

空気防波堤の現地実験について

松本輝寿*・曾我部隆久**・奥村研一***
木村慎太郎****・岩崎 宏*****

1. まえがき

港内における小型船の発着係留等に際し、港内波（港外からの侵入波、港内発生波、航跡波等）の影響を受け静穏度が悪く、利用上危険を伴ったり、稼働率も低いという事例が多く見受けられる。

このような場合、従来は防波堤の建設あるいは消波工の設置により対応してきたが、船舶運航上、施設構造上あるいは水質保全上等の理由により、工作物が設置できない場合には、やむを得ず放置されてきた。

本実験は、港内における種々の制約条件から自由であり、かつ、その消波効果が基礎的実験においては解明されている空気防波堤について、現地実験により、その有効性を検証し、港内の船舶および乗船者の安全対策に寄与しようとする目的で行った。

2. 実験計画

今回の空気防波堤の現地実験は、図-1に示す手順に従って行った。以下、各項目のうち、主なものをとりあげて説明する。

なお、今回の報告は、主として実験の実施までとし、結果の整理・解析等については、機会をあらためて行いたい。

2.1 実験対象地点

はじめに述べたように、空気防波堤の存在意義からいって、港内波の影響のため、利用上問題が指摘されているが、やむを得ず、小型船が頻繁に発着係留しているところが、実験対象地点として最適である。このような条件を満足するとともに、実験の実施に便利な実験対象地点として、大阪港中央突堤基部南海岸通船溜りを選定した。

本地点は、図-2に示すように、大阪湾に対して、大関門を経てほぼ WSW 方向に開いている。大阪市港湾局で測定した風資料をもとに、S.M.B. 法により実験対

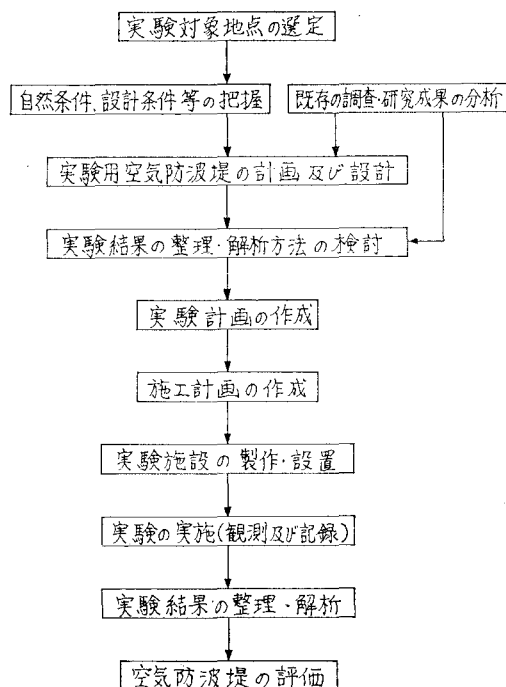


図-1 空気防波堤の現地実験フロー

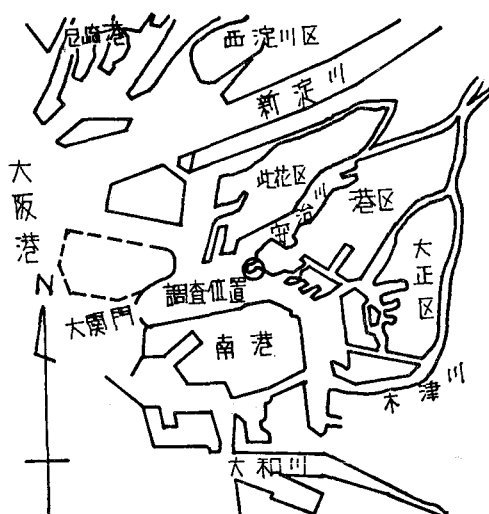


図-2 空気防波堤調査位置図

* 正会員 (前)運輸省第三港湾建設局技術次長
** 正会員 運輸省第三港湾建設局神戸調査設計事務所所長
*** 正会員 運輸省第三港湾建設局神戸調査設計事務所建設専門官
**** 正会員 運輸省第三港湾建設局企画課係長
***** 大阪市港湾局技術部長

表—1 波向別波高出現頻度(年間発生日数)

