

擦り構造式スイングゲート

潮位差利用操作

扉体の傾斜角度

TeraMatsu

目 次

頁

1 . はじめに	1
2 . 扉体の傾斜要因と回転中心の仮定	2
3 . R部接触型摩擦靴	3
3 . 1 転倒モーメント	3
3 . 2 起立モーメント	5
3 . 3 傾斜角方程式	6
4 . 先端接触摩擦靴	7
4 . 1 転倒モーメント	7
4 . 2 起立モーメント	8
4 . 3 傾斜角方程式	9
5 . 傾斜角方程式の係数整理	10
6 . 摩擦力の限界条件	11
7 . 解析結果と結論	12

1. はじめに

別冊「スイング方式」で振り構造によるスイング式ゲートを提案し、構想設計を示した。スイング方式は潮位差を利用して開閉操作を行う。潮位差力で扉体が移動中に扉体は底部摩擦で傾斜する。傾斜抑制の目的で扉体には引き力と浮力で形成する起立モーメントが働いている。本書の目的は扉体の傾斜角度を解析して引き力による傾斜抑制の可能性を確認することにある。

解析はスイング方式の提案書に示した構想設計について行う。表 - 1 はその計画データである。

表 - 1 計画データ

項目		条件値	単位	備考
全体寸法	径間	450	m	〇〇港設計結果A案 (超大型 Tidal Gate) (鋼重除く)
	扉高	23		
	扉巾	12.5		
水位条件	設置水深	16		
	潮位差	5		
	乾舷	2		
鋼重 (超概算)	扉体	18000	tf	
	戸当たり	1500		
	開閉機	500		
	合計	20000		

