

論文 高ビーライトセメントを用いたRCDコンクリートの諸性状

長曾我部徹*1, 寺野宜成*2, 小田部裕一*3, 柳田力*4

要旨: 本研究は、高ビーライトセメントを用いたRCD用コンクリートのフレッシュ性状および力学的性状を実験的に求め、温度ひび割れ制御効果を中庸熱フライアッシュセメントと比較したものである。圧縮強度は積算温度の一次式として表すことができ、引張強度、ヤング係数は通常のコンクリートと同様に圧縮強度のべき乗関数として表示できる。終局断熱温度上昇量は、中庸熱フライアッシュセメントに比べやや小さく、しかも温度依存性が小さかった。また、温度ひび割れ制御効果は同程度以上であった。

キーワード: 高ビーライトセメント, RCD用コンクリート, 化合物組成, 圧縮強度, 断熱温度上昇

1. はじめに

中庸熱フライアッシュセメントは、ダム用低発熱セメントとして、現在RCD工法において広く使用されている。一方、近年セメントの更なる低発熱化開発志向の高まりから、各種低発熱形セメントの開発が行われている。ポルトランド系の高ビーライトセメントもこうした背景により開発されているものの一つであり、ダム用低発熱セメントの選択肢が広がることが期待できる。したがって、このようなセメントの化合物組成がコンクリートの性状に及ぼす影響を把握しておくことは、安定したコンクリートを製造する上で重要である。しかし、高ビーライトセメントを使用した場合に、その化合物組成がRCD用コンクリートに及ぼす影響を養生温度に関して系統立てて検討した事例は少ない[1]。

本研究は、高ビーライトセメントの化合物組成がRCD用コンクリートの諸性状に及ぼす影響を養生温度に関して系統立てて、中庸熱フライアッシュセメントを比較対象として検討した。

2. 実験の概要

2.1 実験項目

高ビーライトセメント(LPCと称する)について、その化合物組成がRCD用コンクリートのフレッシュ性状や強度性状に及ぼす影響を養生温度を変化させて検討した。練上がり・養生温度は、10℃、20℃および30℃に変化させた。また、比較対象として中庸熱フライアッシュセメント(MF30と称する)を用いた。

強度試験用供試体は、建設省土木研究所で考案された標準供試体作製装置により作製し、一層あたりの締め固め時間は既往の研究[2]を参考に40秒と定めた。

断熱温度上昇試験は、供試体中心部で測定したコンクリート温度を追従する熱媒ジャケットを、供試体に密着させることで断熱状態を再現した試験装置を用い、直径、高さともに60cmの供試体

*1 住友大阪セメント(株)セメントコンクリート研究所 (正会員)

*2 住友大阪セメント(株)セメントコンクリート研究所 (正会員)

*3 住友大阪セメント(株)セメントコンクリート研究所

*4 (財)土木研究センター (正会員)

について測定を行った。測定期間は断熱温度上昇量がほぼ収束する4週間を基本としたが、打込み温度10℃については5週間とした。

2.2 使用材料

実験ではピーライト(C₂S)量が58%であるセメント(LPC2と称する)を中心として、C₂S量が51%と少ない(LPC1と称する)ものと、62%とやや多い(LPC3と称する)ものという化合物組成の異なる3種類のセメントを使用した。なお、この組成の範囲は実際の製造におけるばらつきをかなり超える範囲で設定した。また、比較対象としたMF30はC種に相当し、フライアッシュの混

合率は30%である。これらセメントの物理的性状および化合物組成は表-1の通りである。

使用した骨材は粗・細骨材とも花崗岩質の砕砂、碎石である。

また混和剤には、オキシカルボン酸塩系の遅延型のAE減水剤、および多価アルコール系のAE助剤を使用した。

2.3 配合

配合はLPC2またはMF30を用いたコンクリートにおいて、練上がり温度が20℃の場合に練上がり時のVC値が20秒、空気量が1.5%となるように試し練りを行って定めた。なお、化合物組成が変化したLPC1及びLPC3については、LPC2と同一水量とし、練上がり温度が変化した場合も20℃の場合と同一配合とした。表-2に示方配合を示す。

