

## 論文 中性化による各種モルタルの強度発現性状

久保田賢\*1・鯉淵 清\*1・坂井悦郎\*2・大門正機\*2

要旨：高炉スラグ微粉末の混和量、粉末度およびセッコウ添加量を変化させ試作した高炉セメント、高ビーライト系セメントおよび普通ポルトランドセメントモルタル硬化体を促進中性化させたときの強度発現性状を調べた。試作高炉セメントの圧縮強度は材齢とともに増進し、高炉スラグ微粉末混和量が50%までは普通ポルトランドセメントと同等以上の値を示した。水中前養生期間が短い場合にはセッコウ添加量が多い程高い圧縮強度を示した。高ビーライト系セメントは、低水セメント比よりも高水セメント比の方が圧縮・曲げとも高い強度を示した。

キーワード：中性化、炭酸化、圧縮強度、曲げ強度、高炉スラグ微粉末、粉末度、塩基度、セッコウ

## 1. まえがき

高炉スラグ微粉末の粉末度、混和量およびセッコウ量を調整した高炉セメントは、マスコンクリート用や高強度・高耐久性のセメントとして用いられており、また資源の有効利用、炭酸ガス発生量の低減、省エネルギーの観点から地球環境対応型セメントとして位置づけられ、今後更にその使用量も増加するものと思われる。しかし高炉スラグ微粉末を混和したセメントを用いたコンクリートの中性化は養生期間や混和量の影響を受け、高炉スラグ微粉末の混和量が多く、単位セメント量が小さく、湿潤養生が短い場合には中性化し易いとの指摘もある[1]。従来より、高炉スラグ微粉末の粉末度や化学組成が高炉セメントの強度に及ぼす影響については多くの研究者により検討されている[2, 3]。筆者らは、既に湿度や高炉スラグ微粉末の粉末度を変化させた高炉セメント硬化体の炭酸化反応について検討し、炭酸化により空隙が増すことやその改善策としてCaOやSO<sub>3</sub>を化学成分として含む混和材の利用が有効であることを報告した[4, 5]。また高炉スラグ微粉末の化学組成や粉末度およびセッコウ添加量の異なる高炉セメントモルタル硬化体の促進中性化試験を行い、中性化係数について検討し、塩基度の低い高炉スラグ微粉末を用いた場合は中性化を受けやすいこと、水中前養生期間が短い場合はセッコウ添加が中性化抑制に有効であること、低水セメント比の場合は小さな中性化係数となることを報告した[6]。

本研究では、試作高炉セメントを用い、促進中性化試験中の強度発現性状におよぼす高炉スラグ微粉末の混和量、粉末度、塩基度およびセッコウ添加量の影響について、高ビーライト系セメントおよび普通ポルトランドセメントを用いたモルタル硬化体と比較して検討した。更に低水セメント比における高強度・高流動モルタルの強度についても検討した。

---

\*1 第一セメント(株)技術部技術課試験係長(正会員)

\*1 第一セメント(株)工場生産課長

\*2 東京工業大学助教授 工学部無機材料工学科、工博(正会員)

\*2 東京工業大学教授 工学部無機材料工学科、工博(正会員)

表-1 セメントおよび試作高炉セメント原料の化学組成

試料	ig. loss (%)	化学組成 (%)								比重	粉末度 (cm <sup>2</sup> /g)	塩基度
		SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	R <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>			
NPC	1.9	20.8	2.8	4.7	64.7	1.6	2.00	0.60	0.30	3.16	3340	-
LHC	0.8	26.4	2.4	2.5	63.6	0.7	2.19	0.45	0.11	3.22	3280	-
BFS4000	0.1	33.9	0.3	14.3	42.5	6.7	-	0.39	0.62	2.91	4080	1.87
BFS6000	0.1	33.5	0.4	13.8	42.9	6.4	-	0.40	1.18	2.90	6080	1.86
BFS6000 L	0.0	34.3	0.4	14.2	41.2	7.0	-	0.40	1.22	2.90	5960	1.79
BFS8000	0.0	33.7	0.3	14.7	42.1	6.4	-	0.39	0.96	2.90	8330	1.88
AG	-	-	-	-	40.0	-	57.5	-	-	2.90	6120	-

