

# [10] 減圧処理された高炉スラグ碎石コンクリートの諸特性に関する 実験研究

正会員 ○大内 千彦 (関東学院大学)  
森島 修 (関東学院大学)  
綾 亀一 (関東学院大学)  
正会員 加藤 清志 (防衛大学校)

## 1. まえがき

高炉スラグ碎石は多孔質なものもあり、また一般に表面組織は粗である。本実験で行なった減圧処理高炉スラグ碎石コンクリートとは、セメントペーストと骨材界面との付着機構を大気圧差による機械的圧着作用で改善することを目的とした一手法である。すなわち、高炉スラグ碎石コンクリートを練りまぜ中にミキサ内で減圧し、所定の時間経過後瞬間的に大気圧にもどすことにより、普通コンクリートにおいては、約20%の圧縮強度増が得られた<sup>1)</sup>が、高炉スラグ碎石コンクリートにおいても材令28日で約850<sup>kgf/cm<sup>2</sup></sup>の高強度コンクリートが比較的容易に得られ、本報はそれらの圧縮強度特性とあわせて報告する。

## 2. 実験概要

《使用材料・配合》 使用したセメントは N社製普通ポルトランドセメント(比重3.16)であり高強度コンクリート作製実験の場合には 同社製早強ポルトランドセメント(比重3.14)を用いた。細骨材は 千葉県君津産の混合山砂で表乾比重2.64, 吸水率1.53%, 粗粒率2.67のものを使用し、粗骨材は S社製2505Bの高炉スラグ碎石で、絶乾比重2.40, 吸水率2.80%, 粗粒率7.00のものを使用した。配合は 単位水量を153<sup>kgf<sup>2</sup></sup>と一定にし、水セメント比を30, 35, 38, 45, 50, 55, 60%, 細骨材率を35, 45, 55, 60%と変化させ、混和剤として K社製空気非連行型高性能減水剤をセメント重量の0.6%使用した。高強度コンクリート用の配合は 単位セメント量600<sup>kgf</sup>, 細骨材率を32.2%<sup>2)</sup>と一定にした。水セメント比は ワカビリチーを確保できる最小値とし、表-1に示すとおりとした。なお、高炉スラグ碎石は 気乾状態のままで使用した。

《実験装置》 本実験で使用した練りまぜ装置一式を写真-1に示す。ミキサは 公称容量35ℓの可傾式ミキサを加工して使用した。真空ポンプは 到達真空度 $3 \times 10^{-3}$ mmHg, 排気速度250ℓ/分のものを使用し、ミキサと真空ポンプ間に集水トラップ、負圧計および圧力調整バルブを設置した。

《実験方法》 練りまぜ方法は 粗骨材、細骨材、セメントを投入後 30秒間空練りを行ない、混和剤を含む水を投入し さらに 30秒間練りまぜた。その後 練りまぜを中断し 手早くフタを取りつけ 再び練りまぜを開始すると同時に、減圧も開始した。なお、約30秒間で600mmHgに到達し、この減圧度で4分30秒間持続させつつ練りまぜた。その後 バルブを開き、瞬間的に大気圧にもどした。ただちに、ミキサより コンクリートを排出し、1~2回切り返しを行なった後、スランプ試験を行ない、かつ、供試体(10φ×20cm)を作製した。所定の水中養生(20°±3℃)を終えた後、圧縮強度試験を行なった。なお 総供試体数は減圧無処理260個、減圧処理328個、合計588個であった。