3. 実験結果

3.1 フレッシュコンクリートの性状

図-1は、VC試験の結果をまとめて示したものである。化合物組成が異なる3種類のLPCおよびMF30間にはVC値に明確な差は認められず、練上がり温度によってもこうした傾向は変わらない。図-2はブリーディング試験の結果を示したものであるが、ブリーディング率については、総じて練上がり温度が低いほどブリーディング率が大きくなる傾向にある。また、セメントの種類については明確な傾向は認められない。

3.2 硬化コンクリートの性状

図-3は、圧縮強度試験の結果を養生温度ごとに示したものである。養生温度が10℃の場合、C₂S量が少ない程材齢91日における圧縮強度が大きくなる傾向にあるが、20℃お

表-1 セメントの物理的性状および化合物組成

| セメントの種類 | 物理試験 | | | | | | | | | | | 化合物組成 (%) | | | |
|---------|------|---------------------------|----------|------|---------------------------|------|------|------|-----------|-----|-----|------------------|------------------|------------------|-------------------|
| | 比重 | 比表面積 (cm ² /g) | 凝結 (h-m) | | 圧縮強さ (N/mm ²) | | | | 水和熱 (J/g) | | | C ₃ S | C ₂ S | C ₃ A | C ₄ AF |
| | | | 始発 | 終結 | 3日 | 7日 | 28日 | 91日 | 7日 | 28日 | 91日 | | | | |
| LPC1 | 3.23 | 3170 | 2-45 | 4-20 | 6.18 | 10.5 | 27.9 | 49.3 | 219 | 277 | 319 | 29 | 51 | 2 | 11 |
| LPC2 | 3.23 | 3220 | 2-58 | 4-50 | 5.00 | 9.61 | 26.6 | 49.6 | 188 | 247 | 304 | 22 | 58 | 2 | 10 |
| LPC3 | 3.23 | 3190 | 2-43 | 4-53 | 4.31 | 6.37 | 22.6 | 50.2 | 176 | 231 | 283 | 18 | 62 | 2 | 10 |
| MF30 | 2.89 | 3260 | 4-35 | 6-10 | 6.57 | 9.41 | 23.6 | 43.2 | 213 | 256 | 293 | - | - | - | - |

表-2 コンクリートの配合

| セメントの種類 | 水セメント比 (%) | 細骨材率 (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | | | |
|---------|------------|----------|--------------------------|-----|-----|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | | W | C | S | G ₁ | G ₂ | G ₃ | G ₄ |
| LPC | 76.7 | 30 | 92 | 120 | 680 | 237 | 474 | 395 | 474 |
| MF30 | 76.7 | 30 | 92 | 120 | 677 | 236 | 472 | 393 | 472 |

G₁: 150~80mm, G₂: 80~40mm, G₃: 40~20mm, G₄: 20~05mm

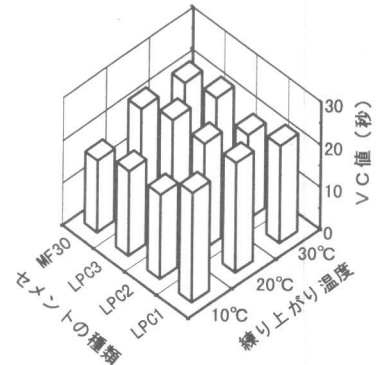


図-1 VC試験結果

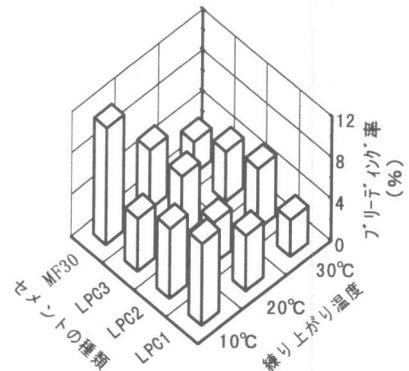


図-2 ブリーディング試験結果

よび 30℃ の場合、材齢 91 日では逆に C_2S 量が多い程圧縮強度は大きくなる傾向が認められた。そして 20℃ および 30℃ の場合、セメントの種類が圧縮強度に及ぼす影響は 10℃ の場合程顕著には認められない。

