

論文 コンクリートの断熱温度上昇および強度発現の標準値の提案

嶋 毅^{*1}・鈴木 康範^{*2}・小田部 裕一^{*3}・岸 利治^{*4}

要旨：各種セメントを用いたコンクリートの断熱温度上昇特性および強度発現特性の標準値を提案した。断熱温度上昇特性に関しては、既往のデータに対する複合水和発熱モデルによる推定値の適合性を検討した上で、打込み温度および単位セメント量が増加した場合の断熱温度上昇量を複合水和発熱モデルによって求め、これに基づいて断熱温度上昇式の各係数の標準値を提案した。一方、強度発現特性に関しては、既往のデータを基に水セメント比ごとに養生温度 20℃における材齢 91 日の圧縮強度で正規化した強度発現率を有効材齢の関数によって近似し、標準値を提案した。

キーワード：温度応力解析，断熱温度上昇特性，強度発現特性，複合水和発熱モデル

1. はじめに

温度ひび割れの発生が懸念される，マスコンクリート構造物では，温度応力解析による温度ひび割れに対する照査が事前に行われる。また，最近実績の増えてきた単位セメント量の多い高強度コンクリートでも，同様に事前の温度応力解析が必要とされてきている。その際，材料特性値として，断熱温度上昇特性および強度発現特性が必要となる。現状では，土木学会コンクリート標準示方書¹⁾において，断熱温度上昇特性および圧縮強度発現特性が与えられている。しかし，マスコンクリートや高強度コンクリートでよく使用される低熱ポルトランドセメントについては，いずれの標準値も与えられていない。また，強度発現に関しては，温度の影響が考慮されていない。

本研究は，上記の低熱ポルトランドセメントの他に，普通ポルトランドセメント，中庸熱ポルトランドセメントおよび高炉セメント B 種を用いたコンクリートについて，製造実績が多いセメントメーカー 3 社の技術資料に基づいて，最近の品質を反映させ，断熱温度上昇特性および強度発現特性の標準値を提案するものである。

2. 断熱温度上昇特性の標準値

2.1 標準値の求め方の方針

セメントの技術資料より，4 種類のセメント，単位セメント量 260～660kg/m³，打込み温度 10，20 および 30℃ の範囲で，47 ケースの断熱温度上昇試験の実験値を基に標準化を検討した。断熱温度上昇試験では，試験所間でのばらつきが少なからず生じることが指摘されている。したがって，これらの実験値から直接断熱温度上昇式を構築した場合，この試験誤差の影響を受ける恐れがある。一方，セメントの鉱物組成，配合および初期温度等を入力すれば，セメントの水和発熱量が計算できる複合水和発熱モデルが提案されている^{2),3),4)}。複合水和発熱モデルは，広範な温度条件下においてセメントの水和発熱速度を計算することができるので，このようなモデルを温度解析に直接用いることが，本来であれば好ましい。しかしながら現状では，このようなモデルを用いて汎用ソフトにより温度解析をできるようにはなっていない。そこで，実験が網羅しきれていない広い適用範囲を対象とするために，本研究では，複合水和発熱モデルに基づいた断熱温度上昇式を提案することとした。

*1 住友大阪セメント（株）セメント・コンクリート研究所 工修（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 グループリーダー 工博（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 博(工)（正会員）

