

ブイ式表面取水装置の水理および 運動特性に関する研究

STUDIES ON HYDRO-DYNAMIC AND MOORING CHARACTERISTICS OF A WATER INTAKE BUOY SYSTEM

村 幸雄*・巻幡敏秋**・重藤宗之***・有馬健次****
By Yukio MURA, Toshiaki MAKIHATA, Muneyuki SHIGETOO and Kenji ARIMA

1. 緒 言

最近、環境問題が重要視されるにつれ、水資源の水質への要請が次第に厳しくなりつつある。その一例として、ダム貯水池の底層からの濁水および冷水の放流により貯水池築造前に比べて、下流河川の冷水化および濁水期間の長期化する問題が生じている。これを解決する一つの方法は「表面取水装置」による貯水池表面の清水および温水の取水である⁶⁾。

「表面取水装置」の形式として取水塔方式、多段ゲート方式およびブイ方式が主に挙げられる。取水塔方式および多段ゲート方式は従来からしばしば採用されているが、ブイ方式は他に前例がなく、取水パイプ付ブイと鋼管およびゴム管を組合わせた可撓性に富んだ導水管から構成されたものを既設のゲートケーシングの前面に設置して取水を行い、取水ブイの位置保持は3本の係留ワイヤで行われるものである。

将来、貯水池の有効利用、海洋開発等に関連して、ブイ式表面取水装置の導水管と類似している水中の可撓管により流体を輸送する必要が予想される。本論文は、これに先立ってブイ式表面取水装置の導水管に関連する水理学的、運動学的特性を解明するために模型実験および若干の理論解析を行ったものである。

2. 本論文に用いた記号

A_j : 断面積
 D : 管路内径
 E : 導水管のゴム管の弾性係数

E : 導水管の等価弾性係数
 F_j : 進行波圧に対する関数
 G : 導水管のゴム管のせん断弾性係数
 GM : 取水口付ブイのメタセンターと重心との距離
 H : 導水管の上端に働く水平力
 H_i : 任意時間の水頭
 H_0 : ゲート前面の水頭
 I_{II} : 導水管の断面2次モーメント
 I_y : 取水口付ブイの Rolling に対する慣性モーメント
 I_y' : 取水口付ブイの Rolling に対する付加慣性モーメント
 K : 取水口付ブイに付加する垂直ばね定数(浮力および係留ワイヤ)
 KG : 取水口付ブイの底面からの重心高さ
 L : 既設取水管と導水管を含む管路の総長さ
 L_1 : ゲートケーシングを含む導水管の管路長さ
 L_2 : 既設取水管の管路長さ
 L_I : 空気の管路長さ
 L_i : 導水管の格点 i から $(i+1)$ までの長さ
 M : 導水管の任意点における曲げモーメント
 M_i : 導水管の格点 i に働く曲げモーメント
 Q : 導水管の任意点におけるせん断力
 Q_i : 導水管の格点 i に働くせん断力
 R_i : 導水管の格点 i のゴム管の長さ
 ΔR_i : 導水管の格点 i のゴム管における軸力による伸び
 T : 導水管の任意点における軸力
 \bar{T} : 水撃圧の周期
 T_i : 導水管の格点 i に働く軸力
 T_H : 取水口付ブイの Heaving 周期
 T_R : 取水口付ブイの Rolling 周期
 V : 導水管の上端に働く鉛直力
 W : 取水口付ブイの重量

* 正会員 工博 山梨大学教授 工学部土木工学科
** 正会員 工修 日立造船(株) 技術研究所
*** 日立造船(株) 陸機設計所
**** 正会員 工修 日立造船(株) 技術研究所

W' : 取水口付ブイの付加水重量
 W_i : 導水管の格点 i から $(i+1)$ に働く鉛直力
 W_H : W と取水口付ブイの水平移動に伴う付加水重量との総重量
 W_V : W と取水口付ブイの上下動に伴う付加水重量との総重量
 a_j : 圧力波の伝播速度
 d : 取水口付ブイの喫水
 f_j : 反射波圧に対する関数
 g : 重力の加速度
 h : 導水管基部中心より上端までの鉛直距離
 h_i : 導水管基部中心より格点 i までの鉛直距離
 Δh_i : 導水管格点 i のゴム管のせん断力による変形量

添字 j において

O : 既設取水管路
 I : 空気管路
 II : 導水管路
 III : フラップ弁部
 f : フラップ部管路
 g : ゲートケーシング部

 k : 取水口付ブイに付加する水平ばね定数
 l : 導水管基部より上端までの水平距離
 l_i : 導水管基部より格点 i までの水平距離
 m : 導水管の格点数
 m_I : $(A_I/A_0)(a_0/a_I)$
 m_{II} : $(A_{II}/A_0)(a_g/a_{II})$
 m_{II_f} : $(A_{II_f}/A_0)(a_f/a_g)$
 m_{III} : $(A_{III}/A_0)(a_g/a_{III})$
 m_{f_f} : $(A_f/A_0)(a_g/a_f)$
 m_{fg} : A_0/A_g
 m_g : a_0/a_g
 m_{gg} : A_g/A_0
 r : 導水管の曲率半径
 t : 時間
 v : 流速
 v_0 : 定常取水時の管内平均流速
 w : 導水管単位長さ当りの重量 (付加水重量を含む)
 w_i : 導水管の格点 i に働く鉛直力
 y_0 : 境界条件より定まる水位
 α_{i-1} : 反射率
 β : 導水管上端の角度
 ζ_i : $\sqrt{H_i/H_0}$
 η_i : $1-i/\theta$
 η_n : 導水管軸線に垂直方向の振動変位

η_s : 導水管長さ方向の振動変位
 $1/\theta$: $2L_2/a_0\tau$
 $1/\theta_I$: $2L_I/a_0\tau$
 $1/\theta_{II}$: $2L_{II}/a_{II}\tau$
 $\bar{\theta}_i$: 導水管の格点 i における接線角
 $\Delta\bar{\theta}_i$: 導水管の格点 i のゴム管の曲り角
 $\Delta\bar{\theta}_0$: 導水管基部の設置角 (あるいはキック角度)
 λ : Darcy-Weisbach の摩擦係数
 ρ : $av_0/2gH_0$
 ρ_I : $a_Iv_0/2gH_0$
 ρ_{II} : $a_{II}v_0/2gH_0$
 τ : 弁閉鎖時間
 σ : 1.1 (修正係数)
 φ : 管路の傾斜角
 ω : 円振動数

3. 実験装置および方法

図一1 (a) はブイ式表面取水装置模型 および実験装置を示している。同図中、導水管は塩ビ管とゴム管の組合せ管 (管内径 41 ϕ , 管厚 1 mm), 既設取水管は塩ビ管 (管内径 41 ϕ , 管厚 1 mm), 空気管はアクリル管 (管内径 13 ϕ , 管厚 3 mm) で製作された。なお、図一1 (b) は導水管模型を示し、表一1 は取水口付ブイ模型の要目を示す。図一1 (a) 中のシリンダー弁は水撃圧発生可能ならしめるように電磁弁と連動させて圧縮空気により弁閉鎖時間を調整できるようになっている。

