

[47] 高炉スラグのコンクリート用混和材への利用について

正会員 依田 彰彦 (足利工業大学工学部)
 正会員 ○横 室 隆 (足利工業大学工学部)

1. はじめに

高炉水砕スラグ粉末を混和材として用いたコンクリートは無添加に比して所要のワーカビリティを得るに必要な単位水量が減り、また水和熱の低減も図られるなど、基本的な性質が改善できることを実験的に確かめ、多くの有用な資料を得た。本報では、長期材令における諸性質の傾向ならびに骨材との反応性状を中心として実験研

究した結果をとりまとめた。

2. 使用材料

a. 高炉水砕スラグ粉末：表1に示すC社製のものを

用い、添加量は、普通ポルトランドセメントに対して内割で5、10、30%とした。

b. セメント：表2～3に示す品質のC社製の普通ポルトランドセメントを用いた。

c. 骨材：表4に示す品質の鬼怒川産の砂及び砂利を用いた。

d. 水：表5に示す水質のものを用いた。

e. その他の材料：NaOH (試薬)。

3. コンクリート・モルタルの練りませ及び供試体の作り方

コンクリートの練りませには45ℓの強制攪拌式ミキサーを用い、砂・砂利は、ともに表乾状態のものを用い、JIS A 1138 (試験室におけるコンクリートの作り方) 及びJIS A 1132 (コンクリートの強度試験用供試体の作り方) によって供試体を製作した。また、モルタルはJIS R 5201 (セメントの物理試験方法) によって製作した。

4. 実験の項目と方法

4.1 コンクリートの場合 W/C 50, 60, 70%, スランブ16~18cmのプレーンコンクリートを対象とし、下記の項目について実験した。

- a. ワーカビリティ：スランブ試験におけるコンクリートの状態から判定した。
- b. スランブ：JIS A 1101 (コンクリートのスランブ試験方法) によった。
- c. 空気量：JIS A 1128 (まだ固まらないコンクリートの空気量の圧力による試験方法) によった。
- d. 単位水量：所定の骨材量の中へW/C60%のセメントペーストを徐々に加えて練り、スランブ約7~22cmに至るまでス

表1 使用高炉スラグ粉末の品質

真比重	比表面積 (cm ² /g)	化 学 成 分 (%)							塩基度	ガラス化率 (%)
		CaO	Al ₂ O ₃	MgO	SiO ₂	MnO	TiO	FeO		
2.98	3730	39.4	15.9	6.6	32.9	0.6	2.5	0.8	1.88	98.2

表2 使用普通ポルトランドセメントの化学成分 (%)

ig.loss	insol	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	R ₂ O
0.5	0.9	22.4	5.4	3.2	64.1	1.4	1.6	0.46	0.45	0.77

表3 使用普通ポルトランドセメント及び高炉スラグ粉末を内割添加した場合の物性

高炉スラグ粉末の添加量 (%)	比 重	比表面積 (cm ² /g)	凝 結 (h-m)			安定性	フロー (mm)	曲げ強さ (kgf/cm ²)				圧縮強さ (kgf/cm ²)			
			水 量	始 発	終 結			3 日	7 日	28 日	91 日	3 日	7 日	28 日	91 日
0	3.17	3200	28.3	2-05	3-38	良	246	35	52	72	82	140	245	408	452
5	3.16	3220	28.0	2-06	3-42	良	244	36	56	81	86	141	246	410	478
10	3.15	3250	28.0	2-08	4-09	良	244	36	55	80	87	126	240	385	494
30	3.10	3350	28.0	2-10	4-15	良	242	29	47	72	85	111	232	383	496

表4 使用骨材の品質

種 類	表 乾 比 重	吸 水 率 (%)	単 位 容 積 (kg/ℓ)	洗 い 損 失 量 (%)	有 機 不 純 物	ふるいを通るものの重量百分率 (%)										粗 粒 率 は 最大寸法 (mm)
						ふるい目 (mm)										
						25	20	15	10	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	
川 砂	2.59	2.15	1.66	2.0	うすい	—	—	—	—	100	92	75	44	12	2	2.77
川 砂 利	2.57	1.63	1.66	0.8	—	100	80	66	30	4	—	—	—	—	—	25

表5 使用水質 (足利保健所報告)

色 度	濁 度	水 素 イオン濃度 (pH)	蒸 発 残 留 率 (ppm)	塩 素 イオン (ppm)	過マンガン酸カリウム消費量 (ppm)
5度以下	2度以下	6.8	260	10.6	4.1

