

荒海における防波堤ケーソンの据付け

吉 村 芳 男*

1. はしがき

わが国の港湾における主要な防波堤は、そのほとんどが捨石基礎の上に鉄筋コンクリート製のケーソンを据付けて本体とする、いわゆるケーソン防波堤である。防波堤工事は、種々の作業船を使っての海上作業であるので、波のあまりない静かな海面のときに行なわれるのが通常であり、特にケーソンの据付けは、ケーソンの自重が数百トン以上もあって、海上に浮べるか、または大型の起重機船で吊り上げて運搬し、海水を入れて沈設するので、海上がきわめて静穏なときに行なわれるものである。

しかし、外洋に直面したところで防波堤の建設が進められるようになり、さらに工事量の増大にもなって、かなり波のある状態、つまり荒海における防波堤工事を余儀なくされるようになった。そこで太平洋に面する小名浜港では、荒海におけるケーソン防波堤の急速大量施工について研究を進め、すでに波浪予報にもとづく施工管理、捨石基礎の先行期間および均しの精度などについての成果を発表したが、今回ケーソン据付け工についての研究成果を報告する。

2. ケーソン据付け上の問題点

現在各港で用いられているケーソン据付けの工法を大別すれば

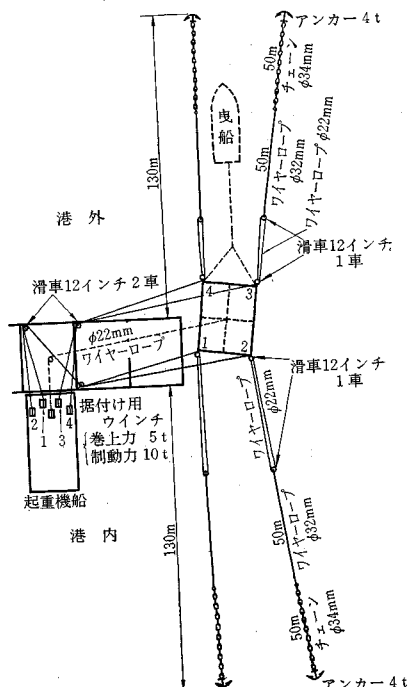
- ① 既設のケーソンと据付けようとするケーソンとの間にワイヤーロープを張り渡し、ウインチでロープを操作して据付けケーソンを定位置に固定して沈設する。
- ② 据付けケーソンを起重機船で吊りながら沈設する。
- ③ 海底にアンカーしたワイヤーロープを据付けケーソンの四隅に取り、ウインチでロープを操作しケーソン

を固定して沈設する。

といった3つの工法になる。これらのうち、①と②の工法は岸壁におけるケーソンの据付けにも用いられているが、①は波によるケーソンの動揺を制御する力が弱く、また②は、ケーソンのほかに起重機船の動揺の制御も必要であるので、専ら海上が静かな場合に用いられている。③の工法は、保有している作業用船舶機械によって若干の差異があるが、小名浜港をはじめ八戸港、日立港、鹿島港などの海上条件の悪いところで用いられているもので、荒海に適した工法といえる。小名浜港ではこれまで有義波高 0.9 m 程度の波浪中でも据付けを実施してきたので、小名浜港の工法にもとづいて荒海における据付け工法の検討を行なうことにする。

