人工リーフによる波の変形について

谷野賢二*・水野雄三**・渡邊康玄***・平沢充成****

1. まえがき

胆振海岸は，北海道の中央南部に位置し，太平洋に面した延長約 29 km の漂砂海岸である．海岸沿線は，道央経済の中心的な地域を背後地にもつとともに，道南・道央を結ぶ36号線，JR 室蘭本線が通る交通の要所となっている．しかし，従前から海岸侵食や越波による災害が多発しており，従来の護岸施設では災害を解消することが困難と判断されることから，人工リーフ等の広天端潜堤による波の制御および緩傾斜護岸によって，海岸保全を実施して行くこととなった．一方，本海岸の水深5〜10m の海域はホッキ貝の漁場であり，海底地形の変化および漁船操業の障害となる，構造物からの反射波の影響はできるだけ少ないことが望まれる．

人工リーフも含めた潜堤の水理特性については既にいくつかの研究がなされている（たとえば，田中，1976；宇多ら，1987）が，胆振海岸のように平均海底勾配が1/90とゆるやかな場合について，波浪条件と構造物諸元の組合せに対応するデータが無い．本文は，海岸侵食対策として人工リーフ工法の胆振海岸への適用を検討するに当たって，その波浪減衰効果，堤沖側の反射波特性，堤内水位の上昇量等について水理模型実験を実施したので，その結果を報告するものである．

2. 実験方法

（1） 実験条件および実験模型

胆振海岸の中央部，白老付近における代表的な海象条件を表—1 に示す．波高は換算沖波波高 H_0' で表示されている．実験波の条件としては，同表の各波浪条件に加え，エネルギー平均波を除く各周期について波高を数段階に変化させることとした．潮位は，50年確率波に対しては，H.H.W.L. と H.W.L. とし，その他の波浪条件については，H.W.L.，M.S.L. および L.W.L. の3種類とした．リーフの堤脚水深は現地換算で T.P. −4.3m とした．海底勾配は T.P. −2.4m まで1/90とし，それより岸側では1/12とした．この場合，エネルギー平均波を除いて波高の高い波はリーフのかなり沖で砕波することになる．こうした状態を再現するため，海底勾配1/90の最深部は，実験波中の最大波の砕波限界水深より深くなるよう模型縮尺を決めた．また，水路の最深部でも周期によっては深水波とはならない．従って，入射波高の設定に当たって，沖波波高（換算沖波波高）は非砕波領域の波高計の値を用いて推定した．本実験では，相似則として Froude の相似則を採用し，歪なしとした．模型の幾何縮尺は，50年確率波波高については1/65，その他の波浪条件については1/30とした．これは，前述の砕波限界水深と造波装置の性能を考慮して決められた．実験は，長さ28m，深さ 1m，幅 80 cm の両面ガラス張りの水路にモルタル製の水路床を設置した2次元固定床で行った．リーフの基本断面を図—1 に示す．堤体模型の基礎捨石は平均 6 gr の砕石を用いた．沖側被覆石としては，異形ブロック模型（3.2 ton 相当）を，またその他の被覆石は38〜27 gr の砕石を用いた．また，法先には石かご模型を設置した．法勾配は沖側で1/3と1/5の2種類とし，岸側で1/2とした．天端幅 B は現地換算で，20m，40m，60m および 80m の4種類に変化させて実験した．天端水深 R は現地換算で，T.P. −0.8m である．

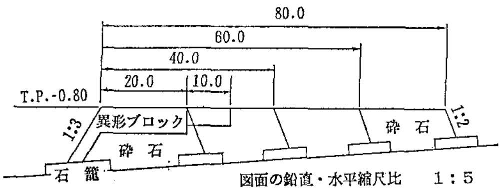
表—1 海象条件

波浪	周期（sec）	換算沖波波高（m）	潮位	（m）
50年確率波	10	8.8	H.H.W.L.	T.P.+1.60
年最大波	8.5	4.5	H.W.L.	T.P.+0.74
中間的な波	6.5	2.3	M.S.L.	T.P.+0.08
エネルギー平均波	4.5	1.3	L.W.L.	T.P.−0.78

