

正会員 ○ 魚本健人 (東大生研)  
 正会員 小林一輔 (東大生研)  
 星野富夫 (東大生研)

1. は し が き

本研究は、省資源、省エネルギーの観点から産業副産物である高炉水砕スラグ及び排煙脱硫石こうを汎用のセメントと大量に置換して使用することを目的として実施したもので、この種の結合材を用いたコンクリートの圧縮強度特性について実験的に調べたものである。なお、実験にあたっては従来の内外の研究及び諸外国の規格等を参考にし、高炉水砕スラグ、石こうの割合を決めた。

2. 使 用 材 料

2. 1 結 合 材 料

結合材料としては、高炉水砕スラグ粉末、排煙脱硫石こうおよび普通ポルトランドセメントを混合して使用した。各材料の性質を表-1に示す。なお、石こうはほとんど二水石こうで、半水石こうが一部含まれている。

2. 2 骨 材

骨材は、富士川産の川砂および最大寸法20mmの秩父両神産の碎石を使用した。川砂は比重2.65、吸水量2.41%、粗粒率2.85で、碎石は比重2.65、吸水量0.78%、粗粒率6.80である。

3. 実 験 概 要

3. 1 結 合 材 の 配 合 比 の 決 定

高炉水砕スラグ・セッコウ系結合材のスラグ、セッコウ、普通ポルトランドセメントの配合比を決定するため、モルタルによる予備実験を行った。即ち、普通ポルトランドセメントは刺激剤として考え、結合材の2wt%とし、高炉水砕スラグを70~90wt%まで変化させたモルタル(水結合材比40~60%)による圧縮強度試験および曲げ強度試験を行い、総合的に最も高い強度が得られる配合比を求めた。その配合比は重量比で示すと、スラグ：セッコウ：セメント=85：13：2 である。

3. 2 圧 縮 強 度 試 験

高炉水砕スラグ・セッコウ系結合材を用いたコンクリートの圧縮強度特性を調べるため次の各条件でコンクリートの配合を決め、φ10×20cmの供試体による圧縮強度試験を行った。配合を決める条件としては(i)スランプ一定(7±1cm)(ii)水結合材比一定(W/B=55%) (iii)単位結合材量一定(B=400Kg/m<sup>3</sup>) (iv)単位水量一定(W=180Kg/m<sup>3</sup>)の4種類とし、(i)については普通ポルトランドセメントのみを用いた場合についても試験を行った。なお、養生は所定材令まで水中(20℃)養生とした。

表 - 1 結 合 材 料 の 品 質

種 別	比重	粉末度 (cm <sup>2</sup> /g)	化 学 成 分 (%)									
			ig.loss	insol.	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	SO <sub>3</sub>	Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Total
普通ポルトランドセメント	3.16	3180	0.4	0.0	22.0	5.1	3.3	1.3	64.7	2.3	—	99.1
高炉水砕スラグ	2.89	4320	2.6	—	32.9	12.3	0.9	6.0	41.0	1.0	0.5	97.2
排煙脱硫石こう	2.31	—	20.4	0.3	0.3	0.0	0.1	0.0	32.6	46.0	—	99.7

### 3. 3 細孔径分布の測定およびX線回折試験

圧縮強度試験終了後、3. 2 (i) の供試体(材令13週)に対し細孔径分布の測定およびX線回折試験(Target:Cu, Filter:Ni)を実施した。細孔径分布の測定では水銀圧入法により75000Å~75Åの細孔径分布と空隙量を求めた。なお、いずれの測定もペースト部分を主体としたが完全に骨材を取り除くことはできなかった。

### 4. 実験結果と考察

#### 4. 1 普通ポルトランドセメントとの比較

図-1はスランブを一定とした場合の普通ポルトランドセメントと高炉水砕スラグ、セッコウ系結合材を比較したものである。この図から明らかのように、スランブを一定にした場合、高炉水砕スラグ・セッコウ系結合材を用いたコンクリートの強度は、普通ポルトランドセメントコンクリートと異なった傾向があると言えよう。即ち、普通ポルトランドセメントコンクリートでは水結合材比が小さくなるほどほぼ直線的に圧縮強度は増大しているが、高炉水砕スラグ・セッコウ系結合材では水結合材比が45~55%で圧縮強度は最大となっている。

