

論文 膨張コンクリートの簡易拘束膨張試験方法

辻埜 真人^{*1}・橋田 浩^{*2}・湯浅 竜貴^{*3}・高橋 圭一^{*4}

要旨: 膨張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ない。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拘束膨張試験方法を提案した。提案試験方法は薄肉円筒モデルを利用することで, 型枠に生じるひずみ量からコンクリートの拘束膨張応力を求めることが可能であり, JIS A 法の一軸拘束試験体との膨張応力の関係を明らかにした。また, 膨張材の混入量が異なる各水結合材比におけ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, 膨張材の混入量を概ね把握できることを明らかにした。

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, 軽量鋼製型枠

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ない。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, JIS A 6202 附属書 2 A 法の一軸拘束試験との関係や膨張材の混入量の違いによる初期膨張量を明らかにすることを目的として検討を行った。

2. 膨張コンクリートの簡易拘束膨張試験方法

提案する試験は, 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, 型枠のひずみ量を測定することで膨張応力を把握する方法である (以下簡易法)。簡易法では, 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挙げられる。さらに, 現場においても容易に測定できることから膨張コンクリートの初期膨張量を把握する品質管理にも利用できると考えられる。

3. 簡易法における理論値と実験値の関係

3.1 薄肉円筒モデル

簡易法は, 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²⁾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³⁾は静的破砕剤の膨張圧への把握に利用しているが, 両者とも厚肉の円筒を用いている。

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。

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

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)

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

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

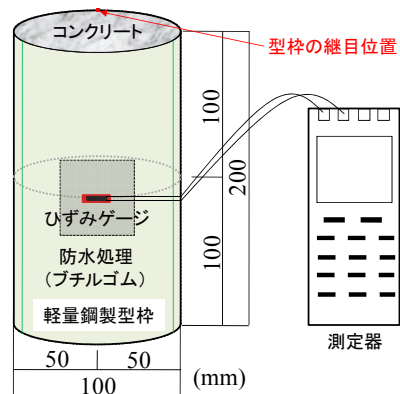


図-1 提案試験方法の概要

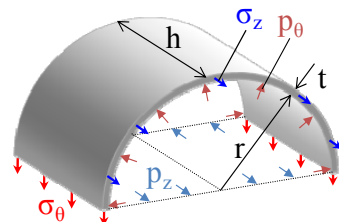


図-2 内部膨張圧を受ける薄肉円筒モデルの概要

*1 清水建設 (株) 技術研究所 生産技術センター 研究員 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 社会基盤技術センター

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、膨張圧は、各方向のひずみ量を用いて表すと式(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} : 円周方向のひずみ量
 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 : 軸線方向のひずみ量
 E_s : 胴板のヤング係数 (N/mm²)
 ν : 胴板のポアソン比

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

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

3.2 実験概要

(1) 実験方法

軽量鋼製型枠を密閉し、空気圧をかけることで、膨張圧力とひずみ量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は、φ100×200 (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量を測定した。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。

(2) 軽量鋼製型枠の機械的性質

膨張圧力とひずみ量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に従って実施した。性質を表-1に示す。

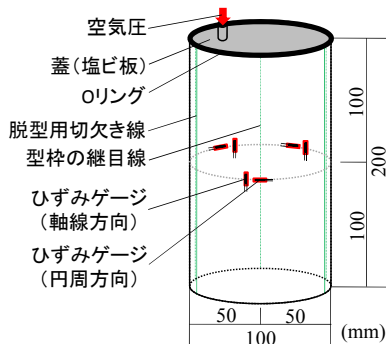


図-3 軽量鋼製型枠における測定位置

表-1 軽量鋼製型枠の胴板の機械的性質

試験片(胴板)厚さ(mm)	0.28
$\sigma_{0.2}$ (N/mm ²)	241
引張強度(N/mm ²)	334
ヤング係数(kN/mm ²)	212
ポアソン比	0.36

3.3 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量を式(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-4に示す。0.12N/mm²程度において、軽量鋼製型枠の底面に变形が生じ、その後は実験値に比べてやや小さい傾向にあるが、ひずみ量から算出した理論圧力は、ほぼ同等であると判断できる。よって軽量鋼製型枠に生じるひずみ量から薄肉円筒モデルを利用することで内部膨張圧力を明らかにすることが可能である。

