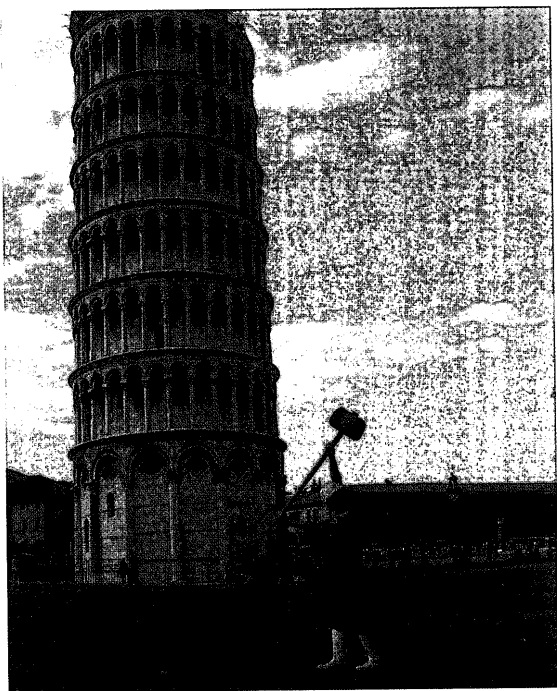


遺跡の保守・安全のための地盤調査法—Pisaの斜塔を例として
(本文35～37ページ参照)



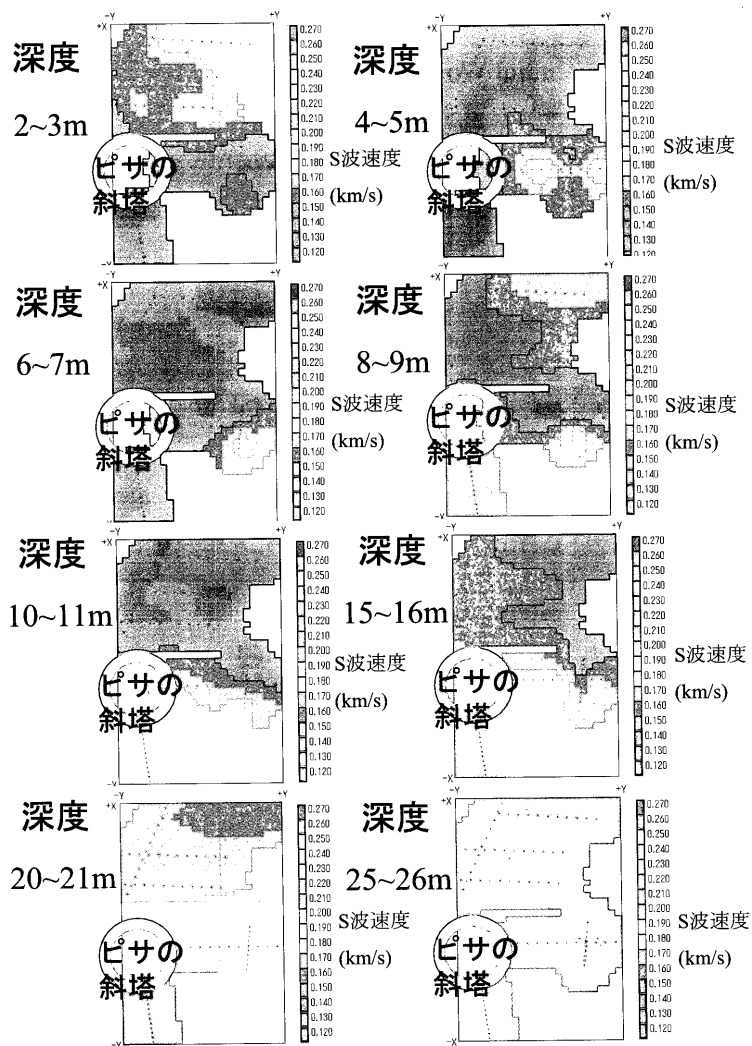
口絵写真—20 ピサの斜塔付近の空中写真
(ピサ市のホームページ
<http://www.comune.pisa.it/>)



口絵写真—21 二次元表面波探査実施状況



口絵写真—23 地盤調査の実施場所
(ピサの斜塔の頂上より南側を撮影)