図-2は上記供試体の細孔径分布及び空隙量(T.P.V.)が水結合材比によってどのように変化しているかを示したものである。これによると普通コンクリートでは水結合材比の小さなものほど空隙量は小さく、小さな空隙(75~240Å)の割合が大きい。一方高炉水砕スラグ・セッコウ系結合材の場合、空隙量は水結合材比が55、75、35%の順に小さく、小さな空隙の割合も同じ順序で増大している。しかし、圧縮強度との対応を調べると、高炉水砕スラグ・セッコウ系結合材も普通ポルトランドセメントコンクリートと同じ傾向があることが認められる。

X線回折試験は、上記供試体のうち水結合材比35%、55%、75%の供試体(材令13週)に対し実施した。その結果、高炉水砕スラグ・セッコウ系結合材では次のこと

- (i) 水結合材比の大きいものほどエトリングガイトの回折強度は大きい。
- (ii) 水結合材比35%のものは他と比べ石こうの回折強度が大きく、石こうは残存していると思われる。

以上のことをまとめると、高炉水砕スラグ・セッコウ系結合材は普通ポルトランドセメントとは異なった水和反応をしているものと思われる。

#### 4. 2 高炉水砕スラグ・セッコウ系結合材の圧縮強度特性

高炉水砕スラグ・セッコウ系結合材の圧縮強度に及ぼす因子が何であるかを調べるため、図-1で求めた値を用い、普通ポルトランドセメントコンクリートに対する高炉水砕スラグ・セッコウ系結合材コンクリートの圧縮強度比を調べると、図-3に示すように単位結合材量とほぼ直線関係となる。この図より、高炉水砕スラグ・セッコウ系結合材を用いたコンクリートは、単位結合材量が少なくなるほど(i)普通ポルトランドセメントコンクリートに近い強度となり、(ii)材令の経過と共に強度の伸びが著しいことがわかる。また、この図からもわかるように単位結合材量230Kg/m<sup>2</sup>の場合(水結合材比75%)には材令4週で、単位結合材量270Kg/m<sup>2</sup>の

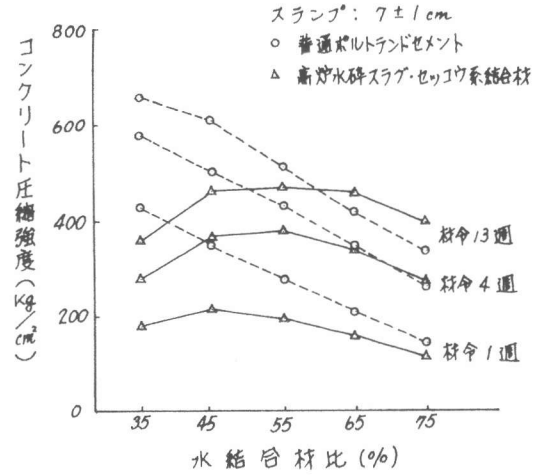


図-1 スランブを一定にした場合のコンクリート圧縮強度と水結合材比との関係

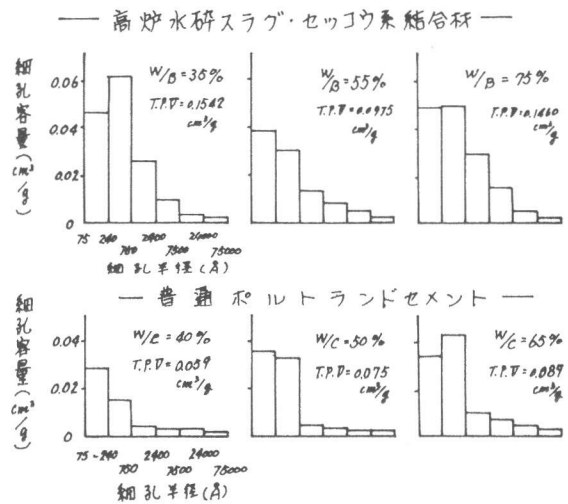


図-2 コンクリート中のペーストの細孔径分布

場合（水結合材比65%）には材令13週で普通ポルトランドセメントコンクリートと同程度の強度が得られている。

一方、一般的に普通ポルトランドセメントコンクリートの強度は水セメント比と相関性があることを考慮すると、高炉水砕スラグ・セッコウ系結合材コンクリートの強度は水結合材比と単位結合材量の関数になっているものと推定される。そこで圧縮強度特性を調べるため次の検討を行った。

(1) 水結合材比を一定にした場合の圧縮強度

水結合材比を一定にし、単位結合材比を変化させた場合の圧縮強度を示したものが図-4である。この図より、水結合材比を55%にした場合、単位結合材量の小さいものほど (i) 圧縮強度は高く、(ii) 材令の経過に伴う強度の伸びおよび伸び率は大きいことが認められる。なお、この場合の強度と単位結合材量との関係は、ほぼ直線近似できると言えよう。

