

論文 マスコンクリート施工時の温度分布, 内部ひずみおよび表面ひずみの実測

吉丸 功祐*¹・牧角 龍憲*²・伊藤 幸広*³・吉原 匠*⁴

要旨：ボックスカルバートの壁体部において、断面内の温度分布、内部ひずみの経時変化を計測した。さらに、コンクリート硬化開始時から脱枠後まで簡易に表面ひずみを計測できる計測プローブを開発し、外乱の影響を大きく受けるかぶり部のひずみの挙動を調べた。脱枠後のかぶり部の伸縮に関しては、構造物の温度降下による収縮よりも、外気温の変動の影響が卓越していることを明らかにした。

キーワード：マスコンクリート, 温度分布, ひずみ, かぶり

1. はじめに

最近、ボックスカルバートや壁式橋台などの壁面において、施工期間中にひび割れが発生する事例が数多く報告¹⁾されている。ひび割れの主な発生原因としては、ひび割れパターンなどから、水和熱に起因する温度応力によると推定されるものが非常に多い。温度ひび割れの発生時期は、脱枠時に確認されるものの他、型枠の存置期間にかかわらず、脱枠後1週間以内に発生するケースも多く見られる。部材厚に対し表面積の比が大きい壁体部では、脱枠後には、清水ら²⁾が指摘するような日射の影響や外気温の変動、急速な乾燥に伴う収縮応力の影響が大きく寄与し、温度応力との複合作用によりひび割れが発生する可能性がある。

日射、外気温、乾燥収縮の影響を把握することは、温度ひび割れ照査における温度解析および応力解析の精度向上のために重要である。そのためには、これらの影響が顕著に表れる構造物の表面部(かぶり部)の温度変化およびひずみのデータの蓄積が必要である。しかし、かぶり部のひずみに関しては、設置の難しさや断面欠損になる等の理由から、実構造物に埋込み型

ひずみ計等をかぶり部に埋設した事例はなく、実測値はほとんど見られない。

本研究では、実構造物の道路カルバートを対象として、かぶり部を含む断面内の温度分布を計測するとともに、内部ひずみおよび表面ひずみ(かぶり部のひずみ)の経時変化を調べることを目的に検討を行った。表面ひずみの計測においては、コンクリート硬化開始時から脱枠後まで簡易に表面ひずみを計測でき、計測終了後撤去可能な計測プローブを開発し、かぶり部のひずみ挙動について計測を行った結果について報告するものである。

2. 計測の概要

2.1 構造物の形状および打設方法

計測対象とした道路カルバートは、図-1に示すような2連のボックスカルバートであり、幅23100mm、高さ9300mm、長さ11700mmの形状である。側壁の厚さは、1000mmであり、かぶり厚さは100mmである。コンクリートの打設は、まず第1リフトとして底版を打設し、第2リフトは側壁を215cmの高さまで打設した。第3リフトは残りの側壁と頂版を同時に打設し

*1 佐賀大学 工学系研究科 都市工学専攻 (正会員)

*2 九州共立大学 教授 工学部 都市システム工学科 工学博士 (正会員)

*3 佐賀大学 助教授 理工学部 都市工学科 博士(工学) (正会員)

