

湖岸堤への覆土工による湖岸の環境改善と覆土の安定性

宇多高明* ・小菅 晋**・岡村和男***
本田哲也****・木内秀規*****

1. ま え が き

近年、人々の生活基盤を取り巻く環境の悪化が多くの面より危惧され、環境、特に自然環境の保護を十分行うべきとの声が高まっている。河川事業もこうした流れの中にあり、従来のように治水のみ重視する方法はもはや時代遅れと言わざるを得ず、治水・利水と自然環境とを同じウエイトで考慮すべき状況にある。このような状況下で、広い水面を持つ湖について考えると、例えば霞ヶ浦では水資源の確保のために湖岸に沿ってコンクリート製の湖岸堤がほぼ全周にわたって構築された結果、湖岸水際の生態系の生息にとって最も重要な部分が人工湖岸に覆われて生息状況が低下し、そのことが湖の水質環境にも悪影響をもたらしたことは否めない。このような現状を考えたとき、コンクリート製の湖岸堤の上に覆土を行い、それにより植生の繁茂を促すと同時に、水際線は緩い勾配の砂浜としてヨシなどの水生植生の繁茂を促すことができれば、失われた湖の自然環境の回復に役立つと考えられる。

この場合検討を要するのは、覆土は既設の湖岸堤の沖側で行われるため、従来の自然湖浜と比較してその前面の水深が大きくなることにより、風波の作用がより厳しくなることである。このことは何らかの方法により波浪を減衰させなければならず、しかも覆土の流出を守るため閉鎖性の湖域を造ればただちに水質の悪化を招き、アオコの発生を見ることになる。もう一つの問題は、霞ヶ浦では水資源の調節のために湖水位が波高のオーダーと比較して大きく変化することである。水位の上昇は覆土への波浪の作用を助長し、覆土の安定性の低下を招く可能性がある。本研究では、霞ヶ浦の土浦近傍に位置する大岩田地区に施工された湖岸堤への覆土工の実例を通じてこのような問題について考察する。

2. 観測地域の概要

観測地域のある霞ヶ浦（西浦）は面積 172 km²の湖である。この湖はもともとは汽水湖であったが、現在は下流の常陸川水門により塩水の侵入が防止されている。湖全体は浅く、平均水深は約 4 m、最大水深は約 7 m である。本研究の観測対象地区は、図-1 に示すように霞ヶ浦西部の大岩田地区である。この地区は東西に約 19 km の湖域の西端に位置するから、東風によって発達する風波の作用を強く受ける。霞ヶ浦では基準標高として Y.P. が使われている。ここに、Y.P. ± 0 m は T.P. + 0.84 m に相当し、平水位は Y.P. + 1.0 m に位置する。

3. 湖岸堤への覆土と観測の概要

図-2 は 1995 年 3 月に行われた地形測量の結果を示す。観測区域の南側には花室川が流入しており、この区

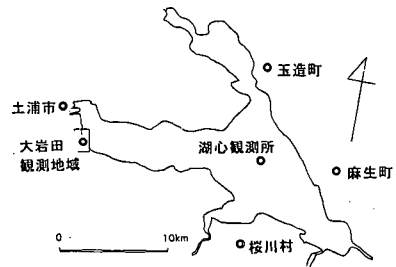


図-1 霞ヶ浦における観測区域と湖心観測塔の位置

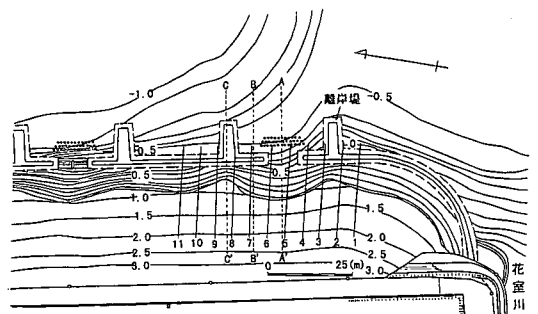


図-2 霞ヶ浦大岩田地区における覆土後の地形

* 正会員 工博 建設省土木研究所 河川管理総括研究官
** 正会員 工博 東海大学助教授 海洋学部海洋土木工学科
*** 建設省関東地方建設局霞ヶ浦工事事務所 調査課長
**** 東亜土木(株) ブロック事業部
***** 古川組(株) 工事課

