

防波堤の作用波力に及ぼす波の多方向性の影響

平石 哲也*・藤咲 秀可**・工 藤 巧**

1. はじめに

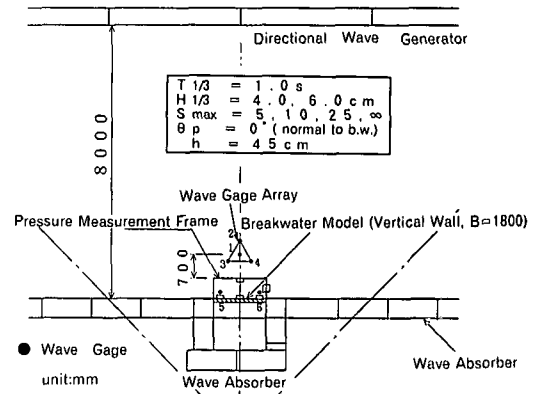
湾口部の津波防波堤や、大規模浮体用の静穏海域創造施設として、水深数十 m の大水深海域での防波堤建設が計画されているが、昨今の財政難を反映して、建設コストの大幅な縮減も強く求められている。一方、海象計(橋本ら, 1995)などの新しい観測技術の整備に伴い、大水深海域での波の方向スペクトルの特性が明らかになりつつあり、単一方向不規則波に代わって、多方向不規則波を設計で用いることができるようになった。

現行の港湾構造物の設計法においては、多くの場合、外力となる海の波を単一方向の不規則波として与えている。ここで、波の多方向性を考慮すると、護岸の越波量やブイの係留張力が、単一方向波を対象とした設計値より低下することが明らかとなっている(平石ら, 1996, 1997)。また、多方向不規則波を用いると捨石マウンドの被災率が従来考えられている値より低下することが報告されている(大野ら, 1997)。しかしながら、多方向不規則波の作用のために、従来は大きな力が作用しなかった消波スリットの横部材に力が作用する(鈴木ら, 1995)場合があり、設計への多方向不規則波の採用については、実験や数値解析による検討が必要である。

本研究では、我が国で多用されるケーソン防波堤の設計条件として重要な作用波圧について、波の多方向性の影響を検討するために、直立壁に作用する多方向不規則波の波圧を測定し、単一方向波のそれと比較を行った。また、単一方向波に対する多方向波の波圧低減率を推定する数値モデルを提案した。

2. 実験の内容

図一に水槽と模型の配置を示す。水槽の一面には幅 80 cm のピストン型造波機を 35 台並べた多方向不規則波造波装置が設置されており、その面に平行に、マウンドを設けずに、直立壁面を設置した。本来は直立壁端部における回折の影響を防ぐために、できるだけ長い直立壁を設けるべきである。しかし、本造波装置は無反射機



図一 実験水槽と模型の配置

能(平口ら, 1991)を有しておらず、壁面が長大になると、水槽内での多重反射が顕著になり、所定の波が再現できない。そこで、図に示すように、造波機面には、平行に反射率 0.2 の消波材を充填した鋼製枠を並べ、一部に木製の直立壁を取り付けた。直立壁の延長は 180 cm である。ここでは、縮尺を 1/100 と仮定して、以下の記述を現地換算値で表示する。

作用波の $H_{1/3}$ および $T_{1/3}$ は 4~6 m および 10 s とし、方向関数は光易型で、方向集中度パラメータ S_{max} (合田, 1990 a) = 5~25 の多方向不規則波および単一方向不規則波を作用させた。周波数スペクトル形は共に、Bretschneider・光易型を用いた。主波向 θ_p は、壁面の法線方向とした。作用波は壁面で重複波となるので、壁面上に 2 台の波高計を取り付け、波高・周期を測定した。方向スペクトルは、壁面から 70 m 離れた波高計アレイで拡張エントロピー法(橋本ら, 1993)を用いて解析した。水深は 45 m とした。

