

庄内川堤防における重力探査及び表面波探査の適用事例 (A feasibility study of gravity and seismic surface wave surveys for near-surface investigations along Shonai-gawa embankment)

佐藤 円¹, 石田 章司², 駒澤 正夫³, 野崎 京三³, 相川 隆生⁴, 杉井 俊夫⁵

- 1 応用地質・中部支社技術部・satoh-madoka@oyonet.oyo.co.jp
- 2 応用地質・中部支社技術部
- 3 応用地質・技術本部
- 4 庄内川河川事務所・調査課
- 5 中部大学・工学部都市建設工学科

概 要

河川堤防の非破壊的調査手法には複数の物理探査を複合させた統合物理探査による評価手法があり、堤体や基礎地盤の土質構成や相対的に危険な箇所への抽出等に用いられている。このような統合物理探査として、今回、重力探査と表面波探査の堤防調査への適用性を検討した。重力探査は、地盤の重力を測定し、その分布から地中の密度構造（密度構造異常）を推定するものであり、従来は、地中における空洞やゆるみの把握に用いられてきた。本報文では、密度構造の分布と地盤の硬軟・縮り具合を表す S 波速度の分布から、堤体及び基礎地盤の縦断区分が可能か否か検討を試みた。庄内川中流部の堤防直下には氾濫平野や旧河道が複雑に発達しているが、両探査の結果、微地形区分と重力異常分布（ブーゲー異常分布）、ならびに S 波速度分布が調和的な傾向を示すことが確認された。

キーワード：統合物理探査，重力探査，表面波探査，重力異常分布，S 波速度

1. まえがき

河川堤防は、河川縦断方向に長い土構造物であり、古くから嵩上げや拡築が行われてきた関係で、内部構造が複雑であるという特徴を有する。河川堤防の整備は、近年、量的整備と併せて内部構造に着目した質的整備が進められている。質的整備では、河川縦断方向で安全性の概略評価を行い、安全性の低い箇所でも詳細調査や安全性の詳細評価、対策工検討を行っている。詳細調査は、被災履歴のある箇所や旧河道横断箇所など、相対的に危険な箇所から優先的に行われることが多く、このような箇所を効果的かつ効率的に抽出する技術として統合物理探査がある。統合物理探査に用いられる手法は、表面波探査と電気探査が主流であるが、その一方で重力探査を精密に行うことにより、1m オーダーの構造スケールで地下構造の検出が期待できる¹⁾。そこで、重力探査の適用性を検討するため、庄内川右岸 25k 付近の堤防において重力探査（精密重力探査）と表面波探査を行った。

2. 調査の諸元

2.1 重力探査及び表面波探査の測線配置

重力探査及び表面波探査は、治水地形分類図を参考に堤防直下に旧河道が横断している箇所を抽出し、堤内地において両探査の測定作業に支障がない箇所を選定した。このような箇所として庄内川右岸 25.0k～25.2k の区間を選定し、図 1～図 2 に示す測線配置で両探査を行った。

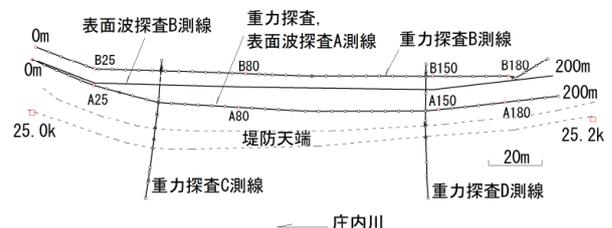


図 1 重力探査及び表面波探査測線配置平面図



図 2 堤防横断方向における重力探査及び表面波探査測線配置図

2.2 重力探査

重力探査は、堤防縦断方向の主測線 2 測線 (A,B 測線, 各 200m, 測点間隔 5m) と横断方向の副測線 2 測線 (C,D 測線, 各 50m, 測点間隔 5m~10 数 m) として行った。副測線は、堤防の地形起伏を利用して堤体の平均密度を推定するために設定した。重力測定には、Scintrex 社製の重力計 CG-5 型 2 台 (シリアル番号: #918, #1052) を用いた。