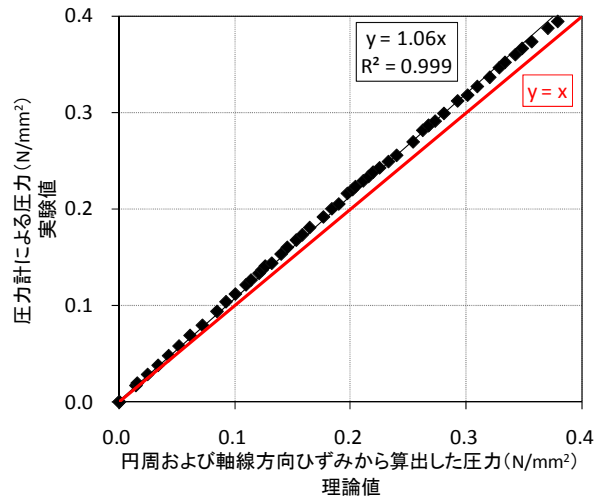


図-4 理論値と実験値の関係

4. ゲージ長の違いによる測定誤差

4.1 概要

簡易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の誤差を調査した。

4.2 実験方法

図-3と同様に、φ100×200 (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℃の恒温室で実施し、試験体本数は各水準につき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。

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および各性状の結果を表-3に示す。

4.4 結果および考察

それぞれのゲージ長における各試験体の平均ひずみ

の結果を図-5から図-8に示す。また、材齢7日の各ゲージ長における平均値と標準偏差を表-4に示す。

膨張ひずみは、打込みから材齢1日で概ね一定になることが明らかになった。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水準は約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標準偏差が大きくなる原因は、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ことが考えられる。以上の結果から、ゲージ長は10mm以上を用いることが望ましいと判断できる。

5. JIS A 6202 附属書 2 A 法の一軸拘束膨張試験との関係

5.1 概要

本章では、JIS A 6202 附属書 2 A 法の一軸拘束膨張試験（以下 A 法）と簡易法で生じる膨張応力の関係を明らかにすることを目的として検討を行った。

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:3.16(g/cm ³)
細骨材	山砂:表乾密度:2.62, 吸水率:1.90%, F.M.:2.57
粗骨材	石灰砕石、表乾密度:2.71, 吸水率:0.47%, F.M.:6.76
混和材	膨張材:石灰系、密度:3.16(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-4 材齢7日における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
	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

表-3 コンクリートの調合と各性状

水結合材比 (%)	スランプ (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		スランプ (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

