

## パッシブサーモグラフィ法を利用した盛土の締固め管理に関する研究

中央工学校○金光寿一 日大生産工 柳内睦人  
日大生産工(院)川久保政亮

### 1. はじめに

現在、道路盛土、河川堤防、宅地造成、埋戻し等の締固め管理では、施工現場の締固め管理状況に合わせて品質規定方式と工法規定方式が採用されている。品質規定方式は密度、締固め度、空気間隙率、飽和度、締固め強度等の試験が用いられ、工法規定方式では締固め機械の機種、締固め回数などで評価されている。その品質管理基準では、盛土量あるいは盛土面積に応じて測定頻度が決められており、盛土量が多くなると品質評価に費やす時間と労力が多大となる。また、締固め範囲が点の測定値であり、盛土全面の管理にはなっていないという問題点がある。すなわち、品質評価を特定箇所の評価で行う方法では、締固めの不十分である弱部を適確に評価することが困難であることが分かる。このような背景から、近年、工法規定方式では自動追尾TS(トータルステーション)及びGPSを用いて、作業中の締固め機械の位置座標を施工と同時に計測し、この計測データを締固め機械に設置したパソコンへ通信・処理(締固め回数のモニター表示)することによって、盛土全面の品質を締固め回数で面的管理する手法が導入されつつある。さらに、3Dスキャナによる沈下量の測定や振動ローラーに加速度計を搭載し、その加速度応答の相違から締固め状態の評価などが試みられている。しかし、振動ローラーからの加速度評価では材料のばらつきや振動ローラーの締固め範囲の重なりなどによって加速度応答が異なることが指摘されている。路盤の破壊や陥没、変形の要因は締固め不良箇所の支持力不足と考えられ、締固め状態に大きなばらつきが生じているものと思われる。従って、信頼のある盛土施工管理においては、面的分布のばらつきを考慮した施工管理手法が必要である。

そこで、本研究では、日射、外気温の変動を利用したパッシブサーモグラフィ法を適用した締固め管理について検討した。パッシブ

サーモグラフィ法は、広範囲の温度変化を視覚的及び定量的に求めることが可能であり、土の締固め度(密度、間隙比、飽和度の変化)の相違によってリアルタイムで温度場変化が明瞭になるものとする。

### 2. 実験概要

パッシブサーモグラフィ法は、被測定物に外部から熱負荷を与えた時、密度、比熱、熱伝導率などの熱特性の相違による断熱効果により熱拡散が妨げられた結果、測定表面に現れてくる局所的な温度変化の相違を検出するものである。従って、締固め面部位に含水比や空気間隙率の相違が存在する場合、健全な締固め箇所と不良箇所の表面では異なる温度上昇が現れてくることになる。

実験では、上層路盤の締固めを想定して粒度調整砕石(M-30)を使用して行った。その締固め管理では、含水比を一定に管理して締固め回数を変えた試験体、また、締固め回数を一定にして含水比を変えた試験体からパッシブサーモグラフィ法の適用について検討した。

#### 2.1 試験体及び実験条件

##### (1) 試験体

実験に供した試験体一覧を表-1及び表-2、また作製した試験体を図-1(a), (b)に示す。赤外線カメラによる温度測定は、含水比を一定にして締固め回数を変えた試験体(No. C1~C4)は平成23年9月7日に、また、締固め回数を一定にして含水比を変えた試験体(No. M1~M4)は平成23年9月16日に、それぞれ7:00~17:00の10時間で行った。試験体の大きさは、300×300×300mmで、日射による熱負荷条件からの熱移動をより明らかにするために50mm角の発泡スチロールを深さ10mm、20mm、30mm、40mmの位置に埋設している。また、実験では、試験体に発泡スチロールを埋設しているため、健全箇所の温度変化、また、締固めエネルギーの相違を明らかにするため、同時に締固め試験用(JIS A 1210 D 法)のモールド(φ150mm)

表-1 締固め回数を変えた実験条件(9/7日)

試験体 No.	試験体寸法 (mm)	突き数 (1周5回×繰返し回数)/層	TDR含水比の管理 (%)
C1	300×300×300	5×10=50	7.0
C2		5×6=30	7.0
C3		5×3=15	7.0
C4		5×1=5	7.0
D1	φ150×125	55	7.0
D2			8.0
D3			12.5
D4			14.6

