

論文 高炉セメントを用いたコンクリートの自己収縮に関する 実験的研究

久保証則*1・青木 茂*2・新村 亮*3・原田 暁*4

要旨：高炉セメントは、一般のコンクリート工事に広く使用されており、使用実績も増加の傾向にある。しかし近年、高炉セメントを使用した躯体コンクリートにひび割れが発生し易いという報告がある。そこで一般に広く使用されている市販の高炉セメントB種を使用したコンクリートについて、ひび割れ抵抗性を把握することを主目的として、自己収縮、圧縮強度、乾燥収縮、ひび割れ抵抗性試験およびモルタルによる簡易断熱温度上昇試験を行った。その結果、普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートと比べて、自己収縮量が大きく、ひび割れ抵抗性が若干小さいことなどが判明した。

キーワード：自己収縮、高炉セメント、ひび割れ抵抗性、乾燥収縮

1. はじめに

近年、単位セメント量が極めて多い高強度コンクリートや粉体量の多い高流動コンクリートが広く使用されるようになってきている。これらのコンクリートは、通常の強度レベルのものよりペースト部分が多いため、コンクリート全体の見かけの体積収縮（自己収縮）が比較的大きくなるという報告がなされている [1]。しかしながら、一般に市販されているセメントを使用し、通常の強度レベルのコンクリートの自己収縮等は、あまり検討されていないのが現状であり、各種構造体コンクリートのひび割れ発生にも、自己収縮が影響しているものと考えられる。

以上のような背景のもとに、本研究報告では、高炉セメントB種を使用した通常の強度レベルのコンクリートについて、自己収縮、圧縮強度、乾燥収縮およびひび割れ抵抗性等とこれらの相互関係を把握し、さらにモルタルによる温度上昇特性についても検討を行った。

2. 試験概要および試験方法

2.1 使用材料

表-1 使用材料

セメントは、市販されている3銘柄の高炉セメントB種（A、BおよびCと略記する）と3銘柄の普通ポルトランドセメントを等量混合したもの（Nと略記する）を使用した。また、細骨材は、大井川水系産陸砂、粗骨材は、青梅産硬質砂岩碎石を使用した。表-1に使用材料を示す。

セメント	A：高炉セメントB種（比重3.05，比表面積3710cm ² /g） B：高炉セメントB種（比重3.04，比表面積3920cm ² /g） C：高炉セメントB種（比重3.02，比表面積3770cm ² /g） N：普通ポルトランドセメント（3銘柄等量混合）
細骨材	大井川水系産陸砂 （比重2.59，吸水率2.12%，F.M.2.70）
粗骨材	青梅産硬質砂岩碎石 （MS20mm，比重2.65，吸水率2.12%）

*1 (株) 大林組 土木技術本部技術第五部 (正会員)

*2 (株) 大林組 土木技術本部技術第五部課長, 工博 (正会員)

*3 (株) 大林組 土木技術本部技術第五部, 工修 (正会員)

*4 (株) 大林組 土木技術本部技術第五部副部長, 工修 (正会員)

2. 2 試験項目

試験は、自己収縮の他、圧縮強度、乾燥収縮、ひび割れ抵抗性およびモルタルによる簡易断熱温度上昇試験等を行った。試験項目および試験方法概要を表-2に示す。また、コンクリートの配合条件は、単位セメント量を一定、単位水量はNを用いた時のスランブが12±1cmになる値を試験練りにより求め、A、BおよびCではこの値で一定とした。コンクリートの配合を表-3に示す。

表-2 試験項目および試験方法概要

試験項目	試験方法	試験材齢	供試体 (cm)
スランブ	JIS A 1101	練り混ぜ時	-
空気量	JIS A 1128	練り混ぜ時	-
自己収縮	(仮称) 高流動コンクリートの自己収縮試験方法	0~1日: 1H 2~5日: 6H 6~28日: 1D	10×10×40
圧縮強度	JIS A 1108	3, 7, 28日	φ10×20
乾燥収縮	JIS A 1129	1, 3日, 1, 2, 4, 8週	10×10×40
ひび割れ抵抗性	コンクリートの乾燥収縮ひびわれ抵抗性試験方法(案)	2日に1回	10×17×92
簡易断熱	モルタルの温度上昇測定	適宜	φ10×15