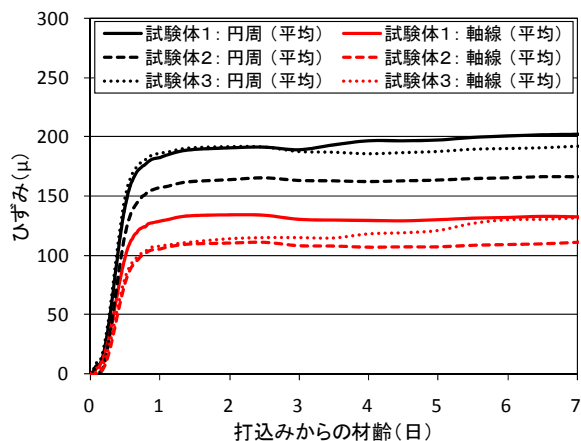


図-5 ゲージ長1mmにおける平均ひずみ量

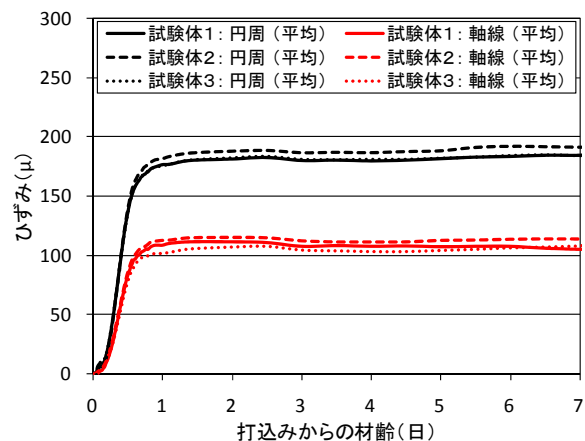


図-7 ゲージ長10mmにおける平均ひずみ量

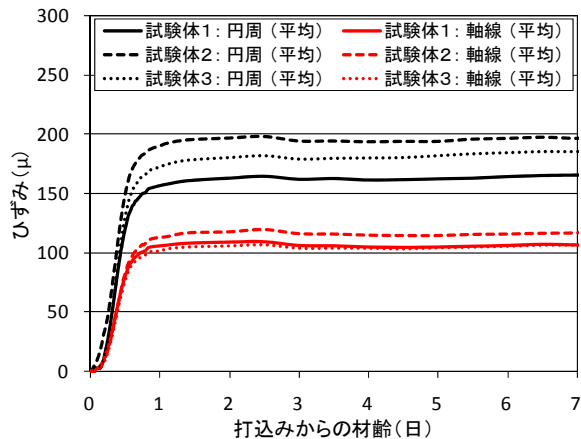


図-6 ゲージ長5mmにおける平均ひずみ量

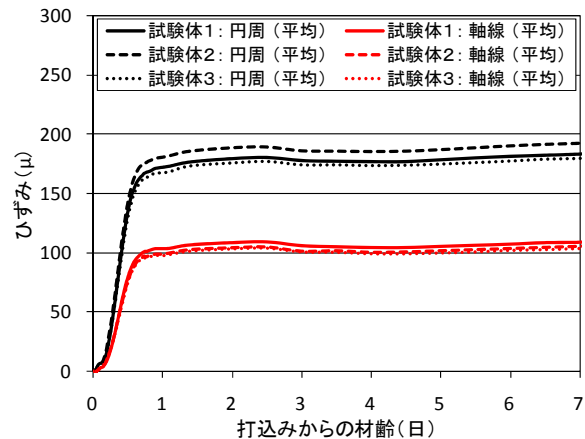


図-8 ゲージ長30mmにおける平均ひずみ量

5.2 実験方法

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。一方、簡易法は図-3と同様にひずみゲージを貼りつけて、それぞれ打込みから連続測定を行った。ひずみゲージには、ゲージ長 10mm を使用した。A 法試験体は、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、アルミテープを二重に貼りつけて乾燥を防いだ封緘養生（以下 A 法封緘）と水中養生（以下 A 法水中）の 2 水準とした。一方、簡易法の試験体については、前章と同様に封緘養生とした。

5.3 実験水準およびコンクリートの調合

コンクリートに使用した材料は前章と同様である。水結合材比については 45% とし、膨張材の混入量は 10kg/m³、20kg/m³、30kg/m³ および 50kg/m³ と簡易法については、無混入の 5 水準とした。各水準におけるコンクリートの調合および各性状の結果を表-5 に示す。

5.4 結果および考察

無混入、10kg/m³ および 20kg/m³ と 30kg/m³ および 50kg/m³ の各ひずみ量の結果を図-9 と図-10 に示す。膨張材を混入していない場合に計測されるひずみ量は小さく、材齢 7 日において円周および軸線方向とも -30 μ 程度であった。収縮ひずみであることから自己収縮をとらえているものと考えられる。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、膨張材を標準使用量混入した場合には、円周方向のひずみは材齢 7 日において約 225 μ になった。一方、A 法水中は約 250 μ であり、A 法封緘は約 150 μ であった。なお、材齢 7 日での簡易法と A 法水中のひずみ量は同程度になる傾向が認められる。

次に、収縮補償の観点から膨張材の混入量 50kg/m³ の水準を除き、材齢 7 日における A 法のひずみ量から鉄筋比を考慮した式(7)を用いて、コンクリートの応力を算出した結果と軽量鋼製型枠のひずみ量から式(5)および式(6)を用いてコンクリートの応力を算出した結果の関係を図-11 に示す。なお、膨張材の混入量 20kg/m³ については、同一調合で別の日程で実施した結果も同時に示している。A 法と簡易法の円周方向に生じる応力は、膨張材の混入量にかかわらず、一次関数の関係で表現することが可能で、A 法封緘は簡易法に比べて 0.872 倍になり、

A 法水中では 1.40 倍になることが明らかになった。A 法水中は、材齢 1 日後からの水中養生によって、膨張材の反応が進み、膨張応力が大きくなったことで、A 法封緘より傾きが大きくなったと考えられる。一方、軸線方向も一次関数の関係で表現することが可能で、A 法封緘の場合は簡易法に比べて 0.584 倍になり、A 法水中では 0.935 倍になることが明らかになった。以上の結果から、簡易法は、JIS A 6202 附属書 2 A 法の一軸拘束試験結果と整合性を図ることが可能であると考えられる。

$$\sigma_c = \varepsilon_s \cdot E_s \cdot A_s / A_c \quad (7)$$

ここに、 σ_c : コンクリートの応力 (N/mm²)