水撃圧の計測方法は、図一1 (a) 中の \blacktriangledown 印に小型圧力変換器 (共和電業製 PGM-2 KC) を取り付け (管に直接埋め込む) 計測がなされた。また、取水口付ブイおよび導水管の動き (図一2 (a)) に対しては、図一2 (b) の計測点 ① ($i=1\sim 8$) の動きをポテンシオメーター (緑測器製 CPP-35 0.5 k Ω) により計測した。

4. 実験結果に関する考察

(1) 水理特性について (主に水撃作用)

既設取水管に塩ビ管 (実機では鋼管) およびゴム管からなる可撓性に富んだ導水管が新設されるために、管径、管厚、管の物性および管の総長さが変化するので、既設取水管に対する水撃作用が変わることが予想される。

前節に示した模型の管路系は表一2 に掲げる動特性を有しており、図一3, 4 は水撃圧発生実験において既設取水管のみの場合および既設取水管への導水管を新設した場合に得られた実験結果をおのおの示している。同図より、導水管を新設した場合の既設取水管内の水圧上昇

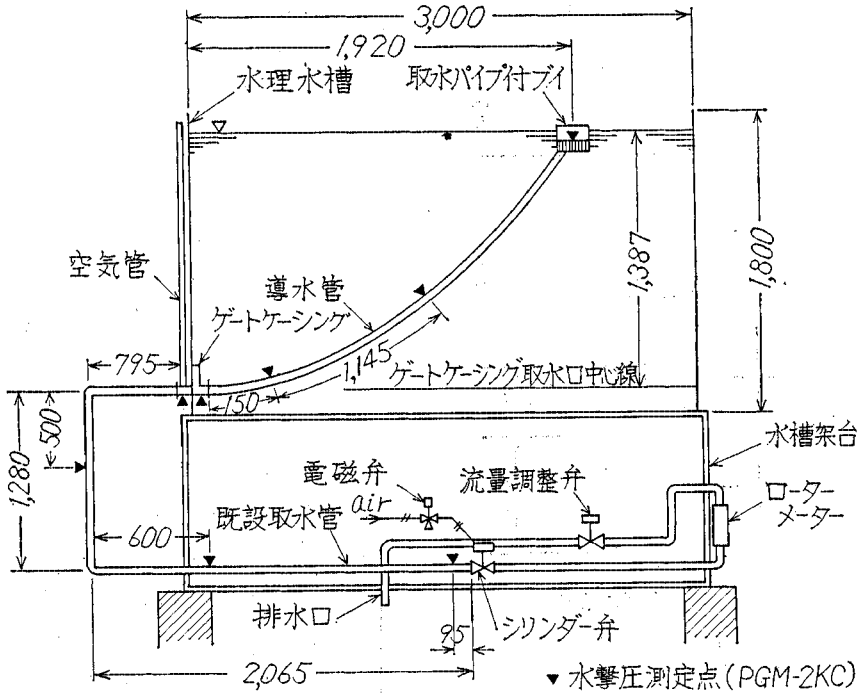


図-1(a) ブイ式表面取水装置模型

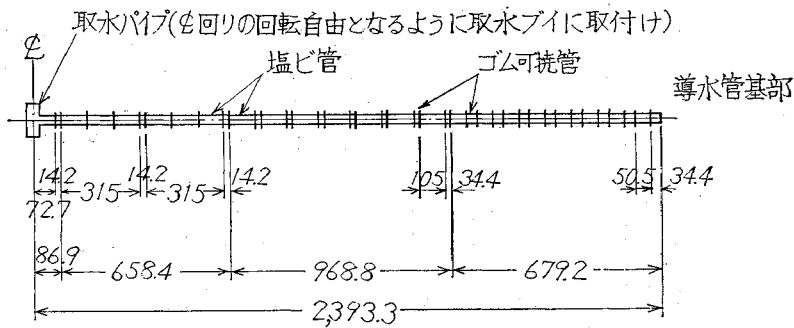


図-1(b) 導水管模型

表-1 取水口付ブイ模型の要目

	重量 W (gr)	慣性モーメント I_y (gr·cm ²)	喫水 d (cm)	KG (cm)	GM (cm)
ブイ本体**	354	9095	1.19	0.90	13.66
スクリーン付ブイ***	816	28432	2.16	-1.80	8.94
導水管スクリーン付ブイ****	908****	34659	2.60	-2.27	9.65

* Rolling に対する値 (構造上 Pitching は起こりにくい)

** 重心点を座標の原点

*** 取水パイプの中心を座標の原点

**** 導水管重量は含まない (取水パイプ重量は含む)

表-2 水撃圧に対する動特性

管名	弁閉鎖時間 τ	水撃圧に対する動特性		
		0.348 sec	0.517 sec	0.597 sec
既設取水管	a	172.4 (m/s)	172.4 (m/s)	172.4 (m/s)
	ρ	1.762	1.762	1.762
	$1/\theta$	0.142	0.096	0.083
空気管	a_I	724.1 (m/s)	724.1 (m/s)	724.1 (m/s)
	ρ_I	5.09	5.09	5.09
	$1/\theta_I$	0.011	0.0076	0.0062
導水管	a_{II}	124.9	124.9	124.9
	ρ_{II}	0.737	0.737	0.737
	$1/\theta_{II}$	0.109	0.073	0.063

水深 $H_0 = 1.387$ m
管内平均流速 $v_0 = 0.28$ m/s

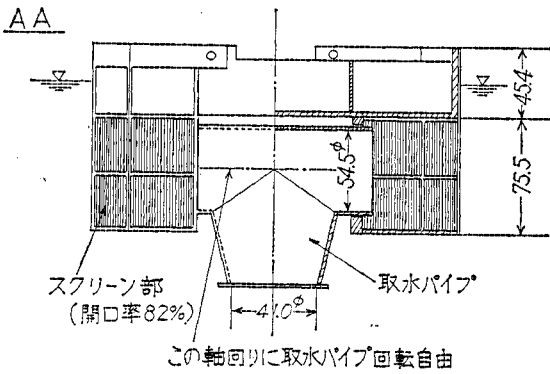
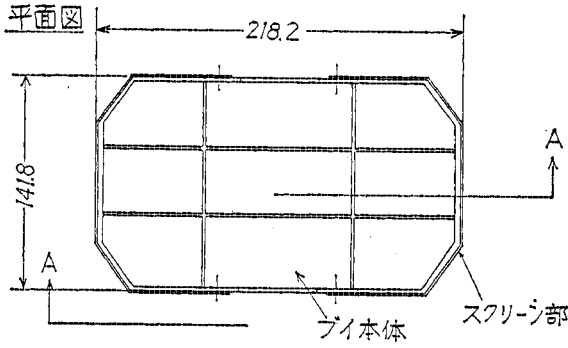


