

令和 3 年度峯ヶ塚古墳弾性波探査等の成果概要

【探査目的】

第 43 回世界遺産委員会の決議で示された追加的勧告のうち項目 d)「非破壊で墳丘の構造的安定性を評価するための手法について検討すること」への対応として実施し、墳丘土の安定状況を明らかにすることによって、資産の今後の保全対策に資することを目的とする。

【対象古墳】

昨年度実施した、「地盤調査方法比較検討委託業務」において、リスク評価を行った結果、調査対象とした 7 基の古墳のなかで峯ヶ塚古墳が最も崩壊リスクの高い古墳として選定された。峯ヶ塚古墳は、深層崩壊リスクだけでなく、植生不良に起因する表層崩壊や高木の根茎吐出や根返り、ガリー浸食等局所的な損壊を含む全てのリスク要因が存在する古墳である。そこで、脆弱かつ不安定な地盤状況が予想される峯ヶ塚古墳で非破壊による弾性波探査を実施した。

【探査方法】

・弾性波探査は、地表面付近で人工的に弾性波（P 波、S 波）を発生させ、地下の速度の異なる地層境界で屈折して戻ってきた屈折波を、地表に設置した測定装置で観測し、地下の弾性波速度構造を求める探査法である。

・また、速度解析結果から地盤内の速度分布が求められるが、得られた速度分布をボーリング結果と対比して総合的に解釈することにより、解析精度を高めることができる。そのため、速度層変化が大きい箇所では貫入試験を併せて実施した。

※墳丘への影響を最小限に抑えるため、貫入径の小さいスウェーデン式サウンディング方法を用いた貫入試験（※貫入ロッド 先端径 33 mm、ロッド径 19 mm）を実施。

- ・弾性波探査
P 波・S 波：受振点間隔 2.0m
A～D4 測線 延べ 194.0m
- ・スウェーデン式サウンディング（SWS）試験
計 8 箇所

測線名	測線長さ (m)
A 測線	88.0
B 測線	44.0
C 測線	32.0
D 測線	30.0
合計	194.0

弾性波探査実施数量表

【探査測線配置】

① A - A' 測線 (L=88m)

A 測線は前方部と後円部にかけての南側斜面に設けた最も長い測線で、墳丘裾部に周濠があることから水際での盛土浸食が発生して、上方斜面にその影響が出ている。よって、斜面中腹にも表層崩壊地形が認められ、A 測線内には地盤の緩みとともに地すべり的な広範囲の緩み領域が潜在する可能性がある。

② B - B' 測線 (L=44m)

B 測線は後円部を概ね南北に横断する測線で、A 測線とは墳丘南斜面の中央やや東寄り（測線距離 10m 付近）で交差する。B 測線上の頂部付近及び北側斜面は、後円墳の形状がほぼ保たれているが、南斜面は起点付近の周濠水際での浸食が激しく、

