

上部斜面堤からの越波が離島港湾の静穏度に与える影響

平石 哲也*・田端竹千穂**

1. はじめに

沖縄県地方および伊豆諸島の離島において、生活環境の向上を図り、産業を振興させつつ、観光客を誘致するためには港湾の整備が必須である。しかし、現状では港湾の整備は遅々として進んでいない。それは、予算的な問題に加えて、次のような問題が原因となっている：①外洋に面した孤立島であり、作用する波が非常に大きい、②島内に施設がなくケーソンが製作できない。したがって、離島港湾の防波堤としては、①堤体がなるべく小さく、本土から曳航しやすい、②高波浪時にも十分な安定性を有するものが必要である。そこで、図-1に示す上部斜面型ケーソン堤が、離島港湾用の防波堤として考案されている。これは、ケーソンの前面に斜面を設けることにより、作用波力に鉛直下方へ向かう成分を生ぜしめ、堤体の安定性を増加させるもので、箱型ケーソンに比べて堤体幅と重量を軽減することができる。上部斜面堤の伝達波特性および耐波安定性は、高橋・細山田(1994)が断面実験により検討しており、水平波力の低減効果と波高伝達率を定量的に明らかにしている。

一方、斜面を有するために越波量は増加する。平口ら(1991)は二次元水路において矩形ケーソン式防波堤の越波量と波高伝達率の関係を検討し、越波量が大きいと伝達率も増加することを明らかにしている。離島の港湾は水域が小さいために、防波堤からの越波は伝達波として港内の波高分布に大きい影響を与える。越波を防ぐためには、防波堤天端を高くすれば良いが、建設費が増大する。したがって、離島港湾においては、荒天時にある程度の越波を許容できるように堤体を設計する。そのため

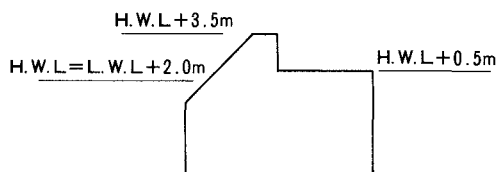


図-1 上部斜面堤の断面

には、越波による伝達波を考慮した港内の静穏度を検討できる手法を確立しておくことが必要である。

本研究は、上部斜面堤の越波が港内の静穏度に及ぼす影響を検討し、それを定量的に評価する計算法を提案することを目的としており、多方向不規則波を用いたモデル実験を実施している。

2. 実験の内容

図-2は、伊豆諸島周辺の離島地区を対象としたモデル港湾Pの平面図である。水槽は、50cm幅の造波板を30枚有するサーベント型造波機を持つ多方向不規則波造波水槽である(平石, 1992)。モデル港湾は、島礁でよく見られる急勾配斜面に設置され、開口部の水深は約25mである。図の長さ600mの主防波堤Bが上部斜面堤で建設されるものとし、縮尺を1/100として実験を行った。離島港湾へ就航する高速客船の運航限界波高(シップ・アンド・オーシャン財団, 1992)は3.5mであり、港湾の目的の一つは就航してきた高速船が安全に係留できる

