論文　高炉スラグ微粉末を大量に混合したRCDコンクリートに関する研究

坂田　昇[*1]・林　大介[*2]・坂井　吾郎[*3]・宮川　豊章[*4]

要旨：高炉スラグ微粉末を大量に混合したRCDコンクリートのフレッシュ性状，硬化性状，発熱特性および自己収縮特性について実験的に検討した。その結果，高炉スラグ微粉末の混合量を多くすることによって，VC値が小さくなり振動締固め性能が向上すること，中庸熱フライアッシュセメントを用いた一般的なRCDコンクリートに比べて材齢3日以降の圧縮強度が高くなる一方で断熱温度上昇量は低くなること，自己収縮がほとんど生じないことなどを明らかにした。

キーワード：高炉スラグ微粉末，RCDコンクリート，フレッシュ性状，硬化性状，発熱特性，自己収縮特性

1. はじめに

近年，地球温暖化の影響により世界規模での気象異変が顕在化しており，温室効果ガスの削減による環境負荷の低減が喫緊の課題となっている。建設工事においても，CO_2削減の取組みとして，高炉セメントが用いられるケースが増えている。一般に高炉セメントとして，高炉スラグ微粉末の混合率が40～45wt%程度の市販の高炉セメントB種が広く使用されているが，CO_2削減の観点からは，さらにセメントの割合を減らし，高炉スラグ微粉末の混合率を大きくすることが有効である。

しかし，高炉スラグ微粉末をJIS規格の混合率70wt%を超えて大量に混合したセメントを一般的なコンクリートに用いた場合，初期強度発現が遅いこと，ブリーディングが大量に発生すること，中性化が進行しやすいこと，自己収縮が大きいことなどの問題が顕在化することが懸念される。

上記の課題を解決する試みとしては，これまでに高炉スラグを95wt%混合したセメントを用いた水中不分離性コンクリートの研究[1)]が行われている。この研究では，水中不分離性とすることでブリーディングが生じないため，長期にわたって強度増進することが確認されているが，凝結時間が著しく長くなり，初期強度発現に問題があることが指摘されている。

また，コンクリートダムの内部コンクリートに用いられるRCDコンクリートに，高炉スラグ微粉末を90wt%混合したセメントを用いた研究[2)]が行われている。この研究では，断熱温度上昇量が小さく，ダムコンクリートへの適用の可能性が示されているものの，その後の研究がなされておらず，実施工への適用には至っていない。

RCDコンクリートは，一般のコンクリートと異なり，さほど大きな初期強度が要求されないこと，超硬練りであるためブリーディングが生じないこと，ダム内部に使用されるため中性化などの耐久性が要求されないことなどの特徴を有するため，RCDコンクリートへの高炉スラグ微粉末を大量に混合したセメントの適用は極めて有効であると考えられる。

そこで，著者らは，高炉スラグ微粉末を大量に混合したRCDコンクリートの実用化を目的として，フレッシュ性状，硬化性状および発熱性状などについて，実験的に検討を行った。

2. 試験概要

2.1 使用材料およびコンクリート配合

使用材料およびコンクリート配合を，それぞれ**表－1**および**表－2**に示す。

同表に示す配合No.1（記号：MF30）は，セメントとしてフライアッシュ混合率30%の中庸熱フライアッシュセメントを用いた一般的なRCDコンクリートの配合である。配合No.2（記号：B90）は，配合No.1（MF30）と単位水量および水結合材比を同一とし，普通ポルトランドセメントに高炉スラグを90wt%混合した結合材を用いたRCDコンクリートの配合である。また，配合No.3（記号：B40）は，普通ポルトランドセメントに高炉スラグを40wt%混合した結合材を用いたRCDコンクリートの配合であり，この高炉スラグの混合率は，通常の高炉セメントB種に相当する範囲である。配合No.4（記号：N）については，後述する簡易断熱温度上昇試験において比較用とした普通コンクリートの配合である。

2.2 試験項目および方法

試験項目および方法を**表－3**に示す。ここで，簡易断熱温度上昇量試験以外の各試験に用いたコンクリートは，前掲の**表－2**の配合よりG80(粒径40～80mm)の粗骨

*1 鹿島技術研究所　土木材料グループ　グループ長　博士（工学）　(正会員)
*2 鹿島技術研究所　土木材料グループ　主任研究員　博士（工学）　(正会員)
*3 鹿島技術研究所　土木材料グループ　上席研究員　博士（工学）　(正会員)
*4 京都大学　大学院工学研究科　教授　工博　（正会員）

