

論文 石炭灰を多量に用いた新しい硬化体製造方法

福留和人*¹・坂本守*²・鈴木達雄*³・長滝重義*⁴

要旨：石炭灰を多量に用いた硬化体をより経済的に製造する方法の検討を行った。検討の結果、セメントおよび石炭灰を最適含水比に近い水粉体比で練混ぜると練上り時は湿気のある粉の状態となるが、振動を与えると流体に性状が変化し、締固めが可能となることを見出した。この現象を利用して硬化体を製造すれば、単位水量、セメント量および水粉体比を大幅に低減できるため、経済的に品質の均一な硬化体を製造することが可能となる。さらに、使用する石炭灰のフロー特性を測定することによって、石炭灰の品質に応じた最適な配合を選定できることを見出した。

キーワード：石炭灰、最適含水比、硬化体、振動締固め、流体化

1. はじめに

近年の電力需要の増加に伴い発電所の建設が促進されているが、石油燃料の大量消費の抑制および原子力発電所の建設用地の確保難等から、石炭火力発電所が見直されている。このような状況から、今後石炭火力発電所の建設が増加し、それに伴って石炭灰の発生量が大幅に増加することが予想されている。現在、石炭灰は、セメント原料、コンクリート用混和材、その他で有効利用されているが、依然として埋立て処分の比率が高いのが現状であり、環境保全の観点からも石炭灰の有効利用の拡大が重要な課題となっている。

著者らは、石炭灰の有効利用の一方法として、石炭灰の原粉を多量に用いた硬化体の製造方法を開発し[1], [2]、これまで主として海洋構造物（人工魚礁や漁場開発を目的とした人工海底山脈のブロックの製造）への適用を検討してきた。その結果、1992年には水産庁の沿岸漁場整備開発事業施設設計指針に石炭灰コンクリートとして記載されるに至った[3]。さらに、経済性および品質の向上を目的として製造方法の検討を進めた結果、新しい製造方法を提案するに至った。

本論文では、開発した新しい製造方法を紹介するとともに、本製造方法における締固め性状および配合設計手法に関する検討結果について報告する。

2. 新しい製造方法の提案

これまでに開発された石炭灰を多量に用いた硬化体の製造方法の特徴は、石炭灰の硬化を促進する混和剤を用いている点であり、石炭灰の使用量の多い領域での短期および長期の強度発現性を大幅に改善することを可能とした[1], [2]。この製造方法でも十分に実用性は確保されていたが、さらに品質および経済性の向上を図ることを目的に種々検討を進めた結果、新しい製造方法の開発に至った。以下、開発した新しい製造方法の概要を述べる。

-
- * 1 (株) 間組技術研究所技術研究部第2研究室 (正会員)
 - * 2 (株) 間組土木本部技術設計部、工修 (正会員)
 - * 3 (株) 間組土木本部港湾・海洋統括部課長、工博 (正会員)
 - * 4 新潟大学教授 工学部建設工学科、工博 (正会員)

新たに開発した製造方法の特徴は、水、セメント、石炭灰および硬化促進剤を最適含水比（JIS A 1210-1979：突固めによる土の締固め試験で最大乾燥密度が得られる含水比）に近い水粉体比で練混ぜ、振動により締固めることにある。表-1に本製造方法における標準的な配合条件および製造方法を示す。写真-1に示すように練上り時では湿り気のある粉体の状態であるが、振動を継続すると数分後には写真-2のように性状が流体状に変化し、締固めが可能となる。

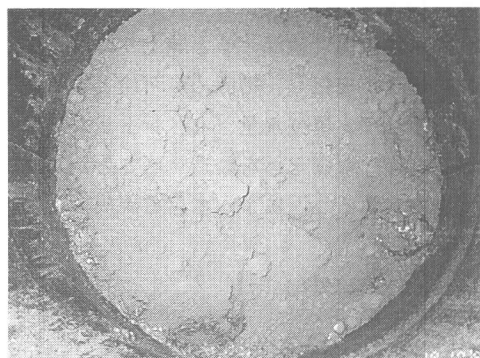


写真-1 練り上がり状況

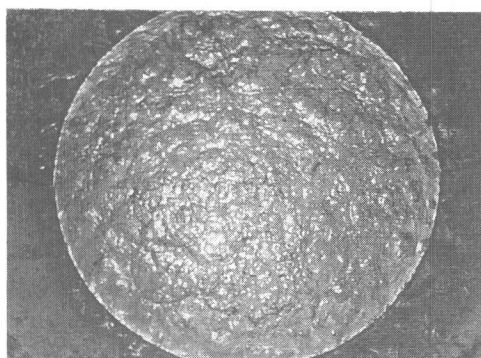


写真-2 流体化状況

表-2に硬化体の配合例を、図-1に従来の製造方法と新しい製造方法で製造した硬化体の圧縮強度の測定結果をあわせて示す。ここで、使用している石炭灰は、表-3に示す石炭灰Aである。

