

原位置水浸試験方法の検証

平成 28 年度 報告書

平成 29 年 3 月

一般財団法人 建設工学研究所

目 次

はじめに	i
1. 研究背景	1
2. 試験盛土における現場水浸沈下試験	3
2.1 盛土に使用した試料の物性	3
2.2 盛土施工	5
2.3 簡易貫入試験によるN値の結果	10
2.4 現場水浸沈下試験	12
2.4.1 試験方法	12
2.4.2 試験結果	17
3. 数値シミュレーションによる実験の再現	19
3.1 解析に使用した基礎方程式	19
3.1.1 浸透流の基礎方程式	19
3.1.2 水分特性曲線	20
3.2 解析手順	21
3.3 解析条件	22
3.4 解析結果	24
4. ドローン (UAV) による空中写真画像から取得できる3次元データの活用	28
4.1 使用機材	28

4.2	飛行経路の選定	30
4.3	基準点の設置	32
4.4	画像解析	33
4.4.1	画像解析の流れ.....	33
4.4.2	SfM【Structure from Motion】について.....	34
4.4.3	MVS【Multi View Stereo】について.....	34
4.4.4	高密度点群から三次元モデルの作成について.....	35
4.4.5	画像成果.....	36
4.5	複数時期の差分解析.....	37
4.5.1	試験条件.....	37
4.5.2	差分解析結果.....	38
4.	まとめ.....	44
	参考文献.....	45

はじめに

昔から、宅地盛土の水浸沈下による住宅被害の事例が数多く報告されている。現在、盛土造成による新設住宅地盤の品質管理方法として、締固め度の平均値 87%以上が規定されているが、道路や河川堤防といった土工構造物と比較すると、締固め度の管理基準値が相対的に低い上に平均値管理であることが、締固め不足による盛土の水浸沈下トラブルの温床となっている。

一方、宅盤の品質評価方法としてスウェーデン式サウンディング試験（以下、SWS 試験）が一般的に利用されているが、SWS 試験だけでは変形に対する評価が難しく、宅盤の品質を保証しているとは言い難い。したがって、住宅地盤の変形（とりわけ、水浸沈下）に対する品質管理手法を確立しておくことの工学的および社会的意義は大きい。

このような背景から、H26 年度より住宅地盤品質協会からの依頼を受けて（一財）建設工学研究所では、住宅地盤の性能評価のための原位置水浸沈下試験（以下、現場水浸試験）方法のガイドライン（案）をリリースしている。本報告書では、昨年度までに提案してきた原位置水浸沈下試験に関するガイドライン（案）をもとに、締固め度を変えた試験盛土群を造成し、各盛土に対して原位置水浸沈下試験および室内水浸沈下試験を実施した。また、試験盛土に雨水を浸透させることで水浸沈下特性や N 値等に影響があるかどうかを確認した。さらに、現地の盛土条件下における盛土内部への水の浸透状況に関する検討も行った。

平成 29 年 3 月 31 日

一般財団法人 建設工学研究所
業務執行理事 澁谷啓

1. 研究背景

近年、豪雨や地下水位の上昇によって、宅盤で水浸沈下が発生し、住宅が傾くなどの被害が生じている事例が数多く報告されている^{1),2)}。これら水浸沈下の原因は、不十分な締固めが行われた地盤内に雨水や地下水が流入することで、地盤内が飽和し、粒子間の付着力であるサクシオンが消失するためだと考えられる³⁾。

現在、実盛土において締固めた土を材料とする土構造物の施工は、締固め度 D_c (=ある施工現場内の多数の地点でそれぞれ測定した乾燥密度 / 所定の締固めエネルギーによる室内締固め試験で求めた最大乾燥密度) が基準となっている。宅地盛土では、盛土地盤の全測定値における締固め度の平均値の下限值が 87%ないし 90%と宅地防災マニュアルの解説⁴⁾によって規定されている。しかし、宅地地盤の締固め度 D_c は図-1.1 に示すように正規分布的にばらつくことが多く、平均値単独による管理値の規定には大きな問題があるとされている⁵⁾。また、道路や橋梁などの土木構造物と比較すると、宅地盛土は主として建築分野の土俵であるが故に、土木分野ほど宅地地盤の締固めに関して厳密な管理が行われていないのが現状である⁶⁾。

宅盤の品質評価方法として一般的に利用されているのがスウェーデン式サウンディング試験(以下、SWS 試験)である。SWS 試験では、地盤の支持力や標準貫入試験で求められる N 値と同様な換算 N 値が得られ、土質の判定や地盤の硬軟を簡易的に推定できる。実状として、地盤改良を行う割合は新築戸建総数の 3~4 割程度とされる⁷⁾が、より過大な調査費をかけて詳細な地盤調査を実施すれば、改良の必要がないと判断される可能性もある。しかし、詳細な地盤調査によって改良工事の必要性を確実に判断できればよいが、対策工を採用せずに不同沈下などの性能障害が発生した際の保証を考えるとその判断は容易ではない。したがって、SWS 試験器具を用いた宅盤の品質評価手法を新たに導入することで宅盤の品質が担保できれば、大変有意義な試験となりうると考えられる。

これまで、澁谷ら⁸⁾は原位置試験・室内試験の結果を基に、宅盤の性能評価に頻繁に用いられる SWS 試験器具を用いた宅盤の品質評価手法を提案した。図-1.2 に提案された原位置水浸沈下試験の概略を示す。原位置水浸沈下試験には比較的準備しやすい試験器具を用いている。また、浸透流解析の結果から、浸透流感知装置を試験実施場所の深さ 10cm に設置することにより、原位置水浸沈下試験の時間を短縮する方法等も挙げられている。

本研究では締固め度を変えた試験盛土群を造成し、各盛土に対して原位置水浸沈下試験および室内水浸沈下試験を実施した。また、試験盛土に雨水を浸透させることで水浸沈下特性や N 値等に影響があるかどうかを確認した。さらに、現地の盛土条件下における盛土内部への水の浸透状況に関

する検討も行った.

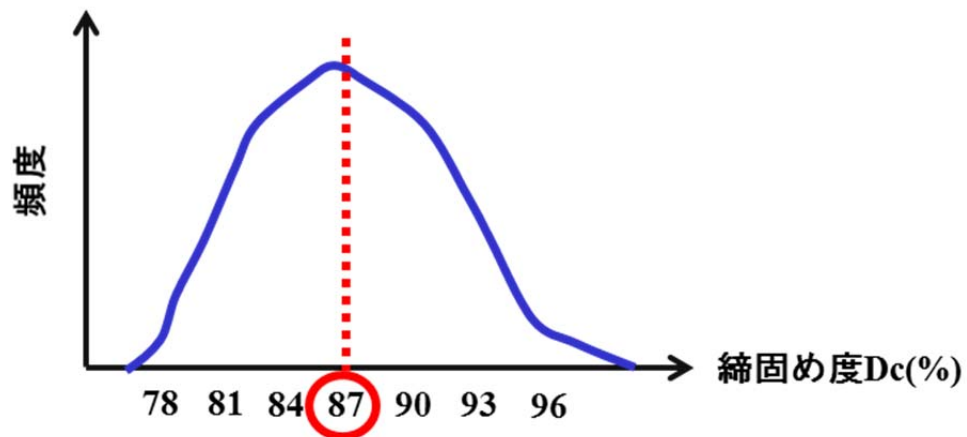


図-1.1 締固め度の測定値の概略図 ⁵⁾に追記

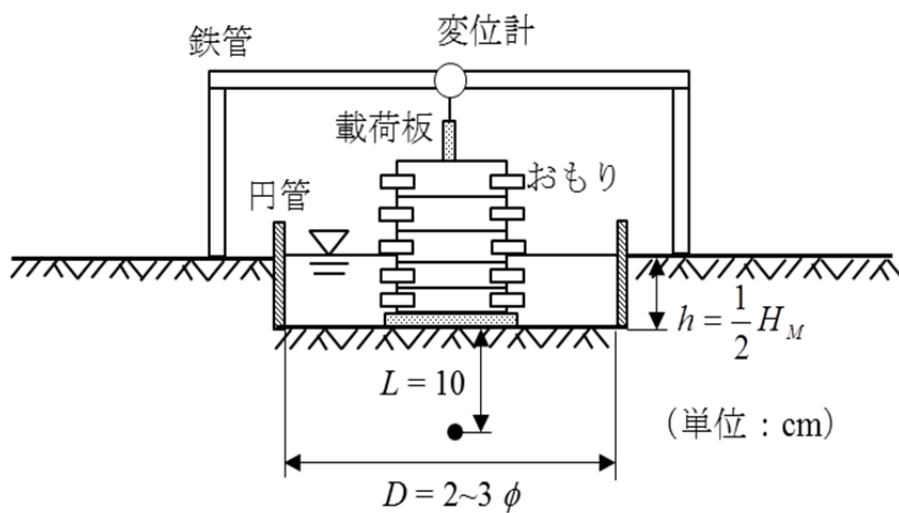


図-1.2 提案した原位置水浸沈下試験の概略図 ⁸⁾

2. 試験盛土における現場水浸沈下試験

2.1 盛土に使用した試料の物性

盛土に使用した材料の物性値を表-2.1 に示す。合わせて、粒径加積曲線を図-2.1 に、締固め曲線を図-2.2 に示す。本試験では、最大粒径 26.5mm の粒径幅が広い一般的なまさ土を用いて試験を実施した。

表-2.1 盛土に使用したまさ土の物性

土粒子密度 $\rho_s(\text{g}/\text{cm}^3)$	自然含水比 $w_n(\%)$	礫 分(%)	砂 分(%)	細粒分(%)	均等係数 U_c	曲率係数 U_c'	平均粒径 $D_{50}(\text{mm})$	地盤材料 分類名	分類記号
2.675	3.7	23.2	62.1	14.7	29.4	2.811	0.67	細粒分まじり 礫質砂	SG-F

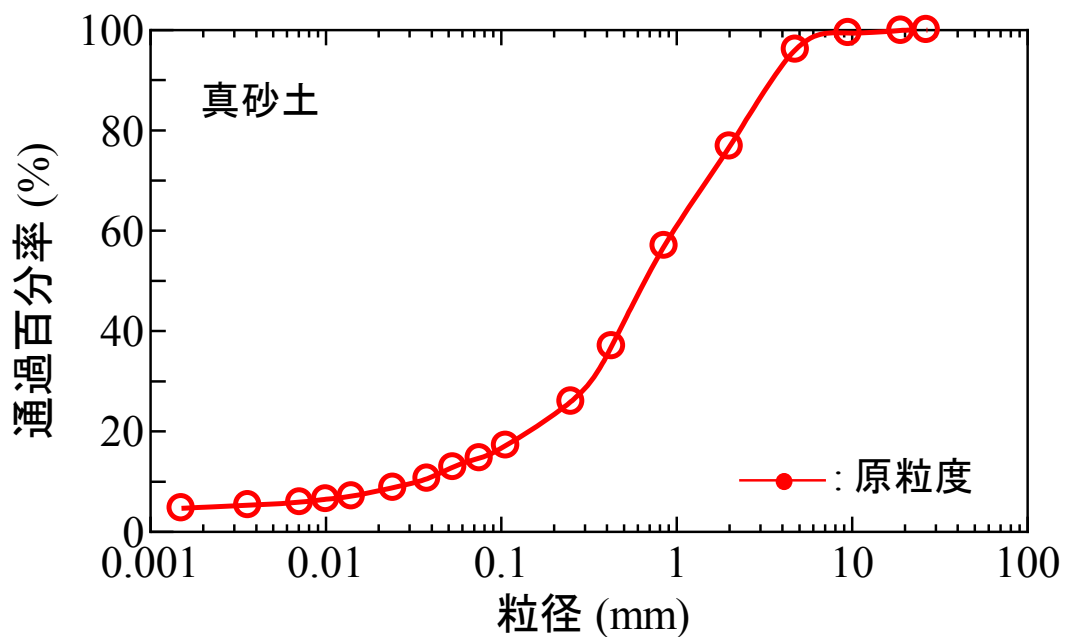


図-2.1 粒径加積曲線

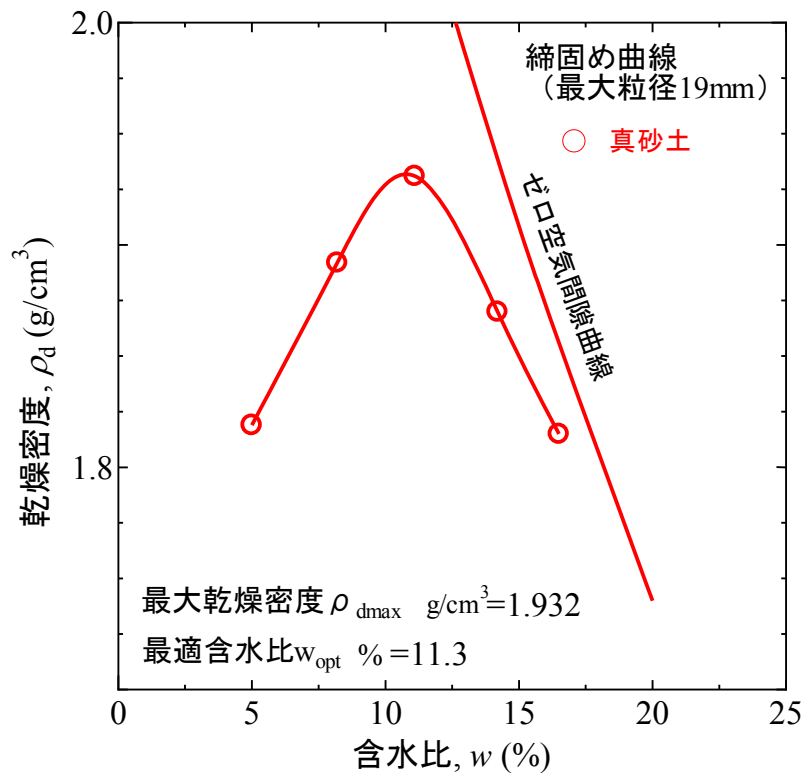


図-2.2 締固め曲線

2.2 盛土施工

本試験では、水浸による沈下の有無を判断できるように異なる締固め度 D_c の試験盛土群を造成した。試験盛土は3パターン ($D_c=75\%$, 85% , 95%) とし、試験盛土を造成した。それぞれ盛土高さは1m, 天端部分は1.5m×3.5m, 法面勾配1:1.5となるように造成した。試験盛土の天端図・側面図をそれぞれ図-2.3及び図-2.4に示す。

