

報告 低発熱・収縮抑制型高炉セメントの建築部材への適用性

久家 立^{*1}・大澤 友宏^{*2}・宇敷 安敏^{*3}

要旨：比較的高い圧縮強度が要求される建築構造物の耐圧盤や基礎梁といったマスコンクリート部材に対してこれまで土木構造物で適用実績が拡大してきた低発熱・収縮抑制型高炉セメントを適用するにあたり、実際に現場で使用される配合を対象として各種試験および解析を行い、低発熱・収縮抑制型高炉セメントの建築部材への適用性について検討した。その結果、一般的に使用実績の多い中庸熱ポルトランドセメントと同等のひび割れ抑制効果があることを確認した。

キーワード：低発熱・収縮抑制型高炉セメント、温度ひび割れ、水密性、温度応力解析

1. はじめに

マスコンクリートは、セメントの水和熱および自己収縮に伴う温度ひび割れが生じる可能性があり、この対策として低発熱系セメントの使用が一般的である。

これまで主に土木構造物において、高炉セメント B 種の JIS 規格範囲内で化学成分と比表面積を調整した低発熱・収縮抑制型高炉セメント（以下 LBB60）の適用実績が拡大してきた。この LBB60 は表 - 1 に示す通り、汎用的な高炉セメント B 種（以下 BB）に比べ、比表面積を低下させるとともに SO_3 量の増加により、コンクリートの断熱温度上昇量の低減と自己収縮量の抑制を可能にした高炉セメントである。

一方、建築構造物でも地下部の耐圧盤や基礎梁は大断面のマスコンクリートである場合が多く、LBB60 を適用した実績はあるが、要求されるコンクリートの圧縮強度が比較的高いことから比表面積の小さい高炉スラグ微粉末を約 60%まで混入した LBB60 だと強度発現性が低く、強度管理材齢において要求される強度を満足するためには、W/C を小さくする必要があり本来の性能を十分に発揮できない場合がある。

そこで本報告では、LBB60 と同様に高炉セメント B 種の JIS 規格範囲内で SO_3 量を増加し、比表面積の小さい高炉スラグ微粉末を約 40%混入した低発熱・収縮抑制型高炉セメント（以下 LBB40）について検討した。この

LBB40 は表 - 1 の圧縮強さに示す通り、LBB60 の強度発現性を改善したものである。しかしその反面、水和熱は LBB60 より大きくなっており中庸熱ポルトランドセメント（以下 M）に近い特性を示す。

過去に行った同一 W/C でのコンクリート試験¹⁾において、LBB40 は圧縮強度について M と同等、断熱温度上昇量および自己収縮量について M よりも小さい結果であった。しかし、実際の現場では必ずしも LBB40 と M が同一 W/C とは限らない。

よって、本報告では実際の現場での配合条件を対象として生コンプラントでの実機試験練りを行い、コンクリートの基礎性状を確認するとともに、室内試験にてコンクリートの各種物性値を確認し、得られたデータを用いた温度応力解析を行い、LBB40 の建築部材への適用性について検討した。

2. 実機試験練りによる配合検討

2.1 試験概要

本試験で検討した配合は、対象現場の耐圧盤および基礎梁で用いられる $f_c=39\text{N/mm}^2$ の配合で、水和熱を抑制する目的から配合条件として高性能 AE 減水剤を用い管理材齢を 56 日とした。

この配合条件に対して、都内生コンプラント 5 工場で室内試験練りの結果から作成した配合を表 - 2 に示す。

表 - 1 セメントの品質試験例

セメント 種類	密度 (g/cm^3)	比表面積 (cm^2/g)	化学成分(%)	凝結(h-m)		水和熱(J/g)		圧縮強さ(N/mm^2)		
			SO_3	始発	終結	7 日	28 日	3 日	7 日	28 日
LBB40	3.04	3350	3.72	3-45	5-11	275	318	20.0	28.5	51.3
LBB60	2.98	3250	3.69	3-51	5-29	232	277	15.0	23.6	44.5
M	3.21	3220	2.03	3-02	4-07	267	322	21.6	30.3	56.8
BB	3.04	3910	2.11	3-07	4-35	280	339	21.7	36.6	63.3