図二は、波圧計を取り付けた測定枠の外観を示す。測定枠は、本来は消波材を充填するために用いるもので、本実験では、平板の支柱部分に、P-7 から P-18 までの 12 個のセンサーを取り付けた。この枠を直立壁に密着させることによって、壁面に作用する波圧だけでなく、壁面で反射した波による圧力(P-17, P-18)および側方の部材に作用する波圧(P-13~15)を測定した。センサー

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所水工部
** 運輸省第二港湾建設局

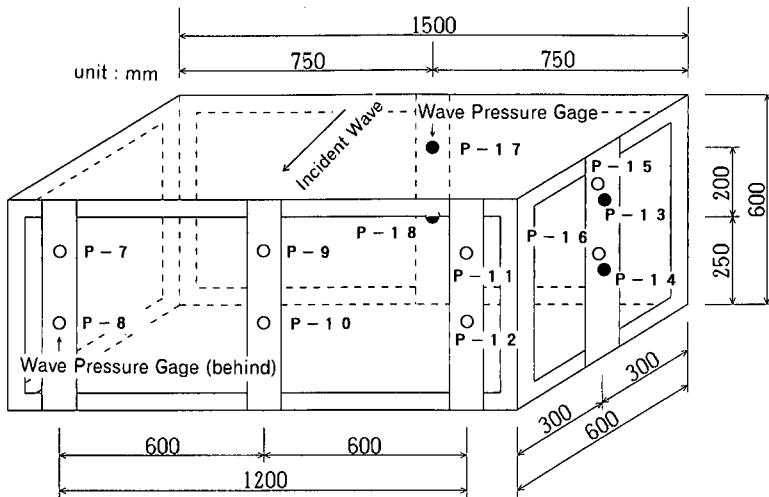


図-2 測定枠における波圧計の取付位置

の設置高さは水面上 (upper) と水面下 20 m (lower) の 2 段に分けた。

実験では、まず直立壁と測定枠を設置しない状態で、造波された波だけを測定し、波高、周期、方向関数が目標値と一致するように造波信号の調整を行った。多方向不規則波の造波においては、シングルサメーション法(高山ら, 1989)に従い、成分波数は 500 とした。図-3 は、波高計アレイで測定した多方向不規則波のピーク周波数における方向関数形を示す。 $S_{max}=5, 10, 25$ の方向関数

形は目標値とよく一致しており、水槽中央部の直立壁面設置位置においては所定の波浪場が再現できることがわかる。

次に、直立壁と波圧測定枠を設置し、単一方向および多方向不規則波を造波して、波圧変化を測定するとともに、波高計アレイおよび直立壁面上に取り付けた波高計センサーで水位変動を解析した。一種類の波に対しては、波群特性を変えて 2 回造波を行い、測定値の平均を採用した。一回の測定時間は、実験値で約 170 s とし、0.02 s 間隔で 8192 個のデジタルデータを取得した。

3. 実験の結果

実験で用いた直立壁は有限長で、厳密には島堤であるため、規則波を作用させた場合には島堤壁面沿いでは波高、波力が場所によって変化する(合田ら, 1971)。ただし、不規則波を用いると、その変化率は小さくなり、無限長を有する防波堤に作用する重複波の波高、波圧と同一とみなすことができる。本実験では、壁面上の 2 カ所の測定波高、3 カ所の測定波圧を比較して、場所的な変動が小さいことを確認した。また、反射波を含む直立壁前面の波高分布を、仮想港口部からの回折波高を用いた近似計算(合田, 1990b)で求め、アレイにおける測定値と比較した。

図-4 は方向分布特性の違いによる波高変化を示す。図中の H_{in} は入射有義波高で、 H は、アレイおよび直立壁面上の測定有義波高の平均値である。なお、壁面上に離れて設置した波高計の測定値はお互いによく一致し、場所的な変動は無かった。図では単一方向波は $S_{max}=999$ で表した。壁面前面での波高比は方向分布特性に係わらず、2.1~2.2 で変化していない。この値は、完全重複波

