

論文 石炭灰を主原料としたモルタルの諸特性と漁場造成用ブロックへの適用性

井筒 庸雄^{*1}・鍵本 広之^{*1}・高原 裕一^{*2}・宋 勇一^{*3}

要旨：石炭灰を主原料とし、セメントと少量の細骨材を混和したモルタルの諸特性について一般コンクリートと比較した。引張強度は圧縮強度の 1/10 程度であり一般的なコンクリートと変わらない。静弾性係数との間にも直線関係が認められるが、コンクリート標準示方書で示されている値と比較してかなり小さい値となる。材料分離抵抗性はモルタルの粘性のため一般コンクリートと比較して高く過剰締固め等に対する問題はない。本モルタルを 1 辺 2.0m の立方体ブロック材料とした場合、有害な温度応力ひび割れは単位セメント量を 220 kg/m³ に抑えることで抑制することができることをブロック試作試験と温度応力解析によって確認した。

キーワード：石炭灰、原粉、ペースト、モルタル、基礎物性、温度応力ひび割れ

1. はじめに

コンクリートは骨材をセメントで結合した複合材料であり、施工性、耐久性の許す範囲内で結合材を極力少なくすることが一般的である。一方で、産業副産物の有効利用の観点では、石炭灰を多量に利用した素材の開発が進められ、結合材を増加するアプローチが行なわれている。石炭灰を多量に使用したセメント系素材としては、硬化促進剤を用いたフライアッシュ硬化体^{例え¹}や、超流体締固め技術を応用した石炭灰固化地盤²⁾、また石炭灰を利用した気泡混合軽量土³⁾があるものの、適用例は多くない。なかでも一般コンクリート材料の代替材としての利用例は少なく、いくつかその素材物性を扱った研究⁴⁾があるもののその数は多くない。

そこで本研究では、石炭灰を主原料とし、セメントと少量の細骨材を混和したフライアッシュペースト、モルタル（以下、「フライアッシュモルタル」）の諸特性について一般コンクリートと比較した。また、フライアッシュモルタルを漁場造成用ブロック（以下、「ブロック」）の材料として使用する場合、多量のペーストに伴う発熱により温度ひび割れの発生が懸念される。そこで上記で明らかにした諸特性を用いて、有害な温度ひび割れを発生させない条件の評価を行なった。

2. 実験概要

2.1 フライアッシュモルタルの基礎物性評価

2.1.1 使用材料

実験には、普通ポルトランドセメント（密度 3.15g/cm³）、石炭灰（密度 2.28g/cm³）、細骨材として海砂（密度 2.75g/cm³、FM2.60）、海水（密度 1.03g/cm³）、必要に応じて高性能減水剤を使用した。また、石炭灰の品質を表

－1に示すが、ここで使用したのは表中の Fa 1 である。

2.1.2 基礎物性の確認試験

圧縮強度、引張強度、静弾性係数の標準的な力学的特性、乾燥収縮特性、自己収縮特性に加え、発熱特性および材料分離抵抗性を一般コンクリートの物性と比較評価した。圧縮強度試験、引張強度試験、静弾性係数試験、乾燥収縮試験は関連する JIS 基準に従い、自己収縮試験は JCI 基準に従い実施した。断熱温度上昇試験については JCI-SQA3 コンクリートの断熱温度上昇試験(案) に準じて試験を実施した。

また材料分離抵抗性試験は以下の手順によった。十分練混ぜた細骨材入りフライアッシュモルタルを用いて φ50×100mm の供試体を作製。その後過剰締固めを模擬するため供試体を振動台（480rpm, 振幅 6mm）に固定し 30 分間継続して振動締固めを加えた後、28 日間 20℃水中養生を実施し材料分離評価用試料を作製した。その後試料の上下端部を 5mm カットし 20mm 四方の薄片を作製し、偏光顕微鏡下で測定幅 0.4mm（計測数 2,000 点）のポイントカウンティング計測を実施した。

計測要素はフライアッシュ、ポルトランドセメントおよびその水和物、気泡、細骨材とした。また、「JSCE-60-1982 フライアッシュの含有率の推定⁵⁾」に準

表－1 使用した石炭灰の品質

品質	JIS A 6201 規定値 (Ⅱ種)	Fa 1	Fa 2	Fa 3	Fa 4	Fa 5
SiO ₂ %	45.0以上	51.4	54.2	51.9	50.2	59.8
湿分 %	1.0以下	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0
強熱減量 %	5.0以下	1.6	2.2	3.1	9.7	2.2
密度 g/cm ³	1.95以上	2.28	2.28	2.39	2.28	2.34
45 μm 残分 %	40以下	5	4	15	26	5
比表面積 cm ² /g	2500以上	3880	3970	3440	4540	4230
フロー値比 %	95以上	108	109	107	99	106
活性度 指数 %	28日 80以上	82	81	78	80	84
	91日 90以上	99	99	93	94	97
MB吸着量 mg/g	—	0.47	0.45	0.48	0.81	0.51