ε_s : 拘束棒のひずみ量

E_s : 拘束棒のヤング係数: 2.12 × 10⁵ (N/mm²)

A_s : 拘束棒の断面積: 95.03 (mm²)

A_c : コンクリートの断面積: 9905 (mm²)

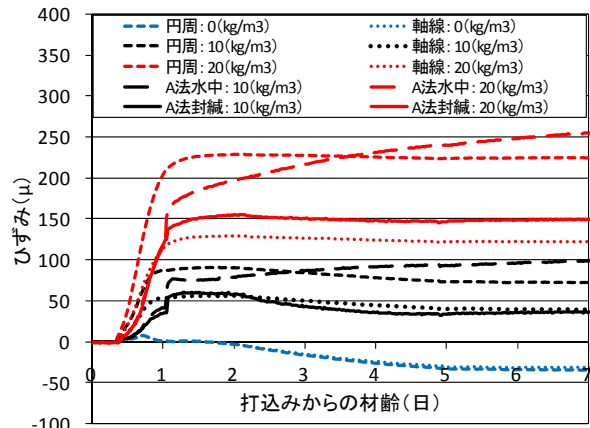


図-9 無混入、10kg/m³ および 20kg/m³ の各ひずみ量

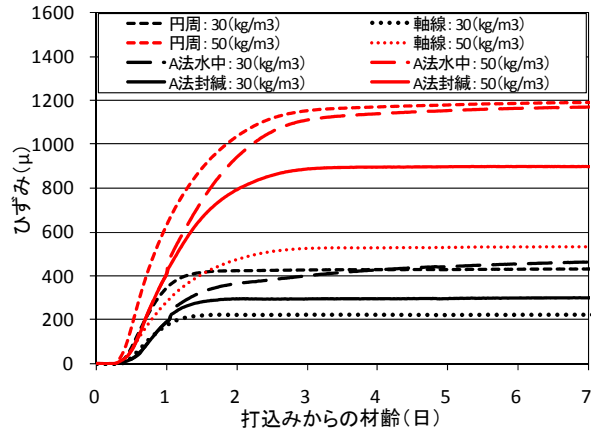


図-10 30kg/m³ および 50kg/m³ の各ひずみ量

表-5 コンクリートの調合と各性状

水結合材比 (%)	スランプ (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		スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	
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			AE減水剤 B × 0.85%	22.0	5.1	20.6	43.9

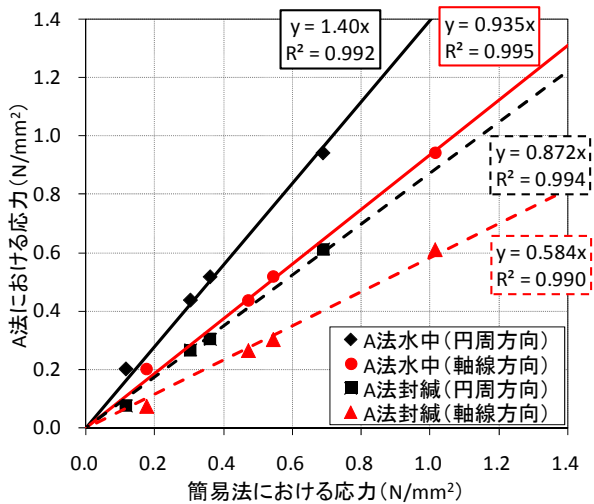


図-11 簡易法とA法の膨張応力の関係

6. 円周方向ひずみと拘束膨張応力の関係

6.1 概要

異なる水セメント比における膨張材の混入量の違いによるひずみ量をさらに測定し、円周方向と軸線方向のひずみの関係を明らかにする。そして、コンクリートの膨張応力と円周方向ひずみの関係を定式化する。なお、測定や養生は、4章と同様とした。

6.2 実験水準およびコンクリートの調合

水結合材比は55%と35%の2水準を追加し、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水準とした。コンクリートに使用した材料は、化学混和剤をリグニンスルホン酸系とポリカルボン酸系に変更した以外は4章と同様である。各水準におけるコンクリートの調合および各性状の結果を表-6に示す。

6.3 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ひずみ量を図-12から図-17に示す。膨張材を混入した水準については膨張ひずみが確認でき、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。水結合材比が35%の場合は、自己収縮の影響を受け、膨張ひずみ量が他の水準に比べて小さくなる傾向が認められる。膨張材

