

# 振り構造ゲートの解析方法

寺田 溥<sup>1</sup>

## Structural Analysis of Torsion Type Gates

Hiroshi TERATA

単純振り理論, 曲げ振り理論, および, 簡易法に分けて構造解析の方法を示し, 各方法の関係を明らかにした。曲げ振りの影響は応力に強く現れ, その程度は有限要素法で把握できる。超大型ゲートの解析は曲げ振りを無視して成り立たない。振り構造はいくつかの本質的優位性を持っているが, 普及率は高くない。解析方法の複雑さがその背景にある。

キーワード: ゲート, 振り, 曲げ振り, 構造解析, 薄肉閉断面

### 1. はじめに

構造物に作用する外力は荷重とその反力に分けて考えることができ, 荷重は構造物の剛性により荷重点から反力点に伝達される。構造物の剛性は剪断剛性, 曲げ剛性, 振り剛性, 引っ張り(圧縮)剛性などと類別して論じられることがあるが, 構造物はこれらのすべての剛性を備えているのが一般的であって, どの剛性が主役を演じるかは, 剛性の相対的大きさだけでなく, 荷重と反力の分布により異なってくる。外力が振りモーメントを形成し得る条件を満たし, かつ振り剛性が相対的に大きければ振り剛性型の構造となるはずである。本論文ではこのような構造を振り構造と定義し, 振り構造を採用した水門扉を振り構造ゲートと呼ぶ。

ヨーロッパにおいては, 振り構造を採用した転倒式ゲートは魚腹型フラップと呼ばれ, 1931年にすでに稼働していた記録がある<sup>1)</sup>。日本ではこの構造が昭和38年に図-1に示す松川放水工<sup>2,3)</sup>に採用され, 以来, 魚腹型の名称で急速に全国に広まり, 多段式魚道ゲートや図-2に示す親子ゲートも現れた。振り構造は, さらに図-3および4に示す修繕船ドックのゲート<sup>4)</sup>に適用され, 扉幅が100mで自重が1000トンを越える大型

のものも実現した。振り構造の優越性は, ①細長ゲートに適用した場合軽量となり, また, ②応力分布が疲労に対して有利である点にあって, 将来のパナマ運河ゲートの代替案としてこの構造が提案されているが<sup>5)</sup>, それは振り構造ゲートのさらなる巨大化とともにローラゲート, マイターゲートなどの代替となる可能性を示している。図-5は代替案の一例である。扉高27.5m×扉幅200m×重量5950トンであり, 中央分割の横引きゲートである。なお, この図は構想を示す暫定的なものである。

ヨーロッパにおける魚腹形の用途が転倒堰中心であるのに対し, 日本での普及方向は若干異なっているように思える。断面形状は, 振り剛性を強めるとともに曲げ変形に対する剛性を低く押さえる思想が強調されていて, 魚腹形から離れている場合もあり, 扉体形式を魚腹型で呼称するのは適切でない場合が多い。本論文で振り構造, または振り構造ゲートの名称を用いる所以である。

本論文の目的はこれまで行われてきた解析方法を内容的に明らかにすること, および各々の方法の関連を明確にすることにある。振り構造の解析は多数の不静定量を把握することが中心になるが, その手続きは極

<sup>1</sup> 三菱重工業(株)横浜製作所鉄構技術部工事担当部長代理

めて煩雑である。振り現象は単純振りと曲げ振りの組み合わせであるが、曲げ振りは構造解析で一般的に考慮されない。しかし、振り構造は曲げ振り現象抜きで論じることはできない。とくに超大型ゲートの解析はこの現象を無視して成り立たない。以下に単純振り理論による解析について詳細に説明し、次に、曲げ振り理論により結果がどのように変わるかを示す。

## 2. 単純振り理論による解析

### 2.1 断面応力の分布形状

単純振り理論による構造解析の出発点として薄肉閉断面の応力分布の特徴を簡単に示す。断面には単純振

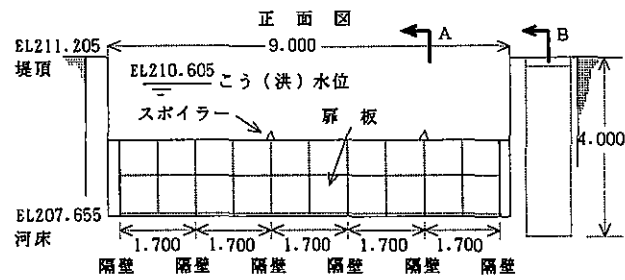


図-1 松川放水ゲート

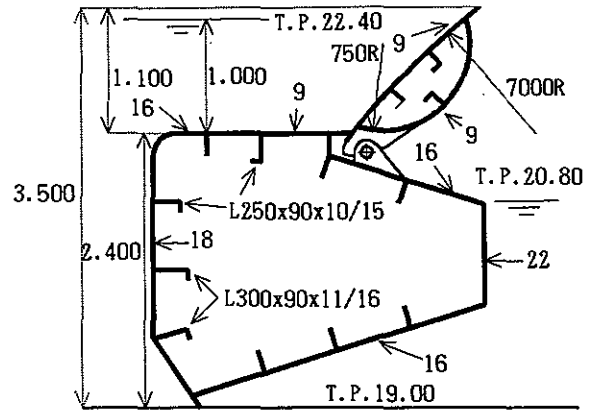
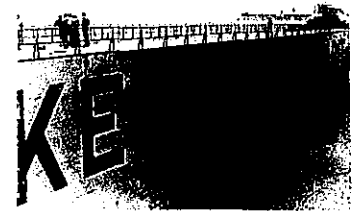


図-2 親子ゲート (扉高 3.5 m × 扉幅 40 m)



(扉高 13.5 m × 扉幅 100 m)

図-3 ドックゲート



(扉高 12 m × 扉幅 80 m)

図-4 ドックゲート

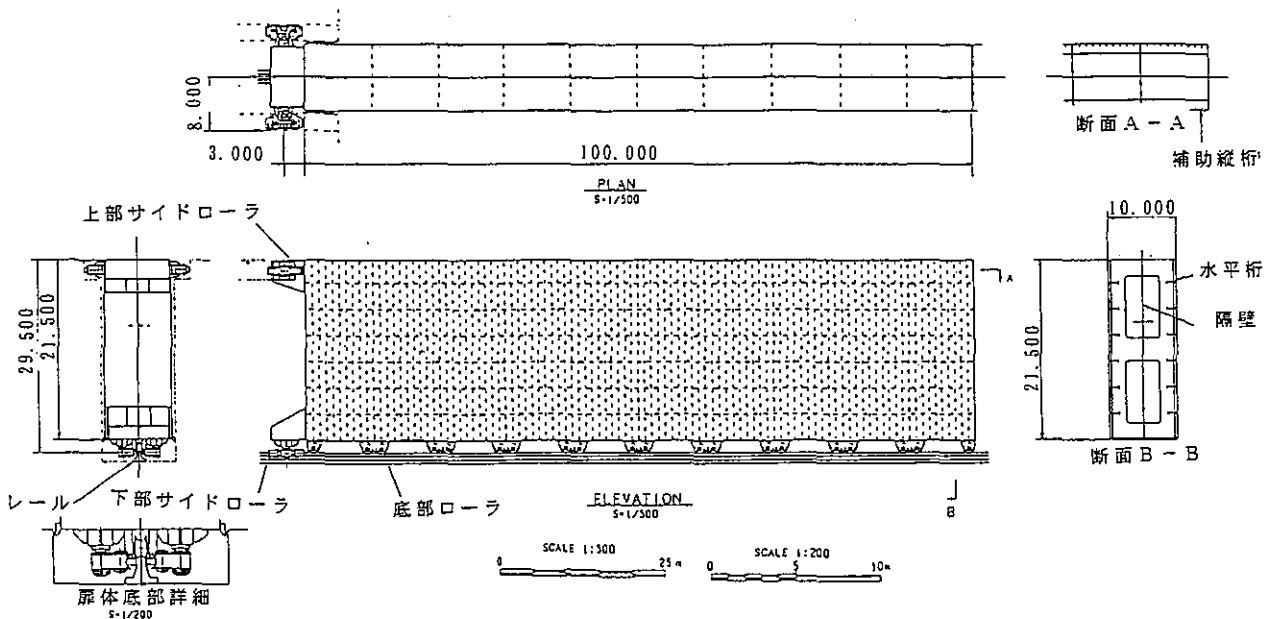


図-5 横引きゲート (扉高 27.5 m × 扉幅 200 m × 重量 5950 トン (図は左岸半分を示す))

りモーメント  $T_s$  による剪断応力  $\tau_s$ ,  $y$  軸および  $x$  軸周りの曲げモーメント  $m_y$  および  $m_x$  による応力  $\sigma_{bx}$  および  $\sigma_{by}$ ,  $x$  軸方向および  $y$  軸方向の剪断力  $Q_x$  および  $Q_y$  による剪断応力  $\tau_{bx}$  および  $\tau_{by}$  が発生する。剪断応力分布は剪断流で定まる。 $\tau_s$  の剪断流は断面の全周にわたり一定である。 $\tau_b$  の剪断流を図-6 および 7 に示す魚腹型および箱型断面について計算した結果を図-8 および 9 に示す。図-6 における  $G$  は重心,  $S$  は剪断中心,  $t$  は板厚を表す。図-6 では  $x$  軸が鉛直方向に設定されているが, これは後で引用する参考文献との