*1 電源開発(株) 火力発電部(正会員)

*2 水産庁 漁港漁場整備部整備課 課長補佐（前職）

*3 水産庁 漁港漁場整備部整備課 課長補佐

じてフライアッシュ含有量分析を実施した。試験に用いたフライアッシュモルタル配合は表-2に示すとおりである。

2.2 ブロックへの適用性評価試験

2.2.1 使用材料

使用材料は普通ポルトランドセメント（密度 3.15g/cm^3 ）、海砂（密度 2.75g/cm^3 , FM2.60）、石炭灰は原粉（表-1のうちF a 2～5）、練混ぜ水は海水（密度 1.03g/cm^3 ）を、また適宜高性能減水剤を使用した。

2.2.2 配合選定条件とその確認試験

ブロックに求められる品質は、設計基準強度 15N/mm^2 、汎用機械（棒状バイブレータ）で締固めることのできる有スランブ配合、密度 1.7g/cm^3 程度である。目標スランブ値は 5cm とし、フライアッシュの品質変動によるスランブ値の調整は、単位水量の増減および高性能減水剤により行った。これを汎用機械（二軸強制練りミキサ）を用いて合理的・安定的に製造する条件を見出すために、練混ぜ時間をパラメータとして、スランブ値、フロー値の変化を見て練混ぜ時間を決定する練混ぜ効率試験を行った。主材料の石炭灰は原粉であり品質変動が大きいいためこれを用いたフライアッシュモルタルの強度管理をどのように行うかが問題である。ここでは複数の石炭灰を用いて行った圧縮強度試験結果により強度管理手法について検討した。なおスランブ試験は通常コンクリートで行う試験であるが、管理の簡便性からフライアッシュモルタルに対しても適用することとした。

2.2.3 配合とブロック形状、寸法、実験ケース

ブロックとして最適な形状、寸法とされる1辺 2.0m の立方体ブロック（写真-1）で、中空方向を縦、横の2方向、中空寸法については $\phi 600\text{mm}$ 、 $\phi 900\text{mm}$ 、 $\phi 1,000\text{mm}$ に変化させた。また配合条件としては単位セメント量を 140kg/m^3 から 240kg/m^3 まで変化させた6配合を上記条件と適宜組み合わせることで温度ひび割れの発生状況について評価した。試験ケースを表-3に示す。

3. 結果と考察

3.1 フライアッシュモルタルの基礎物性

3.1.1 圧縮強度、引張強度、静弾性係数

100ℓ二軸強制練りミキサにて、練上がり温度 20°C 条件でフライアッシュモルタルを練混ぜ $\phi 100 \times 200\text{mm}$ 供試体を作製した。材齢1日で脱枠した後、養生温度を 5°C 、 20°C の2温度条件で水中養生し所定材齢で圧縮強度、引張強度、静弾性係数を求めた。図-1は各材齢に対する圧縮強度、引張強度の変化を、図-2は圧縮強度と引張強度の関係、圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。フライアッシュモルタルの圧縮、引張強度は、通常のコンクリートと同様に養生温度により大きく異なり、 5°C 養生

表-2 フライアッシュモルタルの室内試験配合

	W/C (%)	W/(C+F) (%)	単位量 (kg/m^3)			
			C	F	W	S
①	188.2	30.2	197	1,029	371	197
②	151.0	26.9	240	1,104	362	100

配合②は材料分離抵抗性試験に用いた配合

材料密度は、C : $3.15(\text{g/cm}^3)$, F : $2.28(\text{g/cm}^3)$, W : $1.03(\text{g/cm}^3)$, S : $2.75(\text{g/cm}^3)$



写真-1 試験ブロック形状 ($2.0 \times 2.0 \times 2.0\text{m}$)

中空形状は円形 (縦穴と横穴：穴直径を変化)

表-3 試験ケース

	試験ケース	主な評価目的
単位セメント量 (kg/m^3)	140, 160, 180, 200, 220, 240	発熱量
穴の方向	縦, 横	放熱程度, 幾何形状
中空寸法 (mm)	$\phi 600, 900, 1,000$	放熱程度, 断面寸法

