

斜め入射波による島堤周辺の水位・流速変動に関する現地調査

杉山 弘泰* ・ 佐藤 泰明** ・ 鶴飼 亮行***

清水 琢三*** ・ 定森 良夫****

1. ま え が き

堤体に対して入射波が斜めに作用する場合には、直角に入射する場合に比べマウンド被覆材の移動が起こりやすい。現在建設中である常陸那珂港第4埠頭の北護岸は、汀線にほぼ直角に建設されるため、波浪は沿い波状態で構造物に作用することになる(図-1)。そのため、北護岸ケーソンの根固めブロックの設計には斜め入射を考慮する必要がある。当地点では、高橋ら(1990)が提案した斜め入射波に対する堤幹部と堤端部のマウンド被覆材の安定重量の算定方法を用いている。

高橋ら(1990)は、堤幹部および堤端部で発生する流速を、堤幹部は斜め入射波に対する微小振幅波理論を基に、堤端部には数値波動解析法による計算結果を基に定式化し、水理実験により検証している。ただし、堤幹部においては、入射角が大きくなる場合(60°程度以上)には局所的な波高の増大の影響を考慮する必要があるとしているが、十分検討されていない。また、実際の堤端部には渦流の発生等によりポテンシャル流の条件にならない場合があり、現地での実流速の把握が必要である。したがって、高橋ら(1990)の提案式の現地適用性を検討するため、現地観測において実際に発生している底面流速を把握することは重要である。

本研究では、北護岸において現地調査を実施し、現地での島堤周辺の波高・流速場について調べ、高橋ら(1990)の底面流速評価式による計算値と実測値を比較することにより、この評価式の適用性を検討した。また、底面流速に対する長周期波の影響についても検討した。

2. 現地調査の概要

2.1 調査方法

現地調査は、施工途中(10 函据付完了時)の北護岸ケーソンにおいて平成6年4月4日～27日の期間、実施した。このときの北護岸ケーソンの延長は約200mであった。

ケーソン周辺の波浪場および底面流速場を把握するために、図-2に示すように、入射波観測地点1地点(P0、水深17m)、堤幹部の前背面8地点および堤体端部4地点に自記式の水圧センサー付き電磁流速計を設置し、水圧および流速2成分データの観測を行った。なお、P0地点には超音波波高計も同時に設置している。本調査では、長周期波による底面流速に対しても検討できるよう全ての観測地点においてサンプリング間隔1.0sの連続観測を行った。このうち、堤幹部周辺に配置したP1～P8の8台および堤端部のP9からP12の4台は、それぞれ同期ケーブルで各計器間を接続することにより同時観測した。

島堤沿いに設置したP1～P8までの計測器は約60m間隔にケーソン直立部から3m離れた位置の根固めブロック上に設置した。また、堤体端部の測点のうちP9およびP11はケーソン端部の直立部より1.5m離れた地点に、P10およびP12は4.5m離れた地点に設置した。

各地点で観測された水圧データおよび流速データは、

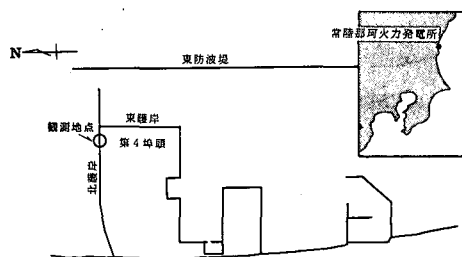


図-1 調査地点位置図

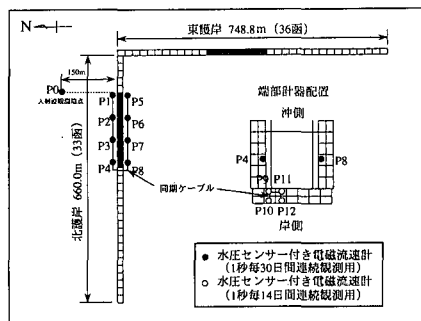


図-2 計測器設置位置図

* 正会員 工修 電源開発(株) 火力部
 ** 正会員 工修 電源開発(株) 常陸那珂火力建設所
 *** 正会員 工修 五洋建設(株) 技術研究所
 **** 正会員 (株)開発計算センター 科学システム事業部

