

浮揚せる二重壁ケーソンの静的安定性

STATICAL STABILITY OF THE FLOATING DOUBLE WALL CAISSON

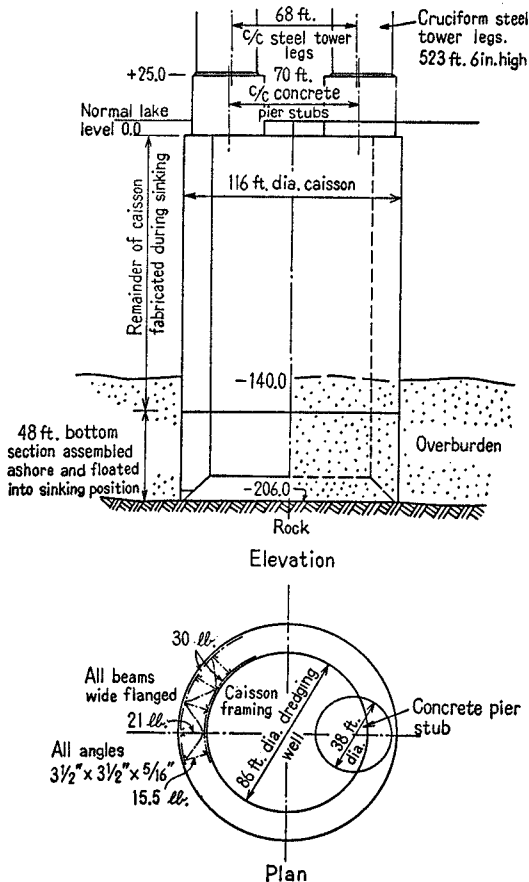
矢 村 家 利*

By Ietoshi Yamura

1. 緒 言

二重壁ケーソン (Double Wall Caisson) は、水上をまたぐ長大橋基礎工法として考えられる Open Dredge Caisson 工法の一つで、アメリカ Mackinac Bridge の主塔基礎に採用されたものである。図-1 にその概略図を示すとおり、膨大な二重円筒型の鋼板構造物で、その施工¹⁾は架設地点より 90 マイル離れた Huron 湖畔を整地して、直径 116 ft に対して高さ 48 ft までを一体として組立て、溶接されたうえ、溝を掘って湖上に引出し

図-1 Mackinac 橋主塔基礎図



て架設地点へ曳航し、現地にあらかじめ設けられた巨大な水中鉄構のわく内に納めたるうえ、高さ 30 ft ずつの鋼板ブロックを積み上げて逐次上方へ伸ばしたものである。

筆者は数年前この種形式の構造物が本州四国連絡橋計画の基礎工法の一つとして試設計が行なわれたことを知り²⁾、これが製作、据付法について検討を加えている間に浮揚安定性について興味ある現象を発見したので、模型系統実験を行ない、すでにその一部は土木施工誌上³⁾その他に発表している。

著者が着目した点は

- (1) 二重壁ケーソンが適当な直径、高さ、二重壁厚さ、重量の範囲で縦向き状態、横向き状態とも水上に安定に浮揚しうること。
- (2) 横向き状態の方が浮揚喫水が著しく浅く、造船台等の斜路上に組立てて容易に進水せしめうること。
- (3) 鋼材の加工、運搬、組立、溶接の設備が完備している造船台上で組立てると、ケーソン製作の工期が著しく短縮され、工費も低減しうること。
- (4) ケーソン直径に比し高さの高いものも一体として組立て可能で、現地施工範囲を縮小しうること。
- (5) 水上を曳航するに横向き状態の方が曳航抵抗が小さく、曳航安定性も良好であること⁴⁾。
- (6) 横向きに浮揚しているケーソンの二重壁内個室に注水することにより、容易にこれを起上らせて向きを縦向きに変えうること。

である。

著者が行なった実験は (1), (2) 項の確認とともに (5), (6) 項の量的推定値を求めたものであるが、その後浮揚安定性を傾斜角に対して示す復元力曲線を模型実験より求めるとともに⁵⁾、これが近似計算式を理論的に求め、高さの異なる模型ごとに注水量を段階的に変えて実験値と計算値を対比することにより、相当高い精度で近似計算式より実物ケーソンの浮揚安定性を推定しうる見通しを得た。

つぎにこれらの概要を述べる。

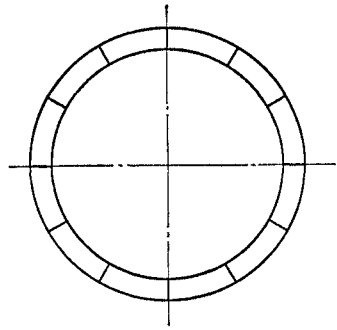
2. 二重壁ケーソンの復元力近似計算式

(1) 基礎仮定

* 正会員 三井造船 (株)

図-2 はケーソンの断面を示す。内外筒間の空間は隔壁によって扇形の区画に等分されている。このままでは計算が面倒になるので、これを力学的な性質をあまりそこなわないで、できるだけ簡

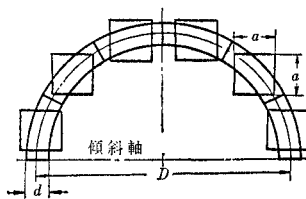
図-2 ケーソン断面



単な区画で置きかえることを考える。最も簡単な断面形は円および正方形であるが、双方の置きかえより得られた近似計算式により数値計算を行なった結果、広い範囲で計算値がほとんど一致し、傾斜角の大きい範囲で少しく差が生ずるが実用上問題にならぬ程度であることが判明したので、ここには計算の容易な正方形断面に置きかえた場合についてのみ説明する。

正方形で置きかえるとき、これを放射状にならべると計算が面倒になるのでその一辺が皆平行になるように配置し、傾斜はこの辺に平行な軸のまわりにおこるものとする。図-3はこのように変形された断面を示している。正方形の面積は各区画の断面面積に等しいものとする。ただしこの変形は二重壁内に注入された内部水の復元モーメントを計算するときのみ考慮する。

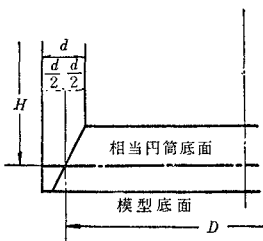
図-3 相当断面形



浮力については平均直径 D 、二重壁厚さ d の中空円筒として取り扱い、 d は D に比し十分に小さいものとする。

つぎに二重壁ケーソンの下端は図-4のようにテーパード形状となっているが、この部分については容積の等しい中空直円筒で置きかえた。刃口部の長さが大であれば別の置きかえを考える方が妥当と思われるが、今回の

図-4 刃口部変形



例では十分の近似をあてるようである。

したがって以後は平均直径 D 、内筒と外筒の間隔 d 、高さ H 、区画数 n なる一様中空二重円筒の復元モーメントの計算となる。

(2) 注入水の復元モーメント

a) 二重壁内全個室へ等量ずつ注水された場合

注入水の復元モーメントは傾斜角 ϕ の大きさによって3種類の場合がある。いずれの場合も全個室へ等量に注水すれば、 n 個の区画の注入水の形状はたがいに相等しいので、一つの区画のみについて注入水の重心の軸方向およびこれに直角方向の変位を求めれば、それが全体としての重心移動に等しい。

いま二重壁ケーソン(自体)の中心軸中点のまわりに復元モーメントを考えることにし、注入水の容積を v 、比重量を r 、ケーソン底面からの注入水重心の円筒軸に平行な高さを z_g 、区画の中心軸からこれに直角方向の変位を x_g とすると

傾斜角 ϕ のとき注入水の復元モーメントは一般に

$$M_1 = r v \left\{ \left(\frac{H}{2} - z_g \right) \sin \phi - x_g \cos \phi \right\} \dots\dots(2.1)$$

