

## 異形ケーソン堤の設計波力に関する研究

片山 裕之\* 関本 恒浩\*  
鵜飼 克臣\* 清水 琢三\*\*

### 要 旨

厳しい海象条件においては衝撃碎波力と呼ばれる設計波力より大きな波力が作用することがあり、この衝撃碎波力の評価法が課題とされている。衝撃碎波力の回避方策の一つに異形ケーソン堤があり、消波機能を持つものと耐波安定性に優れたものに大別される。本研究では、後者のタイプである後部パラペット上部斜面堤に着目し、既に実施された波力・滑動に関する水理模型実験の結果を用いて作用波力に関する詳細な検討を行った。その結果として、直立部とパラペット部の位相差を考慮した作用波力の考え方や、衝撃力から実際に堤体の滑動に寄与した有効波力への換算法およびその必要性を示した。また、ここでは、後部パラペット上部斜面堤の設計波力の考え方、既往の設計法との違いを報告する。

### 1. まえがき

近年、沿岸域の開発が飽和状態になりつつあり、今まで構造物が建設されなかった厳しい海象条件の海域も開発域になってきている。その場合、波浪条件によっては、衝撃碎波力と呼ばれる合田の波力公式から推定される設計波力の数倍に及ぶ大きな波力が発生する可能性があり、これに耐えることのできる耐波安定性に優れた構造にしなくてはならない。

前報において、非常に厳しい波浪条件下でも滑動安定性に優れた構造として、後部パラペット上部斜面堤に着目し、その耐波安定性、越波量・伝達波特性を把握し、通常のケーソン堤では建設不可能な地点においても適用可能であることを確認した。しかしながら、その設計波力の評価法については今後の課題となっていた。

本報告は前報<sup>1)</sup>に引き続き、後部パラペット上部斜面堤を対象に行われた波圧・滑動の水理模型実験結果を用い、設計波力の評価法を念頭において検討を報告するものである。

### 2. 合田式の概要（衝撃碎波力係数 $\alpha_1$ 考慮）

現在、直立式防波堤の波力の算定法としては合田式<sup>2)</sup>が用いられている。合田式は、重複波圧から碎波圧までを連続的に取り扱える波力算定式になっており、『港湾の施設の技術上の基準・同解説』<sup>3)</sup>において標準的な波力算定法として採択されている。（図-1）

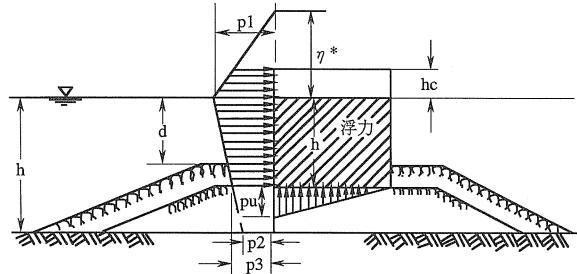


図-1 合田式による直立堤の設計波圧分布

合田式では、設計波高を堤体位置での最高波高  $H_{max}$  を用いるのではなく、堤体位置から  $5H_{1/3}$  ( $H_{1/3}$ : 有義波高) だけ沖側の位置での最高波高  $H_{max}$  を用いることになっている。また、マウンド高による波圧増分の効果を表す  $\alpha_2$  の項を加えることにより、マウンド形状による衝撃碎波力もある程度考慮した形となっている。

高橋ら<sup>4)</sup>の衝撃碎波力係数  $\alpha_1$  は、海底勾配の影響のない一様水深条件でのマウンド形状による影響を、規則波実験により定式化したものである。この衝撃碎波力係数は合田式の  $\alpha_2$  に相当し、現行の基準（合田式）の  $\alpha_2$  の部分を、 $\alpha_2$  と  $\alpha_1$  のうちの大きい方を用いれば良い。以下に衝撃碎波力係数  $\alpha_1$  について示す。

$$\alpha_1 = \alpha_{10} \times \alpha_{11} \quad (1)$$

$$\alpha_{10} = \begin{cases} H/d : H/d \leq 2 \\ 2.0 & : H/d > 2 \end{cases} \quad (2)$$

