圧力分布を考慮した柱体に作用する 津波波力評価モデル

池谷 毅¹・岩前 伸幸²・末長 清也³・秋山 義信⁴・舘野 公一⁵・鈴木 紀雄⁶

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

E-mail: ikeya-t@kajima.com

²正会員 鹿島建設株式会社技術研究所土木構造グループ (〒182-0036 東京都調布市飛田給二丁目19-1)

³正会員 鹿島建設株式会社技術研究所土木構造グループ (〒182-0036 東京都調布市飛田給二丁目19-1)

⁴正会員 鹿島建設株式会社技術研究所土木構造グループ (〒182-0036 東京都調布市飛田給二丁目19-1)

⁵非会員 鹿島建設株式会社建築設計本部 (〒107-8502 東京都港区赤坂6-5-30)

⁶非会員 鹿島建設株式会社技術研究所副所長 (〒182-0036 東京都調布市飛田給二丁目19-1)

陸上の構造物に作用する津波の持続波圧は、入射波のフルード数に依存して変化することが知られている。ところが、津波持続波力を抗力モデルを用いて評価する場合、抗力係数には形状により決定する一定値が用いられるのが一般的で、上述のフルード数の影響は考慮されない。本論文では、波圧分布と整合性のある波力の評価法を提示する。風工学の分野で用いられる圧力係数を基本として、これに、柱体前面での跳水によるエネルギー減衰、柱体背面での空洞化の影響を加味して水圧分布を求め、この積分値として波力を求めた。解析の結果、抗力係数がレイノルズ数とフルード数の関数となることを示し、円柱及び正四角形に対しては、抗力係数とフルード数との関係を導出し、実験結果と比較して良好な一致を得た。さらに、近似関数を提案し、必要となるパラメータを示した。

Key Words : tsunami wave force, wave pressure, drag coefficient, Froude number

1. はじめに

陸上構造物に作用する津波波力には、フロントが到達する際に発生する衝撃波力と水位が最大になる時間帯にて発生する持続波力の二つがある。このうち、多くの場合最大波圧を示す持続波力を表現する方法として、物体の周辺の応力として水圧を積分して力とする方法と、流入流速から抗力係数を仮定して力を評価する方法がある。林¹⁾、林²⁾、池谷³⁾によれば持続波圧はフルード数（以下、 Fr 数）に依存することがわかっている。本来、二つの方法は、整合性がとれているべきであるが、抗力係数には一定値が用いられることが多く、 Fr 数の関数とはされることは少ない。

そこで、本研究では、柱体に作用する津波の持続波力を対象として、柱体周辺の圧力分布を考慮して波力を求める方法を示し、これから抗力係数を求め、両モデルの整合性を図ることを目的とする。はじめに、水理模型実験を行い、陸上の柱状体に作用する津波の特徴を把握する。次に、風工学で用いられている圧力係数を基本に、水理実験で得られた特徴を加味して圧力分布のモデルを

作成し、これから波力、抗力係数を求める。

2. 柱体に作用する波力水理実験

(1) 実験目的・方法

円柱および正四角柱に対する広い Fr 数範囲にわたる波力の特性を知ることが目的として水理実験を実施した。

実験には、鹿島建設株式会社技術研究所海洋水理実験場中型水路（幅0.7m×長さ60m×深さ1.5m）のポンプ式津波造波装置を用いて、定常流を発生させて実施した。水路中に、勾配1/100の海底面模型を設置し、その陸側に水平床の陸上部を設置している（図-1参照）。実験で

図-1 水理模型実験の概要

は、入射波検定実験と波力計測実験を行い、入射波検定実験では、入射進行波の水深と流速を計測し、波力実験では、柱体模型に作用する波力および柱体の前後の水深を測定した。

(2) 実験条件

実験に用いた柱体模型は、円柱（直径10mm、長さ150mm）および正四角柱（10mm×10mm、長さ150mm）の2種類とした。柱体の設置は、図-1に示すとおり護岸位置から105cm流下した地点とした。また柱模型には、長さに目盛がつけられており、これから目視により浸水深を求めた。高Fr数の流れを実現するため護岸上に堤体を設置し、低Fr数用には背後に堰を設置して、入射波のFr数を広範囲（ $0 < Fr < 3$ ）に変化させた。