## 3. 減圧処理効果

配合および減圧処理時間を一定にし、減圧度を変化させた場合のスランプの変化と圧縮強度との関係

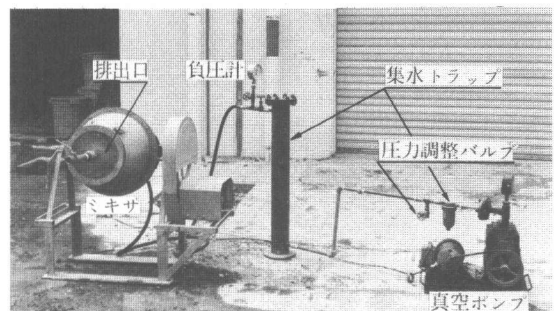


写真-1 練りまぜ装置一式

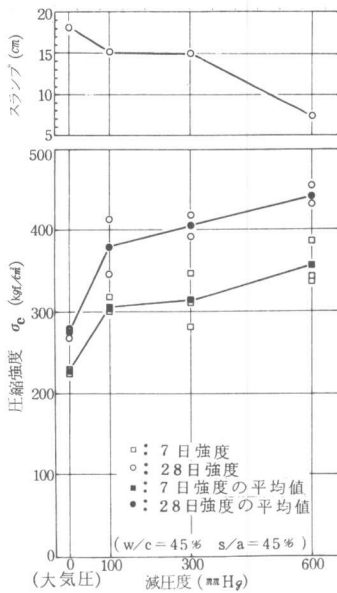


図-1 圧縮強度と減圧度との関係

を図-1に示す。減圧度の増大とともにスランブが低下し、反面圧縮強度が増大することがわかった。また、大気圧下で練り混ぜた場合に比し、100 mm Hgの減圧度で練り混ぜた場合との差が大であることがわかり、さらに100 mm Hgと300 mm Hgではスランブ、圧縮強度ともに大差がなく、600 mm Hgの減圧度で減圧処理を行なうことにより、約1.6倍の圧縮強度増になることがわかった。本実験では以後600 mm Hgの減圧度で減圧処理を行なった。

減圧処理を行なうと、スランブが低下するが、その低下量(ΔS)は図-2のようになり、(1)式で与えられる。

$$\Delta S = S_0 - 0.6 \times 1.15^{S_0} \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 $S_0$ ：減圧処理しないコンクリートのスランブ (cm)  
 処理しないコンクリートのスランブが約18cm以下の場合では、減圧処理によるスランブの低下量が直線的に増大するのに比し、スランブが約20cm以上のコンクリートではスランブの低下量が急激に減少する。このことは、減圧処理することで、セメントペーストが大気圧により圧着され、かつ、骨材表面および内部へ浸透が促され、セメントペースト量の相対的な減少に起因することが主要因と考えられる。

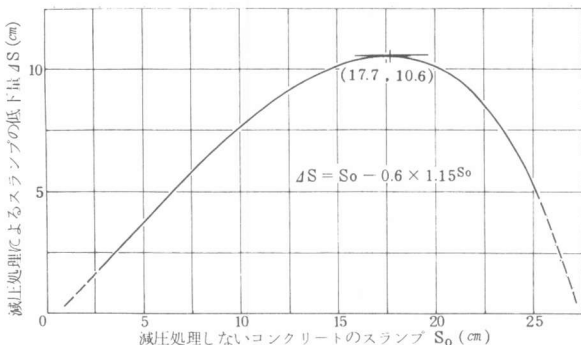


図-2 ΔSとS<sub>0</sub>との関係

減圧処理されたコンクリートの圧縮強度とセメント水比との関係を図-4に、圧縮強度と単位セメント量との関係を図-5に示す。これらから高炉スラグ碎石コンクリートを減圧処理することにより、同一セメント水比において、圧縮強度が100~200 kgf/cm<sup>2</sup>増大し、同一単位セメント量においては圧縮強度が約75~130 kgf/cm<sup>2</sup>増大することがわかった。また、減圧処理した場合の圧縮強度とセメント水比との相関式を(2)式で示し、同一単位セメント量における圧縮強度の増加量を(3)式に示した。

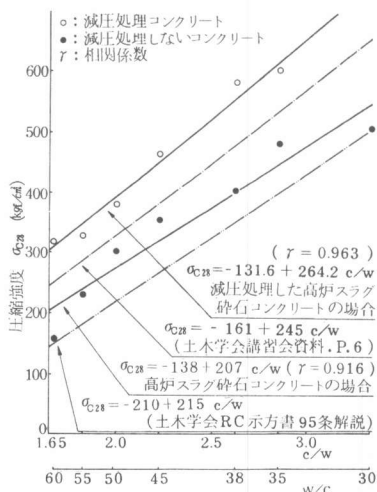


図-3 圧縮強度とセメント水比との関係

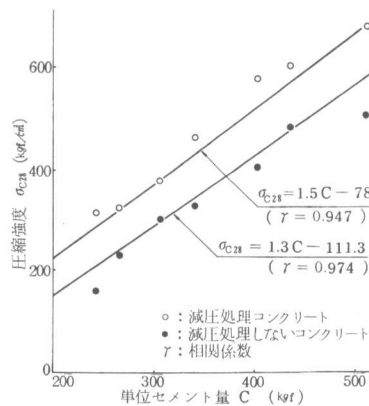


図-4 圧縮強度と単位セメント量との関係

$$\sigma_{c28} = -131.6 + 264.2 c/w \quad (\gamma = 0.96) \dots\dots\dots(2)$$

$$\Delta\sigma_{c28} = 0.2 C + 33.3 \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここに、 $\sigma_{c28}$ ：材令28日の圧縮強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)、 $c/w$ ：セメント水比、 $\gamma$ ：相関係数、 $\Delta\sigma_{c28}$ ：材令28日における圧縮強度の増加量 (kgf/cm<sup>2</sup>)、 $C$ ：単位セメント量 (kgf)