を標準使用量混入した場合には、材齢7日におけるひずみ量は200μ程度になることが明らかになった。

次に、4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/m³の水準を除く）の材齢7日における円周方向と軸線方向のひずみの関係を図-18に示す。円周方向と軸線方向のひずみの関係は一次関数で表現することが可能であり、軸線方向ひずみは円周方向ひずみの約0.53倍になることが明らかになった。つまり、式(5)は式(8)のように表現することが可能であり、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、コンクリートの拘束膨張応力を求めることが可能である。

$$p_{\theta} = \frac{E_s \cdot t \cdot \varepsilon_{\theta} (1 + 0.531\nu)}{r(1 - \nu^2)} \quad (8)$$

7. まとめ

軽量鋼製型枠を利用した簡易拘束膨張試験方法を提案し、実験によって以下のことを明らかにした。

- (1) 軽量鋼製型枠に生じるひずみから薄肉円筒モデルを利用することで内部膨張圧を把握できる。
- (2) ゲージ長が10mm以上のひずみゲージを利用することで、ひずみ量のバラつきを小さく抑えることが可能である。
- (3) JIS A 6202 附属書2 A法の一軸拘束膨張試験と提案試験に生じる応力は膨張材の混入量にかかわらず、一次関数の関係で表現することができる。
- (4) 提案試験の円周方向ひずみ量と水中養生したA法のひずみ量は材齢7日で同程度になる。
- (5) 軽量鋼製型枠に生じるひずみ量は、膨張材の混入量の違いによって明確な差が生じる。
- (6) 円周方向と軸線方向のひずみの関係は一次関数で表現することが可能であり、軸線方向ひずみは円周方向ひずみの約0.53倍になる。
- (7) 軽量鋼製型枠の中央部のひずみを測定することによって、コンクリートの拘束膨張応力を求めることが可能である。

表-6 コンクリートの調合と各性状

水結合材比 (%)	スラブ (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		スラブ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	
55	21 ±1.5	4.5 ±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
35	21 ±2.0	4.5 ±1.5	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

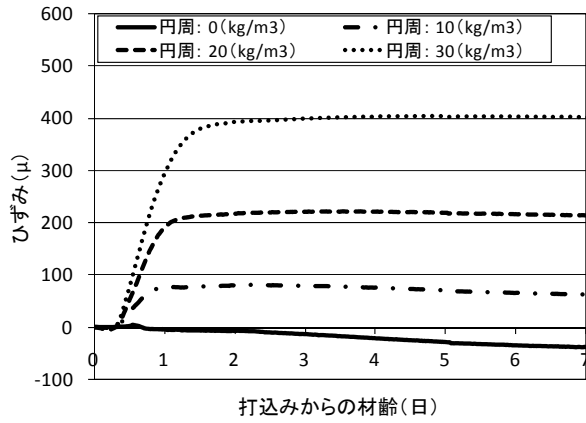


図-12 膨張材の各混入量におけるひずみ：(W/B=55%, 円周)

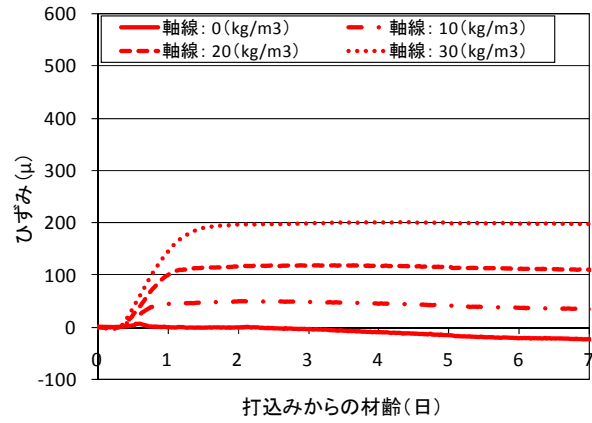


図-15 膨張材の各混入量におけるひずみ：(W/B=55%, 軸線)

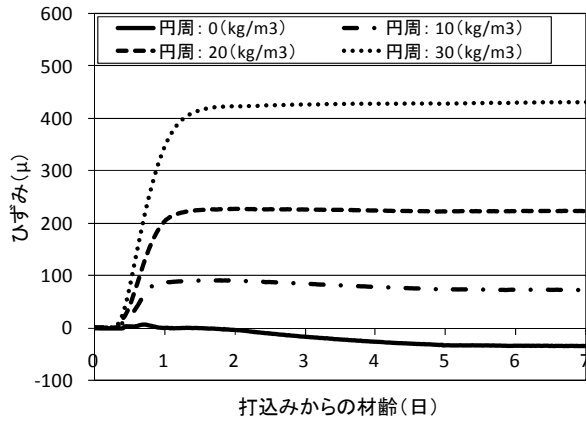


図-13 膨張材の各混入量におけるひずみ：(W/B=45%, 円周)

