

論文 軽量型枠を用いた膨張コンクリートの拘束膨張試験による品質管理

辻埜 真人^{*1}・橋田 浩^{*2}・湯浅 竜貴^{*3}・菊地 俊文^{*4}

要旨：ぶりき製軽量型枠を用いた膨張コンクリートの拘束膨張試験において周囲の温度条件がひずみに与える影響を調査した。一定の温度環境下で養生した場合、温度が高いほど膨張速度は速く、本論文の調査では、軽量型枠における最大膨張ひずみは、 $30^{\circ}\text{C} > 20^{\circ}\text{C} = 10^{\circ}\text{C} > 5^{\circ}\text{C}$ の順になる。また、温度変化が生じる環境下では、コンクリートの線膨張係数に近い補償線膨張係数のひずみゲージを選定することやコンクリート温度による補正を行うことで、膨張コンクリートの初期膨張ひずみをより正確に測定することが可能であり、実構造物に使用された膨張コンクリートの初期膨張性能を把握するための品質管理に利用できることを示した。

キーワード：膨張材、膨張コンクリート、拘束膨張試験、ひび割れ、乾燥収縮、軽量型枠

1. はじめに

コンクリートの収縮に起因するひび割れ問題に関して様々な検討がなされ¹⁾、膨張材の利用が進んでいる。膨張材を利用したコンクリートの初期膨張量に関しては、JIS A 6202 附属書 2 の拘束膨張試験方法が規格化されているが、簡便な方法とは言えず、材料開発や試験練りなどの限られた評価の時に利用されるにとどまっている。つまり、実構造物に使用された膨張コンクリートの初期膨張性能を評価する試験方法が求められている。そこで、閑田らは JIS 法の拘束器具にひずみゲージを貼り付けた方法を提案し、膨張ひずみの工事用管理試験として有用であることを示している²⁾。一方、筆者らは図-1に示すように、コンクリートの強度試験用に利用されているφ100×200 (mm) のブリキ製の軽量型枠の中央部にひずみゲージ (ゲージ長 10mm, 自己温度補償型) をエポキシ樹脂接着剤 (常温硬化後、70℃環境下でキュアリング) で円周方向に貼り付け、型枠のひずみを測定することで膨張性能を評価する試験方法 (以下、軽量型枠法) を開発している^{3), 4)}。軽量型枠法では、封かん養生した膨張コンクリートの拘束膨張ひずみを容易に測定でき、薄肉円筒モデル⁴⁾を利用することで、ひずみと内部膨張圧の関係も把握できる。さらに、JIS A 法とのひずみ¹⁾や仕事量の関係性⁵⁾についても明らかにされている。また、膨張ひずみを測定した供試体を強度試験へ転用できるところも特長の一つである。

本論文では、現場で軽量型枠法が適用されることを想定し、周囲の温度条件が軽量型枠法のひずみに与える影響を明らかにし、実構造物に使用された膨張コンクリートの膨張ひずみを正確に測定するための方法の確立を目的として検討を行った。最後には、実現場において軽量型枠法を適用した事例について述べる。

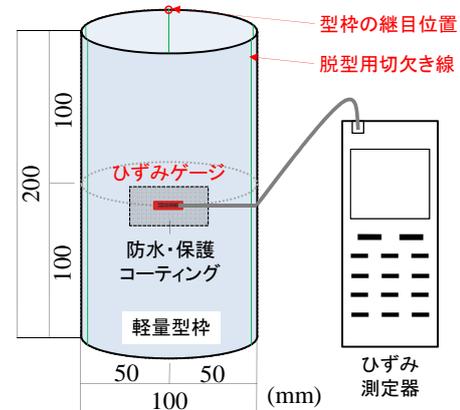


図-1 軽量型枠法の概要

2. 様々な一定温度環境下でのひずみ挙動

2.1 概要

膨張コンクリートの拘束膨張特性に及ぼす温度の影響に関する研究は非常に多くなされてきた^{例えは6), 7)}。近年では、封かん養生での養生温度ごとに拘束鋼材比を変化させた場合の膨張ひずみの特性が明らかにされており、拘束膨張ひずみは自由膨張ひずみと比較して、相対的に養生温度の影響が小さいことが示されている⁸⁾。しかし、このような 20℃環境下以外での封かん養生での拘束膨張試験の結果は少なく、軽量型枠法のひずみ挙動を把握する上でも明らかにする必要があるといえる。また、軽量型枠法は膨張コンクリートのポテンシャルを評価している JIS A 6202 附属書 2 の A 法とは異なり、実部材でも生じる自己収縮を包含した形での膨張性状を評価していることから、実構造物における膨張効果を評価する上で、様々な温度環境下でのひずみ挙動を把握することは重要であると考えられる。