\*技術研究所 \*\*企画部

$$\alpha_{11} = \begin{cases} \frac{\cos \delta_2}{\cosh \delta_1} & : \delta_2 \leq 0 \\ \frac{1}{\cosh \delta_1 (\cosh \delta_2)^{1/2}} & : \delta_2 > 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\delta_1 = \begin{cases} 20\delta_{11} & : \delta_{11} \leq 0 \\ 15\delta_{11} & : \delta_{11} > 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\delta_2 = \begin{cases} 4.9\delta_{22} & : \delta_{22} \leq 0 \\ 3.0\delta_{22} & : \delta_{22} > 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$\delta_{11} = 0.93\left(\frac{B_M}{L} - 0.12\right) + 0.36\left(\frac{h-d}{h} - 0.6\right) \quad (6)$$

$$\delta_{22} = -0.36\left(\frac{B_M}{L} - 0.12\right) + 0.93\left(\frac{h-d}{h} - 0.6\right) \quad (7)$$

ここに、 $H$ ：波高(m)、 $d$ ：マウンド水深(m)、 $B_M$ ：マウンド肩幅(m)、 $L$ ：波長(m)、 $h$ ：設置水深(m)である。

### 3. 現行の上部斜面堤の設計法

本研究の対象は後部パラペット上部斜面堤であるが、ここではまず、現行の上部斜面堤の設計波力算定法について述べる。

上部斜面堤は森平ら<sup>5)</sup>や中田ら<sup>6)</sup>など、運輸省第一港湾建設局によって提案され設計法が確立してきた。通常ケーン堤と比して、斜面部に飛び込んでくる水塊が越流する効果による波力低減や、鉛直下向きの波力が期待できることなど、堤体の滑動に対して安全側に働く効果などが取り込まれている。森平ら<sup>5)</sup>によると、「合田式で求められた直立壁に作用する波力（水平力）は、斜面壁において、面平行方向成分と垂直方向成分に分解され、そのうちの垂直方向の成分のみが堤体に作用する」と記述している。上部斜面堤の設計波圧分布を図-2に、また斜面部の設計波圧算定式を式(8)に示す。

$$\text{斜面部水平波力} : P_{2H} = P_{2G} \times \sin \theta \sin \theta \quad (8)$$

$$\text{斜面部鉛直波力} : P_{2V} = P_{2G} \times \sin \theta \cos \theta$$

ここで、 $P_{2G}$ は合田波力の斜面部に相当する直立壁に作用する波力、 $\theta$ ：斜面部の傾斜角である。

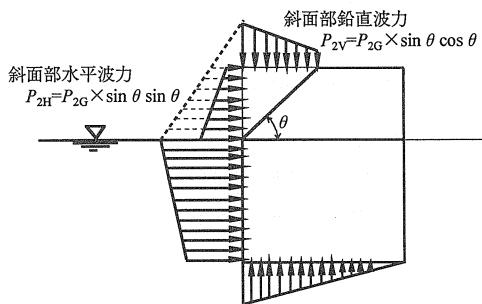


図-2 上部斜面堤の設計波圧分布

### 4. 衝撃碎波力から有効波力への換算

#### 4. 1 有効波力の評価法

水理実験において堤体への作用波力を計測すると、設計波力の数倍の大きな波力が作用することがある。この波力は衝撃碎波力と呼ばれ、高波浪や海底勾配が急な条件で発生しやすい。しかし実際に衝撃碎波力が堤体に作用しても、捨石マウンドや地盤の弾性変形によってその一部を吸収するため、変位はするものの滑動はほとんどしないことがある。従って、衝撃波力が作用する際の堤体の滑動安定性を調べるために、実際に堤体の滑動に寄与した波力（有効波力）を評価する必要がある。

合田<sup>7)</sup>は、こうした動的応答特性をわかりやすく説明するために、ばね自身が仮想質量を持つ連成ばね系のモデルを考えた。さらに計算を簡略化するために図-3のような水平ばねの位置を全体の重心において改良型モデルを提案している<sup>8)</sup>。