口絵写真—22 各深度におけるS波速度平面分布 (図の上が北側)



口絵写真—24 ボーリングマシン (左側)

遺跡の保守・保全のための地盤調査法—Pisa の斜塔を例として

Site Investigation Practice for Conservation of Antiquities—A Case of the Leaning Tower of Pisa

澁谷 啓 (しぶや さとる)

北海道大学大学院

田中政典 (たなか まさのり)

独立行政法人 港湾空港技術研究所

林 宏一 (はやし こういち)

応用地質科

渡部 要一 (わたべ よういち)

独立行政法人 港湾空港技術研究所

山下 聡 (やました さとし)

北見工業大学工学部

荘司 泰敬 (しょうじ やすのり)

応用地質科

1. はじめに

遺跡の地盤調査における技術的・社会的な要求は何であろうか。第一に、長い将来にわたって対象物をできる限り古代のあるべき姿のまま保守し、その安全性を確保するという共通の使命がある。つまり、他の土木事業一般と比較して、考慮すべき時間のスパンが圧倒的に長く、保守・保全効果の持続性 (sustainability) が要求される。よって、過去における周辺の地盤環境の変化や自然災害の歴史を調査し、それらの未来予測が必要となる。第二に、人類の貴重な財産であるから、周辺環境を乱すことは極力避けねばならず、また地盤調査そのものが観光客の邪魔になってはいけな。要するに、環境面での制約が多い。第三に、長年にわたる地盤環境・地盤材料特性の変化により保守・保全がクリティカルな状況に至ったケースが多いので、調査の対象となる地盤物性そのもの、ましてやその変化の領域が不特定である場合が多い。

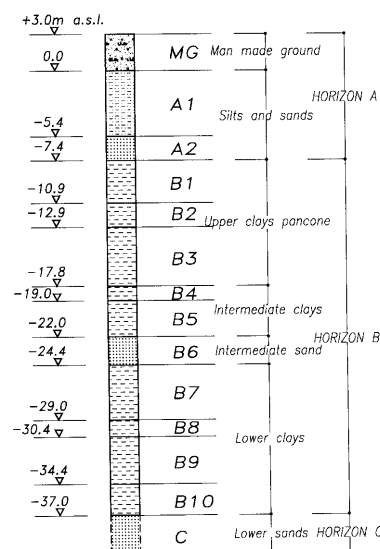
第一の要件を満たすためには、地質学、地形学等の他分野の専門家との連携が必要となろう。第二および第三の制約をクリアーする調査法として、「環境・地盤にやさしくて広領域の調査が可能な非破壊型探査」が挙げられる。この意味で、広範囲における地盤内のせん断弾性波 (S 波) 速度分布が迅速に得られる①表面波探査¹⁾、は適宜にかなった調査法の一つである。さらに、この種の間接測定による“面情報”、②PS 検層等の原位置での直接測定による“線情報”、③室内 S 波速度測定試験による“点情報”の3種類の情報を総合的に判断することにより、地盤の非一様性、せん断弾性係数の異方性、等を考慮した確度の高い地盤情報が得られるであろう。過去に、②と③を考慮した地盤調査の例はいくつかある²⁾。

本稿では、遺跡の地盤調査の新たなフレームワークとして、①、②、③の同時実施による三位一体型地盤調査を提案する。また、その端緒となる事例研究として、昨年9月にイタリアのPisa (ピサ) の斜塔 (口絵写真—20) で実施した日・伊2国間国際共同研究による地盤調査の概要を紹介する。

2. Pisa の斜塔の安定化の歴史と特異性

斜塔が“直塔”になると、観光資源としての価値が激減する。観光客が塔の天辺に登れるに十分な安全性を保証することが必要条件であり、観光客の驚嘆を促すほどに傾斜していることが十分条件であるかもしれない。この事がPisaの斜塔の安定化問題の特異性である。一方、塔の傾きの原因が基礎地盤の不等沈下にあることは、一般の方々にも広く知られている。図—1は、斜塔の基礎地盤の代表的なプロフィール³⁾である。

