

金沢港内の堆砂量とその平面分布の予測

波間 純男*・高橋 政秋*・松本 祐二*
山田 貴裕**・黒木 敬司***

日本海沿岸の中央部に位置する金沢港は、建設当初から港内への土砂流入及び航路埋没が発生し、近年では、航路の計画水深を維持するために、年間約 5 万 m^3 の維持浚渫が実施されている。このような港内堆砂に対して、測量データを基に地形変化傾向を把握し、数値シミュレーションによる堆積地形の再現を目的として、金沢港および徳光観測所の波浪データを解析し、金沢港内の検潮記録により高波浪時に出現する長周期水面変動を解析した。これらの条件により再現計算を実施した結果、現地の地形変化とほぼ一致する再現計算結果を得ることができた。この手法を用いて、航路及び泊地への土砂流入を制御するための効果的な対策の配置と施工手順を予測した。

1. はじめに

金沢港では建設当初から港内への土砂流入が激しく、泊地と航路に埋没が生じ、航路水深維持のために、継続的な維持浚渫が実施されている。最近の浚渫量は年間当たり約 5 万 m^3 に達している。港内埋没メカニズムを明らかにする目的で、これまでに深浅測量・波浪・流況調査等の各種現地調査が実施されるとともに数値シミュレーションによる再現実験が試みられてきた。しかし、これまでの数値シミュレーションでは、堆積域の分布だけでなく堆積量についても満足できる結果を得ることはできていなかった。そこで、測量結果をより詳細に解析して、近年の港内堆砂状況を明らかにするとともに、数値シミュレーションに採用する各種条件を見直すことによって予測精度を高め、防砂堤延伸の効果について検討した。

2. 測量データを用いた地形変化解析

金沢港で実施された 1991 年以降の深浅測量データを用いて港内の堆砂状況把握を主目的とした解析を実施した。

(1) 金沢港内堆砂量の変化

解析範囲は図-1 に示す範囲を対象とし、図-2 に示すように、1991 年を基準としたその後の累積堆砂量の時間変化 (ΔV_s) を整理した。なお、累積堆砂量は維持浚渫による土砂減少量も考慮した。

1991 から 1999 年間の平均的な港内堆砂量は、約 17 万 m^3 /年である。が、1994 年を境にして堆砂速度が緩やかになっており、1994 年以前は約 20 万 m^3 /年、1994 年以降は約 11 万 m^3 /年となっている。

本研究の目的は、数値計算による埋没地形の再現とその条件を用いた対策工の評価であることから、主として最近の地形変化傾向を再現する必要がある。1994 年以降の地形変化を再現目標地形として選定した。

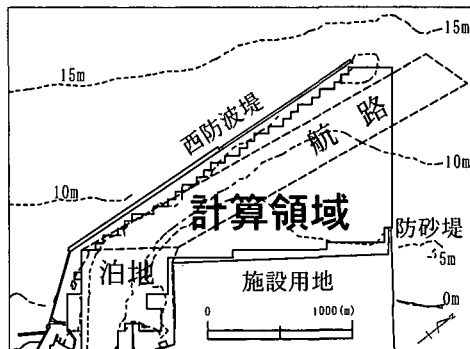


図-1 土砂量変化解析範囲

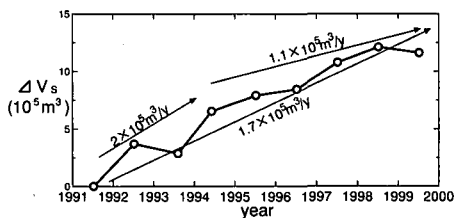


図-2 堆砂量の経年変化

(2) 港内地形変化の分布

図-3 は、1994~1999 年に生じた地形変化の平面分布図で、顕著な侵食域は太破線で、堆積域は太線で表示する。堆積域は、西防波堤に沿って泊地方向に分布しており、また防砂堤先端にも堆積分布が確認できる。これに対して、侵食域は西防波堤先端付近と施設用地前面域に確認できる。これらの地形変化の要因について分析する。

西防波堤に沿って泊地方向に分布している堆積は、高波浪により巻き上げられた砂が、西防波堤の静穏域となる航路へ押し込まれ堆積し、更にその一部は、副振動に誘起された流れにより泊地まで輸送され、堆積したと推定される。防砂堤先端の堆積は、海浜部において北から南に向う流れが生じ、そして防砂堤に沿う岸から沖へ向う流れが生じる。この流れによって砂が運ばれ、防砂堤先端に堆積したと考えられる。