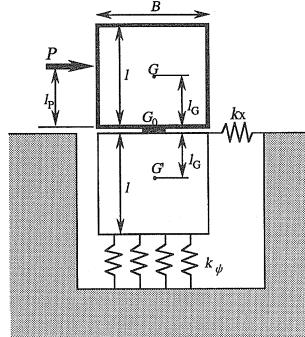


図-3 連成ばねモデル<sup>8)</sup>

図-3のモデルは、ケーンが摩擦接觸面を介してばね系上にすわっているものである。ばねは仮想的な質量を持ち、計算を単純化するためケーン壁体と同じ質量で、密度分布が接觸面に関して対象であるものを仮定している。従って可動部分の質量は $2W$ となり、その重心 $G_0$ 及び水平ばねの作用位置は接觸面上にあることになる。

この系の運動方程式は次のようになる。ただし、合成重心の水平変位を $x$ 、合成重心回りの回転角を $\theta$ で表す。

$$2 \frac{W}{g} \ddot{x} + k_x x = P(t) \quad (9)$$

$$2 \frac{W}{g} (r_0^2 + l_G^2) \ddot{\theta} - k_\psi \theta = l_p P(t) \quad (10)$$

ここで、 $W$ は堤体重量、 $g$ は重力加速度、 $k_x$ は水平方向ばね定数、 $P(t)$ は波力、 $r_0$ は壁体の重心 $G$ 回りの回転半径、 $l_G$ は堤体重心から接觸面までの鉛直距離、 $k_\psi$ は回転方向ばね定数、 $l_p$ は波力の作用位置から接觸面までの鉛直距離である。また、 $r_0$ は壁体が一様密度の直方体の場合には次式になる。

$$r_0^2 = \frac{1}{12} (B^2 + l^2) \quad (11)$$

また、 $k_x$ と $k_\psi$ は式(12)で与えられ、 $k_x'$ と $k_\psi'$ は式(13)の関係がある。

$$k_x = k_x' BD \quad (12)$$

$$k_\psi = \frac{1}{12} k_\psi' B^3 D \quad (12)$$

$$k_\psi' = 4k_x' \quad (13)$$

ここで、 $B$ は堤体の断面方向の幅(m)、 $D$ は堤体の延長方向の長さ(m)である。

このような連成ばねモデルを用いる場合、地盤の特性、すなわち水平方向ばね定数 $k_x$ と回転方向ばね定数 $k_\psi$ をどの程度の値を用いるかが重要である。本実験では堤体の変位量を測定しているため、堤体の変位波形と、衝撃波力作用時の変位の振動波形を合わせることで水平成分の固有振動数を抽出することが可能である。さらに、抽出された固有振動数から次の関係を用いて水平ばね定数 $k_x$ を推定することができる。

$$\omega_x^2 = \frac{k_x}{m} = \frac{k_x' BD}{m} \quad (14)$$

回転ばね係数 $k_\psi'$ については、回転成分の固有振動数を変位波形から抽出することが難しいため、式(13)の関係より算出した。なお、水平ばねについては実験により別途評価できることが好ましい。

防波堤の滑動を支配するのは、直接的には底面のせん断力 $F(t)$ であって波力 $P(t)$ ではない。壁体下面に働くせん断力は、壁体重心の加速度運動による慣性力を差し引いたものである。すなわち次式のように表すことができる。

$$F(t) = P(t) - \frac{W}{g} (\ddot{x} + I_G \ddot{\theta}) \quad (15)$$

この $F(t)$ を実際に壁体の滑動に影響する有効せん断力と考え、有効波力と呼ぶことにする。

#### 4.2 実験波力から有効波力への換算

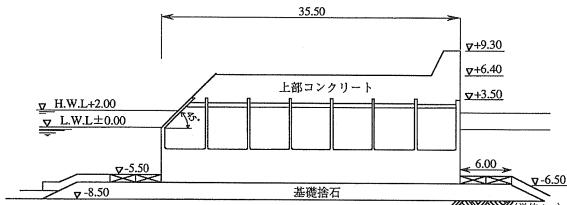


図-4 堤体模型の模式図

連成ばねモデルを用いて実験波力から有効波力の換算を行った。実験波力、堤体の変位量は図-4に示す後部パラペット上部斜面堤について既に行われた波力・滑動実験の結果を用いた。実験条件については前報に詳細に記してあるため省略する。

