

孔間弾性波探査法による離岸堤の埋没状況に関する考察 (その 2)

宮本卓次郎* ・ 吉 永 茂** ・ 曾我富士雄***
清水謙吉****・ 川又良一*****・ 佐藤峰雄*****

1. ま え が き

離岸堤や突堤等の海岸防護施設の多くは、高波浪等による堤体の沈下および堤体前面海浜の洗掘等を生じ、機能維持を図るための嵩上げ等を余儀なくされている。このような構造物の沈下防止対策を検討するに当たり、構造物の埋没形状を知ることはきわめて重要と考える。この情報を得るため、昭和 59 年度には新潟西海岸の連続離岸堤を対象に孔間弾性波探査法による調査を実施し、昭和 60 年度に報告したところである。その概要は、離岸堤をはさんだ 2 地点の弾性波の伝搬速度を発振深度および受振点を変えて求め、その測定結果を解析して海底に埋没した構造物の形状を把握したものである。今回はこの報告に引き続き、昭和 60 年度においてさらに新たな試みを加え調査を実施したので、その調査方法および成果についてとりまとめ報告するものである。

今回、報告する内容は以下の 3 点である。

① 昨年度の孔間弾性波法においては、砂層速度分布を、構造物のない 2 地点の調査孔の伝搬速度より求めたが、その解析において砂層別の速度を想定しつつ、伝搬速度を逆算し、最も測定結果をよく再現する砂層速度分布として求めた。今年度は砂層別の速度を求めるため、あらかじめサスペンション PS 検層および海底面起振による P 波検層によって直接砂層速度を求め、これを参考として用いたこと。

② ソノプロブを利用して、一般的音波探査法による海底地層および離岸堤埋没形状の把握を試みたこと。

③ サイドスキャンソナーを利用して、離岸堤および浅海域における面的形状の把握を試みたこと。

2. PS 検層の今後の利用と可能性

2.1 孔間弾性波探査法

孔間弾性波探査法とは、以下の手順により構造物埋没

部の形状を調査しようとするものである。

a) 現場調査

図-1 に示すとおり、構造物の前後、および沖側の 3 点に海底面下約 10 m まで削孔する。このうち構造物前面 (A 点) を受振孔とし、12 連の地震計を設置し、構造物沖側 (B 点) および構造物背面 (C 点) において、深度を変えて人工的に弾性波を発生させる。この時の伝搬時間を、受振孔でそれぞれ計測する。

b) シミュレーション

まず、層別伝搬速度を想定したシミュレーションを行い、図-1 の A 点—B 点の計測結果を最も良く再現する層別伝搬速度を求める。(第一段階)

次に、第一段階で求めた層別伝搬速度および構造物の伝搬速度を基に、構造物形状を想定したシミュレーションを行い、図-1 の A 点—C 点の計測結果を最も良く再現する断面形状を求める。(第二段階)

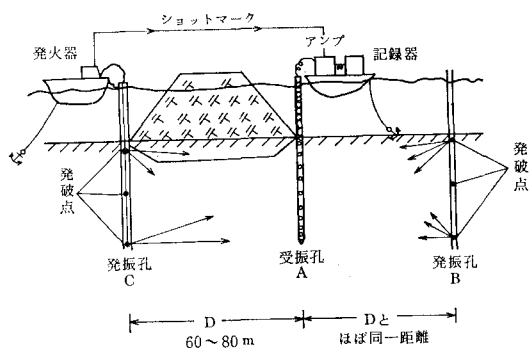


図-1 孔間弾性波探査概念図

2.2 サスペンション PS 検層および P 波検層

昭和 60 年度では、上記①による離岸堤の埋没形状の推定手法について報告した。

前回の報告では図-1、A—B 間の砂層速度分布を求めるに際し、孔間測定時の経路長および走時時間から各層の伝搬速度を想定し求め、これを第一段階のシミュレーション計算での入力値とした。このため、計算において正確な速度分布を求めることは技術的に難しい面があり、また精度も今少し良いとは言えなかった。これに対

* 正会員 運輸省第一港湾建設局新潟調査設計事務所調査課長

** 運輸省第一港湾建設局新潟調査設計事務所工事専門官

*** 新潟県新潟港湾事務所工務課工務第二係長

**** 正会員 大和探査技術株式会社新潟支店長

***** 正会員 株式会社エコー第一技術部調査課

三洋水路測量株式会社海象部

して、サスペンション PS 検層および P 波検層は層別の速度を直接求められる利点を持っており、今回はこの値を参考として第一段階のシミュレーション計算を行ったため、解析精度を大幅に向上させることができた。

