

石炭灰の水中モルタルへの適用について

Application of coal ashes to underwater mortar

北海道電力(株) ○正員 五十嵐 由一 (Yoshiichi Igarashi)
 北海道電力(株) 正員 神藤 謙一 (Kenichi Kandou)
 東洋建設(株) 柳沼 利信 (Toshinobu Yaginuma)

1. はじめに

一般の水中不分離性コンクリート、いわゆる水中コンクリートは水中不分離剤の使用により粘性を高めることで、コンクリートの水中打設を可能としているが、一般に高コストであり、気中打設と比べて強度も低下するといわれている。

石炭火力発電所から副産物として大量に発生するフライアッシュは、シルト分を主とする球形微粒子の粉体であり、砂質土に適量混合して固練りスラリー状とすることで、水中投下可能な材料分離抵抗性を確保でき、これを利用して港湾築堤工事に利用されている。そこで、フライアッシュの有する材料分離抵抗性および流動性に着目し、海中で打設可能なモルタルへの適用を図るべく、配合条件等を室内試験で検討し、海中において実証試験を実施したので、結果を報告する。

2. 試験の概要

室内試験の概要を表-1および以下に示す。

2.1 使用材料

使用材料を表-2、細骨材の粒度分布を図-1に示す。石炭灰は、年間発生量の多い苫東厚真発電所4号フライアッシュと苫東厚真発電所2号クリンカアッシュを使用した。コンクリート用細骨材には、苫小牧市錦岡産陸砂を、混和剤はエルコン(セルロース系)、を使用した。

2.2 練混ぜ方法

室内試験の石炭灰モルタルの練混ぜは、55Lの強制二軸ミキサを使用し、1バッチ40Lで練混ぜた。実証試験の石炭灰モルタルは、市中生コンクリート工場で練混ぜた。練混ぜ水は、海水を模擬し、NaClを水道水に溶解させ海水と同等の濃度(水の質量に対して3.3%)とした。

2.3 水中供試体作製方法

水中供試体は、水中投下法およびトレミー模擬法により作製した。水中投下法による供試体の作製方法は、土木学会コンクリート標準示方書「水中不分離性コンクリートの圧縮強度試験用水中作製供試体の作り方(JSCE-F504)」、懸濁物質量の測定は、土木学会コンクリート標準示方書「コンクリート用水中不分離性混和剤

表-2 使用材料

材 料	種 類	品 質
セメント	高炉セメントB種	密度 3.04g/cm ³ 、比表面積 3,850cm ² /g
	普通ポルトランドセメント	密度 3.16g/cm ³ 、比表面積 3,350cm ² /g
フライアッシュ	苫東厚真発電所4号機産	WA(ワンプ)原粉
クリンカアッシュ	苫東厚真発電所2号機産	CV(コウハレ)
細骨材	苫小牧市錦岡産陸砂	コンクリート用細骨材
混和剤	硬化促進剤	食塩(NaCl)
	水中不分離性コンクリート用混和剤	エルコン:太平洋マテリアル(株)製(セルロース系)
練混ぜ水	上水道水	

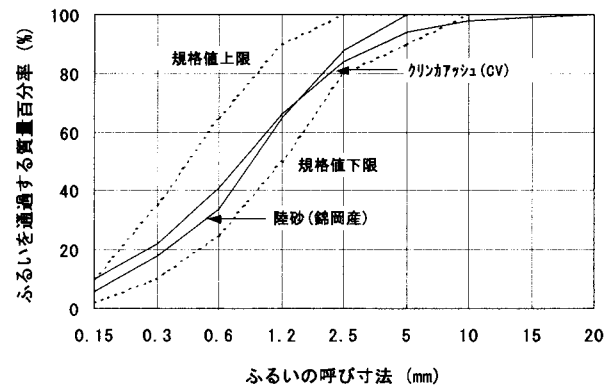


図-1 細骨材の粒度分布

品質規格(JSCE-D104)」にそれぞれ準拠した。水中投下法による供試体の作製方法を、図-2に示す。

トレミー模擬法による供試体の作製方法は、トレミーによる打設を模擬し、内径50mmの塩び管を使用して水中の型枠内に材料を押し出した。なお、懸濁物質量の測定における水量と試験量は水中投下法と同一とした。トレミー模擬法による供試体の作製方法を、図-3に示す。