であらわされる。

正方形の一辺の長さを a 、ケーソンが直立の場合の注水高さを t とすれば、一区画内の水量は

$$v/n = a^2 t \dots\dots(2.2)$$

で与えられる。

① $0 \leq \phi \leq \phi_1$ 図-5 (a)

$$\phi_1 = \tan^{-1} \left(\frac{2t}{a} \right) \text{ 図-5 (b)} \dots\dots(2.3)$$

$$z_g = \frac{t}{2} + \frac{a^2}{24t} \tan^2 \phi \dots\dots(2.4)$$

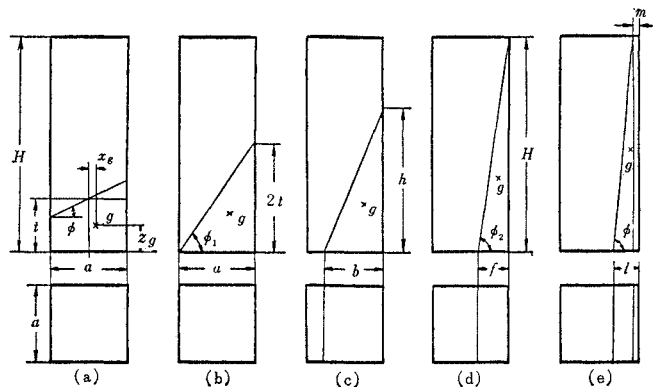
$$x_g = \frac{a^2}{12t} \tan \phi \dots\dots(2.5)$$

② $\phi_1 \leq \phi \leq \phi_2$ 図-5 (c)

$$\phi_2 = \tan^{-1} \left(\frac{H^2}{2at} \right) \text{ 図-5 (d)} \dots\dots(2.6)$$

$$z_g = h/3 \dots\dots(2.7)$$

図-5 注入水の重心(正方形断面)



$$x_g = \frac{a}{2} - \frac{b}{3} \dots\dots\dots(2.8)$$

ただし,

$$bh = 2at, \quad h/b = \tan \phi$$

③ $\phi_2 \leq \phi \leq \frac{\pi}{2}$ 図-5 (e)

$$z_g = \frac{H}{2} - \frac{H^3 \cot \phi}{12at} \dots\dots\dots(2.9)$$

$$x_g = \frac{a}{2} - \frac{at}{2H} - \frac{H^3 \cot^2 \phi}{24at} \dots\dots\dots(2.10)$$

b) 注入水を全個室等量に注水しない場合

n を偶数とし, n 個に等分された個室の連続した n' 個の個室に左右対称に注水した場合

① n' が奇数の場合

横向きで下側からの1区画ごとの注水量を順次 $v_1, v_2, v_3, \dots, v_{\frac{n'+1}{2}}$ とする。全注水量は

$$v = v_1 + 2v_2 + 2v_3 + \dots + 2v_{\frac{n'+1}{2}} \dots\dots\dots(2.11)$$

注入水のモーメントは

$$\begin{aligned} M_1 = & r v_1 \left\{ \left(\frac{H}{2} - z_{g1} \right) \sin \phi - \left(\frac{D}{2} + x_{g1} \right) \cos \phi \right\} \\ & + 2r v_2 \left\{ \left(\frac{H}{2} - z_{g2} \right) \sin \phi - \left(\frac{D}{2} \cos \frac{2\pi}{n} + x_{g2} \right) \cos \phi \right\} \\ & + 2r v_3 \left\{ \left(\frac{H}{2} - z_{g3} \right) \sin \phi - \left(\frac{D}{2} \cos \frac{4\pi}{n} + x_{g3} \right) \cos \phi \right\} \\ & + \dots\dots\dots \\ & + 2r v_{\frac{n'+1}{2}} \left\{ \left(\frac{H}{2} - z_{g\frac{n'+1}{2}} \right) \sin \phi \right. \\ & \left. - \left(\frac{D}{2} \cos \frac{n'-1}{n} \pi + x_{g\frac{n'+1}{2}} \right) \cos \phi \right\} \dots\dots\dots(2.12) \end{aligned}$$

$z_{g1}, z_{g2}, \dots, z_{g\frac{n'+1}{2}}, x_{g1}, x_{g2}, \dots, x_{g\frac{n'+1}{2}}$ は各注水個室ごとに 2.(2) a) に示される z_g, x_g の計算式より (v/n) を $v_1, v_2, \dots, v_{\frac{n'+1}{2}}$ として求める。

注入水量が各個室等量の場合

$$v = n'v_1 \dots\dots\dots(2.13)$$

とすれば, 注入水のモーメントは

$$\begin{aligned} M_1 = & r v \left[\left(\frac{H}{2} - z_{g1} \right) \sin \phi - \left\{ \frac{1}{n'} \cdot \frac{D}{2} \left(1 + 2 \cos \frac{2\pi}{n} \right. \right. \right. \\ & \left. \left. + 2 \cos \frac{4\pi}{n} + \dots + 2 \cos \frac{n'-1}{n} \pi \right) + x_{g1} \right\} \cos \phi \left. \right] \\ & \dots\dots\dots(2.14) \end{aligned}$$

② n' が偶数の場合

$$v = 2(v_1 + v_2 + v_3 + \dots + v_{\frac{n'}{2}}) \dots\dots\dots(2.15)$$

$$\begin{aligned} M_1 = & 2r v_1 \left\{ \left(\frac{H}{2} - z_{g1} \right) \sin \phi - \left(\frac{D}{2} \cos \frac{\pi}{n} + x_{g1} \right) \cos \phi \right\} \\ & + 2r v_2 \left\{ \left(\frac{H}{2} - z_{g2} \right) \sin \phi - \left(\frac{D}{2} \cos \frac{3\pi}{n} + x_{g2} \right) \cos \phi \right\} \\ & + 2r v_3 \left\{ \left(\frac{H}{2} - z_{g3} \right) \sin \phi - \left(\frac{D}{2} \cos \frac{5\pi}{n} + x_{g3} \right) \cos \phi \right\} \\ & + \dots\dots\dots \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & + 2r v_{\frac{n'}{2}} \left\{ \left(\frac{H}{2} - z_{g\frac{n'}{2}} \right) \sin \phi \right. \\ & \left. - \left(\frac{D}{2} \cos \frac{n'-1}{n} \pi + x_{g\frac{n'}{2}} \right) \cos \phi \right\} \dots\dots(2.16) \end{aligned}$$

注入水量が各個室等量の場合

$$v = n'v_1 \dots\dots\dots(2.17)$$

$$\begin{aligned} M_1 = & r v \left[\left(\frac{H}{2} - z_{g1} \right) \sin \phi - \left\{ \frac{D}{n'} \left(\cos \frac{\pi}{n} + \cos \frac{3\pi}{n} \right. \right. \right. \\ & \left. \left. + \cos \frac{5\pi}{n} + \dots + \cos \frac{n'-1}{n} \pi \right) + x_{g1} \right\} \cos \phi \left. \right] \\ & \dots\dots\dots(2.18) \end{aligned}$$

注水される個室が連続しない任意の個室の場合

式 (2.12), (2.16), または式 (2.14), (2.18) より該当する注水個室の項のみを採ればよい。

式 (2.14), (2.18) は一括してつぎのとおり書ける。

$$M_1 = r v \left[\left(\frac{H}{2} - z_{g1} \right) \sin \phi - (kD + x_{g1}) \cos \phi \right] \dots\dots\dots(2.19)$$

k 値の一例を示すと

$n=12$, 連続個室注水の場合

n'	k	n'	k
1	0.5	7	0.266 58
2	0.482 96	8	0.209 13
3	0.455 34	9	0.151 78
4	0.418 26	10	0.096 59
5	0.373 21	11	0.045 45
6	0.321 98	12	0

(3) 浮力の復元モーメント

浮力の復元モーメントを考えるとときは注入水による排水容積の増加のみを考慮し, ケーソン中心軸中点のまわりに復元モーメントを考える。この場合も傾斜角によって普通3種類の状態がある。図-6 (a) にこの状態を分ける限界傾斜角を示す。ただし計算式はすべて $d/D \leq 1$ と考えている。 d が D に比しそれほど小さくないときは計算式が複雑になる。

ケーソン底面から浮心の円筒軸に平行な高さを Z_g , 円筒軸からこれに直角方向の変位を X_g とすると, 傾斜角 ϕ のとき浮力の復元モーメントは 図-7 より

$$M_2 = (W_0 + r v) \left\{ \left(\frac{H}{2} - Z_g \right) \sin \phi - X_g \cos \phi \right\} \dots\dots\dots(3.1)$$

