

ダムコンクリートへの水和発熱モデル の適用に関する研究

舎川 徹¹・関根裕治²・鶴田 滋³・野口博章⁴・真保 崇⁵

¹正会員 東京電力(株)工務部(〒100-0011 東京都千代田区内幸町一丁目1-3)

²正会員 工修 東京電力(株)工務部(〒100-0011 東京都千代田区内幸町一丁目1-3)

³正会員 工修 東京電力(株)建設部(〒100-0011 東京都千代田区内幸町一丁目1-3)

⁴正会員 工修 東電設計(株)第一土木本部(〒110-0015 東京都台東区東上野三丁目3-3)

⁵正会員 工修 東電設計(株)第一土木本部(〒110-0015 東京都台東区東上野三丁目3-3)

従来から提案されている断熱温度上昇式でダムコンクリートの発熱特性を同定し、コンクリートダムの温度上昇量を推定した場合、実際より小さく見積もる傾向にあることが認められている。本研究では、コンクリートダムの温度解析の精度向上を目的に、ダムコンクリートの発熱特性の設定に水和発熱モデルを適用することで、ダムコンクリートの長期に亘る水和発熱過程を同定する手法を検討した。同定したダムコンクリートの発熱特性の検証は、コンクリートダムの温度計測結果とダムコンクリートの総発熱量を仮定した温度解析結果を比較することで行った。

Key Words : dam concrete, mass concrete, RCD, hydration heat model, adiabatic temperature rise

1. まえがき

重力式コンクリートダムの建設工法の一つであるRCD工法は、全面レヤー打設と機械化施工により施工の効率性を向上させた施工法である。1999年現在、国内では36件の採用実績¹⁾があり、重力式コンクリートダムの近年の代表的な建設工法である。

RCD工法では、コンクリートの敷均しおよび締固めに汎用建設機械を使用し、特にコンクリートの締固めには、リフト表面から振動ローラを用いて行うために、振動ローラの走行性を考慮して、ゼロスランプの超硬練りの貧配合コンクリート(以下、RCD用コンクリートと呼ぶ)を用いることを特徴としている。

また、RCD工法によって施工されるダム(以下、RCDダムと呼ぶ)では、温度規制方法においても柱状工法に代表される在来工法と大きな相違点を有

する。すなわち、コンクリート敷均し時のブルドーザおよび締固め時の振動ローラの効率的な走行を確保するために、縦継目は設けず、また横継目も型枠を使用せずにコンクリート敷均し後目地板を挿入する合理化が図られている。これにより、全面レヤー打設方式が採られ、温度規制の方法は基本的にはブレーキングによって行われる^{2), 3), 4)}。

温度ひび割れの発生は、構造物の安全性・止水性・耐久性を損なう要因であり、とりわけ安全上重要構造物であるダムにおいては、その制御方法がダムの設計・施工計画を左右する重要課題である。

ブレーキングを主体とする温度規制方法を採用した場合、打込み後のコンクリートの冷却は実質的には不可能である。したがって、事前に実施する熱伝導解析の予測精度は高い水準にあることが要求される。コンクリートダムの熱伝導解析は、一般には通常のコンクリートを対象とした場合と大きな差はな

いものの、断面が巨大であり熱の放散に時間を要することから、長期間に亘って、温度変化を的確に把握する必要があることを特徴としている。たとえば、岩盤あるいは外気に接する部分を除いたダム内部が最高温度に達するには3~4ヶ月以上を要することも稀でない。

したがって、熱伝導解析の精度向上のためには、コンクリートの熱物性値を室内試験などを通じて的確に定めることが重要であるが、なかでもコンクリートの発熱特性（本論文では、総発熱量と発熱速度を指す）の長期材齢における信頼性が最も重要となる。

また、ダムコンクリートは、用途別に外部、内部、着岩および構造物周り毎に配合を区分するのが一般的である。内部コンクリートだけでも所要強度別に配合を変化させる場合もあり、ダムコンクリートの熱伝導解析に当たっては、各配合毎に断熱温度上昇試験を実施し、且つ発熱特性に打込み温度依存性を確認する必要があることから、試験数は自ずと多くなる。

したがって、コンクリートダムの熱伝導解析に当たっては、配合および打込み温度の相違を考慮し、且つ長期に亘っての断熱温度上昇式の信頼性が重要となる。

しかし、従来から用いられている断熱温度上昇式によってダムコンクリートの発熱特性を同定し、コンクリートダムの温度上昇量を推定した場合、ダムコンクリートの長期に亘る水和発熱過程を十分に表現できず、実際より小さく見積もる傾向となることが認められている⁵⁾。

我々は、その原因の多くは、通常のコンクリートと比較して貧配合であるダムコンクリートの緩やかな発熱特性の長期間に亘っての同定を断熱温度上昇試験だけに依存しているためと考えている。すなわち、例えば内部コンクリートに相当する単位結合材量130kg/m³の材齢28日における1日当たりの断熱温度上昇量は0.1℃程度であり、これ以降の長期に亘っての温度上昇量の測定には、現行の断熱温度上昇試験装置では精度の面で無理があると考えている。

本研究では、この解決策として、発熱が時間だけに依存する従来の解析手法に変えて、時間と温度に依存する水和発熱モデルを用いることによって、短期間の断熱温度上昇試験結果からでも、ダムコンクリートの発熱収束過程と総発熱量を適切に設定することにより、解析の精度向上が図れることを示す。

この提案方法の妥当性は、コンクリートダムの施工中からの温度履歴の実測結果との整合性を確認す

ることで検証した。

2. ダムコンクリートに断熱温度上昇式を適用した際の既往報告における課題

ダムコンクリートのような低発熱コンクリートを対象とする場合には、発熱特性の同定の際に、以下に示すような問題が指摘されている。

①フライアッシュ等が混合された単位結合材量の少ないRCD用コンクリートでは、温度上昇が極めて緩やかになる。これにより、試験装置の断熱保持が困難になり、測定精度に影響する⁶⁾。

②断熱試験の精度等の面から、通常は30~40日間で試験を終了する。実際には、終了時以降も温度が上昇過程にある⁵⁾。

③ダムコンクリートの発熱特性は、一般に断熱温度上昇試験結果を式(1)の断熱温度上昇式で回帰することで推定される。

$$T_{ad} = K \{1 - \exp(-\alpha t^\beta)\} \quad (1)$$

ここに、 T_{ad} :断熱温度上昇量(℃)、 K :断熱温度上昇量の終局値(℃)、 t :材齢(日)、 α 、 β :発熱速度に関する係数である。

式(1)の断熱温度上昇式で断熱温度上昇試験値を直接回帰した場合には、実際には温度上昇過程にあるにも関わらず、温度上昇が停滞するような回帰曲線となる。このため、断熱温度上昇量の終局値が低めに評価される⁷⁾。