従来の製造方法では、材齢28日で20 N/mm²の圧縮強度を得るには、セメント添加率を、20~30%とする必要があったが[1]、本製造方法によれば、水粉体比を低減できるため、セメント添加率15%程度で同等の強度を確保することができる。

また、ブリーディングもほとんどなくなるため、上下方向の圧縮強度のばらつきが小さく、品質の均一性も向上する（図-2参照）。また、単位水量、セメント量が低減されることから、目視上ではあるが、ひびわれの発生も低減することが認められた。

表-1 配合条件および製造方法

配合条件			製造方法	
水粉体比 W/(C+F) (%)	セメント 添加率 C/(C+F) (%)	硬化促進 剤添加率 ad./W (%)	振動条件 (標準)	振動時間 (標準)
石炭灰最適含水比 + 0~5%	10 ~ 20	3.3% を標準と する	・振動数: 4,000rpm ・振幅: 1.0 mm	5分

表-2 本製造方法における配合例（石炭灰：A）

石炭灰の最適含水比 (%)	水粉体比 W/(C+F) (%)	セメント添加率 C/(C+F) (%)	単位量 (kg/m ³)			
			水	セメント	石炭灰	硬化促進剤
27.8	30.8	15.0	416	203	1149	0.045

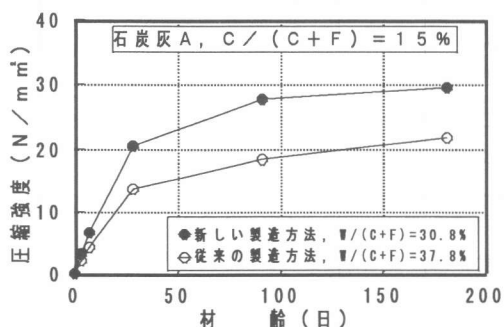


図-1 材齢と圧縮強度の関係測定例

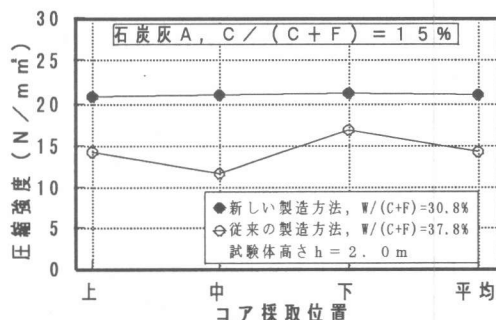


図-2 高さ方向の圧縮強度の分布

3. 振動による流体化現象の検討および強度発現性への効果

振動によりコンクリートの流動性が増大する現象は、従来より知られている性質であり、コンクリートの締固めに標準的に利用されている。この現象は、コンクリート中のセメントペーストが振動の影響により液状化するためであると考えられる。今回提案した製造方法において、湿気のある粉から流体に性状が変化する現象も振動によるセメントペーストの液状化現象の延長上にあると考えられる。ただし、これらの2つの現象は、以下の点で根本的に異なっている。すなわち、コンクリート中のセメントペーストは、練上り時（振動を与える前）でも状態的には流体であり、振動により流体としての特性が変化（降伏値および粘性の低下）しているにすぎない。それに対し、本製造方法の場合は、振動の作用により固体（湿気のある粉）から流体に状態が変化していると考えられ、振動停止後も流体状態が持続される。

現時点では、上記の流体化現象のメカニズムは十分に解明できていないが、これまで得られた流体化現象に関する実験データのいくつかを紹介する。ここで、使用した石炭灰の品質は、表-3に示すとおりである。

3.1 突固め試験による最適含水比と流体化現象の関係

本製造方法の第一の着眼点は、「粉体が最も密に締固まった状態（乾燥密度が最も高い）で最も高い強度が得られるはずである」という点である。そこで、最適と考えられる水粉体比を決定するためにJIS A 1210-1979（突固めによる土の締固め試験方法）により締固め曲線を求めた。さらに、振動による締固め（振動数：4000rpm、振幅：1mm、振動時間：5分間）も同様に行った。

