

低天端ケーソン堤の越波による伝達波について

青野利夫*・貝沼憲男**・興野俊也***・金澤 剛****

1. ま え が き

大水深の外洋に防波堤を建設する場合、設計波高を越えるような高波浪時にはある程度越波を許容するような考え方によって、防波堤の天端高さを低くして設計の合理化をすることが考えられる。防波堤の天端高さを低くすることにより、比較的小規模の波浪でも越波の影響を受けるため、港内静穏度の低下が懸念される。従って、越波により発生する伝達波の影響を明確にする必要がある。

越波による伝達波の研究は、合田・竹田(1966)を始めとして多くの研究が行われているが、ほとんどが2次元断面実験の検討結果であり、現地での再現性がどの程度なのか明確でない。平面水槽を用いた高垣ら(1985)、平口ら(1991)の実験結果では、方向分散の影響を強く受ける結果が得られている。一方、港内静穏度解析への伝達波の組込みに関しては、平口ら(1991)、平石(1994)によるものがあるが、現地への適用性に関してはまだ十分検討されていない。

本研究は、低天端ケーソン堤の越波による伝達波の特性を現地観測により明らかにするとともに、従来の知見の妥当性および越波による伝達波モデルを構築するための基礎検討を行ったものである。

2. 現 地 観 測

現地観測は、茨城県ひたちなか市に建設中の東京電力(株)常陸那珂火力発電所東護岸背面および南護岸付近海域で行った。東護岸の施工時の天端高 h_c は、朔望平均満潮位上 $h_c = 1.5$ m、設計有義波高との比は0.23倍程度であり現在は低天端状態として取り扱える。観測地点は図-1に示すように東護岸背後の港内側に4地点、南護岸の港内側と港外側のそれぞれ1地点ずつとした。各観測地点には、電磁流速計付き水圧式波高計(D-2, D-3, D-4, S-2)、超音波式波高計と水圧センサー付き電磁流速計(D-1, S-1)を設置した。入射波の観測は、沖側の防波堤の影

響を受けない水深25 m地点に電磁流速計と超音波式波高計を設置して行った。観測期間は平成7年9月15日～平成7年10月10日までの25日間について行った。取得されたデータには有義波高 $H_{1/3} = 2.5$ m以上のデータが24回あり、観測期間中の最大波高は昭和以後最大級の規模を持つ台風12号の通過(9月17日)に伴うものである。この日の12時に $H_{max} = 7.77$ m, $H_{1/3} = 4.75$ m, $T_{1/3} = 8.9$ sの波浪を観測し、設計有義波高の75%程度の波高が取得された。波浪観測は、毎正時の前後10分間ずつ20分間行い、サンプリング間隔は0.5秒とした。

3. 解 析 方 法

水面変動データは、超音波式および水圧式波高計から得られるデータを用いて算定した。水面変動は基本的に超音波式波高計からの出力を用いているが、高波浪時の水面は、砕波によって大量の気泡が発生し、超音波式波高計では欠測が多くなる。そのため、超音波式波高計で観測された水面変動から得られる波の数が、100波以下の場合、水圧式波高計から得られる水圧波形を水面波形に換算して用いた。水圧波形から水面波形への変換には水圧波の方向分散を考慮した橋本ら(1992)と同様の方法によって行い、超音波式波高計で得られた水面波形と比較して変換波形の妥当性を確認した。有義波諸元はゼロダウンクロス法により統計処理を行って算定した。

港内波の解析は、水圧式波高計からのデータを用い、水圧波形から水面波形への変換は、入射波解析と同一で

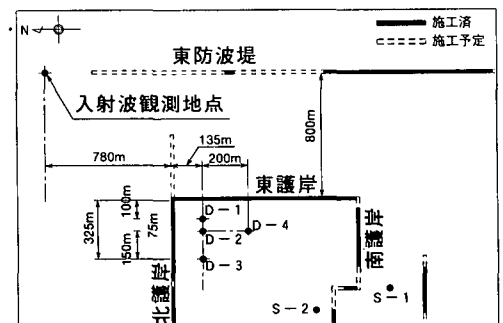


図-1 現地観測の概要

* 工博 東亜建設工業(株)技術研究所数値解析研究室
 ** 東京電力(株)電力技術研究所構造研究室 主管研究員
 *** 東京電力(株)電力技術研究所構造研究室 主任研究員
 **** 工修 東洋建設(株)土木本部土木設計部