RCDダムの温度解析に対する式(1)の断熱温度上昇式の適用性を評価した報告⁵⁾によれば、解析値は全般的に実測値に対し温度上昇量を小さく見積もり、短期間で発熱が終了すると報告されている。この原因として、断熱温度上昇試験と堤体内のコンクリートの断熱特性が異なること、断熱温度上昇試験の供試体と試験室内を断熱状態にすることが難しく断熱状態の保持精度が悪いこと、ダムコンクリートは断熱温度上昇試験の終了後も温度上昇過程にあるがこれを考慮していないことを挙げている。このため、断熱温度上昇特性が材齢10日を境に区分され、断熱温度上昇式を2区分した方が近似精度が向上するとしている。また、実ダムでは、夏季打設リフトにおいても材齢3ヶ月で最高温度に到達する事実から、この程度の比較的長期の材齢までも依然として水和発熱が顕著に生じている影響を考慮する必要性

表-1 RCDダムの配合

ダムコンクリート種類	配合名称	粗骨材最大寸法 Gmax (mm)	結合材量 C+F (kg/m ³)	フライアッシュ比 F/C+F (%)	水結合材比 W/C+F (%)	細骨材率 (%)	単 位 量 (kg/m ³)					
							水 W	セメント C	フライアッシュ F	細骨材 S	粗骨材 G	AE減水剤
RCD用コンクリート	R110	120	110	30	77.2	28	85	77	33	643	1692	0.275
	R120		120		70.8	28	85	84	36	640	1684	0.300
	R130		130		65.4	28	85	91	39	638	1676	0.325
有スランプコンクリート	S140	120	140	30	71.4	25	100	98	42	547	1677	0.350
	S200		200		50.0	24	100	140	60	511	1656	0.500

を挙げている。そこで、発熱特性を二段階に区分し、断熱温度上昇式における終局断熱温度上昇量Kを大きくし、温度上昇が長期に及ぶように発熱速度の係数αを小さくした場合、解析値を実測値に近づけられることを確認している。このことから、断熱温度上昇式に対し長期に及ぶ発熱を加味した評価が必要であるとしている。

他の実ダムの報告⁸⁾でも、最高温度の到達は、夏季打設部では材齢2ヶ月、冬季打設部では1年という長期に及ぶとしている。ここでは、実現象と解析結果の相違を受けて、温度上昇が極めて緩やかとなる材齢約15日以降の断熱温度上昇量を、精度良く求める方法の開発の必要性を挙げている。

以上のように、現行の断熱温度上昇式によるダムコンクリートの発熱特性の同定手法では、実ダムの長期に亘る水和発熱過程を十分に評価できないことがわかる。

筆者らは、これらの原因を式(1)に示すように発熱の表現が時間の関数だけで定義されているためと考えている。コンクリートの発熱特性の同定に関する別のアプローチとしては、鈴木ら⁹⁾が提案したコンクリート中のセメントの水和発熱過程を定量化する水和発熱モデルが挙げられる。

原田ら¹⁰⁾は、温度履歴に依存する水和発熱過程と熱伝導方程式との連成を考慮した非線形温度解析を提案し、単位セメント量の多いコンクリートを用いた比較的大型の壁状構造物やブロック状のコンクリート構造物を対象とし、水和発熱モデルの有効性を示している。しかし、コンクリートダムに適用した例は見あたらない。

3. ダムコンクリートの水和発熱モデルの定量化

(1) 水和発熱モデルと定量化方法

短期間での断熱温度上昇試験に基づいて発熱特性を同定する場合、発熱速度の収束過程の表現が課題となる。水和発熱モデルをダムコンクリートのような長期間を対象とする解析に適用しようとした場合には、水和発熱モデルの積算発熱量の終局値を表す総発熱量をどの程度にするかが課題となる。

以下、水和発熱モデルのパラメータとして必要となる発熱速度と温度活性の算出過程を示す。特に、本研究では、積算発熱量の増加に伴う発熱速度の収束過程の表現方法を提案する。

水和発熱モデルは、同一配合で打込み温度が異なる断熱温度上昇試験結果をもとに求めた積算発熱量と水和発熱速度の関係から、コンクリート中のセメントの活性化エネルギーと限界水和発熱速度をアーレニウス則に従い定量化することで、任意の温度履歴を受けるコンクリート構造物の温度解析に対応できるようにしたものである。水和発熱モデルの発熱方程式は、式(2)で表現される。

$$H = H_{\infty}(Q) \exp \left[-\frac{E(Q)}{RT} \right] \quad (2)$$

ここに、H：発熱速度(kJ/kg/hr)、 $H_{\infty}(Q)$ ：限界水和発熱速度(kJ/kg/hr)、 $-E(Q)/R$ ：温度活性(kJ·K/kg/hr)、T：絶対温度(K)、Q：積算発熱量(kJ/kg)である。

(2) 断熱温度上昇試験

a) 使用材料

セメントにはN社製の中層熟ポルトランドセメントをフライアッシュにはJ社製のものを用いた。骨材は泥岩と砂岩の混合砕石、砕砂を用い、粗骨材最大寸法は120mm、細骨材の粗粒率は2.75である。混和剤には、N社製のAE減水剤遅延形を用いた。なお、RCD用コンクリートを対象とした配合では空気量調整剤は用いていない。

b) コンクリートの配合

配合は表-1に示すとおりであり、RCD用コンクリートでは、単位結合材量を130,120および110kg/m³（以下、R130,R120,R110と略記する）とした3配合、また、有スランプコンクリートでは、単位結合材量を200および140kg/m³（以下、S200,S140と略

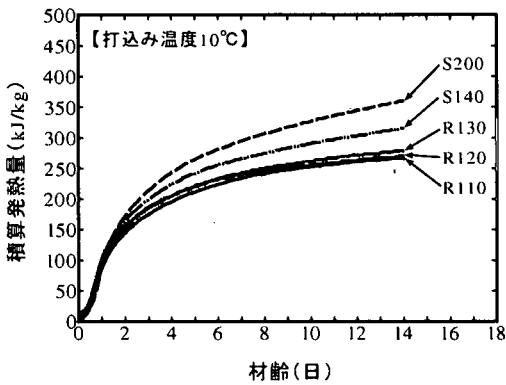


図-1 打込み温度 10°Cにおける材齢と積算発熱量の関係

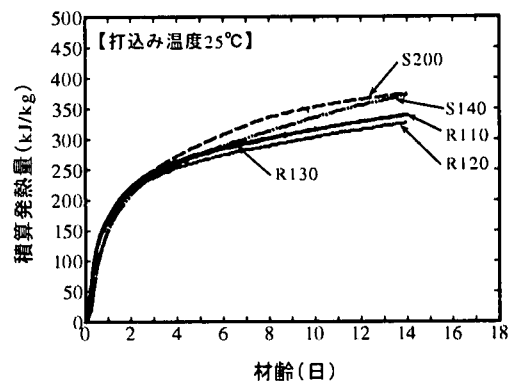


図-2 打込み温度 25°Cにおける材齢と積算発熱量の関係

記する)の2配合である。単位水量は、VC値が20±10秒あるいはスランプが3±1cmとなるように定めた。

c) 断熱温度上昇試験

打込み温度を10,25°Cの2水準としたコンクリートを対象に断熱温度上昇試験を材齢14日まで実施した。試験装置は熱媒体を水としたジャケット方式のもの¹¹⁾であり、断熱保持能力は0.1°C/日である。コンクリート試料はフルミックス状態のものをφ60cm×h60cmの試料容器に打ち込み、試験に供した。試験は、断熱温度上昇試験も含め精度向上を図ることを目的として恒温室で行った。