(2) 単位結合材量を一定にした場合の圧縮強度

単位結合材量を一定にし、水結合材比を変化させた場合の圧縮強度を示したものが図-5である。この図より、

(i) 圧縮強度は水結合材比または単位水量とほぼ直線関係にあり、普通ポルトランドセメントコンクリートの場合と同様な関係となっていること、(ii) 材令の経過に伴う強度の伸びは水結合材比にかかわらずほぼ一定であることが認められる。

(3) 単位水量を一定にした場合の圧縮強度

単位水量を一定にし、水結合材比を変化させた場合の圧縮強度を示したものが図-6である。この図より、各材令とも強度にピークが存在することがわかる。また、ピークとなる水結合材比が65%付近にあるため、もし水結合材比35~65%の範囲で実験を行うと、水結合材比を増加するに従い強度が増すかのような傾向があらわれる。

4.3 高炉水砕スラグ・セッコウ系結合材を用いたコンクリートの圧縮強度近似式

上記の結果からも明らかなように、高炉水砕スラグ・セッコウ系結合材を用いたコンクリートの圧縮強度 $\sigma$ は、実用上は次式の形に近似できると考えられる。

$$\sigma = K(1 - \alpha B) \cdot (1 - \beta W/B)$$

ただし K,  $\alpha$ ,  $\beta$ : 定数 ( $\alpha > 0$ ,  $\beta > 0$ ,  $K > 0$ )

B : 単位結合材量

W : 単位水量

なお、K,  $\alpha$ ,  $\beta$ は材令等により変化するものと思われる

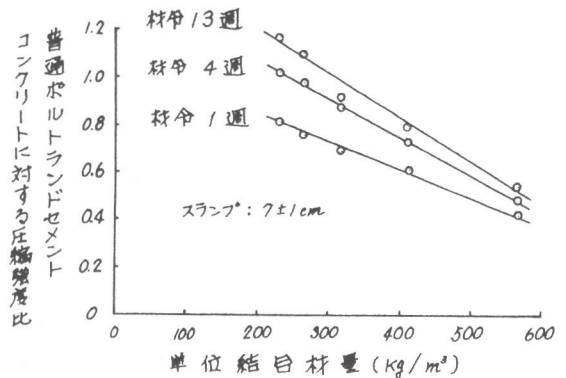


図-3 普通ポルトランドセメントコンクリートに対する圧縮強度比と単位結合材量との関係

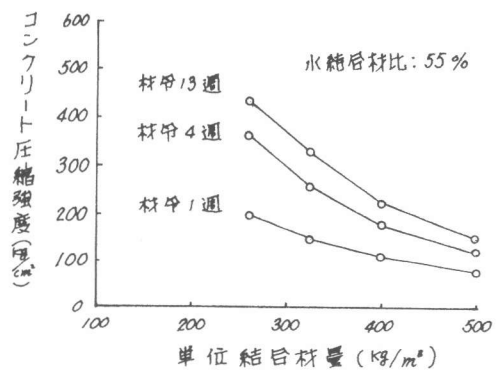


図-4 水結合材比を一定にした場合の圧縮強度と単位結合材量との関係

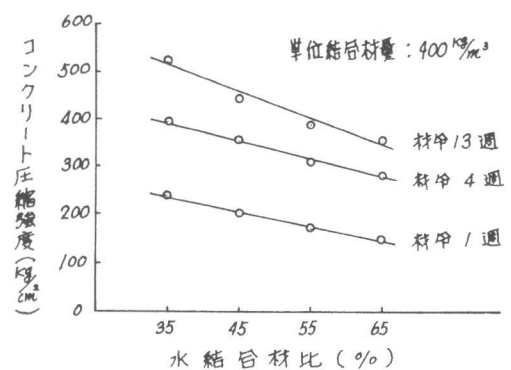


図-5 単位結合材量を一定にした場合の圧縮強度と水結合材比との関係

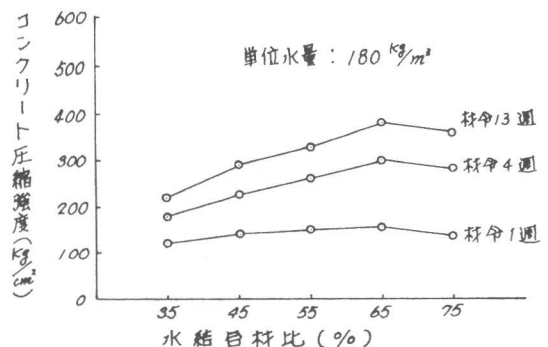


図-6 単位水量を一定にした場合の圧縮強度と水結合材比との関係

が、今回の実験結果だけでは不明である。

ここで上記の実験結果との対応を調べると、上記の式は

(i)  $W/B$  が一定の場合 :  $\sigma \propto (1 - \alpha B)$  となり強度が単位結合材量に比例することを示している。