表-2 試作高炉セメントの組成

2. 実験方法

2.1 試料および配合

表-1に示すごとく、セメントは普通ポルトランドセメント (NPC) と高炉ラッシュ系セメント (LHC) を、高炉スラグ微粉末 (BFS) は粉末度 (ブレン比表面積) および化学組成の異なるものを用いた。また BFS と NPC およびセッコウ (A

試作高炉セメント	粉末度-塩基度*	混合割合 (%)		
		NPC	BFS	AG
4000-47.5	4080-1.87	50	47.5	2.5
6000-76	6080-1.86	20	76	4
6000-50	6080-1.86	50	50	0
6000-47.5	6080-1.86	50	47.5	2.5
6000-45	6080-1.86	50	45	5
6000-28.5	6080-1.86	70	28.5	2.5
6000 L-47.5	5960-1.79	50	47.5	2.5
8000-40	8330-1.88	50	40	10
8000-45	8330-1.88	50	45	5
8000-47.5	8330-1.88	50	47.5	2.5
8000-50	8330-1.88	50	50	0

\*塩基度=補正塩基度:JIS塩基度-0.13(TiO<sub>2</sub>-1), TiO<sub>2</sub>>1.0 [7]

表-3 結果一覧

W/C (%)	セメント	前養生材 齢 (日)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )				中性化深さ (mm)				
			前養生後	促進中性化材 齢			促進中性化材 齢				
				1W	4W	13W	26W	1W	4W	13W	26W
50	NPC	3	26.1	56.0	70.0	86.7	-	3.55	4.01	6.33	-
		7	41.9	57.6	58.0	74.9	-	0	2.73	4.73	-
		14	52.3	52.3	67.2	72.8	-	0	0	3.48	-
	4000-47.5	3	18.0	51.0	66.4	80.6	-	6.00	14.4	20.0	-
		7	30.0	52.6	66.8	84.0	-	2.42	7.97	14.1	-
		14	44.2	55.8	71.7	80.3	-	0.72	4.96	4.74	-
	6000-76	7	33.1	47.9	57.4	61.8	-	4.39	8.19	11.9	-
	6000-50	7	34.5	55.0	70.1	79.0	-	1.99	4.14	5.47	-
	6000-47.5	3	23.1	52.4	65.2	79.4	-	5.24	12.2	20.0	-
		7	38.7	56.3	72.3	84.4	-	1.90	6.81	12.2	-
		14	55.8	70.4	82.2	86.6	-	1.31	3.56	4.52	-
	6000-45.0	7	38.3	61.9	77.0	83.2	-	2.95	4.01	4.25	-
	6000-28.5	7	40.7	57.5	69.4	77.3	-	1.25	1.93	2.30	-
	6000 L-47.5	3	19.8	49.0	61.6	65.1	-	7.21	16.1	20.0	-
	8000-40	7	38.4	68.0	81.4	87.0	-	3.97	8.54	10.5	-
	8000-45	7	31.3	65.0	78.1	85.6	-	4.31	8.60	13.0	-
8000-47.5	3	26.9	58.0	70.5	83.6	-	4.49	11.0	16.6	-	
	7	47.2	65.8	82.4	88.8	-	0.98	5.65	9.11	-	
	14	64.0	72.5	87.0	93.8	-	0	2.30	5.51	-	
8000-50.0	7	22.2	53.0	69.4	80.2	-	4.26	12.6	15.6	-	
LHC	7	20.0	47.8	82.9	107.7	-	4.31	11.2	11.6	-	
35	NPC	7	61.6	-	82.4	88.1	85.9	-	0	0	0
	6000-47.5	7	71.7	-	106.6	115.1	111.4	-	0	0	0
	LHC	7	43.4	-	74.4	78.8	82.0	-	0	0	0