*1 株式会社デイ・シイ セメント事業本部営業部技術営業課技術営業係長 修士（工学）（正会員）

*2 株式会社デイ・シイ セメント事業本部営業部技術営業課技術営業係 修士（工学）（正会員）

*3 鹿島建設株式会社 東京建築支店

表 - 2 実機試験練り示方配合

工場名	セメント 種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
				W	C	S1	S2	G1	G2
A 工場	LBB40	44.8	45.0	165	369	316	473	994	—
B 工場		46.5	45.1	165	355	395	395	998	—
C 工場		45.4	44.0	165	364	579	192	762	255
D 工場		47.5	46.9	165	348	513	330	678	294
E 工場		44.7	44.0	160	358	775	—	716	308
A 工場	M	46.7	45.6	165	354	326	487	999	—
B 工場		49.0	45.2	165	337	403	403	1015	—
C 工場		44.4	44.2	165	372	585	195	764	255
D 工場		44.5	46.3	165	371	508	325	683	294
E 工場		45.9	45.0	160	349	804	—	713	306

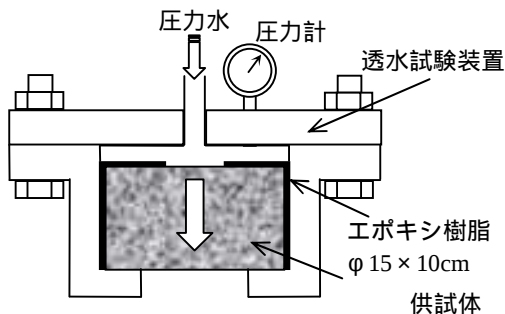


図 - 1 透水試験概略図

$$\beta_i^2 = \alpha \times \frac{D_m^2}{4 \times t \times \zeta^2} \quad (1)$$

ここに、

β_i^2 : 拡散係数(cm²/sec)

D_m : 平均浸透深さ(cm)

t : 水圧を加えた時間(sec)

α : 加圧時間に対する係数($\alpha = t^{3/7}$)

ζ : 水圧の大きさに関する係数(5kgf/cm²では 0.905)

表に示した LBB40 の配合および各工場における M の配合について実機ミキサーで試験練りを行い、LBB40 の配合の妥当性を確認した。試験では、圧縮強度（材齢 7 日、28 日および 56 日の 3 材齢分 φ 10 × 20cm 供試体 9 本）と透水試験（φ 15 × 30cm 供試体 1 本）で必要となる供試体を採取した。圧縮強度試験は、所定材齢まで標準水中養生とし JIS A 1108 に準じて試験を行った。透水試験は、技術書院発刊のコンクリートの試験方法(下)²⁾ に準じて行った。材齢 56 日まで標準水中養生を行った φ 15 × 30cm 供試体から、透水試験用供試体（φ 15 × 10cm）をコンクリートカッターで 2 体切り出し、恒温恒湿室内（室温 20℃、相対湿度 60%）で約 1～2 週間程度自然乾燥させた後、供試体側面および断面の加圧面以外をエポキシ樹脂を塗布して透水試験装置（図 - 1）に設置し、5kgf/cm² の水圧を 3 週間加えた。加圧後供試体を割裂し、加圧表面からの水の浸透深さをノギスにより測定した。また、コンクリートの拡散係数は式(1)により算出した。

2.2 コンクリートの圧縮強度

表 - 3、図 - 2 および図 - 3 にフレッシュ性状試験および圧縮強度試験結果を示す。表には各配合における配合目標強度と（材齢 56 日強度 / 配合目標強度）の強度比を併記した。

どの工場においても圧縮強度は管理材齢 56 日において配合目標強度の 100%以上の強度比であることから、室内試験練りの結果から作成した配合は妥当な配合であると判断できる。また、M での結果と比較すると同一目標強度に対する強度比が同等の結果であることから、M の W/C に対して ±2%程度の範囲に設定された LBB40 の W/C は妥当であったと考えられる。