(3) 実験結果

実験の結果得られた知見を以下にまとめる。① 抗力係数は、Fr数の関数となり。Fr数の増加に伴い、抗力係数は減少する。② 柱体の上流側において、水深は堰上がり、下流側は水面の低下が生ずる。この傾向は、Fr数が大きいほど激しくなり、Fr数が1.5程度より大きくなると背面側の水深はゼロ（空洞域）となる。

なお具体的な抗力係数とFr数との関係については、理論結果との比較の中で提示する。

3. 無限長の柱体に働く力と抗力係数

(1) 抗力係数と圧力係数

無限長の柱体に働く力と抗力係数について、主に風工学分野で採用される考え方を示す。一様流中に存在する無限長の柱体の長さ h_0 の部分に作用する流れの流下方向の風力は、次式で評価される。

$$F_x = \frac{1}{2} \rho C_D U_\infty^2 h_0 D \quad (1)$$

ここに、 ρ ：流体の密度、 C_D ：抗力係数、 U_∞ ：無限風上での流速、 D ：柱体の幅である（図-2(a)参照）。一方、柱体表面における圧力を p として、柱体表面に作用するせん断力や圧力の時空間変動を無視すれば、流体力は、

$$F_x = \int_S \int_0^{h_0} p \cos \phi dz ds \quad (2)$$

圧力分布 p は、圧力係数 C_p を用いて、

$$p - p_\infty = C_p \frac{\rho U_\infty^2}{2} \quad (3)$$

ここに、 p_∞ ：無限風上での圧力である。

式(3)を式(2)に代入すれば、流体力を圧力係数で表す次式を得る。

$$F_x = \int_S \int_0^{h_0} (p_\infty + C_p \frac{\rho U_\infty^2}{2}) \cos \phi dz ds$$

図-2 記号の定義

$$= \frac{\rho U_\infty^2 h_0}{2} \int_S C_p \cos \phi ds \quad (4)$$

式(4)と式(1)から、抗力係数と圧力係数との関係として、次式を得る。

$$C_D = \int_S C_p \cos \phi ds / D \quad (5)$$

(2) 圧力係数の分布形

C_p の分布については、多くの風洞実験データがあるので、これらを用いてデータを関数近似することを行う。

a) 円柱周りの圧力係数

円柱に作用する抗力係数は、図-2(b)の極座標を用いて、式(5)より次式となる。

$$C_D = \int_S C_p \cos \phi ds / D = \int_0^\pi C_p(\theta) \cos \theta d\theta \quad (6)$$

円柱周りの圧力係数は、空気流の場合、ベルヌイの定理から、淀み点で最大値が生じ、 $C_p=1$ となる。また、剥離域ではほぼ一定値となる特徴を有する。そこで、以下に示す次式で近似することとする。

$$C_p(\theta) = \begin{cases} 1 - (1 - C_{p1}) \sin^2 \beta \theta & : |\theta| < \theta_c \\ 1 - (1 - C_{p1}) \sin^2 \beta \theta_c & : |\theta| \geq \theta_c \end{cases} \quad (7)$$

$$\beta = \frac{1}{\theta_c} \sin^{-1} \sqrt{\frac{1 - C_{p2}}{1 - C_{p1}}} \quad (8)$$

ここに、 C_{p1} ：圧力係数の最小値、 C_{p2} ：剥離域内の圧力係数、 θ_c ：剥離点の生じる前縁から角度である（図-3参照）。

円柱の周りの流れの剥離現象は、レイノルズ数（以下Re数、 $Re = UD/\nu$ ）により変化することが知られている。五十嵐⁴⁾を参考にすれば、無剥離（ $Re < 10^3$ ）、亜臨界領域（ $10^3 < Re < 2 \times 10^5$ ）、臨界領域（ $2 \times 10^5 < Re < 5 \times 10^5$ ）、超臨界領域（ $5 \times 10^5 < Re$ ）の4領域に分類できる。津波を対象とする場合、剥離を伴う流れとなるので $Re > 10^3$ の範囲の流れを対象とする。

