論文 逆解析手法を適用したサーモグラフィー法による内部探査の推定精 度向上に関する基礎的研究

関 俊力*1·山田 和夫*2

要旨:本研究では,過去の研究で定量化した各種の内的・外的熱特性値の妥当性を確認するために,非定常 熱伝導逆解析手法を提案するとともに,その推定精度について検討を行った。その結果,サーモグラフィー 法による内部探査結果の定量化を図るには,測定対象内部の熱伝導率および熱拡散率,測定表面と外気領域 との境界条件である日射吸収率および熱伝達率の取扱いが重要であること,コンクリートの調合条件に依存 する熱伝導率と熱拡散率,測定条件に関連する日射吸収率と熱伝達率が広範囲に変化する場合でも,本研究 で提案した逆解析手法を用いることによって,精度良く内部探査ができること,などが明らかになった。 キーワード:コンクリート,逆解析,サーモグラフィー法,熱伝導率,熱拡散率,熱伝達率,日射吸収率

1. はじめに

筆者らは、従来からサーモグラフィー法による内部探 査結果の精度向上を目的とした一連の基礎的研究を行っ てきた。その結果、サーモグラフィー法による内部探査 結果の精度向上を図るには,測定対象の内的熱特性値(熱 伝導率と熱拡散率),風速・風向および測定対象の表面 色に関連する外的熱特性値(熱伝達率と日射吸収率)の 影響を正確に把握しておく必要があることがわかったた め、別報1)において、測定対象の熱特性値に関する簡便 な評価方法を提案するとともに、広範囲な調合を有する コンクリートの熱特性値を実測し、得られた熱特性値の 妥当性と適用性の確認を行った。本研究では,引き続き, コンクリートの定量的な内部探査方法の確立を目的とし て、気象条件(気温・日射量)の経時変化の影響が考慮 できる非定常熱伝導逆解析手法を提案するとともに、本 提案逆解析手法による内部探査結果に及ぼす内的および 外的熱特性値の影響について解析的に検討を行った。

2. 解析方法

2.1 解析の対象とした試験体

表-1に解析の概要を示す。本解析では、目的に応じて100×100×5mmの空隙モデル(発泡スチロール)が試験体中央部の20mmの深さに埋設されている300×300×100mm平板試験体(モルタルまたはコンクリート製)の内部探査に関する3シリーズの解析を行った。すなわち、解析-Iでは、コンクリートの調合の違いによって変化する内的な熱特性値(熱伝導率および熱拡散率)の影響を調査対象として、空気量(Va=0,20,40および60%の4種類),粗骨材量(単位粗骨材嵩容積として0,25,50および100%の4種類), 水セメント比(W/C=40,65および90%の3種類),試験体の乾湿状態(乾燥状態および湿

潤状態の2種類)を解析要因とし,解析-Ⅱでは,風速 ・風向によって変化する外的な熱特性値(熱伝達率)の 影響を調査対象として,風速(0,3.0,6.0,および9.0m/s の4種類)および風向(試験体表面に対して垂直および 水平の2種類)を解析要因とした。また,解析-Ⅲでは, 試験体表面色によって変化する外的な熱特性値(日射吸 収率)の影響を調査対象として,試験体の表面色(均一 色と色むらの2種類,ただし,均一色は,打放し色,白 色,緑色および黒色の4種類,色むらは,中央部(空隙 モデル埋設部表面)-周辺部(空隙モデル非埋設部表面) の色分けが白色-打放し色および黒色-打放し色の2種

表一1 解析の概要 (a) 解析-I

試験体 記号	種類	目標 空気量 (%)	実測 空気量 (%)	試験体 記号	種類	W/C (%)	粗骨材 嵩容積 (%)
A00		0	0	K00			0
A20	モルタル	20	21	K25	コンクリー	60	25
A40		40	31	K50	Ь	60	50
A60		60	36	K100			100

試験体 記号	種類	W/C (%)	S/C	試験体 記号	種類	W/C (%)	状態
M40		40	1.25	D65	王儿夕儿	65	乾燥
M65	モルタル	65	3.00	W65	-1/0/10	05	湿潤
M90		90	4 50				

