクリートでのひび割れ指数は1.5（ひび割れ発生確率20%）であり、普通コンクリートに比べひび割れが発生しにくい状態となっているものと考えられる。

5. ひび割れ抑制対策とその効果

5.1 ひび割れ抑制対策項目

構造物に発生するひび割れの主な発生要因は、コンクリートの水和熱に起因する温度応力であること、都市部に建設され施工業者が多いこと、施工期間が長いこと等からひび割れ抑制対策は、(1)単位セメント量の低減、(2)ひび割れ補強鉄筋量の増加、(3)膨張材の使用の3項目に着目して検討を行った。なお、調査対象ブロック数は対策を行っていない箇所を含めて102箇所であり、それぞれの抑制対策内容と調査箇所数を表－3に示す。

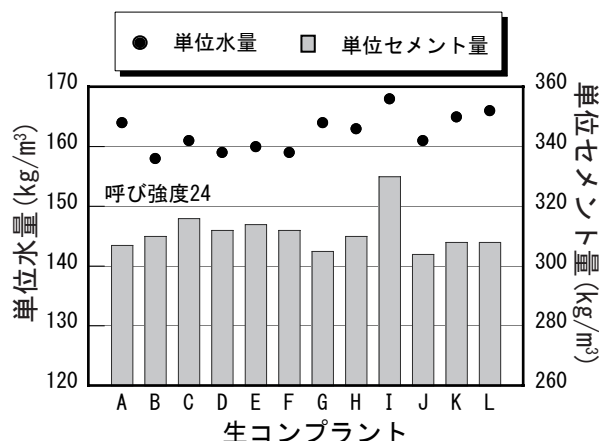
5.2 ひび割れ抑制対策効果

図－11に生コン工場と単位セメント量および単位水量の関係を示す。工事に使用されたコンクリートは12カ所の生コン工場から出荷されているため、呼び強度が同一であっても、単位水量で最大15kg/m³、単位セメント量で最大25kg/m³程度異なっていることが判った。また、図－12および図－13に示すように、単位セメント量とひび割れ幅およびひび割れ本数との関係には明確な差が認められず、単位セメント量が少ない場合でも、ひび割れは多く発生していた。このように、同一地区の生コン工場で単位セメント量が大きく異なることなどから、水和熱抑制のために、高性能減水剤の使用による単位セメント量の低減を行っても、これ以上のセメント量の低減は期待できないと考えられたため、単位セメント量の低減による方策は得策でないと判断された。

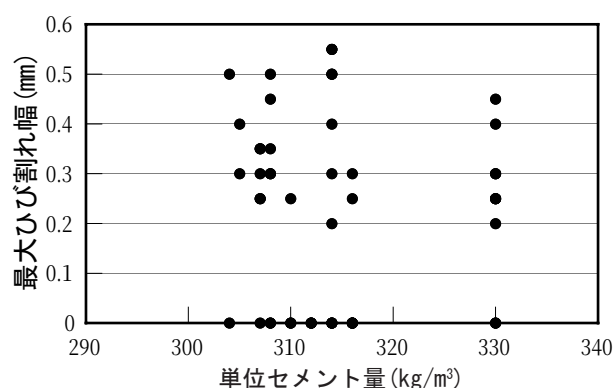
ひび割れ抑制効果を確認するため、対策項目毎に、打設温度とひび割れ幅およびひび割れ本数の関係で示した。その結果を、図－14および図－15にそれぞれ示す。なお、ひび割れ本数は躯体に発生した0.15mm以上のひび割れの本数で表した。これらの図より、無対策の場合は、打設温度が高いほどひび割れ幅および本数ともに大きくなる傾向にあった。補強鉄筋の場合は、ひび割れ本数は無対策の場合と大差ないが、ひび割れ幅は最大で0.3mmまで減少する傾向にあり、補強鉄筋の増加はひび割れ幅の抑制に効果があるものと考えられる。このように、打設温度がひび割れ発生に影響

表－3 調査ブロック数内訳

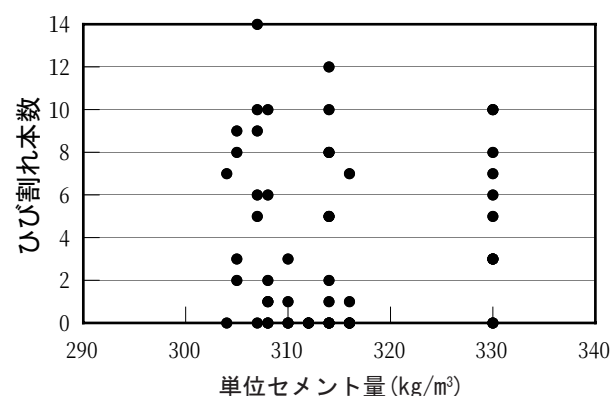
対策内容	ブロック数	呼び強度	
		21	24
無対策	49	－	49
膨張コンクリート	11	3	8
補強鉄筋量増加	42	5	37
合 計	102	8	94