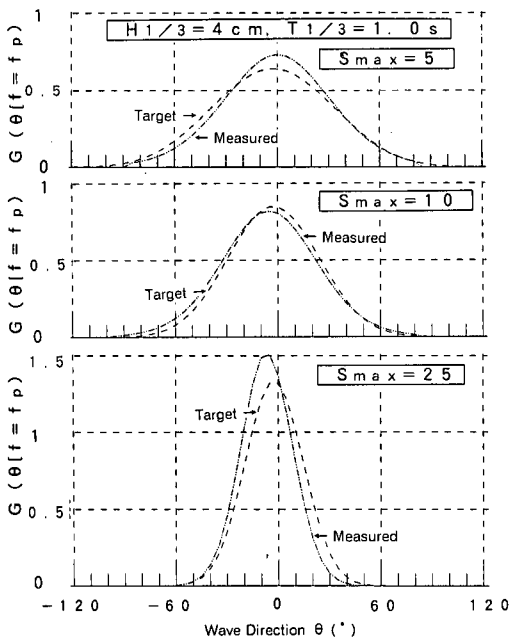


図-3 作用させた多方向不規則波の方向関数

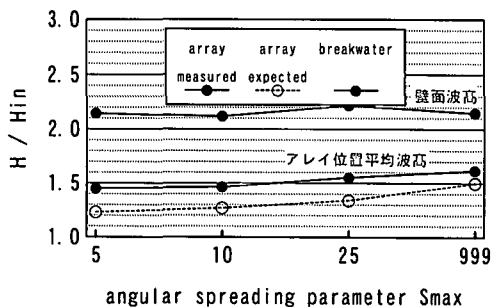


図-4 方向分布特性による実験波高の変化

高比とほぼ一致し、壁面に沿っては波高がほぼ一定し、重複波が生じていると考えられる。アレイの位置では、理論値よりも実験値の方が若干大きくなっているが、単一方向性が強くなると合成波高が増大する傾向は、実験値でもよく表れており、目標とする波浪場が形成されていることがわかる。

図-5は、直立壁面前面での波圧変化を示したものである。波圧の変化は、円柱の多方向波力を整理した手法(平石ら, 1994)に従い、正圧のピーク値の有義値を $P_{+1/3}$ とし、最大値を P_{+max} として整理した。また、 $\rho g H$ (ρ : 水の密度, g : 重力加速度)で無次元化して示した。実験では、 H_m を 4 および 6 m に変化させたが、碎波が生じず衝撃波圧が発生しない範囲における実験であるため、波高が変化しても無次元波圧は変化しなかった。そこで、図では、波高 4 および 6 m における、それぞれ 2 回の測定値をすべて平均して示した。図において P-9 が壁面中央部、P-7 および P-11 はそれぞれ中央部より 60 m 離れた点に相当する。上面 (upper) および下面 (lower) において、場所的な差は小さく、壁面に沿っては、平面的にほぼ一様な波圧が作用しており、実験模型を無限に長い防波堤の一部として考えることが妥当であることがわかる。

図-5 では、 $S_{max}=5$ の多方向波と単一方向波のケースを比較しており、上面および下面において、黒記号で示した多方向波の値は単一方向波の場合より小さくなって