*4 国土交通省 九州地方整備局 九州技術事務所 所長

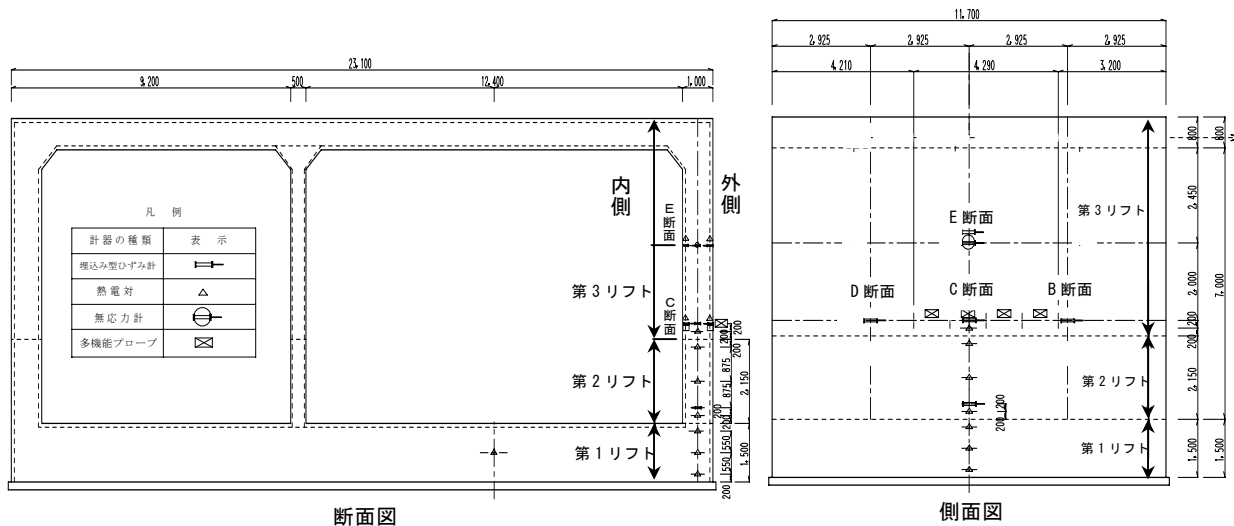


図-1 ボックスカルバートの形状および計測位置

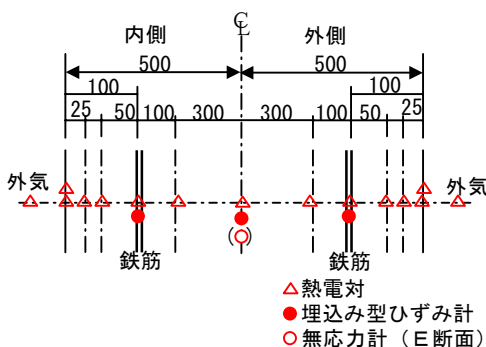


図-2 C断面, E断面における計測装置の位置

た。使用したコンクリートの種類, 各リフトの打設日と脱枠日は表-1に示す通りである。

2.2 計測項目および計測位置

(1) 温度

第1リフトおよび第2リフトにおいても計測を行ったが, 本報では第3リフトの計測概要について述べる。コンクリート温度の計測は, 図-1に示すように, ボックスカルバート長手方向の中心線上のC断面およびE断面で行った。C断面は, 打継ぎ面から40cmの高さであり, E断面は240cmの高さである。各断面とも, 構造物内部または外部との熱伝達状況を把握するために, 断面内にかぶり部内の3箇所を含む合計11箇所に熱電対を配置した。また, ボックスカルバート内外の外気温についても計測した。熱電対の設置位置は, 図-2に示すように, 断面中心線から左側(以下, 内側)と右側(以下, 外側)に対称に配置した。

表-1 コンクリートの種類および打設日, 脱枠日

コンクリートの種類	24-8-40BB, 打設時温度27~32℃
各リフトの打設日 および脱枠日	第1リフト:平成15年8月5日打設/8月8日脱枠(底板)
	第2リフト:平成15年8月19日打設/8月25日脱枠(側壁)
	第3リフト:平成15年9月8日打設/9月15日脱枠(側壁) 9月8日打設/9月30日脱枠(頂版)

(2) 内部ひずみ

側壁内部のひずみの計測においては, T社製の埋込み型ひずみ計(見掛けの弾性係数40N/mm²)を用いた。ひずみの計測位置は, 外部拘束による温度ひび割れの起点となる可能性が高い打継ぎ面付近とし, 打継ぎ面から40cmの位置にあるB, C, D断面とE断面において, 側壁の内側, 外側とも, それぞれ表面から10cmの位置にひずみ計を設置した。さらにC断面においては, 断面中央部にもひずみ計を, E断面中央部には無応力計を設置した。