*4 東京大学生産技術研究所 人間・社会系部門 助教授 博(工)（正会員）

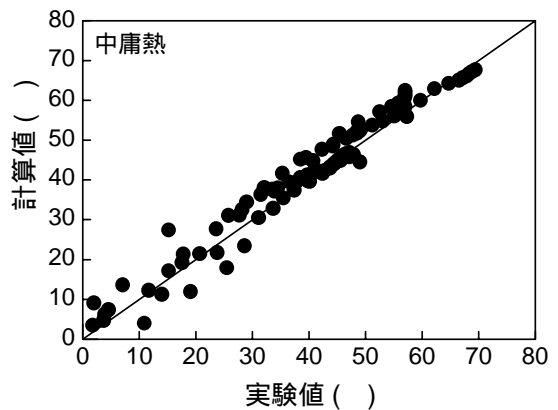
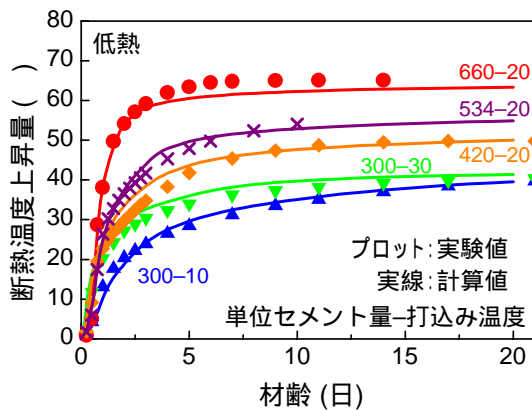
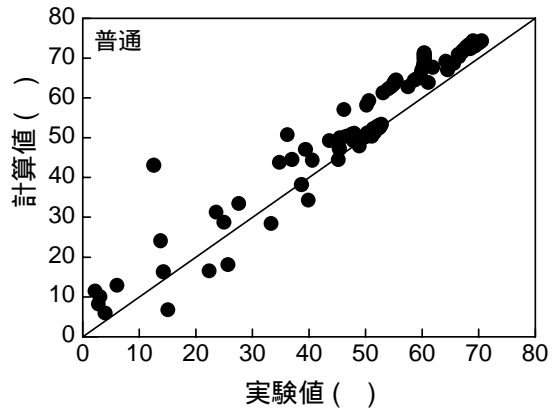
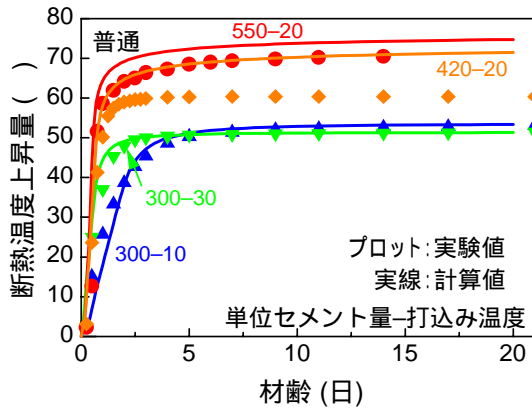


図 - 1 複合水和発熱モデルの適合性

2.2 複合水和発熱モデルの検証

技術資料の実験値を用いて、複合水和発熱モデルの適合性を検証した。図 - 1 に断熱温度上昇量を示す。また、図 - 2 に同一経過時間における複合水和発熱モデルによる断熱温度上昇量の計算値と実験値との比較を示す。普通ポルトランドセメントで単位セメント量が 420kg/m^3 の場合に、実験値より高い推定値を与えているように思われる。しかし、複合水和発熱モデルの精度が悪いとは言い切れない。なぜならば、この普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートの断熱温度上昇量は、同一技術資料における高炉セメント B 種のそれと比較して低い傾向が見られたからである。また、打込み温度が低い場合に、打込み後から 3 日間程度において、計算値が実験値より若干低めになる傾向が見受けられる。しかし全体的には、図 - 2 に示すように、複合水和発熱モデルの計算値と実験値とは概ね合致しており、断熱温度上昇特性を実用的な精度で推定できているといえる。