（2） 測定項目および測定方法

測定項目は，反射波，伝達波，リーフ上の波高分布，

* 正会員 工修 北海道開発局開発土木研究所港湾研究室副室長
** 正会員 工修 北海道開発局開発土木研究所港湾研究室室長
*** 正会員 工修 北海道開発局開発土木研究所河川研究室
**** 正会員 北海道開発局開発土木研究所港湾研究室



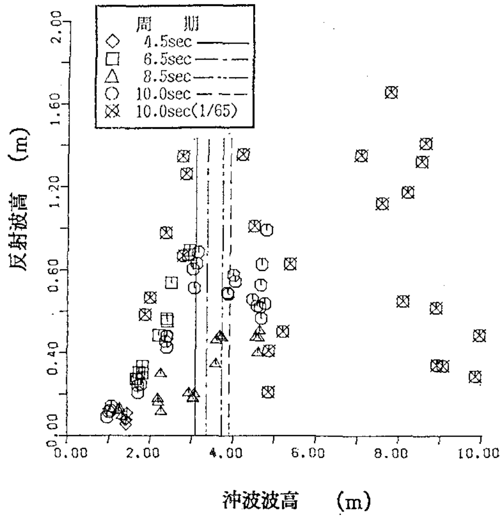
図―1　人工リーフ基本断面

水位分布および波の打ち上げ高さである．反射波は，沖側天端先端から2.2m（1/65では1m）の位置に22.5cm間隔で設置した2本の波高計を用い，入・反射波分離推定法により求めた．伝達波は岸側の波高計記録をゼロアップクロス法により求めた．これらの波高計は電気容量式波高計を用い，増幅器からの出力は A/D コンバータを介して，サンプリング周波数 20Hz でデジタル化した．リーフ上の波高分布の測定はビデオカメラを用いた．進行する波峰に合わせてカメラを移動して記録したものを，予め水路のガラス面に設置した1cm方眼のアクリル製定規の目盛りを利用して読み取った．同様に，波の打ち上げ高さは，水底に設置された方眼定規と水面との交線の時間変化のビデオ記録から読み取った．水位測定はマノメータを，砕波の影響を受けない沖側と，沖岸の堤法先及び天端先端，岸側天端先端から170cm（1/65では80cm）の位置に設けて計測した．水路内の水量は一定のため，砕波水深以浅で平均水位が上昇すると，沖側の平均水位は低下するので，各測点の平均水位は沖測の水位変化量を0とした補正を加えている．

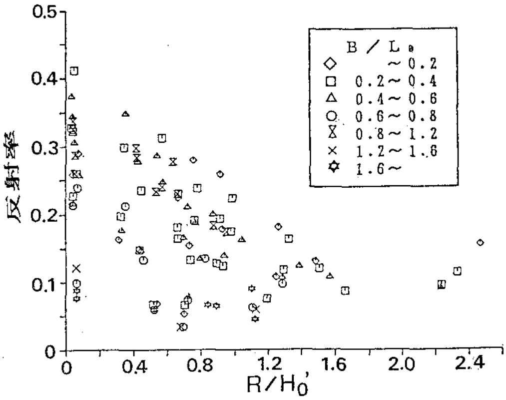
3.　実験結果

（1）反射波

同一周期の波に対する法勾配の影響として，全体的には1/3の反射率がやや大きくなっているが，天端水深が増加するにしたがって1/3と1/5の差がなくなる傾向にあった．また，後で述べる伝達波特性等についても，法面勾配による差は小さい．そこで，以下では法面勾配1/3の場合の実験結果のみを図示する．図―2は，横軸に換算沖波波高 H_0' を取ったときの反射波高の変化を示したものである．図中の垂線は，堤脚水深を砕波水深として合田の規則波による砕波指標（たとえば，海岸保全施設築造基準連絡協議会編，1987）より求めた砕波波高を表している．重複波領域における反射波高は沖波波高の増加と共に単調に増加しているが，砕波後の波が堤体に作用している場合には，反射波高の変動が激しい．図―3は，入射波が非砕波のデータについて，天端幅 B と沖波波長 L_0 をパラメータとして，反射率と相対天端水深 R/H_0' の関係を示したものである．この場合，堤体幅の効果については顕著な傾向がみられない．また，反射率