*1 清水建設 (株) 技術研究所 生産技術センター 博士(工学) (正会員)

*2 清水建設 (株) 技術研究所 生産技術センター 所長 博士(工学) (正会員)

*3 清水建設 (株) 技術研究所 生産技術センター

*4 清水建設 (株) 技術研究所 生産技術センター 工修 (正会員)

2.2 実験種類およびコンクリートの調合

養生温度を5℃、10℃および20℃に設定し、硬質砂岩碎石を使用したコンクリート（記号：S）と養生温度を30℃および20℃に設定し、石灰碎石を使用したコンクリート（記号：L）の合計5種類とした。水結合材比については50%とし、膨張材はエトリンガイトー石灰複合系を使用して、混入量は標準使用量の20kg/m³とした。使用材料を表-1に、コンクリートの調合とフレッシュ性状の結果を表-2に示す。また、表-3に各圧縮強度試験の結果を示す。硬質砂岩碎石を使用したコンクリートの試験については、練り上がり温度が10℃程度となるように調整し、試験体を作製後、所定の養生温度に設定した恒温槽に静置して、測定を行った。一方、石灰碎石を使用したコンクリートを使用した試験については、練り上がり温度が30℃程度となるように調整し、所定の養生温度に設定した恒温槽に静置して、測定を行った。なお、膨張材を混入しない普通コンクリート（S-NおよびL-N）については、養生条件を20℃環境下のみとした。

2.3 結果および考察

低温環境下における打込み直後からの材齢とひずみの関係を図-2に示す。なお、各記号の数字は養生温度を示す。20℃環境下の水準は材齢7日まで、10℃環境下については材齢10日までに最大膨張ひずみを確認したために計測を終了した。一方、30℃環境下での結果を図-3に示す。30℃環境下についても、材齢7日までに最大膨張ひずみを確認したために計測を終了した。

膨張材を混入していないS-N-20については、材齢1日までに小さな膨張ピークが観察された。これは、コンクリート温度が練り上がりの10℃から20℃の恒温槽で養生されたことおよび水和反応に伴って温度上昇し、膨張したことに起因していると考えられる。その後は自己収縮の影響とみられる収縮ひずみが70μ程度生じている。一方のL-N-20については、練り上がりの31℃から20℃の恒温槽で養生されたことによる温度低下によって収縮ひずみが生じた後に、自己収縮とみられる収縮ひずみが30μ程度確認された。練り上がり温度は異なるが、石灰石骨材を使用したコンクリートの自己収縮が小さくなる既往の報告⁹⁾と同様の結果といえる。S-CSA-20が膨

