

論文 高強度コンクリート部材の水和熱による温度履歴と温度応力の解析

近藤 吾郎*¹・森田 司郎*²

要旨：高強度コンクリート部材においては、水和熱の蓄積による温度履歴が過酷なため温度ひび割れが生じるなど温度応力の増進が著しくなる。本研究は、水和発熱速度の温度依存性を考慮した水和発熱モデルを梁部材を対象とした温度解析に適用し、得られた部材の温度履歴を用いた温度応力解析を行って、打設時期や梁の外部拘束の相違が温度応力の発達状況に及ぼす影響を検討するものである。

キーワード：高強度コンクリート、温度応力、セメントの水和発熱、クリープ

1. はじめに

高強度コンクリートの利用を目的とした実大施工実験の報告がなされているが、場所打ちの場合の梁部材にはほとんど例外なく水和熱の蓄積による温度履歴に起因したひび割れが生じている。

本研究は、高強度コンクリート梁部材を対象として温度応力の発生状況を解析的に追跡したものである。温度応力の算定には、条件として部材内部の各位置における温度履歴が必要とされるが、建築部材のように断面寸法が小さい場合には、部材内部の温度は断熱条件とは異なるため断熱温度上昇に基づいてセメントの水和発熱を求める従来の方法では温度履歴の予測における精度が期待できない。そこで、任意の温度条件に適用できる水和反応の温度依存性を考慮した水和発熱モデルを用いた温度解析を行い、その結果を実測温度履歴と比較してその精度を確認した。温度応力解析においては、高強度コンクリートのクリープ特性を反映したモデルを用い、打設時期の相違や梁の軸方向外部拘束が温度応力に及ぼす影響を検討した。

2. 高強度コンクリート梁部材の水和熱の蓄積による温度解析

2. 1. 解析対象部材

解析対象は、著者らが温度履歴の実測を夏期と冬期に行った梁部材を模した供試体(梁幅500mm, 全せい900mm, 長さ780mm)とした[1]。実部材の梁材軸方向の熱伝達条件にあわせて、両妻面には厚さ200mmの発泡スチロールを設けて保温したものである。コンクリートの調合は表-1に示すように水セメント比が26%、60%の2種類で、セメントは普通ポルトランドセメント、混和剤にはアミノスルホン酸系の高性能AE減水剤を使用したものとした。型枠は12mm厚のコンパネ製で、脱型を行う材齢7日まではシート養生としたものである。

2. 2. 解析方法

(1) 水和発熱のモデル化

比較的部材寸法が小さい建築部材では断熱状態に近いマスコンの場合と異なり、水和発熱速度の温度依存性を考慮することがより重要となる。この水和発熱の温度依存性について、内田らは積算発熱量に基づく水和発熱モデル[2]を提案している。このモデル

表-1 コンクリートの調合

調合量(kg/m ³)				W/C	Ad.
W	C	S	G	(%)	(kg/m ³)
212	353	840	840	60	0
177	682	784	784	26	23.9

*1 千葉大学工学部助教授、工博（正会員）

*2 日本建築総合試験所所長、工博（正会員）

では、温度依存性は次式のアレニウス式で表され、活性化エネルギー E はセメントが水と接触し
てからの発熱量（積算発熱量）の関数として表されるとするものである。

$$h_T = h_{T_0} \cdot \exp\left(-\frac{E}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right) \quad (1)$$

ここで、 h_T は温度 T (K)における水和発熱速度、 h_{T_0} は基準温度 T_0 (K)における発熱速度、 R は気体
定数を表す。

水セメント比45%と26%の場合の水和反応速度を実測した結果[3]から積算発熱量と発熱速度の
関係を図-1に示す。同図中には、積算発熱量10J/gごとに20℃と37℃の実測発熱速度から式(1)
を用いて活性化エネルギーを逆算し、56℃での発熱速度を計算した結果を併記した。この計算値
と実測値の比較から、反応初期には計算値と実測値は対応するが水和反応の進行とともに計算値
は過大評価し、特に発熱速度がピークとなる付近で特に顕著である。