(b) 解析-Ⅱ

試験体 記号	種類	風速	風向	試験体 記号	種類	風速	風向
M-H-0.0	モルタル	0.0		M-P-0.0		0.0	-nk ⊐tc
M-H-3.0		3.0	垂古	M-P-3.0	エルタル	3.0	
M-H-6.0		6.0	王旦	M-P-6.0	-1/2/2/2	6.0	水十
M-H-9.0		9.0		M-P-9.0		9.0	

(c) 解析-Ⅲ

			(-))41				
試験体 記号	種類	表面色	W/C (%)	試験体 記号	W/C (%)	中央部	周辺部
M-N	モルタル	打放し		M-W-N	65	白色	打放し
M-W		白色	65	M-B-N	05	黒色	打放し
M-G		モルタル 緑色 65					
M-B		黒色					

*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)

		(u) 777-171	1		
試験体	熱伝導率	比熱C	密度ρ	熱拡散率	0
記号	W/mk	cal/g $\cdot ^{\circ}C$	g/cm ³	m²/hr	ρ・ζ
A00	1.63	0.348	2.10	0.00192	0.73
A20	0.79	0.262	1.60	0.00162	0.42
A40	0.63	0.241	1.40	0.00159	0.34
A60	0.58	0.258	1.30	0.00148	0.34
K00	1.63	0.348	2.10	0.00192	0.73
K25	1.54	0.273	2.20	0.00221	0.60
K50	1.81	0.246	2.20	0.00288	0.54
K100	1.88	0.187	2.40	0.00361	0.45
M40	1.54	0.340	2.13	0.00183	0.72
M65	1.68	0.307	2.16	0.00218	0.66
M90	1.51	0.221	2.09	0.00281	0.46
W65	1.68	0.307	2.16	0.00218	0.66
D65	1.93	0.272	2.24	0.00272	0.61

(a) 解析— I

表-2 解析に用いた熱特性値一覧

(b) 解析−Ⅱ

類)を解析要因として取り上げ,別報^{1),2)}で示した各種 内的・外的な熱特性値(**表**-2参照,ただし,解析-II および解析-IIIで使用した内的な熱特性値は,解析-I のM65試験体と同様とした)の妥当性および内的・外的 熱特性値が内部探査結果に及ぼす影響について検討する とともに,次の2.2節に示す非定常熱伝導逆解析手法の 適用性および適用限界について検討を行った。なお,解 析対象の試験体は,測定面が南面となるように設置され, 熱源は,無風の晴天日の気温と日射を利用した自然熱源 で,風速は送風機により制御されている²⁾。また,解析 時刻は,午前6時~午後6時の測定データ¹⁾のうち,熱環 境の特異時刻となる相当外気温の上昇時,最高時近傍お よび下降時の10,13および16時の3時刻を取り上げた。

2.2 非定常熱伝導逆解析による内部探査手法

本研究では、計測結果として与えられるコンクリート の表面温度分布から、内部に存在する空隙の埋設深さと 大きさを定量的に評価する問題を取り扱う。すなわち、 既知量および未知量を、それぞれ以下のように設定した。

既知量:表面温度分布(計測結果),測定物を構成する 素材の熱特性(密度,比熱,熱伝導率,熱伝

熱伝達率 熱伝達率 試験体 試験体 記号 $(cal/s \cdot cm^2 \cdot C)$ 記号 $(cal/s \cdot cm^2 \cdot C)$ M-H-0.0 0.0010 M-P-0.0 0.0010 M-H-3.0 M-P-3.0 0.0012 0.0013 M-H-6.0 0.0017 M-P-6.0 0.0013 M-H-9.0 M-P-9.0 0.0013 0.0020 (c) 解析-Ⅲ 日射吸収率 試験体 日射 試験体 記号 吸収率 記号 中央部 周辺部 M-N 0.60 M-W-N 033 0.60 M-W 0.33 0.97 M-B-N 0.60 0.75 M-G M-B 0.97 d1:埋設深さ(d2=100-d1-5) t:厚さ=5mm <u>c</u>i ■断熱面 <u>n</u> 50 = 空隙モデル ート 12.5 00 11 11 11 11 11 11 11 11 11 d2/ 12.5 [単位:mm] 150 12.5 図-1 解析モデル