表-1 入射波観測地点の波浪条件

年 月 日 時 分	$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (s)	$H_{L\ 1/3}$ (m)	$T_{L\ 1/3}$ (s)	波 向 (°)			$U_{1/3}$ (m/s)	U_{max} (m/s)	$U_{L\ 1/3}$ (m/s)	$U_{L\ max}$ (m/s)
					全波浪成分	風波	うねり				
1994 4 8 9 : 00	1.89	7.08	0.10	72.0	81	64	86	0.34	0.70	0.05	0.07
1994 4 13 18 : 00	1.81	8.36	0.12	75.3	128	114	129	0.38	0.78	0.05	0.07
1994 4 18 6 : 00	1.63	5.55	0.05	66.9	87	75	105	0.16	0.37	0.03	0.04
1994 4 20 7 : 00	1.67	5.38	0.04	56.7	85	61	116	0.18	0.37	0.06	0.07
1994 4 25 6 : 00	1.79	8.78	0.09	66.6	115	92	116	0.39	0.85	0.05	0.08

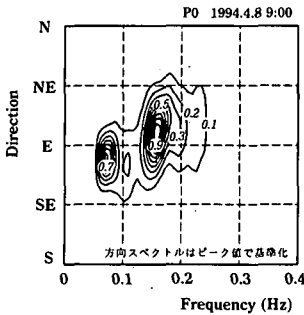


図-3 方向スペクトル解析結果

1 時間毎に区切り、統計処理を行った。水圧波形については、潮位成分の除去後、各周波数成分毎に微小振幅波理論を用いて水位に変換し、合成して水位波形を求めた。この変換の際の補正係数 (n 値) は、P0 地点の超音波波高計 (2 時間毎 20 分間観測) によるデータを用いて得られた水位と水圧の周波数スペクトルを比較して求めた。各観測地点の水位および流速データは、FFT を用いて波浪成分 (周波数 $f > 0.03$ Hz)、長周期成分 (周波数 $f < 0.03$ Hz) に分離して、それぞれの成分に対する統計量を求めた。

2.2 入射波浪特性

観測期間中には、ピーク有義波高が 2 m 程度の時化が 5 回観測された。各時化のピーク時の入射波地点の水位と流速の統計処理結果を表-1 にまとめた。表中には波浪成分の $H_{1/3}$ 、 $T_{1/3}$ 、主波向 (全波浪成分、風波成分およびうねり成分)、長周期成分の $H_{L1/3}$ 、 $T_{L1/3}$ 、波浪成分および長周期成分の有義流速 $U_{1/3}$ 、 $U_{L1/3}$ 、最大流速変動 U_{max} 、 U_{Lmax} を示した。なお、表中に記した風波成分とうねり成分は周波数スペクトルの解析結果をもとに波浪成分の周波数範囲をさらに分割したもので、風波成分は $f > 0.15$ Hz、うねり成分は $0.03 \text{ Hz} < f < 0.15 \text{ Hz}$ とした。

時化のピーク時に対して EMEP (橋本, 1993) を用いて方向スペクトル解析を行った。当地点では、例えば図-3 に示す 1994 年 4 月 8 日 9:00 の通り、風波とうねりから成る 2 方向性の波浪が生じやすいことがわかった。

