

砂礫層内における長周期水流動の現地観測

平石哲也¹・奥野光洋²・安藤興太³・国栖広志⁴

港内の長周期波による係留大型船舶の荷役事故が外洋に面した大型港湾で増加している。港内の長周期波対策の一つとして、港内岸壁や護岸の一部を改良し、幅の広い砂礫層に長周期波を透過させ、港内での反射による増幅を抑止する長周期波対策施設が提案されている。透水層内の水流動の特性とエネルギーの消波特性について、実験式は提案されているが、現地で観測した例はほとんどない。そこで、高潮による越流水を浸透させる目的で建設された砂礫層を有する馬堀海岸高潮対策護岸を用いて、台風来襲時の現地砂礫層内の水流動を調べた。その結果、透水層内の波高と流速から導かれたエネルギーが、*Dupuit-Forchheimer* 則に類似した近似式に従って減少していくことが確認できた。

1. はじめに

外洋から港湾に進入する周期数十秒～数分程度の長周期波によって、係留された大型船の動揺が大きくなり、荷役障害に至る現象が各地の外洋に面した港湾で増加している。長周期波対策として、ソフト的には港内長周期波の短期予測、ハード的には沖合防波堤の最適方向への延伸が提案されているが、その整備には多大なコストが必要であり、早急な対応が困難である場合が多い。一般に長周期波は港内での消波や吸収が困難であり、港内での共振現象により波高が増大する危険性があるため、人工干潟や適切な消波層を設置し、港内における反射率を低減させ、増幅による波高増大を抑える事が有効である。

平石 (2004) は、既存の岸壁・護岸施設を改良して、港内における 30 s から 300 s の周期帯に存在する長周期波の増幅を抑止するために、岸壁等の反射率を低下させる長周期波対策護岸を提案した。これは、港湾で多用されているスリットケーソンタイプの直立消波堤を改良し、陸側にもスリットを有する両面スリットタイプのケーソンを製作し、裏込め材に大型の礫石層を採用して、50 m 以上の幅広い消波層を設けたものである。ただし、上記の長周期波対策護岸について具体的な工法が提案されておらず、現在のところ施工された例はない。また、現地において透水層の長周期波消波効果が実証されていないので、試験施工によって、その効果を確認しておく必要がある。

一方、著者のひとりとは横須賀市馬堀海岸の高潮対策事業の設計に関する委員会のメンバーとして、両面スリットケーソンの裏込め部に越波を浸透させ、背後地への越波を防止する親水性高潮防護施設の開発に関わってきた。

この施設は 1998 年から実際に工事が実施され、2005 年 12 月に裏込め部の工事が全長でほぼ終了している。この高潮対策護岸は、目的は異なるものの、長周期波対策護岸の構造と類似しており、裏込め部の砂礫層内の長周期波流動を測定することにより、長周期波対策護岸の有効性を類推できる。現地砂礫層やマウンド内での水流動に関する現地観測は、これまでにほとんどなされておらず、石積み層の透過率を測定した富永ら (1971) の調査や、砂礫層による水質浄化作用を検討した小田ら (1994) の検討がなされているだけである。

本調査では、馬堀高潮対策護岸の工事途中区間を活用して、幅広の砂礫層内における長周期の水流動を測定し、長周期波対策護岸の反射率等を推定する数値計算法 (平石ら, 2002) で用いられている砂礫内のエネルギー損失式について検証した。

馬堀海岸高潮対策護岸は横須賀市の東京湾側に位置しており、外洋の長周期波が直接影響する場所に位置していない。したがって、観測された長周期流動の周期は長周期波に比べると短いので、長周期波による水流動を観測したわけではない。しかし、現地で砂礫層内の水流動を観測した例はなく、周期帯が異なっても参照できる結果が得られると考える。