関係を保つためである。しかし, 図-8 は  $x$  軸が水平に設定されているので, 図-6 を反対側から見て時計方向に 90 度回転した状態に当たる。剪断流はグラフに示した特定の形状と部材寸法に対するもので, 値はグラフに示した率が乗じてある。剪断流は時計方向, グラフは断面の外側がプラスである。

## 2.2 弾性方程式による解析例

解析の中身は扉体の各支持点における弾性変形量を方程式で表し, 支持条件に合致するように内力を決定する操作であって, 振り構造の解析方法の基本である。基礎的な流れは参考文献 6 を踏襲している。弾性方程式は行列式で表され, その解はコンピュータで得られる。

### a) 解析モデル

扉体は剪断中心を結んだ線で置き換え, 振り剛性および曲げ剛性がこの線に集中しているものとする。梁の曲げ理論での剛性は断面の重心を結んだ線に集中していると考えが, これを剪断中心に移しても弾性方程式に影響を与えない。曲げ変形を算出するときの荷重は剪断中心線上にある必要がある。

### b) 計算外力

荷重は各隔壁に作用する集中荷重に置き換える。大きさは径間内の隔壁で等しく, 両端でその半分である。反力は各隔壁位置の底部に設けられる支承と扉体の端部で発生する。端部反力は力の形で作用するのが一般的であるが, 扉体断面に作用する段階では振りモーメントの形をとると考えることができるので, 扉体端部において反力モーメント  $M_0$  が作用すると見なす。両端支持は片側支持の応用として解けるので, 片側支持を基本とする。底部支承からの反力は隔壁に作

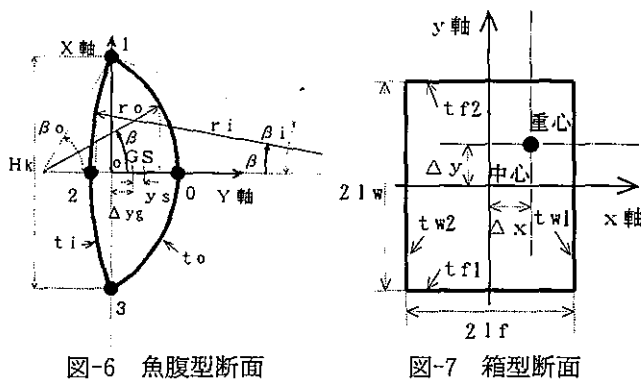


図-6 魚腹型断面

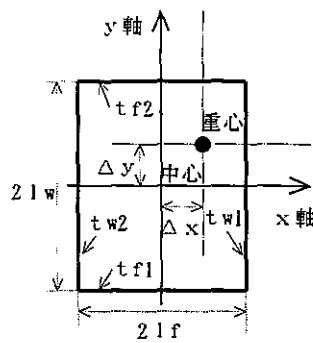


図-7 箱型断面

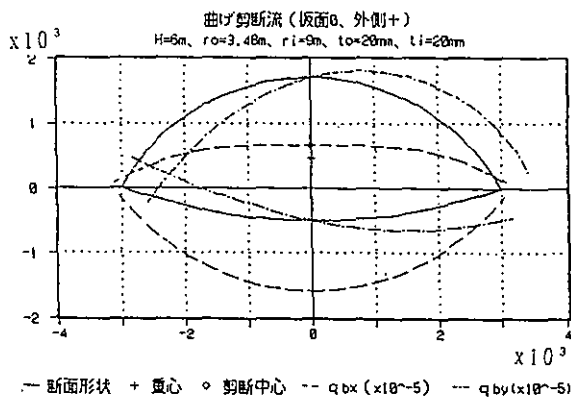


図-8 魚腹型

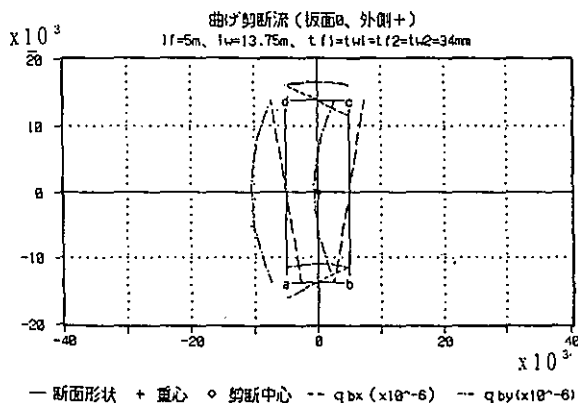


図-9 箱型

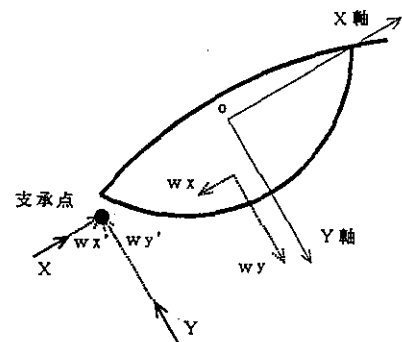


図-10 外力の方向

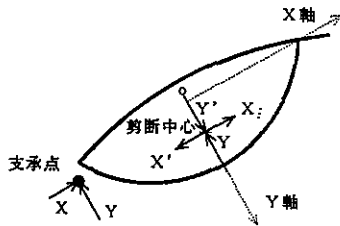


図-11 仮想力

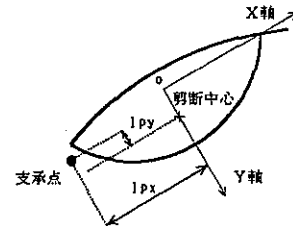


図-13 剪断中心

用する荷重 ( $w_x, w_y$ ) と等しい部分 ( $w_x', w_y'$ ), およびそれからはみ出す部分 ( $X, Y$ ) に分け, 正の方向を図-10のように定める。前者を静定量, 後者を不静定量と名付ける。 $(w_x, w_y)$  と  $(w_x', w_y')$  は偶力を形成する。これを静定振りモーメントと名付け, 中間断面での大きさを  $m_s$  とする。残った ( $X, Y$ ) は支承反力の不静定量である。各隔壁位置において, 図-11に示すように, 剪断中心に不静定量 ( $X, Y$ ) およびこれと大きさが等しく反対方向の不静定量 ( $X', Y'$ ) が作用していると考え。不静定量 ( $X, Y$ ) と仮想の不静定量 ( $X', Y'$ ) は偶力を形成する。これを仮想の不静定振りモーメントと名付け,  $i$  断面における大きさを  $m_{fi}$  とする。残った剪断中心線に作用する仮想の不静定力 ( $X, Y$ ) は扉体に曲げ変形を起こさせる。

### c) 変位計算法

扉体には計算外力による振り変形および曲げ変形が生じる。部材は断面によって異なるから, 剪断中心を結んだ線は曲線であり, したがって曲げ変形は内部振りを伴うので, 上記のほかに, この変形の算出式も必要である。以下にそれぞれの変形による支承点変位の計算方法を示す。

#### 1) 集中振りモーメントによる変形

図-12に境界条件を示す。 $a$  端は回転に対して固定,  $b$  点は回転に対しても変位に対しても自由である。 $0 \sim n$  は支点番号であり,  $l_{sxn}$  が扉体の全長である。扉体は剪断中心線を結んだ線で表されていて, 支点間は

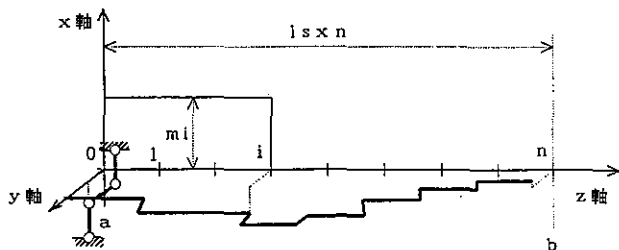


図-12 境界条件

$z$  軸に平行な直線である。 $i$  点に作用する集中モーメント  $m_i$  に対して, 図に示すような内部振りモーメントが発生する。横断面はこの大きさに応じて振れるが,  $a$  端固定,  $b$  端自由の境界条件であるから, ある断面の回転角度はそれから左側の扉体の振り角度が集積されたものとなる。剪断中心は左側の振り角度分だけ移動することになるが, これを考慮すると弾性方程式が荷重に対して非線形となるので, 扉体の振り角度が極めて小さいことを条件として, 振り変形による剪断中心の移動を無視する。図-13は剪断中心と支承点の距離  $l_{px}$  および  $l_{py}$  を示す。 $i$  断面に作用する集中モーメントによって発生する  $j$  断面の支承位置の  $x, y$  方向の変位  $\xi_{tij}, \eta_{tij}$  は式(1)で計算される。一様構造の場合は式(2)となる。

