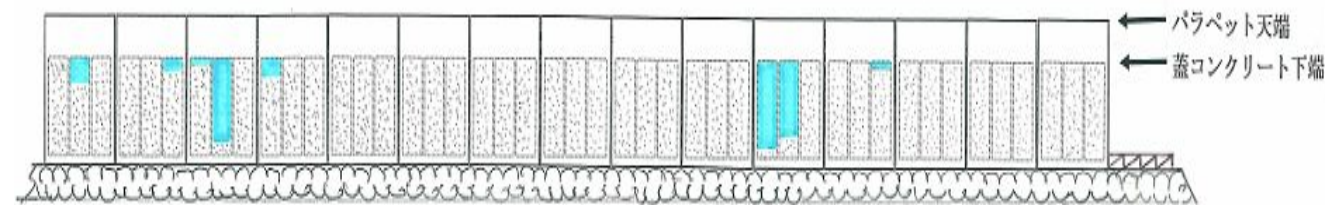
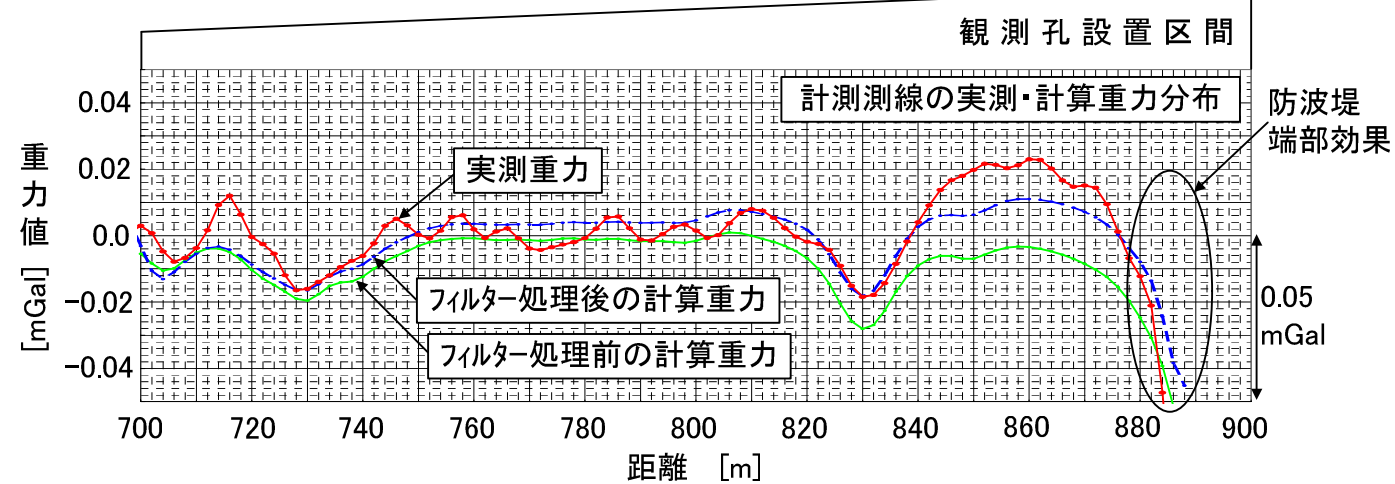
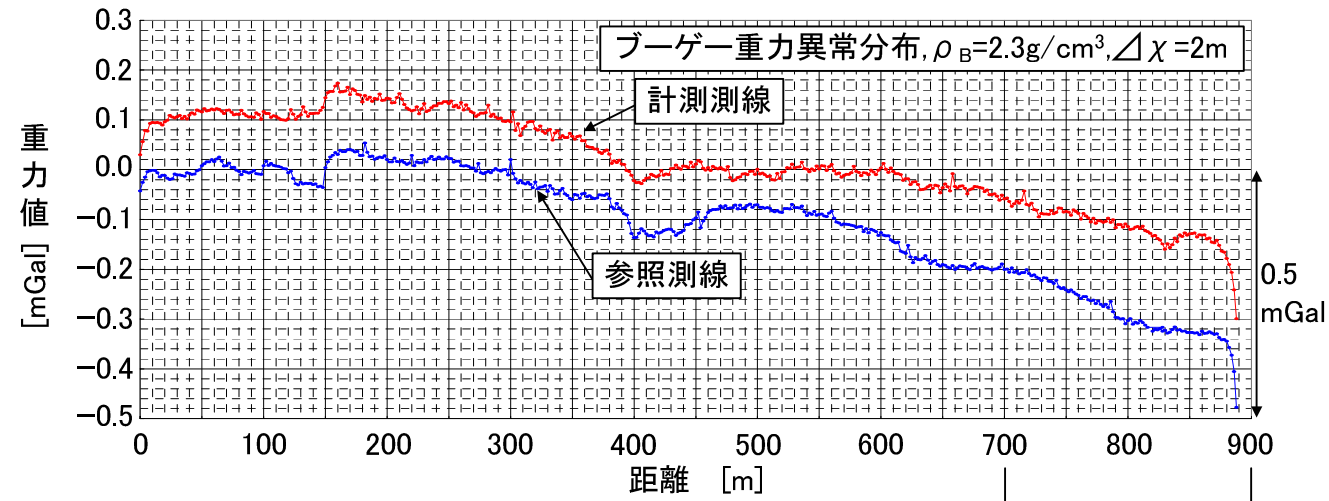


重力計を用いた防波堤の空洞探査



防波堤ケーソン隔室の空洞模式図 (水色部: 位置と大きさ)

大波による消波ブロックの衝撃などによって防波堤ケーソンの前壁が損傷を受け、中詰砂が流失してケーソン隔室に大きな空洞のある防波堤があります。その防波堤全延長890mにおいて高精度の重力計による重力探査を実施しました。

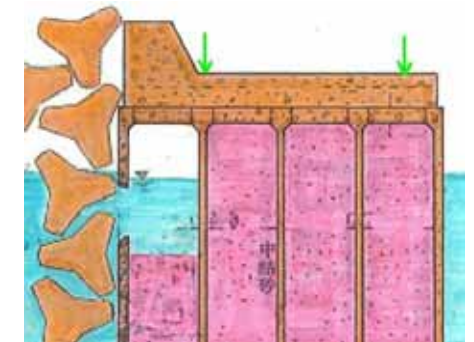
同防波堤の一部約200m間は、パラベット天端に設けられた観測孔から中詰砂上面の位置を測ることにより、ケーソン隔室の空洞の有無とその大きさを確認することができます。この区間での低重力異常値から比較的大きな空洞を見事に捉えることが出来、重力探査手法の有効性が検証されました。



防波堤上での重力測定

防波堤ケーソンの港外側隔室上と港内側隔室上に、2本の測線(計測測線と参照測線)を定め、高精度重力計2台で同時に重力を測定します。

それらの計測結果を解析することにより、空洞の有無などを推定します。



[断面図]



[平面図]



高精度重力計 シントレックスCG-3M

2006 年 8 月 2 日

防波堤空洞重力探査法

(シンクロナイズド・マイクログラビティ探査法)

応用地質株式会社

1. はじめに

「防波堤空洞重力探査法」は、消波ブロックで被覆されたケーソン式防波堤を対象として、その上部工天端より高精度重力探査（マイクログラビティ探査）を実施することにより、防波堤ケーソンの中詰め砂の流出による空洞（以下、「防波堤空洞」または単に「空洞」などと略称）の有無とその大きさを非破壊で調査することを目的とするものである。

得られる成果としては、高さが 4m～5m 程度以上の比較的大規模な空洞に対し、その空洞状況（位置や隔室数など）を推定することが可能であると判断される。

【技術的背景および特徴】

防波堤における空洞調査の特徴は、(1) 調査対象が海水/塩水で飽和された中詰め砂の流出による空洞であり、調査対象およびその周辺域の電気伝導度が非常に高いこと、(2) 上部コンクリートの厚さが、パラペット背面部で 2m～3m 程度（パラペット部では 6m 程度の場合もある）と厚いこと、(3) ケーソン内部は、コンクリート隔壁によって隔室に細分されており、中詰め砂を含む構造が規則的ではあるが複雑であることなどが挙げられる。一般には、これらの事項が制約条件となり、電気探査や地震探査、電磁波探査など物理探査による空洞調査を難しくしている。また、現場が陸と隔てられた沖合いの防波堤である場合などには、探査装置の可搬性も重要な要素になる。

重力探査は、従来、石油や金属鉱床などの資源探査において大規模な地下構造探査手法として利用されてきているが、近年になって重力計の精度と安定性が向上するにつれ、土木分野などにおける微細な地下構造を対象とした高精度重力探査（マイクログラビティ探査）が実用に供されるようになってきた [例えば、野崎(1997): マイクログラビティ探査の現状とその利用, 応用地質技術年報, No.19, pp.35-60 参照]。

- 現在の高精度重力計（SCINTREX 重力計 CG3M 型、ラコスト重力計 D 型など）の測定精度（再現性）が数マイクロガル～10 マイクロガル前後であること、
- 中詰め砂の空洞モデルから期待される低重力異常の大きさが大規模な空洞の場合 100 マイクロガル近くのものになり得ること

および、

- 重力は、如何なるものによっても遮蔽されないこと（塩水やコンクリート厚などの影響を受けにくいこと）

を考慮すれば、測定方法を工夫することにより、ケーソン中詰め砂の空洞調査手法として重力探査を実用に供し得る可能性が大いにありと考えられる。実際、これまでに実施した調査により、比較的大規模な空洞（例えば、中詰め砂の流出による空洞高さが 4m～5m 程度以上の空洞）を低重力異常として検出できることが示されている [例えば、野崎・三石・佐野(2005)]。

また、測定装置も大きさが(W)24cm×(D)31cm×(H)32cm、総重量 15kg 程度と小型軽量であるため現場作業を機動的に行なうことが可能といえる。

これらを考慮した場合、重力探査（マイクログラビティ探査）は、現場作業の安全性ならびに技術面（空洞検出可能性）・コスト面の双方から従来手法 [例えば、潜水土による目視確認や地下レーダー探査法（連続波レーダー法、パルスレーダー法など）] に比べて有利な手法であると考えられる。

2. 防波堤空洞重力探査法の概要

2-1. 重力探査の原理

重力探査は、重力計と呼ばれる非常に精密なバネ秤によって地表で重力（引力）を測定し、その分布状況から空洞等の地下構造を非破壊で推定する物理探査手法の一つである。

地表で計測された重力値は、地下構造のほか、潮位や太陽・月による時々刻々変化する引力の影響や、各測定点の高さの違いなどによっても変化する、そのため、重力探査で得られた生の重力データに、種々の重力補正を施し、同じ高さで測った重力値（重力異常値または、ブーゲー異常値）に換算する。このようにして得られた重力異常値の分布（重力異常分布）は、もし地下構造に異常がなければ、すべて同じ値を示すことになる。しかし、実際には多くの場合、何らかの地下構造異常が存在するため、得られた重力異常分布中には一般に高/低重力異常が認められることになる。すなわち、低重力異常の箇所では足元に周囲に比べて密度の低い物質（空洞等）が存在し、逆に高重力異常の箇所では足元に周囲に比べて密度の高い物質が存在することになる。