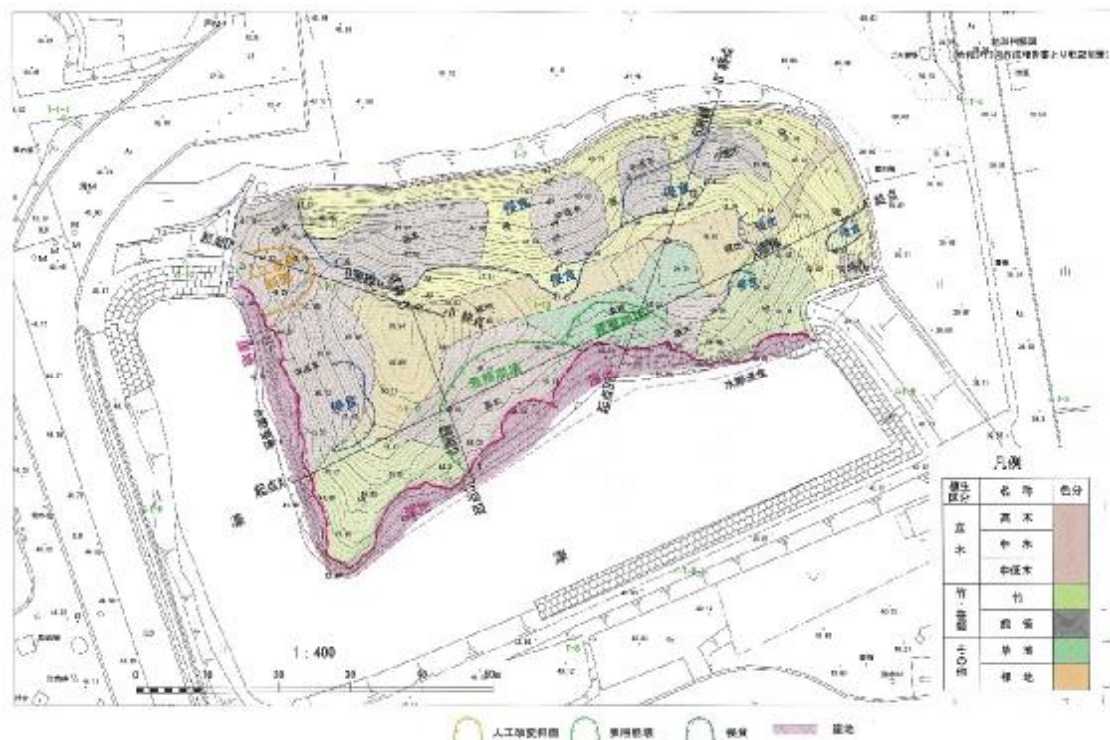
墳丘裾部には **2～3m** の急崖が存在している。

③ C-C' 測線 (L=32m)

C測線は前方部の南斜面に配置した測線で、A測線とは墳丘南斜面の中央やや西寄り（測線距離 **11m** 付近）で交差する。C測線上の地形は、頂部付近は前方部の方墳地形が保たれてはいるが、B測線同様、周濠沿いの斜面裾部の浸食が激しく、その上位斜面は比較的広範囲にわたって緩み地形が読み取れる。

④ D-D'測線 (L=30m)

D測線は前方部の西斜面に配置した測線である。付近の斜面は、頂部付近は前方部の原形を留めているが、北角には人工改変された急斜面が存在する。切り取られた斜面は植生が乏しく、墳丘土が露出しており、雨水による浸食や自然崩落が発生している。



【探査結果】

< P波探査 >

P波探査の結果、A～D測線とも3層区分され第1層の速度値は0.3～0.4km/secを示し、測線に関わらず、ほぼ同値が得られている。また、第2層の速度値のうち前方部は **0.5～0.64km/sec**、後円部は **0.6～0.7km/sec**、第3層の速度値のうち前方部が **1.1～1.2km/sec**、後円部が **1.0～1.1km/sec** と極僅かにバラツキが認められるが測線別に両層に大きな違いは認められない。