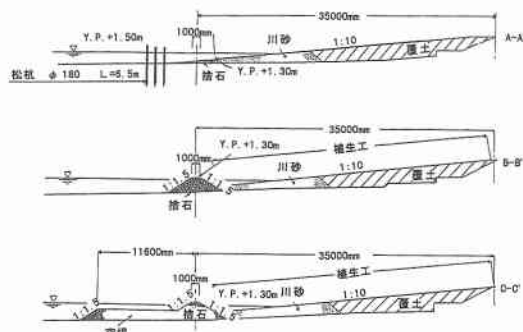


図-3 覆土工と離岸堤の代表断面

域一帯はコンクリート製の湖岸堤であったが、その前面で覆土が行われた。覆土ののり面勾配は1/10の一樣勾配であり、例えば図-2の測線 A-A', B-B', C-C'代表断面形を図-3に示すが、T.P.+1.3 m 以上では土が、またそれより沖側では波による土の流出を防止するために川砂が投入された。そして覆土上の植生の繁茂を助長するため、覆土上では柳枝工が行われた。また、沖合には図-2, 3に示すように離岸堤が設置された。離岸堤の天端高はY.P.+1.3 m, 天端幅は1.0 mである。また離岸堤の沖側には逆T字型の天端高Y.P.+1.0 mの潜堤が造られた。工事は1993年2月26日～1993年11月17日に行われた。

土砂の投入後、波浪の作用により汀線は沿岸方向に波形となった。これは図-2に示したように離岸堤が開口部を持つこと、またこの離岸堤は沿岸方向に一樣な幅を持たず、30 m間隔に逆T字型で設置してあり、その部分では特に消波効果が高いためである。そして離岸堤の背後では、舌状砂洲の発達が助長されていた。本研究では特に図-2に示す東西18 m, 南北50 mの範囲について1995年9月23日に詳細観測を実施した。観測項目は、①沿岸方向5 m, 岸沖方向に2 mピッチでの深淺測量, ②高水位時の痕跡水位, ③浜崖の位置とその高さ, ④湖底の底質調査, ⑤植生状況調査, ⑥写真撮影などである。図-2には測線配置を示す。測線は南側よりNo.1～No.11の順に並んでいる。なお、浜崖と痕跡水位の調査を行ったが、5 m間隔では測定精度が低いため、沿岸方向に2.5 mと測線間隔を狭めて調査した。

4. 写真による現地状況の観察

写真-1は湖岸堤に覆土がなされた地区の北側に隣接する従来型護岸区間の状況である。写真に示すように、堤防ののり面はコンクリートブロックであり、その湖側にはコンクリートテラス、および写真には見えないが、テラスの前面には矢板が打ってある。風波はこの直立の矢板護岸で反射されるため、コンクリートテラスの上面



写真-1 霞ヶ浦大岩田地区における従来の湖岸堤



写真-2 離岸堤の開口部の砂浜とその両側の植生帯

には越波した水がたまっており、また矢板護岸の前面は反射波により乱れた波面となっていた。このような状況では水際付近の多様な生態系が失われたままであり、湖の水質環境にも悪影響をもたらす。そこで既設の護岸の上に勾配1/10で土砂を盛る覆土が行われた。写真-2は覆土の行われた区間の現地状況である。覆土の沖側には風波による土砂の流出を防止するための捨石による離岸堤が造られている(図-2参照)。写真-1の状態と比較して、環境条件が大きく改善されたことが分かる。沖合からの風波は離岸堤の消波効果により多くのエネルギーを失い、また緩勾配の砂浜をなだらかにはいあがるため、写真-1のような越波は起こらない。写真-2の左上上部には離岸堤の一部が見えているが、この離岸堤は幅5 mの開口部を有する。このため開口部からの侵入波は同心円状に広がり、汀線に到達する。開口部の存在は波浪の汀線への侵入を許すから、土砂の流出防止のためには過度なエネルギーの侵入は防止する必要がある。しかし同時に波浪のエネルギーが低すぎると、水質の低下を招き、霞ヶ浦で問題視されているアオコの発生を助長する。このことから、離岸堤の天端高と開口幅については十分な検討が必要とされる。写真-2では前方にマコモを中心とする密な植生群が見られるが、これはその沖にある離岸堤の消波効果が高いことに起因している。一方、写真

