

エアークッション効果を利用した栈橋揚圧力の減勢法とそのモデル則に関する研究

中 村 孝 幸*

1. ま え が き

栈橋構造物などの床版に作用する揚圧力は、その作用時間が短かく強度の大きな衝撃波力であることが知られている。近年著者¹⁾は、このように強度の大きな衝撃波力が波面と構造物との間にはさままれる空気のカッション効果を利用して有意に減勢できることを実験的に確認している。本研究は、これに引き続き、上記のようなエアークッション効果を利用した波力減勢法の確立およびその実用化を主目的としている。このため、まず最初に従来提案した波力減勢工と比較して矩形的空気室を格子状に配列しただけのより簡単な構造の減勢工を採用し、これによる波力減勢度の実態を明らかにするとともに空気室の高さに伴う波力減勢度の変化の予測法について検討した。これに引き続き、現場の減勢工の空気室の高さを予測する上で必要となる模型相似則について明らかにすると共に波力減勢度を考慮した実用的な空気室の高さの決定法を導き、波力減勢工の実用化を容易ならしめようとするものである。

2. 揚圧力の減勢法

2.1 実験装置および実験方法

(1) 実験装置： エアークッション効果を利用した波力減勢工には、図-1 に示すような矩形的空気室の集合体より成るものを採用した。この際空気室の高さ D としては、1, 2, 5 cm の 3 種類のものを製作した。また減勢工を付加しない場合の水平床版の模型には、図-1 の減勢工板の基板と同一の厚さ 0.6 cm の鋼板を用いた。模型床版に作用する揚圧力は、前論文¹⁾でその詳細を紹介した固定梁構造の波力計を用いて測定した。この波力計の固有振動数は、測定時において 400 Hz 程度と高応答性能を有しており、衝撃揚圧力の作用時間 (1/50 秒程度) から考えてほぼ正確な測定が行えるものと考えられる。また波圧計は、共和電業社製の PGM-1 KG (空中固有振動数 3 kHz) を用い、これを図-2 中に示すように模型板の中心に設置した。

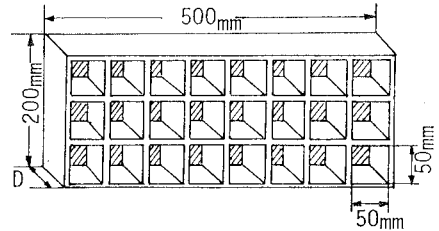


図1 矩形空気室型の波力減勢工

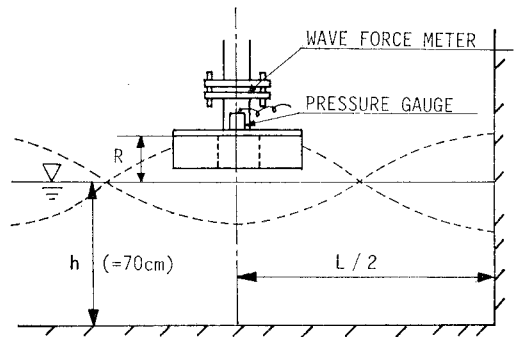


図-2 実験方法

(2) 実験方法： 実験は図-2 に示すように 2 次元造波水槽の一端に反射板を設けて重複波を生起せしめ、反射板より半波長離れた腹の位置に模型床版を設置して作用する揚圧力および波圧の測定を行った。この場合に採用した水理条件は、静水深 $h=70$ cm, 入射波高 $H=12.7$ cm, 周期 $T=1.49$ sec である。そしてクリアランス R としては、図-2 に示す R で定義し、この R を 0, 8.5 cm の 2 種類に変化せしめた。なお揚圧力の測定は、その出現現象が不規則になりやすいことを考慮して各ケースについて同様の実験を 5 回程度繰り返して行ない、総波数で 50 波程度となるようにした。

