

ジャケット構造物を通過する波の波高低減率

WAVE DISSIPATION COEFFICIENT DUE TO LARGE NUMBER OF OFFSHORE JACKET-TYPE BASEMENTS

池谷 毅¹・稲垣 聡²・向原 健²・相河 清実³・衛藤 謙介⁴・野口 孝俊⁵
Tsuyoshi IKEYA, Satoshi INAGAKI, Takeshi MUKOHARA, Kiyomi AIKAWA, Kensuke ETO
and Takatoshi NOGUCHI

¹フェロー会員 工博 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給二丁目19-1)

²正会員 工修 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給二丁目19-1)

³正会員 鹿島建設株式会社 土木設計本部 (〒135-0064 東京都港区赤坂六丁目5-10)

⁴国土交通省港湾局 (〒100-0013 東京都千代田区霞ヶ関二丁目1-3)

⁵正会員 国土交通省関東地方整備局 (〒144-0041 東京都大田区羽田空港三丁目3-1)

In the Tokyo International Airport (Haneda Airport) expansion project, the D runway will be constructed as a hybrid type structure with the piled-elevated platform and the reclaimed island. About 200 steel structures (jackets) will be used for the platform, and wave height may decrease when waves propagate through the jackets. Hydraulic model tests have been performed to measure the wave dissipation coefficient by jackets. In addition, an analytical model to estimate the wave energy dissipation due to the drag forces of cylindrical members of jackets is formulated. The analytical model well presented the wave dissipation of the hydraulic model tests. It is also effective to evaluate the difference between the real site and the model test, such as the relation between the drag coefficients of cylindrical members and the Reynolds' number and other experimental settings.

Key Words : wave height, wave dissipation, jacket-type basement, pile-elevated platform, Haneda Airport

1. はじめに

栈橋などに用いられるジャケット構造物(以下JKT)は、一般に波長に比べて十分に細い部材(小口径部材)の組合せから成り、波通過時の波浪変形は一般には考慮されない。しかし、多数のJKTが使用される場合には全体として通過波の低減が予想される。東京国際空港(羽田空港)再拡張事業において、

埋立・栈橋部複合構造として新設されるD滑走路島の栈橋部には、図-1のような配置で約200基のJKT設置が計画されており、護岸への到達波高、周辺海域の静穏度などにJKTの存在が影響する可能性がある。JKTの標準断面図を図-2に示す。本検討ではこの再拡張事業で使用予定のJKTを例に波高低減効果を調べる水理模型実験を実施し、実験結果を現地スケールの現象に適用する方法を検討した。