図-1(c) 取水口付パイ模型

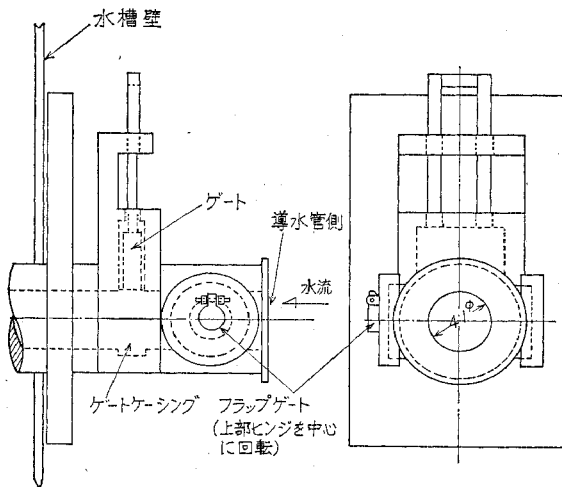


図-1(d) ゲートケーシング部模型 (フラップゲート付)

は導水管のない場合の約 15~30% 程度増加することが認められ、この水圧上昇が既設取水管の安全性に問題が生ずる場合が考えられる。ただし、ゲートケーシング部にフラップゲート（フラップ取付管断面の 50% の開口率）を設置すると（図-1 (d) 参照）、水圧上昇は図-4 中の印 ⊕ で示されるように、フラップゲートの位置を境にして新設導水管内の水圧上昇が急激に減少する

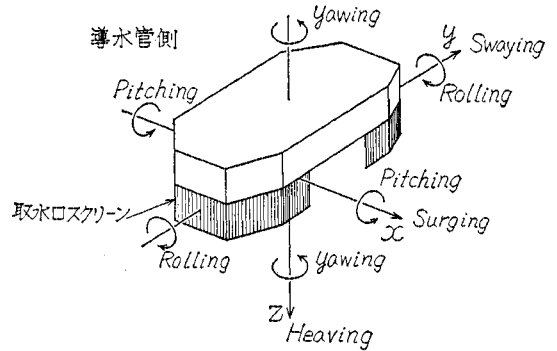


図-2(a) 座標および運動名

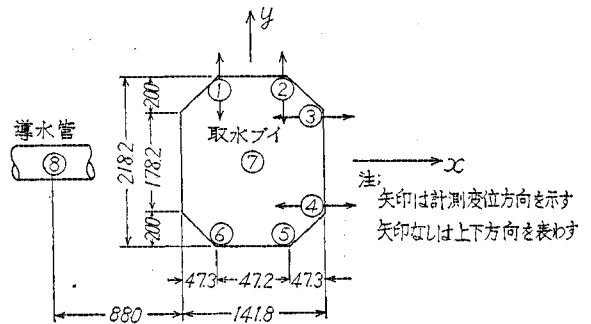


図-2(b) 計測点

とともに、既設取水管内の水圧上昇も軽減され、既設取水管のみの実測値 ⊙（図-3）にほぼ一致する。フラップゲートは常時には水漏れはなく、水撃圧発生時には瞬時にヒンジ型ふたが開くことをインクを用いた可視化実験により確認した。

著者らは、付録Aに詳述するように、水撃作用に関する理論解析の基礎方程式 (A.1) において流体摩擦を無視し、管路が水平であると仮定した算術的解法^{1),2)}を用い、新設導水管の影響を既設取水管内の反射効果として補正する方法により解析を行った。

既設取水管のみの場合である 図-3 において、実測モードは理論モードである直線と最大 10% 程度の誤差で良い一致が認められる。図-4 の導水管が新設された場合においても、図-3 と同程度に実測値と理論値との一致が見られ、水撃圧がゲートケーシング部で部分反射するために生じるモードの急変化が、実測値、理論値ともに同傾向を示している。ただし、フラップゲートがある場合の理論値はフラップゲート部の反射率を 1 として求めた。本解析法で導出された反射率 α_{i-1} については今後の研究を必要とする種々の問題点を内包しているが実用上はほぼ使用に耐えられると思われる。

表面取水装置は取水点がきわめて浅くなっており（取水パイプ中心点の水深は取水パイプ内径の約 1.5 倍、図

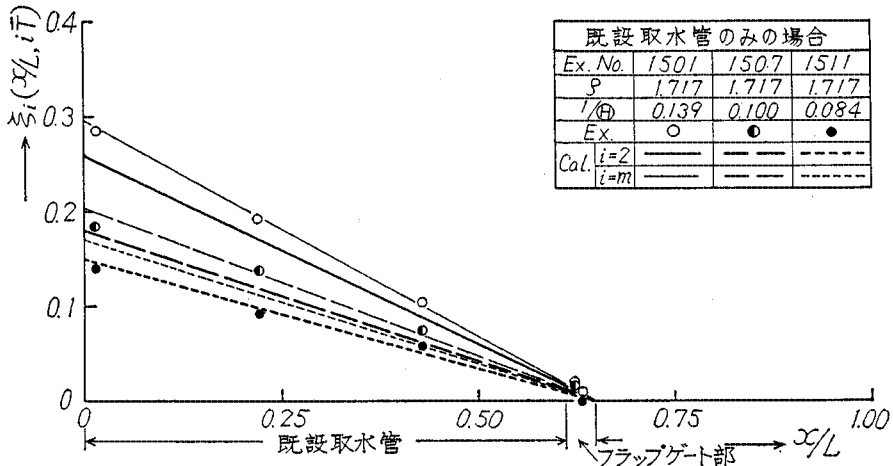


図-3 水撃圧モード

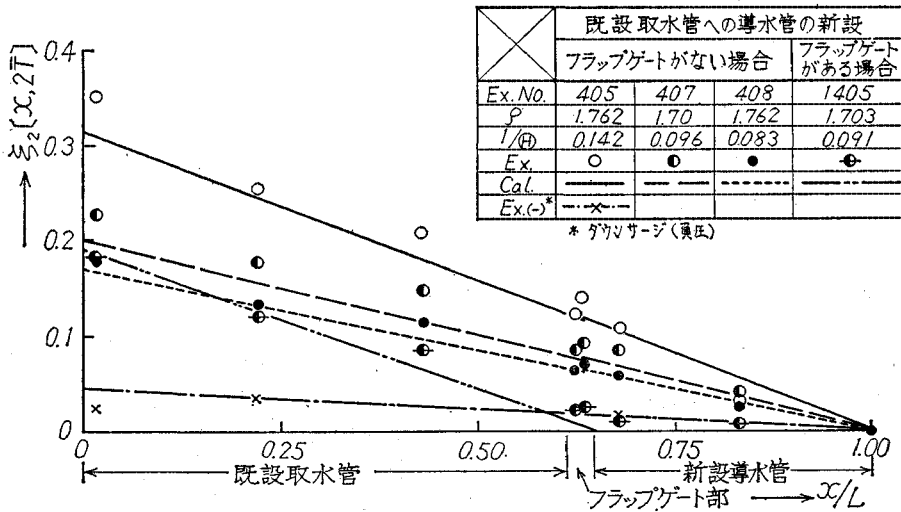


図-4 水撃圧モード

一1(c) 参照), 流体が長い導水管内を流れるために, 空気吸込みおよび脈動流現象の発生が懸念されたが, 実験観測結果 (流量 5.0~50 l/min) より, 前者についてはまったく見られず, 後者については 1.5~2.0 Hz の振動数をもつ振幅の小さい変動圧 (ゲート前面水頭 1.0% 程度) が見られることがわかった。