図 3 に重力計の測定原理を示し、表 1 に使用した重力計の仕様を示す。測定は、図 4 の模式図に示すようなループ測定法によって行なった。この方法は、重力測定基点 (現場基点) を出発して、測定点 1,2,3,..., i, i+1,... と重力測定を行い、再び現場基点に戻って測定を行うものである。また、重力測定と併せて測定点の位置 (水平 X,Y 座標と標高) を精度 20 mm 程度で把握するために、光波測距儀による測量 (TS 測量) を行った。

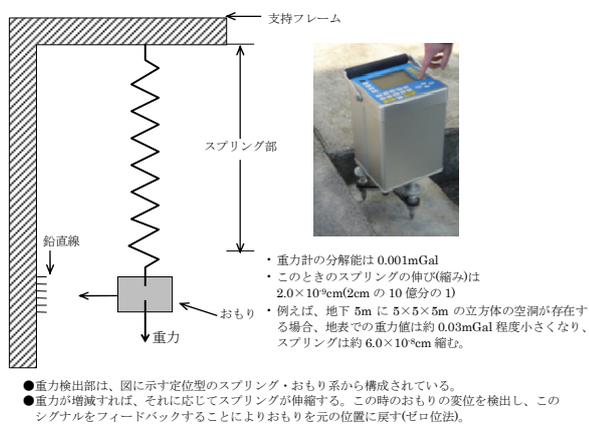


図 3 重力計の測定原理

表 1 重力計の仕様

| 名称 | 型番 | 仕様 |
|--------------|------|--|
| Scintrex 重力計 | CG-5 | 測定分解能: 0.001mGal 測定レンジ: 8000mGal 再現性: 標準偏差 0.005mGal 未満 傾斜自動補償レンジ: ±200arcsec パネ材質: 溶融クォーツ |

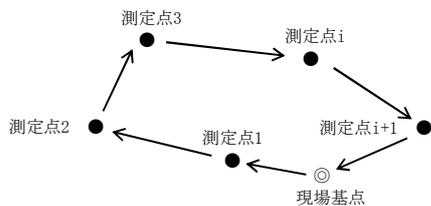


図 4 ループ測定法模式図

2.3 表面波探査

表面波探査は、重力探査と同様、堤防縦断方向の 2 測線 (A,B 測線, 各 200m) で受振点間隔を 2m として行った。

表面波探査の測定では、測線上に等間隔で受振器を多数設置し、起振によって発生した波動を多チャンネルで受振する。受振には 4.5Hz の速度型ジオフォンを 2m 間隔で設置し、1 回の起振で 24 チャンネル同時測定を行った。図 5 に表面波探査測定の概要を、図 6 に起振点-受振点配置図を示す。

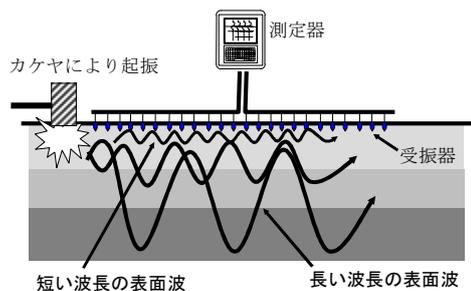


図 5 表面波探査測定の概要

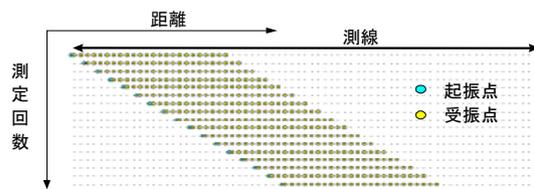


図 6 起振点-受振点配置図

3. 調査結果

3.1 表面波探査

表面波探査の解析結果である S 波速度断面を図 7 に示す。暖色系の色調が低速度、寒色系が高速度を示している。図 7 に示すように、S 波速度は、表層部の深度 0~8m 付近が下流側よりも上流側で速い傾向が認められる。一方、 $V_s=240$ m/s 程度以下の層の層厚に注目すると、測線の起点側で深度 5m、終点側で深度 8~10m 程度であり、上流側ほど低速度の層厚が厚くなる傾向が見受けられる。