2.2 揚圧力の減勢に関する実験結果

図-3 (a), (b) は、 $R=0$ cm と固定した時の各々水平板および減勢工を付加した水平板 ($D=5$ cm) に作用する揚圧力 F の強度分布を示す。なお、図中の F^* は式 (1) の定義によるものである。

$$F^* = F / (\rho g H B L) \dots\dots\dots (1)$$

* 正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部海洋工学科

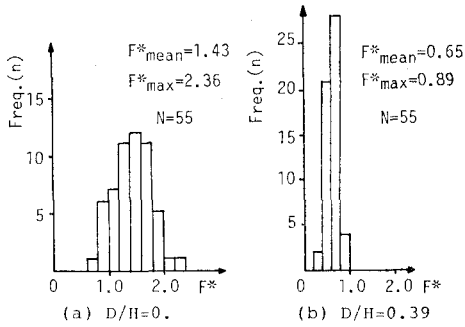


図-3 揚圧力の強度分布

ここに ρ は流体密度, g は重力加速度, B は模型床版の波向方向と直角方向における長さ, l は模型床版の波向方向における長さである。

この図からわかるように F^* の分布は, 減勢工を付加することにより特に大きな揚圧力が低減するようにその分布幅が狭くなっていることが認められる。そして, 揚圧力の出現現象は, 減勢工を設けることにより規則的な現象へと変化するものと言えよう。

図-4 (a), (b) は, 上記の 図-3 (a), (b) の条件の場合に測定された揚圧力 F の時間波形の典型例を各々示す。減勢工を付加しない 図-4 (a) の場合, 揚圧力は鋭い立上りを見せ, 衝撃的な波力波形となっている。一方, 減勢工を付加した (b) の場合, 多少の立上りが局所的に認められるものの (a) のような強度の大きな衝撃性の波形は見られず, エアークッション効果により作用時間の長いならかな波力波形へと減勢されていることがわかる。

次に上記のような強度分布より得られる最大値および平均値に着目して, 減勢工を付加した場合としない場合

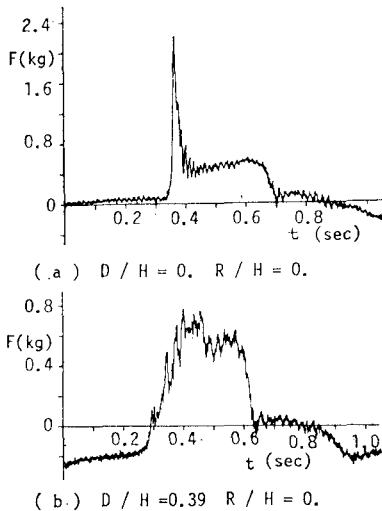


図-4 揚圧力の時間波形

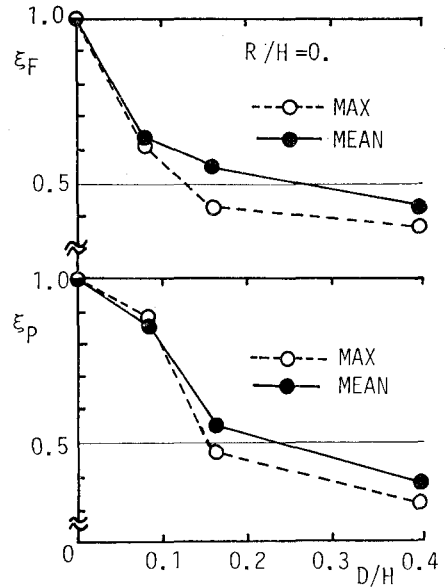


図-5 揚圧力および波圧の減勢度

との比, すなわち減勢度 ξ について検討してみた。図-5 は, 各々揚圧力 F および波圧 P に関する減勢度 ξ_F , ξ_P の D による変化を示すものである。これらの図より, ξ_F と ξ_P の両者は, D の増大とともに減少し, $D=5\text{ cm}$ ($D/H=0.39$) において最大値に着目すると ξ_F , ξ_P 共に 0.4 程度にもなることがわかる。そして, この ξ_F の値は, 前報¹⁾において台形の空気室と三角柱を組み合わせた減勢工を用いて得た $\xi_F=0.35$ に近い値となっており, 図-1 に示すようなエアークッション効果のみを利用した構造の簡単な減勢工を用いても揚圧力が有効に減勢できるものと言えよう。