ただし W_0 : ケーソンの自重

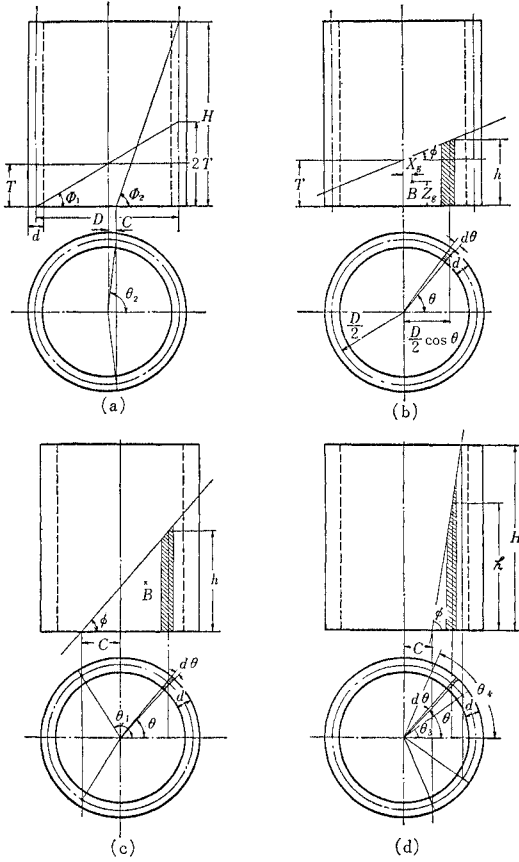
ケーソンの浮揚している液体の比重量が注水の比重量と等しいものとし, 注水のない場合のケーソンの直立浮揚喫水を T_0 , 注水された状態のケーソンの直立浮揚喫水を T とすれば

$$T = T_0 + t = \frac{V_0}{\pi Dd} + \frac{v}{\pi Dd} \dots\dots\dots(3.2)$$

$$W_0 = r V_0$$

① $0 \leq \phi \leq \phi_1$ 図-6 (b)

図-6 浮心



$$\phi_1 = \tan^{-1} \frac{2T}{D} \dots\dots\dots (3.3)$$

$$Z_g = \frac{T}{2} + \frac{D^2}{16T} \tan^2 \phi \dots\dots\dots (3.4)$$

$$X_g = \frac{D^2}{8T} \tan \phi \dots\dots\dots (3.5)$$

② $\phi_1 \leq \phi \leq \phi_2$ 図-6 (c)

$$\sin \theta_1 - \theta_1 \cos \theta_1 = 2\pi T/D \tan \phi \dots\dots\dots (3.6)$$

$$Z_g = \frac{D^2 \tan^2 \phi}{16\pi T} (\theta_1 + 2\theta_1 \cos^2 \theta_1 - 3 \sin \theta_1 \cos \theta_1) \dots\dots\dots (3.7)$$

$$X_g = \frac{D^2 \tan \phi}{8\pi T} (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1) \dots\dots\dots (3.8)$$

任意の傾斜角 ϕ に対して式 (3.6) より θ_1 を求め、これを式 (3.7), (3.8) に代入することにより Z_g, X_g が求められる。

限界傾斜角 ϕ_2 は次式より求められる。図-6 (a)

$$2\pi T = D \tan \phi_2 (\sin \theta_2 - \theta_2 \cos \theta_2) \dots\dots\dots (3.9)$$

$$\cos \theta_2 = 1 - \frac{2H}{D} \cot \phi_2 \dots\dots\dots (3.10)$$

③ $\phi_2 \leq \phi \leq \frac{\pi}{2}$ 図-6 (d)

$$D(\cos \theta_3 - \cos \theta_4) = 2H \cot \phi \dots\dots\dots (3.11)$$

$$\pi T = H \theta_3 + \frac{D}{2} \tan \phi \{ \sin \theta_4 - \sin \theta_3 - (\theta_4 - \theta_3) \cos \theta_4 \} \dots\dots\dots (3.12)$$

$$Z_g = \frac{1}{2\pi T} \left[H^2 \theta_3 + \frac{D^2}{4} \tan^2 \phi \left\{ \left(\frac{\theta_4}{2} - \frac{\theta_3}{2} + \frac{\sin 2\theta_4}{4} - \frac{\sin 2\theta_3}{4} \right) - 2 \cos \theta_4 (\sin \theta_4 - \sin \theta_3) + \cos^2 \theta_4 (\theta_4 - \theta_3) \right\} \right] \dots\dots\dots (3.13)$$

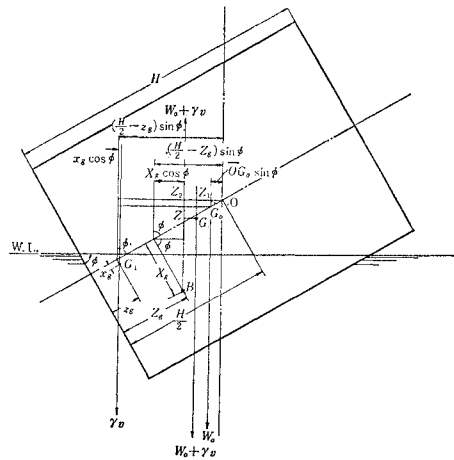
$$X_g = \frac{D}{2\pi T} \left[H \sin \theta_3 + \frac{D}{2} \tan \phi \left\{ \left(\frac{\theta_4}{2} - \frac{\theta_3}{2} + \frac{\sin 2\theta_4}{4} - \frac{\sin 2\theta_3}{4} \right) - \cos \theta_4 (\sin \theta_4 - \sin \theta_3) \right\} \right] \dots\dots\dots (3.14)$$

任意の傾斜角 ϕ に対して式 (3.11), (3.12) より θ_3, θ_4 を求め、これを式 (3.13), (3.14) に代入することにより Z_g, X_g が求められる。

(4) 全体の復元モーメント

図-7 でケーソン中心軸の中点を O 、注水のない場合のケーソンの重心を G_0 、注入水の重心を G_1 、全体の重心を G 、浮心を B 、 G より B を通る沿直線に下した垂線の足を Z 、 O より G および B を通る沿直線に下した垂線の足をそれぞれ Z_1, Z_2 とする。

図-7 復元モーメント図



ケーソンを起上らせるモーメントを正、横に倒すモーメントを負とすれば、全体の復元モーメントは

$$\begin{aligned} M &= (W_0 + r v) \cdot \overline{GZ} = (W_0 + r v) \cdot (\overline{OZ}_1 - \overline{OZ}_2) \\ &= (W_0 + r v) \cdot \overline{OZ}_1 = W_0 \overline{OG}_0 \sin \phi \\ &\quad + r v \left\{ \left(\frac{H}{2} - z_g \right) \sin \phi - x_g \cos \phi \right\} \\ &= W_0 \overline{OG}_0 \sin \phi + M_1 \\ &= (W_0 + r v) \overline{OZ}_2 = (W_0 + r v) \\ &\quad \cdot \left\{ \left(\frac{H}{2} - Z_g \right) \sin \phi - X_g \cos \phi \right\} = M_2 \\ \therefore M &= W_0 \overline{OG}_0 \sin \phi + M_1 - M_2 \dots\dots\dots (4.1) \end{aligned}$$

$$\overline{GZ} = -\frac{W_0}{W} \cdot \overline{OG} \cdot \sin\phi + \frac{M_1}{W} - \frac{M_2}{W} \dots\dots\dots(4.2)$$

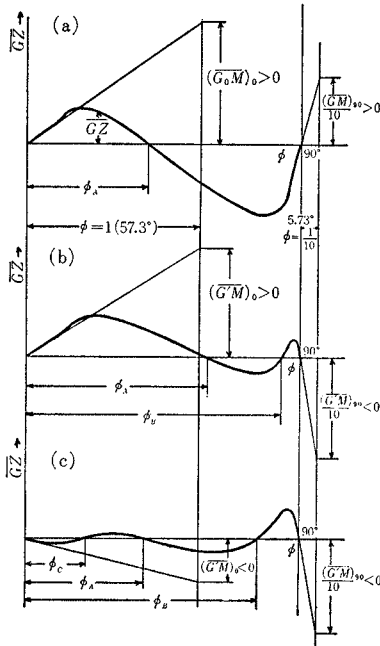
ただし $W = W_0 + r v$

\overline{OG}_0 は G_0 が O より下にあるときを正とする。

(5) 平衡状態とメタセンター

浮揚せる二重壁ケーソンの代表的な復元力曲線を図8に示す。傾斜角 0 は直立, 90° は真横置状態, 縦軸上側は堅向安定の復元てこ, 下側は横向安定の復元てこを示す。

