論文 サーモグラフィー法による内部探査結果に及ぼす風速の影響

関 俊力*1·山田 和夫*2

要旨:本研究では、サーモグラフィー法を適用したコンクリートの内部探査結果に及ぼす風速および風向の影響について一連の実験的および解析的な検討を行った。その結果、表面温度差は、風速が大きくなるほど、風向が試験体表面に対して水平よりも垂直の方が小さくなること、表面温度分布性状に及ぼす風速および風向の影響は、測定対象物の熱伝達率が風速および風向に応じて変化することで説明でき、熱伝達率は一般的に風速が大きくなるとともに直線的に増大すること、本研究で逆解析的に算定した熱伝達率を用いることにより、表面温度分布性状に及ぼす風速および風向の影響を合理的に説明できること、などが明らかとなった。キーワード:コンクリート、サーモグラフィー法、非破壊試験、内部探査、風速、風向、熱伝達率

1. はじめに

筆者らは、これまでにサーモグラーフィー法を適用し たコンクリートの非破壊試験方法の確立を目的とした基 礎的研究として、日射1)やセメントの水和熱2)などの自 然熱源を利用したパッシブな測定方法,並びに冷却3)や 加熱4)などの強制熱源を利用したアクティブな測定方法 について検討を行うとともに、サーモグラフィー法によ る内部探査結果に及ぼす空気量および粗骨材量5),水セ メント比6などの測定対象の調合要因の影響について一 連の検討を行った。その結果、コンクリートの内部探査 を目的とした逆解析問題としてのサーモグラフィー法の 推定精度7)を向上させるためには、対象コンクリートの 熱特性を正確に把握しておく必要のあることが明らかと なった。そのため、別報8)においては、コンクリートの 熱特性に及ぼす調合要因の影響について詳細な検討を行 い、熱伝導率および熱拡散率の定量化を試みたが、サー モグラフィー法の推定精度を更に向上させるためには, 測定対象となるコンクリートの熱特性を含む内的要因だ けでなく,外的要因である気温,日射量,風速および風 向などの気象条件も正確に測定し, これらのデータを計 測結果の定量的な評価に反映させる必要がある。これら の気象条件のうち, 気温および日射量については, これ までのサーモグラフィー測定においても計測を行い,計 測結果に及ぼす相当外気温 (=気温+(日射吸収率×日射 量)/熱伝達率,ただし、日射吸収率および熱伝達率は定 数と仮定して算定) の影響として定量的に反映させてき たが、計測結果に及ぼす風速および風向の影響について は、現在のところ定量的な取扱い方法が確立されておら ず不明な点が多い。この点を踏まえて,本研究では,こ れらの気象条件のうち風速および風向を実験要因として 取り上げ、空隙モデルが埋設されているコンクリートの 表面温度分布性状に及ぼす風速および風向の影響を測定 表面と外気(空気)層との境界条件(熱伝達率)の影響

表-1 実験の概要

	W/C (%)	風 速 (m/s)	風向	空隙モデル (mm)	空隙モデル の種類	
	65	0.0	垂直水平			
		3.0		無し		
		4.5			発泡	
		6.0		100×	スチロール	
		7.5		100 × 5		
		9.0				

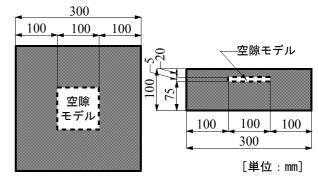


図-1 試験体の形状・寸法

として捉えて一連の実験的および解析的検討を行った。

2. 実験方法

2.1 実験の概要

本実験の概要および本実験で用いた試験体の形状・寸法を、それぞれ表-1および図-1に示す。本実験では、図-1に示すように、寸法300(縦)×300(横)×100(厚さ)mmの試験体中央部の深さ20mmの位置に寸法100×100×5mmの発泡スチロール製の空隙モデルが埋設されている水セメント比(W/C)が65%のモルタル製の平板試験体を使用し、実験要因として、埋設物の有無(有り、無しの2種類)、風速(0、3、4.5、6、7.5および9m/sの6種類)、風向(試験体表面に対して垂直および水平の2種類)を取り上げ、表面温度分布性状に及ぼす風速および風向の影響について調査を行った。なお、試験体の製作に際しては、目標フロー値を200±10に設定し、普通ポルトラ

