

苫小牧西港防波護岸の越波に関する現地観測

伊 藤 博 信*・ 森 木 亮**・ 佐々木秀郎***・ 永 井 豊****

1. はじめに

苫小牧西港港口部に位置する防波護岸は年に数回、高波の来襲時に相当量の越波が生じている。

当地の越波は、過去の発生事例を見ると有義波波高が2.5 m 以上で、かつ有義波周期が10秒以上であることが多く、うねり性の波の時に発生しやすいのではないかと考えられる。一方、越波現象については、模型実験によりいくつかの知見が得られているものの、実際の海域において不規則波が入射する場合についてはあまり検討されていない。特に浅海域においてサーフビート等の長周期性の水位変動が越波に及ぼす影響については未だ解明されていない。

本報告は、これら課題に対する基礎資料を得るために現地での越波状況及び波浪の観測を行い、各課題に対して若干の考察を試みたものである。

2. 現地観測

2.1 概 要

越波の観測を行ったのは、苫小牧西港港口部に位置するケーソンヤードの護岸である(図-1)。

護岸前面に波高計を配置して波浪観測を行うとともに、越波時にはビデオ撮影を実施して越波状況を記録した。観測期間は、平成2年8月29日から11月8日までの

2か月間である。図-1に護岸前面の深淺図(平成2年度測量)、護岸の断面図、及び観測機器の配置を示した。波浪観測は4地点に水圧計付電磁流速計(以後は便宜上波高計と呼ぶ)を設置して実施した。各波高計は同期して観測を行った。St. 1~St. 3の波高計の間隔は、護岸よりそれぞれ90 m, 120 m, 360 m 離して設置した。St. 4は、護岸と平行方向の拡がりをとらえるため、St. 2から120 m 離して設置した。

ビデオ撮影は護岸背後のケーソンヤード操作室(二階建)屋上及び特設ヤグラ(地上高10.5 m)より行った。

この他、西港港口部から東に約7 km 離れた勇払地区の沖合(水深24.5 m)に設置されている波高計のデータも検討に用いた。また、本文中で用いる潮位は西港港内の検潮所で測定したものである。

2.2 観測結果

全観測期間を通じての各地点の波向別波高出現頻度を図-2に示す。波向についてみると、St. 3ではS, St. 1及びSt. 2でSSE, St. 4ではSSWが卓越しており、護岸のほぼ中心に向かい波が収斂している状況を示している。これは図-1に示した等深線の水深6 m 線の形状で明らかのように、海底地形に起因している可能性がある。

観測期間中、11月5日午前10時前後に最大規模の越波を観測した。越波発生前後の現地の波高、及び潮位を

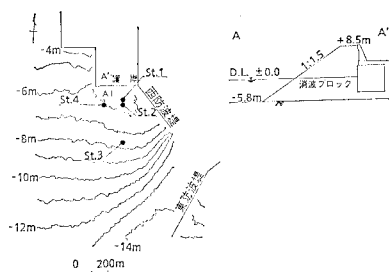


図-1 越波観測位置

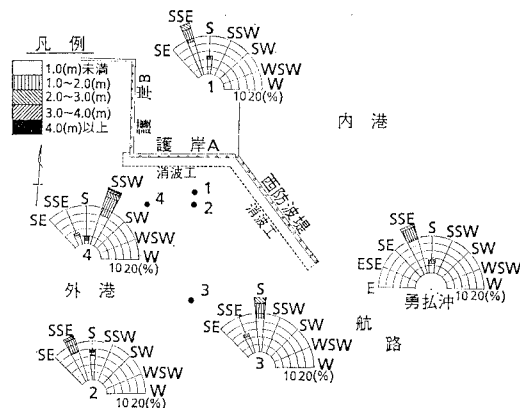


図-2 波向別波高頻度表

* 正会員 工修 北海道開発局港湾部港湾計画課調査係長
 ** 正会員 工修 北海道開発局苫小牧港湾建設事務所第2計画課調査試験係
 *** 北海道開発局港湾部港湾建設課開発専門官
 **** 正会員 工修 北海道開発局苫小牧港湾建設事務所長

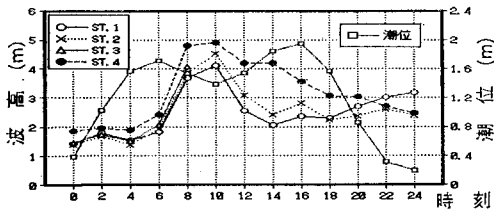


図-3 越波時の現地の海象 (11月5日)