解析結果から次ぎの結論が得られた。

(1) 引き力による扉体傾斜抑制は可能である。

(2) 解析対象の構想設計については、

傾斜角度抑制の上から摩擦靴の接触点は扉板近接型が望ましい。

解析結果は最大潮位差の選択に利用できる。

摩擦係数 $f = 0.3$ なら扉体傾斜は起こらない。

2. 扉体の傾斜要因と回転中心の仮定

(1) 転倒要因

シュー荷重（操作浮力減少分）による摩擦力

潮位差荷重の下方向成分による摩擦力

潮位差荷重の下方向成分

(2) 起立要因

引き力S

シュー荷重

(3) 回転中心についての仮定

扉体：球座中心を通り、径間方向に平行な軸周りに回転する（図 - 3 参照）。

摩擦靴：接触点を通り、径間方向に平行な軸周りに回転する（図 - 1、5 参照）。

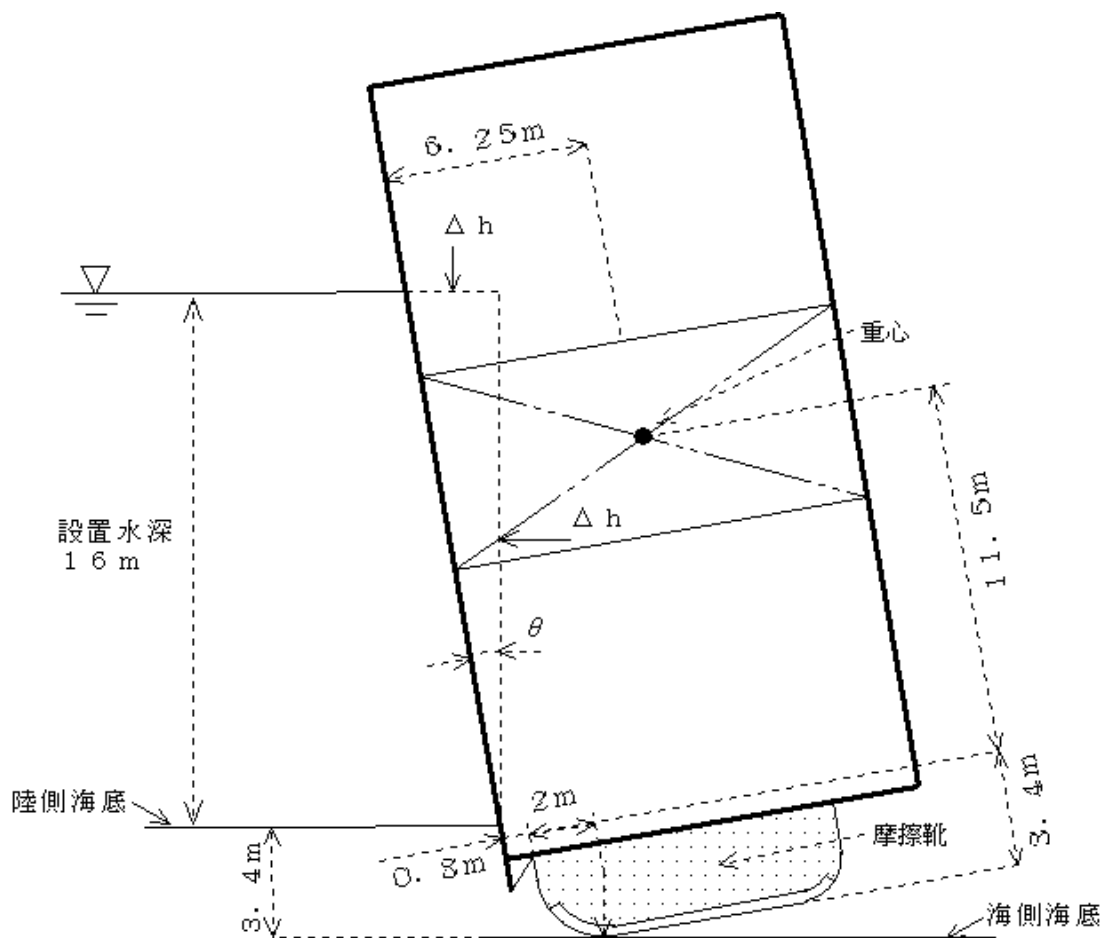


図 - 1 R部接触型摩擦靴の傾斜

図 - 1 はR部接触型摩擦靴の傾斜と関係寸法を示す。

3. R部接触型摩擦靴

図 - 1 に示す R 部接触型靴底の傾斜角度を解析する。

3.1 転倒モーメント

(1) シュー荷重と潮位差荷重下方向成分による摩擦力

転倒モーメント 1 =

$$S_d \times (L_s + \text{潮位差荷重下方向成分} \times 3 \div 5) \times f = 11.4 \times (L_s + h \times \tan(\theta) \times 3600 \times 3 \div 5) \times f$$

S_d : 潮位差作用中心 ~ 接触点の垂直距離 = $16 \div 2 + 3.4 = 11.4$

L_s : シュー荷重 (操作浮力減少分)

潮位差荷重下方向成分 : $= h \times 16 \times \tan(\theta) \times 225 = h \times \tan(\theta) \times 3600$

h : 潮位差

θ : 扉体傾斜角度

f : 摩擦係数

(2) 潮位差荷重

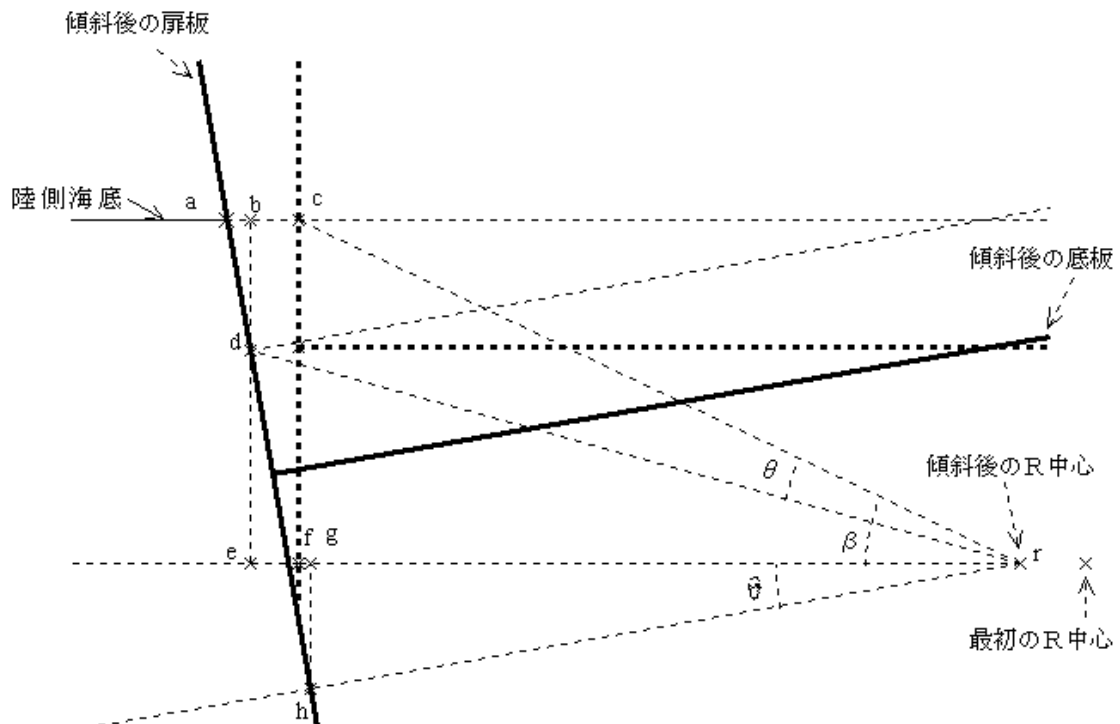


図 - 2 潮位差荷重と摩擦靴の水平距離算出図

図 - 2 にて潮位差荷重と摩擦靴摩擦点の水平距離算式の導出を行う。

転倒モーメント 2 = 潮位差荷重下方向成分 $\times (3 \div 5 \times S_f + 2 \div 5 \times S_s) =$

$$\text{潮位差荷重下方向成分} \times (S_f + 1.38) = h \times \tan(\theta) \times 3600 \times \\ ((9.4 + 2.8 \times \sin(\theta)) \times \tan(\theta) + 2.8 \times \cos(\theta) + 1.38)$$