ここで、セメントの種類や練上がり・養生温度が圧縮強度に及ぼす影響を調べるために、分散分析を行った。この結果、練上がり温度は各材齢において圧縮強度に影響を与えると判定された。一方、セメントの種類は、材齢 91 日の場合に圧縮強度に有意な差を及ぼすことが分かった。そこで、圧縮強度に影響を及ぼすと判定された要因について回帰分析を行い、更に詳しく養生温度と圧縮強度との関係を調べた。

表-3 は、養生温度が有意と判定された材齢 3, 7, 28 日それぞれの圧縮強度を、養生温度の一次式で示したものである。材齢やセメントの種類により相関係数に幅は認められるものの、概ね養生温度と圧縮強度の間には強い相関性が認められた。また、近似式の傾き（表-3 中の係数 B）は材齢を経るごとに大きくなっている。したがって、養生温度の違いが圧縮強度へ及ぼす影響は、材齢 28 日までは材齢を経るごとに大きくなっているといえる。

一方、材齢 91 日の結果については、セメントの種類と養生温度を要因として重回帰分析を行い、更に標準化を行った結果、

$$(\text{圧縮強度}) = 0.547 \times (C_2S) + 0.382 \times (\text{温度})$$

となった。標準回帰係数は C_2S に係る方が 0.547 と大きいことから、材齢 91 日の圧縮強度は C_2S 量つまり化合物組成の影響の方が大きいことが分かる。

このように、RCD 用コンクリートの圧縮強度発現性に及ぼす養生温度の影響は全材齢に渡っている。そこで、圧縮強度の発現性状を積算温度を用いて表す場合について検討した。図-4 は LPC2 と MF30 を用いた場合の、積算温度と圧縮強度の関係を示したものである。これより、LPC2 はある積算温度を境として折れ曲るようなプロット形状を示していることが確認された。こうした傾向は、化合物組成の異なる他の LPC についても見られた。そこで、本実験では LPC を用いた RCD 用コンクリートの圧縮強度発現性を、積算温度 140 (℃・日) を境に 2 つの区間に分け、それぞれ積算温度の常用対数の一次式で近似し表した。一方、従来のダム用セメントとして用いられてきた MF30 は、LPC の場合ほど明確な区分は見られないことから、1 つの式で表すこととした。