2. 3 フレッシュコンクリート

スランブは、JIS A 1101「コンクリートのスランブ試験方法」によった。

空気量は、JIS A 1128「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法(空気室圧力方法)」によった。

表-3 コンクリートの配合

セメントの種類	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)			
			水	セメント	細骨材	粗骨材
A	56.7	46	170	300	818	983
B	56.7	46	170	300	818	981
C	56.7	46	170	300	818	981
N	56.7	46	170	300	821	988

2. 4 自己収縮

(社)日本コンクリート工学協会「超流動コンクリート研究委員会 報告書(Ⅱ) [付録1] (仮称)高流動コンクリートの自己収縮試験方法」[2]により埋込み型ひずみ計を供試体の中央部に埋設されるように設置し、10×10×40cmの角柱供試体を2本作製した。ひずみおよび温度は、打設直後から材齢1日までは1時間毎、材齢2日から材齢5日までは6時間毎、その後24時間毎に材齢28日まで行った。なお、試験は、20℃、60%RHの雰囲気内にて行った。

2. 5 圧縮強度

JIS A 1132「コンクリートの強度試験用供試体の作り方」により供試体を各材齢3本作製し、JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」により圧縮強度試験を行った。供試体寸法はφ10×20cm、試験材齢は3日、7日および28日である。供試体は、20℃の水中および気中にて所定の材齢まで養生した。

2. 6 乾燥収縮

JIS A 1132「コンクリートの強度試験用供試体の作り方」により、10×10×40cmの角柱供試体を各配合3本作製し、JIS A 1129「モルタルおよびコンクリートの長さ変化試験方法」のうちダイヤルゲージ法により行った。供試体は、20℃の水中で養生後、材齢7日目に基長を測定し、この時から乾燥を開始した。測定は、乾燥材齢1日、3日、1週、2週、4週および8週とした。

2. 7 ひび割れ抵抗性

「コンクリートの乾燥収縮ひびわれ試験方法(案)」(JIS原案)[3]に準じ、図-1に示す拘束器具を使用して各配合毎3本作製した。型枠の取り外しは材齢7日とし、20℃、60%RHの

雰囲気内にて行った。測定は、コンタクトゲージ法により、型枠脱型直後から行い、供試体にひび割れが発生するまで原則として毎日行った。なお、ひび割れの発生は、目視およびひずみの急変により確認した。

2. 8 モルタルによる簡易断熱温度上昇

モルタルは、コンクリートの配合より粗骨材を除いた配合とした。試験は、図-2に示す試験装置により、モルタルを魔法瓶の中に入れ、中心部に設置した熱電対により、内部温度を測定した。

