パッシブサーモグラフィ法による温度場変化を利用した盛土の締固め管理

1. はじめに

現在、道路盛土、河川堤防、宅地造成、埋 戻しなどの締固め管理では、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。品質規定方式は乾 燥密度(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、締固め回数等で評価 されている。しかし、現行の品質管理基準は、 測定頻度が盛土量あるいは盛土面積に応じた 特定箇所の評価であり、締固めが不十分であ る弱部箇所を適確に評価することは困難であ る。路盤の破壊や陥没、変形の要因は使用材 料の品質のバラツキや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バラ ツキ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においては、面的でバラ ツキ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、盛土の締固め管理の 効率性及び信頼性の向上を図ることを目的と して日射、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ものである。健 全な締固め箇所と不良箇所の表面では、含水 比や空気間隙率の相違によって熱パラメータ である密度、比熱及び熱伝導率が異なり、温 度場変化が現れてくることになる。前報の実 験では、上層路盤に使用される粒度調整砕石(M -30)を用いて、含水比の相違や締固め強度の 相違がどの程度の温度差となって現れるのか を明らかにした。本研究では、路体及び路床 の締固め管理を想定して実習地(関東ローム) において含水比の相違や締固め強度の相違が どの程度の温度差となって現れるのかをサー モグラフィ法から検討を行った。

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伝熱及び断 熱効果により熱拡散が妨げられた結果、測定

中央工学校〇金光寿一 日大生産工 柳内睦人 中央工学校 横田翔太郎

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。

実習地における実験は平成24年7月18日と7 月25日に行った。実験状況及び実験要因を写 真-1、写真-2及び表-1に示す。締固め評価は 締固め度と温度上昇変化との関係を明らかに するために、種々締固め回数及び含水比を変 化させて比較した。赤外線カメラを用いた測 定は、7月18日が12:50~18:00、7月25日が14: 00~17:00である。

2.1 試験体及び実験条件

(1)試験体

写真-1は、土を測定日前日にほぐしたもの (範囲A)と現状放置したもの(範囲B)、C10、 C30及びC50は、重量8kgの角形ランマー(145× 145mm)を高さ500mmの位置から10回、30回、50 回と自然落下させたもの、さらにW1及びW2は 散水量(水温28℃)を変化させたもので温度変 化の相違を明らかにするものである。

-方、**写真-2**のD10~D40は深さ方向の締固 め不良を評価するために、締固め用モールド 供試体(直径150mm×高さ170mm)に各層厚(10mm ~40mm)を55回で締固めた後、その上に粒度調 整砕石(粒径20mm~30mm、空隙率40%)を入れ て反対向きにして埋め込んだもの、S10、S30 及びS50はモルタル三連型枠供試体に含水比が 一定で締固め回数を変えたもの、M1、M2及び M3は締固め回数を一定にして含水比を変えた もの、さらにC10、C30及びC50は重量8kgの角 形ランマーで高さ500mmの位置から10回、30回、 50回と自然落下して締固めたものである。表-1には各試験体作製時の空気間隙率と含水比を 示す。その実験時の密度、空気間隙率及び含 水比は、圧密供試体作製器具であるカッター リングを使用して測定した。なお、実習地の 土粒子密度は2.599g/cm³、最大乾燥密度1.17 g/cm³、最適含水比32%である。

Management approach embankment compaction using the change of temperature field passive thermography method Juichi KANAMITSU, Mutsuhito YANAI and Shotaro Yokota