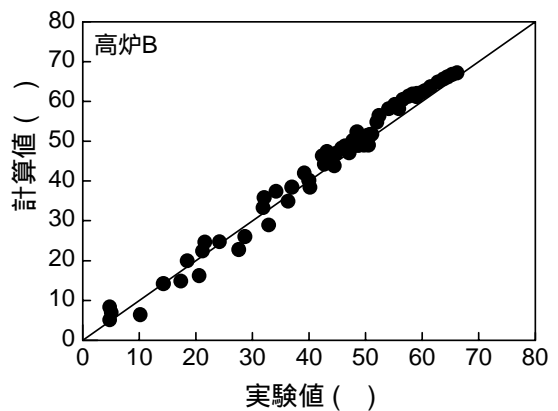
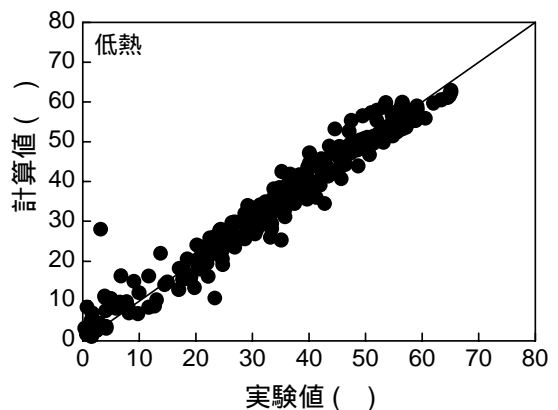


