

傾斜水域に設置された潜堤による多方向不規則波の碎波変形特性

許 東 秀*・松本 幸久**・中村 昭 男***・岩田好一郎****

1. 緒 言

近年、潜堤の建設水深が深くなる傾向があるため、潜堤の耐波設計外力や背後海域への波浪伝達状況の精度高い推算のためには、多方向不規則波の碎波過程を含む波変形場の特性を明らかにすることが必要である。しかし、従来の碎波に関する研究は規則波や一方向不規則波を対象としたものがほとんどであり、実海域で我々が観測する多方向不規則波の碎波に関する研究例はほとんどなく早急に解明すべき問題となっている。

本研究では傾斜水域上の潜堤による多方向不規則波の碎波を取り上げ、主に水理実験より、碎波限界と碎波後の波変形について考究しようとするものである。

2. 水理模型実験と解析方法

2.1 造波水槽と潜堤模型

水理実験を、図-1 に示すような中部電力㈱電力技術研究所の所有する平面波浪水槽で行った。実験では一定水深域での静水深 h を 50 cm、構造物中心部の設置水深 h_c を 30 cm に保った。

本実験で使用した潜堤模型は 2 種類の木製の不透過矩形潜堤であり、その諸元は、堤長 $W=300$ cm・堤幅 $B=60$ cm・堤中心高 $d=18$ cm と、堤長 $W=300$ cm・堤幅 $B=60$ cm・堤中心高 $d=21$ cm である。

2.2 実 験 波

多方向不規則波の主波向を潜堤に対して直角方向 ($\theta_p=90(\text{deg.})$) で固定した。そして、有義周期 $T_{1/3}$ を 1.0 と 1.6 s の 2 種類とし、それぞれの周期に対し有義波高 $H_{1/3}$ を 4.5, 4.0 cm とした。また、方向集中度パラメータ $S_{\max}$ を 10, 25, 75, ∞ の 4 種類に変化させ、計 16 種類の波を造波させた。なお、多方向不規則波として、Bretschneider-光易型の周波数スペクトル(光易, 1970)、方向関数として光易型方向関数(Mitsuyasu ら, 1975)を、期

待波とした。なお、比較のために規則波の碎波限界実験も行った。すなわち、波向を構造物に対して直角とし、周期 $T=1.0\sim 1.8$ s の 5 種類変化させ、それぞれの周期に対して碎波が起こるまで波高を注意深く大きくした。

2.3 碎波の計測

予備実験で碎波は潜堤上の岸側部分で多く生じることが判明したので、碎波が頻繁に起こる BP1, BP2, BP3 の 3 区域を碎波計測区域として選定し(図-2 参照)、その 3 区域に碎波水位計(岩田ら, 1998)を設置して碎波の水位変動を計測した。それと同時に、碎波近傍の波の挙動を 8 mm ビデオカメラ (SONY: CCD-TR 705) を用いて撮影した。

さらに、潜堤周辺の波変形特性を明らかにするために、潜堤を縦横断する P1~24 の計 24 地点(図-3 参照)で電気容量式水位計を用いて、水位変動の計測を行った。水位計により計測された時間波形は、パーソナルコンピュータを使用しサンプリングタイム 0.01 s、データ数は、多方向不規則波の場合は 10240 で、規則波の場合は 1024 で AD 変換を行いハードディスクに収録した。

なお、潜堤と図-3 の波変形の計測地点 P 15 までが多方向不規則造波装置の有効造波領域の範囲に入っている

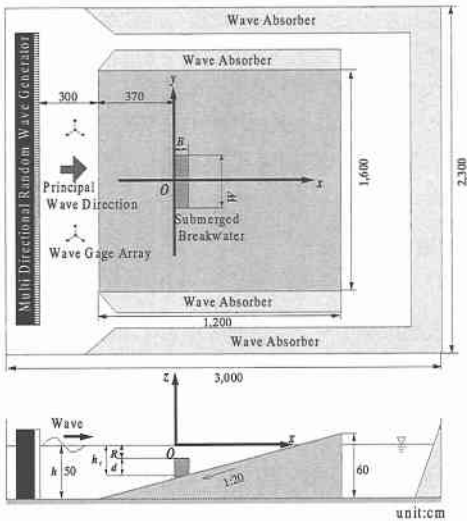
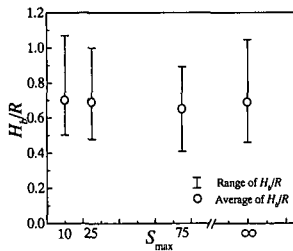
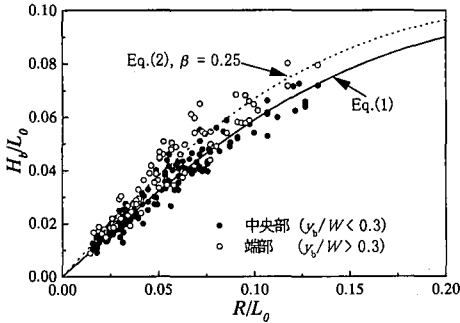