備考 $9.4 = 16 \div 2 + 1.4$

$$2.8 \times \sin(\theta) = g h$$

$$2.8 \times \cos(\theta) = g r$$

$$S_f: \text{潮位差荷重下方向成分中心} \sim \text{摩擦点の水平距離} = 16 \times \tan(\theta) \div 2 + a b + e r \\ = 16 \times \tan(\theta) \div 2 + (1.4(1 - \cos(\theta)) + 2.8 \times \sin(\theta)) \times \tan(\theta) \\ + 2.8 \times \cos(\theta) + 1.4 \times \sin(\theta) \\ = 8 \times \tan(\theta) + 1.4 \times \tan(\theta) - 1.4 \times \sin(\theta) + 2.8 \times \sin(\theta) \times \tan(\theta) \\ + 2.8 \times \cos(\theta) + 1.4 \times \sin(\theta) \\ = (9.4 + 2.8 \times \sin(\theta)) \times \tan(\theta) + 2.8 \times \cos(\theta)$$

$$S_s: \text{潮位差荷重下方向成分中心} \sim \text{引き力作用点の水平距離} = S_f - f r + 12.5 \div 2 \\ = S_f + 3.45$$

$$a b = b d \times \tan(\theta) = (1.4(1 - \cos(\theta)) + 2.8 \times \sin(\theta)) \times \tan(\theta)$$

$$b d = (c f - d e) = 1.4 - 1.4 \times \cos(\theta) + 2.8 \times \sin(\theta) \\ = 1.4(1 - \cos(\theta)) + 2.8 \times \sin(\theta)$$

$$c f = 3.4 - 2 = 1.4$$

$$d e = c r \times \sin(\theta - \alpha) = c r \times (\sin(\theta)\cos(\alpha) - \cos(\theta)\sin(\alpha)) \\ = c r \times (c f \div c r \times \cos(\alpha) - f r \div c r \times \sin(\alpha)) \\ = c f \times \cos(\alpha) - f r \times \sin(\alpha) = 1.4 \times \cos(\alpha) - 2.8 \times \sin(\alpha)$$

$$f r = 0.8 + 2 = 2.8$$

$$e r = c r \times \cos(\theta - \alpha) = c r \times (\cos(\theta)\cos(\alpha) + \sin(\theta)\sin(\alpha)) \\ = c r \times (f r \div c r \times \cos(\alpha) + c f \div c r \times \sin(\alpha)) \\ = f r \times \cos(\alpha) + c f \times \sin(\alpha) = 2.8 \times \cos(\alpha) + 1.4 \times \sin(\alpha)$$