また、LPC2 の積算温度 140 (℃・日) 以上の区間における近似式の傾きが、MF30 に比べ大きく

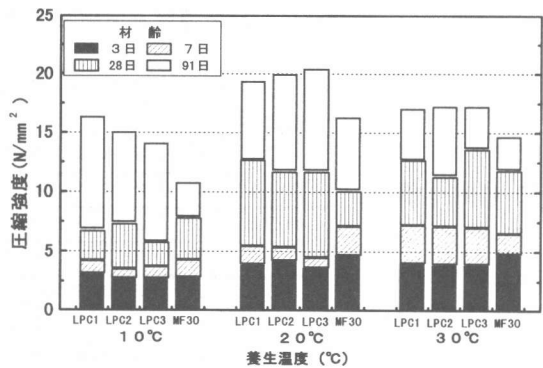


図-3 圧縮試験結果

表-3 養生温度と圧縮強度の関係

| 材齢 | 材齢 3 日 | | | 材齢 7 日 | | | 材齢 28 日 | | |
|------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|---------|-------|-------|
| | A | B | r | A | B | r | A | B | r |
| LPC1 | 2.813 | 0.044 | 0.913 | 2.617 | 0.152 | 0.996 | 4.793 | 0.296 | 0.866 |
| LPC2 | 2.018 | 0.077 | 0.875 | 2.246 | 0.160 | 0.990 | 4.418 | 0.269 | 0.904 |
| LPC3 | 2.263 | 0.059 | 0.960 | 1.770 | 0.167 | 0.956 | 2.553 | 0.391 | 0.959 |
| MF30 | 2.150 | 0.099 | 0.888 | 3.753 | 0.113 | 0.751 | 5.967 | 0.198 | 0.997 |

f'c: 圧縮強度 (N/mm²), T: 養生温度 (°C), r: 相関係数

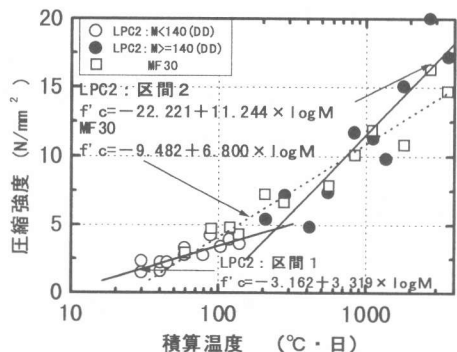


図-4 積算温度と圧縮強度の関係

なっている。これは、LPCの長期材齢にかけての強度発現が、従来のMF30に比べ優れていることを示唆するものである。表-4には近似式の各係数を示した。

表-4 積算温度と圧縮強度の関係

| セメントの種類 | 区間* | f'c = A + B log M | | |
|---------|-----|-------------------|-------|-------|
| | | A | B | r |
| LPC1 | I | -4.54 | 4.170 | 0.960 |
| | II | -20.7 | 11.08 | 0.949 |
| LPC2 | I | -3.16 | 3.319 | 0.911 |
| | II | -22.2 | 11.24 | 0.913 |
| LPC3 | I | -2.28 | 2.906 | 0.902 |
| | II | -23.2 | 11.79 | 0.935 |
| MF30 | - | -9.48 | 6.800 | 0.964 |

* 区間 I : 積算温度 140 (°C・日) 以下
 区間 II : 積算温度 140 (°C・日) より大
 f'c : 圧縮強度 (N/mm²)
 M : 積算温度 (°C・日)

一方、表-5に示すようにRCD用コンクリートの場合にも、引張強度やヤング係数は圧縮強度のべき関数として表せる。

表-5 圧縮強度とヤング係数、引張強度の関係

| | f t = A × f'c(t) ^B | | E = A × f'c(t) ^B | |
|------|-------------------------------|-------|-----------------------------|-------|
| | A | B | A | B |
| LPC1 | 0.084 | 1.162 | 2.308 | 0.817 |
| LPC2 | 0.136 | 0.958 | 2.514 | 0.765 |
| LPC3 | 0.076 | 1.202 | 2.353 | 0.803 |
| MF30 | 0.103 | 1.081 | 2.864 | 0.752 |

f'c : 圧縮強度, f t : 引張強度 (N/mm²)
 E : ヤング係数 (KN/mm²)

3.3 断熱温度上昇試験結果

断熱温度上昇試験では測定期間を4週間としたが、4週を経過してもコンクリートの温度は僅かずつではあるが上昇を続けており終局値に収束しない。そこで、終局断熱温度上昇量（以下“終局値”）の推定には既往の方法 [3] を使用した。また、断熱温度上昇の近似式には次の2式を用いた。

$$Q(t) = Q_{\infty}(1 - e^{-\gamma t}) \quad \dots \text{式(1)}$$

$$Q(t) = Q_{\infty}(1 - e^{-\alpha t^{\beta}}) \quad \dots \text{式(2)}$$

ここに Q(t) : 断熱温度上昇量 (°C), Q_∞ : 終局断熱温度上昇量 (°C), t : 材齢 (日)