ある。

また、現地の入射波浪特性を把握するため、拡張最大エントロピー原理法 (EMEP 法・橋本ら, 1993) による方向スペクトル解析を行い、波浪特性を検討した。

4. 観測結果

(1) 港内波の特性

港内波は、長周期波、回折波、反射波および伝達波等の様々な成分が重合して得られる波浪である。越波時と非越波時の港内波の波浪特性を把握するため、港内の D-1 地点から D-4 地点、および S-1 と S-2 の各地点の方向スペクトル解析を行った。図-2 と図-3 は、越波が最も激しく生じていた 9 月 17 日 12 時と越波がほとんど生じていない 9 月 21 日 8 時の方向スペクトル解析結果 (入射波と D-1 地点) を示したものである。

図-2 と図-3 から、越波時、非越波時ともに入射波の方向スペクトルは単一のピークを持ち、波向きはともに東護岸に対して直角に入射する波向き (E) となっている。一方、港内側では越波時と非越波時では異なる特性が見られ、越波時には港内側には多数のピーク値の発

生が見られる。この傾向は図には示していないが他地点においても見られる。これは、長周期波、回折波、反射波、伝達波等多くの成分が港内に発生していることを示している。

非越波時では、入射波と同一の周波数帯に 2 つのピーク値しか持たない。これは、非越波時における港内波が回折波とその反射波成分が港内で卓越していることを示唆している。

(2) 港内における長周期波成分

一般に、港内の観測波浪には、長周期波成分が含まれており、有義波諸元に強い影響を与えたと考えられる。長周期波成分は、港内観測波の周波数スペクトル形状から判断し周期 20 秒以上の波を数値フィルターを通して統計処理を行い分離した。

図-4 は、各地点の観測波高と長周期波成分の波高とを比較したもので、図中の実線は、それぞれ観測波高の 1 割、3 割および 5 割を示している。長周期波の波高は、港内観測波高の 1 割から 5 割の間となっている。図-5 は観測周期と長周期波成分の周期を比較した結果で、両者には明確な関係が見られず、長周期波の周期は、25 秒から 140 秒と非常にばらついている。これらは、港内波の解析には長周期波の影響を考慮した解析が必要であるこ

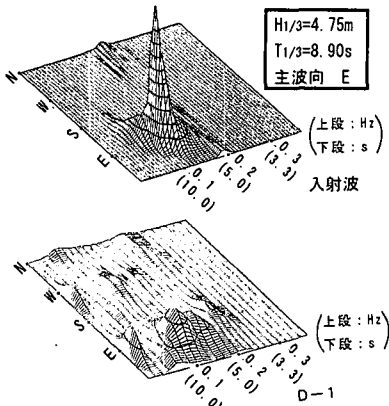


図-2 方向スペクトル解析結果 (9 月 17 日 12 時)

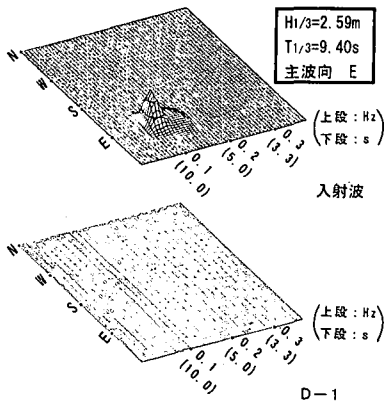


図-3 方向スペクトル解析結果 (9 月 21 日 8 時)