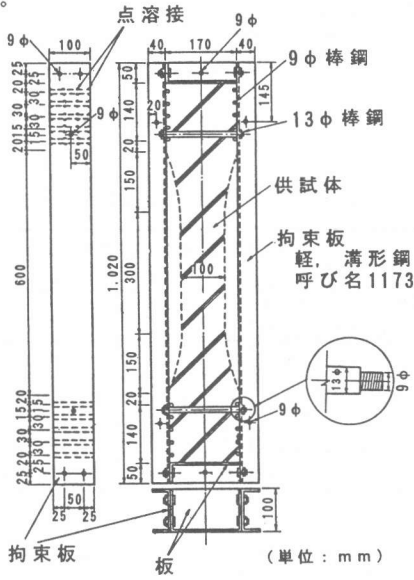


図-1 拘束器具

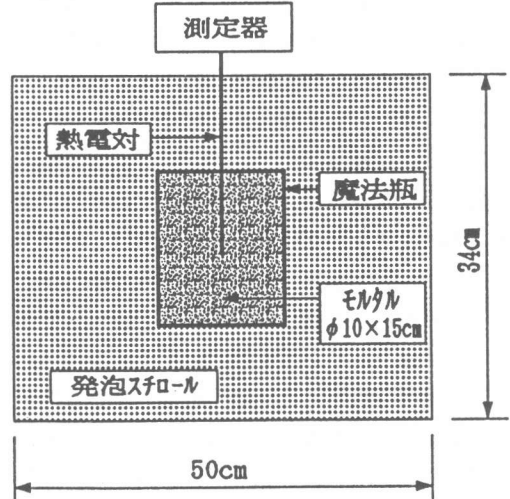


図-2 簡易断熱試験装置

3. 試験結果および考察

3. 1 フレッシュコンクリートの性状

フレッシュコンクリートの試験結果を表-4に示す。スランプは、それぞれの単位水量をNの単位水量と同一としたため、Aが12.5cm、BおよびCが14.5cmで、Nより1~3cm程度大きくなり、若干の差異が見られた。空気量は、いずれの配合のコンクリートともほぼ同一であった。

表-4 フレッシュコンクリート試験結果

セメントの種類	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)		スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)
			水	セメント			
A	56.7	46	170	300	12.5	4.6	20.0
B	56.7	46	170	300	14.5	4.3	20.0
C	56.7	46	170	300	14.5	4.1	20.0
N	56.7	46	170	300	11.5	4.6	20.0

3. 2 自己収縮

自己収縮試験結果を表-5および図-3に示す。ひずみは、いずれのコンクリートとも、打設後ある期間までは(+)の値、すなわち膨張傾

表-5 自己収縮試験結果

セメントの種類	ひずみ (×10 ⁻⁴)								
	0.5日	1日	3日	4日	5日	7日	14日	21日	28日
A	+38	+38	+16	+11	+4	-13	-52	-72	-81
B	+6	+6	-16	-24	-32	-48	-81	-94	-98
C	+31	+33	+8	+2	-5	-23	-74	-103	-116
N	+26	+24	-1	-12	-22	-41	-31	-36	-44

向を示し、その後（-）の値、すなわち収縮傾向になった。ひずみが再び0になった材齢は、Aが約5日で最も遅く、Bが約1日で最も早く、Cが約4日であり、Nは約3日であった。材齢21日における収縮ひずみ量は、Aが 72×10^{-6} 程度で最も小さく、Bが 94×10^{-6} 程度、Cが 103×10^{-6} 程度で最も大きく、Nは 36×10^{-6} 程度であった。以上のことから、高炉セメントB種を使用したコンクリートの自己収縮は、普通ポルトランドセメント使用コンクリートの約2～3倍大きく、A～C間の差異も若干見られた。

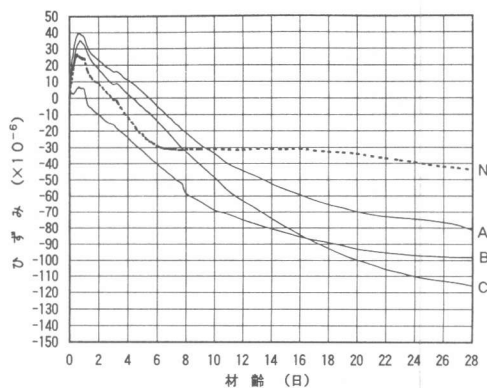


図-3 自己収縮試験結果

3.3 圧縮強度

圧縮強度試験結果を表-6および図-4に示す。水中養生をした場合の圧縮強度は、材齢7日までA、BおよびCともほぼ同等の値を示したが、材齢28日では、Aが 38.9 N/mm^2 、Bが 37.2 N/mm^2 、Cが 40.3 N/mm^2 で、かなりの差異が認められた。これは、材齢7日から28日までの強度の伸びの差によるものと考えられ、伸びは、Aが 20.3 N/mm^2 、Bが 19.2 N/mm^2 、Cが 22.2 N/mm^2 であり、かなり大きな値を示した。また、材齢28日におけるNの圧縮強度は、 41.4 N/mm^2 で、Nに対する強度比は、それぞれAが94%程度、Bが90%程度、Cが97%程度であった。気中養生した場合も、材齢7日までには、水中養生と同程度の強度発現を示したが、材齢7日から28日までの強度の伸びは、4～7 N/mm^2 程度であり、水中養生に比べかなり小さい値となった。以上のことから、高炉セメントB種を使用したコンクリートでは、材齢初期だけでなく、長期にわたっての養生が重要であると考えられる。

