

高松塚古墳版築の地盤工学的調査結果について

調査概要

石室解体・搬出時に懸念されるクレーンベースの安定性、掘削壁面土留工安全性、掘削時および地震時における石室の安定性等を検討するために、図-1に示した箇所で行った試験を実施し、版築土層の地耐力の評価を行った。

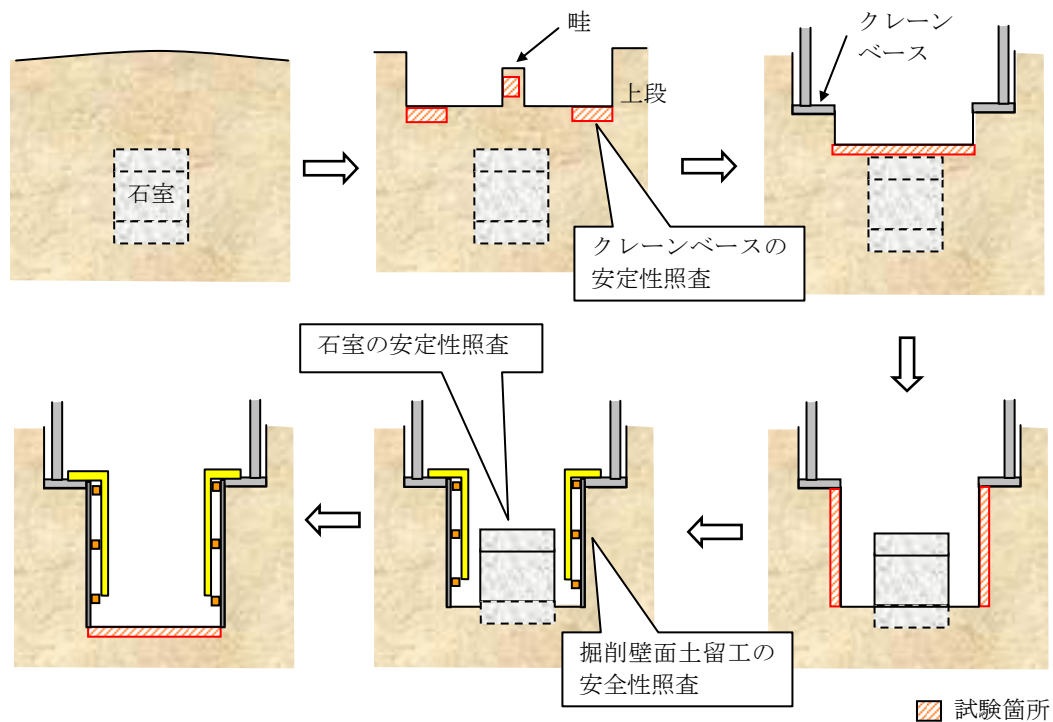


図-1 試験箇所

適用方法

調査対象が重要な史跡である「高松塚古墳」の墳丘版築土であること、また本調査が発掘調査や石室解体作業と並行で実施する必要があることから、

- a. 非破壊検査手法である、
- b. 迅速な試験である、
- c. 衝撃や振動を与えない

という条件を満足しなければならない。

これらの条件を満たす試験法として、次の3つの方法を採用した。

- 1) 針貫入試験：先端貫入針を対象土に貫入させ、その時の貫入量と貫入力から強度を求める試験である。別途一軸圧縮試験の強度とのキャリブレーションを行い、試験結果を一軸圧縮強度に換算する。
- 2) 表面透過型R I密度水分計、表面散乱型R I密度計：密封線源から放射されるガンマ線、中性子線を地表部に設置する検出管で探知し、地盤の密度と含水比を求める試験

である。

- 3) キャスポル（簡易支持力試験器）：45cmの高さから4.5kgの重錐を落下させ、地盤面に当たった時の衝撃加速度値から地盤の強度を算定する試験法である。針貫入試験が表層1cmの領域に対する強度値を求めるのに対し、キャスポルでは地盤内部20～30cmの部分までの範囲の平均的な強度が求められる。

試験時期・箇所

本調査における各試験時期を表-1に、試験箇所を図-2に示す。

表-1 試験時期

日時	対象面	摘要
平成18年12月8日	クレーンベース設置面	針貫入試験
12月12日	掘削畦壁面	表面透過型R I密度水分計
12月14日	クレーンベース設置面	針貫入試験、キャスポル
平成19年2月28日	石室から10cm上面	針貫入試験 表面散乱型R I密度測定
6月29日	掘削壁面	針貫入試験
7月14日	掘削壁面	針貫入試験
8月30日	床石設置面	針貫入試験

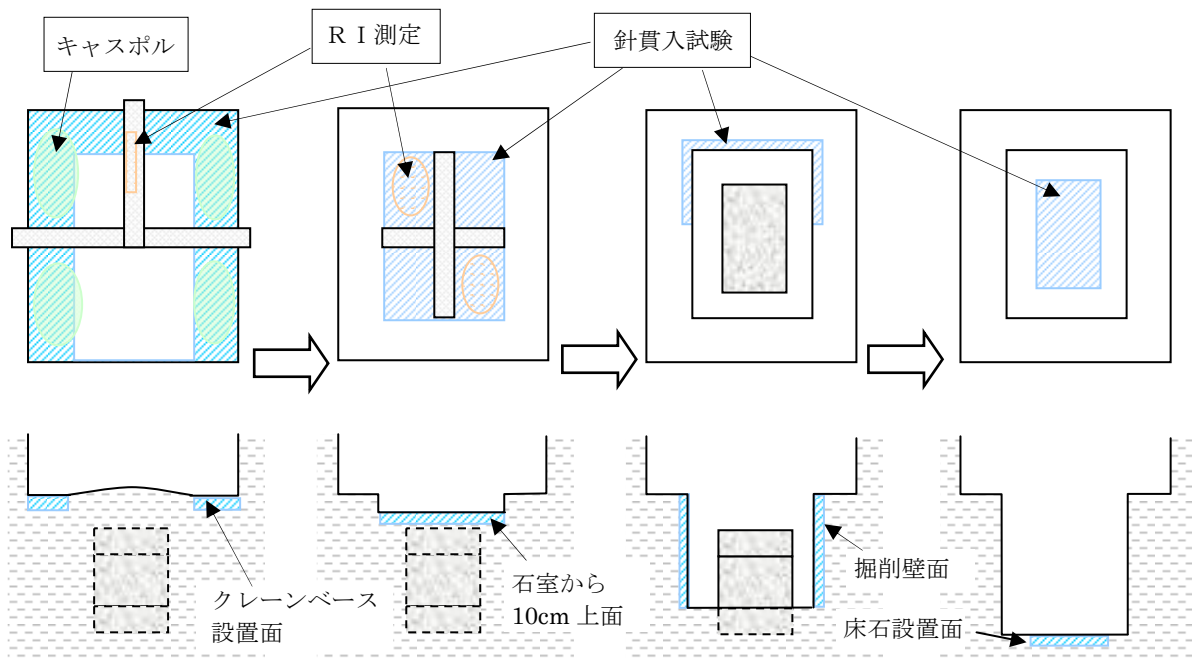


図-2 測定箇所

調査結果

1. 針貫入試験

クレーンベース設置面、版築掘削面

クレーンベース設置面にて、針貫入試験を実施した。分布図が作成できるように間隔 10cm の千鳥配置で実施した（平成 18 年 12 月 8 日および 14 日）。