断熱温度上昇の近似結果は表-6に示すとおりであり、近似の一例としてLPC2を20°Cで打設した場合の結果を実測値と共に図-5に示した。これより、式(2)の近似精度の方が式(1)に比べより高いことが分かる。また、終局値を推定値と比較すると、20°Cの場合LPC2はMF30に比べ3.6°C低かった。

一方、C₂S量と終局値の関係は図-6に示

表-6 断熱温度上昇の近似式の係数

| 打込温度 | セメント種類 | 実測値 (°C) | 式(1) | | 式(2) | | | |
|------|--------|----------|----------------|-------|----------------|-------|-------|-------|
| | | | Q _∞ | γ | Q _∞ | α | β | |
| 10°C | LPC1 | 16.2 | 17.1 | 0.133 | 17.1 | 0.359 | 0.564 | |
| | LPC2 | 15.5 | 18.0 | 0.066 | 18.0 | 0.244 | 0.553 | |
| | MF30 | 16.0 | 21.8 | 0.053 | 21.8 | 0.262 | 0.458 | |
| 20°C | LPC1 | 17.5 | 19.2 | 0.140 | 19.2 | 0.402 | 0.522 | |
| | LPC2 | 16.6 | 17.2 | 0.138 | 17.2 | 0.323 | 0.625 | |
| | LPC3 | 15.4 | 17.1 | 0.113 | 17.1 | 0.302 | 0.588 | |
| 30°C | MF30 | 18.3 | 20.8 | 0.110 | 20.8 | 0.338 | 0.532 | |
| | LPC2 | 15.1 | 15.5 | 0.183 | 15.5 | 0.432 | 0.598 | |
| | LPC3 | 14.5 | 15.0 | 0.177 | 15.0 | 0.404 | 0.593 | |
| | | MF30 | 15.8 | 15.9 | 0.308 | 15.9 | 0.522 | 0.638 |

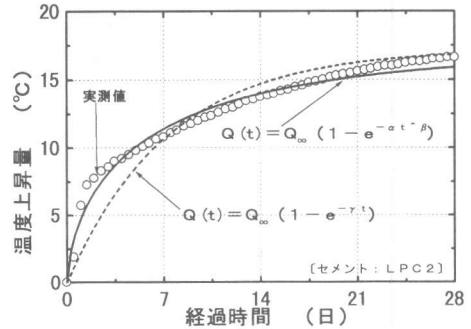


図-5 断熱温度上昇の近似

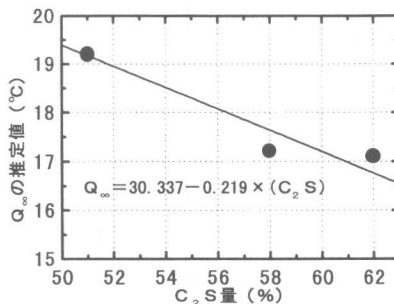


図6 C₂S量とQ_∞の関係

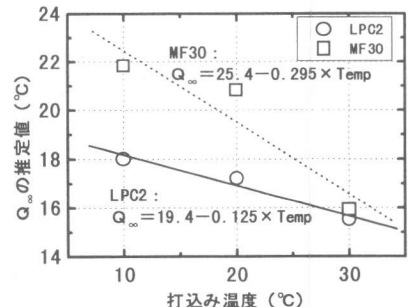


図-7 打込み温度とQ_∞の関係

すように、 C_2S 量が多くなるほど終局値が低くなる傾向が認められた。本実験の結果では、 C_2S 量 1%の増加に対し終局値が 0.2℃下がる結果となった。

図-7は LPC2 と MF30 の打込み温度と終局値を比較したものである。これより終局値については、いずれのセメントを用いても打込み温度が高くなるほど終局値は小さくなるが、LPC2 のほうが傾きが MF30 よりも小さい。すなわち、LPC の方が終局値に及ぼす打込み温度の影響は小さいといえる。

