

軽量型枠法による膨張コンクリートの品質管理

辻埜 真人 橋田 浩 湯浅 竜貴 菊地 俊文
(技術研究所) (技術研究所) (技術研究所) (技術研究所)

Quality control of expansive concrete using a thin cylindrical steel mold

by Masato Tsujino, Hiroshi Hashida, Ryuki Yuasa and Toshifumi Kikuchi

Abstract

Expansive additive is increasingly being used to reduce the cracking that results when concrete shrinks. Although appendix 2 of JIS A 6202 specifies a method for evaluating the restrained expansion of concrete mixed with an expansive additive, this method is not simple and is used only for limited evaluations. A new method was required for controlling the quality of the expansion effect in concrete mixed with an expansive additive and used for actual structures. We developed a simple restrained expansion test method that applies the thin cylindrical steel mold used for the compressive strength test. This thin cylindrical steel mold method can be used to determine the amount of the initial expansion of concrete containing various amounts of an expansive additive. The amount of expansive additive added to the concrete is used to accurately determine the amount of expansion up to about 40 kg/m³. Moreover, the method is a modification of the restrained expansion in the former JIS A testing method, describes a nearly perfect proportional relationship, and clearly shows nearly equal expansion strain for materials that have been aged for seven days. Furthermore, the expansion of expansive concrete can be evaluated and the results used for quality control by selecting the optimal strain gauge according to the temperature or type of concrete.

概 要

コンクリートの収縮に起因するひび割れを抑制するために、膨張材の使用が進んでいる。膨張材を混入したコンクリート(以下、膨張コンクリート)の膨張量の評価に関しては、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、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、実構造物に使用する膨張コンクリートの膨張効果を品質管理する方法はこれまでになく、有用な方法が求められていた。そこで、圧縮強度試験に利用されている軽量鋼製型枠を用いた簡易な拘束膨張試験方法(以下、軽量型枠法)を新たに開発した。(商品名: SG モールド) 軽量型枠法は、膨張材の混入量が異なる膨張コンクリートの初期膨張量を把握することが可能であり、膨張材の標準使用量である 20kg/m³ の 2 倍にあたる 40kg/m³ 程度までの膨張性能を適正に評価することができる。また、既往の試験方法である JIS A 法の一軸拘束試験のひずみとほぼ完全な比例関係にあり、材齢 7 日の膨張ひずみはほぼ等しくなることを明らかにした。さらに、実現場への適用に関する検討を進め、コンクリートの種類により最適なひずみゲージを選定することや温度による補正を行うことで、膨張コンクリートの膨張効果を評価することが可能であり、品質管理に利用できることを示した。

§ 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、膨張材の使用が進んでいる^{1),2)}。膨張コンクリートの膨張量の評価に関しては、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、実構造物に使用する膨張コンクリートの膨張効果を品質管理する方法はこれまでになく、有用な方法が求

められていた。そこで本論文では、膨張コンクリートの膨張量を比較的容易に把握できる試験方法を提案し、理論モデルの構築、膨張材の混入量の違いによる初期膨張量および試験方法の適用範囲ならびに既往の試験方法である JIS A 6202 附属書 2 A 法の一軸拘束試験との関係を明らかにすることを目的として検討を行った。さらに、実構造物に使用する膨張コンクリートの膨張効果を確認するための品質管理に利用できるかの検討を行った。なお、本論文の開発成果として SG モールドと名付けた商品を販売開始している。

§ 2. 軽量鋼製型枠を使用した拘束膨張試験

提案する試験方法は、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ブリキ製の軽量鋼製型枠の中央部にひずみゲージを貼り付け、型枠のひずみを測定することで膨張応力を把握する方法である(以下、軽量型枠法)³⁾⁵⁾。軽量型枠法では、膨張コンクリートの膨張応力を簡便に把握できることや強度試験への転用が可能である利点があげられる。さらに、専門性や熟練度を要することなく容易に測定できることから、実現場において、構造物に使用される膨張コンクリートの膨張効果を確認するための品質管理方法に利用できると考えられる。

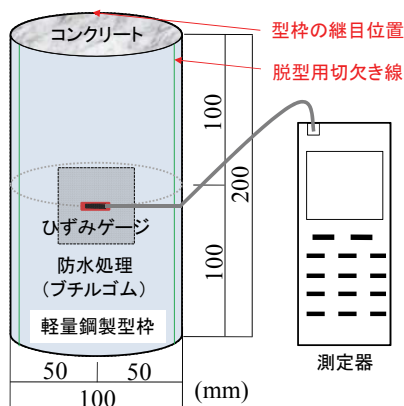


図-1 軽量型枠法の概要

§ 3. 軽量型枠法における理論モデル

3.1 薄肉円筒モデル

軽量型枠法は、内部膨張圧力を受ける薄肉円筒の問題と捉えることができる。このような円筒を利用した方法は、小林ら⁶⁾が膨張セメントの膨張圧を明らかにする際に検討しており、原田ら⁷⁾は静的破砕剤の膨張圧の把握に利用しているが、両者とも比較的厚肉の円筒を用いて検討している。図-2に示すような膨張圧を受ける薄肉円筒については、力の釣合いにより円周方向には式(1)が成り立ち、軸線方向においては式(2)が成立する。

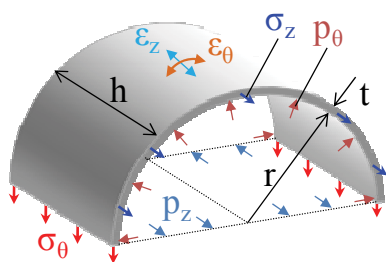


図-2 内部膨張圧を受ける薄肉円筒モデルの概要

$$2h \cdot t \cdot \sigma_{\theta} = 2r \cdot h \cdot p_{\theta} \quad \text{より} \quad \sigma_{\theta} = p_{\theta} \cdot r/t \quad (1)$$

ここに、
 h : 円筒の長さ (mm)
 t : 胴板の厚さ (mm)
 σ_{θ} : 円周方向の応力 (N/mm²)
 r : 型枠の半径 (mm)
 p_{θ} : 円周方向の圧力 (N/mm²)

$$2\pi \cdot r \cdot t \cdot \sigma_z = \pi \cdot r^2 \cdot p_z \quad \text{より} \quad \sigma_z = p_z \cdot r/2t \quad (2)$$