2. 水流動の特性

(1) 現地観測の内容

図-1 に馬堀海岸の位置図を示す。観測地点は、馬堀海岸高潮対策護岸の東端に当たり、両面スリットケーソンが施工されたばかりで、上部工の工事は成されていない。図-2 に馬堀海岸高潮対策護岸の標準部の模式断面を示す。計測器は、法線直角方向に 3 カ所の計測機器を設置し、透水層 (捨石) 内の流速を測定した。計測器の間隔は、スリットケーソン後面の No.1 から透水層内部の No.2 までは 4.5 m, No.2 から透水層の奥に設置した No.3 までは 9.5 m である。写真-1 および写真-2 に計

1 正会員 工博 (独法) 港湾空港技術研究所海洋・水工部
2 (独法) 港湾空港技術研究所海洋・水工部
3 (独法) 港湾空港技術研究所海洋・水工部研修生
4 正会員 工修 日本海洋コンサルタント(株)技術開発部

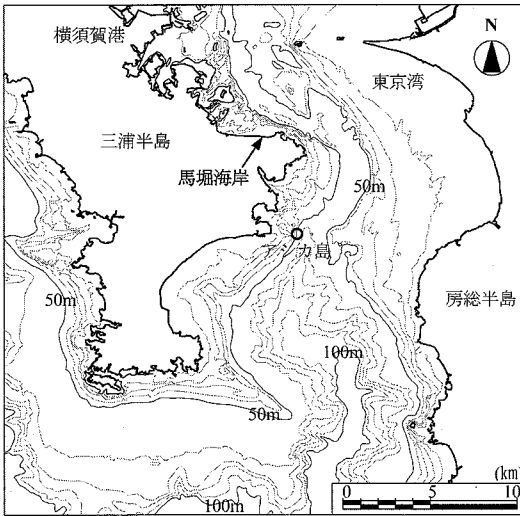


図-1 馬堀海岸高潮護岸位置図

器設置工事状況を示す。2005年8月16日から9月30

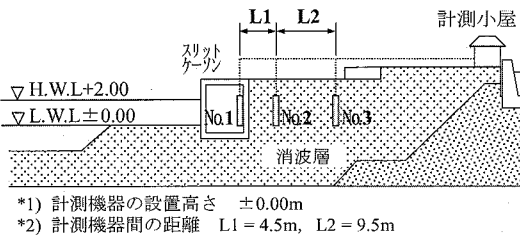


図-2 馬堀海岸護岸標準模式断面図および計器取付概要

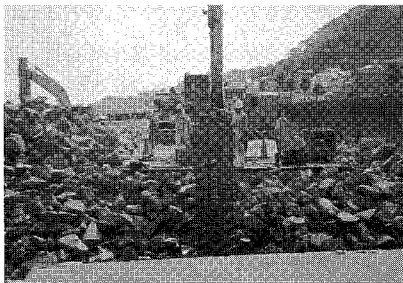


写真-1 計器設置状況 (計器取付箱の貫入)

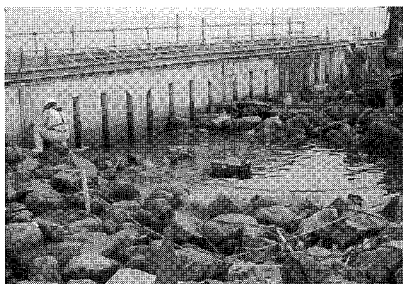


写真-2 計器設置状況 (計器埋め込み後)

日の設置期間中、台風11号および14号が来襲したので、0.5s間隔で48時間連続のデータを2回取得した。

(2) 計測期間中の波浪条件

本調査では、波高計を護岸前面に設置することが困難であったため、護岸前面波高を計測できなかった。従って、馬堀海岸における観測時の波高を推定するため、NOW-PHAS (全国港湾海洋波浪情報網) のアシカ島における波高観測値からエネルギー平衡方程式による波浪変形計算を行い、観測地点の波高を推定した。観測期間中の馬堀海岸護岸前面の推定有義波高 $H_{1/3}$ 及び周期 $T_{1/3}$ は以下の通りである；