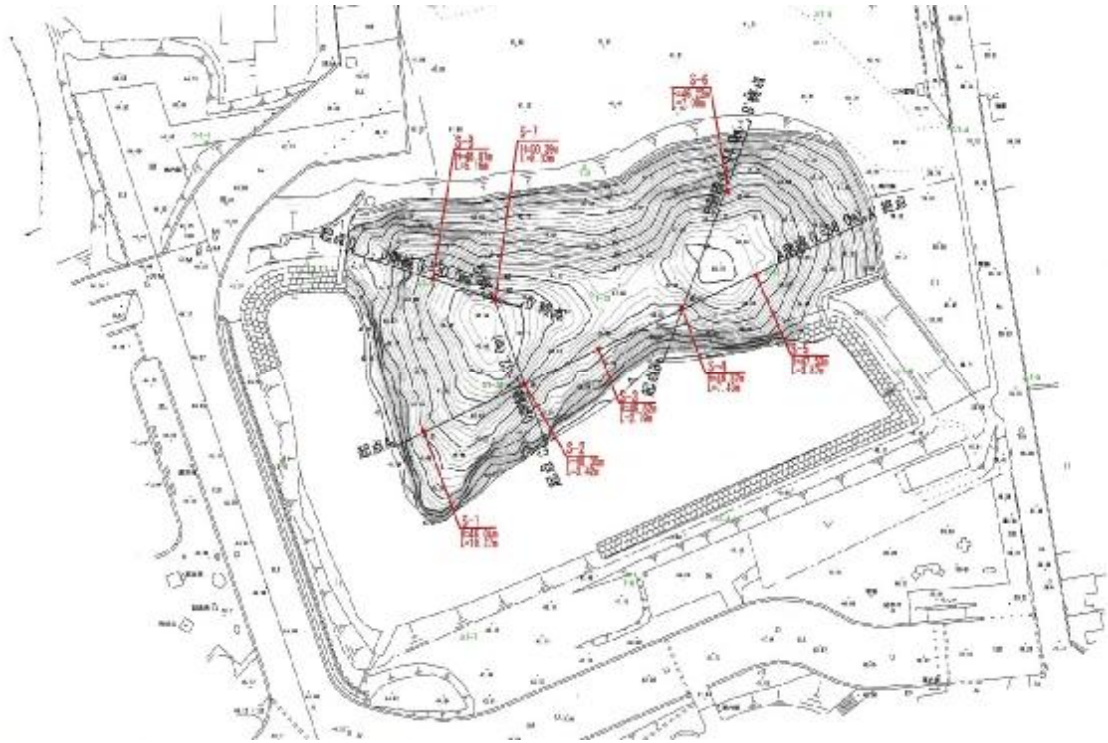
本業務で得た墳丘盛土の P波速度は、0.3～1.2km/sec で一般値「主要地層・岩石の原位置弾性波伝播速度 (Vp)」と比較すると 「沖積層の表土・崖錐・乾砂礫」値と同程度の速度値が得られている。

< S波探査 >

S波探査の結果、丘盛土の速度層は概ね第1層から第5層まで区分できる。(P波探査に比べるとS波探査は分解能が高いことが解る。) 第1層は表層に被覆する低速度の不安定な土層域を示している。第2層から第4層にかけては徐々に地盤が締まり、最深部の第5層で最も良く締まっている。速度値は第1層が **70～150m/sec**、第2層が **150～200m/sec**、第3

層が 200～250m/sec、第 4 層が 260～290m/sec、第 5 層が 320～390m/sec を得ている。

【スウェーデン式サウンディング試験】



<試験位置>

試験の実施位置は、地形判読の結果や現地踏査の結果、弾性波探査の解析結果等から墳丘盛土で速度層変化が大きい箇所を読み取って、各測線に代表となる試験位置として S-1～S-8 の 8 地点を選定した。

<試験結果>

探査測線上の **8** 箇所で行ったスウェーデン式サウンディング試験では、試験中のロッドの貫入状況や音等から粘性土と微細な砂質土が不規則に混在する墳丘盛土の土質構成が推測される。

試験結果から得られた **Wsw** 値、**Sws** 値をもとに、算出した地点毎 **25cm** 区間の換算 **N** 値を求めた。

貫入した墳丘盛土の平均値は、砂質土で **N=2.6～20.1**、粘性土で **N=3.1～6.7** を示し土質区分に関わらず、盛土の締まり具合、特に表層地盤は非常に緩いことが推測される。

【総合解析】

<峯ヶ塚墳丘の墳丘盛土の地盤解析>

弾性波探査の解析で得られた **S** 波弾性波速度分布とスウェーデン式サウンディング試験結果から得た換算 **N** 値、既存ボーリング調査の実測 **N** 値（標準貫入試験）、補正換算 **N** 値との相関解析を行った。

弾性波探査の解析結果は、**P** 波探査の解析結果は速度層区分が第 **1～3** 層までの **3** 層区分であるのに対し、**S** 波探査は解析精度が高くなって第 **1～5** 層までの速度層層区分が可能となった。よって、峯ヶ塚の墳丘盛土の締まり具合や安定度の評価検討を行うにあたっては「S

波速度分布図」をもって解析を行った。

<S波速度分布図> (不安定な墳丘盛土斜面箇所)

峯ヶ塚古墳の墳丘盛土の表層地盤の層区分は、第1~2層でS波速度が70~200m/sec、推定N値は概ねN<11.9を示す。その下位層として速度層区分で第3層が分布し、S波速度は200~250m/sec、推定N値は11.9~55と推測される。最下部層は原地盤を含む墳丘盛土の基礎地盤でS波速度は260~390m/sec、N値は55以上を示している。