今回紹介する重力探査では、重力異常分布と地下構造とのこのような関係を探査原理として地下構造（空洞箇所等）の推定を行なう（図 1）。

2-2. 測定方法

(1) 閉環測定法

重力測定は、図 2 に示す高精度重力計（SCINTREX 重力計 CG-3M）を 2 台用いて行なう。

測定の手順は、図 3 に示す閉環測定法（ループ測定法）によって行なう。この測定方法は、まず現場に設けた重力測定基点で測定を行ない、その後順次測定点 1, 2, 3, …, i, i + 1 と測定を行い、ループの最後に再び基点にて測定を行なうものである。重力測定基点において最初と最後の 2 回測定を行なう理由は、2 回の測定値の差からループの閉塞時間内における重力計のドリフトを評価し補正するためである。

実際の調査では、ループの閉塞は原則として、午前のループ、午後のループの 2 回に分けて行う（閉塞時間は、2 時間～4 時間）。各測定点間の移動は徒歩による。また、重力測定基点としては、原則として、計測測線または参照測線の測定点の中からアクセスが便利でノイズが少ない安定したものを選定して採用する。

(2) 測線配置・測点間隔について

簡単なモデル計算によると、隔室上部の中詰め砂が流出し、3m 立方の海水で飽和された空洞による低重力異常の現われる範囲は、15m～20m 程度、および、重力異常の大きさ（振幅）は、0.01 mGal～0.02mGal 程度と考えられる（図 1 参照）。

一般に、これらの低重力異常を有意に検出するためには、重力異常の現れる範囲の中に 6 点程度以上の重力測定点を配置する必要がある、したがって、一般的な目安としての測点間隔は 2m 程度といえる。

また、計測測線下方の隔室内に空洞が生じている場合、この空洞が参照測線に及ぼす影響を十分小さく抑えるために、参照測線と計測測線とのオフセット距離は 10m 前後よりも大きくとることが望ましい。

(3) 同調重力測定法（シンクロナイズド重力測定法）

簡単なモデル計算によると、期待される重力異常の大きさは、0.01mGal～0.02 mGal 程度とかなり小さいものが想定される。そこで、検出可能性を少しでも高めるために港外側天端の「計測測線」と平行して、港内側天端に「参照測線」を設定し、2 台の重力計によって両測線の同じ距離程の 2 測点で同時測定（1 秒以内の精度で同調シグナルさせて測定）する方法（同調重力測定法または、シンクロナイズド重力測定法）を採用する。実際の調査では、このような同調重力測定を 2 台の重力計を用いて実施することを標準とする。

両測線の重力データは、各々単独で解析することのほか、とくに S/N 比が小さい場合、両者の差をとることにより、時々刻々と変化する潮位による引力や、波浪によるケーソンの動揺に起因する加速度、調査対象よりも深部の密度異常による重力の広域的傾向（トレンド成分）など、両測線に共通に効いてくる重力成分やノイズを除去するためにも利用可能である。

2-3. 主な使用機器

重力測定に使用する高精度重力計の仕様、および、重力測定点の位置測量に使用する測量機器の仕様を、それぞれ、表 1 および表 2 に示す。

(1) 高精度重力計：2 式

使用する重力計は、一般に相対重力計と呼ばれているもので、異なる 2 地点間の重力差を測定する器械である。

本調査で使用する高精度重力計（SCINTREX 重力計 CG-3M 型）の仕様を表 1 に示す。

表 1 SCINTREX 重力計 CG-3M 型の仕様

名称	型番	仕様
Scintrex 重力計	CG-3M	製作会社：カナダ SCINTREX 社 測定分解能：0.001mGal 測定レンジ：7000mGal 再現性：標準偏差 0.01mGal 未満 傾斜自動補償レンジ：±200arcsec パネ材質：溶融クォーツ 電源：12VDC（バッテリー内蔵） 寸法：(W)240mm × (D)310mm × (H)320mm 重量：11.4 kg データ出力：RS-232C

(2) 測量機器（トータルステーション、オートレベルなど）：1 式

重力測定点の位置（特に、高さ）は、トータルステーションやオートレベルなどによって測量を実施して決定する。表 2 に、測量機器の仕様例を示す。

表 2 測量機器の仕様例（オートレベル）

名称	型番	仕様
ソキヤ 自動レベル	B2C	コンペンセータの機能範囲：6 以上 観測による較差：0.5mm 以内 備考：国土交通省公共測量作業規定による 3 級レベルに適合。

2-4. 解析方法

図 4 に重力データ処理と解析における一般的な流れを示す。

本調査手法の解析手順は、以下の 3 つのステップに大別される。特に、ケーソン中詰砂の空洞状況調査の流れを図 5 に示す。

(1) 重力値の計算

現場で得られた測定データから各重力点での重力値を計算する。

(2) 重力異常値の計算

得られた重力値に種々の補正を施し重力異常値（ブーゲー異常値）を求める。

これらの測定点毎のオリジナル重力異常値には、深部の地下構造等による影響と考えられる波長の非常に長いトレンド成分が含まれている。そこで、このトレンド成分を回帰直線で近似し、これをオリジナル重力異常値から差し引くことにより、残差重力異常値を求める。

(3) 重力解析 (図 5 参照)

1) フィルター処理

得られた残差重力異常分布にフィルター処理などのデータ処理を施すことで、

- ・トレンド成分 (対象とするケーソンよりも深い地下構造等に起因する成分)
- ・シグナル成分 (対象とするケーソン構造に対応する成分)
- ・ノイズ成分 (測定誤差や地表付近の不均質な構造等に起因する成分)

などの各成分に分離する。

場合より、中詰め砂の分布深度に対応する成分をシグナル成分から抽出するために、シグナル成分を更に、長波長成分 (海底地形の影響等を反映する成分) と短波長成分 (調査対象に対応する成分) とに分け、中詰め砂の流出による空洞状況の把握は、主に短波長成分重力分布を用いて行なうことも調査目的を達成するために有効である。

解析の際には、フィルター処理のほか、計測測線と参照測線の両者の重力異常分布の差をとるなどによって、空洞箇所の検出能力を高める。

差をとることの利点は、潮位の時間変化や波浪等によるケーソン全体の動揺などの影響 (ノイズ) を除去することにある。

2) モデル計算

モデル計算によって、フィルター処理の結果得られたシグナル成分重力分布 (特に短波長成分重力分布) を説明するためのモデル構造を推定する。

このモデル計算結果を用いて、中詰め砂の流出によって隔壁に空洞が生じているケーソンの箇所と空洞の規模を評価する。

3. まとめ

本節では、以上に述べた「防波堤空洞重力探査法 (シンクロナイズド・マイクログラビティ探査法)」の概要をまとめておく：

【目的】

本技術は、消波ブロックを有するケーソン式防波堤において、その上部工天端より重力探査を実施することにより、ケーソン中詰め砂の空洞状況を非破壊で調査することを目的とするものである。

【調査の標準仕様】

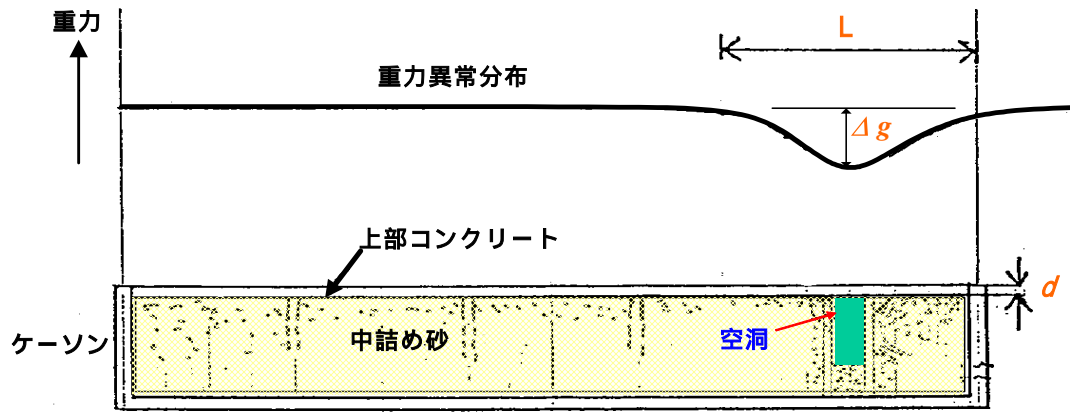
- 測線配置：防波堤の上部工天端に「計測測線」と「参照測線」との 2 測線を配置することを標準とする。
- 測点間隔：2 m ピッチを標準とする。
- 測定方法：「計測測線」と「参照測線」との 2 測線において 2 台の高精度重力計 (SCINTREX 重力計 CG-3M) を同調させてマイクロガル測定を実施することを標準とする。各測定点の位置は、測量によって決定する。
- 解析方法：調査から直接的に得られるデータは、「計測測線」と「参照測線」における重力異常分布である。この重力異常分布にフィルター処理を施すことにより、調査対象の影響を反映すると考えられる重力成分 (シグナル成分重力分布) を抽出する。このシグナル成分重力分布と別途実施するモデル計算結果とを比較検討すること等により、中詰め砂の空洞状況を推定する。

【成果】

中詰め砂の流出による空洞高さが 4m ~ 5m 程度以上の比較的大規模な空洞に対し、その空洞状況 (位置や隔壁数など) を推定することが可能である。

参考文献：

- 野崎京三(1997)：マイクログラビティ探査の現状とその利用，応用地質技術年報, No. 19, 35-60.
 野崎京三・三石 晋・佐野正佳(2005)：防波堤空洞調査法としてのシンクロナイズド・マイクログラビティ探査の適用 特に関測孔データによるキャリブレーション結果，応用地質技術年報, No. 25, 21-33.



