

波群特性とサーフビートを考慮した防波堤堤頭部の設計波力について

関本 恒浩* ・ 近藤 浩右**・ 藤谷 昌弘***
今井 澄雄****・ 黒田 輝夫****

1. 緒 言

現行の混成防波堤設計法においては、滑動破壊に対する安全率を1.2以上確保することにより、最高波高や堤体の前・背面水位および摩擦係数その他の主要設計条件のばらつき、あるいは波力算定式そのものの推定誤差をカバーし、所定の安定性を確保するよう配慮されている。しかし、防波堤堤頭部のように場所的に波高の変化が大きく、かつ通常大きな波力が作用するところでは、設計条件の設定に当り特別な配慮が必要とされる。

防波堤堤頭部における蛇行災害は一般に波の回折効果とその発生原因として理解されているが、この効果だけでは既往の被災事例を十分には説明できないことも指摘されている（伊藤・谷本，1971）。他の原因としてはサーフビートの影響が考えられる。現行の設計法では、最高波の推定において暗にサーフビートの影響が考慮されてはいるものの、サーフビートによる水位変動を直接的に堤体前・背面の水位条件に反映した安定検討は行わない。しかしながら、サーフビートの水位変動が来襲波の波高増大に伴い有意な大きさに発達すれば、水位上昇時の浮力の増大と静水圧の発生、あるいは水位下降時の衝撃波圧の発生可能性が堤体の安定検討上不可欠の要素となりうる。

本研究では、先端水深約13mの防波堤堤頭部において約2ヶ月間にわたり水位変動の現地観測を実施し、その結果を解析して堤体前・背面におけるサーフビートの特性を波浪成分の特性と関係づけるとともに、波群化を考慮した $H_{max}/H_{1/3}$ の関係を取込んだ防波堤堤頭部の堤体安定検討フローを提案する。さらに、現実に近いモデル堤体と確率波高の条件を与え、サーフビートによる堤体前・背面水位変動を確率変数として取扱った場合、波高の再現確率と堤体の滑動確率がどのように対応するかを調べる。

2. 現地観測とデータ処理の方法

現地観測は、新潟県柏崎市にある東京電力株式会社柏崎刈羽原子力発電所専用港湾の南防波堤堤頭部において、1989年1月末から3月末まで約2ヶ月にわたり実施した。観測点の配置を図-1に示す。堤体部では防波堤先端から25m、125m、225mの堤体前・背面に容量式波高計を設置し、2時間おきに20分間、サンプリング間隔0.2sで計測を行った。堤体延長上のSt. Aには同期ケーブルで接続された自記式の超音波波高計と電磁流速計（方位計内蔵）を設置し、サンプリング間隔0.5sで2時間おきに約17分間の計測を行った。

データの処理にあたっては、数値フィルターを用いて得られた水位変動記録を周波数0.05Hz以上の波浪成分と0.05Hz未満のサーフビート成分に分離し、以下の解析に用いた。

観測の途中、高波浪に伴う計器の破損や電源の故障により欠測を生じたため、本稿では3月12日から3月31日の計測記録を対象に解析を行っている。この間、St. Aにおける最大有義波高は2.16m、有義波周期は5~8sで変化した。また、サーフビート成分の有義波周期は40~45sのものが卓越していた。

3. 堤頭部におけるサーフビートの特性

3.1 入射波との関係

3月12日~31日の観測各点における波浪成分およびサ

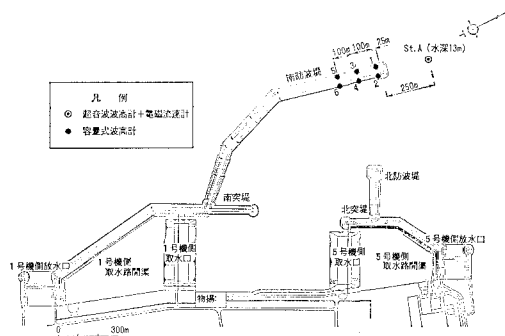


図-1 観測点の配置

* 正会員 工修 五洋建設(株) 土木設計部
** 正会員 工修 五洋建設(株) 技術部技術企画課
*** 正会員 工修 東京電力(株) 柏崎刈羽原子力建設所
**** 正会員 工修 東京電力(株) 柏崎刈羽原子力建設所