(2) 導水管の stiffened catenary³⁾ について

任意の水深における導水管の stiffened catenary を把握することは, ゴム管の強度, 導水管の設置箇所の地形との取り合い, ならびに取水ブイの係留位置の問題などに関連して非常に重要である。

図-5 中の○印は, 同図中に示した実験条件における導水管模型の stiffened catenary (曲げ剛性を有する懸

垂線) の実測値を表わしている。本実験では導水管の基部であるゴム管部に, ゴム管の管厚不足*とゲートケーシング部へのゴム管の接着の拙さのために, 若干のキックが発生していることが認められた。

本論文では, 導水管の stiffened catenary に対する解析方法の一試みとして付録Bに掲げるように, 導水管模型の塩ビ管を剛体とし, ゴム管部のみの剛性を考慮した片持ばりとして近似解法を行った。なお, 本解法では導水管内の流れによる流体力を考慮していない。図-5中において, 実線は導水管基部にキックが発生しておらず, 導水管水中重量が0である場合 (重量と浮力とが釣り合っている場合) の理論値を示し, 破線はキックの発生 (キック角度 $4\theta_0 = 12^\circ$) があり, かつ水中重量がわず

* 水撃圧発生可能ならしめるために管厚 1 mm とした。

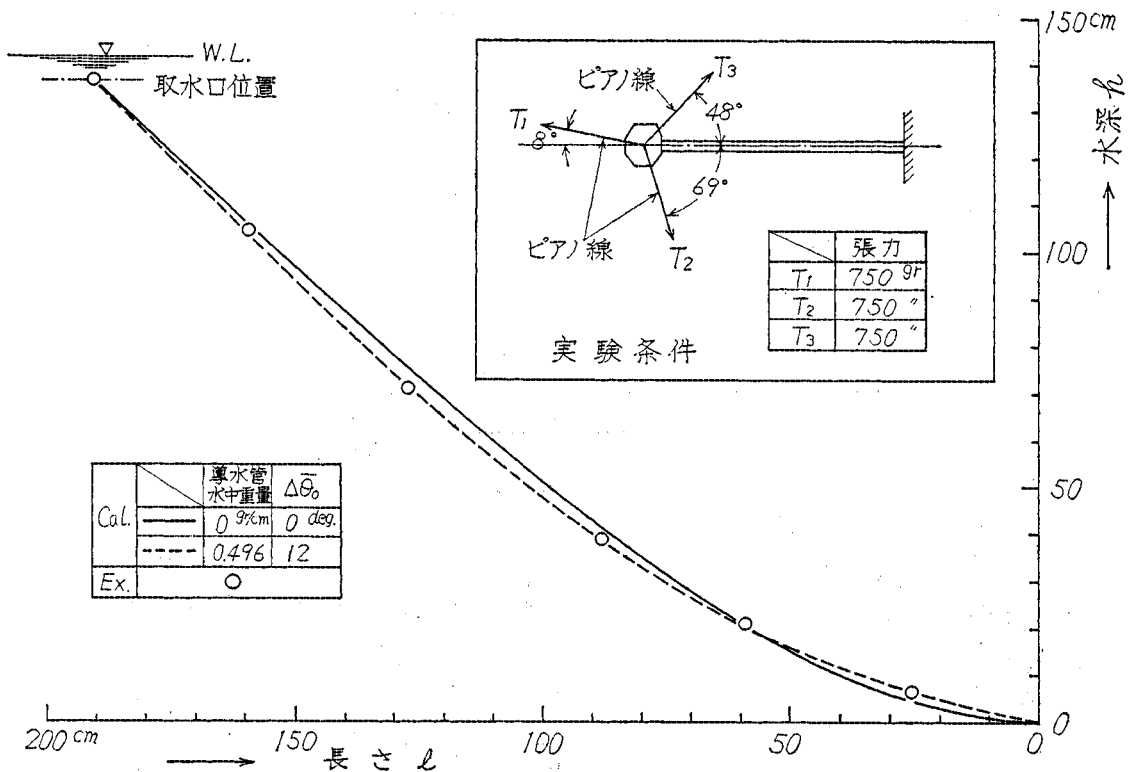


図-5 導水管模型の Stiffened Catenary

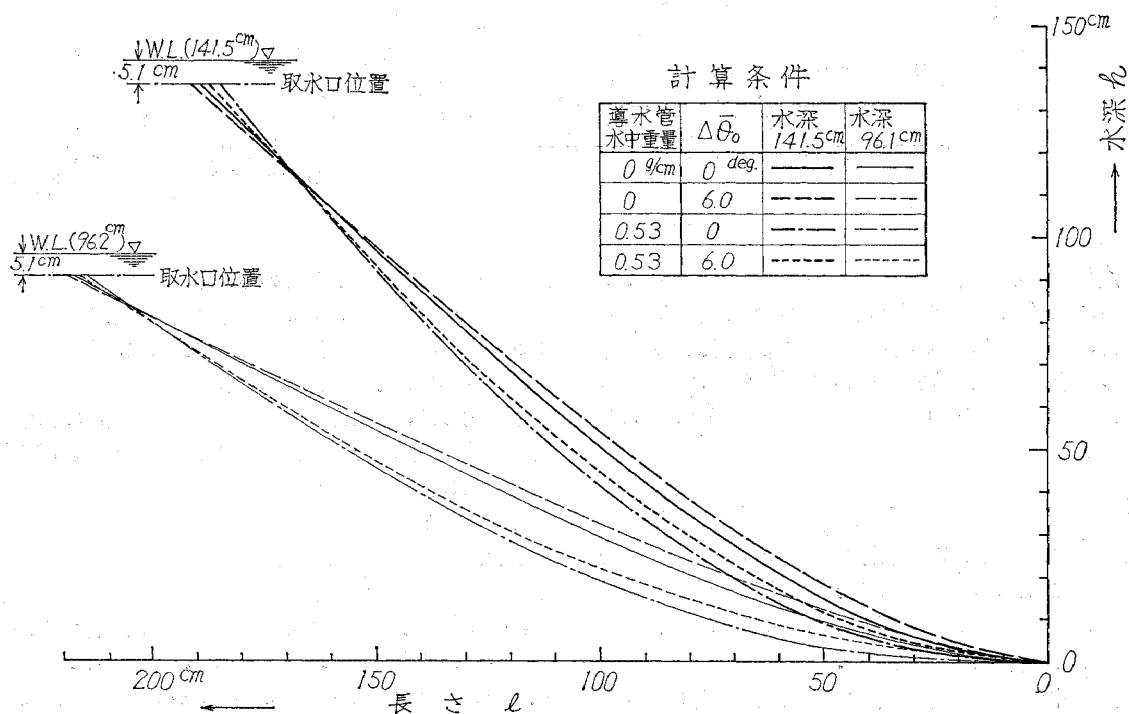


図-6 導水管模型の Stiffened Catenary

表-3 模型の動特性

	取水口付パイ模型の実測固有周期			導水管模型の動特性		対数減衰率
	Heaving (sec)	Rolling (sec)	Pitching (sec)	固有周期		
パイ本体	0.52	0.40	0.42	実測値 (sec)	理論値 (sec)	0.769
スクリーン付	0.60	0.62	0.71			
スクリーン導水管付	1.30	1.34	0.93	1.26	1.11 (1.67)	