達率,日射吸収率),気象環境の外的条件 未知量:空隙の埋設深さおよび大きさ

上記の問題は、計測結果から原因を推定する逆問題で あり、具体的には時刻tにおけるコンクリート表面の温 度分布の計測結果(*eTemp*.(*i*))と推定結果(*aTemp*.(*i*)) との残差の2乗和を最小にする最適問題と等価となる。

$$min\{\Sigma (eTemp.(i) - aTemp.(i))^2\}$$
(1)

ここに、aTemp.(i)は仮定した未知パラメータを用い て計算されたi節点の表面温度である。別報³⁾において は、i節点の表面温度aTemp.(i)を3次元定常熱伝導解析 によって求めたが、時刻tで計測される表面温度は、日 の出時刻から計測時刻までの気温および日射量の経時変

表-3 逆解析結果一覧(解析-I)

		=			=									
土知島		未知量1			未知量1				未知	1量2				
小川里	埋没深	さ(正解値	: 20mm)	大きさ	(正解值:	100mm)	埋没深	さ(正解値	: 20mm)	大きさ(正解値:100㎜)				
時刻	10時	13時	16時	10時	13時	16時	10時	13時	16時	10時	13時	16時		
A00	20.02	20.01	20.01	99.92	99.73	124.97	20.00	20.00		100.00	86.86			
A20	19.99	9.20		90.83	100.02		20.01	14.55		98.76	101.60			
A40	20.01	19.99	20.02	94.56	91.22		20.01	20.41	19.92	94.88	99.72	89.03		
A60	20.00	20.02	20.02	95.87	95.68	99.78	20.00	20.00	20.02	99.74	97.31	99.41		
K00	20.02	20.01	20.01	99.92	99.73	124.97	20.00	20.00		100.00	86.86			
K25	20.02	20.03	20.00	99.62	99.63	99.67	20.02	20.04	20.06	99.68	96.78	95.01		
K50	20.01	20.03	20.03	98.64	99.26	99.09	18.62	20.05	19.98	97.54	89.16	97.49		
K100	20.00	20.04	20.05	97.52	99.33	99.98	20.00	19.99	24.07	98.88	99.53	100.09		
M40	20.03	20.02		99.52	99.34	99.54	19.76	19.98		99.99	84.51			
M65	19.96	20.04	20.00	97.46	98.87	96.02	20.00	20.03		88.36	89.56			
M90	20.00	20.04	20.02	97.13	100.00	98.97	20.03	20.00	20.02	87.90	85.72	89.22		
D65	19.96	20.04	20.00	97.46	98.87	96.02	20.00	20.03		88.36	89.56			
W65	20.00	20.15	20.13	100.00	99.24	97.39	20.01	20.19	21.57	96.72	99.04	120.00		

※表中の網掛け箇所は、解析結果が求まらなかった場合であることを示す。



図ー2 表面温度分布に関する測定結果と逆解析結果との比較例(解析-I)

化の影響を受ける。本研究では、この気温および日射量 の経時変化の影響を考慮するために、3次元非定常熱伝 導有限要素解析によってaTemp.(i)を求めた。なお、式(1) は、一般的に非線形となるため、式(1)の解法には非線 形最適化手法を用いる必要があるが、本研究では、非線 形性の強い問題にも比較的安定した収束状況を示すマル カート法を用いた。図-1に本解析で用いた解析モデル を示す。本解析では、逆解析によって求める空隙モデル の埋設深さと大きさを、それぞれの方向の寸法で除した 相対値で評価して、未知パラメータの変化量が1%以下 になるまで、3次元非定常熱伝導解析を繰返し行った。