ケーソンの据付けは図-1のように、ケーソンが据付

図-1 ケーソン据付け図



* 正会員 北海道開発庁港政課長

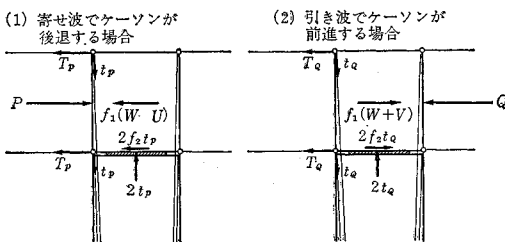
す位置にくれば据付け用ワイヤーロープ（以下据付けワイヤーと略称）をケーソンの四隅に取り付け、起重機船の動力ウインチで据付けワイヤーを操作してケーソンを定位置に固定し、注水して沈設する。この場合、据付けワイヤーは取扱い上から、ワイヤー径や滑車の車数に制約があって、据付けワイヤーの引張力をやたらに大きくすることができないので、ケーソンに作用する波の力が大きくなれば、据付けワイヤーのみでケーソンを固定することができなくなる。これに対し小名浜港では、ケーソンと捨石基礎との間に働く摩擦力を利用して波力を減殺する方法を用いた。すなわち注水するにつれてケーソンが沈んでケーソン底面が捨石基礎に接触し、さらに注水が進んでケーソン重量が増加すれば、ケーソンと捨石基礎との間に摩擦力が作用するようになって、不規則に押し寄せる一連の波群の中の小さい波ではケーソンは滑動せず、大きい波を受けたとき前後に滑動する状態になる。このとき注水を中止し、大きい波によるケーソンの滑動を据付けワイヤーで制御し、ケーソンが定位置に入ったならば、ただちに注水を再開し、次にケーソンを滑動させるような大きい波がくる前に、必要な重量の増加を終えて据付けを完了するのである。

したがって、この工法によるケーソン据付け上の問題は、対象とする波の波力に対して据付けワイヤーの強さをどう決めるかという点と、間欠的にくる大きい波の間を縫って必要な重量増加を図るのに、注水速度をどのように決定すれば良いかの2点にしばられる。

3. 据付けワイヤーの設計

波を受けてケーソンが捨石基礎上で滑動する場合は、寄せ波で後退し引き波で前進するが、寄せ波の力の方が引き波の力より大きいので後退量の方が前進量より大きく、ケーソンはその差だけ少しずつ後退してゆく。したがって、ケーソンが据付け位置より前方（港外側）にある場合は、据付けワイヤーで後退量を制御することによって容易にケーソンを定位置におさめることができる。しかし、ケーソンが滑動しすぎて据付け位置より後方（港内側）に落着いた場合は、据付けワイヤーによって寄せ波による後退量よりも引き波による前進量を大きく

図一 据付け中のケーソンに作用する力



して、ケーソンを前進せしめねばならない。

ここに

P : 寄せ波の波圧

Q : そのときの引き波の波圧

W : 静水面におけるケーソンの見掛けの重量

U : 寄せ波による揚圧力

V : 引き波による浮力の減少

t_p : ウインチの制動力

t_q : ウインチの巻上力

T_p : 制動力による据付けワイヤーの引張抵抗力

T_q : 巻上力による据付けワイヤーの引張力

f_1 : ケーソン底面と捨石基礎との摩擦係数

f_2 : ケーソン側面と緩衝材（堅木）との摩擦係数

とし、港内側の据付けワイヤーの張力を0とすれば 図一 2 から寄せ波でケーソンが後退する場合は

$$P - 2T_p - f_1(W - U) - 2f_2t_p > 0 \dots\dots\dots(1)$$

引き波でケーソンが前進する場合は

$$2T_q + Q - f_1(W + V) - 2f_2t_q > 0 \dots\dots\dots(2)$$

前進量が後退量より大であるという条件は、波の力の作用時間を同じとすれば、ケーソンの滑動量はおのおのケーソンに作用する力の合力に比例すると考えられるので

$$2T_q + Q - f_1(W + V) - 2f_2t_q > P - 2T_p - f_1(W - U) - 2f_2t_p$$

となり、整理して

$$2(T_p + T_q) + 2f_2(t_p - t_q) > (P - Q) + f_1(U + V) \dots\dots\dots(3)$$

となる。式(3)が据付けワイヤーの設計式で、据付けワイヤーの必要な張力が、ケーソンの重量と関係なく波の力と摩擦係数とによって求まる。波の力は波高、周期および防波堤前面水深によって決まるのであるが、周期と前面水深を一定とすれば、式(3)を満足する最大の波高がその据付けワイヤーによる据付け可能限度波高となる。ケーソンがこの限度波高より大きい波高を受けたときは、常にケーソンの後退量が前進量より大きくなって位置修正が不可能となる。また限度波高に対し、式(1)および式(2)を満足する最大のケーソン重量が据付け可能限度重量となり、注水しすぎてケーソン重量が限度重量を超過した場合もケーソンの位置修正ができない。