3.2 起立モーメント

(1) 引き力

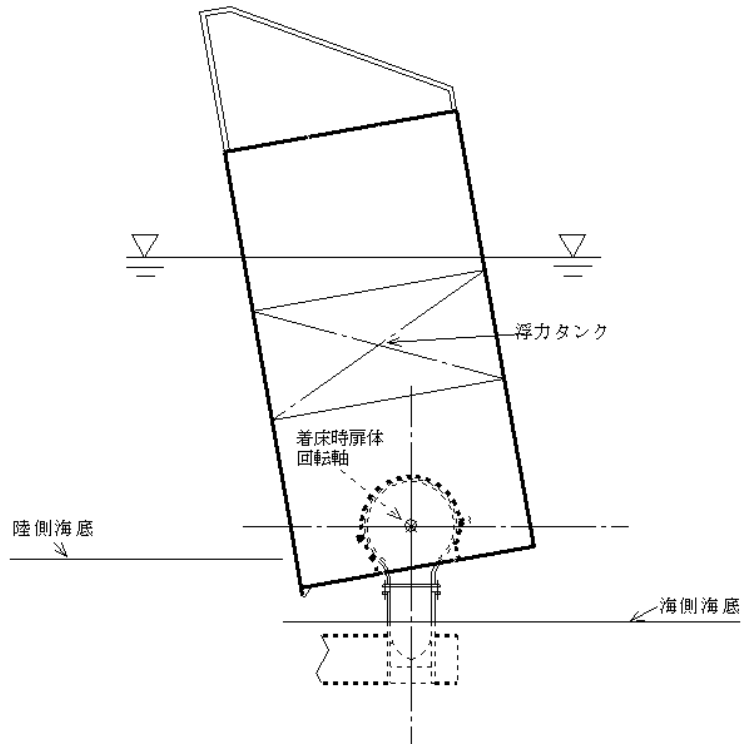


図 - 3 扉体傾斜（着床時）

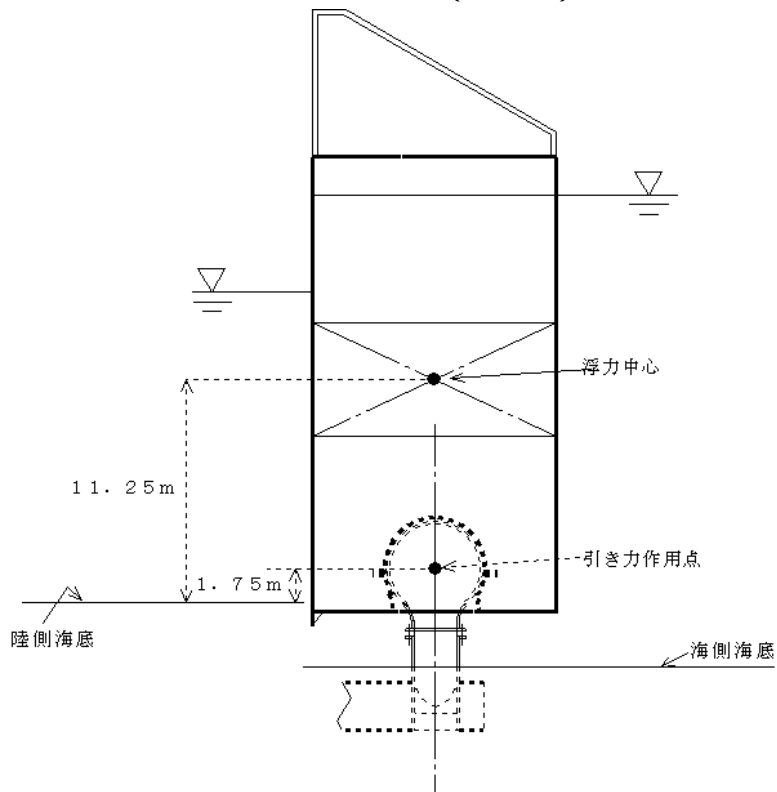


図 - 4 浮力中心と引き力作用点

図 - 3 は着床時の扉体傾斜、図 - 4 は扉体の浮力中心と引き力作用点を示す。

$$\text{起立モーメント 1} = S_p \times \sin(\theta) \times S = 9.5 \times \sin(\theta) \times S$$

S : 引き力

$$S_p : \text{浮力中心} \sim \text{引き力作用点迄の垂直距離} = 11.25 - 1.75 = 9.5$$

(2) シュー荷重 (操作浮力減少分)

$$\begin{aligned} \text{起立モーメント 2} &= L_s \times (S_r + R \times \sin(\theta)) \\ &= L_s \times (3.45 - 14.65 \times \sin(\theta) + 2 \times \sin(\theta)) \\ &= L_s \times (3.45 - 12.65 \times \sin(\theta)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_r : \text{重心から R の中心迄の水平距離} &= 12.5 \div 2 - 0.8 - R - 14.65 \times \sin(\theta) \\ &= 3.45 - 14.65 \times \sin(\theta) \end{aligned}$$

R : 靴底湾曲部 (R部) の曲率半径 = 2 m

3.3 傾斜角方程式

算出式の導出条件は下記の通り。

$$\text{転倒モーメント 1} + \text{転倒モーメント 2} = \text{起立モーメント 1} + \text{起立モーメント 2}$$

従って、

$$\begin{aligned} 11.4 \times (L_s + h \times \tan(\theta) \times 3600 \times 3 \div 5) \times f + h \times \tan(\theta) \times \\ 3600 \times ((9.4 + 2.8 \times \sin(\theta)) \times \tan(\theta) + 2.8 \times \cos(\theta) + 1.38) \\ = 9.5 \times \sin(\theta) \times S + L_s \times (3.45 - 12.65 \times \sin(\theta)) \end{aligned}$$

の値が小さいと仮定して、下記の近似化を行う。

$$\tan(\theta) =$$

$$\sin(\theta) =$$

$$\cos(\theta) = 1$$

従って、

$$\begin{aligned} 11.4 \times (L_s + h \times \tan(\theta) \times 3600 \times 3 \div 5) \times f + \\ h \times \tan(\theta) \times 3600 \times ((9.4 + 2.8 \times \sin(\theta)) \times \tan(\theta) + 2.8 + 1.38) \\ = 9.5 \times \sin(\theta) \times S + L_s \times (3.45 - 12.65 \times \sin(\theta)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 11.4 \times (L_s + h \times \tan(\theta) \times 3600 \times 3 \div 5) \times f + \\ h \times \tan(\theta) \times 3600 \times ((9.4 + 2.8 \times \sin(\theta)) \times \tan(\theta) + h \times \tan(\theta) \times 3600 \times 4.18) \\ = 9.5 \times \sin(\theta) \times S + L_s \times (3.45 - 12.65 \times \sin(\theta)) \end{aligned}$$

$$3600 \times 2.8 \times h \times \tan(\theta)^3 +$$

$$3600 \times 9.4 \times h \times \text{ } ^2 + (11.4 \times 3600 \times 3 \div 5 \times h \times f + 3600 \times 4.18 \times h - 9.5 \times S + 12.65 \times L_s) \times \text{ } + 11.4 \times L_s \times f - 3.45 \times L_s = 0$$

$$10080 \times h \times \text{ } ^3 + 33840 \times h \times \text{ } ^2 + (24624 \times h \times f + 15048 \times h - 9.5 \times S + 12.65 \times L_s) \times \text{ } + 11.4 \times L_s \times f - 3.45 \times L_s = 0$$

転倒モーメント1の備考 に示す $g h (= 2.8 \times \sin(\text{ }))$ を微量として無視すると上式は二次方程式となり、根が容易に得られる。即ち、

$$33840 \times h \times \text{ } ^2 + (24624 \times h \times f + 15048 \times h - 9.5 \times S + 12.65 \times L_s) \times \text{ } + 11.4 \times L_s \times f - 3.45 \times L_s = 0$$

4. 先端接触摩擦靴

図 - 5 に示す先端接触型靴底の傾斜角度を解析する。この算式は、2. と3. の算式の簡略化操作で作ることができる。

4.1 転倒モーメント

(1) シュー荷重と潮位差荷重下方向成分の摩擦力

転倒モーメント1 =

$$S_d \times (L_s + \text{潮位差荷重下方向成分}) \times f =$$

$$11.4 \times (L_s + h \times \tan(\text{ })) \times 3600 \times 3 \div 5 \times f$$