波向	W	WSW	SW	合 計
船溜り前面波高				
0.20 m ~ 0.39 m	14.3日	29.3日	27.3日	70.9日
0.40 m ~ 0.59 m	13.3	25.0	11.0	49.3
0.60 m ~ 0.79 m	5.7	3.0	1.7	10.4
0.80 m ~	0.3	0.7	0.0	1.0
合 計	33.6	58.0	40.0	131.6

象地点である船溜り前面の波高を推算すると、表—1 のようになり、W~SW 方向の風の卓越する冬期が特に問題となることがわかる。なお、推算した波の周期は 2~3 秒である。

また、当船溜りを利用している船舶は、20 トン以下の小型船約 100 隻で、ピーク時の交通量は、1 時間 40 隻を越えている。

2.2 実験用空気防波堤の計画および設計

(1) 設計対象波の設定

港内静穏度の向上という実用的見地からは、波高を低減させることが必要である。

本実験対象地点での小型船の利用状況を考えると、船溜り内の波高は、0.3m 以下に抑えることが望ましい。

船溜り前面の波高を空気防波堤により 60% 以下に低減できれば、既設防波堤のしゃへい効果等も加わり、船溜り前面の波高 0.6m は船溜り内では 0.3m になることが期待される。この場合、表—1 に示すように、船溜り前面波高が 0.6m を越える日数は年間約 11 日となるから、船溜り内の静穏度はかなり向上する。

一方、空気防波堤の設計(必要空気量の算定)に当っては、消波対象波の周期が必要である。

そこで、風向、風速を種々組合わせて、S.M.B. 法により推算した船溜り前面での波高が 0.6m 前後になる時の周期を求めた。その結果は $T_{1/3}=2.1\sim 2.9$ sec である。

以上の点から船溜り前面での設計対象波および消波率を次のように設定した。

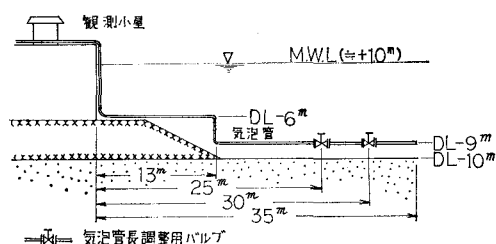
$$H_{1/3}=0.6\text{ m}, T_{1/3}=3\text{ sec}, L_0=14\text{ m}, \text{消波率 } 60\%$$

(2) 気泡管の延長

気泡管の延長は、栗原¹⁾によれば波長の 2 倍以上必要とされており、本実験では 30 m とした。ただし、延長と消波効果との関係を見るため、海中でバルブを開閉することによって、25 m および 35 m に延長を変えることのできるようにした。

(3) 気泡管の設置方向および水深

気泡管の設置方向は、波向との関係を考えて決める必要がある。表—1 に示すように、最多波向は WSW 方向と推定されるので、気泡管の設置方向は、WSW に直角な方向とした。これは、既設防波堤の延長方向と一致す



図—3 気泡管設置要領

ることになる。

この設置位置における水深は、既設防波堤の堤脚部は捨石マウンドのため D.L. -6m であり、それからはずれると、D.L. -10m の原地盤となる。

気泡管は、マウンド部では捨石に直接設置し、原地盤部では海底から 1m の高さに木枠を組んで、その上に設置した(図—3 参照)。栗原²⁾によれば、気泡管の設置水深については、波長の 1/2~2/3 くらいが適当とされているが、当実験の場合はややその範囲からはずれる。しかし、その差は大きくはなく、ほぼ、適当と判断した。

(4) 必要空気量の算定

必要空気量(Q)については、消波率、設置水深、対象波長をパラメーターとして算出する方法が栗原³⁾により提案されており、今回もその方法を採用した。

設置水深 7.0 m, 10.0 m における必要空気量はそれぞれ、 $Q=25.9\text{ l/sec}\cdot\text{m}$, $4.7\text{ l/sec}\cdot\text{m}$ となり、両者の間には大きな差がある。そこで、過去の実験例も参照して、 $Q=26\text{ l/sec}\cdot\text{m}$ を当実験の必要空気量とした。