3. 解析結果とその考察

3.1 内部探査結果に及ぼす調合要因の影響

表-3にコンクリートの調合を解析要因とした解析-Iによる逆解析結果の一覧表を示す。この表によれば、 未知量を埋設深さの1変数に設定した場合の解析結果は、 解析時刻が16時の場合に空気量を20および40%に設定し たA20およびM40試験体の解が求まっていないが、その 他の調合の試験体については全ての時刻において、正解 値の埋設深さ20mmに収束しているのがわかる。また、 未知量を空隙モデルの大きさの1変数に設定した場合に も、解析時刻が16時の場合にA20およびA40試験体の解 が求まっていないことを除けば、全ての時刻において、 正解値の大きさ100mmに収束している。一方,未知量 を空隙モデルの埋設深さと大きさの2変数に設定した場 合の解析結果は、未知量が1変数の場合に比べて、時刻16 時で解の求まらない試験体が多く、かつ解析時刻によっ ては内部探査結果の精度が若干低下する傾向にあるが, 時刻が10時および13時の解析結果は,推定精度の若干悪 い試験体も一部認められるものの、ほぼ正解値の埋設深 さ20mm, 大きさ100mmに収束している。また, 図-2 は、表面温度分布に関する推定結果と測定結果とを比較 した例であるが、未知量が2変数で、コンクリートの調 合を広範囲に変化させた場合であっても、表面温度分布 の推定結果と測定結果は非常に良く一致しており、本解 析で使用した熱特性値の妥当性が確認できた。以上のこ とから、本研究で提案した内部の熱伝導特性の影響が考 慮できる非定常熱伝導解析を適用した内部探査手法を用 いることで、精度の良い内部評価が可能であるといえる。

3.2 内部探査結果に及ぼす風速および風向の影響

表-4(a)および(b)に風速および風向を解析要因とし

	(a) 風向が試験体表面に対して垂直の場合												
土畑昌		未知量1		未知量1			未知量2						
不叫里	埋没深	埋没深さ(正解値:20mm)			大きさ(正解値 : 100mm)			さ(正解値	: 20mm)	大きさ(正解値 : 100mm)			
時刻	10時	13時	16時	10時	13時	16時	10時	13時	16時	10時	13時	16時	
M-H-0.0	19.98	20.04	20.23	99.45	99.11	98.29	23.27	20.15	20.20	106.53	90.17	97.67	
M-H-3.0	19.98	19.93	19.97	99.91	99.86	93.98	20.05	20.00	23.08	89.04	88.06	108.21	
M-H-6.0	19.94	20.33	20.01	100.07	98.19	98.23	20.00	20.36	21.47	89.12	92.96	99.55	
M-H-9.0	20.01	19.99	20.06	99.54	102.10	98.31	19.39	19.92	20.01	95.17	99.91	94.28	

表	- 4	逆解柞	∱結果-	-覧	(解析-	· II)	
a)	風向;	が試験の	本表面に	[☆]	て垂直	の場	

土加昌		未知量1			未知量1			未知量2					
木邓里	埋没深さ(正解値:20mm)			大きさ(正解値:100mm)			埋没深さ(正解値:20mm)			大きさ(正解値 : 100mm)			
時刻	10時	13時	16時	10時	13時	16時	10時	13時	16時	10時	13時	16時	
M-P-0.0	19.98	20.04	20.23	99.45	99.11	98.29	23.27	20.15	20.20	106.53	90.17	97.67	
M-P-3.0	19.94	20.37	20.04	98.84	98.27	96.72	19.28	19.99	20.38	98.66	99.47	92.68	
M-P-6.0	19.99	20.01	19.98	99.53	99.41	99.32	21.41	20.23		95.68	98.13		
M-P-9.0	19.97	19.95	19.91	99.81	99.83	98.82	21.28	19.86		99.62	98.71		



(a) 風速が9.0m/sで風向が垂直の場合
(b) 風速が9.0m/sで風向が水平の場合
図-3 表面温度分布に関する測定結果と逆解析結果との比較例(解析-Ⅱ)

表-5 逆解析結果一覧(解析-Ⅲ)