図 - 2 複合水和発熱モデルによる断熱温度上昇量の計算値と実験値との比較

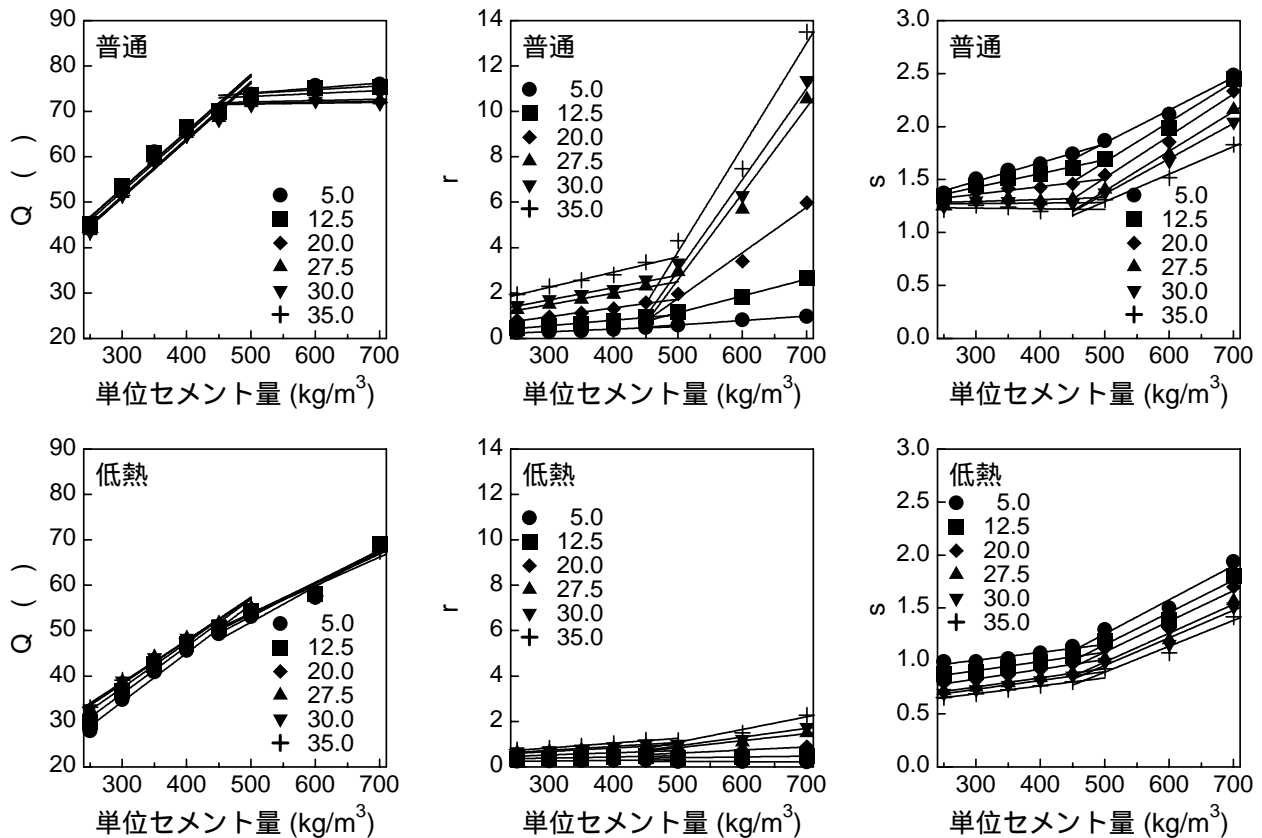


図 - 3 断熱温度上昇式の係数と単位セメント量との関係

2.3 標準値の提案

前述の試験誤差を考慮して、実験値を直接用いず、複合水和発熱モデルによって断熱温度上昇量を系統立てて求め、この結果より断熱温度上昇式を提案することとした。すなわち、1種類のセメントに対して、単位セメント量 250 ~ 700kg/m³ の 8 水準および打込み温度 5 ~ 35 の 6 水準の計 48 ケースについて断熱温度上昇量を計算し、最小二乗法により式(1)の係数を求めた。

$$Q(t) = Q (1 - \exp(-rt^s)) \quad (1)$$

ここで、 Q は断熱温度上昇量の終局値であり、 r および s は断熱温度上昇速度に関する係数である。式(1)は、汎用の FEM 解析ソフトに組み込まれていることに加えて、特に低熱ポルトランドセメントの場合に、精度の向上が期待される。

図 - 3 に、これらの係数と単位セメント量との関係の例を示す。また、表 - 1 に打込み温度ごとの式(1)の係数と単位セメント量の関係式を示す。単位セメント量が多くなるに従い、水和の停滞が起こるので、単位セメント量の増加に伴う終

局断熱温度上昇量の増加はやや小さくなる。複合水和発熱モデルによる計算をする際に、単位セメント量 450kg/m³ までが AE 減水剤を用いたコンクリートの配合を、また単位セメント量 500kg/m³ を超えるものについては高性能 AE 減水剤を用いたコンクリートの配合を想定している。混和剤の種類により近似式を使い分けを想定して、単位セメント量 450kg/m³ を境に 2 本の直線で近似した。終局断熱温度上昇量 Q と単位セメント量との関係においては、単位セメント量 500kg/m³ を超えると、傾きが小さくなる傾向がある。一方、断熱温度上昇速度に関する係数 r, s と単位セメント量との関係においては、両係数ともに、単位セメント量 500kg/m³ を超えると、傾きが大きくなる傾向がある。これらの傾向は、特に反応性が高い種類のセメントで打込み温度が高い場合に顕著で、傾きの変化が急である。反応性が高い種類のセメントで、単位セメント量の増加に伴う終局断熱温度上昇量の増大に頭打ちが生じる理由は、複合水和発熱モ

表 - 1 近似式の係数の算定式 (適用範囲：単位セメント量 250 ~ 700kg/m³ , 打込み温度 5 ~ 35)