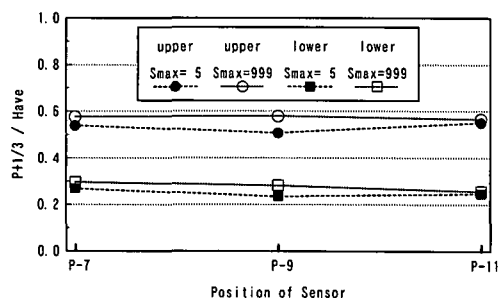


図-5 壁面波圧の場所的な変化

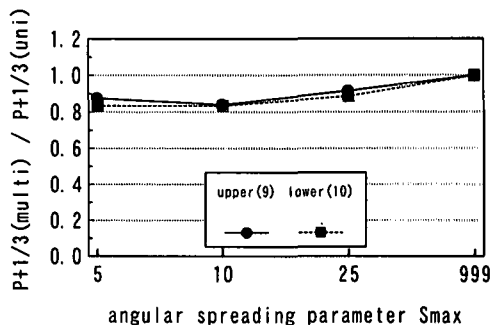


図-6 波の多方向性による壁面波圧の変化

いることがわかる。そこで、壁面中央部における波圧の方向集中度により変化を調べた。図-6は、作用波の S_{max} を横軸に取り、単一方向波作用時の波圧に対する比として多方向波作用時の正有義波圧 ($P_{+1/3}$) を示したものである。上面と下面では、波圧の比はほとんど変化していない。 $S_{max}=5$ および 10 のときには、波圧比は 0.85 程度で変化しないが、 $S_{max}=25$ になると波圧比は増加し、0.9 程度である。このことから、多方向不規則波が作用する場合には、単一方向波作用時に比較して、波圧強度が 0.85~0.9 程度に低下することがわかる。その低下率は上面と下面で一致しているので、壁面に作用する全波力についても、10~15%の低下が期待される。

図-7は、壁面上ではなく前面および側面に設置された支柱上に、測定棒の内側へ向けて取り付けられたセンサーで測定された波圧の変化を示す。前面支柱上の P-17 および P-18 における波圧比は 1 で、ほぼ一定で、波の多方向性による変化は受けていない。側面支柱の P-15 および P-16 においては、波の多方向性が強くなり S_{max} が低下するほど波高比は大きくなる。これは、多方向不規則波の場合には、防波堤壁面において反射された斜め波の成分が、正面から支柱に作用する可能性があるが、単一方向波の場合には、反射波は壁面から直角に沖側へ向かい、側面支柱に直接作用する割合が小さくなるためと考えられ、部材の設置場所によっては、多方向不規則波

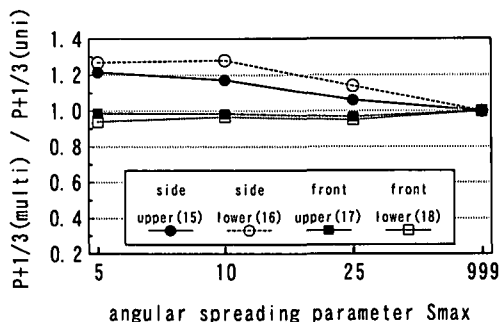


図-7 正面・側面支柱に作用する反射波圧の変化

が最大値を与える可能性がある。

図-8は、側面支柱の外側(P-13)と内側(P-15)の作用波圧比を比較したもので、参考値として壁面上(P-9)の上面波圧を示した。壁面波圧は波の多方向性が強くなると低下するのに反して、側面支柱に作用する波圧は増加する。特に、外側よりも内側の増加が顕著で、これは壁面からの反射波による圧力が付加されるためと考えられる。長大な防波堤壁面に対する側方支柱に相当するものとしては、波浪観測塔、消波スリットなどの構造物が考えられ、設計にあたっては波の作用方向や多方向性を考慮することが重要である。

これまでの、波圧の有義値を検討してきたが、設計にあたっては最大値が重要である。図-9は、壁面における正圧の最大値(P_{+max})を比較したものである。上面においては低下率は有義値の場合よりやや小さく、多方向性を考慮すると0.8~0.9程度である。下面の低下率はさらに小さくなり、0.7~0.8程度になる。最大波圧で比較すると、有義値で比較するよりも、多方向性の影響が顕著になり、単一方向波圧に比べて、壁面波圧は平均して8割程度に減少するとみなすことができる。

最後に、吸い出し現象等に大きな影響を及ぼす負圧について検討した。図-10は、壁面に作用する負圧の有義値($P_{-1/3}$)の変化を示す。波圧比は正圧と同様に、多方向