表-2 含水比を変えた実験条件(9/16日)

試験体 No.	試験体寸法 (mm)	突き数 (1周5回×繰返し回数)/層	TDR含水比の管理 (%)
M1	300×300×300	5×10=50	7.14
M2			11.90
M3			16.30
M4			19.60
D5	φ150×125	55	7.14
D6			11.90
D7			16.30
D8			19.60

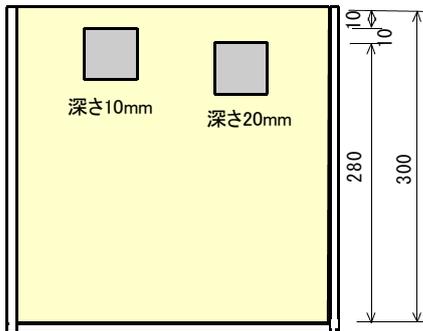
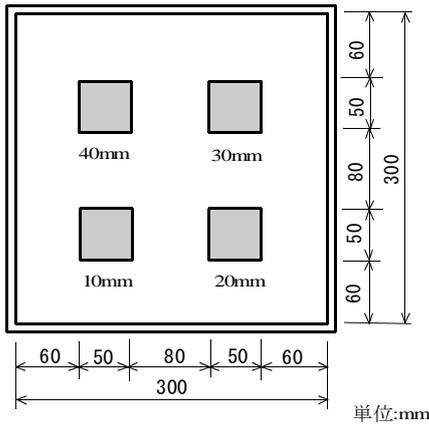
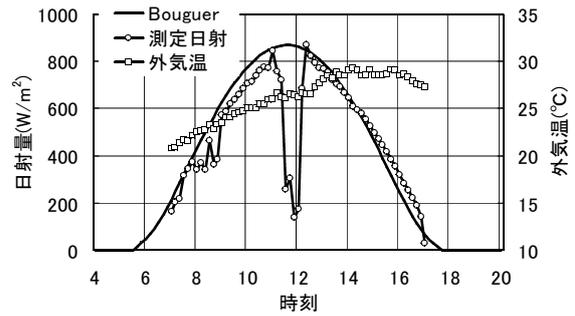


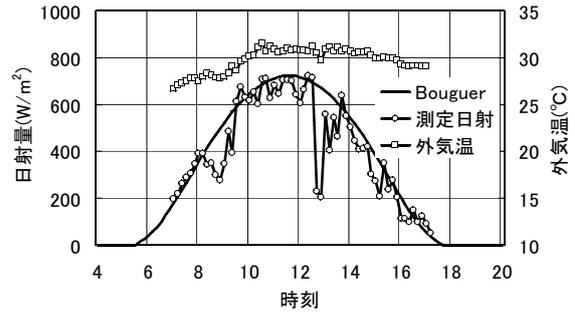
図-1 試験体と欠陥部(C及びM試験体)

での温度測定も実施して比較した。

試験体C及びMの締固め方法は、重量8kgの角形ランマー(145×145mm)を高さ500mmの位置から自然落下させた。幅300mmの周回を5回で突固め、試験体C1は1層当たりこれを10回繰返し、



(a) 9月7日



(b) 9月16日

図-2 日射量と外気温

高さ300mmの試験体を6層で締固めた。また、締固め試験用のモールドでは、JIS A 1210 D法に従って、5層で各層55回の締固めを行った。表中の含水比は、TDR土壌水分測定器(TDR-341F型)を用いて測定した締固め時の値である。なお、含水比の調整は粒度調整砕石に水を霧吹きにて均一に馴染ませ、さらに締固め後12時間以上試験体を密封して赤外線カメラによる温度測定を開始した。

