

論文 膨張モルタルの膨張エネルギーの温度依存性

小林 晋吾*1・小澤 満津雄*2・森本 博昭*3

要旨: コンクリートの体積変化によって生じるひび割れ抑制の方法として、膨張材を添加する方法がある。しかしながら、膨張材を添加した膨張コンクリートの膨張性能は、十分に定量化されていないのが現状である。そこで本研究では、ひび割れの制御を目的とした膨張コンクリートによる導入応力算定の基礎資料を得るために、20℃、30℃、50℃の温度一定条件下において膨張材を添加したモルタルの一軸拘束試験を実施し、膨張エネルギーの発現性状を検討した。その結果、設定温度が高くなるほど、膨張エネルギーの終局値は小さくなる傾向を示し、温度依存性が確認された。

キーワード: 膨張モルタル, 膨張エネルギー, 仕事量一定則, 温度依存性, 積算温度

1. はじめに

コンクリートの体積変化に伴うひび割れの抑制方法の一つに膨張材の使用が挙げられる。膨張材のひび割れ抑制効果を推定するためには、膨張コンクリートの膨張性能を定量的に評価することが重要である。これまでに有効自由膨張量の方法、潜在膨張量の概念を導入した複合モデル、バネ・ダッシュポット等の力学モデルなどの有力な方法が提案されている¹⁾。辻ら^{2),3),4),5)}は、仕事量一定則による膨張エネルギーの評価手法を提案している。本研究グループでも、膨張材の膨張エネルギーに関する検討を進めている⁶⁾。しかし、膨張材を用いたコンクリートの温度依存性について、十分な検討がなされているとは言い難いのが現状である。そこで本研究では、膨張エネルギーに着目した膨張ひずみの評価方法を提案する基礎資料を得るために、20℃、30℃、50℃の温度一定条件下において膨張材を添加したモルタルの一軸拘束試験を実施した。実験で得られる拘束鋼材のひずみから膨張エネルギーと積算温度との関係を求め、膨張エネルギーの温度依存性を検討した。

2. 膨張エネルギーの算定

本研究では、仕事量一定則²⁾に基づき、一軸拘束試験の結果より、単位体積あたりの膨張モルタルが鋼材に対してなす仕事量を求めた。式(1)~(6)膨張エネルギーの算出式を示す。

$$e_{che} = \sigma_c \epsilon_c = const. \quad (1)$$

$$\sigma_c A_c = \sigma_s A_s \quad (2)$$

$$\sigma_c = (A_s / A_c) \sigma_s = p \sigma_s \quad (3)$$

$$\epsilon_c = \epsilon_s \quad (4)$$

$$\sigma_s = E_s \epsilon_s \quad (5)$$

$$e_{che} = 1/2 p E_s \epsilon_s^2 \quad (6)$$

ここに、 e_{che} : 仕事量 (N・mm/mm³)

σ_c : コンクリート応力 (N/mm²)

ϵ_c : 膨張ひずみ

σ_s : 拘束鋼材応力 (N/mm²)

ϵ_s : 拘束ひずみ

A_c : コンクリート断面積 (mm²)

A_s : 拘束鋼材断面積 (mm²)

p : 拘束鋼材比

E_s : 拘束鋼材のヤング率 (N/mm²)

3. 膨張モルタルの一軸拘束試験

3.1 示方配合および使用材料

表-1,2 に示方配合と使用材料を示す。配合は、JIS R 5201「セメントの物理試験方法」⁷⁾を参考にした。W/Cは0.5とした。膨張材の使用量はセメントの内割りで30kg/m³とした。セメントは普通ポルトランドセメントとした。膨張材はノーマルCSAを用いた。細骨材は細骨材の吸水率や表面水の影響を抑えるために、標準砂(ISO砂)を使用した。試験練りには、オムニミキサを用いた。ミキサは、練り上り温度を一定にするために、温度20℃の恒温室に設置した。練り混ぜ方法を以下に示す。1)セメントと細骨材を投入し、1分間練り混ぜた。2)水を投入し、更に1分間練り混ぜを行い、ミキサ内に付着したセメント分を掻きだした。3)膨張材を投入し、5分間の練り混ぜを行った。表-3に膨張モルタルのフレッシュ性状を示す。練り上り温度をコントロールし、20+3℃の範囲内となるように、制御した。しかし、温度が高くなるほど、フロー値の低下がみられた。流動性の制御は今後の検討課題としたい。表-4に圧縮強度試験と弾性係数試験の結果を示す。試験材齢は温度20℃が材齢1,3,7,14,28日とし、温度30℃と50℃は、材齢1,3,7日とした。