2.3 コンクリートの水密性

表 - 4 に各工場で採取した供試体における透水試験結果を示す。A 工場については比較のため M についても供試体を採取し試験を行った。

LBB40 の浸透深さから算出した拡散係数は 0.83～2.37 × 10⁻⁴cm²/sec とバラツキが大きい結果であった。また、M は 0.44 × 10⁻⁴cm²/sec と LBB40 に比べ小さい結果であった。一般的に長期材齢において高炉スラグ微粉末の潜在水硬性の効果により緻密化する高炉セメントは水密性に優れると言われるが、今回の結果で水密性は LBB40 < M であった。しかし、LBB40 の結果はバラツキが大きいことや M の試験数が少ないことから明確な性能の良否は判断できず、むしろ供試体の締固め程度が結果に大きく影響を与えたと思われる。

表 - 3 実機試験練りにおけるフレッシュ性状試験および圧縮強度試験結果

工場名	セメント 種類	配合強度 (N/mm ²)	フレッシュ性状			圧縮強度(N/mm ²)			σ 56 / 配合強度 強度比 (%)
			スランプ (cm)	空気量 (%)	C.T ()	σ 7	σ 28	σ 56	
A 工場	LBB40	46.8	18.5	4.8	31	34.0	46.5	54.7	116.9
B 工場		46.0	18.5	4.8	30	31.0	43.6	47.5	103.3
C 工場		48.0	18.5	4.8	30	35.2	49.2	55.4	115.4
D 工場		46.5	19.5	4.9	28	32.7	46.7	52.8	113.5
E 工場		48.0	18.5	4.5	30	30.5	51.0	55.9	116.5
A 工場	M	46.8	19.5	5.1	31	27.3	43.5	53.5	114.3
B 工場		46.0	19.0	3.9	30	28.6	41.1	48.5	105.4
C 工場		48.0	17.0	4.9	30	34.8	49.2	55.0	114.6
D 工場		46.5	17.0	5.0	29	32.4	46.7	54.0	116.1
E 工場		48.0	18.5	4.3	30	33.9	49.2	56.8	118.3

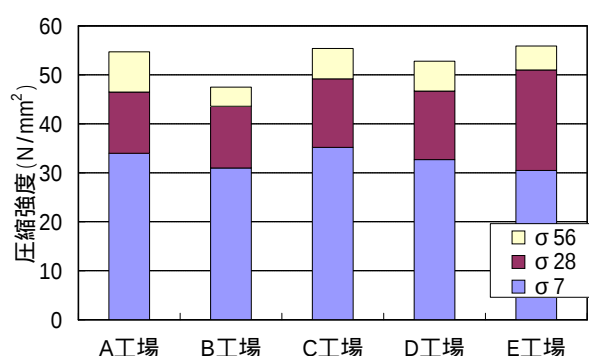


図 - 2 圧縮強度試験結果 (LBB40)

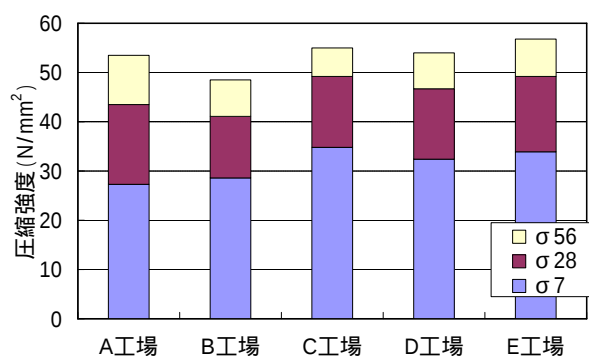


図 - 3 圧縮強度試験結果 (M)

3. 現場配合を用いた各種物性値の比較

3.1 試験概要

表 - 1 に示した5工場中LBB40の配合で最も単位セメント量が多いA工場の配合を用いて、室内試験練りでコンクリートの各種物性値についてMとの比較を行った。今回の対象現場では、2月のコンクリート打設が予定されており、試験は標準水中養生とともに6封緘養生の2水準について実施した。