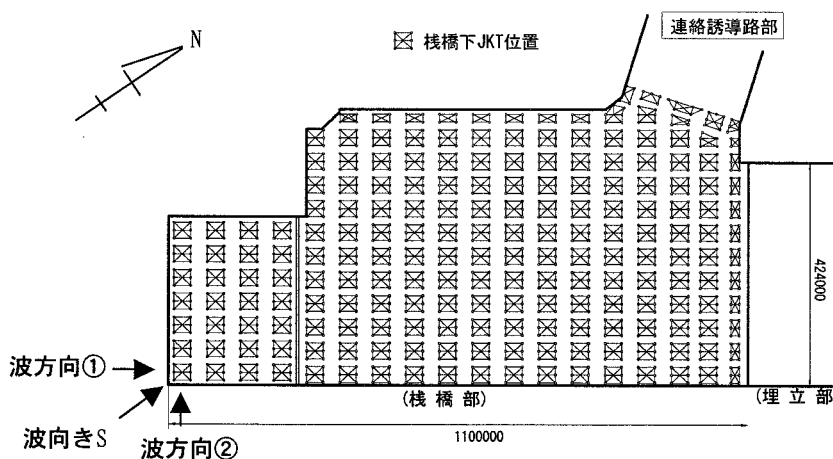


図-1 羽田空港D滑走路島栈橋部におけるJKT配置平面図

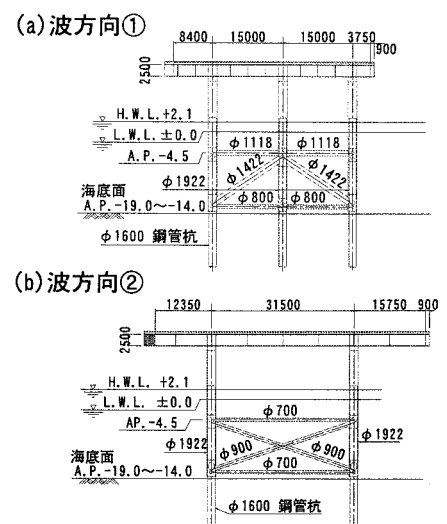
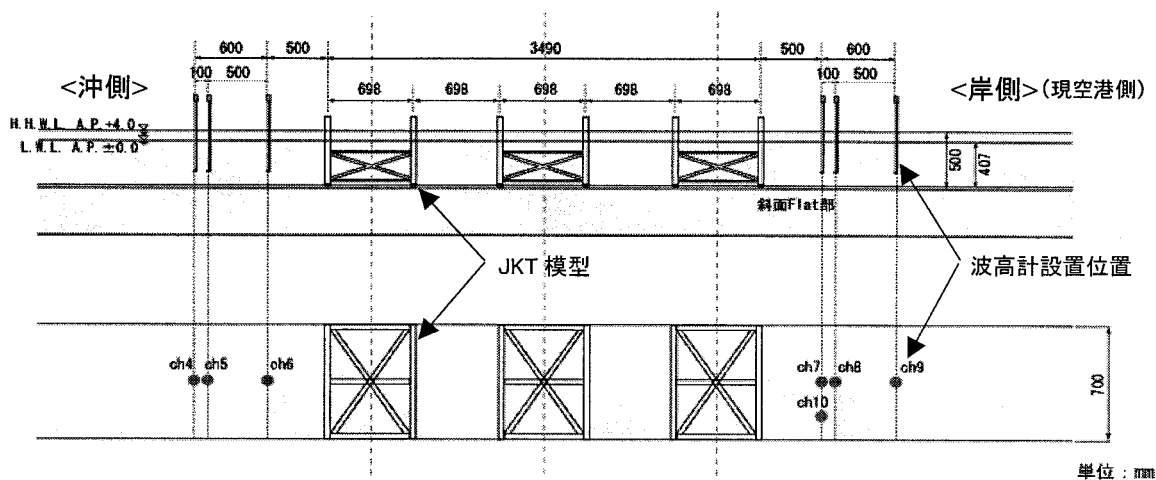


図-2 JKT標準断面図



2. 水理模型実験

水理模型実験は、1/43スケールのJKT模型（写真-1）を図-3のように直線造波水路（長さ60m，幅0.7m，深さ1.5m）内に1～3基設置して行った。なお，JKTは円柱部材で構成されており，鉛直管（レグ）は現地スケールで約φ2000mm，水平材・斜材（ブレース材）がφ700～1400mmである。

模型の沖側と岸側に波高計を設置し、池谷ら¹⁾の方法で入反射分離を行い、それぞれの位置での入射波高を求めた。現地の主波向きはS方向なので、その方向から見た模型を設置することが望ましいが、本実験は2次元実験であるので、2次元性をほぼ確保できる図-1の波方向①及び②の状況を考えた。JKTは波方向①と②で部材の本数・構成が異なり、またJKTの設置間隔も異なるため、それぞれの方向に対して実験を実施した。波浪条件を表-1に示す。

実験状況を写真-2に示す。図-4に入射波の有義波高から算出した波透過率の一覧を示す。ここで波透過率は次式より算出している。

$$\text{波透過率}(\%) = \frac{\text{岸側の入射波高}}{\text{沖側の入射波高}} \times 100 \quad (1)$$

模型を設置しないケースでは透過率は96%前後となり、中でも波高が最も小さいWave3の減衰が最も大きい。模型の基数を増やすと方向①及び②のどちらのケースでも透過率は指数的に小さくなり、模型1基当たりで波はおよそ3%減衰する結果となった。模型を3基設置した場合の波透過率は、Wave2が最も小さくなる。これは、Wave2の水深が最も小さく、波がJKTのブレース材の抵抗を受けやすいためと考察できる。JKTの基数による透過率の減少割合は、Wave3が最も小さく、Wave2が大きい。

波方向①と②を比較すると、波方向②の方が模型の基数を増やした際の透過率の低下が若干大きい。これはJKTの設置間隔が波方向①の半分で短いためエネルギーの減衰が連続的に起こること、図-2お