建設は1173年に開始され、おおよそ100年後には、現在の7階建ての塔 (高さ60 m, 基礎直径19.6 m) が完成されている。建設直後から塔は南側へ傾き始め、これまでに幾度か安定化が試みられてきたが、1993年の段階で最大傾斜角5.5°, 頂部の傾きの水平距離は4.5 mにも達し、いよいよ崩壊の危機に直面した。そこで、多分野の専門家からなるイタリア政府の専門委員会が設置され、地盤工学分野では、Jamiolkowski (ジャミオルクスキー) 教授 (トリノ工科大学), Burland (バーランド) 教授 (インペリアルカレッジ), Viggiani (ビッジ

図—1 Pisa の斜塔の基礎地盤の代表的な土性図³⁾

論文

アーニ)教授(ローマ大学)の3名が中心メンバーとなって、安定化のための技術的な検討を開始した。結果、1999年1月から約2年間の歳月をかけて、塔の北側の基礎地盤10 m以浅の砂質シルト(図-1参照)をオーガーにより掘削除去する underexcavation 工法により、塔の傾斜を約0.5°だけ北側に戻すことに成功した⁴⁾。

地盤改良の歴史は浅く、とりわけ改良効果の持続性は未知である。今回採用された underexcavation による安定化工法は、タイムマシーンのごとく、周辺環境に配慮しながら基礎の表面を約200年前の状態に回復することに見事に成功した。

現在、塔の傾斜および基礎地盤の沈下・間隙水圧のモニタリングは続行している。安定性の将来検討のためには、とりわけ基礎地盤の現状を把握し、不安定化の兆候を事前に察知することが重要である。今回の国際共同研究は、この試みの一環として実施された。

3. 調査結果

3.1 表面波探査

今回適用した手法は、二次元表面波探査法と微動アレイ探査法である。この探査により、地盤のS波速度分布を求めることができるが、前者は、アクティブに振動を励起することで、高周波の表面波を発生させることにより、浅部のS波速度分布を二次元的に精度良く求めることができる。一方、後者は長周期の自然微動を観測することにより、解析原理上、深度の深い箇所の探査が可能であり、両者を組み合わせることで地盤調査法として適用性の高い手法とすることが期待できる。

図-2, 3にそれぞれの手法で設定した測線配置を示す。なお、当該地区においては、Foti⁵⁾(フォティ)によって表面波探査が行われているが、今回は、Pisaの斜塔の周囲に可能な限り多くの測線を設けて、斜塔周囲の地盤においてS波速度分布の違いがあるのかどうかを把握することと、また常時、周囲に観光客がいる状況下での測定の可否などの実用上の問題を探ることに重点をおいた。

1週間の滞在期間中、二次元表面波探査を9測線(延べ約300 m長)、また微動アレイ探査については、いくつかのセンサー配置やサイズを変えた9アレイについて測定を実施した。実施状況を口絵写真-21に示す。

なお、測定期間中は観光客の立ち入りが制限されなかった地点においても測定を実施した。測定上の支障はなく、雑踏の環境下においても測定が可能であることが確認できた。

測定結果を口絵写真-22に示す。この図は、すべての測線から得られた結果を用いてS波速度の構造分布を三次元画像として再構成したものであり、図中に示した等深度毎に平面的なS波速度分布を示している。

今回の調査結果をまとめると、二次元表面波探査と微動アレイ探査により、深度25 m程度までの地盤のS波速度構造を求めることができることを確認した。また、イタリアの研究機関で実施された既往の表面波探査の結

