セメント種類の違いが膨張コンクリートの総エネルギーに及ぼす影響

名城大学　学生会員　○岡田崇宏　　名城大学　学生会員　　羽田和香予
太平洋セメント株式会社　　正会員　　三谷裕二　　名城大学　　正会員　　石川靖晃

1. はじめに

変形解析を行う際、膨張材の効果を導入する手法は大きく分けて２つある。ひとつは、自由膨張ひずみを直接初期ひずみとして与える手法である。この方法では、自由膨張ひずみが入力値となり、JCI ひび割れ制御指針では、セメントの種類に応じて自由膨張ひずみの入力値が規定されている [1)]。もうひとつは総エネルギー一定則に基づき初期ひずみを決定する手法である [2)]。この場合膨張材料の総エネルギーが入力値となる。

本研究では、セメントの種類を変化させた拘束膨張試験を実施し、その結果から総エネルギーを評価することで、セメント種類の違いが総エネルギーに及ぼす影響について検討した。

2. 膨張コンクリートの拘束膨張実験概要および総エネルギー評価方法

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(B 法)を JIS6202 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、低発熱セメントの 5 ケースとした。水セメント比は全ケースにおいて 50%である。使用した膨張材は低添加型のものであり、混入量は全ケース 20kg/m³ である。いずれのケースでも試験回数は 1 回である。測定時間は 1,3,7 日とし、その間の環境温度は 20℃一定とした。拘束膨張ひずみの経時変化を表-1 に示す。また別途測定したヤング率の経時変化を表-2 に示す。ただし、低発熱セメントのヤング率は測定されていない。

表-1 拘束膨張ひずみの経時変化

	1日	3日	7日
普通	84	175	193
高炉	55	157	212
早強	106	197	210
中庸熱	117	241	243
低熱	93	401	401

（単位はマイクロ）

表-2 ヤング率の経時変化

	3日	7日
普通	23.7	28.6
高炉	19.5	23.3
早強	20.5	27.9
中庸熱	20.9	25.6
低熱	—	—

（単位はGPa）

2.2 総エネルギー評価方法

前述の実験結果から、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。

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

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 は拘束鋼材のひずみ、$\Delta\varepsilon_s$ 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に 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。

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

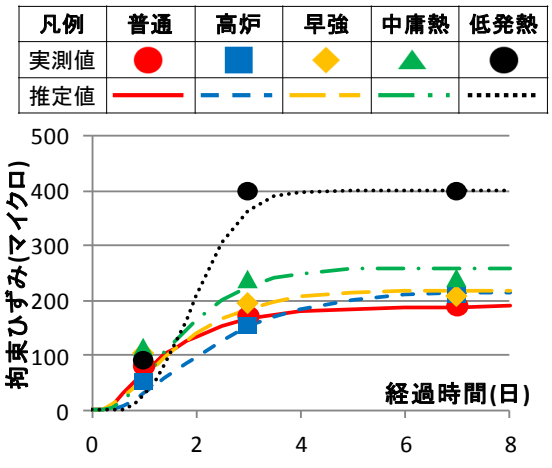

図-1 拘束膨張ひずみの推定結果

キーワード　：拘束膨張試験　拘束膨張ひずみ　ヤング率　総エネルギー　ひび割れ制御指針
連絡先　　：住所：愛知県名古屋市天白区塩釜口 1-105　電話：052-838-2343

ここで、$\varepsilon_{ex}(t_e)$は有効材齢t_e(日)における膨張ひずみ(×10-6)、$\varepsilon_{ex,\infty}$は膨張ひずみの終局値(×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わす係数、$t_{ex,0}$は膨張開始時点の有効材齢(日)である。式(2)にて推定した拘束膨張ひずみ履歴を図-1 に示す。なお、$a_{ex},b_{ex},t_{ex,0}$は、セメントの種類ごとにJCI ひび割れ制御指針に提示されている値を使用した。$\varepsilon_{ex,\infty}$は表-1 の実験値と適合するように与えた。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t_nにおける圧縮強度(N/mm2)である。推定したヤング係数履歴を図-2 に示す。式(3)(4)中の全てのパラメータは、セメントの種類ごとにJCI ひび割れ制御指針を基に決定した。低発熱セメントでは実測値がないため、推定値との比較はできないが、他のセメントにおいては、早強セメントを除き実測値は推定式付近に存在していることが分かる。

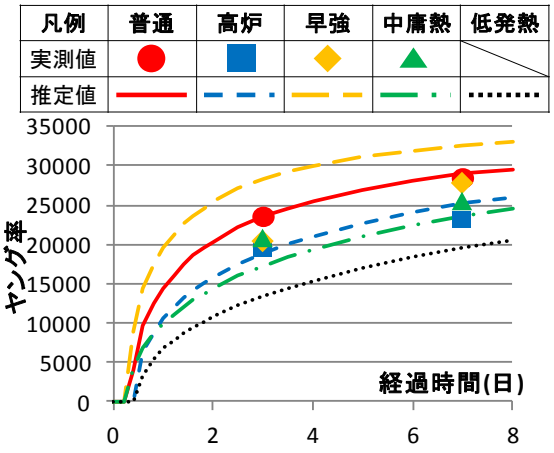

図-2 ヤング率の推定結果

3. セメント種類ごとの総エネルギーの評価

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単位体積当たりの総エネルギー履歴を図-3 に示す。どのケースにおいても、材齢7 日程度で総エネルギーは安定していることがわかる。材齢8 日目における単位体積当たりの総エネルギーは、普通セメントでは52.0×10-6N/mm2、高炉セメントB種では66.6×10-6N/mm2、早強セメントでは67.5×10-6N/mm2、中庸熱セメントでは100.9×10-6N/mm2、低発熱セメントでは249.5×10-6N/mm2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、早強セメント、高炉セメントB 種ではほぼ同様となる一方、中庸熱セメント、低発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。

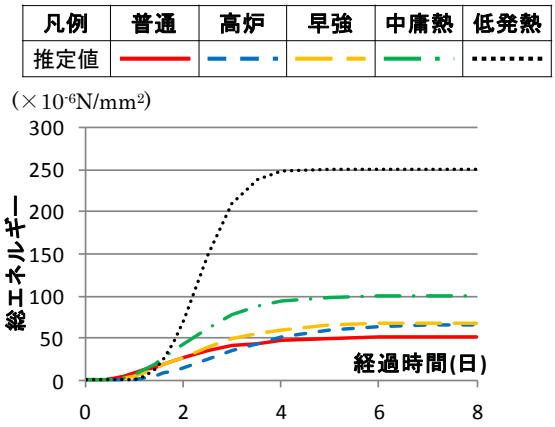

図-3 総エネルギー量の推定結果

4. おわりに

セメント種類を変化させた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。その結果、低添加型膨張材を使用し、混入量を20kg/m3とした場合、総エネルギーは、普通セメント、早強セメントおよび高炉セメントB種では50～70×10-6N/mm2程度、中庸熱セメントでは100×10-6N/mm2程度、低発熱セメントでは250×10-6N/mm2程度発生することが確認された。実験ケースが少ないため、今後多くの拘束膨張試験結果を収集していく必要がある。

参考文献

1) 社団法人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)
2) 柴田要、石川靖晃、田辺忠顕：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