^{*1} 愛知工業大学大学院 工学研究科生産·建設工学専攻 修士(工学) (正会員)

^{*2} 愛知工業大学 工学部建築学科教授 工博 (正会員)

表-2 モルタルの標準調合表

W/C	S/C	単位重量(kg/m³)		
(%)	3/0	水(W)	セメント(C)	砂(S)
65	3.0	307	472	1415

表 -3 モルタル試験体の熱特性値一覧 密度 (ρ) 熱伝導率(k) 比熱(C) $\rho \cdot C$ (g/cm^3) (W/mk) $(cal/g^{\circ}C)$ 0.572

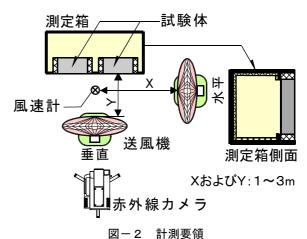
ンドセメント,天竜川産の川砂(最大寸法:2.5mm,表 乾密度:2.60g/cm³,吸水率:1.29%)を使用して試し練 りにより調合を決定した。本実験で用いたモルタルの標 準調合表を表-2に示す。試験体の打設は試料をほぼ等 しい量の2層に分けて行い,各層をJIS R5201-1992(セメ ントの物理試験方法)規定の突き棒を用いて締固めを十 分に行った。その後,試験体質量が安定するまで実験室 内に放置して自然乾燥させた後,試験体側面に厚さ50mm の発泡スチロールを専用接着剤(CK11)を用いて張り 付けて試験体側面からの熱の放出を防ぐ処理を行った。

2.2 計測要領

図-2に計測の概要を示す。計測は、いずれも晴天の 無風日に愛知工業大学2号館屋上で実施した。計測に際 しては、試験体を表面が真南に向くように表面温度分布 測定箱に設置し、午前6時から午後6時までの間の1時間 毎に赤外線カメラ (TH9100MR) を用いて試験体表面温 度の測定を行った。写真-1に本実験で得られた測定結 果の可視画像および赤外線画像の一例を示す。本実験要 因である風速および風向の設定は、送風機を前掲の図-2に示すように試験体の表面に対して垂直および水平に 配置した後,試験体表面と送風機の距離を1~3m移動さ せながら風速の調整を行った。なお、無風状態の結果と の比較を行うために,全ての風速および風向の計測時に, 送風機による風を与えていない試験体(風速0m/s)の計 測も同時に行った。また, 外気温, 測定用試験箱の内部 温度および日射量は10分毎に、風速は自記記録型風速計 (test-0435) を用いて10秒ごとに自動計測した。図-3 に測定日の気象条件に関する測定結果の一例を示す。

3. 解析方法

本研究では、8節点アイソパラメトリック要素を用いた3次元非定常熱伝導有限要素解析9を行って実験結果との比較を行った。本解析では、前掲の図-1に示した平板試験体の対称性を考慮して図-4に示す1/4解析モデルを使用した。なお、解析に必要な熱特性値のうち、密度 (ρ) 、熱伝導率 (k、非定常熱線法を改良したプローブ法10)に基づく迅速熱伝導率計QTM-D3を使用)については実測し、比熱 (c) については、別に行った1次元熱伝導実験8)により求めた熱拡散率 (D) を用いて算定



0.024 40 風速·3m/s 35 0.021 風向:垂直 30 0.018 0.015 25 [©] 20 0.012 字 0.009 頭 15 ◆外気温 ➡内気温1 0.006 盃 10 ➡内気温2 ✔相当外気温 0.003 ◆日射量 0.000 10 11 12 13 14 15 16 17 18 時刻(時)

図-3 気象条件の一例(風速:3m/s, 風向:垂直)