表-1 実習地の試験体及び実験要因

試験日	試験体概要	実験要因	空気間隙率(%)	含水比(%)
7/18 12:50 ~ 18:00	A	前日にほぐしたもの	38	13.9
	в	現状	21	30.9
	C10~C50	8Kgで10回, 30回, 50回締固め	27/20/17	15.4/17.7/14.6
	W1	水量300ccを散水	10	22.8
	W2	水量600ccを散水	8	31.6
7/25 14:00 ~ 17:00	D10~D40	厚み10mm~40mmに50回締固め。下は砕石	33/46/35/34	27.3
	S10~S50	最適含水比で一定。10回, 30回, 50回締固め	35/30/29	22.7
	M1~M3	50回締固め。含水比13%, 27%, 39%に設定	50/28/4	12.7/26.5/38.7
	C10~C50	8Kgで10回, 30回, 50回締固め	33/18/25	14.7/23.3/16.3

写真-2 7月25日



(2)実験条件
図-1には実験日の7:00~17:00までの全天日射量と外気温を示す。
Bouguer 式で算出した全天日射量と



写真-3 測定状況

比較すると実験日の日射量の変動は、7月18日 の12:50~18:00で81%,7月25日の14:00~17: 00では僅か36%になる。外気温は地上10cmの 位置で測定したもので、7:00からの温度上昇 はそれぞれ6.9℃,6.6℃であった。また、最 大風速は7月18日が8.3 m/s(14:00)、7月25日 が5.5m /s(14:20)であった。

3. 実験条件と熱画像

赤外線カメラ〔2次元非冷却マイクロボロメ ータ型,波長領域8.0~14.0µm,最小温度分解 能0.05℃(at30℃)〕による温度測定は、測定 距離6.3m(7月18日)及び2.3m(7月25日)の位置 から熱画像の撮り込みを行った。測定状況を 写真-3に示す。

3.1 7月18日に得られた熱画像と温度変化



a) 12:30 (b) 13:00 写真-4 熱画像(7月18日)

写真-4(a),(b)に7月18日に得られた熱画像 を示す。(a)は12:50に(b)は13:00に得られた 熱画像である。土の熱特性の相違から熱画像 は大きな温度差となって現れており、12:50で は最小温度が30.2℃、平均温度が40.7℃、最 大温度が51.0℃となっている。

(1)範囲A及び範囲B

範囲Aは、測定日前日にほぐしたもので、範 囲Bは現状放置したものである。圧密供試体作 製器具であるカッターリングを使用して測定 (18:00)した空気間隙率及び含水比は表-1の通 りである。熱画像から得られた範囲Aと範囲B のヒストグラムと平均温度変化を図-2(a), (b) 及び図-3に示す。写真-1のA及びBの範囲は、 1,500×2,300mm、1,200×2,300mmで、この範 囲の画素数はそれぞれ3,956及び3,285Pixelで ある。その13:00のヒストグラムを比較すると、 明らかに温度範囲や分布形状に違いが見られ る。標準偏差は、範囲Aが3.1℃範囲Bが2.0℃ で、土の熱特性の相違を確認することができ る。空気間隙率は、範囲Aが38%、範囲Bが21 %、また含水比はそれぞれ13.9%、30.9%で ある。図-3に示す平均温度の時系列変化では、 13:00の両者の温度較差は5.6℃で13:40には 7.8℃となり、その後両者の温度較差は小さく



なり18:00には1.2℃となっている。日射を受けた土の表面温度は、空気間隙率が大きく、 含水比が小さいほど高くなる。

(2)C10、C30及びC50

C10、C30及びC50の位置は、12:50~13:00の 間に重量8kgの角形ランマーを高さ500mmの位 置から10回、30回、50回と自然落下させたも のである。図-4には、熱画像に示す破線位置 のプロファイル温度を示す。13:00の熱画像で は各締固め位置に周辺箇所よりも低温域が確 認され、締固め回数が多いほど温度が低くな っている。僅か10分間以内の温度変化であり、 実現場でのプルーフローリング試験に適用で きる可能性が示唆された。