2.4 水中不分離性確認試験ケース

配合条件と打設方法が水中不分離性に与える影響を把握し、最適条件を決定するため、表-3に示すケースで水中供試体を作製し、懸濁物質量、供試体表面の目視観

表-1 試験概要

試 験	目 的	パラメーター
室内試験	水中不分離性確認試験	細骨材の種類(陸砂、クリンカアッシュ) スランプ、水中不分離剤量 打設方法(水中投下法、トレミー模擬法)
	強度試験	単位セメント量 セメントの種類(BB、OPC) 練混ぜ水の種類(水道水、食塩水)
	環境影響確認試験	有害物質の溶出による環境影響の確認 六価クロム、砒素、セレン、フッ素、ホウ素

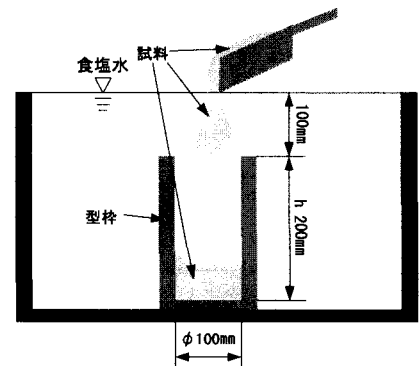


図-2 水中投下法による供試体の作製方法

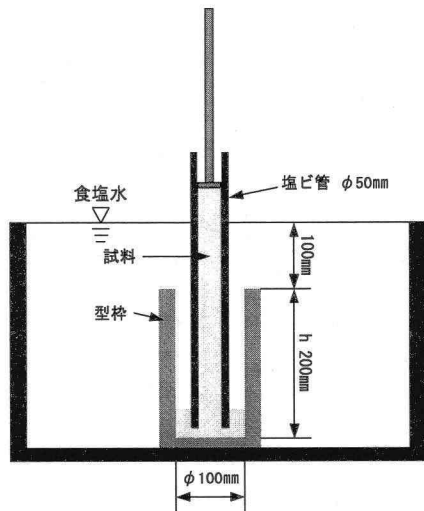


図-3 トレミー模擬法による供試体の作製方法

察および強度試験を行った。比較ケースとしては、水中不分離剤を使用せず、スランプを変化させたケースとスランプフローを一定として水中不分離剤量を変化させたケースを設定し、それぞれ3ケースの細骨材で実施した。

表-3 水中分離度試験ケース

スランプ スランプフロー (cm)	水中 不分離剤 (%)	細骨材		
		なし	陸砂 300L/m ³	クリンガッシュ 300L/m ³
5±1.5	0	○	○	○
8±1.5	0	○	○	○
12±1.5	0	◎	◎	◎
18±1.5	0	○	○	○
40±3	0.4	○	○	○
40±3	0.6	○	○	○
40±3	0.7	○	—	—
40±3	0.8	○	○	○
40±3	1.0	○	○	○
40±3	1.2	○	○	○

※ 供試体作製方法

○～水中投下法

◎～水中投下法およびトレミー模擬法

3. 水中分離度試験結果

3.1 懸濁物質量

スランプと懸濁物質量の関係を図-4、不分離剤添加率と懸濁物質量の関係を図-5に示す。

水中投下法による懸濁物質量は、スランプが小さくなり粘性が増加しても少なくなる傾向は示されず、スランプ5～18cmの範囲では600～800mg/Lの値を示した。しかし、トレミー模擬法では懸濁物質量はほぼ50mg/Lとなり、水中不分離性混和剤を用いた場合は、混和剤添加率1.2%で規格値の50mg/Lを満足した。