#### 2) 集中荷重による曲げ変形

図-14は境界条件を示す。実際にも  $a$  端の変位は拘束されているが,  $b$  端は支持反力が荷重と釣合いを保ちながら変位し得る状態にあり, 変位量は弾性方程式の解として定まる。 $i$  点の集中荷重  $w_i$  による  $j$  点の  $x$  方向および  $y$  方向の撓み  $\xi_{wij}$  および  $\eta_{wij}$  は式(3)で与えられる。 $I_x$  および  $I_y$  は中立軸に設定された  $x$  軸周りおよび  $y$  軸周りの断面二次係数である。

[ $i$  断面の  $m_i$  による  $j$  支承点の変位]

$$\left. \begin{aligned} \xi_{tij} &= \sum_{k=1}^j \frac{m_i l_s}{G J_{tk}} l_{pxk} \quad J > i \text{ なら} \quad \sum_{k=1}^i \frac{m_i l_s}{G J_{tk}} l_{pyk} \\ \eta_{tij} &= - \sum_{k=1}^j \frac{m_i l_s}{G J_{tk}} l_{pyk} \quad J > i \text{ なら} \quad - \sum_{k=1}^i \frac{m_i l_s}{G J_{tk}} l_{pxk} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ただし,  $J_t$  は振り断面係数である。

[ $i$  点の  $m_i$  による  $j$  支承点の変位: 一様断面の場合]

$$\left. \begin{aligned} \xi_{tij} &= \frac{m_i l_s j}{G J_t} l_{pyk} \quad J > i \text{ なら} \quad \frac{m_i l_s i}{G J_t} l_{py} \\ \eta_{tij} &= - \frac{m_i l_s j}{G J_t} l_{px} \quad J > i \text{ なら} \quad - \frac{m_i l_s i}{G J_t} l_{px} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

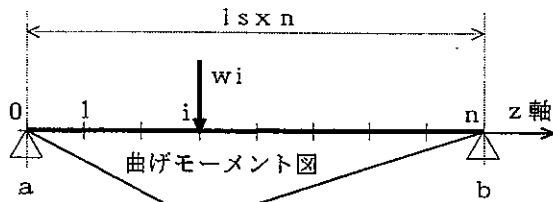


図-14 境界条件

$$\left. \begin{aligned} \xi_{wij} &= X_i \sum_{k=1}^n \frac{l_s^3}{EI_{yk}} A_{ijk} \\ \eta_{wij} &= -Y_i \sum_{k=1}^n \frac{l_s^3}{EI_{xk}} A_{ijk} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ただし,

$$\begin{aligned} A_{ijk} &= (n-j)(n-i) \{k^3 - (k-1)^3\} \div (3n^2) \\ &\quad (k \leq i, k \leq j) \\ &= (n-i)jB \div (6n^2) \quad (j < k \leq i) \\ &= (n-j)iB \div (6n^2) \quad (i < k \leq j) \\ &= ji \{ (n-k+1)^3 - (n-k)^3 \} \div (3n^2) \\ &\quad (k > i, k > j) \end{aligned}$$

$$B = \{3k^2 - 3n(k-1)^2 - 2k^3 + 2(k-1)^3\}$$

3) 内部振りによる変形

i) 内部振りのモーメント

図-12の末端条件で算出する。断面の剪断中心のz軸からの距離を $l_{sk}$ および $l_{sy}$ とし、図-15のように設定する。内部振りのモーメントはz軸周りのモーメントの釣合いから次の式で与えられる。

[i断面の荷重による0断面とn断面の反力]

$$\left. \begin{aligned} R_{x0i} &= X_i \cdot (n-i) \div n \\ R_{y0i} &= Y_i \cdot (n-i) \div n \\ R_{xni} &= X_i \cdot i \div n \\ R_{yni} &= Y_i \cdot i \div n \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

[i断面の荷重による0断面の反力振りモーメント]

$$\left. \begin{aligned} m_{xi} &= X_i l_{syi} - R_{x0i} l_{sy0} - R_{xni} l_{syn} \\ m_{yi} &= Y_i l_{sxi} - R_{y0i} l_{sx0} - R_{yni} l_{syn} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

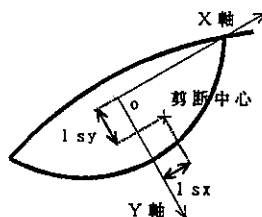


図-15 剪断中心

[i断面の荷重によるj-1~j断面間の振りモーメント]

$$\left. \begin{aligned} m_{xij} &= X_i l_{syi} - R_{x0i} l_{syj} - R_{xni} l_{syn} \quad (j \leq i) \\ &= R_{xni} (l_{syj} - l_{syn}) \quad (j > i) \\ m_{yij} &= Y_i l_{sxi} - R_{y0i} l_{sxj} - R_{yni} l_{syn} \quad (j \leq i) \\ &= R_{yni} (l_{sxj} - l_{syn}) \quad (j > i) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

ii) 振り変形

$m_{xij}$  および  $m_{yij}$  によって生じる変位量は式(1)の  $m_i$  をこれらに置き換えて得られる。仮定の不静定力  $X$  および  $Y$  に対する支承位置の  $x$  方向の変位を  $\xi_x$  および  $\xi_y$  とし、 $y$  方向の変位を  $\eta_x$  および  $\eta_y$  とする。

[i断面の荷重  $X_i$  および  $Y_i$  によるj支承点の変位]

$$\left. \begin{aligned} \xi_{xij} &= \sum_{k=1}^j \frac{m_{xik} l_s}{GJ_{tk}} l_{pyk} \\ \eta_{xij} &= - \sum_{k=1}^j \frac{m_{xik} l_s}{GJ_{tk}} l_{pxk} \\ \xi_{yij} &= \sum_{k=1}^j \frac{m_{yik} l_s}{GJ_{tk}} l_{pyk} \\ \eta_{yij} &= - \sum_{k=1}^j \frac{m_{yik} l_s}{GJ_{tk}} l_{pxk} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

d) 弾性方程式

弾性方程式は次の行列方程式に組み立てられる。 $F$  は  $2n+2$  個の行と列を持つ正方形行列、 $\chi$  は  $2n+2$  個の未知数を要素とする柱状ベクトル、 $S$  は  $2n+2$  個の定数を要素とする柱状ベクトルである。 $F$  は  $\chi$  の係数である。図-16は各行列の中身を詳細に示している。式(8)の解は式(9)で与えられる。

$$F\chi = S \quad (8)$$

$$\chi = F^{-1}S \quad (9)$$

$F^{-1}$  は行列  $F$  の逆行列である。 $\chi$  を算出するのに必要な行列演算はコンピュータで簡単に実行できる。両端

行列名	F	$\chi$	S
	不静定反力X	不静定反力Y	支点変位
	1, 2, ..., n,	1, 2, ..., n,	$\xi_b, \eta_b$
支x承方向	1. X及びその振りモーメントによる係数 (行列A)	1. Yの振りモーメントによる係数 (行列B)	X1
	2. ...	2. ...	X2
	n. ...	n. ...	Xn
支y承方向	1. Xの振りモーメントによる係数 (行列C)	1. Y及びその振りモーメントによる計数 (行列D)	Y1
	2. ...	2. ...	Y2
	n. ...	n. ...	Yn
b支点	-1/n, -2/n, ..., -1, 0, 0, ..., 0, 0	0, 0, ..., 0, -1/n, -2/n, ..., -1, 0	$\xi_b$
n	0, 0, ..., 0, 0, 0, ..., 0, 0	0, 0, ..., 0, 0, 0, ..., 0, 0	$\eta_b$

図-16 行列要素

支持, すなわち,  $b$  端も振りに対して拘束されている場合は, 静定振りモーメントの合計値  $M_0$  の半分が荷重振りモーメントとして  $b$  端 ( $n$  断面) に作用すると考えることにより, これまでの理論がそのまま適用できる。変わるのは柱状ベクトル  $S$  の中身だけで, 扉体断面が全幅にわたり一様である場合の不静定反力は片側支持の値と一致する。

e) 解析例

弾性方程式で得られた  $X_i, Y_i$  を積分して剪断力  $Q_x, Q_y$  が得られ,  $Q_x, Q_y$  を積分して曲げモーメント  $M_x, M_y$  が得られ, b) 項で述べた  $m_s$  と  $m_{fi}$  を積分して内部振りモーメント  $T_i$  が得られ,  $T_i/GJ_{ti}$  を積分して回転角  $\theta_i$  が得られ, これらから応力分布が得られる。支承反力は  $X_i, Y_i$  と静定反力の和として与えられる。以下に 3 種類の解析例を示す。

[解析例 1]

魚腹型断面が片側で支持される一般的な例で, 扉体構造は一様である。後で曲げ振り理論との比較を行

う。計算条件は以下のとおりである。

- 扉高:  $H_g = 6400$  mm    断面:  $H_k = 6000$  mm
- 扉幅:  $L_g = 25000$  mm     $r_o = 3480$  mm
- 傾斜角度:  $\theta = 15^\circ$      $r_i = 9000$  mm
- 支承位置:  $L_{py} = 391$  mm     $t_o = 20$  mm
- $L_{px} = 3206$  mm     $t_i = 20$  mm
- 支承区画:  $n = 8$     計算角度:  $\theta_c = 30^\circ$