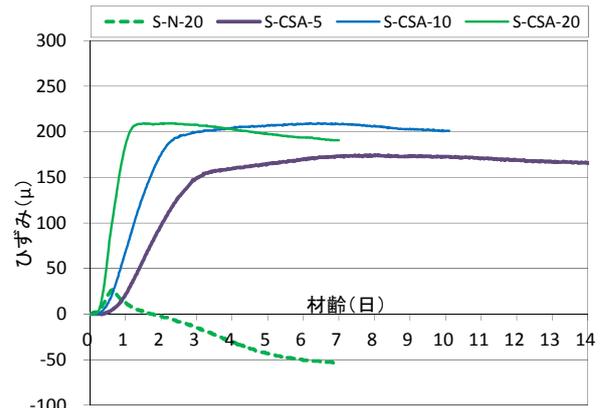


図-2 低温環境下におけるひずみ

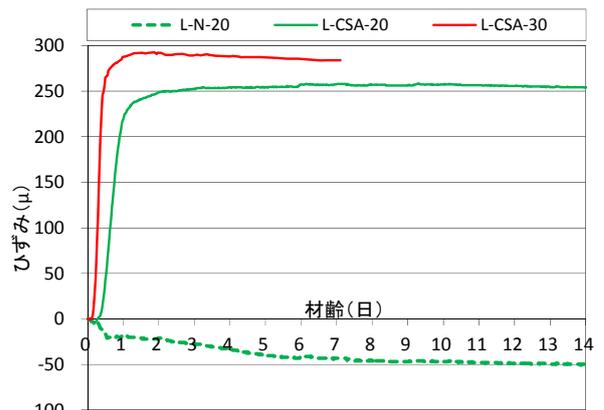


図-3 30℃環境下におけるひずみ

表-1 使用材料

材料	仕様
セメント	普通ポルトランドセメント:密度(3.16g/cm ³)
細骨材	S1・山砂:表乾密度(2.62g/cm ³), 吸水率(1.68%), F.M.(2.62)
	S2・山砂:表乾密度(2.59g/cm ³), 吸水率(2.35%), F.M.(2.18)
	S3・石灰砕砂:表乾密度(2.67g/cm ³), 吸水率(0.83%), F.M.(3.51)
粗骨材	G1・硬質砂岩碎石:表乾密度(2.65g/cm ³), 吸水率(0.63%), Gmax=20mm, F.M.(6.56)
	G2・石灰砕石:表乾密度(2.70g/cm ³), 吸水率(0.96%), Gmax=20mm, F.M.(6.61)
混和材	膨張材:複合系, 密度:3.05(g/cm ³), 標準使用量:20(kg/m ³)
化学混和剤	AE減水剤:リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体
	AE剤:高アルキルカルボン酸系 空気量調整剤:ポリアルキレングリコール誘導体

表-3 圧縮強度試験結果

記号	28日圧縮強度(N/mm ²)				
	20℃ 水中養生	5℃ 封緘養生	10℃ 封緘養生	20℃ 封緘養生	30℃ 封緘養生
S-N	45.5	34.1	38.9	43.9	-
S-CSA	42.0	35.1	37.6	41.0	-
L-N	44.6	-	-	41.3	39.7
L-CSA	43.2	-	-	40.3	39.2

表-2 コンクリートの調合とフレッシュ性状

記号	水結合材比(%)	細骨材率(%)	単位量(kg/m ³)								化学混和剤	フレッシュ性状		
			水	セメント	膨張材	細骨材(S1)	細骨材(S2)	細骨材(S3)	粗骨材(G1)	粗骨材(G2)		スランプ(cm)	空気量(%)	温度(℃)
S-N	50	47.5	170	340	-	843	-	-	942	-	AE減水剤 B×0.9%	21.0	3.7	8.9
S-CSA	50	47.5	170	320	20	843	-	-	942	-	AE減水剤 B×0.9%	19.5	4.4	11.3
L-N	50	45.5	165	330	-	-	258	602	-	972	AE減水剤 B×0.75%	20.0	4.5	31.0
L-CSA	50	45.5	165	310	20	-	258	602	-	972	AE減水剤 B×0.75%	19.5	3.4	30.0

張ピークから収縮しているのに対して、L-CSA-20 が収縮していない点も骨材の影響と考えられる。

次に、S-CSA-20 は、材齢 1 日程度で膨張ひずみのピークがあり、その後は緩やかに収縮している。S-CSA-10 については、20℃環境下に比べて、膨張速度が遅く、材齢 2 日にかけて膨張が進み、最大膨張ひずみは材齢 6 日に確認できた。膨張ひずみは 200μ 程度であり、S-CSA-20 とほぼ同等であった。S-CSA-5 は、さらに膨張速度が遅く、材齢 3 日にかけて膨張が進み、最大膨張ひずみは材齢 7 日に確認できた。養生温度が 5℃の膨張ひずみが小さくなった原因は、既往の研究¹⁰⁾で示されているようにエトリンガイトの生成量が少なくなったことが考えられる。これまでの 20℃環境下の検討では、材齢 7 日までの膨張ひずみで評価することが多かったが、低温環境下で最大膨張ひずみを確認するためには、材齢 7 日以降も計測を延長する必要がある。

L-CSA-30 は最も膨張速度が速く、材齢 0.5 日の段階でほぼ膨張ピークをむかえており、L-CSA-20 に比べて最大膨張ひずみも大きくなった。20℃環境下で最大膨張ひずみが生じる既往の研究¹¹⁾とは異なる結果であり、軽量型枠法における拘束状況の違いや水中養生と封かん養生の違いによる影響と考えられる。今後、更なるデータの蓄積によって分析を進める必要があるといえる。