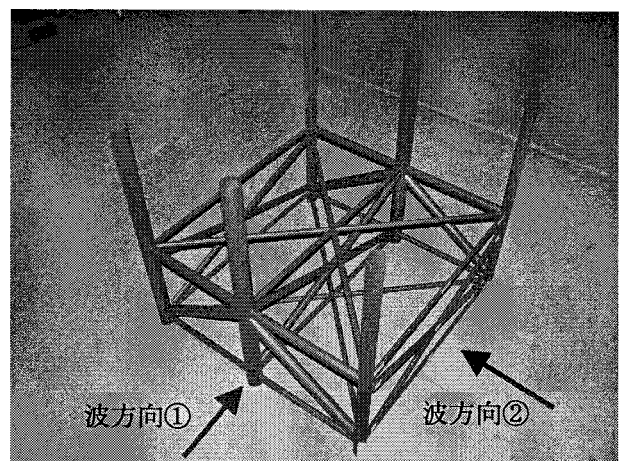


写真-1 JKT模型

表-1 波浪条件

		Wave1	Wave2	Wave3
現地 スケール	状況	暴風時 H.H.W.L.	暴風時 L.W.L.	供用時 M.W.L.
	H _{1/3} (m)	4.15	4.15	1.97
	T _{1/3} (s)	8.3	8.3	5.9
	潮位	A.P.4.0m	A.P.±0.0m	A.P.+1.2m
模型 スケール (縮尺1/43)	H _{1/3} (cm)	0.097	0.097	0.046
	T _{1/3} (s)	1.27	1.27	0.90
	水深(cm)	50.0	40.7	43.5

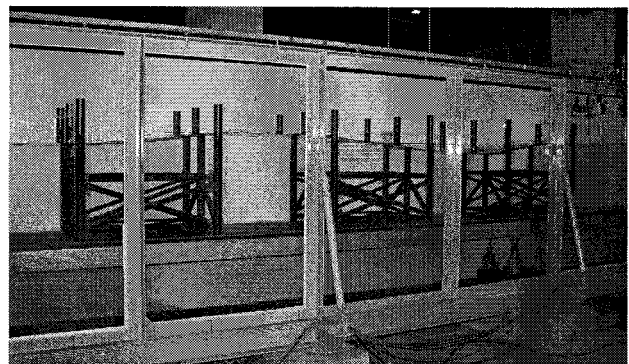


写真-2 実験状況 (方向① 模型 3 基 Wave1)

