

論文 現場計測による膨張コンクリートのひずみおよび拘束度の検討

杉橋 直行^{*1}・室屋 浩幸^{*2}・野村 朋宏^{*3}・関 博^{*4}

要旨: 膨張材のひび割れ制御効果に関する現場計測について、計測精度および凝結始発前に生じる体積変化の計測感度が評価に与える影響を検討した。これを踏まえ、膨張材および鉄筋の有無を変えたコンクリート箱桁橋床版のモデル供試体で温度およびひずみ計測を実施した。膨張材による自由膨張ひずみを分離し、これが型枠や鉄筋にどの程度拘束されるか検討した。計測された膨張材の自由膨張ひずみは近年提示されている算定式とよく合致し、型枠支保工および内部拘束による拘束度が 0.35、鉄筋の拘束度が 0.2~0.3 程度であることを確認した。

キーワード: 膨張材, 拘束度, 膨張ひずみ, 現場計測, 温度応力, 自己収縮, 乾燥収縮

1. はじめに

コンクリート構造物のひび割れを制御するために、膨張材を使用するケースが増えてきている¹⁾。膨張材を使用したコンクリートを施工する現場では、膨張材によるひび割れ制御効果がどの程度あったのか定量的に把握することが、①今後の同種構造物への膨張材の適用性を検討する、あるいは②膨張材によるひび割れ制御効果のコストパフォーマンスを評価する、等のために重要である。このため、膨張コンクリートを使用する現場では、熱電対や埋設型ひずみ計、鉄筋計、ひずみゲージ、有効応力計あるいは土圧計等の各種計器を設置して膨張コンクリートの打込み直後からの挙動計測が試みられ、これらの計測データが様々な論文で評価されている。

これら多種の計測機器による計測が現場で行われる大きな理由の一つは、膨張材によるひび割れ制御効果の定量的な把握のために、材齢と共にコンクリートの体積変化が生じる多岐にわたるメカニズムの中から膨張材によるものを分離する必要性が欠かせないためである。

しかしながら、近年埋設型ひずみ計の若材齢時の感度²⁾や有効応力計の理論値および計測値との相違³⁾等が説明されるに至り、現場計測における計測データの評価方法に課題が多くあることや、これらのデータの解釈が論文毎に相違するであろうことから、一様に論文のデータを他者が評価できないデメリットが明らかとなってきた。

ここでは、計測の開始点および体積変化の基点の取り方、熱電対および埋設型ひずみ計の精度や感度がひび割れ制御効果の評価に与える影響を整理検討し、その課題をまとめた。

これらの課題を踏まえた上で、コンクリート箱桁橋床

版への膨張材の適用性を検討するためにモデル供試体による事前実験を行った。同構造物では桁や鉄筋あるいは型枠が自由膨張ひずみをどの程度拘束するかが、膨張材のひび割れ制御効果を支配し、その適用性を考える上で重要である。ここでは、膨張材および鉄筋の有無を変えた橋床版のモデル供試体の温度およびひずみ計測結果から膨張材による自由膨張ひずみを分離し、これが型枠や鉄筋でどの程度拘束されるか検討した。

2. 現場計測における課題の整理

2.1 計測の開始点および体積変化の基点

レディーミクストコンクリートを使用した現場打ちコンクリートのひび割れ制御効果の計測は、計測機器を型枠内に設置しているという手法上の理由から、コンクリートが型枠内に打込まれた時点から開始される場合がほとんどである。

しかしながら厳密には、コンクリートは市中プラントでの練混ぜ時セメントに注水された時点から水和反応を生じ、温度膨張や水和収縮あるいはプラスチック収縮が開始する⁴⁾。したがって、アジテータ車で運搬される時間が長ければ、計測が開始される打込み時点とのずれが例えば水和収縮については図-1に示すように生じる。

その一方で、この時間に発生する体積変化はひび割れ制御効果の計測という観点からは必ずしも重要とはならない。なぜなら、これらの体積変化はアジテータ車やポンプ車、あるいは配管内で発生しているものであり、型枠打込み時に自由に変形できる状態に解放され、コンクリート内部に応力は蓄積されないからである。

したがってこの観点から留意すべきは、例えば計測結

*1 清水建設(株) 土木技術本部基盤技術部課長 工修 (正会員)