ーフビート成分の有義波高（以下各々 $H_{1/3}$, $G_{1/3}$ と表す）の経時変化を図-2 に示す。堤体前面の St. 1, 3, 5 における $H_{1/3}$ はいずれも入射波を代表する St. A の値の約 2 倍ではほぼ等しいが、 $G_{1/3}$ の値は多くのケースにおいて St. 3 が最も大きく、St. 1 が最も小さい。観測期間中のサーフビートの卓越有義波周期に対応する波長で無次元化した St. 1, 3, 5 の堤頭からの距離はそれぞれ 0.03, 0.24, 0.45 であり、 $G_{1/3}$ の分布は回折理論に呼応したものとなっている。しかし、それらの値は St. A と比べてはるかに大きく、5 倍以上に達するケースも多く見られる。このような増幅は一般の回折理論では説明が不可能である。

一方、堤体背面の St. 2, 4, 6 における $G_{1/3}$ は各地点とも同様に、St. A とほぼ同じ値を示す。同じデータを用いてクロススペクトル解析を行った著者ら (1990a) の研究によれば、港外で拘束波として存在していたサーフビートは、堤頭部の回折現象に伴う急激な波高の減衰により、港内を自由波として伝播することが明らかにされており、各地点の $G_{1/3}$ の分布もこれに対応したものと考えられる。

図-3 は横軸に入射波浪成分の有義波高 (St. A の $H_{1/3}$) をとり、St. 3 の $H_{1/3}$ と $G_{1/3}$ および St. 4 の $G_{1/3}$ を整理したものであり、図中の実線はそれぞれ以下の関係式により示される。

- ①堤体前面のサーフビートの有義波高 $G_{f1/3}$
 $G_{f1/3} = 0.3H_{1/3}^{1.5}$ (1)
- ②堤体背面のサーフビートの有義波高 $G_{r1/3}$
 $G_{r1/3} = 0.08H_{1/3}$ (2)

3.2 堤体前・背面のサーフビート水位変動の相関

通常、サーフビートのような長周期波に伴う水位変動は防波堤堤頭部の前・背面ではほぼ同振幅・同位相で生じ、前・背面水位差が有意な静水圧を生じさせることはないと考えられているように思われる。しかしながら、先に見た観測結果は、堤体の前・背面におけるサーフビートの挙動が別個の原因に支配されており、両者の水位

