降雨後の影響下におけるパッシブサーモグラフィ法によるコンクリート診断

## 1. はじめに

日射量及び外気温の変動を利用したパッシ ブサーモグラフィ法は、加熱機器を利用する アクティブ法に比べて検査の効率性も高く、 広範囲に均一な熱量が供給されることから大 規模な構造物の診断に適している。しかし、 供給される太陽エネルギーは全日快晴ばかり ではなく曇り、雨の繰り返しで、特に降雨後 にはコンクリートへの吸水が温度上昇変化に 影響を及ぼすことが予測される。

そこで、本研究では、先ず降雨後の気象条 件が及ぼす健全部コンクリートの温度上昇変 化について、横浜市港北区役所の屋上で実測 された温度データを分析し積算日射量の相違 から明らかにした。また、欠陥部の温度上昇 変化については、水中浸漬して飽和状態にし た試験体、乾燥炉で乾燥した試験体から検討 した。さらに、熱伝導解析では計測されたコ ンクリート温度との比較を行い、降雨後の温 度変化の再現性について検討した。

#### 2. 日射量とコンクリートの温度上昇変化

日射量とコンクリート温度のデータは横浜 市港北区役所から提供された2006年8月と2007 年10月である。区役所屋上ではヒートアイラ ンド現象の緩和や省エネ対策に繋がる事業と して緑化内部温度及びコンクリート表面温度 (水平面)が1分間隔で計測されている。

# 2.1 積算日射量と温度上昇との関係

(1) 2006年8月の温度上昇

図-1は2006年8月1日から31日まで計測され たコンクリート表面の最大温度上昇とその最 大温度上昇までの積算日射量との関係である。 なお、この最大温度上昇は最大温度から日の 出時刻の温度を減算したものである。図-2に は両者の相関関係を示す。

その結果、17日、31日、14日及び10日は同 積算日射量と比較すると5℃以上も大きい特異 な温度上昇を示している。これらの気象条件 は、前日あるいは前々日が雨天となっている。 表-1に降雨時間帯と降雨時間及び合計降雨量



中央工学校 〇金光寿一 日大生産工 柳内睦人

図-1 積算日射量と温度上昇(2006.8)



図-2 積算日射量と温度上昇との相関 表-1 降雨時間と降雨量

雨日	時刻		合計雨量		
	始め	終わり	(分)	(mm)	
8	4:50	12:00	186	13.5	
9	0:14	23:00	660	102.5	
12	13:36	16:00	144	20.0	
15	9:13	10:00	47	1.0	
16	6:52	0:00	152	14.0	
17	0:53	8:00	103	18.5	
18	0:29	2:00	62	4.5	
23	10:47	11:00	13	1.5	
25	7:45	23:00	190	11.5	
26	0:46	1:00	14	4.5	
30	15:41	16:00	19	0.5	

を示す。特に、9日は102.5mm/日の大雨で、翌 日の10日は積算日射量が少ない割には最も温 度上昇量が大きくなっており、日射波形に乱 れがなければ更なる温度上昇が期待できる(図 -3,図-4参照)。また、17日は8:00まで雨であ るが、気化熱の影響も見受けられず急激な温

Concrete Diagnosis by the Passive Thermography Method under the Environment after Rainfall Juichi KANAMITSU, Mutsuhito YANAI

— 149 —







図-5 降雨後の日射量とBouguer式の比較

度上昇を示し僅か1,838W/m<sup>2</sup>・hで17.7℃上昇 している。ここに、降雨後の影響を受けると 思われる日は表-1に示すとおり、降雨の翌日 となる10、13、17、18、24、27及び31日であ るが、積算日射量に対して特異な温度上昇日 となったのは、10、14、17及び31日である。 13日は積算日射量が3,159W/m<sup>2</sup>・hで18.5℃の 上昇、18日は4,051 W/m<sup>2</sup>・hで18.1℃の上昇、 24日は1,946 W/m<sup>2</sup>・hで13.0℃の上昇、27日は 1,069 W/m<sup>2</sup>・hで10.4℃の上昇となっており、 特に18日は図-2に示す平均値を下回っている。 4,051W/m<sup>2</sup>・hでは、図-2の回帰式から21.7℃ 程度になるはずであるが18.1℃の温度上昇に 止まっている。この温度上昇変化に影響する 因子としては、日射量の他に風速、湿度、外 気温及び蒸発潜熱が考えられる。18日は時刻2 :00まで雨が降っており、日の出時刻までの時 間は186分間である。湿度は日の出時で91%、 日の入り時が73%で8月の平均値とほぼ同様で ある。しかし、風速が最大で15m/s、日の出時