その概要は以下のとおりである。

a) サスペンション PS 検層

これまでの PS 検層は、一般的にはボアホールピックを利用してきた。しかし、振源として板たたき法を用いるため、海上ではこの方法が使用できないので、S波を反転して測定することができなかった。しかし、近年新しい概念による同一孔内での発振、受振を行うサスペンション PS 検層が開発された。図-2 にその概念図を示す。

この方法は、1つの振源と2つの受振器とをケーブルの先端に連結し、孔中で吊り下した状態で測定を行う。

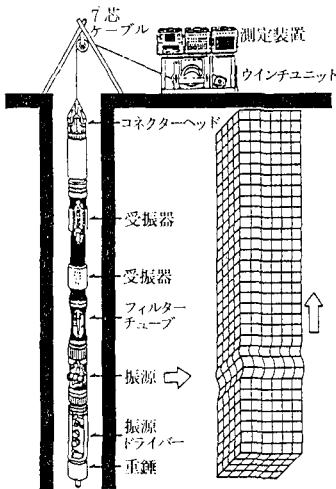


図-2 サスペンション PS 検層概念図

この方法では、孔内水中で体積変化の生じない剛体を、孔軸に対して直交する方向に急激に動かすことにより、孔内水に正負の圧力を加えて孔壁を動かし、直接S波を発生するものである。孔径に較べて発生する波の波長が十分に長ければ、この振源は、無限媒質における単純な一方向性の点振源となり、P波とともに孔軸方向に卓越したS波を発生する。またボーリング孔が孔内水で満たされている場合、孔壁が動くとき孔内水も一体の動きをする。したがって、水の動きを検出することによって、孔壁の動きを知ることができる。孔内水の動きは、受振器全体の見掛け比重をほぼ1にし漂遊方式によって検出する。振源には、ソレイド型磁振源が用いられ、1つの受振器には上下動成分と孔軸に直行する方向に2個の換振器が内蔵されている。この方法で得られた記録から速度を求めるには、2つの受振器により得られた各深度の記録についてP波初動あるいはS波の同位相の時間差を読み取り、受振器間の距離をこの時間差で割ることにより求められる。

b) P波検層

P波検層は、原理的には孔間弾性波探査法と全く変わらない方法であり、孔内に12個連結の地震計を吊り下げ、孔口付近で起振し、これにより得られた各深度での走時時間をもとにし、シミュレーション計算を行い、計算による走時曲線が実測による走時曲線に近似するまで計算を繰り返して行い、最も近似した断面図での速度分布により求められる。

c) 測定結果

サスペンション PS 検層とP波検層の結果を代表測線付近で得られている既存のボーリング柱状図との関連で検討してみた。図-3 に示す様に、サスペンション PS 検層およびP波検層のP波速度は良く一致し、標高 -6

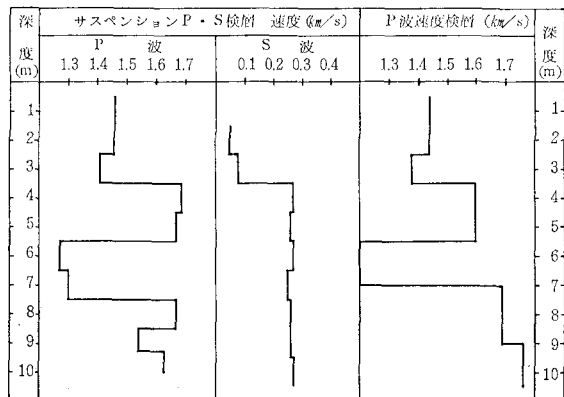
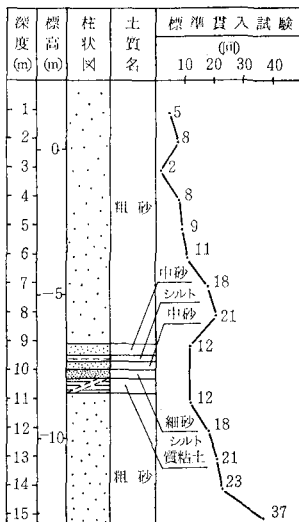