特に速度変化が顕著 (コンター間隔が密) な $V_s=190$ m/s 程度以下の低速度部分は、A 測線では距離 70m より下流側に、B 測線で距離 35m より下流側に確認される。

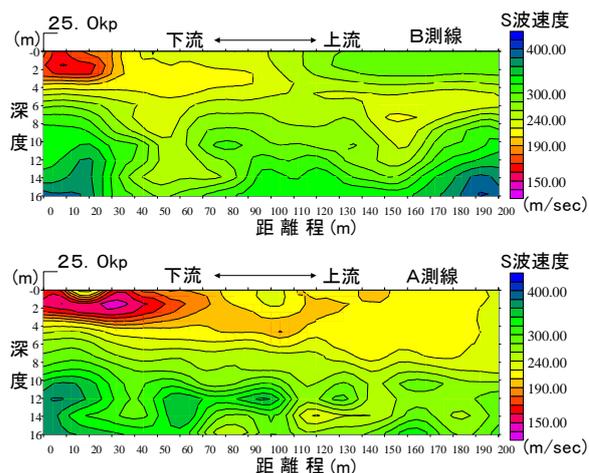


図 7 表面波探査結果

3.2 重力探査のデータ処理及び結果概要

【重力データ処理】ブーゲー異常値を算出する際の地形補正用地形データ (DEM) としては、国土地理院²⁾による「(通称) 5m-DEM」と今回実施した重力測定点の測量データをコンパイルして作成した 5m-DEM を用いた。また、重力データ処理の際には、ブーゲー異常分布の広域的傾向 (トレンド) を評価することを主目的として、調査地

周辺数 km 以内の範囲の既往重力データ 132 点（産業技術総合研究所³⁾、Nagoya University⁴⁾）も合わせて解析した。フィルター処理法としては、上方接続による方法⁵⁾を採用した。

【堤体の平均密度】地形質量の平均密度を推定する方法は、Nettleton⁶⁾、Fukao et al.⁷⁾、Komazawa⁵⁾などの方法が提案されているが、これらはいずれも重力異常分布と地形起伏との相関が最も小さくなる密度を最適の密度として推定するものである。ここでは Nettleton⁶⁾の方法を適用した結果、堤体の平均密度として 1.8 g/cm³程度の値を得た(図 8)。

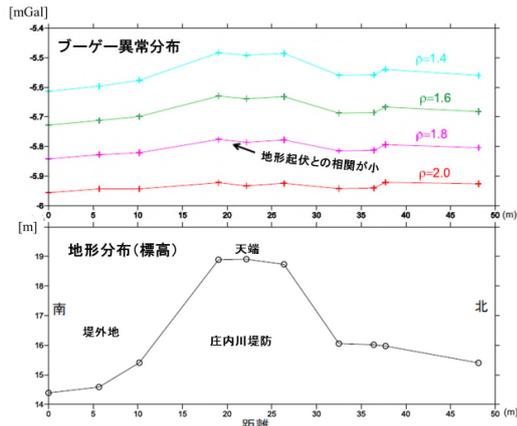


図 8 堤体平均密度の推定 (C 測線, 密度 ρ の単位: g/cm³)

【ブーゲー異常分布】図 9 に A 及び B 測線のブーゲー異常分布 (上述の最適密度: 1.8 g/cm³を使用) を示す。両測線とも、図の左 (下流側) から右 (上流側) にかけて重力値が次第に大きくなる傾向が認められ、測線下流側にお