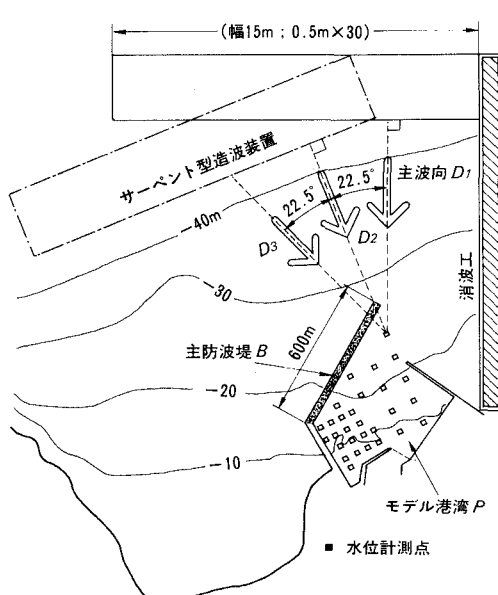


図-2 モデル港湾と実験装置の配置

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所水工部主任研究官

** 正会員 工修 運輸省第一港湾建設局新潟調査設計事務所長

静穏度を港内に確保することにある。そこで、実験波の沖波波高は有義値で3.5mとした。さらに時化時を想定して5~7.5mの波を実験では作用させた。周期は東京都(1985)の波浪推算結果を参考にして、有義波高3.5mの場合に8と12s、5mの場合に12s、7.5mのときに16sとした。主波向も上記の推算結果をもとに、図に示す $D_1 \sim D_3$ の3種類とした。港内の波高分布は、波の方向集中度によって変化する(斎藤ら, 1993)ので、本実験では、 $H_{1/3}=3.5$ mに対しては、単一方向不規則波だけでなく多方向不規則波を作用させた。波の周波数スペクトル形は、修正 Bretschneider-光易型(合田, 1987)である。波の多方向波の方向分布関数は光易型を用い、方向集中度パラメータ(合田・鈴木, 1975) S_{max} は、有義波周期 $T_{1/3}$ が8および12sの場合に対して、それぞれ10および25とした。

主波向 D_1 については、造波機を図中の実線の位置に設置し、主波向 D_2 および D_3 については、一点鎖線で示した位置に設置した。これは、多方向不規則波造波機では、造波機面法線に対して 45° 以上傾いた主波向を有する方向へ多方向不規則波を造波することは困難であるためである(平石, 1992)。なお、実験波は沖波の条件で決定しているので、波浪変形計算(高山ら, 1991)を実施して、造波機位置での波高を求め、造波機に与える入力値とした。

造波された波を検定するために、造波機中心から2m離れた位置に4本の波高計を組み合わせたアレイを設置し、沖波の波高・周期および方向スペクトルを求めた。方向スペクトルの解析は、バイジアンモデル(橋本, 1992)に従った。図-3は、ピーク周波数近傍の周波数帯における主波向 D_3 の多方向波の造波機前面における方向関数を示したもので、太い実線が実験値、細い実線が $S_{max}=10$ の目標値を示す。図に示された場合、 D_2 方向が $\theta=90^\circ$ に相当するので、目標関数のピーク角度は 22.5° ずれている。図中の太い破線は、造波板による回折波を重ね合わせて計算した理論解(高山ら, 1989)である。実験で用いた造波機は、隣合う造波板が接続されていない離散型であり、造波板による回折と、造波機全体長の有限性のため、場所によって造波された波の性質が変化し、目標方向関数が再現できない可能性もある。ただし、測定点の有効造波領域(平石, 1991)の範囲内にある場合には、理論解と目標値はほぼ一致する。図-3に示されるように、造波機前面では、本実験の場合、理論解は目標値とほぼ一致する。ただし、特定の周波数ではピークの値が目標値よりも少し高くなる。実験値は、理論解にほぼ一致しており、目標値より若干ピークが高くなる場合もある。全体的な分布形は、ほぼ目標値を表しているため、造波機前面においては、目標とする多方向不規則波がほ

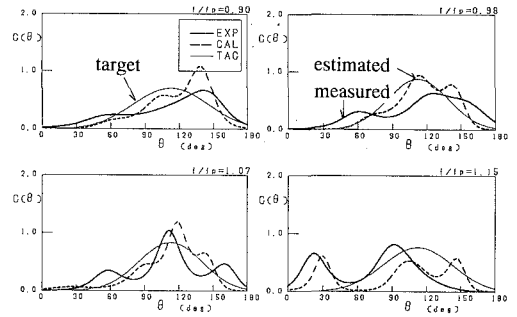


図-3 造波された沖波の方向分布関数

ぼ正確に造波されていると言える。なお、一方向波について同一の解析をしたところ、鋭いピークを持つ方向関数が解析され、水槽内に単一方向性を妨げるような反射が生じていないことが確認できた。

実験では、港口部の波高・周期・方向スペクトルを4本の波高計を組み合わせたアレイで測定し、港内では29カ所で波高・周期を測定した。図-4は港内における波高計の配置図を示す。

実験は次の3種類からなる;