3.2 供試体の密実性

試験結果から水中投下法により作製した供試体は、細骨材、水中不分離剤の有無およびフレッシュ性状の違いに関係なく、空隙が生じ密実性に劣るものであった(写真-1)。トレミー模擬法により作製した供試体は、空隙が生じることがなく密実性に優れたものであった(写真-2)。

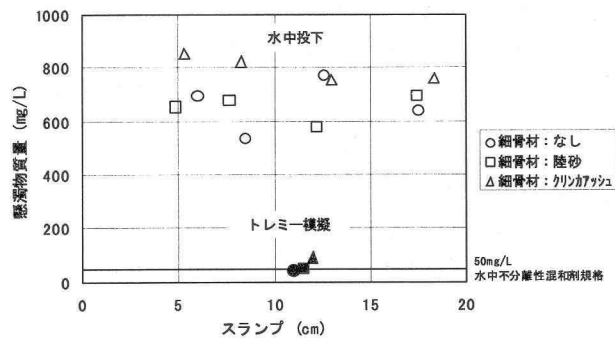


図-4 スランプと懸濁物質量

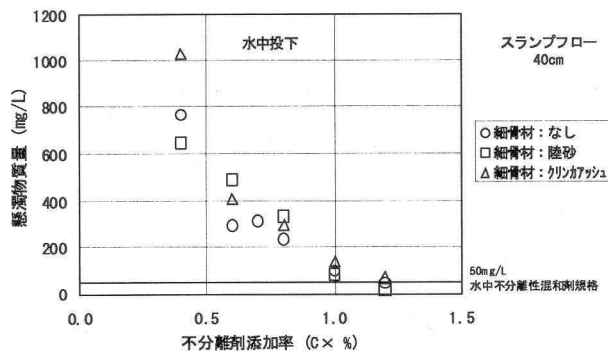


図-5 不分離剤添加率と懸濁物質量

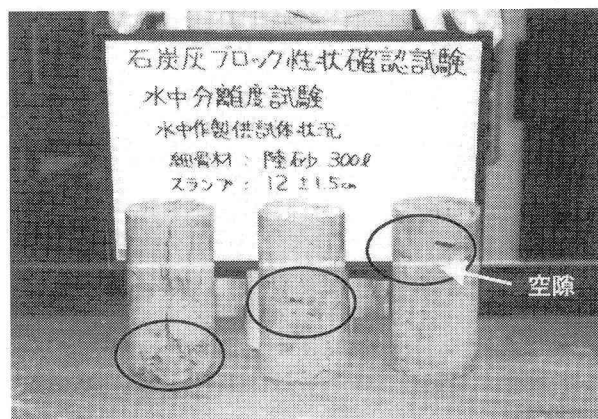


写真-1 水中投下法・細骨材：陸砂

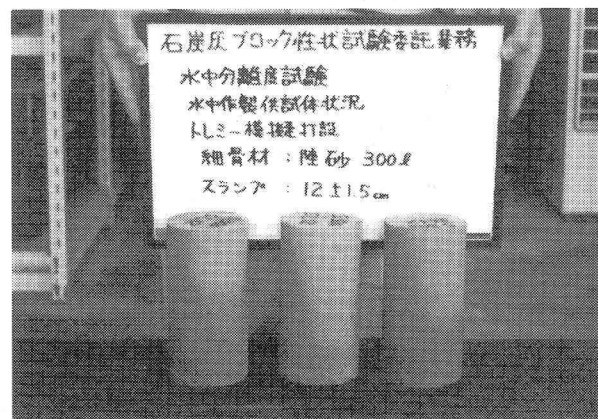


写真-2 トレミー模擬法・細骨材：陸砂

3.3 圧縮強度

圧縮強度試験は、水中作製供試体が密実に作製可能であり、適度な流動性が確保できるスランプ12cmの配合

ケースについて、トレミー模擬法により作製した供試体を用いて実施した。スランブ 12 cm、単位セメント量 250 kg/m³ における水セメント比と圧縮強度の関係を図-6 に示す。