ランプ試験を繰返し、測定スランプに対する単位水量を求めた。

c. プリージング量：JIS A 1123 (コンクリートのプリージング試験方法) によった。

f. 凝結：ASTM C 403 (Time of Setting of concrete Mixtures by Penetration Resistance) によった。

g. 圧縮強度：JIS A 1108 (コンクリートの圧縮強度試験方法) によった。

h. 静弾性係数：圧縮強度の測定時にコンプレッソメーターを用いて歪を測定し、最大荷量1/3における点の静弾性係数を求めた。

i. 引張強度：JIS A 1113 (コンクリートの引張強度試験方法) によった。

j. 長さ変化率：JIS A 1129 (モルタル及びコンクリートの長さ試験方法) のコンパレーター法によった。

k. 重量変化率：長さ変化の測定時に0.1gまで測れる直示天秤を用いて測定した。

1. 中性化深さ：長さ・重量変化の測定が終わった時(乾燥期間1年)に供試体を曲げて折り、その破断面に1%のフェノールフタレインアルコール溶液を噴霧し、紫赤色にならなかった部分を中性化したものと見なし、その深さをノギスで測定した。なお、同供試体は温度20℃、湿度60%、CO₂濃度0.15%の環境下に放置していたものである。

4.2 モルタルの場合

a. 曲げ・圧縮強度：JIS R 5201に準じた。なお、水中養生温度は20℃を基準とし、5℃、40℃についても実験した。

b. アルカリ骨材反応：ASTM C 227 (Alkali Reactivity, Potential, of Cement-Aggregate Combinations...Mortar-Bar Method) に準じ、供試体の大きさは4×4×16cmとした。なお、表4に示した川砂にNaClを0.3%添加したものを以下海砂と表現する。

5. 実験結果と考察

実験結果を表6及び図1～8に示す。

5.1 コンクリートの場合

a. 練り混ぜたコンクリートのワーカビリティは表6に示す通り、すべて^{1~4)}良好で、従来から報告している通りの結果を得た。

b. 高炉スラグ粉末を混和材として用いると前述している通り、所要のワーカビリティを得るに必要な単位水量は減る(図1参照)。減水率は添加量5,10%の場合は1%程度、30%の場合は2%程度である。

c. プリージング量は、いずれも0.41cm³/cm²以下であったが、高炉スラグ粉末の内割添加量及び水セメント比のちがいがいによる傾向は認められない。

d. 凝結時間は、始発・終結とも内割添加量が多いほど、若干であるが長くなる傾向が認められた(図2参照)。

e. 圧縮強度は、図3に示す通りである。細かく見ると先ず材令7日では若干大きい内割添加量5%・W/C60、70%の場

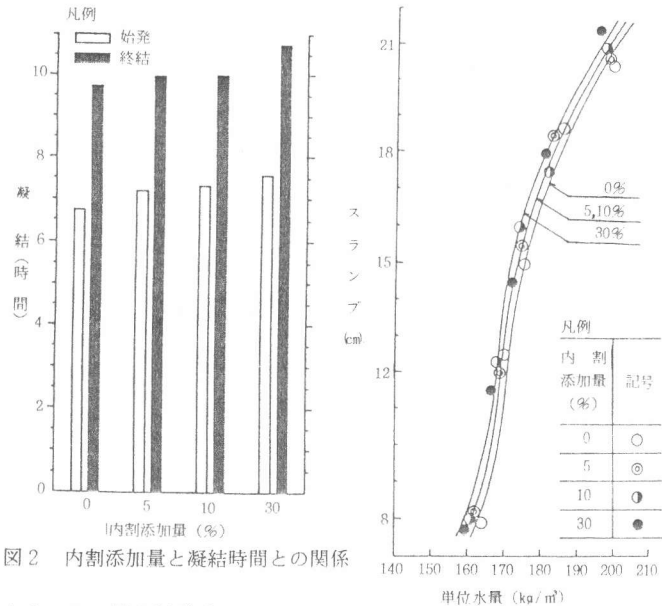


図2 内割添加量と凝結時間との関係

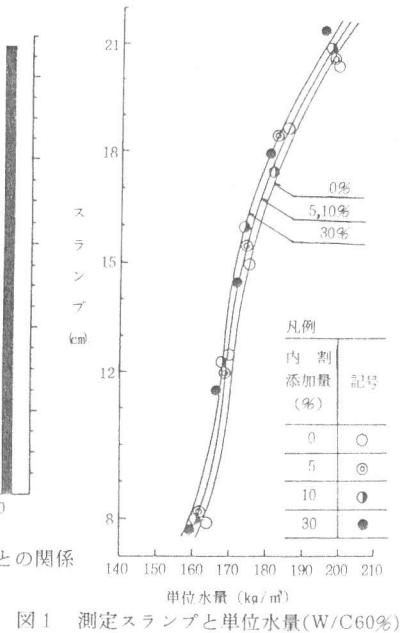


図1 測定スランプと単位水量(W/C60%)