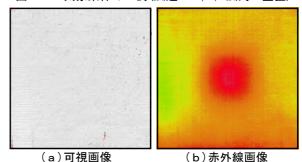
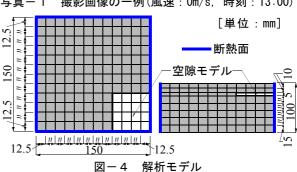


写真-1 撮影画像の一例(風速:0m/s, 時刻:13:00)



 $(\rho \cdot c = k/D)$ した。実測および算定された試験体の熱特性値の一覧を表-3に示す。解析に際しては、実測された気温および日射量の気象条件を入力データとして、午前6時から午後6時までの間の時間増分を10分に設定して非定常熱伝導解析を行った。ただし、午前6時の時点での試験体内部温度は、まず午前6時の気象条件を用いて定常解析を行い、その結果を初期内部温度とした。また、

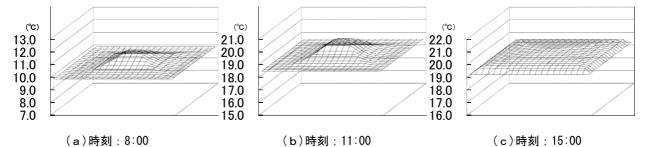


図-5 計測された表面温度分布の例(風速:7.5m/s, 風向:水平)

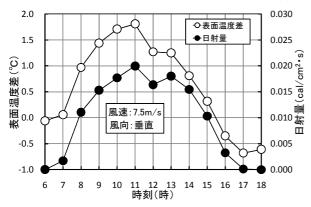
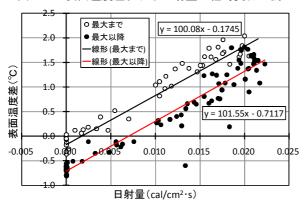


図-6 表面温度差および日射量の経時変化の例



図ー7 表面温度差と日射量との関係

本研究で対象としている解析結果に及ぼす風速および風 向の影響は、試験体表面の境界条件である熱伝達率が風 速および風向に応じて変化するものとして評価した。

4. 結果とその考察

図-5は、空隙モデルが埋設されている試験体の表面 温度分布の経時変化の一例を示したものである。この図 から明らかなように、空隙モデル埋設部(試験体表面中 央部)と健全部(試験体表面周辺部)との表面温度差は、 時間の経過とともに変化していく様子が読み取れる。

4.1 測定結果に及ぼす気象条件の影響

本実験では、前述のようにいずれも晴天の無風日に計測を行っているが、実験装置の関係で風速および風向を実験要因とした10回の計測は、異なった日に実施しているため、それぞれの計測日の微妙な気象条件の違いによる影響が測定結果に反映されている可能性が考えられ

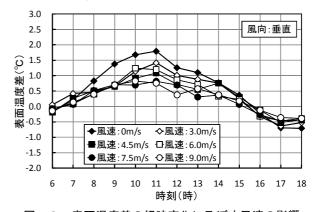


図-8 表面温度差の経時変化に及ぼす風速の影響 (風向:垂直の場合)

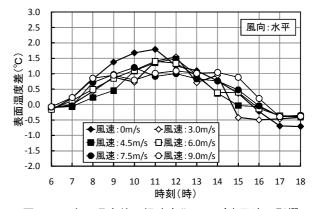
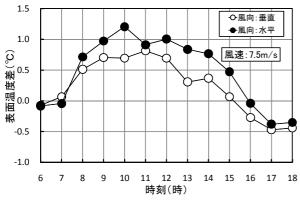


図-9 表面温度差の経時変化に及ぼす風速の影響 (風向:水平の場合)

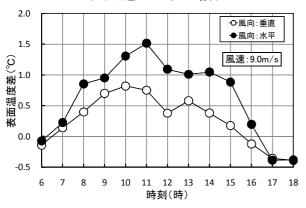
る。図-6は、ある測定日の試験体の表面温度差と日射量の経時変化の一例を示したものであるが、両者は非常に良く対応していることがわかる。また、図-7は、図-6に示す測定日毎に得られた表面温度差と日射量との関係の10回分をまとめて示したものである。この図によれば、両者の関係は、測定日に関わらず計測開始時刻から日射量が最大となるまでの時刻と日射量の最大時刻から計測終了までの時刻に分類し、それぞれを線形式によって近似できることがわかる。この点を踏まえて、本研究では、上記の気象条件の違いによる影響を軽減させるために、図-7に示す関係を利用して、測定日の日射量の違いによって生じる表面温度差の影響を取り除いた。

