

# [26] 高炉水砕スラグ粉末を用いた膨張コンクリートの膨張特性 および圧縮強度

正会員 辻 幸和 (群馬大学 工学部)

正会員 ○小林 信一 (群馬大学 工学部)

## 1. 序論

高炉水砕スラグ粉末は、高炉セメントおよび普通ポルトランドセメントの混合材としてだけでなく、混和材としても利用され、すでに数多くの研究成果が報告されている。また、高炉水砕スラグ粉末を膨張コンクリートに併用した場合の膨張特性および強度に関する実験結果も高炉セメントを含めて、すでにいくつか報告されているが、拘束状態下におけるものは少ない。そして、拘束を受ける膨張コンクリートは、拘束鋼材比が1%の膨張率に換算して、 $300 \times 10^{-6}$ 程度までの比較的膨張エネルギーの小さいものに限られており、ケミカルプレストレスを積極的に利用する膨張エネルギーの大きいコンクリートに関する報告はなされていない。

本研究は、高炉水砕スラグ粉末の有効利用を目的として、すでに報告した結果を踏まえて<sup>1)2)</sup>、膨張コンクリートの一軸拘束膨張率、および自由膨張させた圧縮強度特性に及ぼす高炉水砕スラグ粉末の影響を、単位膨張材量、水結合材比、および膨張材の種類を主要因にとって実験した結果を報告するものである。高炉水砕スラグ粉末の使用量は、膨張材の2倍および4倍と一定のまま、単位膨張材量とともに変化させている。

## 2. 実験の概要

膨張率の測定には、JIS A6202「コンクリート用膨張材」の参考1「膨張コンクリートの拘束膨張及び収縮試験方法」に規定するA法一軸拘束器具を用いた。断面が $10 \times 10$ cm、長さが36cmの断面中央に、呼び名11mmのPC鋼棒を拘束鋼材として配置し、鋼棒の両端を端板で溶接して拘束する方法である。拘束鋼材の断面積とコンクリートの断面積の比で表わされる拘束鋼材比は、0.96%である。材令1日で脱型し、ダイヤルゲージ法により測定した3本の供試体の平均値をとった。圧縮強度は $\phi 10$ cmのシリンダーを用い、材令2日で脱型した後、 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ の水中で自由膨張させた。試験材令は、1週、4週、13週および52週で、同じく3本の測定値を平均した。

膨張コンクリートの配合は、表-1に組合せを示すように、水結合材比 $W/(C+B+E)$ を40%、50%、60%の3種類、単位膨張材量 $E$ を0、20、30、40、50、60 $\text{kg}/\text{m}^3$ の6種類、膨張材をエトリンガイト系のXと石灰系のYの2種類に変化させ、高炉水砕スラグ粉末（以下スラグと略称する）は、単位膨張材量 $E$ が0 $\text{kg}/\text{m}^3$ を除き、膨張材に対する重量比 $B/E$ で0、2、4の3種類に変化させる方法をとった。セメントに対するスラグの置換え率 $B/(C+B)$ に直すと、水結合材比 $W/(C+B+E)$ が40%の場合は62%まで、50%の場合は89%まで、60%の場合は89%まで変化させている。なお、一部の組合せについては、 $E$ が70 $\text{kg}/\text{m}^3$ および80 $\text{kg}/\text{m}^3$ を、それぞれ追加した。また $E$ が0 $\text{kg}/\text{m}^3$ の圧縮強度の基準となる普通コンクリートについては、スラグ混和率 $B/(C+B)$ を、0、30、50、70、85%に変えた。これらの配合のうち $E=0$  $\text{kg}/\text{m}^3$ 、 $B=0$  $\text{kg}/\text{m}^3$ の基準配合表を表-2に示す。

スラグは1種類を、膨張材はエトリンガイト系の膨張材Xと石灰系の膨張材Yの2種類を、また、セメントは普通ポルトランドセメントをそれぞれ用いた。それぞれの化学成分、比重等を表-3に示す。骨材は渡良瀬川産の川砂および川砂

表-1 配合の組合せ

E (kg/m <sup>3</sup> )	W/(C+B+E) = 40 (%)			W/(C+B+E) = 50 (%)			W/(C+B+E) = 60 (%)		
	B/E = 0	B/E = 2	B/E = 4	B/E = 0	B/E = 2	B/E = 4	B/E = 0	B/E = 2	B/E = 4
2.0	○	○	○	○	○	○	○	○	○
3.0	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.0	○	○	○	○	○	○	○	○	○
5.0	○	○	○	○	○	○	○	○	○
6.0	○	○	○	○	○	○	○	○	○
0	B/C = 0, 30, 50, 70, 85 (%)								