G) の混和量を表-2のように変化させ試作高炉セメントを調整した。セメント/砂 (ISO標準砂) 比は1/2とし、水セメント比は50%および35%とした。なお、水セメント比50%の場合は、リグニンスルホン酸塩系減水剤 (P社製) を0.2wt%添加した。但しLHCの場合は無添加とした。水セメント比35%の場合は、モルタルフローが250mmとなるようにポリカルボン酸塩系高性能AE減水剤 (T社製) を添加した。

## 2.2 試験方法

モルタル硬化体は40×40×160mmとし、養生として20℃の水中養生を3、7、14日間行った。促進中性化試験は、温度20℃、炭酸ガス濃度10%、湿度60%とし、促進中性化材齢として1、4、13、26週間実施し、硬化体の曲げ・圧縮強度を測定した。中性化深さは、曲げ強度後のモルタル断面にフェノールフタレインの1%溶液を噴霧しノギスで測定した。

## 3. 結果および考察

試験結果の一覧を前ページ表-3に示した。

### 3.1 NPC、試作高炉セメントおよびLHCの水中養生期間の影響

図-1に水セメント比50%、前養生材齢を3、7、14日間行ったNPC、粉末度6000、塩基度1.86のBFSを47.5%とした試作高炉セメントおよびLHCを用いたモルタル硬化体の圧縮強度を示した。いずれのセメントとも、促進中性化材齢とともに強度は増進している。試作高炉セメントは、前養生期間が3日と短い場合にはNPCより低い強度となるが、前養生を7日まで行うことにより4週以降NPCよりも高い強度を示した。また、前養生14日では前養生後からNPCよりも高い強度となった。前養生3日の場合、試作高炉セメントは全通中性化しているにもかかわらず強度低下はなく80N/mm<sup>2</sup>弱の強度を発現している。LHCの強度発現性状は、NPCや試作高炉セメントとは異なり、4週以降の強度の伸びが著しく13週で約110N

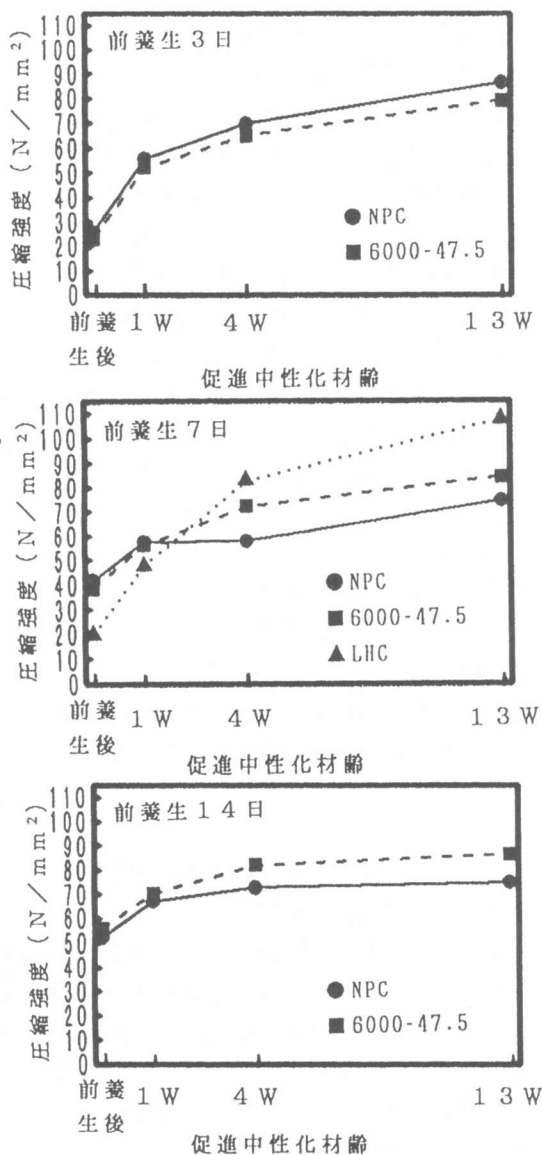


図-1 促進中性化材齢と圧縮強度 (W/C = 50%)