図-3に突固め試験と振動締固めの締固め曲線の測定結果をあわせて示す。突固め試験において乾燥密度が最も高くなる水粉体比が最適含水比に相当する。図に示すように、振動締固めにおいて流体化する限界の水粉体比と締固め試験における最適含水比はほぼ一致していることがわかる。したがって、セメントおよび石炭灰の混合粉体の最適含水比を求めれば、おおよそ流体化可能な水粉体比を推測できる。一方、乾燥密度が最大となる水粉体比は、突固めと振動締固めで若干異なる。また、最適含水比以下の水粉体比では突固めの方が乾燥密度は高いが、最適含水比より大きい水粉体比では振動締固めの方が乾燥密度は高くなっており、流体化の効果が見られる。これらの傾向は、突固めと振動の締固めのメカニズムの差異によるものと考えられる。

3.2 流体化の強度発現性への効果

図-4に突固め（突固め試験と同様の方法で締固め。3層25回）と振動締固めにより作製した場合の水粉体比と圧縮強度の関係の測定結果を示す。ここで、最も水粉体比の小さい配合では振動により流体化せず、最も水粉体比の大きい配合では、練上り時において

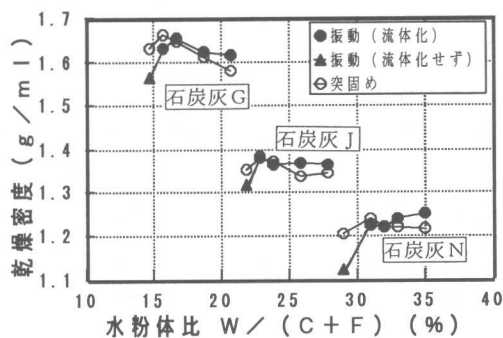


図-3 突固めと振動の締固め曲線の比較

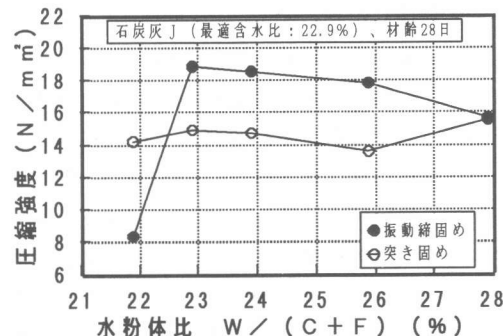


図-4 突固めと振動締固めの圧縮強度の比較

流体状であった。図に示すように、流体化することにより強度発現性が改善されている。これは、流体化により水および硬化促進剤が均一に分散されるためであると考えられる。

3. 3 製造上の最適水粉体比の存在

図-5に水粉体比と圧縮強度の関係の測定例を示す。図に示すように最適含水比近傍では、水粉体比が小さいほど高い強度が得られるとは限らず、強度が最も高くなる得られる水粉体比（以下、最適水粉体比と呼ぶ）が存在する。したがって、配合選定では、最適水粉体比を適切に選定することが肝要となる。

4. 配合設計手法の検討

石炭灰の品質の影響を調べるために、10カ所の発電所から産出された15種類の石炭灰を用いて各種試験を行った。表-3に試験に用いた石炭灰の品質の一覧を、図-6に締固め曲線の測定結果を示す。表および図に示すように石炭灰の種類によって最適含水比は、大幅に異なる。したがって、石炭灰の種類によって最適水粉体比も大きく異なり、また、セメント添加率を一定とすると得られる強度も大幅に異なる。

産業副産物の有効利用という観点に立てば、産出される石炭灰の原粉をそのまま利用することが最も望ましい形であり、そのためには何らかの方法で石炭灰の品質を把握し、それに応じて適切に配合を選定する手法を確立することが必要となる。

以上のことから、石炭灰の品質に応じた配合設計手法の検討を行った。

4. 1 最適水粉体比の選定方法の検討

これまでの検討結果から突固めによる土の締固め試験方法で最適含水比を測定すればおおよそ最適水粉体比を予測できることがわかった。しかし、この試験方法はコンクリート材料の分野では一般的な方法でなく、また、最適含水比を得るのに試験回数がかかなり多くなる場合がある

ことから、必ずしも最良の方法とは言えない。そこで、モルタル、コンクリートの分野で汎用的な試験方法、すなわちセメントペーストが流動性を持つ領域の流動性状から最適含水比を予測できないかを検討した。試験には、フロー試験（JIS R 5201-1992）を用いることとした。図-7に