L : 重力異常の範囲 15 m ~ 20 m程度
g : 重力異常の大きさ 0.01 mGal ~ 0.02 mGal程度

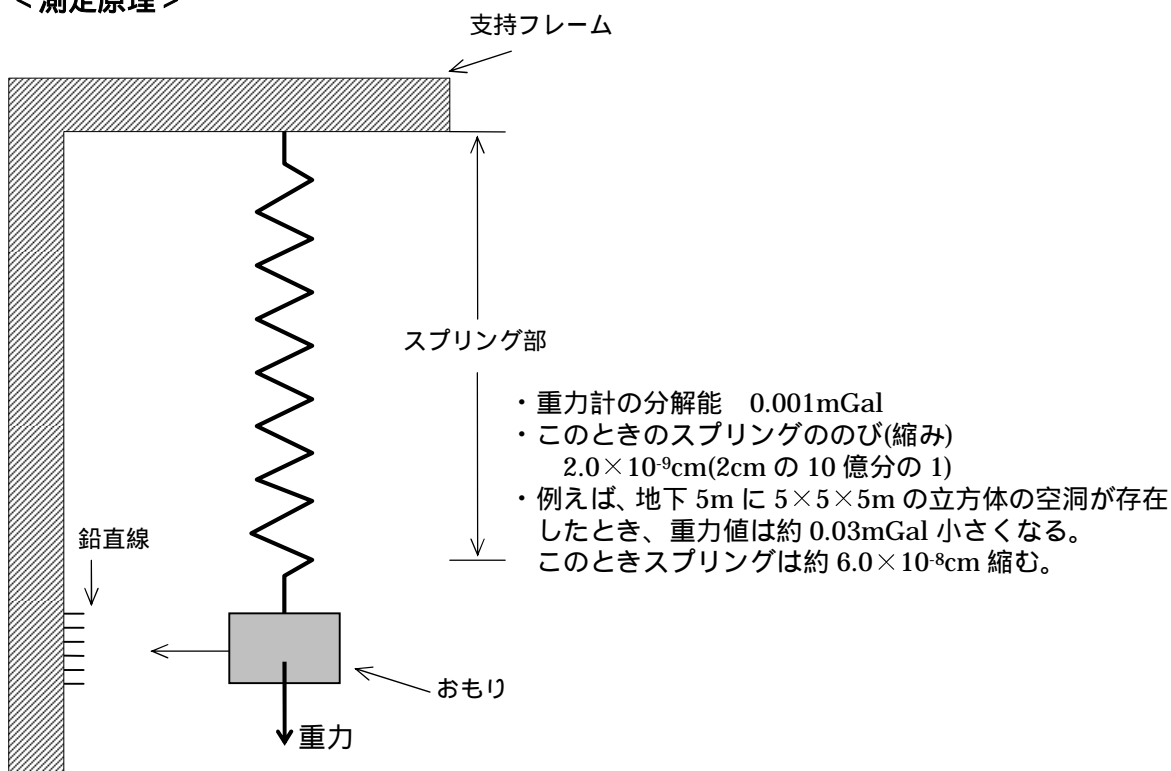
上記の重力異常を有意に検出するために、測定間隔は、
上部コンクリート厚 d と同程度にとる必要がある。
(標準的な測定点間隔 = 2 m前後)

図1 期待される重力異常の概要

< SCINTREX 重力計 CG - 3M 型の外観 >



< 測定原理 >



重力検出部は、図に示す定位型のスプリング・おもり系から構成されている。重力が増減すれば、それに応じてスプリングが伸縮する。この時のおもりの変位を検出し、このシグナルをフィードバックすることによりおもりを元の位置に戻す(ゼロ位法)。

図2 重力計の外観および測定原理

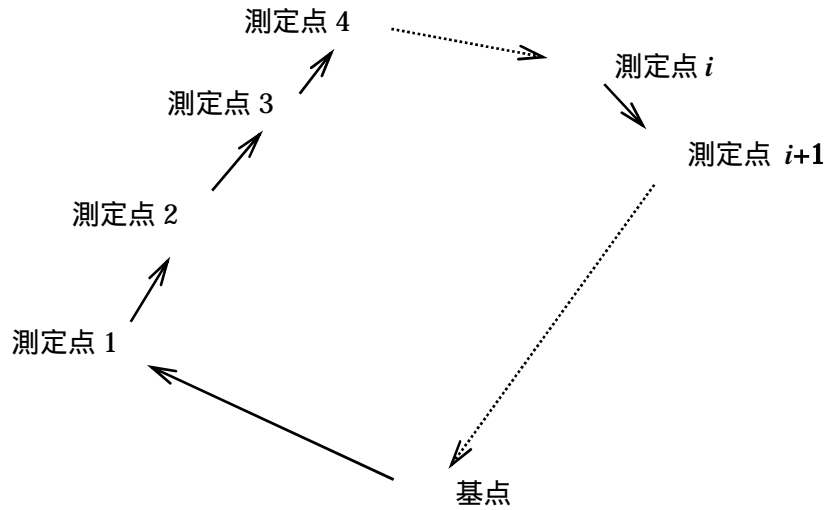


図 3 閉環測定法（ループ測定法）

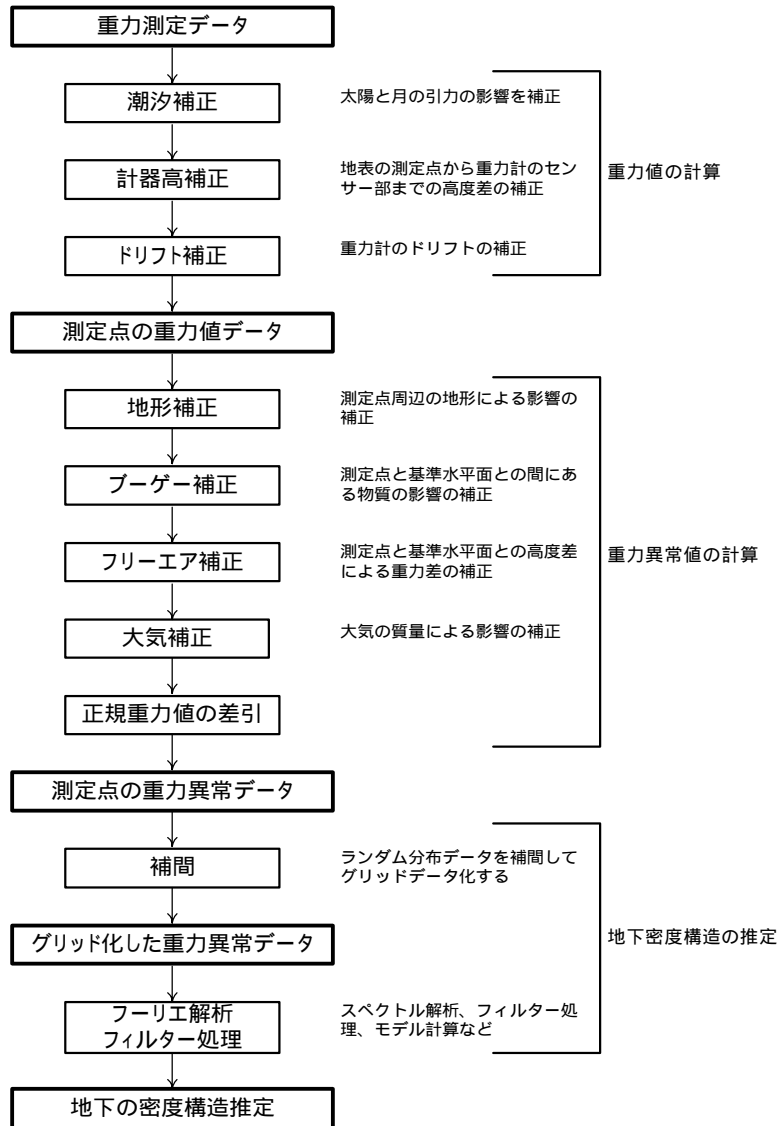


図 4 重力データ処理と解析の流れ

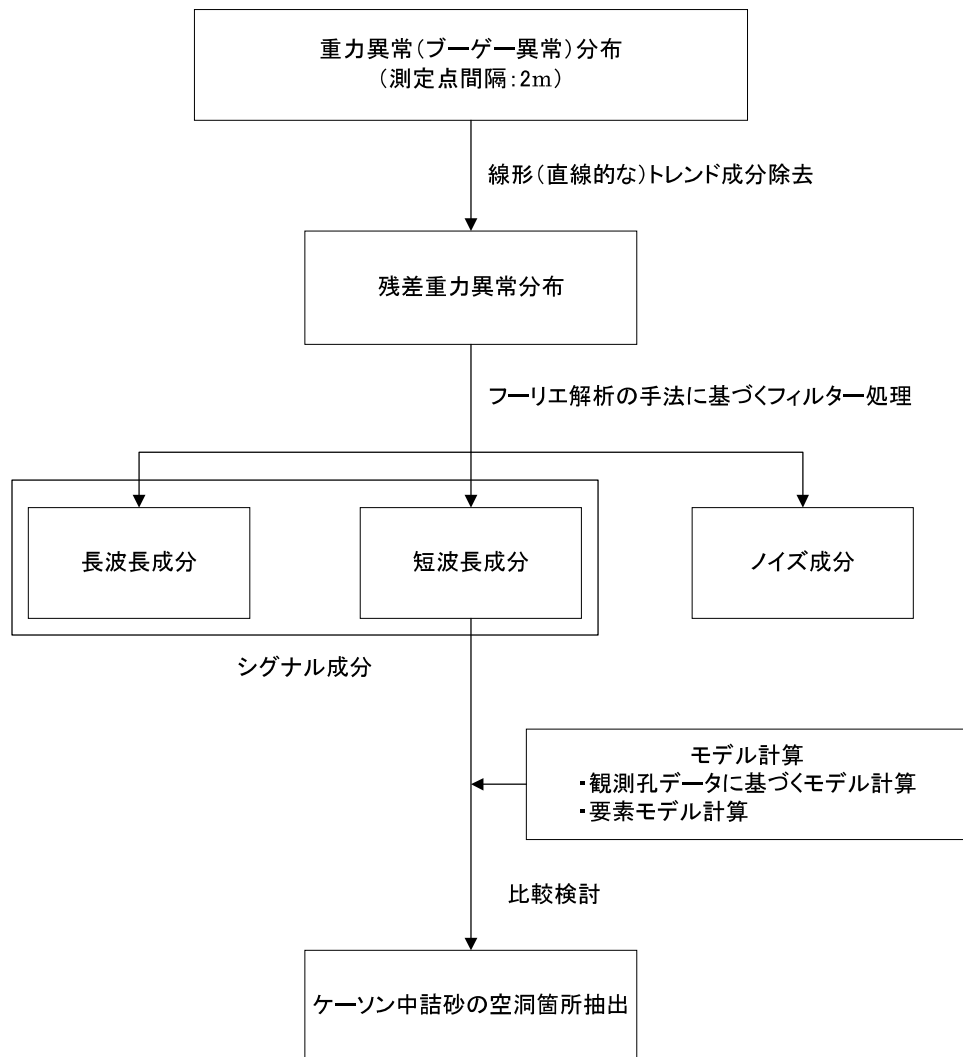


図 5 ケーソン中詰砂の空洞状況調査の流れ図

防波堤空洞調査法としてのシンクロナイズド・マイクログラビティ探査の適用 —特に観測孔データによるキャリブレーション結果—

野崎 京三¹⁾・三石 晋¹⁾・佐野 正佳²⁾

1) 応用地質(株),

2) 国土交通省四国地方整備局高知港湾・空港整備事務所

Detection of cavities within breakwaters

using a method of the synchronized microgravity survey

Kyozo Nozaki¹⁾, Susumu Mitsuishi¹⁾ and Masayoshi Sano²⁾

1) OYO Corporation

2) Shikoku Regional Development Bureau, MLIT

Abstract

A microgravity survey along a breakwater of the box caisson type for detecting the cavities within chambers of the breakwater has been carried out off-shore Kochi, Shikoku, Japan. The purpose of the survey is to detect the cavities with relatively larger scale that might reduce the stability of the breakwater. In the survey, we adopted a method of the synchronized microgravimetry. We employed two profile lines: one is the measurement line and the other is the reference line. The gravity stations are settled at every 2 m interval for each profile line. Gravity measurements were performed by using a couple of SCINTREX CG-3M gravimeters, the sampling rates being synchronized within one second. The results of the survey were critically evaluated over a 200 m calibration interval where the top of filled-in sands for each chamber of the box caisson can be monitored. The results show that gravity lows corresponding to the locations of relatively larger cavities with heights of more than about 4 m are detectable by microgravity anomalies with the amplitudes of 0.01mGal to 0.05mGal over the intervals of 20m to 40m.