施工する際の盛土のまき出し厚に関しては20cmに設定した。これは、現場水浸試験実施時は天端部分から10cmの穴を掘ること、土壌水分計を試験場所の掘削面から深さ10cmに設置するための両方を考慮したからである。そのため、天端から20cm(試験地盤面下10cm)の位置に土壌水分計を設置した。盛土施工時の様子に関しては写真-2.1に示す。

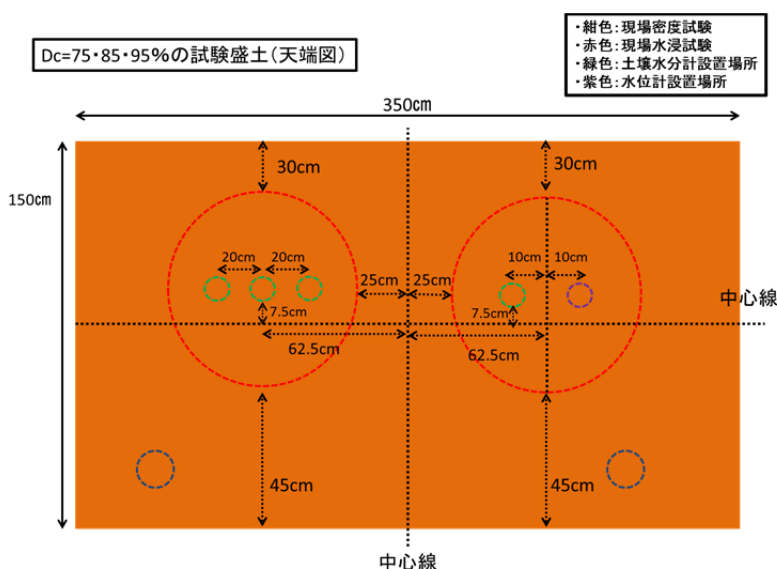


図 2.3 各種原位置試験の位置(天端)

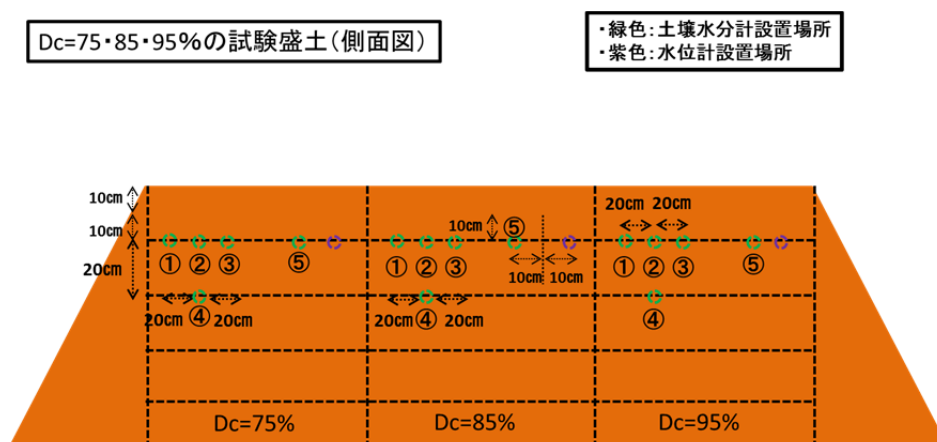


図 2.4 各種原位置試験の位置(側面)



Dc=75%盛土(バケットでの締固めのみ)



Dc=85%盛土(ハンドローラーでの締固め(0.5 往復))



Dc=95%盛土(ハンドローラーでの締固め(10 往復))

写真-2.1 盛土施工時の様子

試験盛土完成時の様子を写真-2.2 に示す。左から締固め度 $D_c=95\%$ 、 85% 、 75% の盛土である。盛土の法面に関しては、盛土の型崩れを防止するためにショベル・スコップ等で十分に締め固めた。また、1回目の試験開始までは盛土内部への雨水の浸透を極力抑制するために、盛土全体をブルーシートで覆わせて盛土内に雨水の侵入を防いだ。

なお、今回の試験では施工直後と施工後に盛土を雨ざらしにした状態の盛土の2つのケースにおいて水浸沈下試験を実施し、盛土に乾湿が加わった場合の水浸沈下への影響についても検証した。盛土施工後の水浸沈下試験から2回目の試験（施工2か月後に実施）までの当該地域の降雨データに関しては、図-2.5 に示す通りである。



写真-2.2 試験盛土全体の様子

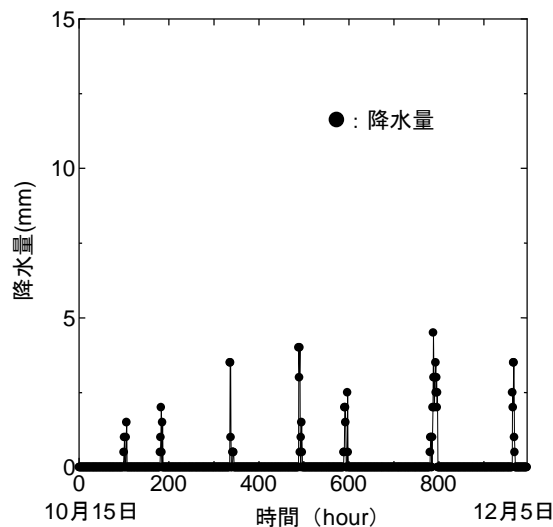


図-2.5 盛土施工後(1回目試験終了後)からの降雨データ

上記の造成した試験盛土が目標締固め度となっているか確認するために、現場密度試験を実施した。写真-2.3 に砂置換法による現場密度試験概況を示す。現場密度は、砂置換法による土の密度試験方法（JIS A 1214）に準じて実施した。得られた密度と、室内締固め試験から得られた最大乾燥密度（ $\rho_{dmax}=1.932\text{g/cm}^3$ ）を以下の式を用いて締固め度 D_c を算出した。

$$D_c = \frac{\text{現場で測定された締固め土の乾燥密度 } \rho_d}{\text{突固め試験から得られた最大乾燥密度 } \rho_{dmax}} \times 100$$



写真-2.3 現場密度試験の様子

試験盛土造成時に各層で実施した現場密度試験結果を表-2.2 に示す。各盛土とも、目標設定した締固め度に多少のばらつきがあるものの、5層（20cm/1層）の平均を見れば、概ね目標締固め度と一致していることが分かる。なお、試験盛土2層目の含水比が他層に比べて若干高い傾向があるが、これは2層目造成時に小雨が降る中での施工であったために含水比の上昇につながったものと考えられる。

表-2.2 各層毎の締固め度の比較(施工時)

	Dc=75%		Dc=85%		Dc=95%	
	含水比w(%)	締固め度Dc(%)	含水比w(%)	締固め度Dc(%)	含水比w(%)	締固め度Dc(%)
1層目	7.62	77.2	7.62	83.7	6.46	90.8
2層目	11.76	80.8	9.27	84.0	10.83	95.8
3層目	12.79	71.7	8.68	89.6	3.34	100.7
4層目	6.31	78.6	2.58	87.9	7.93	96.3
5層目	8.28	70.7	9.22	79.4	8.04	92.4
平均値	9.35	75.8	7.47	84.9	7.32	95.2

ここで、2か月間雨ざらしにした後の盛土に対しても盛土天端から10cm掘削した面にて現場密度試験を実施した。結果を表-2.3 に示すが、施工直後と比較すると全体的に盛土が締固められている状況であること、特にDc=75%で施工した盛土では締固め度の増加が顕著であることが伺える。これは、2か月間盛土を雨ざらしにしたことで盛土自体が水締めされ、結果として盛土の密度が増加したことが一因となっているものと考えられる。

表-2.3 施工後2か月が経過した盛土天端での締固め度

Dc=75%		Dc=85%		Dc=95%	
含水比w(%)	締固め度Dc(%)	含水比w(%)	締固め度Dc(%)	含水比w(%)	締固め度Dc(%)
6.29	93.27	6.73	97.48	6.81	99.82

2.3 簡易貫入試験によるN値の結果

盛土の強度をより詳細に把握するため、施工直後に簡易貫入試験（JGS 1433-2012 に準拠）を実施した。試験装置を図-2.6 に示す。簡易貫入試験は簡単に実施可能であるサウンディング試験として、地盤表層部の調査に広く用いられる一方で、打撃エネルギーが小さいために貫入抵抗の多い硬質粘性土や砂礫地盤には適用不可能という欠点を持つ。

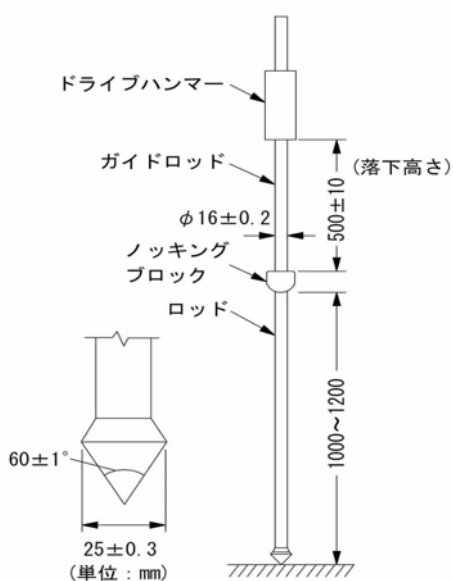


図-2.6 標準貫入試験実施の概略図

施工直後に各盛土の天端にて実施した試験結果を図-2.7に示す。図から、締固め度の増加に伴いN値が高くなっていることがわかる。ここで、Dc=75、85%の盛土では、深度毎のN値増加が確認できず一様に低い値を示している一方で、Dc=95%では不規則な強度の高低が確認できる。今回の盛土のまき出し厚が0.2mであり、ここでは施工時にハンドローラーを使用して転圧しているため、転圧箇所ではN値の増加が顕著になったものと考えられる。

ここで、図中には施工2か月が経過した盛土にて実施した貫入試験の結果も示すが、表-2.3に見られたような締固め度の増加があるものの、N値からはその傾向が顕著ではないことから、雨ざらしにしたことによる強度の増加は、密度増加ほど敏感に反応を示していないことが伺える。

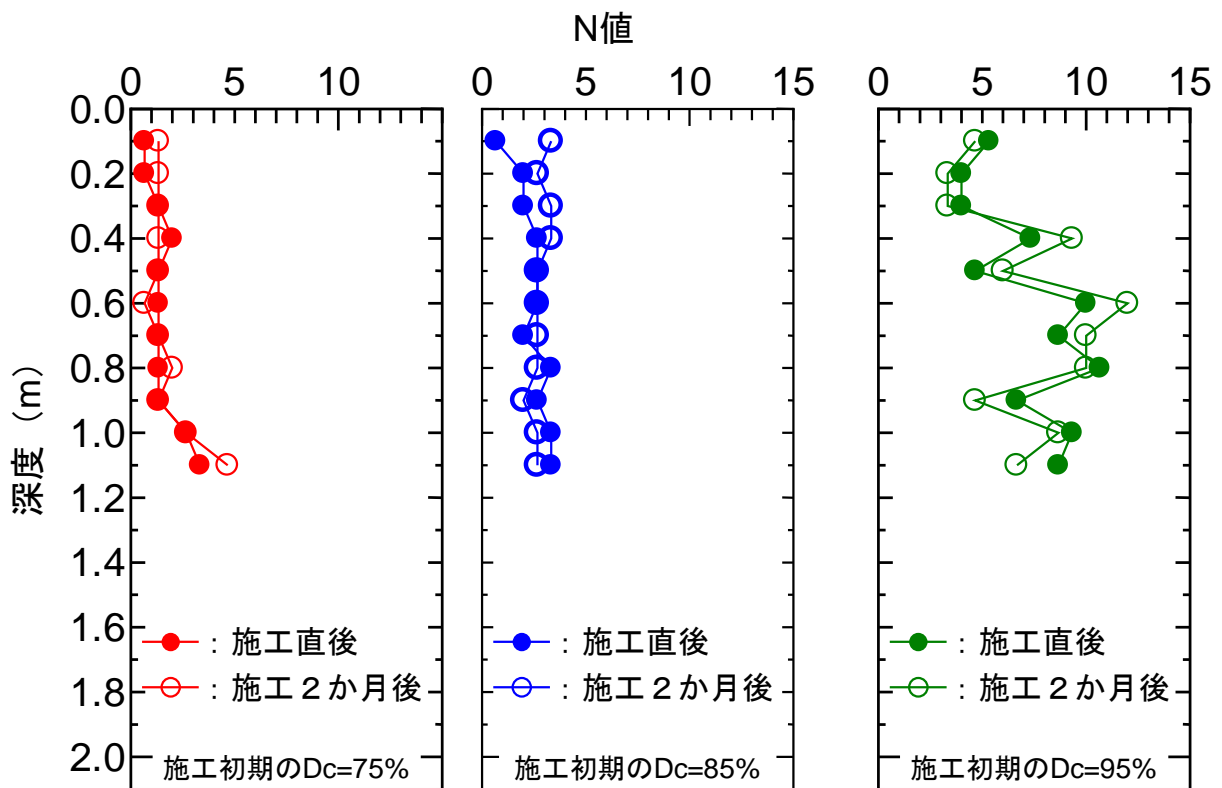


図-2.7 簡易貫入試験結果

2.4 現場水浸沈下試験

2.4.1 試験方法

現場水浸沈下試験は、澁谷らが提案するガイドライン案⁸⁾に則って実施した。以下に、当該試験に使用した器具等について示す。

<試験に使用した器具>

- (1) 載荷板：直径 25cm の円形であり，上下面が平板な鋼板。
- (2) 載荷装置：スウェーデン式サウンディング試験に用いられているおもりを使用した。
- (3) 注水用円管：掘削孔壁面を止水するために設置した。円管の直径は 75cm である。
- (4) 乾燥砂：載荷板を設置する際に，掘削面と載荷板を水平に保つ目的で使用した。なお，今回の試験では粒径 2mm 以下の市販砂を用いた。
- (5) 変位計：最小メモリが 1/100mm で最大 20mm まで測定できるダイヤルゲージを使用した。
- (6) 水分計測装置：対象深度に浸透流が到達したと判断できる装置を利用した。なお，施工直後に実施した試験では土壤水分計（写真-2.4 参照）のみ，施工 2 か月経過時に実施した試験では土壤水分計と水位計（投げ込み式，写真-2.5 参照）を用いて計測している。土壤水分計と水位計の設置位置は図-2.8 に示す通りである。なお，水位計に関しては，円管の外側から電動ドリルを用いて掘削し，地中に挿入した塩ビパイプの中に入れており，水がセンサー部にくると音が鳴るような仕組みになっている。