表-1 越波時の波浪諸元 (11月5日10時)

地点	H_{max}	T_{max}	$H_{1/3}$	$T_{1/3}$	波向	備考
3	4.94m	12.5s	4.08m	12.4s	184°	8時の値
2	5.80m	14.0s	4.32m	12.7s	—	波向欠測
1	5.01m	10.0s	4.11m	10.9s	140°	
4	6.10m	13.0s	4.81m	12.6s	194°	

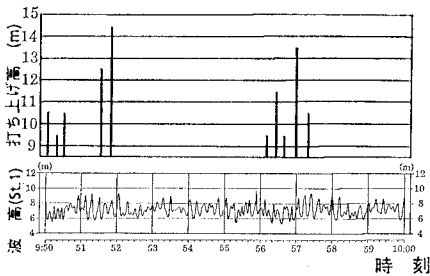


図-4 越波の打ち上げ高と St. 1 の波高 (11月5日10時)

図-3 に、また10時の波浪諸元を 表-1 に示した。現地の波向は、全期間の場合 (図-2) と同じく護岸に収斂する傾向が見られた。

越波は護岸の中央部から西側にかけての部分で多く発生した。9時50分から10時00分までの護岸中央部での越波の発生状況・打ち上げ高さを、ビデオ撮影記録より読みとったものを、同時刻の St. 1 の波形と併せて 図-4 に示す。このうち、最大規模の越波 (胸壁天端上 6m, 幅 30m 程度) が9時51分に認められた。

なお、9月28日には有義波波高 2.5m 以上、同周期 6 秒の風波性の波浪が観測されたが、飛沫が風で護岸を越してくる程度で、越波には至らなかった。

3. 地形的要因の検討

3.1 概 要

当地のような浅海部に位置する護岸の越波を考える場合、詳細な地形に基づく波の変形を考慮しなければならない。2. でも示したように、護岸前面の等深線は沖方向に凸となっており、波の屈折による収斂で波高の増大が起きている可能性がある。また、観測位置付近には西防波堤が存在し、その反射による波高の増大が考えられ

る。このため、数値波動解析法を用いて護岸前面の波高の分布を計算した。さらに、この計算結果を基に越波量等を算定し、地形的要因の越波現象への影響を検討した。

3.2 数値波動解析

地形的要因として海底地形の影響と西防波堤の反射を想定し、これらの影響を計算した。海底地形については、昭和54年度測量の深浅図 (図-5) には等深線の凸形状が見られなかったため、これを対照例に用いた。計算ケースの内訳を表-2に示す。この中で、現地条件に近い設定のケース2の波高比分布を図-6に示した。波高比が大きくなるのは護岸中央から西端の範囲で、実際の越波状況に対応している。また、一般に隅角部では波高の増大が起るものとされているが、護岸と西防波堤基部のなす隅角部では特に増大はない。これは、波向Sの場合には東防波堤の回折範囲に入るためと考えられる。

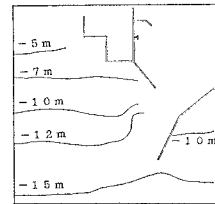


図-5 深浅図 (昭和54年測量)

表-2 計算ケース

ケース	波浪条件等	
	波向 S, 周期12秒 反射率: 直立壁0.8, 消波工0.5	
ケース	深浅図	西防反射率
1	昭和54年度 (図-5)	0.5
2	平成2年度 (図-1)	0.5
3	〃	0.0

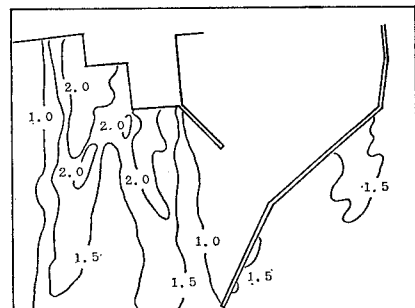


図-6 波高比分布 (ケース2)

計算結果を基に入射波・反射波・合成波による護岸前面の波高比を求めたものが表-3である。波高比の算定は、護岸全延長×50m の範囲で平均して求めた。この結果によれば、平成2年度の深浅図を用いたケース2の

波高比は、昭和54年度のそれを用いたケース1に比べて約4割ほど大きい。また、西防波堤の影響は、無視できる範囲であると思われる。

表-3 地形の影響と波高比

ケース	深浅図	西防反射率	波高比	備考
1	昭和54年	0.5	1.14	合成波
2	平成2年	0.5	1.60	合成波
2と3の差	〃	—	0.13	西防反射波