得られた針貫入試験の結果を、コンターマップとして図-3 に示す。石室をカバーしているドーム状の版築上に位置する測点では換算一軸圧縮強度 q_u が $6 \times 10^2 \text{kN/m}^2$ 以上となる領域が広がっている。この領域を除くと、ほとんどの領域で換算一軸圧縮強度 q_u は $2 \sim 6 \times 10^2 \text{kN/m}^2$ の範囲にあるが、墳丘中心からの距離が大きくなるとやや小さくなる傾向がある。これはドーム上に構築された墳丘の構造を反映して、クレーンベースのようにある水平面を削り出すと、中心部から離れるほど上位の版築層になることによる可能性が考えられる。

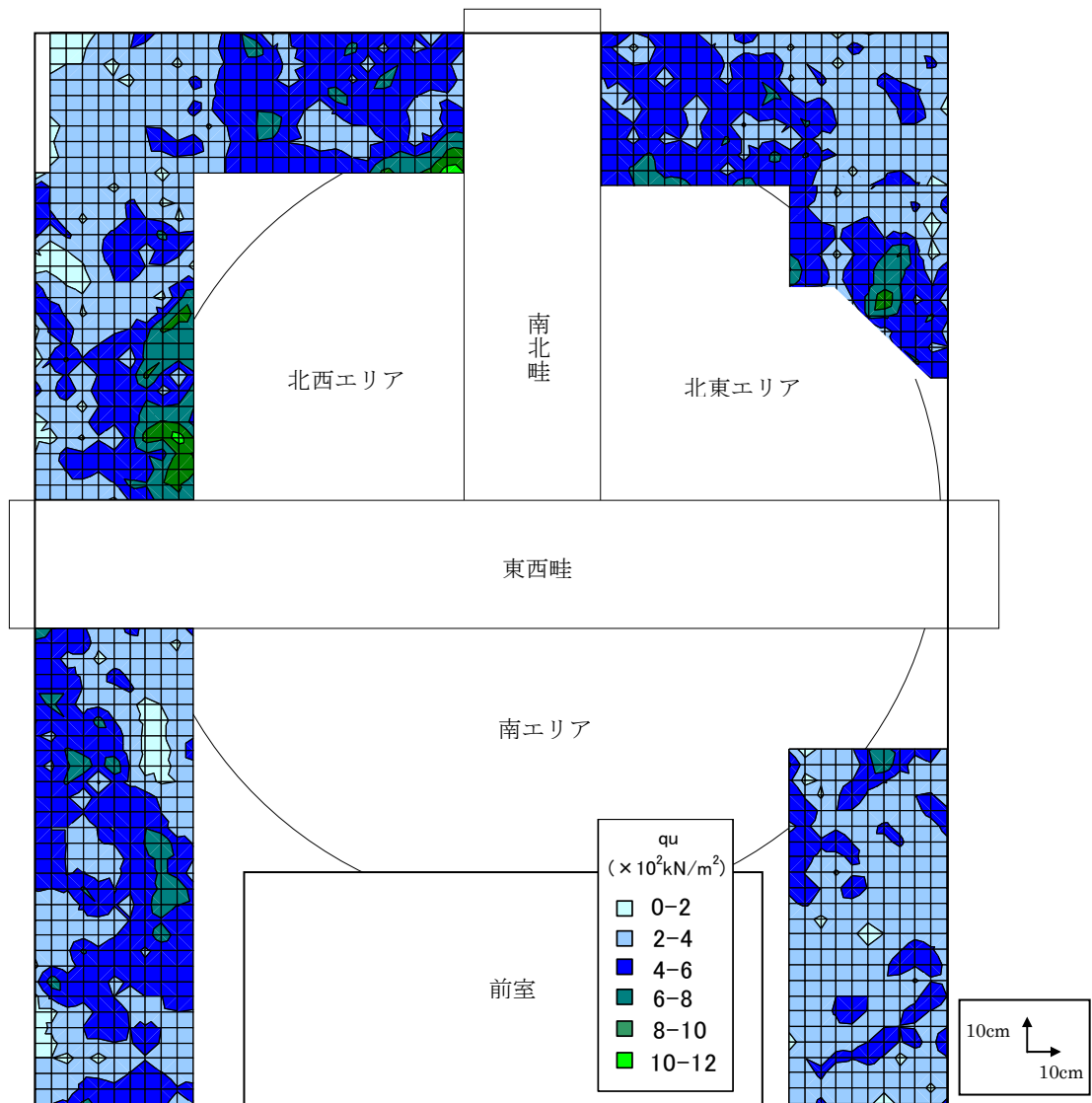


図-3 クレーンベース設置面における針貫入試験結果

石室直上面（天井から 10cm）

石室から 10cm 上面の版築掘削面にて、針貫入試験を実施した（平成 19 年 2 月 28 日）。得られた針貫入試験の結果を、コンターマップとして図-4 に示す。

石室から 10cm 上面の版築層は、クレーンベース設置面に比べ、換算一軸圧縮強度 q_u が $4 \sim 8 \times 10^2 \text{kN/m}^2$ の範囲の領域が多いことが分かる。また、石室中心に近いほど換算一軸圧縮強度 q_u が大きくなる傾向が確認された。

