

材料の設計用値がマスコンクリートの温度ひび割れ解析結果に及ぼす影響

太平洋コンサルタント(株)
太平洋セメント(株)
太平洋セメント(株)
(財)電力中央研究所

正会員
正会員
正会員
フェロー会員

○倉内 英敏
谷村 充
兵頭 彦次
金津 努

1. はじめに

2007 年制定のコンクリート標準示方書（以下，JSCE と略す）では，温度応力解析の物性値の見直しが行われ，高炉セメント B 種の断熱温度上昇式の変更，および低熱ポルトランドセメントの断熱温度上昇式が追加された．また，2008 年に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」（以下，JCI と略す）の改定が行われ，最新の知見や新たな実験により材料の設計用値が整備されるとともに，3 次元有限要素法による解析手法が提示された．本稿では，JSCE および JCI の設計用値を用いた温度応力解析を実施し，セメントの種類が解析結果に及ぼす影響に着目して検討を行った．

2. 解析の概要

解析モデルは，図-1 に示すように，既設底版上に打設される壁状構造物の 1/4 モデルとした．壁延長：10m，壁高さ：4m，壁厚：1.0，1.5，2.0 および 2.5m に変化させた．境界条件は，壁側面を型枠，上面を散水養生とし，それぞれの熱伝達率を 8 および 14W/m²℃とした．脱枠時期は NC：5 日，BB および LC：7 日とした．外気温は東京都の 7 月 1 日～8 月 31 日の日平均気温(2006～2008 年の平均)とし，打込み温度は外気温に 5℃を加えたものとした (28.7℃)．拘束条件は地盤下面および軸対称断面を拘束面とした．解析期間は打込み後 2 ヶ月間とした．

セメントの種類は，普通ポルトランドセメント (NC)，高炉セメント B 種 (BB) および低熱ポルトランドセメント (LC) を対象とした．表-1 に JSCE および JCI の材料の設計用値を示す．なお，BB については，JSCE2007 年版に加えて JSCE2002 年版の設計用値を用いた場合についても解析を行った．JCI の圧縮強度式は，水セメント比 (W/C) の関数となっているため，設計基準強度（ここでは，材齢 28 日・30N/mm²）を満たす W/C を設定した．JSCE では，LC の圧縮強度式が提示されていないため，文献 3)を参考にして圧縮強度発現式の係数を定めた．自己収縮ひずみについて，JCI はセメントの種類や W/C によらず全てに考慮することとなっている．一方，JSCE では現状，NC についてのみ自己収縮ひずみ予測式の係数が提示されており，また，自己収縮の影響が無視できない場合に考慮することとされている．JSCE による場合，検討した強度レベルでは自己収縮の影響を無視するのが一般的であると考えられるため，これを考慮せずに解析を行った．ただし，NC については自己収縮を考慮したケースについても解析を行い比較した．