(3) 表面ひずみ

かぶり部のひずみを計測するために, 図-3に示す装置を開発した。ひずみ計測の原理としては, かぶり部に埋設した2個の測定端子(以下, 多機能プローブと称す)のコンクリートの収縮・膨張に伴う変位量を変位計測装置により計測し, 計測開始時の基長をもとにひずみを算出するものである。多機能プローブの形状は, 図-4に示す通りである。多機能プローブは, 合板に穴を開けてスパナ等でねじ込むことにより容易に固定でき, コンクリート打設後に固定

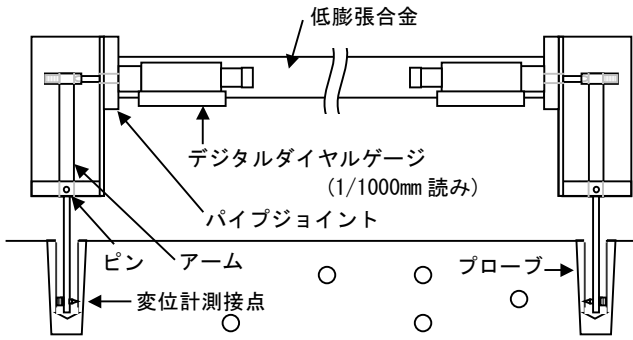


図-3 計測原理の概略図

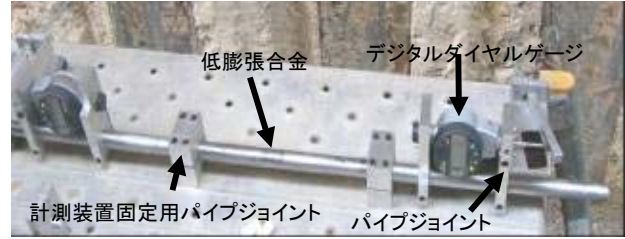


写真-1 変位計測装置の外観

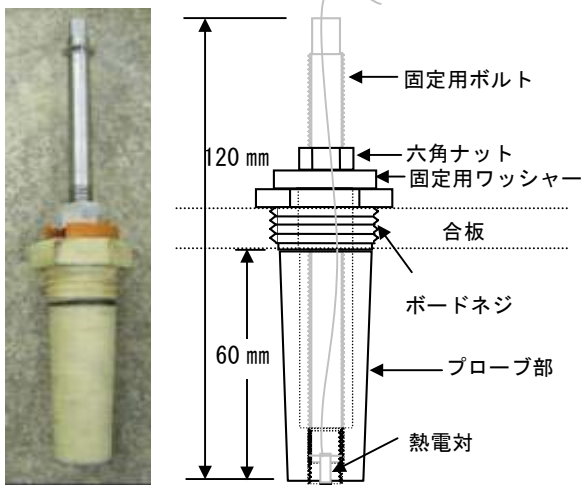


図-4 多機能プローブの形状

用ボルト等を取り外すことによって、プローブ部が自由に可動できるようになる。また、プローブ内にはφ16×50mmの空間があり、種々のセンサを組込むことができる。本計測においては、ひずみ計測の他、かぶり部の温度変化を計測するために、熱電対を先端部に取付けた。従来の埋設型の計測装置と異なり配線類が躯体内を通らないため、設置作業が簡易であり、コンクリート打設作業時に支障とならない。なお、プローブ部はプラスチックコーンと同様な形状であり、計測終了後には撤去が可能であり、繰り返し使用できる。プローブ部の材質は、コンクリートと熱膨張係数が同等であり、コンクリートよりも熱伝導率が小さく、強度が大きいという素材から選定し、ガラス繊維で強化したポリアミド樹脂を用いた。