*2 清水建設(株) 名古屋支店土木部工事長 工修 (正会員)

*3 清水建設(株) 名古屋支店土木技術部グループ長 工修 (正会員)

*4 早稲田大学 創造理工学部社会環境工学科 教授 (正会員)

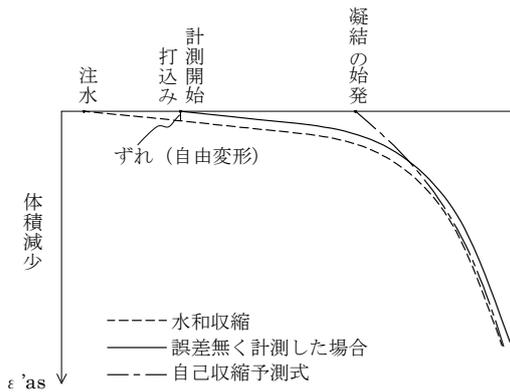


図-1 水和収縮および自己収縮、計測開始点

果のフィッティング解析において自己収縮予測式等を適用する場合に、図-1 に示す計測開始点および凝結始発時とのずれを理解し、その整合性を考慮することである。すなわち注水から打込み時、さらに凝結始発までの時間を把握すれば、計測を打込み時から開始してもひび割れ制御効果の計測として問題はない。

一方で、体積変化の基点は上述した計測開始点ではなく、一般的には凝結始発時とする場合が多い。体積変化の起点については、計測機器の精度や感度およびコンクリートのヤング係数等の物性に関する理解が必要となる。

2.2 温度計測

コンクリートの温度変化範囲やコストから JIS C1602 に示される T 型熱電対 (クラス 2) を用いて温度計測が行われるのが一般的である。この熱電対の精度は $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ 以内である。

この熱電対の誤差の影響を検討する。 1°C 温度収縮したコンクリートが完全拘束されていた場合に発生する応力の引張強度に対する比は、表-1 の通り 10.7% と極簡略的には計算できる。表-1 は、コンクリート標準示方書³⁾に示される引張強度 f_t およびヤング係数 E を使用して、線膨張係数を 10μ と仮定して計算したものである。

表-1 温度収縮 1°C の完全拘束応力および引張強度比

物性項目	記号	単位	算定
圧縮強度	$f_c(t)$	N/mm^2	$f_c(t)$
引張強度	$f_t(t)$	N/mm^2	$0.44 \times \sqrt{f_c(t)}$
ヤング係数	$E_c(t)$	N/mm^2	$E_c(t) = \varphi(t) \times 4.7 \times 10^3 \sqrt{f_c(t)}$
	$\varphi(t)$		クリープの影響を考慮した補正係数 材齢3日まで0.73 材齢5日以降1.0 材齢3日から5までは直線補間してもよい
温度差	ΔT	$^{\circ}\text{C}$	1
線膨張係数	α	$1/^{\circ}\text{C}$	10×10^{-6}
温度ひずみ	ϵ ($\alpha \times \Delta T$)	-	$10 \times 10^{-6} \times 1$
温度差応力	σ ($E \times \epsilon$)	N/mm^2	$4.7 \times 10^3 \sqrt{f_c} \times 10 \times 10^{-6} \times 1$
応力/引張強度	$\sigma/f_t(t)$	%	10.7

一見するとその割合は大きいように思えるが、完全拘束となる構造体はほとんどないことから、実際の構造物

ではその影響は数%程度以下と考えられる。さらに熱電対の誤差分布は連続的で、誤差がある特定の温度計測点にのみ生じる確率は少なく、その測点前にも同程度の誤差が含まれるとすれば、さらにその誤差影響は小さくなる。これらのことから、熱電対の誤差が温度ひび割れ制御効果の評価に与える影響は比較的小さいと考える。