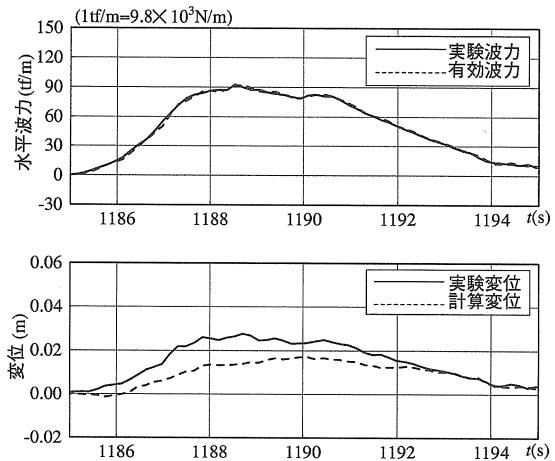


図-5 連成ばねモデルの計算結果の例

有効波力への換算は、波力波形から定義した1波毎を対象に行った。実験波力および変位の時系列を用い、変位の振動波形に合うように水平振動成分の固有振動数を設定した。ただし、滑動量までは表すことができないため、変位の1波目の周期のみ合うように計算を行った。さらに抽出した固有振動数から式(14)により水平ばね定数を、回転ばね係数については式(13)により設定した。そして、設定した各条件と実験波力を入力として連応答計算の結果の最大波力であるから、有効波力としてはピークの値をとることになる。

計算結果の例を図-5に示す。本実験条件では、合田波力を上回る波力が堤体に作用したもの、衝撃碎波力としては大きくなかった。しかし条件によっては衝撃碎波力が作用することがあるため、堤体の滑動安全性を評価する際には考慮すべきである。

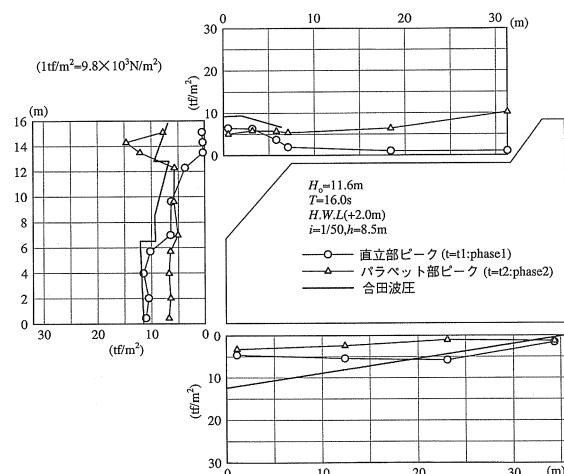
#### 5. 各部に作用する波力の検討

図-6に後部パラペット上部斜面堤に作用した代表的な波圧分布を示す。前報より直立部に波力が作用するphase1 ( $t=t_1$ )と、パラペット部に波力が作用するphase2 ( $t=t_2$ )が存在することが分かっており、図中にはphase1およびphase2の波力として最大になった波についての分布を示している。また同時に合田波圧の計算値も記してある。ただし、実際の検討では実験波力と有効波力の比を用いて低減した有効波圧分布を用いる。この際、直立部（あるいは斜面部にも）に衝撃力が作用した場合は直立部（および斜面部）の波圧分布のみ、パラペット部に衝撃力が作用した場合はパラペット部波圧のみ低減する。低減の方法としては、実験波力から有効波力への低減分を衝撃力が作用してい

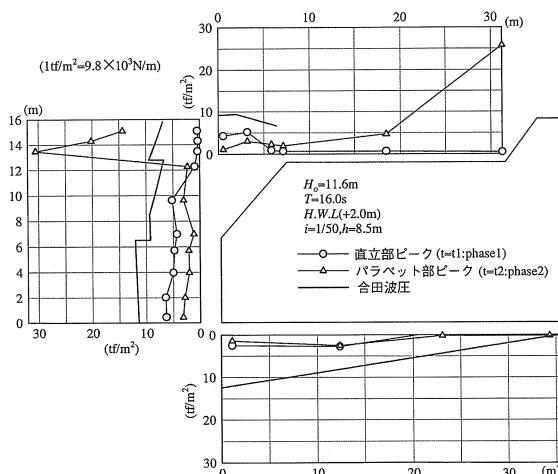
る部分の波力からのみ低減するように配分すればよい。

CASE1は直立部作用時（phase1）に水平波圧合力が最大となったケースのもので、直立部から斜面部にかけてほぼ合田波力と同等の波圧が作用しているのが分かる。この波がパラペット部に作用した時刻（phase2）の分布を見るとパラペット部で大きくなり、斜面部では $t=t_1$ とほとんど変わらないのに対して、直立部では合田波圧のほぼ半分に低減していることが分かる。