図-7 積算日射量と温度上昇(2007.10)



図-8	積算日射量と温度上昇との関係	ł
	表-2 降雨時間と降雨量(2006.8	3)

	時刻		合計雨量		
I	始め	終わり	(分)	(mm)	
1	0:30	23:10	65	6.5	
2	10:00	10:55	55	2.5	
5	20:10	20:55	45	1.5	
8	10:00	12:45	10	1.5	
9	8:50	13:05	35	2.5	
10	4:10	4:15	5	0.5	
12	20:10	20:15	5	0.5	
19	19:40	23:30	125	19.5	
20	0:15	0:20	5	0.5	
26	6:05	21:20	110	25	
27	0:40	21:30	910	106.5	
30	23:20	23:50	30	2.5	
31	0:05	0:15	10	1.5	

から日の入り時までの平均風速も6m/sを超え ており8月で最も強い風を受けている。18日は この強風条件によって蒸発潜熱及び大気への 熱拡散が増加したものと考える。一方、降雨 が健全部の温度上昇に影響を与えるならば、 12日は144分間20mmの降雨量があり、特異な温 度上昇は14日ではなく降雨後の13日になる。 図-5に実測の積算日射量とBouguer式で最大日 射量を一致させて算出した積算日射量との割 合(日射変動)を示す。この13日の積算日射量 は1,898W/m<sup>2</sup>・h、温度上昇は17.0℃、日射変 動の割合は0.77で、14日はそれぞれ2,315W/m<sup>2</sup>・h、18.4℃、0.75である。降雨後に特異な温 度上昇を示した10日、14日、17日、31日と共 通している気象条件は、時刻8:00まで降って



図-9 日射波形の比較

いた17日を除くと、積算日射量は2,000W/m<sup>2</sup>・ h以上で、日射変動の割合では0.75以上となっ ている。

(2) 2007年10月の温度上昇

次に図-7は季節別の温度上昇を比較した 2007年10月1日から31日までの温度上昇と最大 温度までの積算日射量との関係である。また、 図-8には両者の相関関係を示す。表-2には降 雨時間と降雨量を示す。

その結果、図-2の8月と比較すると温度上昇 は積算日射量との相関が強くなっている。最 も温度上昇が大きくなった21日も降雨後では あるが雨量は少なく、最大風速は10m/sを超え ており積算日射量とほぼ比例関係にある。一 方、28日は27日の大雨により同積算日射量と 比べると2℃程度は温度上昇が大きくなってい る。28日の最大温度までの積算日射量は図-7 に示す通り2,341W/m<sup>2</sup>・hで日の出時からの温 度上昇は22.1℃である。しかし、日射波形の 乱れを実測の積算日射量と Bouguer式で算出 した積算日射量と比較すると(最大温度となっ た13:10まで)、0.82であり(図-9参照)、乱れ がなければ22.1℃以上の上昇量が得られたも のと思われる。なお、降雨後の6日については 積算日射量は最大温度となった時刻14:00まで 2,541W/m<sup>2</sup>・hであるが、Bouguer式で算出した 積算日射量との割合は0.53であり、16.6℃の 上昇量に止まっている。

このような降雨が影響するコンクリート表 面の温度上昇変化の理由は、表面が濡れてい る方がコンクリート表面の濃淡が乾燥時の灰 色よりも濃く日射吸収率が大きくなること、 また表面部に水分を含んでいる方が乾燥して いる場合よりも反射率が小さくなり吸熱量が 増加したことが要因と思われる。

## 3. 屋外実験と熱伝導解析による再現性

本実験ではコンクリート中の水分状態が欠 陥検出にどのように影響を及ぼすのかを明ら

		表-3	試験体一	覧	
試験体 記号		試験体	欠陥		実験条
		寸法(mm)	大きさ(mm)	彩 (mm)	件
	N1				乾燥
Ν	N2	200×200×100	なし		浸漬
	N3			気中	
	K1		2	20	浸漬
к K2 K3	300×300×210	100×100×5 (空洞)	40	浸漬	
	K3			40	乾燥