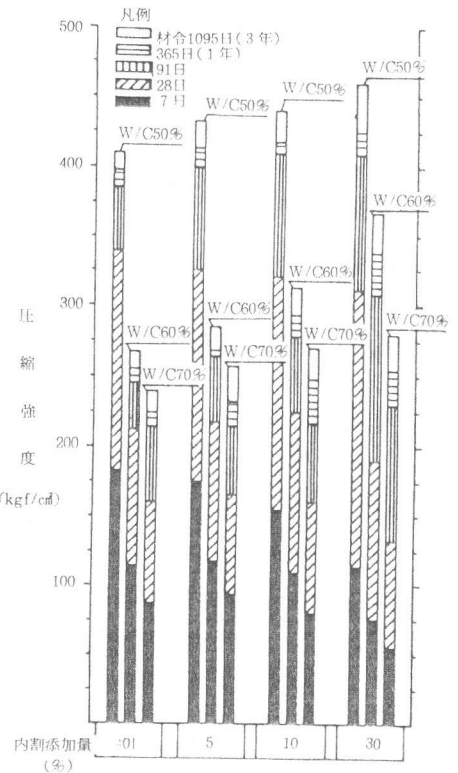


図3 圧縮強度一覧

合を除き内割添加量が多いほど若干小さい。次に材令28日では多少小さい内割添加量30%を除いて5%, 10%は無添加の場合と同程度である。最後に材令91日・365日(1年)・1095日(3年)に到ると内割添加量が多いほど大きくなる。とくに長期材令になるほどこの傾向が著しくなる。

f. 静弾性係数は、図4に示す通り圧縮強度の発現の傾向と近似しており、いずれも日本建築学会の鉄筋コンクリート構造計算規準に示している式で表わすことができる。

g. 引張強度は、図5に示す通り一つの式($F_t=0.09F_c+8\text{kgf/cm}^2$)で表わすことができる。

h. 乾燥収縮率は、紙面の都合上W/C70%のみを図6に示すが、高炉スラグ粉末の内割添加量が多いほど小さい。この理由は高炉スラグ粉末とセメントペーストとの化学反応によってエトリンガイト($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot3\text{CaSO}_4\cdot32\text{H}_2\text{O}$)が生成したためであろう。また、W/Cのちがいは小さいほど若干であるが乾燥収縮率は小さい傾向が認められた。

i. 重量減少率は、紙面の都合上データを示していないが、その傾向は乾燥収縮率に似ている。

j. 中性化深さは、高炉スラグ粉末の添加量が多いほど、またW/Cが大きいほど、若干であるが大きい(表6参照)。

5.2 モルタルの場合

a. 養生温度を5°C、20°C、40°Cとかえたモルタルの強度は図7に示す通り、養生温度が5°C、20°Cの場合は、内割添加量が多いほど若干小さいが、養生温度が40°Cの場合は内割添加量が多いほど多少大きい。

b. 骨材との反応性状を図8に3つの試験例を示す通り、いずれの場合も高炉スラグ粉末の内割添加量が多いほど膨張率は小さい傾向が明確に認められた。これは高炉スラグ粉末の含有するアルカリ量が少ないためである。

6. 結論

材令3年までの実験研究結果から結論として次のようなことがいえる。

a. 高炉水砕スラグ粉末をコンクリート用混和材として用いると良好なワーカビリティーが得られ、しかも無添加に比較して単位水量を減らすことができる。この減水傾向は内割添加量が多いほど若干であるが大きい。