CASE2はパラペット部作用時（phase2）に衝撃力が作用し、この時刻が水平波圧合力のピークとなった場



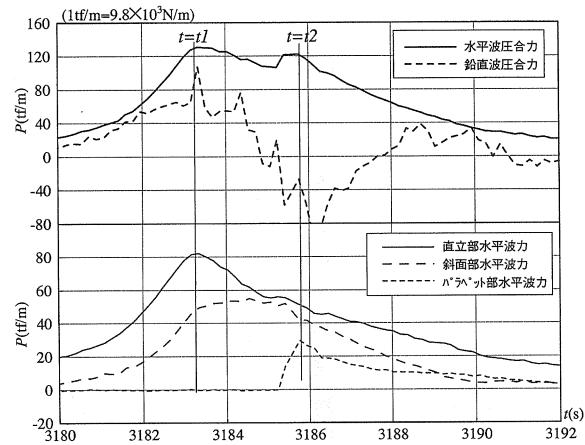
CASE1：直立部水平波力1位のケース



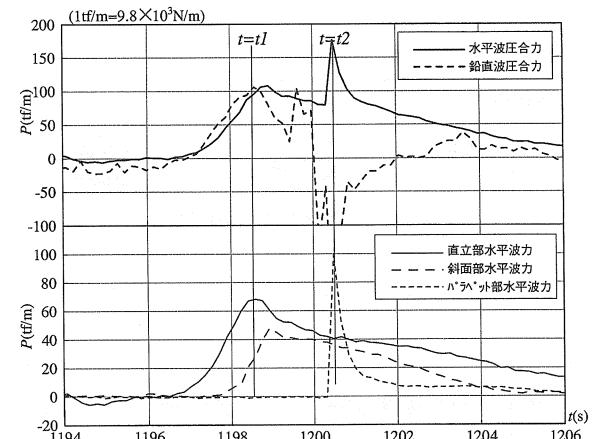
CASE2：パラペット部水平波力1位のケース  
図-6 代表的な作用波圧分布の例

合である。直立部と斜面部の作用波圧を見ると $t=t_1$ すでに合田波圧より小さく、 $t=t_2$ ではさらに低減している。またパラペット部に衝撃力が作用した瞬間には、天端のパラペットに近い側でかなり大きな鉛直下向きの波力が作用しており、堤体の滑動安定性に寄与していると考えられる。

次に直立部、斜面部、パラペット部に作用する各波力、および上記各波力の水平波圧合力、鉛直波圧合力の経時変化の代表例を図-7に示した。ここで鉛直波圧合力とは、揚圧力、斜面部とパラペット部に作用する下向きの波力、および天端上に作用する下向きの波力の合力である。CASE1では、上段の水平波圧合力の変化に $t=t_1$ と $t=t_2$ の二つのピークが見られ、このケースでは $t=t_1$ の時に全体として最大となっている。またCASE2では $t=t_2$ の時に合力が最大となっている。なお、場合によっては斜面部波力のピークが合力として最大となることも考えられるが、直立部と斜面部の波力作



CASE1：直立部水平波力1位のケース



CASE2：パラペット部水平波力1位のケース  
図-7 各部に作用する波力の経時変化の例

用の位相差は本検討断面では小さく、同時に作用すると考えてもよいと思われる。また、どちらのCASEにおいても、 $t_1$ と $t_2$ で明らかに位相差が見られ、直立部波力は $t=t_2$ の時刻では6～7割程度低減している。鉛直合力についても $t_1$ と $t_2$ の時刻で明らかに差異が見られ、パラペット部に波が到達するまでに揚圧力は低減し、また天端上の水塊による鉛直下向きの力が作用し、むしろ合力は下向きに転じている。

このように、同じ後部パラペット上部斜面堤においても波の条件や設置条件によって波力の作用が異なる場合が考えられることが分かり、直立部波力作用時およびパラペット波力作用時の二つのphaseについて検討を行い、厳しい条件の方で堤体断面を決定する必要があると考えられる。