(ii)  $B$  が一定の場合 :  $\sigma \propto (1 - \beta W/B)$  となり強度が単位水量に比例することを示しているが、 $B$  が一定のため  $W/B$  に比例するとも言える。

(iii)  $W$  が一定の場合 :  $\sigma \propto (1 - \alpha B) \cdot (1 - \beta W/B)$  となり  $B > 0$  の条件では  $B = \sqrt{\beta W / \alpha}$  において  $\sigma$  は最大となることを示している。

すなわち、いずれの場合も実験結果の傾向と良く合っていると見えよう。

この式から明らかなように、普通ポルトランドセメントの場合のようにスランブを一定に保ち、 $W/B$  を変化させるといふ配合方法を取ることは、 $W$  が一定の場合に近い配合となるため、 $B = \sqrt{\beta W / \alpha}$  または  $W/B = \sqrt{\alpha W / \beta}$  付近で強度は最大となる。従ってスランブの大きいコンクリートでは、単位水量が増大するためピークとなる  $W/B$  も増加し、水結合材比を小さくしても強度の増加は望めないことになる。なお、今回行った実験結果(図-4, 5)から  $\alpha$ ,  $\beta$  を求めると  $\alpha \doteq 0.0017 \text{ m}^3/\text{Kg}$ ,  $\beta \doteq 0.8$  となるので、単位水量  $180 \text{ Kg}/\text{m}^3$  とした場合のピークとなる水結合材比は  $W/B \doteq 6.2 \%$  となり、図-6と比較しても良い一致を示している。

## 5. 結 論

高炉水砕スラグ：セッコウ：セメント = 85 : 13 : 2 で混合した高炉水砕スラグ・セッコウ系結合材は普通ポルトランドセメントとはその水和反応が異っており、コンクリートの圧縮強度には次の傾向がある。

(i) 水結合材比を一定にすると、単位結合材量の小さい配合ほど強度は高い。

(ii) 単位結合材量を一定にすると、水結合材比の小さい配合ほど強度は高い。

(iii) 単位水量を一定にすると、ある水結合材比で強度は最大となるため、実験範囲によっては水結合材比を大きくするほど強度が高くなるという現象が起りうる。

(iv) 普通ポルトランドセメントコンクリートと異なり、強度的には水結合材比を大きくした配合とする方が有利である。

(v) 実用的には、圧縮強度を次式のように近似することができる。

$$\sigma = K (1 - \alpha B) \cdot (1 - \beta W/B) \quad K, \alpha, \beta : \text{定数} (> 0)$$

なお、単位水量を一定にした場合上式では  $W/B = \sqrt{\alpha W / \beta}$  で最大となるが、今回行った実験結果とも良い一致を示した。

## 6. あ と が き

本研究では、スラグ：セッコウ：セメント = 85 : 13 : 2 の場合についてのみ検討を行ったが、普通ポルトランドセメントを  $2 \text{ wt} \%$  とし、高炉水砕スラグを  $70 \sim 90 \text{ wt} \%$  とした場合の結合材においてもほぼ同様な傾向を示すことは実験的に確認してあるので、いわゆる高硫酸塩スラグセメントの領域では本研究の結果があてはまるものと考えられる。最後に本研究に御協力いただいた方々に感謝いたします。

## 参 考 文 献

- 1) 小林、魚本、榎本、森：高炉水砕スラグ・セッコウ系結合材を用いたコンクリートに関する基礎的研究(1)  
生産研究 vol.30, No.6, 1978年6月
- 2) 森、小林、魚本：高炉水砕スラグおよび排煙脱硫石膏のセメントとしての利用  
土木学会第33回年次学術講演会講演概要集 1978年9月
- 3) 魚本、小林、星野：高炉水砕スラグ・セッコウ系結合材を用いたコンクリートに関する基礎的研究(2)  
生産研究 vol.30, No.10, 1978年10月