圧縮強度試験は、所定材齢までの養生方法を標準水中

表 - 4 実機試験練りにおける透水試験結果

工場名	セメント 種類	浸透深さ (cm)		拡散係数 ($\times 10^{-4}$ cm ² /sec)	
		1.47	平均	1.75	平均
A 工場	LBB40	1.70	1.59	2.34	2.05
A 工場	M	0.81	平均	0.53	平均
		0.66	0.74	0.35	0.44
B 工場	LBB40	1.13	平均	1.03	平均
		1.48	1.31	1.77	1.40
C 工場	LBB40	1.90	平均	2.92	平均
		1.50	1.70	1.82	2.37
D 工場	LBB40	0.97	平均	0.76	平均
		1.05	1.01	0.89	0.83
E 工場	LBB40	1.22	平均	1.20	平均
		1.13	1.18	1.03	1.12

養生と6封緘養生の2水準の供試体についてJIS A 1108に準じて試験を行った。透水試験は、材齢28日まで6封緘養生として実機試験練りでの供試体より養生期間を短くさらに水分の供給がない厳しい条件で試験を行った。断熱温度上昇量試験は、空気循環式の断熱熱量計で約14日間測定した。自己収縮試験は、JCI自己収縮研究委員会の方法に準じて、ひずみの測定は埋込み型ひずみ計により行った。乾燥収縮試験は、材齢7日まで標準水中養生した後、JIS A 1129-2に準じて試験を行った。

3.2 フレッシュコンクリートの物性値

表 - 5 および図 - 4 ~ 6 にフレッシュ性状試験、凝結試験、ブリーディング試験および断熱温度上昇量試験結果を示す。凝結時間はLBB40よりもMの方が長く、ブリーディング量もLBB40よりもMの方が多い結果であ

表 - 5 室内試験練りにおけるフレッシュコンクリートの物性値

セメント 種類	フレッシュ性状			凝結試験		ブリーディング試験	
	スランプ (cm)	空気量 (%)	C.T ()	始発時間 (h-m)	終結時間 (h-m)	最終ブリーディング量 (cm ³ /cm ²)	最終ブリーディング率 (%)
LBB40	20.0	4.8	20.0	7-44	10-32	0.127	2.99
M	19.5	5.2	20.0	8-32	11-40	0.161	3.94

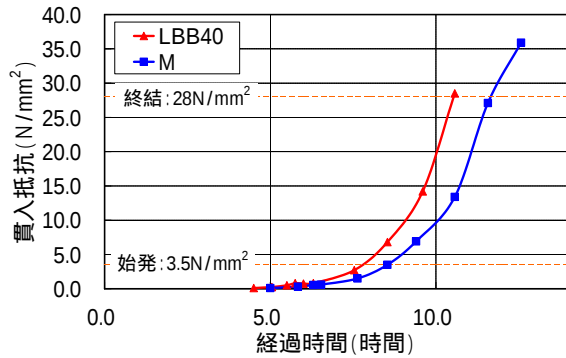


図 - 4 凝結試験結果

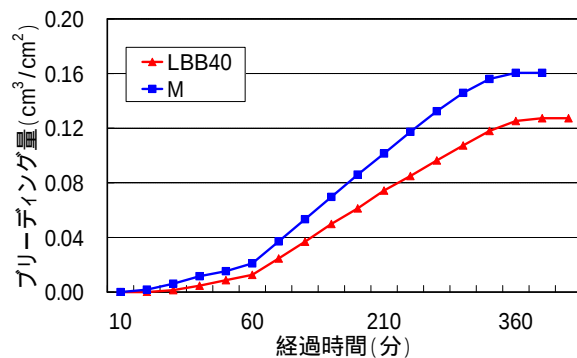


図 - 5 ブリーディング試験結果

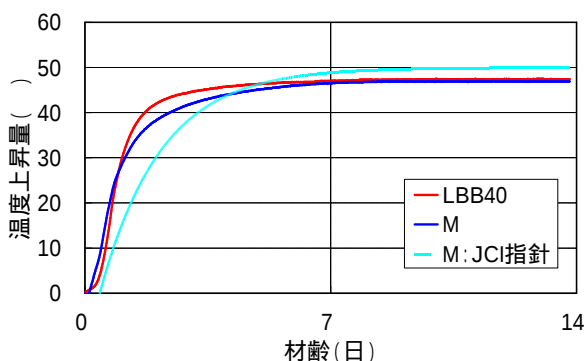


図 - 6 断熱温度上昇量試験結果

った。単位水量が同じで混和剤添加量は M の方が少なかったことから、LBB40 よりも M の方が約 2%W/C が大きいことが影響している可能性もあるが、大きな差ではないことから同等の結果と判断できる。