中央部では沖合に孤立したマコモの群落はあるものの、汀線付近は波の作用が強いいため植生は見られない。さらに離岸堤の開口部の北側でも植生群の発達が見られた。

5. 湖浜地形変化

5.1 湖浜の地形特性と植生群落

図-4には詳細観測により得られた浅深測量の結果と水位痕跡を示す。離岸堤の天端高はY.P.+1.3mであり湖の平均水面(Y.P.+1.0m)より0.3m高い。観測区域のほぼ中央部には幅約12.5mの開口部があり、そこから波浪が侵入する条件にある。離岸堤の岸側の地形特性として、離岸堤の開口部では全体に等深線がほぼ同心円状となり、逆T字型の部分の岸側では消波効果が著しいため舌状砂州が著しく発達している。また、離岸堤の開口部を通る中心線を引いた時、例えば0.6mの等深線の形状はこの中心線に関して左右対称ではなく、等深線の最も湾入する点は明らかに北側にずれている。このことは、卓越波の入射方向が開口部の中心線方向ではなく、これより時計回りの方向に傾いていることを示している。いま、図示するように、等深線の最湾入点と開口部の中心点とを結ぶ直線PQを引くと、その方向はE9°Sとなる。この方向角は図-1において大岩田地区より東側に最も長い吹送距離となる方向と一致している。

図-4には各測線ごとに基準グイより沖向き距離を測定することにより定めた植生群落の分布も示す。観察されたのは主としてマコモ群落とやなぎたでの群落である。一見して明らかなように、逆T字型の離岸堤の岸側の波浪の静穏な場所で植生群落の発達がよい。離岸堤の開口部の中央よりやや北側にも一部マコモ群落があるが、その範囲は狭い。また、やなぎたでの群落も波浪の作用の弱い舌状砂州部分に見られ、しかもほぼY.P.-0.2mの等深線より岸側に限られている。やなぎたでは一年草であり、日当たりのよい水辺や湿地、または水中に生える(奥山, 1974)が、これも波浪条件との対応が良い。さらに図-4に示す水位痕跡によれば最も高い所でY.P.+1.6mまで水位が上昇したことが分かる。

図-5には代表3断面の湖浜形状と植生群落の分布を示す。断面としては図-2に示したように、南側の舌状砂州の頂部を通る測線No.2、離岸堤の開口部付近の測線No.6、北側の舌状砂州の頂部を通る測線No.9を選んだ。それぞれの測線においては、実測の湖浜断面と推定初期断面形を示すとともに、植生の区分と概略の植生の高さを示した。初期断面形は、①初期湖浜は一様勾配で造られたこと、②波の作用の及ばない十分標高の高い場所と、逆に離岸堤近傍の波の作用下でも湖底地形変化の生じない場所では初期地形が残されていると考えられること、の2点より十分標高の高い場所の湖浜形状と湖底