次に凝結始発前の温度の影響について検討を加える。注水後、凝結始発時までには生じる温度上昇は、後述の実験では約 2.5°C であり、場合によっては 5°C 程度まで温度上昇することもある。この温度による発生応力は、この時のコンクリートの E および拘束度が分かれば表-1 と同様の算定法により求められる。この時点の E は直接計測することが困難であり、プロクター貫入抵抗値 P の値を一軸圧縮強度 F に換算し、これを圧縮強度 f_c 相当と考えて E を算定する。 P が $3.5\text{N}/\text{mm}^2$ 前後の範囲における F は、 P の $1/10 \sim 1/20$ となるデータが多い⁶⁾。 F を P の $1/10$ と仮定した場合、凝結始発前に例えば温度が 5°C 上昇しこれが完全拘束されていた場合に発生する圧縮応力は $0.035\text{N}/\text{mm}^2$ と算定される。これは、長期圧縮強度の $1/1000$ オーダーで無視できる程度と考えられる。若材齢時の有効ヤング係数の算定式の適用性について検証したものではないが、材齢2日までのヤング係数を材齢で算出する提案式⁷⁾によっても発生する応力のオーダーは変わらないことから、実務上あるいは物性上も妥当性はあると考える。

他に、凝結始発前の温度ひずみを無視できる理由として、ほとんどの場合部材が様に膨張する温度上昇時の圧縮応力が導入される時期であることがあげられる。つまり、この圧縮応力を無視してもひび割れ制御の観点からは安全側の設定と考えられるためである。

このため、先ほどの大きき議論を含めて、凝結始発前の温度上昇の影響は無視して良いと考えられる。

2.3 ひずみ計測

(1) 埋設型ひずみ計

一般的に市販されている埋設型ひずみ計 (以降ひずみ計と呼ぶ) は、図-2²⁾に示す通り標点距離 100mm 、計測ひずみ範囲 $\pm 5000\mu$ 、誤差 $\pm 50\mu$ 以内のものである。誤差 20μ 以内のひずみ計も市販されている。

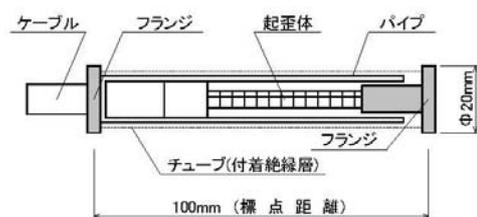


図-2 埋設型ひずみ計構造概略図²⁾

まず、この誤差がひび割れ制御効果に与える影響を検

討する。ひずみ計の誤差は図-3 に示すように分布しており、計測最大ひずみ $\pm 5000\mu$ において誤差絶対値 50μ 以内となるように校正されている。したがって一般的なひび割れ制御効果の計測範囲と考えられる 1000μ 程度以下の範囲における誤差は 50μ よりも小さく連続的な分布を示す場合が多いと考えられる。ひずみ計の最大誤差 50μ が生じたと仮定しても誤差の連続性から、図-4 に示すパターン1よりも2に近い計測結果が想定される。パターン2の場合、膨張最大点からの収縮量の差は 50μ の誤差よりも必ず $\Delta\epsilon_2$ だけ小さい誤差となり、誤差に連続性がある場合ひび割れ制御効果の検討に与える影響は非常に小さくなる。これらのことから、一般的なひび割れ制御計測においてはひずみ計の誤差の影響は小さいと考える。

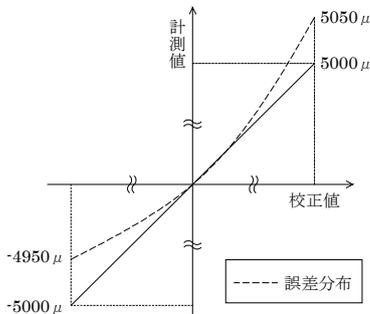


図-3 埋設型ひずみ計の誤差分布の模式図

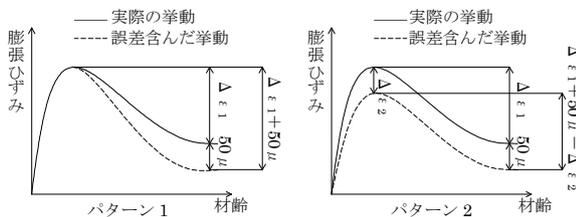


図-4 計測誤差の模式図

次に、凝結始発前のひずみ計の感度がひび割れ制御効果に与える影響を検討する。ひずみ計の片端側から 10mm 部分をモルタルにセットして、このモルタル部を強制的に 0.1mm (ひずみ 1000μ 相当)変位させた時に計測できるひずみの感度が図-5²⁾の通り示されている。凝結始発時の感度は、コンクリート膨張側の計測となる計器引張方向で50%程度、収縮(計器圧縮方向)で80%で