3. 温度変化が生じる環境下でのひずみ挙動

3.1 概要

軽量型枠法によって実構造物に使用された膨張コンクリートの初期膨張性能を品質管理する際にはコンクリートの受入れ検査と同時に実施することを想定しており、養生期間中は外部環境で保管されることになる。よって、コンクリートが打ちこまれた状態における軽量型枠の線膨張係数とひずみゲージの補償線膨張係数が異なることから、気温変化によりひずみは変動し、正確な測定値として評価するためには、温度変化による補正を行う必要があると考えられる。

3.2 実験種類およびコンクリートの調合

コンクリートの線膨張係数は一般的に 10.0μ/℃程度であるが、石灰石骨材を使用した場合には小さくなることが知られている。そこで、粗骨材種類を変更することによって線膨張係数を変化させた 2 種類のコンクリートにおいて、温度変化が生じる環境下での軽量型枠法のひず

みを調査した。一方、軟鋼に一般的に使用される補償線膨張係数 11.8μ/℃とガラスや特殊金属に使用される 8.1μ/℃の 2 種類のひずみゲージを用いた場合の温度変化による影響も調査した。試験種類は、コンクリート種類とひずみゲージの組み合わせで合計 4 種類とした。コンクリートに使用した材料は、前章に示した通りである。なお、水結合材比については、後述する実現場での適用を鑑みて前章より 5%小さく 45%とした。膨張材はエトリンガイト-石灰複合系を使用し、混入量は標準使用量の 20kg/m³とした。コンクリートの調合と各特性の結果を表-4 に示す。

3.3 結果および考察

温度履歴を与えた各補償線膨張係数のひずみゲージ

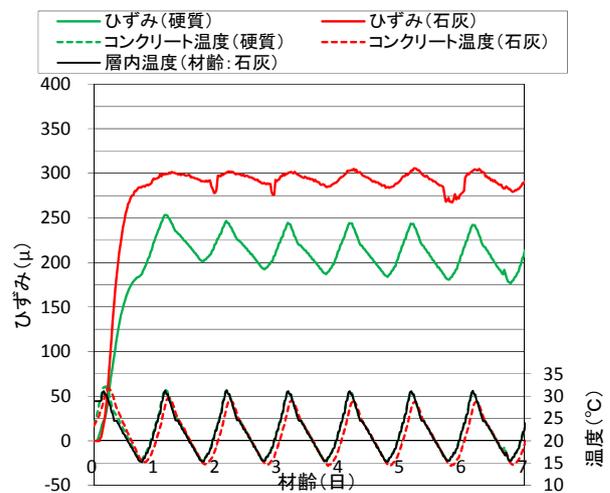


図-4 補償線膨張係数 8.1 μ/℃のひずみゲージを使用した場合のひずみ

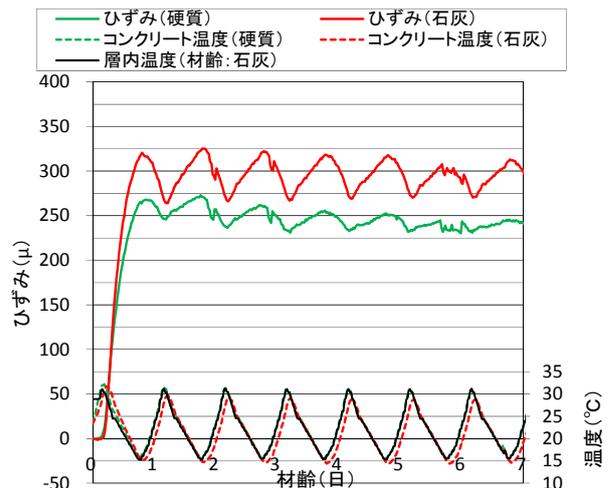


図-5 補償線膨張係数 11.8 μ/℃のひずみゲージを使用した場合のひずみ

表-4 コンクリートの調合と各特性

種類	水結合材比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)						化学混和剤	フレッシュ性状			28日圧縮強度 温度履歴封緘養生 (N/mm ²)
			水	セメント	膨張材	細骨材 (S1)	粗骨材 (G1)	粗骨材 (G2)		スランブ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	
硬質	45	48.9	175	369	20	842	889	-	AE減水剤 B×0.9%	15.5	3.7	23.5	39.5
石灰	45	48.9	175	369	20	842	-	905	AE減水剤 B×0.9%	21.0	4.5	23.4	43.1

