

兵庫県淡路島の内田海岸の海岸侵食と越波の原因について

宇多高明*・藤岡憲弘**・藤原謙治***・熊谷健蔵****

1. ま え が き

外海・外洋に面した海岸において防波堤のような波の遮蔽構造物が建設されると、汀線に沿って波の遮蔽域の外側から内側へ向いた海浜流が生じ、これによって周辺海浜で侵食が、そして波の遮蔽域内で堆砂が生じることは一般に広く知られている。しかし、内海・内湾と比較して、外海・外洋に面した海岸への卓越来襲波の周期は長く、また、一般に波浪が十分長い距離を伝播してくるため、海岸線に到達するまでに屈折変形が著しく、したがって汀線への入射角の変動幅は比較的限られている。一方、内海や内湾域で局地的に発達する風波の場合には入射波向の変動幅が大きく、また、一般に海岸線形状が複雑なため、海岸構造物による波浪場の変化が予想もしなかったような隣接海岸の侵食を引き起こすことがある。こうした点より外海に面した海岸とは別の意味で注意が必要である。大阪湾に面した兵庫県淡路島の内田海岸では、近年こうした原因により侵食が進んできている。そこで本研究では、内田海岸の現地データを分析し、内海・内湾における波の遮蔽構造物の建設に伴う海岸侵食について論じるとともに、その対策手法について検討するものである。

2. 内田海岸の概況

内田海岸は兵庫県淡路島の南東部、大阪湾に面する延長約3.5 kmの海岸である(図-1)。内田海岸の南部は由良港の砂嘴に隣接し、友ヶ島水道に面している。由良港の南側には図-1に示すように連続的に岩礁が伸びている。これは太平洋からの高波浪の作用により崖侵食が進んでいることを表している。海岸線の方向は由良港の位置でほぼ直角に曲がり、そこでは内側に内水面を持つ内側に内水面を持つ砂嘴の発達をみる。地形的にみると図-1に示すように洲本～内田海岸の間の海岸線はほぼ北東方向を向いているために太平洋からの波は作用しにくく、大阪湾で発達する風波の作用が主となる。

この海岸での風波の推算のために、図-2には吹送距離の分布を示す。大阪湾の形状により、最もフェッチが長いNEの34.7 km、これにENEの31.7 km、NNEの30.7 kmが続いている。また洲本港の風向風速データをもとにしたSMB法による波浪推算結果を図-3に示す。季節的に見ると、夏季にはNE方向が、冬季にはNNEまたはN方向からの入射波が卓越する。また春、

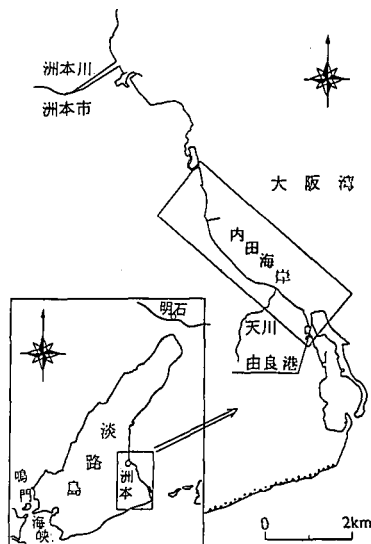


図-1 兵庫県淡路島における内田海岸の位置

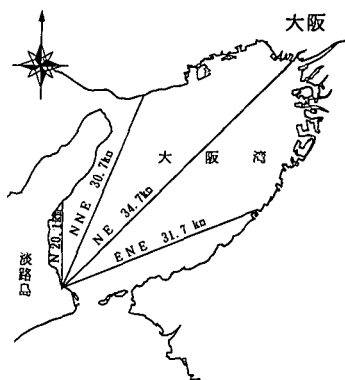


図-2 内田海岸の吹送距離の分布

* 正会員 工博 建設省土木研究所河川研究室長
 ** 兵庫県土木部港湾課課長補佐
 *** 兵庫県洲本土木事務所港湾課課長
 **** 正会員 パシフィックコンサルタンツ(株)大阪支社