／mm<sup>2</sup>の値を示した。

### 3.2 水セメント比の影響

図-2に前養生7日、水セメント比50、35%のNPC、粉末度6000、塩基度1.86のBFSを47.5%とした試作高炉セメントおよびLHCを用いたモルタル硬化体の圧縮・曲げ強度を示した。水セメント比35%の場合はいずれのモルタルとも中性化しておらず、4週でNPCは80N/mm<sup>2</sup>程度、試作高炉セメントは100N/mm<sup>2</sup>程度、LHCは70N/mm<sup>2</sup>程度の圧縮強度を示した。LHCは4週以降で、表3に示したとおり、水セメント比35%は中性化していないにもかかわらず、中性化している50%の方が高い圧縮強度を発現し、通常の20℃標準水中養生とは全く異なる傾向を示した。試作高炉セメントの曲げ強度は、促進中性化材齢が長くなってもほとんど変わらず水セメント比35%の方が高い値を示している。これに対し、NPCは4週以降で水セメント比50%の方が35%よりも高い値を示し、特にLHCはよりこの傾向が顕著であった。この原因については、セメント中のビーライト量、水和率等を含め細孔径分布や水和組織を調べることにより今後検討することとしている。

### 3.3 高炉スラグ微粉末の混和量、粉末度および塩基度の影響

図-3に水セメント比50%、前養生7日とし、粉末度6000、塩基度1.86のBFSの混和量を変えた場合の圧縮強度を示した。通常のB種高炉セメントに近い組成においては、中性化されても強度低下はみられず、4週以降ではNPCより高い値を示したが、混和量76%まで増量したものは低くなった。これはBFSを多量に使用したセメント硬化体を中性化すると細孔量と大きな細孔が増すと報告されていることより[4]、この場合も同様な現象が起っていると