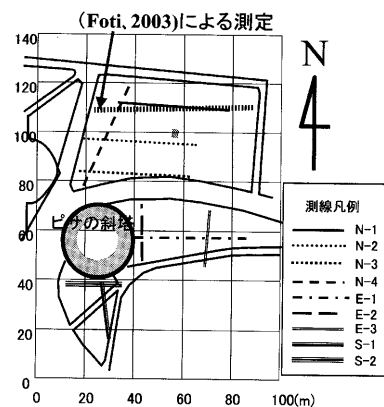


図-2 二次元表面波探査測線配置図

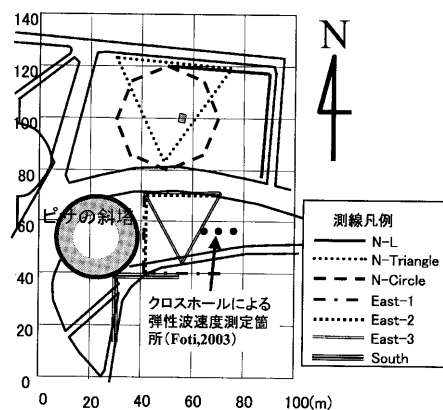


図-3 微動アレイ測線配置図

果⁵⁾およびPS検層結果(S波の直接測定による線情報)³⁾ともそれぞれ整合性があることを確認した(図-2, 3参照)。

さらに、Pisaの斜塔周囲地盤のS波速度分布測定から大変興味深いことがわかった。安定化工法の影響をうけたであろうと想定される深さ8~16 mの地盤内領域において、地盤掘削を実施した斜塔北側のS波速度の方が、手付かずの南側の地盤のS波よりも明らかに小さいことである(口絵写真-22参照)。これは、安定化に伴う接地圧の変化の予測(すなわち、北側の接地圧の増加に伴いS波は増加すること)とは全く逆の傾向である。北側の基礎地盤のS波速度の低下(すなわち、剛性の低下)の原因として、掘削に伴う地盤の乱れによる影響、間隙水圧の局部的上昇による影響、等の可能性が考えられる。この新事実は、塔の今後の動き(=傾き具合)を予測する上で貴重な情報である。今後とも、当該国際共同研究の枠組みの中で、現地での地盤計測結果、原位置/室内試験結果、等を加味して総合的に検討する予定である。

3.2 地盤調査

イタリア式と日本式のボーリング・サンプリングを3孔、電気式静的コーン貫入試験2孔、ダイラトメーター試験1孔を口絵写真-23に示す位置で実施した。

これらの地盤調査には、口絵写真-24に示す現地会社のボーリング機械を使用した。このトラックを改良した自走式の装置は、質量17 000 kg、マストの高さ約10 m、

100 kW の出力を持っており、直径40～245 mm のボーリングロッドに対応でき、ロッドの接続は自動で行われる。

ケーシングを深さ11 m 付近まで挿入し、12 m 付近以深の粘土試料を採取した（図－1 参照）。採取試料の品質および物性値を比較する目的で、イタリア（トリノ工科大学）側はイタリアで改良されたシェルピーチューブ（ITA-SHE）とオスターバーグ式サンプラー（ITA-OST）を用意し、一方日本（港空研究所）側はエクステンションロッド式サンプラー（JPN）を持ち込み、地盤工学会基準「固定ピストン式シンウォールサンプラーによる土の乱さない試料の採取方法」を準用したサンプリングを実施した。

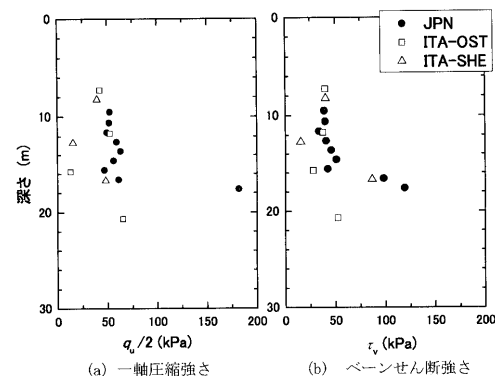
今回我が国で実施した物理試験の結果は、イタリアの結果³⁾とおおむね一致しているが、両国で w_p および w_L の測定方法がそれぞれ微妙に異なることが判明したため、現在データを詳細に検討中である。Pisa 粘土の土粒子密度 (ρ_s) は $2.7 \sim 2.8 \text{ g/cm}^3$ にあり、我が国の海成粘性土の ρ_s , 2.65 g/cm^3 程度よりも大きな値を示している⁶⁾。一方、塑性指数 (I_p) と w_L との関係は、A 線の上であり、 w_L に対して相対的に I_p が大きい。また、自然含水比 (w_n) は w_L や I_p に対して小さく、液性指数 (I_L) も小さい傾向にあった。