次に、ケーソン重量が限度重量より小さい場合は、この重量に対して式(1)および式(2)を満足する最小の波高が、このときの据付け可能な低い方の限度波高となり、これ以下の波高では、ケーソンは後退または前進せず位置の修正はできなくなる。すなわち、ケーソンの据付けは、ケーソンの重量から定まる最低限度波高と、据付けワイヤーの張力から定まる最高限度波高との間で可能となるのである。

ケーソン重量を小さくして最低限度波高を小さくした

表-1 ケーソン据付け時の波高分布 ($H_{1/3}$)

据付け函数	波高区分					合計
	0.4 m 未満	0.4~0.59	0.6~0.79	0.8~0.99	1.0~1.19	
昭和 38 年度~40 年度 (据付けワイヤー改良前)	7 14	24 49	12 25	5 10	1 2	49 面 100%
昭和 41 年度~42 年度 (据付けワイヤー改良後)	6 7	21 25	26 31	15 18	16 19	84 面 100%

場合は、この波高以上の波の来襲間隔が短くなって、ケーソンが頻繁に滑動するので位置がなかなか定まらず、またケーソン重量を増加して最低限度波高を高めてゆくにしがって、ケーソンの位置修正を可能ならしめる波の来襲間隔が長くなって据付けに時間がかかるようになる。適当なケーソン重量すなわち適当な注水量は、据付け時の波高、潮位によって変るため事前に予定することは困難であるが、経験上、波の来襲状況とケーソンの滑動状況を観察しながら 2~3 回注水を繰返すことでえられる。

式(3)をケーソンの据付け実績によって検討してみる。当初の据付けワイヤーは、実測の結果 $t_P=3.5t$, $t_Q=1.0t$, 滑車効率 $\eta=0.8$ で、2車と1車の8インチ滑車を使って力を増幅しているので、 $T_P=16.7t$, $T_Q=2.0t$ となり、 $f_2=0.5^2$ とすれば

$$\text{式(3)の左辺} = 39.9t \dots\dots\dots(4)$$

一方、この据付けワイヤーを用いた昭和 38 年度から 40 年度にかけての、ケーソン据付けと波高との関係は表-1 のとおりで、据付けを円滑に行なえる限度波高は $H_{1/3}$ で 0.9 m と考えられる。波浪観測結果から $H_{\max}=1.58 H_{1/3}^2$ であるので、最大の限度波高は 1.42 m となる。この波に対し、周期 10 秒、ケーソンの下端高を -7.0 m、長さ 10 m、奥行 13 m、潮位 +0.7 m および $f_1=0.6^2$ として、ケーソンに作用する波圧⁹⁾、揚圧力⁹⁾ および浮力の減少⁹⁾ を重複波に対する Sainflou の簡略公式によって求めれば

$$\text{式(3)の右辺} = 127.4t \dots\dots\dots(5)$$

式(4)と(5)とから、式(3)の右辺の各項は計算値の 1/3 の値を用いればよいことになる。

昭和 41 年度からは図-1 のように据付けワイヤーを改良し、その取扱いを迅速にするため、1車の12インチ滑車を2個使用し、ウインチの巻上力を 5 t、制動力を 10 t に増強した。この結果、滑車効率を 0.9 として、 $T_P=23.4t$, $T_Q=8.6t$ となり、式(3)によって据付け限度波高を求めれば、 $H_{\max}=2.13\text{ m}$, $H_{1/3}=1.34\text{ m}$ をうる。昭和 41 年度から 42 年度にかけてのケーソン据付けの実績は表-1 の下段のとおりであって、このときの限度波高は、据付け函数の相対度数の分布状況から見て、1.20 m より若干高いと判断され、上記計算とほぼ一致した結果となっている。

以上から、据付け式(1),(2),(3)における P, Q, U, V

を Sainflou 式によって求めるときは、縮小係数として 1/3 を乗じた値を用いねばならない。なお、この 1/3 という縮小係数は H_{\max} に対するものであって、対象波高が $H_{1/10}$ や $H_{1/3}$ になれば当然変るものである。