ここに、
 σ_z : 軸線方向の応力 (N/mm²)
 p_z : 軸線方向の圧力 (N/mm²)

次に、薄肉円筒に生じるひずみは、応力状態が σ の平面応力状態であるから、円筒材料のヤング係数とポアソン比を与えると式(3)および式(4)で示される。よって式(3)および式(4)から、各方向の膨張圧は、各方向のひずみを用いて表すと式(5)および式(6)のように表すことができる。

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{1}{E_s} (\sigma_{\theta} - \nu \cdot \sigma_z) \quad (3)$$

ここに、
 ε_{θ} : 円周方向のひずみ
 E_s : 胴板のヤング係数 (N/mm²)
 ν : 胴板のポアソン比

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E_s} (\sigma_z - \nu \cdot \sigma_{\theta}) \quad (4)$$

ここに、
 ε_z : 軸線方向のひずみ

$$p_{\theta} = \frac{E_s \cdot t (\varepsilon_{\theta} + \nu \cdot \varepsilon_z)}{r(1 - \nu^2)} \quad (5)$$

$$p_z = \frac{2E_s \cdot t (\nu \cdot \varepsilon_{\theta} + \varepsilon_z)}{r(1 - \nu^2)} \quad (6)$$

3.2 理論検証実験

3.2.1 実験方法

軽量鋼製型枠を密閉し、空気圧を与えることで、膨張圧力とひずみの関係を明らかにする。実験は図-3に示すような状況で実施した。利用した軽量鋼製型枠

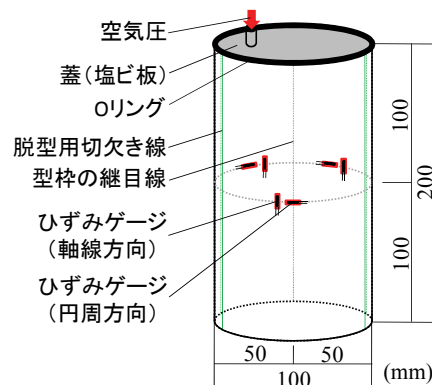


図-3 軽量鋼製型枠における測定位置

は、 $\phi 100 \times 200(\text{mm})$ であり、**図-3**に示すような位置に5mmの長さのゲージを貼り付けてひずみを測定した。一方、空気圧は、コンプレッサーから圧力計を経由し、軽量鋼製型枠にかかるような状態とした。

3.2.2 軽量鋼製型枠の胴板の機械的性質

膨張圧力とひずみの関係を検討するに先立ち、軽量鋼製型枠の胴板の機械的性質を調査した。試験片は、円筒に加工する前の平板を使用した。引張試験片は、JIS Z 2201の13B号に準拠する形状に加工し、引張試験はJIS Z 2241に従って、3体実施した。各試験体の応力-ひずみ曲線を**図-4**に示す。胴板には明確な降伏点はなく、線形性が保持できるひずみは700 μ 程度であることが明らかになった。各性質を表-1に示す。

3.2.3 理論値と実験値の関係

円周および軸線方向の平均ひずみを式(5)に代入して算出した理論圧力と圧力計によって得た実験値の結果を**図-5**に示す。0.12N/mm²程度において、軽量鋼製型枠の底面に変形が生じ、その後は実験値に比べてやや小さい傾向にあるが、ひずみから算出した理論圧力は、ほぼ同等であると判断できる。つまり、 $\phi 100 \times 200(\text{mm})$ の軽量鋼製型枠において、薄肉円筒モデルが成立することが示された。

§ 4. ゲージ長の違いによる測定誤差

4.1 概要

コンクリートには、一般的に最大径20mmの粗骨材が使われることや型枠表面に脱泡できずに生じる空気泡により、微小な表面部分は必ずしも均一な応力状態にならない可能性がある。そこで、軽量型枠法をコンクリートへ適用する場合のゲージ長の違いによる測定ひずみへの影響を調査した。

4.2 実験概要

図-3と同様に、 $\phi 100 \times 200(\text{mm})$ の軽量鋼製型枠の中央部の円周方向および軸線方向にひずみ長が1mm、5mm、10mmおよび30mmのひずみゲージを貼り付けて測定に供した。ゲージの上にはブチルゴムを適宜貼り付け、防水処理を施した。測定はコンクリートの打込み後、静置してから連続測定とし、養生は上面を二重にラップして、封緘養生となるようにした。また、試験は20 \pm 2 $^{\circ}\text{C}$ の恒温室で実施し、試験体本数は各種類につき3本とした。膨張ひずみを測定し、材齢28日まで型枠に存置した封緘養生の試験体を圧縮試験に供した。

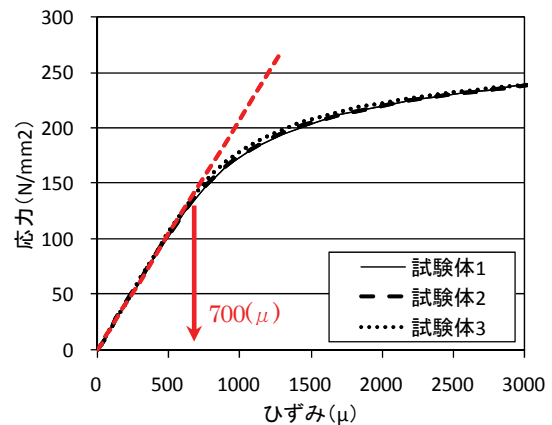


図-4 胴板の応力-ひずみ曲線

表-1 軽量鋼製型枠の胴板の性質

	試験体1	試験体2	試験体3	平均
試験片(胴板)厚さ(mm)	0.280	0.280	0.280	0.280
幅実測(mm)	12.5	12.5	12.5	12.5
$\sigma_{0.2}(\text{N}/\text{mm}^2)$	242	240	241	241
最大荷重(kN)	1.17	1.19	1.16	1.17
引張強度(N/mm^2)	334	339	330	334
ヤング係数(kN/mm^2)	208	211	216	212
ポアソン比	0.350	0.357	0.357	0.355