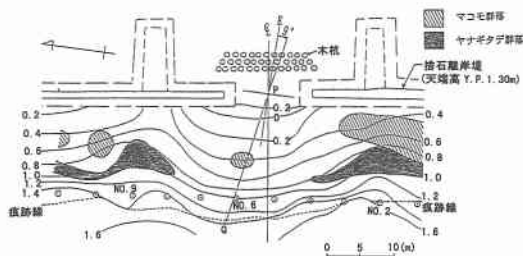


図-4 観測域の浅深図(1995年9月23日測定)と植生群落の平面分布

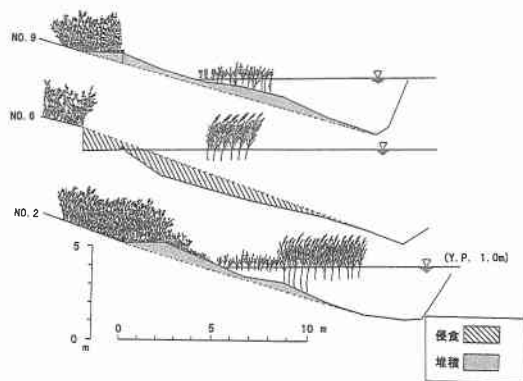


図-5 測線 No. 2, 6, 9 に沿う湖浜縦断面形と植生群落

下の断面形とを直線で近似して定めた。

まず、開口部付近の測線 No.6 では、高さ 28 cm の浜崖が形成され、ここで陸生の植生群落は途切れている。沖合には一部マコモの小さな群落があるが、この断面では大きく侵食されている。一方、測線 No.2 では前浜を中心として最大約 66 cm 厚で土砂が堆積しており、その上に植生群落が繁茂している。開口部を挟んで対照的な位置にある測線 No.9 でも同様な特徴が見られるが、ここでは前浜での土砂堆積厚 53 cm に対して、沖合の水深 95 cm での堆積厚が 67 cm と大きい。すなわち、北側の方が土砂の堆積が著しい傾向がある。これは、既に述べたように、離岸堤の開口部の中心線に対して卓越波の入射方向が時計回りの方向に傾いているため、漂砂の下手側である北側に開口部からの侵食土砂が多く運ばれ堆積したためと考えられる。

5.2 高水位時における波浪による覆土の流出

図-6には観測域での汀線、浜崖の形成範囲と浜崖の高さの沿岸分布、高水位痕跡線を併せて示した。浜崖は開口部にのみ見られるが、その高さの分布形は開口部の中心線に関して南北非対称であり、北側で最も高い浜崖が形成されている。そしてその位置は汀線が最も後退している部分とよい対応を示す。一方、水位痕跡線は汀線

とほぼ平行であって、開口部で最も陸側に入り込んでいる。

以上に述べた侵食の原因について、図-1に位置を示す湖心観測塔の気象データをもとに検討した。湖浜の侵食については、浜崖断面のノッチの形成状況や湖岸に堆積した植生などの浮遊物の新鮮度から判断して、侵食後あまり時間が経過していないことが明らかであったこと、また、9月23日の観測に先立つ9月17日には台風12号が来襲したことから、9月17日以降の観測データに着目し、風向・風速と水位の経時変化を図-7のようにとりまとめた。これによると、霞ヶ浦の水位は9月17日のY.P.約+1.2mより急上昇し、9月18日15時には+1.67mに達したが、その後は階段状の変化を示しつつなだらかに低下した。この階段状の水位変化は霞ヶ浦の下流にある常陸川水門において退潮時に水門が開けられ、上げ潮時に閉じるという水門操作によるものである。一方、風速データは台風通過時に最大風速11m/sが観測され、その後日周期を繰り返しつつ次第に風速は低下した。また風向については、風波の発達に寄与する成分の発生状況を取り出してある。これによると、台風時は陸風でこの地区での風波の発達に無関係であったが、その後、ESE~ENE方向の風が毎日の高風速とほぼ同位相で発生している。ただし図-1に示したように、大岩田地区で高波浪を引き起こす風向はEまたはESE方向であって、ENE方向は吹送距離が短く風波は高くないこと

を考慮すると、侵食の外力となったのは9月18日と22日と考えられる。それぞれの日の水位はY.P.+1.6mおよび+1.4mであり、そこに約6m/sの風が吹いたことがわかる。霞ヶ浦の湖心観測塔のデータについては宇多ほか(1987)が風速・吹送距離より有義波高・周期を算定する推算式を示しているため、それより計算すると、 $H_{1/3}$ は約16cm、 $T_{1/3}$ は3.1sとなる。したがってこれが侵食を引き起こしたと考えられる。また、観測された最高水位は図-3に示した痕跡水位と一致している。