3. ケーソン堤周辺の波浪・流況特性

3.1 堤体周辺の波高分布特性

水圧波形から変換された堤体周辺の水位の実測値を基

ただし、波向は北から時計回りを正とする。

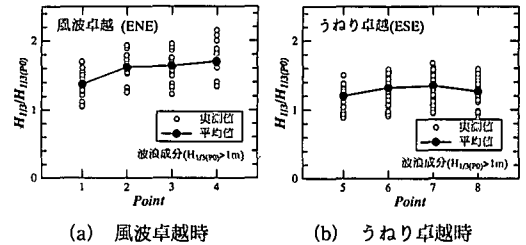


図-4 波浪成分の堤体沿いの波高分布

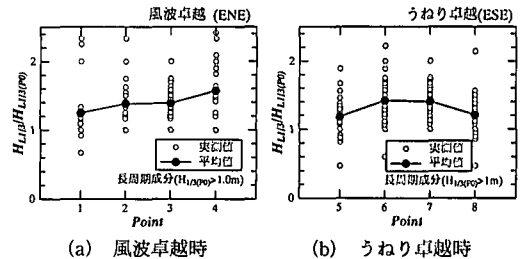


図-5 長周期成分の堤体沿いの波高分布

に、堤体周辺の波高分布について検討する。

図-4 は波浪成分の堤体沿いの波高分布を P0 地点に対する波高比分布で示したもので、P0 の有義波高が 1 m 以上のときの値を風波およびうねりが卓越している場合に分けて示したものである。なお、風波については P0 地点の波向が ENE、うねりについては ESE の場合について、それぞれ直接波浪が入射する堤体側の観測地点を示した。

風波が卓越する場合、沖側の P1 地点から岸側の P4 地点に向かうにつれて 1.4~1.7 程度に波高比の増大がみられるが、うねりが卓越する場合は、堤体中央部の P6 および P7 で波高比が大きくなるものの、1.3 程度と風波の場合に比べて小さかった。計測器を配置した北護岸は、施工途上であったため、その延長は 200 m と比較的短かったが、風波が卓越する場合には、堤体長は風波の波長の 5 倍程度となり、波長に比べて堤長が十分長く、堤体による反射波および散乱波の影響が波高分布に現れている。一方、うねりが卓越した場合は 1.7 倍程度となり、堤体の影響が風波が卓越した場合に比べて顕著に現れていない。長周期成分の波長は堤長に比べ非常に長い、図-5 に示す長周期成分の波高比分布は、波浪成分の分布と

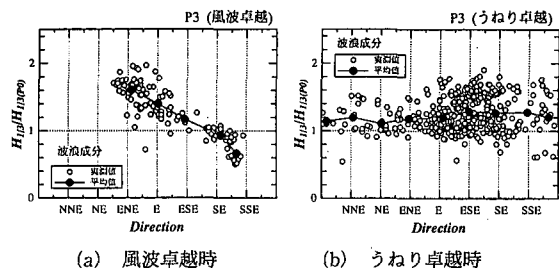


図-6 波浪成分の波高分布に対する波向の影響

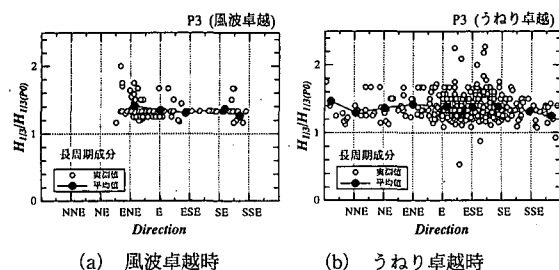


図-7 長周期波浪成分の波高分布に対する波向の影響

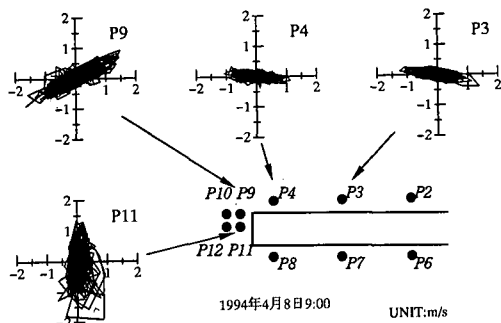


図-8 堤体周辺の流況特性

対応した傾向が得られた。

図-6 および図-7 は、波浪成分および長周期成分の波高分布に及ぼす波向の影響を調べたもので、P3 地点の波高比について横軸に P0 地点の波向をとってプロットしたものである。風波卓越時の波浪成分の波高比は、入射波向が北寄りとなり、P3 地点に対する入射角が大きくなると増大し、逆に P3 地点が遮蔽域となる南寄りの波向の場合は小さくなっており、遮蔽の影響が現れている。一方、うねり卓越時と長周期成分については、入射波向に関係なく波高比がほぼ一定となっており、堤体に対して波長が長い (1/2 波長以上) 場合には、波向の影響が波高分布に顕著に現れなかった。