この水和進行状態では、セメント粒子表面に水和生成層が形成され、この生成層内では水やカル
シウムイオンなどの物質移動が生じ、この層を透過した物質が水和反応に消費されている。友
沢は、この物質移動量と化学反応により消費される量が等しいことから、水和反応速度は物質移
動抵抗と化学反応抵抗の直列合成抵抗によって支配されるとしている[4]。ここでは、水和反応速
度は物質移動抵抗が化学反応抵抗より大きい場合には、化学反応抵抗の大きさに関わらず物質移
動量により制限され、逆に化学反応抵抗が大きければ反応に消費される以上の物質移動は生じな
いとして、図-1の計算値と実測値の相違は20℃、37℃の条件では水和反応速度は化学反応律速
であり、56℃の条件では拡散律速下にあるためと解釈すれば、任意の温度 T (K)での発熱速度 h_T は
次式によって表すことができる。

$$h_T = \min(h_1, h_2) \quad (2)$$

ここで、 h_1 、 h_2 はそれぞれ化学反応律速、拡散律速
の場合の発熱速度を表し、20,37,56℃での発熱速度
 h_{20} , h_{37} , h_{56} を用いて次のように表すことができる。

$$\begin{aligned} h_1 &= h_{20} \exp\left[-\frac{E_1}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{293}\right)\right] \\ h_2 &= h_{56} \exp\left[-\frac{E_2}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{329}\right)\right] \\ -\frac{E_1}{R} &= \ln\left[\frac{h_{37}}{h_{20}}\right] / \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{310}\right) \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、水和が進行して20℃、37℃でも拡散律速下
にあると考えられる場合には $-E_1/R$ はおおよそ4000(K)
となることから、 $-E_2/R$ は4000(K)とした。

このモデルでは、特に水セメント比が45%以上のコン
クリートについて顕著にみられた高温度下での発熱
量の低下を表現することができない。この現象は、緻
密な水和生成物が形成されるため拡散抵抗が増加する
ためとされる。ここでは、このような拡散抵抗の増加
を水和生成層の厚さを割増して表現できると仮定して、

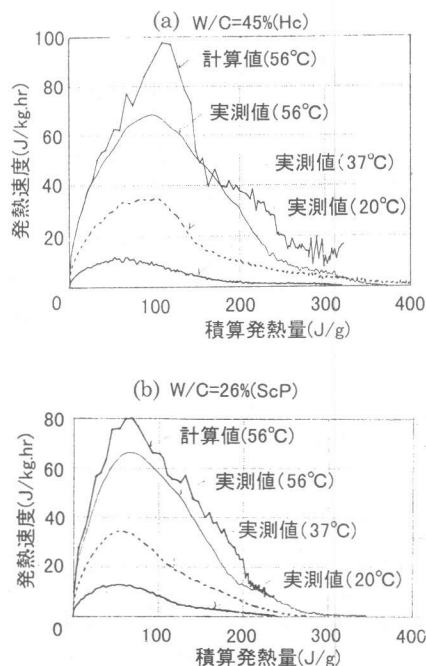


図-1 水和発熱特性

水和進行度を表す積算発熱量は h_1 の時間積分量で与えられるとした。この仮定についてはさらに検討が必要ではあるが、56℃での実測値についてこの定義による積算発熱量の割増によって、図-1において積算発熱量が150J/gを越える範囲での計算値との相違が改善される。このようにして積算発熱量に対する20,37,56℃の実測値を図-2に示す。ここで、水セメント比26%の場合には350J、45%の場合には400Jで発熱速度が0となるとして実測データの不足を補完した。