図-1 実験水槽

* 正 会 員 博(工) 名古屋大学大学院助手 工学研究科土木工学教室
** 正 会 員 工 修 若築建設(株) 土木本部設計部
*** 正 会 員 中部電力(株) 電力技術研究所
**** フェロー 工 博 名古屋大学大学院教授 工学研究科土木工学教室

図-5 $S_{\max}$ と H_b/R の関係図-6 R/L_0 と H_b/L_0 の関係

端水深比 H_b/R の関係を示した図であり、図中の I は H_b/R のばらつきの範囲、○は平均値を示している。なお、ここで用いた碎波の数は、 $S_{\max}=10, 25, 75, \infty$ の場合それぞれ 48, 59, 67, 61 であり、碎波データ数に若干大小はあるものの大きな差異はないと考えてよい。図-5 からわかるように $S_{\max}$ が大きくなるにつれて、すなわち多方向性が弱くなるにつれて、平均的に H_b/R が小さくなる傾向が見られる。

多方向性が強くなるに伴い碎波波高が大きくなる理由として、多方向不規則波では異なる向きの波が合成されるため部分重複波的性格を帯びる波も存在するようになるので、多方向性が強いほど、波高の大きな碎波が生じ易くなることが考えられる。しかし、図-4 と図-5 から、多方向性 ($S_{\max}$ の差異) による碎波波高の違いはさほどなく、むしろ碎波波高は潜堤上の碎波位置によって大きく異なると考えられる。

4.3 多方向不規則波の碎波限界の定式化の試み

前述したように、来襲波の多方向性の違いより、潜堤端部での屈折などの影響で、碎波波高が碎波位置により大きく異なるので、ここでは工学的な観点より、大きく y 方向の無次元碎波位置 $y_b/W > 0.3$ を潜堤端部、それ以外の部分 $y_b/W \leq 0.3$ を潜堤中央部として区分けして、碎波波高・沖波波長比 H_b/L_0 の変化について考察する。

図-6 に、多方向不規則波の相対天端水深 R/L_0 と碎波波高・沖波波長比 H_b/L_0 の関係を示しており、図中●は潜堤中央部 ($y_b/W \leq 0.3$)、○は潜堤端部 ($y_b/W > 0.3$) の実験値を、実線は 2.2 で既述した規則波の碎波実験

で定式化した碎波限界式 (1) (許, 2000)、破線は後述する碎波限界式 (2) を表している。

$$\frac{H_b}{L_0} = 0.106 \tanh\left(2\pi \frac{R}{L_0}\right) \quad (1)$$

ここで、 L_0 は沖波波長で、碎波周期 T_0 を用いて、 $L_0 = gT_0^2/(2\pi)$ によって計算している。

図-6 から、潜堤中央部に対して実験値と式 (1) の対応が比較的良好、潜堤中央部においては、規則波に対して提案された式 (1) で多方向不規則波の H_b/L_0 を精度良く算定できると考えられる。

一方、潜堤端部については、既述のように水深急変部での屈折等の影響が及ぶため全体的に H_b/L_0 が大きくなり、式 (1) では H_b/L_0 を過小評価する。そこで、著者らは潜堤端部による屈折等の効果は相対天端水深 R/L_0 に反比例すると仮定し、式 (1) を修正して式 (2) を提案する。

$$\frac{H_b}{L_0} = 0.106 \left\{ 1 + \beta \exp\left(-2\pi \frac{R}{L_0}\right) \right\} \tanh\left(2\pi \frac{R}{L_0}\right) \quad (2)$$

ここに、 β は入射波、潜堤等に支配される係数である。図-6 に示すように、式 (2) (図中の破線) は実験値との対応がよく、潜堤端部での H_b/L_0 を算定できると考えてよい。なお、式 (2) の係数 β については、実験値を最もよく近似するため $\beta=0.25$ を与えている。