なお、必要空気量の算定については、Taylor⁴⁾の理論にもとづいて提案された Bulson^{5),6)}の式がある。これによれば $Q=220\sim 230\text{ l/sec}\cdot\text{m}$ となり、栗原の方法で求めた値の 10 倍近い値となる。

これら算定式の妥当性については、現地実験の結果により判断されることになる。

(5) 電動機出力の算定

必要空気量を送るための電動機の出力は、単位時間に空気に与える有効エネルギーの観点から算定できる。この動力を空気動力(L_{aa})といい、当実験条件を考慮すると、 $L_{aa}=2.81\text{ kW/m}$ となる。これに送風機の平均効率や余裕を見込むと、当実験に必要な電動機出力は 4.49

表—2 必要空気量および電動機出力

気 泡 管 長 (m)	25	30	35
空 気 量 (m^3/min)	40	48	56
電 動 機 出 力 (kW)	36.7	44.0	51.3
栗原による 理論的な最小動力	112	135	157

kW/m となる。これより、気泡管長別の空気量及び電動機出力は、表-2 のようになる。なお、表-2 には、栗原⁷⁾の提案した、波の阻止に必要な理論的な最小動力の値も併記した。

以上より、当実験で用いるコンプレッサーは、送風能力 48 m³/min, 出力 150 kW とした。

(6) 気泡管径、孔径および孔数の算定

気泡管径は、管内の摩擦損失や温度上昇を少なくするという観点からは、太い方が望ましい。そこで、内径 15.5 cm の鉄管（規格品）を用いることにした。これは過去の現地実験に比較してやや太い径である。

気泡孔径は、特に決定する根拠もないので、過去の実験例（現地および模型）を参照して、3 mm とした。

気泡孔数は、気泡孔径が決定されると、Zeuner の公式を応用して算定できる。ここで、Zeuner の公式とは、圧縮された十分大きい容器内の空気（圧力 p_0 、密度 ρ_0 ）が断面積（ A ）の小さい穴から、別の空気中（圧力 p 、密度 ρ ）に噴出する時の流出量（ m ）を与える式であり、空気の比熱比を κ とすると、次のように表わされる⁸⁾。

$$m = A \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} \rho_0 p_0 \left\{ \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\kappa+1/\kappa} \right\}}$$

当実験では、気泡管の設置水深が途中で変化していることを考慮して、設置水深 7.0 m, 10.0 m における空気の流出量を変化させるようにした。また、上式を用いる場合、気泡管内の圧力損失を考慮する必要があるが、これは管内流速を仮定して気泡孔数を算出した後、あらためて圧力損失計算を行い、仮定した値を検討した。

この結果、気泡孔数は 18 個/m に決定した。

2.3 観測方法

現地実験の目的は、冒頭に述べたように、空気防波堤の有効性を評価しようとするものである。このため、現地実験は空気量と消波効果との関係を把握するための波高観測を中心として、消波に対する大きな要因といわれる流速およびその時のバックグラウンドの流況を求めるための流速観測および大潮時の 25 時間潮流観測を実施した。その他に実験当日の風向・風速等も観測した。

(1) 波高観測

空気防波堤は周期の長い波にはあまり効果がないといわれているため、消波効果を把握するための波高計は、短周期の波を正確に捕えることのできるものでなければならない。この点から、波高計としては、容量式波高計や超音波波高計等を用いるのが望ましいが、それぞれ設置方法についての制約がある。

今回の調査では、その目的から、空気防波堤を通過する前後の波高観測はもちろん、船溜り内の波高観測もあわせて実施しようとした。これらの観測には、本来、同じ種類の波高計を使用すべきであるが、上に述べたよう