式(7)、式(8)の近似の有効性を確認するため、表-1のパラメータを用いて算出した圧力係数と実験データとを比較して図-4に示す。亜臨界、臨界、超臨界領域の代表的なデータ⁴⁵⁾に対して、良い近似となっていることがわかる。

図-3 円柱の圧力係数 C_p のモデル化 図-4 円柱の圧力係数 C_p と実測値との比較表-1 円柱の圧力係数 C_p 近似式のパラメータ

領域	Re	C_{p1}	C_{p2}	θ_c
亜臨界	1.1×10^5	-1.4	-1.2	78°
臨界	6.7×10^5	-2.5	-0.2	130°
超臨界	8.4×10^6	-2.0	-0.8	103°

b) 正四角柱周りの圧力係数

正四角柱に作用する流れ方向の流体力に影響する作用面は、正面（添え字 f を付す）と背面（添え字 b を付す）であることから、抗力係数は

$$C_D = \frac{1}{D} \left[\int_{-D/2}^{D/2} C_{pf}(y) dy - \int_{-D/2}^{D/2} C_{pb}(y) dy \right] \quad (9)$$

ここに、 C_{pf} 、 C_{pb} は、それぞれ、正面および背面における圧力係数である。正四角柱周りの圧力係数は、円柱に比べると Re 数の影響は小さいといわれる。正四角柱周りの圧力係数のデータ（日本鋼構造協会⁵⁾）を参考に、次式でモデル化する。

$$C_{pf} = 1 - \left| \frac{y}{D/2} \right|^3, \quad C_{pb} = -1.2 \quad (10a,b)$$

実験データと比較した結果を図-5 に示す。良好な近似であることわかる。

図-5 正四角柱の前面と背面での圧力係数

図-6 正四角柱の前面と背面での圧力係数

4. 自由水面を有する流れに設置された柱体に作用する力と抗力係数

(1) 自由表面を有する流れにおける力と抗力係数

津波のような自由表面を有する流れの中に設置された柱体周辺では、圧力の変化にともない水深が変化する（図-6参照）。抗力係数を用いて流体力を評価する場合には、入射進行波の流速、水深に対して流体力を定義する。すなわち、

$$F_x = \frac{1}{2} \rho C_D V_1^2 h_1 D \quad (11)$$

ここに、 V_1 ：入射波の流速、 h_1 ：入射波の水深である。

津波の持続波圧が作用する時間帯において、物体表面の圧力の鉛直方向分布は、静水圧分布で近似されること（例えば神山⁶⁾）から、柱体表面の評価点での水深を h として、物体表面における圧力を p を次式であらわす。

$$p = \rho g (h - z) \quad (12)$$

ここに、 z ：地盤面を原点に鉛直上方にとった座標、 g ：重力加速度である。式(12)を式(2)に代入することにより、

$$F_x = \int_S \int_0^h \rho g (h - z) \cos \phi dz ds = \int_S \frac{\rho g}{2} h^2 \cos \phi dS \quad (13)$$

となる。式(13)と式(11)から、水深を用いて抗力係数を定義することができる。

$$C_D = \frac{1}{Fr_1^2 D} \int_S \left(\frac{h}{h_1} \right)^2 \cos \phi dS \quad (14)$$

ここで、 $Fr_1 = V_1 / (gh_1)^{1/2}$ は、入射波の Fr 数である。抗力係数は、 Re 数の関数となるが、式(14)は、水流に対する抗力係数は、 Re 数のみならず Fr 数の関数にもなることを

