コンクリートの受熱温度推定方法の提案

コンクリート系構造物の火害診断手法に関する研究 (その1)

PROPOSAL OF A NEW METHOD TO PRESUME HEATED TEMPERATURE
IN CONCRETE

A study on diagnosis method of fire-damaged concrete structures (Part 1)

吉田正友*, 岡村義徳**, 田坂茂樹**

Masatomo YOSHIDA, Yoshinori OKAMURA and Shigeki TASAKA

This paper describes a new method to presume temperatures in concrete suffered from fire. In this paper, the temperatures in fire-damaged concrete member were presumed, aiming at admixture responsive to thermal career. Although the quantity of admixture in concrete is small, the absorbance for its ultraviolet rays can be measured in high sensitivity. Concrete test samples were heated at every 100°C from normal temperature up to 600°C, and the absorption curves were obtained at each temperature. The relations between heated temperatures and absorbances were derived from the absorption curves measured, and showed almost linear relations. Therefore, by measuring the ultraviolet absorption spectra of admixture, it was found that heated temperatures in concrete were possible to be presumed from absorbances.

Keywords: concrete, fire-damaged diagnosis, admixture, UV spectrum,
heated temperature, presumption method

コンクリート, 火害診断, 混和剤, UVスペクトル, 受熱温度, 推定方法

1. まえがき

鉄筋コンクリート(以下、RCと呼ぶ)造建物の火災においては、火災区画内で長時間、火災が継続し、大被害を受ける場合が多い。このような建物を再使用するかどうかの評価は火害の程度によって大きく異なる。火害を受けたRC造建物の調査においては外観上の損傷だけではなく、主体構造部のコンクリートや鉄筋の受熱温度も推定し、各部材の被害度をより正確に診断することが重要である。現在、コンクリートの受熱温度推定方法として理論計算による方法及び化学的手法による方法があるが、いずれの場合もより正確な受熱温度を把握するには有効な手段とは言い難い。そこで、筆者らは、コンクリート中に微量に含まれる有機系化合物、即ち、“コンクリート用化学混和剤”(以下、混和剤と呼ぶ)の敏感な熱的变化に着目し、コンクリートの受熱温度を推定する方法を提案する。

2. コンクリート系構造物の火害診断手法の現状とその問題点

2.1 火害を受けたRC造建物の被害度推定方法

火害を受けたRC造建物の評価方法のフローを図1⁴⁾に示すが、図中の「被害の評価」の段階で、「構造物は安全か?」の判断の際に、各部材の被害度をより正確に診断することが必要である。

現在、火害を受けたRC造建物の主な被害度推定方法には、次に示すものがあるが、それぞれにその下に示す問題点がある。

(1) 目視観察^{5), 6)}

被災空間の全域について、外観上の被害状況を目視観察する。具体的には、コンクリートの変色、爆裂、ひび割れ、浮き、剝離、変形等を詳細に観察する。概括的な被害等級の分類しかできない。

(2) シュミット・ハンマーによるコンクリートの反ば

本論文は文献1)~3)の内容を取りまとめ、加筆修正したものである。

* (財)日本建築総合試験所・工修

** (財)日本建築総合試験所

General Building Research Corp., M. Eng.

General Building Research Corp.

図1 火災を受けた構造物の評価方法

つ硬度測定^{5), 7)}

シュミット・テスト・ハンマーにより加熱表面の反ばつ硬度を測定し、加熱表面の圧縮強度を推定する。表面の反ばつ硬度しかとらえられず、深さ方向の強度分布は推定できない。また、加熱後の圧縮強度について、シュミット・ハンマーによる既往データが不十分であるため、被害程度の相対的な評価しかできない。

(3) コンクリートの中性化試験^{5), 6)}

コンクリートが500℃以上の加熱を受けると中性化することを利用して、コンクリートのはつり部分にフェノール・フタレイン溶液を噴霧して、中性化深さを測定する。長期間経過したコンクリートについては、中性化の進行が経年劣化によるものか、または火災によるものかの判断が困難である。