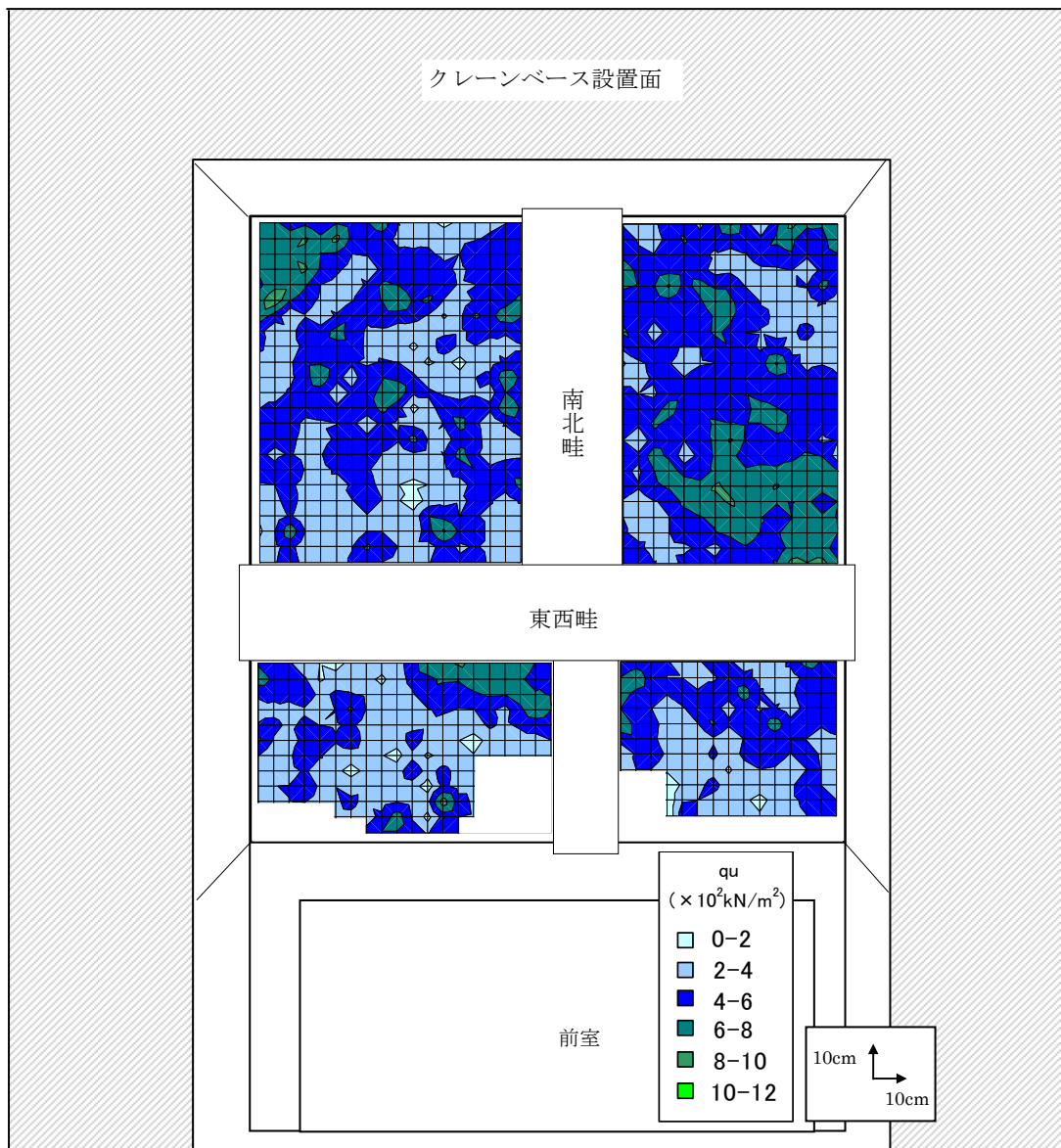


図-4 石室から 10cm 上面の版築掘削面における針貫入試験結果

掘削壁面

平成19年6月29日、7月14日、および8月30日時点で露出していた掘削壁面にて、針貫入試験を行った。試験配置を図-5~7に示す。試験結果を図-8~11に示す。

掘削壁面の試験は、クレーンベース設置面の試験と異なり、版築層に対し水平に針を貫入することになる。図-8、9に示すように、換算一軸圧縮強度 q_u はクレーンベース設置面の結果と同様に、ほとんどの領域が $2\sim 6\times 10^2\text{kN/m}^2$ の範囲であった。クレーンベース設置面から約110cmおよび200cm付近において、 q_u が小さくなる傾向が見られた。これらの深度は、それぞれ壁石上面、床石上面付近にあたる。これは地震による影響もしくは、版築を構築する上で何らかの工夫が施された可能性が考えられる。また、石室を削ってできた粉末の混入が観察された210cm付近の層で、 q_u が大きくなった。

8月30日に実施した針貫入試験結果により、クレーンベース設置面から約240cm下方の床石設置面付近の q_u は、それより上位の q_u より大きい傾向が確認できた(図-10)。石室設置面にあたる版築層は、石室を覆う層より強固に締固められたと考えられる。

また東壁面の q_u も同様に、ほとんどの領域が $8\sim 12\times 10^2\text{kN/m}^2$ の範囲であり、上層よりやや大きめとなった(図-11)。また、北から100~150cm付近で q_u が大きい値を示しているが、これは後出の図-12に示した床石設置面の北東エリアにおける q_u が大きい箇所と近く、礫が混入していたためと考えられる。

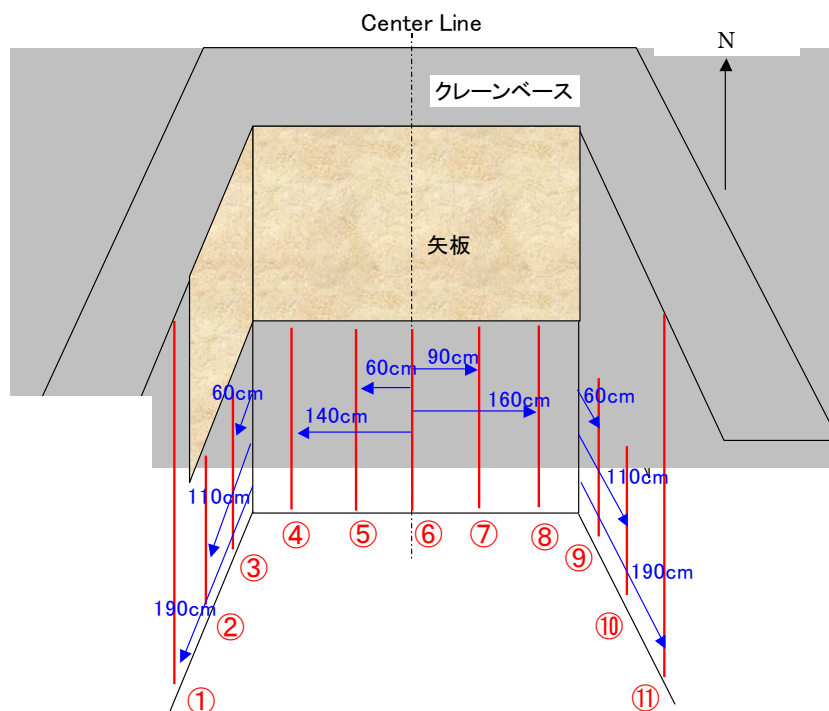


図-5 掘削壁面での針貫入試験の測点配置図 (平成19年6月29日実施)