セメント	T ₀ ()	Q		r		s	
		C 450	450<C	C 450	450<C	C 450	450<C
普通	5.0	0.126 × C+ 15.4	0.0110 × C+ 68.6	0.00113 × C- 0.0479	0.00195 × C- 0.38	1.76e-3 × C+ 0.954	0.00310 × C+ 0.298
	12.5	0.126 × C+ 15.1	0.0085 × C+ 69.7	0.00243 × C- 0.1745	0.00741 × C- 2.58	1.30e-3 × C+ 1.036	0.00377 × C- 0.219
	20.0	0.127 × C+ 14.4	0.0065 × C+ 70.1	0.00387 × C- 0.2058	0.02012 × C- 8.30	7.23e-4 × C+ 1.144	0.00397 × C- 0.468
	27.5	0.126 × C+ 13.6	0.0030 × C+ 70.6	0.00503 × C- 0.0250	0.03804 × C- 16.43	1.84e-4 × C+ 1.238	0.00376 × C- 0.488
	30.0	0.126 × C+ 13.4	0.0020 × C+ 70.6	0.00541 × C+ 0.0707	0.04023 × C- 17.14	5.38e-5 × C+ 1.256	0.00334 × C- 0.306
	35.0	0.126 × C+ 13.1	0.0020 × C+ 70.8	0.00670 × C+ 0.2422	0.04606 × C- 19.21	-6.64e-5 × C+ 1.250	0.00261 × C- 0.013
中庸熱	5.0	0.113 × C+ 8.6	0.0230 × C+ 50.9	0.00046 × C+ 0.1042	-0.00015 × C+ 0.33	1.41e-3 × C+ 0.783	0.00345 × C- 0.104
	12.5	0.113 × C+ 9.1	0.0215 × C+ 52.0	0.00100 × C+ 0.1046	0.00048 × C+ 0.28	1.19e-3 × C+ 0.781	0.00324 × C- 0.111
	20.0	0.112 × C+ 10.1	0.0190 × C+ 53.4	0.00176 × C+ 0.0993	0.00230 × C- 0.27	1.02e-3 × C+ 0.757	0.00322 × C- 0.206
	27.5	0.110 × C+ 10.6	0.0170 × C+ 54.2	0.00256 × C+ 0.1246	0.00616 × C- 1.76	8.12e-4 × C+ 0.737	0.00339 × C- 0.431
	30.0	0.110 × C+ 10.7	0.0160 × C+ 54.5	0.00281 × C+ 0.1429	0.00812 × C- 2.61	7.44e-4 × C+ 0.730	0.00335 × C- 0.457
	35.0	0.108 × C+ 10.9	0.0145 × C+ 54.7	0.00326 × C+ 0.1998	0.01355 × C- 5.05	5.89e-4 × C+ 0.718	0.00353 × C- 0.643
低熱	5.0	0.107 × C+ 2.2	0.0785 × C+ 12.6	0.00028 × C+ 0.1710	-0.00013 × C+ 0.30	7.44e-4 × C+ 0.783	0.00322 × C- 0.355
	12.5	0.104 × C+ 4.9	0.0735 × C+ 16.4	0.00053 × C+ 0.2215	0.00036 × C+ 0.22	8.68e-4 × C+ 0.647	0.00305 × C- 0.370
	20.0	0.100 × C+ 7.5	0.0705 × C+ 18.4	0.00097 × C+ 0.2273	0.00137 × C- 0.09	9.21e-4 × C+ 0.553	0.00290 × C- 0.363
	27.5	0.095 × C+ 9.7	0.0670 × C+ 20.3	0.00155 × C+ 0.2070	0.00311 × C- 0.72	8.63e-4 × C+ 0.495	0.00273 × C- 0.374
	30.0	0.094 × C+ 10.2	0.0655 × C+ 21.1	0.00174 × C+ 0.2008	0.00386 × C- 1.01	8.31e-4 × C+ 0.483	0.00261 × C- 0.346
	35.0	0.092 × C+ 11.0	0.0630 × C+ 22.1	0.00213 × C+ 0.1925	0.00560 × C- 1.72	7.43e-4 × C+ 0.467	0.00245 × C- 0.329
高炉 B	5.0	0.109 × C+ 18.8	0.0115 × C+ 63.6	0.00086 × C+ 0.0024	-0.00050 × C+ 0.64	1.67e-3 × C+ 0.722	0.00610 × C- 1.363
	12.5	0.112 × C+ 17.6	0.0110 × C+ 63.8	0.00172 × C- 0.0787	0.00062 × C+ 0.45	1.28e-3 × C+ 0.798	0.00481 × C- 0.799
	20.0	0.114 × C+ 16.8	0.0085 × C+ 65.0	0.00270 × C- 0.1261	0.00478 × C- 1.13	8.43e-4 × C+ 0.870	0.00533 × C- 1.220
	27.5	0.116 × C+ 15.6	0.0065 × C+ 65.4	0.00353 × C- 0.0628	0.01444 × C- 5.44	3.98e-4 × C+ 0.956	0.00528 × C- 1.336
	30.0	0.116 × C+ 15.5	0.0055 × C+ 65.7	0.00374 × C- 0.0030	0.02025 × C- 8.20	2.52e-4 × C+ 0.978	0.00539 × C- 1.434
	35.0	0.126 × C+ 15.4	0.0110 × C+ 68.6	0.00419 × C+ 0.1501	0.03530 × C- 15.31	-3.06e-6 × C+ 1.019	0.00516 × C- 1.375