土加昌	未知量1				未知量1		未知量2						
不加里	埋没深	埋没深さ(正解値:20mm)			大きさ(正解値 : 100mm)			埋没深さ(正解値:20mm)			大きさ(正解値 : 100mm)		
時刻	10時	13時	16時	10時	13時	16時	10時	13時	16時	10時	13時	16時	
M-P	19.99	20.04	20.10	98.39	96.70	95.77	20.02	20.04	19.96	93.09	98.02	96.29	
M-W	19.98	20.01	20.05	100.00	99.82	98.93	20.08	20.01	20.08	97.37	94.85	94.93	
M-G	19.99	19.99	20.04	98.61	96.91	97.65	19.99	20.01	20.59	90.17	95.42	95.35	
M-B	19.97	20.02	19.99	98.53	96.17	99.03	19.99	19.93	20.02	93.26	95.15	96.18	

(a) 表面色が均一色の場合

土加旱		未知量1			未知量1		未知量2						
不邓里	埋没深さ(正解値:20mm)			大きさ(正解値:100mm)			埋没深	さ(正解値	: 20mm)	大きさ(正解値:100mm)			
時刻	10時	13時	16時	10時 13時 16時			10時	13時	16時	10時	13時	16時	
M-W-N	19.96		20.04	87.57	98.45	99.15	19.96		20.00	90.07		93.25	
M-B-N	20.00	20.00	20.04	97.63	99.84	94.14	20.00	20.01	20.05	97.10	98.14	96.84	

(b) 舟れたがなる担合





た解析-IIによる逆解析結果の一覧表を示す。この表に よれば、未知量を1変数および2変数のいずれに設定した 場合であっても、風速および風向に関わらず全ての時刻 においてほぼ正解値の埋設深さ20mm、大きさ100mmに 収束しているのがわかる。また、表面温度分布の測定結 果と解析結果との比較例を示した図-3から明らかなよ うに、表面温度分布に関する解析結果は、測定結果と非 常に良く一致しており、別報²⁾において定量化した風速 および風向と熱伝達率との関係の妥当性が確認できた。 以上のことから、計測時の風速および風向の影響により 測定表面の熱伝達率が変化する場合であっても、気温と 日射量の経時変化が考慮できる本逆解析手法を用いるこ とにより、精度の良い内部探査が期待できるといえる。

3.3 内部探査結果に及ぼす表面色および色むらの影響

表-5(a)および(b)に表面色および色むらを解析要因

表一6 第	烈亿	マ学率を変	致とする	る逆解析統	吉果一覧
熱伝導率 (W/mk)		未知量1		未知量2	
		埋設深さ	大きさ	埋設深さ	大きさ
		(20mm)	(100mm)	(20mm)	(100mm)
0.42		10.04	100.10	12.39	103.20

97.50

99 70

100.00

20.00

18.93

17.04

88.40

78.70

80.20

19.96

18.96

17.30

1.70

3 00

4.20

とした解析-Ⅲによる逆解析結果の一覧表を示す。表-5(a)に示す表面色の影響については、未知量が1変数の 場合には、空隙モデルの埋設深さおよび大きさのいずれ も、若干の誤差は認められるものの、全ての時刻におい て正解値の埋設深さ20mm、大きさ100mmに収束してい る。また、未知量が2変数の場合にも、1変数の場合と同 様に、全ての時刻においてほぼ正解値に収束しているの がわかる。一方、表-5(b)に示す色むらの影響につい ても、未知量が1および2変数のいずれも推定精度の悪い 結果が一部認められるが、全ての時刻においてほぼ正解 値に収束している。図-4は、表面温度分布の測定結果 と解析結果との比較例を示したものであるが、表面温度 差が大きくなるM-BおよびM-B-N試験体についても、表 面温度分布に関する測定結果と逆解析結果は非常に良く 一致している。以上のことから、本研究で提案した外部

表-7 熱拡散率を変数とする逆解析結果一覧

執扩勘索	未知量1		未知量2	
$(m^2/4m)$	埋設深さ	大きさ	埋設深さ	大きさ
(m/nr)	(20mm)	(100mm)	(20mm)	(100mm)
0.001	20.43	75.00	12.89	31.60
0.002	20.10	75.10	20.21	89.50
0.004	17.45	100.00	17.86	91.20
0.006	1546	100.00	15.60	75 50