図-3 ボーリング結果と速度検層結果

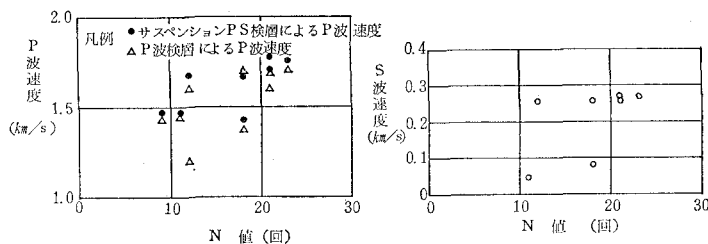


図-4 N値とP波およびS波速度の関係

～7m 付近に低速度層が認められ、柱状図のN値および地層の境界面とも一致している。また、このN値の変化の傾向は、サスペンション方式よりもP波検層がより近似している。これらの関係を図-4にP波およびS波速度別に相関図として示した。

この結果をみると、P波速度は、2点ほど特異な値を示しているが、比較的良好な相関関係が得られている。また、S波速度は地盤の力学特性と密接な関係を持っていることは広く知られているが、今回の調査ではP波速度の分布と同様にその傾向は近似しているが、相関関係はP波ほど明確に示されていない。今回の調査では、データ数が少ないため、正確な相関関係式を求めるまでには至らなかった。

d) 断面形状の把握

図-5は、前述の2つの速度検層で求めた速度値を基に得られた代表測線における砂層速度断面図を、シミュレーション計算の弾性波経路、走時曲線と共に示している。この断面図は、孔間弾性波探査法で作成された走時曲線を基に、サスペンションPS検層およびP波検層の速度値を参考として、シミュレーション計算の入力値を定めて、屈折法を用いたシミュレーション計算を行って

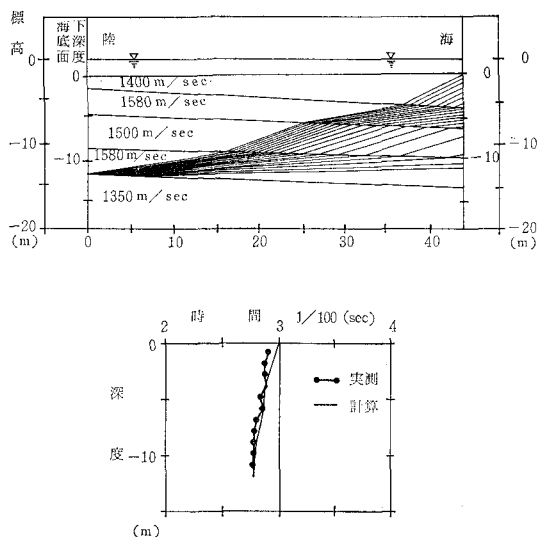


図-5 弾性波経路と走時曲線

得られたものである。この結果は、孔間弾性波探査法の測定結果を基にしたシミュレーションに較べて計算の繰り返し回数が少なくなり、また走時曲線も実測による走時曲線と、より近似するようになった。

更に、離岸堤の埋没断面は、砂層断面の解析と同一手法で堤体の大きさを变化させて推定した。

図-6はシミュレーション計算で得られた離岸堤断面図を示す。

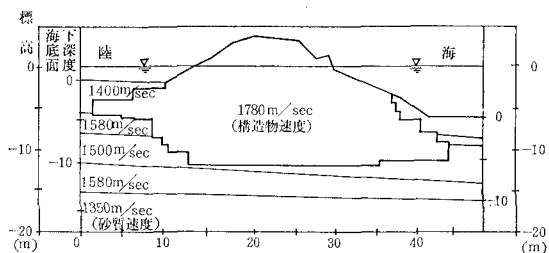


図-6 離岸堤断面図

以上、孔間弾性波探査法、単孔によるサスペンションPS検層およびP波による弾性波速度測定とその利用について1部述べたが、サスペンションPS検層は、今後のデータの蓄積により、その簡便さと正確さにおいては海底下の情報収集の面でその利用は十分期待されると考ええる。

3. ソノプロープによる離岸堤埋没形状調査

離岸堤構造物の海底面下の形状及び海底地層を把握するため、ソノプロープによる音波探査を試みた。その概要は以下のとおりである。

3.1 ソノプロープ

ソノプロープは弾性波探査法と同様に音波(縦波)のもつ物理的性質を利用して、海底下の地質や地質構造を調査する音波探査法である。これは、音源として磁歪振動子を用いるため、発信周波数が比較的高く分解能が優れている反面、可探深度が浅くなるため、主として浅海部の探査に適しているといわれている。図-7にソノプロープのブロック図を示した。

