

論文 高炉スラグ微粉末を用いた土中コンクリートの10年までの性質について

横室 隆*¹・依田 彰彦*²・島崎 信明*³・紙田 晋*⁴

要旨：高炉スラグ微粉末 4,000cm²/g を混和材として用い、置換率を 25 ～ 95 % の範囲で 6 段階変化させた場合の水結合材比 65 %，スランプ 16 ± 1.5cm，空気量 4 ± 1.0% の土中コンクリート (2 m × 2 m × 1.2 m) を打設した結果，温度の上昇量は，置換率が増すほど抑制効果がある。また，高炉スラグ微粉末コンクリートの標準養生およびコアによる圧縮強度を究明し，標準養生した圧縮強度とコアによる圧縮強度の関係から推定式を案出した。また，材齢 10 年の平均中性化深さは，置換率が増すほど大きくなるが置換率 25 % は無混入のものと同程度であることが明確となった。

キーワード：高炉スラグ微粉末，土中コンクリート，置換率，コア強度，平均中性化深さ

1. はじめに

本実験研究は，省資源・省エネルギーや地球環境保全等，社会的な要請から我が国で発生する産業副産物のうちで最も大量に副産されている高炉水砕スラグに着目し，その有効利用を図ることを目的として行った。ちなみに，この高炉水砕スラグの年間発生量は 1500 万トン程度である。この高炉水砕スラグは現在，セメントの原料，地盤改良材，コンクリート用骨材などに利用されている。そこで，この高炉水砕スラグの付加価値をさらに高めるため乾燥し，微粉碎したものが高炉スラグ微粉末である。現在，この高炉スラグ微粉末は比表面積に応じて 3 種類の品質 (4,000, 6,000 および 8,000cm²/g) が JIS 化されている。本研究は，これまでの研究^{1)~11)}に引き続き，この高炉スラグ微粉末を混和材として用い置換率を 25 ～ 95 % とした場合のコンクリートを土中に打設し温度上昇量をはじめ，強度の発現性状，中性化深さなどの諸性質について材齢 10 年までの結果を報告する。併せて

比較検討するために普通ポルトランドセメントと高炉セメント B 種について同様の実験を行った。

2. 実験概要

2. 1 使用材料

セメントは，普通ポルトランドセメント (記号 N, 密度 3.16g/cm³) と高炉セメント B 種 (記号 BB, 密度 3.04g/cm³, 高炉スラグ分量 39 %), 混和材は，高炉スラグ微粉末 (記号 BF, 比表面積 4,000cm²/g), 細骨材は鹿島産陸砂 (表乾密度 2.62g/cm³, 吸水率 1.0 %, f.m. 2.35), 粗骨材是那珂川産砂利 (表乾密度 2.61g/cm³, 吸水率 0.7 %, f.m. 6.92), また，化学混和剤は，主成分がリグニンスルホン酸塩の AE 減水剤標準形を使用した。

2. 2 コンクリートの置換率および調査

コンクリートの水結合材比は，65 % と一定にし，混和材としての高炉スラグ微粉末の置換率を，25, 50, 65, 80, 90 および 95 % まで変

*1 足利工業大学助教授 工学部 建築学科 (正会員)

*2 足利工業大学教授 工学部 建築学科 工博 (正会員)

*3 住金鹿島鉱化(株) 技術担当部長 (正会員)

*4 住金鹿島鉱化(株) 生産技術部製品技術課係長

化させた。なお、目標としたスランプは 16 ± 1.5cm, 空気量は 4 ± 1.0 %とした。その高炉スラグ微粉末コンクリートの置換率および調合を表-1 に示す。

2. 3 コンクリートの練混ぜ

生コンプラントにて 1.5m³ 傾胴型ミキサを用いて細骨材, 粗骨材を投入し, 結合材としてのセメントと高炉スラグ微粉末を入れ 15 秒間空練りし, そこに水と AE 減水剤標準形を加え合計 1 分間練り混ぜた。その後, アジテータトラックによって 10 分間運搬し打込んだ。

2. 4 土中コンクリートの寸法と打設方法

住金鹿島鉱化(株)構内敷地を G.L.レベルから掘り下げて型枠を埋め込み, 練り混ぜたコンクリートを, ただちに図-1 に示す 2 m × 2 m × 1.2 m の木製型枠に打設した。なお, そのときの外気温は 13.0 ~ 17.5 °Cであり土中の温度は 10 °C前後であった。また, 乾燥を防ぐため濡れた毛布で打設したコンクリートの上面を初期養生した。その後, No.1 ~ 8 の各土中コンクリートの内部中央部のコンクリート温度上昇量を測定した。また, 同時に直径 10cm の円柱供試体も作製し, 標準養生 (20 ± 2 °C水中) のための圧縮強度試験に供した。