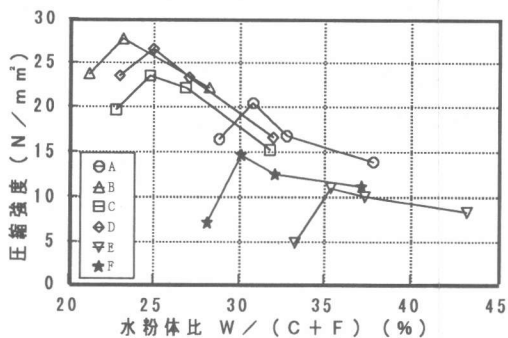


図-5 水粉体比と圧縮強度の関係

表-3 石炭灰の品質

石炭灰	発電所	石炭灰の物性		
		比重	比表面積 (cm²/g)	最適含水比 (%)
A	a	2.21	3,350	27.8
B		2.31	2,430	18.2
C		2.24	2,320	21.8
D		2.23	3,220	22.0
E		2.19	3,450	32.0
F		2.17	3,840	25.1
G	b	2.37	2,960	15.8
H	c	2.33	3,050	17.0
I	d	2.24	3,520	22.8
J	e	2.20	2,940	22.9
K	f	2.21	2,670	26.0
L	g	2.25	3,820	25.9
M	h	2.29	2,410	14.9
N	i	2.20	3,250	28.0
O	j	2.21	3,180	21.8

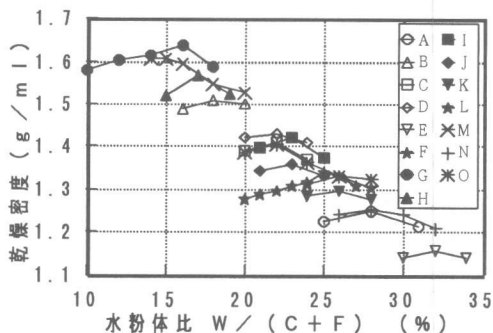


図-6 各種石炭灰の締固め曲線

水粉体比とフロー値の関係を示す。図に示すように石炭灰の種類によって水粉体比とフロー値の関係は異なっているが、その関係はほぼ直線関係にあることがわかった。この結果からあるフロー値となる水粉体比を求め、最適水粉体比との比較を行った。ここで、直線性が得られやすいことからフロー値140となる水粉体比を求めた。図-8および9にフロー値140となる水粉体比と最適含水比および最適水粉体比の関係を示す。図に示すように両者は、極めて良好な相関関係が見られる。したがって、フロー試験により粉体の流動特性を測定すれば、高い精度で最適水粉体比の予測が可能である。

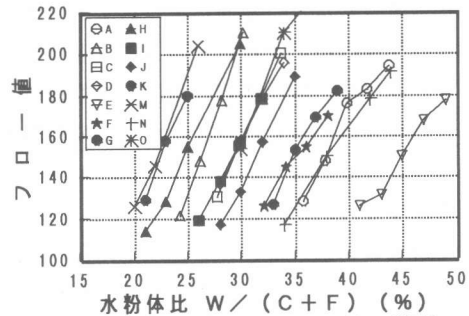


図-7 水粉体比とフロー値の関係

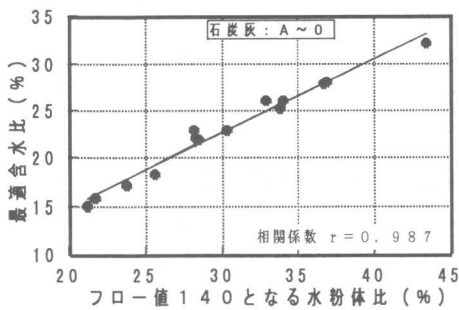


図-8 フロー値140となる水粉体比と最適含水比の関係

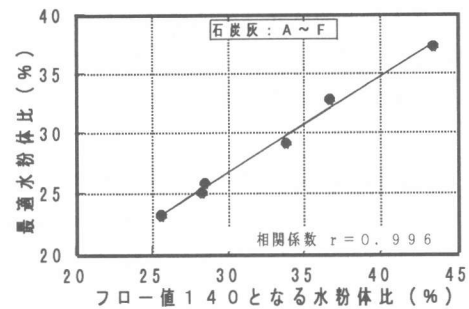


図-8 フロー値140となる水粉体比と最適水粉体比の関係

4. 2 標準的なセメント置換率における圧縮強度の推定

石炭灰の品質によって最適水粉体比が異なるため、要求される強度の硬化体を経済的に製造するためには、石炭灰の応じてセメント添加率を適切に選定することが必要となる。

図-10は、標準的なセメント添加率（15%）における粉体水比と圧縮強度の関係を示す。石炭灰の種類によって若干ばらつきは見られるが、粉体水比と圧縮強度の関係は石炭灰の種類に関わらずほぼ直線関係にあり、実用上は、粉体水比によって圧縮強度の予測が可能であると考えられる。