デルにおいて、水セメント比の低下に伴い、未水和セメントへの水分の接触機会が減少する状況を考慮していることによる。

図 - 4 に、提案した係数の関係式より計算した断熱温度上昇量を示す。単位セメント量が多く、打込み温度が高い場合に、複合水和発熱モデルと比較して提案値の収束が早い傾向にある。これを改善するためには、近似式として式(1)以外の関数を用いる必要があるが、式(1)には汎用ソフトによる解析が可能となる利便性があるので、本研究では式(1)を採用した。全体的には、提案値と複合水和発熱モデルによる計算値とは一致をみせている。計画および設計段階に用いるには、十分な精度であると思われる。なお、単位セメント量が 450 ~ 500kg/m³ 間は、高性能 AE 減水剤を使用する場合、500kg/m³ 以上の式を外挿し、それ以外の場合には、450kg/m³ 以下の式を外挿することを提案する。

3. 強度発現特性の標準値

マスコンクリートの温度応力解析において、コンクリートの発熱特性とともに、有効ヤング係数および引張強度の算定の基になる圧縮強度発現特性が解析精度に大きな影響を及ぼすので、その値をできる限り精度よく求めておく必要がある。土木学会コンクリート標準示方書において強度発現特性は与えられているが、低熱ポルトランドセメントについては与えられていない。しかも、養生温度の影響が考慮されていない。そこで、技術資料に基づいて、コンクリートの強度発現特性を求めた。

強度発現特性の場合も、断熱温度上昇量と同様に、広い範囲を系統立てて検討するために、技術資料に記載されている各材齢における水セメント比と圧縮強度の関係式を用いて、水セメント比 25 ~ 60% の各材齢の圧縮強度を養生温度ごとに求めた。これを、養生温度 20 における