表現することとする。

$$C_h = \max(C_{h\max} C_p, C_{h\min}) \quad (18)$$

ここに, $C_{h\max}$: 水流の場合の最大の圧力係数, $C_{h\min}$: は水流の場合の最小の圧力係数である。

$C_{h\max}$ は, 淀み点における水深 h_3 (図-7 参照) とすれば, 式(16)から, 次式で表現される。

$$C_{h\max} = \frac{2}{Fr_1^2} \left(\frac{h_3}{h_1} - 1 \right) \quad (19)$$

ここで, h_3/h_1 は, 淀み点における水深係数に相当するが, 池谷ら³⁾の理論解析結果より, 以下のとおりとする。

$$\frac{h_3}{h_1} = \frac{h_2}{h_1} + \frac{V_2^2}{2gh_1} = \frac{h_2}{h_1} + \frac{1}{2} Fr_1^2 \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^{-2} \quad (20)$$

$$\frac{h_2}{h_1} = \begin{cases} 1 & ; Fr_1 < 1 \\ -\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{1 + 8Fr_1^2} & ; Fr_1 \geq 1 \end{cases} \quad (21)$$

図-8 に, 式(20), (21)で示される関係と, 最近の実験・解析結果^{6,7,8)}を比較して示す。データの変化傾向を良好に示していることが確認される。

一方, 最小値 $C_{h\min}$ は式(16)において, 水深 $h=0$ とおくことにより, 次式で表わされる。

$$C_{h\min} = (-2)/Fr_1^2 \quad (22)$$

(3) 自由表面流における抗力係数

a) 円柱の場合

円柱の場合の抗力係数は, 柱体表面での水深を用いて抗力係数を定義することができる。

$$C_D = \frac{1}{Fr_1^2} \int_0^\pi \left(\frac{h}{h_1} \right)^2 \cos \theta d\theta \quad (23)$$

円柱の場合, 水圧係数 $C_h(\theta)$ は, 式(7), (8), (18), (19), (20), (21), (22)より, 次式で表される

$$C_h(\theta) = \begin{cases} \max[C_{h\max} \{1 - (1 - C_{p1}) \sin^2 \beta \theta\}, C_{h\min}] : |\theta| < \theta_c \\ \max[C_{h\max} \{1 - (1 - C_{p1}) \sin^2 \beta \theta_c\}, C_{h\min}] : |\theta| \geq \theta_c \end{cases} \quad (24)$$

Re 数は亜臨界領域を想定して, $C_{p1} = -1.4$, $C_{p2} = -1.2$, $\theta_c = 78^\circ$ とした場合の, 式(24)で示される水圧係数 $C_h(\theta)$ を図-9 に示す。また, $C_h(\theta)$ を式(17)に代入して求めた h/h_1 を図-10 に示す。

抗力係数は, h/h_1 を式(23)に代入し, 式中の積分を数値的に行い, Fr 数の関数として求められる。解析結果を, 既往の実験結果, 及び本研究で取得した実験結果とともに, 図-11 に示す。計算された結果は, Fr 数の増大に伴い抗力係数が低減する傾向を良好に示している。

理論計算は, 数値積分となるため, 実用上不便である

図-7 柱体周辺の水流の変化の模式図

図-8 淀み点における水深係数 h_3/h_1 と Fr 数との関係

意味している。

水流に対しても, 圧力係数を用いることにより圧力と流速とを結びつけることを考える。今, 空気流の場合と区別するために, 自由水面を有する場合の圧力係数 (水圧係数と呼ぶ) を C_h と書く。水底面における圧力は, 水圧係数 C_h を用いて, 次式となる。

$$(p - p_\infty)_{z=0} = \rho g(h - h_1) = C_h \frac{\rho V_1^2}{2} \quad (15)$$

式(15)より, 水深 h と水圧係数 C_h との関係として,

$$C_h = \frac{\rho g(h - h_1)}{\rho V_1^2 / 2} = \frac{2}{Fr_1^2} \left(\frac{h}{h_1} - 1 \right) \quad (16)$$

逆に, 水圧係数 C_h と水深 h の関係として次式を得る。

$$\frac{h}{h_1} = \frac{Fr_1^2}{2} C_h + 1 \quad (17)$$

C_h の分布形がわかれば, 式(17)により水深の分布を求めることができ, これを式(14)に代入することにより抗力係数を算出することが可能となる。

(2) 自由表面流における水圧係数

空気流の場合, 圧力係数の最大値は淀み点で生じ, ベルヌイの定理から, $C_p = 1$, 最小値は, $C_p = -\infty$ となった。しかし, 津波による水流の場合, 水理実験にみられたように, 柱体の上流側に発生する跳水などによりエネルギーが減衰するため, $C_h < 1$ となる。また, 水深はゼロ以下になることはないので, 最小値については, 水深がゼロに相当する水圧係数となる。このことを考えて, C_h の関数形としては, 空気流の C_p と関連づけて, 次式で