3.2 堤体周辺の底面流況特性

図-8 は、時化のピーク時である 4 月 8 日 9 時の堤体周辺の底面流速の時間変化を示したものである。堤幹部の P3, P4 では、堤体に沿う方向に流速が発生しており、

堤端部の P9, P11 では P3, P4 に比べて速い流速が生じている。

なお、堤端部では堤体近傍 (1.5 m 離れた地点) の観測地点である P9 および P11 では、それぞれの地点から 3 m 離れた P10 および P12 地点に比べて、大きな流速が発生していた。

4. 底面流速評価式の適用性の検討

4.1 堤体周辺における底面流速の評価式

高橋ら (1990) は、斜め入射波および堤頭部に対する混成堤マウンド被覆材の安定重量算定法を提案しているが、そこでは堤幹部および堤端部の底面流速の評価式を次のように提案している。波高 H の入射波により水深 h の位置で発生する水粒子速度の最大値 U は次式のように表される。

$$U = \{(gH^2\kappa)/k\}^{1/2} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 g は重力加速度、 κ は無次元流速であり、相対水深の影響を表す k_1 と波長に対するマウンド前肩幅の相対的な長さの影響を示す $(k_2)_0$ の積として次式で表される。

$$\kappa = k_1 \cdot (k_2)_0 \dots\dots\dots (2)$$

$$k_1 = \frac{2kh'}{\sinh 2kh'} \dots\dots\dots (3)$$

$$(k_2)_0 = \sin^2 k B_M \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 k は水深 h' に対する波数、 B_M は基礎捨石マウンドの前肩幅である。波向を考慮した堤幹部および堤端部の無次元流速 κ をそれぞれ次のように提案している。

$$\text{堤幹部: } \kappa = k_1 \cdot (k_2)_B \dots\dots\dots (5)$$

$$(k_2)_B = \max \{ \alpha_s \sin^2 \beta \cos^2 (kl \cos \beta), \cos^2 \beta \sin^2 (kl \cos \beta) \} \dots\dots (6)$$

$$\text{堤端部: } \kappa = k_1 \cdot (k_2)_T \dots\dots\dots (7)$$

$$(k_2)_T = (\alpha_s \tau^2)/4 \dots\dots\dots (8)$$

ただし、 β は堤体法線の垂線と波の入射方向のなす角、 l は直立壁から対象となる地点までの距離、 α_s は安定重量を算定する際に、対象となるマウンド面の傾斜角の影響を考慮するための補正係数、 τ は堤頭部流速と無堤時の進行波の流速の比である。なお、以下の検討では、流速を実測値と比較する際には α_s は 1.0、安定重量を算定する際には、高橋ら (1990) に従い α_s は 0.45 とし、 τ は実測値を基に検討した。

4.2 底面流速評価式の適用性の検討

ここでは、先に述べた底面流速評価式を用いて計算した流速値と実測値を比較することにより、その適用性について検討する。

(1) 堤幹部

図-9 は、堤幹部の P3 地点での底面軌道流速の有義流速値 $U_{1/3}$ と入射有義波高 (P0 地点) の関係を波浪成分お

よび長周期成分について示したものである。図中の直線は、底面流速評価式を用いて計算した値である。ただし、本調査の堤幹部の観測地点では完全重複波とならず、波高比が2.0より小さかったため、図-6および図-7に示した波高比を考慮して底面軌道流速を計算した。

波浪成分については、計算値と実測値の対応が概ねよいが、実測値は波高が大きくなるにしたがって大きくなる傾向がみられる。この傾向は高橋ら(1990)の実験結果と対応している。また、入射角が大きくなってもその影響が小さいことがわかる。これは、入射角が大きくなって堤体沿いの流速が大きくなる傾向と堤体が有限長であることにより波高が小さくなる傾向が相殺したと考えられる。実測結果でも波向の影響はみられなかった。