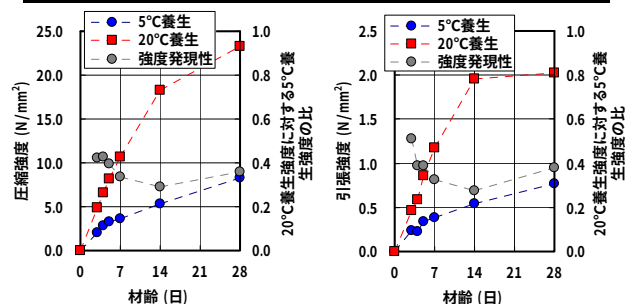


図-1 圧縮強度、引張強度試験結果

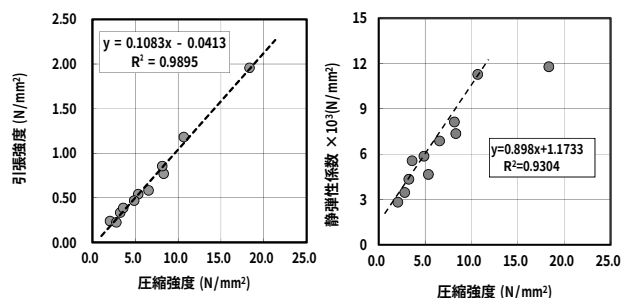


図-2 圧縮強度と引張強度、静弾性係数の関係

では、標準環境の 20°C 養生に比べて $50 \sim 30\%$ の強度発現性であった。また、圧縮強度と引張強度の間には直線関係が認められ、引張強度は圧縮強度の $1/10$ 程度であり一般的なコンクリートの $1/10 \sim 1/13$ と変わらない。

静弾性係数についても、圧縮強度が 10N/mm^2 程度までの範囲では、圧縮強度と静弾性係数の間には直線関係が認められるが、フライアッシュモルタルは骨材を用いていないため土木学会コンクリート標準示方書で示されている値と比較してかなり小さくなっている。圧縮強度が 20N/mm^2 程度のケースで静弾性係数が上記傾向からずれるが、静弾性係数は粉体の物理的な充填程度に大きく影響を受けるため、ポズラン反応が進行し圧縮強度が増加しても静弾性係数はさほど増加しないとする既往

の研究結果⁴⁾とも一致する。

3.1.2 乾燥収縮特性

圧縮強度試験と同配合のフライアッシュモルタルを用いて乾燥収縮試験を実施した結果を図-3に示すが、20℃、60%R.H.条件下での乾燥収縮量は材齢 280 日で 2,840 μ であり、結合材容積 100 l/m^3 、単位水量 100kg/ m^3 、空気量 4.0%の条件のコンクリートの乾燥収縮量 500～600 μ ⁶⁾と比較して大きくなる。これは粗骨材がなく細骨材も殆ど含有していないフライアッシュモルタルの特性ともいえる。温度 5℃、50%R.H.環境下での結果も併記したが、20℃、60%R.H.環境下と比較して約 1.3 倍の乾燥収縮が生じることがわかる。

3.1.3 自己収縮特性

圧縮強度試験と同配合のフライアッシュモルタルを用いて自己収縮試験を実施した結果を図-3に併記する。今回実験に用いた石炭灰では、自己収縮量は 350 μ 程度と乾燥収縮量の 1/12 程度であり依然収縮が継続している。しかしながら石炭灰の種類によっては収縮量が大きく変化したり膨張を生じるものも存在することが報告⁴⁾されていることから、石炭灰の種類によっては注意が必要である。

3.1.4 断熱温度上昇特性

練上がり温度 20℃の条件で断熱温度上昇試験を実施した(図-4)。フライアッシュモルタルの断熱温度上昇は、計測開始から急激な温度上昇を示し、24 時間後には 35.1℃、24～48 時間の間に 9.0℃、48～72 時間の間に 2.2℃上昇し、時間の経過とともに上昇量は急激に低下した。フライアッシュモルタルは製造後 2 日までの温度上昇量が大きく、14 日後の最終上昇温度は 49℃であった。

3.1.5 分離抵抗性

作製した供試体の各要素の定量結果を表-4に示す。供試体上下面において各構成要素の含有率の差は最大 3.0%であり、過剰締固めに対して細骨材やフライアッシュの材料分離に対する抵抗性を有していることがわかる。また、供試体の上下部においてフライアッシュの含有率の差は 2%程度であり、材料分離は殆どないと評価できる。この結果から、過剰締固めによる材料分離の危険性は殆どないものと考えられる。

