

名古屋工業大学
富士製鉄名古屋製鉄所
大成建設名古屋支店

正員 〇吉田邦智
正員 沼田晋一
松林正文

1. まえがき

高炉スラグは製鉄所高炉において、鉄鉄製造の際に、副産物として産出される。この高炉スラグと碎石とを、コンクリート粗骨材として用いるスラグ碎石コンクリートは 現在主として、構造物の基礎部分に使用されているが 今後 天然骨材の不足にともない さらに 一般構造物への進出も可能なものと思われる。そこで、今回の研究においては 鉄筋コンクリート梁の曲げおよびせん断破壊実験をとりあげ、スラグ碎石コンクリートを用いた構造物の問題点と重要な研究にしようとする。

2. 高炉スラグについて

スラグは高炉における鉄鉄製造の際、鉄鉄石中の脈石やコークス燃焼残分である灰分が石灰と共に溶解して出来るいぼ副産物である。スラグは多孔質で表面の凸凹がはげしい。その性質は受印方式（運搬）により大きく左右されるが、本実験の管理を行ない、その密着性 表1 スラグコンクリートの配合上の修正

項目	修正事項
単位水量	水セメント比にたいして 6~10kg 増す
細骨材率%	2% 増す
細骨材F.M.	0.2 小さくする。

ガス（ N_2 , H_2S , SO_2 , etc）を排出すれば、充分緻密な強度の大きいものが得られる。スラグ自体の強度にはある程度のバラツキが認められるが これをコンクリートの粗骨材として用いる場合、そのコンクリートにはほかにバラツキが生じないことが 我々の実験によって認められた。

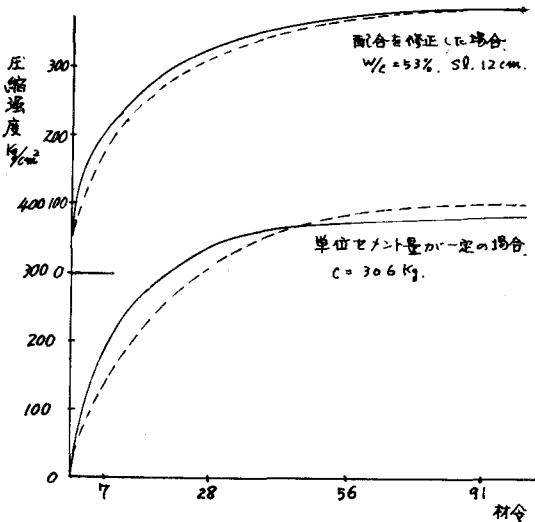
3. スラグコンクリートの性質

3-1 配合について スラグ碎石は多孔質なものであるから コンクリート配合には、普通コンクリートに比べて多少の修正が必要であり この実験に用いたスラグ碎石の場合 表1に示す通りである。この修正配合設計をすれば、必要なワーカビリティが得られ、一般の施工に十分適応すると思われる。

単位重量は普通コンクリートに比べて5%程度小さいもので、軽量性はあまりない。

3-2 強度について 圧縮強度 曲げ強度とも、初期強度が大きいことが特長である。これはスラグとモルタルとの付着性によることが主因であると思われる。単位セメント量を同じくした場合、%の大きい（60%程度）コンクリートは普通コンクリートに比べて長期強度

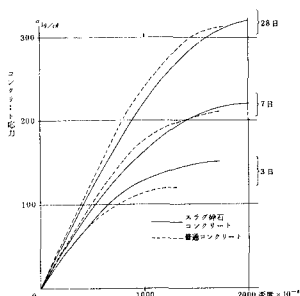
図-1. 配合による圧縮強度の違い



度が小さいが 上記のような配合設計が考慮されれば、 $\%$ の大きな場合でも充分な強度が得られこ
る。又 $\%$ の小さい場合には 普通コンクリートより強度は大きく かなりの高強度(450 kg/cm^2 程度)のコン
クリートも製造可能である。曲げ強度の場合には 普通コンクリートに比べて 多少小さい傾向にあ
る。図-1 に配合を修正した場合と単位セメント量と同じくした場合の圧縮強度の比較を示す。また
スラグコンクリートには、特に混和剤の影響が大きく、適当な混和剤の使用により、スラグ研石とモ
ルタルの付着を大きくすることが出来る。

3-3 弾性係数について $\%$ =53%のコンクリートについての応
力-変曲線の測定結果を示すと図-2のようである。一般にスラグコン
クリートは普通コンクリートより多少弾性的な傾向があり 弾性
係数は幾分小さい。しかしこの差は 軽量コンクリートと普通コン
クリートほどの差はなく スラグコンクリートは軽量コンクリート
より普通コンクリートにずっと近い性質のものである。弾性係数の
違いによる構造物への影響はほとんどないことが 後述の実験から
も確かめられた。