Keywords: breakwater of the box caisson type, cavity, non-destructive survey, microgravity survey, synchronized microgravimetry

(要 旨)

ケーソン式防波堤のメンテナンス調査の一環として、防波堤ケーソンの中詰め砂流出による空洞（防波堤空洞と略称）の有無とその大きさを非破壊で調査することを目的とする重力探査を高知港において実施した。この際、新たに提案したシンクロナイズド・マイクログラビティ探査（時間同期高精度重力探査）の手法を採用した。計測測線と参照測線との2測線を、それぞれ、空洞が生じている可能性のある港外側隔室の天端上と港内側隔室の天端上とに設定した。測定点間隔は各測線とも2 mとした。重力測定は、2台のSCINTREX重力計CG-3Mを用い、計測測線と参照測線とで約1秒以内の精度で同期させて行なった。ケーソン隔室内の中詰め砂上面深度をモニターするための観測孔が設置されている区間でのキャリブレーションの結果、空洞高さが4 m程度以上の比較的大規模な防波堤空洞に対応した重力異常が、20 m～40 mの範囲に、大きさ0.01 mGal～0.05 mGal程度の低重力異常として検出され、シンクロナイズド・マイクログラビティ探査の防波堤空洞調査への適用性が実証的に示された。

キーワード：ケーソン式防波堤・空洞・非破壊調査・マイクログラビティ探査・シンクロナイズド重力測定

1. はじめに

消波ブロック（テトラポッドなど）で被覆されたケーソン式防波堤は、通常、ケーソン内部の隔室が海水で飽和された中詰め砂で満たされており、その重量によって安定性が保たれている。しかし、台風時の波浪の影響などによってテトラポッドのアームがケーソンのコンクリート側壁を損傷し、隔室内の中詰め砂が流出することによって部分的に海水で満たされた空洞（ここでは「防波堤空洞」と呼ぶ）が生じ、防波堤の安定性を低下させる場合がある（図-1参照）。

今回、ケーソン式防波堤のメンテナンス調査の一環として、このような防波堤空洞の状況を非破壊で調査することを目的とした重力探査（シンクロナイズド・マイクログラビティ探査/時間同期高精度重力探査）を高知港防波堤において実施した。対象とする空洞としては、防波堤の安定性を低下させる可能性のある比較的大規模な空洞とした。本稿では、少なくとも国内で初めての例として実施したシンクロナイズド・マイクログラビティ探査の結果と有効性について報告する。

なお、ここでいう「シンクロナイズド・マイクログラビティ探査 (synchronized microgravity survey)」とは、デジタル・サンプリングが可能な重力計（例えば、SCINTREX重力計CG-3M/CG-5やLaCoste & Romberg重力計グラビトンEGなど）を複数台用い、これらの特性を生かして空間的に異なる地点で時間的に同期させて重力測定を行なうことにより、地盤全体の動揺や海岸付近での海洋潮汐の影響などといった広い意味での（=時間的・空間的に）coherentな加速度成分を評価し、目的とする地下構造に由来する重力成分をフィルター処理により抽出するための高精度重力探査を意味する（例えば、野崎 1997, 1999 を参照）。したがって、シンクロナイズド・マイクログラビティ探査を和訳すれば、「時間同期高精度重力探査」とでもいうことになる。

2. 技術的背景

2.1 調査を困難にする要素

防波堤における空洞調査の特徴としては、以下のような項目が挙げられる：

- (1) 調査対象が海水/塩水で飽和された中詰め砂の流出による空洞であり、調査対象とその周辺域の電気伝導度が非常に高いこと。
- (2) 上部コンクリートの厚さが、パラベットの背面部で2m~3m程度（パラベット部では6m程度の場合もある）と厚いこと。
- (3) ケーソン内部は、コンクリート隔壁によって（水平断面が例えば4m四方程度の隔室）細分されており、中詰め砂を含む構造が規則的ではあるが複雑であること。

- (4) 波浪の影響などにより、防波堤全体が振動または動揺していること。

ケーソン式防波堤におけるこの種の空洞調査手法として、例えば、地下レーダー探査手法による試みがなされているが（例えば、佐藤, 2005）、一般には、上述した事項が探査上の制約となり、電気探査や地震探査、電磁波探査など物理探査による防波堤空洞調査を難しくしている。また、現場が陸と隔てられた沖合いの防波堤である場合などには、探査装置の可搬性も重要な要素になる。

なお、物理探査手法による空洞調査全般については、例えば、高屋・他（2005）を参照されたい。

2.2 重力探査の特徴・適用の可能性

—現在の高精度重力計（SCINTREX重力計CG-3M型、ラコスト重力計D型など）の測定精度（再現性）が0.005 mGal-0.01 mGal (1 mGal = 10^{-5}ms^{-2}) 前後であること、

—防波堤空洞の標準的モデルから期待される低重力異常の大きさが大規模な空洞の場合0.1 mGal近くのものになり得ること、

および、

—重力は、如何なるものによっても遮蔽されないこと（塩水や上部コンクリートなどの影響を受けにくいこと）

を考慮すれば、測定方法を工夫することにより、防波堤空洞の調査手法として重力探査を実用に供し得る可能性が大いにあると考える。とくに、後述するように、計測・参照の2本の測線を設けてシンクロナイズド・マイクログラビティ探査を適用することにより、

- (1) 波浪などによる防波堤全体の動揺の影響を重力測定値から除去できる可能性を有すること、

ならびに、

- (2) 目的とする重力成分を抽出するための最適フィルター特性の選定を1測線の場合に比べてはるかに容易に行なえること

は調査結果の信頼性を高める上で注目し得る。また、測定装置も小型軽量（SCINTREX重力計の場合、サイズがW)24 cm×(D)31 cm×(H)32 cm、総重量が15kg程度）であるため現場作業を機動的に行なうことが可能といえる。

3. 重力測定の概要

図-1に、今回調査を行なった高知港防波堤におけるシンクロナイズド・マイクログラビティ探査の測線配置を模式的に示す。高知港における防波堤の場合、総延長890 mに沿って、防波堤天端に計測測線・参照測線の2測線を設定した。

重力測定の精度は、0.01 mGalよりも良いことを目標とした。これは、図-3に模式的に示した単純な空洞モデルによる重力異常は、目安として海水で飽和された3m

立方の空洞の場合、低重力異常の範囲は15 m~20 m程度、重力異常の大きさ（振幅）は0.01 mGal~0.02 mGal程度と推定されることによる。

重力測定は、2台のSCINTREX重力計CG-3Mを用い、計測測線と参照測線とで同じ距離程の2測定点で1秒以内の精度で同期させてシンクロナイズド重力測定を行なった。

3.1 測線オフセット距離・測点間隔

計測測線は、空洞が生じている可能性のある港外侧隔室の上方に、参照測線は、通常は損傷を受けていない港内側隔室の上方に設定した。参照測線と計測測線とのオフセット距離は10 m前後よりも大きくとることが望ましい。これは、港外侧隔室に仮に深さ15 m程度（断面：4 m×4 m）の空洞が生じていたとしても、参照測線にはその影響が高々、重力測定精度の限界に近い0.005 mGal

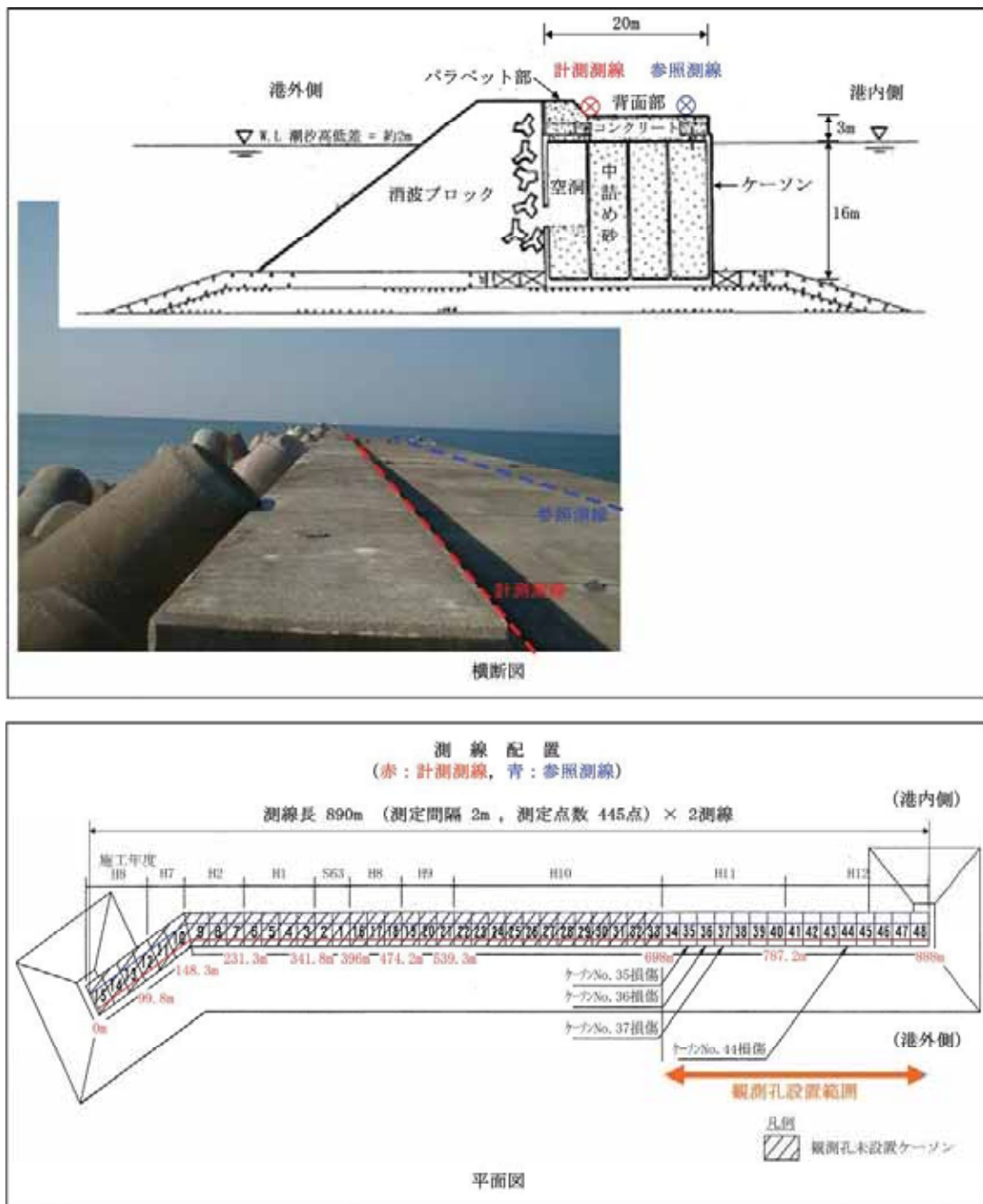


図-1 防波堤空洞調査（シンクロナイズド・マイクログラビティ探査）の測線配置
Fig. 1 Layout of the profile lines.