 図-9 円柱周りの水圧係数 $C_h(\theta)$

 図-10 円柱周りの水深係数 h/h_1 の分布

ので、近似関数を考える。林ら¹⁾の実験式を参考に、次の関数形による近似式を考えた。

$$C_D = \begin{cases} C_{D\min} + (C_{D\max} - C_{D\min})(1 - Fr_1^2/4) & : Fr_1 < \sqrt{2} \\ C_{D\min} + (C_{D\max} - C_{D\min})(1/Fr_1^2) & : Fr_1 \geq \sqrt{2} \end{cases} \quad (25)$$

図-11 中の破線は、 $C_{D\max}=1.1$, $C_{D\min}=0.5$ とした近似関数であり、理論解、実験データを良好に再現する。

図-11 では、実験データの多く存在する亜臨界領域に対するものであった。実際の津波現象を考えると、亜臨界領域以外の条件となる場合も考えられる。表-1 を参考に、臨界、超臨界の水圧係数に対して抗力係数を求めた(図-12 参照)。計測データが無いために、理論の検証はできないが、常流射流を通じて、亜臨界領域に対するものが最も大きな値を示すことがわかる。

b) 正四角柱の場合

角柱の場合の抗力係数は、前面と背面の水深から、

$$C_D = \frac{1}{Fr_1^2 D} \left[\int_{-D/2}^{D/2} \left(\frac{h_f}{h_1} \right)^2 dy - \int_{-D/2}^{D/2} \left(\frac{h_b}{h_1} \right)^2 dy \right] \quad (26)$$

正四角柱まわりの水圧係数は、式 (10ab), (18), (19), (20), (21), (22) より次式となる。

$$C_{hf} = C_{h\max} C_p = \frac{2}{Fr_1^2} \left(\frac{h_3}{h_1} - 1 \right) \left(1 - \left| \frac{y}{D/2} \right|^3 \right) \quad (27)$$

 図-11 円柱の抗力係数の Fr 数との関係

 図-12 抗力係数に及ぼす Re 数の影響

$$C_{hb} = \max \left[\frac{-2.4}{Fr_1^2} \left(\frac{h_3}{h_1} - 1 \right), \frac{-2}{Fr_1^2} \right] \quad (28)$$

式(27), (28)を式(17)に代入すれば、水深の分布を得る。

$$\frac{h_f}{h_1} = \frac{Fr_1^2}{2} C_{pf} + 1 = \frac{h_3}{h_1} + \left(1 - \frac{h_3}{h_1} \right) \left| \frac{y}{D/2} \right|^3 \quad (29)$$

$$\frac{h_r}{h_1} = \frac{Fr_1^2}{2} C_{pr} + 1 = \max \left[-1.2 \left(\frac{h_3}{h_1} - 1 \right) + 1, 0 \right] \quad (30)$$

ここで、前面の水深の最大値(淀み点: $y=0$)を $h_{f\max}$ とかけば、

$$\frac{h_{f\max}}{h_1} = \frac{h_3}{h_1} \quad (31)$$

$h_{f\max}/h_1$ および h_r/h_1 の理論式(29), (30)を実験データと比較して、図-13 に示す。Fr 数が1周辺のデータ数が不足しているが、全体の傾向は良く表している。

式(29), (30)を式(26)に代入することにより、角柱の場合の抗力係数として次式を得る。

$$C_D = \frac{1}{Fr_1^2} \left[\left(\frac{h_{fmean}}{h_1} \right)^2 - \left(\frac{h_b}{h_1} \right)^2 \right] \quad (32)$$

$$\frac{h_{fmean}}{h_1} = \sqrt{\frac{9}{14} \left(\frac{h_3}{h_1} \right)^2 + \frac{3}{14} \left(\frac{h_3}{h_1} \right) + \frac{1}{7}} \quad (33)$$