写真-2.4 土壤水分計(左)と計測用ロガー(右)



写真-2.5 水位計(計測部は○で示す箇所)

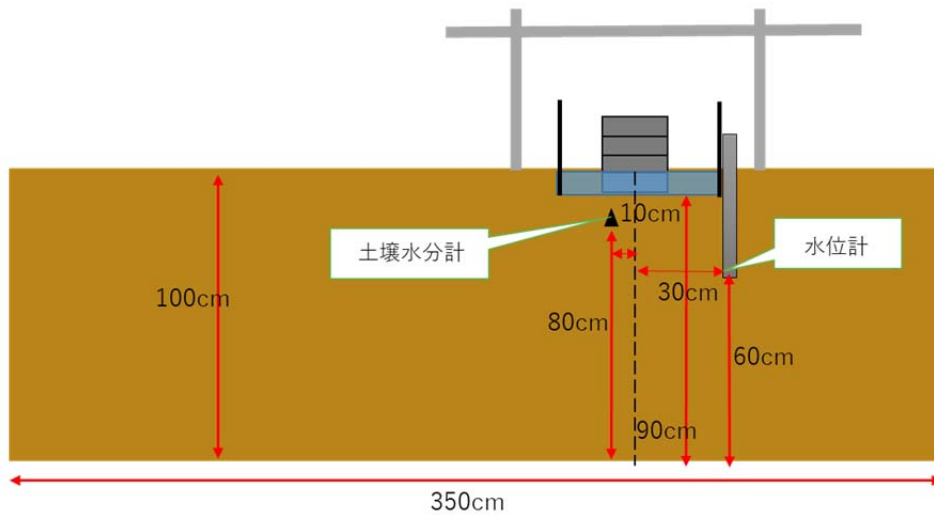


図-2.8 水位計と土壤水分計の設置位置

次に原位置水浸沈下試験の試験手順を以下に記す。なお、試験の概略図は、図-1.2 に示した通りである。

<試験手順>

- (1) 試験位置は、事前に設置していた土壌水分計の上部で実施した。また、施工直後と施工2か月経過時の2回に分けて試験を実施するため、それぞれ天端部分の半面を試験位置に設定した。
- (2) 試験地盤面の掘削幅は、円管の直径に合わせるため、75cmの掘削幅に設定した。また、掘削高さに関しては、盛土のまき出し厚が0.2mであることから、10cmの掘削高さにし、掘削面を水平に整地した。
- (3) 載荷板は、整形した掘削面に乾燥砂を2~3mm程度敷き、水平になるように設置した。
- (4) 単管やクランプを用いて、沈下量測定装置を組み立て、載荷板にダイヤルゲージを2つ設置した。これは試験中に載荷板が傾く可能性や、載荷板に設置したダイヤルゲージが載荷板から外れてしまい、測定できないことを考慮するためである。なお、沈下量は、ダイヤルゲージ2つの平均値としている。沈下量測定装置を対象地盤に設置する際に、単管を地盤に埋め込むが、地盤内が密になることを極力防ぐために、写真-2.6のように従来の埋め込み型から据え置き型の沈下量測定装置に変更した。
- (5) 試験準備が整い次第、おもりを載荷し、圧密段階に移行するが、本試験では施工直後と施工2か月経過時の各試験でおもりの載荷方法が違うので、それぞれの試験方法を分けて記載する。なお、給水時の様子は、写真-2.7に示す。

施工直後の試験：2階建ての木造家屋の総荷重を意識して、圧密段階で95kg（約19kPaの応力に相当）のおもりを載荷し、圧密沈下量を測定した。圧密沈下量が一定値に収束したら、給水を開始し、水浸過程に移行する。水位は掘削面から掘削高さである10cmまで水を張り、水位を保った。給水後、沈下量が収束した段階で、おもりを12.7kgずつ段階的に載荷させていき、全てのおもり（171.8kg、約34.4kPaの応力に相当）を載荷させた後、沈下量が収束するまで計測を行った。

施工2か月経過時での試験：圧密段階で施工直後に実施した際の最大荷重（171.8kg）まで載荷した。沈下量が収束した段階で給水し、水浸過程に移行した。給水後、水浸沈下量が収束するまで試験を実施した。



写真-2.6 水浸沈下試験の様子(据置型の沈下量計測)



写真-2.7 給水時の様子(D_c=95%盛土)

2.4.2 試験結果

圧密過程においては、先に示すように上載させている荷重が異なるために、ここでの記載は省略し、水浸過程における沈下量の比較を行った。図-2.9は、施工直後の盛土（図中、破線で示す）および施工後2か月が経過した盛土（図中、実線で示す）で実施した水浸沈下試験時の沈下量を時系列で示したものである。締固め度の異なる盛土において、施工直後では、 $D_c=75\%$ で施工した盛土の水浸による最終沈下量が約8mmに対し、 $D_c=95\%$ では0.3mmと水浸沈下量が著しく小さくなっており、盛土施工時の締固め度が水浸沈下量に大きく影響することが伺える。また、同じ $D_c=75\%$ で締固めた盛土でも、一定期間雨ざらししておくことによって、沈下量が2.7mmにまで低下した。

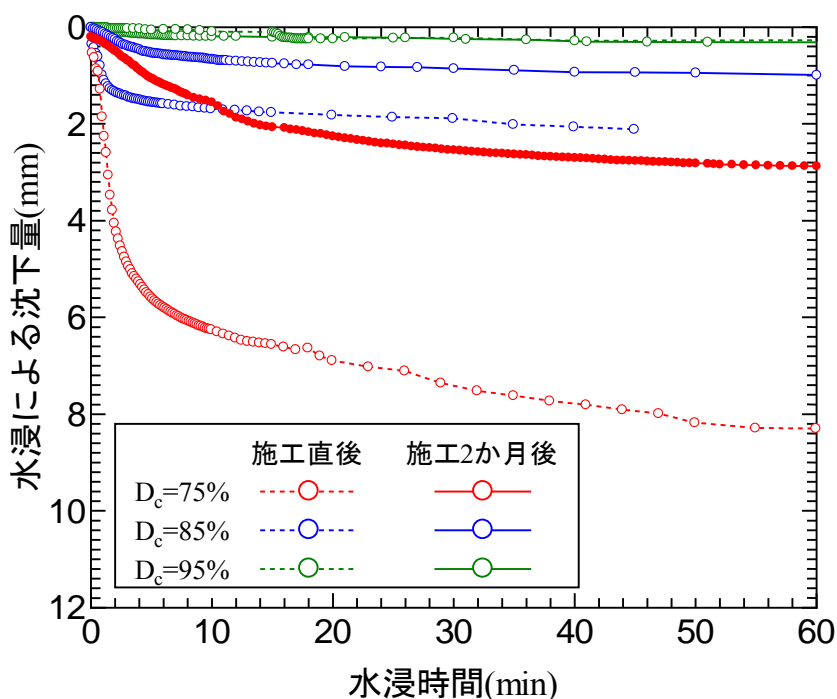


図-2.9 各盛土における水浸沈下量の比較

図-2.10 は、施工2か月が経過した時点の盛土における土壌水分計の計測データである。土壌水分計は、現場水浸沈下試験時に試験地盤面下10cmの位置に設置したデータを記載している。なお、図中の飽和度は、各締固め度の盛土に設置した土壌水分計のうち、一番大きい体積含水比 Θ_{max} を示したものを飽和度 $S_r=1$ と仮定して、その値からの各時間における体積含水率 Θ_n との比により算出したものである。式を以下に示す。

$$S_r = \frac{\theta_n}{\theta_{max}}$$

図より、 $D_c=75\%$ においては、水の給水が断続的に不足したため、給水中の飽和度が不安定となっている。当初、締固め度が大きいほど水の到達が遅いことが想定されたのであるが、 $D_c=85\%$ と 95% での差がほとんどなかった。また、注水後から飽和度が低下するまでにかかる時間が $D_c=95\%$ のほうが早くなっていた。

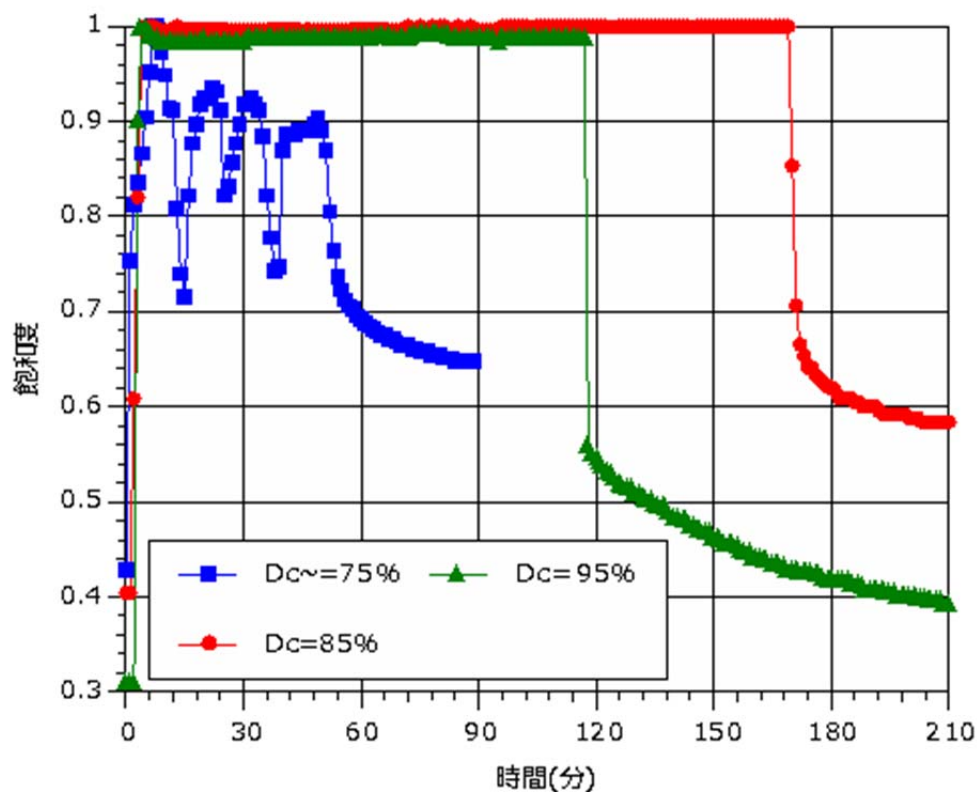


図-2.10 施工2か月後の盛土にて実施した水浸沈下試験における土壌水分計のデータ

3. 数値シミュレーションによる実験の再現

前章で述べた現場盛土実験において土壌水分計を用いて定量的に水分の移動を把握した。本章では、飽和・不飽和浸透流解析によって実験盛土における水の浸透過程の再現を試みた。また、比較的簡易な軸対称2次元モデルと、盛土形状を考慮した3次元モデルによるシミュレーションを行い、両者の結果を比較した。

3.1 解析に使用した基礎方程式

3.1.1 浸透流の基礎方程式⁹⁾

水浸沈下試験の数値シミュレーションに使用した飽和—不飽和浸透流解析の基礎方程式は以下のとおりである。

$$\left(\phi \frac{dS_w}{d\psi} + \alpha S_s \right) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \nabla [K(\nabla \psi + \nabla Z)]$$

ここに、 ϕ は間隙率、 S_w は飽和度、 S_s は比貯留率、 K は透水係数テンソル、 ψ は圧力水頭、 Z は位置水頭、 α は飽和領域($S_w=1$)で $\alpha=1$ 、不飽和領域($S_w \neq 1$)で $\alpha=0$ である。

また、透水係数テンソル K は比透水係数 k_r 、および飽和透水係数テンソル k_s により、以下の通りに表される。

$$K = k_r \cdot k_s$$

境界条件は圧力水頭規定の境界 Γ_1 上で以下の通り表される。

$$\psi = \psi_1 \text{ on } \Gamma_1$$

また、流速 q が規定される境界 Γ_2 上では以下の通り表される。

$$q = -n \cdot K \cdot (\nabla \psi + \nabla Z) \text{ on } \Gamma_2$$

ここに、 n は境界上に建てた単位外方向法線ベクトルである。

3.1.2 水分特性曲線¹⁰⁾

基礎方程式解析に必要な物性値である比透水係数 k_r は飽和度 S_w の関数、飽和度 S_w は毛管圧 $\psi_c = -\psi$ の関数と考えられる。一般的に飽和度 S_w と毛管圧 ψ_c の関係(水分特性曲線)は数学的にモデル化する試みがなされ、多くのモデルが提案されているが、ここでは van Genuchten の式を用いて水分特性曲線を求めた¹⁰⁾。

$$S_e = \frac{S_w - S_r}{S_f - S_r} = \frac{1}{\{1 + (\beta\psi_c)^n\}^m}$$

ここに、 S_e は有効飽和度、 S_r は残留飽和度である。 S_f は毛管圧 $\psi_c = 0$ における飽和度であるが、本研究では $S_f = 1.0$ とする。 β 、 n 、 m は空隙の幾何学的な特徴から決定される形状パラメータであり、 n 、 m は無次元、 β は圧力水頭の逆数の次元をもつ。