表-2 基準配合表

粗骨材の最大寸法 (mm)	スラング (cm)	空気量 (%)	水結合材比 W/(C+B+E) (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
					水 W	結合材 C+B+E	細骨材 S	珪骨材 G
25	8-1	1.5-0.5	40	37	180	450	643	1111
25	8-1	1.5-0.5	50	40	165	330	750	1143
25	8-1	1.5-0.5	60	43	165	275	843	1154

利を用い、比重は、それぞれ 2.48 および 2.65、粗粒率はそれぞれ 2.98 および 6.94 (最大寸法 25mm) であった。

コンクリートの打込みは温度が  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度が 80% RH 以上の部屋で行い、脱型までその部屋で養生した。脱型後は  $20 \pm 1^\circ\text{C}$  の水中養生とした。

### 3. 膨張特性

スラグと膨張材の重量比  $B/E$  を 0, 2 および 4 に、それぞれ一定に保ったコンクリートの一軸拘束膨張率と単位膨張材量  $E$  との関係を示した例が図-1 である。膨張量の増加がほとんど認められなくなった材令 7 日における、水結合材比が 50% の場合である。

スラグを用いない膨張コンクリートの一軸拘束膨張率は、 $E$  の増加とともに、放物線状に増加している。スラグを用いた膨張コンクリートも、ある範囲までは、 $E$  の増加に伴って膨張率は同様に増加するが、その勾配は、スラグの使用量が多いほど緩やかになっている。また、単位膨張材量が増加しても膨張率は増加しない現象が生じている。このような現象が生じ始める単位膨張材量は、スラグ膨張材比が大きいほど小さくなる傾向が認められる。水結合材比が 40% および 60% の場合もほぼ同様のことが示された。

一軸拘束膨張率とスラグ膨張材比  $B/E$  の関係を、 $E$  が  $30\text{kg}/\text{m}^3$  と  $50\text{kg}/\text{m}^3$  についてプロットしたのが図-2 である。また、図-3 は、 $E$  が  $40\text{kg}/\text{m}^3$  の場合の拘束膨張率と結合材水比との関係を示す。

単位膨張材量  $E$  が  $30\text{kg}/\text{m}^3$  の場合は、スラグを膨張材の 2 倍あるいは 4 倍用いて、その量だけセメントを減じて、拘束膨張率の低下は小さい。特に、膨張材 X を用いたコンクリートの低下は、ほとんど認められない程度である。

単位膨張材量を  $40\text{kg}/\text{m}^3$  以上用いると、スラグの使用による拘束膨張率の減少は顕著になってくる。この膨張率の低下の程度は、一般に、水結合材比が大きく、同じスラグ膨張材比でもスラグの置換え率  $B/(C+B)$  が大きな膨張コンクリートほど著しくなることも認められる。そして、 $E$  が  $50\text{kg}/\text{m}^3$  のスラグ膨張材比が 4 の膨張コンクリートは、スラグを用いない場合の 20~40% 程度の膨張率しか生じていない。水結合材比が 60% のコンクリートは、表-2 に示すように、単位結合材量  $(C+E+B)$  が  $275\text{kg}/\text{m}^3$  のうち、 $E$  が  $50\text{kg}/\text{m}^3$ 、 $B$  が  $200\text{kg}/\text{m}^3$  で、セメント量  $C$  が  $25\text{kg}/\text{m}^3$  しかない。スラグ置換え率に直すと 89% となる。したがって、膨張エネルギーに変化がないと仮定しても、スラグを多量に用いると、膨張作用が活発な材令初期におけるコンクリートの強度発現が小さいため、ケミカルプレスト

表-3 高炉水砕スラグ粉末、膨張材およびセメントの品質

	比重	比表面積 ( $\text{cm}^2/\text{gr}$ )	遊離 熱量	化 学 成 分 (%)						合計
				$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{SO}_3$	
スラグ	2.90	3720	-	33.2	15.6	0.9	42.1	6.4	-	98.2
膨張材 X	2.96	2650	0.4	2.4	12.1	0.5	52.4	1.6	30.4	99.8
膨張材 Y	3.14	3900	0.6	6.8	1.8	2.4	60.5	2.4	22.7	97.2
セメント	3.17	3260	0.5	22.2	5.3	3.0	64.6	1.4	1.8	98.8