さらに、数値波動解析の有効性を検証するために、計算で求めた波高と、実測波高の比較を行ったものが表-4である。比較の対象としたのは11月5日10時のSt.1~St.4の値である。入射波の波高には西港港口部における換算沖波波高を用いた。この結果によれば、平成2年度の深浅図を用いたケース2の現状再現性は良く、計算は有効であると考えられる。

表-4 計算波高と実測波高の比較

		St. 1	St. 2	St. 3	St. 4
$H_{1/3}$ (m)	ケース1	2.2	2.8	3.2	4.6
	ケース2	4.8	4.4	4.8	5.9
	実測値	4.1	4.3	(4.1)	4.8
H_{max} (m)	ケース1	2.9	3.8	4.3	6.2
	ケース2	6.4	5.9	6.4	7.9
	実測値	5.0	5.8	(4.9)	6.1

注) 括弧内は8時の記録

3.3 越波量等の検討

合田ら(1975b)の方法で護岸前面の換算沖波波高から越波量を算定した。沖波から西港港口部までの屈折は既存の資料(苫小牧港湾建設事務所, 1983)に、西港港口部から護岸前面までの屈折・回折計算は3.2の結果による。11月5日10時の越波量を推定すると、平成2年の地形で $2.7 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m}/\text{sec}$ 、昭和54年の地形で $7.0 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m}/\text{sec}$ であった。今回の観測では越波量の観測は行っていないため、この結果を直接に実測値と比較することはできない。しかし、福田ら(1973)によれば、越波量と安全度は表-5に示すような関係があるとされている。これによれば、海底地形の影響がない場合でも、仮に背後が道路ならばかなりの危険性が生じる程度の量の越波が発生する可能性がある。

表-5 越波量と安全度(福田ら, 1973)

条 件	単位: $\text{m}^3/\text{m}/\text{sec}$	
	50%安全度	90%安全度
護岸のすぐ背後を人が危険なく歩行する	2×10^{-4}	3×10^{-5}
護岸のすぐ背後を高速で自動車が通過する	2×10^{-5}	1×10^{-6}
護岸のすぐ背後で家屋が安全である	7×10^{-5}	1×10^{-6}

なお、近藤ら(1983)の図表を用いて打ち上げ高の算定も行った。11月5日10時の場合、実測値が9~14.5mであるのに対し、護岸を消波構造の斜面と考えた場合の推定値は5.6~6.2m、滑らかな斜面と考えた場合の推定値は11.6~12.8mとなり、滑らかな斜面と考えた方が適合するという結果となった。ただし前者は透水性の傾斜堤に関する推定であり、非透水性の護岸への適用は不適当である可能性がある。

以上、3.の結果を総合すると、海底地形による波の収斂によって護岸前面の波高は4割程度増大するが、この増大がなくてもかなりの越波が起こる可能性が示された。また、西防波堤の影響は小さいことが示された。

4. 波浪周期と護岸の反射率

4.1 概 要

一般には護岸に消波工を設置すれば、波浪が減勢され越波量が減少することが期待できる。しかし当地の越波状況を観察すると、風波性の波が入射した9月28日には消波ブロックの間で波が飛沫となって砕け散る様が観察されたが、うねり性の波が入射した11月5日には、波が消波工の位置でも砕けず、かえってブロックが高く積まれた位置で大きな越波が起こるように見受けられた。このため、1.で述べたうねり性の波に対する越波の発生しやすい原因は、消波工の減勢効果の低下にあるのではないかと考えた。以下では消波工の減勢効果の目安として護岸の反射率を検討した。まず現地波浪観測の波形より入反射波を分離し、次に反射率を計算して周期と反射率の関係を調べる。この結果、周期により反射率に大きな違いがあれば、数値波動解析法の反射率設定を修正して越波量を再計算するものとする。

4.2 入反射波の分離

浅海域における波の非線形性を考慮し、当初は疑似非線形長波理論(久保田ら, 1989)を用いて入反射波の分離を試みたが、安定した結果が得られなかった。以下には線形長波理論(Guza et al., 1984)を用いて分離した結果を示す。波の進行方向としては岸沖方向(護岸と垂直)のみを考え、各St.で測定した流速の岸沖成分と波高の時系列から入反射波を分離した。