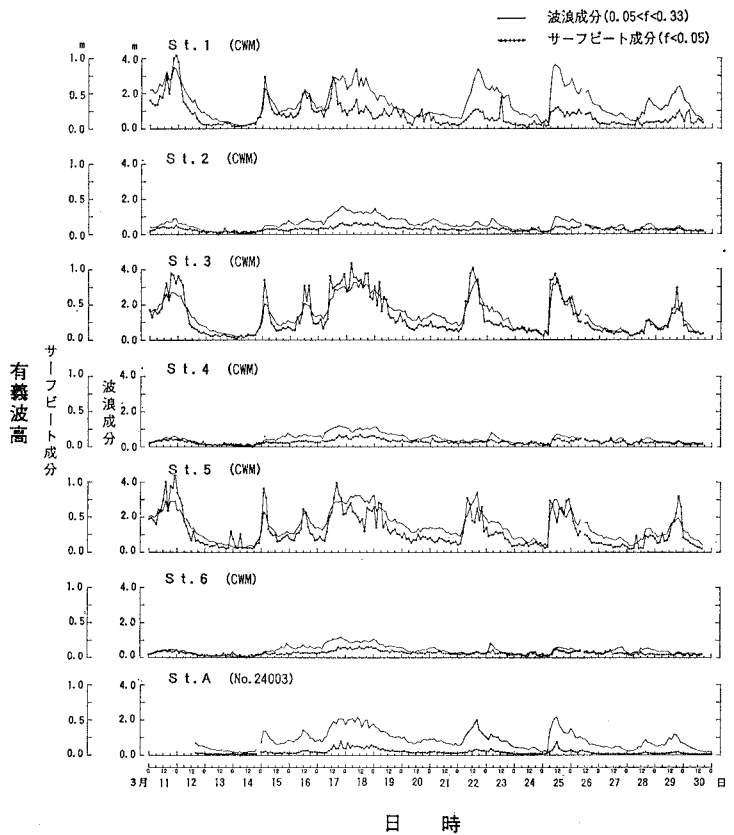


図-2 観測各点における波浪およびサーフビートの有義波高の変化

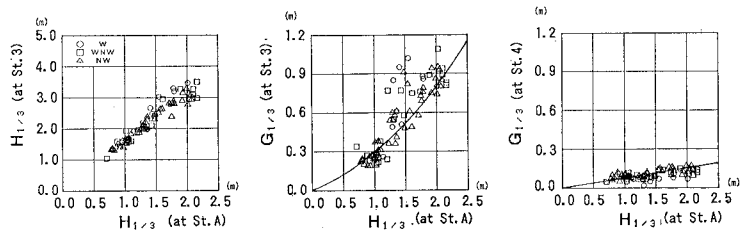


図-3 St. 3 の $H_{1/3}$, $G_{1/3}$ および St. 4 の $G_{1/3}$ と St. A の $H_{1/3}$ の関係

変動は全く相関がないことを示唆するものである。この点を裏付けるために、前・背面水位変動間の相互相関関数から絶対値が最大となるものを求め、入射波浪成分の有義波高に対して示したのが図-4 である。相互相関係数は概して小さく、波高が増加するにつれ

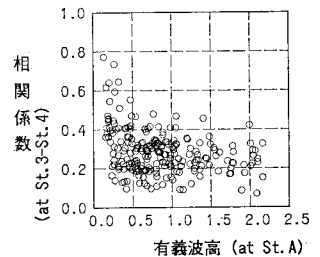


図-4 堤体前・背面サーフビート水位間の相関係数 (St. 3 と St. 4)

て、相関係数は減少する傾向を示す。1.7 m 程度以上の波高ではほとんどが 0.3 以下の値を示すことから、堤頭部における堤体前・背面のサーフビート成分の水位変動は独立なものと考えられる。

4. 防波堤堤頭部の設計波力算定方法

4.1 波群化の影響

混成防波堤の設計条件の設定に当たり、サーフビートの問題とは別に、波群特性をどのように考慮するかという問題がある。近年この方面での研究の進展に伴い、波群化の進行は不規則波における波高の度数分布形状を従来から多用されている Rayleigh 分布よりも裾広がり形状とし、結果として高波高の出現確率を高めることが指摘されている（間瀬ら，1986；安田ら，1989）。このような問題は必ずしも防波堤堤頭部の設計にのみ関連するものではないが、一般に堤頭部は防波堤延長上で最も水深が大きく、問題の重要性もより高いものと考えられる。波高度数分布を Weibull 分布で近似した場合、Weibull 分布の母数 m と波群化の指標である Groupiness Factor (GF) の間には負の相関があり（間瀬ら，1986；関本ら，1990a），この関係を用いて波高の度数分布と波群化を結び付けることが可能である。そこで、従来より碎波帯内の波高推定に用いられている合田（1975）のモデルの考え方に波高の度数分布として Weibull 分布を与え、碎波帯内の波高変化を計算した。図-5 は結果の一例を示すもので、沖波波形勾配 $H_0'/L_0=0.02$ ，海底勾配 1/100 に対応し、Weibull 分布の形状母数 m を 1.7, 2.0 (Rayleigh 分布), 2.2 の 3 通りに変化させている。波群化の効果は m の低下として表れるが、 H_{max} 増大の程度は碎波帯外で有意で、碎波帯内では $H_{1/3}$ に多少の変化が見られる程度である。したがって、設計波の碎波帯内に堤体が位置する場合、有義波高が同一であれば m が変化しても設計波高はさほど変化しない。このことは間瀬ら（1986）のモデルの場合でも同様である。