試験の継続期間を14日までとしたのは、既往の報告⁸⁾におけるダムコンクリートの材齢15日以降の断熱温度上昇量を測定する試験の精度および対象配合の低発熱性の関係による。すなわち、今回の試験対象配合で最も単位結合材量が少ない配合はR110であるが、この配合の温度上昇が材齢14日以降では0.1°C/日程度となり試験機の断熱保持性の限界近くになるためである。

(3) 材齢と積算発熱量の関係

断熱温度上昇試験結果をもとに、材齢と積算発熱量との関係を打込み温度別に図-1および図-2に示す。ここで、積算発熱量は、断熱温度上昇量にコンクリートの熱容量を乗じて単位結合材量で除したものである。これによれば、積算発熱量はRCD用コンクリートと有スランプコンクリートで傾向が異なっている。すなわち、RCD用コンクリートの場合、積算発熱量は単位結合材量で除したことによってR130～R110の間でその差は小さくなっているが、有スランプコンクリートでは、RCD用コンクリートと比較して大きく、かつ単位結合材量によって差が認められる。また、その傾向は打込み温度が低温

である10°Cの方が顕著である。

さらに同図から、材齢14日では積算発熱量は増加傾向にあることから、未だ発熱過程の途中であることが認められる。材齢14日時点における積算発熱量は打込み温度10°Cでは275～360kJ/kg、打込み温度25°Cでは325～375kJ/kgであり、この値は普通ポルトランドセメントが完全に水和した際の総発熱量(502kJ/kg)の7割程度に相当する積算発熱量である。

(4) 積算発熱量と水和発熱速度の関係

水和発熱モデルにおける水和発熱過程の定量化のために、積算発熱量と水和発熱速度の関係を求める。その方法は基本的には鈴木ら⁹⁾、岡村ら¹²⁾の発熱特性の同定手順に従うこととし、本研究では、積算発熱量と水和発熱速度の関係を表現することを目的として、関数によって回帰する方法を採った。

すなわち、図-3(a)～(e)に示すように実測値を2つの関数で回帰し、長期的な水和発熱過程を表現することとした。図-3(a)に示したR110の発熱速度において、積算発熱量に伴う発熱速度のピークは、材齢2日以内に現れており、その後は下に凸な曲線で緩やかに収束していくことが認められた。今回の試験において試験を終了した材齢14日付近での発熱速度は1kJ/kg/hrより小さい。また、この時期の前後で積算発熱量の変化に伴う発熱速度は大きく変化する状態には無いものと判断でき、緩やかに下に凸な関係を保つ状態で収束していく傾向が認められる。このような傾向は図-3(b)～(e)に示した他の配合においても同様である。そこで、これらの過程を表現するため、試験値が存在する初期の発熱過程を8次の多項式で回帰し、積算発熱量が150～200kJ/kg以降(材齢2日以降)の発熱過程を、式(3)に示すLogistic関数で回帰することとした。

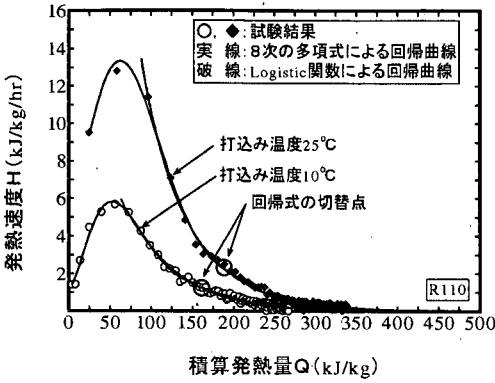


図-3(a) 長期的な水和発熱過程の回帰方法(R110)

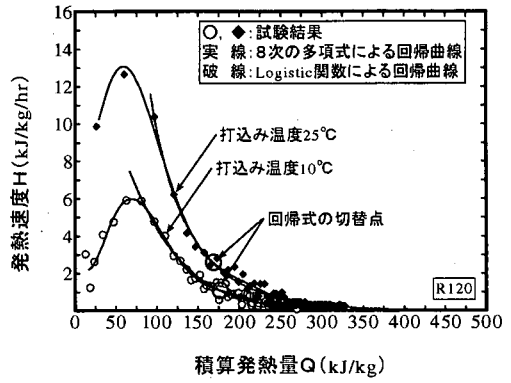


図-3(b) 長期的な水和発熱過程の回帰方法(R120)

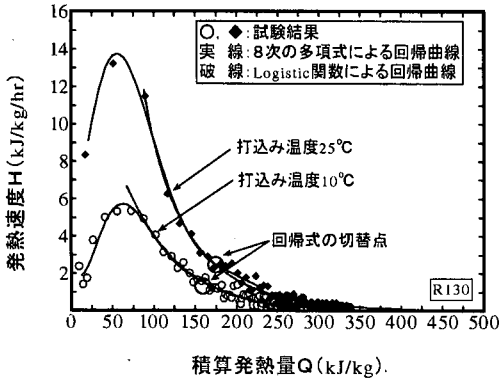


図-3(c) 長期的な水和発熱過程の回帰方法(R130)

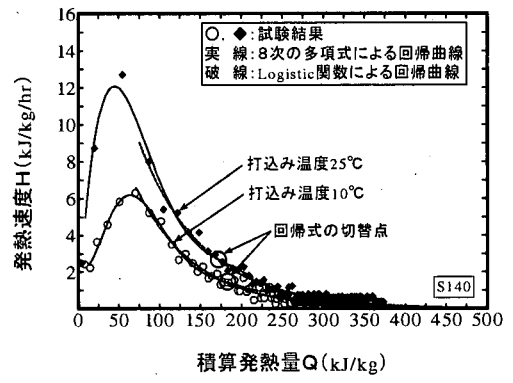


図-3(d) 長期的な水和発熱過程の回帰方法(S140)