*1 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 学生 (正会員)

*2 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 助教 博士(工学) (正会員)

*3 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 教授 博士(工学) (正会員)

表-1 示方配合

水結合材比	単位量			
(%)	(kg/m ³)			
W/(C+EA)	W	C	EA	S
50	293	556	30	1758

表-2 使用材料

材料	材料特性
セメント (C)	普通ポルトランドセメント, 密度 3.15g/cm ³
膨張材 (EA)	ノーマル CSA 系(Calcium Sulfur Aluminates), 密度 2.93g/cm ³
細骨材 (S)	セメント強さ試験用標準砂 (ISO 砂), 密度 2.54g/cm ³ , 湿分 0.2%未満

表-3 モルタルのフレッシュ性状

設定温度 (°C)	20	30	50
フロー値 (mm)	235	175	186
練上がり温度 (°C)	20.3	23	21.1

表-4 圧縮強度と弾性係数試験結果

材齢 (日)	20°C		30°C	50°C
	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	圧縮強度 (MPa)	圧縮強度 (MPa)
1	9.8	-	10.4	15.8
3	23.9	-	28.6	17.9
7	30.4	-	32.8	21.5
14	36.8	-	-	-
28	44	35.9	-	-

3.2 供試体形状・寸法および拘束試験概要

図-1 に拘束供試体の形状および拘束枠を示す。供試体は ASTM 規格⁸⁾に準拠した。図より、供試体寸法は 75×75×254mm の角柱供試体とした。拘束鋼材は、φ9.2mm のアンボンド PC 鋼棒を用いた。PC 鋼棒は、供試体断面中央に配置し、その両端に 75×75×9mm の鋼板を設置して、締め付けネジで固定した。PC 鋼棒にはひずみゲージ(ゲージ長 3mm)を PC 鋼棒中央に対極となるように 2 枚貼付した。その後、防水処理を施した。PC 鋼棒とモルタルの付着を切るために、PC 鋼棒にアンボンドテープを巻きつけた。供試体の内部温度を確認するために、供試体断面中心と側面に熱電対を設置した。図-2 に実験装置の概要を示す。図より、拘束枠を型枠内に設置した。拘束枠が型枠に固定されないように、型枠内の側面と底面にテフロンシートを貼付けた。モルタル打設後、水分の蒸発を防ぐために供試体上面にテフロンシートを設置し

封緘処理を施した。供試体は封緘処理後に、設定温度に制御された環境試験室内に静置した。その後、ひずみゲージと熱電対をデータロガーに結線し、PC 鋼材のひずみと供試体内部の温度を 10 分毎に計測し、PC に記録した。本研究では、設定温度を 20,30,50°C とした。

3.3 モルタルの凝結試験

膨張モルタルの計測開始時間の決定のために、JIS A 1147「コンクリートの凝結時間試験方法」⁷⁾を実施した。練り上ったモルタルを寸法 200×300×100mm のプラスチックの容器に打設した。その後、拘束供試体と同様に環境試験室内に静置した。所定の時間にプロクター貫入抵抗試験を実施し、貫入抵抗を算出した。貫入抵抗が 3.5MPa の時間を凝結始発時間とし、28MPa の時間を凝結終結時間とした。拘束 PC 鋼材の計測開始時間は凝結始発とした。