(2) 解析条件

コンクリートの熱的性質は、水セメント比に関わらず容積比熱 $3\text{J}/\text{cm}^3\text{C}$ 、熱伝導率 $125\text{J}/\text{cm}\cdot\text{hr}\cdot\text{C}$ 、部材表面での熱伝達率を $3.35\text{J}/\text{cm}^2\cdot\text{hr}\cdot\text{C}$ とした。コンクリートの初期温度には、夏期30℃、冬期19℃と打設直後の実測温度を与えた。発熱開始までの遅延時間は解析では考慮せず、打設後直ちに水和発熱が進行するものとして、材齢7日まで15分の時間刻みで温度解析を行った。外気温度条件には、実測結果を基に材齢7日までの平均温度として、夏期には24℃、冬期には8℃の一定温度を与えた。なお、水セメント比60%のコンクリートの水和発熱特性は、20,37,56℃の発熱速度の計測結果では水セメント比45%と相違ないこと[3]から、図-2(a)に示す発熱特性を用いた。

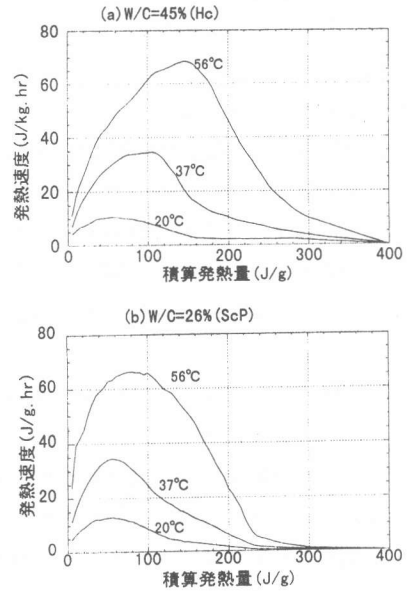


図-2 積算発熱量の修正

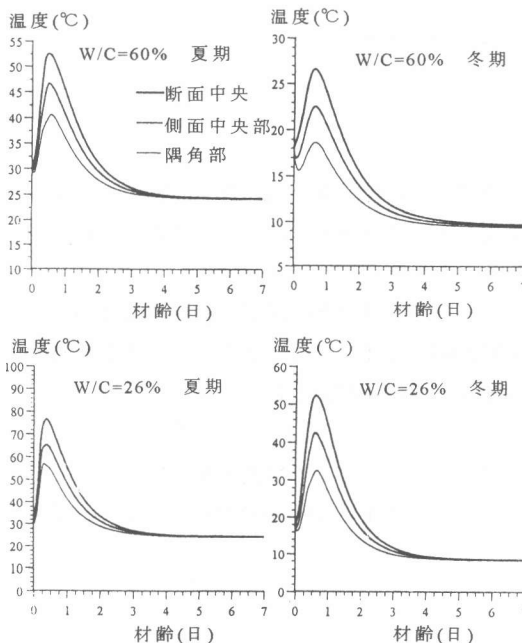


図-3 温度解析結果

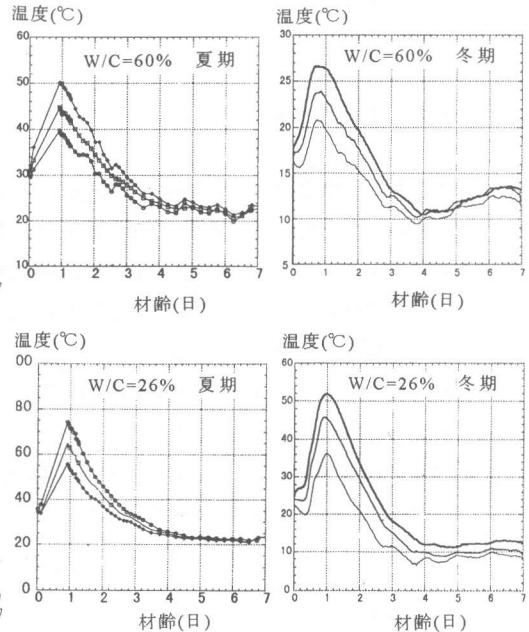


図-4 実測温度履歴

3. 温度解析結果の概要

温度解析結果得られた断面内の3点（断面中心、側面中央、隅角部）の温度履歴を図-3に、実測結果を図-4にそれぞれ示す。夏期の実測結果では、計測装置の異常により打設後1日のデータが欠落しているが、水セメント比26%のコンクリートには高性能AE減水剤を使用しているため10時間程度、混和剤を使用していない水セメント比60%については2時間程度の遅延時間があることを考慮すれば、最高温度やその時の材齢などよく対応することが認められ、温度依存性を考慮した水和発熱モデルの検証が行えたといえる。ただし、断面中心と表面での温度差は実測結果に比べやや大きいこと、最高温度から外気温度に平衡するまでの温度降下速度が大きいことなど、解析条件を含めてさらに検討する余地がある。

3. 高強度コンクリート部材の温度応力解析

3. 1. 解析の概要

(1) 温度履歴下での強度と剛性の進展のモデル化

コンクリートの弾性係数は材齢の進行にしたがって増進するが、変動温度下では強度発現とともに温度の影響を強く受ける。この温度効果を考慮するため、温度解析の際に水和進行度の指標とした積算発熱量に基づいて、発現強度、剛性進展を評価するものとした。したがって20℃を規準とする等価材齢 te は、次式で与えられる。