#### 4. 減圧処理による高強度化および強度特性

表-1から早強セメントを使用し、骨材気乾状態で減圧処理することにより高炉スラグ碎石コンクリートにおいても材令28日で800

kgf/cm<sup>2</sup>以上の強度が得られた。上述の強度発現の要因を解析し、さらに改良をつむむことにより 高炉スラグ砕石コンクリートでも 28日間標準養生で1000 kgf/cm<sup>2</sup>の圧縮強度を得ることが可能となろう。

コンクリートの通常の短期試験で求まる応力-ひずみ曲線で 種々の変形特異点が与えられるが、それらは コンクリートの破壊挙動をはあくする重要な指標となり、材料の個々の特性値としての意味を持つことが明らかにされている<sup>4)</sup>。比例限度は 塑性変形の開始点となる応力レベルであり、臨界応力は ひびわれが連続化され供試体体積が膨張へ反転する応力レベルで、コンクリートの真の強度となるべき応力レベルであるとされている<sup>4)</sup>。

図-5は 比例限度応力比と圧縮強度との関係であり、Blakey<sup>5)</sup>は骨材とセメントペーストとの付着強度を増加させれば、初期ひびわれが発生する応力レベルは 大となるとし、Kaplan<sup>6)</sup>は初期ひびわれの発生は 比例限度であり、そのひびわれ応力は 粗骨材容積、種類 および 水セメント比に影響されるものとし、応力比 約0.48、また、加藤は 平均0.46であるとした<sup>7)</sup>。本実験では 強度範囲150~850 kgf/cm<sup>2</sup>において 平均0.55の応力比を得た。このことから 高炉スラグ砕石を用いたコンクリートの初期ひびわれ発生応力レベルが高い応力比であり付着強度も大きいことがわかる。

臨界応力比と圧縮強度との関係を図-6に示し、既報<sup>4)</sup>の天然骨材を用いたコンクリートの場合と比較した。天然骨材の場合、強度の増加に伴ない 応力比も増大するが、高炉スラグ砕石コンクリートの場合、強度に影響されず、概略0.83の値を得た。さらに、図-5,6より 臨界応力比と比例限度応力比が、天然骨材を用いたコンクリートに比し、比較的近い値を示し、付着ひびわれから連続ひびわれに推移する応力経路が短い特性を持つことがわかった。

比例限度に対する弾性係数と圧縮強度との関係を図-7に示し、土木学会RC示方書<sup>7)</sup>および 横道<sup>8)</sup>の場合と比較し、さらに相関式(4)を得た。

$$E_p = 0.307 \sigma_{CB} + 164.9 \quad (r = 0.57) \dots (4)$$

ここに、 $E_p$ : 比例限度に対する弾性係数 (cm/cm)

$\sigma_{CB}$ : 圧縮強度 (kgf/cm<sup>2</sup>),  $r$ : 相関係数

圧縮強度と比例限度におけるポアソン比との関係を図-8に、圧縮強度と臨界応力におけるポアソン比との関係を図-9に示す。これらより、天然骨材

表-1 圧縮強度試験結果

	C (kgf/cm <sup>2</sup> )	w/c (%)	s/a (%)	減水剤 (%)	スランブ (cm)	圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )			
						$\sigma_{C3}$	$\sigma_{C7}$	$\sigma_{C14}$	$\sigma_{C28}$
普通ポルトランドセメント	無処理	600	23	0	0	—	500	—	651
				0.60	0	—	587	—	656
				1.00	0.1	—	593	—	695
				1.40	0.1	—	610	—	749
				0	5.2	398	454	516	528
				0.60	0	567	592	616	713
	減圧処理	23	30	0	0	623	703	—	744
				1.40	0	606	698	—	779
				0.40	5.3	384	438	527	546
				0	1.3	601	670	700	770
				0.60	5.8	568	680	715	752
				1.00	19.1	616	618	699	734
早強ポルトランドセメント	無処理	600	30	0	1.1	672	694	720	764
				0.60	1.4	675	695	758	751
				1.00	7.3	666	727	747	777
				1.20	16.1	624	684	675	771
				0	0.1	614	691	715	773
				0.60	0.8	614	678	697	734
	減圧処理	21	30	0.85	4.6	617	649	711	749
				5.65	8.1	736	797	—	907
				0	0	684	765	744	824
				0.60	0.4	694	743	789	852
				1.00	3.0	—	—	—	836
				1.10	4.8	764	787	804	832