図―2　反射波高～沖波波高

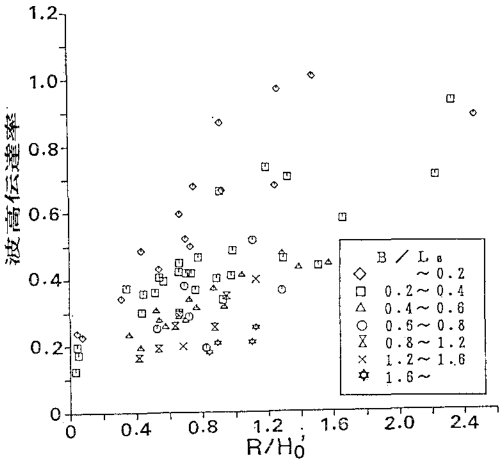


図―3　反射率～R/H_0'

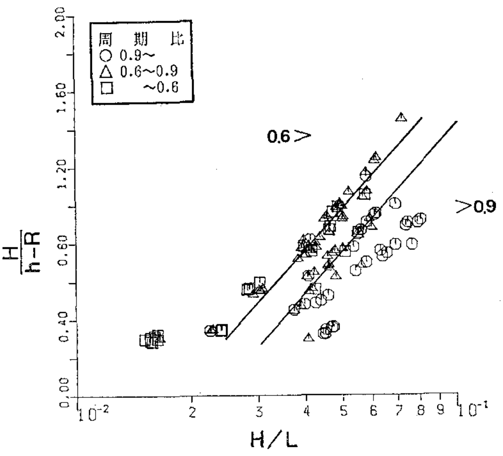
の上限は R/H_0' の増加とともに単調に減少しており，最大値は約0.4であった．

（2）伝達波

図―4は，伝達波波高と換算沖波波高の比で定義した波高伝達率（減衰率）を，横軸を R/H_0' に取って整理したものである．パラメータとして B/L_0 をとった．潜堤やリーフを通過した波の周期が入射波の周期より一般に短くなることが既に報告されている（田中，1976）．こうした波はゼロクロッシング法によると，分裂によって入射波周期に対して2つの波と見なされる．そこで，伝達波は岸側の波高計記録からゼロアップクロス法により求めた波高，周期の時系列データを用いて次のように定義した．分裂した2つの波のうち波高の高い方を取り出し，連続する5波の波高及び周期の平均値をそれぞれ伝



図—4 波高伝達率～R/H_0'



図—5 伝達波周期の減少

達波のそれとした．同図より，R/H_0' の減少とともに，また，B/L_0 の増加とともに，伝達率が減少する様子が分かる．

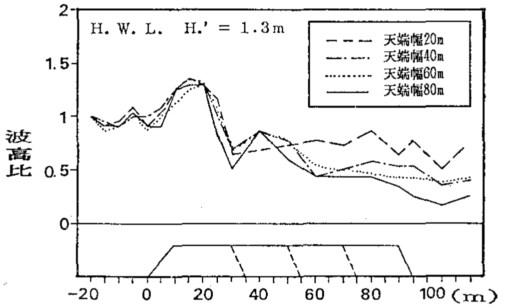
伝達波の分裂は主として長周期側に生じている．分裂に至る過程は次のようであった．リーフ先端部で砕波した波はリーフ上を進行するにしたがって再生し，孤立波のような状態で進行していく．リーフ後端で再び水深が深くなると分裂する．図—5 に，先に述べた伝達波の周期特性を示す．田中(1976)と同様に，横軸に入・反射波分離推定法で求めた入射波の波形勾配 (H/L) を，縦軸に波高と堤高の比を取り，周期比をパラメータとした．伝達波周期の平均値と入射波周期の比は，長周期側で約 0.6 であり，波峰は明確に分裂している．これに対し，周期が短くなるに従って分裂波峰は主峰に比べて小さくなり，周期比は1に近づく．