また、 n と m の関係は次式を用いる。

$$m = 1 - \frac{1}{n}$$

比透水係数と有効飽和度の関係は以下の通り表される。

$$k_r = S_e^\varepsilon \{1 - (1 - S_e^{1/m})^m\}^2$$

ここに、 ε は空隙の連続性に関わるパラメータであるが、一般的に $\varepsilon = 1/2$ が用いられる。

また、有効飽和度 S_e を求める式を微分して整理すると、次式のようになる。

$$-\Phi \frac{dS_w}{d\psi_c} = \frac{\Phi \alpha m n (1 - S_r) (\beta \psi_c)^{n-1}}{[1 + (\beta \psi_c)^n]^{m+1}}$$

つまり、パラメータとして α および n と、残留飽和度 S_r を与えれば、不飽和浸透特性が得られる。

3.2 解析手順

本研究で実施した解析のフローチャートは、図-3.1 に示す通りである。

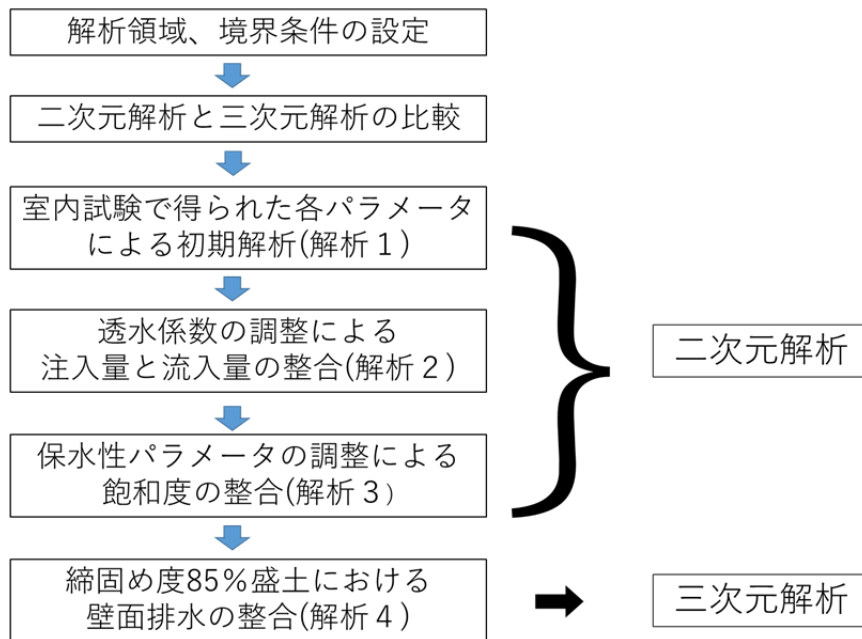


図-3.1 浸透流解析のフローチャート

1) 解析領域，境界条件の設定

解析領域や境界条件の設定，初期値の設定を行う。

2) 2次元解析と3次元解析の比較

2次元解析と3次元解析の任意のパラメータによる，解析結果の誤差を判定する。

3) 室内試験で得られた各パラメータによる初期解析（解析1）

室内試験で得られた透水係数や保水性の条件をもとに解析を行う。

4) モデルキャリブレーション

① 実験の注入量と解析の流入量の整合（解析2）

実験での各締固め度における注水量が解析の流入量と合うように透水係数を調整する。

② 飽和度グラフの整合（解析3）

飽和度の上昇過程や初期値が合うように保水性のパラメータを調整する。

③ 壁面排水の整合（解析4）

実験で確認された飽和度 $D_c=85\%$ の盛土における壁面排水が生じるように調整する。

3.3 解析条件

本試験では二次元解析を実施し、図-3.2のような長方形断面の円筒座標系で解析を実施した。また、図-3.3に有限要素解析図を示す。解析領域は、試験盛土と同じ寸法のモデルを用い、高さ10cm、幅175cmの地盤に、高さ10cm、幅37.5cmの穴を設け、水を浸透させている。

今回の解析に使用した不飽和浸透パラメータを表-3.1に示す。このパラメータに関しては、室内試験結果を基に解析を実施したが、現場試験結果と整合性が確認されなかった。よって、解析結果が現場試験結果と一致するようにそれぞれのパラメータを修正した。修正をするために実施した条件・解析を下記に記す。透水係数は注水量=流入量にすることで修正した。残留飽和度・初期水圧は、現場試験で土壌水分計から得られた飽和度の上昇過程に近づくように、保水性試験から得られた結果を基に解析を行うことで修正した。また、 $D_c=75\%$ における円管の水深についてであるが、これは2章でも述べたように、現場水浸試験時に水の供給が追い付かず、掘削面から一定の水位を保つことができなかつたため、現地で水深を測定した結果を本解析のパラメータとして扱っている。

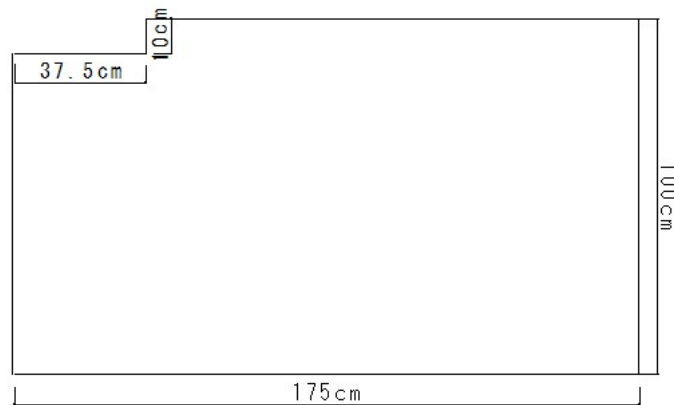


図-3.2 解析領域

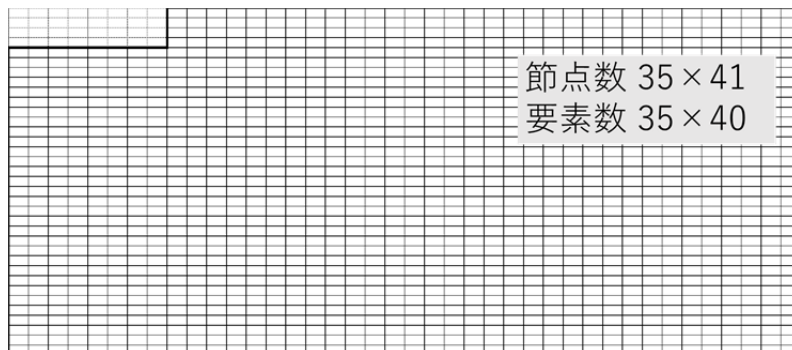


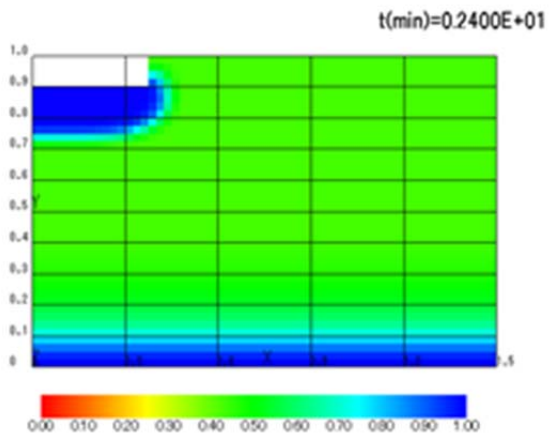
図-3.3 有限要素分割図

表-3.1 不飽和浸透パラメータ

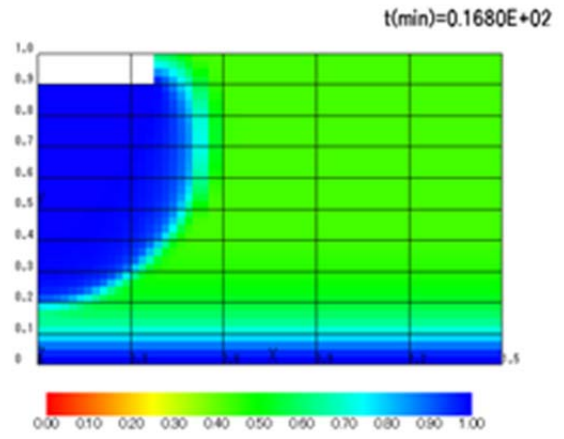
締固め度	D _c =75%	D _c =85%	D _c =95%
透水係数φ	0.016	0.009	0.0028
円管の水深(m)	0.01	0.1	0.1
円管の水深までに達する時間(分)	1	10	10
パラメータn	2.55	4.72	14.6
パラメータα	11.5	9.56	6.17
残留飽和度S _r	38	41.5	32
初期水圧(m)	-0.43	-0.53	-0.54

3.4 解析結果

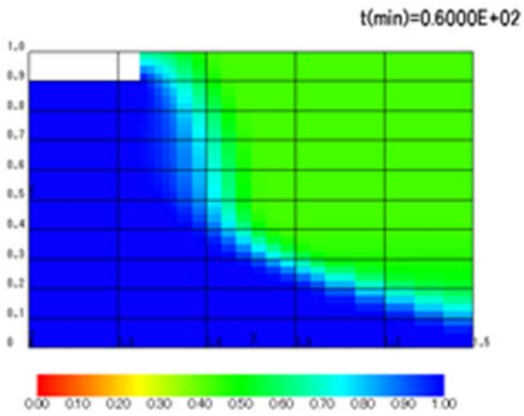
図-3.4(A)～(D), 図-3.5(A)～(D), 図-3.6(A)～(D)は, 施工後2か月が経過した時点での水浸沈下試験の結果との整合を検証するために実施した浸透流解析結果を示したものである。なお, 施工直後に実施した水浸沈下試験における浸透流解析については, 現場試験実施時に注水量の確認ができておらず, 浸透流解析に用いるパラメータを把握することができていないので, ここでは省略する。図-3.4～3.6には, 深度10cmに浸透水が到達した時間, 深度10cmに浸透水が到達してから15分後, 試験開始から60分後の結果, 飽和度と時間関係のグラフを載せている。なお, 上記の解析結果のまとめ方は, ガイドライン案⁸⁾を参考にしている。図-3.4～3.6(A)より, 深度10cmに浸透水が到達するのはDc=75, 85, 95%はそれぞれ, 1.8分後, 2.2分後, 6.5分後である。ここで, 土壤水分計による浸透水到達時間を比較したものを表-3.2に示す。室内試験の既往の研究では, 締固め度が密であるほど, 透水係数つまり浸透水の到達時間は遅くなることが報告されている。しかし, 表-3.2における現場試験の結果からは, Dc=75%の盛土が最も到達時間が遅く, 室内試験との整合性が取れていない。これは, Dc=75%の盛土は締固め度が緩いため, 盛土内に水道ができやすく, 土壤水分計が設置されている箇所を避けて, 水が浸透したためだと考えられる。そのため, 現場結果と解析結果を比較すると, Dc=75%の浸透水到達時間が異なると考えられる。また, Dc=85%においても, 図-3.4(B)より十分に飽和度が上昇していないことから, Dc=75%と同様の理由により, 水みちが形成している可能性が示唆される。Dc=95%においては, 十分に飽和度が上昇していることや, 締固め度が大きいことから, 盛土内部に水みちが形成されている可能性は少ないと予測される。しかし, 今回の結果を比較して, 現場結果と解析結果は一致しているとは言い難い。この原因として, 今回使用したデータロガーは最短計測間隔が1分であることや, 浸透水到達時間が5分程度とかなり早い時間の結果となっており, 今回使用した土壤水分計の計測インターバルでは実際の挙動が追えていない可能性が示唆される。



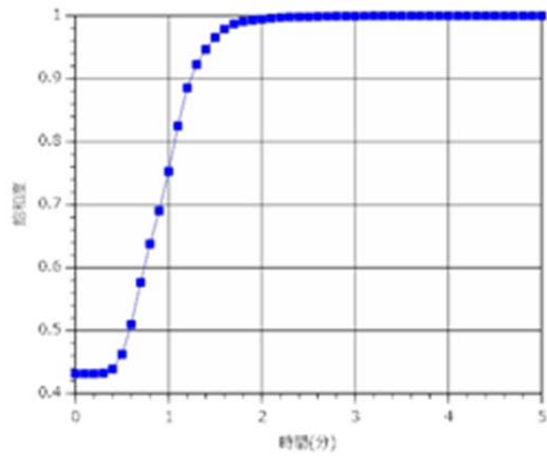
(A) 深度 10cm に浸透水到達時(到達直後)



(B) 深度 10cm に浸透水到達時(到達後 15 分経過)

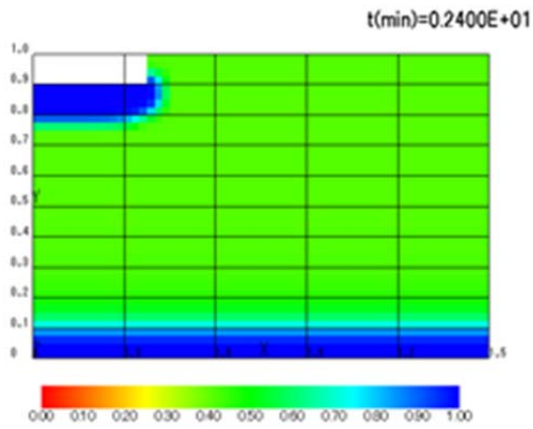


(C) 深度 10cm に浸透水到達時(到達後 60 分)

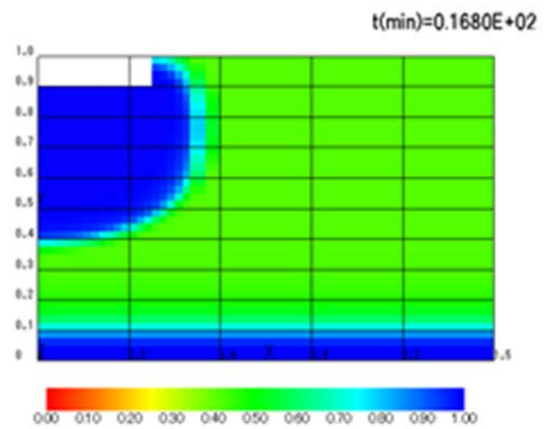


(D) 飽和度と時間との関係

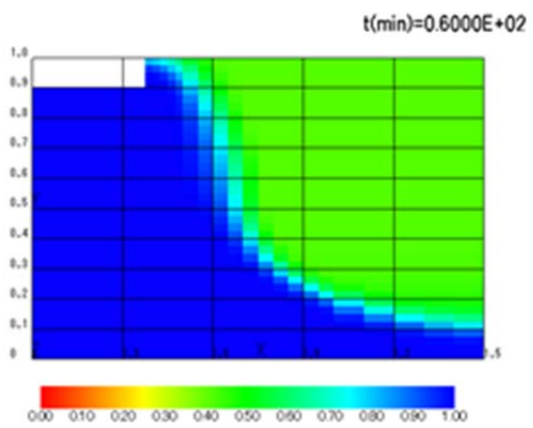
図-3.4 浸透流解析結果 ($D_c=75\%$)