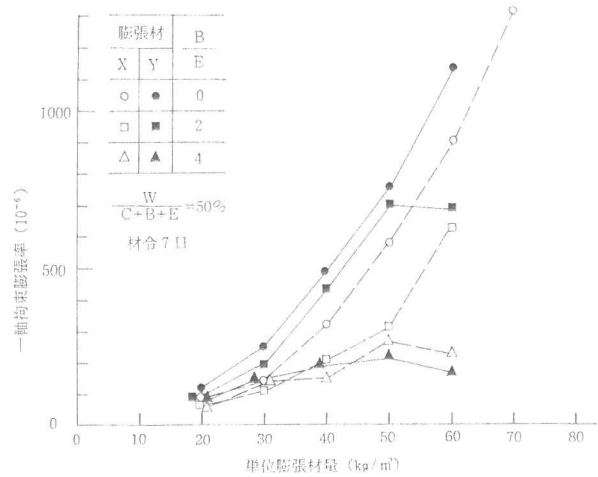


図-1 単位膨張材量と拘束膨張率の関係

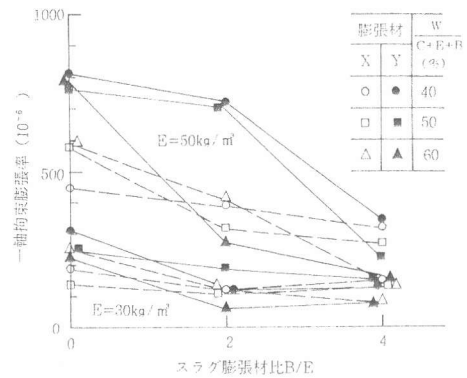


図-2 スラグ量が膨張率に及ぼす影響

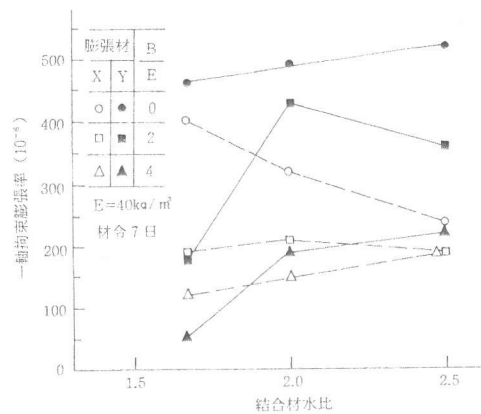


図-3 結合材水比と膨張率の関係

レスの拘束に打ち勝って膨張することが、困難となることに起因すると考えられる。

#### 4. 圧縮強度

図-4は、自由膨張させた膨張コンクリートの圧縮強度の経時変化の例である。なお、EおよびBとも $0 \text{ kg/m}^3$ の普通コンクリートの圧縮強度の発現曲線を破線で示す。

単位膨張材量Eが $20 \text{ kg/m}^3$ および $30 \text{ kg/m}^3$ 、あるいはB/Eが4の $40 \text{ kg/m}^3$ の膨張コンクリートのように、膨張作用による強度の低下がほとんど生じない範囲では、Eにかかわらず、ほぼ等しい強度発現曲線を示す。B/Eが2のEが $40 \text{ kg/m}^3$ の膨張コンクリートは、図-1に示すように、一軸拘束膨張率が材令7日において $400 \times 10^{-6}$ を超えたこともあり、圧縮強度の低下が生じている。この場合でも、材令の経過に伴う強度発現は、強度低下を生じないものとほぼ同様である。

単位膨張材量Eを $50 \text{ kg/m}^3$ に増加すると、同じく図-1に示すように、膨張材Yを用いたB/Eが2のコンクリートは、著しい膨張のため拘束膨張率が $700 \times 10^{-6}$ を超え、強度の低下が顕著である。また、Eを $60 \text{ kg/m}^3$ に増加しても、拘束膨張率は増えないにもかかわらず、自由膨張したコンクリートの圧縮強度は減少している。なお、このような場合においても、材令の経過に伴う強度の発現は、わずかながら期待できる。

スラグ膨張材比B/Eが4の場合に、Eを $50 \text{ kg/m}^3$ 以上用いても、一軸拘束膨張率は $250 \times 10^{-6}$ 程度と小さいが、自由膨張させたコンクリートの圧縮強度の低下は著しいことも、図-1と図-4から明らかである。なお、図-4(b)において、強度の低下が生じないEが $40 \text{ kg/m}^3$ 以下の膨張コンクリートの材令7日における圧縮強度は、普通コンクリートに比べて小さくなっていることも認められる。しかしながら、材令の経過に伴う強度増進は大きく、材令28日あるいは91日において、普通コンクリートとほぼ同等の値を示している。いわゆる潜在水硬性に起因するものである。