2.3 空気圧縮モデルの適用性

空気圧縮モデルは, 高さ D の空気室が初期速度 U をもつ密度 ρ , 厚さ K の水塊により 1 次元的に断熱圧縮されるものとして導かれる。そしてこの圧縮の際に発生する最大空気圧 $\hat{P}_A$ は, Bagnold²⁾ や光易³⁾ により明らかにされているように式 (2) の非線形方程式を解いて与えられる。

$$5(\hat{P}_A/P_0)^{2/7} + 2(\hat{P}_A/P_0)^{-5/7} - 7 = \rho K U^2 / P_0 D \quad (2)$$

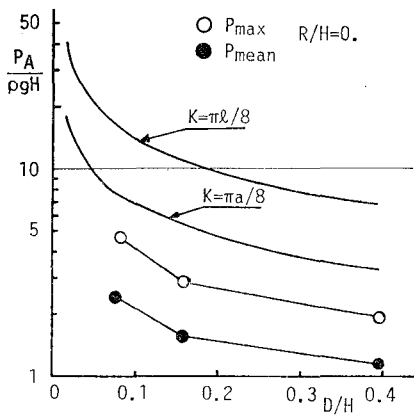
ここに P_0 は大気圧である。また $\hat{P}_A$ は絶対圧での最大空気圧をあらわし, ゲージ圧でのそれ P_A と $\hat{P}_A = P_0 + P_A$ の関係がある。式 (2) の右辺側の量は, Impact 数あるいは Bagnold 数と呼ばれている無次元量で上記モデルを支配する重要な量である。本研究では, 以下において谷本⁴⁾と同様にこの無次元量を Bagnold 数と呼ぶことにし, これを Bg と略記する。

式 (2) の近似解についても Bagnold²⁾ や光易³⁾ により与えられており, ゲージ圧での P_A で表示すると式 (3)

のようになる。

$$P_A = \begin{cases} (1.18\sqrt{Bg} + 1.2Bg)P_0 & 0 < Bg < 0.62 \\ 2.7BgP_0 & 0.62 < Bg < 2.5 \end{cases} \quad \dots\dots\dots(3)$$

これらの表示式からわかるように、空気室内の最大圧 P_A は、 Bg 数が求まれば決定できることとなる。本研究では、 Bg 数の算定に当り、 U には微小振幅重複波理論による値が、 D には矩形空気室の高さが、また K については、平板の付加質量の $1/2$ の板にわたる平均厚さが適用できるものとした。この際、付加質量を求めるための基準長さには、i) 床版の長さ l を用いた場合 ($K = \pi l/8$) および ii) 矩形の空気室の一辺の長さ a を用いた場合 ($K = \pi a/8$) の両者を採用して算定を行ってみた。図—6 は、一例として $R=0$ cm の場合の式 (3) に



図—6 波圧強度の空気室高さによる変化

よる P_A の算定結果との比較を示す。この図より、 P_A の算定値は、 D の増大と共に減少しており、実測結果と定性的な傾向はよく一致していることがわかる。一方、定量的な比較を行ってみると、上記の ii) による K を用いた場合の方が実測結果に近くなっている。これは波圧のピーク値が出現する時間位相において波面が未だ床版の両端部に達しておらず、ii) による K の方が妥当であることによるものであろう。そして減勢工に作用する波圧の D による変化は、ほぼ空気圧縮モデルにより説明され得るものと言えよう。

3. 減勢工に適用されるモデル則

3.1 空気圧縮モデルに基づく理論的考察

(1) Froude 則を適用した時の波力減勢度：ここでは、従来波浪実験によく用いられている Froude の相似則を上述したような波力減勢工に適用した場合、波力減勢度に関する模型と原型との比がどのようになるかを空気圧縮モデルに基づき検討してみた。なお以下では、鉛

直面内における 2 次元波浪問題に限定し、揚圧力についても床版の単位幅当りに作用する力を対象としている。

a) 減勢工を付加しない場合の揚圧力の比：この場合の揚圧力 F に関する模型と原型との比は、従来ほぼその妥当性が認められている Froude の相似則に基づき式 (4) のように与えられるものとした。

$$F_M/F_P = S^2 \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここに S は長さの縮尺、下添字 M, P は各々模型および原型の量をあらわす。