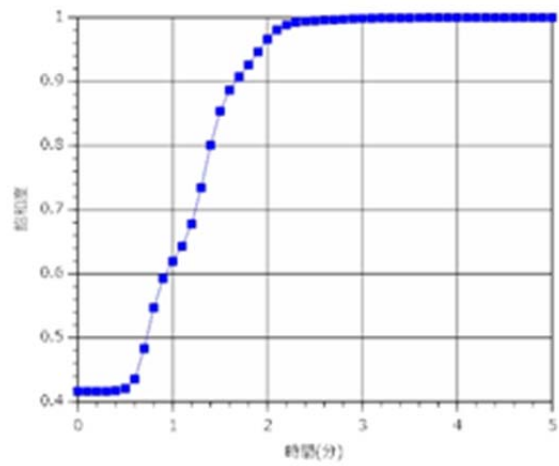
(A) 深度 10cm に浸透水到達時 (到達直後)



(B) 深度 10cm に浸透水到達時 (到達後 15 分経過)

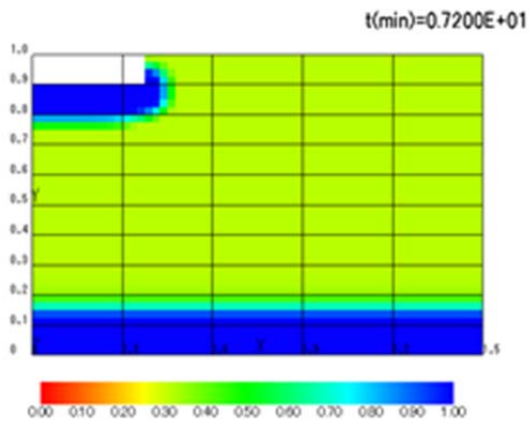


(C) 深度 10cm に浸透水到達時 (到達後 60 分)

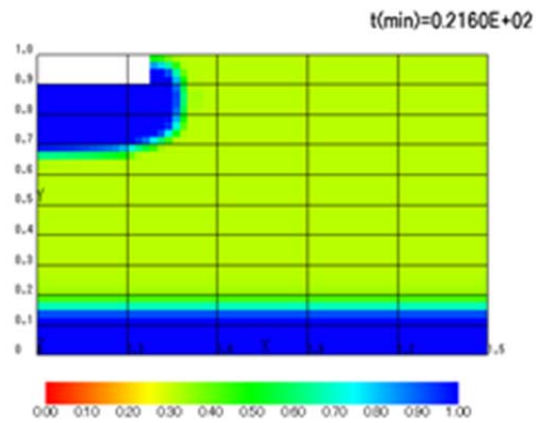


(D) 飽和度と時間との関係

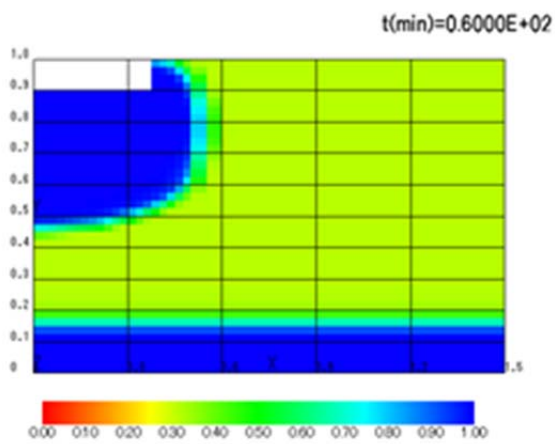
図-3.5 浸透流解析結果 ($D_c=85\%$)



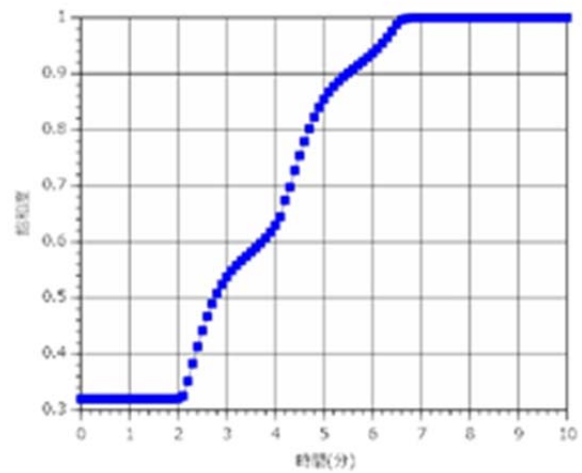
(A) 深度 10cm に浸透水到達時(到達直後)



(B) 深度 10cm に浸透水到達時(到達後 15 分経過)



(C) 深度 10cm に浸透水到達時(到達後 60 分)



(D) 飽和度と時間との関係

図-3.6 浸透流解析結果 ($D_c=95\%$)

表-3.2 浸透水到達時間(現場試験と浸透流解析結果との比較)

	到達時間(分)		
	$D_c=75\%$	$D_c=85\%$	$D_c=95\%$
現場試験	6	4	4
浸透流解析	1.8	2.2	6.5

4. ドローン (UAV) による空中写真画像から取得できる 3 次元データの活用

当該試験盛土において、ドローンによる空中写真撮影を実施した。空撮により取得できる個々の高解像度写真は、合成することによって撮影範囲の三次元モデルの作成を可能とする。複数時期の飛行によって作成される三次元モデル (DSM【Digital Surface Model】: 自律飛行が可能な小型無人ヘリコプター) を用いて差分解析を行うことにより、時間経過に伴う、盛土の形状寸法の変化を把握する。

4.1 使用機材

当該試験盛土にて使用する UAV は PHANTOM4 (株DJI 社製) であり、機体に GPS、加速度センサー、ジャイロセンサー及び高度計を搭載し、各センサーから取得した情報を基に飛行時に自分の位置を常時把握することで安定した飛行を可能としている。写真-4.1 に当該機体および操縦用プロポーショナルを示す。デジタルカメラと UAV 機体の接続部にはジンバルを備え、飛行時に機体そのものが発生する振動や強風時の影響を受けずに安定した画像を撮影し続けることが可能である。

PHANTOM4 のスペックを以下に記す。

自動飛行範囲：操縦者より半径 1,000m の球状範囲内

水平方向最大飛行速度：20.0m/s【標準速度：5.0m/s】

鉛直方向最大飛行速度：6.0m/s (上昇), 4.0m/s (下降)【標準速度：上昇下降共に 2.0m/s】

飛行可能時間：28 分程度 (※ 4 セル-リポバッテリー*1 基搭載時)

機体重量：1.4kg (※ バッテリー・カメラ含まず)

積載可能重量：約 0.5kg

搭載カメラ仕様：約 1,200 万画素

地上分解能：約 5mm (※ 対地高度により変わり、左記は対地高度：10.0m の場合である。)



写真-4.1 PHANTOM4 機体及び操縦用プロポーションナル

4.2 飛行経路の選定

図-4.1 に当該試験盛土における飛行経路を示す。航空法での飛行許可区域を遵守した上で可能な限り高画質で効率的な経路となるように計画した。当該地区の飛行回数は1フライト/式である。

- ① 民家の真上を飛行しない飛行経路。(墜落時のリスクを最小限に抑える.)
- ② 1フライト当たりの飛行時間が15分迄(水平移動を2.0~4.0m/sの速度で飛行するため、飛行距離:3,000m未満)となるような飛行経路。(最大で20分程度の飛行は可能であるが、現地風速等の飛行条件によってバッテリー消費量が変わるため、安全側の飛行時間設定とする.)
- ③ 現地地形の起伏に合わせて、可能な限り画像分解能を細かくするための飛行高度。
→当該地区での飛行高度は、各フライト範囲内最高標高より対地高度:約10mとする。
この対地高度により得られる画像分解能は約5mmとなる。

また、空中撮影した各々の写真を合成するためには、写真同士が機体進行方向に80%、機体進行方向から直行方向に60%重ねる必要があるため、これを考慮した飛行経路を選定した。

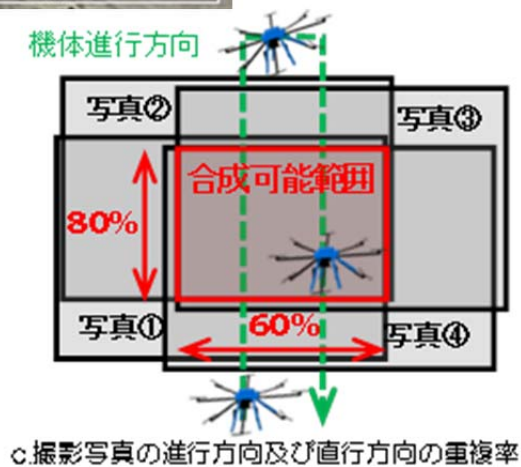
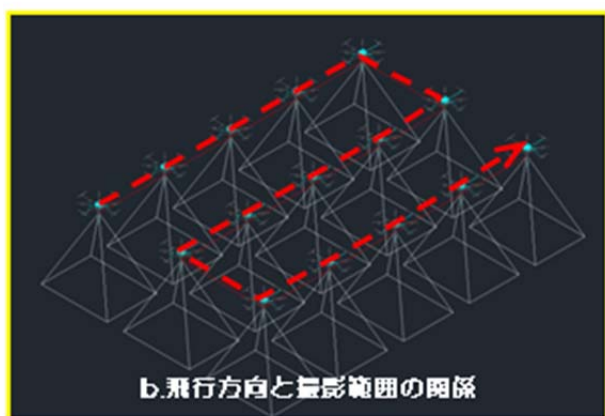
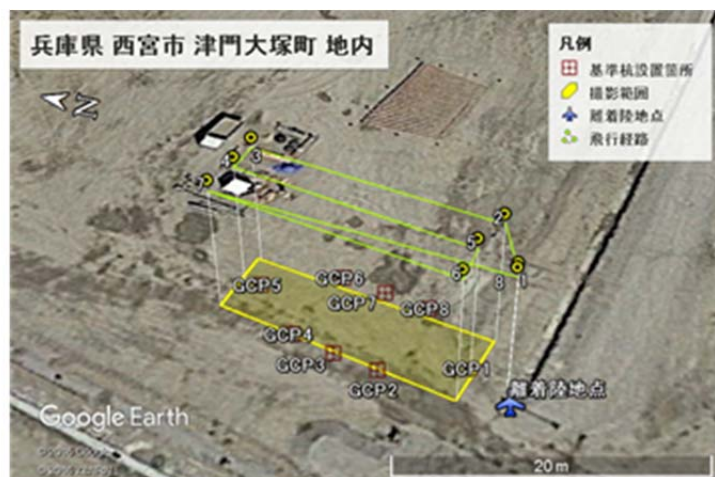


図-4.1 試験盛土飛行計画図

<飛行経路>

飛行経路は通常、機体進行方向が等高線と平行方向になるように選定する。これは撮影斜面との対地高度を一定に保持しやすい理由からなる。

離着陸地点から機体の高度を 10m 上昇させた後、その対地高度を保持しつつ飛行範囲内を図-4.2 内の番号を昇順に進行しながら空中撮影を行う。機体が撮影範囲内を移動するにつれて地山からの対地高度が変化するが、対地高度が $10\pm 2\text{m}$ の範囲内で十分なラップ率を確保できる経路を航行する。

【撮影飛行距離：水平飛行距離：92m+鉛直飛行距離：20m 飛行時間：約 8 分】



図-4.2 飛行経路の概要図

4.3 基準点の設置

通常、図-4.3 に示す対空標識を飛行前に設置したうえで空中飛行撮影を行い、三次元モデル作成時に静止画像に写り込んだ対空標識の座標を基準点（GCP）として使用する。しかし、当該試験盛土では対地高度：10m と非常に低い高度で飛行するため、別途対空標識を設置せずとも杭頭が写真上で把握できる。したがって、基準点杭の設置のみで対空標識の設置は行っていない。