() の値はゴム管の弾性係数を用いて算出

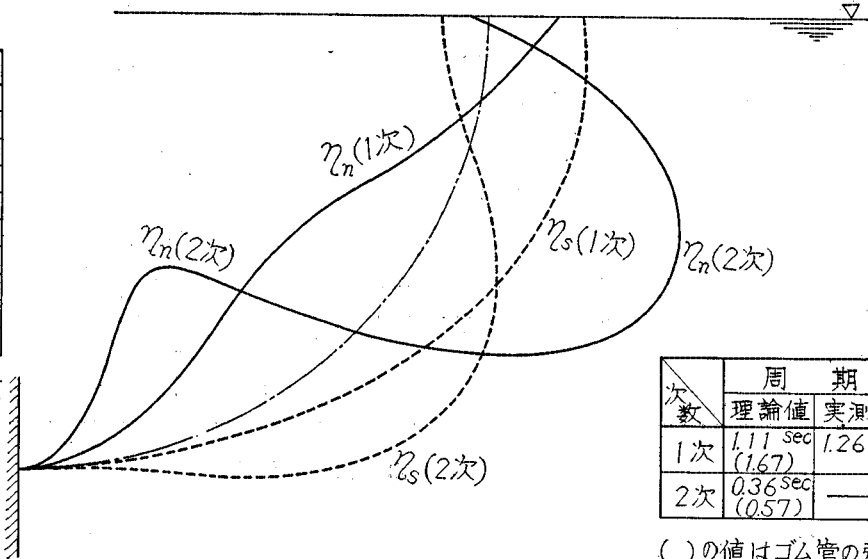
表-4 取水口付パイ模型の付加水質量係数・付加慣性モーメント係数

	パイ本体	スクリーン付パイ	導水管スクリーン付パイ
Heaving W'/W	4.53	2.89	11.69
Rolling I_y'/I_y	1.19	0.713	10.88*

・回転中心を取水口パイプの中心とする
 パイ本体の $I_y = 9095.1 \text{ gr} \cdot \text{cm}^2$
 スクリーン付パイの $I_y = 28432 \text{ gr} \cdot \text{cm}^2$
 導水管・スクリーン付パイの $I_y = 34659 \text{ gr} \cdot \text{cm}^2$

項目	数量
A	0.84 cm ²
I	2.61 cm ⁴
E*1	7.81 × 10 ¹⁰ kg/cm ²
L	244.0 cm
Y*2	155.3 cm
W	43.49 g/cm
Wv	3351 gr
Wh	1810 gr
K	296.4 g/cm
長	10.0 g/cm

*1 等価弾性係数
 *2 $r = 2L/\pi$



() の値はゴム管の弾性係数を用いて算出。

図-7 導水管固有振動モード

かに存在する場合 (約 0.5 g/cm) の理論値を示している。破線と○印の実測値とは良く一致しており、本解析法はキック発生の有無にかかわらず有力な手段であるといえる。

図-6 は導水管基部でのキックの有無、水中重量および水深の変化に対する導水管模型の stiffened catenary の理論値を示したものである。本図より水中重量が stiffened catenary に微妙な影響を与えることがわかる。各ケース、取水口位置のずれが見られるのは、係留しているピアノ線の張力がつり合っていることおよび取水口付パイがある喫水を持って水面に浮んでいるという条件に起因するものである。

(3) 係留時における運動特性

a) 固有周期

表-3 は動揺実験により求めた取水口付パイおよび導水管についての動特性を示している。取水口付パイに導水管を取り付けると、Heaving および Rolling 周期が

極端に長くなる。取水口付パイの Heaving と Rolling の固有周期は

$$T_H = 2\pi \sqrt{(W+W')/K \cdot g} \dots \dots \dots (1)$$

$$T_R = 2\pi \sqrt{(I_y+I_y')/g \cdot W \cdot GM} \dots \dots \dots (2)$$

で表わされる。上式および表-3 の実測固有周期より付加水質量係数、付加慣性係数を算出すると表-4 となる。同表中、導水管付取水口付パイの値が大きい理由は、導水管の動きに伴う付加水質量が取水口付パイのそれに見掛上含まれるためである。なお、スクリーン付パイの付加慣性係数はパイ本体のそれより小さいが、付加慣性モーメントの値はパイ本体のそれの約 1.9 倍となっている。

表-3 中の導水管の固有周期の理論値は、付録 C で述べる近似解法により求めたものである。本解析法でかなりの近似を行っているにもかかわらず、理論値と実測値とは良く一致している。なお、解析に用いた導水管の弾性係数としては、ゴム管の弾性係数 ($= 3.09 \times 10^{10} \text{ kg/cm}^2$) と塩ビ管の弾性係数 ($= 3.49 \times 10^9 \text{ kg/cm}^2$) との等価弾

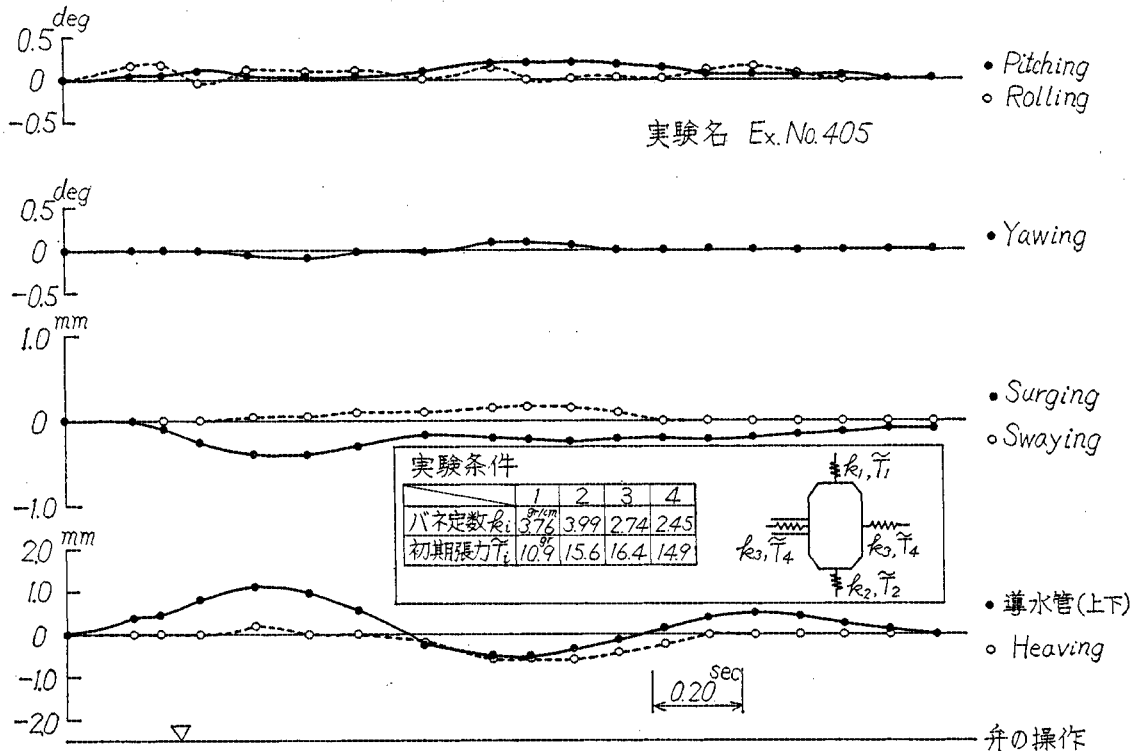


図-8 取水装置の過渡応答

性係数 ($=7.81 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$) を求めた*. 図-7 は理論固有振動モードを示している. 表-3 中に示した導水管の実測減衰率は非常に大きい値であり, 導水管は外乱などに対して振動しにくい性質を有している. これは管と管とを結合しているフランジが大きく作用しているためであろう.