記号は図-17 に示したもののほかは図-6 のものを用いている。図-8 は本例である。図-18~20 が解析結果である。 $x$  軸が扉体の高さ方向,  $y$  軸がそれと直角方向に設定されている。記号は 2.2 項のほかの箇所と共通である。図-18 が支承反力, 剪断力, 曲げモーメント, 19 が内部振りモーメントを表す。横軸が断面の番号, 縦軸が解析結果を表すが, グラフの値はグラフ上に示した率を乗じた結果である。扉体構造が一様な場合は不静定反力の値が非常に小さく, したがって剪断力および曲げモーメントは小さく, 内部振りモーメントは静定振りモーメントに沿っていて, 扉体径間方向にはほ

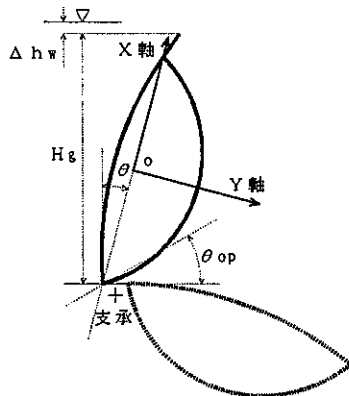


図-17 記号と座標系

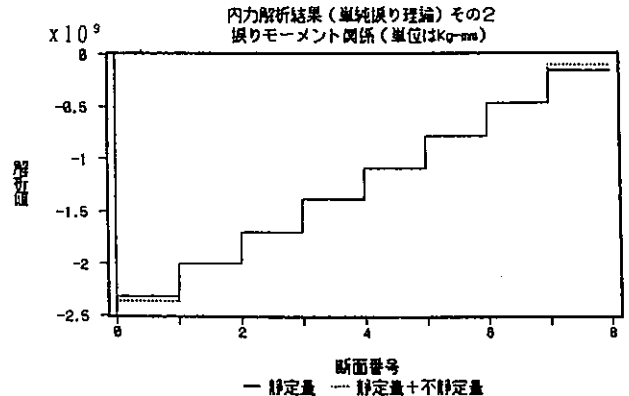


図-19 振りモーメント

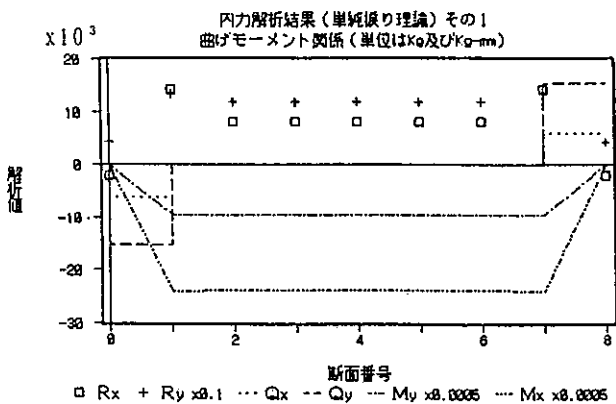


図-18 曲げモーメント関係

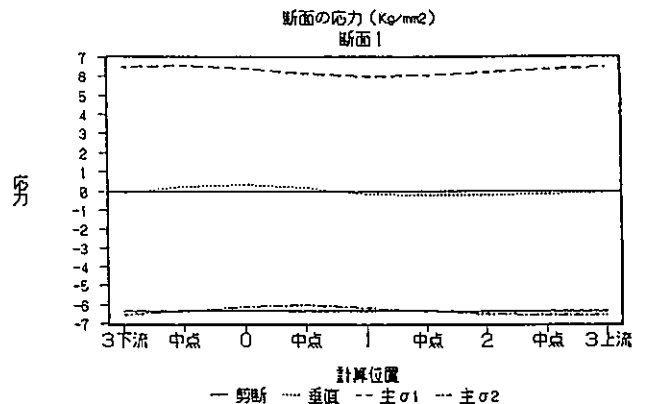


図-20 応力



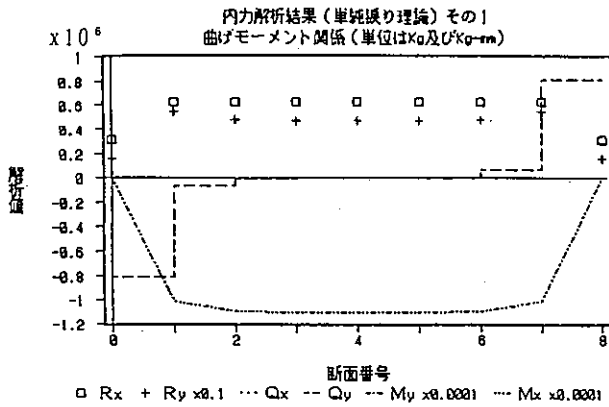


図-24 曲げモーメント関係

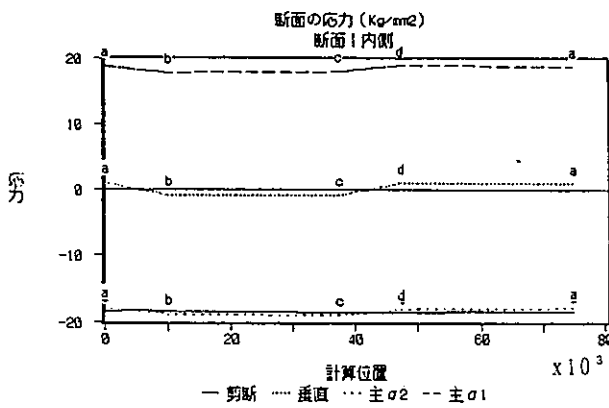


図-25 応力

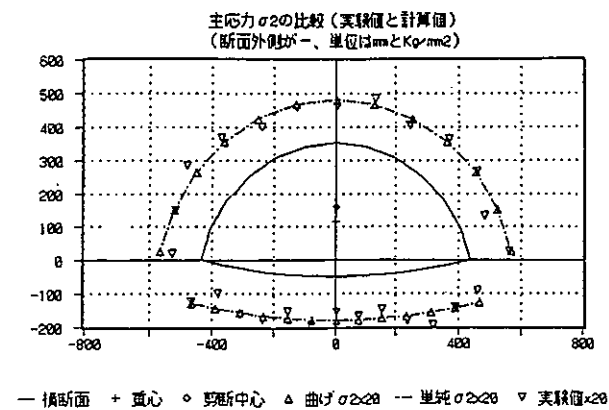


図-26 主応力分布

#### f) 模型実験

弾性方程式による解析方法の正しさを検証するために大型模型(幅 17.000 m×扉高 1,000 m)による強度実験を行った。その詳細は文献 2, 3 に示した。応力分布および変形の解析結果は概ね計測値と良い一致を示した。図-26 はその例で、主応力の横断面分布を示す。計測位置は 0~1 断面の間である。解析結果は単純

$\sigma_2$  である。断面の形状を応力値と共通の軸で表示する都合上、応力値の方に 20 を乗じた。

#### g) 支承移動の影響

弾性方程式の応用例の一つとして、図-2 に示した親ゲートが撓んだときの子ゲートの開閉荷重の解析方法を示す。時計方向に  $\theta$  だけ操作したときの荷重増加量  $M_d$  は式 (10)~(12) で与えられる。

$$M_d = M_f + \frac{dU}{d\theta} \quad (10)$$

$$\frac{dU}{d\theta} = \delta(u_x - u_y) \sin 2(\theta_d + \theta) \quad (11)$$

$$M_f = r_p c_{pf} \delta \{ w_{xp} \cos(\theta_d + \theta) + w_{yp} \sin(\theta_d + \theta) \} \quad (12)$$

$U$  は開閉により扉体内に蓄えられる歪エネルギー、 $\delta$  は代表する回転支承の変位量、 $u_x$  および  $u_y$  は代表する回転支承において  $x$  および  $y$  軸方向に単位変位を与えたときに発生する扉体の歪エネルギー、 $\theta_d$  は  $x$  軸から反時計方向に計った  $\delta$  の方向、 $M_f$  は支承ピンの摩擦トルク、 $r_p$  は支承ピンの半径、 $c_{pf}$  は軸受けの摩擦係数、 $w_{xp}$  および  $w_{yp}$  は代表する回転支承の  $x$  および  $y$  軸方向に単位変位を与えたときの支承軸の摩擦荷重である。 $u_x$  および  $u_y$  は単位変位量に対する弾性方程式の解を用いて算出される振りモーメントおよび曲げモーメント分布図から算出でき、 $w_{xp}$  および  $w_{yp}$  は不静定反力を用いて次式から近似的に算出できる。

$$w_p = (w_{px}^2 + w_{py}^2)^{1/2} \quad (13)$$

$$\text{ただし、} w_{px} = \sum_{k=0}^n |X_k|, w_{py} = \sum_{k=0}^n |Y_k|$$

$x$  および  $y$  軸は子ゲートの主軸に一致している必要がある。図-2 に示した親子ゲートについて開閉荷重の増加量を算出した結果、 $dU/d\theta$  は自重による転倒モーメントの約 1%、全倒伏モーメントの 0.5% 程度、 $M_f$  は止水ゴムによる摩擦モーメントの 0.5% 程度であり、開閉荷重の変化量は実用上無視できるが、支承反力の増加率は約 10% であって、扉体の解析上無視できない。f) の模型を用いて荷重変化を計測したが、有意義な差は認められなかった。