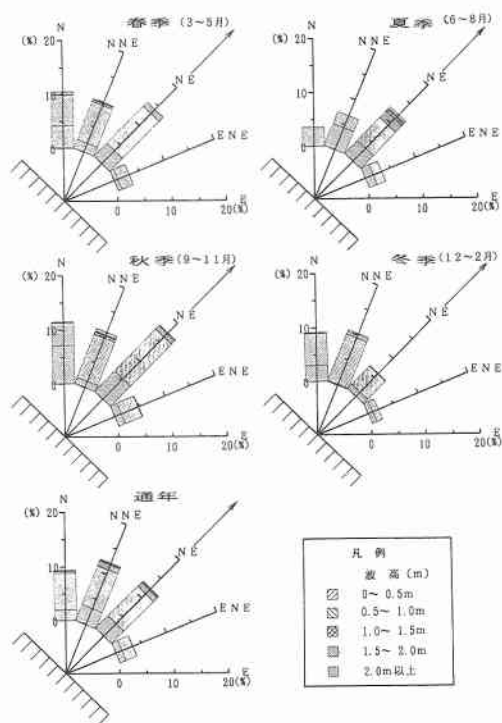


図-3 SMB法による推算波浪の各方向別出現頻度

秋にはNE方向だけでなく、NNEまたはN方向もかなり高い頻度となる。図-3には内田海岸の平均的な海岸線方向も示す。これと入射波の方向を比較すると、全体として南向きのエネルギーフラックスが、そして南側では北向きのエネルギーフラックスが卓越することが分かる。由良港南部より友ヶ島水道を通して北向きに侵入する太平洋の高波浪は北向きのエネルギーフラックスの卓越をもたらす。したがって由良港の砂嘴より北側では南向きのエネルギーフラックスが卓越することになり、この結果由良港の砂嘴には南北両側から漂砂が供給される条件にあると考えられる。

3. 写真による現地海岸の状況把握

写真-1は1991年4月21撮影の内田海岸の全景写真

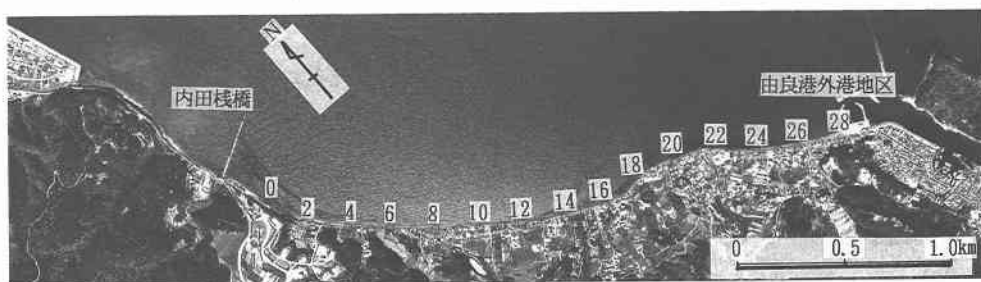


写真-1 内田海岸の空中写真

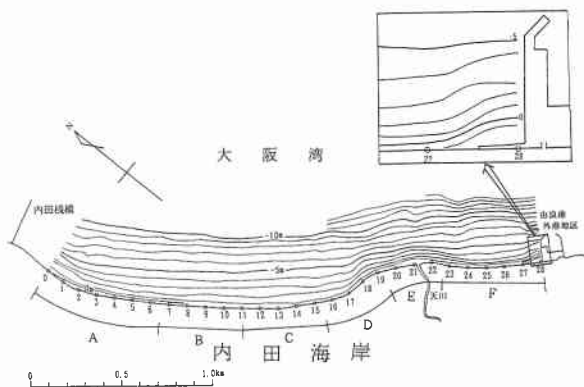
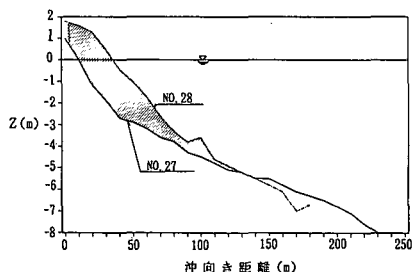


図-4 内田海岸の等深线图 (1994年5月測量)