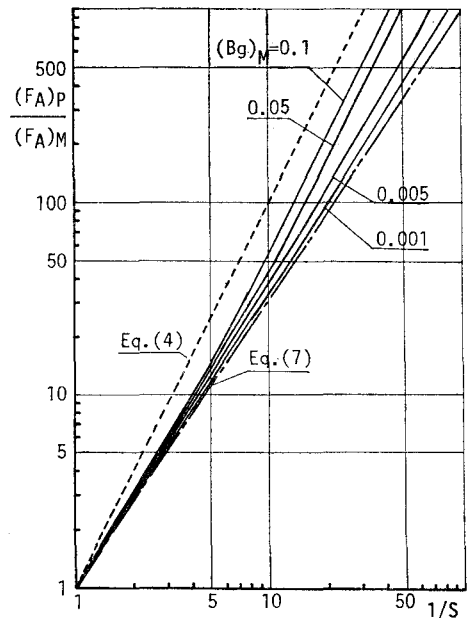
b) 減勢工を付加した場合の揚圧力の比：この場合の揚圧力 F_A に関する模型と原型との比は、 F_A が $P_A l$ (l : 床版長さ) に比例することに注意すると式 (3) の P_A の近似解を用いて式 (5) のように導ける。

$$\frac{(F_A)_M}{(F_A)_P} = \begin{cases} \left[\frac{1.18/\sqrt{S} + 1.2\sqrt{(Bg)_M/S}}{1.18 + 1.2\sqrt{(Bg)_M/S}} \right] S^2 & (Bg)_P \leq 0.62 \\ \left[\frac{1.2 + 1.18\sqrt{(Bg)_M}}{2.7} \right] S^2 & 0.62 \leq (Bg)_P \leq 2.5 \end{cases} \quad \dots\dots\dots(5)$$

ここで模型の Bg 数は、一般に満足される $(Bg)_M < 0.62$ が仮定してある。そして式 (5) の誘導に当っては、Froude 則を適用した時の Bg 数に関する模型と原型との比を表わす式 (6) の関係が利用してある。

$$(Bg)_M/(Bg)_P = S \quad \dots\dots\dots(6)$$

図—7 は、式 (5) の関係式を $(Bg)_M$ をパラメーターにして示すもので、わかりやすくするため式 (5) の逆数関係、すなわち波力比の逆数と縮尺の逆数 $1/S$ の関係で



図—7 Froude 則を適用した時の F_A の比

表示してある。なお図中には、式(4)の関係式および $(Bg)_M$ と $(Bg)_P$ の両者が十分小さい場合に式(5)の第1式から導かれる式(7)の関係式も付記してある。

$$(F_A)_M/(F_A)_P = S^{3/2} \dots\dots\dots (7)$$

この図より、波力比の逆数は、減勢工を付加した場合の方がそれを付加しない場合より小さくなることやその傾向は $(Bg)_M$ が小さくなるほどまた縮尺の逆数が大きくなるほど顕著になるがわかる。したがって減勢工を付加した場合、模型波力を空気バネ効果を考慮していない式(4)により原型波力に換算すると過大な波力を予測することになるものと言えよう。

c) 波力減勢度の比: 波力減勢度 ξ_F に関する模型と原型との比は、式(5)を式(4)で除して求められる。すなわち、式(5)の右辺の S^2 を除いた [] の中のものである。図-8は、これら ξ_F に関する比の逆数と $1/S$ との関係を図示するもので、図中には、 $(Bg)_M$ および $(Bg)_P$ が十分小さな場合に得られる式(8)の関係式についても付記してある。

