

各種セメントを用いた膨張コンクリートのひずみ曲線の検討

太平洋セメント 正会員 兵頭 彦次 太平洋セメント 正会員 谷村 充
住友大阪セメント 正会員 鈴木 康範 法政大学 正会員 溝淵 利明

1. はじめに

コンクリートのひび割れ対策として、膨張材を用いる事例が増えている。その効果についてはFEMなどを用いて解析的に評価する取組みが行われているが、課題のひとつに膨張ひずみの設定がある。膨張ひずみを設定する方法については各種研究がなされているが、これらの手法はセメントの種類や水結合材比等の適用範囲に制約がある。そのため実際に解析的評価を行う場合、JIS A 6202 附属書 2 の試験で得られる一軸拘束を受けた膨張ひずみを入力物性値として設定することも多い。同試験による膨張ひずみを解析に直接与えることについては、実構造物における構造条件、環境条件などを勘案すれば議論の余地があるが、最大の利点は膨張コンクリートの標準的な試験として用いられているため広範なデータを有することである。そこで本検討では、解析に用いる膨張ひずみの便宜的な適用範囲拡張を目的として、膨張材供給メーカーから収集した広範なデータを整理し、セメント種類が異なる場合の膨張ひずみ曲線を提示する。またマスコンクリートと同様の温度履歴下でのコンクリート応力について、本ひずみ曲線を用いた解析値と実測値の比較を行い同曲線の位置づけについて示す。

2. 膨張ひずみ曲線の検討

(1) 収集データの範囲

表 - 1 に、本検討で収集したデータの対象範囲を示す。収集データは、試験室および現場で採取された膨張コンクリートについて JIS A 6202 に準じて膨張ひずみを測定したものである。対象とするセメントの種類は、ポルトランドセメント系が普通(N)、中庸熱(M)、低熱(L)、早強(H)、混合セメント系が高炉セメント B 種(BB)である。膨張材の種類は、石灰系および CSA-石灰複合系の 2 種類であり、いずれも低添加型のもを標準使用量 20kg/m^3 内割置換している。水結合材比は 40% ~ 60% の範囲である。

(2) 膨張ひずみ曲線

収集したデータより、水結合材比が膨張ひずみの発現性に与える影響は小さいこと、セメント種類に応じた膨張ひずみの発現性は膨張材の種類によらず同様の傾向を示すこと、膨張材の違いが膨張ひずみの発現性に与える影響が小

表 - 1 データ収集の範囲(単位膨張材量: 20kg/m^3)

セメントの種類	W/(C+EX)(%)	
	石灰系	CSA-石灰複合系
N	40, 50, 55, 60	40, 45, 50
BB	50, 55	40, 45, 50
M	50	40, 45, 50
L	50	40, 45, 50
H	50	40, 45, 50

さいことが確認された。そこで、膨張ひずみを条件によらずセメント種類別に平均化し、材齢との関係を示したものを図 - 1 に示す。N, BB, H の膨張ひずみは概ね同等であり終局ひずみはいずれも 200×10^{-6} 程度であった。一方、低発熱型のセメントは膨張ひずみが相対的に大きく、終局ひずみは M が 300×10^{-6} 程度、L が 400×10^{-6} 程度であった。

次に収集データ数が多い N, BB を対象に、データ解析を行った。図 - 2 に、N および BB の全収集データを対象とした材齢と膨張ひずみの関係をそれぞれ示す。またこれらを式(1)を用いて回帰した結果を併記する。

$$\varepsilon_{ex} = \varepsilon_{ex,\infty} \{1 - \exp(-\alpha t^\beta)\} \quad (1)$$

ε_{ex} : 膨張ひずみ ($\times 10^{-6}$), $\varepsilon_{ex,\infty}$: 終局ひずみ ($\times 10^{-6}$), α, β : 定数
膨張ひずみの実測値は、標準的な基準材齢である 7 日において $150 \times 10^{-6} \sim 250 \times 10^{-6}$ の範囲であった。ただし、個々の膨張ひずみの発現性は一定のパラッキを有していた。解析を行う上で、膨張ひずみを大きく見積ることは応力やひび割れ発生の結果を危険側に評価する可能性がある。また標準的な試験と実構造物における諸条件は当然異なる。そこで実測データを用いて統計的な検討を加えた。具体的には、材齢 7 日の