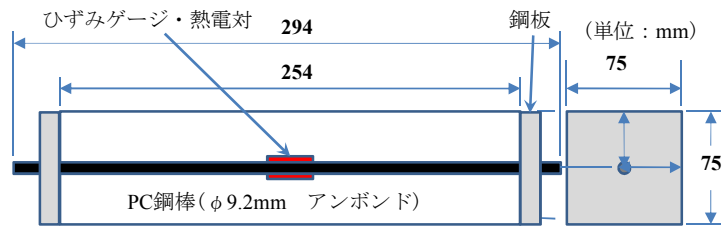


図-1 供試体形状寸法および拘束型枠

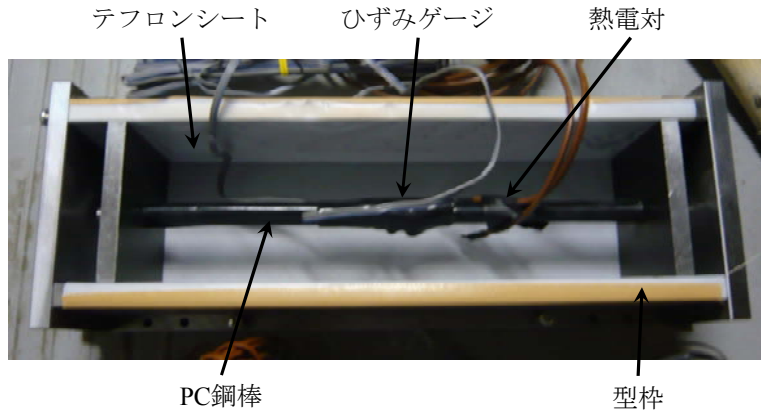


図-2 実験装置概要

4. 実験結果および考察

4.1 凝結試験結果

図-3 にモルタルの貫入抵抗値の経時変化を示す。図より、温度 20℃の供試体は、注水後 5.6hr.で凝結始発に達し、7.4hr 後に終結に達した。温度 30℃は凝結始発時間と終結時間はそれぞれ 3.5hr と 5.2hr.であった。温度 50℃は、凝結始発時間と終結時間はそれぞれ 3.4hr と 4.1hr.となった。設定温度が高くなるほど、セメントの水和反応が促進されたためと考えられる。表-5 に凝結試験結果を示す。この凝結時間試験の結果をもとに、内部温度と鋼材のひずみの計測開始時期を決定した。

4.2 供試体内部温度および拘束鋼材ひずみの経時変化

図-4~6 に温度 20, 30, 50℃設定における供試体の内部温度および拘束鋼材全ひずみの経時変化を示す。ここでの計測開始時間は、凝結始発時間とした。図-4 より、温度 20℃では、凝結始発時の温度が 22℃であり、最高温度もほぼ同等であった。拘束鋼材は計測開始から膨張方向にひずみが増加し、2日で 132×10^{-6} を示した。

図-5 より温度 30℃のケースは、凝結始発時の供試体温度が 30℃であり、計測後 0.2 日で約 33℃まで上昇し、その後、31℃程度に落ち着いた。拘束鋼材は計測開始から膨張方向にひずみが増加し、計測開始後 2 日で 129×10^{-6} を示した。

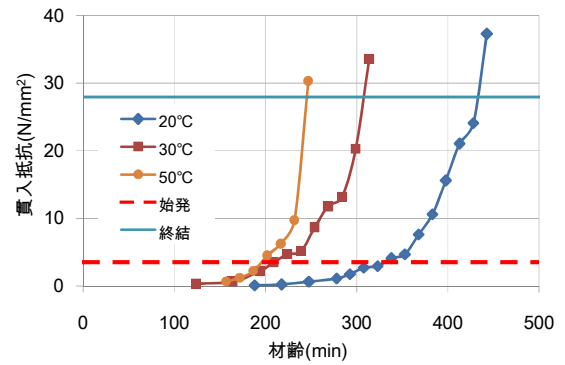


図-3 モルタルの貫入抵抗値の経時変化

表-5 凝結試験結果

温度 (℃)	始発 (hr.)	終結 (hr.)
20	5.6	7.4
30	3.5	5.2
50	3.4	4.1

図-6 より温度 50℃では、凝結始発時の温度が 47℃であるが、計測後 0.14 日で 54℃まで上昇しその後、50℃に落ち着いた。拘束鋼材は計測開始から膨張方向にひずみが増加し、0.75 日で 133×10^{-6} を示した。それぞれの温度設定において、凝結始発後も温度が上昇しており、それに伴って拘束鋼材も膨張している。このことから、拘束鋼材の温度補正を以下の方法で行った。式(7)(8)に補正方法を示す。拘束鋼材の膨張ひずみは、熱膨張に起因するひずみと膨張材モルタルが水和反応に伴い膨張することに起因するひずみが含まれていると仮定する。よって、温度増分に鋼材熱膨張係数 $11(\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C})$ を掛けることで、熱膨張ひずみを補正した。

$$\varepsilon_{all} = \varepsilon_{ex} + \varepsilon_t \quad (7)$$

$$\varepsilon_{ex} = \varepsilon_{all} - \Delta T_s \cdot \alpha_s \quad (8)$$

ここに、

ε_{all} : 拘束鋼材の全ひずみ

ε_{ex} : 膨張モルタルの膨張に起因する拘束鋼材のひずみ

ε_t : 拘束鋼材の温度ひずみ

ΔT_s : 供試体内部の温度変化($^{\circ}\text{C}$)