断熱温度上昇量は LBB40 の方が単位セメント量が 15kg 多いにも関わらず終局温度上昇量が LBB40 で

47.5 °C、M で 47.0 °C とほぼ同等の結果であった。W/C が同一でない実際の現場で使用される配合においても LBB40 は M と同等の熱特性であると判断できる。

3.3 硬化コンクリートの物性値

表 - 6 および図 - 7 ~ 10 に圧縮強度試験、自己収縮試験および乾燥収縮試験結果を示す。

圧縮強度は標準水中養生供試体において管理材齢 56 日の強度で配合目標強度以上となっている。一方、6 封緘養生供試体は LBB40、M とともに管理材齢 56 日の強度が標準水中養生供試体の 79%まで低下している。一般的にマスコンクリート内部はセメントの水和熱で外気温に比べ温度が上がることから本試験で行った低温養生での結果ほど強度低下はしないと考えられる。

自己収縮量は LBB40 が初期に約 90×10^{-6} 膨張した後収縮するのに対し、M は初期から収縮することから LBB40 は M に比べて自己収縮量を抑制することができる。これは LBB40 の特性で、前述のように SO_3 量の増加による効果であり、マスコンクリートで問題となる自己収縮量の抑制に有効的である。

乾燥収縮量は LBB40 と M で大きな差異は認められず同等の結果であった。

3.4 コンクリートの水密性

表 - 7 に透水試験結果を示す。

浸透深さから算出した拡散係数は LBB40 が $20.45 \times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{sec}$ 、M が $34.95 \times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{sec}$ で水密性は LBB40 > M であったが、実機試験練りでの結果と整合がとれず、試験数が少ないことから明確な性能の良否を判断することはできない。また、LBB40、M とともに実機試験練りでの結果に比べ大幅に拡散係数が大きくなっていることから 6 封緘養生の影響が大きいことがわかる。実機試験練りの結果も踏まえ、水密性の向上には十分な締固めと湿潤養生が重要であることを改めて認識できた。

4. 温度応力解析による適用性の検討

4.1 解析概要

本解析では、前章の試験で得られた圧縮強度特性、断熱温度上昇特性および自己収縮特性を用いて建築構造物の耐圧盤および基礎梁を模擬した 3 次元 FEM 解析により LBB40 の実構造物への適用性について検討した。

表 - 6 室内試験練りにおける圧縮強度試験結果

セメント 種類	標準水中養生(N/mm ²)			6 封緘養生(N/mm ²)		
	σ_7	σ_{28}	σ_{56}	σ_7	σ_{28}	σ_{56}
LBB40	32.8	48.2	54.1	17.6	35.3	42.8
M	24.7	39.7	48.5	16.2	31.4	38.3

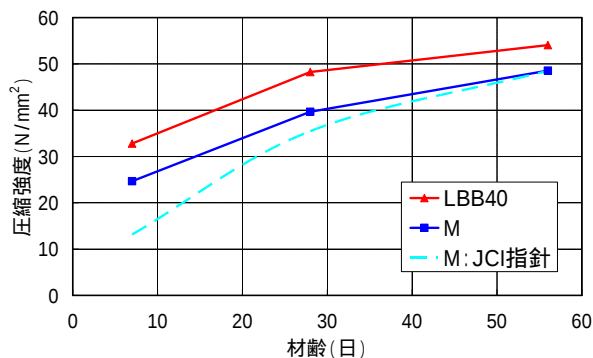


図 - 7 圧縮強度試験結果 (標準水中養生)