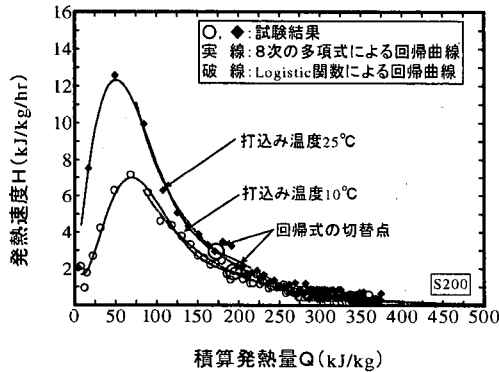


図-3(e) 長期的な水和発熱過程の回帰方法(S200)

$$H = \frac{A}{1 + B \exp(-CQ)} \quad (3)$$

ここで、H：発熱速度(kJ/kg/hr)、Q：積算発熱量(kJ/kg)、A、B、C：定数である。

また、両者の関数の切り替え点は、図中に示す各

回帰曲線の交点位置とした。図-3中に示した回帰結果は、試験結果を良く表現できている。

なお、発熱速度の緩やかな収束過程をも回帰しようとする場合、多項式のみで表現することは困難であった。すなわち、多項式のみを用いた場合、積算発熱量の終局値付近において、発熱速度が0に収束せず、上方または下方に発散する形状を示した。そこで、発熱過程を初期と長期過程で区分して、長期過程部分については、水和発熱速度が緩やかに収束していく状態を表現できるLogistic関数を用いることとした。

図-4および図-5は、全ての配合を対象にして、打込み温度10℃及び25℃の積算発熱量と発熱速度の関係を整理した結果である。図-4の打込み温度が10℃の場合、単位結合材量の多い有スランブコンクリート(S200)の発熱速度は、積算発熱量が50kJ/kgを越えた範囲で、他の配合(S140,R110~130)よりも大きい。また、S140,R110~130については、コンクリートの種類及び単位セメント量に相違する影響は明瞭ではない。

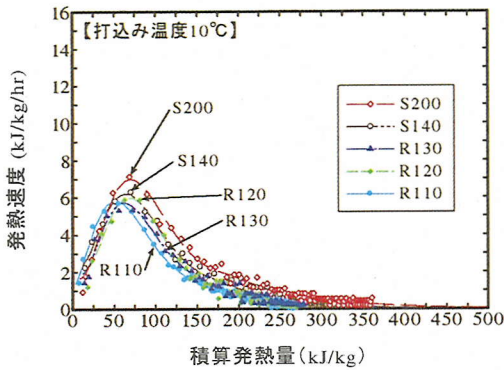


図-4 打込み温度10°Cにおける積算発熱量と発熱速度の関係

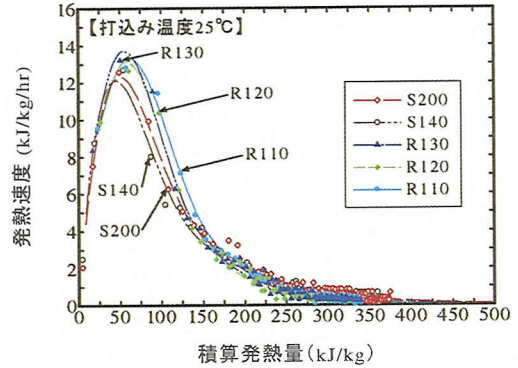


図-5 打込み温度25°Cにおける積算発熱量と発熱速度の関係

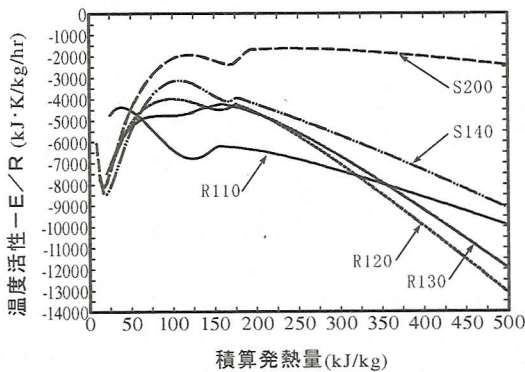


図-6 積算発熱量と温度活性の関係

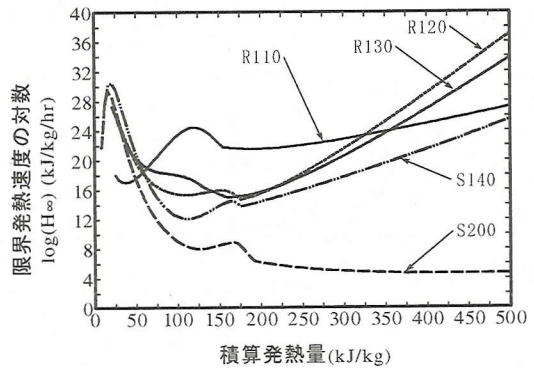


図-7 積算発熱量と限界発熱速度の関係

一方、図-5に示した打込み温度25°Cの場合によれば、発熱速度は積算発熱量50～125kJ/kgの範囲でRCD用コンクリートと有スランブコンクリートの配合の相違による差が認められる。

(5) 温度活性と限界水和発熱速度の定量化

図-4, 5に示した打込み温度が異なる2水準の積算発熱量と発熱速度の関係から、アーレニウス則に従い算定した積算発熱量と温度活性の関係を図-6に、積算発熱量と限界発熱速度の対数の関係を図-7に示す。

図-6によれば、R110を除き温度活性(-E/R)は、積算発熱量が大きいくときには、単位結合材量が少ないほど大きくなる傾向が認められる。

化学反応速度は活性化エネルギー(E)が大きいくほど遅いという観点から考えると、単位結合材量が少ないほど反応速度が遅いことを示していると考えられる。また、活性化エネルギー(E)は、セメントの水和反応の温度依存性の強弱を規定するものである

¹²⁾。したがって、単位結合材量の少ないものほど打込み温度の依存性が高いことを示しているものと考えられる。

(6) 水和発熱モデルの検証

図-6および図-7で同定した水和発熱モデルの検証を断熱温度上昇試験結果に対して行った。検証結果を図-8および図-9に示す。これによれば、打込み温度10および25°Cともに、解析結果は試験結果を非常に良く捉えており、初期材齢を多項式でそれ以降の長期に亘る過程をLogistic関数によって回帰する方法は、精度が高いことが認められる。

ここで示した解析結果は、計算から求まるものであり、いわば机上で実施した断熱温度上昇試験結果とも言える。したがって、材齢14日までの断熱温度上昇試験結果から、水和発熱モデルのパラメータを同定し、机上においてその後の試験をシミュレートできる可能性がある。