である。写真には100m間隔で配置された深浅測量の測線番号No.0~No.28も示す。空中写真により主な特徴を判読すると、最も北端には1972年に完成した洲本市の埋立護岸がある。また、この南約800mには土砂の積み出し用の内田棧橋がある。棧橋の長さは約300mであり、そのすぐ南側に内田海岸の起点No.0が位置する。海岸線はNo.0~No.16では直線的であるが、No.17付近で大きく突き出たあと、No.23~No.28では再び直線的となる。No.17付近では海岸線の形状が大きく変わるだけでなく、海岸状況も砂礫浜から消波工で守られた海岸と大きく変わる。

4. 内田海岸の地形変化

ここでは深浅測量データと空中写真による汀線比較を試みる。内田海岸において1994年5月に深浅測量を実施した。結果を図-4に示す。ここで図示するように海岸線を区分する。A, Bは砂礫浜, Cは海岸線は直線的であるが消波工の設置区間, Dは海岸線が突出するとともに消波工が設置されている区間, E, Fには海岸線が再び直線的となるが、それぞれ消波工を持つ区間、および消波工なしの区間である。全体にA~C区間では等深線が沿岸方向にほぼ平行に伸びており、0~10m間の海底勾配は約1/40である。これに対し、D, EおよびF区間の一部では-6m以浅の等深線が大きく突き出し、例えばNo.

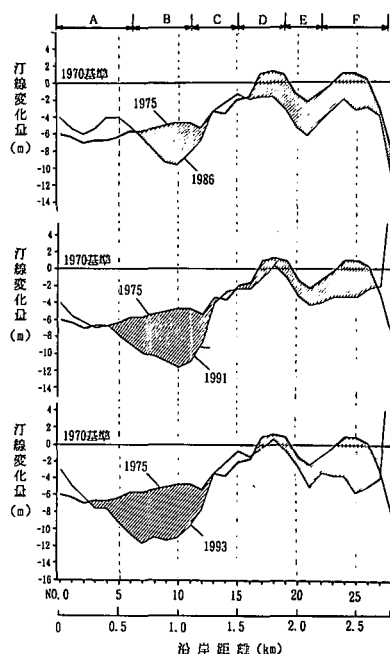


図一五 由良港外港に隣接する測線 No. 26 と No. 27 の断面形の重ね合わせ

20 付近での海底勾配は約 $1/20$ と急になる。一方、由良港外港の防波堤の北側隣接部では土砂が堆積しており、拡大図に示すようにほぼ -4m 以浅の等深線が突出している。等深線の突出は No. 27～No. 28 で大きい。

ところで、No. 26～No. 28 では、 -5m 以深の等深線が沿岸方向に直線的に伸びていることを考慮すると、外港防波堤建設以前には -5m 以浅の等深線も沿岸方向にほぼ一様であったと考えられる。この時、No. 28 の変形前の断面形状は隣接の No. 27 とほぼ同一であったと推定されるので、両者の断面形の重ね合わせを行うと図一5 となる。これによると、地形変化は陸上の約 1.5m より -4.5m の間で生じ、波による地形変化はほぼ -4.5m で見られなくなる。このことは地形変化の限界水深はほぼ -4.5m にあることを示している。さらに図示するように変化が生じたと見られる範囲の海浜断面積は $\Delta A = 170\text{m}^2$ 、見かけの汀線変化量 (Δy) は $\Delta y = 31\text{m}$ となる。 ΔA と Δy の回帰係数は漂砂の移動高 (h) に等しいので、ここでは $h = 5.5\text{m}$ となる。

次に、空中写真の比較による汀線変化について調べてみる。図一六には、1970 年を基準としてそれより 1975 年、1986 年、1991 年、1993 年までの汀線変化量を示す。もともと前浜幅は狭かったので、他の外海に面した海岸での汀線変化と比較すると変化量の絶対値自体は小さい。しかし、経年的に汀線の後退が続く特徴がいくつか見られる。1975 年までの変化では、No. 17 以北の区域で汀線後退が目立っており、しかも汀線の後退量は北側ほど大きい。図一四に示したように、No. 17～No. 20 の範囲は海岸線が大きく突き出ているから、以上の特徴は、No. 17 以北での汀線が単調に後退したことを表している。しかも北側ほど汀線後退量が多い点は、南向きの沿岸漂砂により沿岸漂砂の上手側で汀線後退量が大きかったことを示している。また、No. 28 付近では、汀線後退が著しいが、No. 17 以北での汀線後退によって生じた土砂も含めて土砂量の欠損が大きいことから、この当時 No. 28 を通過して由良港方面へと沿岸漂砂が流出していたと考えられる。1986 年までの変化では、1975 年と比較して新た