S_d : 潮位差作用中心 ~ 摩擦点の垂直距離 = $16 \div 2 + 3.4 = 11.4$

L_s : シュー荷重 (操作浮力減少分)

$$\text{潮位差荷重下方向成分} : = h \times 16 \times \tan(\text{ }) \times 2.25 = h \times \tan(\text{ }) \times 3600$$

h : 潮位差

: 扉体傾斜角度

f : 摩擦係数

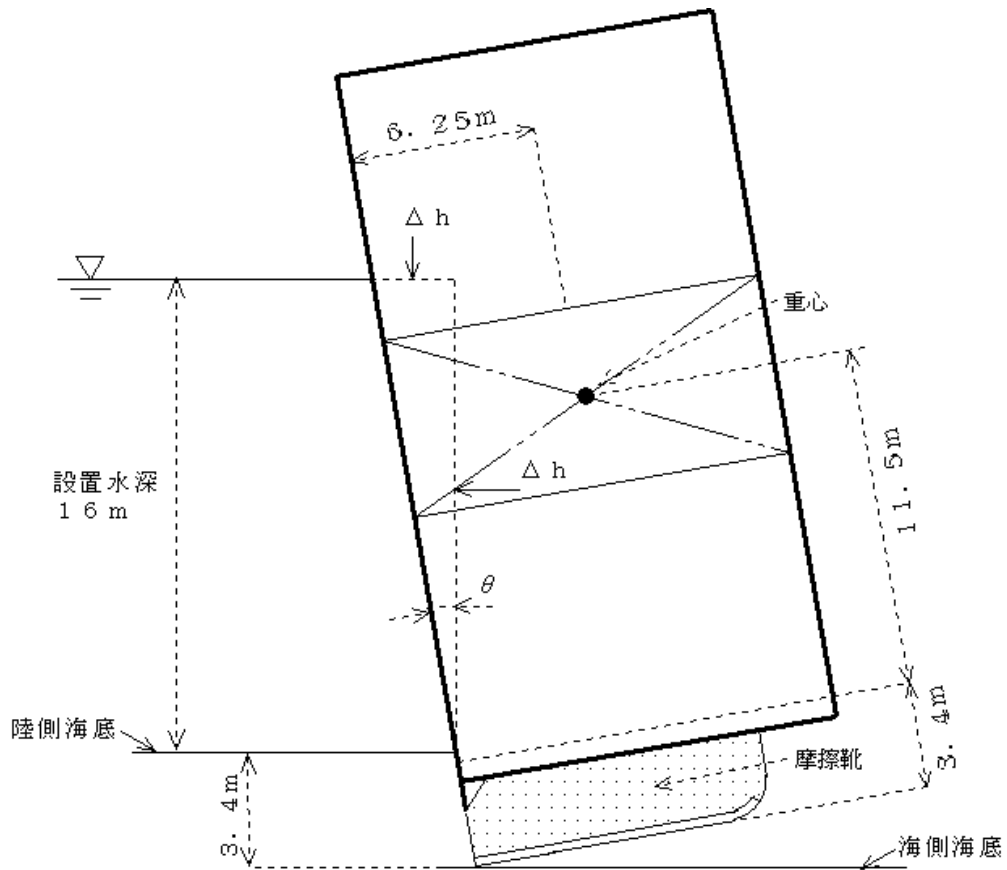


図 - 5 先端接触型靴底

(2) 潮位差荷重

$$\begin{aligned}
 \text{転倒モーメント} 2 &= \text{潮位差荷重下方向成分} \times (S_f \times 3 \div 5 + S_s \times 2 \div 5) \\
 &= \text{潮位差荷重下方向成分} \times (S_f + 2.5) \\
 &= h \times \tan(\quad) \times 3600 \times (11.4 \times \tan(\quad) + 2.5)
 \end{aligned}$$

S_f : 潮位差荷重下方向成分中心～摩擦点の水平距離

$$= 1.6 \times \tan(\quad) \div 2 + 3.4 \tan(\quad) = 11.4 \times \tan(\quad)$$

S_s : 潮位差荷重下方向成分中心～引き力 S 作用点の水平距離 = $S_f + 12.5 \div 2$

$$= S_f + 6.25$$

4.2 起立モーメント

(1) 引き力

$$\text{起立モーメント} 1 = S_p \times \sin(\quad) \times S = 9.5 \times \sin(\quad) \times S$$

S : 引き力

$$S_p: \text{浮力中心} \sim \text{引き力作用点迄の垂直距離} = 11.25 - 1.75 = 9.5$$

(2) シュー荷重 (操作浮力減少分)

$$\text{起立モーメント} 2 = L_s \times S_r = L_s \times (6.25 - 14.65 \times \sin(\theta))$$

$$S_r: \text{重心から接触点迄の水平距離} = 12.5 \div 2 - (11.25 + 3.4) \times \sin(\theta) \\ = 6.25 - 14.65 \times \sin(\theta)$$

4.3 傾斜角方程式

$$11.4 \times (L_s + h \times \tan(\theta) \times 3600 \times 3 \div 5) \times f + \\ h \times \tan(\theta) \times 3600 \times (11.4 \times \tan(\theta) + 2.5) \\ = 9.5 \times \sin(\theta) \times S + L_s \times (6.25 - 14.65 \times \sin(\theta))$$