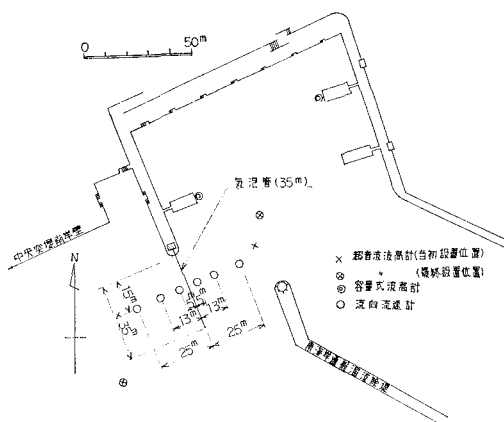


図-4 波高計および流速計配置図

に設置地点での制約条件から、前者に超音波波高計、後者に容量式波高計を用いることにした（図-4 参照）。

(2) 流速観測

流速観測（流向を含む）には、取扱いやすさ等を考慮して、小野式自記流速計を用いることにした。

その設置位置は、Kobus⁹⁾による研究成果にもとづいて検討した。すなわち、Kobus は表面における最大流速の発生位置とその水平方向の減衰についてとりまとめており、当実験条件について、それを適用すれば、最大流速は気泡管より約 5 m 離れたところに発生し、13 m, 25 m 離れるとそれぞれ 50%, 22% 程度に減衰する。この点から、流速計は気泡管の前後 5 m, 13 m, 25 m に設置することにした。

設置個数は、気泡管の前後 5 m については流速をできるだけ正確に把握するため、水深方向にそれぞれ 7 台、他の地点はそれぞれ 4 台とし、計 30 台を用いた。波高計および流速計の配置図を図-4 に示す。

(3) 潮流観測

潮流観測にも、流速観測と同様の理由で、小野式自記流速計を用いた。

設置位置は気泡管の中央部で、上、中、下 3 層について観測を行った。

(4) 空気量の測定

気泡管を流れる空気量を把握するためには、管内圧力、温度、動圧を測定する必要がある。

当実験においては、測定精度等を考慮して、ブルドン管圧力計（ゲージ圧 5 kg/cm²）、タイコス型 L 型温度計、スライド型ピトー管および傾斜管式マンメーターを利用した。

(5) その他の測定

以上の他、実験時の気温、水温を棒状温度計により、風向・風速を大阪市港湾局屋上のエーロペン型自記風向風速計により測定した。

2.4 現地実験計画

限られた期間でできるだけ多くのデータを得るために、波高および流速観測の実験ケースを、表-3のように設定した。測定時間はいずれも20分であり、気泡管長や空気量の調整を含めて、実験は1日で終了させることができた。ただし、波高観測については予備実験を含めて3日間行った。これらの実験に当っては、約1カ月前から長期の天気予報を行い、施工計画を含めた実験計画を作成し、逐次、見直ししながら工程を進めていった。

表-3 現地実験ケース

気泡管長(m)	—	25	—	30	—	35	—
空気量(m ³ /min)	0	48	24	0	48	24	0

3. 実験の実施

実験の開始に先立って、観測機器を含めた空気防波堤システムの試運転を行った。この結果、いくつかの問題点等が見つかった。主な点は次のとおりである。

① 気泡の噴出状況を観察したところ、気泡管全長にわたって様な流れになっていなかった。設置水深7.0m部の気泡孔数を1m当り8個減少させて、10個/mにした。

② 気泡が超音波波高計の設置位置まで流れていき、計測が不可能となっていたので、気泡の影響のない位置にまで移設した(図-4参照)。

③ コンプレッサーの送風能力は、予定の48m³/minよりも小さく、40m³/min前後であった。また、実験ケースとして設定した24m³/minの送風は、コンプレッサーの圧縮能力と送風量とのバランスを保つことが不可能で、18~26m³/minの間で脈動していた。

他にも小さな問題があったが、これらを解決して、本実験にとりかかった。本実験は、波高観測を53年1月20日(予備実験)、21日、2月1日に、流速観測を1月28日に、潮流観測を2月7~8日に実施し、ほぼ満足なデータを得ることができた。

4. 実験結果

始めに述べたように、空気防波堤の評価等についての詳細な結果の発表は別の機会にゆずることとし、ここでは簡単なデータの整理によって明らかになった点を列挙するにとどめる。

① 空気防波堤から5m離れた地点における水平流の流況は、模式的に図-5のように示される。すなわち、垂直方向にはほぼ三角形分布の変化を示しており、ある深さ(d)以下では弱いもどり流れとなっている。 d の値は約2mで、Bulson¹⁰⁾による必要空気量の算定の際に算出される値とほぼ一致している。