表－1　使用材料

項目	記号	摘要
水	W	上水道水，密度；1.0g/cm^3
セメント	C	普通ポルトランドセメント，密度；3.16 g/cm^3
		中庸熱フライアッシュセメント（フライアッシュ混合率 30%），密度；2.85 g/cm^3
混和材	B	高炉スラグ微粉末，密度；2.91 g/cm^3，比表面積；4040cm^2/g
細骨材	S	美山産砕砂，密度；2.64 g/cm^3，粗粒率；2.80
粗骨材	G20	青梅産砕石，密度；2.65 g/cm^3，実積率；63.7%，Gmax20mm，粒径 5～20mm
	G40	青梅産砕石，密度；2.66 g/cm^3，実積率；64.0%，Gmax40mm，粒径 20～40mm
	G80	当別産砕石，密度；2.60 g/cm^3，実積率；60.4%，Gmax80mm，粒径 40～80mm
AE 減水剤	AE	リグニンスルホン酸化合物とポリオールの複合体

表－2　コンクリート配合

No.	W/（C+B）（%）	W/C（%）	s/a（%）	単位量（kg/m^3）							AE（(C+B)×%）
				W	C	B	S	G20	G40	G80	
No.1（MF30）	70.8	70.8	30.0	85	120	－	679	530	532	520	0.25
No.2（B90）	70.8	708.3	30.0	85	12	108	680	531	533	521	0.25
No.3（B40）	70.8	118.1	30.0	85	72	48	682	532	534	522	0.25
No.4　（N）	55.0	55.0	47.0	165	300	－	862	976	－	－	0.25

表－3　試験項目および方法

評価項目	試験項目	試験方法	対象配合
フレッシュ性状	VC 試験	JSCE-F 508 に準拠	No.1，No.2，No.3
硬化性状	圧縮強度試験	JIS A 1108 に準じ，φ125×h250mm の標準養生の供試体を，配合ごとに 3 体試験	No.1，No.2
発熱特性	簡易断熱温度上昇量試験	500×500×500mm の供試体を発泡スチロールで断熱して温度測定（本文中に記載）	No.2，No.4
自己収縮特性	自己収縮試験	100×100×400mm の供試体にひずみ計を埋め込んで測定（本文中に記載）	No.2

材を除いた後，再度，1m^3 となるように各単位量を分配して練り混ぜたものとした。また，供試体を作製する際には，振動タンパを用いて締固めを行った。

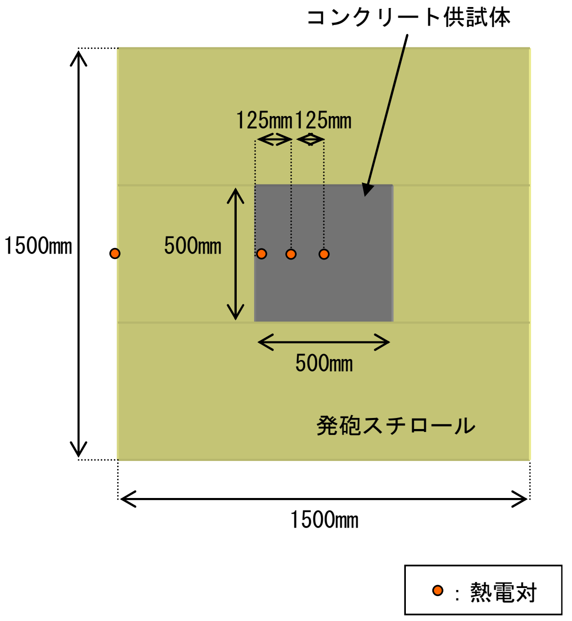
以下に，簡易断熱温度上昇量試験および自己収縮試験の方法を示す。

(1) 簡易断熱温度上昇量試験方法

温度 20℃および相対湿度 80%の室内において，**図－1** に示す断面図のように, 500×500×500mm のコンクリート供試体を厚さ 500mm の発泡スチロールで覆い，コンクリートの中心位置，コンクリート表面からの深さ 125mm の位置, コンクリート表面位置および発泡スチロール表面位置の計 4 箇所の温度を熱電対で測定した。供試体数は，各配合について 1 体とした。