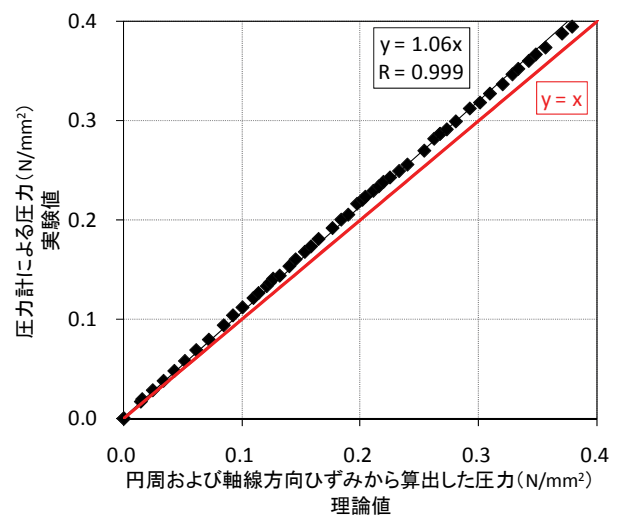


図-5 理論値と実験値の関係

4.3 コンクリートの調合

コンクリートに使用した材料を表-2に示す。水結合材比については45%とし、膨張材の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-3に示す。

表-2 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	山砂: 表乾密度(2.62g/cm ³), 吸水率(1.90%), F.M.(2.57)
粗骨材	石灰砕石: 表乾密度(2.71g/cm ³), 吸水率(0.47%), Gmax=20mm, F.M.(6.76)
混和材	膨張材: 石灰系, 密度(3.16g/cm ³), 標準使用量(20kg/m ³) 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
化学 混和剤	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 コンクリートの調合と各特性

水結合材比 (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	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 20°C封緘養生 (N/mm ²)
				水	セメント	膨張材	細骨材	粗骨材		スランブ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	
45	21 ±1.5	4.5 ±1.5	48.9	175	369	20	842	909	AE減水剤 B×0.9%	22.0	4.6	20.7	47.1

4.4 結果および考察

材齢 7 日の各ゲージ長におけるひずみの各結果と標準偏差を表-4 に示す。膨張ひずみは、打込みから材齢 1 日で概ね一定になり、円周方向のひずみは全てのゲージ長で概ね同程度で約 185 μ であった。標準偏差は、ゲージ長が大きくなるにつれ、小さくなる傾向が認められ、ゲージ長が 10mm 以上であれば、試験体間の誤差を小さく抑えることが可能であると判断できる。一方、軸線方向は 1mm ゲージが 125 μ であり、他の 3 種類は約 110 μ であった。標準偏差については、円周方向と同様の傾向がみられ、ゲージ長が大きくなると小さくなった。軸線方向については、円周方向に比してひずみの値が小さく、分解能の観点からはやや劣るが、全体的に標準偏差が小さくなる傾向が認められる。ゲージ長が小さい場合には、コンクリート表面に生じる気泡や粗骨材の存在による局所的な影響を受けていると考えられる。以上の結果から、ゲージ長は 10mm

表-4 材齢 7 日におけるひずみの平均値および標準偏差

測定方向	ゲージ長	平均値 (μ)	最大値 (μ)	最小値 (μ)	標準偏差
円周	1mm	187	202	166	15.2
	5mm	182	196	165	12.8
	10mm	186	191	184	3.3
	30mm	185	192	183	5.6
軸線	1mm	125	132	111	9.9
	5mm	109	117	106	5.0
	10mm	109	114	105	3.9
	30mm	106	109	104	2.2

以上を用いることが望ましいと判断でき、本章以降の検討では、ゲージ長 10mm のひずみゲージを使用した。

§ 5. 軽量型砕法の特徴

5.1 概要

軽量型砕法における水結合材比と膨張材の混入量の違いによる膨張量を調査する。また、円周方向と軸線方向のひずみの関係を明らかにする。加えて、JIS A 6202 附属書 2 A 法の一軸拘束膨張試験(以下 A 法)と軽量型砕法で生じるひずみの関係を明らかにすることを目的として検討を行った。なお、軽量型砕法の測定や養生については、前章と同様とした。

5.2 円周方向および軸線方向のひずみ挙動

5.2.1 実験種類およびコンクリートの調合

水結合材比は 55%、45%と 35%の 3 水準とし、膨張材については混入量を 10kg/m³、20kg/m³、30kg/m³と混入なしの 4 水準を基本として、水結合材比 45%については、50kg/m³も追加した。コンクリートに使用した材料は、水結合材比が 55%の場合の化学混和剤をリグニンスルホン酸系に、水結合材比が 35%の場合に

表-5 コンクリートの調合と各特性

水結合材比 (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	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 20°C封緘養生 (N/mm ²)
				水	セメント	膨張材	細骨材	粗骨材		スランブ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	
55	21 ±1.5		50.0	180	327	0	880	909	AE減水剤 250ml/B=100kg	21.0	4.9	20.4	37.4
					317	10			AE減水剤 250ml/B=100kg	21.5	4.6	20.7	38.1
					307	20			AE減水剤 250ml/B=100kg	22.0	4.6	20.8	35.9
					297	30			AE減水剤 250ml/B=90kg	22.5	4.6	20.8	34.0
45	21 ±1.5	4.5 ±1.5	48.9	175	389	0	842	909	AE減水剤 B×1.0%	22.0	4.9	20.5	48.0
					379	10			AE減水剤 B×0.95%	21.5	4.1	20.9	44.5
					369	20			AE減水剤 B×0.9%	22.0	4.3	20.5	46.8
					359	30			AE減水剤 B×0.85%	21.5	5.2	21.1	43.6
					339	50			22.0	5.1	20.6	43.9	
35	21 ±2.0		46.9	170	486	0	775	909	高性能AE減水剤 B×0.725%	21.5	4.2	20.7	61.1
					476	10			高性能AE減水剤 B×0.725%	20.5	4.5	21.2	55.8
					466	20			高性能AE減水剤 B×0.75%	22.5	4.6	20.9	56.2
					456	30			高性能AE減水剤 B×0.725%	22.5	5.0	21.2	56.2

ポリカルボン酸系に変更した以外は前章と同様である。各実験種類におけるコンクリートの調合と各特性の結果を表-5に示す。

5.2.2 結果および考察

各水結合材比における打込み直後からの材齢とひずみ

みの関係を図-6から図-11に示す。膨張材の混入量が増えるにつれて、円周および軸線方向のひずみも増加し、膨張材の混入量によって明確な差が生じることが明らかになった。膨張材を標準使用量(20kg/m³)混入した場合には、材齢7日におけるひずみは200μ程度