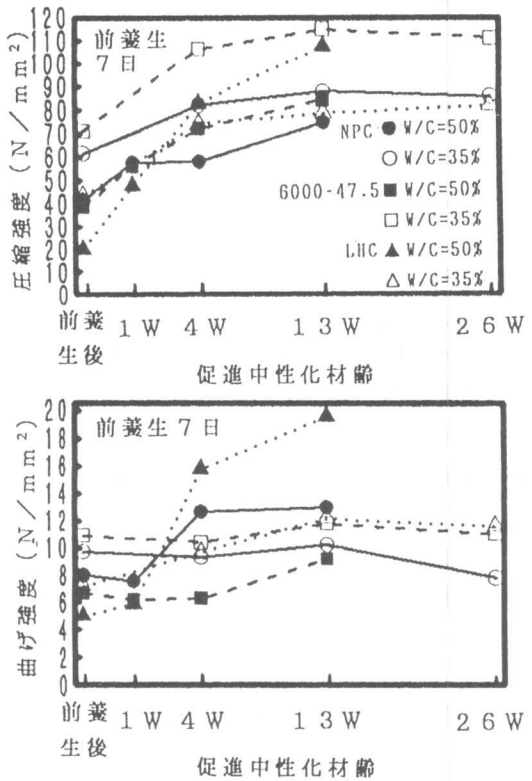


図-2 W/C=50%、35%における圧縮・曲げ強度

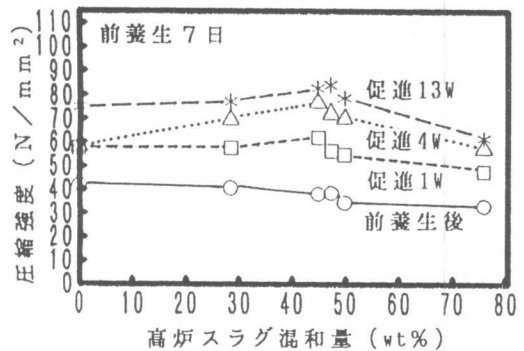


図-3 高炉スラグ混和量と圧縮強度 (粉末度6000cm<sup>2</sup>/g、W/C=50%)

考えられる。また、BFS混和量を28.5%とし、AGを添加した試作高炉セメントの強度はNPCと同等以上であり、表3に示したとおり4週以降の中性化深さも小さいことより耐久性を有する高炉セメントであることが示唆される。

図-4に水セメント比50%、前養生7日とし、塩基度がほぼ同一で粉末度を4000、6000、8000と変えたBFSを47.5%とした試作高炉セメントの圧縮強度を示した。粉末度の細かいBFSを用いる程、促進中性化中の強度は増進するが、13週ではその差はほとんどみられない。

図-5に水セメント比50%、前養生3日とし、粉末度6000で塩基度が1.86、1.79と異なるBFSをそれぞれ47.5%混和した試作高炉セメントを用いた場合の圧縮強度を示した。1.86のBFSを用いたものは、1.79のものよりも各材齢において高い強度を示している。前養生期間が3日と短い場合、1.79と塩基度が低いものを用いたものは、4週から13週での強度の伸びが塩基度1.86のものに比べて小さくなっている。しかし、前養生期間を7日以上行った場合には塩基度による差はみられなかった。

### 3.4 セッコウ添加量の影響

図-6に水セメント比50%、前養生3日とし、内割りでAG添加量を変化させたBFSを50%とした試作高炉セメントの圧縮強度を示した。前養生3日においては、AG添加量が多くなる程、強度が高くなる傾向にあり、前養生が短い場合にはAGの添加が有効であることが明らかになった。これはAG添加量とともにBFSの反応が促進され、水和生成物であるエトリンガイト量が増加すると報告されていることより〔6〕、組織が緻密化するためと考えられる。

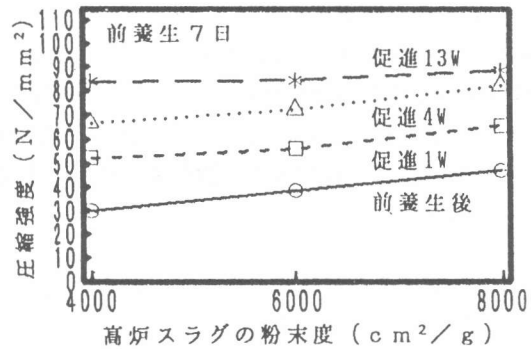


図-4 高炉スラグの粉末度と圧縮強度  
(NPC:BFS:AG=50:47.5:2.5、W/C=50%)

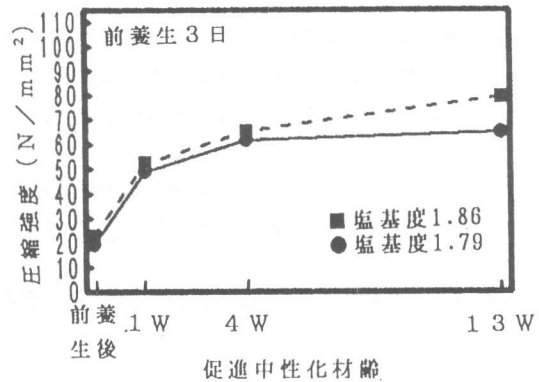


図-5 塩基度の差による圧縮強度  
(NPC:BFS:AG=50:47.5:2.5、W/C=50%)