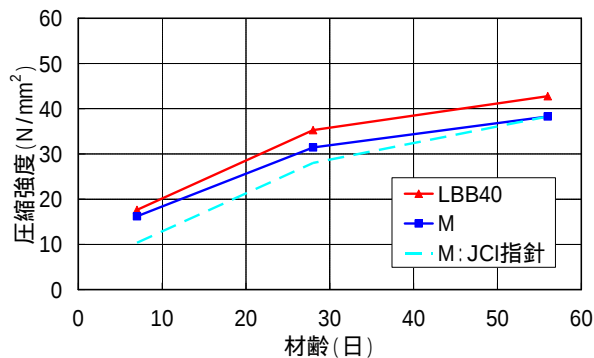


図 - 8 圧縮強度試験結果 (6 封緘養生)

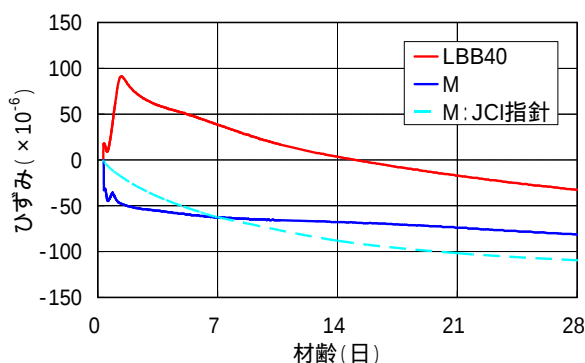


図 - 9 自己収縮試験結果

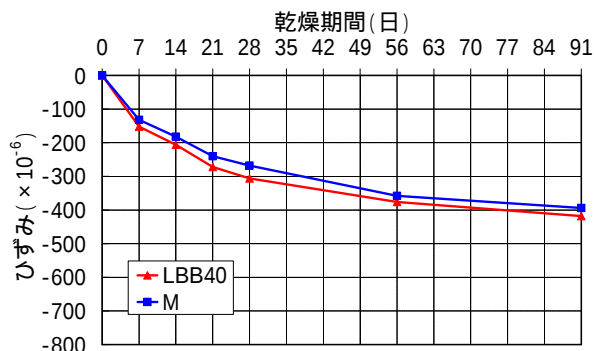


図 - 10 乾燥収縮試験結果

表 - 7 室内試験練りにおける透水試験結果

セメント 種類	浸透深さ (cm)		拡散係数 ($\times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{sec}$)	
	2.04	平均	19.70	平均
LBB40	2.12	2.08	21.20	20.45
				
M	2.66	平均	33.40	平均
	2.78	2.72	36.50	34.95
				

使用プログラムは ASTEA-MACS を用い、図 - 11 に示す対象部材の 1/4 をモデル化した。諸定数は JCI マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008³⁾に示される設計用値および既往式を用いた。圧縮強度特性は前章の図 - 7 で示した試験結果の近似式を用いた。断熱温度上昇特性および自己収縮特性は前章の図 - 6 および図 - 9 で示した試験結果を用いた。解析で用いた圧縮強度特性を図 - 12 に示す。

4.2 解析結果

表 - 8 に解析結果をまとめた。図 - 13 に着目節点 2 における最小ひび割れ指数発生時のひび割れ指数分布図を示す。

LBB40 は M に比べひび割れ指数 1.0 以下の領域が少なく、最小ひび割れ指数も若干大きい結果であった。最高温度および最大引張応力も全体的に M と比べ小さい結果であったことから前章までの試験結果で示されたコンクリートの断熱温度上昇量の低減と自己収縮量の抑制効果が結果としてひび割れ抑制効果として現れたと考えられる。しかし、実際の現場で使用される配合を対