#### 2.3 立体骨組み理論による解析例

図-4 のドックゲートを例にとり、振り構造ゲートが立体骨組みとして解析できることを示す。

a) 解析モデル

ゲート断面のスケッチを図-27に示す。構造はこれまでに述べてきた振り構造ゲートと大同小異であって、扉体は薄肉閉断面であり、隔壁が一定間隔に並び、端末壁板は大きな支持反力に耐える重構造である。支承が存在せず、その代わりに扉体の下縁に沿って木座が設けられていて、水圧力によりドック底の壁面に押し付けられ、反力が発生する。解析モデルは閉断面部材と隔壁部材からなり、閉断面部材は剪断中心を結んだ線に置き換え、隔壁を2本の線に置き換えたもので、その全体形状を図-28に示す。図の3~6, 6~9等が閉断面部材であり、1~2, 2~3等が隔壁を表す。立体骨組み構造では、一般的に曲げモーメントと軸力が主役であって、部材剛性は重心に集中しているとしてモデルが組まれる。部材の振り剛性が無視できない場合でも、剪断中心が重心と一致していることがほとんどであるので、不都合が生じることは少ない。振り構造では剪断中心と重心が一致していないのが普通であって、曲げ剛性が剪断中心に集中しているとする、隣接部材の節点間距離が変化することになる。これは部材剛性が変化したのと同じ結果になるから、内力分布を把握するためには隣接部材の剛性を節点の移動量に合わせて調整する必要がある。図-27に示すモデルでは

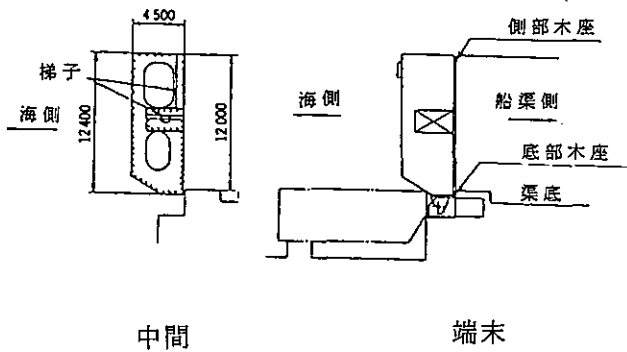


図-27 断面構造

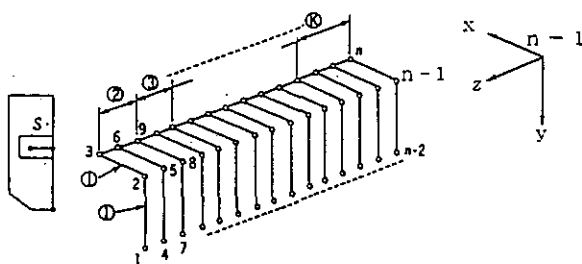


図-28 解析モデル

隔壁に相当する部材が剛性の調整を必要とする方向にあるが、隔壁を含む断面は変形し難いので、弾性方程式と同じ取扱いをして、断面は変形しないものと考え、隔壁部材の剛性は計算誤差が大きくなる範囲で十分大きな値を与える考え方でこのモデルが正当化できる。

b) 解析結果

図-29は内部振りモーメントと曲げモーメントを示し、図-30は試験負荷時の変位の実測データと解析値を示している。解析値は実測値の傾向を良く再現している。応力についても同じ結果を得ている。立体骨組み理論と弾性方程式による解析結果は同一内容であるはずである。

c) 横強度

横断面形状が変化しないとの前提を設定して立体骨組み解析を示したが、実際は横断面も変形するので、

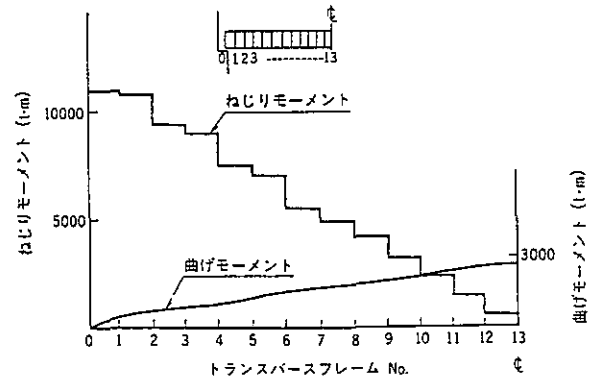


図-29 解析結果

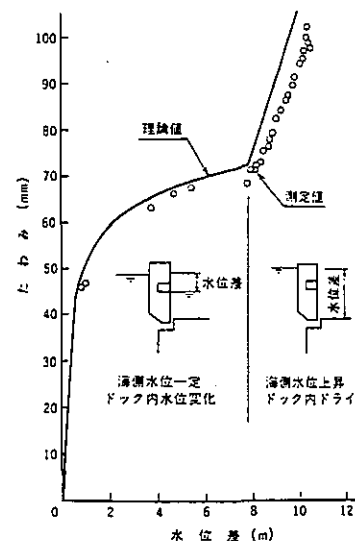


図-30 変位量

この強度的な影響を別個に解析する必要がある。変形形態は端末、中間、中央で質的に異なるので、それぞれに適した解析方法を用いる必要がある。例として端末壁と端末支承を含む断面の解析方法を示す。作用する外力要素は閉断面部材の曲げおよび振り剪断応力、扉板側防撓材を通して端末壁に伝達される端末荷重、2.2のb項で述べた  $M_0$  (反力モーメント)、端末支承に作用する静定反力  $w$  (=端末荷重) および不静定反力  $X$  (=曲げ剪断応力) である。図-31は  $M_0$  (=振り剪断応力+静定反力の偶力) を形成する端末支承反力  $R_H$  とベアリング木座反力  $R_T$  の作用点を示す。 $L_E$  は偶力の腕の長さである。 $M_0$  の大きさは静定振りモーメントから定まるので、 $R_T$ 、 $R_H$  は次の式で与えられる。

$$R_T = M_0 \div L_E \quad (14)$$

$$R_H = R_T - (w_{x1} + X_1) \quad (15)$$

添え字  $x$  は  $x$  方向、1 は節点番号を表す。 $R_T$  はベアリング木座に沿って一様に分布すると考える。 $R_H$  は  $x$  方向の支承反力であり、 $y$  方向の反力として自重  $X$  (3/16) を考える。端末荷重は防撓材位置に適宜分配する。解析は2次元の有限要素法を用いて行えるが、簡単な静定系に置き換える方法もある。支承軸の荷重は  $x$ 、 $y$  方向反力を合成して得られる。この値は  $R_T$  の存在により中間支点到比較して著しく大きい。

#### d) 剪断座屈

振り構造は閉断面部材が純剪断に近い状態にあるから、剪断座屈に対する配慮が重要である。検証は簡便化されている方法で行うことができる。扉体面には種々の開口が設けられる。応力集中を緩和するために補強がなされるが、剪断座屈強度の低下にも配慮が必要である。

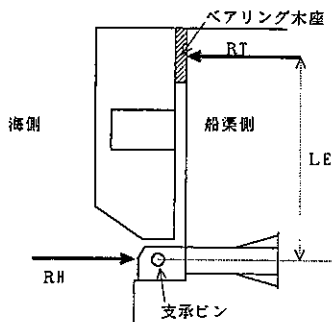


図-31 端末反力

#### e) 応力集中

図-3に示した扉体コーナは大きな円弧形状をしている。図-4では直角形状として、応力集中を強度計算に織り込んだ<sup>7)</sup>。

### 3. 曲げ振り理論による解析

#### 3.1 断面応力の分布形状

単純振り理論で述べた断面応力に加え新たに発生する応力は曲げ振りモーメント  $T_w$  による剪断応力  $\tau_w$  および、その変化率  $d\Psi/dz$  に応じて生じる垂直応力  $\sigma_z$  である。 $\sigma_z$  は断面内で釣り合うので、断面力は形成されない。 $\tau_w$  の分布は剪断流で定まり、 $\sigma_z$  の分布はそり関数  $\Psi$  で定まる。図-32は図-8と同じ断面の曲げ振り剪断流とそり関数を示す。曲げ振りの剪断流と曲げの剪断流の相違は明らかである。単純振り剪断流と同様に曲げ振り剪断流も剪断中心周りにモーメントを形成していて、 $T_w$  と  $T_s$  の和が外力振りモーメントと釣り合う。したがって、曲げ振りの影響度合いは