5. 波変形特性

5.1 潜堤周辺の波高分布

図-7 は、無次元有義波高 $(H_p)_{1/3}/H_{1/3}$ の変化を示した例であり、横軸に計測位置 x, y を有義波周期 $T_{1/3}$ に対応する沖波波長 $(L_{1/3})_0$ によって無次元化した無次元計測位置 $x/(L_{1/3})_0, y/(L_{1/3})_0$ 、縦軸は計測地点における有義波高 $(H_p)_{1/3}$ を発生波の有義波高 $H_{1/3}$ で無次元化したものである。なお、図中の■, ●, ▲, ▼印は、それぞれ $S_{\max}=10, 25, 75, \infty$ の場合の値である。

図-7 において、まず沖側から潜堤前面に至る変化 ($x/(L_{1/3})_0 < 0$) を見ると、実験値が少ないが、 $(H_p)_{1/3}/H_{1/3}$ が増減し部分重複波と思われる変化を示すことが認められる。また、 $S_{\max}=\infty$ (一方向波) のときは $S_{\max}=10, 25, 75$ に比べ、 $(H_p)_{1/3}/H_{1/3}$ が常に大きな値となっている。これは、多方向波は、傾斜面での水深変化に伴う屈折の影響を受けない一方向波に比べ、潜堤に至るまでの水深変化による屈折の影響をより強く受けるためと考えられる。潜堤上に進行すると、潜堤設置に伴う水深急変のため、 $(H_p)_{1/3}/H_{1/3}$ が最大 1.25 まで急激に増大する傾向が見られる。なお、潜堤上では、 $S_{\max}$ が大きいほど $(H_p)_{1/3}/H_{1/3}$ が大きくなる傾向があるが、これは本実験では入射波の主流向が潜堤に対して直角方向になっているため、一方向性を帯びるにつれて潜堤による波高増大の

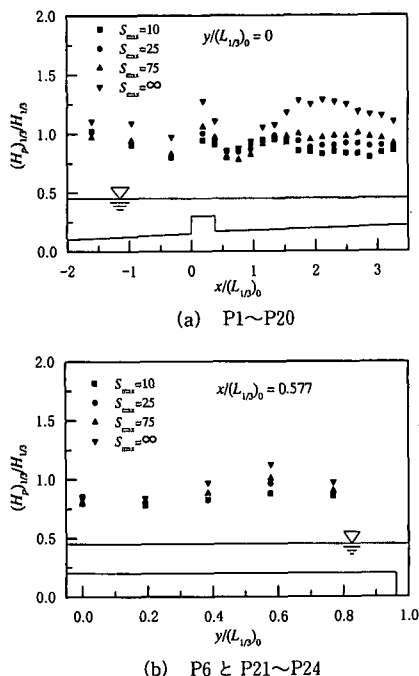


図-7 無次元有義波高分布

 $(H_{1/3}/gT_{1/3}^2=0.00459, R/gT_{1/3}^2=0.00918)$

影響を受けやすくなるためと思われる。さらに、潜堤上から潜堤背後にかけては碎波による波高減衰効果により $(H_p)_{1/3}/H_{1/3}$ が最小 0.75 まで急激に減少し、その後屈折や回折効果によって波エネルギーが潜堤後方に集まるためと浅水効果のため、 $(H_p)_{1/3}/H_{1/3}$ は一時的に増加する傾向がある。このことは、 S_{max} が大きいほど $(H_p)_{1/3}/H_{1/3}$ が大きくなる傾向が顕著に現れており、 $S_{max}=\infty$ のときは特に大きくなっている。

次に、 y 方向の $(H_p)_{1/3}/H_{1/3}$ の変化について考察する。全体的に潜堤中央背後 ($y/L_{1/3}=0.0$) から $y/L_{1/3}$ が大きくなるにつれ徐々に $(H_p)_{1/3}/H_{1/3}$ は大きくなっていき、 $y/L_{1/3}=0.6$ 付近で $(H_p)_{1/3}/H_{1/3}$ が最大 1.13 となりその後再び小さくなっていく傾向が見られる。また、 $y/L_{1/3}=0.0$ では S_{max} の違いによらずほぼ同じ値をとるが、 $y/L_{1/3}$ が大きくなるにつれて S_{max} が大きいほど $(H_p)_{1/3}/H_{1/3}$ の変動幅が大きくなることが確認できる。このことから、一方向性が強くなるほど潜堤による屈折や回折の影響を受けやすくなると思われる。なお、図示していない $H_{1/3}/gT_{1/3}^2=0.00159$ の場合もほぼ同じ傾向を示した。