図-3 再現対象地形

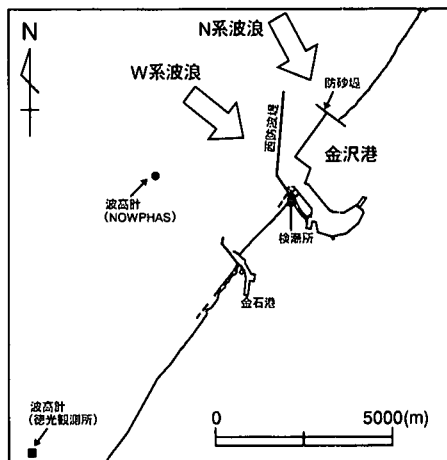


図-4 波浪観測地点位置図

西防波堤先端付近の侵食域は、港内から港外に向う流れにより侵食し、沖側に堆積したと考えられる。施設用地前面の侵食域は、開口部に近いために西防波堤による遮蔽効果が少ないことから、比較的活発に砂が移動すると考えられる。そのため、護岸前面に沿う強い流れや反射波により、洗掘したと考えられる。

このように大規模な地形変化を生じさせるには、年数回程度の高波浪の来襲が寄与していると考えられる。

3. 金沢港と松任海岸の波浪データ解析

(1) 代表波向

港内埋没をもたらす有力な外力の一つとして、荒天時の波浪が挙げられる。金沢港沖の波浪観測は、1970年から実施されているが、波向は観測されていない。そのため、既往の数値シミュレーションでは、金沢港から南西方向に約 60 km 離れた福井港沖の波向データを参考に波向条件を設定している。これに対して、金沢港から約 10 km 離れた松任海岸の徳光観測所(図-4)で 1988 年から波向観測が実施されており、本報告ではこの地点の波向データを基に条件を設定した。波向条件の設定方法は、最初に波高・周期・波向データから田端ら (1980) の方法により方向別波エネルギー分布を算出した。その結果、海岸線に対し直角方向 (N 310°) に重心が位置しており、この方向を境界に W 系と N 系の波向に分割して、それぞれの重心方向を代表波向 (W 系: 波向 298.4°, N 系: 波向 321.9°) とした。

(2) 代表波高・周期と作用時間

代表波高と周期は、金沢港沖の波データから、1 年間に 1 日程度発生する波高 (超過確率 99.7%) として、5.5 m とし、荒天時の平均的な沖波波形勾配が 0.03 程度であることから周期については 10.8 s とした。

代表波浪の作用日数は、年間あたりに来襲する波浪の

総波エネルギーと、代表波高・周期により計算される波エネルギーの関係から、波作用時間 20 日間とした。

4. 港内副振動の影響検討

金沢港を対象とした既往の埋没予測調査では、航路内での堆積範囲と堆積土砂量の表現が不十分であり、図-1 に示した港内全域の堆砂量と計算結果を合わせこむ方法で再現性の確認を行っていた。著者等は、再現性の低さの要因を、高波浪時に西防波堤の遮蔽域に形成される時計回りの循環流により港口部周辺から港内側に土砂が運ばれていたものの、循環流の規模が小さいために航路まで土砂が到達していなかったためと考えた。

本研究を開始するに当たって現地踏査を行い、比較的波高が大きい時に、港口部だけでなく航路周辺でも強い流れがあり、港内に向かう流れやその逆方向の流れを繰り返していることが確認された。松岡ら (1991) は長周期波が航路・航行埋没に影響していると報告しており、金沢港においても、この流れが航路埋没に対して影響しているものと考え港内副振動について検討した。

(1) 港内の長周期水面変動解析

金沢港では 1997 年から潮位の連続記録 (図-4 に検潮所の位置を示す) が 15 s 間隔でデジタル化して保存されている。そこで、比較的高波浪の来襲が多い時期である 1~3 月 (1997 年) の潮位データを解析対象として用いた。このデータを 6 時間毎に分割し、潮汐成分を取り除いた後に、ゼロアップクロス法により波高を算出した。また、同一期間のデータを用いて、FFT 法により周波数スペクトルを算出した。

