

Boltzmann式による終局値算出に関する考察

日本コンサルタント株式会社 正会員 石川陽一

1. まえがき

前報「コンクリートの表面弱化深さの測定方法」において、Boltzmann 式を用いることにより終局反発度および終局表面弱化深さを求めることができることを報告した。本報告では、この手法を更に発展させて、Boltzmann 式を用いることにより、断熱温度上昇量を始めとする各種特性値の終局値を求めることの可能性について検討した。シミュレーションに使用したデータは、いずれも実測値である。

2. 通常コンクリートの終局断熱温度上昇量

普通ポルトランドセメント（NC）およびB種高炉セメント（BB）使用コンクリートの温度上昇量のプロットと Boltzmann 式による回帰曲線を図1に示す。従来式を使用した場合は、プロットが回帰曲線から多少ずれることがあることが知られているが、Boltzmann 式による回帰曲線は、ほぼ完全に合致している。従来式と Boltzmann 式による終局断熱温度上昇量（以下K値という）の比較を表1に示す。Boltzmann式によるK値は、三つの従来式の平均値と一致している。

数多くデータで検討したが同様の傾向が認められた。

表1 K値の比較（添字は材齢を表す）

式の種類	NC _{0~10} (°C)	BB _{0~10} (°C)	LC _{0~21} (°C)	LC _{4~21} (°C)
従来式(1)	43.3	46.6	29.7	31.3
従来式(2)	42.3	45.0	28.5	30.6
従来式(3)	42.7	45.6	29.7	31.3
従来式の平均	42.8	45.8	29.3	31.1
Boltzmann 式	42.8±0.2	45.9±0.2	30.5±0.6	33.6±0.2

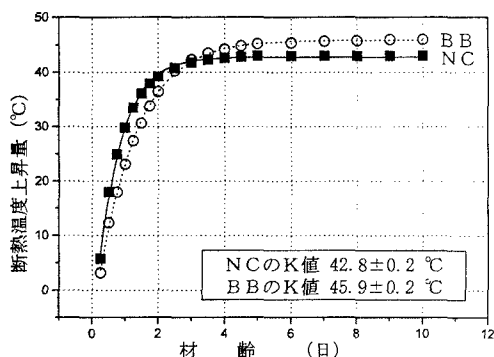


図1 通常コンクリートの Boltzmann 回帰

3. 低発熱コンクリートのK値

低発熱コンクリートの代表として、ビーライトセメント（LC）使用コンクリートでシミュレーションした結果を以下に例示する。図2に示すように、Boltzmann の回帰曲線とプロットが合致せず、まだ温度が上昇中であるにもかかわらず、材齢15日頃に温度上昇が停滞していると見なした回帰曲線となり、更に測定を継続した場合に上昇するであろう温度上昇分が見込まれていないだけでなく、K値は、最終測定値より小さく算出されている。このような傾向は従来式においても認められる。全データを使用して求めたK値を表1のLC_{0~21}に示す。図3に示したように Boltzmann 回帰を二つに分割すると、プロットと回帰曲線は合致するようになる。このことは、温度上昇を支配する主反応が4日頃に交替していることを示唆している。ビーライトの水和が支配的主反応と考えられる4日～21日の間のデータで求めたK値および同様に求めた従来式のK値を表1に併記する。この場合でも従来式のプロットと合致しない。このような現象は、フライアッシュ混入コンクリート、高炉スラグ高配合コンクリートでも同様な傾向が認められる。

前報で説明したように、Boltzmann の回帰式は、統計熱力学に基づくものであり、4日～21日のプロットが回帰曲線と完全に一致しているため、この反応は熱力学的に説明できる現象と考えられ、21日以降もこの現象が続くと考え、Boltzmann 式によって求められる最終値をK値と考えてよいものと思われる。