の値が小さいと仮定して、下記の近似化を行う。

$$\tan(\theta) =$$

$$\sin(\theta) =$$

$$\cos(\theta) = 1$$

$$11.4 \times (L_s + h \times \tan(\theta) \times 3600 \times 3 \div 5) \times f + \\ h \times \tan(\theta) \times 3600 \times (11.4 \times \tan(\theta) + 2.5) = \\ 9.5 \times \sin(\theta) \times S + L_s \times (6.25 - 14.65 \times \sin(\theta))$$

$$3600 \times 11.4 \times h \times \tan^2(\theta) + (11.4 \times 3600 \times 3 \div 5 \times h \times f + \\ h \times 3600 \times 2.5 - 9.5 \times S + 14.65 \times L_s) \times \tan(\theta) + \\ 11.4 \times L_s \times f - 6.25 \times L_s = 0$$

$$41040 \times h \times \tan^2(\theta) + \\ (24624 \times h \times f + 9000 \times h - 9.5 \times S + 14.65 \times L_s) \times \tan(\theta) + \\ 11.4 \times L_s \times f - 6.25 \times L_s = 0$$

5. 傾斜角方程式の係数整理

(1) R部接触型靴底

三次方程式

$$10080x \quad h x^3 + 33840x \quad h x^2 + \\ (24624x \quad h x f + 15048x \quad h - 9.5xS + 12.65xL_s) x + \\ 11.4xL_s x f - 3.45xL_s = 0$$

$$a = 10080x \quad h$$

$$b = 33840x \quad h$$

$$c = 24624x \quad h x f + 15048x \quad h - 9.5xS + 12.65xL_s$$

$$d = (11.4x f - 3.45) x L_s$$

二次方程式(近似)

$$33840x \quad h x^2 + \\ (24624x \quad h x f + 15048x \quad h - 9.5xS + 12.65xL_s) x + \\ 11.4xL_s x f - 3.45xL_s = 0$$

$$a = 33840x \quad h$$

$$b = 24624x \quad h x f + 15048x \quad h - 9.5xS + 12.65xL_s$$

$$c = (11.4x f - 3.45) x L_s$$

但し、 $\theta = 0$ の場合は起立モーメント $M_2 = 0$ とする。従って、係数は下記となる。

$$a = 33840x \quad h$$

$$b = 24624x \quad h x f + 15048x \quad h - 9.5xS$$

$$c = 11.4x f x L_s$$

(2) 先端接触型

$$41040x \quad h x^2 + \\ (24624x \quad h x f + 9000x \quad h - 9.5xS + 14.65xL_s) x + \\ 11.4xL_s x f - 6.25xL_s = 0$$

$$a = 41040x \quad h$$

$$b = 24624x \quad h x f + 9000x \quad h - 9.5xS + 14.65xL_s$$

$$c = (11.4x f - 6.25) x L_s$$

但し、 $\theta = 0$ の場合は起立モーメント $M_2 = 0$ とする。従って、係数は下記となる。

$$a = 41040 \times h$$

$$b = 24624 \times h \times f + 9000 \times h - 9.5 \times S$$

$$c = 11.4 \times f \times L_s$$

6. 摩擦力の限界条件

限界条件：摩擦力モーメント 潮位差力モーメント

$$\text{摩擦靴全荷重} = L_s + \text{潮位差荷重} = L_s + h \times \tan(\quad) \times 3600 \times 3 \div 5$$

摩擦力 = 摩擦靴全荷重 × 摩擦係数 (f)

$$= (L_s + h \times \tan(\quad) \times 3600 \times 3 \div 5) \times f$$

$$\text{摩擦力モーメント} = (L_s \times 5a + h \times \tan(\quad) \times 3600 \times 3a) \times f$$

$$\text{潮位差力} = h \times 3600$$

$$\text{潮位差力モーメント} = h \times 3600 \times 3a$$

従って、限界条件式は

$$(L_s \times 5a + h \times \tan(\quad) \times 3600 \times 3a) \times f \quad h \times 3600 \times 3a$$