#### 6. 直立部とパラペット部の波力作用の位相時間

後部パラペット上部斜面堤に作用する波力は、直立部と斜面部に作用する水平波力のピーク時刻 ( $t=t_1$ : phase1) とパラペット部に作用する水平波力のピーク時刻 ( $t=t_2$ : phase2) の二つのphaseが存在することが分かった。このphase1とphase2の位相時間が有意であれば、パラペット部に波力が作用する時間における直立部および斜面部の波力を低減して考えることができる。そこで、本実験の条件において位相時間の検討を行った。

ここでいう位相時間とは、波力が堤体前面の直立部からパラペット基部前面までの水平距離 $I$ を伝播するのに要した時間と定義する。波速の代表値として長波の波速 $\sqrt{gh}$ を用いると、作用時間 $t$ は次式のように表すことができる。

$$t = I / (\alpha \sqrt{gh}) \quad (16)$$

ここで $\alpha$ は補正係数である。

波および堤体設置の条件は同じのまま、パラペットの位置が $I=2.1\text{m}$ 、 $25.6\text{m}$ 、 $15.1\text{m}$ と異なる実験結果による位相時間 $t$ と、長波の波速 $\sqrt{gh}$ で $I$ を進行した場合の位相時間 $t$ を比較したものが図-8である。この結果、式(16)において $\alpha=1.5$ とした場合に実験結果による位相時間 $t$ を評価できることが分かった。

なお、高橋ら<sup>9)</sup>は混成防波堤上の越波水の運動を調べ、「打ち込み時」と「越流時」に分けて整理している。その結果、越流した水塊の流速は長波の波速の0.2～0.5倍程度であるとしている。これは直立堤を対象としているため、波が直立壁に衝突した後打ち上がり、天端上に水塊が落下してから越流するため鉛直上向きのエネルギーが大きくなるのに対して、本実験は斜面上を直接すべり越流するため、流速が大きくなっている

るものと考えられる。

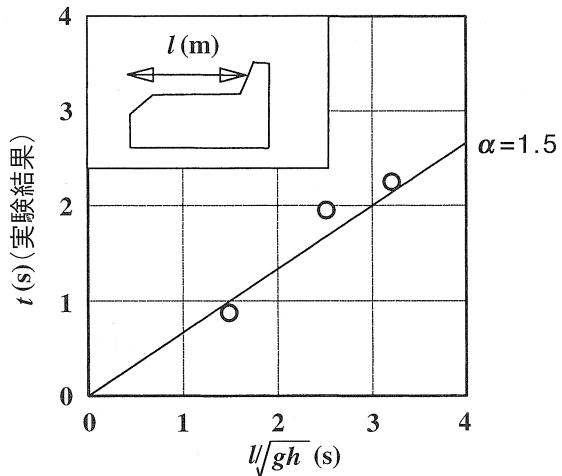


図-8 直立部からパラペット部の波の作用位相時間

#### 7. 後部パラペット上部斜面堤の設計波力の考え方

これまでの検討から、後部パラペット上部斜面堤には、直立部と斜面部に作用する波力のピークが合力のピークになる場合と、パラペット部に作用する波力のピークが合力のピークになる場合の二つのphaseが存在することが分かった。従って、それについて作用波力を模式化し、滑動安全性、転倒安全性、また端趾圧強度などの安全性を照査し、堤体にとって一番厳しい条件のphaseで断面を決定すればよいことになる。それぞれのphaseについてまとめるところ、以下のようなになる。また、後部パラペット上部斜面堤のphase1とphase2の位相差を考慮した設計波力の模式的な経時変化を示すと、図-9のようになる。

##### (1) 直立部波力ピーク時 ( $t=t_1$ : phase1)

直立部波力作用時 (phase1) では、直立部および斜面部のみに波力が作用し、パラペット部には波力は作用しないと考える。本実験条件においては、直立部と斜面部波力は（有効波力ベースで）ほぼ合田波力レベル、あるいはそれ以下であったが、高波浪・急勾配条件においては、phase1においても合田波力の数倍の衝撃碎波力が作用することがあることが報告されている<sup>10)</sup>。従って、水理実験から検討するのであれば、有効波力に換算した上で、作用波力の検討を行うべきである。