程度であるというモデル計算の結果による。計測測線下方の隔室内に空洞が生じている場合、この空洞が参照測線上の重力異常に及ぼす影響を十分小さく抑えるために、ここでは両測線のオフセット距離を10 m～15 mとした。

また、測定点間隔は、各測線とも2 mとした。これは、測線を設定した防波堤背面部の上部コンクリート厚が3 mであることによる。一般に、重力異常の現れる範囲(以下、重力異常の範囲と表現する)は、地下構造異常の深度(土被り厚さ)の5倍～6倍程度である。これらの低重力異常を有意に検出するためには、重力異常の範囲の中に5・6点程度以上の重力測定点を配置する必要がある。したがって、一般的な目安としての測定点間隔は、地下構造異常の深度(土被り厚さ)と同程度かこれ以下にとる必要がある。

3. 2 重力測定

重力測定は、図3に示す高精度重力計(SCINTREX重力計CG-3M)4台を用いて行なった。

測定の手順は、図4に示す閉環測定法(ループ測定法)によって行なった。この測定方法は、まず現場に設けた重力測定基点で測定を行ない、その後順次測定点1, 2, 3, …, i , $i+1$ と測定を行い、ループの最後に再び基点にて測定を行なうものである。重力測定基点において最初と最後の2回測定を行なう理由は、2回の測定値の差からループの閉塞時間内における重力計のドリフトを評価し補正するためである。

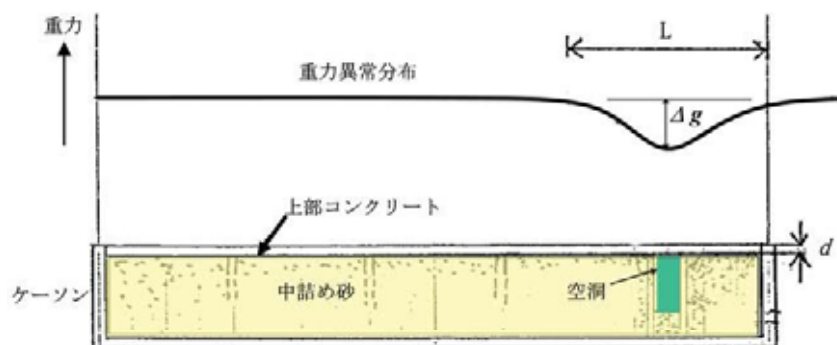
前述したように、単純なモデル計算によると、期待される重力異常の大きさは、0.01 mGal～0.02 mGal程度とかなり小さなものまで想定する必要がある。そこで、検

出可能性を少しでも高めるために港外側の「計測測線」と平行して、港内側に「参照測線」を設定し、2台の重力計によって両測線の同じ距離程の2測点で同時測定(1秒以内の精度で同調シンクロナイズさせて測定)する方法(同調重力測定法またはシンクロナイズド重力測定法)を採用した。今回の調査では、常時4台の重力計を用い、このようなシンクロナイズド重力測定を2班構成で実施した。

両測線の重力データは、各々単独で解析することのほか、参照測線の重力異常分布中に有意な変化が認められない場合には、両者の差をとることにより、時々刻々と変化する潮位による引力や、波浪によるケーソンの動揺に起因する加速度、調査対象よりも深部の密度異常による重力の広域的傾向(トレンド成分)など、両測線に共通に効いてくる重力成分やノイズを除去するために利用可能である。

3. 3 測量

重力値計算に必要な地盤高さの測定点測量は、トータルステーションおよびオートレベルによって測量を実施して決定した。高さの精度は、mmの単位まで計測した。



L : 重力異常の範囲 15 m～20 m程度
 Δg : 重力異常の大きさ 0.01 mGal～0.02 mGal程度

上記の重力異常を有意に検出するために、測定間隔は、上部コンクリート厚 d と同程度にとる必要がある。(標準的な測定点間隔=2 m前後)

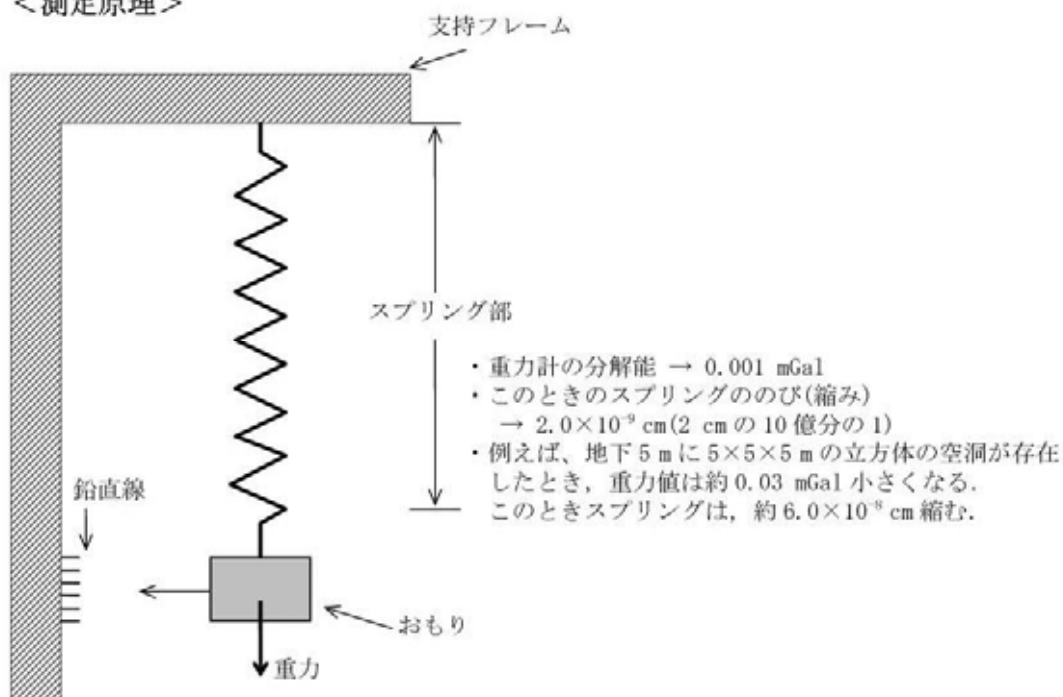
図-2 期待される重力異常の概要

Fig. 2 Explanatory figure of the gravity anomaly distribution caused by a cavity.

<SCINTREX 重力計 CG-3M 型の外観・仕様>



<測定原理>



- 重力検出部は、図に示す定位型のスプリング・おもり系から構成されている。
- 重力が増減すれば、それに応じてスプリングが伸縮する。この時のおもりの変位を検出し、この信号をフィードバックすることによりおもりを元の位置に戻す(ゼロ位法)。

図-3 重力計の外観・仕様および測定原理

Fig. 3 A view of the SCINTREX CG-3M gravimeter, its specifications and the gravity responsive system.

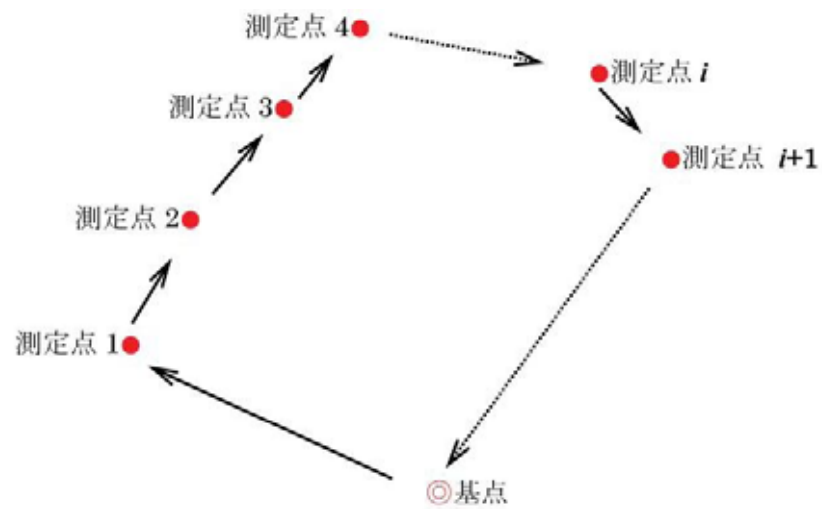


図-4 閉環測定法（ループ測定法）

Fig. 4 Schematic illustration of the gravity measurements (loop method).

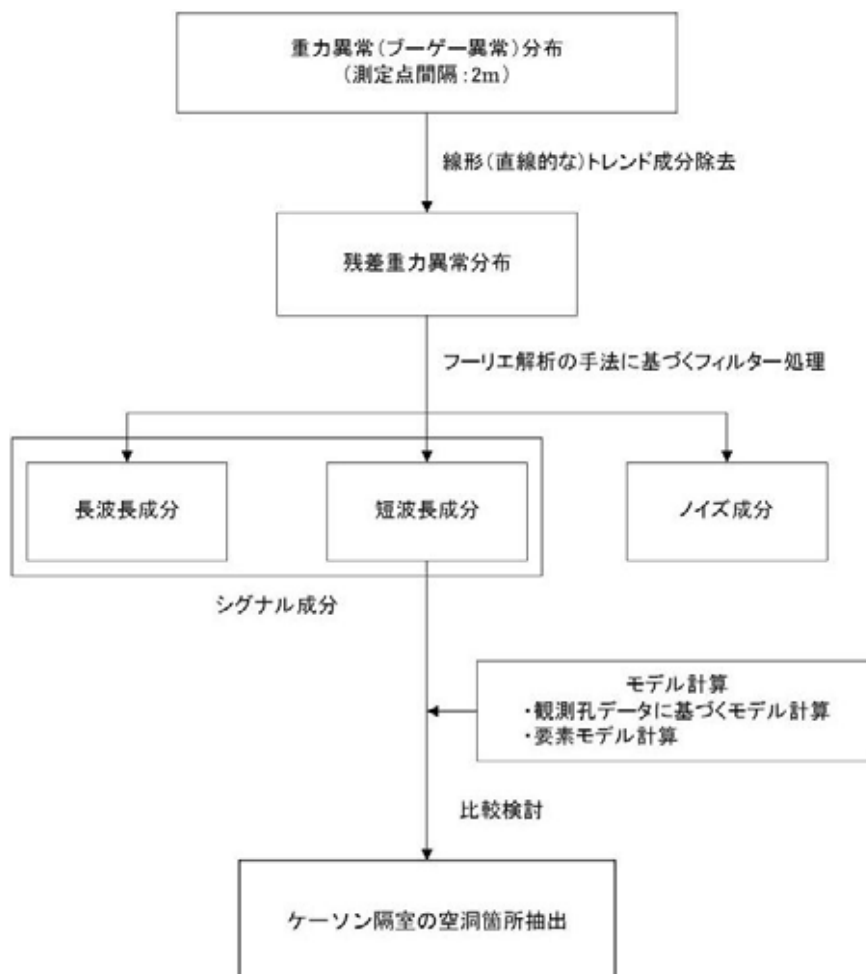


図-5 ケーソン隔室の空洞状況調査の流れ図

Fig. 5 Flow diagram of the data processing.