$$f \quad 10800 \quad h \div (5L_s + 10800 \quad h \times \tan(\quad))$$

$$= 1 \div (L_s \div (2160 \quad h) + \tan(\quad))$$

7. 解析結果と結論

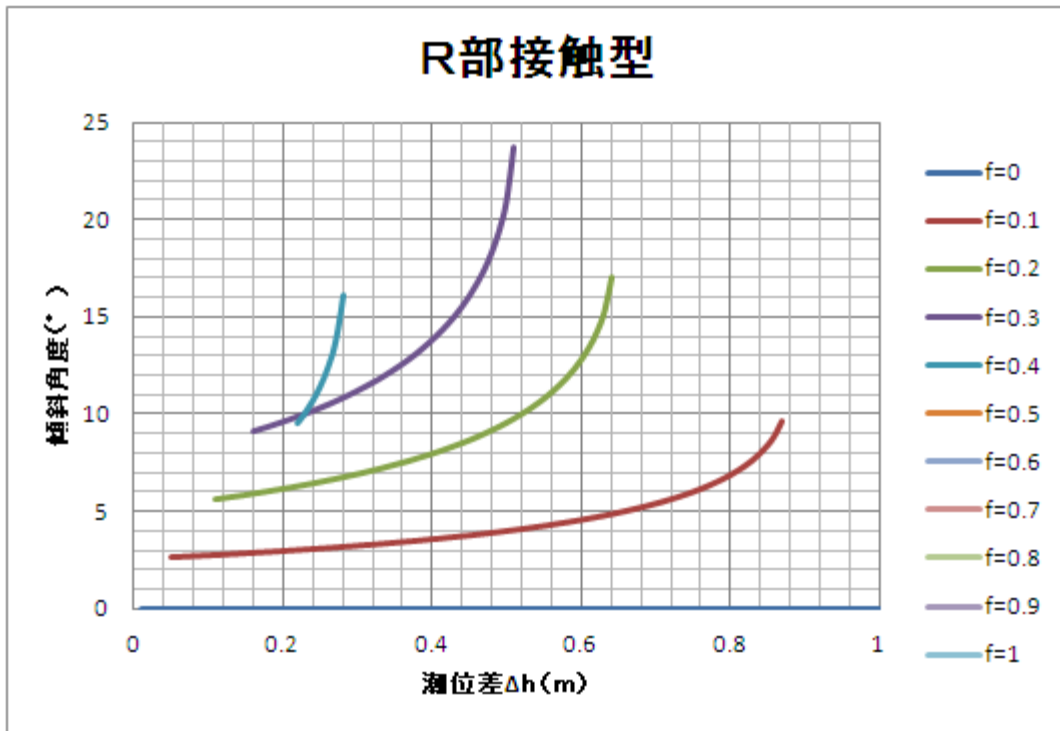


図 - 6 R部接触型摩擦靴の扉体傾斜角度

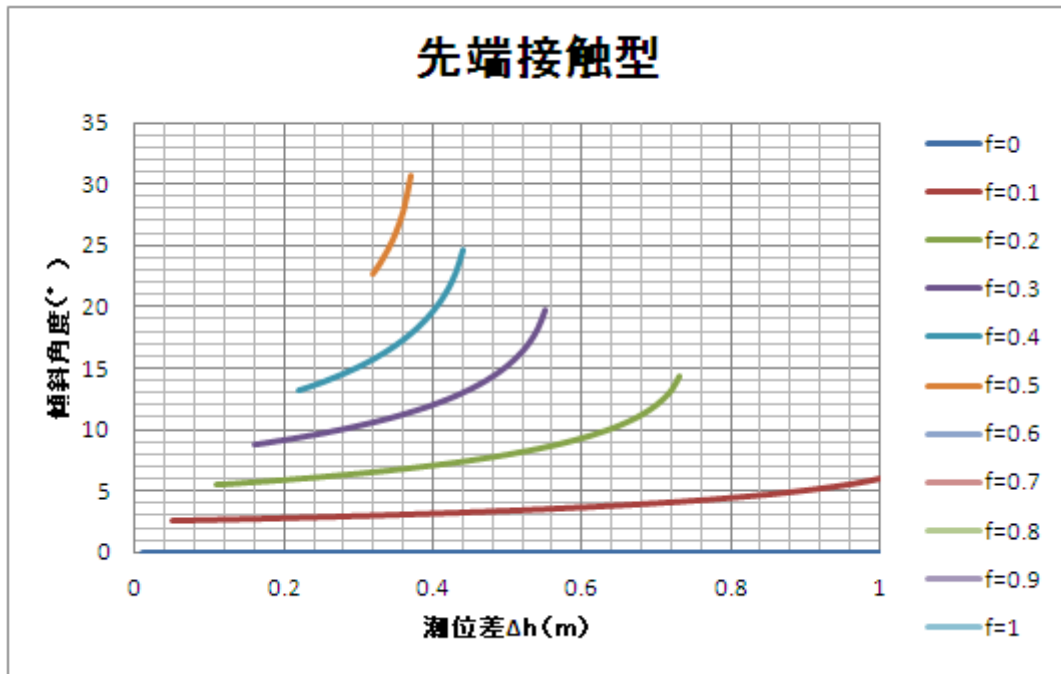


図 - 7 先端接触型摩擦靴の扉体傾斜角度

図 - 6 はR部接触型摩擦靴の扉体傾斜角度、図 - 7 は先端接触型摩擦靴の扉体傾斜角度の解析結果である。グラフは図の右側に示す摩擦係数系列にたいして描かれているが、図

に現れていない系列($f = 0.5 \sim 1.0$)及びグラフ左端より左側の潮位差は摩擦力 潮位差駆動力の領域で、潮位差が開閉操作に利用できない。グラフ右端より右側の潮位差では傾斜角方程式の解が存在せず、傾斜角度が無限に大きくなることを意味する。方程式に含まれる起立モーメント 2 は $= 0$ の場合は 0 であるが、 f が小さい範囲で他のモーメントと比較して突出した値となり、方程式を満たす解が負となる。実際には起こり得ないので、負根の範囲は起立モーメント $= 0$ として数値解析を行った。結果的に R 部接触型の $f = 0 \sim 0.3$ で起立モーメント $2 = 0$ 、 $f = 0.4$ で 0 とし、先端接触型の $f = 0 \sim 0.4$ で起立モーメント $2 = 0$ 、 $f = 0.5$ で 0 とした。これは図 - 6 の $f = 0.4$ のグラフが他のグラフと調和しない背景でもある。実際には、 f の微小増加により起立モーメント 2 が大きな値で作用するので扉体の接触点は容易に靴底 R 部または先端部に移行できず、 f 増加に伴う転倒モーメント 1 と転倒モーメント 2 の成長が起こらず、扉体は直立に近い状態で推移すると考えられる(即ち、シュー荷重による押さえが有効に作用する)。