護岸前面に位置するSt.1, St.4における、11月5日10時の入反射波の分離結果を図-7に示す。ビデオ撮影より読みとった波の打ち上げ高も再掲した。

St.1では入射波の中に振幅約50cm、周期約2分のサーフビートが認められたのに対し、St.4では特にそのような結果は認められなかった。一方、反射波については入射波高に対応した結果となっており、両地点の間で特に明確な差は認められなかった。

越波状況と比較すると、上記のサーフビートに加え入射波及び反射波がともに大きいときに越波するようであ

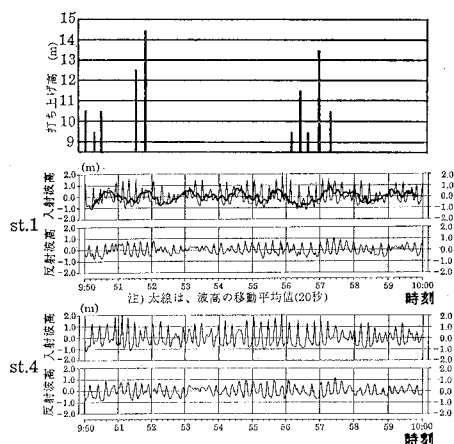


図-7 入射波の分離

るが、その傾向は一様ではない。

4.3 反射率の算定

2通りの方法で反射率を計算した。

一方は、分離した入射波の波形からパワースペクトルを計算し、その比の平方根を反射率とするものである。結果の一例を図-8に示す。

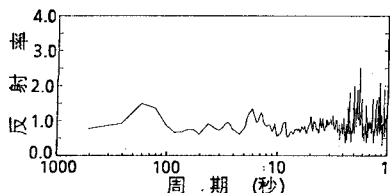


図-8 スペクトルから求めた反射率 (11/5, 10時, St. 1)

計算結果はノイズ等のため不安定なものとなったので、ここでは傾向のみ検討する。全ケースともほぼ5秒前後で反射率が最も小さく、周期が大きくなるに従って反射率も大きくなっていった。

もう一方は、入射波の波形を通常の波浪波形と同様に処理して有義波を計算し、入射波の波高の比を反射率とするものである。入射波の周期の平均と反射率の関係をプロットしたものを図-9に示す。長周期の波が出現したときに反射率は大きくなっているようである。これは各地点とも同様の傾向を示していた。

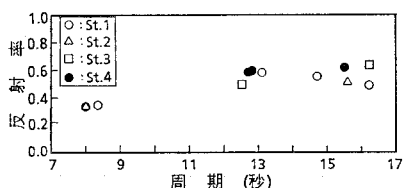


図-9 波の周期と反射率の関係

St. 1 の波形から計算された反射率は 0.35~0.58 となる。越波の発生した11月5日10時の反射率は 0.58 であった。これは一般に考えられている異形消波ブロックの反射率の範囲とほぼ同じであるため、数値波動解析法による検討は行わなかった。ただし、この時の10分間の観測中の総波数57波のうち10波までが越波していたため、越波しなかった波の反射率はこれより大きいと考えられる。

5. 水位の変動

5.1 概要

越波状況を観察していると、護岸到達前に砕波の発生が認められる。一般に、砕波領域以浅では平均水位の上昇が起こるとされており、この上昇が越波の発生に関与している可能性が考えられる。また、4.2 で述べたように、St. 1 の波形にはサーフピートの存在が示されており、これも越波に関与する可能性がある。これら波浪に起因する水位の変動について若干の検討を試みた。

5.2 平均水位の変動

合田 (1975a) によれば浅海域における平均水位は波浪の影響を受け、砕波領域以深では低下し、以浅では上昇するとされている。まず、砕波等の波浪変形過程を間接的に検討するため、現地波浪のパワースペクトルを計算した。結果を図-10に示す。

図-10 現地波浪のパワースペクトル

9月28日のエネルギーピーク値は、各点ではほぼ同一であり、地点間での波浪変形量は少ないと考えられる。これに対し、11月5日の St. 1 と St. 2 を比較すると、St. 1 のエネルギーは半分以下になっており、これは砕波していることを表していると思われる。なお、11月5日のスペクトルでは200秒付近に一つのピークが認められる。これはサーフピートの存在を示すものと考えられる。

次に現地波浪観測の波形から平均水位を計算した。11月5日の観測について、波高計の波形から各観測回の平

均値を算出し、潮位を引き去ったものを平均水位とし、図-11に示す。波高の上昇とともに平均水位は低下しており、St. 1, St. 4の低下量はSt. 2より大きいようである。St. 3の低下量は最も大きい、8時の観測以降に計器転倒で欠測しているのもその信頼度はあまり高くない。