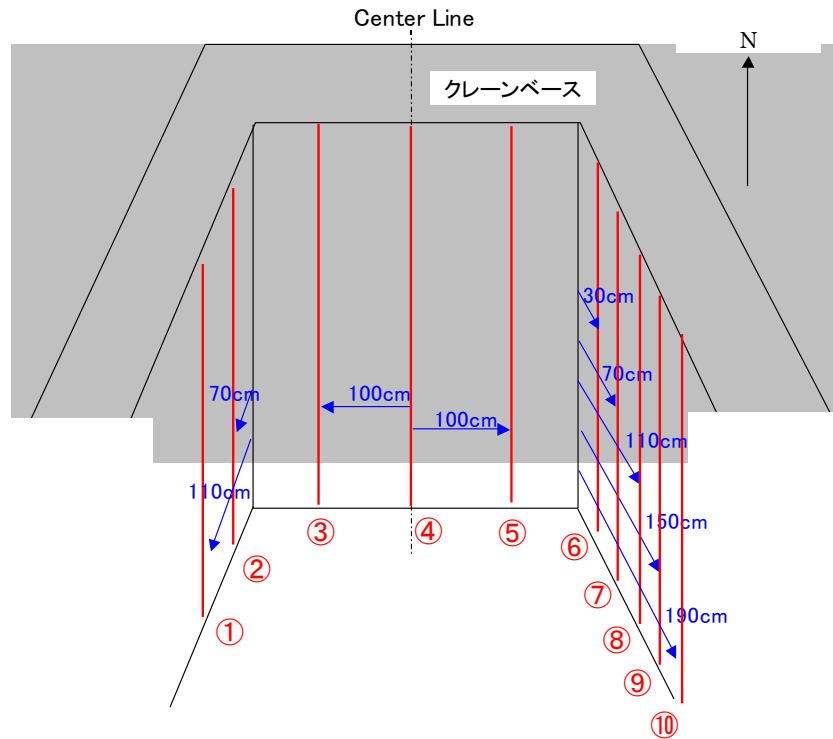


図-6 掘削壁面での針貫入試験の測点配置図（平成 19 年 7 月 14 日実施）

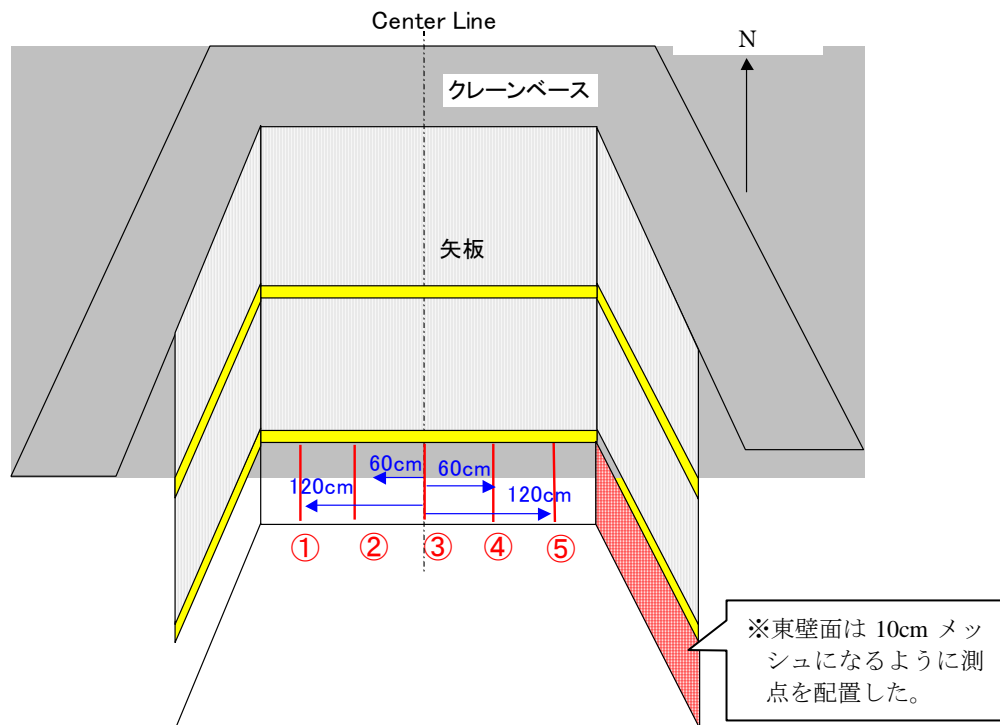


図-7 掘削壁面での針貫入試験の測点配置図（平成 19 年 8 月 30 日）

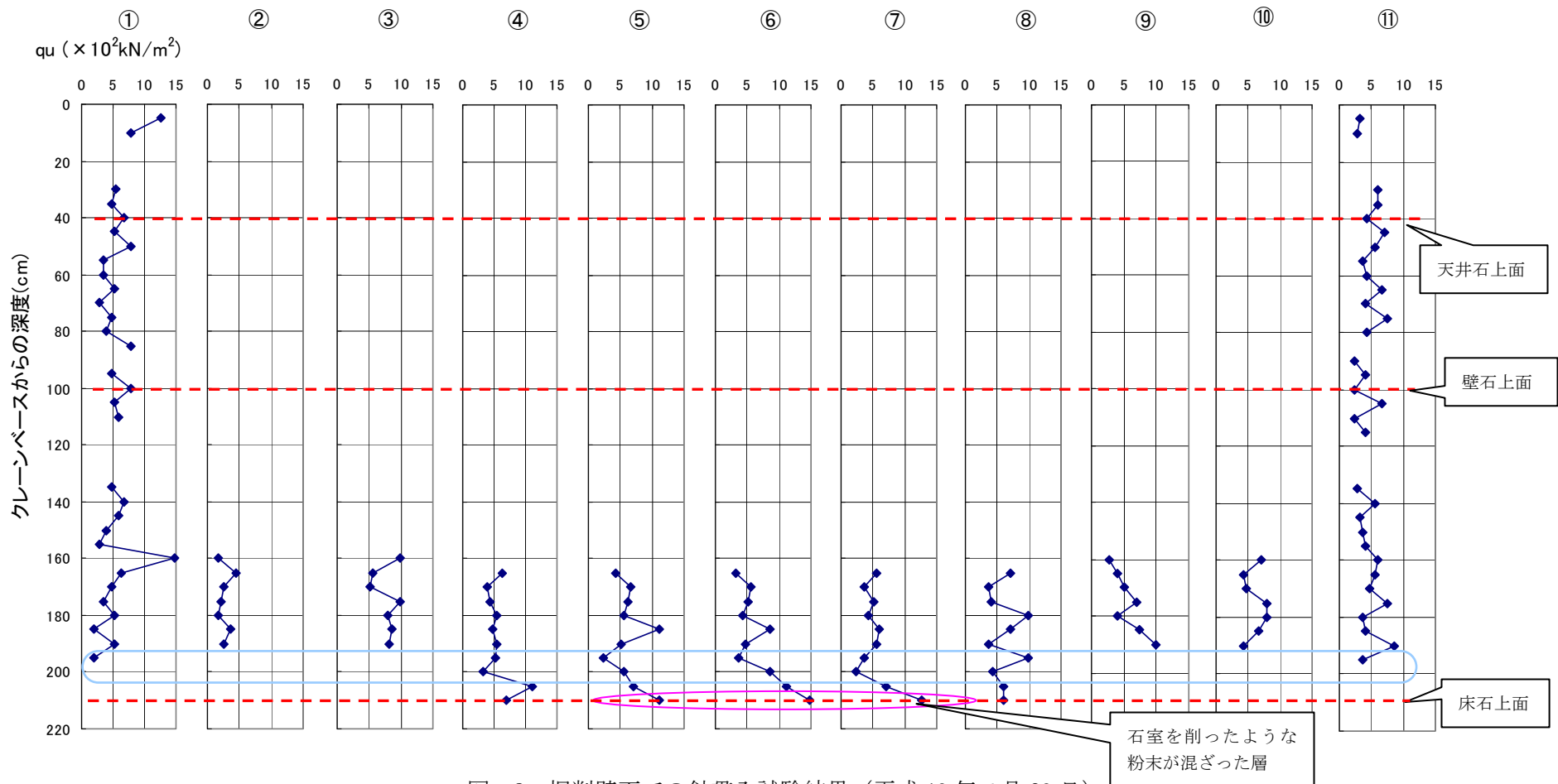


図-8 掘削壁面での針貫入試験結果 (平成 19 年 6 月 29 日)