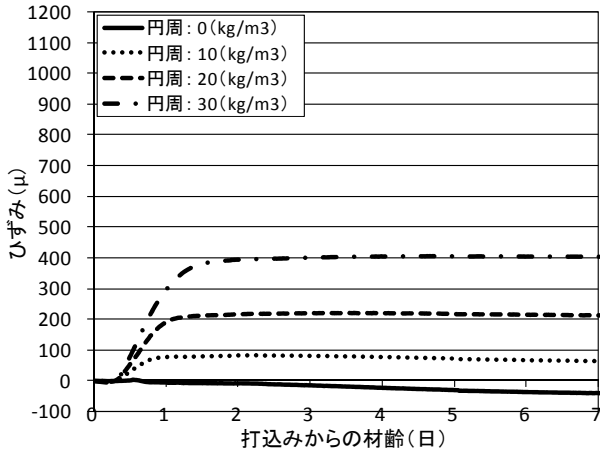


図-6 膨張材の各混入量におけるひずみ
:(W/B=55%、円周)

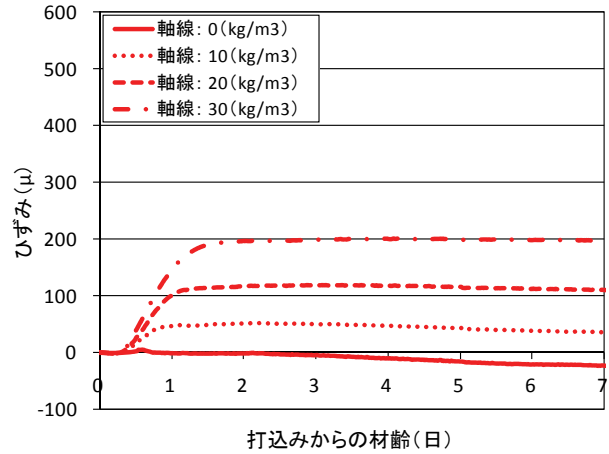


図-9 膨張材の各混入量におけるひずみ
:(W/B=55%、軸線)

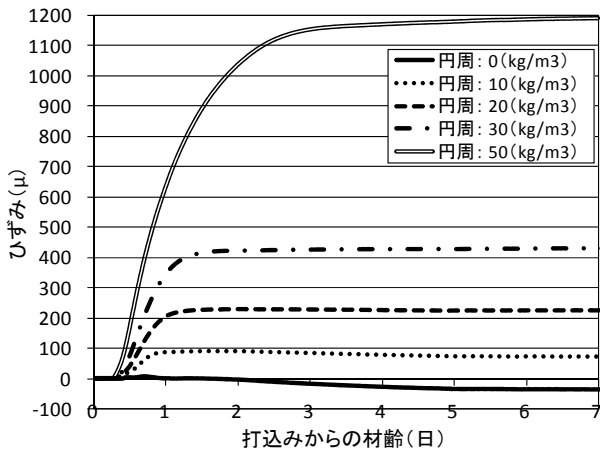


図-7 膨張材の各混入量におけるひずみ
:(W/B=45%、円周)

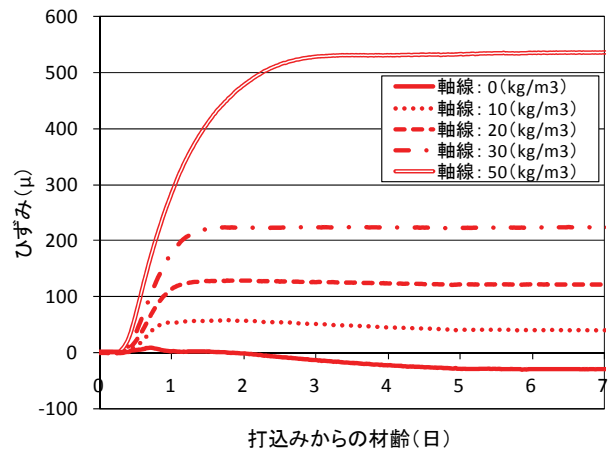


図-10 膨張材の各混入量におけるひずみ
:(W/B=45%、軸線)

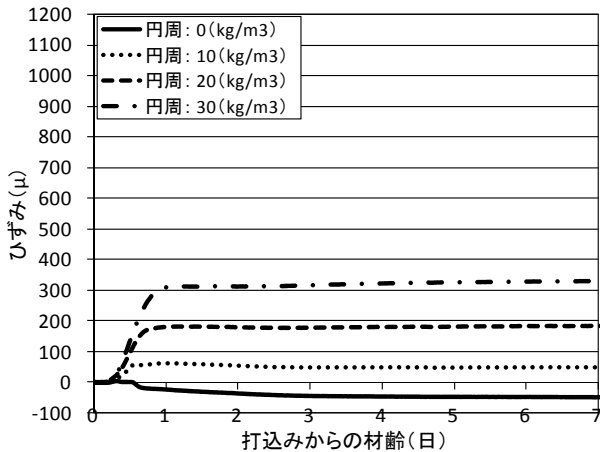


図-8 膨張材の各混入量におけるひずみ
:(W/B=35%、円周)

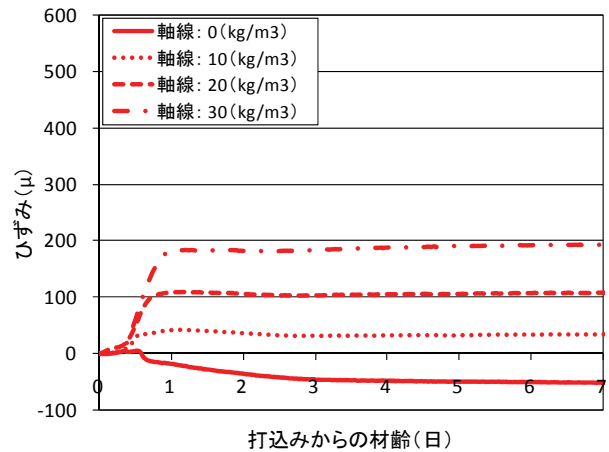


図-11 膨張材の各混入量におけるひずみ
:(W/B=35%、軸線)