ある。このことは本来のひずみよりも小さい値が計測されていることを示す。この理由として、この時点のコンクリートは低弾性でひずみ計との一体化が不十分なためとされている。逆に凝結始発前でも大きなひずみを計測している場合は、コンクリートとひずみ計の一体化が進んでいるとも考えられ、すなわちコンクリートのヤング係数がある程度発現し、応力が発生していること等も想定される。凝結始発前のひずみ計の感度は取り扱いが難しく、計測結果を留意して取り扱う必要がある。

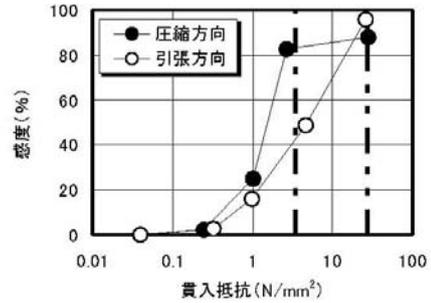


図-5 感度および貫入抵抗の関係²⁾

3. 現場計測による膨張材のひび割れ制御効果の検討

3.1 実験概要

箱桁橋床板への膨張材ひび割れ制御効果を検討するための事前実験として、 50cm 厚さの床板を模擬した図-6 に示す型枠に表-2 のコンクリートを打込んだ。

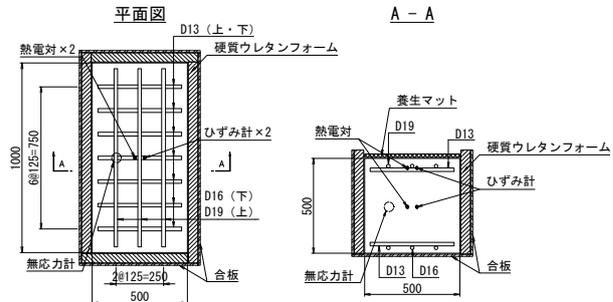


図-6 供試体

供試体は橋床板の建設時を模擬し、底面を合板型枠、上面を養生シート、側面は断熱に近くするために硬質ウレタンフォームで覆った。鉄筋(3-D19+3-D16, $p=0.58\%$)はNo.1 供試体にのみを配置し、No.2 および3 供試体は無筋とした。打込み直後から材齢90日まで熱電対による温度計測、ひずみ計による実ひずみ、無応力計による

表-2 示方配合

組骨材の最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)					
					水 W	セメント C	膨張材 EX	細骨材 S	粗骨材 G	高性能 AE 減水剤 A
25	15	43	4.5	43	148	324	20	783	1043	適宜
25	15	43	4.5	43	148	344	0	783	1043	適宜

無応力ひずみを計測した。

セメントは普通ポルトランドセメント、膨張材は石灰系低発熱タイプを使用した。20±3℃の室内で実施した凝結試験結果では、膨張コンクリートの凝結始発は7時間30分、終結が9時間30分、普通コンクリートの凝結始発は8時間10分、終結が10時間10分であった。

実験は表-3の通り条件を3種類に組み合わせて行った。表-3には、実験条件から無応力ひずみおよび実ひずみに含まれるひずみ成分を膨張収縮メカニズム別に示した。

表-3 実験条件

供試体 No.	膨張材	鉄筋	無応力ひずみ(εf)の成分	実ひずみ(εa)の成分
1	有	有	$(\epsilon_t + \epsilon_{ag} + \epsilon_{ex} + \epsilon_{sh})$	$(1 - (R_1 + R_2 + R_3)) \times (\epsilon_t + \epsilon_{ag} + \epsilon_{ex} + \epsilon_{sh})$
2		無	$(\epsilon_t + \epsilon_{ag} + \epsilon_{ex} + \epsilon_{sh})$	$(1 - (R_1 + R_2)) \times (\epsilon_t + \epsilon_{ag} + \epsilon_{ex} + \epsilon_{sh})$
3	無	無	$(\epsilon_t + \epsilon_{ag} + \epsilon_{sh})$	$(1 - (R_1 + R_2)) \times (\epsilon_t + \epsilon_{ag} + \epsilon_{sh})$