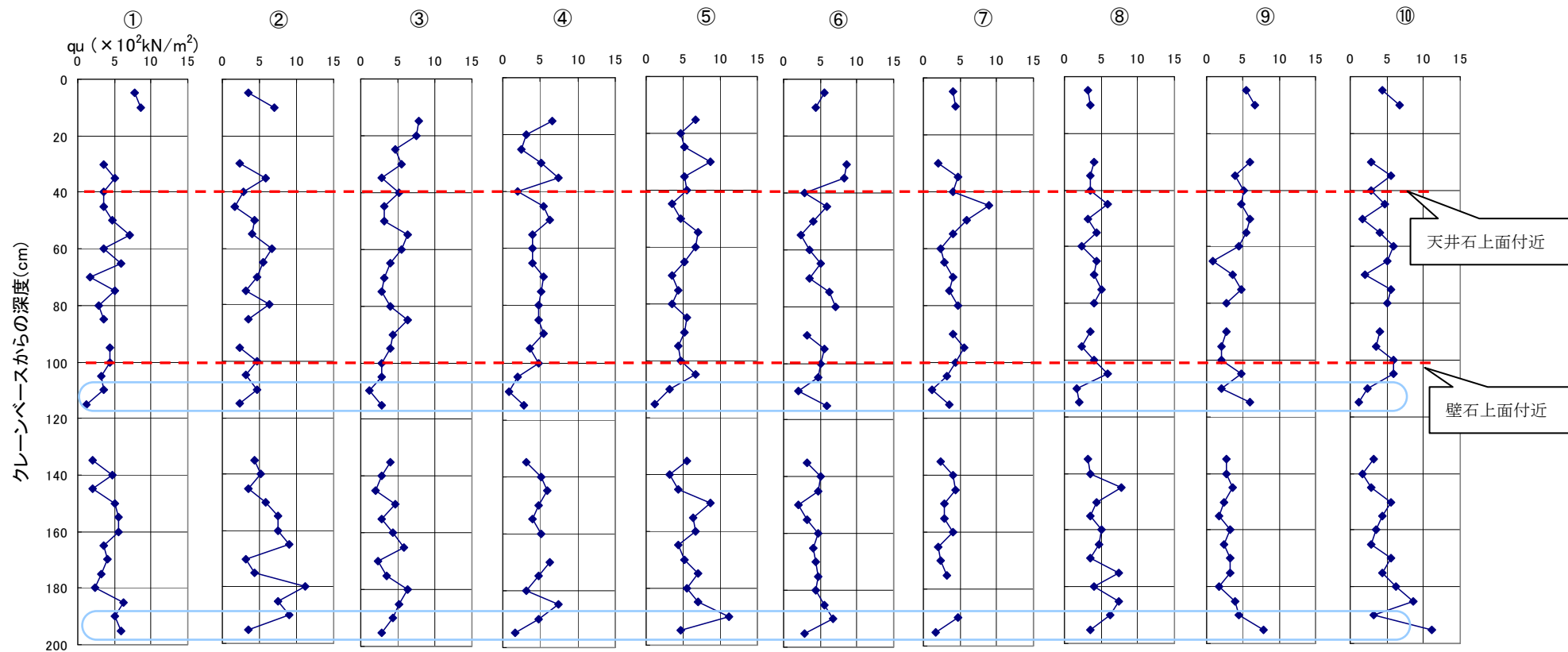


図-9 掘削壁面での針貫入試験結果（平成19年7月14日）

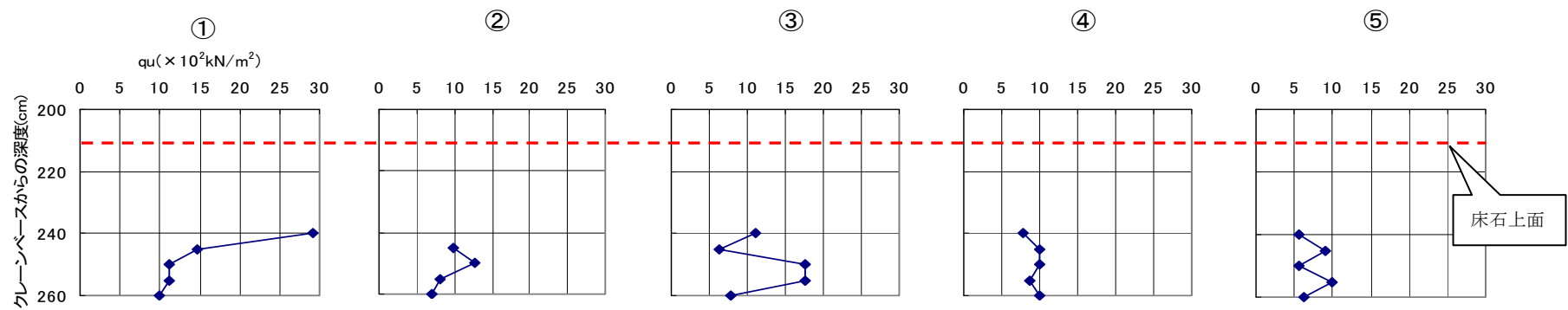


図-10 北掘削壁面での針貫入試験結果（平成 19 年 8 月 30 日）

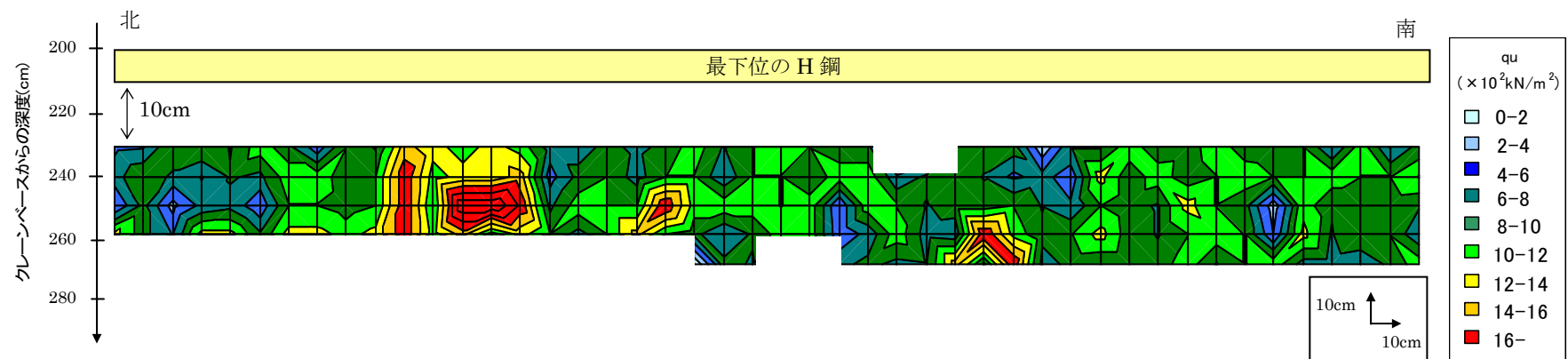


図-11 東掘削壁面での針貫入試験結果（平成 19 年 8 月 30 日）

床石設置面

床石設置面付近の層で針貫入試験を実施した。南エリアの版築掘削面および北エリアの版築直下の地山面を測定対象とした。(平成 19 年 8 月 30 日)。得られた針貫入試験の結果を、コンターマップとして図-12 に示す。

石室より上の版築層 (図-4) では、換算一軸圧縮強度 q_u は $4 \sim 8 \times 10^2 \text{kN/m}^2$ の領域が多かったのに対し、石室より下の版築層では、 q_u は $8 \sim 12 \times 10^2 \text{kN/m}^2$ の領域が多いことが確認され、このレベルの版築は地山とほぼ同等の強度を有していることがわかった。また、地山面である北エリアと版築面である南エリアの q_u には大きな差が見られなかった。