表6 コンクリートの実験結果

高炉水砕スラグ粉末の内割添加量(%)	W/C(%)	スランプ(cm)	空気量(%)	打込時の温度(°C)	ワーカビリティー	ブリージング量(cm^3/cm^3)	乾燥期間1年後の中性化深さ(mm)
0	5.0	17.0	1.9	20.5	良	0.36	4.5
5		17.5	1.8	20.0	良	0.36	4.7
10		18.0	1.9	20.0	良	0.40	5.1
30		17.5	1.6	19.5	良	0.41	5.6
0	6.0	16.5	1.8	20.5	良	0.41	7.1
5		17.5	2.0	20.0	良	0.39	7.1
10		18.0	1.9	20.0	良	0.35	8.2
30		17.5	1.9	19.5	良	0.32	9.3
0	7.0	17.5	1.8	19.5	良	0.39	8.0
5		18.0	2.0	19.0	良	0.31	9.2
10		18.0	2.0	19.0	良	0.34	10.0
30		18.0	2.0	18.5	良	0.39	11.4

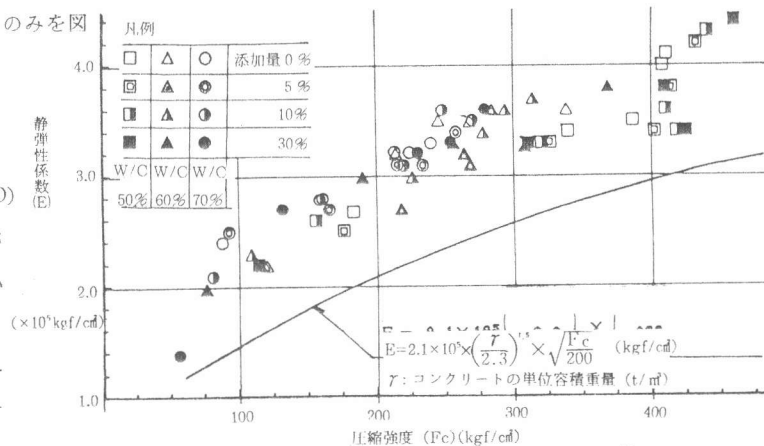


図4 圧縮強度と静弾性係数との関係

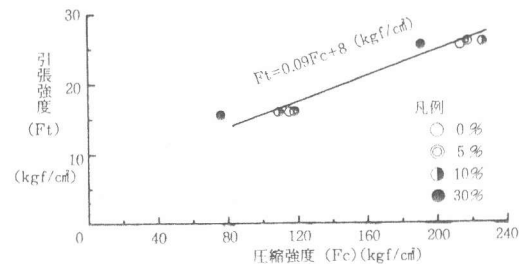


図5 圧縮強度と引張強度との関係

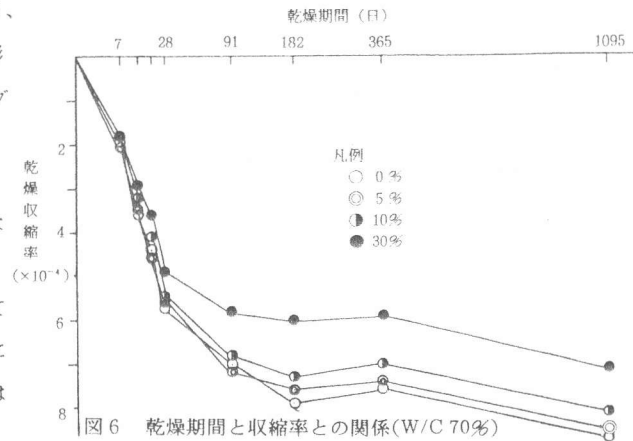


図6 乾燥期間と収縮率との関係(W/C 70%)

b. プリージング量は多くも少なくもなく、JASS 5の常用コンクリートの目標値(0.5 cm³/cm³以下)を満足できる。

c. 凝結時間は内割添加量が多いほど若干であるが長くなる。

d. 圧縮強度は、その発現に特異な傾向がある。すなわち、短期材令では温度が高くて内割添加量が多いほど圧縮強度は大きくなり、逆に温度が低いほど小さくなる。長期材令では温度の高低にかかわらず圧縮強度は大きくなる。これは高炉スラグ粉末が有する潜在水硬性によって長期間にわたって圧縮強度が増進するので、耐久性のあるコンクリート構造物ができることになる。なお、気温が低い場合、その気温に対処できるようなコンクリートの調合設計の実施または型枠存置期間の若干の延長を企てれば解決できる。

e. 静弾性係数は圧縮強度の発現傾向に近似しており、 $E = 2.1 \times 10^5 \times \left(\frac{f}{2.3}\right)^{1.5} \times \sqrt{\frac{f_c}{200}}$ (kgf/cm²)で表示することができる。(f: 重量 t/m³)