になることが明らかになった。また、膨張材を混入していない場合に計測されるひずみは小さく、材齢 7 日において円周および軸線方向とも 30μ から 50μ であった。収縮ひずみであることから自己収縮を捉えているものと考えられる。水結合材比が 35% の場合は、自己収縮の影響をうけ、膨張ひずみが他の水準に比べて小さくなる傾向が認められる。また、膨張材を 50kg/m^3 混入した場合には胴板の線形弾性限度の 700μ を超えることから、正確な膨張ひずみを測定できていないと判断できる。よって、軽量型枠法の適用範囲としては、膨張材の混入量が 40kg/m^3 程度までといえる。

次に、前章も含めた膨張材を混入した全試験体(膨張材の混入量 50kg/m^3 を除く)と、別の機会に実施した使用材料の異なる水結合材比 42% から 60% の間で、膨張材を標準使用量(20kg/m^3)混入した材齢 7 日における円周方向と軸線方向のひずみの関係を図-12 に示す。円周方向と軸線方向のひずみには比例関係が認められ、軸線方向ひずみは円周方向ひずみの約 0.54 倍になることが明らかになった。また、平均値から 25% 区間にほぼ全ての試験結果がおさまる。ここで、式(5)および式(6)は、円周方向のひずみを用いて式(7)および式(8)のように表現できる。軽量鋼製型枠の円周方向ひずみを測定することによって、各方向のコンクリートの拘束膨張応力を評価することが可能であるが、円周方向の応力については、円周方向と軸線方向のひずみの関係を表わす係数とポアソン比との積で表現されるため、ひずみの $\pm 25\%$ のバラつきは応力で $\pm 10\%$ 以内のバラつきとなり、軸線方向に比べて安定した評価が可能といえる。よって、円周方向と軸線方向のひずみの関係を表わす係数を 0.54 とすれば、円周方向の応力を十分に評価できると判断できる。

$$p_{\theta} = \frac{E_s \cdot t \cdot \varepsilon_{\theta} (1 + \alpha \cdot \nu)}{r(1 - \nu^2)} \quad (7)$$

$$p_z = \frac{2E_s \cdot t \cdot \varepsilon_{\theta} (\nu + \alpha)}{r(1 - \nu^2)} \quad (8)$$

ここに、 α : 円周方向と軸線方向のひずみの関係を表わす係数 (0.54)

5.3 JIS A 6202 附属書 2 A 法の一軸拘束膨張試験との関係

5.3.1 実験方法

本論文の A 法については拘束棒の中央部分の左右にひずみゲージを貼りつけた(以下 A 法ゲージ)。一方、軽量型枠法は中央の円周部分にひずみゲージを貼りつけて、それぞれ打込み後に静置してから連続測定を行った。A 法ゲージ試験体は、打込み後から水分が逸散しないようにシールして、材齢 1 日で脱型を行い、水中養生を行った。

5.3.2 実験種類およびコンクリートの調合

使用したコンクリートは前節の水結合材比が 45% の水準である。また、膨張材の混入量は 10kg/m^3 、 20kg/m^3 および 30kg/m^3 の 3 水準である。

5.3.3 結果および考察

各ひずみの結果を図-13 に示す。軽量型枠法のひずみは、材齢 1 日程度で最大膨張ひずみに達し、その後はほぼ一定値となっている。一方、A 法ゲージは材齢 1 日での脱型や水中養生の開始によって膨張が進んでいることがわかる。拘束状況の違いや養生条件は異なるが、材齢 7 日での膨張ひずみは結果的に同程度になる。

次に、材齢 7 日における A 法ゲージと軽量型枠法のひずみの関係を図-14 に示す。なお、同一調合で別の日程で実施した膨張材の混入量 20kg/m^3 の結果も同時に示している。A 法ゲージと軽量型枠法の円周方向に生じるひずみは、膨張材の混入量にかかわらず、ほぼ完全な比例関係にあり、A 法ゲージのひずみは 1.1 倍になることが明らかになった。一方、軸線方向もほぼ完全な比例関係であることが明らかになった。

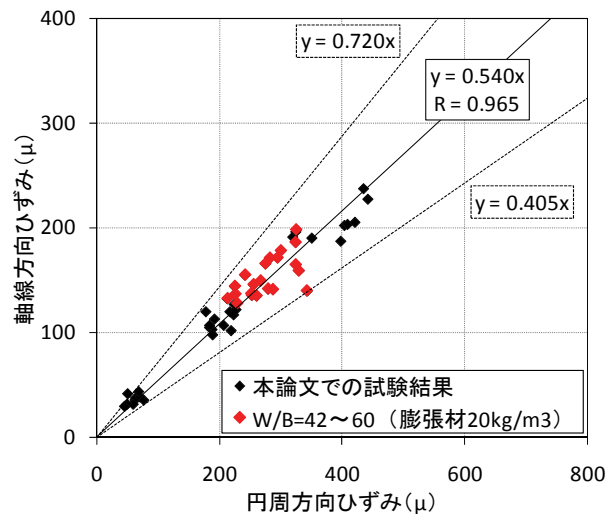


図-12 円周方向と軸線方向のひずみの関係

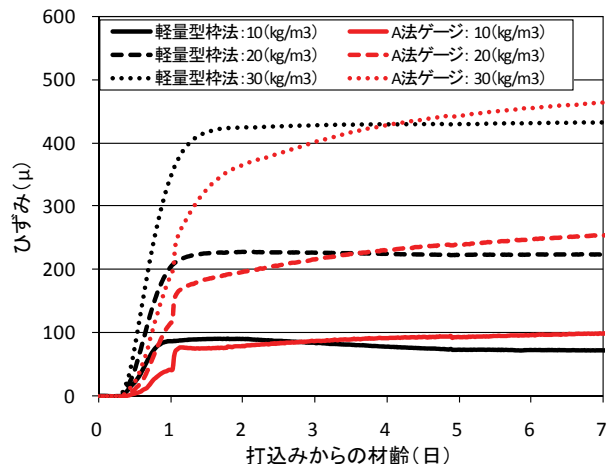


図-13 軽量型枠法と A 法のひずみ

日本コンクリート工学会の『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』に関する研究委員会²⁾での共通試験において実施した材齢7日での軽量型砕法とA法のひずみの関係を図-15に示す。図中には、測定数が少なく、ややバラつきとみられる膨張材を10kg/m³および40kg/m³混入した場合を除いた時の回帰線も示す。本論文の検討では、ひずみゲージで測定しているが、委員会ではJISに準拠した測長器によって測定しており、JISに準拠した場合には、軽量型砕法とA法はほぼ同程度のひずみになると判断できる。ひずみゲージでは、局所的なひずみを測定していることで、JISに準拠した測長器よりもやや大きくなったと推察される。