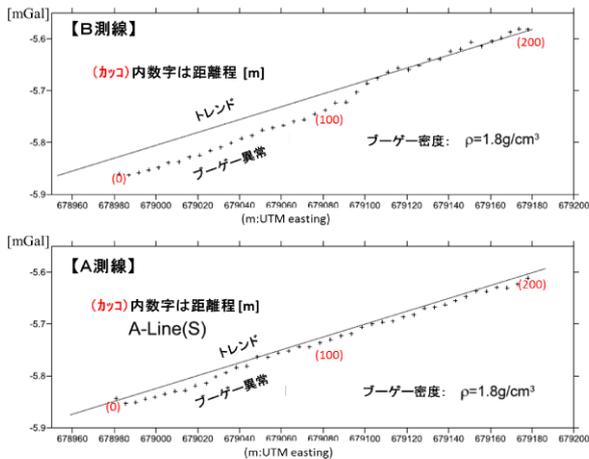


図 9 ブーゲー異常分布

いてその傾向 (トレンド) からのシフト量が 0.01 ~ 0.03mGal 程度の低重力域が認められる。今回対象とする浅部構造の検討は、深部構造を反映したこの傾向 (トレンド) からのシフト (残差重力分布) について行うことになる。

4. 考察及びまとめ

4.1 治水地形分類上の特徴

図 10 に調査箇所周辺の微地形分類図を示す。調査区間の周辺は、標高+13m~14mを有する低平な地形面を有し、

微地形区分では、旧河道と自然堤防の発達箇所にて 2 分される。調査区間については、距離程 140m~150m 付近から下流側がおおむね旧河道で、上流側は自然堤防に該当しているものと考えられる。

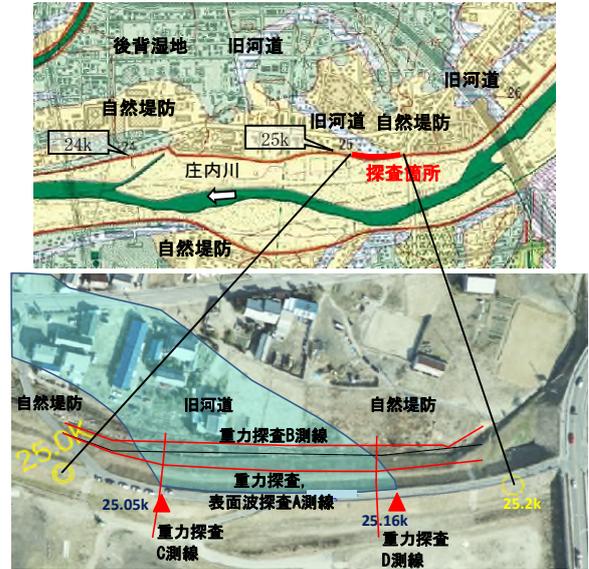


図 10 調査箇所における微地形区分図

4.2 地質分布の特徴

図 11 に庄内川右岸 25.0k~25.2k 付近の地質縦断面図を示す。調査区間に既往ボーリングデータはないが、既往調査によると、堤体は砂質土から構成され、堤体直下には沖積層砂質土が分布している。なお、調査区間の堤体直下には旧河道が横切るように発達しているため、基礎地盤表層の地質は、図 11 に示す分布と異なる可能性がある。

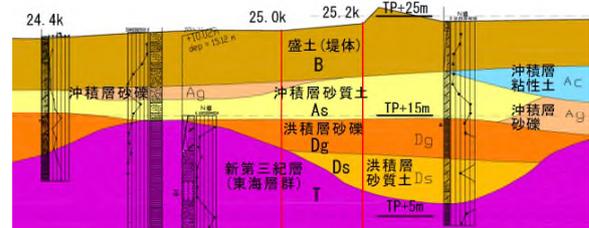
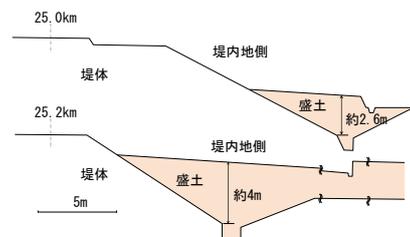