3.2 ブロックへの適用性評価試験

3.2.1 汎用機械で合理的に練混ぜられる配合の決定

汎用的な練混ぜ機械である二軸強制練りミキサで、セメント、フライアッシュのみのペーストを混ぜることはできても、均一に練り混ぜるためには相当な時間が必要である。これを解決するために、密度条件を満足する範囲内で最小限の細骨材を添加し練混ぜ効率の向上を図ることとした。2.0 m^3 二軸強制練りミキサを用いて細骨材量を変化させた練混ぜ試験で性状を評価した後、最終

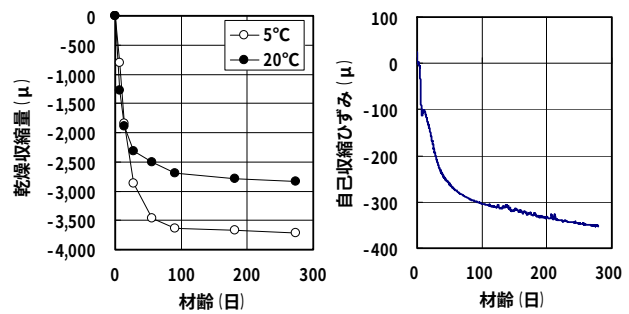


図-3 乾燥収縮試験、自己収縮試験結果

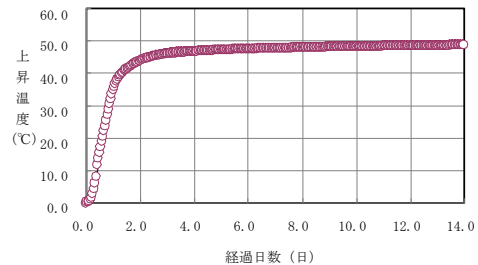


図-4 断熱温度上昇試験結果

表-4 材料分離抵抗性の評価結果

部位	フライアッシュ	ポルトランドセメント および水和物	気泡	細骨材
上端	612 (30.6%)	1,142 (57.1%)	142 (7.1%)	104 (5.2%)
下端	580 (29.0%)	1,202 (60.1%)	126 (6.3%)	92 (4.6%)

※表中の数字は計測されたポイント数、括弧内の数字はその割合を示す。

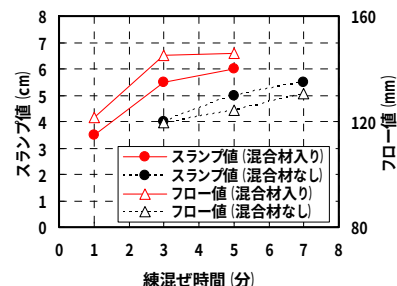


図-5 練混ぜ効率試験結果

表-5 練混ぜ効率確認試験用配合

W/C (%)	W/(C+F) (%)	単位量 (kg/ m^3)			
		C	F	W	S
195	30.2	180	1,016	362	200

材料密度は、C : 3.15 (g/ cm^3)、F : 2.28 (g/ cm^3)、W : 1.03 (g/ cm^3)、S : 2.75 (g/ cm^3)

的に細骨材を 1 m^3 当り 200kg 混合した配合と、細骨材なしの配合の練混ぜ効率確認試験を実施した結果を図-5に示す。練混ぜ時間を 1, 3, 5, 7 分と変化させ練混ぜたフライアッシュモルタルのスランプ値、フロー値を計測した結果、細骨材入り配合では練混ぜ時間 3 分で安定したスランプ値、フロー値が得られたが、細骨材なし配合では練混ぜ時間 7 分でも依然として安定していないことがわかる。以上の結果から、製造効率向上の観点から細骨材を 1 m^3 当り 200kg 混合すればよいことがわかった。なお、練混ぜ効率確認試験に使用した細骨材入り配合は表-5に示すとおりである。

3.2.2 所要強度を満足する配合の決定方法

石炭灰原粉を用いる場合、その品質変動によって圧縮強度、スランプ値の変動が予想される。試験で使用した5種類のフライアッシュを用いて2.0m³二軸強制練りミキサーで製造したフライアッシュモルタルの圧縮強度試験結果を図-6に示すが、供試体の材齢28日における圧縮強度はセメント水比と一定の相関関係があり、石炭灰原粉を用いた場合でも概ね水セメント比で配合設計しても問題ないと考えられる。フライアッシュも強度増進機能を有するが、脱枠や転置に配慮した配合設計を考慮すると、配合設計上フライアッシュの効果を加味しない指標W/Cで整理するのがよいと考えられる。