図－4 に深さと地盤のせん断強さの関係を示す。一軸圧縮強さ (q_u) は G.L. - 10 m から - 20 m 付近までおよそ $50 \sim 70 \text{ kN/m}^2$ を示し、深さ方向の強度増加はほとんど見られない。室内ペーンせん断強さ (τ_v) は、 $30 \sim 50 \text{ kN/m}^2$ であり、深さに対する強度分布の傾向は一軸圧縮強さと一致している。室内ペーンせん断試験から得られた鋭敏比は $2 \sim 4$ の範囲にあった。

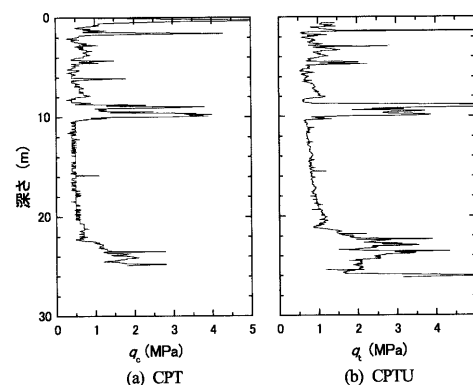
電気式静的コーン貫入試験は、イタリアでよく実施されている先端抵抗 (q_c) と周面摩擦のみを測る方法 (CPT) と先端抵抗 (q_t)、周面摩擦および間隙水圧を測定する方法 (CPTU) の両方を実施した。図－5 は、CPT から得られた q_c 値、CPTU から得られた q_t 値の比較である。 q_t 値は、G.L. - 10 m から - 20 m 付近において、深さの増加に対して増加する傾向が見られたが、 q_c 値にはその増加傾向がなかった。今後、電気式静的コーンの構造と先端抵抗値についての検討が必要である。なお、 $q_u/2$ 値を用いて求めたコーン係数 (N_{kt}) は14程度であった。

4. ま と め

表面波探査法は、調査対象地区を傷つけることなく、迅速かつ手軽に広領域の S 波速度分布を面的に把握することができる点に特徴があり、遺跡などの保守・保全のための地盤調査には有効な手法である。提案する三位一体型地盤調査法では、まず表面波探査法により大まかに被調査地区の地盤状況の全体像を明らかにし、次のステップとして、この情報をよりどころに、より詳細な地盤物性を求めるための各種原位置試験およびサンプリングの実施を立案することにより、遺跡に対して最小限の



図－4 各種サンプリング試料のせん断強さの比較



図－5 コーン貫入試験結果の比較

負荷と費用で地盤調査を行うことが可能となろう。

謝辞：トリノ工科大学の Jamiolkowski 教授，Lo Presti 博士，Foti 博士には、サイトの選定，地盤情報の提供，等で大変お世話になった。港湾研修生の椎名貴彦氏（五洋建設），村上智英氏（佐伯建設工業），白石保律氏（日本工営）には共に調査に参加していただいた。本調査は、文部科学省の科研費基盤研究(B)(2)（海外学術調査）（課題番号：15404012）の援助を受けた。

参 考 文 献

- 1) 例えば，Tokimatsu, K.: Geotechnical site characterization using surface waves, Proc. 1st Inter. Conf. on Earthquake Geotechnical Engineering (Ishihara, K. edn.), Tokyo, Vol. 3, pp. 1333～1368, 1997.
- 2) Shibuya, S. et al.: Measurement and application of quasi-elastic properties in geotechnical site characterization, Theme Lecture, Proc. 11th Asian Regional Conf. on SMGE, Seoul, Vol. 2, pp. 639～710, 2001.
- 3) Lo Presti, D. et al.: Geotechnical characterisation of the subsoil in Pisa, Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils, Balkema, Vol. 1, pp. 909～949, 2003.
- 4) Jamiolkowski, M.: The leaning tower of Pisa: end of an Odyssey, Terzaghi Oration, Proc. 15th ICSMGE, Vol. 5, pp. 2979～2996, 2001.
- 5) Foti, S.: Small-strain stiffness and damping ratio of Pisa clay from surface wave tests, Geotechnique, Vol. 53, No. 5, pp. 455～461, 2003.
- 6) 小川富美子・松本一明：港湾地域における土の工学的諸係数の相関性，港湾技術研究所報告，第17巻，第3号，p. 89, 1978.

（原稿受理 2004.1.20）