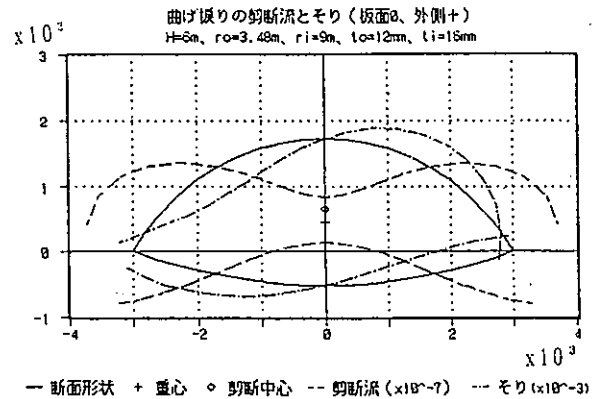


図-32 魚腹型

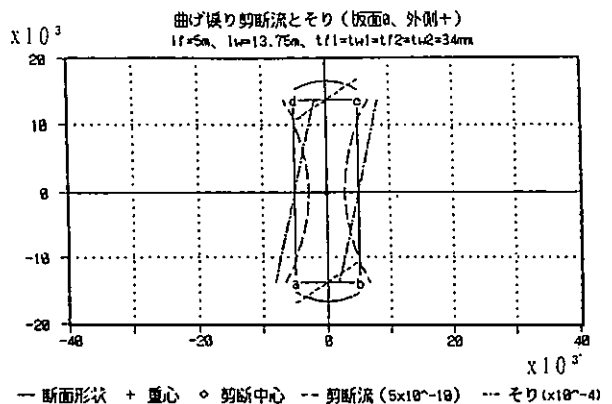


図-33 箱型

$T_w$ が全体に占める比率で計ることができるが、単純振り剪断流の値が断面全周にわたり一定の値であるのに対し曲げ振り剪断流は符号が変化するので、 $T_w = T_s$ であっても $\tau_w$ が $\tau_s$ よりも格段に大きくなる。この点で、後で述べるように、曲げ振り現象が断面の応力分布を大きくかき乱す要因である。図-33は図-9と同じ断面の計算結果である。

### 3.2 弾性方程式による解析例

#### a) 解析方法

解析モデルと計算外力は単純振り理論と変わらない。変位計算法の集中振りモーメントに対する算式が曲げ振りを考慮した式に入れ替わる。振り角 $\Theta$ は次の曲げ振りの基礎方程式を図-12の荷重と境界条件に対して解いて得られる。

$$EC_{bd} \frac{d^4 \Theta}{dz^4} - GJ_t \frac{d^2 \Theta}{dz^2} - m_t = 0 \quad (16)$$

$EC_{bd}$ は曲げ振り剛性、 $GJ_t$ は単純振り剛性、 $m_t$ は外部振りモーメントである。一様断面に対する解は式(17)のようになる<sup>8)</sup>。

$$\Theta = \frac{T}{EC_{bd}} \left[ \frac{z}{a^2} - \frac{\text{sh}\{a(1-c)\}\text{sh}(az)}{a^3 \text{sh}(al)} \right] \quad z \leq c$$

$$\frac{T}{EC_{bd}} \left[ \frac{c}{a^2} - \frac{\text{sh}\{a(1-c)\}\text{sh}(az)}{a^3 \text{sh}(al)} + \frac{\text{sh}\{a(z-c)\}}{a^3} \right] \quad z \geq c \quad (17)$$

ただし、 $a = \sqrt{DJ_t / EC_{bd}}$ 、 $c : z = c$ が荷重点

shはsinhを示す。本論文の目的からは曲げ振り現象が解析結果にどのような影響を及ぼすかを知ることができれば十分であるので、この式を用いて式(2)を次の式に入れ替える。

[ $i$ 点の $m_i$ による $j$ 支承点の回転角]

$$\theta_{ij} = \left\{ kj - \frac{\text{sh}(k[n-i])\text{sh}(kj)}{\text{sh}(kn)} \right\} \frac{m_i}{k^3 EC_{bd}} \quad (j \leq i)$$

$$\left\{ ki + \text{sh}(k[j-i]) - \frac{\text{sh}(k[n-i])\text{sh}(kj)}{\text{sh}(kn)} \right\} \frac{m_i}{k^3 EC_{bd}} \quad (j > i) \quad (18)$$

ただし、 $k = a/l_s$

[ $i$ 点の $m_i$ による $j$ 支承点の変位]

$$\left. \begin{aligned} \xi_{ij} &= \theta_{ij} l_{py} \\ \eta_{ij} &= \theta_{ij} l_{px} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

#### b) 解析例

弾性方程式で得られた不静定反力( $X_i, Y_i$ )から内力を算出する手順は単純振り理論とまったく同一である。ただし、内部振りモーメントは $T_w$ と $T_s$ の合計であるので、それぞれの振りモーメントを求める必要がある。また、曲げ振りにより新たに発生する $\sigma_z$ および $\theta$ を算出するために以下の算式が必要である。

[ $i$ 断面に作用する外部振りモーメント]

$$m_{ei} = m_{si} + X_i l_{py} + Y_i l_{px} \quad (20)$$

[ $j$ 断面の回転角およびその微分値]

$$\theta_j = \sum_{k=0}^n \theta_{kj} \quad (21)$$

$$\theta'_j = \sum_{k=0}^n \theta'_{kj} \quad (22)$$

$$\theta''_j = \sum_{k=0}^n \theta''_{kj} \quad (23)$$

$$\theta'''_j = \sum_{k=0}^n \theta'''_{kj} \quad (24)$$

ただし、 $\theta_{kj}$ は $k$ 断面に作用する $m_{ek}$ による $j$ 断面の回転角、'は $z$ についての全微分を表す。

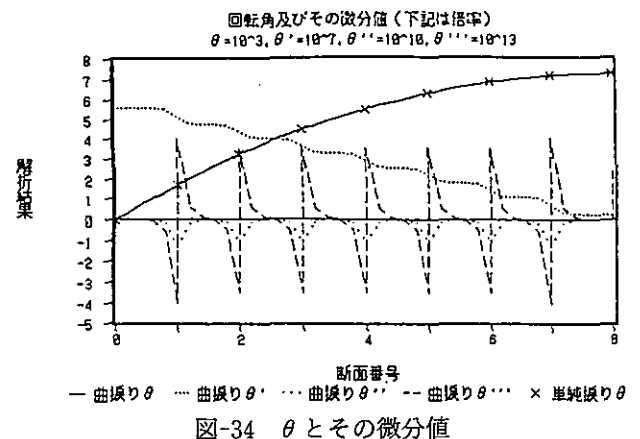
[ $j$ 断面の単純振りモーメント]

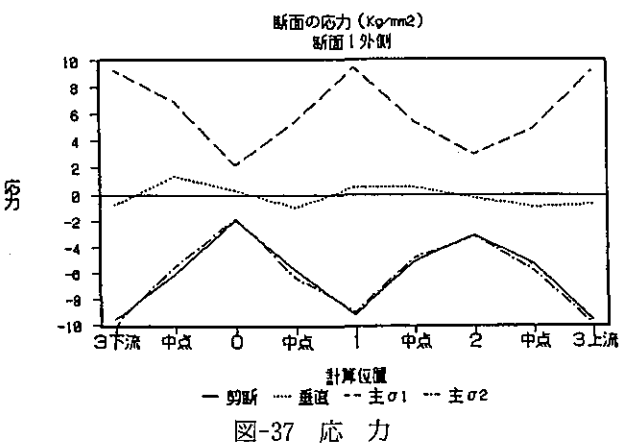
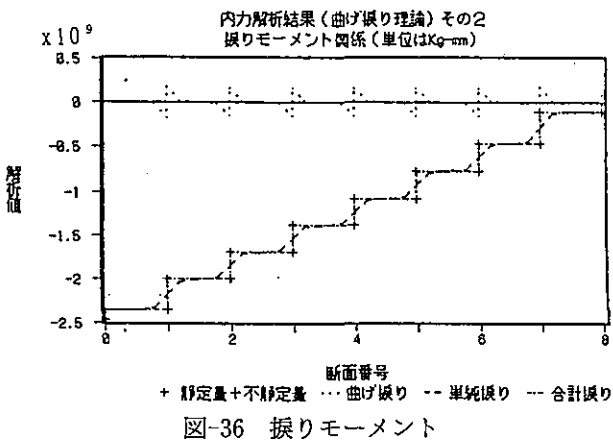
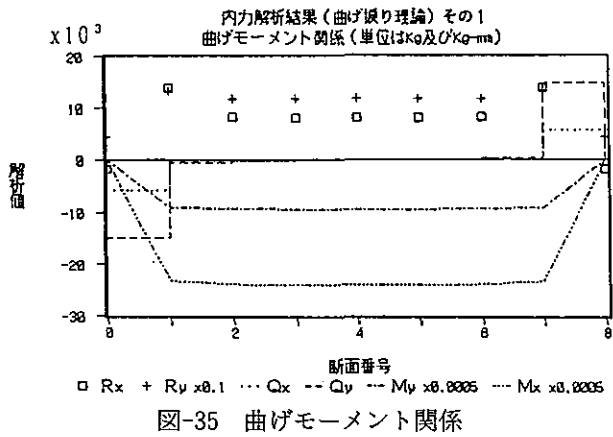
$$T_{sj} = GJ_t \theta'_j \quad (25)$$

[ $j$ 断面の曲げ振りモーメント]

$$T_{wj} = -EC_{bd} \theta'''_j \quad (26)$$

$T_{sj}$ および $T_{wj}$ は支承点間でも変化するが、以上の $\theta$ に関わる算式では、 $j$ を実数として取り扱うことにより算出することができる。応力分布はこれらから算出する。以下の事例は単純振り理論と同じケースであり、番号は対応事例を踏襲している。