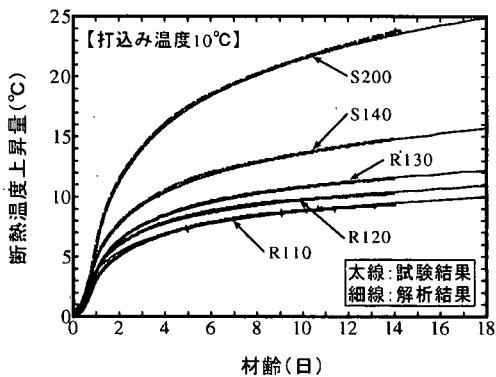


図-8 打込み温度 10°Cにおける断熱温度上昇曲線

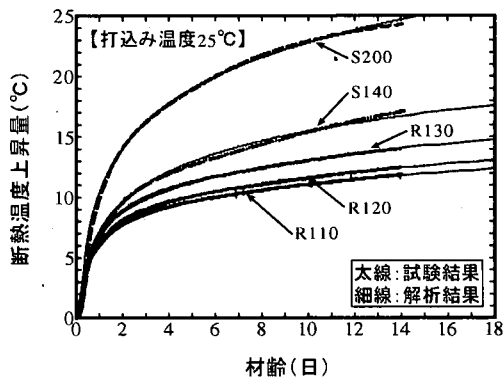


図-9 打込み温度 25°Cにおける断熱温度上昇曲線

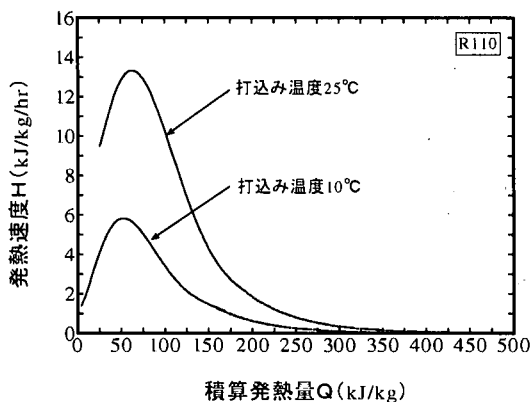


図-10 推定した長期発熱過程

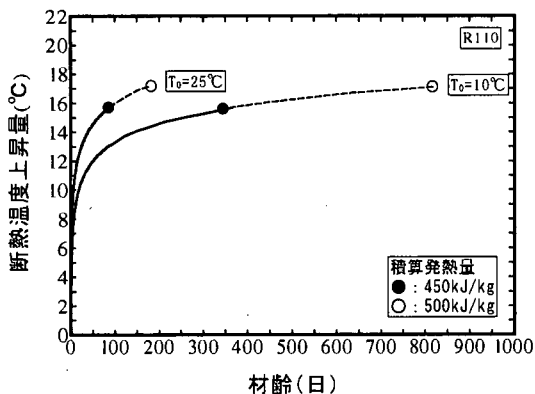


図-11 推定した断熱温度上昇曲線

図-10は図-3(a)の再掲であり、ダムコンクリートの長期発熱過程を今回提案する回帰手法で推定したものである。これによれば、積算発熱量の増加に伴い発熱速度が0に収束していく様子がわかる。また、積算発熱量が450kJ/kg程度で、発熱がほぼ終了するような結果となる。

図-11に今回提案する水和発熱モデルの定量化方法で、長期発熱過程を考慮した場合の断熱温度上昇曲線を示す。ここで、図中の●、○印は発熱速度が微小となる積算発熱量、例えば450kJ/kgおよび500kJ/kgにおける断熱温度上昇量を示している。これによれば、図-10から発熱速度が微小となると推定できる期間においても、断熱温度上昇量が増加していくことがわかる。したがって、今回の提案法を適用する場合には、積算発熱量の終局値を設定する必要がある。しかしながら、現状ではダムコンクリートの総発熱量を特定した報告がなく、セメントペースト試料による溶解熱法以外の試験方法も確立さ

れていない。

本研究では、ダムコンクリートの総発熱量を特定するために、実ダムの温度解析に今回提案する水和発熱モデルの定量化方法を適用し、実ダムの温度履歴を表現できる積算発熱量の終局値を同定する。ここに示した水和発熱モデルの定量化方法の妥当性に関しては、次章の実ダムへの適用によって論ずることとする。

4. 実ダムの温度解析への適用

(1) 解析モデルと解析条件

実ダムの温度解析は、二次元有限要素法による水和発熱モデルを適用した非線形非定常熱伝導解析¹⁰⁾とした。その際、実ダムの発熱特性を検討するために、水和発熱モデルにおける総発熱量を表-2の解析条件に示す3水準としたパラメータ解析を実施した。