2. 5 実験の項目と方法

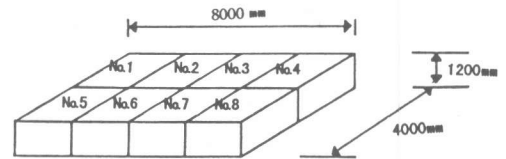


図-1 土中コンクリートの概略図

(1) フレッシュコンクリート

a. スランプ: JIS A 1101 (コンクリートのスランプ試験方法) による。

b. 空気量: JIS A 1128 (フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法 (空気室圧力方法)) による。

c. 土中コンクリートの温度測定: コンクリート内部中央部に熱電対のセンサーを埋め込み打点式ハイブリット記録計により, 打設後 6 時間間隔で 10 日間に渡りコンクリートの温度の測定を行った。

(2) 硬化コンクリート

a. 圧縮強度・静弾性係数・ポアソン比: 圧縮強度試験は, JIS A 1108 (コンクリートの圧縮強度試験方法) による。標準養生のための供試体は打設の翌日にキャッピングを施し, 翌々日に脱型し, 材齢 3, 7, 28, 91, 365 日で試

表-1 打込んだ高炉スラグ微粉末コンクリートの置換率と調合

調合 No.	水結合材比 (%)	高炉スラグ微粉末の置換率 (%)	空気量 (%)	スランプ (cm)	練上がり温度 (°C)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)					
							水	結合材			細骨材	粗骨材
								N	BF	BB		
1	65	0	4.7	15.0	14.5	43.9	148	228	-	-	852	1083
2		25	4.8	14.5	14.0	43.8	148	171	57	-	846	1083
3		50	3.7	17.5	13.8	44.1	144	111	111	-	859	1083
4		65	3.3	17.0	13.5	44.3	142	77	142	-	865	1083
5		80	4.4	16.5	13.0	44.3	141	43	172	-	865	1083
6		90	2.7	14.5	13.0	44.5	139	21	193	-	872	1083
7		95	3.0	16.5	13.0	44.5	139	11	203	-	872	1083
8		-	4.8	16.5	14.0	43.7	148	-	-	228	844	1083

験した。

また、土中コンクリートから抜き取った直径10cmのコア強度は、JIS A 1107（コンクリートからコアおよびはりの切取り方法ならびに強度試験方法）により、材齢28, 91, 182, 365日、5年、および10年で試験した。また、圧縮強度試験時に歪を測定し、最大荷重の1/3の静弾性係数とポアソン比について材齢10年のみ求めた。さらに、JIS A 1125（骨材の含水率試験方法及び含水率に基づく表面水率の試験方法）に準じてコンクリートの含水率を測定した。吸水率はJIS A 1110（粗骨材の密度及び吸水率試験方法）に準じて測定した。

ｂ. 中性化深さ：材齢10年のコアによる圧縮強度試験終了後、ただちにコア供試体を割裂し、フェノールフタレインアルコール溶液法により中性化深さをノギスを用いて1cmごとに測定し、計10点から平均中性化深さを算出した。

3. 実験結果と考察

3.1 フレッシュコンクリート

(1) スランプ及び空気量

あらかじめ、試し練りにより調査を決めた結果は表-1に示す通りで、目標としたスランプおよび空気量が得られた。

(2) 土中コンクリート温度

経過時間による土中コンクリートの内部温度の昇降状況を図-2に示す。これによれば普通ポルトランドセメントを単独に用いたコンクリート（以下、無混入コンクリートと呼ぶ）は、