図一六 1970 年を基準とした内田海岸の汀線変化

に No. 7～No. 13 で集中的な汀線の後退が始まるとともに、No. 18 以南でも汀線の後退が著しくなった。No. 17 以南での汀線後退は沿岸方向にほぼ一様に近いのに対し、No. 7～No. 13 の間では No. 10 でピークを持ちつつ集中的に侵食が進んだこと、そしてその両側の No. 7 以北と No. 14 付近では逆に汀線が前進したことが特徴である。1991 年になると、1986 年において No. 7～No. 13 の間で見られた汀線後退域が北側へ広がり、No. 5～No. 13 の間で大きく汀線が後退した。この場合も汀線が最も後退した位置は No. 10 にあるが、ここより北側区域での侵食が大きく進んだ。一方、No. 28 付近では汀線の著しい前進が見られる。これは 1989 年に由良港外港の防波堤が建設され、それによって沿岸漂砂が阻止されるとともに、新たに波の遮蔽域が形成されたことにより土砂が堆積したものである。同様な傾向は 1993 年になっても続く。No. 3～No. 13 の間では 1975 年より最大で 6m 汀線が後退するとともに、1991 年と比較して汀線が大きく後退した区域がさらに北側へと広がり、No. 7 付近でも大きな後退を示す。これと対比的に No. 3 以北では汀線が前進している。結局、内田海岸での汀線変化の特徴は次の 2 つに要約される。

① No. 3～No. 13 の間では少なくとも 1986 年以降汀線の後退が著しくなり、汀線の著しい後退域が No. 10 付近より No. 7 付近へと北側へ広がったこと。これに対し、No. 3 以北の汀線、および No. 13～No. 16 付近では汀線が同じ時期に前進傾向を示したこと。

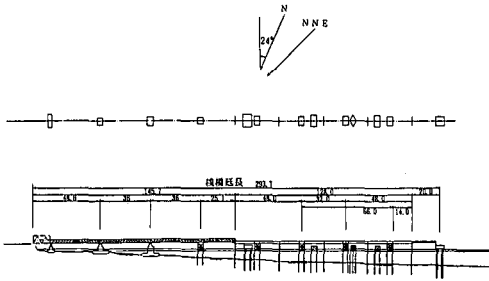


図-7 内田棧橋の形状

② No. 23～No. 27 では経年的に汀線が後退し、逆に No. 27～No. 28 では汀線の著しい前進を示したこと。

これらの2つの特徴とも汀線変化量の絶対値そのものは大きくないが、経年的に侵食または堆積が一方的に進んだことが特徴である。②については、由良港外港の防波堤の建設後生じたことから防波堤の延伸により南向きの沿岸漂砂が阻止されるとともに、防波堤による波の遮蔽効果に起因して生じた汀線変化と考えられる。前出の写真-1と方向別の波の出現頻度分布図(図-3)を見ると、A区間の北側には内田棧橋が位置し、NまたはNNE方向からの入射波に対しかなりの波の遮蔽効果を持ちうる可能性が指摘される。この棧橋の建設時期は1986年であるから、No. 3～No. 13での汀線後退の開始時期と一致している。またこの棧橋は図-7に示すように沖側150m間は5～20m間隔、陸側150m間は約40m間隔の橋脚で支えられている。橋脚の間隔はこの海岸へ入射する。