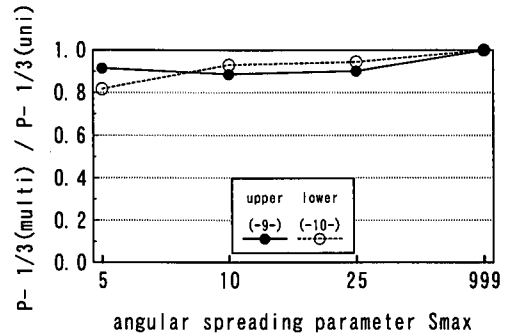


図-10 壁面に作用する負圧の方向集中度による変化

向不規則波の場合に0.8~0.9となり、単一方向波に比較して、吸い出しの危険性は小さくなる。

以上のように、壁面上では、最大波圧、有義波圧および負圧共に、多方向不規則波を作用させると小さくなり、単一方向波に対する比は、方向集中度 S_{max} が25以下であれば、ほぼ0.8~0.9と考えることができる。現行の設計では単一方向波による設計波力に対して防波堤の安定性を決めているが、同一波高でも、多方向性が明らかな場合には、設計値を現行より0.8~0.9程度低下させることができる。そうすれば、防波堤堤体そのものを小さくでき、建設コストを下げることが可能である。

4. 波圧低減効果の推定式

数値モデルでは、斜め入射波の波圧低減率を、越波量の低減効果を表すために用いる $\cos \theta$ を用いて、 $\cos^2 \theta$ (θ は法線方向からの傾き)と仮定した。そして、多方向不規則波を構成する i 番目の斜め波成分が全波圧 P に貢献する寄与率 P_{di} を $\cos^2 \theta_i \cdot P_{Ni}$ で与えた。ここで、 P_{Ni} は、単一方向不規則波を構成する成分波が全波圧に与える寄与率である。

成分波の重ね合わせ法としてシングルサマメーション法を用いると、単一方向不規則波に対する多方向不規則波作用時の波圧比 P_d は、次式で計算できる。

$$P_d = \frac{\sum_{i=1}^{N_s} \left[a_i \cos^2 \theta \frac{S(f_i) df_i}{m_0} \right]}{\sum_{i=1}^{N_s} a_i \frac{S(f_i) df_i}{m_0}} \quad (1)$$

ここで、 m_0 , a_i , df_i , $S(f_i)$ は、それぞれ波の全エネルギー、成分波の振幅、周波数帯幅、スペクトル密度で、 N_s は成分波数である。なお係数 γ は、実験値と計算値が一致するように与え、本モデルでは1とした。

図-11は、上記のモデルで推定した波圧低減率の変化を方向集中度 S_{max} に対して示したものである。比較のために3.で示した壁面中央点の上面と下面における正圧の有義値と最大値および負圧有義値の波圧低減率の実験値を白丸で示した。数値モデルでは、 S_{max} が40以下になると波圧低減率 P_d が急激に小さくなり、 $S_{max} = 5$ 程度で