< 峯ヶ塚古墳の墳丘盛土の速度層区分と推定N値 >

速度層区分		第1層	第2層	第3層	第4層	第5層
測線名	A	70~140	150~160	210~240	260~280	320~390
	B	100~150	160~200	210~250	260~270	350~360
	C	90~150	160~170	200~240	280~290	
	D	100~150	150~170	200~210	270~280	
全速度層区分		70~150	150~200	200~250	260~290	320~390
推定N値		N<1.6	1.6~11.9	11.9~55	55~60<N	60<N

※ 表中の推定N値はS波弾性波速度と補正換算N値の関係式 $V_s=139.9N^{0.145}$ からの算定値を示す。

弾性波探査で得られた地盤の速度情報や探査前に行った地形判読や現地踏査の結果を基に、峯ヶ塚古墳の墳丘盛土について、不安定な盛土斜面を選定した。不安定な斜面の選定条件としては、盛土の締まり具合(弾性波速度値)だけで無く、現地の地形条件も考慮。

< 不安定な墳丘盛土斜面の諸元 >

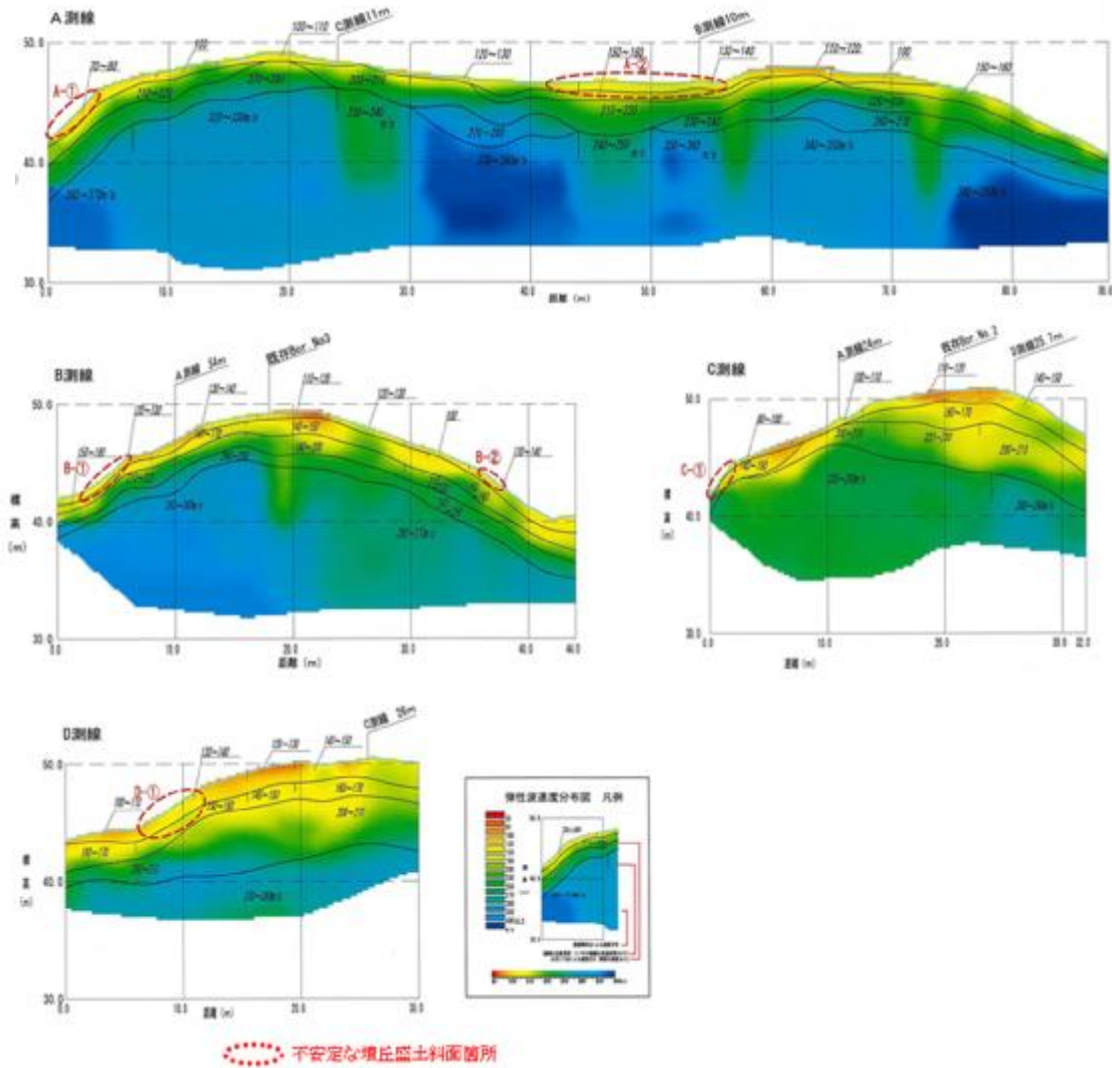
測線名	S波解析 図上位置	不安定区間 (起点:m)	最大深度 (G-m)	斜面勾配 (1:α)	P波速度 (km/sec)	S波速度 (m/sec)	推定N値
A	①	0 ~ 4.0	1.20	1:0.70	0.3	70~80	N < 1
	②	42.0 ~ 56.0	1.50	(1:0.10)、(1:0.45)	0.3~0.4	120~160	N < 1 ~ 2.5
B	①	2.0 ~ 6.0	1.40	1:0.10~1.00	0.4	150~170	1.6 ~ 3.8
	②	36.0~38.0	1.30	1:1.50	0.3	130~160	N < 1 ~ 2.5
C	①	0 ~ 2.0	1.70	1:0.45	0.3	90~150	N < 1 ~ 1.65
D	①	6.0 ~ 12.0	1.30	1:0.34~0.60	0.3	100~160	N < 1 ~ 2.5