b) 水撃圧発生時の導水管・取水パイの挙動

図-8 は 図-4 中の 弁閉鎖時間が一番短い実験 Ex. No. 405 における水撃圧発生時での導水管, 取水口付パイの挙動の実測値を示している. 同図は導水管の動きが主体であり, 導水管の固有振動1次が卓越していることを表わしている. すなわち, 導水管中央部が Z 方向 +1 mm ほど動くと, 取水口付パイは x 方向 -0.5 mm 程度動いており (図-2, 7 参照), 周期は約 1.1 秒である. 水撃圧により誘起される導水管, 取水口付パイの動きは, 大きい減衰率により非常に小さく抑えられていることが予想される. また, 幾何学的相似が成立している実機についてはほぼ同じ結果になるであろう水撃圧上昇率が大きくなると, 導水管の上下動は余り大きくならないが, 取水口付パイの回転運動が発生して複雑な挙動を示す. 本論文では水撃圧発生時の導水管の挙動について

の理論解析を行わなかったが, これは興味ある問題であり, 今後なされるべき研究課題の1つであろう.

5. 結 言

ブイ式表面取水装置の水理および運動特性に関して以上の検討を加えた結果, 次の結論が得られた.

(1) 既設取水管に表面取水装置の導水管を新設することによる既設取水管内の水撃圧上昇率は 15~30% 増加する. この上昇率増分を軽減させる手法は, 既設取水管の呑口部にフラップゲートを設置することである.

(2) 表面取水装置の取水点がきわめて浅く (取水パイ中心点の水深は取水パイ径の 1.5 倍) になっているが, 本論文で検討した程度の流量 (30 l/min) において空気吸込み, 変動圧の大きい脈動流現象は認められない.

(3) 可撓性に富んだ導水管 (塩ビ管とゴム管との組合せ管) の stiffened catenary は, 塩ビ管を剛体とし, ゴム管のみの剛性を考慮した複合ばりと考えた解析により十分な精度で推定できる.

(4) ブイ式表面取水装置の運動特性は, 導水管と取水口付パイとは連成系を形成しているが, 導水管の動きが支配的である. また, 外乱などに対して減衰率が大きいので非常に安定である.

* 片持ばりの自由端に単位荷重を加えた時の変位が等しくなるように等価弾性係数を求めた.

付録 A

水撃作用に関する基礎方程式は、図-A(a) に示される管路系で1次元流れ、高次の微小項が省略できる程度の圧縮性と変形を仮定すると次のように示される。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{\lambda v}{2D} |v| &= 0 \\ \frac{\partial y}{\partial t} + v \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + v \sin \varphi &= 0 \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{(運動方程式)} \\ \text{(連続の式)} \end{array} \quad \text{.....(A.1)}$$

上式で流体摩擦を無視し、かつ管路が水平であるとする

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + g \frac{\partial y}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{g}{a^2} \frac{\partial y}{\partial t} &= 0 \end{aligned} \right\} \text{.....(A.2)}$$

となり、一般解は

$$\left. \begin{aligned} y &= y_0 + F\left(t + \frac{x}{a}\right) + f\left(t - \frac{x}{a}\right) \\ v &= v_0 - \frac{g}{a} \left[F\left(t + \frac{x}{a}\right) - f\left(t - \frac{x}{a}\right) \right] \end{aligned} \right\} \text{.....(A.3)}$$

である。上式において、任意時間の管内速度 v を $v_i = \eta_i v_0 \zeta_i$ の関係より任意周期の管内速度 v_i に変換し、図-A(a) に示される管路系を構成している空気管部、ゲートケーシング部、フラップゲート部および新設導水管部での水撃作用による反射効果(反射率)を考慮すると、任意周期に対する水圧上昇率は²⁾

$$\begin{aligned} \zeta_i &= -\rho \left(1 - \frac{i}{\theta}\right) \pm \sqrt{\rho^2 \left(1 - \frac{i}{\theta}\right)^2 + 2\rho \left\{ \alpha_{i-1} \left(1 - \frac{i-1}{\theta}\right) \zeta_{i-1} + (1 - \alpha_{i-1}) \right\}} \\ &+ 1 - \alpha_{i-1} (\zeta_{i-1}^2 - 1) \quad (i=1, 2, \dots, m) \end{aligned} \quad \text{.....(A.4)}$$

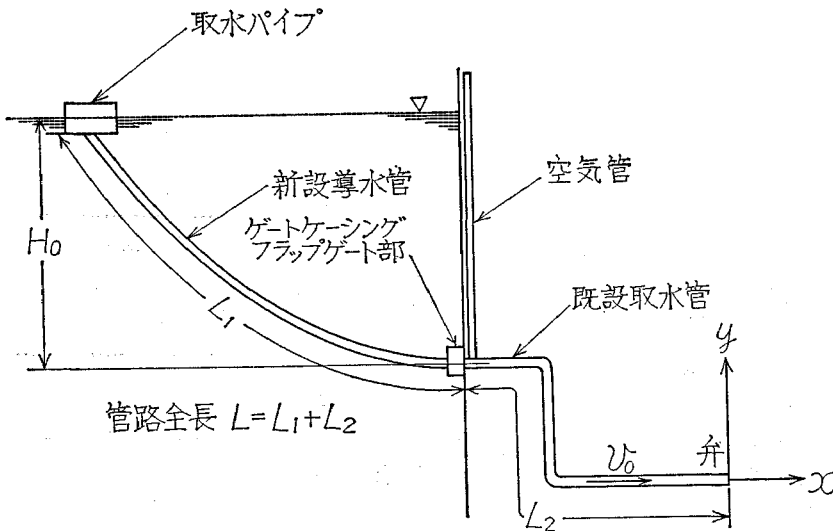


図-A(a) 管路系と座標系

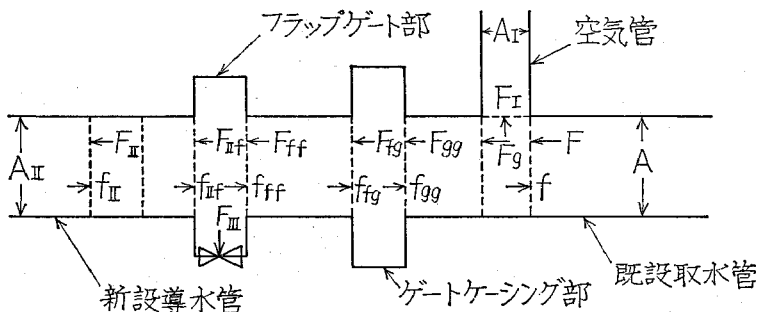


図-A(b) 反射現象の仮定

また、水上昇率に対するモードは

$$\xi_i[x, i\bar{T}] = (\zeta_i^2 - 1) \frac{L-x}{L} \dots\dots\dots (A.5)$$

である²⁾。なお、 $L=L_2$ で $\alpha_{i-1}=1$ (全反射) となる場合、式 (A.4) の $\zeta_m(i=m)$ および式 (A.5) の $\xi_m[x, m\bar{T}]$ (Allievi の略算式とよばれるもの) はそれぞれ次のように近似的に与えられる。