$$(\xi_F)_M/(\xi_F)_P = 1/\sqrt{S} \dots\dots\dots (8)$$

この図に見られるように、 ξ_F の値は模型よりも原型の方が小さくなっており、波力減勢の効果が原型においてより有効にあらわれることなどがわかる。

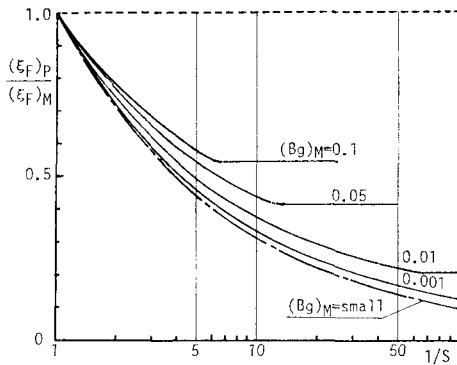


図-8 Froude 則を適用した時の ξ_F の比

(2) 波力減勢度の一致を考慮した模型則: ξ_F を模型と原型とで一致させるためには、Froude 数と Bg 数の両者の一致を考慮する必要があるが、このような模型実験は不可能に近い。 ξ_F を一致させる唯一の近似的な方法としては、減勢工の空気室の高さ D を除く諸量については Froude 則を適用して決定し、 D についてはその波変形に及ぼす影響が小さいものと仮定して後述する空気圧縮モデルから導かれる関係式を満足するように決定する方法が挙げられる。そして、 ξ_F を一致させるための D に関する比は、上記した ξ_F に関する比を 1 とした式を解いて求められ、結果のみを示すと式(9)の

ようである。

$$\frac{D_M}{D_P} = \begin{cases} \left[\frac{-1.18 + \sqrt{1.39 + 5.66\beta + 5.76\beta^2 S}}{2.4\beta} \right]^2 & (Bg)_P \leq 0.62 \\ \frac{1.18/\beta + 1.2S}{2.7} & 0.62 \leq (Bg)_P \leq 2.5 \end{cases} \dots\dots\dots (9)$$

ここに β は、式(10)で定義される量である。

$$\beta = \sqrt{(Bg)_M}/S \dots\dots\dots (10)$$

そしてこの場合の $(Bg)_M$ と $(Bg)_P$ との比は式(11)で与えられる。

$$(Bg)_M/(Bg)_P = S^2 \cdot (D_P/D_M) \dots\dots\dots (11)$$

また $(Bg)_M$ が十分小さな場合、式(9)中の S を含む項は無視でき、 D_M/D_P は β のみの関数となる。図-9は、式(9)の関係を図示するもので、 D に関する比の逆数と β および $1/S$ の関数で表わしてある。この図より、 ξ_F を模型と原型とで一致させるためには、 D_P として D_M を線形スケールで $1/S$ 倍して求めた値よりかなり小さくする必要のあることがわかる。そして一般の室内実験のように $(Bg)_M < 0.01$ でかつ $(1/S) > 15$ の条件の場合、 D_P には D_M のほぼ $1/\sqrt{S}$ 倍程度のものを採用すればよいことなどもわかる。

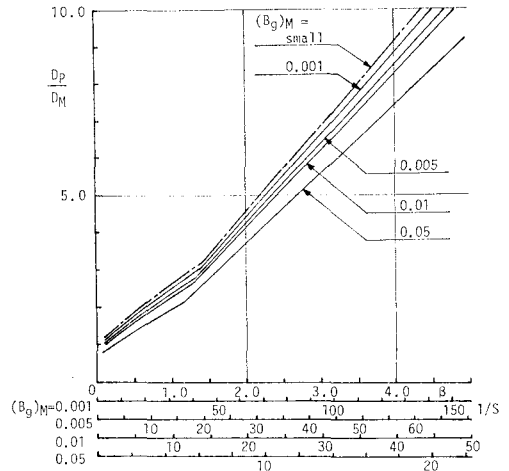


図-9 ξ_F の一致を考慮した時の D の比

3.2 実験による検証

(1) 実験方法: 図-1と同様の形式の減勢工を水平床版に付加した場合としない場合の両者について重複波による揚圧力の測定を行った。実験に採用した縮尺 S 並びに Froude 則に基づき決定・採用した波条件等を一括して表-1に示す。そしてこの実験では、表中に示すように D についても線形縮尺化した値を用いており、上述した 3.1 (1) の場合に対応する検証実験になっている。