4.2 表面温度分布性状に及ぼす風速の影響

図-8は、表面温度差の経時変化に及ぼす風速の影響



(a) 風速: 7.5m/sの場合



(b)風速:9m/sの場合 図-10 表面温度差の経時変化に及ぼす風向の影響

を風向が試験体表面に対して垂直の場合について示したものである。この図によれば、試験体の表面温度差は、送風機を用いて風を与えた試験体の方が風を与えていない試験体(図中の風速:0m/s)に比べて小さくなっているのがわかる。また、風を与えた試験体に注目すると、風速が大きくなるに従って表面温度差が小さくなる傾向を示している。これは、試験体表面に風を与えることによって試験体表面への熱伝達が妨げられ、表面温度の上昇が低下することに起因しているものと考えられる。

これに対して、図-9は、表面温度差の経時変化に及ぼす風速の影響を風向が試験体表面に対して水平の場合について示したものであるが、この図によれば、試験体の表面温度差は、風向が試験体表面に対して垂直の場合と同様に、試験体表面に風を与えることによって小さくなる傾向が認められるが、表面温度分布に及ぼす風速の影響は風向が垂直の場合ほど顕著でないことがわかる。

4.3 表面温度分布性状に及ぼす風向の影響

図-10は、試験体の表面温度差の経時変化に及ぼす風向の影響を風速が7.5m/sと9m/sの場合について示したものである。この図から明らかなように、風速が同じ場合には風向が試験体表面に対して垂直よりも水平の場合の方が表面温度差は大きくなることがわかる。なお、この表面温度差に及ぼす風向の影響は、全ての風速条件で認められるため、前述の表面温度差に及ぼす風速の影響は、

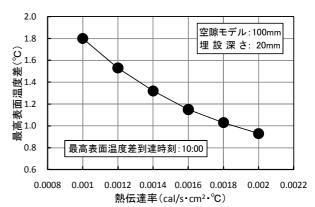


図-11 表面温度差と熱伝達率との関係の一例

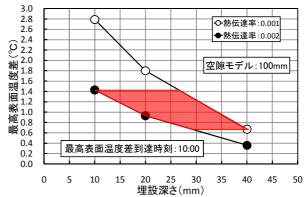


図-12 表面温度差と空隙モデルの埋設深さとの 関係に及ぼす熱伝達率の影響

風向によって相違し,一般的に風向が試験体表面に対して水平の場合よりも垂直の方が顕著であるといえる。

4.4 風速と熱伝達率との関係

コンクリートの内部探査を目的としたサーモグラフィ 一法は、計測された気温、日射量および表面温度差、並 びに対象コンクリートの各種熱特性(熱伝導率(k)およ び熱拡散率(D)または密度 (ρ) ×比熱(c))を用いて逆解 析的に空隙などの介在物の位置や大きさを評価する試験 方法であるが, これらの計測された気温, 日射量および 表面温度差,並びに測定対象の熱特性が同じであっても, 風速および風向によって試験体表面の熱伝達率に変化が 生じると,介在物の埋設深さの推定に誤差が生じる。例 えば、図-11は、試験体表面の熱伝達率を除く外的条件 および測定対象の内的条件を一定とした場合の表面温度 差に及ぼす熱伝達率の影響を示した一例であるが、この 図によれば、表面温度差は熱伝達率が大きくなるに従っ て著しく低下することがわかる。また、表面温度差と空 隙モデルの埋設深さとの関係に及ぼす熱伝達率の影響を 示した図-12によれば、表面温度差が同じであっても、 図中の赤色の網掛けで示した領域において試験体表面の 熱伝達率の違い(後述する本実験で得られた熱伝達率の 上下限値)により埋設深さに12mm~17mm程度の相違 が認められる。これらのことからも,表面温度差を利用 したサーモグラフィー法による内部探査結果の精度向上