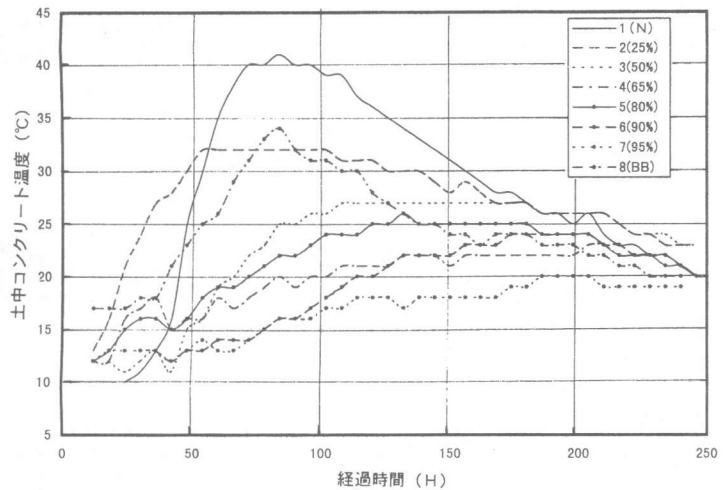


図-2 経過時間による土中コンクリート温度

表-2 強度性状と中性化深さ

調査 No.	水 結合 材比 (%)	高炉スラグ 微粉末の 置換率 (%)	標準養生 供試体 圧縮強度 (N/mm ²)	コア供試体						
				圧縮強度 (N/mm ²)		静弾性 係数 (kN/mm ²)	ポア ソン 比	平均 中性化 深さ (mm)	含水率 (%)	吸水率 (%)
				材 齢						
				28日	28日	10年	10年	10年	10年	10年
1	65	0	21.9	18.7	22.9	21.0	0.16	1.2	3.2	6.3
2		25	24.0	22.0	26.0	23.1	0.16	1.8	4.2	6.6
3		50	24.4	22.4	32.8	28.4	0.16	3.0	4.3	6.5
4		65	23.8	18.5	35.5	28.5	0.17	3.7	4.8	5.3
5		80	22.1	17.2	44.0	29.8	0.19	6.4	4.5	5.0
6		90	19.2	12.7	42.3	30.0	0.18	13.0	3.9	4.9
7		95	16.6	12.8	40.3	29.9	0.18	13.6	3.8	4.7
8		—	—	21.5	18.9	24.6	22.0	0.16	4.4	3.1

およそ 100 時間で 40 °C とピークをむかえ、その後の温度は降下していくが、高炉スラグ微粉末を用いて置換率を大きくした場合のコンクリート温度は、一部のものを除き傾向としては置換率が増すほど小さくなっている。一部逆転しているものは、試験体の置かれた位置の温度差の影響と思われる。ちなみに高炉スラグ微粉末を 95 % 置換した土中コンクリートの内部温度は、およそ 100 時間で 17 °C 程度とほぼ横ばいで、コンクリートの温度の変化が小さい。従って、高炉スラグ微粉末の置換率は大きいほど温度は低下し、温度に対する抑制効果が大きく期待できると考える。

3. 2 硬化コンクリート

(1) 圧縮強度

材齢の経過に伴う標準養生した高炉スラグ微粉末の置換率と圧縮強度との関係を図-3 に示す。これによると、材齢 3 日および材齢 7 日では、高炉スラグ微粉末の置換率が増すほど圧縮強度は小さくなっているが、材齢 28 日では置換率 65 % のものは、無混入コンクリートとほぼ同程度でそれより置換率が増すと圧縮強度は低下する。しかし、材齢 91 日では置換率が 80 % で最大となり、高炉スラグ微粉末

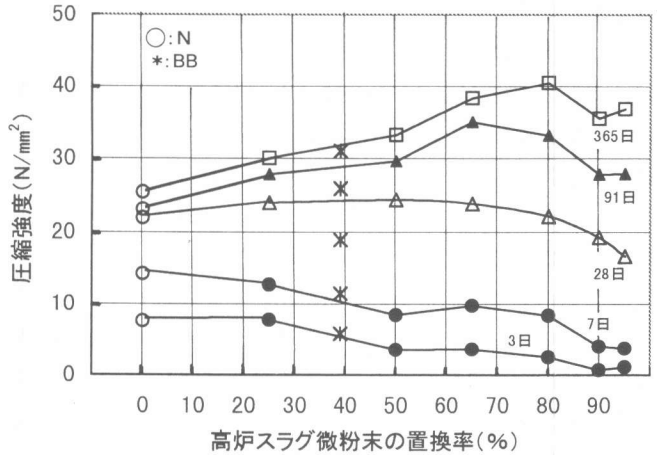


図-3 高炉スラグ微粉末の置換率と標準養生した圧縮強度との関係(水結合材比65%)

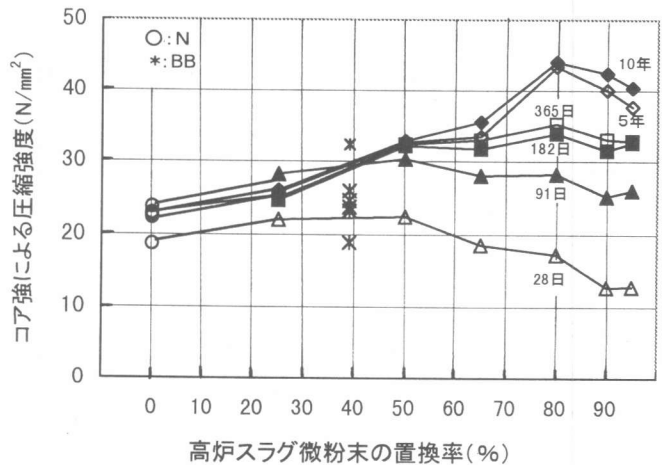


図-4 高炉スラグ微粉末の置換率とコアによる圧縮強度との関係(水結合材比65%)