を使用した場合の実験結果を図-4および図-5に示す。石灰砕石コンクリートの場合には、ひずみゲージの補償線膨張係数が $8.1\mu/\text{C}$ の時に温度変化に対する変動が小さくなり、一方の硬質砂岩砕石コンクリートの場合には、ひずみゲージの補償線膨張係数が $11.8\mu/\text{C}$ の時に温度変化に対する変動が小さくなった。これは、コンクリートの剛性がぶりき製型枠に比べて十分大きく、コンクリートの線膨張係数とひずみゲージの補償線膨張係数がそれぞれ近いことに起因している。軟鋼には、一般的に $11.8\mu/\text{C}$ の補償線膨張係数のひずみゲージが使用されるが、コンクリートの種類によって、適切な補償線膨張係数のひずみゲージを選定することで、温度変化によるひずみの変動を小さくでき、より正確な評価ができることを意味している。

次に、一般的に使用される $11.8\mu/\text{C}$ の補償線膨張係数を有するひずみゲージを用いた場合に、コンクリート温度を利用して、式(1)から補正ひずみを算出した結果を図-6に示す。なお、それぞれのコンクリートの線膨張係数は、材齢2日から3日にかけての温度変化とひずみ変化の関係から求め、硬質砂岩砕石コンクリートは $10.0\mu/\text{C}$ であり、石灰砕石コンクリートは $8.5\mu/\text{C}$ であった。図-4や図-5に示した結果と比較すると、気温変化によるひずみの変動を小さくでき、式(1)による評価が妥当であると判断できる。

$$\varepsilon'(t) = \varepsilon(t) - (TEc - TESg) \cdot (T(t) - T(0)) \quad (1)$$

ここに、
 $\varepsilon'(t)$: 材齢 t 日における補正ひずみ
 $\varepsilon(t)$: 材齢 t 日における測定ひずみ
 TEc : コンクリートの線膨張係数
 $TESg$: ひずみゲージの補償線膨張係数
 $T(t)$: 材齢 t 日におけるコンクリート温度
 または気温
 $T(0)$: 材齢 0 日におけるコンクリート温度
 または気温

実現場での適用を鑑みた場合、コンクリート温度を測定することは、熱電対の埋め込みによって圧縮強度用の供試体として利用できないデメリットもあることから、気温変化に対する補正が次善の策となる。そこで、気温変化に対する補正を検討した。

気温(槽内温度)を利用して、式(1)から補正ひずみを算出した結果を図-7に示す。図-6に示したコンクリート温度による補正と比較するとひずみの変動は大きくなっている。これは、コンクリートに熱伝導する時間だけ、温度にタイムラグが生じていることが原因と考えられる。ただし、補正を行わない図-4および図-5に示した結果と比較すると、温度変化によるひずみの変動

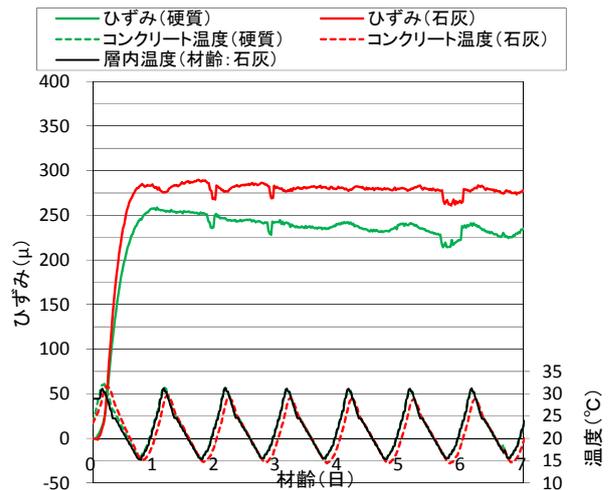


図-6 コンクリート温度で補正したひずみ
(補償線膨張係数 $11.8\mu/\text{C}$ のひずみゲージを使用)