$$te = \int h_1 / h_{20} dt \quad (4)$$

この等価材齢を用いて圧縮強度 F_c を、 F_c から弾性係数 E_c とポアソン比 ν をそれぞれ次のように与えた。

$$\frac{F_c}{F_c^\infty} = \frac{te}{a + te} \quad (5)$$

$$E_c(\text{kgf/cm}^2) = 15000\sqrt{F_c(\text{kgf/cm}^2)} \quad (E_c(\text{MPa}) = 4743.4\sqrt{F_c(\text{MPa})}) \quad (6)$$

$$\nu = [1 - \frac{E_c}{E_{28}}(1 - 2\nu_{28})] / 2 \quad (7)$$

ここで、 F_c^∞ は無限材齢の圧縮強度、 E_{28} は28日材齢でのヤング係数、 ν_{28} は28日材齢でのポアソン比(=0.2)をそれぞれ表す。式(7)では、ポアソン比 ν は、コンクリートの硬化過程において体積弾性係数が変化しないという条件から求めたものである。

なお、強度発現性状を表す定数 a は、封緘養生したシリンダーの圧縮試験結果[5]から、26%の水セメント比の場合で1.9(day)、水セメント比60%で4.75(day)とした。またコンクリートの無限材齢での圧縮強度は、それぞれ800kgf/cm²(78.4MPa)、300kgf/cm²(29.4MPa)とした。

(2) クリープ特性

初期材齢の高強度コンクリートを対象とした乾燥収縮により生じる体積変化が拘束され生じる拘束応力と拘束ひずみの推移の計測結果から、クリープ則を評価した報告[5]を参考にして、圧縮、引張とも次式のクリープ係数を用いた。

$$\begin{aligned} \phi_{ij} &= \phi_N \rho(i, j) \xi(j) \\ \rho(i, j) &= 0.132 \ln[(i - j) + 1] \\ \xi(j) &= 10.28 / (5 + \sqrt{j}) \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、終局クリープ係数 ϕ_N は高強度コンクリート、普通強度コンクリートとも4とする。また i は現在の材齢(day)、 j は載荷材齢(day)をそれぞれ表し、温度効果を考慮してそれぞれ式(4)で与えられる等価材齢を与えた。ただし、引張と圧縮のクリープ特性が異なること、コンクリートの乾燥の影響、回復クリープやクリープの温度効果などについて、このクリープモデルの妥当性については検討の余地がある。