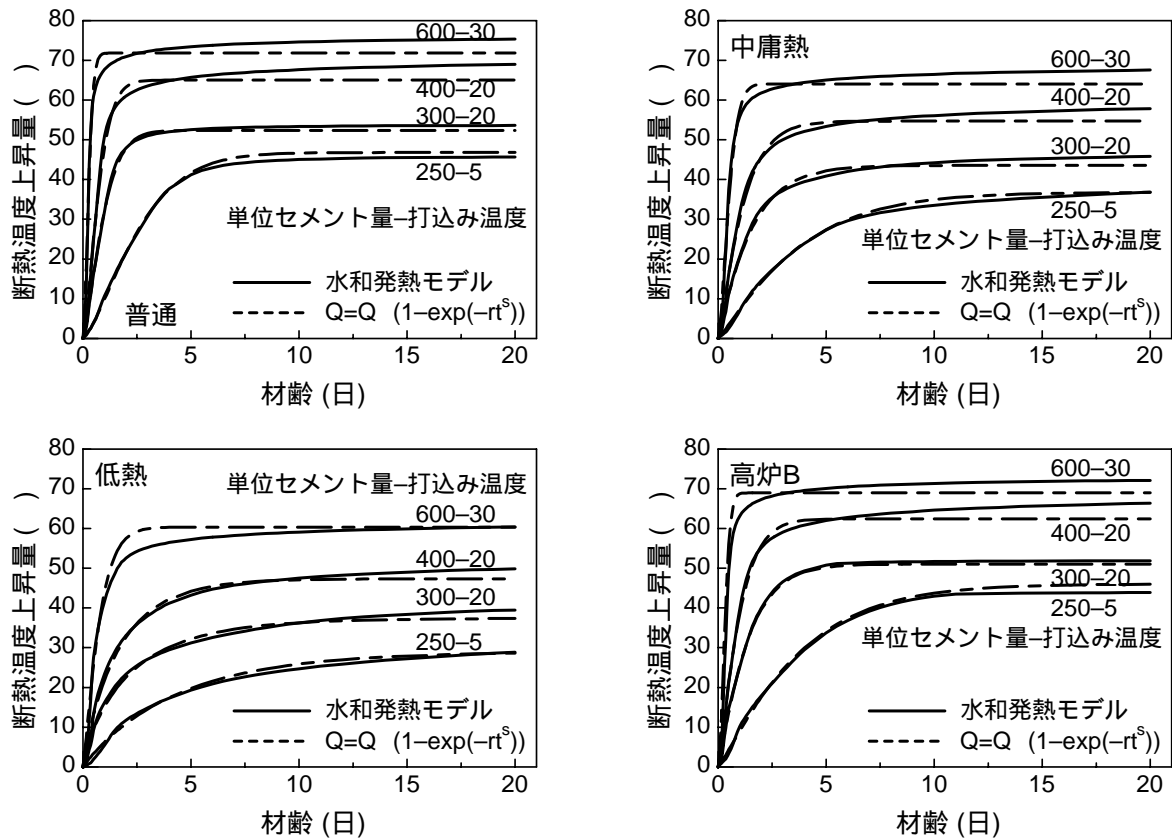


図 - 4 提案する断熱温度上昇量の標準値の例と複合水和発熱モデルとの比較

材齢 91 日の圧縮強度で正規化した値を強度発現率と定義した。この強度発現率を水セメント比ごとに有効材齢の関数によって近似することとした。近似式は、式(2)に示す Ross の双曲線式である。

$$fc'(t_e)/fc'(91)=t_e/(a+bt_e) \quad (2)$$

ここに、 $fc'(t_e)$ は有効材齢 t_e におけるコンクリートの圧縮強度(N/mm²)、 $fc'(91)$ は 20 標準養生材齢 91 日におけるコンクリートの圧縮強度(N/mm²)、 a および b は係数。有効材齢 t_e は以下に示す式(3)で与えられる。

$$t_e = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp \left[13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i)/T_0} \right] \quad (3)$$

ここに、 t_i は温度が $T()$ である期間の日数(日)。養生温度 20 材齢 91 日における圧縮強度は、技術資料の平均値をセメント水比の一次式によって近似した。また、最小二乗法により、水セメント比ごとの係数 a 、 b を求め、これらとセメン

ト水比との関係を一次式で近似した。これらの近似結果を表 - 2 に示す。すなわち、水セメント比と有効材齢がわかれば、コンクリートの圧縮強度の推定が可能となる。水セメント比が小さくなると係数 a は小さくなる。一方、係数 b は逆に大きくなるが、その変化幅は係数 a と比較して小さい。係数 a が小さくなると、式(2)の傾きは大きくなる。また、係数 b が大きくなると、式(2)の傾きは小さくなる。係数 a の水セメント比に伴う変化幅は、係数 b に比べて大きいので、水セメント比が小さくなると式(2)の傾きが大きくなり、強度発現の速度が高くなる。これは、水セメント比が小さくなるとセメント粒子の密集度が高まり、水和に伴い硬化組織の緻密化が円滑に進み、強度発現の速度が高くなったと解釈できる。

図 - 6 に、式(2)の係数 a, b とセメント水比との関係を示す。図 - 6 より、係数 a, b とセメント水比との関係はほぼ直線に近いことがわかる。表 - 2 に示すように、相関係数も 1 に近い。図 - 6

表 - 2 材齢 91 日の圧縮強度および式(2)の係数 a,b の推定式 (R は相関係数)