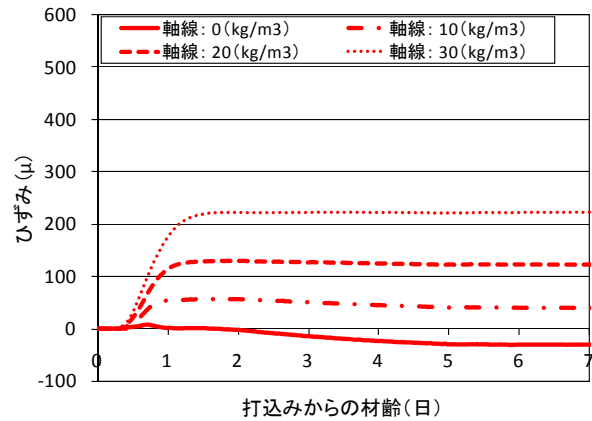


図-16 膨張材の各混入量におけるひずみ：(W/B=45%, 軸線)

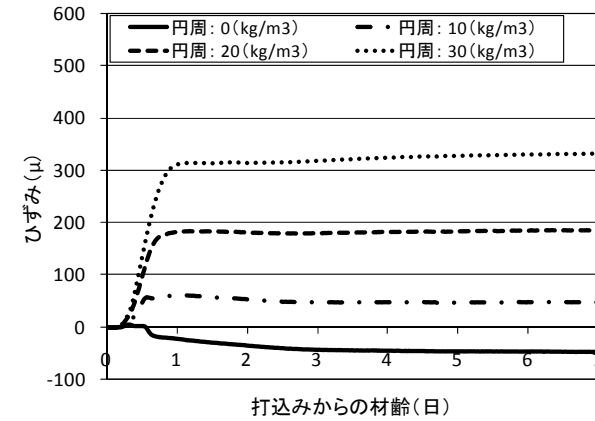


図-14 膨張材の各混入量におけるひずみ：(W/B=35%, 円周)

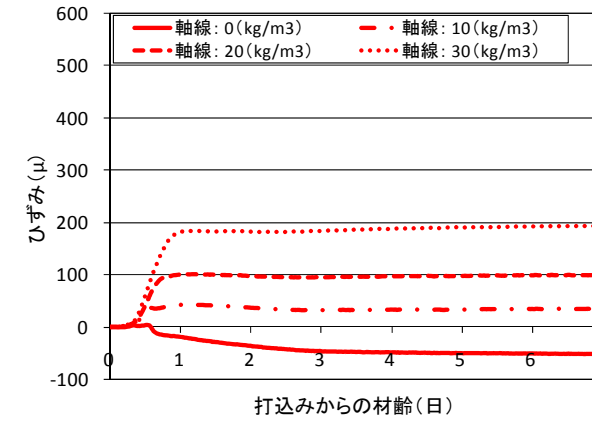


図-17 膨張材の各混入量におけるひずみ：(W/B=35%, 軸線)

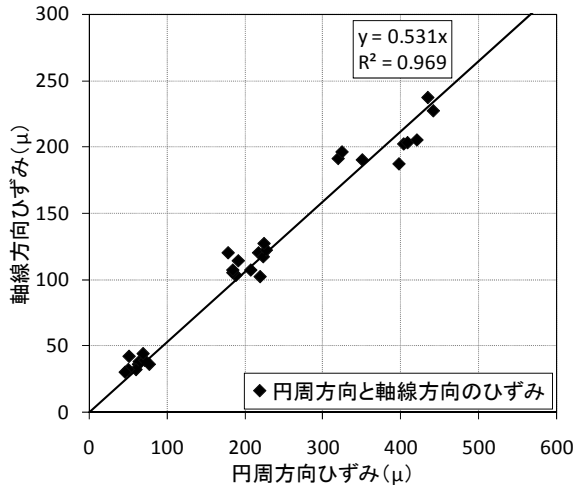


図-18 円周方向と軸線方向のひずみの関係

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) 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
- 3) 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