[解析例 1]

図-34~37が解析結果である。図-34は $\theta$ とその微分値を示す。単純理論による $\theta$ も×印で示した。横軸は断面番号である。縦軸は計算結果に表示の倍率を乗じた値を表す。 $\theta$ は概ね滑らかな曲線であり、支承を含む断面では単純振り理論による解析結果と厳密に一致する。 $\theta$ は $T_s$ に比例する量であって、明らかに単純

振り理論と異なっている。 $\theta''$ は $\sigma_z$ に比例する量であって、両端の区画を除いて概ね周期的に変化する。 $\theta'''$ は $T_w$ に比例する量であって、両端の区画を除いて概ね周期的に変化するのと同じであるが、支承を含む断面を境にして符号が反転する。支承の拘束によりそり変化の方向が急転する結果と考えられる。図-35が曲げモーメント関係であるが、単純振り理論と大きな相違はない。計算基礎となる不静定反力にほとんど差がないからである。図-36は振りモーメントを示す。 $T_s$ と $T_w$ は支承点間で変化している。しかし、合計した値は一定となり、外力から算出した内部振りモーメント(+印)に等しい。このことは曲げ振りモーメントの平均振幅が断面の性質には無関係に支承点の数で定まることを示している。すなわち、支承点を増やせば曲げ振りモーメントの平均振幅は減少するものと考えられる。図-37は断面1の外(左)側の剪断応力、垂直応力、および主応力を示す。図-20と比較すれば、曲げ振りによる乱れがいかに大きいか明らかである。断面1内の乱れは同程度であり方向が反転していること、および断面0では曲げ振りの影響が小さいために応力分布は平坦であることを確認している。応力に乱れが生じても全体が純剪断に近い状態であることに変わりはない。乱れの原因は $\tau_w$ および $\sigma_z$ であり、また、影響度合いは曲げに伴う応力と比較してはるかに大きい。 $T_w$ は $T_s$ と比較してはるかに小さな値であるが、応力分布に大きな影響を与える点に注目すべきである。扉体の非駆動端に向かって単純振りモーメントは減少するが、曲げ振りモーメントの値は同じ程度を保ちながら周期変化するの、扉体の径間中央や非駆動端部では曲げ振りの影響は一層顕著なものとなる。しかし、小形ゲートではこの部分は強度的に十分余裕があるのが普通であって、乱れ現象を無視しても工学上問題になることはない。超大型ゲートでは、経済設計の考え方から断面の板厚を非駆動端部に向かって減じるから、扉体は広範囲に渡って強度的臨界状態となるので、曲げ振り現象を無視した解析は成り立たない。曲げ振り現象は内力分布よりも応力分布に大きく影響する。

[解析例 2]

図-38は変形量を示す。大きな傾向は内力も含めて解析例1と同じであるが、細部について若干異なる。

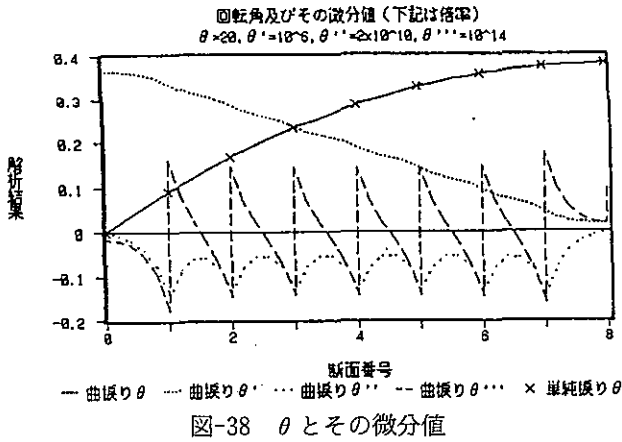


図-38  $\theta$ とその微分値

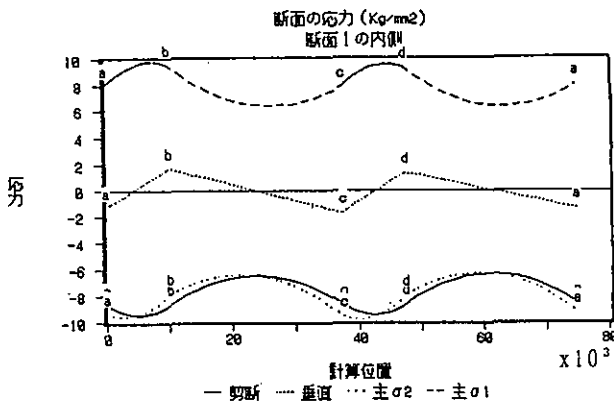


図-39 応力

$\theta''$ , および  $\theta'''$  の支承点と支承点の間の変化が解析例 1 では 0 軸に張り付く傾向があるのに対して, 解析例 2 では 0 軸から離れている。この相違は主に  $K$  値によるものであることを確認している。解析例 1 では  $K$  は 9.73 であるのに対し, 解析例 2 では 3.07 である。図-39 は断面 1 の内側の剪断応力, 垂直応力, および主応力を示している。応力の乱れは解析例 1 に比較して少ない。区分数はどちらも同じであるから,  $T_s$  と  $T_w$  の平均的比率は等しいはずであるので, この差は形状の影響であると考えられる。すなわち, 魚腹型断面よ

りも, 長方形断面の方が曲げ振りモーメントに対して効率が低いことを示している。

### 3.3 有限要素法による解析例

図-5 に示した超大型ゲートは有限要素法で解析されているので, これを題材として, この解析方法の意義につき述べる。

#### a) 変形の再現性

有限要素法はこれまでに種々の種類の要素を用いた方法が実用化されてきたが, 対象構造物の性格と解析目的に対して適切な方法が選択され, また, 要素分割が正しく行われるならば, 解析結果は模型実験に劣らない再現性を持っている<sup>9)</sup>。曲げ振り理論が自然現象にかなった考え方であるならば, 解析結果にはその証しが現れているはずである。

#### b) 解析結果

文献<sup>9)</sup>の説明を引用する。扉体は中央で分割されていて, 端部の上部と下部が支持されている。箱型であり, 扉板は補助縦桁により補強され, 補助縦桁は水平桁で支持され, 水平桁は隔壁で支持され, 隔壁の底部はローラで支持されている。解析は NASA の "NAS-TRAN" を用いて IBM9021 により行われた。要素節点の自由度は 6 であり, 梁要素ともなる。ゲート全体が約 2500 の板要素と約 2000 の梁要素に分割されている。水圧荷重は扉板に作用するが, 板要素に局所的な曲げは発生しない。図-40 は解析結果の例で, 扉板上の主応力の大きさと方向を示している。扉板全体が純剪断に近い状態にある。

#### c) 断面応力の比較

弾性方程式との比較を行う。有限要素法については前項で扉板の主応力を示したが, 断面全体の応力が必要であるので, 新たに計算した結果を用いた。参考文献に示されている寸法およびメッシュ分割に従い, 同

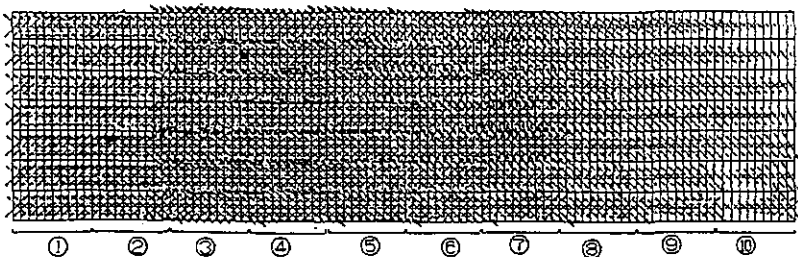
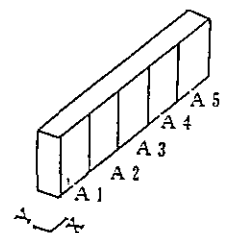


図-40 主応力の分布 (扉板)

最大主応力	13.7
ケース番号	1



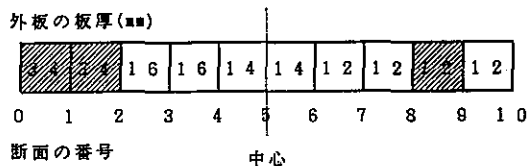


図-41 板厚変化

じプログラムを用いて、IBM750により計算したが、扉板の主応力が図-40から読み取った値と一致することを確認した。板要素の応力は板要素の中央の値と考えられるので、比較は板要素の中央を通る断面で行うことを基本としたが、ローラ間の中間の断面は要素の境界に一致するので、隣合う要素の値の平均値をもってその断面の応力とした。図-41は板厚分布と断面番号を示す。板厚は全周一様である。応力を比較する断面は、弾性方程式の適用が一様断面に限られることを考慮して、図の斜線区画における左端、中央、右端の9断面とした。図-9および33は断面0~2を示すが、補助的な部材は含んでいない。図-42は各断面における主応力 $\sigma_1$ および $\sigma_2$ を曲げ振り(曲げ)、有限要素(有限)、および、単純振り(単純)について比較している。各