2005年8月25～26日： $H_{1/3}=0.4\sim1.0\text{m}$, $T_{1/3}=6\sim12\text{s}$

2005年9月5～6日： $H_{1/3}=0.4\sim0.7\text{m}$, $T_{1/3}=10\sim15\text{s}$

(3) 現地の流速および水位の特性

前述した計測期間のデータの中で比較的波高および周期の大きかった2005年8月26日0時を選出し後述の解析を行った。波と流速の統計解析には、毎時00分から次の正時までの60分間の連続観測値を用い、連続した観測記録を0.5s毎にデジタル値に変換して有義値等を求めた。スペクトル解析では、0.01から0.5(1/s)の範囲でスペクトル密度を示し、2点の密度比も計算した。この中で、1/30(1/s)すなわち30sよりも長い周期の運動を長周期波成分とした(沿岸センター, 2004)。

図-3に海から陸方向を正とする水平流速の時系列変化を示し、表-1にゼロアップクロスによる統計値の集計表を示す。ここで長周期波成分は30s間の観測値を用いた移動平均法で計算している。図-4は、流速の測定値をスペクトル解析した結果で、周期10～12sの長周期側と周期5sの短周期側にピークが現れている。長周期側の振動周期は、アシカ島で観測された波浪の周期に等しく、外洋からのうねりによる成分が伝播していることが分かる。短周期側は東京湾内の北からの風で発生した湾内発生波による成分と考えられる。図-5は、観測流速スペクトルの密度比で、No.3とNo.2での観測スペクトル密度の比が1以下になっており水流動のエネルギー減衰が顕著に現れていることが分かる。なお、透水層に平行な流速変動は微小であった。

3. エネルギー損失の算定

(1) 砂礫透水層内のエネルギー損失の検討

波の反射率は、入射波の持っているエネルギーに対し、透水層内で失われるエネルギーを減じた反射波エネルギーとの比として考えられる。ここでは、前章で示した馬堀海岸高潮対策護岸における透水砂礫層内の流速値を用いて、水流動が透水層内で失われるエネルギーを損失水頭として算出した。さらに、透水層(裏込め材)の石材特性値からDupuit-Forchheimer則によるエネルギー損