f. 引張強度は高炉スラグ粉末の内割添加量にかかわらず、圧縮強度との関係において一つの式で表示することができる。

g. 乾燥収縮率及び乾燥に伴う重量減少率は高炉スラグ粉末の内割添加量が多いほど、また、水セメント比が小さいほど、ともに若干であるが小さい。この傾向は長期材令に到るほど明らかである。

h. 中性化深さは高炉スラグ粉末の内割添加量が多いほど、また水セメント比が大きいほど若干であるが大きい。しかし問題にするほどではない。

i. 骨材との反応性は高炉スラグ粉末の内割添加量が多いほど小さい。このことは昨今社会問題となっているアルカリ骨材反応現象を高炉スラグ粉末を併用することによってある程度防止することができる一方策といえる。この場合、高炉スラグ粉末の添加量が多いほどその効果は著しい。

j. 以上 a ~ i 項を総括すると高炉水砕スラグ粉末は低温かつ短期材令時の低強度に対する注意(取扱い)を守れば、ワーカビリティの改善をはじめ、今回定量的に把握した長期材令における強度の増進および乾燥収縮の低減の程度ならびにアルカリ骨材反応の低減の程度など、コンクリートの性質をかなり改善することができる。このような役割を有する高炉スラグのコンクリート用混和材への利用をすすめるものである。

本研究には、本学卒業生白井弘吉、川島俊美両君をはじめ多くの卒業生の協力を得たことを付記し、感謝する。

参考文献
 1) 依田、枝広;セメント技術年報 31、P174 (1977)
 2) 依田、枝広;セメント技術年報 33、P192 (1979)
 3) 依田、枝広;セメント技術年報 34、P160 (1980)
 4) 依田、横室;第5回コンクリート工学年次講演会講演論文集、P33 (1983)

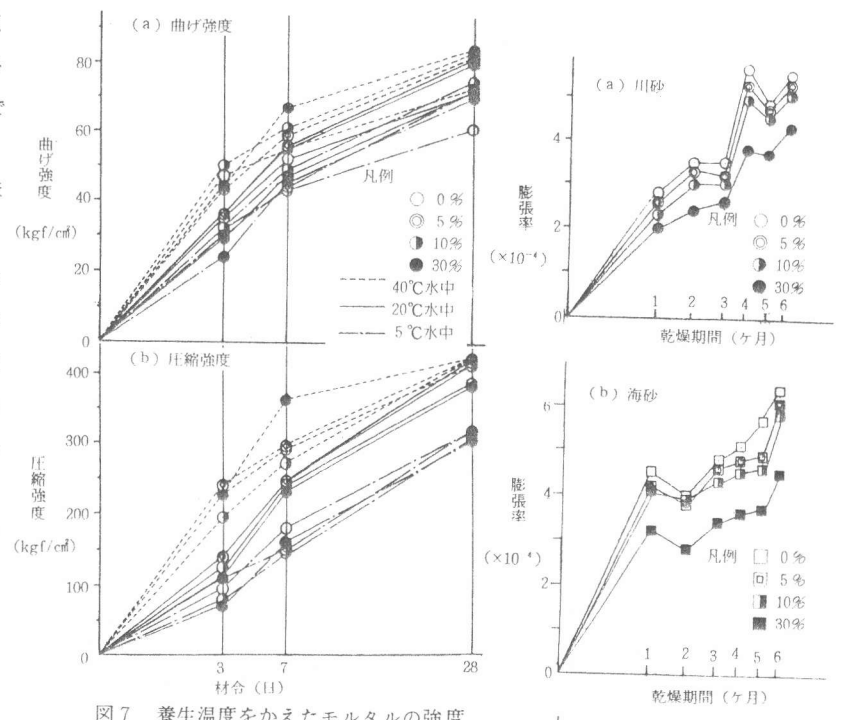


図7 養生温度をかえたモルタルの強度

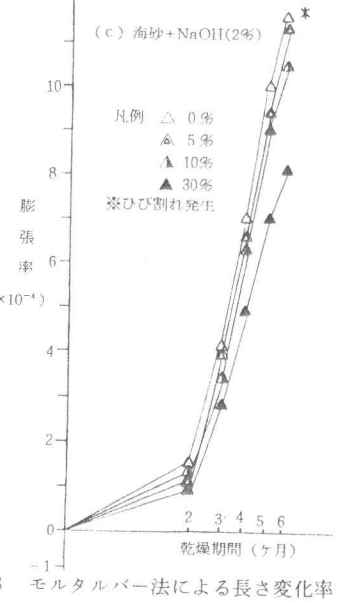


図8 モルタルバー法による長さ変化率