一方、長周期成分は、観測値が小さかったこともあり、ばらつきが大きい。実測値と計算値は概ね対応している。なお、長周期成分の計算値にも図-7に示した波高比分布を考慮している。

(2) 堤端部

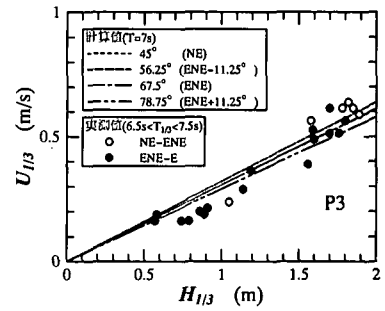
図-10は、P0地点で観測された流速と堤端部で観測された流速の比をセンサー高を考慮してとることにより、式(8)中の τ について検討した結果である。堤端部の4点の観測地点の内、堤体から4.5m離れたP10、P12地点では0.5~1.5程度の値をとっているが、堤体から1.5mの地点のP9、P11では1~3程度の値となった。また、 τ の値には入射角の影響はあまりみられなかった。なお、高橋ら(1990)は数値波動解析法による結果から求められた τ の範囲として1.0~2.5程度、実験結果からは1.4(1.2~1.5)としているが、現地観測でもそれに対応した結果が得られた。

図-11は、入射波高とP11地点の堤端部の底面流速の関係を実測値および計算値について示したものである。入射波高が比較的小さい場合の実測値は $\tau=1.4$ の値に対応しているが、波高が大きくなると $\tau=2.0$ の値に近くなった。

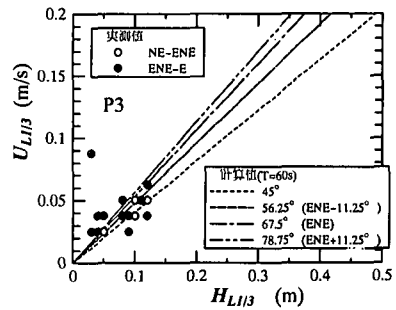
4.3 長周期波を考慮した底面流速の検討

高波浪時には波群拘束波などとして入射波浪に顕著な長周期波が含まれる場合がある。そこで、長周期波が底面流速に及ぼす影響について検討した。

図-12は、入射波観測地点P0における波浪成分と長周期成分の有義波高の関係を示したものである。図中には実測値とともに、合田(1975)のサーフビートの実験式およびSand(1982)の非線形干渉理論から求めた値を示している。主に波浪の発達期である風波が卓越した場合には、非線形干渉理論による値と対応している。一方、うねりが卓越した場合には合田の実験式に対応していた。この傾向は、関本ら(1991)の現地調査結果とも対応している。



(a) 波浪成分 (P3 地点)



(b) 長周期成分 (P3 地点)

