

膨張材料の総エネルギー測定方法に関する基礎的研究

名城大学大学院	○羽田和香予
名城大学大学院	岡田崇宏
太平洋セメント(株)	三谷裕二
名城大学	正会員 石川靖晃

Abstract : In this study, the total chemical energy of expansive material will be estimated based on the conventional restraining expansive tests. Furthermore, another method to estimate the total chemical energy, is also conducted. Then, the total energies estimated from the both methods are compared and discussed. Consequently, it is confirmed that the magnitude of the total energies is almost same although regardless of experimental methods.

Key words : total chemical energy, expansive material, restraining expansive test

1. はじめに

著者ら¹⁾は、仕事量一定則を一般的に拡張した総エネルギー一定則に基づいて膨張材料の解析手法を構築している。この手法の大きな特徴は、変形解析における入力値として自由膨張ひずみではなく、膨張材料の総エネルギーを用いていることであり、総エネルギー一定則に基づく方法では、拘束の違いによる自由膨張量の変化が自動的に考慮される一方で、自由膨張ひずみを直接入力する方法ではそれが考慮されない。総エネルギーの測定方法として、拘束膨張試験が主であるが、この方法で得られる総エネルギーは拘束鋼材のひずみ変化のみを基に評価されており、総エネルギーが正確に評価されているかは検討の余地がある。本研究では、既往の拘束膨張試験結果から、総エネルギーを算定することを試みた。さらに、拘束膨張試験で測定された総エネルギーの妥当性を検討するために、拘束膨張試験とは別の視点で間接的に総エネルギーを評価する手法を構築し、拘束膨張試験から算定された値との比較を試みた。

2. 拘束膨張試験概要および総エネルギーの算定

2.1 拘束膨張試験概要

セメント種類を変化させた膨張コンクリートの拘束膨張試験を JIS A 6202-B 法(図-1)に基づき実施した。実験ケースは、普通、高炉 B 種、早強、中庸熱、低熱セメントの 5 ケースとした。各ケースの試験回数を表-1 に示す。使用した膨張材は石灰系のものを使用し、膨張材混入量は全ケース 20kg/m³ である。測定時間は 1, 2, 3, 7 日とし、測定環境温度は 20℃一定とした。

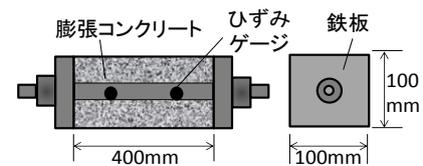


図-1 拘束膨張試験
(JIS A 6202-B 法)

表-1 各ケースの試験回数

水セメント セメント 種類	55%	50%	45%	40%
普通	25	14	3	3
高炉B種	12	2	1	1
早強	—	2	1	1
中庸	—	2	1	1
低熱	—	2	1	1

(回)

2.2 総エネルギー算定

前述の実験により得られた拘束膨張ひずみの経時変化とヤング係数の経時変化から、膨張コンクリートの総エネルギーの評価を試みた。拘束膨張試験では拘束鋼材ひずみの経時変化のみが測定され、拘束鋼材になされるひずみエネルギーは測定可能である。しかし、総エネルギーを評価するためには、膨張コンクリート自身になされるひずみエネルギーを何らかの形で求める必要がある。本研究では、力のつり合い条件および変形の適

合条件を仮定することにより、コンクリート自身のひずみエネルギーを評価した。その結果、最終的に単位体積当たりの総エネルギー U_{che} は次式にて評価される。

$$U_{che} = \frac{1}{2} \rho E_s \varepsilon_s^2 + \sum \rho \frac{E_s^2}{E_c} \varepsilon_s \Delta \varepsilon_s \quad (1)$$

ここで、 ρ は拘束鋼材比、 E_s 、 E_c は拘束鋼材及び膨張材料のヤング係数、 ε_s は拘束鋼材ひずみ、 $\Delta \varepsilon_s$ は拘束鋼材のひずみ増分であり、 Σ は時間当たりの総和を求めることを意味している。

式(1)にて、総エネルギーを評価するために、拘束鋼材の膨張ひずみおよび膨張コンクリートのヤング係数の経時変化を実験値ならび JCI ひび割れ制御指針の方法に従い推定した。拘束鋼材の膨張ひずみは次式で推定した。

$$\varepsilon_{ex}(t) = \varepsilon_{ex,\infty} \left[1 - \exp \left\{ -a_{ex} (t - t_{ex,0})^{b_{ex}} \right\} \right] \quad (2)$$