3.7s～4.0sの波の沖波波長に比べると長いので著しい波の遮蔽効果は発生しないように思われるが、このピアに対し、それぞれN及びNNE方向から波が入射すると考えて遮蔽率を求めると、棧橋全長に対し沖側150mではNが53%、NNEが78%、そして陸側150m間はNが16%、NNEが21%の遮蔽率となる。いま、N、NNE方向からの波が棧橋によって完全に遮蔽されと考え、卓越波としてN、NNE方向よりそれぞれ3.7s、4.0sの波を入射させて不規則波($S_{max}=10$)計算により波高比分布を求めると図-8、9となる。これらによると、Nからの入射条件の場合、No. 3以北の波高比は約0.6以下、またNNEからの入射条件の場合には約0.8以下とかなり小さくなる。このことは内田棧橋に対しNまたはNNE方向からの入射波によりNo. 3以北で波の遮蔽が起きて離岸堤と同様な効果が生じ、これによってNo. 3～No. 13の土砂が北向きに移動した可能性が大きいことを表している。この棧橋は、海岸線とほぼ直交する方向からの入射波に対しては波の遮蔽効果は小さいが、海岸線とほぼ平行方向から入射する波に対しては著しい遮蔽効果を発揮したと推定されるからである。しかも、大阪湾で

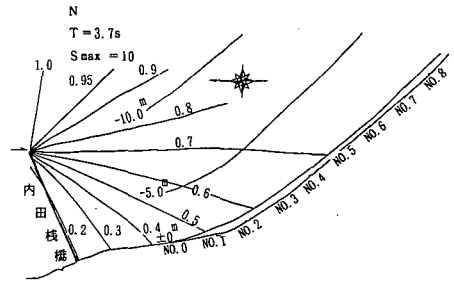


図-8 内田棧橋の持つ波の遮蔽効果(入射方向N)

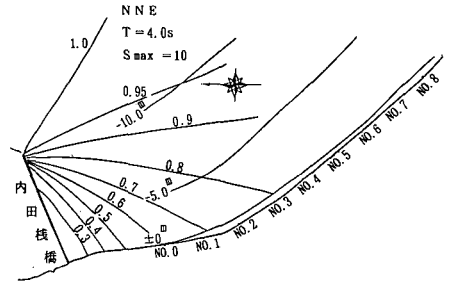


図-9 内田棧橋の持つ波の遮蔽効果(入射方向NNE)

は湾内で発達する風波はフェッチが限られているから周期が短く、このため浅海地形によってもあまり屈折効果が出ず、これによって棧橋の遮蔽効果が強調されたと考えられる。

5. 内田海岸の越波の特徴

内田海岸ではしばしば越波が生じる。1994年9月29日の台風26号時にはNE～NNE方向の風が続いたために、No. 0～No. 11及びNo. 16～No. 28の範囲で著しい越波に見まれた。したがって内田海岸では越波対策が必要とされるが、この場合あまりに局所的な見方では問題の重要性を見失う恐れがある。そこで宇多(1994)の方法をもとに、越波に関係すると思われる諸量を選び、その沿岸分布を図-10にとりまとめた。まず、汀線への法線の方法は、No. 3～No. 13及びNo. 22～No. 28の広い範囲でENEまたはNE方向となっており、この方向からの入射波により広い区域で越波が問題になり易いことがわかる。しかし、No. 17～No. 19にはNNE方向の波の影響を強く受ける狭い窓がある。次に-5mと-2mの等深線までの沖向き距離の分布は、No. 17付近で大きな違いを示し、No. 17より北側では長く、南側の特にNo. 18～No. 24の間では短くなっている。このことは、この範囲では波のエネルギーがあまり減衰せずに岸近くまで到達することを示している。さらに護岸前面の前浜幅は、No. 0～No. 10の中央部では広いが、No. 10～No. 12で非常に狭くなったあと、これより南側ではNo.