表-4 熱伝達率の算定結果一覧

風速	熱伝達率 (cal/s·cm²•℃)			
(m/s)	風向:垂直	風向:水平		
0.0	0.0010	0.0010		
3.0	0.0013	0.0012		
4.5	0.0016	0.0010		
6.0	0.0017	0.0013		
7.5	0.0018	0.0013		
9.0	0.0020	0.0013		

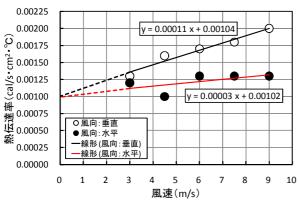
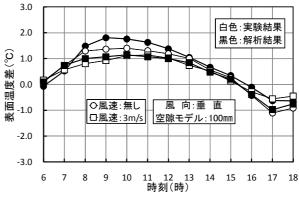


図-13 熱伝達率と風速との関係 に及ぼす風向の影響

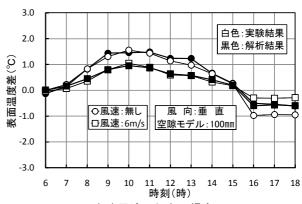
を図るためには、測定対象の熱特性、気温および日射量 の気象条件の他に、風速および風向によって変化する熱 伝達率についても正確な取扱いが重要であるといえる。

4.5 熱伝達率の算定結果

本実験では、試験体の熱伝導率、密度および比熱は、 第3章で述べた測定方法を用いて実測しているが、試験 体表面の熱伝達率は実測していないため、本研究では、 表面温度差の経時変化に関する実験結果と3次元非定常 熱伝導有限要素解析(第3章参照)による解析結果との 差が最小となる熱伝達率を逆解析的に求めた。熱伝達率 の算定結果一覧および熱伝達率と風速との関係を、それ ぞれ表-4および図-13に示す。これらの表および図に よれば、熱伝達率と風速との関係は、風向(試験体表面 に対して垂直および水平)によって相違するが、いずれ の場合もほぼ線形関係を示しており,一般的に風速が大 きくなるに従って熱伝達率も大きくなっているのがわか る。例えば,風向が試験体表面に対して垂直の場合には, 風速が3m/sから9m/sに増大すると熱伝達率は最大で 0.0007cal/s·cm²· ℃程度の変化が認められるが,この熱 伝達率の相違に起因する表面温度差の変化により、空隙 の深さに15mm程度の推定誤差が生じることになる(前 掲の図-12参照)。これに対して、風向が試験体表面に 対して水平の場合には、風速が3m/sから9m/sに増大する と最大で熱伝達率に0.0003cal/s·cm²·℃程度の変化が生 じるため、空隙の深さの推定誤差は3mm程度となり(前 掲の図-12参照), 風向が垂直の場合に比べて風速の影 響が小さいことがわかる。以上のことから, 風向が試験 体表面に対して垂直の場合には、風速によって変化する



(a)風速:3m/sの場合



(b)風速:6m/sの場合

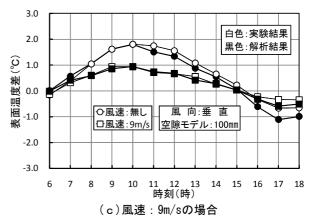
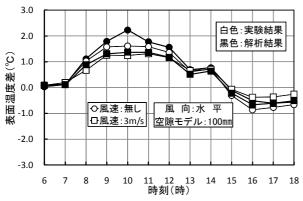


図-14 実験結果と解析結果の比較(風向:垂直)