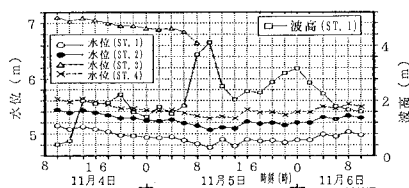


図-11 平均水位の変動

この結果からは、St. 1~St. 4は全て砕波領域以深にあって、平均水位の低下が起きているのではないかと考えられる。この場合、St. 1より岸側に砕波領域があり、それより岸側では平均水位の上昇が起きていると推定されるが、今回の調査では観測機器を設置していないため詳細は不明であり、越波量への影響は計算していない。

スペクトルから推定した砕波領域と平均水位から推定したそれは異なるが、今回の調査からは、どちらがより適切に実態を表すかは判断できなかった。

なお、合田(1975a)の算定図で求めた11月5日のSt. 2の水位変化は約+10cmであるが、実測値は約-30cmであり、実測値と推定値は大きく異なる。上記の研究は自然海浜を対象にしており、この違いには、護岸の反射による重複波の発生等が関係しているのではないかと考えられる。

5.3 サーフビートの検討

4.2で述べたように、St. 1の波形には振幅約50cm、周期約2分のサーフビートが存在する。3.3で示した方法で、水位が50cm上昇したときの越波量を計算すると $7.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m}/\text{sec}$ (平成2年度地形)となり、約2.6倍の量になる。

なお、合田(1975a)が観測結果から提案した関係式によって11月5日10時のSt. 1のサーフビートの大きさを推定すると約22cmと実測値より小さかった。これについては、5.2と同じく、護岸の反射による重複波などの影響があるためと考えられる。

6. 結 論

検討の結果をとりまとめると次のようになる。

(1) 護岸前面の波の変形を検討した結果、西防波堤

による波の収斂は小さいが、護岸前面の海底地形による波の収斂で4割程度の波高増大があることが示された。

(2) (1)の結果に基づき合田(1975b)の図表で越波量を推定すると、一般にかなり大きいと言える量になる。しかし波高増大のない場合でも、なお相当の越波量が存在する可能性も示された。

(3) 打ち上げ高を既存の傾斜堤の結果と比較すると、消波ブロック堤より滑な斜面堤の結果に適合した。

(4) 護岸の反射率は波の周期が長いときに大きくなる傾向が見られた。ただしその変化は一般に考えられている範囲を越えなかった。

(5) 護岸前面で波浪変形に伴う平均水位の上昇が起きている可能性を間接的に示す結果が得られた。また、観測された平均水位の変化は合田(1975a)の導いたものとはかなり異なっていた。

(6) 護岸直近の波浪観測点の入射波には顕著なサーフビートが存在した。これは合田(1975a)の観測結果より大きいものであった。この振幅を水位に加えると、推定越波量はかなり増大した。

以上、当護岸の越波は、地形要因以外に水位上昇等が関与して発生している可能性を示した。今回観測でこれら要因の寄与度を全て明確に定量化することは出来なかったが、今後、防波護岸の設計において平均水位の上昇、サーフビートといった長周期性の要因を考慮していく必要があるものと思われる。

最後に、今回の研究にあたって尾崎 晃北海道大学名誉教授を委員長とする苫小牧港海域調査検討委員会の多大なる協力を受けたことに深く感謝する。また、現地観測と数値解析を担当した北日本港湾コンサルタントの桑原伸司氏に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 久保田進・水口 優・堀田新太郎・竹澤三雄(1989): 現地遡上域における反射波の特性, 第36回海岸工学講演会論文集, pp. 119-123.
- 合田良実(1975a): 浅海域における波浪の砕波変形, 港研報告, 14巻, 3号, pp. 59-106.
- 合田良実・岸良安治・神山 豊(1975b): 不規則波による防波護岸の越波流量に関する実験的研究, 港研報告, 14巻, 4号, pp. 3-44.
- 近藤徹郎・竹田英章(1983): 消波構造物, 森北出版, pp. 180-193.
- 苫小牧港湾建設事務所(1983): 苫小牧港波浪解析業務報告書, 121 p.
- 福田伸男・宇野俊泰・入江 功(1973): 防波護岸の越波に関する現地観測(第2報), 第20回海岸工学講演会論文集, pp. 113-118.
- Guza, R. T., E. B. Thornton and R. A. Holman (1984): Runup of random waves on gentle slopes, Proc. 19th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 708-723.