(4) コンクリート・コアによる圧縮強度試験⁵⁾

コンクリート・コアを採取して、残存圧縮強度を推定する。しかし、一般にコアは深さ方向で被害度が異なるため、当該部分の残存強度の推定は困難である。

(5) 超音波による加熱劣化測定^{5), 7), 8)}

コンクリートの両面で超音波の透過時間を測定し、劣化状況を調べる。部材の全厚に対する平均透過時間しか求められないので、深さ方向の劣化状況は分からない。

(6) マイクロ波による劣化診断⁹⁾

コンクリートのマイクロ波の特性値（減衰定数及び位相定数）を調べ、高温時の劣化度（残存強度）を把握する。深さ方向の劣化状況の分布は求められない。また、コンクリートの含水率によって測定誤差が生じる。

(7) 熱ルミネッセンスによる方法¹⁰⁾

火災を受けたコンクリートから採取された砂の中に残された熱ルミネッセンスを測定し、劣化状況を調べる。電子の移動に関わる測定となるため、高度な測定技術を要し、実用には供しない。また、コンクリートの受熱温度を500℃でしか判断出来ない。

以上、7つの診断方法を示したが、これらの方法はいずれも、コンクリート部材の深さ方向に対する正確な情報を与えるものではない。より正確な診断のためには、主体構造内部のコンクリートや鉄筋の受熱温度を的確に推定することが必要になる。

2.2 コンクリートの受熱温度推定方法

現在用いられている主なコンクリートの受熱温度推定方法には、次に示すものがある。

(1) 化学的手法による方法¹⁾ ——— コンクリートの中性化、炭酸ガス・遊離石灰量の分析及びX線回折法等により受熱温度を推定する。

(2) 理論的計算による方法²⁾ ——— 火災室内の寸法・形状、可燃物量（内装材料及び積載物の種類と量）及び窓等の開口条件を設定し、火災性状を予測し、内部温度を計算する。

(3) 火災状況より求める方法 ——— 消防署資料、火災室内の使用材料の燃焼特性及び桧木等の木材の炭化深さ・炭化速度より火災性状（火災継続時間及び火災最高温度）を推定し、さらにコンクリートの変色状況よりコンクリート表面温度の推定を行なった上で、内部温度を計算する。

上記の方法には、次に示す問題点がある。

(1) 無機物質の場合、消火時の放水等により化学的変化が火害を受ける前の状態に戻る可能性がある。

(2) 実火災の性状を正確に把握することは困難であり、また、火災前の火災室内の条件が正確に把握出来ないことが多い。コンクリートの内部温度は加熱時間及び加熱温度によって大幅に異なり、火災規模の適正把握が必要となる。

(3) 実火災の性状を正確に把握することは困難である。

また、コンクリートの微妙な変色状況の判断も容易ではない。

3. コンクリートの受熱温度推定方法の選択

3.1 UVスペクトル法の採用

現在、混和剤としては、減水剤が主に用いられ、そのうち、リグニンスルホン酸系（以下、リグニン系と呼ぶ）混和剤を使用するケースが最も多く、ナフタリンスルホン酸系（以下、ナフタリン系と呼ぶ）混和剤がこれに次ぐ。これらの混和剤は2つ以上の二重結合が単結合を挟んだ共役二重結合をもつ有機系化合物であるため、紫外線（波長域：200～400nm）を吸収する度合（以下、吸光度Aと呼ぶ）が大きい。一方、コンクリートの主構成材である無機物質は紫外線吸収がほとんど認められない。そこで、筆者らは混和剤のこの性質に着目し、温度履歴を経たコンクリートの吸光度の変化を調べることにした。分析にあたっては、微量でも定量分析が可能である紫外吸収スペクトル（以下、UVスペクトルと呼ぶ）法を採用することとした。吸光度Aは(1)式で示される。

$$A = \log(1/T)$$

$$= a \cdot c \cdot l \quad (1)$$

ここで、T:透過率 (=透過光強度/入射光強度)

a:吸光係数 (1/cm)

c:濃度

図2 リグニン系混和剤の示差熱重量分析結果

1: 吸収層（セル）の厚さ（cm）

(1)式で、試料の吸光係数 a を一定とすれば、試料の濃度 c により吸光度 A が変化することが分かる。測定には、分光光度計（UV-200、島津製作所製）を用いた。