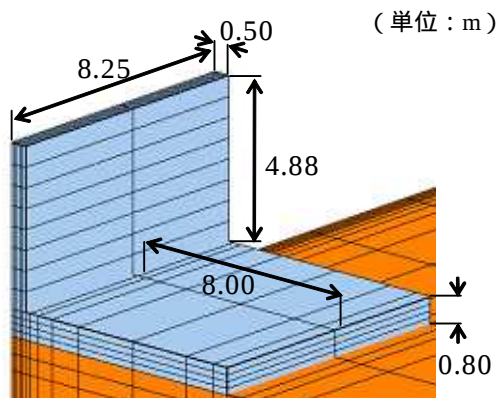


図 - 11 モデル図

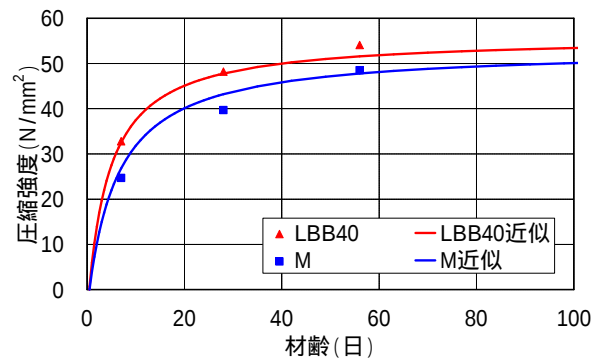
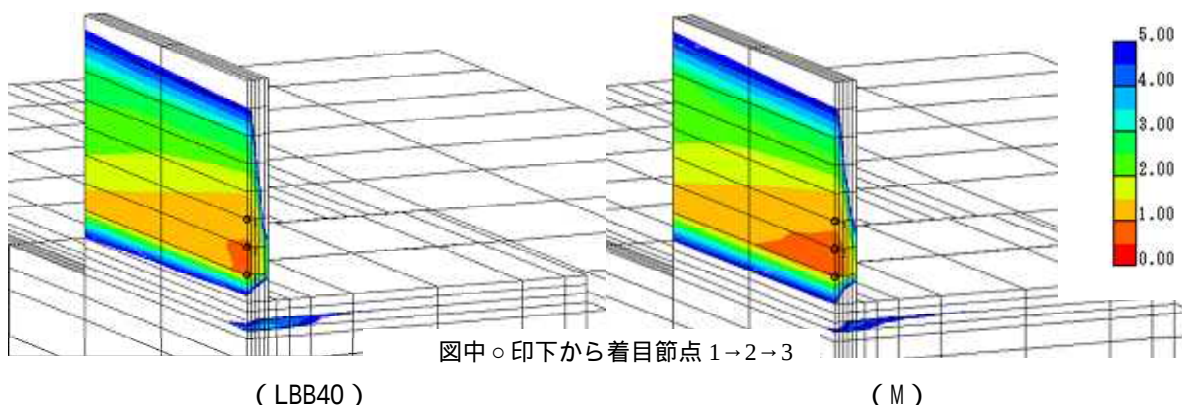


図 - 12 圧縮強度特性

表 - 8 解析結果一覧

セメント 種類	着目節点	最高温度 ()	最大引張応力 (N/mm ²)	最小ひび割れ指数
LBB40	1	47.10 (1.3 日)	3.14 (26.7 日)	0.94 (14.7 日)
	2	48.20 (1.7 日)	3.25 (21.3 日)	0.91 (14.7 日)
	3	47.84 (1.7 日)	2.66 (21.3 日)	1.12 (14.7 日)
M	1	51.91 (1.5 日)	4.14 (26.7 日)	0.82 (24.0 日)
	2	52.97 (1.7 日)	4.07 (21.3 日)	0.83 (18.7 日)
	3	52.54 (1.7 日)	3.27 (21.3 日)	1.04 (18.7 日)



図中○印下から着目節点 1→2→3

図 - 13 ひび割れ指数分布図

象とする場合には、LBB40 は W/C を M よりも低く設定されたため単位セメント量の増加に伴う断熱温度上昇量低減効果の減少からひび割れ抑制効果は M とほぼ同等の結果になると考えられる。

5. まとめ

実際に現場で使用される配合を対象として各種試験および解析を行い、低発熱・収縮抑制型高炉セメントの建築部材への適用性について検討した。

その結果、室内試験練りで作成した LBB40 の配合は実機試験練りで所要のフレッシュ性状および圧縮強度を満足し、室内試験で得られた各種物性値においても M と同等の結果であった。また、そこで得られた結果を用い

た温度応力解析においても、M と同等のひび割れ抑制効果が期待できることを確認した。

参考文献

- 1) 宮澤伸吾, 大澤友宏, 廣島明男, 鯉淵清: 低発熱・収縮抑制型高炉セメントを用いたコンクリートの特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.487-492, 2005.6
- 2) 笠井芳夫, 池田尚治: コンクリートの試験方法(下), 技術書院, pp.148-151, 1998
- 3) 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