変位計測装置の外観は、写真-1に示す通りである。両側のデジタルダイヤルゲージを固定する丸棒には、低膨張合金（熱線膨張係数 1.37



写真-2 変位計測装置の設置状況

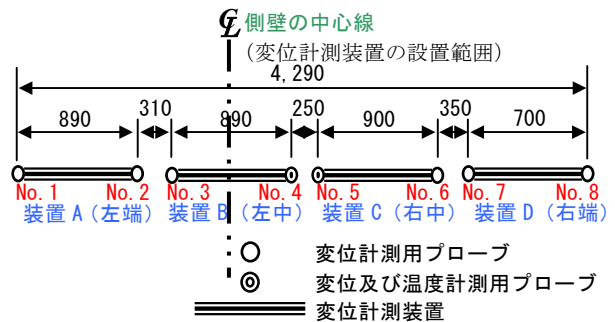


図-5 変位計測装置の取り付け位置

×10⁻⁶/°C) を用い、外気温の変化による計測誤差を少なくした。さらに、低膨張合金の中央に熱電対を取付け、温度変化による伸縮量を補正した。各プローブ部の変位量は、アームを介して1μm読みのデジタルダイヤルゲージで計測し、30分間隔でノートパソコンに計測データを取り込んだ。

表面ひずみの計測位置としては、第3リフトにおいて打継ぎ面から67cmの高さで水平に4箇所設置し計測した。図-5には、各変位計測装置の設置位置および多機能プローブの設置間隔を示す。プローブの設置間隔がそれぞれのセットで異なるのは、縦バタ（支保工）が存在する位置を避けて設置したためである。

3. 計測結果

3.1 温度分布

図-6 は、C断面の側壁内、外側部におけるコンクリート表面からの温度分布を経過時間毎に示したものである。経過時間に係らず、コンクリート表面から 200mm までの範囲では、温度分布はほぼ直線的となっている。

断面中央部の温度がピーク（30 時間後）を迎えるまでの昇温過程においては、側壁の内側、外側とも温度差はほとんどない。しかし、降温過程での 48 時間後は、外側のかぶり部の温度が内側のかぶり部に比べ 1℃程度低くなっている。これは、内側のボックスカルバート内に熱がこもり、外側よりも外気温が 2.6℃高くなっており、保温効果があったことによると考えられる。脱枠は 170 時間後に行った。その 1 日後の 194 時間においては、内側、外側の外気温の差はほとんどないにも係らず、中央部を除く外側のコンクリート温度が内側よりも約 1℃低くなっている。これは、外気の対流の違いによる熱伝達率の差によるものと考えられ、その影響範囲は表面から 200mm 以上に及ぶ。また、日射量が大きい時間帯のケースとして、経過時間 245 時間後（午後 12 時 46 分）では、外側のかぶり部の温度の方が大きくなっている。このように壁体部では、脱枠後には、日射や風の影響がかぶり部まで及ぶと言える。

図-7 および図-8 は、それぞれ側壁外側および内側の各測点の温度履歴を示したものである。内側、外側ともかぶり部においては、外気温の日変動等の外乱の影響は、温度がピークを過ぎてから既に見られ、脱枠後にはその影響が顕著となる。表面から 200mm の位置では、型枠存置期間中の外乱の影響は小さいが、脱枠後には外気温と連動した振幅が見られる。

降温過程においてコンクリート表面温度が外気温と同程度になるまでは、内側のかぶり部の温度は、外側のそれよりおおよそ 1℃高い。これは、本件のように頂版を側壁と同時に打設するボックスカルバートでは、内側では外乱の影