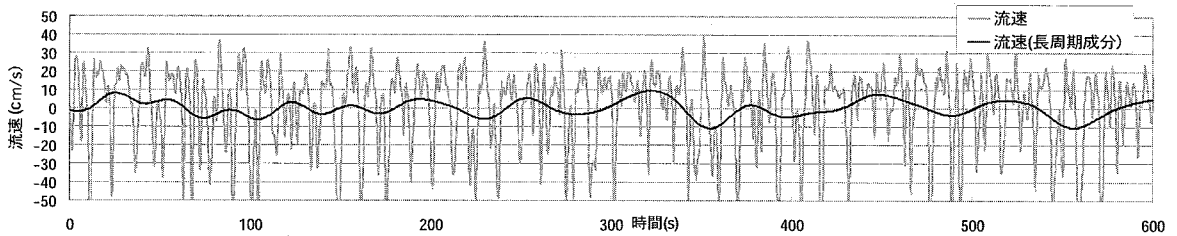


図-3(a) 流速観測値 (2005年8月26日0時) No.1 地点

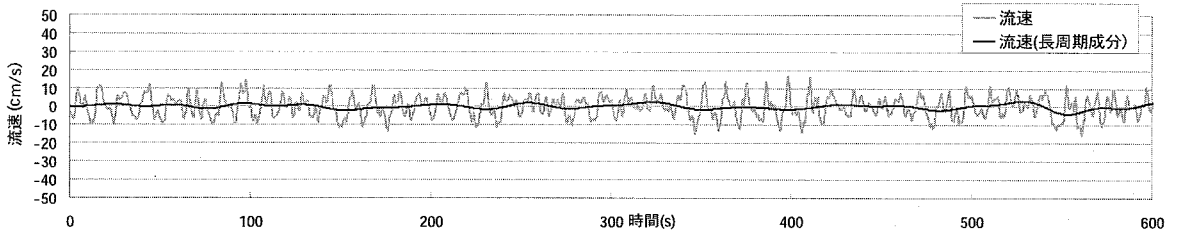


図-3(b) 流速観測値 (2005年8月26日0時) No.2 地点

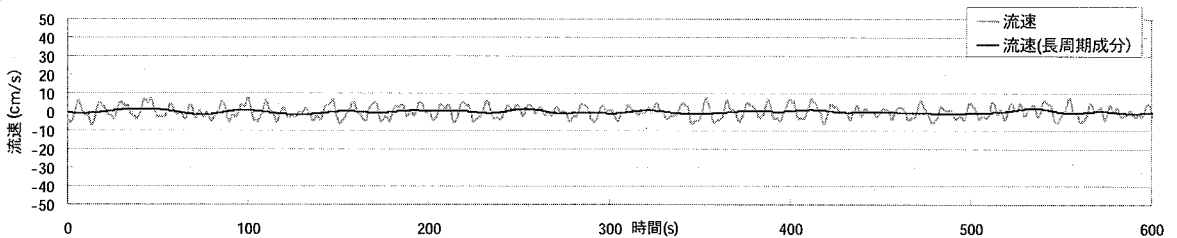


図-3(c) 流速観測値 (2005年8月26日0時) No.3 地点

表-1 流速統計値集計表 (2005年8月26日0時)

	波数	V_{max}	$V_{1/3}$	V_{mean}	T_{max}	$T_{1/3}$	T_{mean}
流速No1	547	122.4	81.9	53.3	11.5	9.0	6.6
流速No2	543	33.3	18.8	12.6	11.5	9.6	6.6
流速No3	401	16.4	10.8	7.3	13.0	12.0	9.0
長周期No1	62	20.4	14.1	9.1	74.5	77.9	58.1
長周期No2	60	7.3	4.8	3.2	93.5	74.8	60.0
長周期No3	60	3.9	2.7	1.8	72.5	60.6	60.0

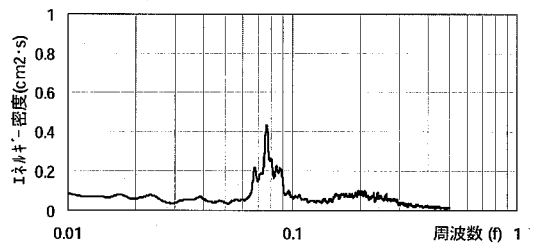
単位: V (cm/s), T (s)