$$\zeta_m = \frac{\rho}{2\theta} + \sqrt{\left(\frac{\rho}{2\theta}\right)^2 + 1} \dots\dots\dots (A.6)$$

$$\xi_m[x, m\bar{T}] \doteq \sigma \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\rho}{\theta} \right) \left\{ \frac{\rho}{\theta} + \sqrt{\left(\frac{\rho}{\theta}\right)^2 + 4} \right\} \right] \frac{L_2-x}{L_2} \dots\dots\dots (A.7)$$

式 (A.4) に用いる反射率は空气管から導水管にかけて圧力波の圧力と流量の連続条件および塩ビ管とゴム管で組合された導水管内では等価な圧力波の伝播速度を仮定することにより次のように算出される (図-A (b) 参照)。

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{f}{F} = \frac{1-m_I-m_g}{1+m_I+m_g} \\ \alpha_{gg} &= \frac{f_{gg}}{F} = \frac{1-m_{gg}}{1+m_{gg}} \bar{\beta} \\ \alpha_{fg} &= \frac{f_{fg}}{F} = \frac{1-m_{fg}}{1+m_{fg}} \beta_{gg} \\ \alpha_{ff} &= \frac{f_{ff}}{F} = \frac{1-m_{ff}-m_{\text{II}}}{1+m_{ff}+m_{\text{II}}} \beta_{fg} \\ \alpha_{\text{II}f} &= \frac{f_{\text{II}f}}{F} = \frac{1-m_{\text{II}f}}{1+m_{\text{II}f}} \beta_{ff} \\ \alpha_{\text{II}} &= \frac{f_{\text{II}}}{F} = \frac{1-m_{\text{II}}}{1+m_{\text{II}}} \beta_{\text{II}f} \\ \bar{\beta} &= \frac{F_g}{F} = \frac{2}{1+m_I+m_g} \\ \beta_{gg} &= \frac{F_{gg}}{F} = \frac{2}{1+m_{gg}} \bar{\beta} \\ \beta_{fg} &= \frac{F_{fg}}{F} = \frac{2}{1+m_{fg}} \beta_{gg} \\ \beta_{ff} &= \frac{F_{ff}}{F} = \frac{2}{1+m_{ff}+m_{\text{II}}} \beta_{fg} \\ \beta_{\text{II}f} &= \frac{F_{\text{II}f}}{F} = \frac{2}{1+m_{\text{II}f}} \beta_{ff} \\ \beta_{\text{II}} &= \frac{F_{\text{II}}}{F} = \frac{2}{1+m_{\text{II}}} \beta_{\text{II}f} \end{aligned} \dots\dots (A.8)$$

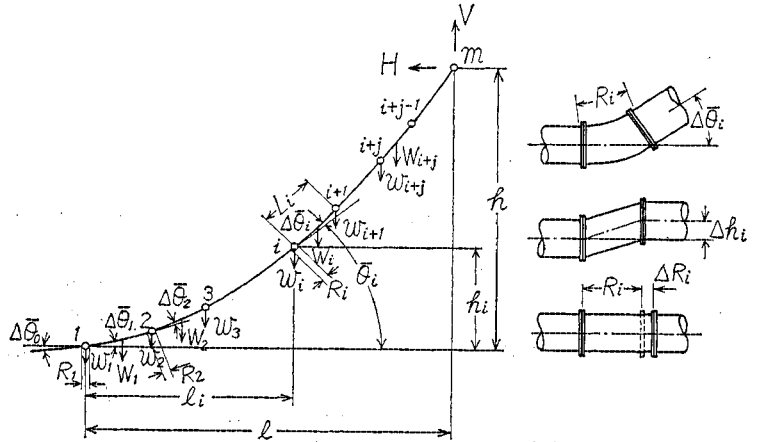


図-B 導水管のモデル化

立つ。

$$\begin{aligned} M_i &= V \cdot (l-l_i) - \sum_j w_{i+j} (l_{i+j}-l_i) \\ &\quad - \sum_j W_{i+j-1} \left(l_{i+j-1}-l_i + \frac{L_{i-j-1}}{2} \right) \\ &\quad + H(h-h_i) \\ Q_i &= (V - \sum_j w_{i+j} - \sum_j W_{i+j-1}) \cdot \cos \bar{\theta}_{i-1} \\ &\quad + H \sin \bar{\theta}_{i-1} \\ T_i &= (V - \sum_j w_{i+j} - \sum_j W_{i+j-1}) \sin \bar{\theta}_{i-1} \\ &\quad - H \cos \bar{\theta}_{i-1} \end{aligned} \dots\dots\dots (B.1)$$

$$\begin{aligned} \bar{\theta}_i &= \Delta \bar{\theta}_0 + \Delta \bar{\theta}_1 + \Delta \bar{\theta}_2 + \dots + \Delta \bar{\theta}_i \\ l_i &= l_{i-1} + (L_{i-1} + \Delta R_{i-1}) \cos \bar{\theta}_{i-1} - \Delta h_{i-1} \sin \bar{\theta}_{i-1} \\ h_i &= h_{i-1} + (L_{i-1} + \Delta R_{i-1}) \sin \bar{\theta}_{i-1} + \Delta h_{i-1} \cos \bar{\theta}_{i-1} \end{aligned} \dots\dots\dots (B.2)$$

ここに、

$$\begin{aligned} \Delta R_i &\doteq R_i \frac{T_i}{A_{\text{II}} E}, \quad \Delta h_i \doteq 2 R_i \frac{Q_i}{A_{\text{II}} G} \\ \Delta \theta_i &= (R_i + \Delta R_i) \frac{M_i}{EI_{\text{II}}} \end{aligned} \dots\dots (B.3)$$

である。式 (B.2) において $h_m \doteq h$, $l_m \doteq l$ となるように収束計算を行うことにより任意格点の座標ならびに張力 T , せん断力 Q , モーメント M が決定される。なお本論の計算ではせん断力による変位は小さいので無視した。また、ピアノ線の方の張力がつり合っている状態として $H=0$ という条件を与えた。