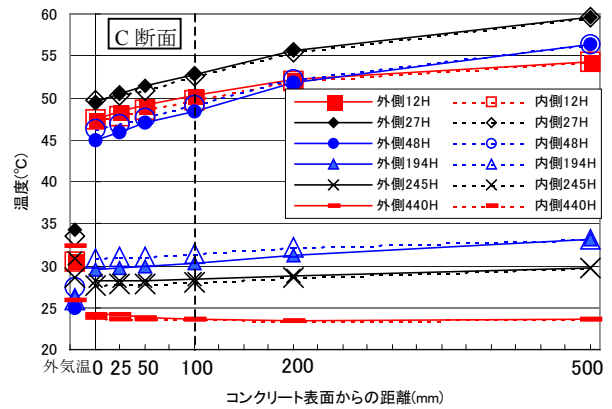


図-6 コンクリート表面からの温度分布

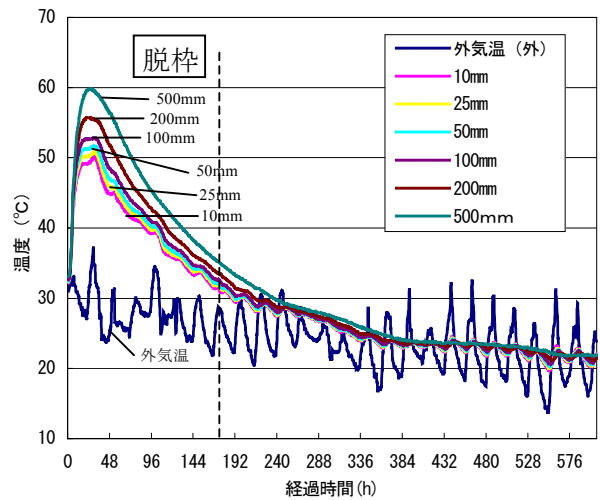


図-7 C断面外側の各測点の温度履歴

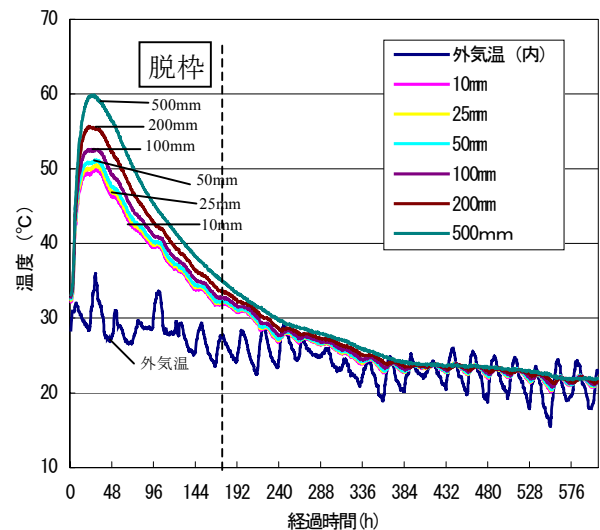


図-8 C断面内側の各測点の温度履歴

響を受けにくく、また水和による発熱がボックスカルバート内部にこもるためであり、温度解析時には考慮が必要と考えられる。

3.2 内部ひずみ

図-9 は、各測点において埋込み型ひずみ計で計測した全ひずみの経時変化である。なお、ひずみの初期値は凝結終結時とした。いずれの測点のひずみも脱枠後あたりから、外気温の日変動の周期に合わせて変化している。しかし、その振幅幅は 2μ 程度と小さい。

昇温時のひずみは、外部拘束の影響が小さく、温度上昇量の大きいE断面が大きくなっている。打継ぎ面から同じ高さのB,C,D断面を比較すると、これらは第1リフトとの熱伝達条件や外部拘束条件が同等と見なすことができるが、ひずみの値は断面によって異なり、また同じ断面内でも内側と外側で大きく異なっている。例えば、B断面の内側と外側では、ピーク時に 73μ ひずみの差がある。これは主に、埋込み型ひずみ計を設置した箇所の鉄筋による拘束状態の違いによるものと推測される。

経過時間 209 時間 (9 月 17 日 午前 3 時 45 分) にひび割れが発生し、ひずみが開放されたことにより、グラフが不連続になっているものがある。ひび割れの発生位置は、図-10 に示すように、C,D断面の間から発生しE断面横まで伸びており、B断面の計測器以外は発生を明確に感知した。