表-6 圧縮強度試験結果

セメントの種類	圧縮強度 (N/mm^2)					
	20℃水中養生			20℃気中養生		
	3日	7日	28日	3日	7日	28日
A	10.8	18.6	38.9	10.2	17.7	25.2
B	9.50	18.0	37.2	11.1	17.6	21.2
C	8.93	18.1	40.3	10.4	18.3	22.8
N	17.1	28.5	41.4	15.2	23.9	29.5

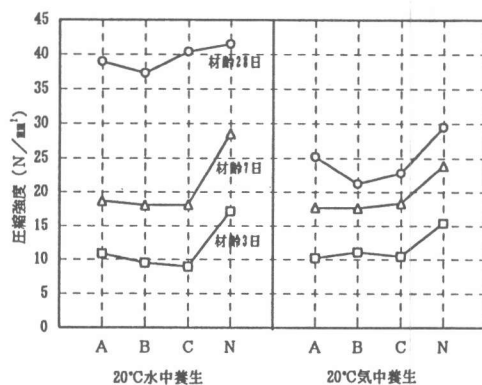


図-4 圧縮強度試験結果

3.4 乾燥収縮

乾燥収縮試験結果を表-7および図-5に示す。乾燥材齢8週における長さ変化は、A、BおよびCともほぼ同等の値を示し、Aが 670×10^{-6} 、Bが 660×10^{-6} 、Cが 620×10^{-6} で、またNも 630×10^{-6} であることから、この時点に

表-7 乾燥収縮試験結果

セメントの種類	長さ変化 ($\times 10^{-6}$)					
	1日	3日	1週	2週	4週	8週
A	110	200	300	450	540	670
B	80	160	240	400	510	660
C	90	190	280	420	500	620
N	80	150	210	350	500	630

おける長さ変化には、セメントの種類および銘柄による差異はあまり認められない。乾燥材齢 1 週における長さ変化は、A が 300×10^{-6} 、B が 240×10^{-6} 、C が 280×10^{-6} で、乾燥材齢 8 週に対する割合は、それぞれ A が 45% 程度、B が 36% 程度、C が 45% 程度であった。また N では 210×10^{-6} 、33% 程度であった。以上のことから、高炉セメント B 種を使用したコンクリートは、乾燥材齢初期の段階では A～C 間の差異が若干認められ、普通セメントを用いたコンクリートよりやや大きめの値であったが、長期になるとこのような傾向は認められなかった。

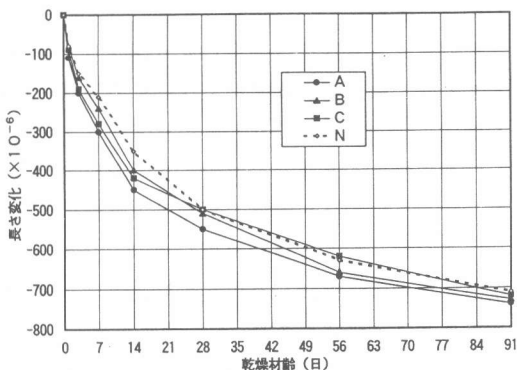


図-5 乾燥収縮試験結果

3.5 ひび割れ抵抗性

ひび割れ抵抗性試験結果を表-8に示す。ひび割れ発生材齢は、供試体間にもバラツキがあるものの概ねAが7～13日、Bが11～14日、Cが8～11日で、またNでは11～17日であった。以上のことから、高炉セメントB種を使用したコンクリートのひび割れ抵抗性は、普通セメント使用コンクリートよりやや劣っているものと考えられる。これは、材齢初期段階における強度発現性状の差異以外に、自己および乾燥収縮の小さいものほど、抵抗性が良くなる傾向が認められることから、収縮量の差の影響も大きいものと考えられる。なお、ひび割れ抵抗性は、高炉セメント間においてA～C間の差異も若干認められた。