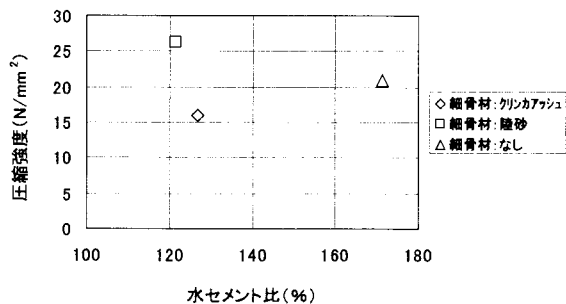


図-6 水セメント比と圧縮強度

水セメント比が小さい陸砂使用ケースの強度が最大となっており、細骨材にクリンカアッシュを使用した場合は、強度発現が小さいことが認められた。これは、クリンカアッシュ自体の強度が陸砂に比べると小さいことに起因すると考えられる。

3.4 最適な条件の選定

試験結果より、細骨材の種類は陸砂を使用した場合が所要強度を得るために必要な単位セメント量が最も少なくなると考えられる。したがって、最適配合はスランブ 12 cm、細骨材に陸砂を使用した配合とした。

4. 強度確認試験結果

水中分離度試験結果より、得られた配合について、単位セメント量を3水準 (200, 250 および 300 kg/m³) として試験を実施した。

4.1 圧縮強度

単位セメント量と材齢 28 日における圧縮強度の関係を図-7 に示す。圧縮強度は単位セメント量と高い相関性が認められた。そこで、設計基準強度 18N/mm² に変動係数 15% を考慮し、得られた配合強度 24N/mm² を満足する単位セメント量を求めた。この結果、設計基準強度 18N/mm² を満足する単位セメント量は、220kg/m³ となった。

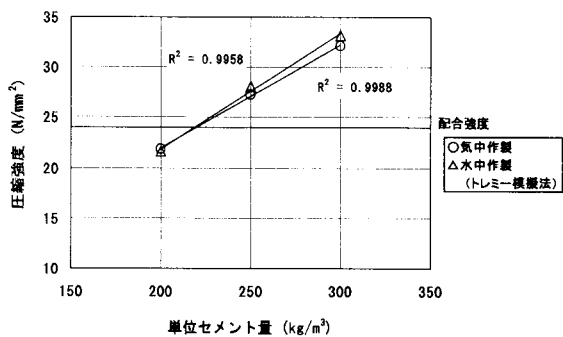


図-7 単位セメント量と圧縮強度

4.2 材料確認試験結果

セメントの種類を高炉セメント B 種 (BB) から普通ポルトランドセメント (OPC) に換えた場合および練混ぜ水に上水道を使用した場合について強度発現の相違を確認するため、単位セメント量 250kg/m³、細骨材に陸砂を使用したスランブ 12 cm の配合で強度を比較した。

また、フライアッシュセメント B 種と同等品を使用した一般的なモルタルとの強度発現の相違を確認した。材料確認試験における圧縮強度試験結果を図-8 に示す。

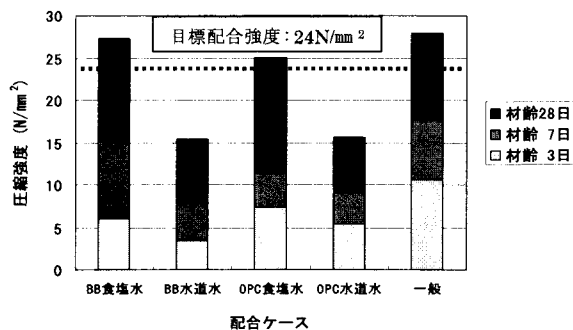


図-8 材料確認試験における圧縮強度試験

圧縮強度は、練混ぜ水に食塩水を使用した場合、上水道を使用した場合より、1.3~1.9 倍高い強度となり、ナトリウムがセメントの水和促進に寄与していることが認められた。