ここで、 $\varepsilon_{ex}(t_e)$ は有効材齢 t_e (日) における膨張ひずみ ($\times 10^{-6}$)、 $\varepsilon_{ex,\infty}$ は膨張ひずみの終局値 ($\times 10^{-6}$)、 a_{ex} 、 b_{ex} はセメントの種類が膨張ひずみの進行特性に及ぼす影響を表す係数、 $t_{ex,0}$ は膨張開始時点の有効材齢(日)である。なお、 a_{ex} 、 b_{ex} 、 $t_{ex,0}$ は、セメントの種類ごとに JCI ひび割れ制御指針²⁾に提示されている値を使用した。ヤング係数は次式で算定した。

$$E_c(t_e) = C_3 f'_c(t_e)^{C_4} \quad (3)$$

$$f'_c(t_e) = \frac{t_e - S_f}{a + b(t_e - S_f)} f'_c(t_n) \quad (4)$$

ここで、 $E_c(t_e)$ はヤング係数(N/mm²)、 $f'_c(t_e)$ は圧縮強度である。 C_3 、 C_4 は係数であり、それぞれ 6300、0.45 を標準とする。 a 、 b はセメントの種類および管理材齢に応じた圧縮強度の発現を表す係数、 S_f はセメントの種類に応じた硬化原点に対応する有効材齢(日)、 $f'_c(t_n)$ は管理材齢における圧縮強度(N/mm²)である。式(3)(4)中のすべてのパラメータは、セメントの種類ごとに JCI ひび割れ制御指針を基に決定する。

2. 3 セメントの種類ごとの総エネルギーの算定

上記にて推定した拘束膨張ひずみ履歴およびヤング係数履歴を式(1)に代入することで求めたセメントの種類ごとの単位体積当たりの総エネルギー履歴を図-2 に示す。図中にプロットされている値は、各材齢で式(1)を用いて算定した総エネルギーである。プロットされた値のバラツキは大きい、平均的な膨張エネルギーを知るために、おおまかではあるが、各材齢における総エネルギーの実測値の平均に対して回帰を行った。どのケースにおいても、材齢 6 日程度で総エネルギーは安定していることがわかる。単位体積あたりの総エネルギー最大値の平均は、普通セメントでは $48 \times 10^{-6} \text{N/mm}^2$ 、高炉セ

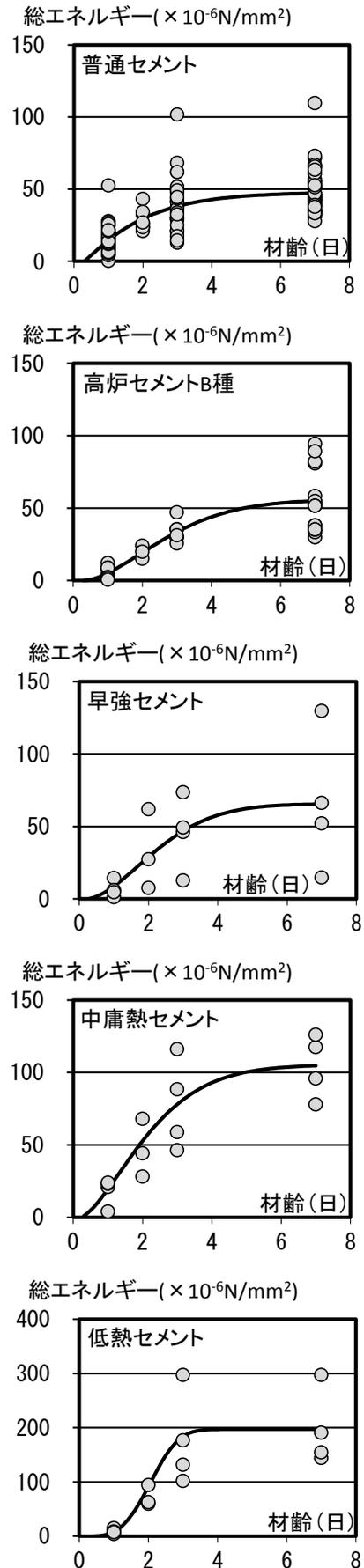


図-2 各セメントの総エネルギー推定結果

表-2 示方配合表

最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	水結合材比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)						
					W	C	膨張材 EX	S	G	混和剤	
										SP*1	AE*2
20	15±1.5	6.5±1.5	55	47	175	318	0	830	951	3.82	0.016
						298	20				
						278	40				

*1 高性能 AE 減水剤 *2 空気量調整剤

メント B 種では $56 \times 10^6 \text{N/mm}^2$, 早強セメントでは $66 \times 10^6 \text{N/mm}^2$, 中庸熱セメントでは $105 \times 10^6 \text{N/mm}^2$, 低熱セメントでは $197 \times 10^6 \text{N/mm}^2$ である。このことから、膨張コンクリートの総エネルギーのオーダーは、普通セメント, 高炉セメント B 種, 早強セメントでは、ほぼ同様となる一方, 中庸熱セメント, 低熱セメントの順で総エネルギーは大きくなることが確認された。