(2) 実験条件

図-2(a), (b)には計測で得られた7:00~17:00までの全天日射量と外気温を示す。最大日射量は、9月7日が868W/m<sup>2</sup>(12:20)、9月16日が722W/m<sup>2</sup>(12:20)である。7:00~12:20までの積算日射量は9月7日が2,724W/m<sup>2</sup>・h、9月16日が2,725W/m<sup>2</sup>・hであった。図中には日射変動を検討するためにBouguer式で算出した全天日射量を示しておく。計算されたBouguer式の7:00~12:20までの積算日射量は9月7日が3,533W/m<sup>2</sup>・h、9月16日が2,939W/m<sup>2</sup>・hとなり、実験日の日射量の変動は、それぞれ77%, 93%になる。特に、9月7日は11:00~12:30、9月16日は12:30~13:40まで大きな日射変動が見られる。7:00~17:00までの平均外気温は9月7日が26.1℃、9月16日が29.7℃、7:00からの温度上昇はそれぞれ5.7℃、4.0℃であった。また、最大風速は9月7日が2.5 m/s(9:40)、9月16日が2.9 m/s(8:20, 13:50)であった。

### 3. サーモグラフィ法の締固め管理

赤外線カメラによる温度測定〔2次元非冷却マイクロボロメータ型、波長領域8.0～14.0 $\mu$ m、最小温度分解能0.05 $^{\circ}$ C(at30 $^{\circ}$ C)〕は、測定距離120cmの位置から20分間隔で熱画像の撮込みを行った。測定状況を写真-1に示す。

写真-2, 3は、含水比を一定にして締固め回数を変えた試験体Cの時系列変化の熱画像である。写真-4, 5はJIS A 1210に準じて55回で締固め含水比を変化させた熱画像である。また、写真-6, 7は、締固め回数を一定にして含水比を変えた試験体M1からM4の9:20と12:20の熱画像である。

#### 3.1 締固め回数を変えた熱画像と温度変化

写真-2, 3の時系列な熱画像を見ると、測定開始時の7:00から図-2(a)の日射エネルギーを受けて次第に表面温度は高くなり、11:40には一時日影となった表面温度の低下を確認することができる。1層当たり50回締固めた試験体C1と5回の締固め試験体C4との熱画像を比較すると、密度が小さい、空気間隙率の大きい試験体C4の方が温度上昇が大きいことが分かる。図-3及び図-4(a), (b)に健全部及び各欠陥部から健全部を減算した温度差変化を示す。先ず、健全部の温度上昇量では、締固め回数が多いほど上昇量が小さくなり、試験体C1とC4では11:00に4.2 $^{\circ}$ Cの温度上昇差が生じている。

欠陥部との温度差変化では、試験体C1とC4ともに12:00に最大温度差となり、その欠陥深さ10mm～40mmの温度差は試験体C1ではそれぞれ、7.4 $^{\circ}$ C、6.8 $^{\circ}$ C、6.6 $^{\circ}$ C、5.5 $^{\circ}$ Cとなり、試験体C4は6.3 $^{\circ}$ C、6.2 $^{\circ}$ C、4.8 $^{\circ}$ C、4.6 $^{\circ}$ Cが得られ、40mm以深においても締固め不良箇所の評価が可能であることが示唆された。

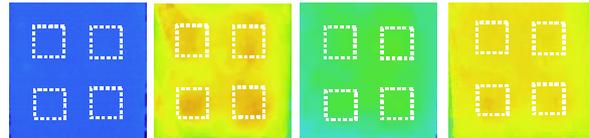
一方、写真-4、写真-5は含水比を変えて各層を55回で締固めた熱画像の比較で、含水比が大きいほど熱容量や蒸発潜熱の影響から温度上昇が遅くなることが分かる。図-5に試験体Dの温度変化を示す。試験体D1～D4をTDR含水比管理で締固めた含水比7%、8%、12.5%、14.6%の相違から、11:00には試験体D1より2.2 $^{\circ}$ C、3.3 $^{\circ}$ C、4.5 $^{\circ}$ C温度が低くなっている。この含水比に対する温度変化は、1%で約0.5 $^{\circ}$ Cである。赤外線カメラの最小温度分解能は0.05 $^{\circ}$ Cであるが、熱画像からの視覚的な評価を考えると、2%程度の含水比の相違であれば十分に判読できるものと思われる。

#### 3.2 含水比を変えた熱画像と温度変化

写真-6, 7の熱画像を見ると、含水比を変化させた写真-4及び写真-5に示す試験体Dと同様

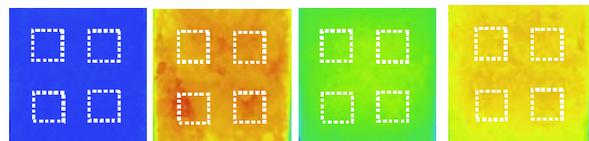


写真-1 赤外線カメラによる測定状況



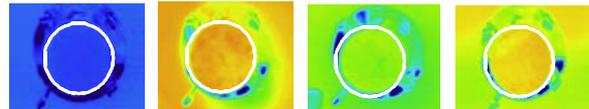
(a) 7:00 (b) 10:40 (c) 11:40 (d) 16:00

写真-2 試験体C1の熱画像(9/7日)