4. データ処理の概要

ケーソン隔室の空洞調査の流れ図を図-5に示す。

4. 1 重力補正

現場で得られた測定データから各重力点での重力値を計算する。得られた重力値に種々の補正を施し重力異常値（ブーゲー異常値）を求める。これら測定点毎のオリジナル重力異常値には、目的とする重力成分以外に、深部の地下構造等による影響を反映した波長の非常に長いトレンド成分も含まれている。そこで、このトレンド成分を回帰直線で近似し、これをオリジナル重力異常値から差し引くことにより、残差重力異常値を求める。

データ処理の出発点となる重力異常値（ブーゲー異常値）の計算の際、仮定密度をコンクリートの平均的な密度値 2300 kg/m^3 としてブーゲー補正を施した。地形補正は、施していない。これは、防波堤の外形横断面が縦断方向にほぼ等しい2次元構造をしているため、防波堤質量の各重力測定値への影響がほぼ一様と考えられること、および、横断面の変化の影響は、その大部分が後述するフィルター処理によって除去可能であると判断したことによる。

4. 2 フィルター処理

得られた残差重力異常分布にフィルター処理などのデータ処理を施すことにより、

- ・トレンド成分（主に、対象とするケーソンよりも深い地下構造等に起因する成分）
- ・シグナル成分（主に、対象とするケーソン構造に対応する成分）
- ・ノイズ成分（測定誤差や地表付近の不均質な構造等に起因する成分）

などの各成分に分離する。

場合により、シグナル成分を更に、長波長成分（近傍の海底地形の影響等を反映する成分）と短波長成分（調査対象である防波堤空洞に対応する成分）とに分け、中詰め砂の流出による空洞状況の把握は、主に短波長成分重力分布を用いて行なうことも調査目的を達成するために有効である。フィルター処理の理論的詳細については加藤（1987）を、その具体的適用方法については、例えば野崎・加藤（1988）を参照されたい。

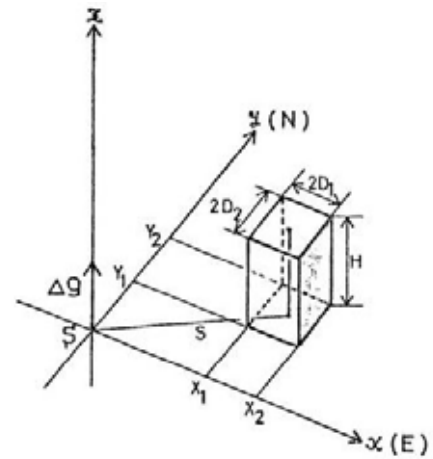
解析の際には、上述したフィルター処理のほか、計測測線と参照測線の両者の重力異常分布の差をとることによって、空洞箇所の検出能力を高めることができる場合がある。差をとることの利点は、潮位の時間変化や波浪等によるケーソン全体の動揺などの影響（ノイズ）を除去することにある。

4. 3 モデル計算

モデル計算によって、フィルター処理の結果得られたシグナル成分重力分布（特に短波長成分重力分布）を説明するためのモデル構造を推定する。このモデル計算結果を用いて、中詰め砂の流出によって隔室に空洞が生じているケーソンの箇所と空洞の規模を評価する。

今回のモデル計算では、各ケーソンの1個の隔室内に生じている空洞を1個の四角柱で近似し、四角柱による重力の解析解（例えば、野崎、1981）を用いた（下図参照）。具体的な計算式は、同図の(1)式および(2)式である。1個の空洞モデルの水平断面の辺長は、同図において $2D_1$ と $2D_2$ とで与えられる。また、その重力は、上面と下面の高さ（H）を有する2個の四角柱による重力の差から計算される。

空洞モデル全体による重力は、このような四角柱の集合として計算される。



四角柱モデルによる重力 (Δg_a)

$$\Delta g_a = f(x_2, y_2, H) - f(x_1, y_2, H) - f(x_2, y_1, H) + f(x_1, y_1, H), \quad (1)$$

ここに、

$$\begin{aligned} f(x, y, h) = & G\rho \left[x \cdot \log \left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2} + y}{\sqrt{x^2 + y^2 + h^2} + y} \cdot \frac{\sqrt{x^2 + h^2}}{x} \right) \right. \\ & + y \cdot \log \left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2} + x}{\sqrt{x^2 + y^2 + h^2} + x} \cdot \frac{\sqrt{y^2 + h^2}}{y} \right) \\ & \left. - h \cdot \text{Tan}^{-1} \frac{h \cdot \sqrt{x^2 + y^2 + h^2}}{xy} \right. \\ & \left. + \frac{\pi}{2} h \right], \quad (2) \end{aligned}$$

(G: 万有引力定数、 ρ : 密度)

5. データ処理およびその結果

5.1 重力異常分布

図-6および図-7に、計測測線および参照測線で得られた重力異常分布（ブーゲー異常分布）およびトレンド成分ならびに元の重力異常分布からトレンド成分を除去した残差重力異常分布を示す。

得られた重力異常分布には、大局的な特徴として、

- ・計測・参照両測線とも、距離程0 m（西方）から距離程890 m（東方）にかけて重力値が約0.4 mGal漸減している傾向
- ・計測測線の重力値は、参照測線のものに比べてほぼ一様に0.1 mGal程度高い値を示している傾向（北方に向けて重力値がほぼ一様に減少する傾向）

が認められる。これらの大局的特徴は、深部の地下構造等による影響と考えられる波長の非常に長いトレンド成分が含まれていることである。そのため、ここではこのトレンド成分を回帰直線で近似し、これを元の重力異常分布から差し引いて、図示した残差重力異常分布を求めた。この残差重力異常分布は、以後の重力解析の出発点となるものである。

5.2 フィルター処理後の重力分布

上述した残差重力異常分布から防波堤空洞に起因すると考えられる重力成分（短波長成分）を抽出する際、前節で述べた特徴を考慮の上、フーリエ解析の手法に基づくノイズ解析およびフィルター・テストを行い、最適のフィルター特性を選定して行なった。フーリエ展開方式としては、全区間890 mを半周期とするコサイン展開を採用した（詳細については、加藤、1987を参照）。今回の場合、カット・オフ波長約8 m、約160 mのバンドパス・フィルターを採用した。

図-8および、図-9に、それぞれ計測測線および、参照測線に対するフィルター処理後の重力分布を示す。長波長成分は、主に海底地形などを反映した重力成分と考えられる。またもし、ケーソン隔室に空洞が生じている場合には、その影響は短波長成分重力分布中に反映されると考えられる。

6. 観測孔データによるキャリブレーション

6.1 実測重力分布と計算重力分布

一部防波堤のパラペット部に設けられた観測孔による中詰め砂深さの観測結果を基に、計測測線および参照測線位置でのモデル空洞による計算重力分布を求めた。この際の計算式は、前述した四角柱による重力の解析解を用いた。モデルの水平断面は、4 m×4 mと設定した。得られた計算重力には、さらに実測重力と同じフィルタ

ー処理を施した。この理由は、フーリエ解析の手法によるフィルター処理における解析区間の両端付近でのデータの歪みを評価するためである。実際、以下に示すように、フィルター処理前の計算重力分布に比べて、フィルター処理後のものは端部付近で実測重力分布にかなり近づくことが判る。

図-10に、観測孔データと、計測測線・参照測線の実測重力分布および、計算重力のフィルター処理前後の重力分布を示す。

6.2 フィルター処理の影響評価

(1) 計測測線について

計測測線の実測・計算重力分布によると、中詰め砂が4 m程度以上流出している大規模な空洞箇所（距離程704.9 m, 730.5 m, 828.0 m, 832.0 m）に対応して、計算重力分布に3箇所の低重力異常が現われていることが判る。なお、図の右端（距離程870 m付近から890 m）に認められる非常に顕著な低重力異常は、防波堤の端部効果(防波堤がなくなり海水が分布していることによる構造物の影響)によるものである。

一方、実測重力分布では、大きさ0.01 mGalを越える相対的な低重力異常に着目すれば、計算重力分布から期待される上記3箇所によく対応した低重力異常が認められる。その反面、中詰め砂の流出量（高さ）が2～3 m程度以下の箇所では、その箇所を実測重力分布から読み取ることは難しい。今回の重力探査によって、空洞の高さが、4 m程度以上の比較的大規模な空洞は検出可能であると判断される。

また、フィルター処理前後の計算重力分布に着目すると、フィルター処理後のものは実測重力分布中に認められる低重力異常に対し、その大きさ・範囲両面において非常に良い一致を示す結果が得られた。

(2) 参照測線について

参照測線の結果によると、計算重力分布では防波堤の端部効果以外には大きさ0.01 mGalを越えるような顕著な低重力異常は期待されない。これは、前述したように、むしろこうなるように参照測線の位置を設定していることによる、いわば当然の結果である。

一方、実測重力分布では、これに反し、距離程785 m付近から840 m付近にかけて、大きさ0.01 mGal～0.02 mGal弱の低重力異常域が認められる。この原因については、現在のところ不明であるが、背面側のケーソン隔室にもなんらかの空洞が生じていることを示唆している可能性がある。