5.3 湖底底質の平面分布

沿岸方向に5m間隔、岸沖方向に2m間隔で採取した底質資料をもとに、測線No.2, 6, 9に沿う岸沖方向の粒度組成をまとめたのが図-8である。開口部に位置する測線No.6では $y=8\sim12$ m間に礫が出現し、その岸側は広く砂に覆われている。これに対して、離岸堤背後の舌状砂州を通る測線No.2では礫はほとんど出現せず、ほとんど砂に覆われているが、北側の測線No.9では汀線近くまで礫が出現している。これは開口部の中心線に対して時計回りの方向より卓越波が入射するため、開口部の北側の汀線付近では波浪の作用が南側と比較して大きかったためと考えられる。このように離岸堤の岸側区域において平面的にみて湖浜材料に大きな違いが見い出されるので、採取資料より①投入した覆土、②シルト、③シルト+砂、④砂、⑤砂+礫、⑥礫の5種類の材料で覆われた範囲に区別した(図-9)。川砂はほぼ様な粒径特性を持つものが投入されたから、図-9の結果は波の作用により底質の淘汰が進んだことを示す。離岸堤の開口部には礫が集中的に現れており、その周囲には砂+礫の範囲が広がるが、開口部の中心線近くのマコモ群落のある場所では局所的にシルト+砂が分布する。これは、マコモ群落の消波効果が発揮されているためと考えられる。この局所的な細粒分の区域を除けば、開口部の中心線に対してその両側に砂+礫の範囲が舌状に伸びている。この分布形は開口部から波浪の侵入が著しい場所と