5. 環境影響確認試験結果

石炭灰モルタル (フライアッシュ+陸砂+高炉セメント B 種+食塩水) と一般モルタル (フライアッシュセメント B 種+陸砂+水道水) について実施した溶出試験結果を表-4 に示す。溶出試験は、環境庁告示第 46 号「土壌の汚染に係わる環境基準」で実施し、試験結果は「海洋汚染および海上災害の防止に関する法律施行令第 5 条第 1 項に規定する金属等を含む廃棄物に係る判定基準を定める総理府令」を満足している。

表-4 溶出試験結果

項目	単位	石炭灰モルタル	一般モルタル	基準値
六価クロム	mg/l	不検出	0.013	≤0.5
砒素	〃	不検出	不検出	≤0.1
セレン	〃	0.004	不検出	≤0.1
フッ素	〃	0.44	0.10	≤15
ホウ素	〃	不検出	不検出	≤0.2*1

*1 基準値として規定する値はなく、参考値として「水質汚濁に係る人の健康の保護に関する環境基準の測定方法及び要監視項目の測定方法について」による。

6. 実証試験

6.1 試験の概要

実証試験は、単位セメント量 250 および 300 kg/m³ の 2 ケースとし、フレッシュ性状の比較はプラント製造時と現場到着時 (運搬時間 30 分) に、強度発現と密実性においては現場気中作製供試体とブロックから採取したコア供試体について確認した。ブロックの打設は、苫小牧東港において海中に設置した型枠 (ブロック寸法: 高さ 3.0m × 幅 1.5m × 奥行 1.0m) にプラント製造した石炭灰モルタルを二重管ポンプ圧送方式で打設した。

6.2 使用材料

使用材料を表-5 に示す。

6.3 配合

プラント製造試験は、室内試験から単位セメント量 250 kg/m³、300 kg/m³ の 2 ケースとし、目標スランブ 12 ± 2.5 cm が得られる配合を求めた。配合結果を表-6 に、

表-5 使用材料

材 料	室内試験	プラント製造試験
セメント	高炉セメントB種	普通ポルトランドセメント
フライアッシュ	WA100(ワンボ)	BO(ボンタン)50/WA50
細骨材	錦岡産陸砂	勇払産陸砂
硬化促進剤	食塩(NaCl)	食塩(NaCl)

また、フレッシュ性状を表-7に示す。プラント配合の単位水量は、室内配合に比べて2ケースともに25 kg/m³少なくなった。よって水粉体比が5%程度小さくなり、水セメント比は単位セメント量250 kg/m³で10%、300 kg/m³で8.3%低下した。単位水量が少なくなったのは、使用材料およびミキサー容量の違いなどが原因と考えられる。また、プラント製造からブロック打設現場まで運搬時間が約30分であったが、スランプ低下などの経時変化は認められなかった。

表-6 配合

条件	単位セメント量 (kg/m ³)	水セメント比 W/C (%)	水粉体比 W/(C+F)	単 位 量(kg/m ³)					食塩 Cl (W×3.3%)
				水 W	セメント C	フライアッシュ F	陸砂 S		
室内	250	126.0	38.4	315	250	570	795	10.4	
	300	105.0	37.7	315	300	535	795	10.4	
プラント	250	116.0	33.1	290	250	626	807	9.6	
	300	96.7	32.6	290	300	590	807	9.6	

表-7 フレッシュ性状

条件	単位セメント量 (kg/m ³)	練り上がりフレッシュ性状			現場フレッシュ性状		
		スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)
室内	250	12.5	4.1	21.7	—	—	—
	300	12.5	3.9	21.9	—	—	—
プラント	250	13.0	2.3	23.0	14.5	1.8	23.0
	300	12.0	2.3	24.0	12.0	2.4	24.0

6.4 プラント製造で打設した石炭灰ブロック

プラント製造で打設した石炭灰ブロックからコア採取し、圧縮強度試験を実施した。コアの採取は材齢21日目に海中から引揚げて実施し、採取したコアは海中養生とした。材齢28日の圧縮強度は石炭灰ブロックの上部、中間部および下部の3ヶ所から採取したコアの平均値とした。脱型後の状態を写真-3に、強度試験結果を図-9に示す。