- ①伝達波実験 港口部を板で遮蔽し、防波堤からの伝達波のみが港内に進入するようにして波高を測定する。
- ②回折波実験 防波堤を高壁とし、伝達波を防ぎ、港口からの回折波のみが港内に進入できるようにして波高を測定する。
- ③合成波実験 実地形を用いて、両者を許容した場合の波高を測定する。

3. 港内波高の計算と実験の結果

(1) 計算方法

計算では、港内水深を一定として島堤による回折波の解を重ね合わせる手法(高山, 1981)を用いた。このとき、回折波と伝達波による港内波高は別個に計算し、両者を重ね合わせて合成波の港内波高分布を求めた。いま、越波が生じないものとして、防波堤開口部のみから進入する回折波による港内波高 H_D を計算する。つぎに、防波堤開口部を反射率0の側壁と仮定して、越波が生じる上部斜面堤部を仮想開口部として、伝達波による港内波高 H_T を計算する。合成波の港内波高 H は伝達波高 H_T と回折波高 H_D から、 $H=\sqrt{H_T^2+H_D^2}$ で計算できる。このとき、回折波の計算条件は、波浪変形計算で求められる港口部の波浪条件をそのまま用いればよい。伝達波については、港口部の入射波高に、越波による伝達率 K_T を掛けた値を入力波高とした。

伝達波の入力周期については、実験結果を利用した。

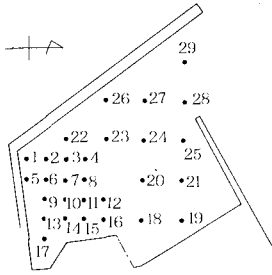


図-4 港内波高測定点

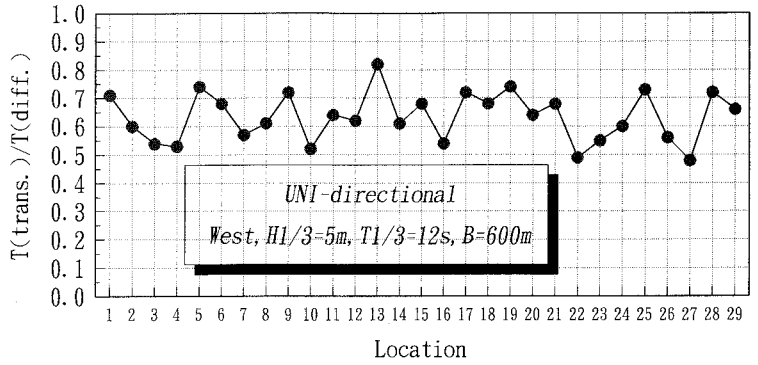


図-5 回折波周期に対する伝達波周期の比 (波向 D_2 , 単一方向波)

図-5 は、 $H_{1/3}=5\text{ m}$ 、波向 D_2 の単一方向波について求めた伝達波による港内波の周期と回折波による港内波の周期の比を示したものである。港内で変動はあるものの、伝達波の周期は回折波のそれに比べて短くなり、 $0.5\sim 0.7$ 程度になる。既往の実験(合田・鈴木, 1974)では、 $0.5\sim 0.6$ 程度である。越波は常に生じているわけではなく、波がない場合の時間帯も含んだ統計的な解析結果が上記の値になっていることを考慮して、本計算では、入射波周期の 0.5 倍を伝達波の周期とした。

本実験で対象とした上部斜面堤の伝達波高は、二次元断面実験で検討されている(高橋・細山田, 1994)。伝達率は入射波高・周期によって変化し、本実験条件の場合には、表-1 のようになる。平面においては波が斜めから入射することを考慮して、次のように計算における伝達率を与えた；高山ら(1984)が示した斜め入射波に対する護岸越波流量の測定によると、直立護岸の場合、入射波角が $30\sim 45^\circ$ になると、越波流量 q は、直角入射波に比して約 0.4 倍に減少する。一方、平口ら(1991)が示した波高伝達率と越波流量の関係では、 q が $1000\text{ cm}^3/\text{m/s}$

の場合には、越波量が 0.4 倍になると K_T が 0.15 から 0.1 程度に減少する。したがって、本計算においては、断面実験で得られた伝達率の約 7 割の値を採用することにした。表-1 に補正值として計算に用いた値を示す。