(2) 自己収縮試験方法

100×100×400mm 供試体の中心に，**図－2** に示すようにひずみ計を設置してひずみを測定した。供試体作製にあたっては，ひずみ計を損傷させないように，丁寧にコ



図－1　簡易断熱温度上昇量試験（鉛直方向断面図）

ンクリートを打ち込んだ後，振動タンパによる締固めを行った。供試体数は，各配合について 3 体とした。

また，自己収縮試験にあたり，凝結試験を実施した。ここで，RCD コンクリートの場合，5mm ふるいでふるったモルタルでは細骨材の量が多すぎて凝結試験を行うことができないため，配合 No.2（B90）と同一水結合材比のペーストを練り混ぜた後，適度な材料分離抵抗性が得られるように細骨材を加えて凝結試験を行った。

3. 試験結果および考察

3.1 フレッシュ性状

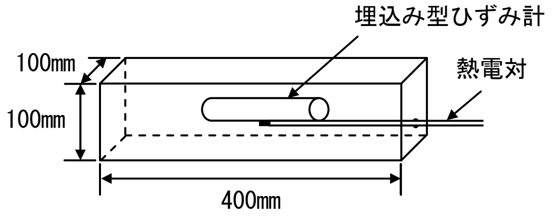
VC 試験結果を**図－3** に示す。同図に示すように，単位水量および水結合材比を同一とした場合，配合 No.1（MF30）および配合 No.2（B90）の VC 値は，それぞれ 8.0 秒および 9.3 秒であり，ほぼ同程度の値となった。また，配合 No.3（B40）の VC 値は 15.7 秒であり，他の 2 種類の配合に比べて大きな値となった。

配合 No.2（B90）と配合 No.3（B40）を比較すると，普通ポルトランドセメントに対する高炉スラグ微粉末の混合率を高めることによって，明らかに VC 値が小さくなることが分かる。これは，普通ポルトランドセメントが少ない配合 No.2（B90）の方が，注水直後の極初期のセメントの水和の影響を受けにくく，VC 値の低減に寄与するコンクリート中の自由水が多いためであると考えられる。その他にも高炉スラグ微粉末の密度が小さいことによる結合材体積の増加の影響が考えられるが，その増加分は僅かであり，それによる影響は小さいものと考えられる。

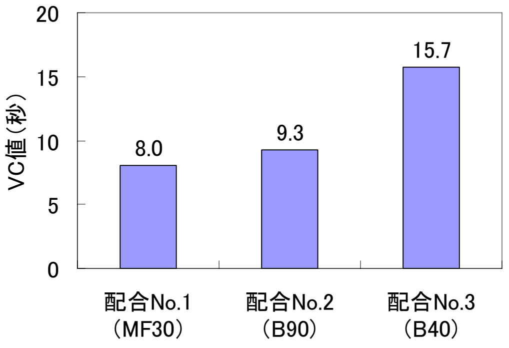
これに対して，配合 No.1（MF30）と配合 No.2（B90）を比較すると，VC 値がほぼ同じであることが分かる。一般に，配合 No.1（MF30）は，フライアッシュの球状粒形によるボールベアリング効果や結合材の体積が大きくなる効果があるため，粉体粒子の形状が角張っている高炉スラグを大量に使用した配合 No.2（B90）よりも VC 値が小さくなることが予測された。しかし，配合 No.1（MF30）の結合材に占めるセメントの割合は 70 wt %であるのに対して，配合 No.2（B90）のセメントの割合は 10 wt %であるために，前述のように，結合材中のセメントの初期水和が大きく影響し，両者の効果が同程度となったものと考えられる。

3.2 硬化性状

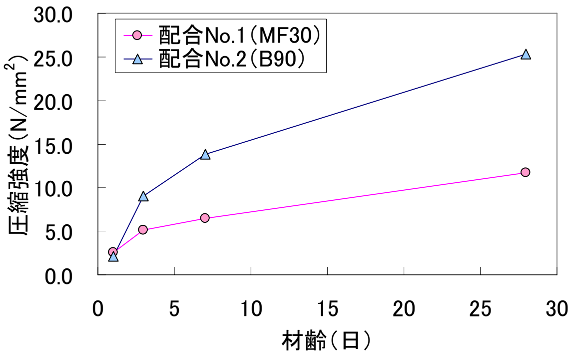
圧縮強度試験結果を**図－4** に示す。同図に示すように，配合 No.2（B90）の圧縮強度は，材齢 1 日において配合 No.1（MF30）と同程度となり，材齢 3 日以降は 2 倍程度の値となった。硬化性状の考察については，発熱性状の考察と併せて後述する。