図-8 復元力曲線とメタセンター



平衡状態は復元力曲線が横軸と交差する点(傾斜角)となるが、この平衡が安定か不安定かは $\partial \overline{GZ} / \partial \phi$ の正負で判別できる。

図-8 (a) はケーソン高さが直径に比しそれほど大きくなく、二重壁内に注水のない場合の復元力曲線である。傾斜角 0° , ϕ_A , 90° が平衡状態で 0° , 90° は安定, ϕ_A は不安定である。ケーソンを傾けた場合、傾斜角が ϕ_A より小さければケーソンは起上り, ϕ_A より大きければ倒れる。

図-8 (b) は (a) のケーソンの二重壁内全個室に等量注水した場合で 0° , ϕ_B が安定, ϕ_A , 90° が不安定な平衡状態である。

図-8 (c) はケーソン高さが直径に比し相当に高く、二重壁内全個室に等量注水した場合で、 ϕ_C , ϕ_B が安定, 0° , ϕ_C , 90° が不安定な平衡状態である。

実際上もっとも重要なのは直立と横置の状態で

$$\left(\frac{\partial \overline{GZ}}{\partial \phi}\right)_{\phi=0} = (\overline{GM})_0, \quad \left(\frac{\partial \overline{GZ}}{\partial \phi}\right)_{\phi=90^\circ} = (\overline{GM})_{90}$$

とかき、これらをメタセンター高さという。メタセンタ

ー高さはつぎのように計算される。

a) 直立状態

$0 \leq \phi \leq \phi_1$, $0 \leq \phi \leq \phi_1$ の範囲の計算式を探り

i) 注水のない場合:

$$\begin{aligned} (\overline{GZ})_0 &= \overline{OG}_0 \sin\phi - \left(\frac{H}{2} - \frac{T}{2} - \frac{D^2}{8T}\right. \\ &\quad \left. - \frac{D^2 \tan^2\phi}{16T}\right) \sin\phi \\ &\approx \left(\overline{OG}_0 - \frac{H}{2} + \frac{T}{2} + \frac{D^2}{8T}\right) \sin\phi \end{aligned}$$

$$\therefore (\overline{GM})_0 = \left(\frac{\partial \overline{GZ}}{\partial \phi}\right)_{\phi=0} = \frac{T}{2} + \frac{D^2}{8T} - \left(\frac{H}{2} - \overline{OG}_0\right) \dots\dots\dots(5.1)$$

中心軸上ケーソン底点を K , メタセンターを M とすれば、幾何学的に

$$(\overline{GM})_0 = (\overline{KB})_0 + (\overline{BM})_0 - \overline{KG}_0 \dots\dots\dots(5.2)$$

とかけるが、式 (5.1) とくらべるとちょうど

$$(\overline{KB})_0 = T/2, \quad \overline{KG}_0 = H/2 - \overline{OG}_0$$

$$\begin{aligned} (\overline{BM})_0 &= \frac{I}{V} = \frac{\pi \{(D+d)^4 - (D-d)^4\}}{64 \pi D d T} \\ &= \frac{D^2 + d^2}{8T} \approx \frac{D^2}{8T} \end{aligned}$$

となっている。

ii) 注水のある場合(全個室等量注水):

$$\begin{aligned} (\overline{GZ})_0 &= \frac{W_0}{W} \overline{OG}_0 \sin\phi + \frac{r v}{W} \left(\frac{H}{2} - \frac{t}{2} - \frac{a^2}{12t}\right. \\ &\quad \left. - \frac{a^2 \tan^2\phi}{24t}\right) \sin\phi - \left(\frac{H}{2} - \frac{T}{2} - \frac{D^2}{8T}\right. \\ &\quad \left. - \frac{D^2 \tan^2\phi}{16T}\right) \sin\phi \\ &\approx \left\{ \frac{W_0}{W} \overline{OG}_0 + \frac{r v}{W} \left(\frac{H}{2} - \frac{t}{2} - \frac{a^2}{12t}\right) \right. \\ &\quad \left. - \left(\frac{H}{2} - \frac{T}{2} - \frac{D^2}{8T}\right) \right\} \sin\phi \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \therefore (\overline{GM})_0 &= \left(\frac{\partial \overline{GZ}}{\partial \phi}\right)_{\phi=0} = \frac{W_0}{W} \overline{OG}_0 + \frac{r v}{W} \\ &\quad \cdot \left(\frac{H}{2} - \frac{t}{2} - \frac{a^2}{12t}\right) - \left(\frac{H}{2} - \frac{T}{2} - \frac{D^2}{8T}\right) \\ &= \frac{T}{2} - \frac{D^2}{8T} - \frac{1}{W} \left(W_0 \cdot \overline{KG}_0 + r v \cdot \frac{t}{2}\right) \\ &\quad - \frac{a^2}{12T} \dots\dots\dots(5.3) \end{aligned}$$

$(\overline{KB})_0 = T/2$, $(\overline{BM})_0 = D^2/8T$, $(\overline{KG})_0 = (W_0 \cdot \overline{KG}_0 + r v t/2)/W$ となるので

$$(\overline{GM})_0 = (\overline{KB})_0 + (\overline{BM})_0 - \{(\overline{KG})_0 + a^2/12T\} \dots\dots(5.4)$$

となっていて式 (5.2) とは $a^2/12T$ だけ異なる。

$a^2/12T = (\overline{GG'})_0$ とおくとこれは浮揚物体内部の自由水効果 (Free Water Effect) による重心の見かけの上昇を表わす量である。浮揚物体内部に自由表面を有する流動体がある場合、浮揚物体が傾斜すると内部の流動

体はその表面が水平面となるまで自由に流動するためその重心が動き、浮揚物体の安定を損ずる働きをする。これを自由水効果といい見かけ上重心が上昇したものととしてその量を計算し、全体の安定を判断する。

自由水表面の傾斜軸に対する断面二次モーメントを i 、自由水の比重量を τ 、浮揚している液体の比重量を r_0 とすれば、自由水による重心の上昇量は

$$\overline{GG'} = \tau i / r_0 V \dots\dots\dots(5.5)$$

で計算できる。式 (5.5) において $r=r_0$ 、 $i=na^4/12$ 、 $V=na^2T$ となるので $(\overline{GG'})_0 = a^2/12 T$ となり式 (5.4) は式 (5.3) の表示と一致する。

b) 横置状態

$\phi_2 \leq \phi \leq \pi/2$ 、 $\phi_2 \leq \phi \leq \pi/2$ の範囲の計算式を採ればよいがこの計算ははなはだ面倒となるので式 (5.2)、(5.4) のごとく $(\overline{KB})_{90}$ 、 $(\overline{BM})_{90}$ 、 $(\overline{KG})_{90}$ 、 $(\overline{GG'})_{90}$ を個々に求める。

図-9 において円筒軸に直角な没水断面積を A とする。

$$\begin{aligned} A &= \pi DdT/H \\ &= R_2^2(\beta - \sin \beta \cos \beta) - R_1^2(\alpha - \sin \alpha \cos \alpha) \end{aligned} \dots\dots\dots(5.6)$$

$$R_2 \cos \beta = R_1 \cos \alpha \dots\dots\dots(5.7)$$

$$R_2 = (D+d)/2, R_1 = (D-d)/2 \dots\dots\dots(5.8)$$

$$(\overline{KB})_{90} = R_2 - 2(R_2^3 \sin^3 \beta - R_1^3 \sin^3 \alpha) / 3A \dots\dots\dots(5.9)$$

$$(\overline{BM})_{90} = H^2(R_2 \sin \beta - R_1 \sin \alpha) / 6A \dots\dots\dots(5.10)$$

$$(\overline{KG})_{90} = R_2, (\overline{KG})_{90} = R_2 - \frac{t}{T} \cdot \frac{a}{2} \left(1 - \frac{t}{H}\right) \dots\dots\dots(5.11)$$

$$(\overline{GG'})_{90} = \frac{n}{12} aH^3 / na^2T = \frac{H^3}{12aT} \dots\dots\dots(5.12)$$

注水のない場合

$$(\overline{G_0M})_{90} = (\overline{KB})_{90} + (\overline{BM})_{90} - (\overline{KG})_{90} \dots\dots\dots(5.13)$$