4.2 波の回折効果

堤体安定性に対するサーフビートの影響を考慮する際に、合わせて波（波浪成分）の回折効果を考慮すべきか

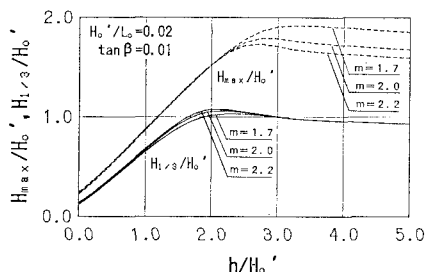


図-5 碎波帯内の碎高変化に及ぼす波高度数分布形状の影響

否かは微妙なところである。今回の観測結果では、サーフビートによる水位変動が強く現れるのはサーフビートの波長の 0.2 倍以上堤頭から離れた位置で、波浪成分の回折に伴う局所的な波高の増大地点はさらに堤頭側に近い位置にあった。サーフビート成分の卓越波長と波浪成分の卓越波長は 8 倍程度の開きがあったため、局所的な波力増加に対して両者が同時に作用しない条件にあったと考えられる。しかしながら、波浪成分の有義波周期が増大し、両者の波長比が 4 倍程度になると、各々の波向条件により同時に波力増大効果が作用することが生じうる。例えば、波浪成分の入射角が堤体に対して 60° ，サーフビート成分のそれが 120° とすると、回折理論から推定される局所的な影響増大地点はほぼ一致する。

厄介なのは現状においてサーフビートの来襲方向を推定する方法がないということである。非線形干渉理論によれば、長周期波の波向は波数ベクトルの差によって決まるので、波浪成分の波向よりも広い方向から伝播し、両者は無相関となる（Sand, 1982, Kimura, 1984）。実際、今回の観測においても両者の波向に相関は見られず、波浪成分の波向がほぼ W~NW 方向に集中しているのに対し、サーフビート成分の波向は海域全方向に分布している様子が見られる（図-6）。

したがって、現状では、地形、防波堤平面配置および構造物の重要度を考慮して両者の同時作用性を判断すべきと考えられる。

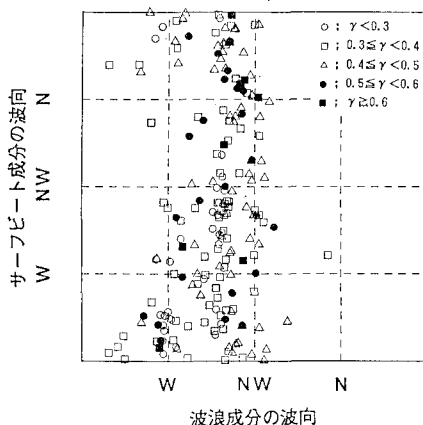


図-6 波浪成分の波向とサーフビート成分の波向

4.3 サーフビートの影響

堤体安定性に対するサーフビートの影響は、間接的には平均水位の変化を介して波高あるいは波力の増大に寄与するが、直接的にも浮力の増加および静水圧の付加として作用する。堤体の前・背面におけるサーフビートの水位変動を、

- ① 前面水位が上昇して背面水位が低下する場合
- ② 前面水位が上昇して背面水位も上昇する場合

③ 前面水位が低下して背面水位が上昇する場合

④ 前面水位が低下して背面水位も低下する場合

に分けて考えると、まず①と②の場合については、前面水位の上昇に伴って作用波高が増大し、同時に静水圧が波力に付加される。①の方が静水圧が大きい、②は浮力の増加が大きく、どちらが厳しいかは堤体幅に依存する。次に③と④の場合については、前面水位の低下に伴いマウンド高一水深比が大きくなるので、衝撃砕波圧の発生可能性を吟味する必要性が生じる。ただし、静水圧が逆向きに作用するので、通常の断面では①あるいは②よりも安定性は高い。

このような検討を進めるにはサーフビートの影響を水位変化量として設計条件に取込む必要がある。この際にも最高値を用いるか、あるいは有義値を用いるかで議論の分れるところであるが、当面は被災事例の検証等に使用されるものと思われるので最高値を採用する。今回の調査は1回の観測時間が20分と短く、30波程度のサーフビートを含むに過ぎないので、入射波高と最高水位の関係は明示できなかったが、便宜的には式(1)または式(2)より求められるサーフビートの有義波高の0.8倍程度を考えれば良いであろう。