3. 2. 温度応力解析結果

解析条件は、外部拘束により梁材軸方向の伸縮が完全に拘束されているケースと外部拘束がなく梁に軸力が作用しない(主筋は考えない)ケースとした。両ケースとも断面内の軸方向には定ひずみ状態として、温度応力によるひび割れ発生はしないと仮定した。実際のはりは、架構や軸方向鉄筋により拘束を受けるので、この2ケースの間にあることになる。温度解析結果は材齢7日までしか計算されていないが、材齢7日の断面内の温度はほぼ外気温度と平衡しているので、その後の温度変化はないとした。

高強度コンクリートの場合の材齢7日と28日における温度応力分布を図-5にまとめて示す。この図は、断面内応力である $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ と軸方向応力 σ_z をそれぞれ断面の中心を原点とした等高線図で表したもので、応力度の単位は kgf/cm^2 である。いずれの場合も、断面内応力に比べ軸方向応力が大きいことがわかる。特に外部拘束の影響は大きく、夏期だけでなく冬期においても断面中心部の引張軸応力による貫通ひび割れを避けることができないことがわかる。外部拘束が無いとした場合でも内部拘束により夏期には断面中央には $20\text{kgf/cm}^2(2\text{MPa})$ を越える引張軸応力が生じることから、表面に現れない内部ひび割れとして潜在している可能性がある。材齢28日ではクリープによって材齢7日より温度応力は緩和されるが、冬期に比べ夏期ではクリープによる応力緩和が望めず高い温度応力を維持している。外部拘束が無い場合においても部材中心部にはかなりの引張軸応力が生じていることから、はり主筋による拘束によっても断面中心部でひび割れが発生する可能性がある。

一方、普通強度のコンクリートの場合には、温度応力の発達する状況は定性的には高強度コンクリートと同じであるが、応力の大きさは全く異なる。たとえば、完全拘束した冬期の場合において、材齢7日の断面中心での軸引張応力は $16\text{kgf/cm}^2(1.6\text{MPa})$ で、この時の発現強度 F_c は $100\text{kgf/cm}^2(9.8\text{MPa})$ 程度であるので、この材齢でひび割れ発生の可能性がある。しかしながら、材齢28日では $6\text{kgf/cm}^2(0.6\text{MPa})$ とクリープにより軸引張応力は緩和される。したがって、材齢28日では、断面中心での軸引張応力が $30\text{kgf/cm}^2(3\text{MPa})$ を越える夏期に外部拘束を受けるケースの他には問題となるような温度応力が生じることはない。

4. まとめ

(1) 普通強度と高強度コンクリートの水和発熱速度の実測結果から温度依存性を考慮した水和発熱速度をモデル化し、これを用いた温度解析により異なる環境温度条件における温度履歴を精度よく追跡することができた。

(2) 高強度コンクリート部材では、軸方向に外部拘束を受ける場合には温度応力は著しく増加し、温度ひび割れの発生をさけることができない。拘束のない場合でも施工時期に関わらず内部拘束により $20\text{kgf/cm}^2(2\text{MPa})$ 程度の軸方向引張応力が初期応力として潜在していることが示された。