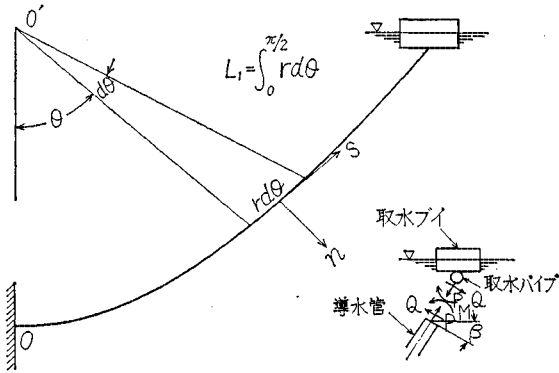
付録 C

導水管が一樣な材質から造られていると仮定すると、固有振動の基礎方程式は、図-C に示す座標系を用いて

$$-\frac{w}{g} \frac{\partial^2 \eta_s}{\partial t^2} + \frac{\bar{E} A_{\text{II}}}{r^2} \left(\frac{\partial \eta_n}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 \eta_s}{\partial \theta^2} \right)$$

付録 B

導水管を構成する塩ビ管は剛体、ゴム管は弾性体と考え、図-B のモデル化を行うと格点において次式が成り



図一C 座標系と境界条件

$$\left. \begin{aligned} -\frac{EI_{II}}{r^4} \left(\frac{\partial^3 \eta_n}{\partial \theta^3} - \frac{\partial^2 \eta_s}{\partial \theta^2} \right) &= 0 \\ \frac{w}{g} \frac{\partial^2 \eta_n}{\partial t^2} + \frac{EI_{II}}{r^4} \left(\frac{\partial^4 \eta_n}{\partial \theta^4} - \frac{\partial^3 \eta_s}{\partial \theta^3} \right) &+ \frac{EA_{II}}{r^2} \left(\eta_n + \frac{\partial \eta_s}{\partial \theta} \right) = 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (C.1)$$

となる。曲率半径 r を一定値 (導水管が円弧状になる⁵⁾) とすると、上式は解析的に解けて、

$$\left. \begin{aligned} \bar{\alpha} = \frac{EA_{II}g}{w\omega^2 r^2} \geq 1 \text{ の場合} \\ \eta_s = k_1(B_1 \cosh r_1 \theta + B_2 \sinh r_1 \theta) \\ \quad - k_2(B_3 \cos r_2 \theta - B_4 \sin r_2 \theta) \\ \quad + k_3(B_5 \cosh r_3 \theta + B_6 \sinh r_3 \theta) \\ \eta_n = B_1 \sinh r_1 \theta + B_2 \cosh r_1 \theta + B_3 \sin r_2 \theta \\ \quad + B_4 \cos r_2 \theta + B_5 \sinh r_3 \theta + B_6 \cosh r_3 \theta \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (C.2)$$

$$\left. \begin{aligned} \bar{\alpha} = \frac{EA_{II}g}{w\omega^2 r^2} < 1 \text{ の場合} \\ \eta_s = -k_1(B_1 \cos r_1 \theta - B_2 \sin r_1 \theta) \\ \quad - k_2(B_3 \cos r_2 \theta - B_4 \sin r_2 \theta) \\ \quad + k_3(B_5 \cosh r_3 \theta + B_6 \sinh r_3 \theta) \\ \eta_n = B_1 \sin r_1 \theta + B_2 \cos r_1 \theta + B_3 \sin r_2 \theta \\ \quad + B_4 \cos r_2 \theta + B_5 \sinh r_3 \theta + B_6 \cosh r_3 \theta \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (C.3)$$

の一般解が得られる。上式において、 $B_1, B_2, B_3, B_4, B_5, B_6$ は境界条件により定まる定数であり、 k_1, k_2, k_3 は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} k_1 &= \left\{ \begin{aligned} \frac{\beta_e^2 r_1^3 + \bar{\alpha} r_1}{1 + r_1^2 (\bar{\alpha} + \beta_e^2)} & (\bar{\alpha} \geq 1 \text{ の場合}) \\ \frac{\beta_e^2 r_1^3 + \bar{\alpha} r_1}{1 - r_1^2 (\bar{\alpha} + \beta_e^2)} & (\bar{\alpha} < 1 \text{ の場合}) \end{aligned} \right\} \\ k_2 &= \frac{\beta_e^2 r_2^3 + \bar{\alpha} r_2}{1 - r_2^2 (\bar{\alpha} + \beta_e^2)}, \quad k_3 = \frac{\beta_e^2 r_3^3 - \bar{\alpha} r_3}{1 + r_3^2 (\bar{\alpha} + \beta_e^2)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (C.4)$$

また、 r_1, r_2, r_3 は

$$\left. \begin{aligned} r_1^2 &= \frac{|\bar{\alpha} - 1|}{\bar{\alpha}} \\ -r_2^2 \\ r_3^2 \end{aligned} \right\} = \frac{1}{2} \left(1 \mp \sqrt{1 + \frac{4}{\beta_e^2}} \right) \text{ (複号同順)} \dots\dots\dots (C.5)$$

β_e^2 は

$$\beta_e^2 = \frac{EI_{II}g}{w\omega^2 r^4} \dots\dots\dots (C.6)$$

で与えられる。

境界条件はゲートケーシング接続部において固定条件となるが、取水パイ接続部において次の関係式で表わされる (図一C 参照)。

$$\left. \begin{aligned} M &= 0 \\ Q \cos \beta - T \sin \beta - (\eta_n \cos \beta + \eta_s \sin \beta) k \\ &\quad - \frac{W_H}{g} \left(\frac{\partial^2 \eta_n}{\partial t^2} \cos \beta + \frac{\partial^2 \eta_s}{\partial t^2} \sin \beta \right) = 0 \\ Q \sin \beta + T \cos \beta + (\eta_s \cos \beta - \eta_n \sin \beta) K \\ &\quad - \frac{W_V}{g} \left(\frac{\partial^2 \eta_s}{\partial t^2} \cos \beta - \frac{\partial^2 \eta_n}{\partial t^2} \sin \beta \right) = 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (C.7)$$

本論では r = 一定としたため、取水パイ接続部において $\beta = \pi/2$ となるが、本計算に際して $\beta = \pi/4$ とした。

参考文献

- 1) 秋元徳三：水力発電所における水撃作用について (1)~(3), 水門鉄管, No. 49, pp. 1~16.
- 2) Jaeger, C.: Engineering Fluid Mechanics, Blackie & Son Ltd., London, p. 295, 1956.
- 3) 吉海連喜ほか：懸垂状海底管の応力解析プログラム, 日本鋼管技報, No. 63, pp. 73~82, 1975.
- 4) 秋元徳三：水圧鉄管の水撃圧と振動, 水門鉄管, No. 92, pp. 10~24, 1975.
- 5) Waltking, F.W.: Schwingungszahlen und Schwingungsformen von Kreisbörgenträgen, Ingenieur-Archiv, Vol. 5, pp. 429~449, 1934.
- 6) 米沢卓志：貯水池の表面取水設備, 土木技術, 30 巻 6 号 1975. (1976.3.6・受付)

* 導水管の stiffened catenary において $\beta = \pi/4$ である。