縮小係数が小さい値となっているのは、実際の波圧などが計算値よりかなり小さいことを示唆している。これは、一般的に Sainflou 式が過大な値を与えること⁹⁾のほかに、ケーソンの据付けでは波は防波堤の先端部分に作用することになるので、波が逃げて反射が完全に行なわれないことにもよると考えられる。

4. 注水速度

ケーソンへの注水は、浮上しているケーソンを沈めて捨石基礎との間に適当な摩擦力を生ぜしめるまでと、ケーソンの位置を定めてから据付けの完了までの2段階にわかれるが、ここでは、据付けの成否を左右する後段の注水速度について論ずる。来襲する一連の波群の中の最低限度波高以上の波による滑動でケーソンの位置を修正するのであるから、位置が定まったのちは迅速にケーソン重量を増加せしめないと、次の大きな波で再び滑動しケーソンは据付け位置からはずれることになる。したがって、注水速度は最低限度波高以上の波の出現間隔によって決定せねばならない。

ケーソン据付け時の最低限度波高を $H_{1/3}$ として注水速度を検討する。昭和 42 年 9 月からの直立式水圧波高計⁹⁾による波浪観測記録の中から、 $H_{1/3}$ が 1.3 m 前後の波と 0.8 m 前後の波の約 20 分間記録をおのおの 15 個ずつ抽出し、 $H_{1/3}$ 以上の波について、その出現間隔の頻度分布を求めれば表-2 のようになる。波の出現間隔とは、 $H_{1/3}$ 以上の波の山がきて次に再び $H_{1/3}$ 以上の波の山がくるまでの時間間隔をいうが、この場合ケーソンの位置の修正は連続してくる大きい波によって行なうので、 $H_{1/3}$ 以上の波が連続してくる場合は除外した。波の出現間隔は両者とも、ほとんど同じような分布をしており、30 秒未満のものが 20%、45 秒未満のものが 40%、60 秒未満のものが 50% となっている。

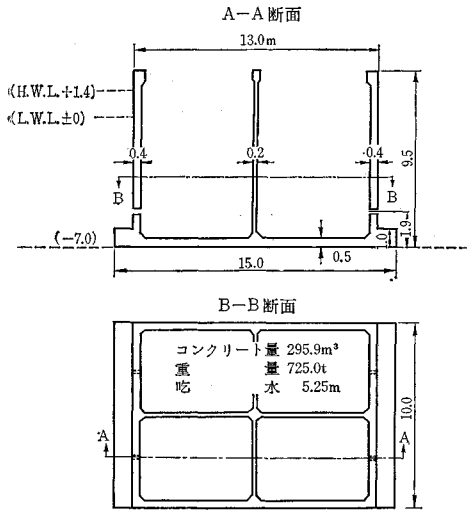
表-2 $H_{1/3}$ 以上の波の出現間隔の分布

波の種類	出現間隔	14秒以下	15~29	30~44	45~59	60~74	75~89	90秒以上	計
		A	度数	5(79)	30	30	24	22	
	相対度数	3	17	17	14	12	5	32	100%
	累加	3	20	37	51	63	68	100%	
B	度数	7(62)	31	36	12	18	17	45	166
	相対度数	4	18	21	7	11	10	29	100%
	累加	4	22	43	50	61	71	100%	

注: ① A: $H_{1/3}=1.21\text{ m} \sim 1.47\text{ m}$, 平均 1.30 m
 B: $H_{1/3}=0.66\text{ m} \sim 0.87\text{ m}$, 平均 0.78 m

② () の数字は $H_{1/3}$ 以上の波が連続する度数で外数である

図-3 ケーソンの寸法図



注水速度を決めるための波の出現間隔を短く取るとは、据付けの精度の向上や据付け時間の短縮などの面からは好ましいが、注水速度を上げるために注水孔を大きくしたり、孔数を増加する必要を生ずる。孔径の増大はケーソン壁の強度や注水孔の充てん処理の上から限度があり、また孔数の増加は注水バルブ操作要員の増加をもたらす。