以上を勘案した混成防波堤堤頭部に対する堤体安定性の検討フローを 図-7 に示す。

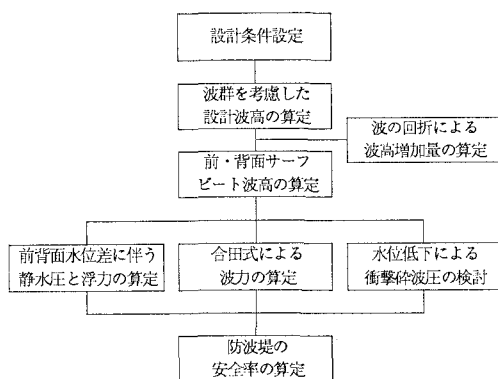


図-7 混成防波堤堤頭部の堤体安定検討フロー

5. モデル堤体に対する滑動確率の算定

5.1 サーフビート水位と滑動限界波高の関係

サーフビートによる水位変動を考慮することが滑動限界波高にどの様に影響するか、水位変動を確率変数として取扱った場合の滑動確率は来襲波高段階に応じてどの様に变化するか、また波高の再現期間と滑動確率の関係はどうかを具体的に示すため、図-8 のような現実に近いモデル堤体を対象として先のフローに従い検討を行った。検討に当たっての種々の条件、仮定を以下に列記する。

- | | |
|-----------------|------------------------------|
| ① 来襲波の有義波周期 | 13.0 s |
| ② 堤体への波の入射角 | 0° (直角入射) |
| ③ 海底勾配 | 1/100 |
| ④ 摩擦係数 | 0.6 |
| ⑤ H_{max} の推定 | 合田モデル |
| ⑥ 波の回折効果 | 無視 |
| ⑦ 波による波圧の算定 | 合田式 |
| ⑧ サーフビート水位の標準偏差 | $\zeta_{rms} = 0.25 G_{1/3}$ |

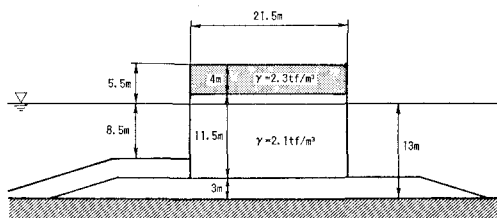


図-8 モデル堤体断面

横軸に rms 値で正規化した堤体前面サーフビート水位を、縦軸に同様に正規化した堤体背面サーフビート水位をとり、0.5m おきの堤体前面入射波高 ($H_{1/3}$) 段階別に滑動安全率が 1.0 となる線を表示したものが 図-9 である。原点は前・背面サーフビート水位を 0 とした通常の設計波に対する当堤体の安定性を示しており、波高 7.5m に対して 1.2 の滑動安全率を確保していることがうかがわれる。なお、 rms 値は各々の入射波高段階別に式(1)、(2)および⑧により求まる個別の値が用いられている点に注意する。

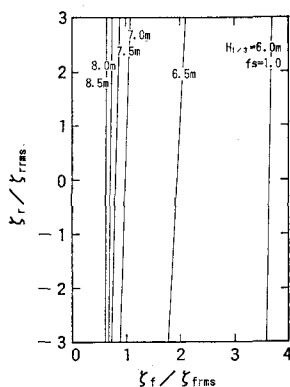


図-9 入射波高別の滑動臨界状態

5.2 入射波高と滑動確率

堤体前・背面におけるサーフビートの水位変動が各々正規分布に従って独立に変化すると仮定すれば、入射波高別の堤体の滑動確率 p は次式によって算出される。

$$p(f_s < 1) = \int_{\zeta_f, \zeta_r; f_s < 1} p_f(\zeta_f) p_r(\zeta_r) d\zeta_f d\zeta_r \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 p_r , p_r はサーフビートによる前・背面水位変動の正規確率密度関数を表し、各々⑧で表される標準偏差を有する。式(3)を計算することは、図-9において特定の線から右側の領域を積分することに他ならない。この様にして求めた入射波高と滑動確率の関係を図-10に示す。これより、入射波の波高約6.8mを境に滑動確率が急減することが理解される。