図-2 応力-変曲線



4. 鉄筋コンクリートとしての性質

4-1 曲げ特性について (梁の曲げ破壊実験)

スラグ研石を粗骨材とする鉄筋コンクリート梁
の曲げ特性を普通コンクリートの場合と比較する
ために、表-2、表-3の様な配合 ならびに供試体
で曲げ破壊実験を行った。載荷方法は図-3に示す
通り 単純載荷である。又用いた鉄筋の性質は
表-4の通りである。

表-2 実験に用いたコンクリート配合

種別	w/c	スラグ cm^3	最大 mm	kg/m^3	$\text{A}_{\text{st}}/\text{A}_{\text{c}}$	単位量 kg/m^3				圧縮 強度
						C	W	S	G	
スラグコン クリート	40	6.0	25	38.4	6.3	405	162	902	1093	162
	50	6.5	25	40.4	5.5	324	162	966	1095	130
	53	12.0	25	41.3	4.3	330	175	925	1012	132
	60	7.5	25	42.4	6.0	263	158	823	1093	108
普通 コンクリート	50	8.0	25	38.4	4.5	312	156	937	1207	125
	53	12.0	25	39.7	4.1	313	165	912	1105	125

4-1-1 極限曲げ破壊時並びに鉄筋降伏時のモー メントについての比較

Under-Reinforced Beam の場合 主引張鉄筋が降伏
した後も、圧縮側コンクリートがその最大圧縮に
達するまで 梁は耐力を保持している。そこで鉄筋が
降伏した時のモーメントと、終局的に梁がその耐力
を失う極限曲げ破壊時のモーメントとを、スラグ研
石コンクリートと普通コンクリートについて比較し
表-5、表-6、にそれぞれ示した。なお表に示した計
算値は それぞれ次のようにして求めた値である。
鉄筋降伏時のモーメントに対しては 現行の弾性較
設計法を適用し $n=15$ とし計算した値である。

また極限曲げ破壊モーメントに対しては 圧縮側
コンクリート中の応力分布を矩形に置き換えて求め

表-3 供試体形状

種別	Beam No.	$\%$	$b \times d$ cm	L cm	l_1 cm	l_2 cm	主鉄筋量	コンクリート 圧縮強度 kg/cm^2
スラグコン クリート	S ₁ -40	40	15×25	120	40	40	2×D19	453
	S ₂ -40	"	"	"	"	"	4×D22	"
	S ₁ -50	50	"	"	"	"	2×D19	337
	S ₂ -50	"	"	"	"	"	3×D19	"
	S ₁ -53	53	25×25	230	20	105	4×D16	323
	S ₂ -53	"	"	"	"	"	"	"
	S ₃ -53	"	"	210	30	90	"	"
	S ₁ -60	60	15×25	120	40	40	2×D13	176
	S ₂ -60	"	"	"	"	"	2×D16	"
普通 コンクリート	N ₁ -50	50	15×25	120	40	40	2×D19	340
	N ₂ -50	"	"	"	"	"	3×D19	"
	N ₁ -53	53	25×25	230	20	105	4×D16	320
	N ₂ -53	"	"	"	"	"	"	"
	N ₃ -53	"	"	210	30	90	"	"