3.4 温度応力解析結果

使用したモデルは、図-8のように岩盤上に 0.75m リフト、打設間隔を 7日として層状打設される、RCD用コンクリートダムの岩着部上 5リフト分（高さ 3.75m）とし、2次元 FEM解析により温度応力解析を行った。なお、5リフト打設後 7日以降上面を断熱温度境界とすることで、擬似的に上方にコンクリートが打設される状況を再現し、温度応力解析ではこの面は自由端として扱った。このように本モデルは、5リフトより上部に打設されるコンクリートの影響を無視していたり、岩盤上に

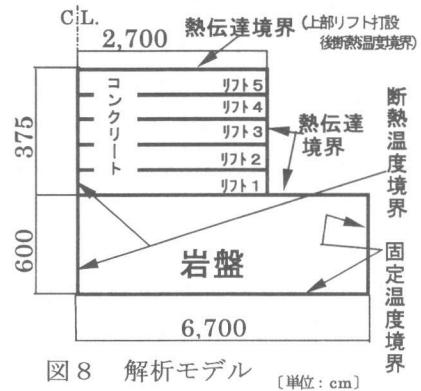


図8 解析モデル [単位: cm]

直接 RCD用コンクリートを打設する場合を想定しているなど、必ずしも厳密なモデルではない。しかしながら、セメントの種類や外気温が温度ひび割れ指数に及ぼす影響を求めるための数値実験の1つとして、本モデルによる解析を行った。解析ケースは表-7に示す 10 ケースで、打込み温度は外気温と同じとした。入力値のうち、圧縮強度については表-4の値を、引張強度およびヤング係数は表-5に示す値をそれぞれ使用した。断熱温度上昇式には、より近似精度の高い式(2)を用いた。その他の値については表-7に示すものを使用した。解析時間は5リフト打設後1年までとし、この間外気温は一定とした。なお、温度ひび割れ指数はモデルの中央部において、解析期間を通じて温度ひび割れ指数が最小となったときの値で評価し比較した。ここで、外気温が 10℃の場合、温度ひび割れ指数の最小値は1リフト若しくは2リフト目の打継ぎ時に現れたのに対し、外気温が 20, 30℃の場合は解析終了時点であった。

表-7 解析ケース及び解析条件

| | 外気温 (°C) | | | 密度 (kg/m³) | | コンクリート | 岩盤 |
|------|----------|----|----|------------|-------------|---------------|------|
| | 10 | 20 | 30 | | | | |
| LPC1 | ○ | ○ | ○ | 2472 | 熱伝導率 (W/mK) | 2.56 | 2.26 |
| LPC2 | ○ | ○ | ○ | | 比熱 (KJ/kgK) | 0.92 | 1.05 |
| LPC3 | ○ | ○ | ○ | | | | |
| MF30 | ○ | ○ | ○ | | 2462 | 熱伝達率 (W/m²°C) | 11.6 |

図-9は解析結果をまとめて示したものである。リフト高さが 0.75m の面状工法による打設を想定して解析を行っているため、いずれの解析ケースについても温度ひび割れ指数は大きく、ひび割れ発生の危険は少ないと考えられる。なお本モデル解析は、温度ひび割れ指数の値そのものより、解析条件を変えた影響が解析結果にどのように反映されるかを確認するために行っている。そこで、こうした観点から考察を行う。LPC2, MF30 いずれのセメントを用いても、外気温が高くなるにしたがって温度ひび割れ指数が小さくなる傾向が認められる。外気温が 20℃の場合、LPC2 は MF30 より 0.2 指数が大きく若干の温度ひび割れ制御効果