3.2 調査方法

調査は、離岸堤とその沖合100mとの間の海域において離岸堤と直角方向に14測線を選んで実施した。方法は調査船に音波探査装置を搭載し、測線上を船が直進できる最小スピードで航行しながら音波の発信、受信を行い、音波による離岸堤構造物の海底下の形状および地質構造の時間断面を記録させた。調査船の海上位置の決

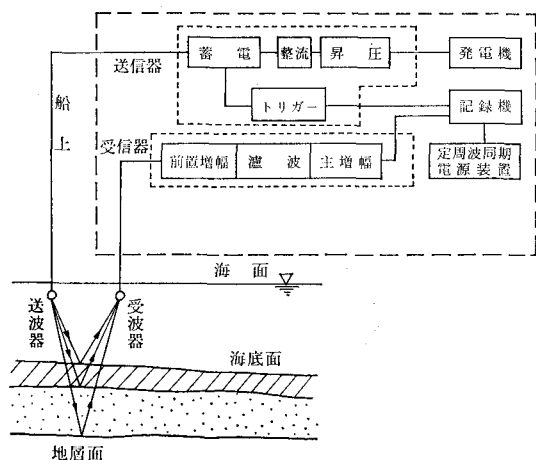


図-7 ソノプローブのブロック図

定は、トランシットによる直線誘導法で行い、測線上の距離の確認は陸上部に設置した基準点よりトランシットで測定した。なお、調査は離岸堤の沖合から実施した。

3.3 調査結果

ソノプローブによる代表的測線における調査結果を図-8に示す。なお、図面には結果を比較できるように弾性波探査で得られた離岸堤断面も合わせて記入している。この結果をみると、孔間弾性波探査法の結果と良く一致しており離岸堤の海底下への潜り込み距離は約4~5mであり、また離岸堤の潜り込み先端部の深度は、約3mであることが分かる。他についてみると、大きい所では約20m沖合へ張り出している所もあり、また先端部の深度も最大で約7m程度であった。このようにソノプローブによる結果は、概ね弾性波探査で得られた断面と合致している。また、地層も弾性波探査法で得られた速度分布とよく一致しており、1500m/secの存在する層が音の低速度層であることからみて、これが今回調査し

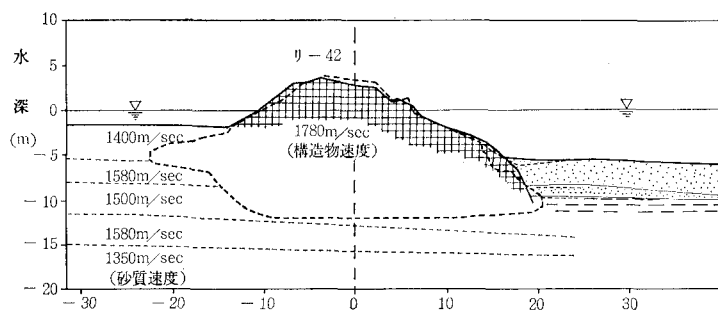


図-8 離岸堤断面の海底状況図

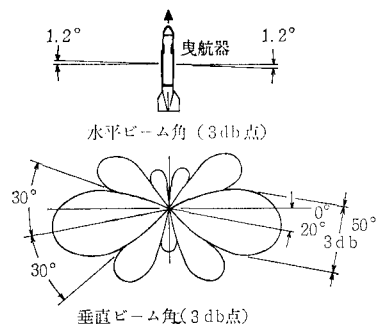


図-9 ビームの指向角

これらより、ソノプローブによる音波探査は深度を増すと探査能力に限界があるものの、海底地層および構造物の沈下形状等を調査する手法として効果的であり、かつ簡便なため、弾性波探査法による詳細調査との組み合わせにより、効率的に広範囲での精度のよい調査を行うことができる。