図 11 庄内川右岸 25.0k~25.2k 付近の地質縦断面図

4.3 築堤履歴及び被災履歴

調査区間における堤防の初期築堤は、既往調査によると昭和 38 年となっている。また、裏のり面から堤内地側に向かって、図 12 に示すように盛土による嵩上げが近年行



われている。腹付け盛土の厚さは、上流ほど厚くなる傾向を示す。なお、詳細な記録はないが、右岸 25.0k において明治元年に越水破堤が記録されている。

4.4 重力探査結果に対する考察

深度 20m 程度よりも浅い構造に対応すると考えられる残差重力分布コンター図を図 13 に、A 及び B 測線毎の残差重力分布を図 14 に示す。

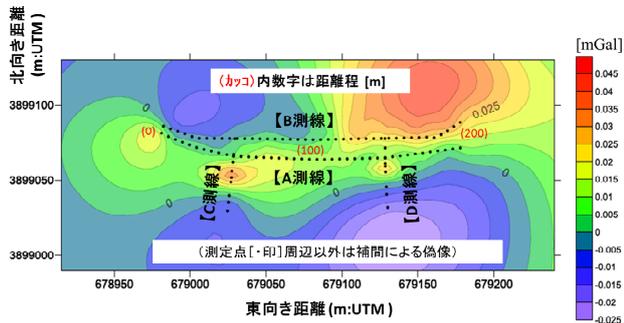


図 13 残差重力分布コンター図 (コンター間隔 0.005mGal)

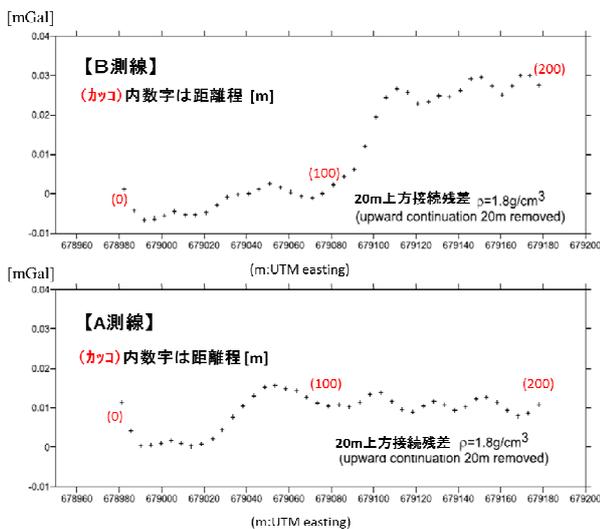


図 14 残差重力分布 (+:重力測点, 間隔: 5m)

図 14 に見られる主な特徴は次のとおりである: B 測線の距離程 10m~100m 区間に認められる低重力域は、上流側に対し約 0.03mGal の落差を持っており、旧河道の位置 (図 10 参照) とよく対応している。一方、A 測線では、距離程 0m 側では B 測線と同様の傾向が顕著であるが、距離程 100m 付近はむしろ高重力を呈している。これは、4.3 節で述べた築堤履歴を反映した堤体内の不均質な密度構造を反映している可能性がある。

4.5 重力及び表面波探査結果に対する考察とまとめ

前節で述べた重力探査結果 (図 14) と表面波探査結果 (図 15) との比較から次のことがいえる: B 測線の深度 6m 程度以浅において、距離程 130m 付近を境に上流側で高速度、下流側で低速度を示している結果は、重力探査の B 測線において、高速度が高重力、低速度が低重力という対応関係を示している。また、A 測線の深度 6m 程度以浅では、B 測線に比べて全体として低速度を呈する中で、距離程 60m~80m 付近を境に上流側で相対的な高速度域 (ほぼ一定速度)、下流側で相対的な低速度域 (速度勾配が大きい) という結果も重力探査の A 測線と調和的である。