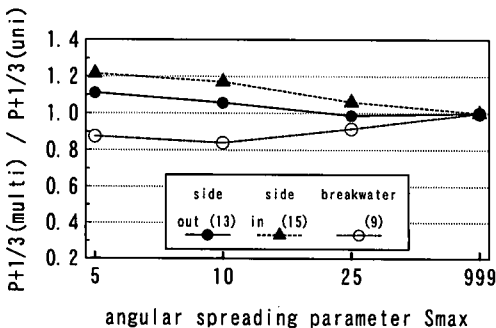


図-8 側面支柱の外および内側に作用する波圧の比較

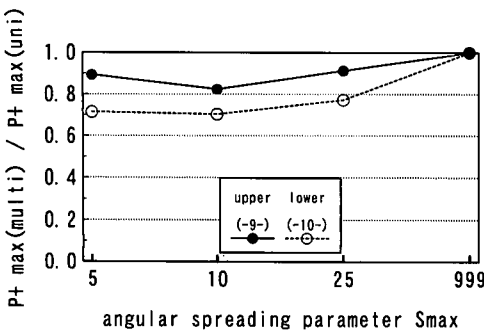


図-9 最大波圧の方向集中度による変化

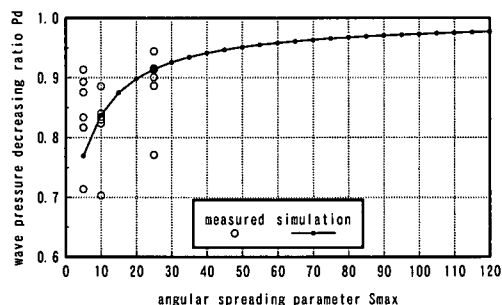


図-11 数値モデルによる波圧低減効果の推定

は $P_d=0.77$ になる。実験値は $S_{max} \leq 25$ の範囲でのみ得られているために、比較範囲は限定されるが、計算値は、ばらついている実験値のほぼ中央値に相当している。特に $S_{max}=25$ では、一点を除くと実験値はほぼ一定しており、計算値とよく一致している。したがって、防波堤壁面に作用する波圧の波の多方向性による低減率は簡単な数値モデルで推定することが可能であることが判る。その値は、 $S_{max} \leq 25$ では約 $0.8 \sim 0.9$ として設定できる。通常、外洋に面した防波堤の設計波の波形勾配は小さく、 S_{max} は 50 以上であることが多い。この場合でも低減効果は 0.95 程度になり、若干の建設コストの縮減が可能である。

4. あとがき

本研究では、多方向不規則波造波水槽において、沖合防波堤に相当する直立壁に作用する波圧の方向集中度による変化を検討した。その結果、最大および有義波圧ともに、単一方向波が作用する場合に比較して、多方向波が作用する場合には、 $10 \sim 15\%$ 低減することが判明した。

この原因は、斜め入射する成分波による波圧が、直入射波に比較して $\cos^2 \theta$ 倍になるためと考えられる。この成果を活用すれば、方向スペクトル解析を含む波浪観測が実施されている海域において防波堤を設計する場合には、現行の設計波力を低減させることができ、建設コストの削減が可能になると考えられる。

参考文献

- 大野賢一・松見吉晴・木村 晃・家村健吾 (1997): 島堤被覆捨石の安定性に及ぼす波の方向分散性の影響について, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp. 951-955.
- 合田良実・吉村知司・伊藤正彦 (1971): 島堤による波の反射および回折に関する研究, 港研報告, 第 10 巻, 第 2 号, pp. 3-52.
- 合田良実 (1990 a): 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, p. 23.
- 合田良実 (1990 b): 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, p. 71.
- 鈴木康正・藤咲秀司・河合弘泰・平石哲也・小島 晃 (1995): 防波堤堤頭面スリット部材の多方向波力に関する模型実験, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 876-880.
- 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.
- 橋本典明・永井紀彦・浅井 正・菅原一晃 (1993): 海洋波の方向スペクトル推定における最大エントロピー原理法 (MEP) の拡張, 港研報告, 第 32 巻, 第 2 号, pp. 3-25.
- 橋本典明・永井紀彦・高山知司・高橋智晴・三井正雄・磯部憲雄・鈴木敏夫 (1995): 水中超音波のドップラー効果に応用した海象計の開発, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 1081-1085.
- 平石哲也・富田康大・鈴木康正 (1994): 円柱波力における波の多方向性の影響, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 836-840.
- 平石哲也・金澤 剛・榎本達也・佐藤一央 (1996): 多方向不規則波の読岸越波流量の数値計算, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 716-720.
- 平石哲也・富田康大 (1997): 波浪による衝撃力に対する浮標システムの安全対策, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp. 881-885.
- 平口博丸・鹿島遼一・田中寛好・石井敏雅 (1991): 多方向不規則波造波機の反射波吸収性能に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp. 121-125.