3.3 表面ひずみ

図-11 は表面ひずみの経時変化を示したものである。また、図-12 は温度および相対湿度の経時変化を示したものである。なお、相対湿度は現場から5kmの位置にある気象台が観測した日平均値である。

いずれの変位計測装置の結果においても、計測開始から30時間以内(区間①)のひずみは大きく変化している。一般的に水和熱により温度が上昇する過程ではコンクリートは膨張するが、ひずみが膨張側の挙動を示したのは装置Cのみである。装置A,B,Dについては、収縮側の挙動となっている。かぶり部においては、鉄筋、既設コンクリートや型枠により、コンクリートの変形が拘束される部分が偏在することによると

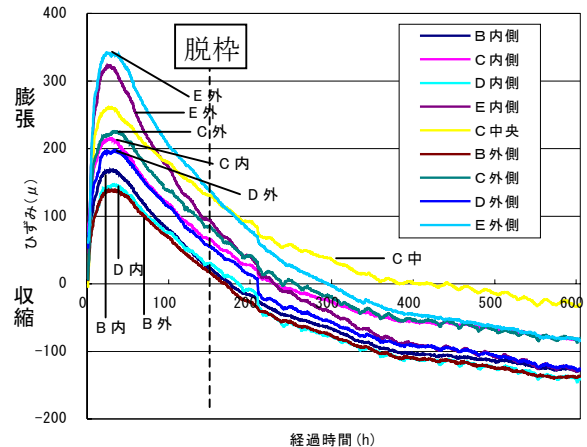


図-9 内部ひずみの経時変化

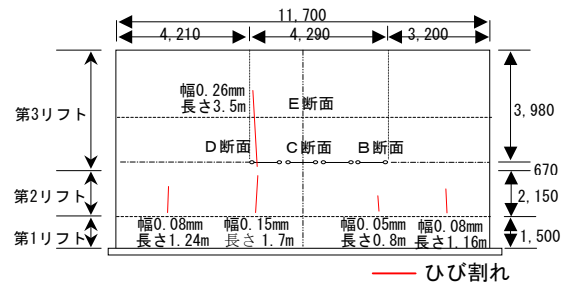


図-10 ひび割れ発生位置図

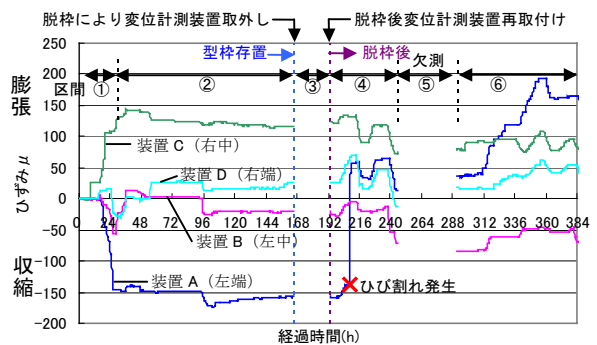


図-11 表面ひずみの経時変化

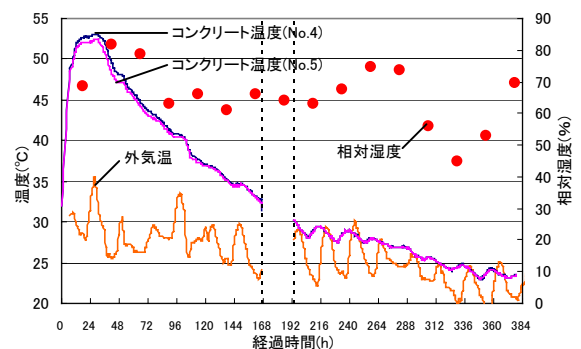


図-12 温度および相対湿度の経時変化

推測される。

水和反応による発熱がほぼ終了する時点から脱枠までの区間②では、いずれのプロープにおいても大きい変位は見られない。この間、外気

温の日較差は最大で 10℃程度の日もあるが、外気温変化がかぶり部の伸縮に及ぼす影響は少ないと言える。これに対し、脱枠後の区間④以降については、外気温の変化と連動し、かぶり部が大きく伸縮する動きが見られ、その挙動は全ての変位計測装置とも概ね一致している。区間④における各日の気温の日較差はおよそ 7℃であり、無応力計より求めた温度降下中のコンクリートの線膨張係数が $10.4 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ であることから、外気温の変化によって計算上最大で約 70×10^{-6} 程度ひずみを生ずることになる。ひずみの実測結果もこれに近い値（ひずみ差 $50 \sim 60 \times 10^{-6}$ ）となっている。すなわち、脱枠後のかぶり部の伸縮に関しては、構造物の温度降下による収縮よりも、外気温の変動の影響が卓越しているといえる。また、その伸縮ひずみが大きいことから、温度降下により構造物に引張応力が作用している状態下では、外気温の変動による伸縮がひび割れ発生の起因となることも考えられる。温度応力解析等により、従来より温度ひび割れは主に構造物中心部から発生するとされているが、この結果よりかぶり部を起点としたひび割れが内部に進展するという仮定もできる。