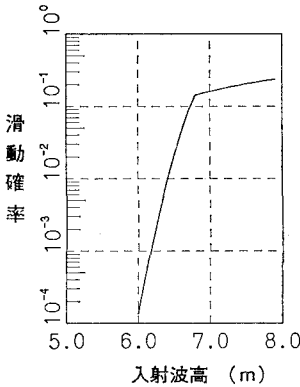


図-10 入射波と滑動確率の関係

5.3 設計波高の再現期間と堤体の滑動確率

上記滑動確率は各波高段階の再現確率との積をとることにより工学的な意味合いが明確になる。ここでは、便宜的に柏崎刈羽原子力発電所専用港湾の沖合、水深15m地点を対象として求められている確率波高(表-1)を用いて計算を行った。

表-1 確率波高

再現年数	確率波高	再現年数	確率波高
100年	7.67m	5年	6.59m
50	7.44	4	6.49
30	7.27	3	6.36
20	7.12	2	6.17
10	6.78	1	5.78

図-11は横軸に入射波の波高をとり、先に示した堤体の滑動確率と波高の再現確率(再現年数の逆数)および両者の積を表示したものである。両者の積は波高6.9m付近にピークを有する形状となるが、これは波高の大きな波よりも波高の小さな波の方が出現頻度は高く、かつ滑動確率がある程度高いためである。このような場合には、ピークの位置が所定の再現年数に対応する波高よりも大きな位置にくるよう、堤体に対して何らかの補強が必要となると考えられる。

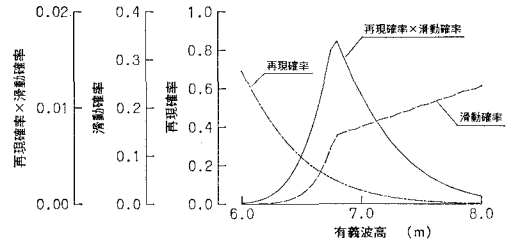


図-11 滑動確率と再現確率の関係

6. 結 語

現地観測により防波堤堤頭部における水位変動の特性を調べ、防波堤堤頭部における堤体安定性を検討する手法を提案するとともに、本手法による堤体の滑動確率に関する検討も実施した。本手法を用いることにより、防波堤堤頭部の設計波力を精度良く算定することが可能になるものと考えられる。ただし、本手法を適用するに当たって残された問題点も多い。例えば、サーフビート算定式に、水深、周期あるいは波群の効果が含まれていないことや設計波高に近い条件で堤体前面のサーフビート特性が実測されていないこと等である。また、既往の被災事例に対して波群とサーフビートの影響を検討することは重要である。

参 考 文 献

伊藤喜行・谷本勝利 (1971): 混成防波堤の蛇行災害, 港湾技術資料, No. 112, 20 p.
合田良實 (1973): 防波堤の設計波圧に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第12巻, 第3号, pp. 31~69.
合田良實 (1975): 浅海域における波浪の碎波変形, 港湾技術研究所報告, 第14巻, 第3号, pp. 59~106.
関本恒浩・清水琢三・窪 泰浩・今井澄雄・島津昌央 (1990a): 港湾内外のサーフビートの発生・伝播に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 86~90.
関本恒浩・鶴岡亮行・今井澄雄・寺田賢二 (1990b): 波群特性を考慮した最高波の出現確率に関する研究, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 111~115.
間瀬 肇・松本明男・岩垣雄一 (1986): 不規則波の浅水・碎波計算モデルに関する研究, 土木学会論文集, 第375号/II-6, pp. 221~230.
安田孝志・鶴岡亮行・土屋義人 (1989): 1次元的に伝播するうねりの統計的性質の空間変動, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 109~113.
Kimura, A. (1984): Averaged two-dimensional low-frequency wave spectrum of wind waves, Dept. of Civil Engg., Delft Univ. of Tech., Report No. 84-3, 54 p.
Sand, S. E. (1982): Long waves in directional sea, Coastal Engineering, Vol. 6, pp. 195~208.