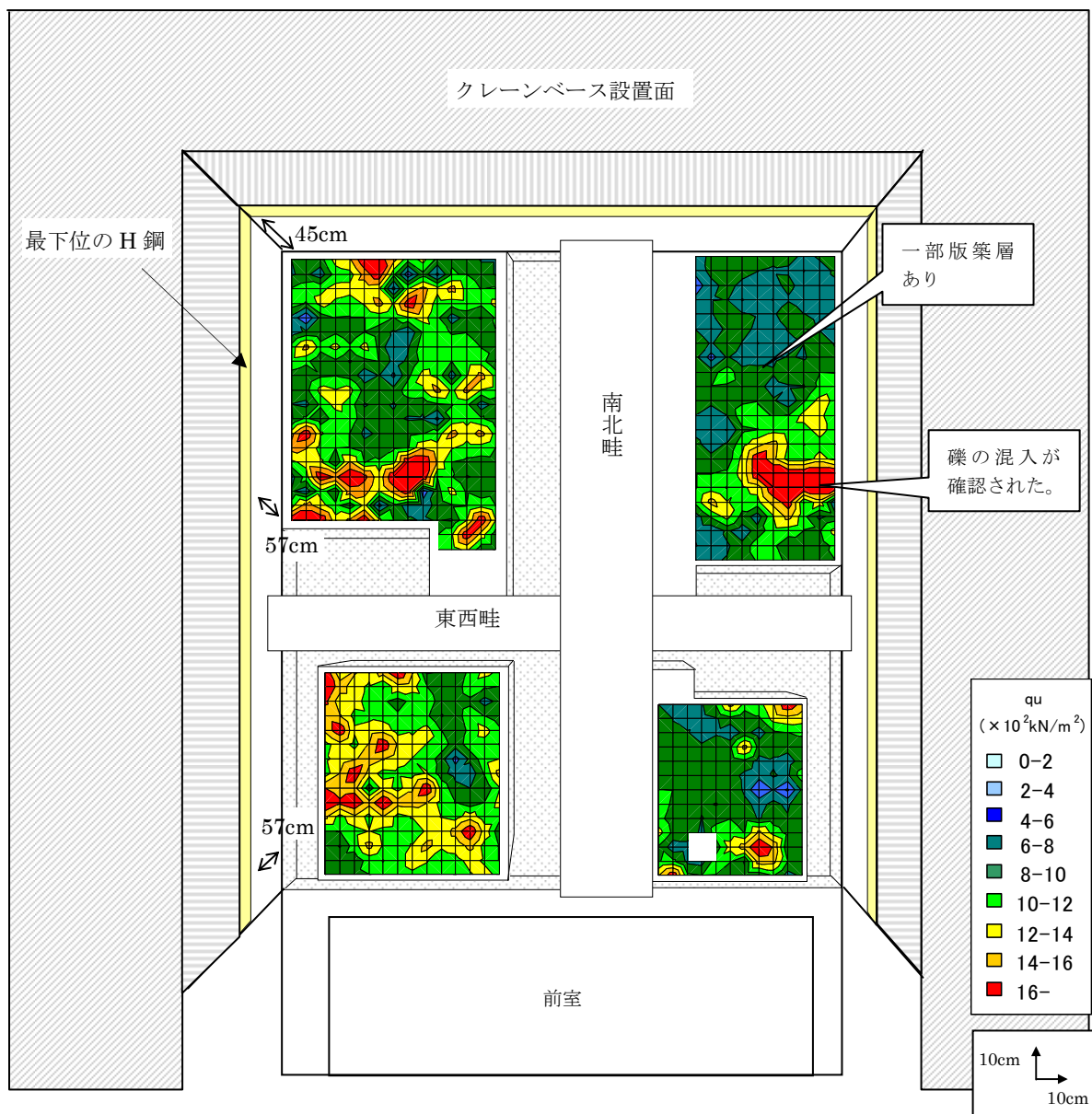


図-12 床石設置面における針貫入試験結果

2. 表面型 R I 密度水分計

南北畦の壁面にて、表面透過型 R I 密度水分計で墳丘版築の密度および水分分布の測定を実施した(平成 18 年 12 月 12 日)。測点配置を写真-1 に、測定結果を図-13 に示す。なお、測定領域は、各点(線源挿入孔)の下側に、およそ幅 30cm×高さ 20cm×深さ 25cm である。

上位から下位へ密度は増加する傾向である。含水比は最下位が大きくなっているが、それより上は 20%弱程度と、大きなバラツキはない。畦の壁面は長期に渡って暴露されており、元々の水分は失なわれていると考えられる。おそらく、最下層の水分程度が発掘前の状態に近いのではないかと考えられる。写真-1 のように南北畦の壁面に現れた版築は赤っぽい上位と、黄色っぽい下位の、2つの層群に分けられるようである。密度の測定値も、下から5点目で差異があり、この構造の違いが見ただけでなく、密度構造も異なっていることがわかる。