（3） リーフ上の波高分布

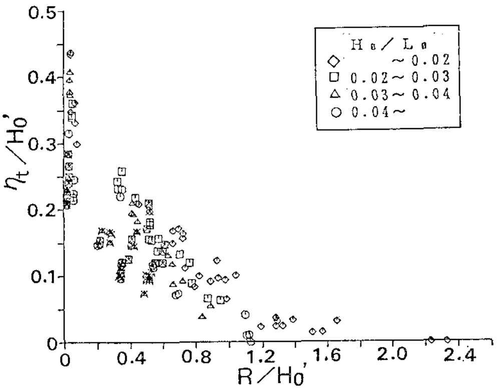
図—6 はリーフ上の波高分布の例である．縦軸は測定の開始点における波高で除した波高比で表されている．同図から分るように，天端や堤法面上の砕波による波の減衰は天端幅によって大きな差はなく，天端幅によって底面摩擦による減衰の程度が異なるようである．$B=$20m では，砕波によるエネルギー減衰だけであり幅の効果がみられない．ただし，底面摩擦によるエネルギー減衰の割合は，$B=$80m でも天端上の砕波による減衰に比べ相当小さい．

（4） 水位上昇量

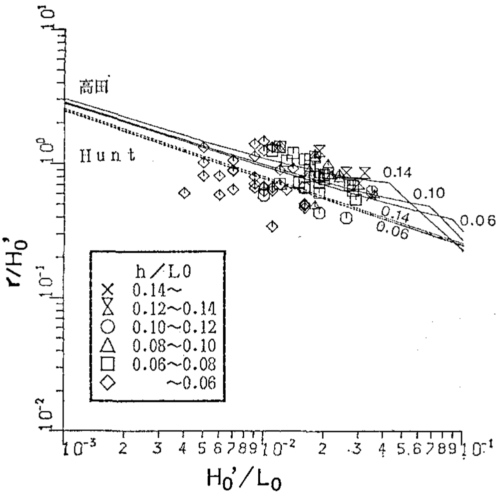
図—7 は堤岸端での水位上昇量 η_t を無次元表示したものである．図中のシンボルマークに付けられた × 印は，入射波がリーフの沖で砕波していることを示している．水位上昇は汀線における打ち上げ高さを増大させる．入射波が沖側で砕波する場合は，同じ R/H_0' でも非砕波に比べて水位上昇量が少ない．H_0'/L_0 が増加するにしたがって，水位上昇量が減少しているのがわかる．$R/H_0'>1$ では，堤体幅に関係なく，水位上昇がみられないか，または，ごく僅かである．逆に，R/H_0' が減少するに従って水位上昇量が増加し，η_t/H_0' が0.44に近づ