※ 表中の不安定区間、最大深度は図7.6.2のS波速度分布図からの読取値を示す。

※ A-②の斜面勾配は、左がB測線沿い、右がC測線沿いの南側周濠に面する最大勾配を示す。

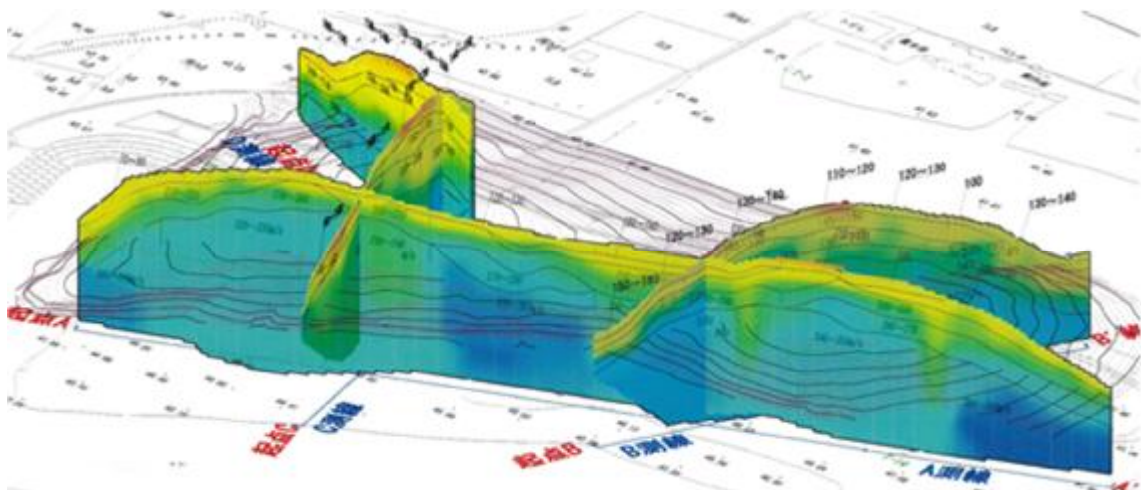
なお、ここで不安定と判定した墳丘斜面は、その勾配が1:1.50以下で、弾性波探査の解析では概ねP波弾性波速度が0.3km以下、S波弾性波速度が170m/sec以下で、推定N値も3.8以下を示す極めて低い墳丘盛土斜面を選定する結果となった。