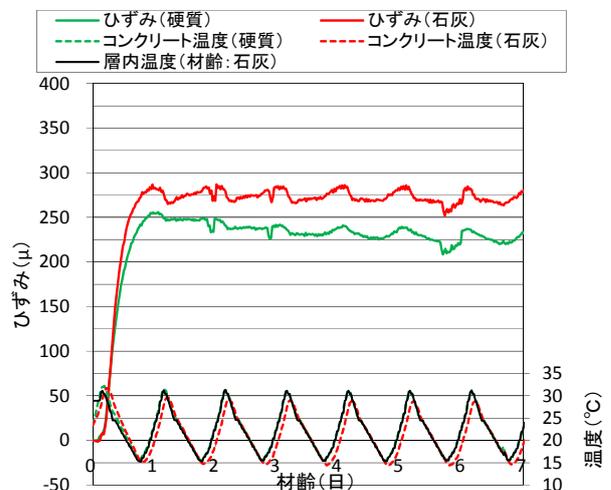


図-7 気温=槽内温度で補正したひずみ
(補償線膨張係数 $11.8\mu/\text{C}$ のひずみゲージを使用)

を小さくできており、気温を用いた式(1)による評価も有効であると判断できる。よって、ひずみ測定時の温度を用いてひずみを補正することで、膨張量をより正確に評価することが可能である。なお、材齢0日における温度と同程度の温度の時にひずみを測定すれば、気温変化による影響を小さくすることが可能で、より正確なひずみを測定できる。

4. 軽量型枠法の実現場への適用

4.1 概要

実構造物へ使用された膨張コンクリートの初期膨張性能を把握するために、実現場において軽量型枠法を適用した。各現場で測定したひずみ挙動を示し、軽量型枠法による膨張コンクリートの品質管理への適用可能性を明らかにする。

4.2 測定概要

本論文では、3つの異なる現場で連続測定した結果を示す。各現場の概要を表-5に示す。A-1は気温が高く、

日中の気温変化も比較的大きい夏期である。一方の A-2 は気温変化の小さい場合である。次に、B は平均気温が 20℃程度の中間に相当する場合の測定結果である。なお、A および B はともに石灰系の膨張材を使用している。そして C-1 と C-2 は、同一現場で 7 日間の平均気温に大きな差はないが、初期材齢の気温が 20℃程度と 10℃程度と異なる場合の測定結果である。なお、膨張材は、エトリンガイトー石灰複合系を使用している。粗骨材は全ての現場で石灰砕石が使用されており、コンクリートの線膨張係数は $8.5\mu/\text{℃}$ とした。また、使用したひずみゲージの補償線膨張係数は $11.8\mu/\text{℃}$ であり、測定場所は現場内の外部環境下である。

4.3 結果および考察

それぞれの結果を図-8 から図-12 に示す。図中には、①測定ひずみ、②コンクリート温度を利用して、式(1)から算出した補正ひずみと③気温を利用した補正ひずみの結果を示している。なお、B および C の現場では、コンクリート温度は計測していない。

A-1 のような気温変化の大きい場合には、温度補正することでひずみの変動が抑えられている。一方、気温変

表-5 各現場の概要

名称	時期	平均気温 (°C)	W/B (%)	膨張材種類	膨張材混入量	粗骨材種類	線膨張係数 ($\mu/\text{℃}$)
A-1	8月	26.7	44.5	石灰系	標準 使用量 20kg/m ³	石灰	8.5
A-2	11月	14.4					
B	9月	20.7					
C-1	10月	16.7	41.5	複合系			
C-2	10月	15.0					