結合材水比と圧縮強度の関係を図-5に示す。スラグ膨張材比が2の場合であり、破線は、普通コンクリート(B/E=0, E=0  $\text{kg/m}^3$ )の場合である。単位膨張材量Eを $30 \text{ kg/m}^3$ 用い、膨張作用による強度低下がほとんど生じない場合には、圧縮強度と結合材水比との間に直線関係が成立する。しかしながら、Eを $40 \text{ kg/m}^3$ 以上用いて、強度の低下が生じる範囲においては、膨張作用の及ぼす影響が大きくて、結合材水比との間には直線関係が成立しなくなる。

図-6は、Eが $30 \text{ kg/m}^3$ の膨張コンクリートの圧縮強度と結合材水比との関係を、スラグ膨張材比と材令をパラメータにと

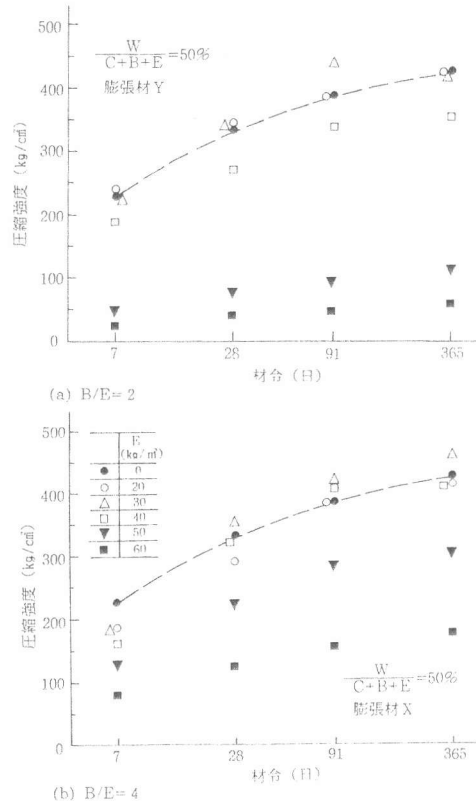


図-4 圧縮強度の発現曲線

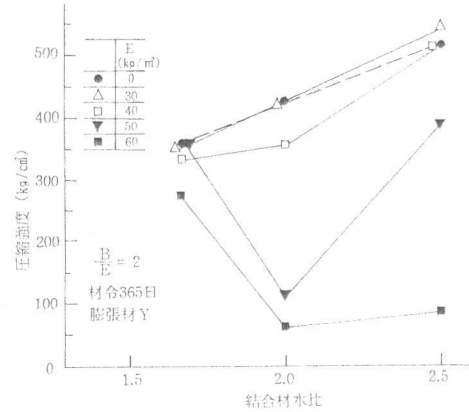


図-5 結合材水比と圧縮強度の関係

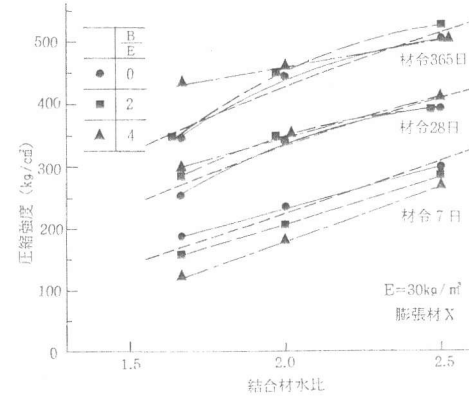


図-6 各材令における結合材水比と圧縮強度の関係

りプロットしたものである。材令7日では、スラグ量が多くなるほど強度は小さく、また、各B/Eとも、それぞれ圧縮強度と結合材水比との間に直線関係が成り立っている。

材令が28日になると、スラグの使用による強度の減少は改善され、膨張材の4倍のスラグをセメントと置換えても、圧縮強度はスラグを用いないコンクリートとほぼ等しくなっている。また、結合材水比との間にも、少し上に凸の曲線となるものの直線関係が成立するとみなすことができる。材令が1年の場合も、水結合材比が60%におけるB/Eが4の場合の強度発現が良好である点を除けば、材令28日の場合と同様な傾向が認められる。

### 5. 一軸拘束膨張率と圧縮強度の関係

一軸拘束膨張率を対数目盛で横軸にとり、圧縮強度との関係を示したのが図-7である。スラグを用いない膨張コンクリートは、膨張率が $400\sim 500 \times 10^{-6}$ 程度の範囲まで、膨張作用による強度の低下はほとんど生じていない。