との境界面における熱伝達の影響を考慮できる逆解析手 法を用いることにより、表面色および色むらによって日 射吸収率が広範囲に、かつ部分的に変化する場合でも、 精度の良い内部探査が可能であるといえる。また、実測 した日射吸収率も妥当な値であることが確認できた。

4. 各種熱特性値が推定精度に及ぼす影響

前章では、別報^{1),2)}で示した各種内的・外的な熱特性 値を用いることにより、精度の良い内部探査が可能であ ることを示したが、以下では、本研究で取り扱った各種 の熱特性値が推定精度に及ぼす影響について検討する。

4.1 推定精度に及ぼす熱伝導率の影響

解析-IのM65試験体で使用した熱伝導率を,一般的 に使用されている上下限値の範囲で変化させて逆解析し た内部探査結果(時刻10時の場合)を表-6に示す。こ の表によれば,未知量が1変数の場合には,空隙モデル の大きさは,熱伝導率に関わらずほぼ正解値に収束して いる。一方,埋設深さは,熱伝導率の実測値に近い1.7W/mk を用いた場合に正解値に近い結果が得られているが,実 測値から離れた値を用いると推定結果に最大10mm程度の 誤差が生じているのがわかる。また,未知量が2変数の場 合にも,実測値に近い1.7W/mkを用いると正解値に近い 結果が得られているが,実測値から離れた値を用いると 埋設深さで最大7mm,大きさで最大20mm程度の誤差が 生じている。図-5は,表面温度分布の推定結果を示し たものであるが,正確な熱伝導率を用いないと,表面温

表-8	熱伝達率を変数とする逆解析結果−	-覧

執伝達率	未知量1		未知量2	
$(cal/s \cdot cm^2 \cdot °C)$	埋設深さ	大きさ	埋設深さ	大きさ
	(20mm)	(100mm)	(20mm)	(100mm)
0.0004	43.55	45.06	49.99	119.99
0.0007	30.14	74.81	31.23	87.17
0.0010	20.04	99.11	20.15	90.17
0.0013	11.94	106.30	23.39	100.21
0.0016	7.69	125.77	11.25	111.30

度分布も測定結果とは異なったものとなっている。

4.2 推定精度に及ぼす熱拡散率の影響

表-7は、解析-IのM65試験体で使用した熱拡散率 を、一般的に使用されている上下限値の範囲で変化させ て逆解析した内部探査結果(時刻10時の場合)を示した ものである。この表によれば、未知量が1変数の場合に は、空隙モデルの埋設深さは、実測値に近い熱拡散率 (0.002m²/hr)を用いるとほぼ正解値が得られているが、

大きさは、25mm程度の誤差が生じている。また、実測 値よりも大きな熱拡散率を用いると、埋設深さは浅く評 価される傾向にある。未知量が2変数の場合にも、実測 値に近い熱拡散率を用いると正解値に近い結果が得られ るが、実測値から離れた値を用いると埋設深さで最大7 mm、大きさで70mm程度の誤差が生じており、熱拡散 率が推定精度に大きく影響しているのがわかる。図-6 は、表面温度分布の推定結果を示したものであるが、図 から明らかなように、正確な熱拡散率を用いないと、表 面温度分布も測定結果とは異なったものとなっている。

4.3 推定精度に及ぼす熱伝達率の影響

解析-ⅡのM-H-0.0試験体で使用した熱伝達率を変化 させて逆解析した内部探査結果(時刻13時の場合)を表 -8に示す。この表によれば、未知量が1変数の場合に は、熱伝達率を実測値の0.001*cal/s・cm²・℃*よりも大きく 設定して逆解析を行うと、空隙モデルの埋設深さと大き さの推定結果は、正解値よりもそれぞれ浅く、かつ大き くなるが、熱伝達率を実測値よりも小さく設定すると、