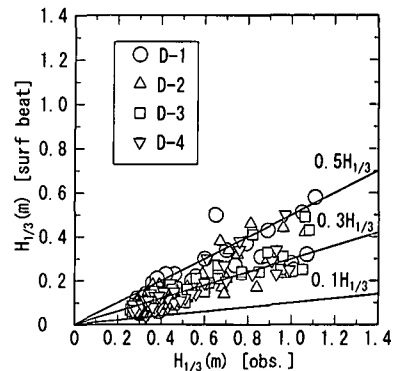


図-4 観測波高と長周期波高との比較

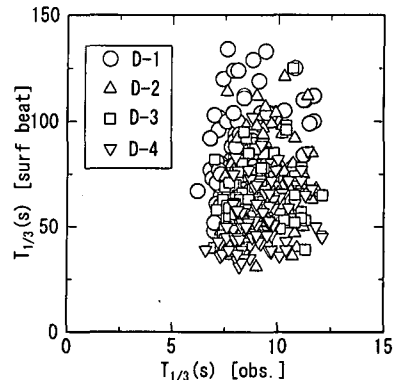


図-5 観測周期と長周期波周期との比較

とを示している。

5. 越波による伝達波の特性

港内の観測結果から明らかなように、越波時の港内では防波堤、護岸による反射波・回折波成分、長周期波成分、護岸からの越波によって発生した伝達波成分、およびそれらの反射波等様々な成分が含まれている。

そこで、越波による伝達波成分を検討するため、まず観測結果から周期 20 秒以上の長周期波成分を取り除いた。回折波・反射波成分に関しては、これらを同時に取り扱える有理化近似に基づく緩勾配不規則波動方程式(石井ら, 1995)による数値解析, 風波については Wilson 法による波浪推算を実施して伝達波成分の抽出を試みた。

(1) 緩勾配不規則波動方程式を用いた回折波・反射波成分の分離

入射波は、観測結果から得られた有義波高, 有義波周期, 主波向, 方向集中度パラメータ S_{max} を東防波堤の沖側 100 m に設置した沖側造波境界に与えた。計算領域は岸沖方向 2000 m, 沿岸方向に 3800 m とし, 差分格子間隔 6 m, 時間刻みは, 入射波周期の 1/50 とした。

解析は、越波時(9月17日12時, $H_{1/3}=4.75$ m, $T_{1/3}=8.9$ s, $h_c/H_{1/3}=0.33$: 9月17日19時, $H_{1/3}=3.28$ m, $T_{1/3}=12.3$ s, $h_c/H_{1/3}=0.46$) 2 ケースと非越波時(9月21日8時, $H_{1/3}=2.59$ m, $T_{1/3}=9.4$ s, $h_c/H_{1/3}=0.97$) 1 ケースの 3 ケースについて実施した。

図-6 は、越波時(9月17日12時, $h_c/H_{1/3}=0.33$) の緩勾配不規則波動方程式による港内の波高分布を示したものである。回折波は最奥部に位置する波浪観測点付近まで達しており、S-1 地点は入射波の影響が大きい。この傾向は、非越波時においても確認された。

図-7 は、各波浪観測点に相当する座標における計算時系列データから有義波高を算定し、長周期波成分を除いた観測値から得られる有義波高と比較したものである。図-7 から非越波時には、全地点で観測値と計算結果が良く一致しており、回折波と反射波成分が卓越しているのが確認できる。一方、越波時には越波の影響のない港外側の S-1 地点を除いて観測値が計算値よりも 6 割から 8 割程度高くなっている。このことは、越波時の港内波が回折・反射計算のみでは、精度良く計算できないことを意味し、伝達波等の成分を考慮する必要があることを示している。また、図-8 に各観測地点の時系列データを用いてスペクトル解析を行い、計算値と観測値の周波数スペクトルを比較した結果の一例を示す。非越波時の周波数スペクトルは、ピーク周波数が若干異なるものの、類似した分布を示している。一方、越波時の周波数スペクトルは、図-7 の結果を反映し、すべての周波数域で観