図 15 に表面波探査結果に想定地層線及び旧河道境界を

書き加えた結果を示す (想定地層線は図 10 に示す地質縦断面図から引用)。地層境界が上流ほど下方に傾斜している原因は、上流側が下流側に比較し、地盤標高が約 4m 高いことによる。図 15 によると、 $V_s=190 \text{ m/s}$ 程度以下の低速度部分は、沖積層砂質土 (As) の分布深度以浅で確認され、その範囲は、A 及び B 測線とも治水地形分類図に示される旧河道の想定分布と調和的であるといえる。

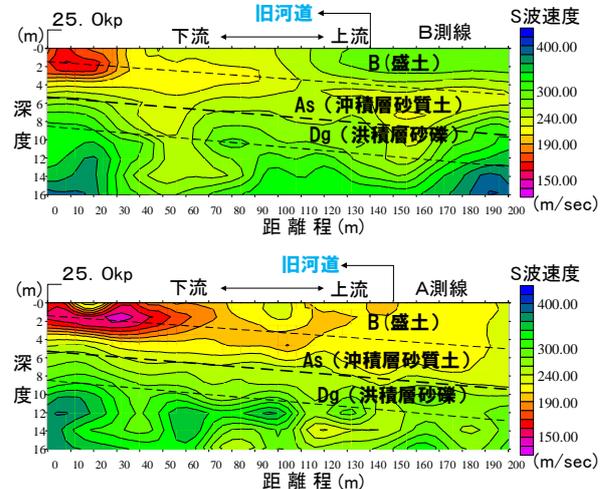


図 15 S 波速度分布と想定地層線

なお、表面波探査の結果から得られた S 波速度と N 値には $V_s = 97.0N^{0.314}$ (V_s : S 波速度, N : N 値)⁸⁾ の関係があり、N 値による土の硬軟の目安⁹⁾とあわせると、表 2 に示したようになる。

表 2 N 値と S 波速度、土の硬軟の目安

| N 値 | S 波速度(m/s) | 土の硬軟 |
|-------|------------|--------|
| 4 以下 | 150 | 非常にゆるい |
| 4~10 | 150~200 | ゆるい |
| 10 以上 | 200 以上 | ふつう |

図 15 及び表 2 により、 $V_s \leq 190 \text{ m/s}$ の範囲は、「ゆるい」または「非常にゆるい」状態であり、地盤強度も周辺に比較し低いものと推測される。

以上の結果から、重力探査の堤防周辺密度構造の検出可能性と、表面波探査の相対的に危険な箇所を効果的かつ効率的に抽出する技術としての有効性が確認された。

参考文献

- 1) 野崎京三: マイクロ重力探査の現状とその利用, 応用地質技術年報, No. 19, 1997
- 2) 国土地理院: 5m メッシュダウンロードサービス, 基盤地図情報サイト, 2016. (URL: <http://www.gsi.go.jp/kiban/index.html>)
- 3) 産業技術総合研究所: 日本重力データベース DVD 版, 2013
- 4) Nagoya University: List of Gravity Data Measured by Nagoya University, Bull. Nagoya Univ. Museum, Special Rep., No.9, 2001
- 5) Komazawa, M. (駒澤正夫): 阿蘇火山の重力解析と解釈 (英文), 測地学会誌, 第 41 巻, 第 1 号, 1995
- 6) Nettleton, L.: Determination of density for reduction of gravimeter observations, Geophysics 4, 176-183, 1939
- 7) Fukao, Y., Yamamoto, A., Nozaki, K.: A method of density determination for gravity correction, J. Phys. Earth, Vol. 29, 1981
- 8) 今井常雄, 麓秀夫, 横田耕一郎: 日本の地盤における弾性波速度と力学的性質, 第 5 回日本地震工学シンポジウムプロシーディングス, 1975
- 9) K.Terzaghi & R.B.Peck: 土質力学 (星野, 加藤, 三木, 榎並共訳), 丸善, 1967