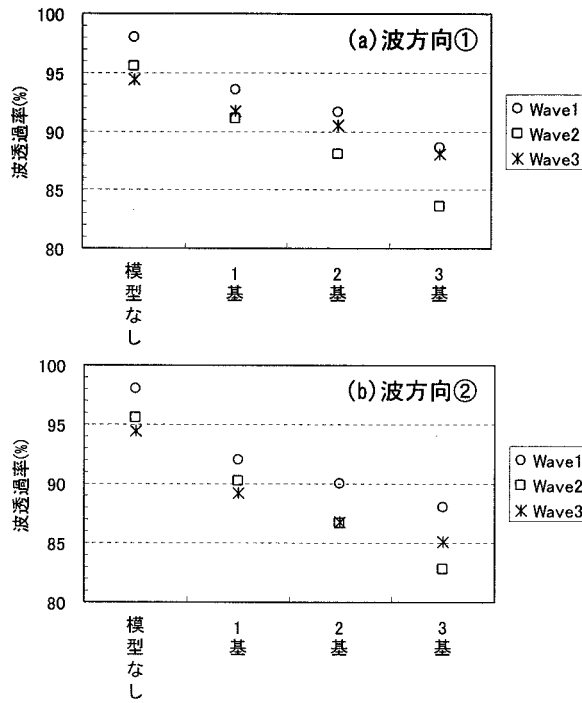


図-4 模型設置基数と波透過率

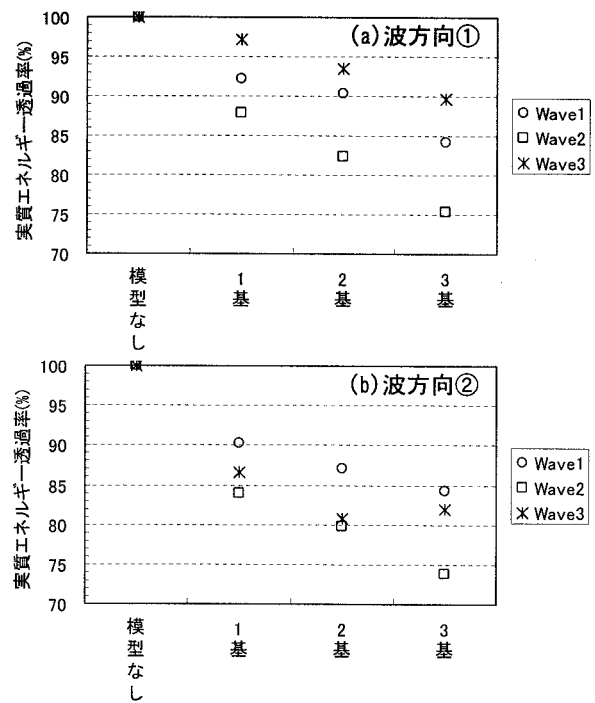


図-5 模型設置基数と実質波エネルギー透過率

よび写真-1のように、波方向②の方が波による水粒子の鉛直運動に対して抵抗となるブレース材の本数が多いことが理由に考えられる。

また、入射波の周波数スペクトルの積分により、沖側・岸側それぞれにおける波のエネルギーを求め、その比を「エネルギー透過率」と定義する。さらに、模型なしの時のエネルギー透過率を考慮して、模型設置の影響のみによる実質のエネルギー透過率を以下のように定義する。

$$\text{実質波エネルギー透過率(\%)} = \frac{\text{岸側の波エネルギー}}{K_0 \times (\text{沖側の波エネルギー})} \times 100 \quad (2)$$

K_0 ：模型なし時のエネルギー透過率である。この値を示したものが図-5であり、波透過率と減衰の量など基本的に同様の傾向を示す。

2. 小口径円柱部材によるエネルギー減衰モデルの構築

(1) モデル化に用いる仮定

前章の模型実験結果を用いて、現地・実物の JKT の波透過率を換算する際に、後述するいくつかの問題点を評価するため、JKT 部材によるエネルギー減衰評価のためのモデル構築を試みる。

まず、以下の条件を仮定する。

- ・部材は、円柱で構成されているものとする。その直径を D 、波の波長を L としたとき $D/L \ll 0.1$ 、すなわち、小口径部材であるとする。
- ・部材は、あまり密に配置されることなく、部材間の相互の影響は小さいものとする。

・波浪場は、線形重ね合わせで表現される不規則波とする。

以下の式展開は、一般化のため多方向不規則場に適用可能な形で記述し、エネルギー平衡方程式における波浪変形解析においてエネルギー減衰を取り扱うことを想定する。

(2) 不規則波の表現

多方向不規則波の波形の表現としては、シングルサメーション法を用いる。なお、解析に用いる座標系は、 x 軸、 y 軸は水平面内の座標、 z 軸は、静水面を原点に、鉛直上方を正とする。

$$\eta = \eta(x, y, z) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(k_n x \cos \theta_n + k_n y \sin \theta_n - 2\pi f_n t + \varepsilon_n) \quad (3)$$

方向スペクトルとの関係は、次式となる。

$$S(f, \theta) df d\theta = \sum_f \sum_{\theta} \frac{1}{2} a_n^2 \quad (4)$$

また、速度ポテンシャルとそれから求まる速度成分は以下の通りとなる。

$$\phi = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_n 2\pi f_n}{k_n} \frac{\cosh k_n (h+z)}{\sinh k_n h} \sin(k_n x \cos \theta_n + k_n y \sin \theta_n - 2\pi f_n t + \varepsilon_n) \quad (5)$$

$$v_x = \frac{\partial \phi}{\partial x}, v_y = \frac{\partial \phi}{\partial y}, v_z = \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (6)$$

(3) 小口径部材に作用する波力

小口径部材に作用する波力は、モリソン式で表現されるとする。ここでは、部材が3次元的に配置さ

れている場合でも対応できるベクトル表示を用いる。すなわち、部材の単位長さ Δs の部分に作用する波力 $\Delta \vec{F}$ を次式で評価する。

$$\Delta \vec{F} = \Delta \vec{F}_M + \Delta \vec{F}_D \quad (7)$$

$$\Delta \vec{F}_M = \rho C_M \frac{\pi D^2}{4} \frac{\partial \vec{v}_N}{\partial t} \Delta s \quad (8)$$

$$\Delta \vec{F}_D = \rho C_D \frac{D}{2} |\vec{v}_N| \vec{v}_N \Delta s \quad (9)$$