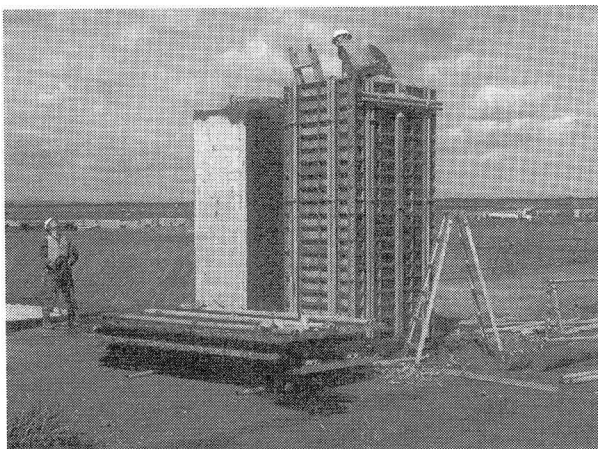


写真-3 脱型状況

脱型後の外観は非常に平滑であり、エア等による凹凸の発生はなく良好であった。ブロックの天端部分の均しは行なわなかったが、打設終了後の形状のまま固化しており、水中での材料の分離は殆ど見られなかった。強度試験で採取したコア供試体の上部と下部における圧縮

強度差は、1 N/mm²程度と小さく、打設方法も良好であることが確認できた。また、室内試験で実施したトレミー摸擬法の強度試験結果より、プラント製造の圧縮強度が大きくなる傾向となった。これは、プラント配合の単位水量が少なくなり、水粉体比が小さくなったためと考えられる。

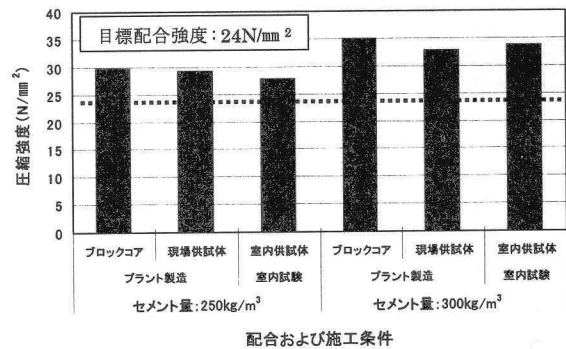


図-9 強度試験結果

7. まとめ

本検討で得られた知見を以下に列挙する。

7.1 室内試験

- ①フライアッシュを使用することで、材料分離抵抗性および流動性が向上し、トレミー摸擬法で水中供試体作製することで、水中不分離剤を使用せずに作製することが確認できた。
- ②細骨材は、圧縮強度で所定の24 N/mm²が得られる陸砂を使用する必要がある。
- ③溶出試験結果から、環境上の問題がないことが確認できた。

7.2 実証試験

- ①トレミーを用いた水中コンクリートのコア供試体の圧縮強度は、同じ配合の気中施工時の圧縮強度と比較し強度低下が懸念されたことから、室内試験の水中作製(トレミー摸擬法)とプラント製造で海中打設したブロックから採取したコア供試体で確認した結果、圧縮強度の低下は見られないことが確認できた。
- ②現場における二重管ポンプ圧送方式での実証打設でも密実で均一なブロックが打設でき、室内試験のトレミー摸擬法供試体と同様の結果を得ることができた。

8. あとがき

今回、石炭灰を大量に使用した水中モルタルへの適用を目的として、水中での強度低下を考慮した配合設定を必要としない石炭灰モルタルの配合と施工方法を室内および実証試験から確認することができた。

石炭灰モルタルは、高い流動性が期待でき、密実に水中打設できることから、複雑な形状の構造物および狭隘箇所においても打設が可能と考えられる。

今後は、石炭灰ブロックの長期強度の確認と、経済的な施工方法について検討する予定である。

最後に、研究を進めるにあたり、ご協力をいただいた北海道開発局室蘭開発建設部苫小牧港湾建設事務所および関係者各位に感謝の意を表します。