5.2 エネルギー分布の変化特性

$y/(L_{1/3})_0=0$ 測線でのエネルギー分布を無次元化して示したのが、図-8 であり、周波数スペクトルを各ピークに対応する区間に分割し、すなわち $f < 0.5f_p$ の範囲を長周期成分、 $0.5f_p \leq f < 1.5f_p$ の範囲を基本周波数成分、 $1.5f_p \leq f < 2.5f_p$ の範囲を 2 倍周波数成分、 $f \geq 2.5f_p$ の範囲を

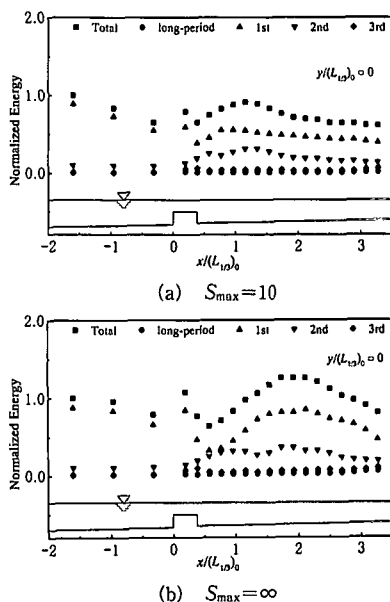


図-8 無次元エネルギー分布

 $(H_{1/3}/gT_{1/3}^2=0.00459, R/gT_{1/3}^2=0.00918)$

3 倍以上の周波数成分とし、それぞれに含まれるエネルギーを算定した。ここで、■, ●, ▲, ▼, ◆印はそれぞれ、全エネルギー、長周期成分、基本周波数成分、2 倍周波数成分、3 倍以上の周波数成分を表し、(a), (b) はそれぞれ $S_{max}=10, \infty$ の場合である。なお、P1 での全エネルギーで無次元化された。

図-8 から分かるように、2 倍周波数成分は波が潜堤上に到達すると、急激にエネルギーが増大していき、潜堤背後で基本周波数成分のエネルギーと相反するように増減を繰り返している。また、 S_{max} による違いを比較すると、 S_{max} が大きくなるにつれて、特に $S_{max}=\infty$ のときは波が潜堤背後を進行するとともに基本周波数成分のエネルギーの増加が明確に確認できる。

5.3 数値計算による波高分布

図-9 に、数値計算による一方向不規則波 ($S_{max}=\infty$) の $(H_p)_{1/3}/H_{1/3}$ の平面分布を示す。なお、図の左から右へ波は進行しており、潜堤を太線で記している。

同図から、潜堤沖側前面から入射する波と屈折により潜堤側壁から来襲する波とが合成して、潜堤端部岸側で局所的に波高が大きくなることが認められる。また、潜堤沖側前面の中央部付近では腹と節が出現する部分重複的な波が形成されている。潜堤背後では、潜堤による屈折や回折の影響によって波高分布が回り込むような形で分布していることが確認できる。

潜堤を横断する岸沖方向の波高変化についてより詳細な議論をするために、 $y/(L_{1/3})_0=0.0$ (潜堤中央部) 測線、 $y/(L_{1/3})_0=0.769$ (潜堤端部) 測線での x - z 断面の

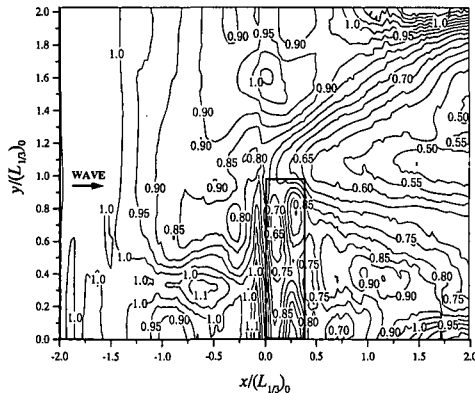


図-9 一方向不規則波の $(H_p)_{1/3}/H_{1/3}$ の平面分布
 $(H_{1/3}/gT_{1/3}^2=0.00459, R/gT_{1/3}^2=0.01224)$

$(H_p)_{1/3}/H_{1/3}$ 分布を例示すると、それぞれ図-10(a), (b) のようである。図-10(a) には、実験値 (図中▼印) を同時に示している。

図-10(a) から、 $S_{\max}=\infty$ の場合の 3 次元直接数値シミュレーション結果は、水理実験値より若干小さくなるものの、潜堤背後の波高増大等の全般的な傾向は実験結果との良好な一致が認められる。