3.2 コンクリートのUVスペクトル特性

図2は、リグニン系混和剤の熱特性を調べる目的で、示差熱天秤分析（DTA、TGA）を行なった結果である。約200℃から発熱反応による重量減少が始まり、約500～600℃で収束する。これは約200℃から混和剤の熱分解反応が起こり、約500～600℃ではほぼ反応が終了するためである。

図3は、リグニン系混和剤を110℃より700℃まで100℃ごとに加熱して、波長250～400nmにおける波長と吸光度の関係（以下、吸収曲線と呼ぶ）を求めたものである。履歴温度110℃における吸光度は波長約340nmでピークを示した。また、履歴温度の上昇とともに吸光度は全波長域にわたり減少し、履歴温度500℃以上ではほとんど変化しないことが分かる。

混和剤が混入されているコンクリートの吸収曲線は、図4に示されており、図3の混和剤の吸収曲線と類似の

特性が得られた。

一方、図5は混和剤が混入されていないコンクリートの履歴温度110℃と500℃での吸収曲線である。混和剤混入の場合と異なり、波長約340nmにおける吸光度のピークは現れない。また、履歴温度が上昇しても、吸光度の減少はわずかである。

混和剤は有機系化合物を含むため、通常、約400～500℃で燃焼し、無機イオンも生成される。その無機イオン（主に炭酸イオン、硝酸イオン、硫酸イオン、塩素イオン及びりん酸イオン）がUVスペクトルを用いた本推定方法に与える影響を調べるため、それらのUVスペクトルを分析した。なお、無機イオン溶液の濃度はすべて500mg/lであった。その結果、図6に示すように硝酸イオンを除いた他のイオンは250～400nmにおける波長域の吸光度はほぼ0に近い値であった。硝酸イオンについては、波長260nmで最小の値を示した。波長260nmにおける無機イオンの吸光度を表1に示す。表1の結果は常温における吸光度を示しているが、実際、燃焼状態では（約400～500℃）、吸光度はさらに減少するので、無機イオンについてはさらに影響は少なくなり、無視できるものと考え

図3 リグニン系混和剤の吸収曲線

図4 混和剤入コンクリートの吸収曲線

られる。

コンクリートの受熱温度推定にあつたては、①履歴温度と吸光度との間に明確な因果関係のあること、②燃焼にともなう無機イオンの影響を出来る限り排除すること、の2点が必要である。そこで、本推定方法では、この2点を満足する波長260nmにおける吸光度を採用することとした。

なお、本手法を長期材令のRC造建物に適用する場合には、リグニン系混和剤の経年変化が懸念されるが、有機系材料である混和剤が単体では、化学的变化を起こし、経年変化を生じる。しかし、混和剤が無機物質であるコンクリート中に含まれている場合には、化学的变化を受けず、経年変化しないので、本手法を長期材令のRC造建物に適用するのは差し支えない。

図5 混和剤無混入コンクリートの吸収曲線

図6 無機イオンの吸収曲線

表1 無機イオンの吸光度

イオン名	吸光度
炭酸イオン	0.00
硝酸イオン	0.055
硫酸イオン	0.00
塩素イオン	0.00
磷酸イオン	0.00
(参考)混和剤	0.99

4. UVスペクトル法によるリグニン系混和剤入りコンクリートの受熱温度推定

混和剤のうち、現在、約8割以上がリグニン系混和剤が用いられている。そこで、リグニン系混和剤入りコンクリートについて受熱温度推定方法を確立するための実験を実施した。UVスペクトル法を用い、履歴温度と吸光度の関係を把握するとともに、①混和剤の添加率の違いが吸光度に明確に現れるか、②試料粉末の採取段階におけるセメントペーストの含有量の差違が測定結果にどのような影響を与えるか、を調べた。

4.1 実験概要

4.1.1 測定用試料の作成

表2に示す2種類の調合（混和剤は通常の使用量とその2倍の量）により、リグニン系混和剤を用いた300×300×40mmの大きさをもつコンクリート試験体を作成した。試料の作成手順を以下に示す。