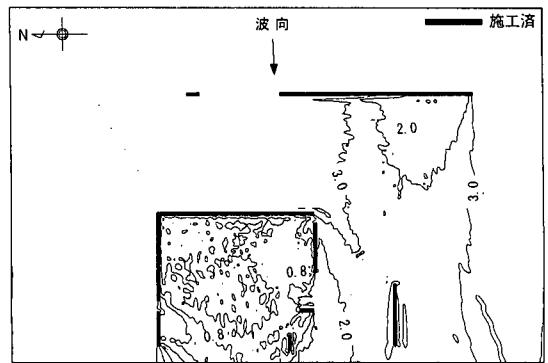


図-6 緩勾配不規則波動方程式による回折・反射計算結果(越波時: 9月17日12時) 波高分布 単位: m

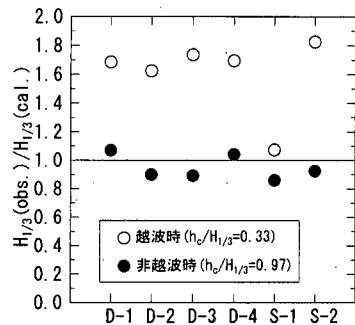


図-7 観測値と計算結果との比較

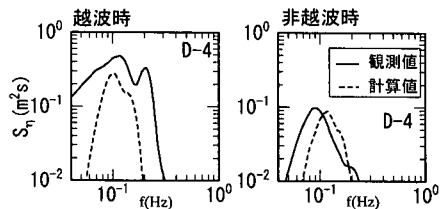


図-8 観測値と計算値のスペクトル比較結果 (D-4 地点)

測値が計算値よりも大きくなる傾向を示している。なお、観測値に見られる周波数が 0.2 Hz 付近のピークは、港内で発生した風波の可能性があるが、Wilson 法による波浪推算[風向は沖(東護岸)からとし、陸上での観測期間中の最大風速 15 m/s を与えて行った推算]を実施した結果、推算波高値が観測波高の 10% 程度、また周期が最大で 0.5 Hz 程度にしかならなかったため、今回の解析では風波を考慮しないこととした。

(2) 越波による伝達波成分の分離

緩勾配不規則波動方程式による解析結果から、港内における波浪は、非越波時は回折波・反射波が卓越し、越波時は伝達波成分の影響が非常に強いことが明らかとなった。緩勾配不規則波動方程式で全ての観測結果を解析することは計算時間の面から困難であるため、3 ケースの解析結果から簡便式を求め、越波による伝達波成分

を分離した。

越波による伝達波成分は、エネルギー的に観測結果から、長周期波成分、回折波・反射波成分および港内で発生する風波成分を除くことにより式(1)で表される。

$$(H_{1/3})_{TF}^2 = (H_{1/3})_{total}^2 - (H_{1/3})_{suf}^2 - (H_{1/3})_{cal}^2 - (H_{1/3})_{wind}^2 \quad \cdots (1)$$

ここで、添字のTFは伝達波成分、totalは観測結果、sufは長周期波成分、calは回折波・反射波成分、windは港内で発生する風波を表す。今回の解析では、風波の成分を考慮していないため、観測結果から長周期波成分を取り除いた波高を $(H_{1/3})_{obs}$ とすると式(1)は次式で表される。

$$(H_{1/3})_{TF}^2 = (H_{1/3})_{obs}^2 - (H_{1/3})_{cal}^2 \quad \cdots (2)$$

ここでは、緩勾配不規則波動方程式による3ケースの解析結果と長周期波成分を除いた観測結果との関係から簡便式を求め、伝達波成分を算定した。簡便式を求めるに当たって以下の仮定をおいた。

- ① 越波による波高の伝達率は、2次元断面実験結果と同様に相対天端高のみに依存する。現地では、その他に多方向性と波向きがあるが、今回の観測ではその影響は非常に小さかったため考慮しない。
- ② D-1からD-4の各地点の波高変化が小さいことから、方向分散を考慮しない。

図-9は、 $(H_{1/3})_{cal}/(H_{1/3})_{obs}$ と $h_c/H_{1/3}$ との関係を示したもので、両者の関係を最小2乗法で算定すると、

$$\frac{(H_{1/3})_{cal}}{(H_{1/3})_{obs}} = 0.6 \left(\frac{h_c}{H_{1/3}} \right) + 0.4 \quad \cdots (3)$$

のようになる。従って、越波による伝達波成分は式(2)を用いて以下のように表される。

$$(H_{1/3})_{TF} = \sqrt{(H_{1/3})_{obs}^2 - (H_{1/3})_{cal}^2} \\ = (H_{1/3})_{obs} \sqrt{1 - [0.6(h_c/H_{1/3}) + 0.4]^2} \quad \cdots (4)$$