(2) 実験による計算法の検証

はじめに、回折波と伝達波の線形重ね合わせ結果と合成波高の分布形が一致するかどうかを実験によって検討した。すなわち、同一の入射波条件で、①伝達波実験、②回折波実験および③合成波実験を行い、港内 29 点で伝達波高 H_T 、回折波高 H_D および合成波高 H を測定した。測定した合成波高を H_E とし、 H_T と H_D より $\sqrt{H_T^2 + H_D^2}$ で計算できる合成波高を H_C とする。図-6 は、 H_E と H_C を比較したものである。図中の“computed”および“measured”が、それぞれ H_C および H_E にあたる。図において、港内の伝達波高は、P. 1~15 の範囲では 1 m より若干小さいが、港口に近い P. 16~29 では、 1 m より大きくなる。薄色○で示した合成波高 H_E は P. 1~P. 15 の範囲では、回折波高とほぼ等しいが、P. 16~29 では、回折波高より大きく、伝達波の影響が強くなっていること

表-1 上部斜面堤の波高伝達率 (高橋・細山田, 1994)

$T_{1/3}(\text{s})$	$H_{1/3}(\text{m})$	伝達率 (K_T)	
		二次元実験値	平面実験補正值
8.0	3.5	0.15	0.10
12.0	3.5	0.18	0.10
12.0	5.0	0.23	0.15
16.0	7.5	0.32	0.20

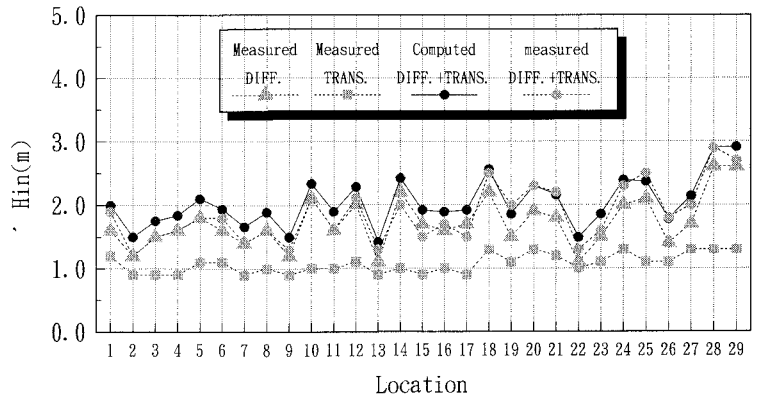


図-6 港内合成波高における計算値と実験値の比較 (単一方向波, 波向 D_2 , $H_{1/3}=5\text{ m}$, $T_{1/3}=12\text{ s}$)

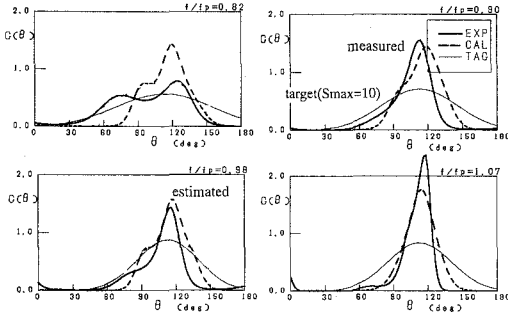


図-7 港口部における波の方向分布特性

がわかる。●で示す計算した合成波高 H_c は、港奥では、 H_E より少し大きくなるが、P. 15~29の範囲では、薄色○の H_E とよく一致している。したがって、回折波と伝達波を別個に計算し、結果を線形に重ね合わせることによって、合成波による港内波高を評価することができる。

港内波高を求める高山法については、単一方向波による検証は十分成されている(高山, 1981)が、これまでに多方向不規則波実験による検証が成された例(斎藤ら, 1993)は少ない。そこで、本実験では、多方向不規則波による回折波高について、計算法の適用性を検討した。ただし、図-1に示したモデル港湾の港口部は、造波装置面より離れており、有効造波領域(平石, 1991)の外に位置している。したがって、目標とする多方向性が港口部で再現されない可能性がある。そこで、まず、港口部における方向スペクトルの解析を行った。