##### (2) パラペット部波力ピーク時 ( $t=t_2$ : phase2)

パラペット部波力作用時 (phase2) には、パラペット部には必ず衝撃的に波力が作用する。直立部および斜面部には波力は作用するが、条件によってはphase1における波力値より低減した波力が作用するものと考えられる。

鉛直力については、直立部水平波力が低減するのであれば揚圧力も同様に低減できると思われる。また、天端上に作用する下向きの波力も、その作用が無視できないほど大きければ考慮するのが妥当であろう。また衝撃的に作用する場合も考えられ、その場合はこの波力も有効波力に換算した上で、実際に堤体の滑動安定性にどの程度寄与しているか調べる必要がある。

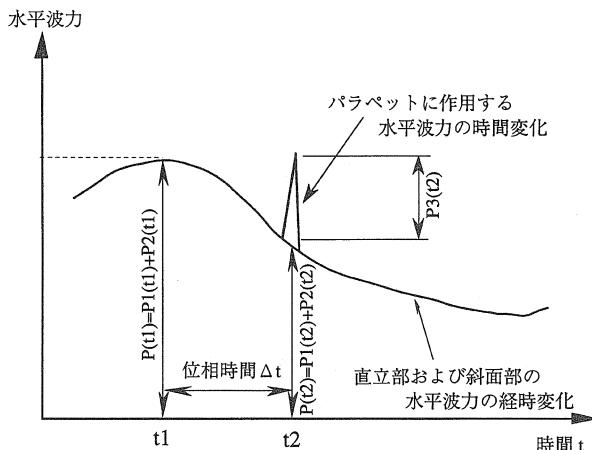


図-9 設計波力の模式図

#### 8. あとがき

前報<sup>1)</sup>に続き、後部パラペット上部斜面堤の作用波力の特性を調べ、設計波力の考え方について報告した。

しかしながら、汎用的な設計法を確立するためにはさらに広範囲の海象条件についての検討を行う必要がある。また、実際に堤体に作用する外力と衝撃碎波力との関係について、有効波力の換算法の精度の向上、あるいは長周期水位変動を含む波力作用時の水位についてなど、今後検討を加えていかなければならない。phase1とphase2の位相差についても、水位の影響や、斜面部の形状による影響も考えられる。

今後、種々の条件による実験データを蓄積していく、後部パラペット型上部斜面堤の設計波力の定式化を目指して検討を行う予定である。

#### 参考文献

- 1) 関本恒浩・片山裕之・鵜飼克臣・清水琢三：後部パラペット上部斜面ケーソン堤の水理特性に関する研究、五洋建設技術研究所年報、Vol.26、pp.37-46、1996
- 2) 合田良實：港湾構造物の耐波設計、波浪工学への序説、増補改訂版、鹿島出版会、pp.88-94、1990
- 3) 運輸省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説、(社)日本港湾協会、1989
- 4) 高橋重雄・谷本勝利・下迫健一郎・細山田得三：混成防波堤のマウンド形状による衝撃碎波力係数の提案、海岸工学論文集、第39巻、pp.676-680、1992
- 5) 森平倫生・国田 治：斜面壁堤の水理特性に関する模型実験、第26回海岸工学講演会論文集、pp.295-298、1979
- 6) 中田邦夫・池田龍彦・岩崎三日子・北野雅三・藤田 隆：上部斜面堤の現地建設に伴う水理模型実験、第30回海岸工学講演会論文集、pp.313-316、1983
- 7) 合田良實：衝撃碎波圧を受ける混成防波堤の挙動に関する考察、港研報告、第12巻、第3号、pp.3-29、1973
- 8) Goda,Y. : Dynamic response of upright breakwaters to impulsive breaking wave forces, Coastal Eng., Vol.22, pp.135-158, 1994
- 9) 高橋重雄・遠藤仁彦・室善一郎：混成防波堤上の越波水の運動と波力に関する実験的研究－親水性港湾構造物に関する水工的研究（第一報）－、港研報告、第31巻、第1号、pp.3-50、1992
- 10) 田崎敏・岡部成光・池田浩一・藤田浩二・榎山 勉：衝撃碎波力低減のための後部パラペット上部斜面堤の開発、海岸工学論文集、第42巻、pp.911-915