ここに、 $\Delta \vec{F}_M$: 慣性力ベクトル、 $\Delta \vec{F}_D$: 抗力ベクトル、 ρ : 流体の密度、 C_M : 慣性力係数、 C_D : 抗力係数である。また、 $\vec{v}_N$ は、図-6に示すように、部材直交方向の流速ベクトルを表している。部材の方向余弦 $\vec{c}(c_x, c_y, c_z)$ を用いると、

$$\vec{v}_N = \vec{v} - (\vec{v} \cdot \vec{c}) \vec{c} \quad (10)$$

さらに、

$$|\vec{v}_N| = \sqrt{\vec{v}_N \cdot \vec{v}_N} \quad (11)$$

より、

$$|\vec{v}_N| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 - (v_x c_x + v_y c_y + v_z c_z)^2} \quad (12)$$

となる。

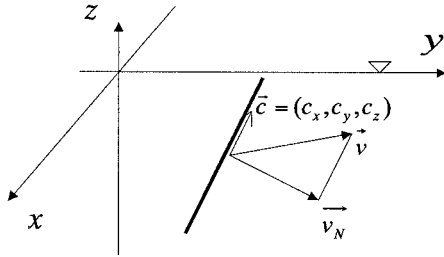


図-6 流速ベクトルの定義

(4) 小口径部材によるエネルギー減衰

長さ Δs の小口径部材による単位時間当たりのエネルギー減衰量は次式で表される。

$$\Delta E_{loss} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T (\Delta \vec{F}_M + \Delta \vec{F}_D) \cdot \vec{v} dt = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T (\Delta \vec{F}_M + \Delta \vec{F}_D) \cdot \vec{v}_N dt \quad (13)$$

線型の流速分布を仮定しているため、関数の直交性から、

$$\Delta \vec{F}_M \cdot \vec{v}_N = 0 \quad (14)$$

となり、慣性力はエネルギー減衰に関与せず、抗力のみが寄与することとなる。よってエネルギー減衰は、次式で表される。

$$\Delta E_{loss} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \Delta \vec{F}_D \cdot \vec{v}_N dt \quad (15)$$

抗力を表す式 (9) を代入すると下記を得る。

$$\begin{aligned} \Delta E_{loss} &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \rho C_D \frac{D}{2} |\vec{v}_N| \vec{v}_N \cdot \vec{v}_N \Delta s dt \\ &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \rho C_D \frac{D}{2} |\vec{v}_N|^3 \Delta s dt \end{aligned} \quad (16)$$

ここでは、エネルギー平衡方程式における波浪変形解析において、エネルギー減衰を取り扱うことを想定しているため、抗力を以下の通り線形化する。

$$\Delta \vec{F}_D = \rho C_D \frac{D}{2} |\vec{v}_N| \vec{v}_N \Delta s \approx \rho C_D \frac{D}{2} \sqrt{\frac{8}{\pi}} \sigma \vec{v}_N \Delta s \quad (17)$$

ここに、

$$\sigma^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \vec{v}_N \cdot \vec{v}_N dt \quad (18)$$

これより、

$$\Delta E_{loss} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \rho C_D \frac{D}{2} \sqrt{\frac{8}{\pi}} \sigma \vec{v}_N \cdot \vec{v}_N \Delta s dt = \rho C_D \frac{D}{2} \sqrt{\frac{8}{\pi}} \sigma^3 \Delta s \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \vec{v}_N \cdot \vec{v}_N dt \\ &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \left\{ v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 - (v_x c_x + v_y c_y + v_z c_z)^2 \right\} dt \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2} \left(\frac{a_n 2\pi f_n}{\sinh k_n h} \right)^2 \\ &\quad \left[\cosh^2 k_n (h+z) + \sinh^2 k_n (h+z) \right. \\ &\quad \left. - \left\{ c_x \cos \theta_n + c_y \sin \theta_n \right\} \cosh k_n (h+z) + c_z \sinh k_n (h+z) \right]^2 \end{aligned} \quad (20)$$