注水のある場合

$$(\overline{G'M})_{90} = (\overline{KB})_{90} + (\overline{BM})_{90} - (\overline{KG})_{90} - (\overline{GG'})_{90} \dots\dots\dots(5.14)$$

$(\overline{GG'})_{90}$ の量は式 (5.9)~(5.11) の各式より得られる量より著しく大となり、少量の注水でも $(\overline{G'M})_{90}$ が負となって平衡が不安定となるのが常である。また $(\overline{GG'})_{90}$ は $(\overline{GG'})_0$ に比して著しく大きい。二重壁ケーソンはコンクリート打設のため構造上多数の水密縦隔壁が上下に通っていて二重壁内を上下に通ずる多数の個室に分割している。それゆえこれを横置きとすれば注水された水は各個室ごとに左右に自由

に流動することができ、多数の自由水表面が得られて注水の自由水効果が顕著に現われるのであるが、これを直立とすれば同じ縦隔壁が注水の自由流動を妨げる壁となるので、直立状態では注水が浮揚安定性をほとんど低下させぬ作用をなすのである。

3. 数値計算例

全個室等量注水の場合の計算を電子計算機 IBM 7090 で行なった。全個室等量注水でない場合は注水のモーメントは手計算で行ない、これより電子計算機で求めた浮力のモーメントを減じて全体の復元モーメントを求めた。

(1) 二重壁ケーソンの高さ直径比と \overline{GZ} (図-10)

ケーソン重心が中心軸高さの midpoint にあるものとし、平均直径 D を単位とし、 H をかえたときの \overline{GZ} を図-10 (a), (b) に示す。

(a) は $d=0.1$ 、 $n=12$ 、 $r=1$ 、 $H=1$ のとき $T_0=0.1$ とし、直立時の喫水 T_0 は H に比例するものとした。

(b) は (a) の自重が 50% 増した場合である。

ケーソン自重と二重壁厚さを同率で増した場合、復元力曲線は元の曲線に一致する。図 (a), (b) で自重、二重壁厚さをともに 50% 増した場合を () 内に表示した。この関係は 2.(3) の理論式よりも明らかで式 (3.2) より

$$T_0 = V_0 / \pi Dd = W_0 / r \pi Dd$$

となるので W_0 と d を同率で増減しても T_0 は変わらない。式 (3.3)~(3.14) 中 Z_g 、 X_g はすべて D 、 T 、 ϕ の関数につき T が変わらない場合、 D 、 ϕ が同じ値であれば Z_g 、 X_g は一致し、したがって \overline{GZ} は一致する。

(2) 注水の影響 (図-11)

$D=1$ 、 $H=1.5$ 、 $d=0.1$ 、 $n=12$ 、 $r=1$ 、 $T_0=0.15$ の場

図-10 H/D の影響

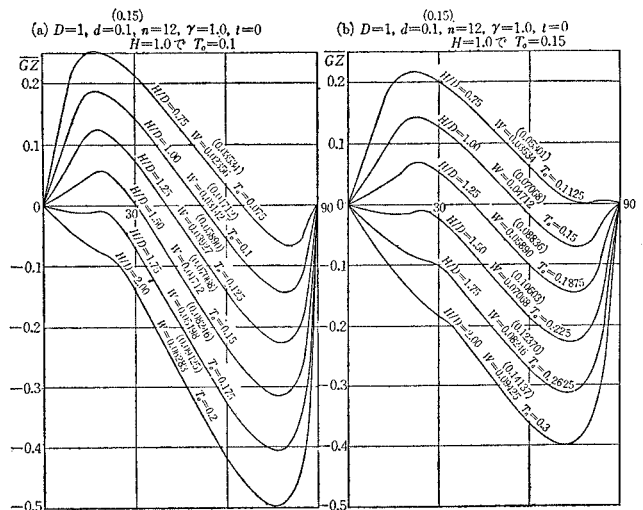
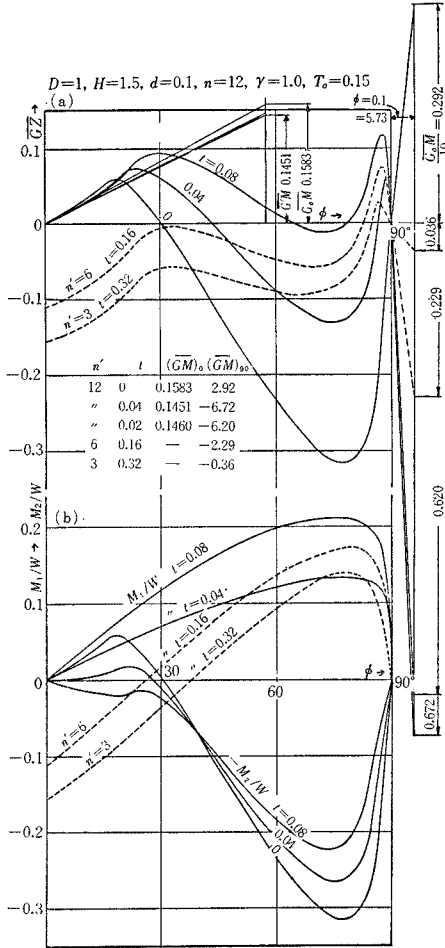


図-11 注水量の影響



合に注水した場合の復元てこを 図-11 (a) に示す。実線は全個室等量注水の場合、端線は片側個室注水の場合である。

\overline{GZ} を注水によるものと浮力によるものとに分け、 M_1/W と $-M_2/W$ を別個に示すと 図 (b) のようになる。全個室等量注水の場合 M_1/W は常に正である。 $-M_2/W$ は二重壁ケーソン自体の重心位置に固定重量(その重量は t で示される注入水の全重量に等しい)を付加した場合の復元モーメントを代表するもので、排水量の増加とともに $(-M_2/W)_{max}$ が下降し、 $(-M_2/W)_{min}$ が上昇することが示されている。

図-11 (a) に示されるごとく少量の注水が著しく横向復元力を損じ、全個室等量注水の場合 $t=0.08$ ($r v=0.02513$) を越すと横向浮揚安定の範囲がなくなり、傾斜角 75° 辺から 0° の直立状態まで起上ることが予想される。

図上には $(\overline{GM})_0$ 、 $(\overline{GM})_{90}$ の計算値とこの図式表示も一例として併記し、 \overline{GZ} 曲線の接線が \overline{GM} を表わすことを示している。

(3) 復元力計測実験との比較 (図-12 (a)~(g))

模型による復元力計測実験については 4. に述べるが、この実験の諸元より計算して得られた復元力曲線を 図-12 (a)~(g) に掲げる。計算式に採用したケーソン自重は模型とこれに取りつけた滑車装置、対重等を加えた重量である。

図上に点で表示しているのが実験値であるが、ほとんどすべての場合に計算値と実験値はきわめてよく一致しており、本論文に示した近似計算式で二重壁ケーソンの浮揚安定性の大略を知るのに十分な精度の得られることがわかる。

(4) 起上り限界注水量、直立限界注水量の推定

注水によりケーソンが横向き状態より堅向きに起上る限界注水量は理論的には $45^\circ \sim 90^\circ$ の範囲で \overline{GZ}_{min} が 0 となって横軸と接する場合の注水量となる。この場合の限界注水量、復元力消失角、起上り後傾斜角は 図-13 から推定される。図で

(a) は A 型模型に全個室等量注水した場合

(b) は A 型模型に片側 6 個室等量注水した場合

(c) は D 型模型に全個室等量注水した場合

であり、図上 () 内に示した数は模型実験より求めた限界注水量、起上り後傾斜角である。この場合も計算値、実験値は相当よく一致している。

ケーソン高さの低い場合、全個室等量に注水して起上ったあと (a) のごとく直立するが、ケーソン高さが高い場合は (c) のごとく起上っても直立近くの安定平衡点で静止するので少しく傾斜しており、これを直立せしめるためにはさらに注水が必要である。図に示すごとく直立に近い範囲の復元力は傾斜角の相当広い範囲で 0 にきわめて近いうえ、注水の増加に対する復元力の増加がきわめて緩慢で、ケーソンを十分安定に直立させるまでの注水量は相当多量となる。