図-4(b) スペクトル解析 (2005年8月26日0時) No.2 地点

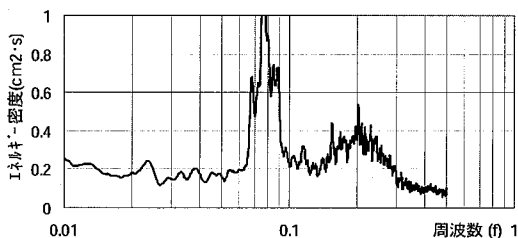


図-4(a) スペクトル解析 (2005年8月26日0時) No.1 地点

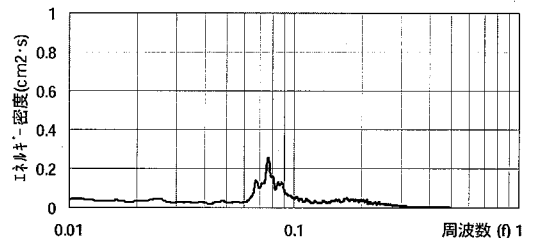


図-4(c) スペクトル解析 (2005年8月26日0時) No.3 地点

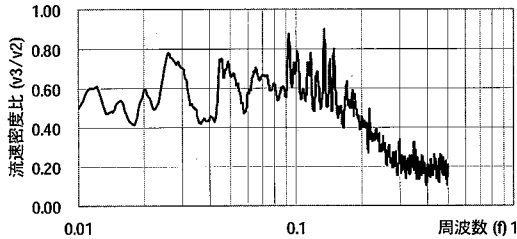


図-5 スペクトル密度比(2005年8月26日0時)No.3/No.2 地点

失を推定し、その適用性を調べた。

なお、Dupuit-Forchheimer 則は準一様流の仮定で求められており、現地での非定常流に対して厳密には適用できないので、本調査での損失の推定値は近似値になる。

a) 現地観測より求まる損失水頭

ここでは、一般的な透水層間の水流動を考える。流れの方向に l だけ離れた地点 1 と地点 2 における断面でベルヌーイの定理を適用すると式 (1) となる。

$$\frac{v_1^2}{2g} + z_1 + \frac{p_1}{\rho g} = \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + h_l \quad (1)$$

$$\text{水面こう配線: } I = z + \frac{p}{\rho g} \quad (2)$$

$$\text{エネルギーこう配線: } I_e = I - \frac{1}{2gl}(v_2^2 - v_1^2) \quad (3)$$

ここで、 v : 流速、 z : 基準面より流心までの高さ、 p : 管内圧力、 h_l : 損失水頭である。

損失水頭 h_l は、地点 1 と地点 2 の全エネルギーの差となる。速度から求める損失水頭は、海底勾配をほぼ水平とみなせるものとするとき式 (3) において $I=0$ となることから、計算では以下の式を適用した。

$$\Delta h_v = \frac{1}{2g}(v_1^2 - v_2^2) \quad (4)$$

b) Dupuit-Forchheimer 則より求めた損失水頭

次に Dupuit-Forchheimer 則を用い、裏込め材の石材特性値から水頭損失係数を求め、近似解として損失水頭を算出することを試みた。

一次元の定常流では、透水砂礫層が流れに及ぼす抵抗を、損失水頭の形で表現した Dupuit-Forchheimer 則の式が一般に成立する。

$$-\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} = (\alpha + \beta|q|)q \quad (5)$$

ここで、 α および β は、消波層内の空隙と材料特性から求まる係数で、次式で表される。

$$\alpha = \alpha_0 \frac{(1-\lambda)^3}{\lambda^2} \frac{\mu}{d^2} \quad (6)$$

$$\beta = \beta_0 \frac{1-\lambda}{\lambda^3} \frac{1}{d} \quad (7)$$

また、流れの方向に一定の距離 L だけ離れた地点 1 と

地点 2 における損失水頭 Δh_e は以下のとおりとなる。

$$\Delta h_e \frac{q}{g} (\alpha + \beta|q|) \times L = \left[2 \left(\beta + \frac{\alpha}{|q|} \right) \right] \cdot \frac{q|q|}{2g} \times L \quad (8)$$

なお、 $q = \lambda v$ 、 v : 流速、 ρ : 流体の密度、 μ : 動粘性係数、 d : 捨石粒径、 λ : 空隙率である。

近藤ら (1983) は、実験結果を基に、材料係数 $\alpha_0 = 800 \sim 1,500$ 、 $\beta_0 = 1.8 \sim 3.6$ を提案している。本研究では、材料係数 $\alpha_0 = 1,000$ 、 $\beta_0 = 2.0$ とした。 L は砂礫層の長さである。捨石粒径 d は、現地で 200 個の碎石を無作為に抽出し、測定して、0.40 m を得た。また、透水層の空隙率 λ は実際に石を直方体に積み上げ、型枠との総重量から計算し 39% として計算した。なお、石材の粒径は表面の長軸値であり、球の直径に換算した数値より大きい。また流速 v については、ゼロアップクロスによる流速観測値の統計値から No.3 地点の平均流速を用いて計算した。