4. サイドスキャンソナーによる離岸堤形状調査

離岸堤構造物の水中部の形状を面的に把握するため、浅海域においてサイドスキャンソナーによる調査を試みた。その概要は以下のとおりである。

4.1 サイドスキャンソナー

サイドスキャンソナーは、一対のトランスジューサー(送受波器)を搭載したトッフィッシュ(曳航器)と曳航ケーブルおよび記録器から構成されている。図-9には、トランスジューサーから発信される音波、周波数105 kHz、パルス幅0.1 msecのビームの指向角を示している。水中を曳航するトッフィッシュのトランスジューサーから発信された音波は、順次時間的にずれながら直下より横方向の海底面を走査し、海底に達すると海底の凹凸や底質の違いに応じた強さの反射波となり、それが順次トランスジューサーに戻ってくる。反射波の強弱は、高密度の底質ほど、また音波の入射波が直角に近いほど強い反射波となる。受信された反射波の強弱は電圧の大小に変換され、ケーブルを介して記録器へ送られ、記録紙上に濃淡表示として出力されるとともに、磁気テープに記録される。1回の送受信によって水平方向1.2°(距離は任意の設定した長さ)の範囲の海底情報を得ることができる。得られた海底情報は電子計算機を用いて、船速による歪み補正や各種の補正を行い、鮮明かつ精度のよい海底地形を表現することができる。

たシルト質の堆積物に符合する。

今回の調査結果からみると、この低速度層(シルト質堆積物)は区域のほぼ全域に分布している。

4.2 調査方法

調査は、離岸堤沖側に離岸堤と平行な3測線(離岸堤よりの距離20m、40m、60m)を選び、調査船でトッ

フィッシュを曳航し、測線上を3ノットの速度で航行しながら音波の発信、受信を行い、音波による離岸堤構造物の水中部分の形状および海底面の情報を記録させた。なお、記録範囲は片側100mに設定して行った。調査船の海上位置の決定は、ソノブローブによる調査と同じ方法で実施した。サイドスキャンソナーで得た画像を立体視するには、入射の異なるビームで作られた2枚の画像が必要であり、この時入射の差が大きければより適切な画像となる。今回の調査では、図-10に示す様にトッフィッシュの位置を変え、また往復調査を行い調査精度を高めるようにした。

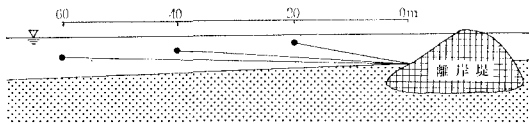


図-10 トッフィッシュからのビーム

4.3 調査結果

サイドスキャンソナーの調査結果のうち、代表区間での水中部分の分布形状を図-11に示している。

この結果をみると、離岸堤の水中部分は概ね7~15mの幅で分布しており、一部の地点でこれから離れたテトラポッドがみられる。離れて分布しているテトラポッドは、最も遠いもので法下から約47mの距離にあり、一部分では法下から沖合4~7mの範囲にまとまって分布している。このように、全域においてかなり全面部に張り出しており、法崩れが一樣に生じていると推定される。

このように、サイドスキャンソナーを利用した調査は浅海域における海洋構造物の面的形状および海底地形をできるだけ正確かつ簡便に把握する手法としては有効

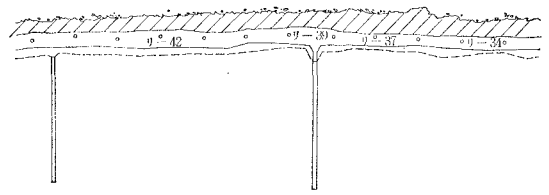


図-11 離岸堤水中部分の分布形状

と思われる。

5. まとめ

離岸堤の埋没形状を推定するため、新たな試みとして孔間弾性波探査法に併用して、サスペンションPS検層およびP波検層を行い解析を試みた。その結果、概略の埋没断面を得ることができた。更に、ソノブローブおよびサイドスキャンソナーを用いて離岸堤沖側の海底面、海底下の調査を行い離岸堤形状を全域に渡って推定することができた。離岸堤の沈下は、前回報告した様にパイピング現象による砂の抜け出しと堤体前面の法崩れおよび洗掘が主因であると考えられ、適切な基礎工および洗掘防止工を施していくことが沈下防止対策として有効であると思われる。今後、2年間の調査で得られた成果を基に、更に検討を加え沈下のメカニズムを明確にし、沈下防止対策工を検討するための基礎資料としていくつもりである。

また、今回の各種の探査法による調査は、個々の手法の特性を利用して海底地形、地質、人工構造物の状況把握等、海面下の多くの情報をできるだけ正確かつ短期的に把握するべく行ったものであり、これらの結果が、より効果的な海岸構造物の埋没形状等の調査手法の確立に資することを期待する。

なお、本調査は新潟県が実施したものである。