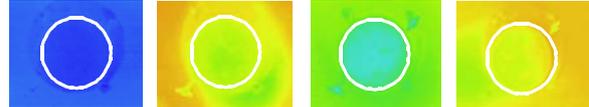
(a) 7:00 (b) 10:40 (c) 11:40 (d) 16:00

写真-3 試験体C4の熱画像(9/7日)



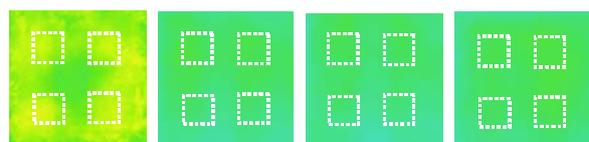
(a) 7:00 (b) 10:40 (c) 11:40 (d) 16:00

写真-4 試験体D1の熱画像(9/7日)



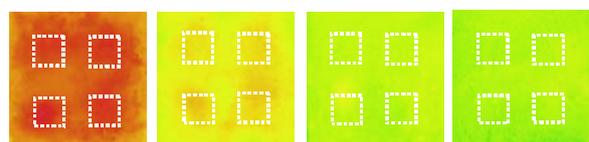
(a) 7:00 (b) 10:40 (c) 11:40 (d) 16:00

写真-5 試験体D4の熱画像(9/7日)



(a) M1 (b) M2 (c) M3 (d) M4

写真-6 試験体Mの熱画像(9:20, 9/16日)



(a) M1 (b) M2 (c) M3 (d) M4

写真-7 試験体Mの熱画像(12:20, 9/16日)

に含水比が大きくなるほど温度上昇量が小さくなることが分かる。図-6には、図-2(b)の日射エネルギーを受けて得られた健全部の温度変化を示す。試験体M1～M4の最大温度上昇量は12:20に得られ、それぞれ13.8 $^{\circ}$ C、8.8 $^{\circ}$ C、

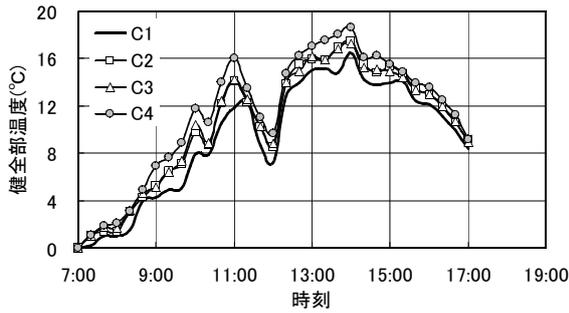


図-3 試験体Cの健全部温度変化(9/7日)

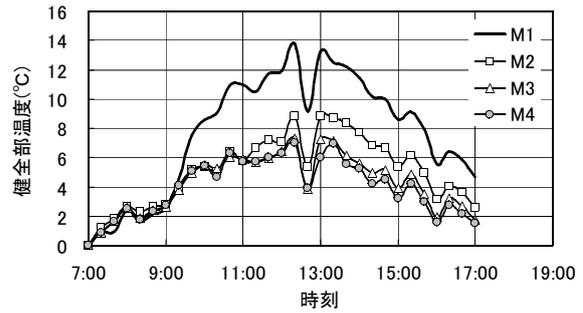
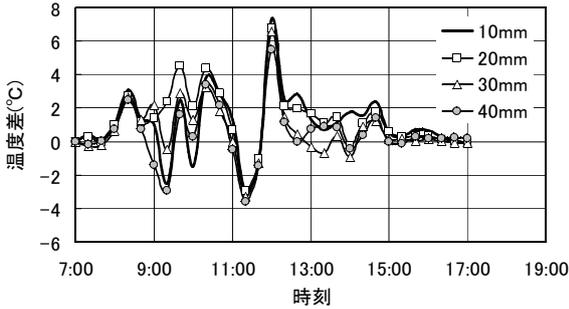
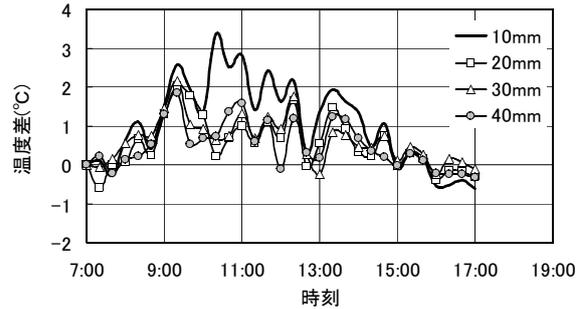