§ 6. 温度変化が生じる環境下でのひずみ挙動

6.1 概要

本章からは、実構造物に使用する膨張コンクリートの膨張効果を確認するための品質管理へ利用できるかの検討を進める。膨張コンクリートの品質管理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、コンクリートと軽量鋼製型砕(ひずみゲージ)の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すると考えられ、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。

6.2 実験種類およびコンクリートの調査

コンクリートの線膨張係数は一般的に10μ/°C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⁸⁾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砕法のひずみを調査する。一方、軟鋼に一般的に使用される11.8μ/°Cとガラスや特殊金属に使用される8.1μ/°Cの線膨張係数を有する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を表-6に示す。水結合材比については45%とし、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。コンクリートの調査と各特性の結果を表-7に示す。

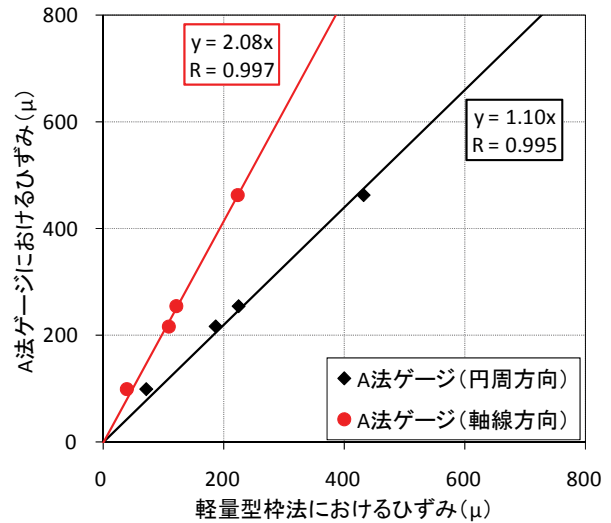


図-14 本論文における軽量型砕法とA法ゲージのひずみの関係

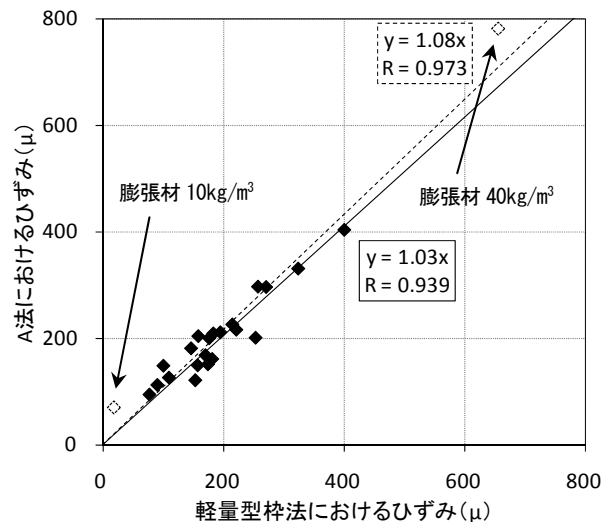


図-15 共通試験における軽量型砕法とA法のひずみの関係

表-6 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	山砂: 表乾密度(2.62g/cm ³), 吸水率(1.68%), F.M.(2.62)
粗骨材	硬質砂岩砕石: 表乾密度(2.65g/cm ³), 吸水率(0.63%), Gmax=20mm, F.M.(6.56)
	石灰砕石: 表乾密度(2.71g/cm ³), 吸水率(0.47%), Gmax=20mm, F.M.(6.76)
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-7 コンクリートの調査と各特性

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(山砂)	粗骨材(硬質)		粗骨材(石灰)	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

6.3 結果および考察

温度履歴を与えた各線膨張係数のひずみゲージを使用した場合の実験結果を図-16 および図-17 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軽量鋼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(9)から補正ひずみを算出した結果を図-18 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-16 や図-17 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(9)による評価が妥当であると判断できる。

$$\varepsilon'(t) = \varepsilon(t) - (TEc - TEsg) \cdot (T(t) - T(0)) \quad (9)$$

- ここに、
- $\varepsilon'(t)$: 材齢 t 日における補正ひずみ
 - $\varepsilon(t)$: 材齢 t 日におけるひずみ
 - TEc : コンクリートの線膨張係数
 - $TEsg$: ひずみゲージの線膨張係数
 - $T(t)$: 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