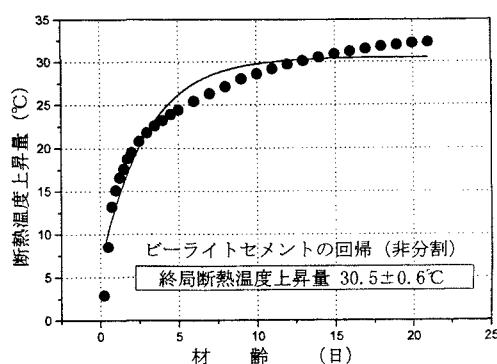


図2 ビーライトコンクリートの回帰（非分割）

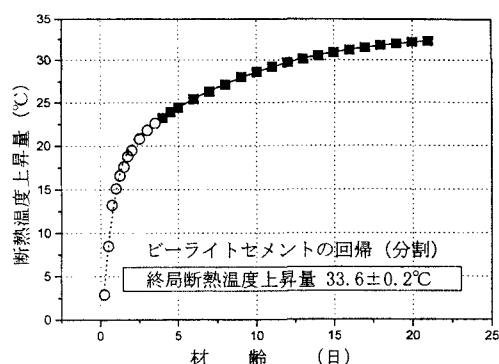


図3 ビーライトコンクリートの回帰（分割）

従来式と Boltzmann 式の K 値の差は 4.3 °C であった。

Boltzmann 式で求めた K 値の 33.6 °C を仮想点としてシミュレーションした結果を図 4 に示す。この結果によると、ビーライトコンクリートは、あと 1.9 °C 上昇するのに 20 日間も要するという予測となった。

4. Boltzmann 回帰の精度

温度が上昇中に測定を終了した場合の Boltzmann 式によって求められた K 値の精度について、図 1 に例示した B B のデータを使用してシミュレーションした結果を表 2 に示す。材齢が 4.5 日以降も温度上昇が続くが、算出材齢で求めた K 値と最終測定日で求めた K 値との差 (e) は、4.5 日以降において ± 0.1 °C 以内におさまっている。

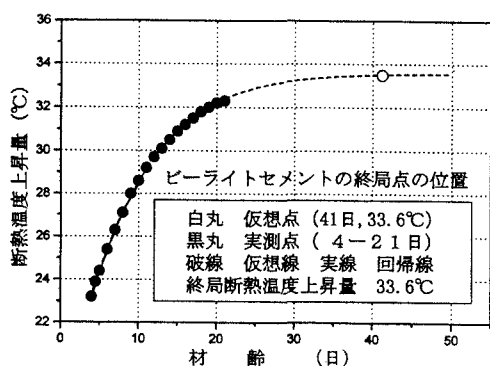


図4 ビーライトコンクリートの終局位置

4.5 日で算出した場合は、1.2 °C 上昇してから温度上昇が停滞すると見込んだ値となっている。数多くのデータで検討を行ったが、測定最終日の近傍にならないと、誤差が ± 0.1 °C 以内におさまらない事例もあった。これは、測定機の断熱状態の機差によるものと考えられる。表 2 の結果は、理想的な断熱状態が保たれると、断熱温度上昇は統計熱力学の法則に従うことを示唆している。

表2 温度が上昇中に測定を終了した場合の Boltzmann 回帰の精度

a. 算出 材 齢 (日)	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
b. 温度上昇量 (°C)	40.3	42.3	43.5	44.2	44.8	45.2	45.4	45.7	45.8	46.0	46.0
c. 算出終局値 (°C)	45.1	45.7	46.5	46.1	46.0	45.9	45.8	45.8	45.8	45.9	45.9
d. 見込上昇量 (°C)	+4.8	+3.4	+3.0	+1.9	+1.2	+0.7	+0.4	+0.1	± 0.0	-0.1	-0.1
e. 終局値誤差 (°C)	-0.8	-0.2	+0.6	+0.2	+0.1	± 0.0	-0.1	-0.1	-0.1	± 0.0	± 0.0

c : 各算出日で測定を終了したと仮定した場合の K 値

d : その後の温度上昇量の予測値 (c - b)

e : 算出日の K 値と最終測定日の K 値との差 (c - 45.9)

5. まとめ

以上のようにビーライトコンクリートなどの特殊コンクリートを含めて、Boltzmann 式で終局断熱温度上昇量を求められる可能性が大きいことを示唆した。各位に追試して頂ければ幸いである。また、Boltzmann の回帰曲線に合致する各種特性値、例えば、紙面の都合で例示できないが、強度、水和熱その他の終局値が Boltzmann 回帰で求められることの可能性が大きいという検討結果も得られている。