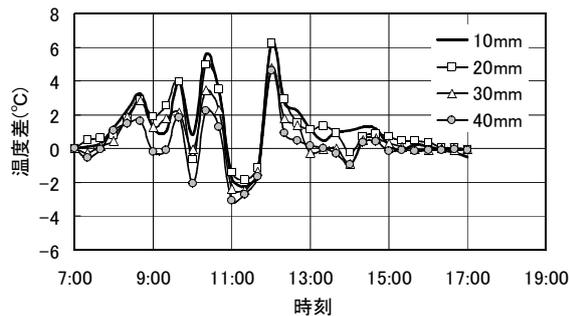
図-6 試験体Mの健全部温度変化(9/16日)



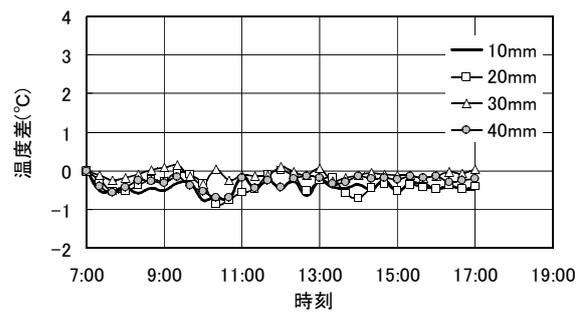
(a) 試験体C1(締固め回数50回/層)



(a) 試験体M1(TDR含水比7.14%)



(b) 試験体C4(締固め回数5回/層)



(b) 試験体M4(TDR含水比19.60%)

図-4 試験体Cの欠陥部の温度差変化

図-7 試験体Mの欠陥部の温度差変化

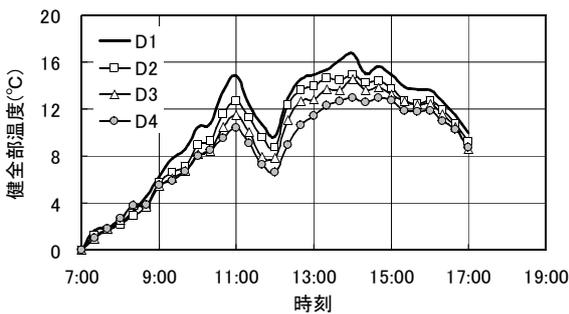


図-5 試験体Dの温度変化(9/7日)

7.3°C、7.0°Cである。前述した試験体Dと同様に、1%の含水比の相違で約0.5°Cの温度上昇差である。実現場では、先ず最適含水比付近で管理することになるが、パッシブサーモグラフィ法による温度管理によって十分に評価できるものとする。図-7(a), (b)には欠陥部と健全部との温度差を示す。写真-6, 7の熱画像を見ても含水比が大きくなると欠陥部との温

度差が判読できなくなっている。図-7(b)に示すように含水比が大きくなると逆に欠陥部の方が健全部よりも僅かではあるが温度上昇量が小さい。この温度差は、試験体M2及びM3においても11:00までは深さ10mmでも負の領域(-0.5°C程度)で推移している。

以上、パッシブサーモグラフィ法の実現場への適用では、敷均し時の最適含水比の評価、その後の締固め管理の一連の評価が可能であることが明らかになった。

#### 4. まとめ

本研究で得られた所見を以下に示す。

- (1) 日射を受けた表面温度変化は、締固め回数及び含水比とに相関性が認められる。
- (2) 温度の上昇は、締固め回数、含水比が小さいほど大きくなり、50mm角の深さ40mm以深の空洞部を熱画像から判読できる。