全成分を含んだ観測結果から得られた波高と入射波高に対する波高伝達率を図-10に、式(4)の関係をを用いて算定した越波による伝達波の波高と入射波高に対する波高伝達率を図-11に示す。図中には、合田の経験式(Goda, 1969)ならびに参考として東護岸の1/50モデルでの2次元断面実験結果(現地換算で堤体背後から60mと160mの地点の平均値)を併せて示した。図で式(4)が負になる場合は、マウンド等からの透過波の存在を考慮して、全エネルギーの3%が伝達波になるようにしている。図-10から、全成分を含んだ観測結果による波高伝達率は相対天端高と無相関となることを示している。図-11から、現地における伝達波の特性は合田の経験式と比較的一致した傾向が認められる。ただし、相対天端高が低いときの伝達率は、合田の経験式よりも低く、実験結果が合田の経験式と比較的一致することを考慮する

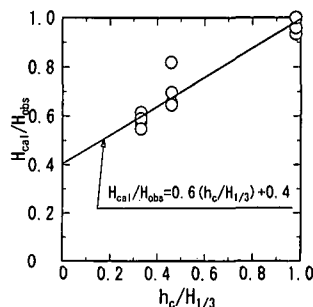


図-9 $(H_{1/3})_{cal}/(H_{1/3})_{obs}$ と相対天端高 $h_c/H_{1/3}$ との関係

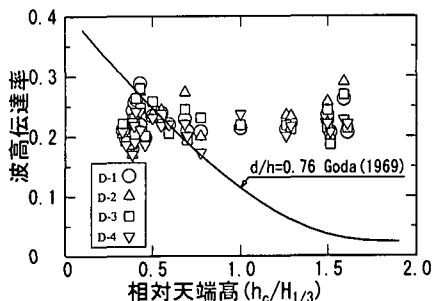


図-10 全成分を用いた場合の波高伝達率

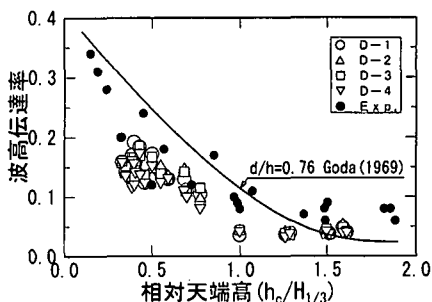


図-11 越波による波高伝達率(簡便式から算定)

と、この差は伝達波の方向分散性が影響していると考えられる。

図-12は、全成分を含んだ観測結果から得られた有義波周期と入射波の有義波周期に対する周期伝達率と相対天端高との関係を示したもので、図中には合田ら(1974)の経験式を併せて示した。図-12から、全成分を含んだ観測結果から得られる周期伝達率は図-10と同様に相対天端高と無相関となっている。これは、港内波の周期には相対天端高に関係しない長周期波と回折波の影響が大きいことを示している。越波による伝達波の周期は、伝達波の周期が回折波の5割になるとした平石による方法(1994)で検討した。この方法を用いて補正すると、図-13に示すように長周期波成分を取り除いた伝達波の周期伝達率は、合田ら(1974)の経験式に近い傾向を示す。図-13には、2次元断面実験結果が示されている

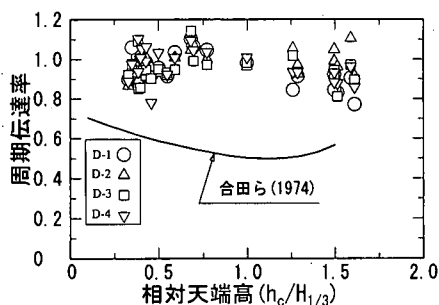


図-12 全成分を用いた場合の周期伝達率

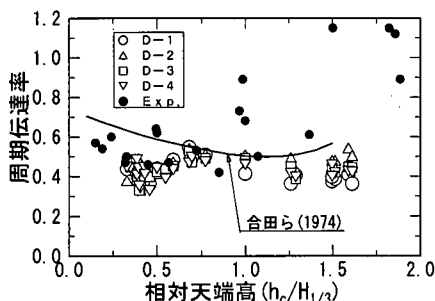


図-13 越波による周期伝達率 (平石の方法で補正)