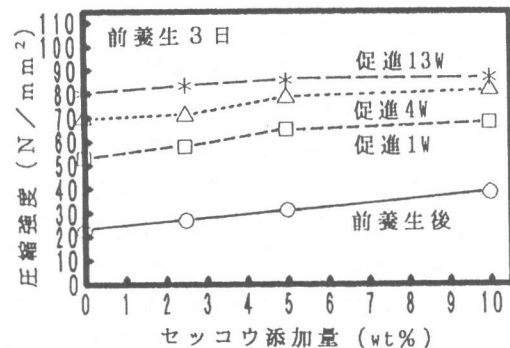


図-6 セッコウ添加量と圧縮強度  
(粉末度8000cm²/g、W/C=50%)

#### 4. まとめ

高炉スラグ微粉末の混和量、粉末度（ブレン比表面積）およびセッコウ添加量を変化させ試作した高炉セメント、高ビーライト系セメントおよび普通ポルトランドセメントを用いたモルタル硬化体を促進中性化させたときの強度発現性状を調べ、以下の結論を得た。

- (1) 粉末度  $6000 \text{ cm}^2/\text{g}$  の高炉スラグ微粉末を用いた試作高炉セメントは高い圧縮強度を示し、高炉スラグ微粉末50%程度までは普通ポルトランドセメントと同等以上の値を示した。
- (2) 高炉スラグ微粉末の粉末度が細かい程高い強度を示し、前養生期間が短い場合はセッコウの添加が有効であった。
- (3) 高炉スラグ微粉末の塩基度1.86、粉末度  $6000 \text{ cm}^2/\text{g}$  以上、混和量28.5%以下、セッコウ添加の条件を満足する高炉セメントは、普通ポルトランドセメントと同等以上の強度特性と中性化に対する耐久性を有することが明らかとなった。
- (4) 水セメント比が35%では、普通ポルトランドセメント、試作高炉セメント (6000-47.5) および高ビーライト系セメントもほとんど中性化せず、試作高炉セメントにおいては4週以降  $100 \text{ N/mm}^2$  以上の強度となり、最も高い強度を発現した。
- (5) 高ビーライト系セメントは、中性化が進むと著しく圧縮・曲げ強度とも増進する。したがって中性化しない水セメント比35%よりも50%の方が高い強度を発現した。

**謝辞** 本研究費の一部は文部省科学研究費（基盤研究A(1)）によった。ここに深く感謝いたします。

#### 参考文献

- [1] 長滝重義、大賀宏行、荒井俊晴：高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートの中性化、高炉スラグ微粉末のコンクリートへの適用に関するシンポジウム、pp143-150(1987)
- [2] 赤津健、前田勝輔：強度発現性から見た高炉セメントの  $\text{SO}_3$  量、セメント技術年報、Vol12 7,80-82,1973
- [3] 佐藤和義、小西栄一郎、深谷一夫：スラグ粉末の粒度と水和反応、セメント技術年報、Vol13 9,49-52,1985
- [4] 坂井悦郎、大場陽子、神谷利夫、大門正機：高炉スラグセメント硬化体の炭酸化反応、第21回セメントコンクリート研究討論会論文報告集、pp29-34(1994)
- [5] 盛岡実、二階堂泰之、久保田賢、浅賀喜与志：各種刺激剤を混和した高炉スラグセメント硬化体の中性化、コンクリート工学年次論文報告集、Vol18, No.1, 741-746(1996)
- [6] 坂井悦郎、大門正機、鯉渕清、近田孝夫：化学組成や粉末度の異なる硬化体の炭酸化、コンクリート工学年次論文報告集、Vol18, No.1, 735-740(1996)
- [7] 赤津健、志賀直敏、池田五十六、前田勝輔： $\text{TiO}_2$  を考慮した高炉セメント用水砕スラグの実用塩基度、セメント技術年報、31, PP137-140, 1977