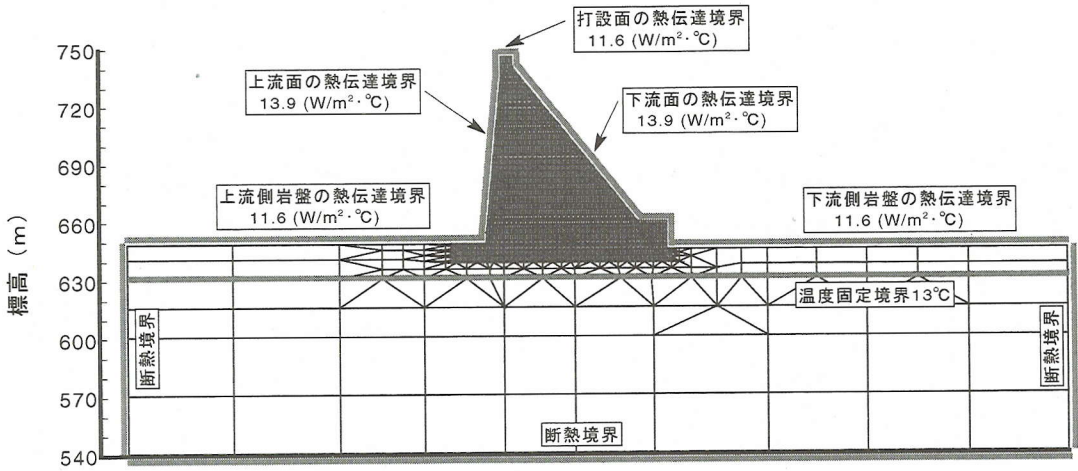


図-12 解析モデル

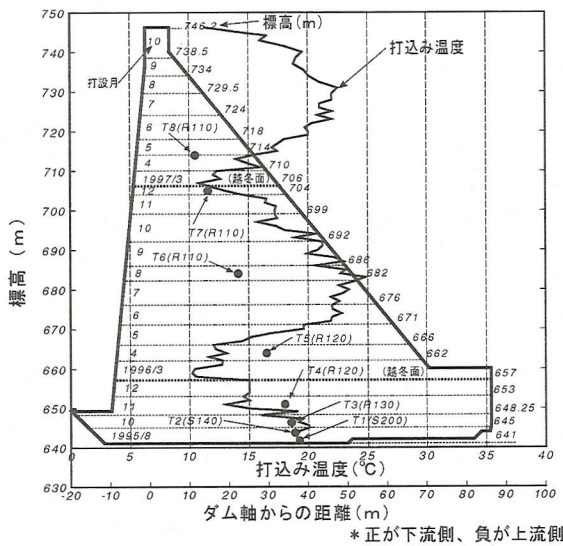


図-13 打設スケジュールと打込み温度

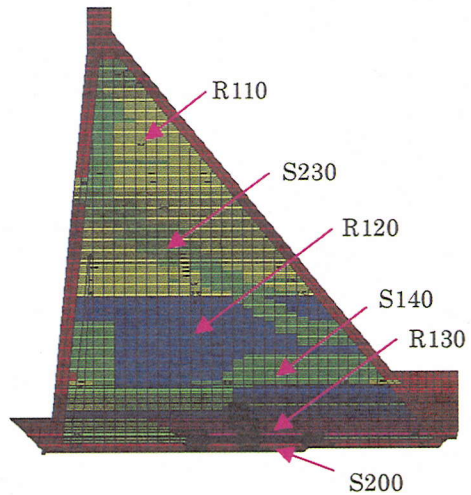


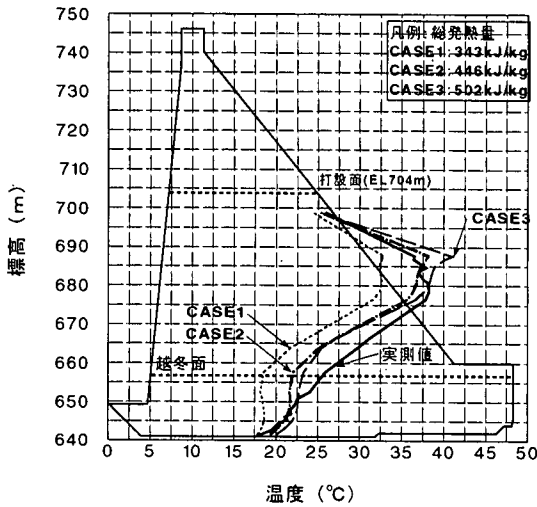
図-14 配合区分

図-12に解析モデルを示す。堤体部は、施工条件を着実に反映させるため、1ステップ毎に1リフト(リフト厚: 1m)を積み上げる方式とし、要素高は1リフトを2等分した0.5mとした。解析条件として、コンクリート及び岩盤の熱特性値は試験により求め、また外気温は実測値より設定した。なお、断熱温度上昇試験を除くコンクリートの熱物性試験は、総骨材量を同等にしたG max=40mmのコンクリートで実施した。堤体部の熱伝達率に関しては、打設面及び上下流面を11.6, 13.9(W/m²·°C)とし、一般的な値^{3), 4), 5), 8)}を採用した。岩盤部は、岩盤温度の計測結果を参考として、温度固定境界を着岩面より10m深

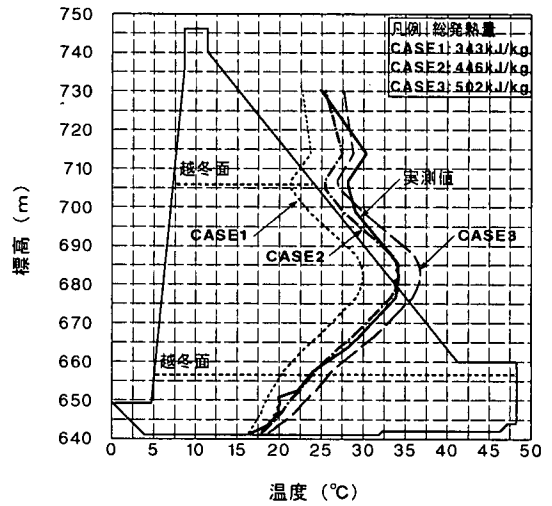
部とし、固定温度を13°Cとした。実ダムの施工条件として、打設スケジュールと打込み温度を図-13に、配合区分を図-14に示す。図-13には各配合の温度計測位置を●印で示す。なお、実ダムの温度分布及び履歴を検討する位置は、上下流面の外気温変動の影響が小さい堤体中央部とした。

解析条件を表-2に示す。

水和発熱モデルを適用するに当たっては、コンクリートの総発熱量を想定する必要がある。本解析ではフライアッシュを30%混した中庸熱ポルトランドセメントの総発熱量として、次の3水準を設定した。



(a) 建設中(1996/12/1)



(b) 建設後(1998/3/1)

図-15 堤体中央部の温度分布 (実測値と解析値の比較)

表-2 解析条件

	コンクリート	岩盤
比熱 C_p (kJ/kg·°C)	1.26	0.92
熱伝導率 λ_c (W/m·°C)	3.0	4.3
密度 ρ (t/m ³)	配合表から求める理論値	2.7
発熱式	水和発熱モデル 総発熱量 (kJ/kg) 3ケース: 343, 446, 502	—
解析時間刻み	1リフト打設につき、材齢3日まで3時間 材齢6日まで6時間、それ以降は24時間	

熱伝導率: Neven法 (中空円筒供試体)

比熱: $h_c^2 = \lambda_c / (C_p \cdot \rho)$ より算出. 熱拡散率 h_c^2 : Glover法

① H.F.W. Taylorによるセメント化合物の水和熱¹³⁾をもとに中庸熟ポルトランドセメント(単味)の完全水和時の水和熱を402kJ/kgと算定した. そして, 完全水和時のフライアッシュの水和熱を209kJ/kg (50kcal/kg)と仮定¹⁴⁾することで, 中庸熟ポルトランドセメント(フライアッシュ30%混合)の完全水和時の水和熱を343kJ/kgとし, これを総発熱量とした. この値は, 図-2に示す打込み温度25°CのRCD用コンクリートの断熱温度上昇試験における材齢14日の積算発熱量とほぼ同等である.

②断熱状態におけるダムコンクリートの完全水和時の発熱量は, 上記の溶解熱法による発熱量の1.3倍程度まで増大すると仮定し, 総発熱量を446kJ/kgとした.

すなわち, 溶解熱法の場合の水セメント比は40%で行われるが, ダムコンクリートのそれと比較してかなり低い値となっている. 水セメント比が小さいコンクリートでは, 水和終了時の総発熱量も小さくなるのが認められている⁹⁾. 水セメント比の相違はセメントの分散性に影響を及ぼし, 総発熱量も相違するものと考えられる. 付表-1に示した鈴木らの試験結果によれば, 総発熱量は水セメント比によって相違することが認められている. これによれば, 水セメント比を溶解熱法相当の40%とダムコンクリート相当の75%とした場合, 水和の進行に伴い両者の差が大きくなり, 中庸熟フライアッシュセメントの材齢91日では, W/C=75%の発熱量はW/C=40%の1.3倍となる結果が得られている.

③ポルトランドセメントの完全水和時の水和熱とされる一般値(502kJ/kg)¹³⁾を, 総発熱量とした.

(2) 解析結果

a) ダムコンクリートの総発熱量

建設中及び建設後における堤体中央部の温度分布(実測値と解析値の比較結果)を図-15に示す. 建設中の分布は, 堤体中央に位置する夏季打設部を施工してから4ヶ月後の状態で, 建設後の分布は19ヶ月後の状態である. 解析結果は, 水和発熱モデルにおける総発熱量を343, 446, 502kJ/kgの3水準としたものである.