< S波速度分布図（不安定な填丘盛土斜面箇所）>



<速度分布の立体図作成>

A～D測線毎の解析成果である「トモグラフィー解析図」を組み合わせたパネルダイアグラムを作成。パネルダイアグラムは一定方向からみたP波速度層構造、S波速度層構造を等角図で表した。



【峯ヶ塚古墳の墳丘盛土調査結果】

- ・ A～D測線上で **P 波** および **S 波** による弾性波探査を実施した結果、P 波探査の解析で 3 層、S 波探査の解析で 5 層の速度層構造が求まり、墳丘盛土の安定性や締まり具合を知る地盤情報として、P 波探査の結果、第 1 速度層で $V_p=0.3\sim0.4\text{km/sec}$ 、S 波探査の結果、第 1、2 速度層で $V_s=70\sim200\text{m/sec}$ の弾性波速度値が得られた。
- ・ 探査測線上の 8 箇所で行ったスウェーデン式サウンディング試験では、試験中の貫入ロッドの動きや音等から粘性土と微細な砂質土が不規則に混在する墳丘盛土の土質構成が推測される。当試験結果から算定した地点毎の **SWS 換算 N 値** の平均値は、砂質土で **2.6~20.1**、粘性土で **3.1~6.7** を示し、推測される表層地盤の締まり具合は非常に緩く不安定である。
- ・ 不安定と判定した墳丘斜面は、その勾配が **1:1.5** 以下で、弾性波探査の解析では概ね **P 波弾性波速度が 0.3km/sec 以下、S 波弾性波速度が 170m/sec 以下** で地盤の締まり具合を指標とする **N 値も 3.8** 以下が予想される。これは盛土材料が砂質土、粘性土のいずれの土質構成にあっても非常に締まりが悪く不安定な地盤状況が推測される。
構成資産の保護の観点から今後も継続的な現地調査とともに修復、保全が望まれる。

【まとめ】

一般に文化遺産として管理されている古墳盛土での補修や保全対策に関しては、どこの斜面がどの程度傷んでいるかを調べて対策工を検討するような地盤調査は殆ど行われていない。本業務は、墳丘盛土の斜面管理に有効な地盤情報を得るための調査手段として弾性波探査を実施した。これは機械ボーリングや原位置試験、各種土質試験等直接的な土質調査が実施出来ない状況下において、非破壊で行う調査として弾性波（P 波・S 波）を用いた物理調査である。本業務では探査結果から墳丘盛土の弾性波速度を求め、速度層分析を行って盛土の安定性を評価する有力な地盤情報が得られた。また探査測線上で行ったスウェーデン式サウンディング試験から導き出した換算 N 値や既存調査の実測 N 値を基に、墳丘盛土の S 波速度と N 値の関係を求め盛土の締まり具合に関する地盤情報も得て今後の古墳調査への弾性波探査適用の有効性を導くことが出来た。

ただし、墳丘盛土は人為的に締め固められた構築で、土質構成も不均一である。また、古墳毎に使用されている盛土材の地域性があり、土質区分が同じでも締め固め条件が異なれば、盛土の強度も異なる。よって、ここで得られた探査、試験結果は峯ヶ塚古墳での地盤情報である。今後他の古墳調査でも本業務の成果が有効活用されるには、事前に行う現地踏査や地形判読によるリスク要因の抽出が重要である。その成果を基にはじめて効果的な測線を設置することが可能となるのであり、同様の調査事例を増やし、検証を重ねて、弾性波探査の古墳調査への適応性の向上を図る必要がある。

※有識者によるコメント（事務局による聞き取り）

- ・弾性波探査は万能ではなく、解釈は難しいが、弾性波探査方法の有効性が確認できた。
- ・点ではなく、面的に把握できた意義は大きい。
- ・表層に弱い箇所がみられるが、平坦な箇所は速度値が遅いからといって心配はない。墳丘斜面の濠水による洗掘防止、雨水の樹根への侵入防止のための植生改良等が重要。