εt: 温度ひずみ, εag: 自己収縮ひずみ, εex: 膨張材のひずみ, εsh: 乾燥収縮ひずみ
εt, εag, εex, εshは拘束を受けていない状態でのひずみ

R1: 外部拘束(型枠, 支保工), R2: 内部拘束, R3: 鉄筋による拘束

3.2 温度計測結果

No.1 供試体 (以降 No.はその No.を持つ供試体を示す)の温度計測結果を図-7に示す。以降、特記のない材齢はコンクリート練混ぜ注水時点をゼロ時とした材齢を表す。No.2, 3の温度計測結果もNo.1とほぼ同様であった。図-7に示す供試体温度は材齢4日目以降、外気温度とほぼ同様となる。

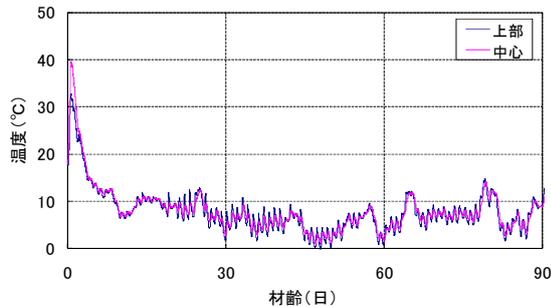


図-7 No.1 供試体温度計測結果

3.3 ひずみ計測結果

打込み直後をひずみゼロの基点にした場合と凝結始発時をゼロに設定した場合におけるNo.1およびNo.2の無応力ひずみを図-8および図-9に示す。

No.1では凝結始発時までに無応力ひずみが113μ計測され、これがNo.2では59μ、No.3では40μとなって、No.1が特に大きい。No.1およびNo.2で温度差がない場合の無応力ひずみは同一になるはずであるが、この時点で50μ程度相違している。