これによれば, 総発熱量が343kJ/kgの場合, 温度分布は建設中及び建設後において, 実測結果より

5℃程度過小に評価される結果となった。

総発熱量が 446 kJ/kg である場合、建設中の分布は実測結果に対し、標高 650～680mの越冬リフト近傍から春季打設部にかけて過小に評価されているが、着岩部及び堤体中央の夏季打設部から秋季打設部にかけて、実測結果との整合性が非常に良い。建設後の分布は、着岩部から堤体中央の夏季打設部にかけて実測結果とほぼ一致しており、建設中の分布で過小評価された標高 650～680mにおいても、建設後には実測結果とほぼ同等となる。標高 705mの越冬リフト近傍からその上部に関しては、実測結果との整合性が劣っているが、総発熱量を 343kJ/kg とした場合に対し、全体的に解析精度が向上していると言える。

総発熱量を 502kJ/kg とした場合には、総発熱量を 446 kJ/kg とした場合に対し、建設後に約 2.5℃高くなるように、過大評価になることがわかる。

以上、実測結果と解析結果の整合性から、コンクリートの総発熱量は、検討した3水準のうち 446 kJ/kg 程度が妥当であると推定される。

b) 温度履歴の整合性

コンクリートの総発熱量を 446 kJ/kg に設定した場合における、実ダムの温度履歴を図-16 に示す。

解析結果は、温度応力評価で重視される着岩部(T1[S200])及び夏季打設部(T2[S140],T6[R110])において、長期間に亘り実ダムの温度履歴を表現できている。秋季打設リフト(T3[R130],T4[R120])においても、実測値と解析値の整合性が長期において高いことが認められる。

一方、他の位置(T5,T7,T8)では、打設1ヶ月以降の温度上昇過程において、解析値は実測値に対して小さく、実測値と解析値の整合性が低い。これらは、越冬リフト(T7)の近傍からその上部に至る部分に相当し、単位結合材量(R110-120)が少なく、低温度(15℃以下)で打設した箇所である。すなわち、打設再開まで長期間低温下に曝される越冬リフトを中心に、その温度履歴の影響を受ける上下リフトの長期の温度上昇過程を表現できない。

今回提案した水和発熱モデルの定量化方法に従えば、長期的な発熱過程を同定できるため、実ダムの温度履歴の解析精度を向上できる可能性がある。しかし、次リフトの打設までに低温下に曝される越冬リフトでは、次リフト打設以降の温度上昇が低く評価されるという課題が残る。

低温の環境下に曝される箇所で、解析精度が低下する原因は、単位結合材量が少なく、打込み温度が低い条件における、断熱温度上昇試験の断熱保持精

度にあると推定される。この条件下では発熱速度が小さいため、長期間の温度上昇に対しては十分な精度のデータを得ることが難しい。また、今回提案した定量化手法では、貧配合で打込み温度が低い場合、同じ試験期間における積算発熱量が少なく、積算発熱量が大となる試験点が打込み温度が高い場合と比較して相対的に不足する。このため、低温打込み時における長期的な発熱過程では、Logistic 関数による回帰精度が低くなる可能性がある。

以上から、低温条件下では断熱温度上昇試験の断熱保持精度が原因と推定される課題が残るものの、コンクリートダムの温度応力評価で特に重視される範囲では、解析精度の向上が十分に図れたことから、本提案方法は温度管理等の実用面において有効であると考えられる。

5. 結論

本研究では、コンクリートダムの温度解析の精度向上策として、ダムコンクリートの発熱特性の設定に水和発熱モデルの適用を試みた。特に、発熱特性の同定を、材齢14日までの断熱温度試験結果から行い、それ以降の低発熱コンクリートの長期に及ぶ水和発熱過程をLogistic関数で回帰した点を特徴としている。ダムコンクリートの発熱特性の同定に対する水和発熱モデルの適用性の評価は、ダムコンクリートの総発熱量をパラメータとした非線形非定常熱伝導解析を実施し、実ダムの温度履歴との整合性を検証することで行った。本研究の範囲内で得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 材齢と積算発熱量の関係から、実施した試験期間内では、RCD用コンクリートの場合、単位結合材量当たりの積算発熱量は配合による差は小さいが、有スランブコンクリートでは、RCD用コンクリートと比較して大きく、かつ単位結合材量によって差が認められる。また、その傾向は打込み温度が低い方が顕著である。
- (2) 積算発熱量に伴う発熱速度は、初期材齢を多項式で、それ以降の長期に亘る過程をLogistic関数によって精度良く回帰することが可能である。
- (3) 同定したダムコンクリートの水和発熱モデルによれば、貧配合コンクリートの温度活性は、富配合コンクリートに対し大きく、水和発熱過程における温度依存性が強い傾向が認められた。