4. 3 セメント添加率の選定方法の検討

図-11にセメント添加率と圧縮強度の関係を示す。図に示すように、セメント添加率と圧縮強度は、ほぼ直線関係にあり、4. 2で推定した標準セメント添加率における圧縮強度をもとに目標強度が得られるようにセメント添加率を選定することが可能である。

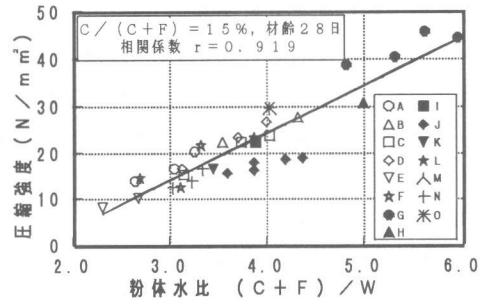


図-10 粉体水比と圧縮強度の関係

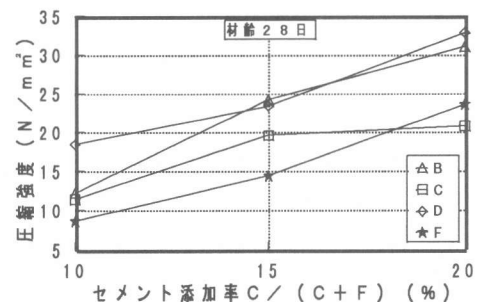


図-11 セメント添加率と圧縮強度の関係

4. 4 配合設計手法の提案

4. 1～4. 3で示した配合選定手順をフローで示すと図-12のようになる。現時点では、十分なデータが得られておらず、精度の高い予測式を得るには至っていない。今後データを収集し、各予測式の精度を高めれば、石炭灰の品質に応じた汎用性の高い配合設計が可能であると考えられる。

5. まとめ

本研究の結果をまとめると以下のようになる。

(1) 石炭灰およびセメントを最適含水比に近い水粉体比で練混ぜると、練上り時は、湿気のある粉の状態であるが、振動を与えると流体状に状態が変化し、締固めが可能となる。

この現象を利用すれば、経済的に品質の均一な硬化体を製造することができる。

(2) 振動により流体化可能な限界の水粉体比と突固め試験で得られる最適含水比は、ほぼ一致する。

(3) 本製造方法において圧縮強度が最大となる最適水粉体比が存在する。

(4) 最適水粉体比は、フロー試験から推定可能であり、また、最適水粉体比から圧縮強度を推定し、セメント添加率を調整すれば、石炭灰の品質に応じた配合設計が可能である。

6. あとがき

湿気のある粉の状態から振動により流体の状態に性状が変化する現象を利用した新しい製造方法を提案した。提案した製造方法によれば単位水量、単位セメント量および水粉体比が低減できるため、経済的に品質の高い石炭灰の硬化体を製造することが可能であり、石炭灰の有効利用方法を拡大する上で有効な製造方法となるものと考えられる。また、本製造方法は、石炭灰に限らず様々な粉体に応用可能であり、今後基礎的な検討および適用範囲の拡大の検討を加え、汎用性のある技術として確立していきたいと考えている。

謝辞

本研究では、水産庁の補助金により福井大学中村充座長のもと（社）マリノフォーラム21が実施している「マウンド漁場造成システムの開発」における石炭灰硬化体製造実験の結果を一部利用させて頂いた。ここに記して、感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 鈴木達雄、門馬尚義、谷口公一：石炭灰混合体の人工魚礁としての適用性、間組研究年報、pp.333-344、1987
- [2] 長滝重義、大賀宏行、谷口公一、染谷健司：フライアッシュを用いた新硬化体の海洋構造物への適用性、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.9、No.1、pp.211-216、1987
- [3] （社）マリノフォーラム21：石炭灰コンクリート設計・製作マニュアル、MF21技術資料、pp.1-28、1989

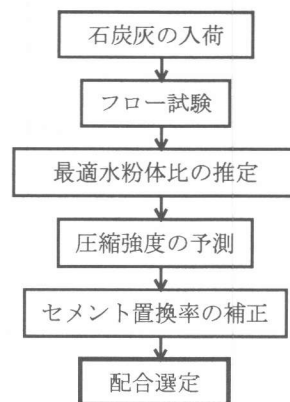


図-12 配合選定フロー