また、フィルター処理後の計算重力分布を実測重力分布と比較すると、計測測線と同様に、フィルター処理後の計算重力分布の方が、より実測重力分布に近い結果が得られた。

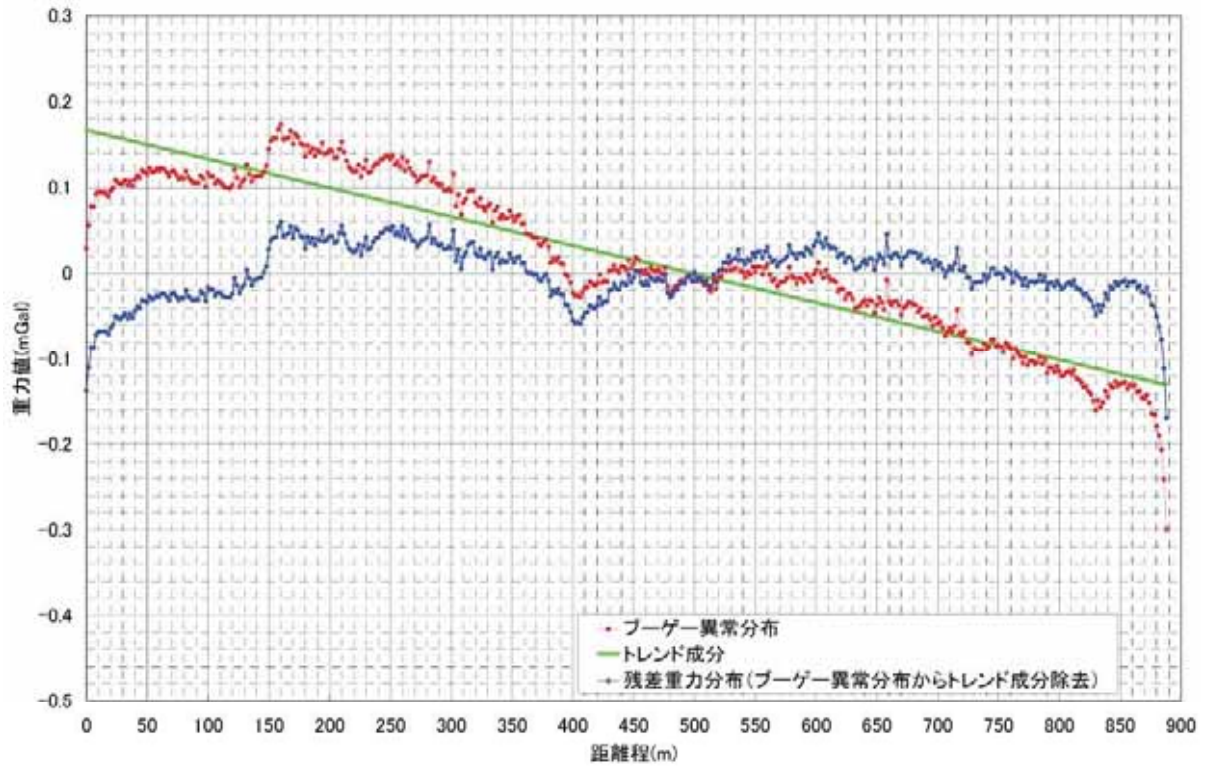


図-6 重力異常分布 (計測測線)

Fig. 6 Gravity anomaly distribution along the measurement profile line.

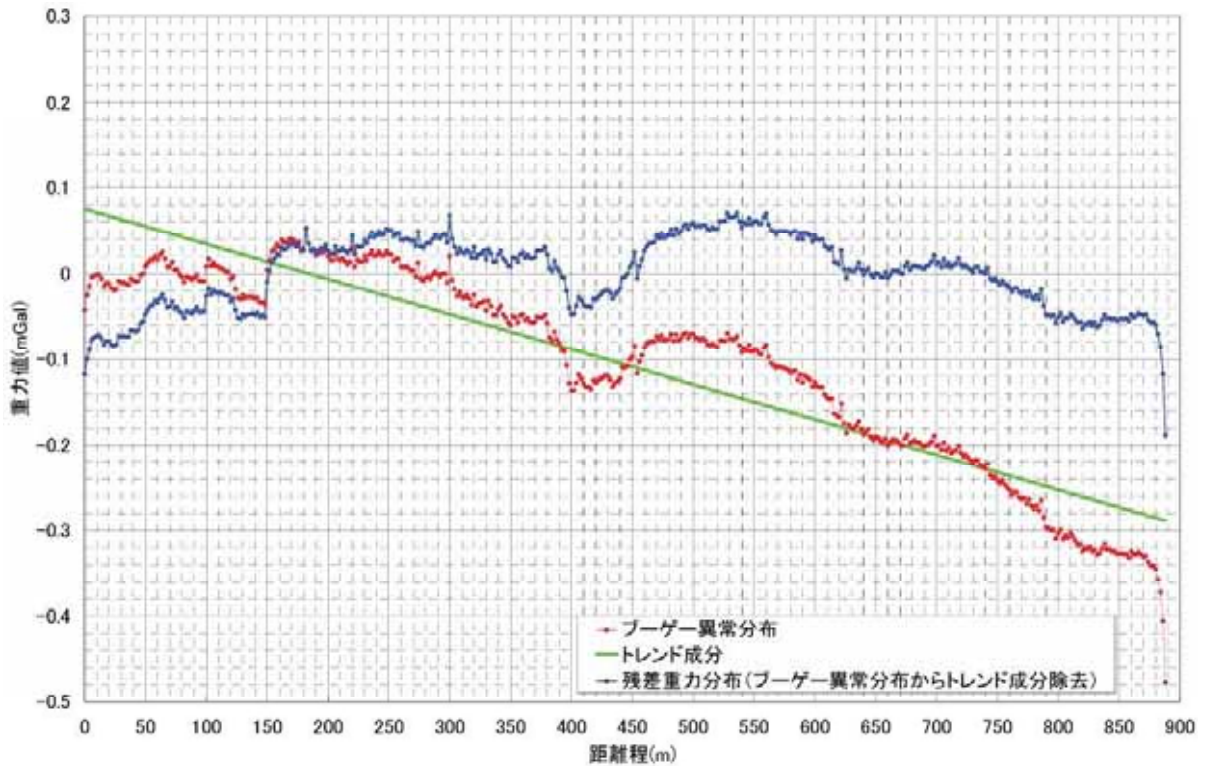


図-7 重力異常分布 (参照測線)

Fig. 7 Gravity anomaly distribution along the reference profile line.

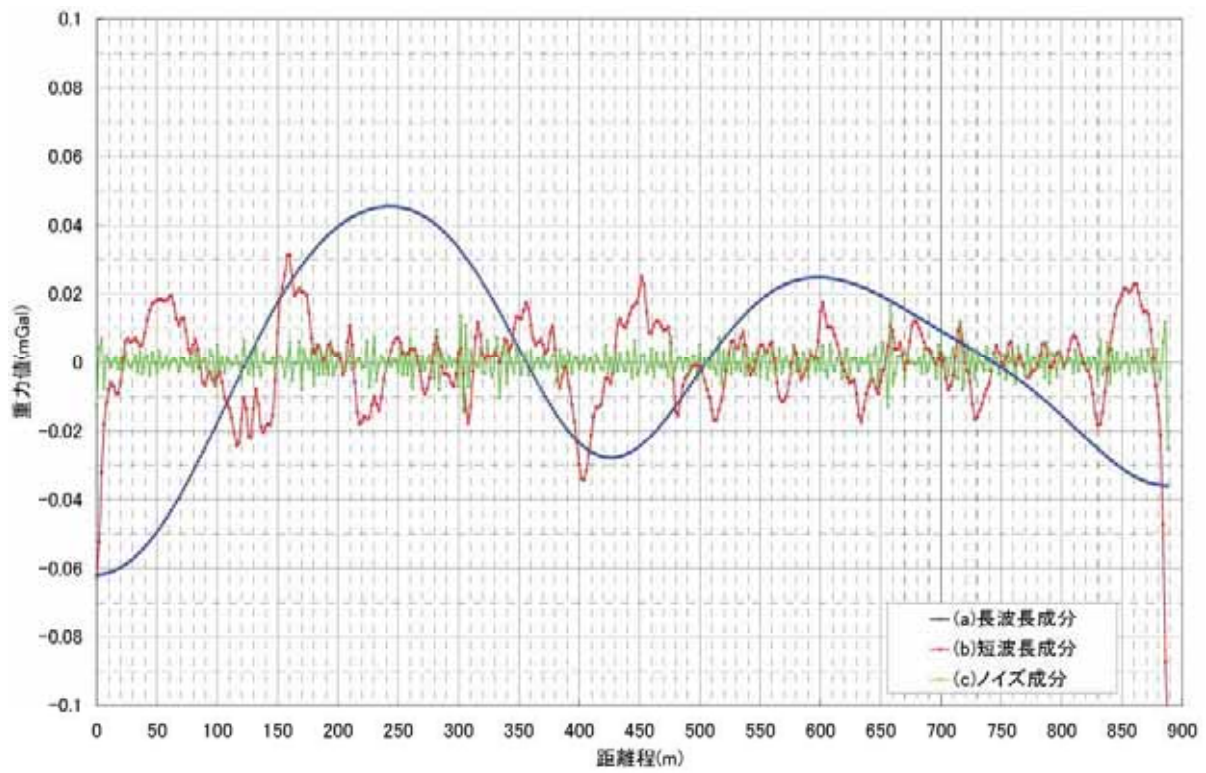


図-8 フィルター処理後の重力異常分布 (計測測線)

Fig. 8 Filtered gravity anomaly distribution along the measurement profile line.

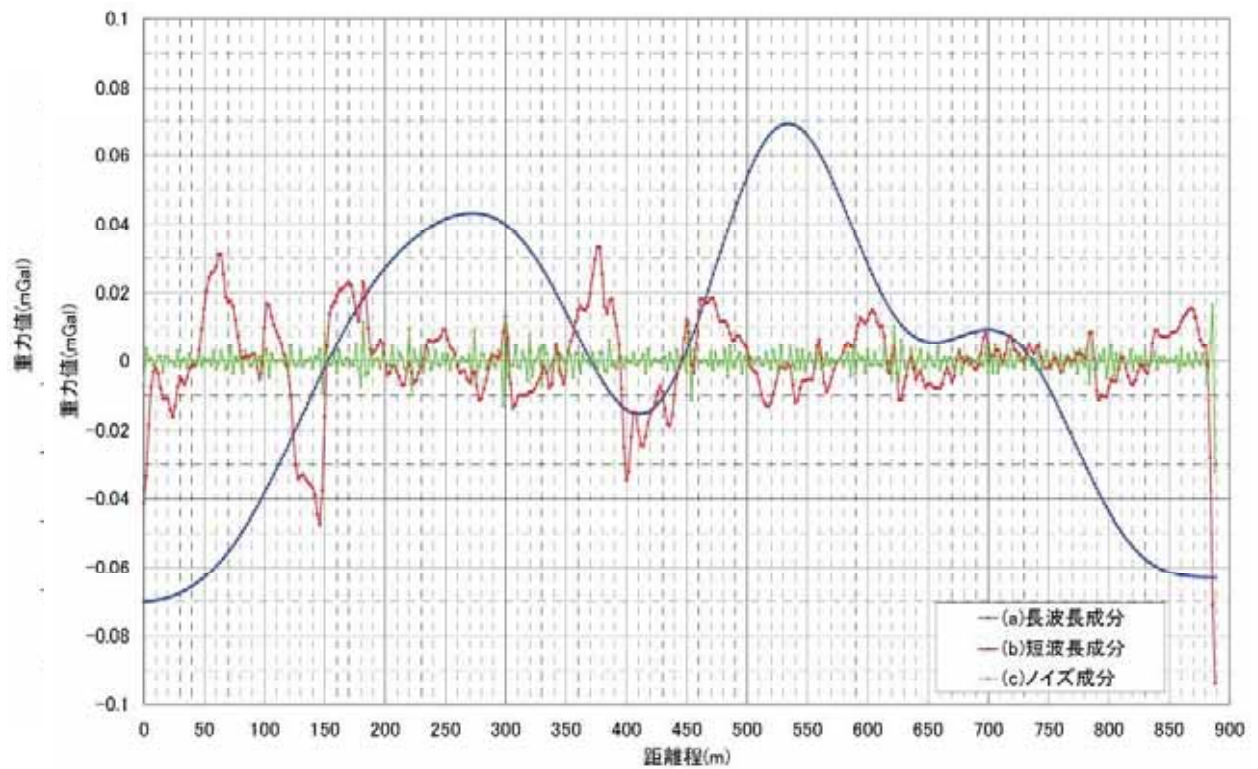


図-9 フィルター処理後の重力異常分布 (参照測線)

Fig. 9 Filtered gravity anomaly distribution along the reference profile line.