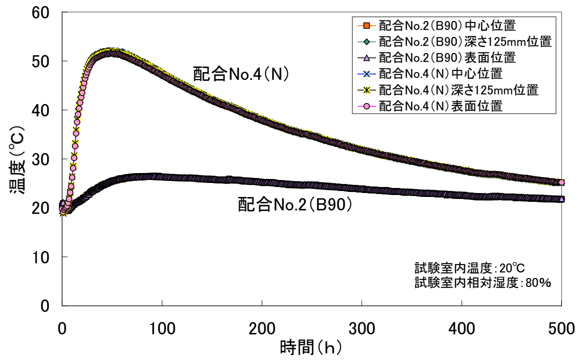
図－2　自己収縮試験の概要



図－3　VC 試験結果



図－4　圧縮強度試験結果



図－5　簡易断熱温度上昇量試験結果

3.3 発熱性状

(1) 簡易断熱温度上昇量試験結果

簡易断熱温度上昇量試験結果を，**図－5** に示す。同図より，配合 No.2（B90）および配合 No.4（N）のいずれも，コンクリートの中心位置，コンクリート表面からの

深さ 125mm の位置およびコンクリート表面位置の 3 箇所における温度の差はほとんど認められない結果であった。

配合 No.2（B90）の温度は，約 80 時間で 26℃まで上昇し，その後，緩やかに下降した。また，配合 No.4（N）の温度は，約 47 時間で 52℃まで上昇し，その後，下降した。

(2) 温度解析による断熱温度上昇式の同定

簡易断熱温度上昇量試験の結果を基に，温度解析により配合 No.2（B90）の断熱温度上昇式の同定を試みた。解析手法として 2 次元 FEM を用い，断熱温度上昇式が式(1)で表現できるものとして解析を行った。

$$Q(t) = Q_{\infty}\left(1 - e^{-rt}\right) \qquad \text{式(1)}$$

ここに，Q(t)；材齢 t 日における断熱温度上昇量（℃）

Q_{∞}；終局断熱温度上昇量

r ；温度上昇速度に関する定数

まず，既往の文献 [3]から断熱温度上昇式を仮定することができる配合 No.4（N）について解析を実施し，本試験における表面熱伝達率および熱伝導率を同定した。ここで，配合 No.4 (N) の断熱温度上昇特性値には，Q_{∞}=41.0（℃），r =1.267 を用いた。解析値と実測値を比較して，最も再現性が高いと判断されたときのコンクリート中心位置における温度履歴を**図－6** に，このときの表面熱伝達率と熱伝導率を**表－4** に示す。

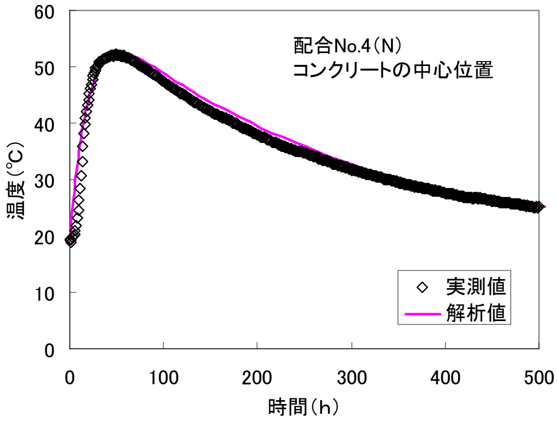
次にこれらの値を用い，配合 No.2（B90）の温度履歴を再現することができる断熱温度上昇式を同定した。結果を**図－7** および**表－5** に示す。

同定された配合 No.2（B90）の断熱温度上昇式を，既往の文献 [3]に示される中庸熱フライアッシュセメント（MF30）の単位セメント量 120kg/m^3 の配合と比較して**図－8** に示す。同図より，高炉スラグ微粉末を大量に用いることにより，一般的な RCD コンクリートよりも温度上昇を抑制することができ，温度応力を低減できる可能性があることが分かる。

(3) 発熱特性と強度発現の関係

既往の研究 [2]によれば，断熱温度上昇と標準養生供試体の圧縮強度には，高い相関があることが報告されている。**表－6** および**図－9** に，各材齢の圧縮強度と最終断熱温度上昇量の比を示す。この値が大きいほど，より少ない発熱で強度が発現することを示す。また，同表には，既往の試験結果 [2]も併せて示した。