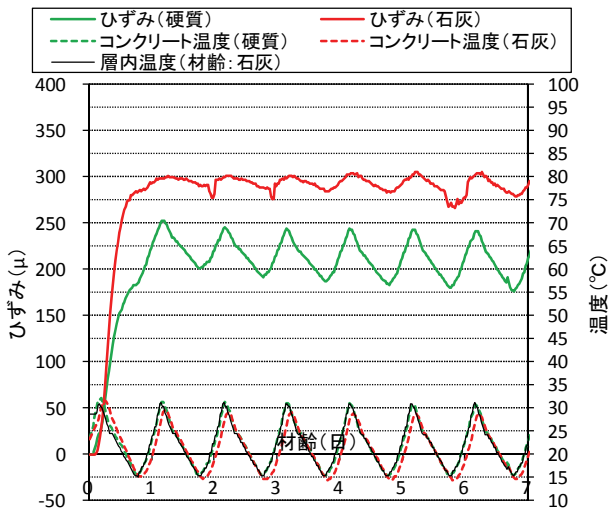


図-16 線膨張係数 8.1 のひずみゲージを使用した場合

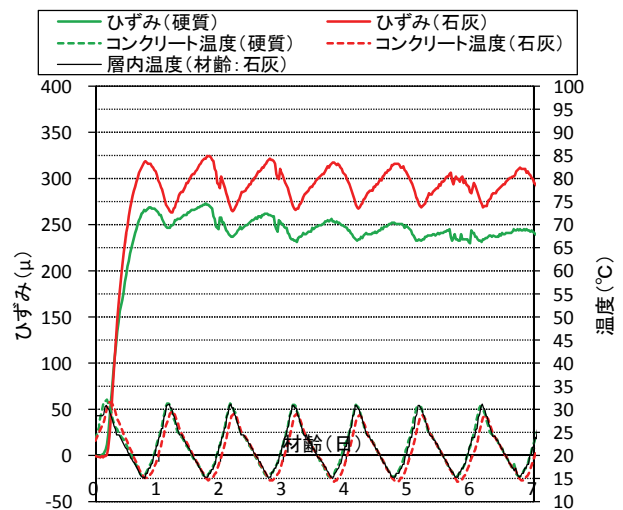


図-17 線膨張係数 11.8 のひずみゲージを使用した場合

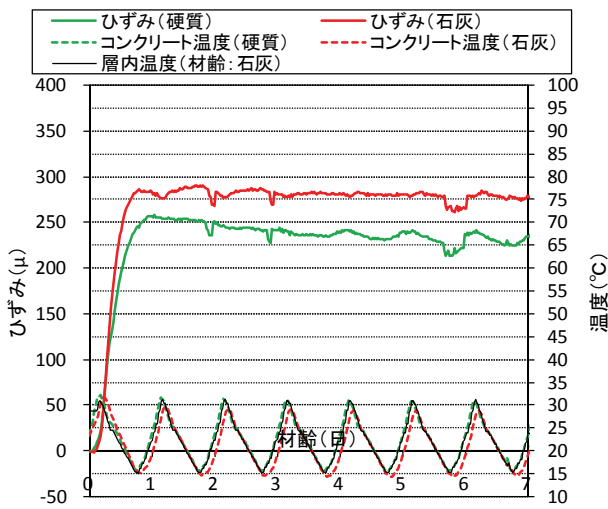


図-18 線膨張係数 11.8 のひずみゲージを使用した場合
(コンクリート温度で補正)

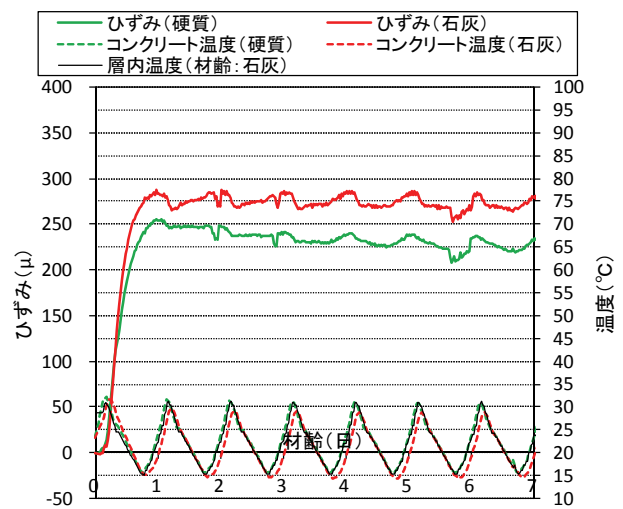


図-19 線膨張係数 11.8 のひずみゲージを使用した場合
(気温=槽内温度で補正)

実現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、ひずみのみの測定に対して、手間がかかることや熱電対の使用による費用増や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などの問題が生じる。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(9)から補正ひずみを算出した結果を図-19に示す。図-18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-16および図-17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を十分に小さくできており、気温を用いた式(9)による評価が妥当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、膨張量を評価することが可能である。

§ 7. 軽量型枠法の実現場への適用

7.1 概要

実構造物へ使用する膨張コンクリートの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。

7.2 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-10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℃程度の間中期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、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 $8.5 \mu / ^\circ C$ とした。また、使用したひずみゲージの線膨張係数は $11.8 \mu / ^\circ C$ であり、測定場所は現場内の外部環境下である。

7.3 結果および考察

それぞれの結果を図-20から図-24に示す。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、気温変化

表-10 各現場の概要

名称	時期	平均気温(°C)	場所	W/C(%)	膨張材種類	粗骨材種類	線膨張係数($\mu / ^\circ C$)
A-1	2009年8月	26.7	京都	44.5	石灰系	石灰	8.5
A-2	2009年11月	14.4					
B	2010年9月	20.7	神奈川	41.0			
C-1	2010年10月	16.7	東京	41.5	複合系		
C-2	2010年10月	15.0					

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、気温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(9)による評価は有効であるといえる。同様にBやC-1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概ね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やC-2からわかるように、ごく初期材齢の気温が与える影響は大きく、Bではごく初期に膨張ひずみが生じ、一方のC-2は比較的膨張ひずみの発現がゆっくりとしており、膨張ひずみの評価材齢を7日以降とすることも必要になることがわかった。以上の結果から、軽量型枠法によって、実構造物に使用した膨張コンクリートの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。

§ 8. おわりに

圧縮強度試験に利用されている軽量鋼製型枠を用いた簡易な拘束膨張試験方法(軽量型枠法)に関する検討を行い、以下の知見が得られた。

- (1) 軽量鋼製型枠において、薄肉円筒モデルが成立する。
- (2) ゲージ長が10mm以上のひずみゲージを利用することで、ひずみのバラつきを小さく抑えることが可能である。
- (3) 軽量鋼製型枠に生じるひずみは、膨張材の混入量の違いによって明確な差が生じ、膨張材を標準使用量(20kg/m^3)混入した場合の材齢7日の円周方向のひずみは 200μ 程度になる。ただし、水結合材比35%程度では、自己収縮の影響を受けてやや小さくなる。
- (4) 軽量鋼製型枠の胴板の機械的性質から、線形弾性範囲で評価する場合には、膨張材の混入量は 40kg/m^3 程度までである。
- (5) 円周方向と軸線方向のひずみには比例関係が認められ、円周方向ひずみを測定することで、コンクリートの膨張性能を適正に評価できる。

- (6) JIS A 6202 附属書 2 A 法の一軸拘束膨張試験と軽量型枠法で生じる材齢 7 日の膨張ひずみは、膨張材の混入量にかかわらずほぼ等しくなる。
- (7) コンクリートの種類によって、適切な線膨張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、より正確な評価ができる。
- (8) ひずみ測定時のコンクリート温度や気温を用いてひずみを補正することで、膨張量を評価することが可能である。
- (9) 軽量型枠法は、実構造物に使用した膨張コンクリートの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。