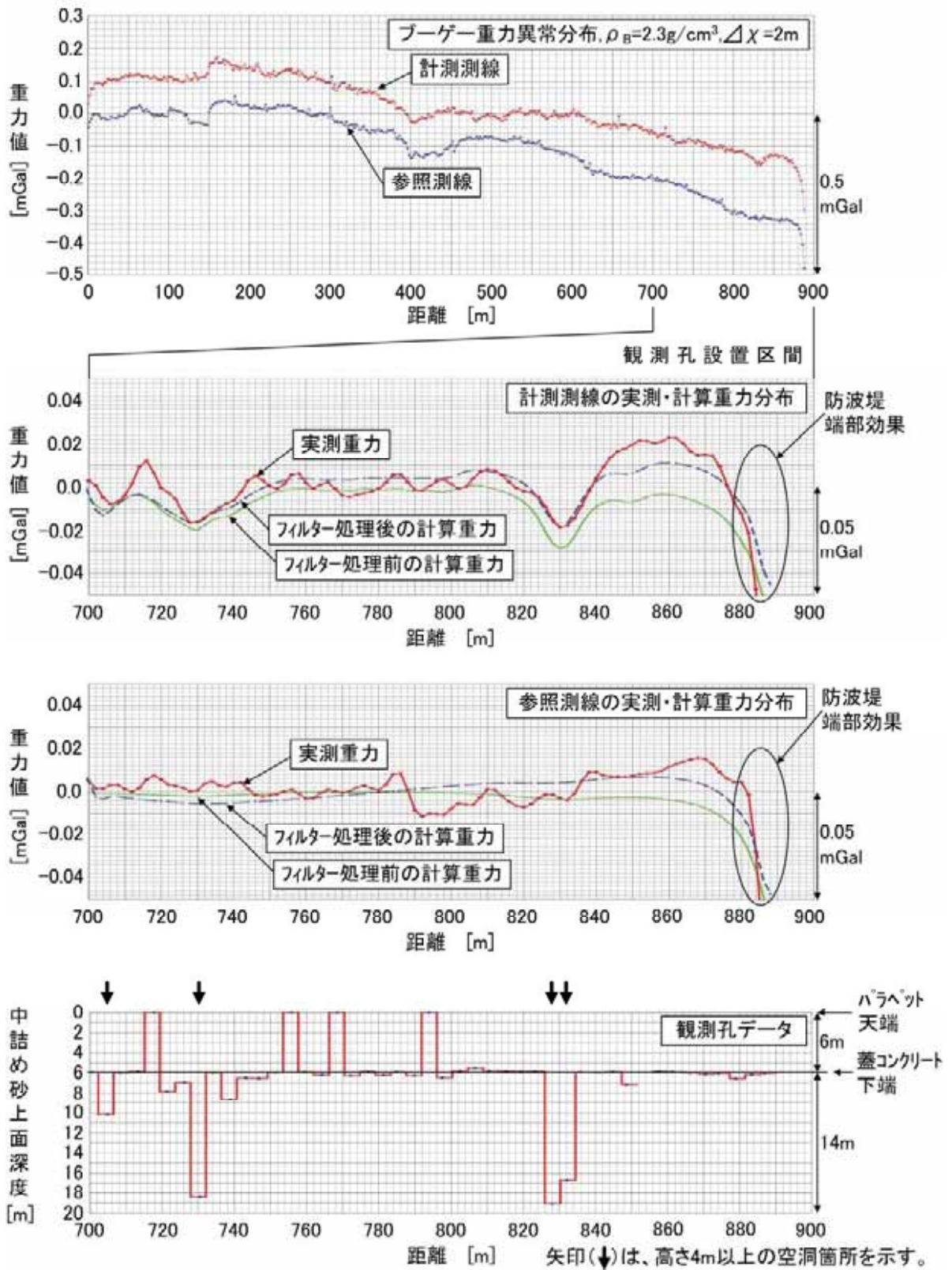


図-10 防波堤空洞調査（シンクロナイズド・マイクログラビティ探査）結果

Fig. 10 Results of the synchronized microgravity survey over the calibration interval.

7. 検討およびまとめ

図-10上段に示した重力異常分布によると、

- (1) 計測測線、参照測線とも、前述したように図の左(西)から右(東)にかけて0.4 mGal程度直線的に減少する傾向が認められる。また、参照測線の重力異常分布は、その南に位置する計測測線のものよりも系統的に約0.1 mGal小さい値を示している。これら波長の長い成分の特徴は、四国沖で南から北に向けて沈み込んでいる(潜り込んでいる)フィリピン海プレートの影響によると考えられる広域重力異常分布の傾向と非常に一致を示している。このことは、今回の重力測定が精度よく実施されたことの傍証になっている。
- (2) また、やや波長の短い成分の特徴として、計測・参照測線における重力異常分布が並行するパターンが認められる。これは、例えば海底地形の影響などといった比較的近傍ではあるが両測線に共通して効いてくる重力成分を反映したものであると考えられる。このように両測線に共通して認められる重力分布パターンは、フィルター処理においてその特性を選定する際に極めて有用な情報を提供するものである。
- (3) 計測・参照測線の両端付近での重力値の低下は、防波堤端部の影響である。以下に述べるキャリブレーションの結果から結論づけられるこの観測結果もまた、現場における重力測定が高精度で行なわれたことの傍証になっている。
- (4) 防波堤空洞に起因すると考えられる重力成分(短波長成分)の抽出は、以上に述べた特徴を考慮の上、フーリエ解析の手法に基づくノイズ解析およびフィルター・テストを行い、最適のフィルター特性を選定して行なった。今回の場合、カット・オフ波長約8 m、約160 mのバンドパス・フィルターを採用した。

図-10の第2段および第3段に示した中詰め砂の上面深度をモニターするための観測孔が設置されている区間(区間長190 m)でのキャリブレーション結果(フィルター処理後の実測重力分布とフィルター処理後の計算重力分布との比較結果、および、下段参照)によると、

- (5) 計測測線(第2段)において、空洞高さが4 m程度以上の比較的大規模な防波堤空洞(矢印の箇所)に対応した低重力異常が、20 m~40 mの範囲に、大きさ0.01 mGal~0.05 mGal程度の低重力異常として実測重力分布中に検出されていることが判る。

また、これ以外では、大きさが0.01 mGalを越えるような低重力異常は検出されていない。このことは、陸上における重力測定精度の限界に近い数0.01 mGalという大きさの重力異常が、防波堤天端といういわば測定条件の悪い現場においても検出可能であることを示している。なお、距離程830 m付近に見られる顕著な低重力異常箇所において別途実施した試験調査結果と今回の調査結果との整合性(再現性)は非常に良好であった。

- (6) 一方、参照測線(第3段)においては、観測孔データ(下段)に基づくモデル空洞による計算重力分布から予想される「防波堤端部以外はほぼ一様な重力分布」に対し、実測重力分布では(距離程785 mから840 mにかけて)大きさ0.01 mGalを越える低重力異常区間が検出されている。この原因については、現在のところ不明である。
- (7) 計測測線および参照測線の2測線によるシンクロナイズド・マイクログラビティ探査の当初の2つの目論見(2-2節)のうち、「両測線の重力値の差をとることによる防波堤全体の動揺等に起因するノイズの除去」については、今回は上記(6)により確認することができなかった。しかし、2測線を設定することにより、「施すべき最適フィルター特性の選定が1測線の場合に比べてはるかに容易となり」、その結果として、上記(5)の結果を得た。

以上に述べた事実は、今回新しく試みたシンクロナイズド・マイクログラビティ探査の防波堤空洞調査への適用性を実証的に示すものであると判断される。

今後さらに現場を重ねることにより、防波堤空洞調査法の一つとしてより洗練されたシステムとして改良してゆく予定である。

謝辞：

査読をしていただいた山口晶敬氏(応用地質株式会社)、および、松澤 宏先生(応用地質株式会社)のコメントは原稿の改善に大いに役立った。国土交通省四国地方整備局高知港湾・空港整備事務所の関係各位には、現場測定の便宜を図っていただいた。ここに記し厚く御礼申し上げます。次第である。

参 考 文 献

- 1) 高屋 正, 内藤邦夫, 早田守廣(2005): 空洞調査への物理探査適用のまとめ, 「地下空洞と物理探査」シンポジウム講演概要集, (社)物理探査学会地盤探査研究会, pp. 52~67.

- 2) 加藤元彦 (1987) : 2次元フィルターの理論と重力・磁力分布の解析, ラテイス, p.262.
- 3) 野崎京三, 加藤元彦 (1988) : ボックスカルバート上におけるマイクロ重力探査, 応用地質年報, No.10, pp. 113~122.
- 4) 野崎京三 (1997) : マイクログラビティ探査の現状とその利用, 応用地質技術年報, No. 19, pp. 35~60.
- 5) 野崎京三 (1999) : マイクログラビメトリーの現状と今後の可能性, 東京大学地震研究所研究集会「21世紀における重力研究のあり方についての研究集会」予稿集, 1999年8月18日-19日, p.12.
- 6) 野崎京三 (1981) : 球面地形補正の計算プログラム, 測地学会誌, 第27巻, 第1号, pp. 23~32.
- 7) 佐藤栄治 (2005) : 構造物診断装置の開発～連続波レーダを利用したケーソン内部空洞の非破壊調査手法について～, 月刊建設, 2005年2月, 特集 適切な維持・管理の推進に向けて, pp. 27~29.