当該試験盛土で設置した基準点位置図（合計：8箇所）を図-4.4 に示す。これら箇所は十分な開空度を有しており、基準杭が飛行撮影時に静止画像内に写り込む。

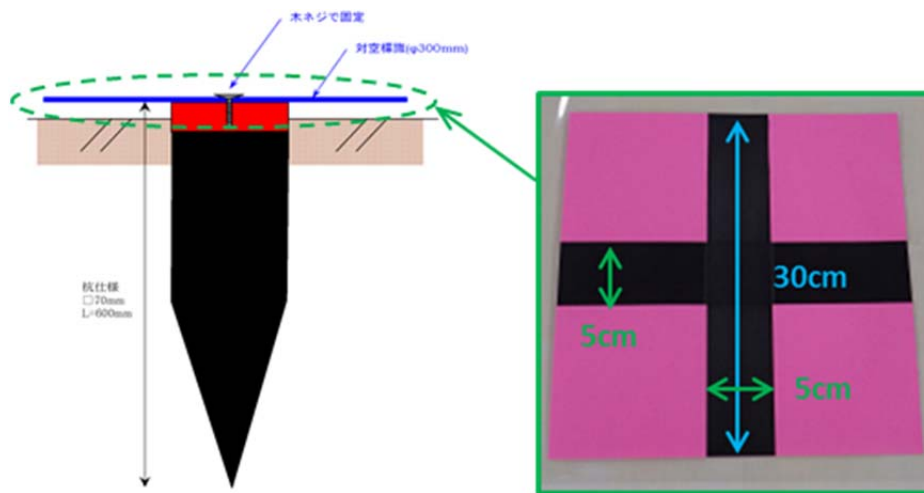


図-4.3 基準点杭及び対空標識設置方法概要図

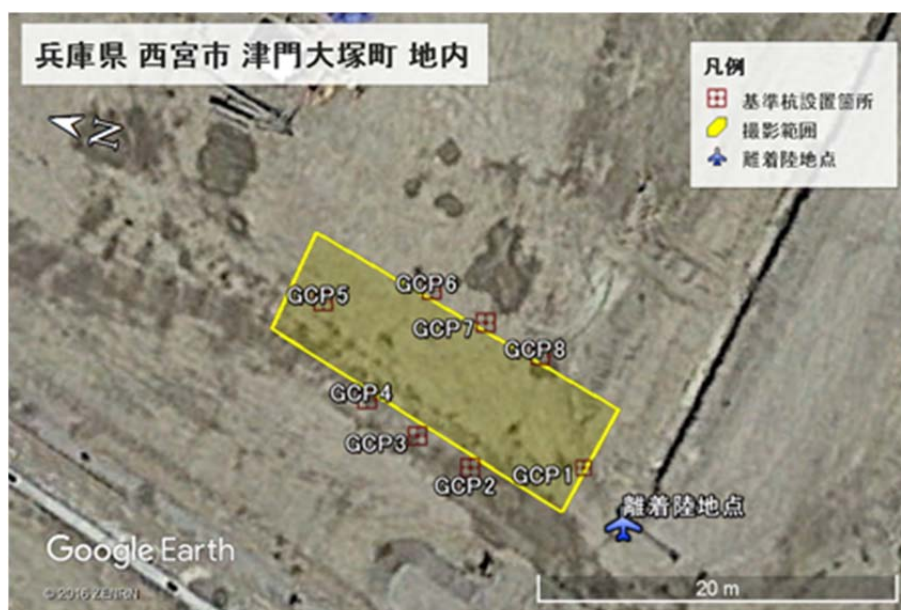


図-4.4 基準杭設置箇所位置図

4.4 画像解析

4.4.1 画像解析の流れ

UAV で撮影された個々の画像は、下記の手順により合成し、三次元モデル（高密度点群データ）を生成する（図-4.5 のフローチャート参照）。個々の空中撮影写真は約 5mm の画像解像度を持つため、合成後に得られる三次元モデルにおいても、詳細な表現が可能となる。

<空中撮影写真の合成手順>

- ① 空中写真の撮影及び撮影写真の取捨選択
- ② SfM 化による特徴点の抽出（(2) 参照）
- ③ 基準点（GCP）情報の挿入
- ④ MVS による高密度点群生成（(3) 参照）
- ⑤ 高密度点群から三次元モデルの作成（(4) 参照）
- ⑥ 三次元モデルより各種データの出力（(5) 参照）

画像解析に使用するソフトは Agisoft 社の PhotoScan、地形解析に使用するソフトはオープンソースの QGIS 及び Esri 社の ArcGIS である。

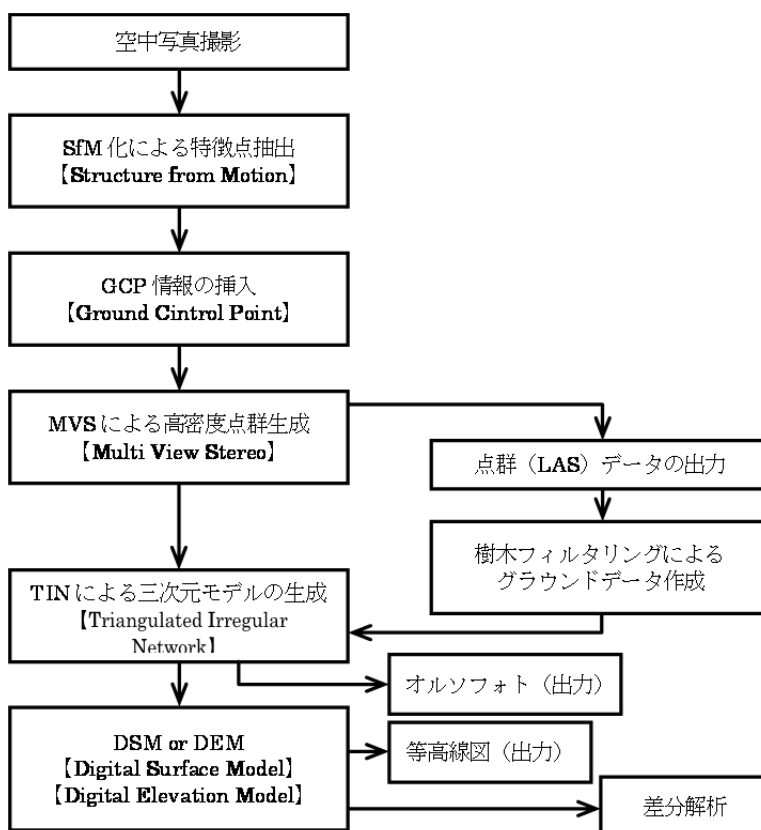


図-4.5 画像解析手法のフローチャート

4.4.2 SfM【Structure from Motion】について

SfM【Structure from Motion】とは複数枚の空中写真から撮影対象の立体形状と撮影位置（カメラの撮影位置）を同時に復元する技術のことを意味する。この調整によって、各写真上で対応する特徴点を抽出し、高密度点群作成の布石とする。なお、空中撮影時は通常のJPG形式に加え、RAW形式（理論上、JPGの約8倍程度高画質に保存が可能な形式）での空中撮影を行っている。当該地区においては、高画質であるRAW形式のデータを使用し、より高精度なSfM化を行う（図-4.6参照）。

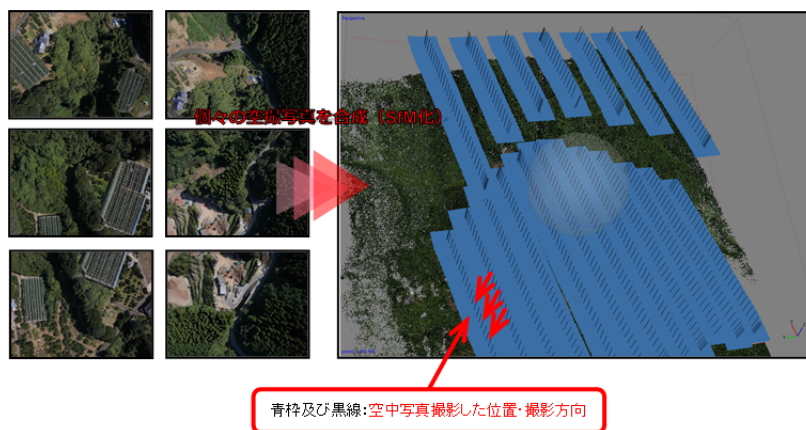


図-4.6 SfM【Structure from Motion】化概要図

4.4.3 MVS【Multi View Stereo】について

MVS【Multi View Stereo】とは、三次元形状を復元する技術のことを意味し、SfM化で得られた疎な特徴点に、GCP情報を付加した上で高密度点群を生成する。図-4.7に示すとおり、MVS技術を採用することにより、SfM化で得られた特徴点（約320万点）を高密度な点群（約1億2,700万点）に生成することができる。ただし、ここで得られる高密度点群はまだ樹木の影響を受けた状態であり、樹木の影響を除いたグラウンドデータの作成については次項で解説する。

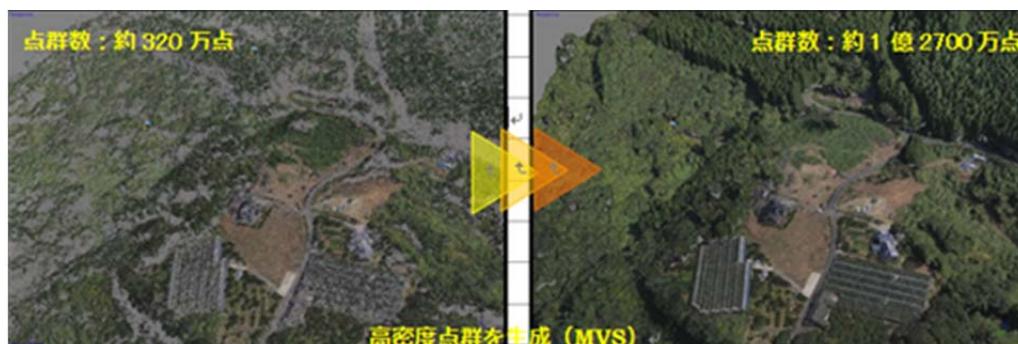


図-4.7 MVS【Multi View Stereo】概要図

4.4.4 高密度点群から三次元モデルの作成について

4.4.1～4.4.3 で作成された数値標高モデルは点の状態である。これら高密度な点群を三次元上の直線で繋いで各点が三角形の頂点となるようにする (TIN) ことによって、三次元的な形状を視覚化することができる。TIN【Triangulated Irregular Network】とは、地表面または海底面の物理的形状を表現し、 $X \cdot Y \cdot Z$ の三次元情報を持った点と線が重複のない三角形の集まりとして配列されたものを意味する (図-4.8 参照)。

これにより作成された三次元モデルの内、樹木の影響を除去したものを DEM【Digital Elevation Model】、樹木の影響が除去されていないものを DSM【Digital Surface Model】という (図-4.9 参照)。

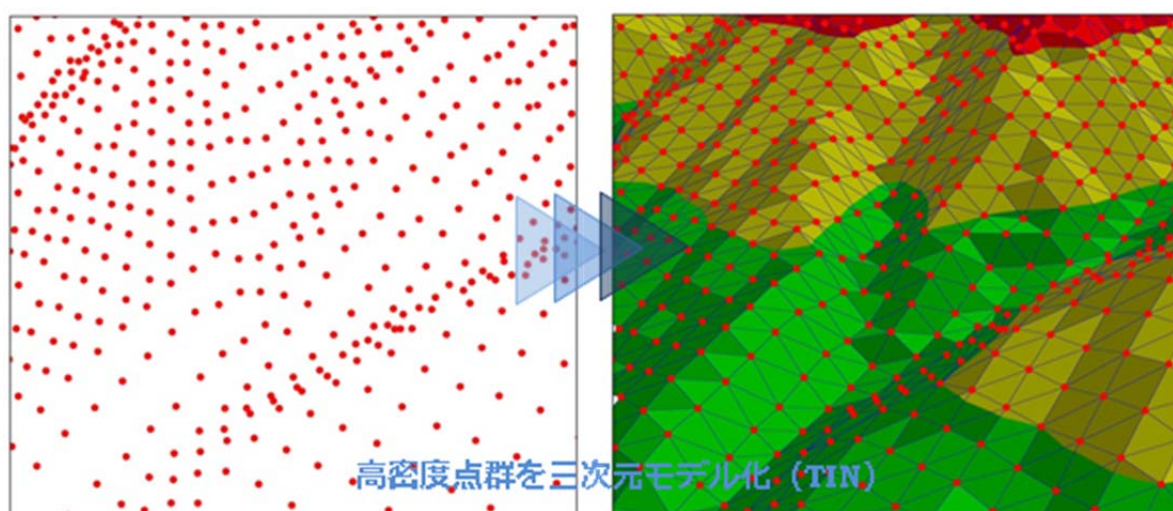


図-4.8 点群の TIN による三次元モデル化概要図

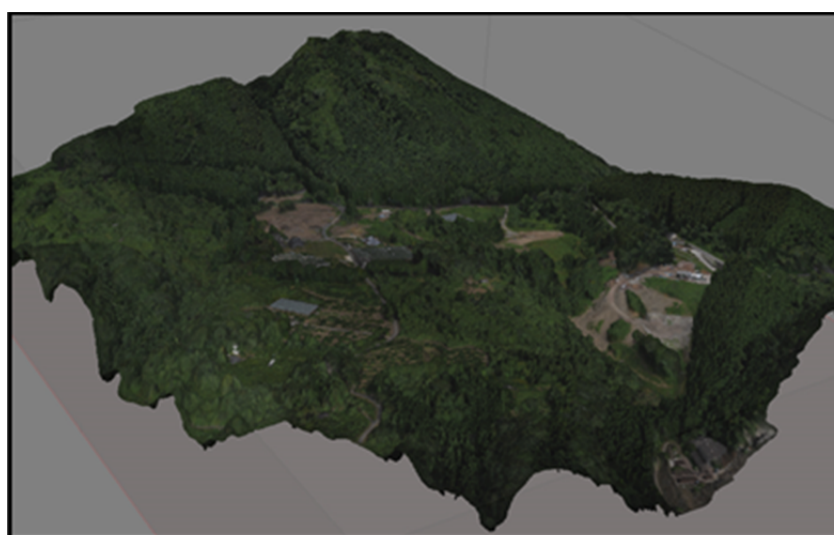


図-4.9 三次元モデル出力例 (DSM)