図-5 は、1997 年 1 月のデータを用いて求めた長周期波の最大波高と周波数スペクトルの経時変化である。左縦軸を周波数 f (Hz), 右縦軸を周期 T (分) とし、色の

濃さでスペクトル密度の大きさを表示した。

最も大きな長周期波高は 60 cm を超えており、1997 年 1 月 5 日 18 時と 24 日 16 時に出現している。一方、スペクトル密度は、8 分、13 分、40 分程度の周期帯にピークが現れ、中でも 40 分付近のスペクトル密度が大きく、幅広く分布している。1997 年 2 月、3 月についても同様の結果が得られた。

(2) 長周期水面変動の再現計算

金沢港内で生じている周期 40 分程度の副振動の平面的な規模を確認し、副振動に伴って発生する流速場の変動を把握する目的で、高山・平石 (1988) の方法による副振動予測計算を行った。計算条件は代表周期を 40 分、代表波向を海岸線に対して直行方向とし、海底摩擦損失は計算領域全域に考慮し、防波堤などの構造物は完全反射とした。

入射波高は、上記の条件の基で検潮所の位置での波高が 60 cm になるように試行計算を繰り返して設定した。

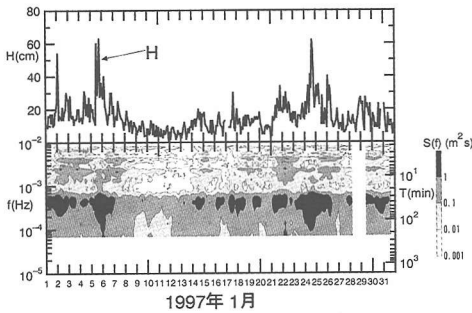


図-5 長周期波の波高と周波数スペクトル

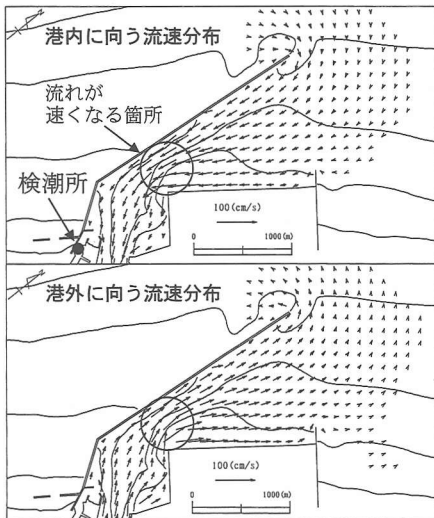


図-6 副振動計算による流れの分布

図-6 は、検潮所での最大波高が 60 cm になったケースの港内に向かう最大流速の分布と、港外に向かう最大流速の分布である。このように、周期 40 分の振動は港奥を振動の腹、港口部を節とした振動となっている。

流速値は、港口部の幅が広いために図中に示した箇所 (○印) で最大になっており、流速 40 cm/s に達している。図-6 から明らかのように、副振動に伴って発生する流れの分布は港内・港外の両方に向かう流れが現れるが、特に港内に向かう流れが航路に沿って形成される堆積地形に影響しているものと判断した。

5. 地形変化分布の再現計算

数値計算により港内地形変化の再現を試みた。計算は、図-1 に示す金沢港を含む沿岸方向 8,000 m、岸冲方向 3,850 m を 25 m 格子に分割して、エネルギー平衡方程式を解く方法により波高・波向の分布を求め、radiation stress を外力とした海浜流計算、榎木ら (1976) による浮遊砂と掃流砂を同時に評価可能なモデルにより地形変化を予測した。

(1) 流れの場の予測結果

図-7 の上段は、N 系の波を作用させた場合の海浜流計算結果である。副振動の影響は、図-6 に示した港内に向かう流れおよび港外に向かう流れを、海浜流計算結果とそれぞれベクトル合成することにより評価することとした。合成結果は図-7 の中段 (港内向き)、下段 (港外向き) に示した。

海浜流のみの場合に比べて、港内向きの流れを合成した場合には、施設用地の前面を通過して航路および港奥に向かう流れが強くなっている。港外向きの流れを合成した場合には、施設用地に沿って港奥に向かっていった流れが途中で西防波堤の方向に向かい、西防波堤に沿って港外に向かう流れが強くなっている。