- 1) 7日以上気乾養生させた試験体を150×40×40mmの試験片に切断した。
- 2) 上記試験片を電気炉内にて各所定温度（110℃、300

表2 リグニン系混和剤入りコンクリートの調合
(セメント100に対する重量比)

セメント (普通ポルトランド)	水	細骨材 (砂)	粗骨材 (碎石)	混和剤 (AE減水剤)
100	50	250	360	0.25及び0.5

表3 試料の種類

試料記号	混和剤の添加率(%) (セメントに対して)	フルイ・サイズ (mesh)
A	0.25	10
B	0.25	35
C	0.5	10
D	0.5	35

図7 履歴温度と吸光度の関係

℃、400℃、500℃及び600℃)で60分間加熱した。

3) 加熱終了後、試験片を砕石が現状のまま残る程度に粉碎した。フルイのサイズにより採取される試料中のセメント・ペースト量を違えるため、10mesh及び35meshのフルイにて通過した部分を振動ミルにて微粉末(粒径: 5~10 μ m)とした。すなわち、フルイ目が細かいほど、セメントペースト量は多くなっている。

4) 試料粉末25gに純水100mlを加えて120分間煮沸した後、5ろ紙を用いて吸引ろ過し、ろ液を試料溶液とした。なお、試料の種類は表3に示す4種類である。

4.1.2 UVスペクトルの測定

前述の試料溶液を分光光度計に装着し、波長域200~400nmにおけるUVスペクトルを求めた。

4.2 実験結果及び考察

図7に波長260nmにおける履歴温度と吸光度との関係を示す。図7より混和剤の添加率が多いほど、また、フルイサイズが小さいほど、吸光度が大きくなることが分かる。混和剤の添加率及びフルイサイズに関わらず、履歴温度100~500℃の範囲では、概ねリニアな関係となり、

図8 履歴温度と吸光度の関係のモデル化

履歴温度が高くなるにつれて、吸光度は小さくなる傾向が認められた。

4.3 推定精度向上の検討

図7の結果から、実用面への適用を考えると、次の3点に関して、推定精度に問題があると考えられる。①履歴温度と吸光度の関係で直線上から逸脱する箇所がある、②混和剤の添加率の差が明確に現れていない箇所がある(試料記号: BとCの300℃~600℃の部分)、③図2に示す混和剤の熱分解の過程から分かるように、吸光度は200℃までは一定となり、500℃以上では、混和剤が完全に熱分解するため、混和剤の添加率に関係なくほぼ同一の値とならねばならない。従って、履歴温度と吸光度の関係は模式的には図8のようにモデル化される。上記①~③の主な原因として次の3点を考えた。

a. 試料抽出液の炭酸化による白濁・・・抽出液中に溶解しているセメント中の Ca^{2+} と大気中の CO_2 の反応により水不溶性 CaCO_3 が生成され、抽出液中に濁りを生じるため、正しい値よりも吸光度が相当増加する。

b. 混和剤のセメントに対する吸着・・・混和剤自身がセメントに対し吸着性がある。特に加熱温度が低いほど吸着性は高い。そのため、混和剤の抽出量が少なくなり、吸光度が正しい値よりも減少する。

c. 試料採取量・・・試料採取量が多くなるほど、その中に含まれるセメント量も増える。そのため、b.と関連して、混和剤の抽出処理が容易でなく、抽出量が少なくなり、吸光度が正しい値よりも減少する。なお、図9には試料の採取量を1gから25gまで変化させ、それぞれ煮沸抽出した後、波長260nmにおける採取量1g当りの吸光度を求

めた結果を示す。

上記、a.～c.の3点の原因を取り除くために、次のような方法を採用した。

a.については、抽出液を塩酸酸性(pH1.6)とし、水不溶性CaCO₃を分解し、濁りをなくした。

b.については、水による煮沸抽出の効率を高めるため、同一試料を数回繰り返し煮沸抽出を行ない、混和剤の抽出量を増した。

c.については、図9より、採取量としては1g当りの吸光度が最大となる量、3gを採用することとした。

上記の方法を採用し、推定精度の向上を図った結果、履歴温度と吸光度の関係は図10に示す一例のように、

図9 試料採取量1g当りの吸光度

図10 履歴温度と吸光度の関係
(混和剤混入コンクリート試験体)