下記の式で計算した値である。

$$M_u = \phi_b d^2 \sigma_{cr} (1 - \frac{\gamma}{2})$$

ϕ_b ; 梁の断面の中 d ; 有効高

$\sigma_{cr} = (\phi_b r_0 / 2 r_2) \sigma_c$; 有効平均応力度

r_1 ; 平均の応力度を表す係数 r_2 ; 圧縮応力度の重心を表す係数

r_3 ; シリンダー試体の圧縮強度と実際の構造物のコンクリート強度との比を表す係数

σ_c ; シリンダー試体の強度

$r = p \cdot \sigma_g / \sigma_u$ p ; 鉄筋比

r_1, r_2 はコンクリートの応力-歪曲線より

求め、この時必要なコンクリートの最大圧縮歪は梁の曲げ試験より決定した。表5、表6

からも判るよう、スラグコンクリートと普通コンクリートの間、いずれの

モーメントにも差は認められない。

4-1-2 鉄筋中の応力の比較

試験結果の一例を示すと図4の通り

であり、こゝにも差は認められない。

このことは、現行の構造物設計規程において、スラグコンクリートの場合も

普通コンクリートと同様 $n=15$ として

計算してよいことを示している。

4-1-3 応力比の比較

試験結果の一例を図5に示す。軽量

コンクリートと、普通コンクリートとの

間には、応力比に若干の差が見

られるが、スラグコンクリート

に於ては、そのようなことは

認められなかった。

4-1-4 ひずみ率モーメント

の比較 表7に肉眼による方法

と、鉄筋中の応力による方法

応力比による方法などから

総合的に判断したひずみ率モーメントを示す。これからも

判るよう、スラグコンクリートが若干大きい値を示して

いるが、このことはスラグ

と、梁の断面の中 d ; 有効高

$\sigma_{cr} = (\phi_b r_0 / 2 r_2) \sigma_c$; 有効平均応力度

r_1 ; 平均の応力度を表す係数 r_2 ; 圧縮応力度の重心を表す係数

r_3 ; シリンダー試体の圧縮強度と実際の構造物のコンクリート強度との比を表す係数

σ_c ; シリンダー試体の強度

$r = p \cdot \sigma_g / \sigma_u$ p ; 鉄筋比

r_1, r_2 はコンクリートの応力-歪曲線より

求め、この時必要なコンクリートの最大圧縮歪は梁の曲げ試験より決定した。表5、表6

からも判るよう、スラグコンクリートと普通コンクリートの間、いずれの

モーメントにも差は認められない。

4-1-2 鉄筋中の応力の比較

試験結果の一例を示すと図4の通り

であり、こゝにも差は認められない。

このことは、現行の構造物設計規程において、スラグコンクリートの場合も

普通コンクリートと同様 $n=15$ として

計算してよいことを示している。

4-1-3 応力比の比較

試験結果の一例を図5に示す。軽量

コンクリートと、普通コンクリートとの

間には、応力比に若干の差が見

られるが、スラグコンクリート

に於ては、そのようなことは

認められなかった。

4-1-4 ひずみ率モーメント

の比較 表7に肉眼による方法

と、鉄筋中の応力による方法

応力比による方法などから

総合的に判断したひずみ率モーメントを示す。これからも

判るよう、スラグコンクリートが若干大きい値を示して

いるが、このことはスラグ

表4. 鉄筋の性質

種類	降伏点強度 σ_{yk} (kg/cm ²)	$\gamma = \sigma_{yk} / \sigma_{ts}$ (kg/cm ²)
異形 D-13	3850	2.17×10^6
" D-16	3660	1.99×10^6
" D-19	4014	2.03×10^6
" D-22	3484	1.96×10^6

図-3. 載荷方法

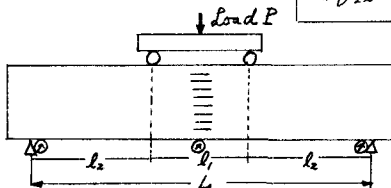


図-4. 鉄筋中の応力の比較

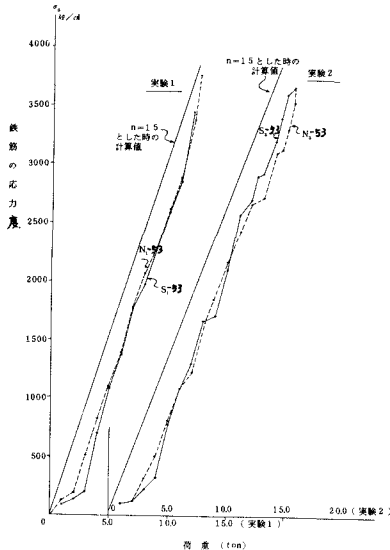


表5. 鉄筋降伏時モーメント (ton-m)

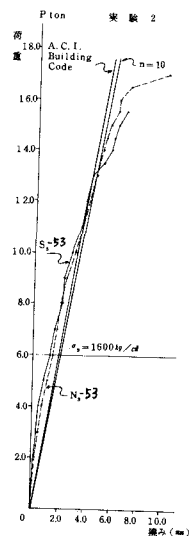
種類	スラグコンクリート								普通コンクリート				
Beam No.	S-40	S-40	S-50	S-50	S-53	S-53	S-53	S-60	N-50	N-50	N-53	N-53	N-53
実験値	6.2	10.4	6.1	8.2	6.6	6.8	7.2	2.9	3.9	5.6	8.4	7.1	7.4
計算値	4.8	10.5	4.8	7.0	6.2	6.2	6.2	2.1	3.2	4.8	7.0	6.2	6.2

$n=15$ $M = \sigma_y A_s (d - \frac{x}{2})$ で計算

表6. 極限曲げ破壊モーメント (ton-m)

種類	スラグコンクリート								普通コンクリート				
Beam No.	S-40	S-40	S-50	S-50	S-53	S-53	S-53	S-60	N-50	N-50	N-53	N-53	N-53
実験値	7.1	11.5	6.4	8.3	7.3	8.9	7.4	3.7	4.2	5.7	8.6	7.6	7.9
計算値	5.3	11.2	5.2	7.3	6.7	6.7	6.7	2.3	3.3	5.2	7.3	6.7	6.7