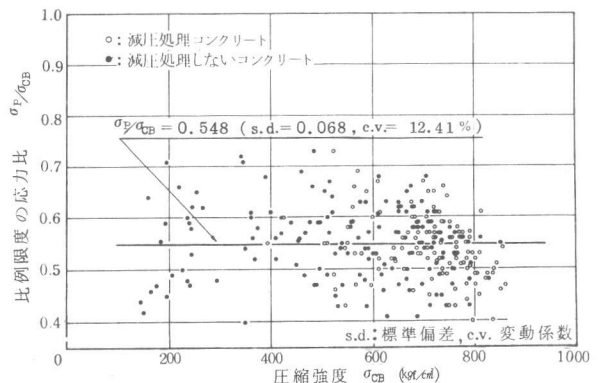


図-5 比例限度の応力比と圧縮強度との関係

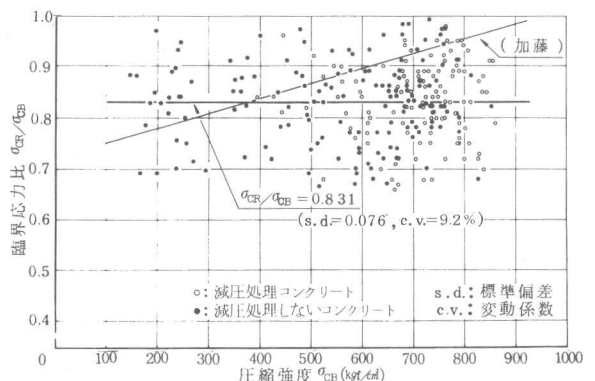


図-6 臨界応力比と圧縮強度との関係

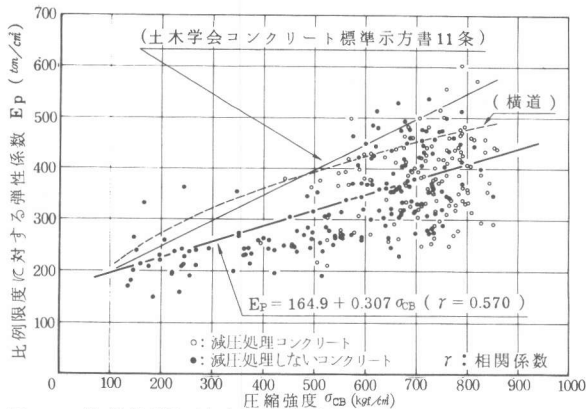


図-7 比例限度に対する弾性係数と圧縮強度との関係

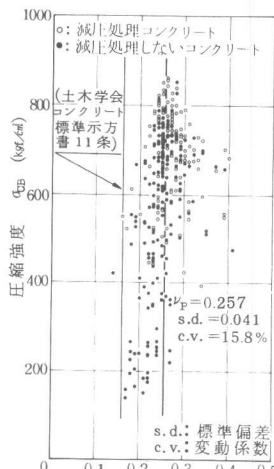


図-8 圧縮強度と比例限度におけるポアソン比との関係

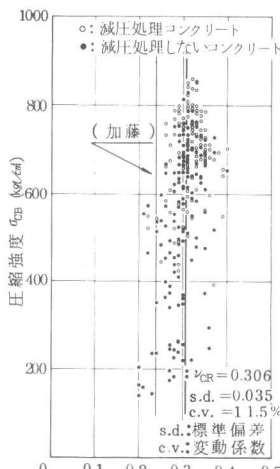


図-9 圧縮強度と臨界応力におけるポアソン比との関係

表-2 コンクリートの弾性係数およびポアソン比の比較

設計基準強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )		180	240	300	400	500	600	ポ ア ソ ン 比
コンクリートの種類								
弾 性 係 数	高炉スラグ砕石コンクリート (本実験値)	2.2	2.4	2.6	2.9	3.2	3.5	1/4
	普通骨材コンクリート (土木学会) <sup>(1)</sup>	2.4	2.7	3.0	3.5	(4.0)	(4.5)	1/6
	高炉スラグ砕石コンクリート (土木学会) <sup>(2)</sup>	2.4	2.7	3.0	—	—	—	1/6
	軽量骨材コンクリート (土木学会) <sup>(3)</sup>	1.3	1.5	1.6	1.9	—	—	1/6
	高炉スラグ砕石コンクリート (建築学会) <sup>(4)</sup>	2.0	2.3	2.6	3.0	3.3	3.6	1/5-1/6

<備考> (1)土木学会コンクリート委員会：コンクリート標準示方書,11条。  
 なお、( )内は、コンクリート橋 昭和47年11月技報堂 p.44引用  
 (2)土木学会コンクリート委員会：高炉スラグ砕石コンクリート設計施工指針(案), 26条。  
 (3)土木学会コンクリート委員会：コンクリート標準示方書, 221条。  
 (4)建築学会：高炉スラグ砕石コンクリート設計施工指針案, 1.3。  
 (RC規準, 5条, コンクリートの弾性係数)  

$$E = 2.1 \times 10^4 \times \left(\frac{r}{2.3}\right)^{1.5} \times \sqrt{\frac{F_c}{200}}$$
 木表では  $r = 2.3 \text{ t/m}^2$  とする  
 ここで、 $r$  : コンクリートの気乾単位容積重量、(  $\text{t/m}^3$  )  
 $F_c$  : コンクリートの設計基準強度、(  $\text{kgf/cm}^2$  )