まずここでは、一般的な手法である凝結始発時をひずみゼロの基点と仮定して、データの整理を行う。このよ

うにして整理したひずみ計測結果を図-10~図-12に示す。

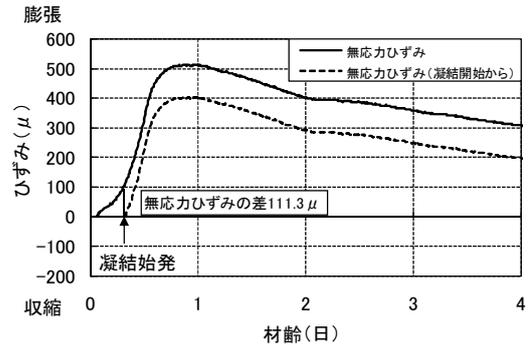


図-8 No.1 供試体の無応力ひずみ

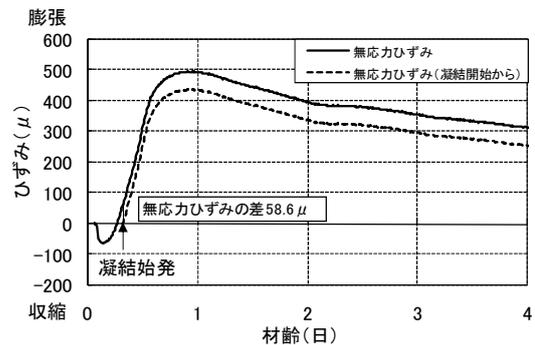


図-9 No.2 供試体の無応力ひずみ

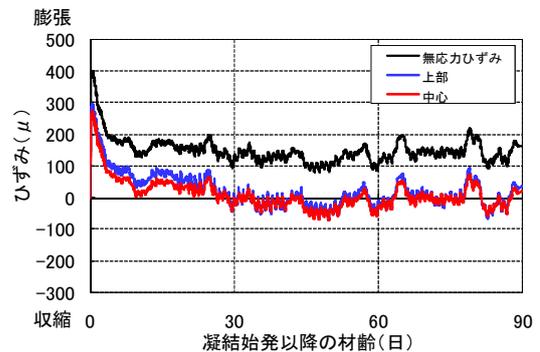


図-10 No.1 供試体のひずみ

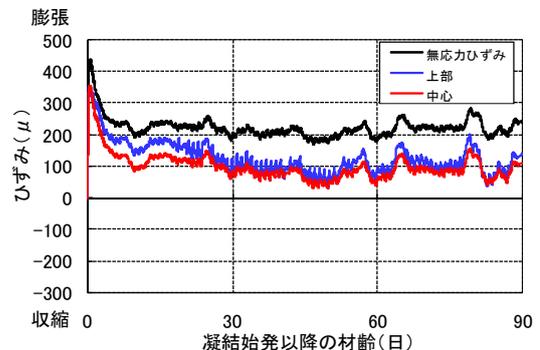


図-11 No.2 供試体のひずみ

図-10および図-11で無応力ひずみを比較した場合50μ程度の差が認められる。この差は、凝結始発前に生じたひずみ差の影響がそのまま残ったものと考えられる。

No.1 および No.2, No.3 の無応力ひずみおよび実ひずみの差を図-13 に示す。

普通ポルトランドセメントを用いた膨張コンクリートの見かけの膨張ひずみの最大値（自由膨張ひずみの実際上取り扱い可能なモデル的数値相当）は、温度条件および鋼材比を変化させた一軸拘束試験結果を用いて、式(1)の通り算定できるとされている⁷⁾。

$$\epsilon_{fa\infty}(T) = 262 \times \exp(0.03T) \quad (1)$$

ここに、 $\epsilon_{fa\infty}(T)$: 見かけの膨張ひずみの最大値 ($\times 10^{-6}$),

T: 温度 ($^{\circ}\text{C}$)

No.2 および No.3 の平均養生温度は図-7 の通り 10°C 程度であり、この場合の $\epsilon_{fa\infty}$ は式(1)より 353μ と計算される。この値は、図-13 の No.2 および No.3 の無応力ひずみの差分 (350μ 程度) で示される膨張材単味の自由膨張ひずみとよく一致する。一方、No.1 および No.3 の無応力ひずみの差分 (270μ 程度) と計算値は一致していない。このことは、凝結始発時の No.1 の無応力ひずみ 113μ をひずみゼロの基点としているが、これを No.2 と同様に 59μ 計測した時点として取り扱うのが妥当である可能性を示唆している。

別途 JISA6202 付属書に準じて一軸拘束膨張ひずみを試験した結果は材齢 7 日以降 180μ 程度であった。これらのことから一軸拘束膨張試験と同等の鋼材比 ($p=1.0\%$ 相当) で拘束した場合の拘束度 R3 は、前述の膨張材の自由膨張ひずみとの比を使用して次のとおり算定できる。No.1 の無応力ひずみが妥当な場合 $1-180/270=0.33$ 程度で、No.2 無応力ひずみが妥当な場合 $1-180/350=0.49$ 程度と算定できる。

一方、本実験における鉄筋の拘束度 R3 は表-3 から分かる通り式(2)で算定できる。

$$R3 = (\text{No.2 の実ひずみ} - \text{No.1 の実ひずみ}) / (\text{No.2 の無応力ひずみ}) \quad (2)$$

ここで、No.1 の実ひずみは、凝結始発時に変えて No.2 と同様に 59μ を計測した時点を基点とした場合についても整理し、この値による鉄筋の拘束度 R3 も求めた。凝結始発時を基点として R3 を求めた結果を図-14、 59μ を基点として R3 を求めた結果を図-15 に示す。

長期の拘束度は図-14 では $0.4 \sim 0.5$ 程度、図-15 では $0.2 \sim 0.3$ 程度となった。今回の鉄筋比は $p=0.58\%$ 程度であり $p=1.0\%$ 相当の拘束膨張試験から求めた拘束度よりも小さくなると考えられる。前段で No.1 の無応力ひずみを妥当とした場合（鉄筋比 $p=1.0\%$ 相当）の拘束度は 0.33 で、これは図-14 で算定された鉄筋比 $p=0.58\%$ 程度における拘束度 $0.4 \sim 0.5$ よりも小さいことから、図-14 は矛盾している。このような事からここでは、図-15 の妥当性が図-14 よりも高いと考えられた。