方向スペクトルを用いて表現すれば、

$$\sigma^2 = \iint_f S(f, \theta) \left(\frac{2\pi f_n}{\sinh k_n h} \right)^2 F(f, \theta, z) df d\theta \quad (21)$$

$$F(f, \theta, z) = \cosh^2 k_n (h+z) + \sinh^2 k_n (h+z)$$

$$- \left\{ c_x \cos \theta_n + c_y \sin \theta_n \right\} \cosh k_n (h+z) + c_z \sinh k_n (h+z) \right]^2 \quad (22)$$

と表記することができる。

以上から、エネルギー減衰量は、次式で表現できる。

$$\begin{aligned} \Delta E_{loss} &= \rho C_D \frac{D}{2} \sqrt{\frac{8}{\pi}} \sigma \Delta s \iint_f S(f, \theta) \left(\frac{2\pi f_n}{\sinh k_n h} \right)^2 F(f, \theta, z) df d\theta \\ &= \iint_f \rho C_D \frac{D}{2} \sqrt{\frac{8}{\pi}} \sigma \Delta s \left(\frac{2\pi f_n}{\sinh k_n h} \right)^2 F(f, \theta, z) S(f, \theta) df d\theta \end{aligned} \quad (23)$$

(5) 複数の部材によるエネルギー減衰量

ここでは、部材が複数ある場合のエネルギー減衰量を評価する方法を示す。

今、 $\Delta x \times \Delta y$ の海域に I 本 ($i=1, \dots, I$) の部材があるとする。これらの部材は、 J 分割されるものとする（図-7 参照）。部材の始端の座標を (x_{0i}, y_{0i}, z_{0i}) 、終点の座標を (x_{1i}, y_{1i}, z_{1i}) とする。また、各要素の中心の座標を (x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}) と書く。このとき、 i 本目の j 番目の微小の部材要素の長さは、以下のよう求められる。

$$\Delta s_{ij} = \sqrt{(\Delta x_i)^2 + (\Delta y_i)^2 + (\Delta z_i)^2} \quad (24)$$

$$\text{ここに、} \Delta x_i = (x_{1i} - x_{0i}) \frac{1}{J}, \quad \Delta y_i = (y_{1i} - y_{0i}) \frac{1}{J},$$

$$\Delta z_i = (z_{1i} - z_{0i}) \frac{1}{J} \text{ である。}$$

また、方向余弦は、次式などで求められる。

$$c_{xi} = \frac{x_{1i} - x_{0i}}{\sqrt{(x_{1i} - x_{0i})^2 + (y_{1i} - y_{0i})^2 + (z_{1i} - z_{0i})^2}} \quad (25)$$

このとき、 i 本目の部材の j 番目の微小要素によるエネルギー減衰は、

$$E_{loss,j,i} = \iint_{\theta f} \rho C_{Di} \frac{D_i}{2} \sqrt{\frac{8}{\pi}} \sigma(z_{ij}) \Delta s_{ij} \left(\frac{2\pi f}{\sinh kh} \right)^2 F(f, \theta, z_{ij}) S(f, \theta) df d\theta \quad (26)$$

となる。よって、単位面積から単位時間に消費されるエネルギーは、以下の通りである。

$$E_{loss} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \iint_{\theta f} \rho C_{Di} \frac{D_i}{2} \sqrt{\frac{8}{\pi}} \sigma(z_{ij}) \Delta s_{ij} \left(\frac{2\pi f}{\sinh kh} \right)^2 F(f, \theta, z_{ij}) S(f, \theta) df d\theta \frac{1}{\Delta x \Delta y} \quad (27)$$

(6) エネルギー平衡方程式に対する組み込み

エネルギー平衡方程式は、次式の通りとなる。

$$\frac{\partial(SC_s \cos \theta)}{\partial x} + \frac{\partial(SC_s \sin \theta)}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial \theta} \left[S \frac{C_s}{C} \left\{ \sin \theta \frac{\partial C}{\partial x} - \cos \theta \frac{\partial C}{\partial y} \right\} \right] = -\epsilon S \quad (28)$$