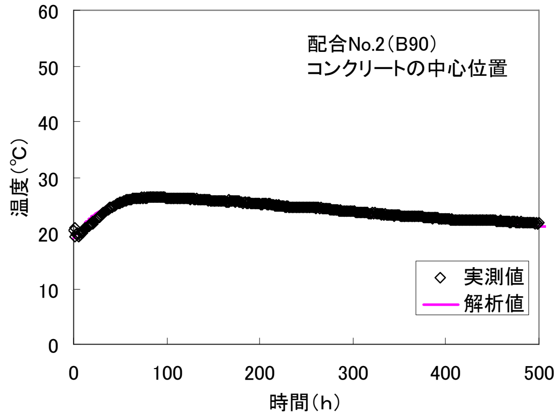
図表に示すように，配合 No.2 (B90) の値は，配合 No.1（MF30）よりも大きく，その程度は，材齢 1 日で約 2 倍，材齢 3 日で約 4 倍，材齢 7 日および 28 日で約 5 倍となった。この傾向は，既往の研究結果 [2] においても同様であり，高炉スラグ微粉末 90wt%（B90）の方が，中庸熱フライアッシュセメント（MF30）よりも大きな値と



図－6　配合 No. 4（N）の解析値と実測値の比較

表－4　配合 No. 4（N）の表面熱伝達率および熱伝導率

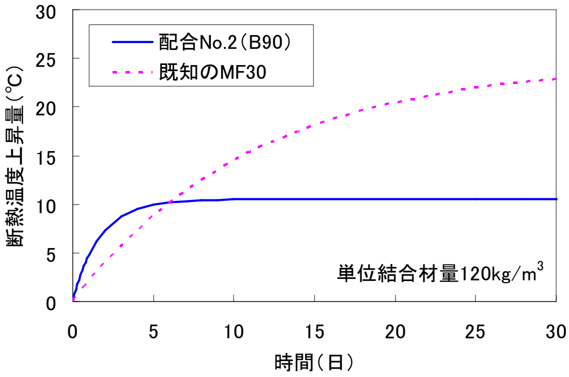
項目	同定結果	単位
表面熱伝達率	0.4	W/m^2℃
熱伝導率	2.6	W/m℃



図－7　配合 No. 2（B90）の解析値と実測値の比較

表－5　配合 No. 2（B90）の断熱温度上昇特性値

項目	同定結果	単位
終局断熱温度上昇量 Q_{∞}	10.5	℃
温度上昇速度に関する定数 r	0.600	－



図－8　断熱温度上昇量

表－6　各材齢の圧縮強度と最終断熱温度上昇量の比

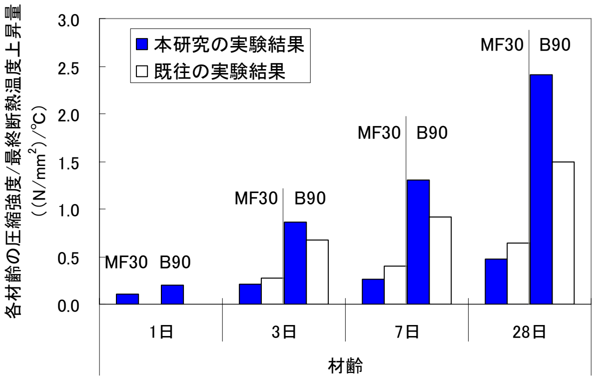
No.	配合条件				各材齢の圧縮強度 / 最終断熱温度上昇量 ((N/mm^2) / ℃)			
	結合材種類	W/（C+B）(%)	s/a (%)	単位セメント量（kg/m^3）	1 日	3 日	7 日	28 日
No.1（MF30）	MF30	70.8	30.0	120	0.11	0.21	0.26	0.47
No.2（B90）	B90	70.8	30.0	120	0.20	0.86	1.31	2.41
既往（MF30）[2]	MF30	89.2	35.0	120	－	0.27	0.40	0.64
既往（B90）[2]	B90※	90.0	35.0	120	－	0.67	0.92	1.50