200°C～500°Cまではほぼ直線関係となった。これを回帰分析した結果、実験値に対する直線の相関係数は0.995となり、非常に良く一致した。図10の結果のばらつきは、履歴温度に対しては±20°C以下である。図7と図10を比較すると、上記a.～c.の原因のうちa.(炭酸化による白濁)の影響が大きかったと考えられる。すなわち、加熱温度が低い範囲では吸光度がそのためにかなり大きくなり、100°C～200°Cの範囲で一定となっていない。受熱温度推定方法にはこれらの方法を採用することで、より高い精度の推定が可能となることが判明した。

なお、実際の火害建物に適用する場合には、混和剤の添加率が不明でも、本手法を使用することが出来る。すなわち、最初に、健全部分から採取したコンクリートについて、図10に示すような吸光度と履歴温度の関係(検量線)を求める。その後、火害を受けたコンクリート・サンプルの吸光度を求め、検量線を用いて履歴温度が求められる。

5. 結語

本報では、混和剤に着目し、新たなコンクリートの受熱温度推定方法を提案した。得られた結論は以下のように要約される。リグニン系混和剤については、UVスペクトル法を用いることにより、常温から600°Cまでの受熱温度を推定できることが判明した。これらの結果をもとに、本手法を実際の火害調査に適用する予定である。詳細に関しては次報にて報告する。

謝 辞

本研究の実験実施にご協力頂いた下手敏勝氏をはじめ関西保温工業㈱研究所の方々々に心より謝意を表します。また、本論文作成に当たり、有益な御助言を頂いた当試験所環境試験室長十倉 毅氏に心より謝意を表します。

参考文献

- 1) 吉田正友, 田坂茂樹: 火害を受けたコンクリートの受熱温度推定に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 1055～1056, 1990.10
- 2) 吉田正友, 岡村義徳, 田坂茂樹: 火害を受けたコンクリートの受熱温度推定に関する研究(その2 リグニン系混和剤入りコンクリートの場合), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 1165～1166, 1991.9
- 3) 吉田正友, 岡村義徳, 田坂茂樹: 火害を受けたコンクリートの受熱温度推定に関する研究, 日本火災学会研究発表会要集, pp. 58～61, 1992.5
- 4) Tovey, A.K.: Assessment and Repair of Fire-Damaged Concrete Structures -an Update, American Concrete Institute, SP-92, pp. 47～62, 1986
- 5) Schneider, U.: Repairability of Fire Damaged Structures(CIB W14 Report), Fire Safety Journal, Vol. 16, 1990
- 6) 松井嘉孝, 他13名: 構造物の耐用性診断とその対策, 新建築技術書7, 朝倉国社, pp. 151～152, 1976.5
- 7) Nasser, K. & Al-Manaseer, A.: Comparison of Nondestructive Testers of Hardened Concrete", ACI Material Journal, pp. 374～380, 1987.9

- 8) 付 思, 井出正男, 佐藤 寛: 超音波によるコンクリートの加熱劣化の測定に関する研究, 日本火災学会研究発表会概要集, pp. 54~57, 1992. 5
- 9) 太田福男: マイクロ波による火害コンクリートの劣化診断法に関する実験的研究, 第43回セメント技術大会講演集, pp. 546~551, 1989
- 10) Placido, Francis: Thermoluminescence Test for Fire-Damaged Concrete, Magazine of Concrete Research, Vol. 32, No. 111, pp. 112~116, 1980. 6
- 11) 岸谷孝一, 森実: 火害を受けた鉄筋コンクリート造建物の火害度と受熱温度の推定, 火災, No. 85, pp. 8~20, 1972. 5
- 12) 鹿島建設技術研究所編: 既存建物の耐力診断と対策, 鹿島出版会, pp. 105~107, 1978. 6

(1994年6月6日原稿受理, 1994年9月20日採用決定)