図－11 生コン工場と単位セメントの関係

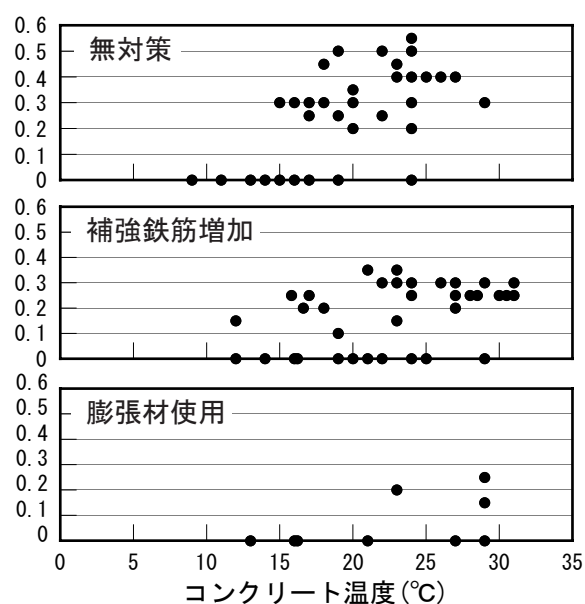


図－12 セメント量とひび割れ幅の関係

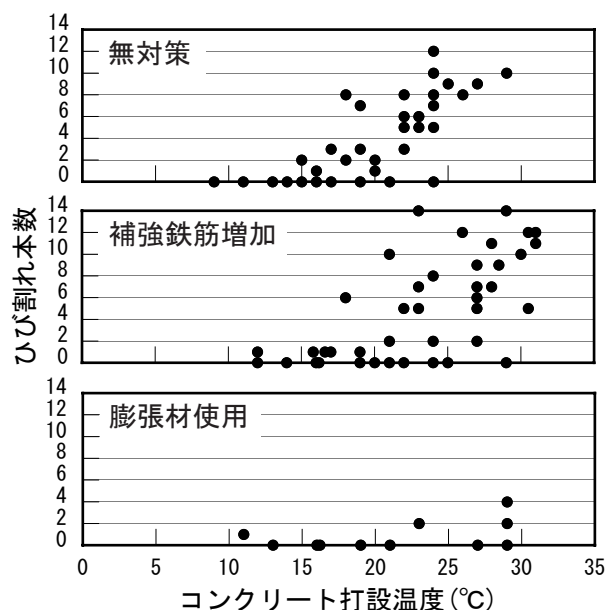


図－13 セメント量とひび割れ本数の関係

した要因としては、コンクリートの引張強度に対する引張応力の増加が著しく速くなることが影響しているものと考えられる³⁾。



図－14 温度とひび割れ幅の関係



図－15 温度とひび割れ本数の関係

一方、膨張材を使用した場合は、打設温度にかかわらず、ひび割れ幅および本数ともに著しく低減されており、前述した温度応力解析とも良く一致している。このように、膨張材の使用により、ひび割れの発生を抑制した要因としては、コンクリートに膨張による圧縮応力が導入できること、温度下降過程に発生する引張応力が低減すること、水和熱抑制型を使用することで最高温度までの到達時間を長くできるため、発生する温度応力を低減すること等によるものと考えられる。

以上のことから、施工現場においては、環境の温度条件はコントロールが困難であり、夏季は冬季に比較すると危険側に行くものとする。しかし、膨張材の使用により、圧縮応力導入による発生応力の低減が計れることから、温度により若干の導入圧縮応力は変化するが、通年での引張応力低減効果を期待でき、ひび割れ抑制対策の有効な一方策と判断された。

6. まとめ

側壁が薄いカルバート構造物の温度ひび割れ対策について、実構造物での現場計測および解析的検討を行った。本論文で得られた結果を要約すると以下の通りである。

(1) ひび割れ発生状況調査から、躯体に発生して

いるひび割れの主要因としては、水和熱に起因する温度ひび割れと判断された。

(2) 温度応力解析結果から、ひび割れは部材の中央部から発生し、そのひび割れが部材の外側へと広がって行くことが判った。

(3) ひび割れ抑制対策効果について検証した結果、打設温度が高いほどひび割れの発生確率は高くなるが、膨張材の使用により、その抑制効果に優れることが確認された。

参考文献

- 1) 北沢真ほか: 膨張材によるマスコンクリートの温度ひび割れ対策に関する検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.23, No.2, pp1117-1122, 2001, 6
- 2) 中村時雄ほか: 高ビーライト系低発熱セメントと水和熱抑制型膨張材を併用した高度浄水処理施設の側壁部マスコンクリート対策, コンクリート工学, Vol.36, No.9, pp28-34, 1998, 9
- 3) 保利彰宏ほか: 膨張材を添加したコンクリートの物理的性状に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp571-576, 1999, 6