4.4.5 画像成果

前項 4.4.4 によって、三次元モデルの作成後には、下記に示すような様々な方法で出力できる。

- ① オルソフォトの出力（図-4.10 参照，.TIF 形式及び.JPG 形式での出力が可能）

※ 一般の写真管理ソフトで閲覧可能

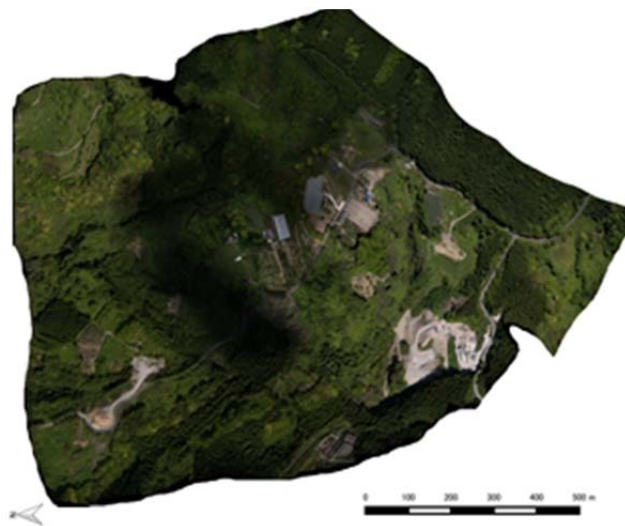


図-4.10 三次元モデル出力例（DSM）

- ② 等高線図の出力（図-4.11 参照，.dwg 形式及び.dxf 形式での出力が可能）

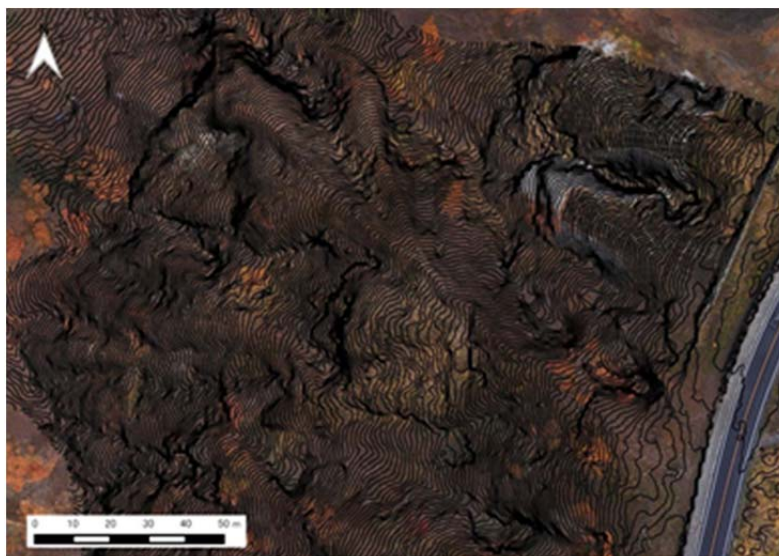


図-4.11 三次元モデル出力例（DSM）

4.5 複数時期の差分解析

前項 4.4 の作業工程を経て作成された 2 時期の三次元モデル (DSM) を用いて標高値の差分解析を行った。地形解析ソフト上で 2 時期の三次元モデルの水平座標 (X, Y) を照合し、標高値 (Z) の差を算出することで、2 時期間の地形変化を把握することができる。

4.5.1 試験条件

本試験は、施工開始前 (9 月 27 日)、施工後 10 日経過時 (10 月 26 日)、施工後約 3 か月経過時 (1 月 11 日) の 3 回に分けてドローンによる空中写真撮影を実施した。ここで、盛土を雨ざらしにした影響を確認するため、盛土施工直後 (10 月 15 日) 以降の 2 時期間 (10 月 15 日から 10 月 25 日、10 月 27 日から 1 月 10 日) における降水量を図-4.12, 4.13 に示す。また、表-4.1 には 2 期間の累積降水量を示す。10 月 15 日から 10 月 25 日の期間においてはほぼ降水量は無く、10 月 17 日のみ 21.5mm/day であった。また、渇水期のため日降雨量は少ないものの、10 月 27 日から 1 月 10 日の期間においては、累積降水量は 191.5mm となり、前期間 (10 月 15 日から 10 月 25 日) の 10 倍程度であった。

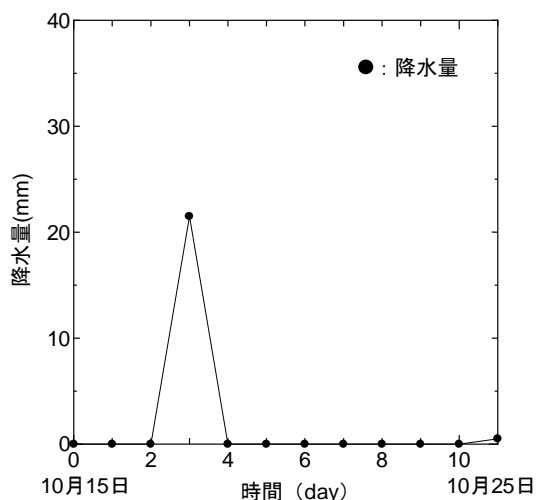
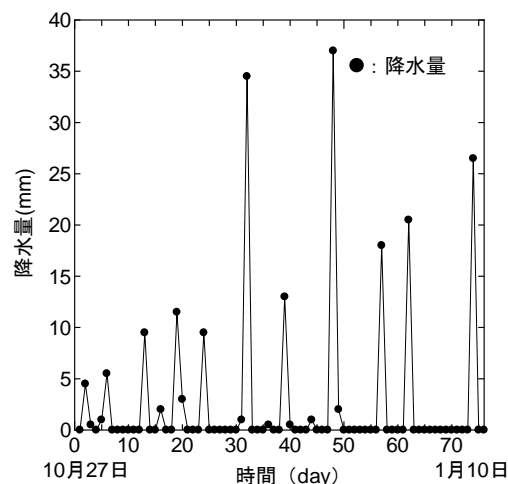


図-4.12 降雨量と時間関係 (10/15~10/25)



4.5.2 差分解析結果

本試験で得られた差分解析図を図-4.14, 4.15, 差分透過図を参考として図-4.16, 4.17 に示す。なお、図-4.14 は 10/26-9/27, 図-4.15 は 1/11-10/26 の結果である。また、図-4.14, 4.15 に示すように、盛土の三次元モデルを 4cm の格子状に区切り、平均化した標高値差を表示させることで、2 時期間の地形変化の把握がし易くしている。以下に 2 通りの差分解析結果・考察を述べる。

① 10/26-9/27 の差分結果について

- (A)盛土天端部：水浸沈下試験実施箇所は、試験時の掘削に起因し、青色表示である。また、天端部の多くは黄色表示であるが、天端法肩部は若干青色の箇所がある。
- (B)盛土天端東側法肩部（3 箇所）：ネイルサンプリング試料採取時の掘削に起因し、青色表示である。
- (C)盛土天端東側法尻部（3 箇所）：ネイルサンプリング試料採取時に発生した掘削土の堆積に起因し、赤色表示である。
- (D)盛土北～北西側法尻部：室内試験用試料採取時の掘削に起因し、青色表示である。
- (E)盛土法面部：北東及び南西側法面は赤色表示、北西及び南東側法面は青色表示である。

①の考察（B, C, D については、試料採取による地形改変に起因するためここでは省略する）

- (A)天端部の多くが黄色表示、つまり沈下現象が見られないことから、各種試験時の作業員による踏み荒らしや踏み固めの影響は無いと考えられる。また、図-4.12 より、降水量も少ないので、降雨による影響は考えにくい。
- (E)三次元モデルは個々の撮影写真を合成した後、事前に設置した基準点（GCP）に合わせ、座標軸の設定を行うが、手動のフライトによる空中撮影だと複数時期で必ずしも同じ飛行経路をとることは難しく、取得した空撮画像の視差に変化が生じるためだと思われる。そのため、2 時期（10/26-9/27）において合成画像の歪みが発生し、図内木杭や計測ロガーの位置を考慮すると、試験盛土が 2cm 程度、北東及び南西方向に引っ張られた状況（赤色表示）を確認できる（引張方向に関しては、図-4.14, 4.15 に矢印で加筆修正している）

② 1/11-10/26 の差分結果について

- (A)盛土天端部水浸試験箇所：水浸沈下試験実施箇所について、12月初旬に実施した箇所は①同様に掘削の形跡を示す青色表示がされている。一方、9月下旬に実施した箇所については、掘削面は全体的に黄色の傾向があり、孔壁周りは赤色、青色表示が見受けられる。
- (B)盛土天端部：全体的に青色表示であり、 $D_c=95\%$ (天端北側)と $D_c=75\%$ (天端南側)を比較すると、明らかに $D_c=75\%$ の天端の方が濃い青色表示である。
- (C)盛土天端東側法面部：ネイルサンプリング試料採取場所は、各種試験時に作業員の移動や除去土砂の堆積に起因し、青・赤色表示されている。
- (D)盛土法面部：北東及び南西側法面が赤色表示、北西及び南東側法面が青色表示。

②の考察(Cについては試料採取等による地形改変に起因するため割愛)

- (A)孔壁の周辺は赤色、青色表示(隆起・沈下)が見受けられるが、これは降雨または時間経過に伴う孔壁の崩れによるものだと考えられる。また、現地において細粒分が流下することで、粗粒分が剥き出しになっていることが確認できている。
- (B)全体的に青色表示であることと、対象期間における降水量(図-4.35 参照)から考えると、降雨の影響による水浸沈下現象だと思われる。また、 $D_c=95\%$ 築造部は、黄色表示の傾向が強く、 $D_c=85\%,75\%$ と締固め度が小さくなるにつれて、青色表示の割合が高くなることが分かる。これは盛土の締固め度が水浸沈下現象に影響を与えることを示唆しており、道路土工等で規定されている $D_c \geq 90\%$ を下回るほど、沈下現象が起こりやすいことが分かる。
- (D)①の(E)と同様の理由であり、複数時期の三次元モデルで生じる引張現象のために発生したものと考えられる。

以上の結果から、次の事柄が言える。

- ・盛土天端部において、各種試験時の作業員による踏み荒らしや踏み固めによる沈下現象は見られない。
- ・盛土を雨ざらしにすると、降雨による水浸沈下現象が見受けられる。さらに、締固め度が水浸沈下現象に影響を与えると考えられ、道路土工等で規定されている $D_c \geq 90\%$ を下回るほど、沈下現象が起こりやすい。

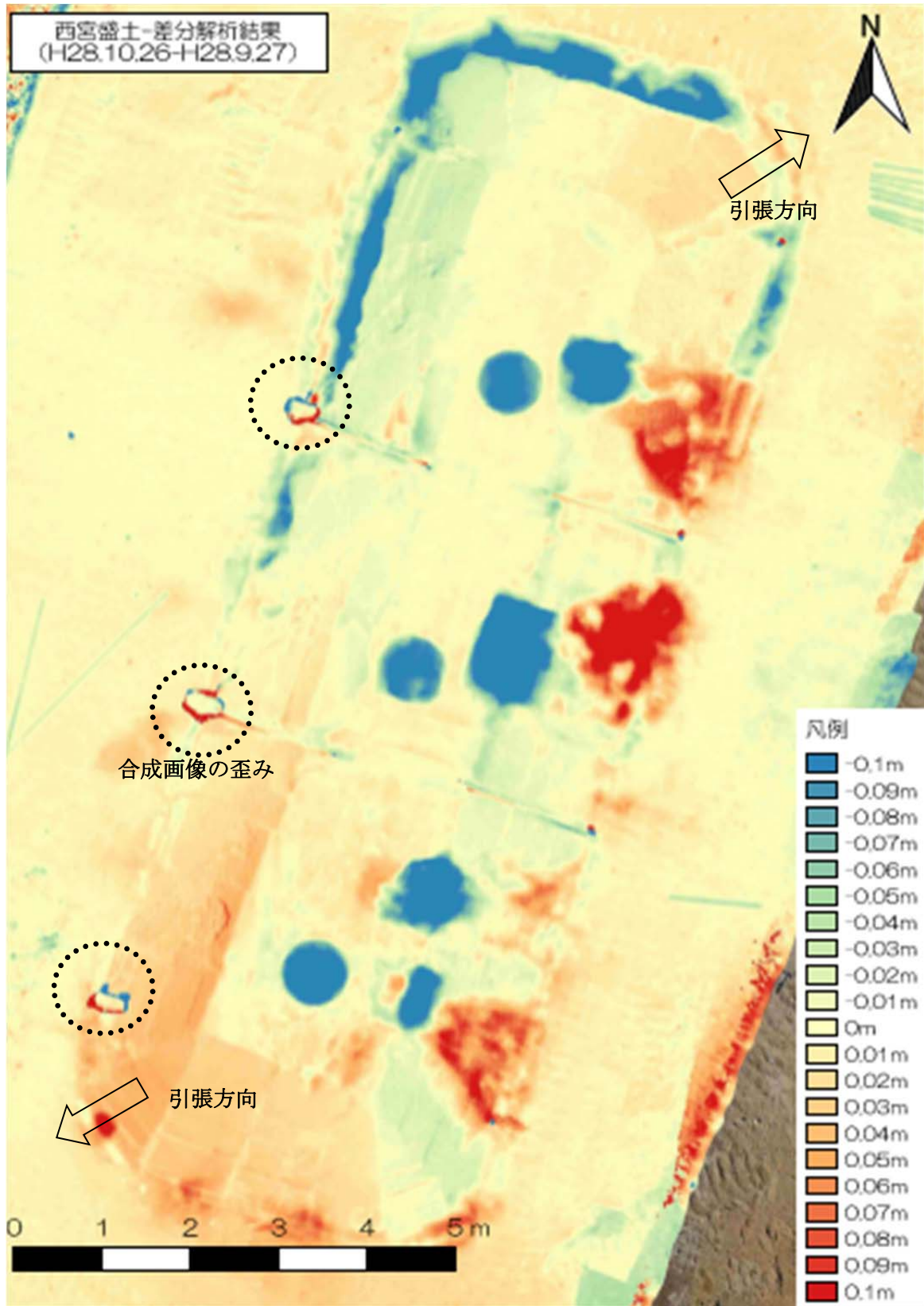


図-4.14 差分解析図(10/26-9/27)