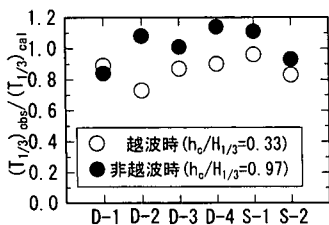


図-14 有義波周期の観測結果と計算結果との比較

が、相対天端が1以下では合田らの経験式に近い傾向を示し、1以上では伝達率が大きくなる。これは、マウンドからの透過波の影響が強くでていると考えられる。

図-14は、有義波周期の緩勾配不規則波動方程式による計算値と観測値との比を各地点について示したもので、越波時と非越波時の結果を示した。図-14から、有義波周期は、越波時と非越波時で計算結果と観測結果とは異なった特性を示し、越波時は、観測周期が計算結果に比較して短くなる傾向にある。一方、非越波時は若干長くなる傾向を示す。このことは、越波による伝達波は、入射波周期に対し短くなることを示す。

6. ま と め

本研究で得られた成果は以下の通りである。

① 越波時には、入射波方向スペクトルは単一のピー

クを持つが、港内側では多数のピークが見られた。これは、長周期波、回折波、反射波、伝達波等の多くの成分が港内波に含まれていることを示している。非越波時には、回折波・反射波成分が卓越していることが分かった。

② 有理化近似に基づいた緩勾配不規則波動方程式を用いて回折・反射計算を行った結果、非越波時は長周期波成分を取り除いた観測結果と良く一致し、回折波・反射波成分の卓越性が示された。越波時は、長周期波成分を取り除いた観測結果が計算結果よりも6割から8割程度大きくなり、その差は伝達波成分と考えられる。

③ 緩勾配不規則波動方程式の回折・反射計算結果に基づいて、長周期波成分を取り除いた観測結果から越波による伝達波成分を分離した。波高伝達率は、方向分散等の影響を受けて合田の経験式よりも小さくなっている。周期伝達率は入射波周期に対して短くなる傾向を示す。伝達波の周期が回折波・反射波の5割になるとした平石の方法を用いると、周期伝達率は、合田らの経験式に近い傾向を示す。

④ 越波を考慮した港内静穏度は、緩勾配不規則波動方程式による波浪変形解析の結果に合田の経験式による伝達率を合成することで評価が可能である。

今後、越波の伝達率を与える方法、天端高による越流モデルを構築する方法などを検討し、緩勾配不規則波動方程式に組み込むことにより、越波を考慮した港内静穏度解析手法の高度化が図れると考えられる。

参 考 文 献

- 石井敏雅・磯部雅彦・渡辺 晃 (1995): 有理化近似に基づく緩勾配不規則波動方程式を用いた波浪場・海浜流場計算法の実務問題への適用性, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 191-195.
- 合田良実・竹田英明 (1966): 越波による防波堤背後への波高伝達率, 第13回海岸工学講演会論文集, pp. 87-92.
- 合田良実・鈴木康正・岸良安治 (1974): 不規則波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.
- 高垣泰雄・清水二六・川原 進 (1985): 防波堤伝達波の平面分布特性, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 579-583.
- 橋本典明・永井紀彦・菅原一晃・浅井 正・久高将信 (1992): 波浪の多方向性と弱非線形性を考慮した水圧波から表面波への換算方法について, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 171-175.
- 橋本典明・永井紀彦・浅井 正・菅原一晃・久高将信・小野修平 (1993): 方向スペクトルの推定における最大エントロピー原理法の拡張, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 136-140.
- 平石哲也 (1994): 多方向不規則波を用いた港内波高分布に関する模型実験手法の検討, 港研資料, No. 788, pp. 1-32.
- 平口博丸・池野正明・井上素行・柏木洋之・阿部光信 (1991): 越波直後の伝達波の方向スペクトルを考慮した港内波の算定法, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 531-535.
- Goda, Y. (1969): Re-analysis of laboratory data on wave transmission over breakwaters, Rept. Port and Harbour Res. Inst., Vol. 8, No. 3, pp. 3-18.