(2) 地形変化予測の結果

地形変化計算を行う際の底質条件は、1986 年に実施された調査結果より、航路周辺では中央粒径 0.03 mm 程度であったが、港口部や周辺の粒径が 0.10~0.20 mm であったことから 0.15 mm とした。また、沈降速度は、Rubey の式より 1.7 cm/s とした。

海浜流のみによる再現計算の場合は、N 系と W 系の波浪をそれぞれ 10 日間作用させて変化量を合成する。しかし、副振動場での予測の場合には、以下のように合成方法を変更した。副振動の 1 周期間には、港内外に向う流れがそれぞれ 1 回発生し、この転流時に低流速の時間帯が 2 回存在することから、地形変化計算結果には、港内向き：港外向き：転流時=1:1:2 の割合で作用時間を調整した。

再現計算結果を図-8 に示す。再現計算の結果は、西防

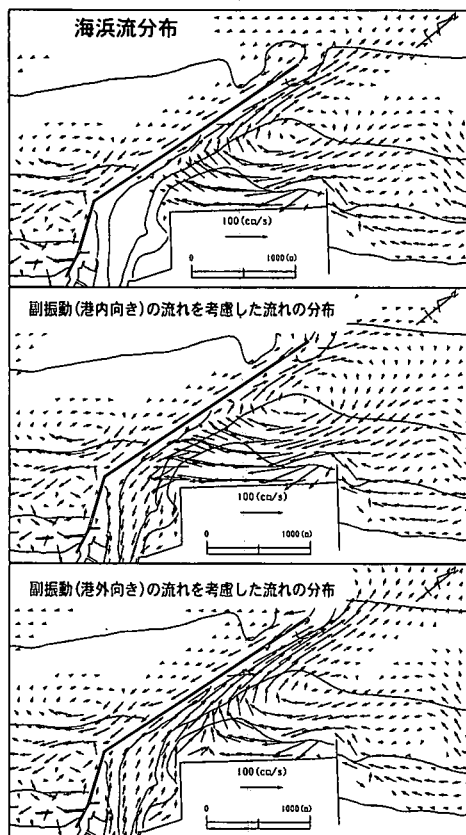


図-7 海浜流分布(上段)と副振動を考慮した流れ(中段・下段)の分布

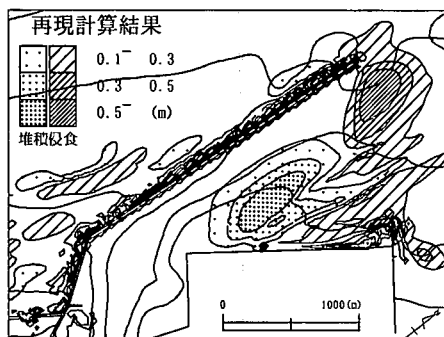


図-8 地形変化再現計算の結果

波堤の沿って泊地方向に分布する堆積地形、施設用地前面および西防波堤先端付近の侵食地形など、現地の地形変化分布を良く再現しており、図-1に示した港内での堆砂量も 11 万 m^3 と再現目標と一致している。

海浜流のみでの地形変化計算結果と、副振動を考慮した地形変化計算の差分を図-9に示す。

副振動を考慮した効果は、港奥に近い航路部分への土砂の入り込みが助長され、防波堤の先端から背後に土砂が回り込む結果となって現れている。

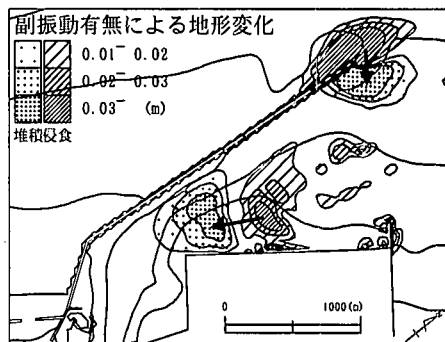


図-9 副振動の有無による地形変化量の差

なお、副振動を考慮したことによる航路部分への堆積厚さの増加量は最大で 5 cm 程度であり堆積は $6,875 \text{ m}^3$ であり、現地の維持浚渫実績と比較すると小さめの値である。