表-8 ひび割れ抵抗性試験結果

セメントの種類	ひび割れ発生材齢
A	7～13日
B	11～14日
C	8～11日
N	11～17日

3.6 モルタルによる簡易断熱温度上昇

モルタルによる簡易断熱温度上昇試験結果を図-6に示す。モルタルの内部温度は、Aの場合、打設後約25時間まで上昇し、温度上昇量は、21.2℃程度であり、その後徐々に下降し、約128時間後に上昇量は0℃となった。B、CおよびNも同様の傾向を示し、Bは、28時間程度まで上昇し、その量は22.0℃程度で、約135時間後に0℃に戻り、Cは、約28.5時間で22.1℃程度、約165時間後に戻った。また、Nでは、約24時間まで上昇し、その量は25.2℃程度で、約100時間後に0

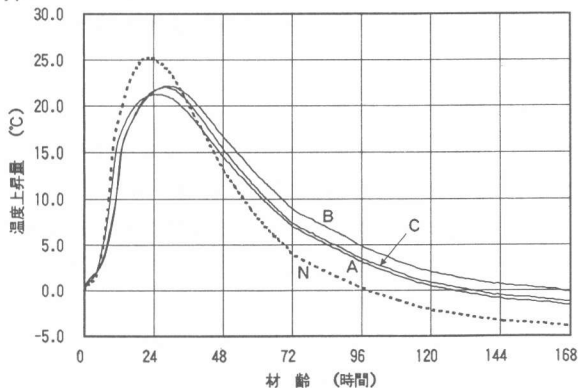


図-6 モルタルによる簡易断熱温度上昇試験

℃になった。以上のことから、温度履歴は、セメントの種類や銘柄によってかなりの差異が認められた。また、高炉セメントB種を使用したいずれの場合にも、普通セメントより内部温度の上昇が遅く、放冷も緩やかであることが認められた。

4. まとめ

高炉セメントB種を使用したコンクリートの自己収縮，圧縮強度，乾燥収縮およびひび割れ抵抗性等とこれらの相互関係，並びにモルタルの内部温度上昇について，以下のことが明らかとなった。

- 1) 高炉セメントB種を使用したコンクリートの自己収縮は，普通ポルトランドセメント使用コンクリートの約2～3倍とかなり大きく，またA～C間の差異は若干認められる。
- 2) 高炉セメントB種を使用したコンクリートでは，圧縮強度試験結果より，十分な長期強度発現のためには，材齢初期の養生に加えて，長期にわたる給水養生が重要である。またA～C間の差異も若干認められる。
- 3) 高炉セメントB種を使用したコンクリートは，乾燥材齢初期の段階ではA～C間の差異が若干認められ，普通セメントを使用したコンクリートより若干大きめの値であったが，長期になるとこのような傾向は認められない。
- 4) 高炉セメントB種を使用したコンクリートのひび割れ抵抗性は，普通セメントを使用したコンクリートよりやや小さい。これは，高炉セメントは，普通ポルトランドセメントに比べ，発熱量が少なく，水和反応が緩やかであり，材齢初期段階における強度発現が小さい。また，自己および乾燥収縮量が大きく，収縮量の差も影響しているものと考えられる。
- 5) 温度上昇は，セメントの種類や銘柄によって若干の差異が認められる。また，高炉セメントB種を使用した場合には，普通セメントより内部温度の上昇が遅く，放冷も緩やかであることが認められる。
- 6) 高炉セメントB種を使用したコンクリートでは，早期に乾燥状態となる構造物，例えば薄い壁やスラブなどで早期脱型または養生を十分に行えない場合，強度発現が十分に発揮されず，収縮などによるひび割れの可能性があり留意が必要である。

【謝辞】

本研究において、八洋コンクリートコンサルタント（株） 浅野研一氏，山崎 実氏に多大の御協力を頂きました。ここに深く感謝致します。

【参考文献】

- [1] (社)日本コンクリート工学協会編：超流動コンクリート研究委員会 報告書(Ⅱ)，日本コンクリート工学協会，pp149-160, 1994. 5
- [2] (社)日本コンクリート工学協会編：超流動コンクリート研究委員会 報告書(Ⅱ)
[付録1] (仮称)高流動コンクリートの自己収縮試験方法，日本コンクリート工学協会，pp209-210, 1994. 5
- [3] J I S 原案：コンクリートの乾燥収縮ひびわれ試験方法(案)，コンクリート工学，Vol. 23, No. 3, pp50-51, 1985. 3