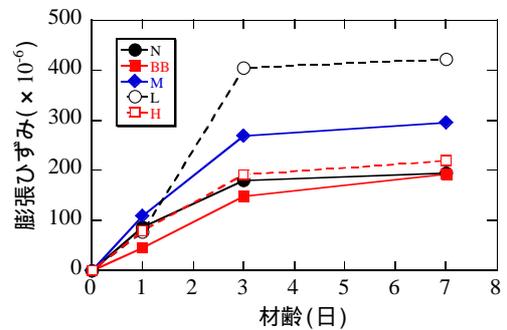


図 - 1 膨張ひずみの平均値と材齢の関係

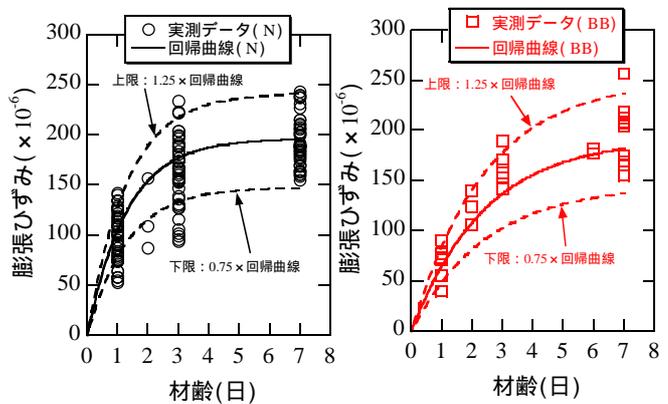


図 - 2 膨張ひずみの実測データと材齢の関係

キーワード 膨張材, セメント種類, マスコンクリート, 温度応力解析

連絡先 〒285-8655 千葉県佐倉市大作 2-4-2 太平洋セメント(株)中央研究所 TEL043-498-3804

データを用いて 95%信頼限界値を算出した。N の信頼限界値の上限および下限はそれぞれ 242×10^{-6} , 150×10^{-6} (平均値: 196×10^{-6} , 標準偏差: 28×10^{-6}), BB の上限および下限は 251×10^{-6} , 146×10^{-6} (平均値: 198×10^{-6} , 標準偏差: 32×10^{-6})であった。平均値に対する上限値の比は, N, BB の場合それぞれ 1.24, 1.27, 下限値の比は 0.76, 0.73 でありセメント種類によらずほぼ一定であった。そこで平均値に対する限界値の比をセメント種類にかかわらず, 上限 1.25, 下限 0.75 と定め, それぞれを回帰曲線に乗じたときの曲線(以下, 上限膨張ひずみ, 下限膨張ひずみ, と称す)を図 - 2 中に示す。

3. 膨張ひずみ曲線を用いた応力解析

(1) 検証方法

応力解析は, 一般的な温度応力解析で用いられている, 時間ステップあたりの増分ひずみから鋼材とコンクリートの力の釣合い条件によって増分応力を求め, これを積分する方法を採用した。膨張ひずみは上限および下限膨張ひずみを用い, 有効材齢を用いて温度の影響を考慮した。物性値は, コンクリートの熱膨張係数を 9.5×10^{-6} (インバー鋼とコンクリートの線膨張係数分の差)とし, その他は既存の予測式¹⁾を用いた。検証には, インバー鋼(ヤング係数: 140 kN/mm^2 , 線膨張係数: 0.5×10^{-6})を用いた一軸拘束供試体(供試体寸法: $100 \times 100 \times 800 \text{ mm}$, 鋼材比: 5.7%)の試験結果を採用した。供試体に与えた温度履歴は図 - 3 のとおりである。なお対象とするセメントは N および BB とした。

(2) 検証結果

まず膨張材無混和の場合の実測値を予測することで, 膨張ひずみ以外の物性値の適合性を検証した(図 - 4)。N の予測値は実測値の再現性が高く, 設定した物性値が妥当と考えられた。一方, BB の再現性は N に比べて相対的に低く, 初期材齢での圧縮応力, 温度降下終了時点での引張応力がともに実測より小さくなった。これについてはさまざまな要因が考えられるが, 両セメントの挙動から, N よりも BB の熱膨張係数が大きいという指摘³⁾が影響していると推察され, これについては詳細な検討が必要と考えられた。いずれにしても予測値は実挙動を概ね再現できており, 膨張材を混和した場合についても同じ物性値を用いて予測することとした。