(3) 普通強度のコンクリートの場合、温度ひび割れの可能性があるのは夏期に拘束を受ける場合に限られる。

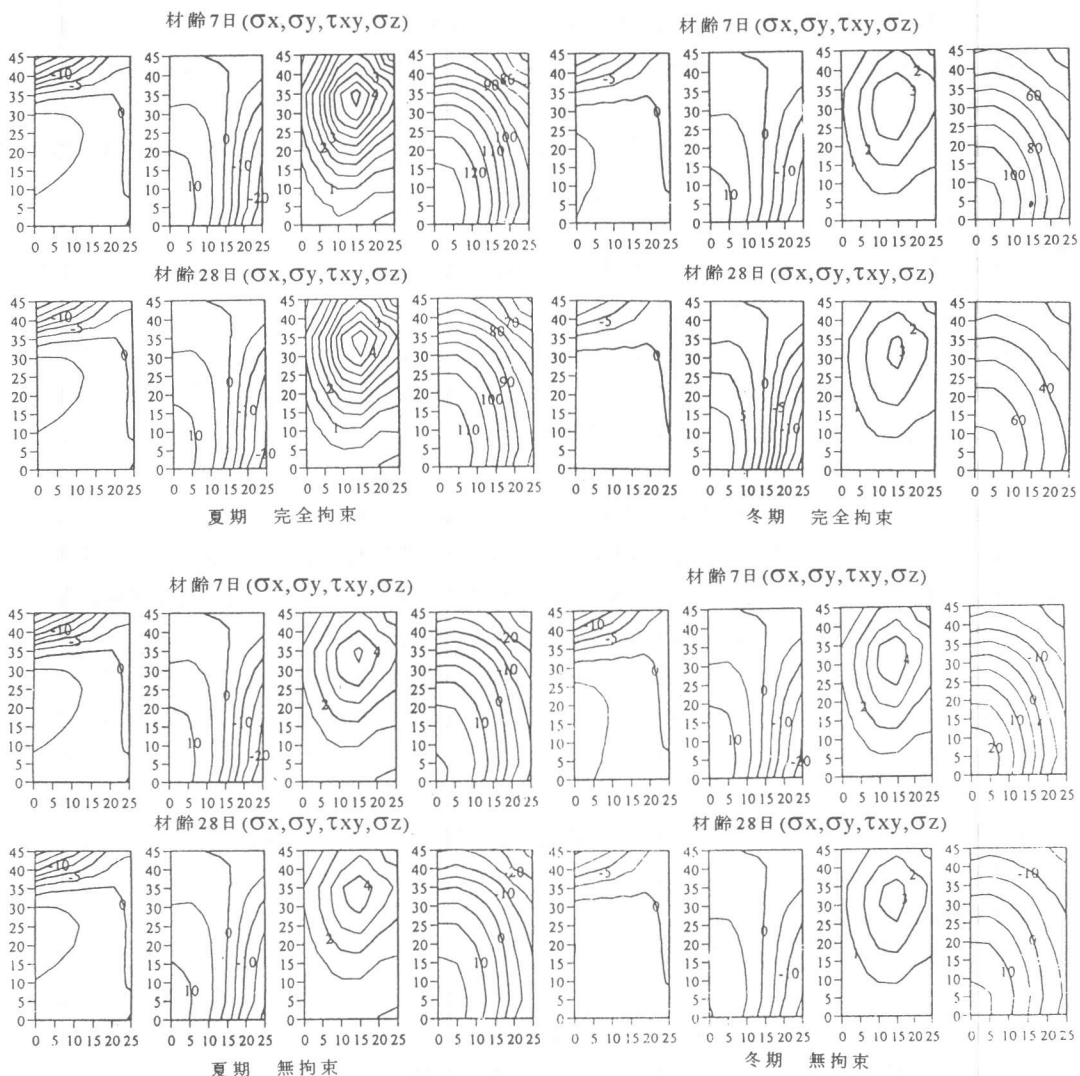


図-5 温度応力解析結果 (図の縦軸、横軸は断面中心からの距離(cm)を表す。)

参考文献

- [1] 近藤吾郎ほか：高強度コンクリート部材内部の水和熱による温度履歴、セメントコンクリート論文集、No.46、1992
- [2] 内田清彦ほか：積算発熱量に基づくセメント水和発熱速度の定式化と温度上昇の予測、コンクリート工学、Vol.24、No.4、1986.4
- [3] 浅井あかねほか：温度依存性を考慮したセメントの水和発熱特性、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.18、No.1、1996
- [4] 友沢史紀：セメントの水和反応モデル、セメント技術年報、Vol.28、1974
- [5] 楊恩翼ほか：若材齢において一軸変形拘束を受けるコンクリートの特性、コンクリート工学、Vol.7、No.1、1996.1