単位面積あたりの波エネルギーは、次式となる。

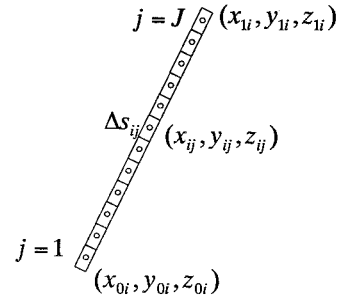


図-7 部材の分割方法

$$E = \iint_{\theta f} \rho g S(f, \theta) df d\theta \quad (29)$$

これより、エネルギー平衡方程式中の減衰率 ϵ は、式(27)より、以下の通りとなる。

$$\epsilon = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J C_{Di} \frac{D_i}{2g} \sqrt{\frac{8}{\pi}} \sigma(z_{ij}) \Delta s_{ij} \left(\frac{2\pi f}{\sinh kh} \right)^2 F(f, \theta, z_{ij}) \frac{1}{\Delta x \Delta y} \quad (30)$$

(7) 実験結果とモデル解析結果との比較

波エネルギー減衰率の2. の水理模型実験による実測値と、上述のモデルによる解析値を表-2 に示す。なお、表-2 には後述の JKT 抵抗体量評価の結果を含んでいる。実験のエネルギー減衰率（②欄）とモデル解析による減衰率（③欄）を比較すると、モデル解析結果は潮位・波浪条件によるエネルギー減衰率の変化の傾向をよく表現していることがわかる。但し、モデル解析結果の方が小さい値を示している。その理由は、モデル解析の仮定では部材間の相互の影響は小さいとしているものの、実際の JKT では、特に複数の円柱部材が集まる隅角部で部材が密集しており、その部分での抵抗の増大を見込めていないためと考えられる。

4. 実験結果の現地スケール現象への適用

(1) 抵抗体の量の評価

2. の模型実験結果を用いて、実物・現地スケールの JKT の波透過率評価を試みる場合の、2つの注意点について述べる。

表-2 実験及びモデル解析による波エネルギー減衰率とJKT配置の違いを考慮した換算（JKT 3 基あたり）

番号		①	②	③	④	⑤	⑥
項目		実質エネルギー透過率 図-8のJKT配置B	エネルギー減衰率 実験値 JKT配置B	エネルギー減衰率 数値計算値 JKT配置B	エネルギー減衰率 数値計算値 JKT配置A	JKT配置B→配置Aによる 減衰率低下の割合	エネルギー減衰率 JKT配置A
計算法		実験結果図-5より	100-①	モデル解析より	モデル解析より	④／③	②×⑤
方向①	Wave 1	84.2	15.8	10.1	8.4	0.83	13.2
	Wave 2	75.4	24.6	19.1	15.2	0.79	19.5
	Wave 3	89.6	10.4	8.2	6.8	0.82	8.5
方向②	Wave 1	84.3	15.7	9.7	6.7	0.69	10.8
	Wave 2	73.8	26.2	19.6	12.5	0.64	16.8
	Wave 3	81.9	18.1	7.8	5.3	0.68	12.4
平均		81.5	18.5	12.4	9.1	0.74	13.7

まず、実験では限られた水路スペース内で大縮尺の実験を行うため、波進行直角方向の隙間を無くした上で、ジャケット1基分の幅を切り出して水路の中に収めた(図-8)。よって、同じ面積の中に存在する抵抗体の量は、現地の実際の配置より水理実験の方が多い。3. で説明したモデルを用いて、実験条件である図-8のJKT配置Bに加えてJKT配置Aの場合を計算した結果を表-2の④欄に示す。JKT配置Aにおいては、エネルギー減衰率は⑤欄に示すようにJKT配置Bの平均0.74倍となった。

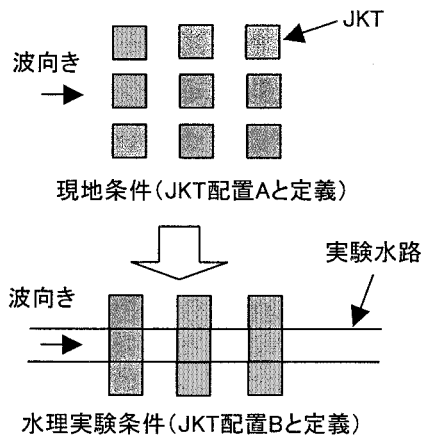


図-8 現地と実験のJKT配置想定(方向①の例)