かにするために、絶乾・水中浸漬・気中試験 体の3パターンから健全部及び欠陥部の温度上 昇変化の違いについて検討した。また、二次 元非定常熱伝導解析ではコンクリートの熱特 性を変化させて実験値の温度変化との比較を 行い再現性について検討した。実験に供した 試験体一覧及び実験条件を表−3に示す。コン クリートの配合は、呼び強度40N/mm<sup>2</sup>、W/C=45 %、空気量は4.5%である。降雨を模擬したコ ンクリートへの吸水は打設後28日間水中養生 し、その後28日間の気中養生後に1日間水中浸 漬し、ポリエステルシートで密封して試験日 まで3日間放置したもの(浸漬と表示)、3日間 110℃の乾燥炉で乾燥した後、同様にポリエス テルシートで密封したもの(乾燥と表示)、ま た、28日間の水中養生後、さらに実験日まで 実験室内に放置したものである(気中と表示)。

赤外線カメラによる温度測定は、8月7日、8 日の2日間の時刻7:00から17:00まで20分間隔 で熱画像の撮り込みを行った。図-11には測定



写真-1 熱画像(8月7日, 8日)



図-12 解析モデル(図-10参照)



図-13 健全部 (N試験体)の温度上昇



図-14 欠陥部(K試験体)の温度差分布

された日射量と外気温を示す。平均風速は7日 が2.7 m/s、8日が2.0m/sであった。

# 3.1 含水率の経時変化

含水率の測定はコンクリート接触型水分計 [(HI-520):高周波容量式]にて行った。その 結果、水中浸漬したN2試験体と気中養生した N3試験体の時刻7:00の含水率は5.8%と5.0% で僅かな差であった。一方、欠陥部で測定し た各K試験体の欠陥深さまでの含水率は、欠陥 深さ20mmであるK1が6.2%で深さ40mmのK2は4. 6%である。その日射受熱による水分蒸発量の 経時変化は、時刻7:00から17:00まで積算日射 量6,851W/m<sup>2</sup>・hを受けているが極僅か1%程度 の減少となっている。また、8日の含水率変化 は7日とほぼ同様の天候であるが、その減少は 見られなかった。

# 3.2 赤外線カメラによる温度測定

写真-1に7日及び8日の時刻13:00に得られた K試験体の熱画像を示す。両日ともに各欠陥位 置には欠陥深さに対応した高温域を確認する ことができるが、特に欠陥深さ40mmであるK2 (浸漬)及びK3試験体(乾燥)は7日の方が鮮明 で、8日のK3については視覚的に欠陥を確認す ることは困難である。

#### 3.3 温度上昇と熱伝導解析による再現性

二次元非定常熱伝導解析は、汎用FEMプログ ラムCOSMOS/M を使用した。図-12に解析モデ ルを表-4に解析に用いた熱特性を示す。その 熱特性は、絶乾を想定した最小値から高含水 率を想定した最大値までの5ケースを比例関係 に設定して深さ40mmまでを一定変化させシミ ュレートした。また、熱伝達係数は14W/(m<sup>2</sup>・ K)の一定値としている。図-13は健全部温度を 比較したものである。熱パラメータ(cρλ)が 大きくなるほど健全部の表面温度は低下する ことになり、再現性には表面の乾湿状態に対 応させて吸熱日射量を大きくする必要がある。 図-14はK2, K3試験体及びケース1とケース5と の試験体中央の温度差分布変化(8月7日13:00) である。熱拡散率が大きくなるほど欠陥部温 度が大きくなり、含水率が高いほど欠陥検出 に有効であることが分かる。

#### 4.まとめ

本研究で得られた所見を以下に示す。

- (1) 港北区役所屋上で測定されたコンクリートの温度上昇量は、降雨後に晴天の場合が最も大きくなっており、その有効性については屋外実験からも確認できた。
- (2) 屋外実験では、温度上昇差は浸漬試験体 の方が大きくなり、降雨後の診断が特に 欠陥検出に有効であることが分かった。
- (3) 熱伝導解析による再現性では、含水率の 相違による健全部の温度上昇は日射吸収 率に影響し、欠陥部は熱拡散率が大きく なるほど欠陥検出に有効であることが明 らかとなった。