6. 防砂堤の延伸効果検討

金沢港の防砂堤は計画延長 800 m の内 186 m まで施工されており、今後の有効な施工手順と最終的な効果を確認する目的で各種の形状を対象として地形変化予測を実施した。

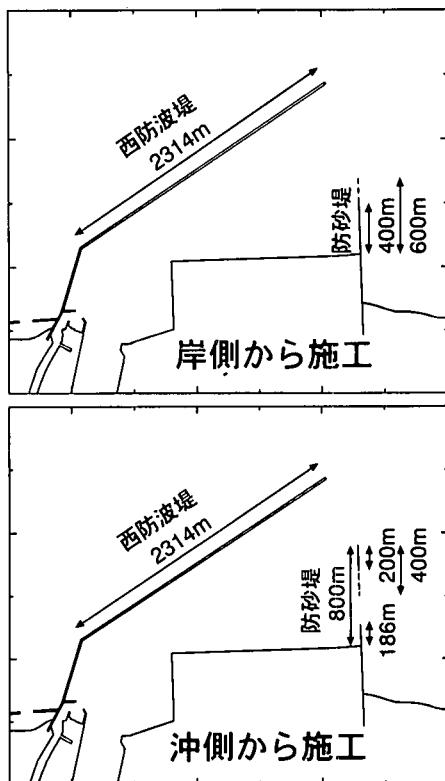


図-10 将来予測計算ケース

防砂堤の計算形状は、防砂堤を岸側から沖側へ施工を実施した場合の2形状(図-10 上段)と、沖側から施工を進める場合の2形状(下段)、更に防砂堤完成時(防砂堤総延長800 m)の計5形状とした。

図-11 は、地形変化予測計算の結果から港内への堆砂量をケース毎に示したものである。岸側から施工した場合の港内土砂量に比べて、沖側から施工した場合の堆砂量が6割程度多くなっていることから、防砂堤は沖側から施工を進めるよりも、岸側から施工を開始した方が、港内堆砂に対し有効であることが確認された。

また、現在の年間あたりの堆砂量が11万 m^3 であるのに対して、防砂堤完成時には1.5万 m^3 となり、堆砂場所も航路周辺から水深の深い港口部に移動するなど、防砂堤の効果が確認された。

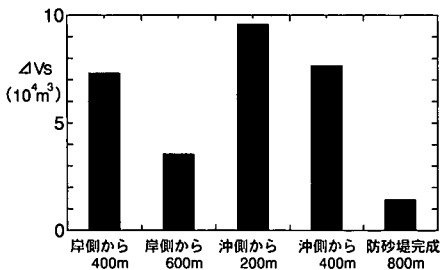


図-11 整備段階別の港内堆砂量

7. ま と め

金沢港を対象として、港内埋没の予測シミュレーションにおいて以下の手順で予測精度の向上に努めた。

- ・近年の測量データを基に土砂量の経年変化を求め、地形変化予測計算の再現対象地形を選定した。
- ・徳光観測所の波向データを用いて、波向条件を見直した。
- ・潮位データにより金沢港内の副振動現象を解析し、数値シミュレーションにより再現した。
- ・副振動による流速分布を地形変化予測計算の外力に取り入れた。

この結果、これまでのような単一波浪と海浜流による予測では表現できなかった航路部の堆砂形状を表現することが可能になった。この手法を用いて防砂堤の施工手順を検討することにより、効果的な施工手順を把握することが可能になった。

なお、本研究の問題点として、航路内の堆積厚さの表現が十分でない点を挙げることができる。これは、地形変化予測を荒天時の20日間に限定したことによるもので、常時の副振動による砂の移動を考慮することにより再現性の向上を図ることが可能と考える。

参 考 文 献

- 榎木 亨・出口一郎 (1976): 海浜変形の予測に関する基礎的実験 (第1報), 第23回海講論文集, pp. 212-217.
- 田端竹千穂・柳生忠彦・福田 功 (1980): 日本海における波のエネルギー, 港湾技研資料, No. 364, pp. 1-20.
- 高山知司・平石哲也 (1988): 数値計算と現地観測による港内副振動特性の検討, 港湾技研資料, No. 636, pp. 1-70.
- 松岡道男・木下勝尊・山本正昭・森口朗彦 (1991): 長周期水理特性を考慮した港内堆砂モデルの適用性の検討, 海工論文集, 第38巻, pp. 416-420.