表-9 日射吸収率を変数とする逆解析結果一覧

	未知量1		未知量2		
日射吸収率	埋設深さ	大きさ	埋設深さ	大きさ	
	(20mm)	(100mm)	(20mm)	(100mm)	
0.30	9.81	123.26	13.90	100.24	
0.45	15.02	100.02	21.73	138.31	
0.60	20.04	96.70	20.04	98.02	
0.75	25.04	81.56	24.45	81.62	
0.90	29.17	72.15	48.90	102.52	



逆にそれぞれ深く,かつ小さくなる傾向にあり,空隙モ デルの埋設深さで-12~23mm程度,大きさで-55~26mm 程度の誤差が生じている。未知量が2変数の場合にも, 空隙モデルの埋設深さの推定結果は,未知量が1変数の 場合と同様に,熱伝達率が大きくなるほど浅くなる傾向 にあるが,空隙モデルの大きさは明確な傾向が認められ ず,推定誤差は,埋設深さで-6~28mm,大きさで-20~ 38mm程度となっている。図-7は,表面温度分布の推 定結果であるが,正確な熱伝達率を用いないと,表面温 度分布も測定結果とは異なったものとなっている。

4.4 推定精度に及ぼす日射吸収率の影響

表-9に解析-ⅢのM-N試験体で使用した日射吸収率 を変化させて逆解析した場合の内部探査結果(時刻13時 の場合)を示す。この表によれば、未知量が1変数の場 合には、逆解析に使用する日射吸収率を打放し面の実測 値(=0.6)よりも大きく設定すると、一般的に空隙モデ ルの埋設深さおよび大きさは、それぞれ実際よりも深く、 かつ小さく推定されるが、日射吸収率を実測値よりも小 さく設定すると, 上記の日射吸収率を大きく設定した場 合とは逆に、それぞれ実際よりも浅く、かつ大きく推定 される傾向にあり、空隙モデルの埋設深さで-12~9mm、 大きさで-28~23mm程度の誤差が認められる。また、未 知量が2変数の場合にも、空隙モデルの埋設深さの推定 結果は、未知量が1変数の場合と同様に、日射吸収率を 実測値よりも大きく設定すると実際よりも深くなり、逆 に小さく設定すると浅くなる傾向を示しているが、空隙 モデルの大きさについては明確な傾向が認められず、ほ ぼ正解値の近傍で変動している。未知量を2変数とした 場合の推定誤差は、空隙モデルの埋設深さで-6~28mm、 大きさで-20~38mm程度となっている。図-8は、表面 温度分布の測定結果と解析結果を比較したものである が、正確な日射吸収率を用いないと表面温度分布も測定 結果とは異なったものになっているのがわかる。

以上のことから,サーモグラフィー法による内部探査 結果の精度向上を図るためには,調合の違いによって変 化する内的な熱特性値(熱伝導率および熱拡散率),並 びに測定条件に関連する日射吸収率および熱伝達率など の外的な熱特性値を正確に把握して推定に反映させない と,上述したような内部評価に誤差が生じるため,これ らの熱特性値の取扱いに配慮する必要があるといえる。

5. 結 論

- サーモグラフィー法による内部探査結果の定量化を 図るには、測定対象内部の熱伝導率および熱拡散 率、測定表面と外気領域との境界条件である日射 吸収率および熱伝達率の取扱いが重要である。
- 2)コンクリートの調合条件に依存する内的熱特性値(熱 伝導率,熱拡散率),測定条件に関連する外的熱特 性値(日射吸収率,熱伝達率)が広範囲に変化す る場合でも、本研究で提案した非定常逆解析手法 を用いることにより、精度良く内部探査ができる。
- 3)過去の研究おいて定量化した内的熱特性値と調合要因との関係、風速・風向と熱伝達率との関係、並びに表面色と日射吸収率との関係を用いることにより、内部探査結果の精度向上が期待できる。

参考文献

- 関俊力、山田和夫:赤外線サーモグラフィー法による 内部評価に関する研究 -コンクリートの熱伝導特性 と内部評価の推定精度-,日本建築学会構造系論文集, Vol.77, No.681, pp.1605-1612, 2012.11
- 2)関俊力、山田和夫: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、コンクリート工学年次論 文集, Vol.32, No.1, pp.1751-1756, 2010.7
- 3)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, 1997.7