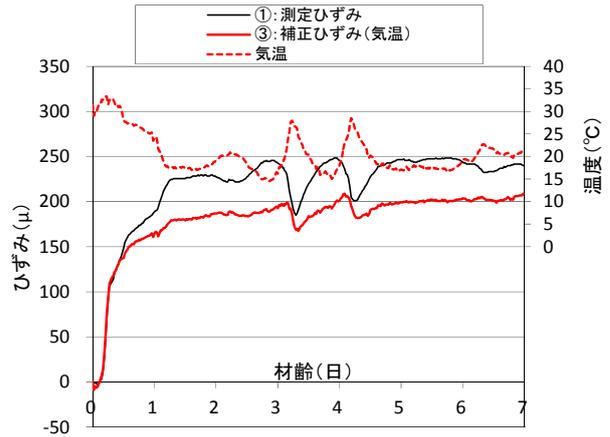


図-10 Bでの測定結果

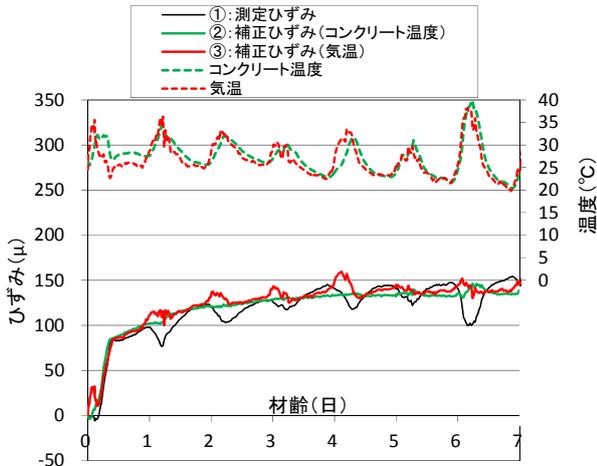


図-8 A-1での測定結果

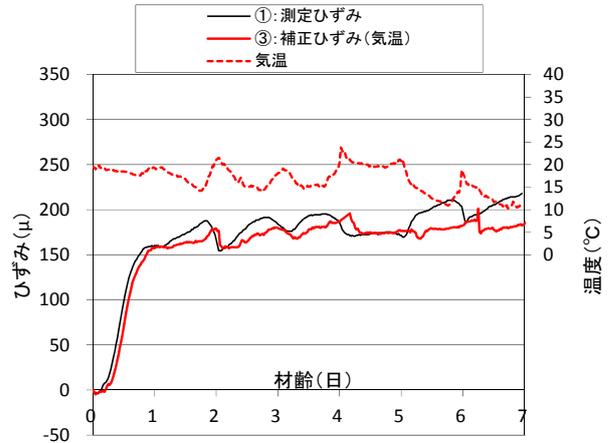


図-11 C-1での測定結果

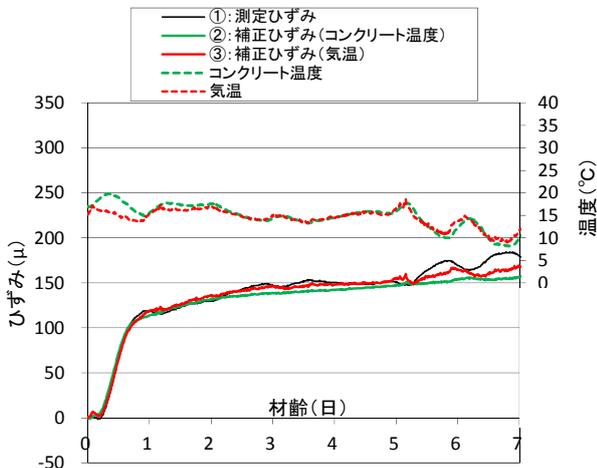


図-9 A-2での測定結果

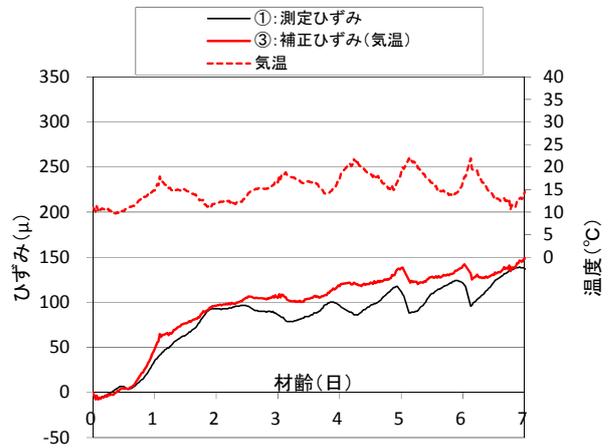


図-12 C-2での測定結果

化の小さい A-2 の場合には、補正ひずみを算出しなくても、比較的精度良く評価できるが、温度による補正を行うことで、より精度よく膨張ひずみを評価することが可能であるといえ、実際の現場においても式(1)による評価は有効であるといえる。同様に B のように測定開始時と材齢 7 日の時点や日中間の気温に大きな差がある場合でも、補正することによってより正確な膨張ひずみを得ることができる。膨張ひずみについては、B、C-1 や C-2 からわかるように、初期材齢の気温が与える影響は大きく、気温が 30℃を超える B ではごく初期に膨張ひずみが生じ、一方、気温が 10℃程度の C-2 は膨張ひずみの発現が比較的ゆっくりとしており、最大膨張ひずみは材齢 7 日以降になっていると考えられる。以上の結果から、軽量型枠法によって、実構造物に使用された膨張コンクリートの初期膨張性能を把握することは可能で、品質管理に利用できると考えられるが、更なる結果の蓄積が必要であるといえる。

5. まとめ

ぶき製軽量型枠を用いた膨張コンクリートの拘束膨張試験において周囲の温度条件がひずみに与える影響や構造物に使用された膨張コンクリートの膨張ひずみをより正確に測定するための検討を行った。得られた知見を以下に示す。

- (1) 一定の温度環境下で養生した場合、温度が高いほど膨張速度は速く、本論文の調査では、軽量型枠法における最大膨張ひずみは、 $30^{\circ}\text{C} > 20^{\circ}\text{C} = 10^{\circ}\text{C} > 5^{\circ}\text{C}$ の順になる。
- (2) コンクリートの種類によって、最適な補償線膨脹係数のひずみゲージを選定することで、気温変化によるひずみの変動を小さくでき、より正確な膨張ひずみの評価ができる。
- (3) ひずみ測定時のコンクリート温度を用いてひずみを補正することで、より正確な膨張ひずみを得ることができる。