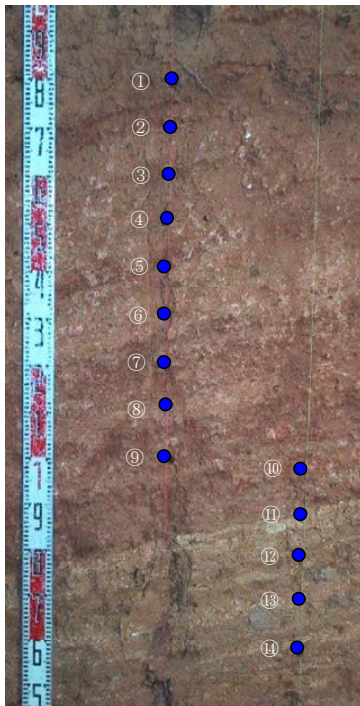


写真-1 密度水分の測点

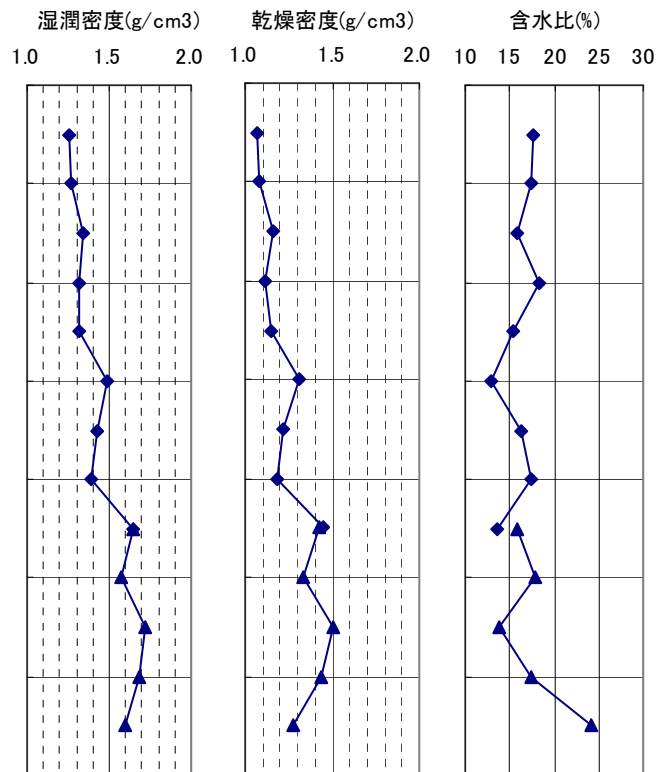


図-13 南北畦の密度・水分測定結果の分布

石室から 10cm 上面の版築掘削面（北西エリアおよび南東エリア）にて、表面散乱型 R I 密度計を用いて密度測定を実施した（平成 19 年 2 月 28 日）。測定結果を図-14 に示す。

石室から 10cm 上面の版築掘削面の試験では、同じ深度層の密度分布を調べた。版築掘削面の湿潤密度は、南北畦の下位部分と同様の $1.5\sim 1.8\text{g/cm}^3$ の範囲であった。北西エリアでは、針貫入試験の結果と同様に、石室中心に近づくほど湿潤密度が大きくなる傾向が見られた。南東エリアの湿潤密度は、北西エリアに比べ小さく、クレーンベースに近づくほど大きくなった。

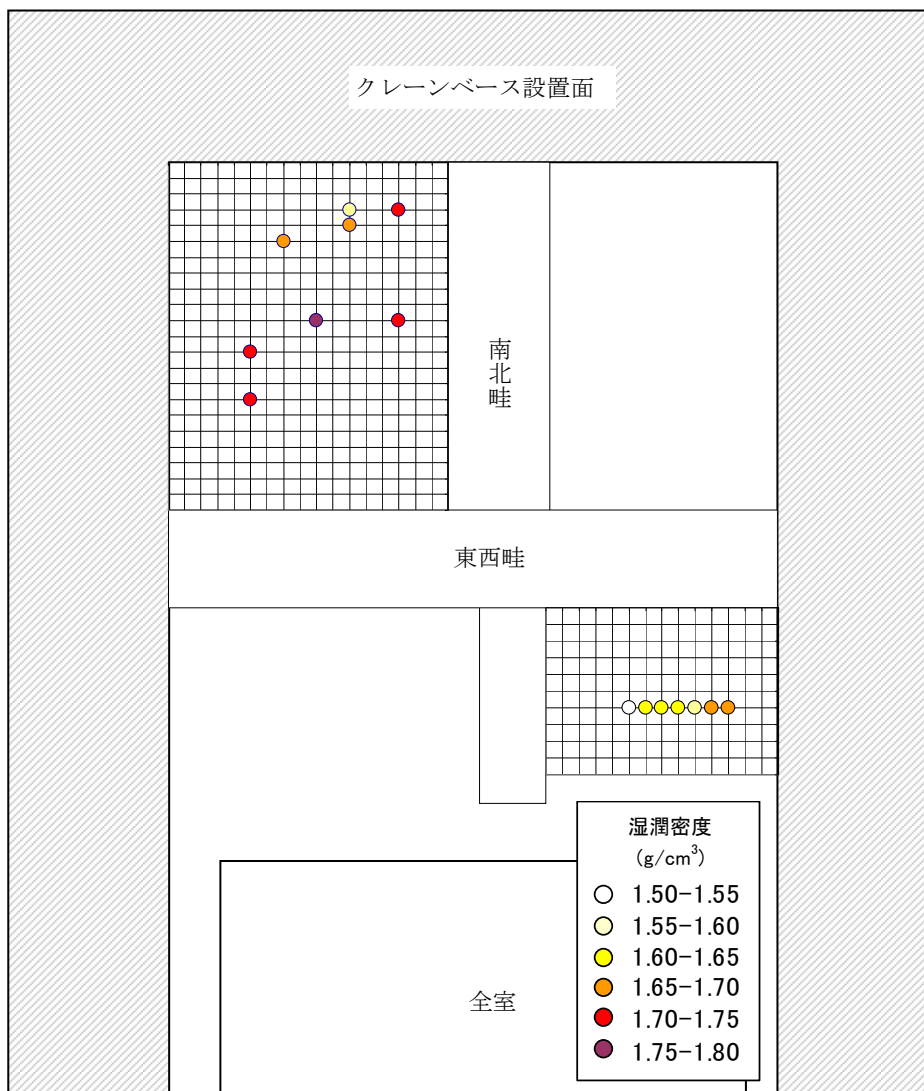


図-14 石室から 10cm 上面の版築掘削面における密度測定結果

3. キャスポル（簡易支持力試験機）

クレーンベース設置面にて簡易支持力測定を実施した。簡易支持力測定機の測定値「インパクト値」から算定されるコーン指数 q_c を、測点に対する分布図として図-15 に示す。