図-13 正四角柱の前面と背面の水位とFr数との関係

図-14 正四角柱の抗力係数のFr数との関係

ここで、 h_{fmax} 上流側水深の自乗平均値 (ms 値) である。式(32)と実験結果との比較を図-14 に示す。実験データの傾向をよく再現している。なお、同図中の破線は、式(25)で示される近似式において、 $C_{Dmax}=2.0$ 、 $C_{Dmin}=1.25$ としたもので、円柱の場合と同様に理論値、実験値を良好に再現することがわかる。

5. おわりに

本論文では、柱体に働く津波持続波力を波圧分布を考慮して求めるモデルを提案した。また近似関数形を示し、抗力係数とFr数との関係を実験データと比較して良好な一致を得た。これにより、柱体周辺の水理現象を取り入れた抗力係数の表示を得た。

謝辞：本研究は、国土交通省平成25年度建築基準法整備促進事業「S-3 津波避難ビルの構造基準の合理化に資する検討（研究代表者：中埜良昭）」において、（独）建築研究所との共同研究として実施したものである。研究の遂行にあたっては、「津波避難ビルの構造基準の合理化検討委員会」東京大学生産技術研究所・中埜良昭所長、防衛大学校・藤間功司教授、港湾空港技術研究所・有川太郎上席研究官、国土交通省国土技術政策総合研究所・奥田泰雄建築災害対策研究官をはじめとした各位より貴重な意見をいただいた。また、防衛大学校・林健二郎教授には円柱に対する流体力のデータを提供をいただくと同時に高フルード数域の流体力について有効なご示唆をいただいた。さらに、電力中央研究所・木原直人博士より解析結果の提供をいただいた。ここに記し謝意を表す。

参考文献

- 1) 林建二郎・浅野敏之・多田毅・寺本行芳：海岸林に作用する流体力と抵抗則評価，土木学会論文集 B3（海洋開発），Vol.68, (2012), No.2, pp.I_114-I_119.
- 2) 林建二郎：柱状物体に作用する遡上流れの流体力評価，土木学会論文集 B3（海洋開発），Vol.69, (2013), No.2, pp.I_329-I_334.
- 3) 池谷毅・秋山義信・岩前伸幸：陸上構造物に作用する津波持続波圧に関する水理学的考察，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.69, No.2, 2013, pp.I_816-I_820.
- 4) 五十嵐保：剥離の形態と形状抵抗，流体力学ハンドブック 10-2-1，日本流体力学会編，丸善，1998.
- 5) 日本鋼構造協会編：構造物の耐風工学，東京電機大学出版局，1997，688p.
- 6) 榊山勉：陸上遡上津波の伝搬と構造物に作用する津波波圧に関する研究，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol.68, No.2, 2012, I-771-I-775.
- 7) 高島大輔・木原直人・田中伸和：陸上構造物前面に作用する津波波圧に関する数値実験，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.69, No.2, pp.I_851-I_855.
- 8) 総務省消防庁：危険物施設の津波・浸水対策に関する調査検討報告書，平成 21 年 3 月，2009，408p.

THE EVALUATION MODEL OF TSUNAMI WAVE FORCE ACTING ON COLUMNAR BODY CONSIDERING PRESSURE DISTRIBUTION

Tsuyoshi IKEYA, Nobuyuki IWAMAE, Seiya SUENAGA, Yoshinobu AKIYAMA, Tomokazu TATENO and Norio SUZUKI

The tsunami wave force acting on land structures has been reported to be dependent on Froude number of incoming tsunamis. When tsunami wave force is evaluated by using drag coefficient, however, constant values is commonly used thus Froude number effects are not considered. In this study, wave pressure distribution model is proposed considering the formation of hydraulic jump on the front side and the formation of the cavity area on the backward of the column. Wave force was then computed by integrating wave pressure around the column. Drag coefficient for a circular cylinder and a square column was presented and good agreement with experimental data was shown.