フライアッシュモルタルは粗骨材を使用しないため、練混ぜ直後の性状はスランプ値に加えフロー値も目安指標とすることができる。圧縮強度試験試料作製と同時に計測したフロー値とスランプ値の計測結果を併記するが、これらの間にも相関関係が認められる。

3.2.3 ブロックに発生する温度応力ひび割れ評価

(1) ひび割れに対する考え方

鉄筋コンクリートの曲げ引張側には設計上ある程度のひび割れが許容されているが、内部に配置された鉄筋の腐食防止（抑制）のため、ひび割れ幅の許容値が設定されている。今回対象としている構造物は通常の鉄筋コンクリートと異なる無筋ブロックであり、使用条件としては海底下に沈設される。しかしここでは鉄筋コンクリートの基準を参考に許容ひび割れ幅の考え方を整理し、本ブロックに適用する許容ひび割れ幅を0.3mmに設定しひび割れに対する評価を行なうこととした。

(2) 試作ブロックに生じた温度応力ひび割れ状況

温度応力によるひび割れ評価を行うに当たりセメント量を変化させた12種類の配合でブロックを試作し温度応力ひび割れ発生状況の評価した。配合設計条件は前記の方針のとおりであるが、温度応力ひび割れ発生の主要因である単位セメント量に着目し、これをパラメータとした試験配合を表-6のように選定した。なお使用した石炭灰はそれぞれ異なるため表-6に併記した。

12個のブロックのうち一例として、単位セメント量200kg/m³で縦穴φ900mmのひび割れ発生状況を示す。

練混ぜたフライアッシュモルタルのスランプ試験、フローの状況を写真-2に、脱枠後に内空部に発生した2本のひび割れの幅の変化を図-7に示す。打設3日後に脱枠したが、脱枠直後に縦穴の上部最小壁厚部2箇所ひび割れが確認され、翌日には底部まで成長した。以降は4週間追跡調査したがひび割れは変化なく、ひび割れ幅は0.05mmと先に設定した許容範囲内であることが確認できた。また上記と同様に12個全ての試験ブロックに生じた温度応力ひび割れを評価した結果を表-8に示

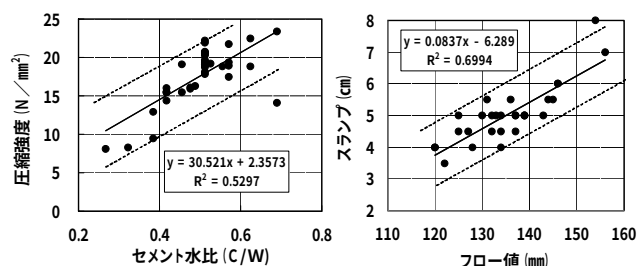


図-6 セメント水比と圧縮強度、フロー値とスランプ値の関係

表-6 試作ブロック配合

BL. No	W/C (%)	W/(C+F) (%)	単位量 (kg/m ³)					備考
			C	F	W	S	Ad	
1	195	30.2	180	1,016	362	200	C×0%	Fa 1
2								
3								
4								
5								
6	25.2	25.4	160	1,116	321	200	C×1%	Fa 2
7								
8								
9								
10								
11	145	29.4	240	981	358	200	C×1%	Fa 3
12	175	29.9	200	1,005	361			