現地観測における水位 (波高) および流速値より算出した損失水頭と、Dupuit-Forchheimer 則による圧力損失計算によって算出した損失水頭との間に、図-6 に示す相関関係があることが判明した。ただし観測値による損失水頭の絶対値は、計算値によるものの 1/10 以下なので 1 次近似式で絶対値を補正した。この一次近似式の係数を補正係数 C' ($C' = 0.0688$) として、Dupuit-Forchheimer 則による理論的に算出した損失水頭 Δh_e に乗じて損失水頭 $\Delta h_e'$ を算出した。損失水頭 $\Delta h_e'$ と現地観測値による損失水頭 Δh_v とを比較した結果を図-7 に示す。両者はよく一致し、Dupuit-Forchheimer 則による損失水頭によって、現地での損失が精度よく計算されていることがわかる。ここでは、現地観測値では、うねりが卓越していたので、うねりによる損失水頭として示す。時間が経つと擾乱が過ぎ去るので、損失水頭は徐々に低下した。

同様に長周期波に相当する成分から得られた流速によって計算した結果を図-8 に示す。長周期波成分の流速代表値は、30 s ~ 300 s のスペクトル密度を積分して、平方根に 3.6 倍して求めているが、本観測は長周期波の

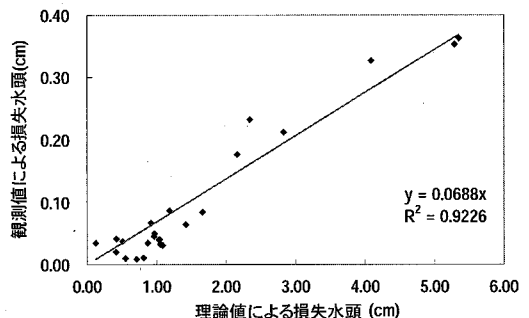


図-6 観測値と理論値の相関、8月26日00時~23時

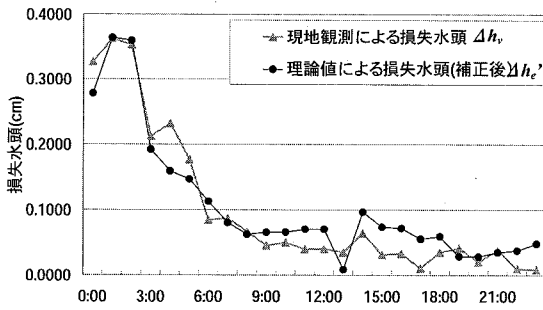


図-7 損失水頭の時系列変化 (8月26日, うねり成分)

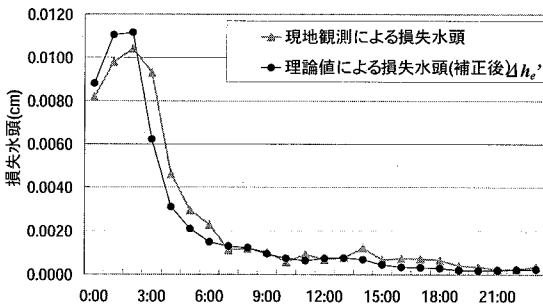


図-8 損失水頭の時系列変化 (8月26日, 長周期成分)

影響が小さい場所で得られた値であり, 絶対値は小さい。

図-7および図-8に示されるように, 8月26日は, 入射波高が大きく, 観測値の変化を推算値で表すことが妥当と考えられる。ただし, 振動する水流动の波高と流速から得られるエネルギー損失水頭は, Dupuit-Forchheimerで近似できる損失に補正係数を掛ける必要があった。したがって, 計算で得られた結論は, 材料係数等を標準値で与えた場合に対応しており, 現地の代表粒径の与え方や材料係数の選び方によって計算結果も変化する。今後も現地でのモニタリング結果などを考察して, 適切な材料係数や損失の与え方について十分な考察を行う必要がある。また, 往復流として時間的に変動している流動の損失を一定の損失式で近似しており, 今後は, 時間的に変動する流れに対するエネルギー損失を考慮していく必要がある。