図-5. 応力比の比較



コンクリートの伸び能力の大きいことを示しているものと思われる。

4-1-5 その他、ひびわれ中、ひびわれ間隔、ひびわれ進行状態を比較しても、両コンクリートに差はほとんど認められなかった。図-6 にひびわれ進行状態の一例を示す。

4-2 センズン特性について

表-8 の供試体についてセンズン破壊実験を行ない、スラグコンクリートのセンズン特性を研究した。なお配合は、普通セメント比に対して、曲げ破壊実験と同一である。試験は二乗載荷で行った。比較すべき供試体の数が少なく、今回の実験から、スラグコンクリートのセンズン特性を結論づけることは出来ない。そこで将来への方向づけとしての意見にとどめておく。表-9 に各供試体の初期斜め引張ひびわれ荷重、センズン破壊荷重を示した。スラグコンクリートのセンズンに対する抵抗力を普通コンクリートのそれと比較するのに一参考になるのは、初期斜め引張ひびわれ荷重であろうが、両者にそれ程の差が認められなかった。しかしながら、ひびわれ状態などから判断すると、スラグコンクリートは、普通コンクリートより若干センズン抵抗は弱いように思われる。軽量コンクリートの場合、現行の設計法に於て、センズン許容応力度を普通コンクリートより小さくしているが、スラグコンクリートの場合も、その称名方向にもっていくのが安全であろう。今後この方面の研究を進めたいと考えている。

5. まとめ

スラグコンクリートを鉄筋コンクリート構造物として利用した場合のコンクリートの性質は、普通コンクリートと軽量コンクリートの中間的な存在であり、かつ普通コンクリートの方へずっと近いものである。それ故、今後の研究が進めば、配合および部材設計、施工において、その特性を知り、多少の修正をすれば、スラグ砕石はコンクリート粗骨材として十分利用出来るものと思われる。

表-7 ひびわれモーメントの比較

Beam No.		ひびわれ荷重 cm			ひびわれモーメント $cm-m$
		固	鉄筋	(ひび)	
スラグコンクリート	S ₁ -53	4	4	4	2.3
	S ₂ -53	4	4	4	2.3
	S ₃ -53	4	5	5	2.0
普通コンクリート	N ₁ -53	3	3	—	1.8
	N ₂ -53	4	3	3	1.8
	N ₃ -53	4	3	—	1.6

図-6 ひびわれ状態 (S₂-53, N₂-53)

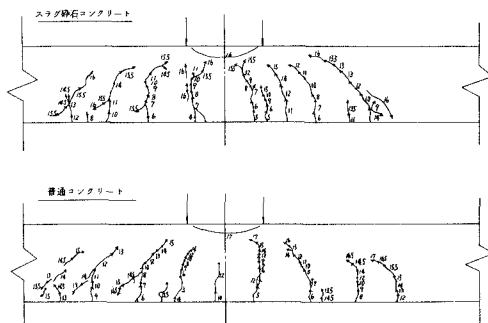


表-8 センズン試験供試体形状

	Beam No.	寸法	主筋	主筋	スラグ	備考
スラグコンクリート	S ₁ '-40	40	440	2 × D19	1.53	φ10 × 6 L=120cm L ₂ =40cm
	S ₂ '-40	40	450	3 × D19	2.23	0 L ₂ =40cm
	S ₁ '-50	50	323	2 × D19	1.53	φ10 × 6 スラグ・シリカは調整せ
	S ₂ '-50	50	323	3 × D19	2.23	0 スラグ・シリカは調整せ
	S ₁ '-60	60	216	2 × D13	0.68	φ10 × 2 L × d = 15 × 25
	S ₂ '-60	60	171	3 × D13	0.68	0
普通コンクリート	N ₁ '-50	50	367	2 × D19	1.53	φ10 × 6
	N ₂ '-50	50	378	3 × D19	2.23	0

表-9 梁のセンズン特性

Beam No.	S ₁ '-40	S ₂ '-40	S ₁ '-50	S ₂ '-50	S ₁ '-60	S ₂ '-60	N ₁ '-50	N ₂ '-50
初期斜め引張ひびわれ荷重 (P ₀)	12t	10	8	12	4	6	12	10
$T_2 = \frac{1}{2} \frac{P_0}{f_{td}}$	16.9	14.9	12.2	16.9	6.1	9.1	16.9	14.9
危険荷重 P _c	24t	24	24	22	11	11	24	24
センズン破壊荷重 P _u	32t	27	32	29	15	14	32	23

危険荷重は斜めひびわれが主引張鉄筋の位置と載荷点付にまで発展した時の荷重