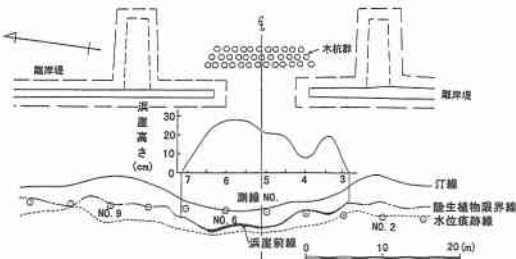


図-6 高水位痕跡線、浜崖の形成限界線および浜崖の高さの沿岸分布

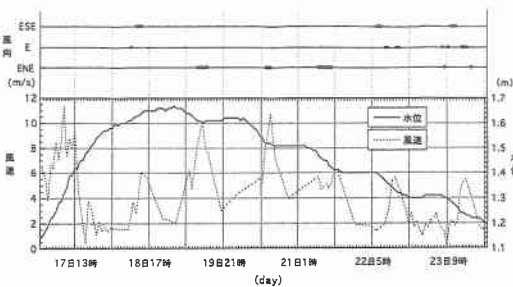


図-7 湖心観測塔における水位、風向風速の経時変化

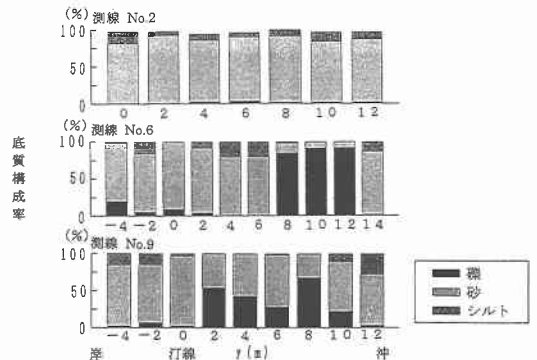


図-8 測線 No. 2, 6, 9 に沿う湖底材料の断面分布

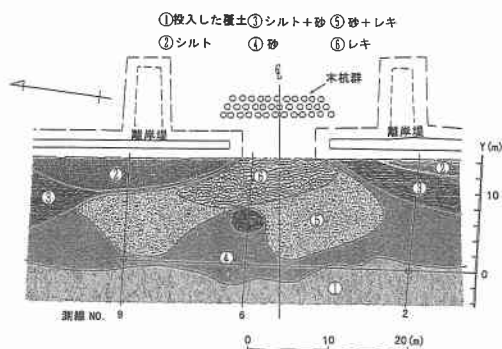


図-9 底質の平面分布

対応する。また興味あることに、舌状の区域は南側に対して北側の方が長く伸びており、明らかに南北非対称であるが、これは図-4に示した等深線図において北側の方が湾入度が大きかったこととも対応している。そしてこれらの点は、離岸堤の開口部中心線に対して反時計回りの方向から卓越波が入射することによりよく説明される。一方、離岸堤の岸側直近にはシルトまたはシルト+砂の範囲が広く伸びているが、そこは図-4に示したように、マコモの群落が見られた場所とほぼ対応している。すなわち波の作用が弱い場所では細粒分が堆積するとともに、そこはマコモの生育環境として望ましいためにマコモの群落形成が助長されたと考えられる。

6. 考 察

観測で得られた最高痕跡水位はY.P.+1.6mであり、この水位は霞ヶ浦の水位が流域での降雨により上昇したときの最高水位とほぼ同一である。最高痕跡水位の見られた場所は離岸堤の背後であり、その場所では小さな浮遊物が直線状に並んでいたことから明瞭に識別された。しかしながら、この付近では植生群落の中に水位痕跡が残されているのみであり、覆土の流出はなかった。一方、離岸堤の開口部では急な浜崖ができたため波浪の陸域への侵入は抑えられていたが、ここでは開口部からの波浪の直接的作用を受けたため、最大28cm厚で覆土の流出が生じた。ここで、侵食・堆積各断面において推定初期

断面からの断面積変化量を求め、測線間隔を乗じると、侵食土砂量は48.0m³、堆積土砂量は43.6m³となる。すなわち侵食土砂量に対して堆積土砂量は約9%小さいが、侵食・堆積土砂量はほぼ均衡している。このことはY.P.+1.3mまでの範囲に投入された川砂が、ほぼ沿岸方向に移動して安定状態に達したこと、つまり川砂の投入範囲は妥当であったことを示す。一方、開口部では土を入れた部分が侵食されているから、この部分では砂の投入範囲が狭かったことになり、今後は離岸堤の消波効果を勘案して覆土の範囲を決めた方が良いと言える。すなわち、離岸堤に守られた範囲では土でもよいが、水交換のため必要とされる開口部では砂浜の範囲を陸側深くまでとする必要がある。ただし、この議論はあくまで天端高Y.P.+1.3mの離岸堤で湖水位が高々Y.P.+1.6mを越えない場合であり、水位がさらに上昇する場合は離岸堤の消波効果が低下するので、さらに陸側まで侵食が進むことになる。その地先の波浪条件は前節で述べたように推算できるので、波浪と水位両者を考えて検討する必要がある。計画する場所が遮蔽されており水位が上昇するのみであれば覆土の流出問題は生じないが、波浪が作用する場所では覆土の流出が危惧されるから、今後においては霞ヶ浦全体において波浪推算を行っておくことが望ましい。

7. 結 論

本研究では、霞ヶ浦での現地実測をもとに覆土工周辺での波浪による土砂流出と、植生環境などについて考察したが、消波のための離岸堤の開口部の岸側の区域では、湖底地形、底質分布、水生植生の分布などが互いに密接な関係を持っていることが明らかにされた。湖の環境保全・保護のためこの種の情報は有効と考えられるので今後も検討を加えていきたいと考える。

参 考 文 献

- 宇多高明・赤穂俊作・今井武雄 (1987): 霞ヶ浦における風波による湖浜変形の実態, 土木学会論文集, 第381号/II-7, pp. 161-170.
- 奥山春季 (1974): 原色野外植物図譜 (3), 誠文堂新光社, pp. 123-124.