を用いたコンクリートの場合に比し、より大きい値をとることがわかった。

種々のコンクリートにおける弾性係数 およびポアソン比の比較を表-2に示す。土木学会では高炉スラグ砕石を用いる場合、普通骨材コンクリートと同一の値を使用することにしており、本実験値は日本建築学会高炉スラグ砕石コンクリート施工指針案の値にほぼ一致することがわかった。

### 5. むすび

以上のことより、減圧処理された高炉スラグ砕石コンクリートについて以下のことを明らかにした。

1)高炉スラグ砕石コンクリートを減圧処理することにより、セメント水比が同一の場合、圧縮強度が200~500kgf/cm<sup>2</sup>において100~150kgf/cm<sup>2</sup>程度大きく、単位セメント量が同一の場合、上記の強度範囲に対し圧縮強度が75~130kgf/cm<sup>2</sup>増大することがわかった。

2)高炉スラグ砕石コンクリートを減圧処理することにより、28日間標準養生で600kgf/cm<sup>2</sup>以上の圧縮強度が比較的容易に得られ、圧縮強度範囲150~900kgf/cm<sup>2</sup>における諸物性値が天然骨材コンクリートとは明らかに異なることがわかった。

6. あとがき 本研究には 本学 中川英恵教授・小倉盛衛講師、ほか 手塚賢司・柿沼宏行・丸山晴久ら学生諸氏の助力を受けた。付記して謝意を表する。

### <参考文献>

- 1) 綾・大内ら：減圧処理された高炉スラグ砕石コンクリートに関する実験研究、セメント技術年報 33, 昭和54年12月, pp. 368~371, セメント協会。
- 2) 高炉スラグ砕石コンクリート設計施工指針(案), 講習会資料, 1978年, 土木学会。
- 3) 吉田徳二郎：コンクリート及鉄筋コンクリート施工方法, 丸善, 昭和46年, p. 531.
- 4) 加藤清志：コンクリートの真の強度に関する研究, 防大理工学研究報告, 第15巻, 第1号, 昭和52年3月, pp. 29~57.
- 5) F. A. Blaney : Discussion of the Effect of Coarse Aggregate on the Mode of Failure of Concrete in Compression and Flexure, MCR, V. 10, No 28, Mar. 1958, pp. 39~42.
- 6) M. F. Kaplan : Strains and Stresses of Concrete at Initiation of Cracking and Near Failure, ACI Jour., Proc. V. 60, No. 7, July 1963, pp. 853~880.
- 7) 土木学会コンクリート委員会：コンクリート標準示方書, 昭和51年2月, p. 23.
- 8) 横道英雄：コンクリート橋, 技報堂, 昭和47年7月, p. 44.