る。なお、静水深 h については縮尺化が困難であったことや衝撃揚圧力の現象が水面付近の波動運動に卓越した影響を受けて生じることなどを考慮して、 $h=70\text{ cm}$ と一定にした。

(2) 実験結果：減勢工を付加した場合の揚圧力の比を示すのが図-10である。図中に示す理論曲線は、この実験での原型の Bg の値が 0.005 程度と十分小さいことから、式 (7) によるものが図示してある。また図中には減

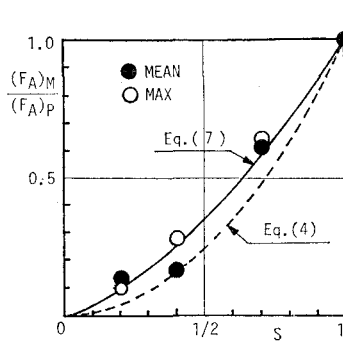
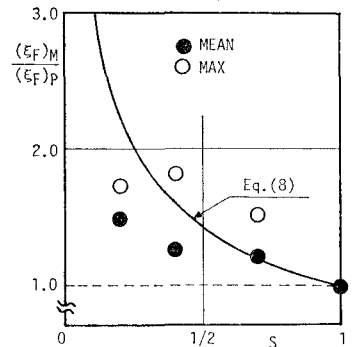

 図-10 F_A の縮尺

 図-11 ξ_F の縮尺

表-1 実験条件

S	l (cm)	D (cm)	T (sec)	H (cm)	R (cm)
1	50	5.0	2.30	15.0	0
7/10	35	3.5	1.93	10.5	0
2/5	20	2.0	1.46	6.0	0
1/5	10	1.0	1.03	3.0	0

勢工を付加しない場合の波力比を示す式 (4) についても比較のため併せ示してある。この図より、実測された F_A の比は多少のばらつきがあるものの空気圧縮モデルによる式 (7) にほぼ一致していることが認められる。なお減勢工を付加しない場合の波力比の測定値は、ほぼ式 (4) による理論値に一致していたことを付記しておく。次に ξ_F の比に関する結果を示すのが図-11 であり、図中には上述した $(Bg)_P$ の条件を考慮して式 (8) による理論曲線が付記してある。この図より、測定された ξ_F の比は、式 (8) によるそれに比して定量的な一致は十分でないものの S の減少に伴ない増大するなど定性的な傾向はほぼ一致していることなどが認められる。以上の検討結果より、3.1 で明らかにした空気圧縮モデルに基づく理論的考察はほぼ妥当なものであることが確認されたが、今後さらに現地実験を含む大縮尺の実験等により上記の理論的考察の追証が必要なものと言えよう。

4. 結 語

- i) エアークッション効果を利用した構造形式の簡単な減勢工を用いても衝撃揚圧力は有意に減勢できる。またその減勢効果は、空気室の高さ D と共に増大し、本実験の場合 $D=5\text{ cm}$ で最大 40% までに減勢できた。
- ii) 減勢工を付加した場合の衝撃揚圧力には、Froude の相似則が適用できず、Froude 則により模型波力を原型波力に換算すると過大な予測値を与える。
- iii) 模型の減勢工と同様な波力減勢度を得るために必要となる原型の空気室の高さ D は、模型の Bagnold 数と縮尺 S を用いて陽に決定でき、一般の室内実験を想定する場合ほぼ模型 D の $1/\sqrt{S}$ 倍程度で与えられる。

参 考 文 献

- 1) 中村孝幸・川本浩二・藤田昌夫：栈橋に作用する衝撃揚圧力の減勢法に関する研究，第 30 回海岸工学講演会論文集，pp. 342~346, 1983.
- 2) Bagnold, R. A.: Interim report on wave pressure research, Jour. of Inst. of Civil Eng., Vol. 12, pp. 201~226, 1939.
- 3) Mitsuyasu, H.: Shock pressure of breaking wave, Proc. of 10th ICCE, pp. 268~283, 1966.
- 4) 谷本勝利・高橋重雄：直立消波ケーソンの上床版に働く空気圧縮揚圧力，第 27 回海岸工学講演会論文集，pp. 215~319, 1980.