(2) 現地水位観測結果による反射率の検討

合田ら(1976)の入・反射波分離推定法および久保田ら(1989)によって提案された擬似非線形長波理論を用いて, 2005年8月26日6時の反射率を算定した。久保田らによる計算式を次式に示す。

$$\eta_i = \frac{1}{2} \left[\eta + u \sqrt{\frac{d}{g}} \cdot \frac{d}{d - \eta} \right] \dots \dots \dots (9)$$

$$\eta_r = \frac{1}{2} \left[\eta - u \sqrt{\frac{d}{g}} \cdot \frac{d}{d - \eta} \right] \dots \dots \dots (10)$$

波高はNo.1(沖側)とNo.3(岸側)の水位計の長周

期波成分の値を用いた。水位計の距離は13.5m, 水深は1.5m, 解析に用いたデータ数は4,096個, サンプルングタイムは0.5秒, 使用したデータ長は約30分である。合田式から得られる反射率は0.8~1.0, 久保田らから得られた反射率はほぼ1.0であり, 透水層の長さが長周期波の消波には不十分であることがわかる。

4. あとがき

本稿では, 高潮対策護岸として建設中の透水砂礫層を用いて, 現地における長周期の水位と流速の砂礫層内における変動を調べた。主な結論を以下に示す。

- 1) 計測器設置後, 2つの台風が接近し, 周期十数秒のうねり成分が湾内に侵入し, 護岸前面でもうねりによる10~15sの流動が観測できた。
- 2) 透水層内のうねりによる流速変動スペクトルから, 振幅比を求めたところ, 0.7~0.8程度の比が観測されエネルギー低減効果が確認できた。
- 3) 流速変動から求めた現地でのエネルギーの損失水頭は, Dupuit-Forchheimer則で近似できる損失に補正係数を掛けることによって表すことができた。
- 4) スリットケーソン後壁のNo.1と透水層内の観測点No.3における水位変動と流速変化から入反射分離計算等で得られる反射率を求めたところ0.8~1.0であった。これは本観測に用いた護岸が本来, 高潮対策を目的としており, 透水層幅が短いためである。

謝辞: 本研究において現地観測を実施するにあたり, 国土交通省関東地方整備局京浜港湾事務所ならびに横浜港湾空港技術調査事務所の方々に多大なるご協力をいただいた。ここに記して心より感謝の意を表す次第である。

参 考 文 献

- 沿岸開発技術研究センター(2004): 港内長周期波影響評価マニュアル, 沿岸開発技術ライブラリー No. 21, 86p.
- 小田一記・貫上佳則・重松孝昌・真栄平宣之・網潔之・倉田克彦(1994): 沿岸局所水域の浄化を目的とした石積堤の最適諸元, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 1106-1110.
- 久保田進・水口 俊・堀田新太郎・竹沢三雄(1989): 現地観測における反射波の特性, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 120-124.
- 合田良美・鈴木康正・岸良安治・菊池 治(1976): 不規則波実験における入・反射波の分離推定法, 港湾技研資料, No. 248, 24p.
- 近藤淑郎・竹田英章(1983): 消波構造物, 森北出版, 275p.
- 富永正照・坂本忠彦(1971): 離岸堤による波浪減殺効果の現地観測, 海岸工学論文集, 第18巻, pp. 149-154.
- 平石哲也・永瀬恭一(2002): 流体直接解析法による長周期波対策護岸の性能検討, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 686-690.
- 平石哲也(2004): 長周期波対策護岸の効果に関する模型実験と数値計算, 港湾空港技術研究所資料, No. 1093, 21p.