3. 別の視点からの総エネルギー測定方法および評価

石川ら¹⁾によると, 総エネルギーは最終的に次式でも表せられる。

$$U^{che} = -\sum \sigma \cdot \Delta \epsilon^{che} \quad (5)$$

ここで, U^{che} は単位体積当たりの総エネルギーの時間増分, σ は膨張材料内に生じる応力, $\Delta \epsilon^{che}$ は膨張材に生じる自由膨張ひずみ成分の時間増分である。式(5)に基づき総エネルギーを実験的に評価することを試みた。

拘束膨張試験とは別の視点で新たに提案する総エネルギー測定装置を図-3 に示す。膨張材料有と無の円柱供試体を 2 つ直列に配列し, 上から一定持続荷重を作用させる。そして, 各供試体に張り付けられたひずみゲージよりひずみの経時変化を測定する。この時, 膨張材有の供試体の全ひずみおよび, 膨張材無の供試体の全ひずみ増分 $\Delta \epsilon_1$, $\Delta \epsilon_2$ は次式で表される。

$$\begin{aligned} \Delta \epsilon_1 &= \Delta \epsilon_1^{ep} + \Delta \epsilon_1^c + \Delta \epsilon_1^{sh} + \Delta \epsilon_1^{che} \\ \Delta \epsilon_2 &= \Delta \epsilon_2^{ep} + \Delta \epsilon_2^c + \Delta \epsilon_2^{sh} \end{aligned} \quad (6)$$

ここで, 上付き添え字 ep , c , sh および che は, それぞれ弾塑性, クリープ, 収縮および膨張材料に起因する自由膨張ひずみである。同一荷重条件および同一環境条件下であれば, 近似的に $\Delta \epsilon_1^c = \Delta \epsilon_2^c$, $\Delta \epsilon_1^{sh} = \Delta \epsilon_2^{sh}$ とみなすことができる。両供試体の全ひずみの差は次式となる。

$$\Delta \epsilon_1 - \Delta \epsilon_2 = \Delta \epsilon_1^{ep} - \Delta \epsilon_2^{ep} + \Delta \epsilon_1^{che} \quad (7)$$

一定持続応力 σ を載荷させた瞬間を基準にして測定開始した場合, 弾塑性ひずみ増分は 0 になるため, 式(7)における全ひずみの差は自由膨張ひずみ成分となる。よって式(5)より単位体積当たりの総エネルギーを評価することができる。

図-3 の装置を用いて総エネルギーの評価を行った。表-2 に示すような異なる膨張材混入量配合ケースを設定した。膨張材混入量は, $20(\text{kg/m}^3)$, $40(\text{kg/m}^3)$ の 2 ケースを設定した。使用したセメントは普通セメント, 高炉セメント B 種の 2 ケースに設定した。材齢 1 日後から持続応力を生じさせ, 供試体ひずみの測定を開始した。持続応力は, 混入量 $20(\text{kg/m}^3)$ に関して $0.8(\text{N/mm}^2)$, $1.6(\text{N/mm}^2)$ の 2 ケース, 混入量 $40(\text{kg/m}^3)$ に関して $0.8(\text{N/mm}^2)$, $1.2(\text{N/mm}^2)$ の 2 ケースに設定した。持続応力 $0.8(\text{N/mm}^2)$ は普通セメントで 6 回, 高炉