コーン指数の分布傾向は、針貫入試験結果の一軸圧縮強度の分布と非常に似ている。図-3 の $q_u = 4 \times 10^2 \text{kN/m}^2$ 以上の領域で $q_c = 20 \times 10^2 \text{kN/m}^2$ となっている。また、墳丘中心から離れるほど q_c は低下する傾向が認められる。これも墳丘版築の構造によるものと考えられる。

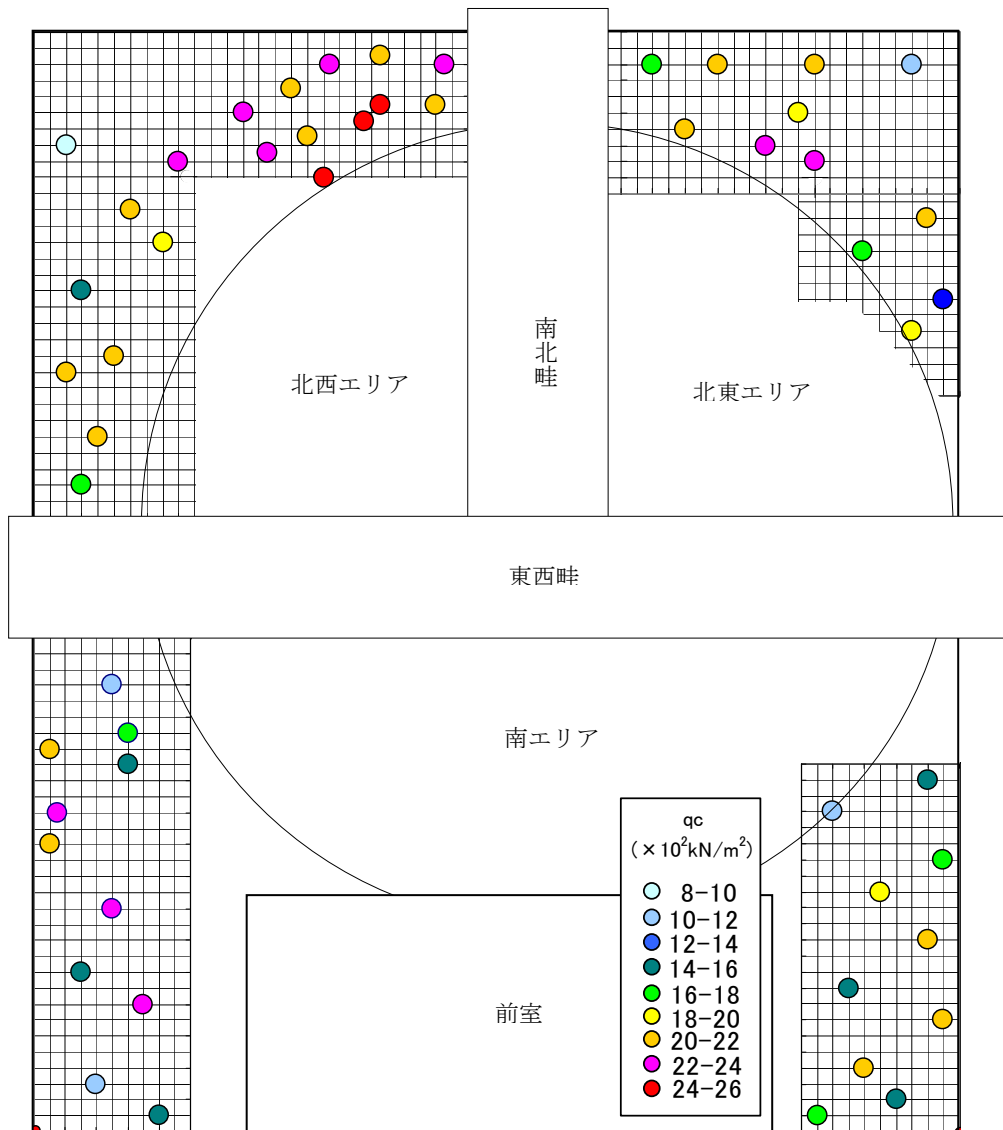


図-15 簡易支持力測定器によるコーン指数 q_c の分布

調査結果のまとめ

クレーンベース設置面、版築掘削面、掘削壁面にて針貫入試験、表面型 R I 密度水分測定および簡易支持力測定を実施した。一連の試験によって、以下の知見が得られた。

- ・ クレーンベース設置面の一軸圧縮強度 q_u はほとんどの領域で $2\sim 6\times 10^2\text{kN/m}^2$ であった。墳丘中心から離れるほど、小さくなる傾向が見られた。クレーンベースの安定性照査には平均値の $4\times 10^2\text{kN/m}^2$ を用いた。
- ・ 石室から 10cm 上面の版築掘削面の一軸圧縮強度 q_u は $4\sim 8\times 10^2\text{kN/m}^2$ であり、クレーンベースの値よりもやや大きな強度を有している。
- ・ 掘削壁面の一軸圧縮強度 q_u はクレーンベース設置面と同様 $2\sim 6\times 10^2\text{kN/m}^2$ であったが、壁石上面および床石上面付近の層で、若干小さくなる傾向が見られた。また床石設置面付近の層では、逆にやや大きくなる傾向が見られた。
- ・ 床石設置面の一軸圧縮強度 q_u は、ほとんどの領域で $8\sim 12\times 10^2\text{kN/m}^2$ で、上位の版築層より大きく、地山の強度に近い値を有することが確認された。
- ・ 南北畦壁面の湿潤密度は、赤っぽい上位部分の層が $1.2\sim 1.5\text{g/cm}^3$ 、黄色っぽい下位部分の層が $1.6\sim 1.7\text{g/cm}^3$ であった。含水比は、上位部分も下位部分も 20%弱程度であった。クレーンベースの安定性照査には、クレーンベース設置面と同等の版築層である下位部分の湿潤密度の平均値 1.643g/cm^3 を用いた。
- ・ 石室から 10cm 上面の版築掘削面の湿潤密度は、南北畦の下位部分と同程度の $1.5\sim 1.8\text{g/cm}^3$ であった。
- ・ クレーンベース設置面のコーン指数 q_c は、一軸圧縮強度 q_u の分布と相関があり、 q_u が $4\times 10^2\text{kN/m}^2$ 以上の領域で q_c は $20\times 10^2\text{kN/m}^2$ となった。また、墳丘中心から離れるほど小さくなる傾向が見られた。

これらの結果に基づいて、クレーンベースの地盤の支持力と安定性、掘削壁面土留工の安全性、石室の安定性（掘削時および地震時）の照査、および石室壁材の転倒防止支保工の検討を行った。