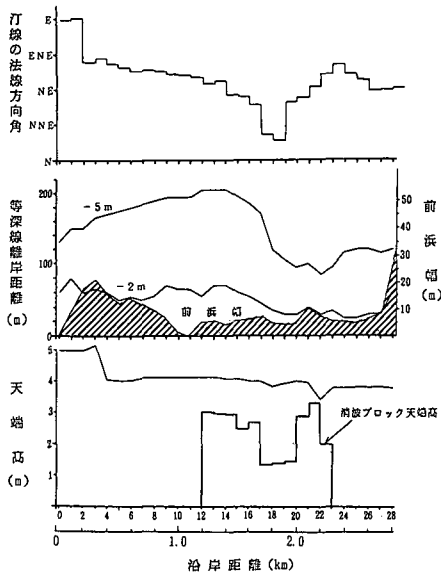


図-10 汀線への法線方向角、-2mおよび-5mの等深線距離、護岸天端高の沿岸分布

27~No. 28の一部区間を除き、平均約6mとなる。護岸天端高は、No. 4以北では約5mと高く、No. 4~No. 21では約4mであるが、それより南側では3.4~3.8mと低くなる。以上を考え合わせると、No. 18~No. 23付近では護岸の天端高もあり高くなく、かつ沖合も急深なために波の入射方向によっては著しい越波が生じることがわかる。また、同じような海岸状況を示していても、それぞれの地先での越波をひき起こす条件は少しずつ異なるので、その対策においては図-10に示した諸量についての十分な検討が必要である。

6. 越波対策について

内田海岸のNo. 3~No. 13の区間では侵食により汀線が後退して護岸の堤脚水深の増大が生じ、このため過去に比較して越波が激しくなっている。この場合、海岸環境の改善を図ると同時に越波対策にも役立たせる目的で養浜工を行っても、養浜砂の大部分は再び北側へと流出してしまう可能性が大きい。なぜなら、内田棧橋が存在し、それによる波の遮蔽効果は今後も続き、またそれに合わせた安定な海浜形状が形成されるには長い時間を要すると考えられるからである。その場合、北向きの漂砂の流出防止のために、No. 3付近にヘッドランド又は突堤を造るとともに、全体として緩やかに南向きに流れる漂砂をも止めるためにNo. 13付近にも同様な施設を造り、これらにより養浜砂の沿岸方向の流出を防止することが必要である。その場合、すでに図-5の海浜縦断面図に示したように、先端水深が約4.5mの突堤状構造

物であれば、汀線は約30mの前進が可能である。実際にはここまで先端水深が深くなくとも3m程度にすれば一部の土砂の流出はあってもかなりの土砂流出を阻止できると考えられる。漂砂の阻止率は、図-5の全断面積変化量に対する-3m以浅での断面積の変化割合で近似的に与えられる。同様にNo. 27~No. 28では現況でも前浜が形成されていることを考慮すると、No. 24~No. 27の範囲で養浜を行えば前浜の拡幅が可能と考えられる。ただし由良港外港の港口への土砂堆積を助長しないかどうかの検討が必要である。一方、地形的に見て海岸線が著しく突出するNo. 17~No. 23では養浜を行うことは事実上不可能である。ここでは通常の消波工があるいは人工リーフなどの消波構造物により消波を行うことが望ましい。

7. 結 論

本研究の主要な結論は以下のとおりである。

① 内田海岸での近年の局所的な汀線後退は、この海岸の北方にある土砂積み出し棧橋のもつ波の遮蔽効果により離岸堤と同様な効果が発揮され、それによって静穏域への漂砂移動が生じたためであることが分かった。湾内では外洋に面した海岸と異なり、短周期で、海岸線と大きな入射角をもつ波が発生する。そしてそれらのある方向角の波が強く遮蔽されることになったことが侵食の原因となった。したがって内海や内湾の海岸にこの種の構造物を造る場合には、外海に面した海岸とは違った意味で注意が必要である。

② 由良港外港の防波堤隣接部での海浜縦断面の場所的変化により、当海岸の波による地形変化の限界水深が約4.5mにあること、そして漂砂の移動高が5.5mであることが分かった。

③ 内田海岸は海岸線が大きく湾曲しているが、この海岸の海岸線への法線方向、汀線幅、-5、-2m等深線の形状の沿岸分布を調べたところ、越波特性から見たその地先の最も弱点となる波の方向角が明らかになるとともに、今後の対策として養浜による前浜の拡幅により消波効果を高められる場所と、従来型の消波工または人工リーフなどの消波構造物により守らなければならない場所が明瞭に区分された。

本研究を進めるに当たり、洲本市開発課の赤澤保守氏(当時)、田中敏彦氏に多大なる御協力をいただいた。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

宇多高明 (1994): 現場のための海岸Q & A 選集 (社) 全国海岸協会, 236 p.