写真-2 スランプ試験、フロー試験状況

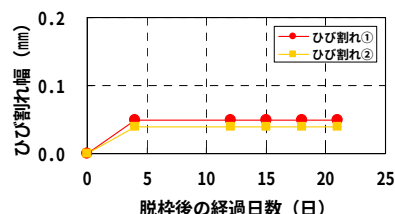


図-7 ブロックに発生したひび割れ推移

表-8 試作ブロックでのひび割れ発生状況と評価

BL. No	単位セメント量 (W/C)	中空寸法	脱枠時期	結果	ひび割れ発生状況
1	180kg/m ³ (195%)	横 φ900	打設 2日	×	脱枠後に中空部上部に発生し翌日には底部に達した。その後側面に達し脱枠後4日で天端上面にも発生 (幅0.45mm)。
2		横 φ1000		×	打設直後に中空部の頂部に発生。自重による応力と温度応力と重なることが原因と想定 (幅0.50mm)。
3		横 φ900		×	脱枠後1日で発生。No.1、2と同様中空部から発生したが3日目からの成長は殆どない。
4	160kg/m ³ (195%)	横 φ900	打設 3日	×	脱枠後1日で発生。No.1～No.3のブロックに発生したひび割れと同様と評価。
5		縦 φ900		○	脱枠後2日目に縦穴の最小壁厚部に発生し5日目には反対側にも発生。脱枠8日目以降は成長はみられない (幅0.30mm)。
6		縦 φ600		○	脱枠後5日目に縦穴の最小壁厚部に発生。ひび割れ幅は0.15mm。
7	180kg/m ³ (175%)	縦 φ900	打設 3日	○	脱枠後3日目に縦穴の最小壁厚部に発生。6日目には長さ180cmまで成長するが7日目以降変化なし (幅0.30mm)。
8	140kg/m ³ (260%)	縦 φ600		◎	ひび割れは発生しなかった。
9	220kg/m ³ (160%)	縦 φ900		○	中空部に発生しないが外面に発生。幅は0.15mm。
10	240kg/m ³ (145%)	縦 φ900		×	脱枠と同時に発生し2日目には縦穴最小壁厚部2箇所まで長さ200cmに成長。脱枠後9日目では幅は0.35mm。
11	240kg/m ³ (145%)	縦 φ600		◎	ひび割れは発生しなかった。
12	200kg/m ³ (175%)	縦 φ900		○	脱枠当日に発生したが以降は変化なし。幅は0.05mm。

すが、中空穴の方向は横方向穴の場合には自重の影響もあり頂部天端に容易にひび割れが発生しやすいと考えられたことから縦方向穴がひび割れ抵抗性があること、有害な温度ひび割れを防止するためには、単位セメント量は 220 kg/m^3 以下とする必要があることがわかった。

(3) 温度応力解析によるひび割れ評価

セメント量 200 kg/m^3 で縦穴 $\phi 900 \text{ mm}$ のケースと類似した、**図-8**に示すモデルを用いて3次元温度応力解析を実施した。解析に用いるフライアッシュモルタルの圧縮強度、引張強度および静弾性係数は、JCI マスコンクリートのひび割れ制御指針に提示される各評価式を用い、式中の係数は試験値をもとに設定した。圧縮強度については、養生温度 5°C 、 20°C で実施した試験結果(**図-1**)を有効材齢で整理したとき、それぞれ材齢7日までの圧縮強度はほぼ有効材齢に対して比例関係(式(1))にあることから、これを直線で近似し有効材齢 t_e における圧縮強度式(2)を解析に使用した。

$$f'_c(t_n) = 1.518 \times t_n \quad (1)$$

$$f'_c(t_e) = t_e / 7 \times 10.626 \quad (2)$$

引張強度、静弾性係数についても同様に以下の式に適用し、式中の係数は実験結果をもとに式(3)、(4)のように設定した。

$$f_t(t_e) = C_1 \times f'_c(t_e)^{C_2}$$

ここに、 $f_t(t_e)$: 有効材齢 t_e における引張強度

$f'_c(t_e)$: 有効材齢 t_e における圧縮強度

C_1, C_2 : 係数

$$E_{tc}(t_e) = C_3 \times f'_c(t_e)^{C_4}$$

ここに、 $E_{tc}(t_e)$: 有効材齢 t_e における静弾性係数

$f'_c(t_e)$: 有効材齢 t_e における圧縮強度

C_3, C_4 : 係数

$$f_t(t_e) = 0.1 \times f'_c(t_e)^{1.01} \quad (3)$$

$$E_{tc}(t_e) = 1,685 \times f'_c(t_e)^{0.78} \quad (4)$$

また、フライアッシュモルタルの熱伝導は 1.5 W/mK 、密度 1.81 t/m^3 、比熱 $1.67 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$ 、地盤についてはそれぞれ 3.0 W/mK 、 $2,600 \text{ t/m}^3$ 、 $0.8 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$ とした。その他、コンクリートおよび地盤の露出面熱伝導率 λ は $14.0 \text{ W/m}^2^\circ\text{C}$ 、鋼製型枠熱伝導率 λ は $14.0 \text{ W/m}^2^\circ\text{C}$ を用いた。

また、フライアッシュモルタルの断熱温度上昇特性は**図-4**を使用し、夏におけるブロック製作を想定し、打設温度 36°C 、地盤温度 31°C の条件で解析を実施した。