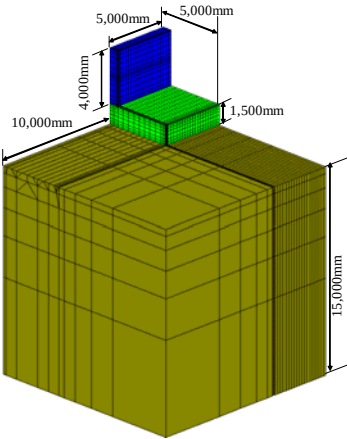


図-1 解析モデル

表-1 設計用値

		JSCE				JCI		
セメント種類		NC	BB ¹	BB ²	LC	NC	BB	LC
W/C		—	—	—	—	63	60	53
セメント量		300 kg/m ³						
設計基準強度		材齢28日:30 N/mm ²						
打込温度		28.7℃						
断熱温度特性		$Q = Q_{\infty} (1 - e^{-at})$				$Q(t) = Q_{\infty} \left[-e^{-\frac{t-t_0}{\tau}} \right]$		
	Q_{∞}	45.1	45	50	39.5	49.9	50.8	40.9
	α, τ	1.481	1.327	1.034	0.6	1.709	1.099	0.772
	S	—	—	—	—	1	1	0.512
	t_0	—	—	—	—	0.094	0.033	0.202
圧縮強度 (N/mm ²)		$f'_c(t) = \frac{t}{a + b \cdot t} \cdot d \cdot f'_{ck}$				$f'_c(t_e) = \frac{t_e - S_f}{a + b \cdot (t_e - S_f)} f'_c(t_a)$		
	a	4.5	6.2	25.7	4.151	7.967	14.466	
	b	0.95	0.93	0.72	0.849	0.71	0.473	
	d	1.11	1.15	1.63	—	—	—	
	S_f	—	—	—	0.37	0.42	0.5	
引張強度(N/mm ²)		$f_t(t) = 0.44 \times \sqrt{f'_c(t)}$				$f_t(t_e) = 0.13 \times f'_c(t_e)^{0.65}$		
有効ヤング係数 (N/mm ²)		$E_c(t) = \varphi(t) \times 4700 \times \sqrt{f'_c(t)}$ $\varphi(3d) = 0.73$ $\varphi(5d) = 1.00$				$E_c(t_e) = \varphi(t_e) \times 6300 \times \sqrt{f'_c(t_e)^{0.65}}$ $\varphi(T_{max}) = 0.42$ $\varphi(T_{max} + 1d) = 0.65$		
自己収縮		考慮する必要がある場合				全てに考慮		
線膨張係数(×10 ⁻⁵)		10				NC,LC:10 BB:12		

*1:JSCE 2002年版
*2:JSCE 2007年版

キーワード 温度応力解析，3次元有限要素法，マスコンクリート，温度ひび割れ指数

連絡先 〒285-8655 千葉県佐倉市大作 2-4-2 ㈱太平洋コンサルタント TEL043-498-3882

3. 解析結果

表-2 解析結果一覧

最小温度ひび割れ指数および最小温度ひび割れ指数発生箇所(壁中央断面の高さ450mm の位置)における最高温度を表-2 にまとめて示す。また、最高温度と壁厚および最小温度ひび割れ指数の関係を図-2 および図-3 に示す。

壁厚 (m)	最小温度ひび割れ指数									最高温度 (°C)								
	JSCE					JCI				JSCE				JCI				
	NC①	NC②	BB-02	BB-07	LC	NC	BB	LC		NC	BB-02	BB-07	LC	NC	BB	LC		
1.0	0.98 (11)	0.88 (11)	0.98 (12)	0.98 (11)	1.42 (12)	0.58 (10)	0.53 (11)	1.26 (10)		54.9	53.7	54.0	43.2	59.1	55.1	43.6		
1.5	0.80 (19)	0.74 (17)	0.83 (18)	0.79 (19)	1.16 (17)	0.56 (17)	0.52 (16)	1.23 (17)		58.9	57.8	58.7	47.2	63.4	59.8	46.2		
2.0	0.70 (35)	0.66 (28)	0.73 (27)	0.69 (33)	1.04 (22)	0.54 (31)	0.51 (25)	1.19 (26)		60.9	60.0	61.5	49.9	65.5	62.6	47.8		
2.5	0.66 (39)	0.61 (40)	0.68 (38)	0.65 (37)	0.96 (32)	0.55 (38)	0.51 (42)	1.17 (36)		61.8	61.0	62.9	51.6	66.3	63.9	48.8		

注) 最小温度ひび割れ指数の欄の()は、その指数が発生した日数を表す。
NC①は自己収縮を考慮しない場合、NC②は自己収縮を考慮した場合を表す。
BB-02は2002年版、BB-07は2007年版を表す。