図-7は、主波向 D_0 の場合の、ピーク周波数近傍の周波数帯における実験波の方向関数形を示す。太い実線で示した実験値は、細実線で示す目標値よりも高いピークを示し、波の方向集中度が目標とするものよりも高くなっている。太い破線で示した分布形は回折理論解(高山ら, 1989)を示し、実験値と回折理論値はよく一致する。したがって、有効造波領域の外側の計測点においては、造波された波の方向集中度は目標値よりも高くなるが、その分布形は理論計算によって評価できることがわかる。図-8は、主波向 D_1 の場合について、港口部のピーク周波数での方向分布関数の理論解を示したものである。このときの、造波信号として与えた S_{max} は10である。細実線は、 $S_{max}=10\sim 100$ に対する目標分布形である。太い破線の分布形は、入力値である $S_{max}=10$ ではなく $S_{max}=50$ 程度になっており、本実験のモデル港湾の港口部においては、 $S_{max}=50$ で分布特性を表わせる多方向不規則波が造波されていることがわかる。

図-9は、港内のP. 1~16測点における回折波高の実験値と計算値を比較したものである。縦軸は、入射波高に対する回折波高の比 K_d を表している。 $S_{max}=10$ の場

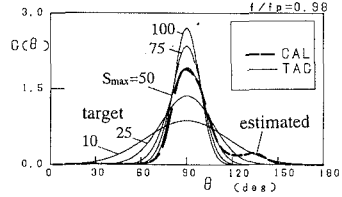


図-8 理論計算による港口部の方向分布特性

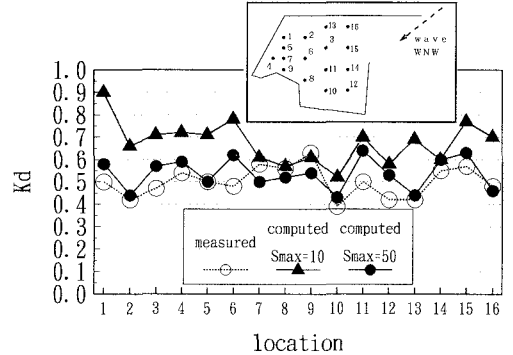


図-9 回折波高の計算値と実験値の比較

合の計算値は、○で示した実験値よりも大きくなり一致していない。これは、前述のように、港口部の方向集中度が入力値よりも増加しているためである。 $S_{max}=50$ として計算すると、●の計算値と実験値はよく一致している。港口部における実測の方向集中度を入力条件として計算した結果と、実験値が一致することより、高山法による回折計算手法が多方向波の港内波高分布計算に適用できることがわかった。なお、図-9における波高計測点は前出の図-4とは異なる。

最後に、本研究で設定した上部斜面堤の平面的な波高伝達率の適合性を検討するために、合成波高の計算結果と実験結果の比較を行った。なお、港内の29測点すべてにおいて計算値と実験値が一致することはなく、どのケースにおいてもある程度の誤差が生じた。そこで、水域の平均値を比較することにし、港内を図-10に示すようにA~Hの8エリアに分割し、各エリアにおける平均波高を求めた。図-11は、主波向 D_0 、沖波波高3.5mの多方向波の場合の港内のエリアA~Hにおける平均波高の計算値を実験波高と比較したもので、この場合は $K_T=0.1$ が2次元実験値の70%にあたる設定値である。越波を考慮しない場合、すなわち $K_T=0$ の場合には、A, Bエリアを除き計算値が実験値より小さくなる。 $K_T=0.1$ の場合には、AおよびBエリアで計算値が若干実験値より大きくなるが、そのほかのエリアではよく一致する。 $K_T=0.2$ の場合には、全域で、計算値が実験値を大きく上回り一致しない。

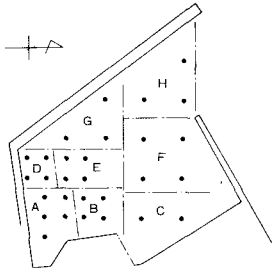


図-10 港内エリア

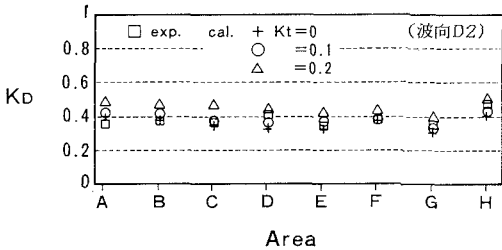


図-11 伝達率の対する港内波高の変化
(主波向 D_2 , 多方向波, $T_{1/3}=12$ s, $H_{1/3}=3.5$ m)