ケーソン高さが高く、自重も大きい場合は 図-14, 15 に示すように復元力曲線は安定な平衡点が 1 個しか現われない。これは注水により不連続な起上り現象が現われなくなることを示している。ケーソンは注水の増加につれてしだいに堅向きに移り、きわめて多量の注水により直立するようになる。また傾斜角の広い範囲で復元力がきわめて小さくなる場合があり、わずかの外力で容易に傾斜角を広い範囲に変えうるようになる。これらの現象はいずれも模型実験の所見と一致している。

4. 模型実験

(1) 実験用模型

模型は亜鉛鉄板製で 図-16 に示す構造とし、写真-1 に示す 6 通りの高さのものを準備した。

想定した実物ケーソンを文献 2) に掲載されたものとし、直径 40 m、高さ 41 m で 1650 t につき、模型寸

図-12 復元力曲線計算値—実験値対比図

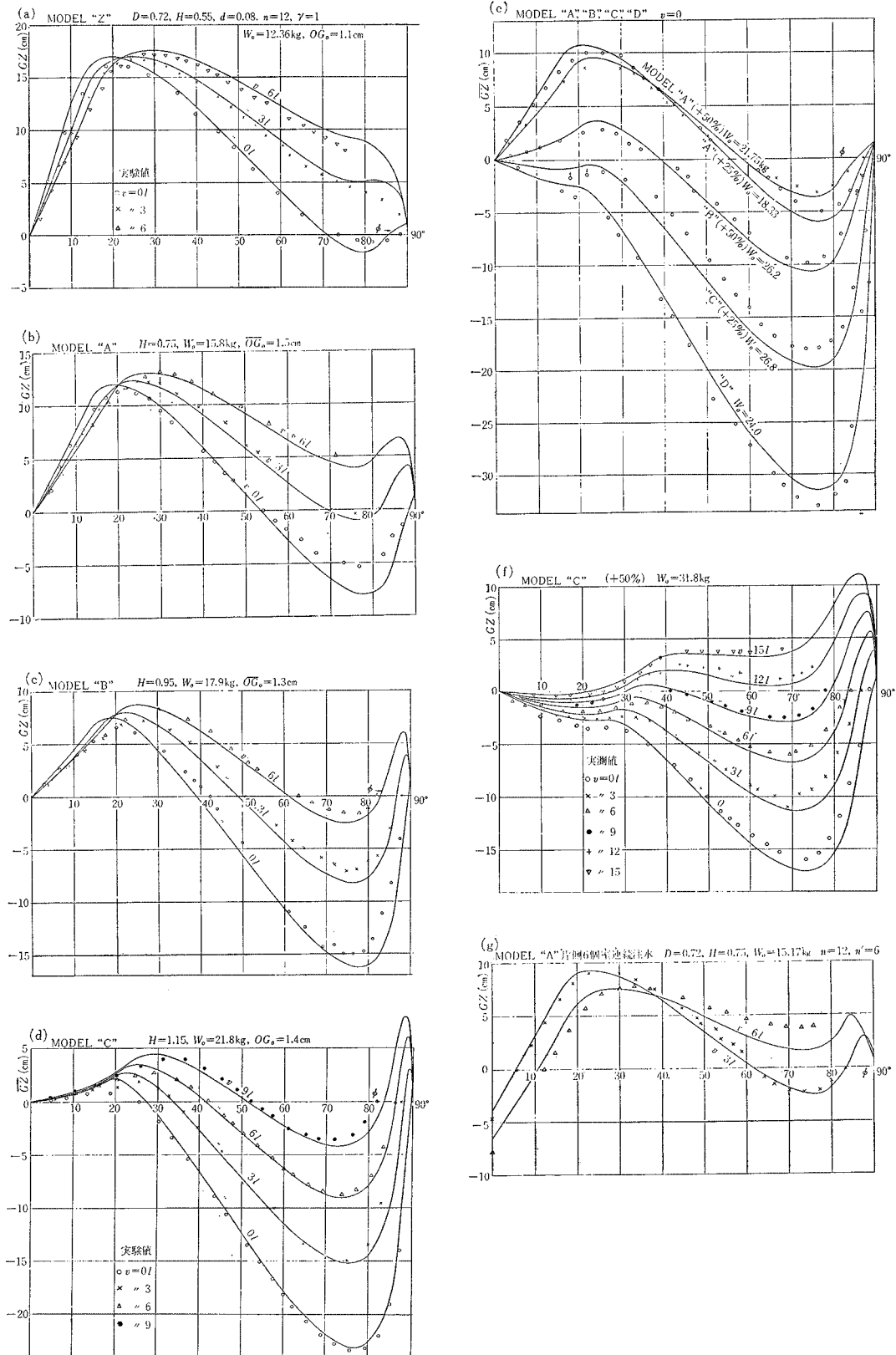


図-13 起上り限界注水状態 復元力曲線

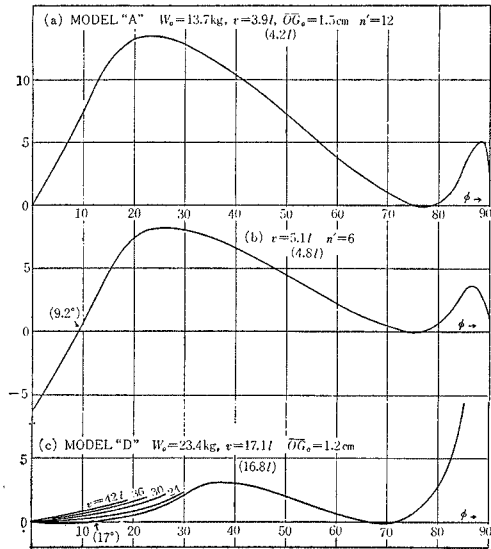


図-14 D型模型(+50%) 復元力曲線

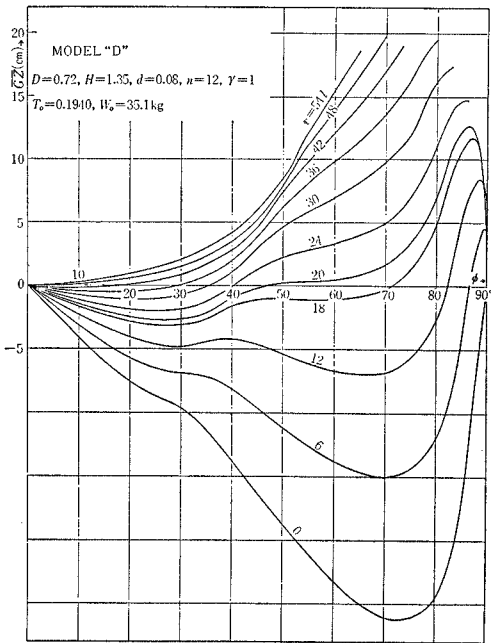


写真-1 二重壁ケーソン系統実験用模型

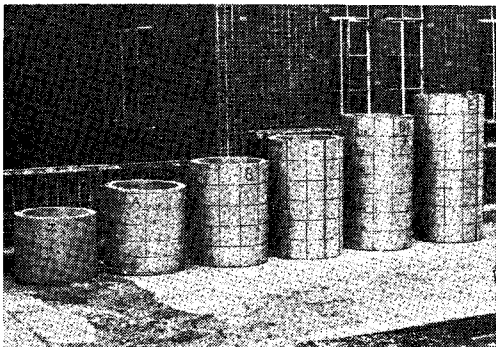


図-15 E型模型(+50%) 復元力曲線

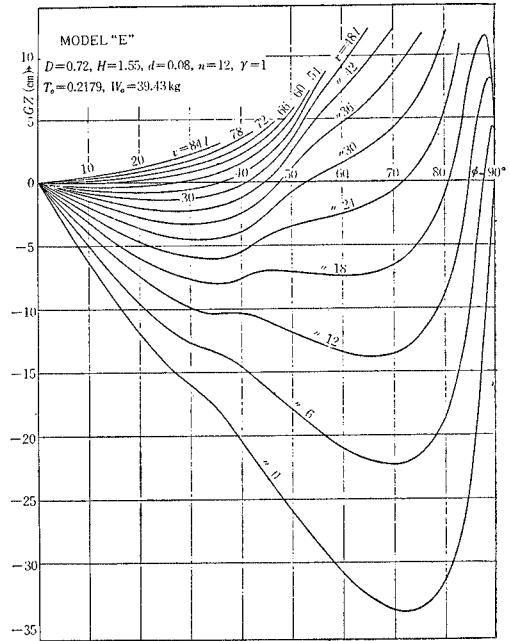
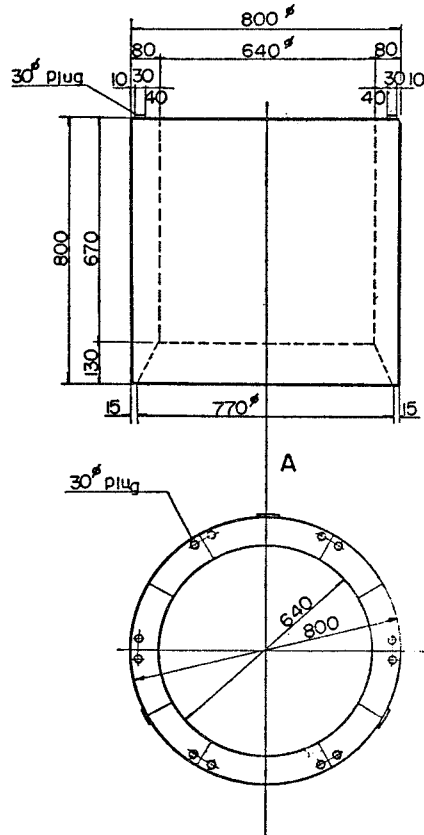


図-16 二重壁ケーソン模型図



法を 1/50 としして実物に相当する重量となるように亜鉛鉄板の厚さを定め、外壁を #28、その他を #31 とした。寸法は直径 800 mm に対して高さを 600 mm より 1600 mm まで 200 mm 飛びに 6 通りとし、二重壁厚さはケーソン外径の 1/10 の 80 mm とし、上下に通る水密縦隔壁で 12 等分した。刃口部は平坦部を 15 mm 残して高さ対底辺の比を 2 対 1 の傾斜とした。ケーソン上端はすべて亜鉛鉄板でふさいで各個室ごとに 1 個ずつ注水孔とその栓を設けた。ケーソン模型の諸元を表-1 に示す。

表-1 二重壁ケーソン模型要目表

型	直径 (mm)	高さ (mm)	計算重量 (kg)	実測重量 (kg)	実測重量 計算重量	重心高 (mm)	二重壁内積 容積 (L)
Z	800	600	10.12	10.96	1.083	314	99.5
A	800	800	13.32	13.7	1.029	410	135.7
B	800	1000	16.54	16.5	0.997	512	171.9
C	800	1200	19.76	19.9	1.007	611	208.1
D	800	1400	22.98	23.4	1.017	713	244.3
E	800	1600	26.20	26.3	1.004	813	280.5

ケーソン自重が変わる場合、および形状相似で縮尺度の異なるものにも適用する場合等のため、別にケーソン内筒内側にねじで押しつけて取りつける円環状の付加重量環を重量別に 4 種類、11 個製作しケーソン重心高さの位置に取りつけるようにした。

(2) 復元力の計測