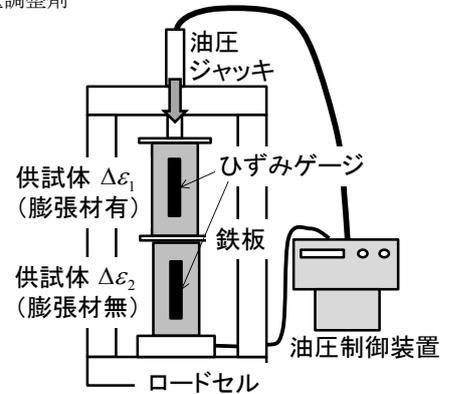


図-3 別の試験による総エネルギー測定方法

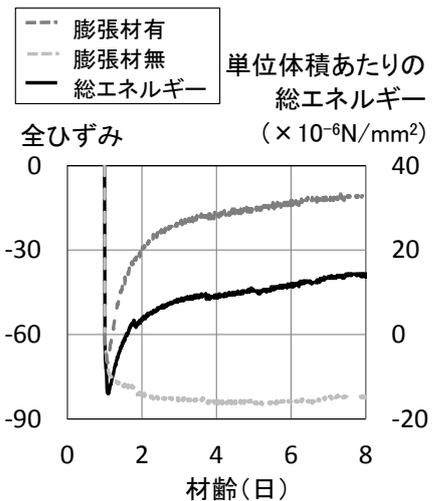


図-4 全ひずみおよび総エネルギー経時変化

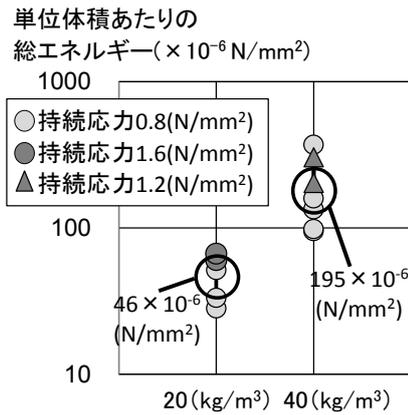
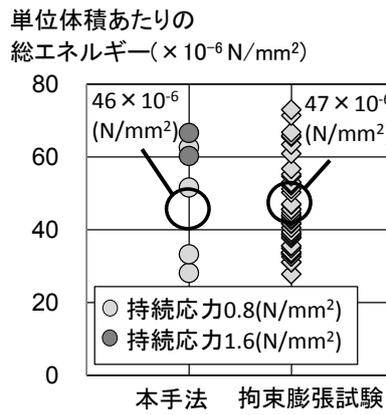
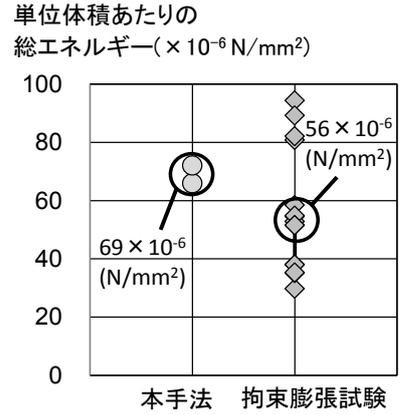


図-5 膨張材混入量に関する総エネルギーの比較



普通セメント



高炉セメント B 種

図-6 測定手法の違いによる総エネルギーの比較

セメント B 種で 2 回、1.2(N/mm²)および 1.6(N/mm²)は普通セメントで 2 回実施した。図-4 に膨張材有、無のそれぞれの全ひずみと単位体積あたりの総エネルギーの経時変化の一例を示す。経過時間に対して総エネルギーは増大し、材齢 7 日程度でほぼ一定となることが伺える。

図-5 に普通セメントの膨張材混入量に関する単位体積当たりの総エネルギー比較を示す。図中の総エネルギーは、いずれも経過時間が十分経過した時の安定した値を取っており、また、丸で囲まれた数値は総エネルギーの平均値を示す。混入量 20(kg/m³)では大凡 30~70×10⁻⁶(N/mm²)の間に、混入量 40(kg/m³)では大凡 100~370×10⁻⁶(N/mm²)に総エネルギーが存在していることが分かる。各混入量の総エネルギー平均値を比較すると、混入量 40(kg/m³)の総エネルギーは、混入量 20(kg/m³)の 4~5 倍となっていることから、膨張材混入量を 2 倍にすると、総エネルギーは 2 倍以上になることが確認された。

4. 両手法による総エネルギーの比較

次に、2. の拘束膨張試験および 3. より説明した試験より算定した普通セメントと高炉セメントの単位体積当たりの総エネルギーとの比較を行った。その結果を図-6 に示す。図中の拘束膨張試験の総エネルギーは、材齢 7 日の総エネルギーをとっている。両手法共に高炉セメントの総エネルギーは普通セメントの 1.2~1.5 倍となっていることが確認された。高炉セメントについては実験ケースが少ないが、両手法共に測定された総エネルギーがほぼ同等となっていることから、本研究の範囲では本手法と拘束膨張試験は、ほぼ同等な精度で総エネルギーが測定可能であることが確認された。一方で、両手法共に総エネルギーのバラツキが大きいことも確認された。今後、F 検定等を通してセメント種類による総エネルギーの違いを統計的に検討したいと考えている。

5. まとめ

拘束膨張試験結果から、セメント種類ごとに総エネルギーの評価を試みた。さらに、拘束膨張試験とは別の視点から総エネルギーを測定する装置を開発し、拘束膨張試験に基づく総エネルギー評価結果と比較検討を行った。その結果、普通セメントと高炉セメントでは、測定方法が異なっていたとしても総エネルギーはほぼ同等な精度で測定されることが確認された。今後、実験ケースを増やし、さらにセメントの種類を変えて継続して統計的な検証を行っていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 林陸太, 石川靖晃: 一軸拘束状態下における膨張コンクリートの仕事量に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol. 29, No. 1, pp. 501-506, 2007
- 2) 日本コンクリート工学協会: マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008, 2008. 11