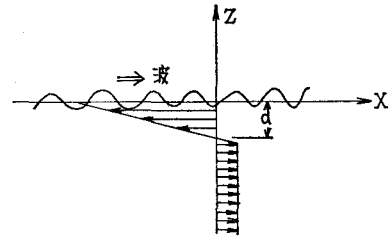


図-5 模式的に見た水平流速分布

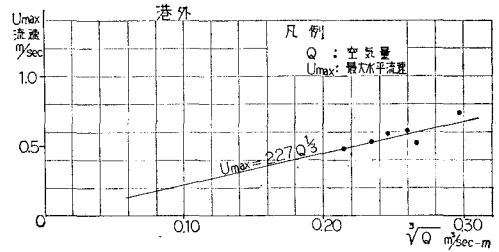


図-6 空気量と最大水平流速との関係

また、観測された水平流速の最大値とその減衰状況は、Kobus¹¹⁾の方法によって求めた値と若干異なっている。観測値の方が前者はやや気泡管の外側に位置し、後者はやや小さな減衰を示している。

② 空気量(Q)と表面における最大流速(u_{max})との関係は、既往の調査、研究結果¹²⁾に示されているように、 $u_{max} \propto Q^{1/3}$ の関係が成立する。ただし、比例定数は栗原¹³⁾の実験結果(3.14)より小さく、当実験の方がやや効率が悪いといえよう(図-6参照)。

③ 消波効果については、さらに解析を進める必要があるが、少なくとも周期2秒程度までの波に対して、効果が見られるようである。これは当初設定した周期3秒という設計波に対してやや開きがあるが、空気防波堤の消波特性についてはより詳細なスペクトル解析等を行うことにより明らかとなろう。

④ 今回の実験においては、気泡管の延長方向は船溜り入口を閉じる配置をとらなかった。しかし、実験中に空気防波堤と波除堤との間の開口部を通過する波がかなり観察された。これが上に述べた設計通りの効果を発揮できなかった原因のひとつであると考えられるが、ともかく、配置、延長等の計画は重要な問題であることを示唆している。

5. あとがき

設置上の制約が少なく、その上、水質改善等の副次的効果を有する空気防波堤の意義は極めて重要である。しかし、現地への適用に当っては必要空気量や気泡孔の算出方法を始めとする設計法、空気防波堤の諸元とその消

波効果あるいは消波機構等のどれひとつをとりあげても多くの問題がある。

今回の実験において、これらの課題がかなり明確になったが、今後は取得された貴重なデータを十分活用して解明に努めるつもりである。

謝辞： 当実験を実施するに当って、京都大学工学部岩垣雄一教授を委員長とする研究会を設置し、多くの御指導を得た。深く感謝する次第である。

参 考 文 献

- 1) 応用力学研究所水文学研究委員会： 空気防波堤の研究に就いて， I ～ VII， 九州大学応用力学研究所報， 第 5， 7， 9， 9， 11， 13， 15， pp. 17～41， 1～25， 25～33， 35～57， 39～59， 39～54， 23～38， 昭 29， 30， 31， 33， 34， 35.
- 2) 前出 1)
- 3) 前出 1)
- 4) Taylor, Sir Geoffrey: The action of a surface current used as a breakwater, Proc. Royal Society, A., Vol. 231, pp. 466～478, 1955.
- 5) Bulson, P. S. and M. I. Struct: The theory and design of bubble breakwater, Proc. 11th. Conference on Coastal Engineering, Vol. II, pp. 995～1015, 1968.
- 6) Bulson, P. S.: Current produced by an air curtain in deep water, The Dock and Harbour Authority, pp. 15～22, May 1961.
- 7) 前出 1)
- 8) 椿東一郎・荒木正夫： 水理学演習（上）， 森北出版， pp. 79～80, 1973.
- 9) Kobus, H. E.: Analysis of the flow induced by air-bubble system, Proc. 11th. Conference on Coastal Engineering, Vol. II, pp. 1016～1031, 1968.
- 10) 前出 5)， 6)
- 11) 前出 9)
- 12) 例えば， 岩垣雄一・安井誠人： 空気防波堤に関する研究（第 1 報）—空気防波堤の基本的性質—， 第 22 回海岸工学講演会論文集， pp. 563～569， 昭 50. 11.
- 13) 前出 1)