(2) 円柱の抗力係数の評価

もう一つの注意点として、実物と模型の縮尺効果(水の粘性影響)が挙げられる。円柱の抵抗係数 C_D とレイノルズ数 R には、図-9に示す関係(巽²⁾)がある。ここにレイノルズ数 R は、

$$R = u \cdot D / \nu \quad (31)$$

u : 代表流速, D : 代表長さ, ν : 水の動粘性係数($1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)であり、現地スケールでの波高4.15m、波周期8.3sのとき、 u を微小振幅波理論による水粒子の最大軌道流速、 D をJKTの鉛直管(レグ)径とすると、各スケールにおけるレイノルズ数 R と抵抗係数 C_D は表-3のようになる。図-9から実験では $C_D=1.2$ の状況のところ、現地では $C_D=0.40$ を用いるのが妥当なことがわかる。また、沿岸技術研究センター³⁾は、現地でマリングロス(貝など)が付着した場合に $C_D=1.05$ の値を提案している。以上から、JKT3基あたりのエネルギー減衰率は、実験値($C_D=1.2$ 相当)で平均13.7%との結果(表-2の⑥欄)を用いると、式(27)のようにエネルギー減衰率は C_D に比例するため、現地では $C_D=1.05$ で12%、 $C_D=0.40$ で4.6%と評価できる(表-4)。参考までに、D滑走路島棧橋部を横断する波は図-1のように12基のJKTを通過する。JKT12基でのエネルギー減衰率は3基の場合の4倍、 $C_D=1.05$ で48%、 $C_D=0.40$ で18.4%となり、波透過率を逆算するとそれぞれ72%、90%(エネルギー透過率の平方根)となる。

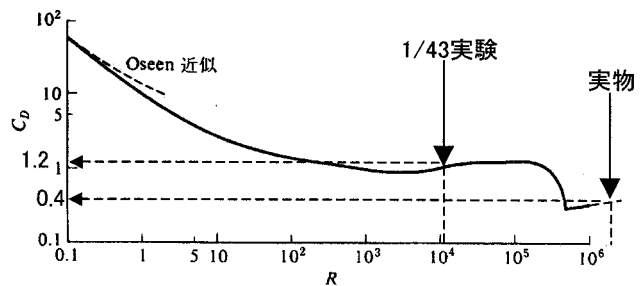


図-9 円柱抵抗係数のレイノルズ数による変化(巽³⁾に加筆)

表-3 各スケールにおけるレイノルズ数と円柱抵抗係数

ケース	波高(m)	周期(s)	$u(\text{m/s})$	$D(\text{m})$	R	C_D
実物	4.15	8.3	1.57	2.0	3.1×10^6	0.4
1/43実験	0.965	1.3	0.24	0.047	1.1×10^4	1.2

表-4 抵抗係数の変化を考慮した実質エネルギー減衰率の換算(JKT3基あたり)

条件		マリングロス有($C_D=1.05$)	マリングロス無($C_D=0.40$)
計算法		(表-2の⑥) $\times 1.05/1.2$	(表-2の⑥) $\times 0.40/1.2$
波方向①	Wave 1	11.5	4.4
	Wave 2	17.1	6.5
	Wave 3	7.5	2.8
波方向②	Wave 1	9.4	3.6
	Wave 2	14.7	5.6
	Wave 3	10.9	4.1
平均		12.0	4.6

5. 結論

本研究では羽田空港再拡張事業で使用予定のJKTを例に波高低減効果を調べる水理模型実験を実施し、実験結果を実物の現象に適用する方法を検討した。

- ・水理模型実験ではJKT模型の基数を増やすと透過率は指数的に小さくなり、波高の高いWave1・Wave2で模型1基当たりでは波高は約3%減衰した。
- ・小口径の円柱部材からなるJKT各部材に作用する波力を求め、全体を積分する解析モデルを構築し、実験結果のエネルギー減衰をよく再現した。
- ・水理実験の結果から現地スケールのJKTの波透過率を評価する際、実験と現地の抵抗体の量の違い、レイノルズ数の差異、マリングロスの有無の影響を上記モデルを用いて評価できた。結果、現地でのJKTによる波高低減量を見積ることができた。

なお、本研究は東京国際空港D滑走路建設工事の設計業務の一環として実施した成果の一部である。

参考文献

- 1) 池谷毅, 稲垣聡: 二次元不規則波実験における入射波・反射波の高精度分離法, 鹿島技術研究所年報, 第54号, pp.41-46, 2006.
- 2) 巽友正: 流体力学, 培風館, 1982.
- 3) (財) 沿岸技術研究センター: 沿岸開発技術ライブラリーNo. 7 ジャケット工法技術マニュアル, 沿岸技術研究センター, 2000.