ひび割れは装置 A のプローブ間に発生しており、その発生時刻はグラフからも明確に確認できる。すなわち装置 A のラインにおいて、計測開始から 209 時間（埋込み型ひずみ計でも同時刻に感知）に急激にひずみが増加しており、収縮側から膨張側に移行している。これは、ひび割れ発生により収縮ひずみが一気に開放されたことを示しており、ひび割れ発生前後のひずみの差は、 170×10^{-6} 程度であった。なお、ひび割れが発生する直前には気温の低下に伴うかぶり部の収縮が見られた。ひび割れ発生後の区間④においては、装置 A のひずみは他の装置のひずみと同様の挙動を示すが、その後区間⑥になると、装置 A のひずみが膨張側に一定の割合で増加する傾向が見られる。これは、ひび割れ幅が拡大したためと考えられる。ひび割れが、区間⑥の途中から急に拡大し始めた理由としては

湿度の変化が挙げられる。気象台の記録によると、区間④からひび割れが拡大し始める前までの相対湿度はおよそ 70%RH であったのに対し、それ以降は 50%RH 台と乾燥した日が続いた。外気の乾燥によりひび割れ開口部分から水分が蒸発し、乾燥収縮が促進され、ひび割れ幅が拡大することが知られているが、本計測においても同様の現象が生じたものと推察される。

4. まとめ

本研究より得られた結論は以下の通りである。

- 1) ボックスカルバートの壁体部では、外気温の日変動等の外乱の影響は、降温過程から見られ、脱枠後にはその影響が顕著になる。
- 2) 型枠存置期間中のかぶり部においては、鉄筋、既設コンクリート、合板により、コンクリートの変形が拘束される部分が偏在すると考えられる。
- 3) 脱枠後のかぶり部の伸縮に関しては、構造物の温度降下による収縮よりも、外気温の変動の影響が卓越している。また、その伸縮ひずみが大きいことから、温度降下により構造物に引張応力が作用している状態下では、外気温の変動による伸縮がひび割れ発生の起因となることも考えられる。

謝辞

本研究は、コンクリートひび割れ抑制対策検討業務の中で行われたものであり、検討委員会委員ならび現場計測にご協力頂いた関係諸氏に感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) (財)道路保全技術センター：コンクリートひび割れ抑制対策検討業務報告書【資料編】，pp.57-79，2004.3
- 2) 清水昭男・伊藤洋・坂口雄彦：マッシュなコンクリート構造物の温度ひびわれ発生に及ぼす日射の影響，第 8 回コンクリート工学年次講演会論文報告集，pp.13-16，1986