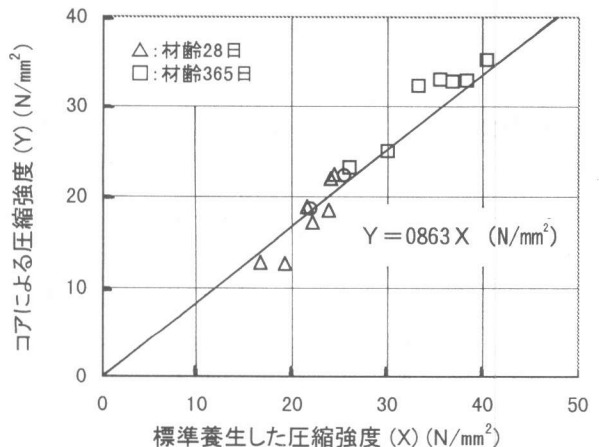


図-5 標準養生した圧縮強度とコアによる圧縮強度との関係

の置換率が 95 %でも無混入コンクリートより大きな値を示している。

次に、土中コンクリートの高炉スラグ微粉末の置換率とコアによる圧縮強度との関係を図-4に示す。上述した通り標準養生したものと同様の傾向を示している。材齢 365 日までの圧縮強度は標準養生に比して土中コンクリートのコア強度は材齢 28 日では 8 ~ 34 %減で平均 18 %減、材齢 365 日では 7 ~ 31 %減で平均 16 %減とコアの圧縮強度は小さい。標準養生とコア強度の材齢 28 日および 365 日の結果から、標準養生した圧縮強度 (X) とコア強度による圧縮強度 (Y) との関係を図-5に示す。このことから標準養生によるコア強度の材齢 1 年までの推定式を求めると

(1) 式

$$Y = 0.863 X (\text{N/mm}^2) \quad (1)$$

のようになるので提案する。

(2) 静弾性係数・ポアソン

比

土中コンクリートの材齢 10 年のコア強度と静弾性係数との関係を図-6に示す。

これによると高炉スラグ微粉末コンクリートの静弾性係数は、日本建築学会 RC 造構造計算規準に示されている提唱式を上廻っており高炉スラグ微粉末の置換率を増しても静弾性係数は低下しない。高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは、無混入コンクリートに比して静弾性係数は同程度で、23.1 ~ 30.0 kN/mm² の範囲にある。また、ポアソン比は 0.14 ~ 0.19 の範囲にある (表-2 参照)。

(3) 含水率・吸水率

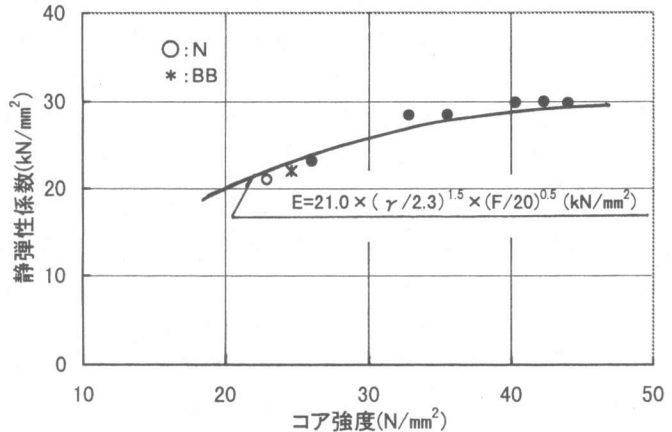


図-6 コア強度と静弾性係数との関係 (材齢10年)

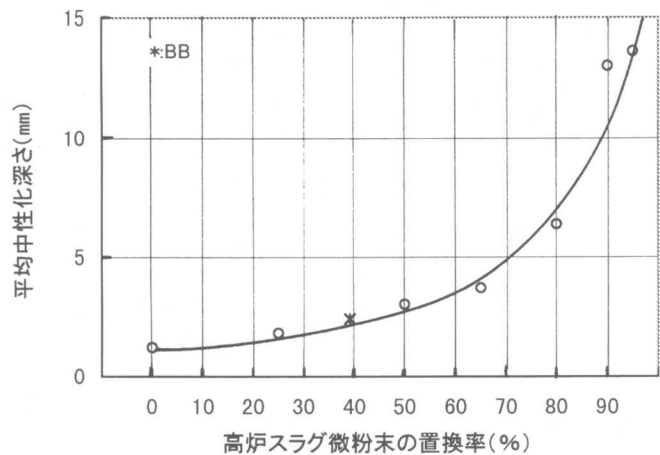


図-7 高炉スラグ微粉末の置換率と中性化深さとの関係 (材齢10年)