(3)W1及びW2

W1及びW2の箇所は、散水量(水温28℃)を300 cc及び600ccと変化させて散水したものであ る。図-5には両者の温度変化を示す。なお、 図中の健全箇所と称する温度はW1とW2箇所間 で得られたものである。12:50~13:00の間に 散水し、両者の平均温度較差が現れ始めるの は40分ほど経過した13:40で、最大温度較差は 14:20に2.4℃が得られ、その後は1℃以下の較 差となっている。散水によってW1とW2の含水 比は22.8%及び31.6%で両者の差は9%程度あ るものの、14:00頃になると日射量、外気温と もに減少傾向にあり僅かな較差に留まったも のと考える。一方、蒸発潜熱の影響は健全部 の変化と同様であり、小さいものと思える。











図-6 ヒストグラム

図-6(a),(b) は14:00に得ら れたヒストグラ ムである。この 14:00における 両者の平均温度 較差は0.63℃で あるが温度分布



は明らかに異っている。600cc散水したW2の方 がバラツキが小さいのは、表層部により均一 に水が浸透したためと考える。

3.2 7月25日に得られた熱画像と温度変化

写真-5は7月25日の14:00に得られた熱画像 である。熱画像では、締固め用モールド及び モルタル三連型枠で作製した試験体を地中に 埋め込むために掘り起こした箇所に高温域が 確認される。

(1)D10、D20、D30及びD40

D10~D40は深さ方向の締固め不良を評価す



るために、締固め用モールド試験体に各層厚(10mm~40mm)を55回で締固めた後、その上に粒 度調整砕石を入れて反対向きにして埋め込ん だものである。埋め込んだ時刻は10:00である。 図-7には14:00に得られたD10~D40のプロファ イル温度を示す。その温度変化は各層厚に対 応した温度差が確認される。厚み10mm~40mm の温度差は、それぞれ6.2、5.9、4.0及び3.2 ℃となっており、これらの相関から深さ70mm 程度までの締固め不良が判読できるものと思 われる。

(2)S10、S30及びS50

S10、S30及びS50試験体は、モルタル三連型 枠供試体に含水比(最適含水比)を一定にして 締固め回数をそれぞれ10回、30回、50回と変 えたものである。図-8に各試験体から得られ た平均温度を時系列で示す。その温度変化で は0.7℃程度の較差しか得られていない。空気 間隙率は35、30及び29%である。モールドを 用いた締固め試験での空気間隙率は最適含水 比において18%であり、この値を大きく越え た上記の空気間隙率較差では大きな温度較差 は期待できない可能性がある。

(3)M1、M2及びM3

M1、M2及びM3試験体は、モルタル三連型枠 供試体に締固め回数を50回の一定にして含水 比をそれぞれ13%、27%及び39%に変えたも のである。図-9に各試験体から得られた平均 温度を時系列で示す。14:00における温度較差



はM1とM2は6.5℃、M2とM3は3.1℃で17:00には それぞれ2.7℃、1.5℃となる。このことから 表面温度は空気間隙率よりも含水比の相違に 大きく影響を受けることが分かる。

(4)C10、C30及びC50

C10、C30及びC50の位置は、13:50~14:00の 間に重量8kgの角形ランマーを高さ500mmの位 置から10回、30回、50回と自然落下させたも のである。図-10には、プロファイル温度から 得られた平均温度を時系列で示す。温度上昇 はC10、C50、C30の順になっている。それぞれ 14:00の温度は37.5℃、35.6℃、36.3℃となっ ている。締固め回数の多いC50よりもC30の方 が温度が低い。この温度が逆転している理由 は、写真-2のC30でも確認できるが表-1に示す 通り含水比がC30は23.3%、C50が16.3%と高 く、また空気間隙率も小さいために生じたも のと考える。

4. まとめ

本研究で得られた所見を以下に示す。

- (1)熱画像では、土の熱特性の違いによって 広範囲の温度変化を視覚的及び定量的に 確認することができる。
- (2) 日射を受けた表面温度は、空気間隙率よ りも含水比の相違に大きく影響される。
- (3) 締固め回数が多いほど温度が低くなり、 実現場でのプルーフローリング試験に適 用できる可能性を示唆された。