(1) 最高温度

NCの最高温度は、JCIによる場合がJSCEよりも明らかに高く、両者の差は4.2~4.6°Cであった。BBの場合、Nと同様にJCIがJSCEを上回ったが、その差は1.0~1.1°Cと小さかった。一方、LCの場合、JSCEがJCIを上回り、壁厚の増大に伴って両者の差が大きくなる傾向となった。これは、両者の断熱温度上昇式の形式が異なることが影響している可能性が考えられる。LCとNCの最高温度差は壁厚に応じJSCE: 10.2~11.7°C, JCI: 15.5~17.5°Cであり、JCIの方がセメント間の差がより大きく現れる結果となった。LCとBBの差についても同様の傾向が認められる(JSCE: 10.8~11.6°C, JCI: 11.5~15.1°C)。

(2) 最小温度ひび割れ指数

NCの最小温度ひび割れ指数は、壁厚が大きくなるほどJSCEとJCIの差が小さくなる傾向となった(JSCE: 0.61~0.88, JCI: 0.55~0.58)。また、JSCEで自己収縮を考慮した場合、JCIとの差は自己収縮を考慮しない場合よりも小さくなった。BBの最小温度ひび割れ指数についてもNCと同様に、壁厚の増加に伴ってJSCEとJCIの差が小さくなった。一方、LCの場合、壁厚1.5mのときに両者の差が最も小さく、壁厚の増加とともに大きくなった。

NCとBBの最小温度ひび割れ指数は、JSCEでは同等もしくはBBの方が幾分大きくなった(最大で0.03)。一方、JCIの場合、最高温度はBBがNCよりも低くなったが(図-2)、最小温度ひび割れ指数はBBの場合が0.03~0.05ほど小さくなった。LCとNCの最小温度ひび割れ指数の差はJSCE: 0.30~0.44, JCI: 0.62~0.68であり、JCIの方がセメント間の差がより大きく現れる結果となった。LCとBBの差についても同様の傾向が認められる(JSCE: 0.31~0.44, JCI: 0.66~0.73)。

壁厚が最小温度ひび割れ指数に及ぼす影響は、JSCEではセメントの種類によらず大きい、JCIの場合、ほとんど認められなかった。温度ひび割れ指数は、体積変化(温度、自己収縮)、ヤング係数とその低減係数による応力の発現と引張強度の発現の関係より定まるため、一つの要因のみから単純に比較することはできないが、JCIでは温度依存性を考慮した有効材齢を用いて強度特性を表現しているのに対して、JSCEの場合は通常材齢で表されていることが影響している可能性が考えられる。双方の違いについては今後、実構造物で生じている現象との対比により、その妥当性に関する調査研究を進めることが期待される。

参考文献

- 1)土木学会: 2007年制定 コンクリート標準示方書「設計編」, pp.331-343, 2008.3
- 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, pp.46-59, 2008.11
- 3)土木学会: 最近のマスコンクリート技術, コンクリート技術シリーズ, No.14, p.6

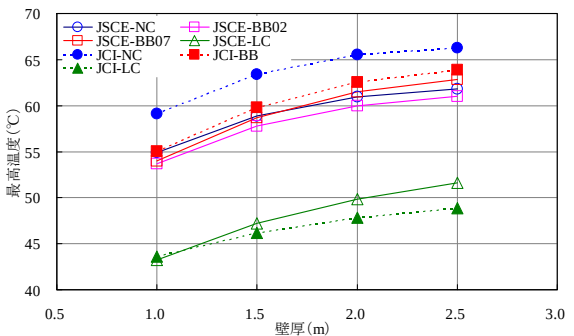


図-2 壁厚と最高温度の関係

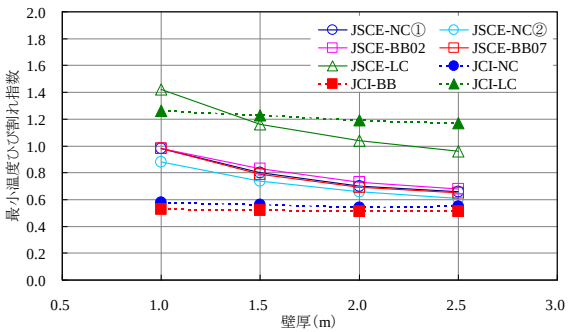


図-3 壁厚と最小ひび割れ指数の関係