自由膨張ひずみにおける妥当性の検証と共に、鉄筋拘

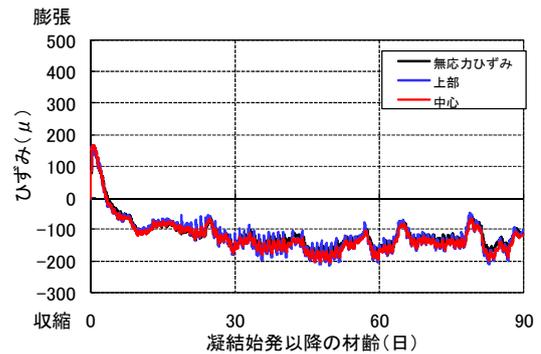


図-12 No.3 供試体のひずみ

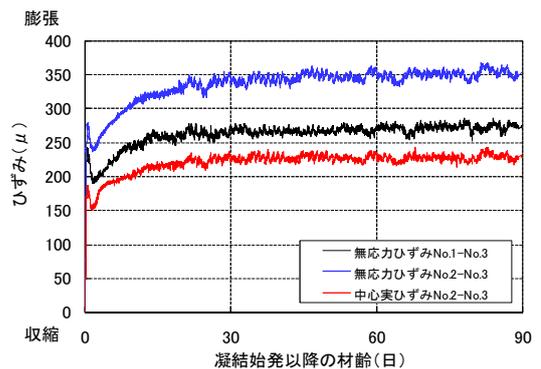


図-13 ひずみの差分

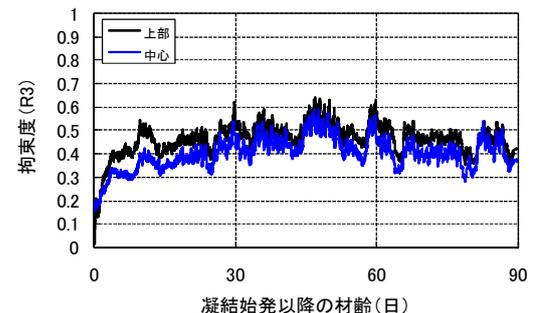


図-14 凝結始発時を基点として求めた R3

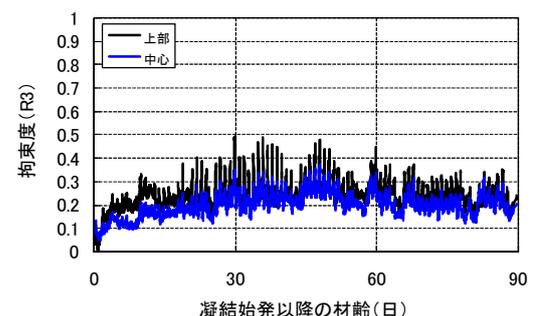


図-15 59μ 計測時を基点として求めた R3

束度の検討結果からも、No.1 のひずみゼロの基点は、No.2 と同様に 59μ を計測した時点とした場合の妥当性が高くなった。

これらのことは、プロクター貫入抵抗値で規定される凝結始発時を一様にひずみゼロの基点とするのではなく、材齢初期にひずみ計で感知可能なある一定値（今回は 59μ ）をひずみゼロの基点とすることで現実的な計測

が可能となることを示唆している。図-16⁸⁾は、セメント水和生成物と膨張材反応生成物とが接する臨界水和点（図中左下）を凝結始発時と設定し、これ以降（図中右下）膨張材の膨張ひずみが応力的に機能するとした模式図である。本件の場合は、この臨界水和点のひずみが60 μ 程度と捉えられたのではないかと考える。このひずみの絶対値が一般的にどの程度であるかは、ひずみ計の剛性や検出限界値、計測するコンクリートの粘性や剛性の組合せなど、今後検討の余地がある。しかしながら、材齢初期にひずみ計で感知可能なある一定値は、ひずみ計とコンクリートの一体化した時点やヤング係数の現実的発現時点を捉えることが出来ていると考えれば、現場の状況で様々に変化する膨張コンクリートの膨張材の作用開始時点の指標として期待できると考える。