温度解析により得られたブロック外表面、中空部表面・内部の温度変化を**図-9(a)**に示す。温度履歴よりブロックの温度は打設後24時間で最高温度に達し、その後は下降に転じて6日から7日で外気温とほぼ一致する。またブロックの温度分布はブロック中央が最も高く、放熱量の多いブロック角は低くなる。**図-9(b)**に実際のブロックの温度履歴を併記するが、実測結果において

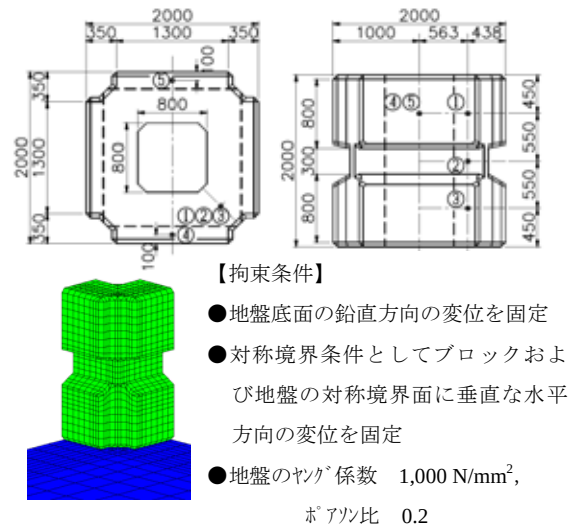


図-8 ブロックの温度応力解析モデル

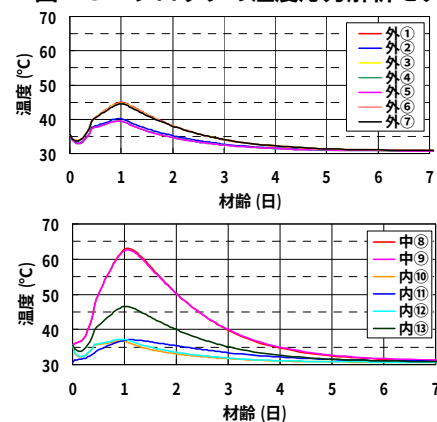


図-9(a) ブロック内温度の時間に伴う変化(解析)

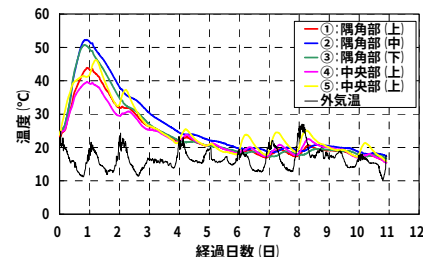


図-9(b) ブロック内温度の時間に伴う変化(実測)

も、解析と同様打設後24時間で最高温度に達し約7日後には外気温と同じとなる(凡例番号は**図-8**に対応)。

次にブロックの内部温度が最大値に達する24時間後の温度分布を**図-10**に、ひび割れ指数の時間に伴う変化を**図-11**に示す。ひび割れ指数はブロック全体としてブロック体内温度がピークとなる1日前後で最小となり、加えてブロック中空部表面および内部では温度の低下量が多い2~3日に再度急激に低下しその後徐々に回復する。また、温度ひび割れの発生の可能性はひび割れ指数が1を下回る部分であり、打設後1日前後でブロックのくびれ部外表面付近、ブロック中空部上端のハンチ部隅部および中央部くびれ部内側となる。また打設後2日以降はひび割れ指数は2を下回ることはなく、解析上ではひび割れ発生の可能性は低いとの結果となった。