図-17、写真-2 に示す装置でケーソン模型の復元モーメントの計測を行なった。傾斜モーメントをケーソン模型に伝えるための滑車装置は傾斜角 ϕ の小さい堅向き状態ではケーソン上面に、 ϕ の大きい横向き状態ではケーソン側面に取り付け、べつべつに計測を行なったが、滑車装置を含む計測時の全体重心はケーソン自体の重心位置に一致するように対重を反対側に取り

図-17 復元力計測実験装置図

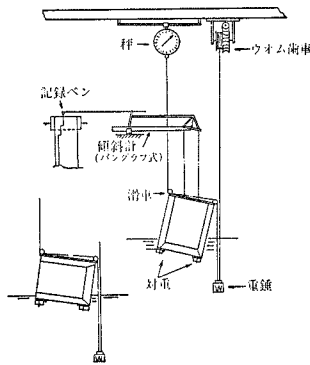
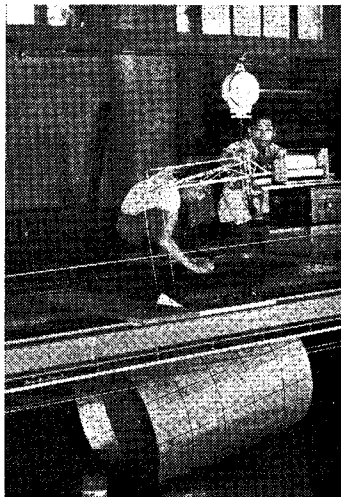


写真-2 復元力計測実験



りつけている。重量は滑車装置、対重を含めた全浮揚重量を採り、得られた復元モーメントより復元てこ GZ を計算した値を 図-12 上に実験値として点で表示している。

模型は系統的に高さを変えているので高さの変化が二重壁ケーソンの復元性をどう変えるか、また自重の増大、注水区画の選択が復元性をどう変えるか大略の傾向が把握できる (5. に後述)。

図上に示した注水量は二重壁内各個室に等量注水した量の合計を示している。ケーソン模型の二重壁内部容積は表-1 に示すとおりで、自由水効果のため少量の注水がいかに大きく横向き状態の復元力を損ずるか明らかに示されている。

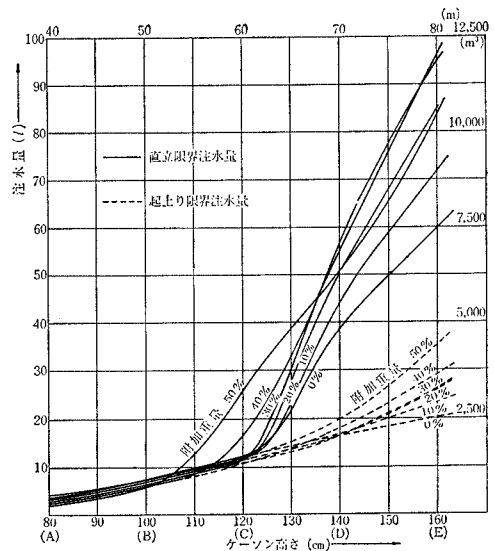
高さの最も高い E 型模型は水槽の深さ不足のためこの実験は行なわなかった。

(3) 起上り限界注水量の計測

二重壁内全個室に等量ずつ注水した場合の起上り限界注水量、起上った状態で浮揚安定性不足で直立せず傾斜している場合、さらにこれに注水して直立するまでの限界注水量を計測した³⁾。これを 図-18 に示す。ケーソン内筒内重心位置に付加重量環を取りつけてケーソン自重の変化により限界注水量、浮揚喫水がどのように変化するかも計測し、付加重量を表-1 実測重量に対する % で示した曲線でそれを表示した。

ケーソンの横置状態の喫水、注水により起上り直立した状態および起上り後さらに注水して直立した状態の喫水、起上り過程の最大喫水を 図-19 に示す。起上り過程の最大喫水はケーソン高さの低い場合は起上り運動の慣性で反対側に深く突込む際に生ずるので、この運動を 16 ミリシネフィルムに納め、これより読みとって

図-18 限界注水量計測値



喫水の変化を求めて得たものである。

図-18, 19の右側, 上側の数値は模型の50倍の実物寸法で示したものである。

ケーソン高さが直径の1.5倍以上で自重も大きくなった場合の直立限界注水量は $(\overline{DM})_0 > 0$ の注水量と考えると計算値より相当大きく出ているようであるが, 3.(4)に述べたとおり直立付近の \overline{GZ} が小さいので, 十分の $(\overline{GM})_0$ を得るには図示の量が安全側と考えられる。

つぎに二重壁内の片側のみの個室に注水した場合の実験を A, B型模型について行なった。

片側6個室を全個室より2個室まで個室選択条件を変

えて各個室等量に注水し, 起上り限界注水量, 起上り後喫水, 起上り後傾斜角を計測した。計測値を表-2に示す。1個室注水の場合は起上らない。

注水される個室が多い方が, また注水される個室が一方に集中せぬ方が限界注水量が少なく, 高さの高いB型の方がA型に比し著しく起上り困難で, 同一条件で限界注水量が2倍以上に増し, またA型では起上るがB型では起上らない場合が多くなっている。