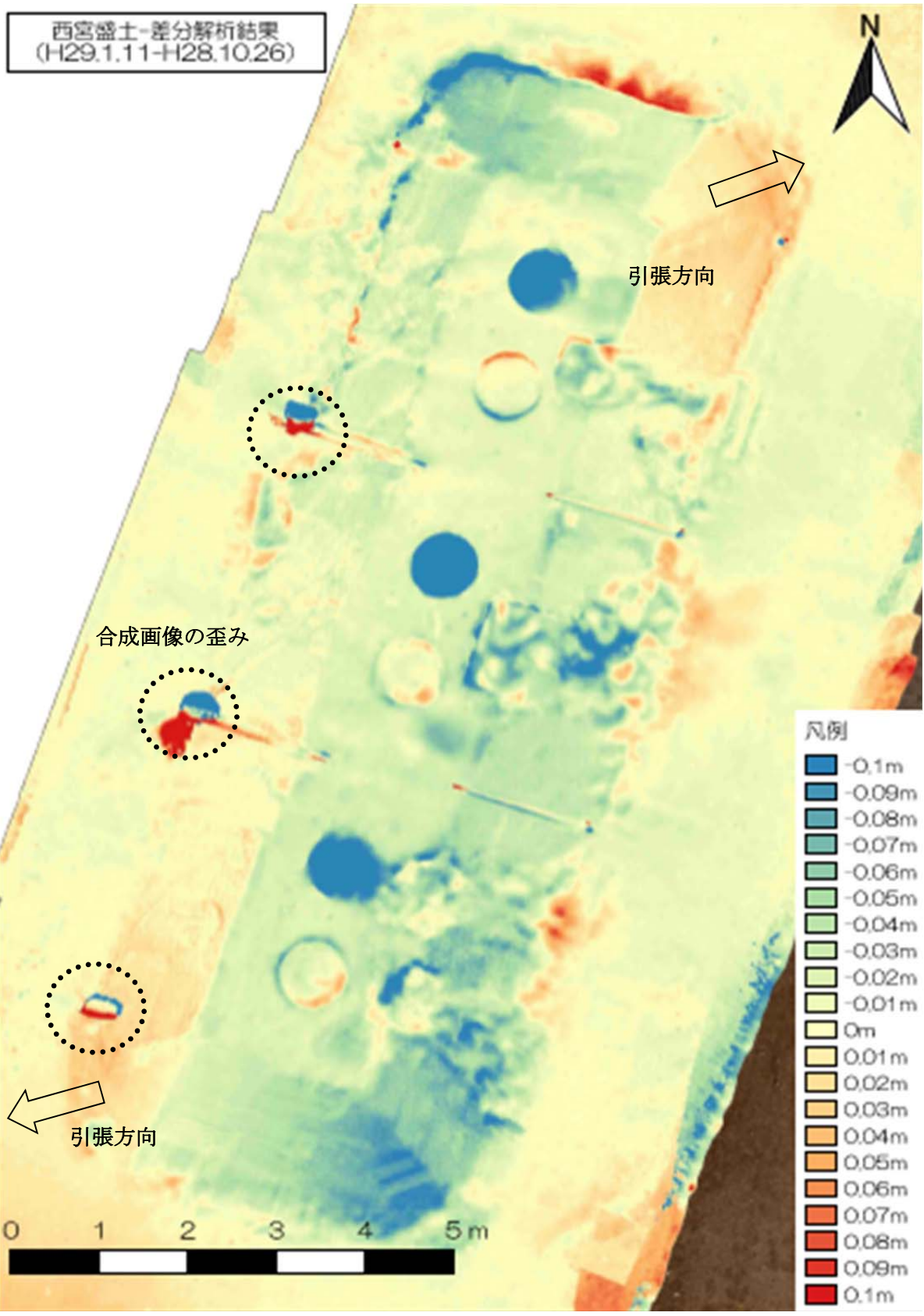


図-4.15 差分解析図(1/11-10/26)

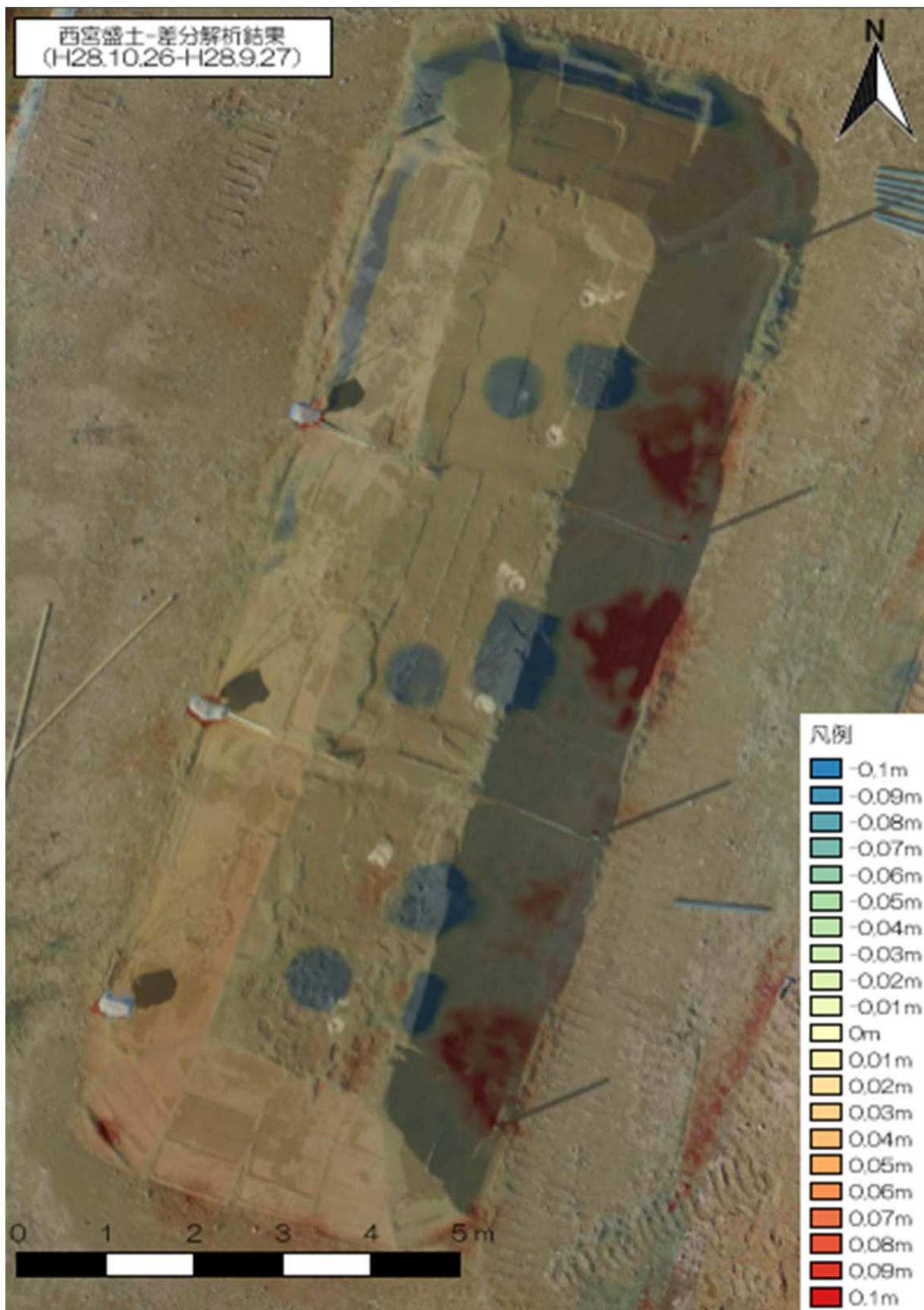


图-4.16 差分透過图(10/26-9/27)

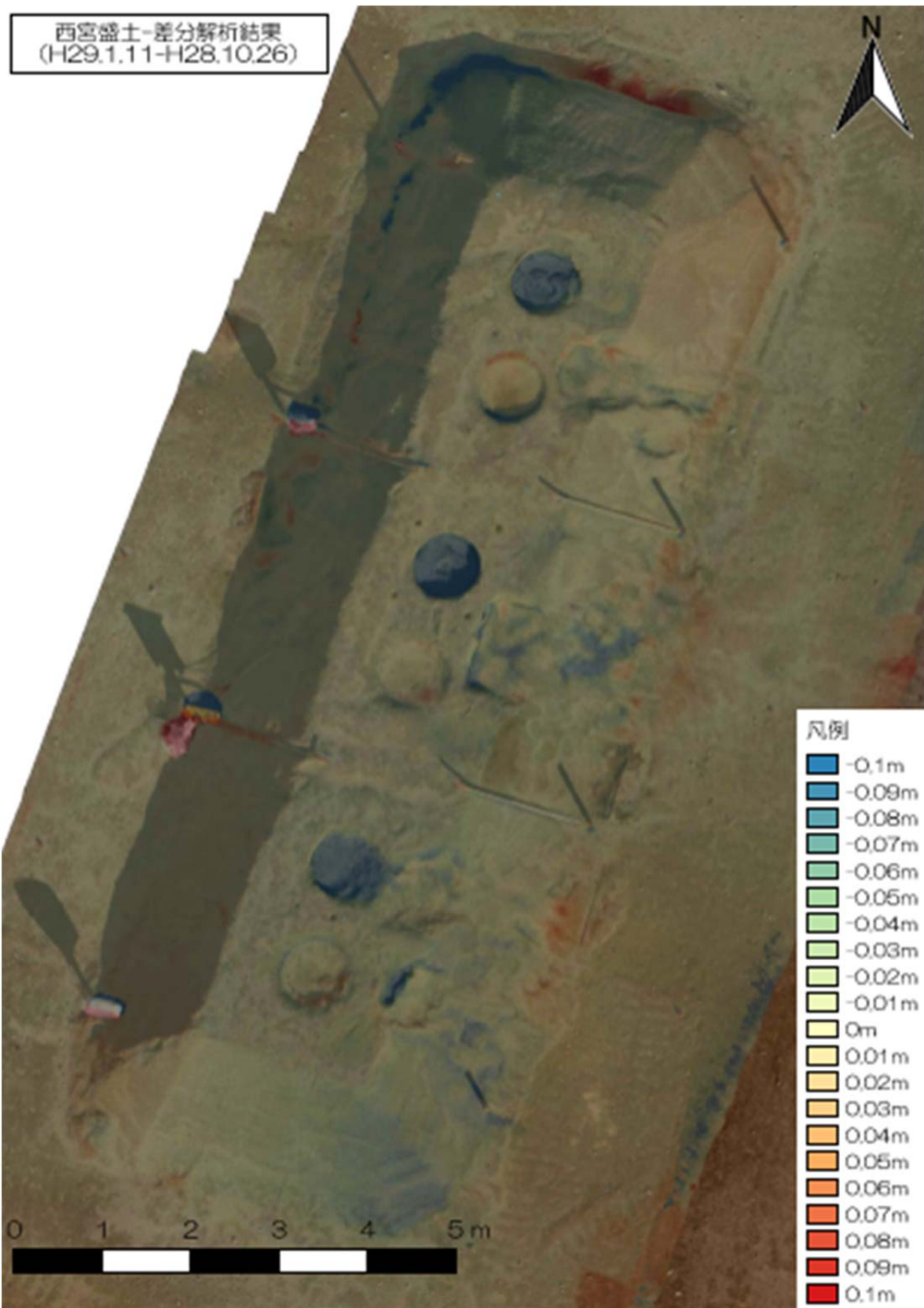


图-4.17 差分透過图(1/11-10/26)

4. まとめ

本研究は、締固め度を変えた試験盛土群を造成し、各盛土に対して原位置水浸沈下試験および室内水浸沈下試験を実施した。また、試験盛土に雨水を浸透させることで水浸沈下特性やN値等に影響があるかどうかを確認した。さらに、現地の盛土条件下における盛土内部への水の浸透状況に関する検討も行った。得られた成果を以下に示す。

- 1) 試験盛土造成時に実施した現場密度試験と、盛土を雨ざらしにした後の現場密度試験結果を比較すると、締固め度は施工当初よりも著しく大きくなっており、 $D_c=75\%$ の試験盛土は $D_c=93.2\%$ であった。これらのことから、盛土を雨ざらしにすることで、水浸沈下が事前に促進され、締固まったと考えられる。
- 2) 施工直後に実施した水浸沈下試験における沈下量を比較すると、締固め度が小さいほどその値が大きくなっていることから、水浸沈下が盛土の締固め度に依存することが確認できた。
- 3) 施工直後と施工後2か月経過時での水浸沈下試験結果を比較すると、どの締固め度においても施工後2か月経過した盛土の方が沈下量は全体的に減少していることが確認できた。これは、盛土を雨ざらしにしたことにより、盛土全体が水締めされ、施工直後の盛土よりも水浸沈下を起こしにくくなったと考えられる。
- 4) 現場水浸試験時の土壤水分計の結果と浸透流解析結果を比較すると、浸透水の深度10cm到達時間は大きく異なり、整合性は確認できなかった。これらは、盛土内に水みちが形成されたことにより、浸透水が土壤水分計設置箇所までの経路を遠回りすることによって、浸透水の到達時間がずれてしまったためだと考えられる。
- 5) 降雨前後の天端部において、ドローンによる差分解析においても、水浸沈下試験に見られるような沈下現象が確認でき、降雨による水浸沈下現象が起こったことが示唆された。また、 $D_c=95\%$ 天端部では沈下現象が見られなかったが、 $D_c=85\%$ 、 75% と締固め度が小さくなるにつれて、沈下量が多くなっていることが確認された。したがって、盛土を雨ざらしにすると、水浸沈下現象が見受けられる。

参考文献

- 1) 望月秋利, 三笠正人, 川本祥史: 宅地造成地の水浸による沈下の検討例, 土と基礎, Vol, No.4, pp.25-32, 1985.
- 2) 李俊憲, 山本拓, 高田昌典, 許晋碩, 金乗洙, 澁谷啓: 下水管理戻しにより生じた周辺地盤の変状の原因究明に関する事例研究, 第48回地盤工学研究発表会, No296, pp.591-592, 2013.
- 3) 福島伸二: 住宅地造成工事の設計と締固め, 基礎工, Vol.37, No.7, pp.96-99, 2009.
- 4) 宅地防災研究会: 宅地防災マニュアルの解説, 第二次改訂版, pp.125-178, 2017.
- 5) 龍岡文夫: 盛土の締固め管理と設計の協働の必要性, 基礎工, Vol.37, No.7, pp.2-9, 2009.
- 6) 仲矢順子, 藤井衛, 建山和由, 安川郁夫, 石田優子: 盛土宅地造成地盤の現状と課題についての考察, 第41回地盤工学研究発表会, No.93, pp.185-186, 2006.
- 7) 田村昌仁, 末政直晃, 水谷羊介, 菊地康明: 戸建て住宅を対象としたスウェーデン式サウンディングの地盤評価, 基礎工, pp.53-60, 2006.
- 8) 澁谷啓, 片岡沙都紀: 水浸沈下を対象とした住宅地盤の性能評価のための原位置試験方法ガイドライン(案), 住品協だより, Vol.10, pp.6-9, 2016.
- 9) Neuman, S.P.: Galerkin method of analyzing non-steady flow in saturated-unsaturated porous media, Finite Element Method in Flow Problem, edited by C. Taylor, O.C. Zienkiewicz, R.H. Gallagher, John Wiley & Sons, Chap.19, 1974.
- 10) van Genuchten, M.Th.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Science Society of America Journal, Vol.44, No.5, pp.892-898, 1980.