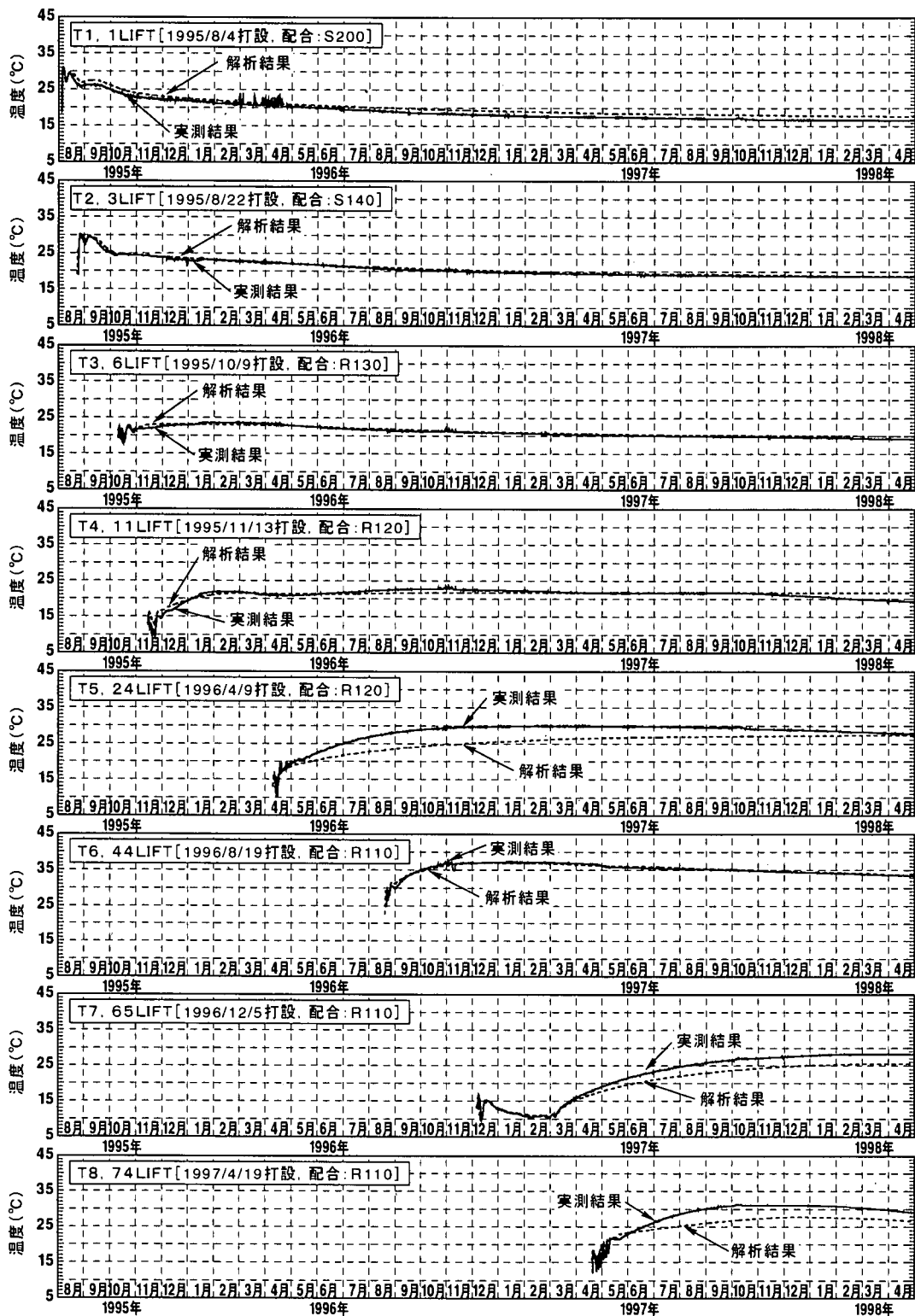


図-16 実ダムにおける各配合の実測と解析の温度履歴の比較

- (4) 同定した水和発熱モデルで材齢14日までの断熱温度上昇量をシミュレートした結果、試験結果との整合性が確認でき、また、実ダムにおける検証結果から長期に亘る発熱過程をLogistic関数によって回帰することは妥当と考えられる。
- (5) ダムコンクリートの長期に及ぶ水和発熱過程をLogistic関数で回帰し、コンクリートの総発熱量を適切に設定すれば、ダムコンクリートの長期に亘る水和発熱過程を十分に表現できるものと考えられる。ただし、越冬リフト近傍とその上層部では、次リフト打設後の温度上昇が低めに評価される結果となった。
- (6) 低温の環境下に曝される部位の解析精度を向上させるためには、断熱温度上昇試験の断熱保持精度を向上させ、長期の水和発熱過程を回帰するのに十分な精度を有したデータを得る必要がある。
- (7) ダムコンクリートの発熱特性の同定に水和発熱モデルを適用し、長期的な水和発熱過程を回帰し、総発熱量を的確に評価することができれば、実ダムの長期に亘る温度解析の精度向上が図れると考えられる。

謝辞：本研究を実施するにあたり、住友大阪セメント(株)鈴木康範氏には、多大なご支援とご助力を賜りました。ここに深甚の謝意を表します。

付録

付表-1は、中庸熟フライアッシュセメント等の水セメント比が異なる場合の水和熱測定結果(住友大阪セメント(株)社内資料、鈴木康範氏提供)である。比較した水セメント比は、溶解熱法で使用される40%と、コンクリートダムの内部コンクリート相当の75%の2水準である。なお、水セメント比75%のセメントペースト試料は、通常の水和熱測定方法で練混ぜると、ブリージングが著しい。このため、非反応性のアルミナ粉末を内割りで置換して作製している。

参考文献

- 1) Dunstan, M.R.H. : Recent Developments in RCC dams, Hydropower & Dams Issue One, pp.40-45, 1999.
- 2) 大藪勝美, 永山 功, 小林政登 : R C D 工法によるコンクリートダムの温度規制, 土木技術資料, Vol.29-12, pp.38-43, 1987.
- 3) 半塚公一, 橋本正一, 片平 博 : 宮ヶ瀬ダムの温度規制計画, ダム技術, 増刊 No.1, pp.239-250, 1991.
- 4) 山住有巧, 播田一雄, 自閉茂治, 谷 剛 : 面状工法による重力式コンクリートダムの温度規制に関する解析的考察, 土木学会論文集, No.502/V-25, pp.33-42, 1994.11.
- 5) 貞弘文佳, 森田義則 : 布目ダム温度規制計画と実績, ダム技術, No.60, pp.76-93, 1991.
- 6) 品質評価試験方法研究委員会報告書 : (社)日本コンクリート工学協会, pp.62-67, 1998.12.
- 7) 石川陽一 : 汎用性のある回帰分析手法—Bol Lzmann回帰—, セメント・コンクリート, No.616, pp.50-57, June 1998.
- 8) 加藤敏治, 横山光直, 船木純孝 : 玉川ダム堤体温度管理の実績, ダム技術, Vol.6-2, pp. 64-74, 1988.
- 9) 鈴木康範, 辻 幸和, 前川宏一, 岡村 甫 : コンクリート中に存在するセメントの水和発熱過程の定量化, 土木学会論文集, No.414/V-12, pp.155-164, 1990.2.
- 10) 原田修輔, 前川宏一, 辻 幸和, 岡村 甫 : 温度依存性を有するセメントの水和発熱過程と熱伝導との連成を考慮した非線形温度解析, 土木学会論文集, No.426/V-14, pp.167-176, 1991.2.
- 11) 鈴木康範, 原田修輔, 前川宏一, 辻 幸和 : 新試験装置によるコンクリートの断熱温度上昇量の定量化, 土木学会論文集, No.396/V-9, pp.109-117, 1988.8.
- 12) 岡村 甫, 前川宏一, 小澤一雅 : ハイパフォーマンスコンクリート, 技報堂出版, pp.140-149, 1993.
- 13) Taylor, H.F.W. : The Chemistry of Cements, Vol. 1, Academic Press, pp.363, 1964.
- 14) 岸 利治, 前川宏一 : 高炉スラグおよびフライアッシュを用いた混合セメントの複合水和発熱モデル, 土木学会論文集, No.550/V-33, pp.131-143, 1996.11.

(2000. 6. 9 受付)

STUDY ON APPLICATION OF HYDRATION HEAT MODEL TO DAM CONCRETE TEMPERATURE ANALYSIS

Tohru TONEGAWA, Yuji SEKINE, Shigeru TSURUTA, Hiroaki NOGUCHI
and Takashi SHIMPO

Analyzing and understanding dam concrete temperature is significant for design and construction method of gravity dam. The Adiabatic Temperature Rise Model which is used conventionally and is specified hydration heat property of dam concrete is, however, generally considered to underestimate the temperature rises than its actual movement.

The purpose of this study is to improve the accuracy of dam concrete temperature analysis. We apply the Hydration Heat Model to describe the long-term hydration heat process of dam concrete. We inspect the specification of long-term hydration heat property of dam concrete by comparing measurements of concrete dam temperature with the results of temperature analysis considering the total hydration heat quantity of dam concrete.