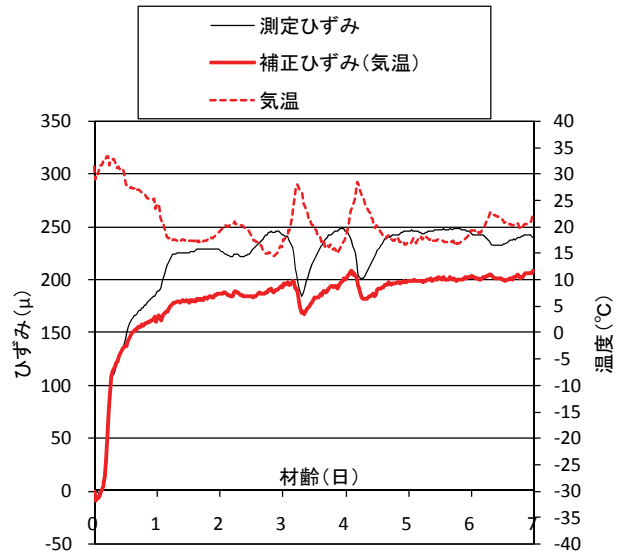


図-22 Bでの測定結果

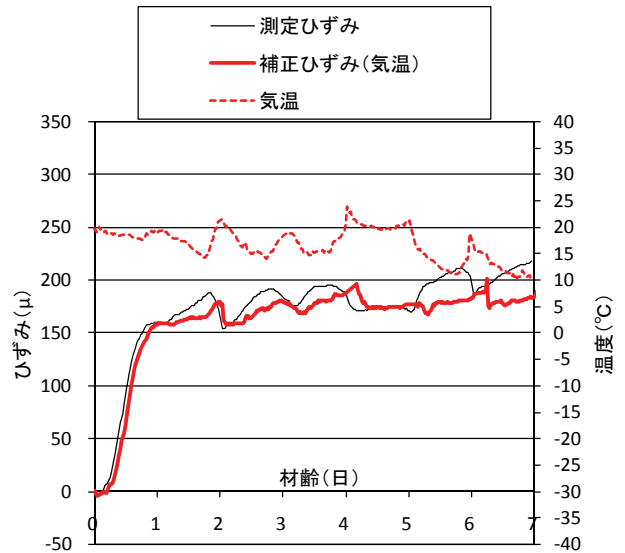


図-23 C-1での測定結果

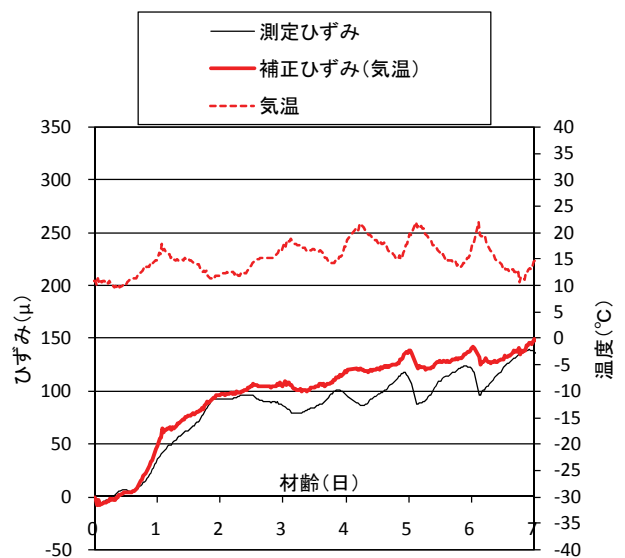


図-24 C-2での測定結果

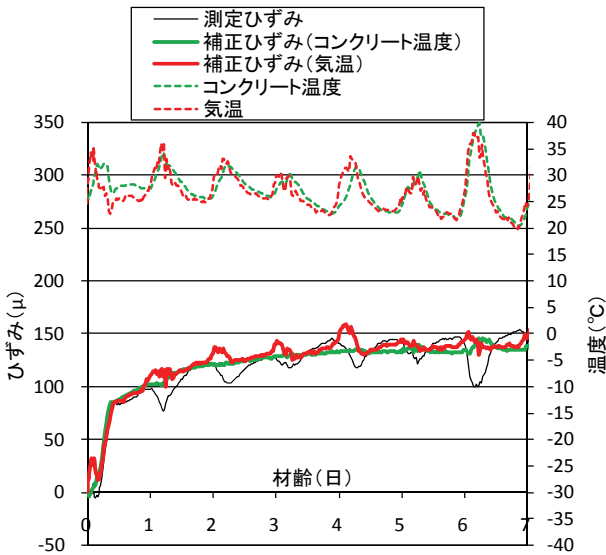


図-20 A-1での測定結果

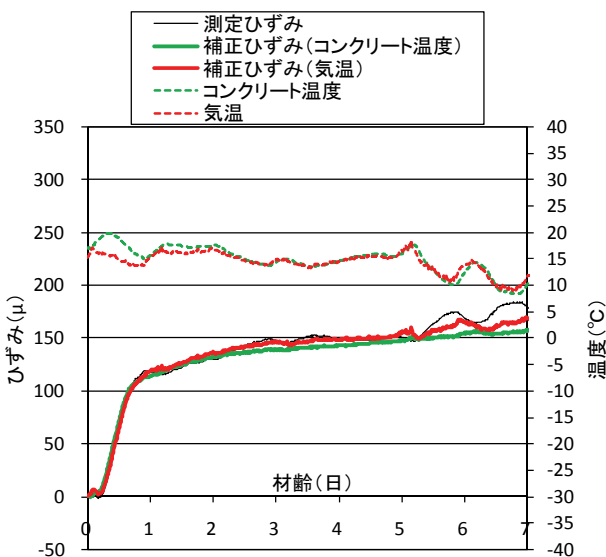


図-21 A-2での測定結果

<参考文献>

- 1) 「コンクリートの収縮特性評価およびひび割れへの影響」に関するシンポジウム：(社)日本コンクリート工学協会、2010.12
- 2) 「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
- 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：鋼製軽量型枠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による考察、セメント・コンクリート論文集 (投稿中)
- 6) 小林一輔、伊藤利治：膨張セメントの膨張圧に影響をおよぼす諸要因、土木学会論文報告集、第226号、pp.67-72、1974.6
- 7) 原田哲夫、副田孝一、出光隆、渡辺明：静的破砕剤の膨張圧測定法と膨張圧の諸性質、土木学会論文集、No.478号/V-21、pp.91-100、1993.11
- 8) 白石良太、中山英明、高尾昇、後藤貴弘：セメント硬化体の線膨張係数に及ぼすセメント、混和材および骨材の種類の影響、三菱マテリアル(株)セメント研究所 研究報告、No.11、pp.33-40、2010