また No.1 のみ凝結始発時までには大きなひずみが生じた理由としては、膨張材のひずみ発現速度の相違、鉄筋の影響、等が考えられるが定かではない。

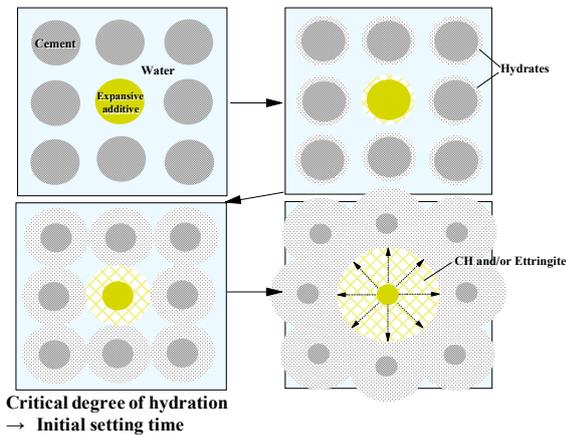


図-16 凝結・硬化の模式図⁹⁾

No.2 および No.3 の実ひずみの差分は前述した通り型枠支保工による拘束 R1 および内部拘束 R2 の影響を受けた膨張材単味のひずみと考えられる。No.2 および No.3 の実ひずみ差と無応力ひずみ差との比から、この R1 および R2 を合わせた拘束度は $1-240/350=0.35$ 程度と推定できる。

4. まとめ

現場計測によって、膨張材のひび割れ制御効果を明らかにするための検討を行った。本検討範囲では、以下の通りであった。

- (1) 熱電対の誤差や凝結始発前の温度ひずみは無視してもひび割れ制御効果の評価に大きな影響はない。
- (2) 埋設型ひずみ計の誤差は無視してもひび割れ制御効果の評価に大きな影響はない。
- (3) 膨張材単味の自由膨張ひずみ最大値は、応力解析を行うために近年提示されているみかけの膨張ひずみ

の最大値と合致した。

- (4) 埋設型ひずみ計で材齢初期に感知可能なある一定値は膨張材の膨張作用開始時点の指標として期待できる。
- (5) 鉄筋による拘束度は0.2~0.3程度であった。
- (6) 型枠支保工、内部拘束による拘束度は0.35程度であった。

これらの知見は今後、実橋梁での計測時に自由膨張ひずみの発現がどの程度であり、また桁がどの程度膨張ひずみを拘束するか、型枠支保工や鉄筋の拘束と分離するため等の基礎データとなり、箱桁橋床板等拘束が比較的小さいと考えられる部材への膨張材の適用範囲の検討に寄与する。

膨張材のひび割れ制御効果を現場でより精度よく明確に把握するために、膨張ひずみが応力的、実務的に作用開始する時点におけるひずみ計の挙動を明確にすることが課題である。

5. 謝辞

中日本高速道路株式会社の和崎氏、秋山氏には実験用地の提供を含め実験のご指導協力を頂き、計測結果のデータ整理にあたって太平洋マテリアル(株)の立川氏、竹下氏にご協力頂いた。ここに記して深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 辻 幸和, 佐久間隆司, 保利彰宏: 高性能膨張コンクリート, 技報堂出版, pp.7-10, 2008.11
- 2) 藤田数正ほか: 埋設型ひずみ計による若材齢コンクリートのひずみ測定手法に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.597-602, 2007
- 3) 高瀬和男ほか: 構造物中のコンクリートの応力測定に関する再検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.615-620, 2007
- 4) 日本コンクリート工学協会: コンクリートの自己収縮研究委員会報告書, pp.1-7, 2002.9
- 5) 土木学会: 2007 年度制定コンクリート標準示方書【設計編: 標準】, pp.340-342, 2008.3
- 6) 名倉健二ほか: 設計基準強度 600kgf/cm² の高流動コンクリートの施工性実験, 第2回超流動コンクリートシンポジウム論文報告集, pp.187-192, 1994.5
- 7) 兵頭彦次ほか: 高炉セメントを用いた膨張コンクリートの応力算定法, 太平洋セメント研究報告, 第151号, pp.13-24, 2006
- 8) 日本コンクリート工学協会: 膨張コンクリートによる構造物の高機能化/高耐久化に関するシンポジウム委員会報告書, pp.9-24, 2003