材齢 10 年におけるコアの含水率と吸水率は表-2に示した通りで、含水率は 3.1 ~ 4.8 % の範囲、吸水率は 4.7 ~ 6.6 % の範囲にある。

(4) 平均中性化深さ

材齢 10 年における土中コンクリートの高炉スラグ微粉末の置換率と平均中性化深さとの関係を図-7に示す。これによると高炉スラグ微粉末の置換率が増すほど、平均中性化深さは大きくなる。しかし、高炉スラグ微粉末の置換率が 25 %以下であれば、無混入コンクリートと同程度である。

4. まとめ

高炉スラグ微粉末を混和材として用い置換率を 25 ~ 95 % まで 6 段階変化させた場合の土中コンクリートについて 10 年間にわたって実験研究した結果、次のようなことがいえる。

(1) 打設した土中コンクリートの温度上昇量は、置換率が増すほど温度は低下するので高炉スラグ微粉末は温度上昇の抑制効果が大きく期待できる。

(2) 標準養生およびコアによる圧縮強度は、高炉スラグ微粉末の置換率が増すほど初期の圧縮強度は無混入コンクリートに比して小さいが、材齢 28 日では置換率 65 % で同程度、材齢 91 日の長期材齢では置換率 95 % でも無混入コンクリートより大きい。また、標準養生に比して土中コンクリートのコアによる圧縮強度は 16 ~ 18 % 程度低減する。

(3) 静弾性係数は、高炉スラグ微粉末の置換率を大きくしても低下せず、無混入コンクリートに比して同程度以上の値になる。

(4) 平均中性化深さは、高炉スラグ微粉末の置換率が増すほど大きくなる。しかし、置換率 25 % 以下であれば、無混入コンクリートとほぼ同程度である。

本実験研究は足利工業大学、日立セメント(株)、住金鹿島鉱(株)の共同研究の一環であることを付記する。

参考文献

- 1) 依田彰彦, 横室隆: 高炉スラグを混和材として用いたコンクリートの性質, コンクリート工学講演論文集, vol.5, pp.33-36, 1983.4
- 2) 依田彰彦, 横室隆, 木村正尚: 高炉スラグを混和材として用いたコンクリートの性質, セメント技術年報, vol.41, pp.142-145, 1987.12
- 3) 依田彰彦, 横室隆: 微粉末化した高炉スラグを混和材として用いたモルタル・コンク

リートの強度, セメント技術年報, vol.42, pp.92-95, 1988.12

- 4) 依田彰彦, 横室隆: 高炉スラグ微粉末を 20, 45, 65 % 内割添加したコンクリートの性質, セメント・コンクリート論文集, Vol.43, pp.132-137, 1989.12
- 5) 依田彰彦: 高炉スラグ微粉末の高強度・高耐久性コンクリートへの利用, Gypsum & Lime243, pp.82-87, 1993
- 6) 依田彰彦: 高炉スラグ微粉末を混和材として用いたコンクリートの性質, 材料, vol.43, No.491, pp.943-948, 1994.8
- 7) 依田彰彦, 横室隆: 高炉スラグ微粉末のコンクリート用混和材への適用研究, コンクリート工学年次論文報告集, vol.17, pp.343-348, 1995
- 8) 李長江, 依田彰彦, 横室隆: セメントペーストの細孔構造および圧縮強度に及ぼす高炉スラグ微粉末の影響, 日本建築学会構造系論文集, 第 506 号, pp.1-6, 1998.4
- 9) Li, C. Yoda, A. and Yokomuro, T. : Pore Structure, Strength and Carbonation of Cement Pastes Containing Ground Granulated Blast-Furnace Slag, Proceedings of Sixth CANMENT/ACI International conference on "Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete", Bangkok, Thailand, 1998, ACI SP-178, Vol. 2, pp.875-891, 1998
- 10) 依田彰彦, 横室隆, 木村正尚, 島崎信明: 高炉スラグ微粉末の高強度・高耐久性コンクリートの利用に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, vol.20, No. 2, pp.61-66, 1999
- 11) 横室隆, 依田彰彦, 木村正尚, 島崎信明: 生コン工場で製造した高炉スラグ微粉末を用いた高強度コンクリートについて, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No. 2, pp.67-72, 1999