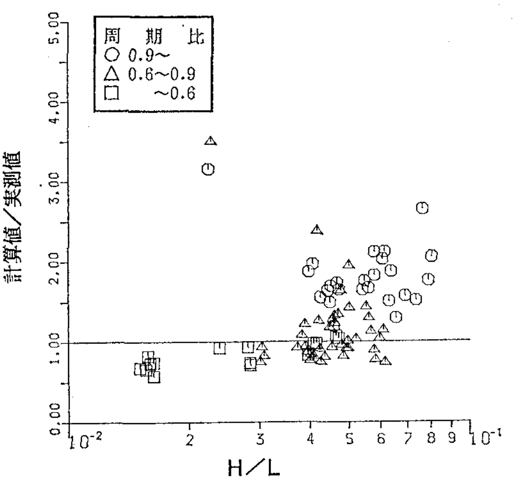
図—6 リーフ上における波高変化



図—7 人工リーフ岸端での水位上昇量



図―9　打ち上げ高さ



図―9　打ち上げ高さの計算値と実験値の比較

く．$\eta_t/H_0'=0.44$ は，年最大波で L.W.L.($R/H_0'=$ 0.045前後）のときの値である．入射波が非砕波の場合，水位上昇量は H_0'/L_0 をパラメータとして比較的よく整理される．こうした堤内の水位上昇は，岸天端高がそれだけ余分に必要であることを示しているわけである．ただし，これは無限に長いリーフに直角に波が入射する場合に相当するが，実際には，堤体幅は入射波の波長程度の長さになる．そして，同様なオーダーの開口幅で空間的に配置されることになる．従って，堤内の水位上昇も，開口部からの流出により，堤端部付近では相当減じていると考えられる．

（5）打ち上げ高さ

図―8 は1/12斜面への打ち上げ高さ r についての実験結果である．図中の h は斜面屈曲部の水深である．波の打ち上げ高さは護岸や堤防の設計に必要な値であり，ここで示すような緩やかな法面勾配の構造物はない．しかし，さきに述べたように，ゼロクロッシング法によって定義されるリーフからの伝達波は，入射波に比べ周期が短くなる場合があり，こうした波を使って従来から用いられている算定式で打ち上げ高さを計算することができるのか，といった点を検討することは意味があると考えられる．そこで，算定式として高田および Hunt の式（土木学会編，1985)を用いて計算を行なってみた．高田(1970)は，堤脚水深が重複波水深（砕波以深）領域にあって，法面上で波が砕波しない場合と，する場合に分けてうちあげ高さを求める式を提案している．この式は勾配 1/8 以上に用いるとされているが，参考のために同式を用いた．それぞれの算定式による推定結果を図―8 中の実線および波線で示す．図―9 は推定した打ち上げ高さと実験値のそれを比較したものである．横軸を先に定義した入射波の波形勾配(H/L)とし，パラメータとして伝達波周期/沖波周期を取った．周期比0.6以下では実験値と算定値はよく一致している．これは，木村ら(1982)が指摘するように，分裂した波峰による戻り流れの影響を無視できないことを示していると考えられる．したがって，リーフ背後の打ち上げ高さの合理的な推定には，伝達波の周期特性を考慮に入れる必要がある．周期比が1に近づくにしたがって分散は大きくなっている．特に，分裂傾向があるものの，ゼロクロッシング法では2つの波とは識別されず．伝達波の周期が入射波の周期と一致している場合，誤差は他に比べてかなり大きいようである．ただし，波形勾配が大きい領域で，短周期の波は伝達波高も小さいので，底面摩擦の影響による打ち上げ高さの減少が分散の1つの原因と考えられる．

4．あとがき

本報告では，堤体幅20～80mの人工リーフについて，胆振海岸の代表的な海象条件に対する反射波，伝達波特性，リーフ上の波高変化等の諸特性を実験的に明らかにした．これまで胆振海岸の地形および波浪条件の組合せに対応するこの種のデータがほとんど見あたらなかったことから，本実験で広天端潜堤に関する既存データの補完が行えたと考えられる．今後は，堤体の安定および地形変化等の問題について検討を行う予定である．

参考文献

宇多高明・小俣　篤 (1987)：人工リーフの設計法，土木技術資料，29-12，pp. 26～31.
海岸保全施設築造基準連絡協議会編 (1987)：海岸保全施設築

造基準解説, pp. 51～52.
木村　晃・瀬山　明・若狭　聡 (1982)： 波のうちあげ高におよぼすもどり流れの効果, 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 380～334.
高田　彰 (1970)： 波の遡上, 越波および反射の関連性について, 土木学会論文報告集, 第182号, pp. 19～30.
田中則男 (1976)： 天端幅の広い潜堤の波浪減殺および砂浜安定効果について, 第23回海岸工学講演会論文集, pp. 152～157.
土木学会編 (1985)： 水理公式集, pp. 529.