C型ではさらに横置浮揚安定性が大きくなり, 片側注水による起上りの困難が予想されたので, 片側注水実験は A, B型に止めた。

図-19 浮揚喫水図

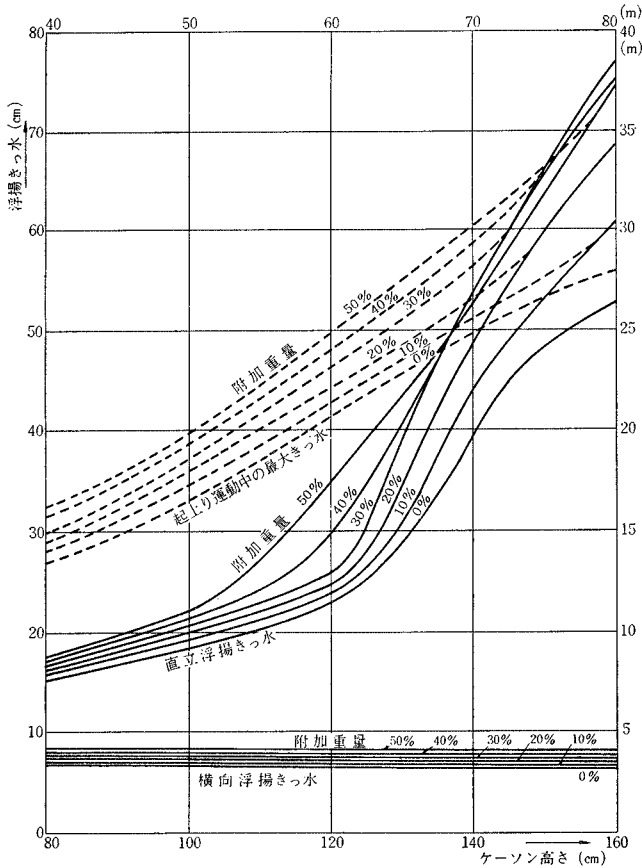


表-2 片側個室注水実験計測値表

二重壁内個室 (片側)	個室数												
	ABCDEF	ABCDE	ABCD	BCDE	ABEF	CDEF	ADE	AB	CD	EF	BC	DE	
A型	起上り限界注水量 (t)	4.8	5.25	5.6	5.6	5.4	5.36	5.1	6.8	7.4	7.0	7.4	7.0
	起上り後喫水高 (cm)	9.0	7.7	6.0	8.0	9.0	10.0	9.2	2.6	5.7	12.4	3.0	9.2
	起上り後喫水長 (cm)	21.8	23.7	25.5	23.5	22.5	21.5	22.5	30.5	27.5	20.9	29.5	24.0
	起上り後傾斜角 (deg.)	9.2	11.5	13.8	11.0	9.6	7.8	9.5	19.3	15.0	6.1	18.4	10.5
B型	起上り限界注水量 (t)	10.2	10.5	起上らず	11.4	11.32	10.8	14.4	起上らず	起上らず	起上らず	起上らず	起上らず
	起上り後喫水高 (cm)	3.5	-2.5	起上らず	0.5	2.8	6.5	-14.0	起上らず	起上らず	起上らず	起上らず	起上らず
	起上り後喫水長 (cm)	36.8	42.0	起上らず	40.5	38.0	34.2	53.3	起上らず	起上らず	起上らず	起上らず	起上らず
	起上り後傾斜角 (deg.)	23.0	29.0	起上らず	26.6	23.7	19.0	40.0	起上らず	起上らず	起上らず	起上らず	起上らず

5. 二重壁ケーソンの静的浮揚特性

理論式および実験より得られた二重壁ケーソンの静的浮揚特性を列挙するとつぎのとおりである。

(1) 二重壁内部注水のない状態でケーソン高さが高くなるにつれて縦向き浮揚状態の復元力, 復元範囲が小さくなり, 横向き浮揚状態の復元力, 復元範囲が大きくなる。

(2) ケーソン自重が軽くなるほど, また二重壁厚さが増すほど復元性は向上し, 二重壁厚さの増大率はケーソン自重の軽減率に等しい効果を復元力の向上におよぼす。

(3) 自重が増加するとケーソン高さの低いものは縦向き浮揚状態の復元範囲が大きくなるが復元力は小さくなる。一方ケーソン高さの高いものは横向き浮揚状態の復元範囲が大きくなるが復元力は小さくなる。

ケーソン復元範囲が縦向き, 横向き浮揚状態ではほぼ等しい高さのケーソンの場合 ($H/D = 1.15 \sim 1.2$), 復元範囲はほとんど変わらないが, 復元力は縦向き, 横向きとも小さくなる。

(4) ケーソン高さが高く, または自重が大きくて直立して浮揚し得ない場合, 復元力は横置に近い傾斜角で最大となり, 縦向きになるにつれて急激に小さくなるが, それから下り方がゆるやかになり, またはほぼ一定の範囲を経て直立状態で0となる。

(5) ケーソン二重壁内部の全個室へ注水すると横向き浮揚状態の復元力を小さくし, 縦向き浮揚状態の復元力を大きくする。横向き浮揚状態の復元力の減少は顕著であるが, 縦向き浮揚状態の復元力の増加はそれほど大きくない。また横向き復元範囲を著しく小さくし, 縦向き復元範囲をそれだけ大きくする。

(6) ケーソン二重壁内部へ注水する個室が片側へ偏る場合は堅向き、横向き浮揚状態とも復元力が小さくなるが、復元力低下の程度は全個室等量注水の場合ほど顕著でない。

(7) ケーソン直径、高さ、二重壁厚さ、自重の適当な範囲で二重壁内部に注水すると、注水量が一定量に達すると横向き復元力を失い、起上って直立する。

(8) ケーソン高さが高く自重の大きい場合、二重壁内全個室注水により起上るが堅向きで傾斜を残し、これを直立せしめるには相当多量の注水を必要とする。

(9) ケーソン高さ、自重が著しく大きい場合は一定量の注水による不連続な起上り現象は現われず、注水の増加につれてしだいに堅向きへ移ってゆく。

(10) ケーソン高さの低い場合、注水する個室が片側へ偏っても起上る。起上り前後の傾斜角の差は全個室等量注水の場合より著しく小さく、起上りによる運動量が小さくてすむ。

6. 結 言

鋼製ケーソンは一般にそれ自体が構造物に加わる外力に対する強度部材でなく、主としてその内部に打設されるコンクリートで外力に抵抗するもので、鋼製ケーソンは主としてコンクリートを打設する際の永久型わくの機能を果たすものである。したがって鋼製ケーソンの重量はその大きさに比し著しく軽量であることを特徴とし、これに伴って浮揚安定上興味ある特性を備えているものと見なすことができる。

理論的に得られた近似計算式と系統的模型実験より、

円断面の二重壁ケーソンの静的浮揚安定性と注水の自由水効果に関する特性は明らかにされ、相当高い精度で実物についての推定も行ないうるものと思われる。

ここに導入された近似計算式はケーソンの動特性の計算にもそのまま利用できるもので、ケーソン起上りの際の衝撃、動揺等の動力学的な問題も今後の研究により推定できるものと思われる。またドームケーソン等の円と長方形の組み合わせで構成されているケーソンの場合もここに導入された近似計算式と同一手法で復元力が計算されるもので、広範囲の鋼製ケーソンの浮揚性の比較が容易にできるようになるものと思われる。

終りに本研究にあたり、近似計算式の導入について東京大学工学部 田宮教授よりご指導を賜わり、水槽実験について同学部 元良教授よりご指導を賜わり、安定研究室 杉田氏以下の方々に実験のすべてを担当実施していただいたことを付記して各位に深甚の謝意を表するものである。

参 考 文 献

- 1) Lawrence A. Rubin: *Mighty Mac*. (1958)
- 2) 岡山県香川県編パンフレット“瀬戸大橋 技術編”(1964)
- 3) 矢村家利: 大型橋脚基礎の工場製作と曳行の新しい試み, 土木施工 Vol. 6, No. 2, (1965)・Vol. 7, No. 2, (1966)・Vol. 7, No. 3, (1966)
- 4) 吉岡 勲・矢村家利: 鋼板製二重壁 ケーソンの曳航抵抗と曳航性能の実験, 造船協会論文集, 第 121 号, (June, 1967)
- 5) 矢村家利: 鋼板製二重壁 ケーソンの浮揚安定性および二重壁内部注水の自由水効果について, 造船協会 論文集, 第 121 号, (June, 1967)

(1968.1.23・受付)