図 - 6 と 7 の解析は f への置き換えと 3 次元方程式の 2 次元化の近似化操作を含んでいるので精度検証が必要である。表 - 2 が検証結果である。転倒モーメントと起立モーメントの差が極小となる点を手操作で求めて正解値とした。傾斜角方程式の解と正解値は傾斜角度 5 度以下で極めて一致し、10 度前後で誤差数%、15 ~ 20 度の範囲で最大 10 数%である。表の右部分に転倒モーメントと起立モーメント及びモーメント差%を示した。モーメント差%が零でないケースは 3 次元方程式に根が無いこと、即ち、傾斜角が無限に大きくなることを意味している。しかしながら、解析の目的は引き力による扉体傾斜抑制

表 - 2 潮位差利用操作時の扉体傾斜解析精度検証結果

摩擦係数 f	潮位差 $\Delta h(m)$	解 (θ°)	正解値 (θ°)	誤差 %	モーメント (tf-m)		モーメント 差%
					転倒	起立	
0.1	0.05	2.65	2.65	-0.06	1268	1268	0.00
	0.50	4.00	4.02	-0.34	1924	1924	0.00
	0.66	5.03	5.08	-0.88	2430	2430	0.00
	0.87	9.68	10.11	-4.50	4902	4820	1.67
0.2	0.11	5.64	5.65	-0.26	2703	2703	0.00
	0.52	10.03	10.45	-4.17	4978	4978	0.00
	0.63	15.25	15.06	1.29	7437	7132	4.10
0.3	0.24	10.20	10.36	-1.51	4936	4936	0.00
	0.43	15.04	17.18	-14.17	8107	8107	0.00
	0.50	20.91	18.50	11.56	9411	8710	7.45
0.4	0.23	10.08	10.51	-4.26	6235	6235	0.00
	0.28	16.15	15.27	5.43	7535	7358	2.35

の可能性検討であり、解析結果は目的に適う十分な精度であると結論できる。

図 - 6 及び 7 の解析結果から次ぎの結論が得られた。

(1) 引き力による扉体傾斜抑制は可能である。

(2) 解析対象の構想設計については、

傾斜角度抑制の上から摩擦靴の接触点は扉板近接型が望ましい。

図 - 8 のグラフ内が潮位差と摩擦係数の選択可能域である。

備考 1) グラフ上側：傾斜拡大域、下側：移動停止域

2) 直立域：R部接触型 $f = 0.3$ 、先端接触型 $f = 0.4$

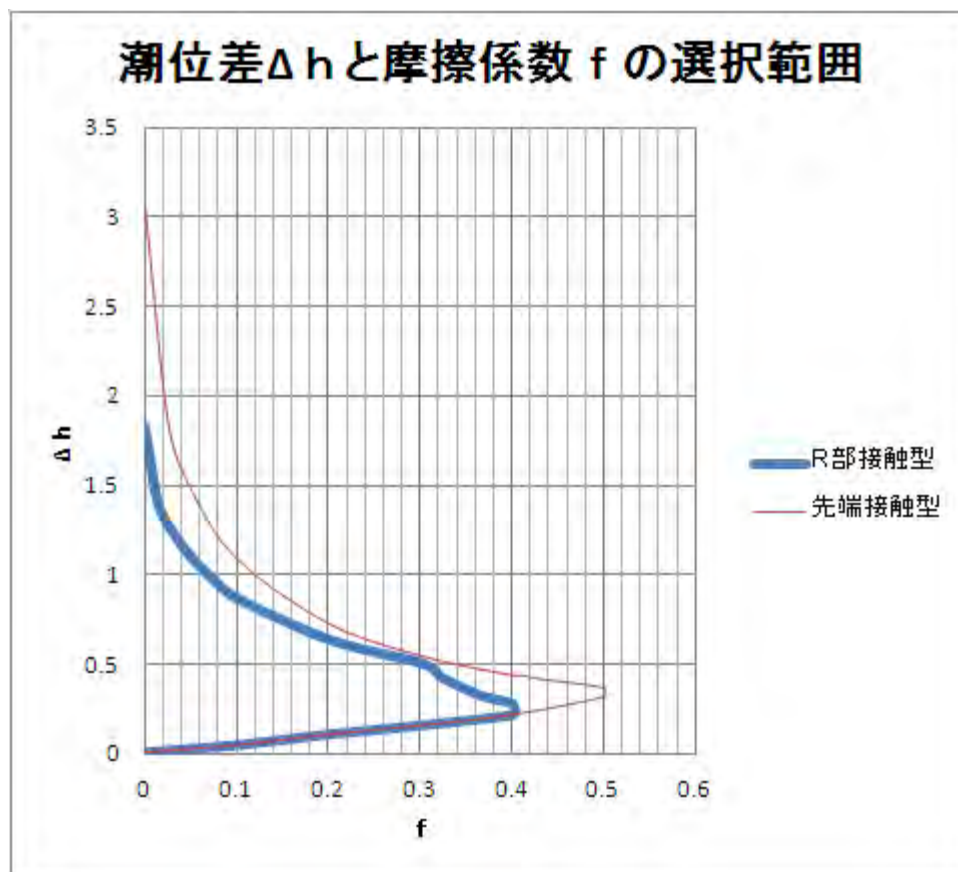


図 - 8 潮位差と摩擦係数の選択領域