スラグを併用すると、膨張率が小さくなり、 $400 \times 10^{-6}$ 程度以下においても強度の低下が生じている。そして、強度低下はB/Eが大きいほど著しくなっている。このような自由膨張させた圧縮強度の低下は、水結合材比が小さいほど軽減されることも図-7より明らかである。特に、水結合材比が40%のコンクリートは、B/Eが4の場合、膨張率が $500 \times 10^{-6}$ と大きいにもかかわらず、普通コンクリートの約70%の強度が得られている。

材令7日における強度低下も、一般には、材令の経過とともに回復することが(d)図より認められる。点線で囲んだEおよびB/Eが極端な場合を除けば、膨張率が $400 \times 10^{-6}$ 程度生じてても、圧縮強度の低下は約5%以内にとどまっている。

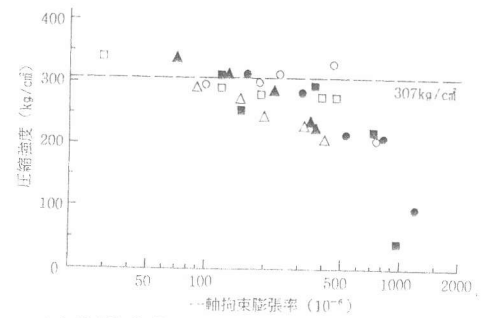
### 6. 結論

本研究は、高炉水砕スラグ粉末を膨張コンクリートに用いた場合の一軸拘束膨張特性および自由膨張させたコンクリートの圧縮強度に及ぼす、高炉水砕スラグ粉末の使用量、単位膨張材量、水結合材比および膨張材の種類の影響を実験的に検討したものである。そして、単位膨張材量が $30 \text{ kg/m}^3$ 程度の膨張コンクリートに、膨張材の4倍程度まで高炉水砕スラグ粉末を用いても、膨張特性および圧縮強度とも高炉水砕スラグ粉末を用いない場合とほぼ同等の性状を示すことを明らかにした。

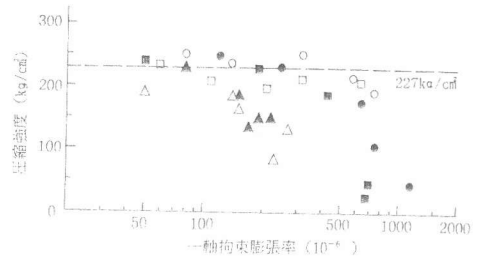
本研究は、文部省科学研究費補助金一般研究(C)(課題番号56550330)を受けた。付記して厚くお礼申し上げます。

### 参考文献

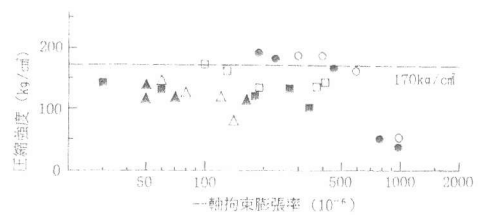
- 1) 辻幸和、川村勲：高炉スラグ粉末を併用した膨張コンクリートの膨張特性、セメント技術年報 33、1979年。
- 2) 辻幸和、佐藤喜徳：高炉スラグ粉末を併用した膨張コンクリートの膨張強度特性、土木学会第35回年次学術講演会講演概要集、V-142、1980年9月。



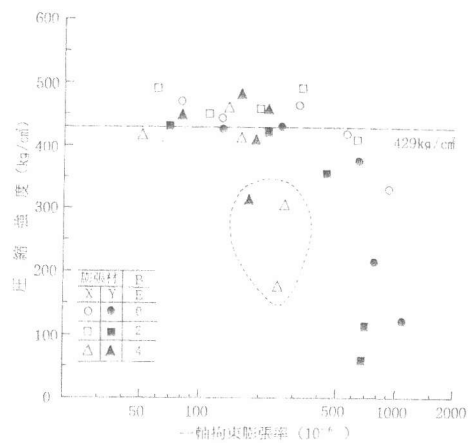
(a)  $W/(C+B+E)=40\%$ 、材令7日



(b)  $W/(C+B+E)=50\%$ 、材令7日



(c)  $W/(C+B+E)=60\%$ 、材令7日



(d)  $W/(C+B+E)=50\%$ 、材令365日

図-7 一軸拘束膨張率と圧縮強度の関係