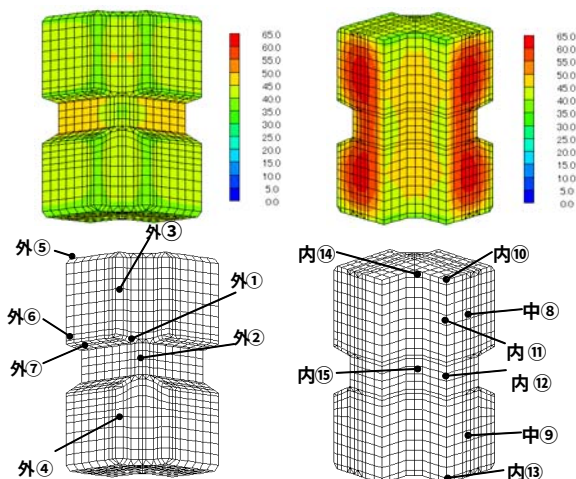


図-10 ブロックの温度分布図

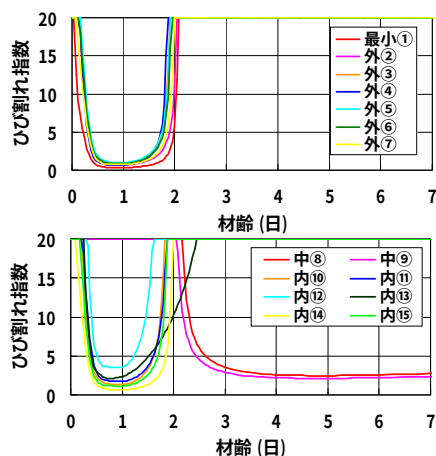


図-11 ひび割れ指数の時間に伴う変化

試作ブロック（「3.2.3(2)」）におけるひび割れ発生状況によれば、温度応力ひび割れは脱枠直後に内空部上部付近に発生し、セメント量が多い場合はその後底部から外部に進展している。またひび割れの進展は打設後 4、5 日（脱枠後 1、2 日）で収束するものが多いが、7、8 日まで成長するケースもあった。時間に伴うブロック温度変化は解析結果と実測結果を比較してほぼ同様の傾向を示しており、これから誘引される温度応力によるひび割れ発生の可能性は、ひび割れ指数が示すように脱枠前の時期（打設後 1～2 日）であると考えられる。

したがって上記のひび割れ発生時期の差異は、脱枠までの間の型枠によるブロックの拘束の影響、脱枠後の乾燥収縮の影響、解析は外気温一定条件で実施しているが実環境は昼夜など温度変化があることなどの影響があるものと考えられる。

4. 結論

本研究結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 圧縮強度と引張強度の間には直線関係が認められ、引張強度は圧縮強度の 1/10 程度であり一般的なコンクリートと変わらない。また、静弾性係数につい

ても、圧縮強度と静弾性係数の間には直線関係が認められるが、土木学会コンクリート標準示方書で示されている値と比較してかなり小さい値となる。

- (2) 温度 20℃、60% R.H. 条件下での乾燥収縮量は材齢 182 日で 2,840 μ であり、一般的なコンクリートの乾燥収縮量 500～600 μ と比較して大きい。これは粗骨材がなく細骨材も殆ど含有していないフライアッシュモルタルの特性ともいえる。また温度 5℃、50% R.H. 環境下では 20℃、60% R.H. 環境下と比較して約 1.3 倍の乾燥収縮が生じる。自己収縮については約 350 μ 程度と乾燥収縮量の 1/10 程度であった。
- (3) フライアッシュモルタルの断熱温度上昇は、製造後 2 日までの温度上昇量が大きく、14 日後の最終上昇温度は 49℃であった。
- (4) 細骨材を 200kg/m³ 混合することで練混ぜ効率を向上させることができる。また過剰締固めを模擬し振動台で 30 分の締固めを実施した結果、フライアッシュモルタルの各構成材料の分離は殆どない。
- (5) ブロック中央部に設ける中空穴は縦方向の方がひび割れ抵抗性があり、有害な温度ひび割れを防止するためのセメント量の上限は、今回の検討においては 220 kg/m³ となった。
- (6) 温度応力解析の結果、温度ひび割れの発生の可能性は、打設後 1 日前後でブロック外面のくびれ部付近、ブロック中空部上端のハンチ部隅部となる。また打設後 4 日前後にブロック中心部でひび割れ指数が 1 に近くなる部分が存在するとの結果となった。

参考文献

- 1) 長瀧重義, 大賀宏行, 谷口公一: 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講演会論文集, Vol.9, No.1, pp.211-216, 1987.
- 2) 斉藤栄一, 福留和人, 岡部俊男: 超流体工法による石炭灰固化地盤構築技術の開発, 土木学会第 59 回年次学術講演会, pp585-586, 2004. 9
- 3) 石井光裕, 岩原廣彦, 加地貴: 石炭灰を利用した気泡混合軽量土の開発, 火力原子力発電, pp411-415, Vol. 55, No. 4, Apr. 2004
- 4) 福留和人: フライアッシュ硬化体の製造方法に関する研究, 新潟大学博士論文, 2003.3
- 5) 土木学会: 混和材として用いたフライアッシュの置換率試験方法 (案), コンクリート標準示方書・規準編, 2010
- 6) 鍵本広之, 川崎昌三, 斎藤文彦: 橋湾火力発電所新設工事で採用したフライアッシュ C 種セメントを用いたコンクリートの耐久性, 電力土木, 電力土木技術協会, No.274, pp.33-37, 1998.