- (4) 材齢 0 日における温度と同程度の温度の時にひずみを測定すれば、より正確なひずみを測定できる。
- (5) 軽量型枠法は、外部環境下においても実構造物に使用された膨張コンクリートの初期膨張性能を把握することが可能で、品質管理に利用できる。

参考文献

- 1) 「高性能膨張コンクリートの性能評価とひび割れ制御システム」に関するシンポジウム：(社)日本コンクリート工学協会，2011.9
- 2) 閑田徹志，百瀬晴基，保利彰宏：施工時における膨張コンクリートの膨張性試験方法の提案，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.579-584，2007
- 3) 辻埜真人，橋田浩，菊地俊文，田中博一：膨張材と石灰石骨材を併用した低収縮コンクリートに関する検討（その 2 膨張コンクリートの品質管理方法），日本建築学会学術講演梗概集 A-1，pp.925-926，2010
- 4) 辻埜真人，橋田浩，湯浅竜貴，高橋圭一：膨張コンクリートの簡易拘束膨張試験方法，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.437-442，2011
- 5) 半井健一郎，栗原勇典，橋田浩，辻埜真人：鋼製軽量モールドを用いた膨張コンクリートの簡易性能評価に関する仕事量一定則からの考察，第 65 回セメント技術大会講演要旨，pp.150-151，2011
- 6) 長瀧重義，米山紘一，飯田一彦：化学的プレストレスの導入に関する基礎研究，セメント技術年報，XXII，pp.457-461，1968
- 7) 岡村甫，古沢孝男，辻幸和：膨張コンクリートの膨張性状に及ぼす温度の影響，第 1 回コンクリート工学年次講演会講演論文集，pp.82-92，1979
- 8) 鶴田昌宏，谷村充，三谷裕二，佐久間隆司，佐竹紳也：種々の温度下で養生した膨張コンクリートの膨張特性，土木学会第 58 回年次学術講演会，pp.339-340，2003
- 9) 城国省二，石田聡，土屋豊，北條泰秀：低熱ポルトランドセメントに石灰石骨材を用いたコンクリートの性状，土木学会第 54 回年次学術講演会，pp.106-107，1999
- 10) 戸川一夫，中本純次，中野錦一：膨張コンクリートの拘束膨張特性におよぼす温度の影響，セメント技術年報，Vol.35，pp.277-281，1981
- 11) 辻幸和，横田紀男，鈴木康範，森本宏：膨張コンクリートの強度および膨張性状に及ぼす養生温度の影響，第 3 回コンクリート工学年次講演会講演論文集，pp.5-8，1981