セメント 種類	$fc'(91) = f_t + f_t(C/W)$			$a = a_t + a_t(C/W)$			$b = b_t + b_t(C/W)$		
	f_t	f_t	R	a_t	a_t	R	b_t	b_t	R
普通	-11.6	29.1	0.9898	7.37	-1.67	0.9942	0.946	0.0138	0.8481
中庸熱	-7.28	29.1	0.9960	24.3	-6.09	0.9631	0.844	0.0399	0.8655
低熱	-6.44	29.4	0.9918	42.0	-9.72	0.9852	0.612	0.0860	0.9765
高炉 B	-1.43	24.5	0.9995	19.2	-5.44	0.9986	0.787	0.0757	0.9992

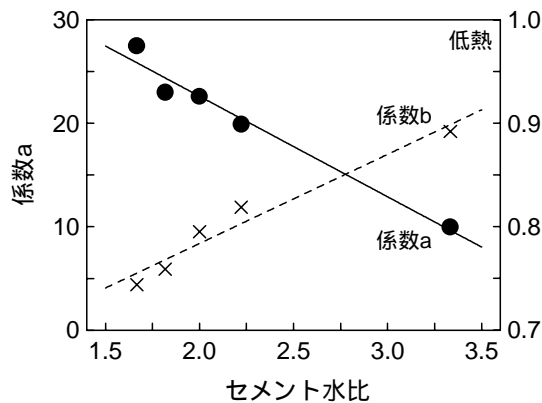


図 - 5 式(2)の係数 a,b とセメント水比との関係

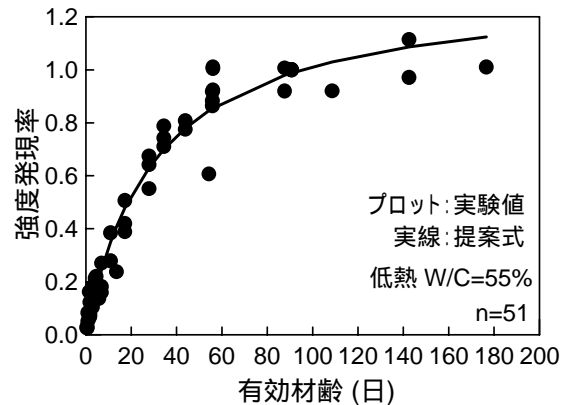


図 - 6 強度発現率の適合性

に強度発現特性の例を示す。強度発現特性は、骨材および混和剤等の使用材料が異なる影響もあり、実験データにばらつきが見受けられるが、式(2)による推定値は、計画および設計段階における強度推定には実用的な精度であると思われる。

4. まとめ

- (1) セメントメーカー各社の技術資料のデータにより、複合水和発熱モデルの適合性を検証した。断熱温度上昇量は概ね合致しており、良好な適合性を示した。
- (2) 複合水和発熱モデルによって求めた断熱温度上昇量に基づいて、各種セメントの断熱温度上昇式の各係数の標準値を提案した。これにより、単位セメント量と打込み温度とから、断熱温度上昇量を計算することが可能となった。
- (3) セメントメーカー各社の技術資料に基づいて、各種セメントの強度発現率の標準値を提案した。これにより、水セメント比と有効材齢とから、計算することが可能となった。

謝辞

本研究は、(社)日本コンクリート工学協会の「マスコンクリートのひび割れ制御に関する研究委員会」(委員長：佐藤良一広島大学教授)の活動の一環として行われたものである。また、セメントメーカー各社からは、技術資料中の詳細なデータを快く提供頂いた。ここに付記して深甚の謝意を表する。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書施工編，pp.52 および pp.86-87，2002
- 2) 岸利治，小田部裕一：主要鉱物間の反応相互依存性を考慮したポルトランドセメント複合水和発熱モデルの再構築，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.561-566，2004
- 3) 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
- 4) 岸利治，前川宏一：ポルトランドセメントの複合水和発熱モデル，土木学会論文集，No.526/V-29，pp.97-109，1995