※：中庸熱ポルトランドセメントに高炉スラグを 90wt％混合した結合材

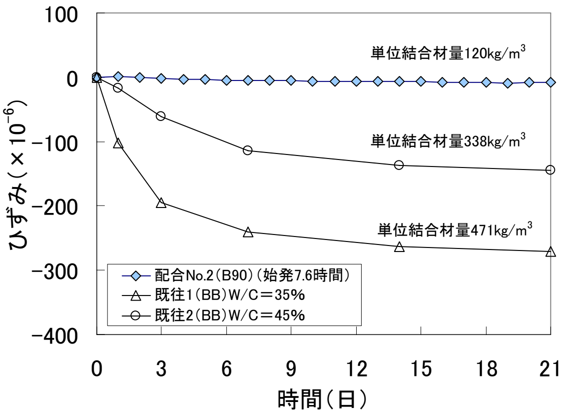
なっている。このことから，RCD コンクリートにおいて，高炉スラグ微粉末 90wt％（B90）とすることによって，より少ない発熱で高い強度発現性が得られるものと考えられる。ただし，この理由については明確でなく，今後，検討を進めていくことが必要である。

3.4 自己収縮

自己収縮試験結果を図－10 に示す。一般に高炉セメントを用いたコンクリートは，自己収縮が大きいことが知られており，今回のように高炉スラグ微粉末を大量に使用した場合，さらに自己収縮が大きくなることが懸念された。しかし，同図に示すように，配合 No.2（B90）の自己収縮量は，-10×10^{-6} 程度であり，ほとんど自己収縮が生じない結果となった。Gmax20mm で高炉セメント B 種を用いた普通コンクリートの既往の実験結果[3]によれば，材齢 21 日でのひずみが， W/C＝35%で-271×10^{-6}，W/C＝45%で-145×10^{-6} であることから， RCD コンクリートのように水セメント比が 70%以上と極めて大きい場合には，セメントの種類によらず，自己収縮はほとんど生じないことが推察される。なお，今回の試験では粗骨材を 5mm～40mm 寸法としており，フルサイズの配合では 40mm～80mm 寸法の粗骨材が収縮に抵抗する骨格になるため，実際の RCD コンクリートでは，さらに自己収縮は小さいものと考えられる。



図－9　各材齢の圧縮強度と最終断熱温度上昇量の比



図－10　自己収縮試験結果

4. まとめ

高炉スラグ微粉末を大量に混合した RCD コンクリートの諸特性について実験的に検討した結果，以下の知見を得た。

(1) 普通ポルトランドセメントに対する高炉スラグ微粉末の混合量を多くすると，VC 値が小さくなる。これは，極初期の水和反応が緩やかに進行することによるものと考えられる。

(2) 高炉スラグ微粉末の混合量を 90wt％とした場合の VC 値は，中庸熱フライアッシュセメントを用いた一般的な RCD コンクリートと同程度である。これは，中庸熱フライアッシュセメントに含まれるフライアッシュのボールベアリング効果および結合材体積の増大効果と，高炉スラグ微粉末の混合量を 90wt％としたセメントの極初期の水和反応が緩やかに進行する効果が同程度であることによるものと考えられる。

(3) 高炉スラグ微粉末の混合量を 90wt％とした場合の圧縮強度は，材齢 1 日において中庸熱フライアッシュセメントを用いた RCD コンクリートと同程度であり，材齢 3 日以降は，中庸熱フライアッシュセメントを

用いた RCD コンクリートの 2 倍程度となる。

(4) 高炉スラグ微粉末の混合量を 90wt%とした場合の断熱温度上昇量は，中庸熱フライアッシュセメントを用いた場合よりも低くなる。このため，温度応力が低減される可能性が高いものと考えられる。

(5) 高炉スラグ微粉末の混合量を 90wt%とした場合，中庸熱フライアッシュセメントと比較して，少ない発熱で高い強度発現性を有するコンクリートとなる。

(6) 高炉スラグ微粉末の混合量を 90wt%とした場合，ほとんど自己収縮が生じない。これは，RCD コンクリートのように水セメント比が 70%以上と極めて大きい場合には，自己収縮はほとんど生じないためと考えられる。

参考文献

1) 田沢雄二郎，大友忠典，横田慎一，平和男，溝淵利明：低発熱型水中コンクリートの開発－高炉スラグ微粉末を大量添加した特殊水中コンクリートの特性－, 鹿島建設技術研究所年報, Vol.35, pp.1-6, 1987.6

2) 河野広隆，森濱和正：高炉スラグ微粉末の RCD コンクリートへの利用，土木研究所資料第 3248 号，1994.1

3) 宇部三菱セメント：技術資料（第５版），2008.4