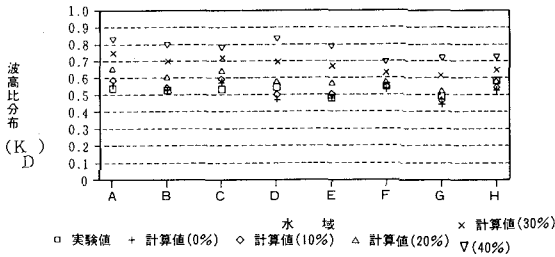


図-12 伝達率の対する港内波高の変化
(主波向 D_2 , 単一方向波, $T_{1/3}=16$ s, $H_{1/3}=7.5$ m)

図-12は、越波の影響を顕著にするために、単一方向波で $H_{1/3}=7.5$ mとした場合のエリア内の平均波高を示す。この場合、二次元実験による K_T は 0.32 で、平面計算における補正値が 0.2 である。 $K_T=0.2$ の場合の計算値は、エリア A~C で実験値より大きくなるが、エリア D~H では実験値とよく一致する。二次元実験結果と同じ $K_T=0.3$ を用いると、全エリアで、計算値は実験値を

大きく上回り、一致しない。したがって、上部斜面堤を有する離島港湾では、港内波高の推定において越波を考慮する必要がある、そのときの越波による波伝達率は二次元断面実験結果の 70% として評価することができる。

4. あとがき

本研究では、多方向不規則波を用いた模型実験によって、港内静穏度に影響を及ぼす上部斜面堤の越波による伝達波の特性を検討し、伝達波を考慮した計算法を提案した。本計算法を用いて、上部斜面堤を用いた離島港湾における静穏度を評価できる。

参考文献

合田良実・鈴木康正・岸良安治 (1974): 不規則波浪実験とその特性について, 第 21 回海岸工学講演会論文集, pp. 237-242.
 合田良実・鈴木康正 (1975): 光易型方向スペクトルによる不規則波の屈折・回折計算, 港湾技研資料, No. 155, 33 p.
 合田良実 (1987): 数値シミュレーションによる波浪の標準スペクトルと統計的性質, 第 34 回海岸工学講演会論文集, pp. 131-135.
 齊藤栄一・沖 政和・清水琢三・鶴岡亮行・磯部雅彦 (1993): 港湾模型を用いた波の変形に関する研究, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp. 56-60.
 シップ・アンド・オーシャン財団 (1992): 伊豆諸島海域への新たな海上交通システムの導入調査報告書, 309 p.
 高橋重雄・細山田得三 (1994): 離島港湾における上部斜面堤の適用性について, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 706-710.
 高山知司 (1981): 波の回折と港内波高分布に関する研究, 港湾技研資料, No. 367, 140 p.
 高山知司・永井紀彦・西田一彦・関口忠志 (1984): 斜め入射不規則波を用いた護岸の越波特性実験, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp. 542-546.
 高山知司・池田直太・平石哲也 (1991): 砕波および反射を考慮した波浪変形計算, 港研報告, Vol. 30, No. 1, pp. 21-67.
 高山知司・平石哲也・立石義博 (1989): 多方向不規則波の造波信号発生法に関する検討, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 153-157.
 東京都 (1985): 伊豆諸島波浪調査および波浪変形調査報告書.
 橋本典明 (1992): 海洋波の方向スペクトルの推定法に関する研究, 港湾技研資料, No. 722, 118 p.
 平石哲也 (1991): サーベント型造波装置の有効造波領域の拡張法に関する検討, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp. 126-130.
 平石哲也 (1992): 多方向不規則波の発生とその応用に関する研究, 港湾技研資料, No. 723, 176 p.
 平口博丸・池野正明・大橋裕寿・柏木洋之・樋口豊久 (1991): 防波堤越波後の波の波高・周期・スペクトル特性, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp. 506-510.