グラフに示す“内側”および“外側”は扉体の中心(図-41参照)側か反対側かを示している。グラフの中のa~dは図-9および33が示す断面内の場所記号に対応している。曲げ振りの結果が単純振りよりも有限要素法の値を良く近似している。有限要素法と曲げ振りは本来良い一致を示すはずであるが、両者を詳しく比較して見ると、断面2の外側、および断面8~9においてかなりの食い違いが認められる。この結果は主に曲げ振りのモデル化に原因があると考えられる。すなわち、①横断面の変形を無視し、②分布荷重を集中荷重に置き換え、③板厚変化の影響を無視したことである。横断面と補助部材の変形は剛性の少ない断面8~9、板厚変化の影響は断面2付近に大きく現れて不思議でない。このような統一性を欠いた比較であったにも関わらず、曲げ振り現象が応力分布に大きく影響していることは否定し難く、弾性方程式が断面変化に対応できない限り、超大型ゲートでは有限要素法による解析が不可欠であることを示している。

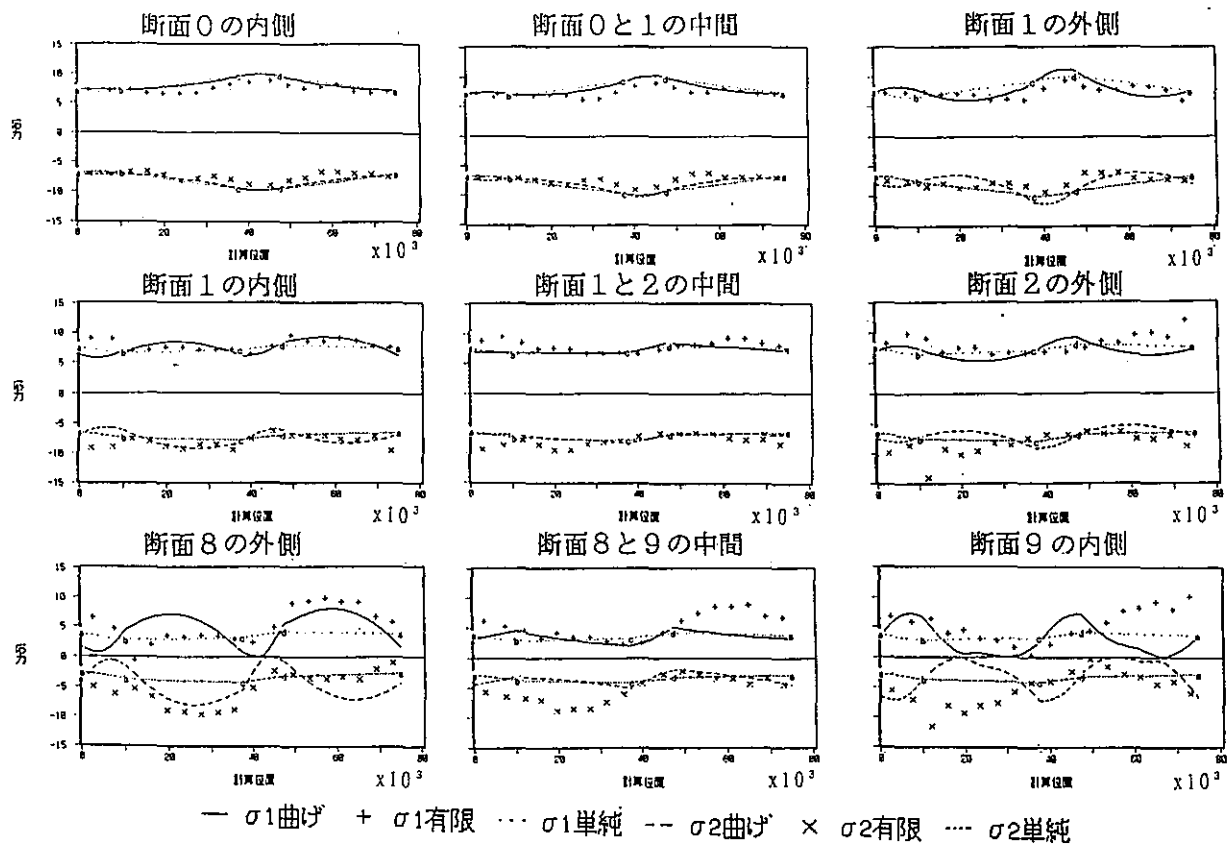


図-42 断面の主応力 (kg/mm<sup>2</sup>)

表-1 適用範囲

		解 析 理 論	
		単純振り	曲げ振り
ゲート断面	一様	弾性方程式 立体骨組み 簡略化解析法	弾性方程式 有限要素法
	変化	弾性方程式 立体骨組み	有限要素法

#### 4. 簡略化解析法

以上の方法は複雑であり、数の多い小形ゲートを短時間で処理するには不向きである。解析が簡略化できる二つの方向がある。どちらも曲げ振り剛性は無視する。① 曲げ剛性を無視する方法：扉体の変形と応力は振り剛性と剪断流だけで算出でき、非常に簡単になる。② 支承が連続していると考える方法：釣合条件を微分方程式で表すことができ、一様断面に対して解が得られている<sup>8)</sup>。剪断中心と重心が一致する条件を追加した例もある<sup>9)</sup>。計算は①に比較し若干複雑である。

#### 5. おわりに

成果を大きくまとめると以下ようになる。

① 曲げ振りモーメントによる剪断応力は同じ大きさの単純振りモーメントによる剪断応力に比較して段違いに大きな値を示す。生じる曲げ振りモーメントの値は小さいが、結果的に断面応力への影響が無視できない。

② 曲げ振りは扉体全長にほぼ等しい大きさで反復して現れる。したがって、振りモーメントの小さい非駆動端に近いほど断面応力への影響が大きくなる。全長の大半が応力的に臨界状態にある超大型ゲートでは曲げ振りによる応力が部材選択のうえで支配的である範囲が広く存在するので、曲げ振りを無視して解析は成り立たない。

③ 表-1 は各解析方法の適用範囲を示す。簡略化解析法は小形で一様断面のゲートまで、単純振り理論による弾性方程式と立体骨組み理論は断面変化がある大型ゲートまで、有限要素法は超大型ゲートまで適用できる。

④ 残された課題と対応：1) 曲げ振り理論による弾性方程式を大型ゲートに適用するためには式 (17) に代わり変断面に対応できる  $\theta$  の計算式が必要である。2) 扉体の大きさに関する適用限界を定量設定するためには曲げ剛性、断面変化、曲げ振り剛性、支承点数などの影響を系統的に把握する必要がある、多数ケースの解析が必要になる。3) 振り構造は橋梁等のほかの分野も含めた超大型構造物に適用できる可能性がある。

#### 参考文献

- 1) M.A.N KLAPPENWEHRE LIEFERVERZEICHNIS
- 2) 寺田 溥：魚腹型転倒水門扉の強度，農業土木学会京都支部発表会，1965
- 3) 寺田 溥：三菱魚腹型水門扉，三菱重工技報，3 (2)，127-129，1965
- 4) 寺田 溥 ほか：ドック用トーショントイプフラップゲートの開発，三菱重工技報，16 (6)，723-733，1979
- 5) Yachiyo Engineering Co., Ltd., Final report of preliminary engineering and cost estimates (phase 1 & 2) for the study of alternatives to the panama canal, commission for the study of alternatives to the panama canal, 1992 & 1993
- 6) Von o. Professor Dr. Paul Cicin, Die Fischbauchklappe und verwandte Wehrsysteme, DER BAUINGENIEUR, 1958 Heft 10, 1958
- 7) Timoshenko and Goodier: *Theory of Elasticity*, Mc Graw-hill, p. 301, Koogakusha, 1959
- 8) 真鍋正寛 ほか：開断面の薄肉構造理論，静定編 I～III，工学研究，14，1965，不静定編 I～IV，15-11・12 および 16-1・2；1967
- 9) 寺田 溥：Stress analysis of flared tubular joint stiffened with diaphragms, Master Thesis prepared for Prof. J. G. Bouwkamp of U. of California at Berkeley, 1969
- 10) Von Dipl.-Ing. I Borocz, Eine Methode zur Berechnung der Fischbauchklappe, DER BAUINGENIEUR, 1966 Heft 1, 1966
- 11) 林政 輝 ほか：シェル構造フラップゲートの静的解析および固有振動数の計算法，石川島播磨技報，9 (3)，258-265，1969

(平成8年8月12日受理)

Information is given to show various analytical methods which are based upon simple torsion theory, bending-torsion theory (theory including bending-torsion) or simplified ideas to facilitate quick calculation. The relationships and differences between each method are clarified to help choose the proper method for analytical cases and purposes. The effect of bending-torsion appears more strongly in the stress distribution of the gate section rather than the internal forces of the section and can be calculated by the finite element method more accurately. Sound designs would not be obtained for super large gates of torsion type without considering gate deformation due to bending-torsion as well as simple torsion. Although torsion type structures have several advantages essentially of a structural nature, its application is not familiar and not used often in actual structures. The difficulty of structural analysis is one of the reasons.

**Key words:** gate, torsion, bending-torsion, structural analysis, closed thin shell