図 - 5 に, 膨張材を混和した場合の予測値と実測値の比較を示す。上限膨張ひずみを用いて予測した場合, 初期の圧縮応力を良く再現できたが, 温度降下過程では乖離し引張応力を小さく評価した。下限膨張ひずみを用いた場合は逆に, 温度降下過程での再現性が高かった。BB の最終的な応力は若干小さく評価したが, その差は膨張材無混和での差と同程度であり, 設定した膨張ひずみの影響ではないと考えられた。これらのことから 2 種類の膨張ひずみによる予測は, 対象期間によって実測値との適合性が異なることがわかった。一般に応力解析の対象として重要視される温度降下時の外部拘束に係る場合には, 下限膨張ひずみを解析に用いることができると考えられる。そこで, 便宜的に各種セメントの膨張ひずみの平均値を回帰した曲線に 0.75 を乗じた結果を表 - 2 に示す。なお解析での使用を加味し ϵ_{ex} の値を丸めた。

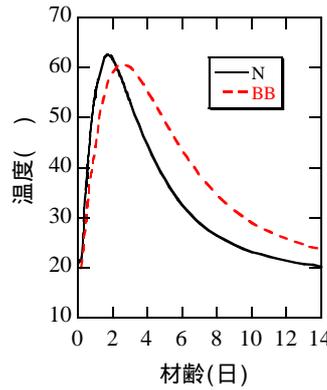


図 - 3 温度履歴

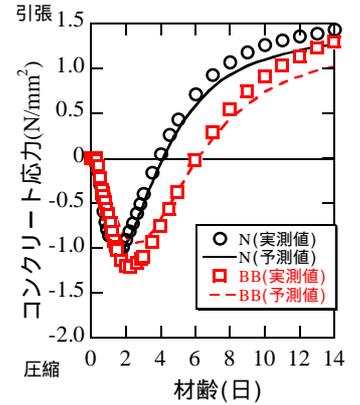


図 - 4 膨張材無混和のコンクリートの応力解析結果

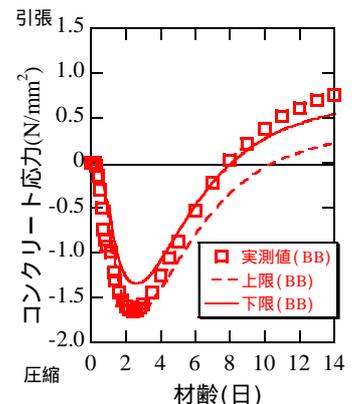
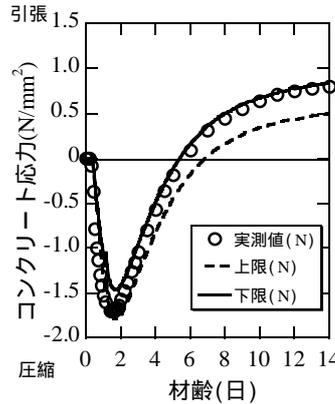


図 - 5 膨張コンクリートの応力解析結果

表 - 2 膨張ひずみ回帰曲線の各係数

セメントの種類	ϵ_{ex} ($\times 10^{-6}$)	α	β
N	150	0.69	1.11
BB	145	0.27	1.53
M	220	0.46	1.49
L	315	0.21	2.51
H	165	0.45	1.38

4. まとめ

JIS A 6202 附属書 2 の試験で得られた膨張ひずみについて, 広範なデータを収集, 整理し, マスコンクリートと同様の温度履歴下でのコンクリート応力について予測値の比較をおこなった。その結果, 膨張ひずみの平均値の回帰曲線に 0.75 を乗じた曲線を用いることができると考えられ, これに基づき各種セメントの膨張ひずみ曲線を提示した。

本検討は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改訂委員会(委員長: 広島大学教授 佐藤良一)の活動の一環として行ったものであることを付記する。

参考文献

- 1) 三谷ほか: マス養生温度履歴下における膨張コンクリートの応力評価手法, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1295-1300, 2006
- 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に関する研究委員会報告書, pp.160, 2006
- 3) 後藤ほか: コンクリートの線膨張係数に関する基礎的研究, 土木学会第 62 回年次学術講演会, 部門, pp.1177-1178, 2007