α_s : 拘束鋼材の熱膨張係数: $11(\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C})$

鋼材の温度変化は供試体内部の温度変化と同等であると仮定し、温度 20, 30, 50℃設定の拘束鋼材の温度ひずみを計算した。その結果を図-7 に示す。この温度ひずみを差し引くことで、ひずみの補正を行った。次に、図-8 に温度 20, 30, 50℃設定における温度補正後の拘束鋼材ひずみを示す。図より温度 20℃のひずみは、計測開始後 1.5 日で 120×10^{-6} まで急激に増加し、その後 3.5 日で

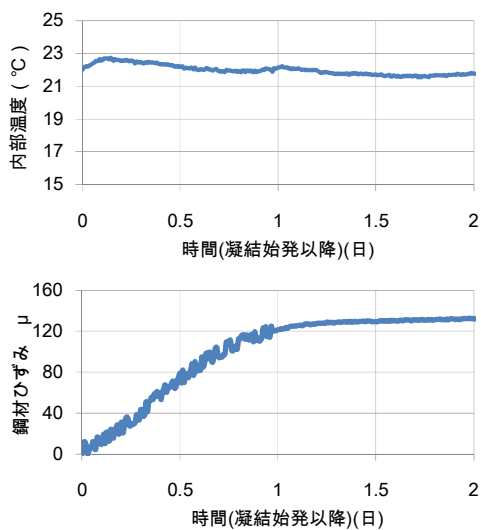


図-4 内部温度, 拘束鋼材全ひずみの経時変化(20℃)

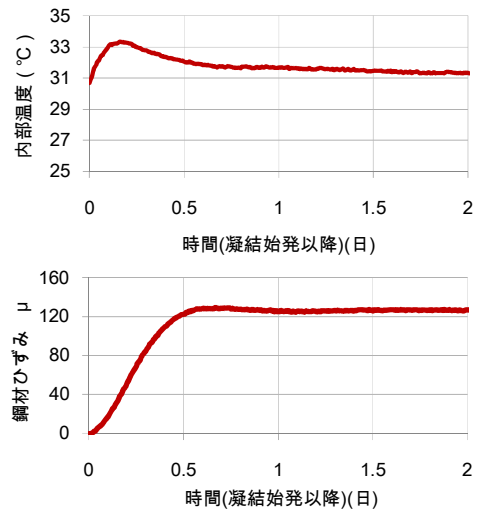


図-5 内部温度, 拘束鋼材全ひずみの経時変化(30℃)

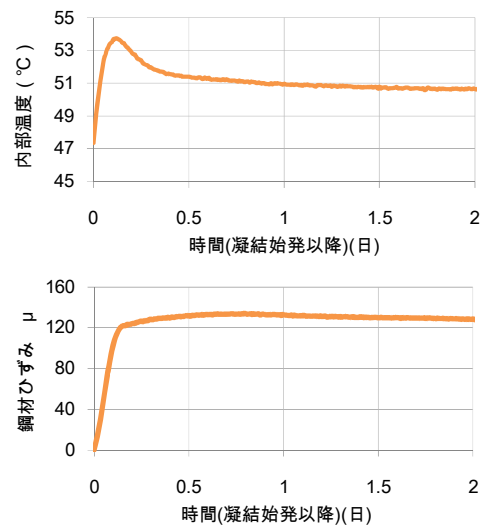


図-6 内部温度, 拘束鋼材全ひずみの経時変化(50℃)

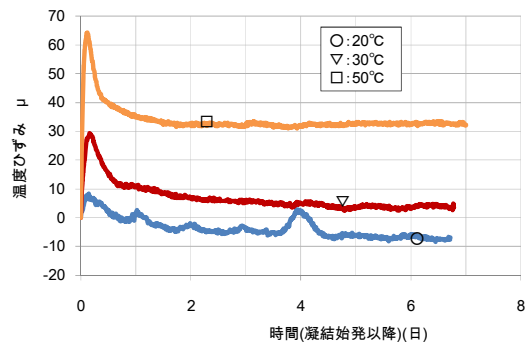


図-7 拘束鋼材の温度ひずみ

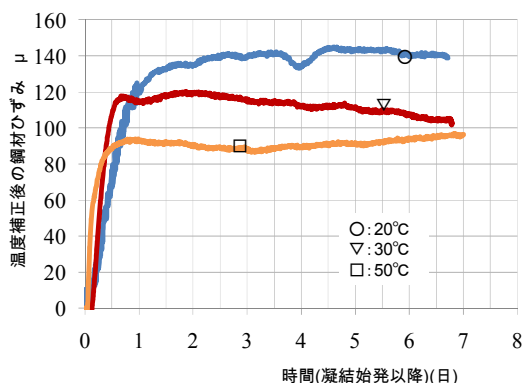


図-8 温度補正後の拘束鋼材ひずみ(20, 30, 50°C)