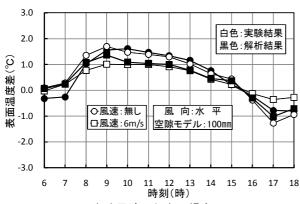
熱伝達率の正確な取扱いが必要であるといえる。

4.6 実験結果と解析結果との比較

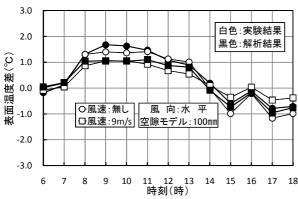
図-14および図-15は、風向が試験体表面に対してそれぞれ垂直および水平の場合の試験体の表面温度差の経時変化に関する実験結果と解析結果との比較を風速別に示した例である。なお、各図には風速=0m/sの結果も併示してある。これらの図によれば、風速および風向を実験要因に設定して計測した表面温度差の経時変化に関する実験結果と解析結果とは比較的良く一致しており、本研究で得られた熱伝達率と風速および風向との関係を用いることにより、空隙モデルが埋設されている試験体の表面温度分布性状に及ぼす風速および風向の影響を精度良く追跡できることがわかる。また、本研究で逆解析的



(a)風速:3m/sの場合



(b)風速:6m/sの場合



(c)風速:9m/sの場合

図-15 実験結果と解析結果との比較(風向:水平)

に算定した熱伝達率の数値も、従来から一般的に用いられてきた値¹¹⁾の範囲内にあり、妥当な値といえる。

5. 結 論

本研究によって得られた結果を要約すると, およそ以下のようにまとめられる。

- 1) 表面温度差は、風速が大きくなるほど、風向が試験 体表面に対して水平よりも垂直の方が小さくなる。
- 2) 試験体の表面温度分布性状に及ぼす風速および風向 の影響は、測定対象物表面の熱伝達率が風速および 風向に応じて変化することで説明できる。
- 3) 熱伝達率と風速との関係は直線関係にあり、熱伝達率は一般的に風速が大きくなるとともに増大する。

4) 本研究で逆解析的に算定した熱伝達率を用いること により、試験体の表面温度分布性状に及ぼす風速お よび風向の影響を合理的に説明することができる。

謝辞

本実験とデータ整理に際して、多大のご助力を得た愛 知工業大学学部学生の泉原浩史君、杉山貴絵さん、丹羽 智美さんおよび松原和也君に対して謝意を表します。

参考文献

- 1) 山田和夫, 桃木昌子: サーモグラフィー法によるコンクリートの内部探査結果に及ぼす日射量の影響に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.1, pp.1215-1220, 1996.6
- 2) 山田和夫, 桃木昌子, 勝見隆: サーモグラフィー法 を適用したコンクリートの充填性評価に関する基礎 的研究, セメント・コンクリート論文集, No.51, pp.222-227, 1997.12
- 3) 勝見 隆, 山田和夫: サーモグラフィー法によるコンクリートの充填性評価に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.1285-1290, 1999.7
- 4) 山田和夫,安藤秀則:強制加熱を利用したサーモグラフィー法によるコンクリートの内部評価,コンクリート工学年次論文集,Vol.24,No1,pp.1485-1490,2002 7
- 5)関 俊力,山田和夫:コンクリートの表面温度分布 性状に及ぼす粗骨材および空気量の影響,日本建築 学会大会学術講演梗概集(九州),A-1,pp235-236, 2007.8
- 6)関 俊力,山田和夫:コンクリートの表面温度分布 性状に及ぼす水セメント比および含水量の影響,日 本建築学会大会学術講演梗概集(中国), A-1, pp.757-758, 2008.9
- 7) 勝見 隆, 山田和夫, 桃木昌子: 逆解析手法を適用 したサーモグラフィー法によるコンクリートの内部 探査, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.1315-1320, 1997.6
- 8) 関 俊力, 山田和夫: コンクリートの熱伝導特性に 及ぼす調合の影響, コンクリート工学年次論文報告 集, Vol.30, No.1, pp.543-548, 2008.7
- 9)矢川元基:有限要素法の基礎と応用シリーズ8-流れ と熱伝導の有限要素法入門,培風館,342pp.,1990.10
- 10) 王徳東, 野口貴文, 濱崎仁ほか:ポリマーセメント モルタルの燃焼特性および熱伝導率に関する研究 その3:熱伝導率の温度依存性, 日本建築学会大会学 術講演梗概集(中国), A-1, pp.163-164, 2008.9
- 11) 日本建築学会:建築設計資料集成1 (環境・熱), pp.97-134, 1978