図-9 堤幹部における入射波高と底面流速の関係

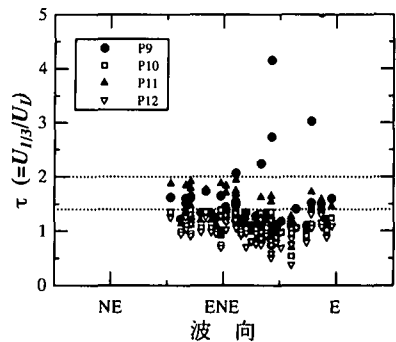


図-10 τ と波向の関係

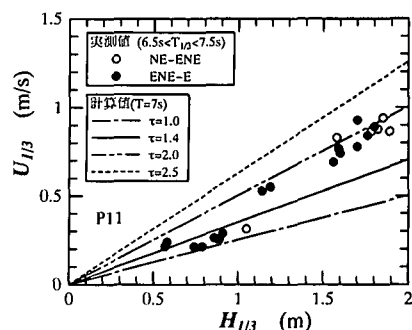


図-11 堤端部における入射波高と底面流速の関係

図-13は、堤幹部の有義流速の計算値と有義波高の関係を示したもので、波浪成分と長周期成分の流速の最大

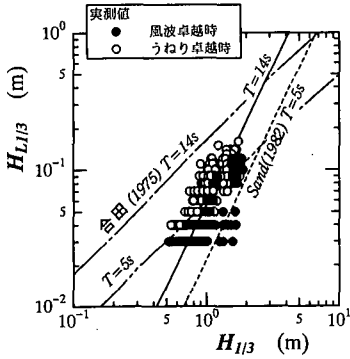


図-12 長周期波の推定

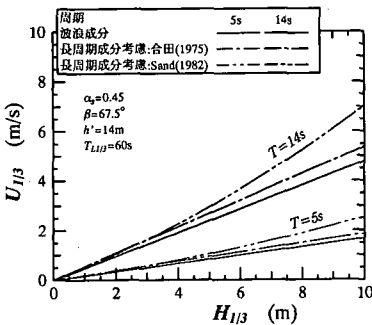


図-13 長周期波を考慮した入射波高と底面流速の関係

値を位相を考慮せずに単純に重ね合わせた結果である。長周期成分による底面流速の推定は、図-12に示した関係より波浪成分の有義波高に対する長周期成分の有義波高を推定し、式(1)を用いて長周期成分の流速を求めた。また、斜め入射波の場合、長周期波が完全反射するような長さの構造物は現実的ではないので、長周期波の堤前波高比を1.5と仮定して長周期波の底面流速を求めた。非線形干渉理論であるSandによる長周期波高は有義波高の2乗に比例するため、波高が大きくなると長周期波の底面流速に及ぼす影響が急激に増大する。

根固めブロックの安定重量は高橋ら(1990)より流速の6乗に比例することが実験により確認されている。そこで、長周期波を考慮した場合とそうでない場合の底面流速の比の6乗をとることにより、長周期波の安定重量に対する影響について検討した。

図-14は、流速比から求めた長周期波を考慮した安定重量と考慮しない安定重量の比と有義波高の関係を示したものである。合田(1975)によるサーフビート推定式を用いた場合には波高に関係なくほぼ一定の割増率となっ

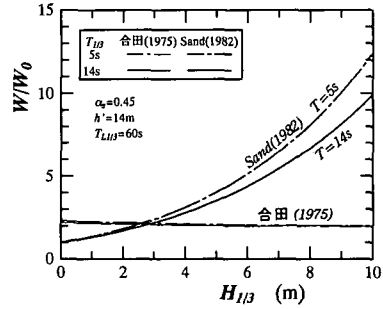


図-14 長周期波を考慮した根固めブロックの安定重量

ているが、Sand(1982)の2次の非線形干渉理論を用いた場合には、波高の増加に伴い、割増率が増加する傾向がみられた。ただし、本調査では2m以上の高波浪は観測されておらず、設計波クラスの条件に対しては外挿領域となっている。そのため定量的な評価を行うには十分なデータは得られていないが、設計波クラスの波浪が来襲した場合には長周期波の影響を無視できないことがわかった。

5. あとがき

斜め入射時における島堤周辺の波高分布および底面流速分布に関する現地調査を実施し、現地データに基づいて高橋ら(1990)の斜め入射時の底面流速評価式の現地適用性を検討した。その結果、高橋らの行った実験結果とほぼ一致した観測結果が得られた。

さらに、底面流速に対する長周期波の影響を検討したところ、設計波クラスの入射波高に対してはその影響が無視できないことがわかった。今後、定量的な評価法を確立するためには、さらに高波浪時の現地観測データを蓄積する必要があるだろう。

参考文献

- 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・鶴岡亮行・坂野雅人・近藤浩右(1991): 非碎波領域におけるサーフビートの現地観測, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 91-95.
- 高橋重雄・木村克俊・谷本勝利(1990): 斜め入射波による混成マウンド被覆材の安定性に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告, 第29巻, 第2号, pp. 3-36.
- 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(MEP)の拡張, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 136-140.
- Sand, S. E. (1982): Long waves in directional sea, Coastal Engineering, Vol. 6, pp. 195-208.