出現間隔を長く取れば、注水中にケーソンを滑動させる波を受ける確率が大きくなって、位置修正の回数が増し据付けに手間どることになる。以上の点と、実際上最低限度波高付近での据付けはあまりなく、また波高が H_{max} に近づくにつれて、その出現間隔が長くなることなどから、注水速度は 30~45 秒程度の時間内に必要なケーソン重量の増加が完了できれば、実際上十分であると考えられる。

小名浜港のケーソンの諸元は図-3のとおりで、底部近くに注水用として10インチ蝶型弁バルブ4個を有している。3.の結果によって、潮位 +0.7 m, $H_{1/3}=1.34$ m, $H_{max}=2.13$ m の波浪中でケーソンの据付けを行なうものとし、最初の注水により最低限度波高が 1.34 m であるとする。このとき、最低限度波高に見合うケーソン内の水位は、式(2)から -1.75 m となり、また最大波高に見合うケーソン内の水位は、式(1)から -1.40 m となる。この間の注水時間は、外水位を一定とすれば次式で表わされる。

$$T = \frac{A}{c \cdot a} \sqrt{\frac{2}{g}} (\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2})$$

A: ケーソンの内面積

g: 重力の加速度

H: ケーソン内外の水位差

a: 注水孔の断面積

表-3 法線からの出入誤差の分布

(昭和41年度~42年度)

誤差の範囲 (cm)	0~2.4	2.5~4.9	5.0~7.4	7.5~9.9	10.0~12.4	12.5~14.9	計
度数	36	24	14	4	2	1	81
相対度数 (%)	45	30	17	5	2	1	100%

c: 流量係数

$A=108 \text{ m}^2$, $H_1=2.45 \text{ m}$, $H_2=2.10 \text{ m}$, $a=0.14 \text{ m}^2$, $c=0.944^{10)}$ であるので、 T は 43 秒となる。

注水速度の適否は、据付けたケーソンの防波堤法線からのずれによって判定される。表-3 は 10 インチ蝶型弁バルブを取り付けたケーソンの据付け完了時における上部前縁(港外側)中心点の防波堤法線からのずれの分布を示すものであるが、通常の海面における据付けの誤差許容値が $10 \text{ cm}^{11)}$ であることと比べれば、きわめて良好な据付け精度を示しており、注水速度の取り方の妥当性を裏付けている。

5. むすび

据付けワイヤーによるケーソン据付けに対し、施工実績にもとづいて、ケーソンに作用する波の力とケーソンの滑動を制御するのに必要な据付けワイヤーの張力との関係を解析して、合理的な据付けワイヤーの設計法を検討し、正確なケーソン据付けに必要な注水速度の決め方を論じたが、従来現場の経験によりながら試行錯誤的に行なわれてきた据付けワイヤーと注水バルブの設計に対し、明確な指針を与えるものと考えられる。

なお波の力 (P, Q, U, V) に対する縮小係数は、これらの力の計算式と摩擦係数を前提として、据付け実績から逆算的に求めた係数であるので、防波堤先端部における不規則重複波の波圧や揚圧力など、あるいは摩擦係数についての実測値や実験値によって漸次修正されるべきものである。また、注水速度を決めるもととなる波の出現間隔は波浪特性に関連するので、小名浜港と異なった波浪特性の港では、改めて出現間隔の統計を取って注水速度を求めるべきである。

参考文献

- 1) 吉村芳男: ケーソン防波堤の急速施工例, 土木学会誌, Vol. 51, No. 9, 1966, pp. 41-47.
- 2) 日本港湾協会: 港湾工事設計要覧, 1959, pp. 185.
- 3) 小名浜港工事事務所: 小名浜港の波と風, 1965, pp. 6. 4), 5), 6), 7) 前出 2) pp. 29, 9, 16, 17.
- 8) 永井・玉井・西村: 深い海中に築造された直立防波堤に働く波圧, 第10回海岸工学講演会講演集, 1963, pp. 109.
- 9) 内田・斎藤・東條・進藤: 小名浜港の風波について, 第14回海岸工学講演会講演集, 1967, pp. 72.
- 10) 物部長穂: 水理学, 岩波書店, 1951, pp. 202.
- 11) 日本港湾協会: 港湾工事共通仕様書解説, 1964, pp. 113.

(1968.11.14・受付)