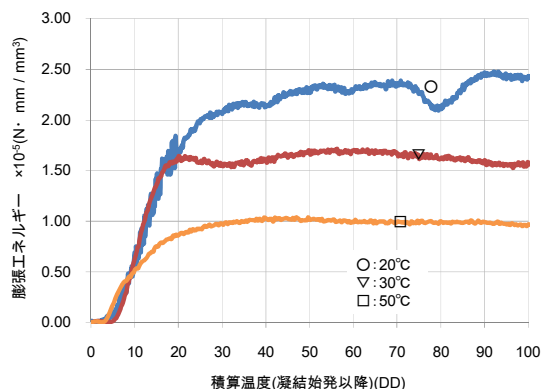


図-9 膨張エネルギーの積算温度評価(20, 30, 50°C)

140×10^{-6} となった。温度 30°C のひずみは、計測開始後 0.75 日で 120×10^{-6} まで急激に増加し、その後ほぼ一定となった。温度 50°C のひずみは、計測開始後 0.80 日で 94×10^{-6} まで急激に増加し、その後、約 90×10^{-6} となった。

4.3 膨張エネルギーの積算温度評価

図-9 に温度 20°C, 30°C, 50°C における膨張エネルギーの積算温度による評価を示す。図より、温度 20°C の膨張エネルギーは 50DD で $2.33 \times 10^{-5} \text{Nmm/mm}^3$ となった。温度 30°C の膨張エネルギーは 50DD で $1.69 \times 10^{-5} \text{Nmm/mm}^3$ となった。温度 50°C の膨張エネルギーは 50DD で $1.00 \times 10^{-5} \text{Nmm/mm}^3$ となった。この結果、本研究の範囲では、設定温度が高いほど、供試体の膨張エネルギーは、小さい傾向を示した。

温度が高くなると膨張エネルギーが小さくなる点について、高温環境下における若材齢クリープの増大⁹⁾などが挙げられており、本実験においても同様の影響が考えられる。今回の実験では、モルタルの練り上がり温度を 20°C 程度でほぼ制御した。しかし、各設定温度において、供試体内部の温度が環境試験室の設定温度に達するまでの時間差があり、それが膨張エネルギーの発現性状に影響を及ぼしたと考えられるため、今後の検討課題としたい。

5. まとめ

本研究の範囲内で得られた知見を以下に示す。設定温度が高くなるほど、膨張エネルギーの終局値は小さくなる傾向を示し、温度依存性が確認された。膨張エネルギーの温度依存性は、種々の議論があるところだが、今後、膨張材の添加量や鋼材比を変化させて、更に検討を進める必要がある。また、温度履歴が水和生成物の生成状況に与える影響も検討する必要があると考える。

謝辞

本研究を実施するに当たり、膨張材の提供を頂いた(株)電気化学工業 宮口克一氏に謝意を表す。また、実験の実施に関して同研究室 4 年生諸氏より協力を得た。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 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、高耐久に関するシンポジウム, 2003
- 2) 土木学会：膨張コンクリートの設計施工指針, コンクリートライブラリーNo.75,1992
- 3) 辻幸和：コンクリートにおけるケミカルプレストレスの利用に関する基礎研究, 土木学会論文報告集, No235, pp111-124,1975
- 4) 辻幸和：ケミカルプレストレスおよび膨張分布の推定方法, コンクリート工学, Vol.19, No.6, pp.99-105,1981
- 5) 辻幸和：コンクリート工学における膨張エネルギーの評価方法, コンクリート工学, Vol.26, No.10, pp.5-13,1988
- 6) 糟谷守ほか：膨張コンクリートの膨張エネルギーに関する実験的検討, コンクリート工学協会年次論文集, Vol.29, No.2, pp.157-162,2007
- 7) 日本コンクリート工学協会：コンクリート便覧, 技報堂, pp.215-219,1996
- 8) American Society for Testing and Materials : Standard Test Method for Restrained Expansion of Shrinkage Compensating Concrete, C 878/C 878M -09
- 9) 三谷裕二ほか：膨張材を混和したコンクリートの拘束膨張特性に及ぼす養生温度の影響, コンクリート工学年次論文集, pp.155-160, Vol.25, No.1, 2003