また、沖側から潜堤に至るまでは、図-10(a) の潜堤中央部の方が $(H_p)_{1/3}/H_{1/3}$ の増減が見られ、部分重複的な性状が認められる。さらに、潜堤背後においては、潜堤中央部 (図-10(a)) の場合は岸へ近づくにつれ徐々に波高が増大するのに対し、潜堤端部 (図-10(b)) の方は、減少していく傾向がある。この理由として、造波した一方向不規則波の波向が潜堤に対し直角方向であるため、潜堤による屈折と回折の影響を受けて潜堤中央部背後付近に波エネルギーが集まるためと思われる。

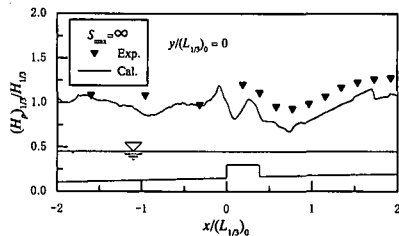
6. 結 論

本研究で得られた主要な結論を以下に要約する。

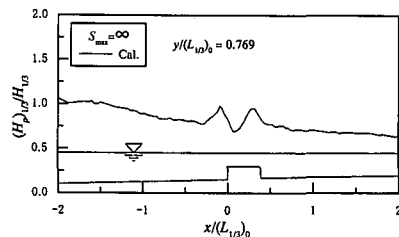
(1) 多方向性が弱くなるにつれて ($S_{\max}$ が大きくなるにつれて)、碎波波高・天端水深比 H_b/R が若干小さくなっていく傾向がある。

(2) 多方向不規則波は、潜堤端部では潜堤側壁水深急変部における屈折等の影響を受け、潜堤中央部より H_b/R が増大する。また、碎波波高・沖波波長比 H_b/L_0 は潜堤中央部 ($y_b/W \leq 0.3$) より潜堤端部 ($y_b/W > 0.3$) の方が大きくなり、その算定式として式 (2) を提案した。

(3) 一方向性を帯びるほど、方向集中度が大きいので潜堤による屈折・回折の影響を強く受けて、潜堤背後で波のエネルギーが集中する領域が比較的狭い範囲に限られる。このため、潜堤背後においては、潜堤中央部の場合は徐々に波高が増大するのに対し、潜堤端部の方は、



(a) 潜堤中央部 ($y/(L_{1/3})_0=0.0$)



(b) 潜堤中央部 ($y/(L_{1/3})_0=0.769$)

図-10 一方向不規則波の無次元波高分布

$(H_{1/3}/gT_{1/3}^2=0.00459, R/gT_{1/3}^2=0.01224)$

僅かに減少していく傾向がある。

(4) 潜堤背後で、2 倍周波数成分は、規則波の場合と同様に、基本周波数成分とほぼ逆位相で変動を示す。

(5) $S_{\max}=\infty$ の場合の 3 次元直接数値シミュレーションにより得られた有義波高は、水理実験値より若干小さいものの、全般的に実験結果と良く一致する。

今後、一方向不規則波だけでなく多方向不規則波に対する 3 次元直接数値解析方法の開発および精度高い乱流モデルの取り組みについて検討していく所存である。

参 考 文 献

- 岩田好一朗・川嶋直人・新美達也・富田孝史・許 東秀・松本幸久 (1998): 碎波水位計の試作と多方向不規則波の碎波の計測, 海洋開発論文集, Vol. 14, pp. 161-166.
- 川崎浩司 (1998): 潜水構造物による碎波変形と再生過程に関する基礎的研究, 名古屋大学学位論文, 186 p.
- 許 東秀・川嶋直人・松本幸久・岩田好一朗・富田孝史・水谷法美 (1999): 一定水深域に設置された潜堤による不規則波の碎波について, 海洋開発論文集, Vol. 15, pp. 303-307.
- 許 東秀 (2000): 潜堤による多方向不規則波の碎波特性と潜堤上の構造物に作用する波力特性に関する基礎的研究, 名古屋大学学位論文, 186 p.
- 光易 恒 (1970): 風波のスペクトルの発達 (2) —有限な吹送距離における風波のスペクトルの形について—, 第 17 回海岸工学講演会講演集, pp. 1-7.
- Beji, S. and J. A. Battjes (1993): Experimental investigation of wave propagation over a bar, Coastal Engineering, Vol. 19, pp. 151-162.
- Mitsuyasu, H. et al. (1975): Observation of directional spectrum of ocean waves using a cloverleaf buoy, J. Physical Oceanography, Vol. 5, No. 4, pp. 750-760.
- Petit, H. A. H., P. Tonjes, M. R. A. van Gent and P. van den Bosch (1994): Numerical simulation and validation of plunging breakers using a 2D Navier-Stokes model, Proc. 24th ICCE, Vol. 1, pp. 511-524.