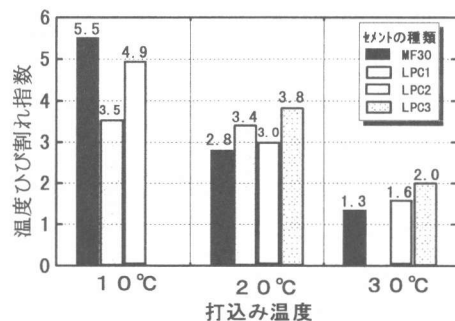


図-9 温度ひび割れ指数の比較

の向上が確認された。なお、同様に外気温 30℃においても LPC2 の優位性は確認されたが、外気温 10℃では MF30 に比べ温度ひび割れ指数が 0.6 小さくなった。これは、LPC2 の低温時における強度発現性の低さに起因しているものと考えられる。

次に、LPC の化合物組成の影響について検討してみた。外気温が 20℃の場合、 C_2S 量が 51~62% 変化したとき、温度ひび割れ指数は 3.0~3.8 の範囲内にあったが、化合物組成との間に一定の傾向は見出せなかった。また、外気温 30℃という高温においては、 C_2S 量が多いほど温度ひび割れ制御上有効ではないかとの予測のもとに LPC3 の解析を実施した。この結果 LPC2 を使用する場合より更に 0.4 温度ひび割れ指数が高くなった。しかし、逆に温度が低く (10℃) なった場合 C_2S 量の少ない LPC1 を用いた解析では、LPC2 を使用する場合に比べ温度ひび割れ指数は高くならなかった。これは、初期材齢における強度発現が遅い LPC を、更に低温環境下で使用したことが大きく影響していると考えられる。この場合、LPC1 は LPC2 よりも強度発現性は良いが、温度ひび割れ制御効果を改善できなかったのは、断熱温度上昇との兼ね合いによるものと推察される。しかし、本実験の範囲内ではこれを確認するまでには至らなかった。いずれにしても、LPC を低温下で使用する場合、本来有している温度ひび割れ制御効果の優位性が相殺される可能性があると考えられる。

4. まとめ

本研究より得られた知見は以下の通りである。

- ① 化合物組成の異なる 3 種類の高ピーライトセメントおよび中庸熱フライアッシュセメントの間には、RCD 用コンクリートの VC 値に明確な差異は認められない。またこうした傾向は、練上がり温度が変化しても変わらない。
- ② 高ピーライトセメントを用いた RCD 用コンクリートの材齢 91 日圧縮強度は、ピーライト量と養生温度の影響を受けるが、ピーライト量の及ぼす影響がより大きい。また、引張強度およびヤング係数は、従来のコンクリートと同様に圧縮強度のべき乗関数として表せる。
- ③ 終局断熱温度上昇量 Q_{∞} は、高ピーライトセメントの方が中庸熱フライアッシュセメントに比べやや少なく、打込み温度を変えた場合の Q_{∞} の変化量も少ない。
- ④ 岩着部をモデル化した数値実験では、高ピーライトセメントの温度ひび割れ制御効果は、低温時を除き中庸熱フライアッシュセメントのそれと同等以上である。

〔謝辞〕

本実験の実施にあたり、建設省土木研究所の永山功氏、河野広隆氏、渡辺和夫氏、国土開発技術研究センターの梶原日出隆氏、白土稔氏、名城大学の鈴木德行教授ほか関係各位のご協力およびご助力を得ました。ここに深謝いたします。

〔参考文献〕

- [1] 柳川 城二 ほか：ダム用低発熱セメントの開発（その 1），ダム技術 No. 116，pp. 11-19，1996. 5
- [2] 永山 功 ほか：標準供試体作製装置を用いた RCD 用コンクリートの配合設計についての検討，土木技術資料 36-10，pp. 22-27，1994. 10
- [3] 柳田 力：マスコンクリートにおける上昇温度の実質的推定方法，土木技術資料 11-4，pp. 3-9，1969. 4