



土木研究所資料

第七八七号

剛体基礎底面下の水の挙動に関する試験報告

昭和四十七年十一月

建設省土木研究所

土木研究所資料

第 787 号

剛体基礎底面下の水の挙動に関する試験報告

昭和47年11月

建設省土木研究所

受 領 書

報告書名 : 剛体基礎底面下の水の挙動に関する試験報告

資料番号 : 土木研究所資料 第 787 号

部 数 : 部 (1/2)

上記の資料確かに受領致しました。

昭和 年 月 日

所 属

住 所

氏 名

印

剛体基礎底面下の水の挙動に関する試験報告

目 次

1. ま え が き	1
2. 基礎底面下の水の挙動に関する理論	3
3. 水の挙動に関する性状	26
4. 模型試験方法	45
5. 模型試験結果	47
6. 結果のまとめ	59
7. あ と が き	60
8. そ の 他	61

1. ま え が き

ケーソン基礎に水平荷重あるいは曲げモーメントが作用したとき、ケーソン基礎底面反力の偏心によって、その一部を分担する設計方法が現在採用されている。それによると、水平荷重や曲げモーメントが大きくなると、偏心量が大きくなって、その一部が浮き上がり、その状態で静的なつり合いが保たれている。この考え方は、震度法を用いる現行の地震時の設計法にも、適用されている。

それでは、ケーソン基礎のような剛性の大きい、深い基礎が水平方向の荷重を受けて変位した場合に、その底面はどのような状態になるのであろうか。どのような現象を示すのであろうか。その問題については、現在までのところ、全く解明されていない。

単純に考えて、静的な水平荷重が作用した場合、すなわち常時の設計に対しては、荷重の増大とともに、剛体基礎は回転変位を生じ、回転変位が大きくなると、底面の一部は地盤より離れてしまうであろう。したがって、常時の設計においては、現行の設計法における同じ挙動を示すことは確かである。

それでは、地震時の設計ではどのようなになるであろうか。地震荷重のように繰り返される早い運動を与えるような場合については、明確に現象を把握することができていない。確かに一端は浮上るであろう。しかし、浮上りを生ずると、それに対する地中水の動きが問題となり、現象が複雑となる。

この地中水の動きについては次のような現象になることが予想される。地震荷重によって、剛体基礎に運動が生じると、底面と地盤とが離れ、その間に地中水が流入するだろう。当然、地表面より深い位置にあるケーソンの底面は、地下水で飽和されているであろうし、東京湾岸道路で対象とされるような大規模な基礎では海水で満たされているだろう。

この流入する水は剛体基礎の運動と全く一体となって動くであろうか。当然、何らかのタイムラグ、すなわち時間的な遅れを伴うことが考えられる。この時間的な遅れが負の水圧を生ぜしめ、浮き上がる運動を抑制しようとすると考えてもおかしくないはずである。

そこで、ここではこの物理的現象、すなわち、ケーソン基礎底面に生ずる負の水圧の有無を把握する目的で、昭和45年度より基礎研究室において基礎的な調査をくり返したのでその結果について報告するものである。

本報告では簡単なモデルを考えて計算を行なった結果と負の水圧が発生するような機構を有する実験装置を作成して、最も負の水圧を生じやすい状態で実験をくり返し行なった結果を示し、その両者を対比することにより説明するものである。

この現象の解明は著しくむずかしい問題で、まだ研究も端緒についたばかりであるが、ひとまず過去2年間の成果について報告するものである。

負の水圧を計算するに当っては、水を粘性流体としたNavier-Stokesの基礎方程式に基づき、

- 1) 水の運動は定常流である
- 2) 基礎の回転角は小さく、運動は連続して生ずる
- 3) 重力の影響を無視する
- 4) 基礎底面の形状は矩形とする

という仮定のもとに計算したものである。

また、実験は $120\text{ cm} \times 60\text{ cm} \times 80\text{ cm}$ の水槽に、 $40\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ で高さ 85 cm の剛体模型を据え付け、一方向より速度が変化することのできる荷重を加えて、変位させることにより、負の水圧を生ぜしめ、底面にはめこんだ水圧計にて読み取ったものである。

なお、ここに示す計算方法は海中における作業用足場の撤去時に生ずる脚の引抜きに対する抵抗、すなわち“地切り”の問題にも適用することができるので、それについても最後に若干ふれるつもりである。

本報告はひとつの試みとして計算と試験を比較したもので、中間報告としてまとめたものにすぎないので、今後より詳細な研究を行ない、地震時の設計に適用できるようにする予定である。

昭和47年11月

基礎研究室

足立 義雄

松岡 啓治

2. 基礎底面下の水の挙動に関する理論

負の水圧分布について厳密に計算することは非常にむずかしく、簡単に解が見つかるものではない。当然、簡略にして、ひとつのモデルを考えて、解くにすぎない。ここでは底面下の水の挙動にのみ着目して解くこととし、ケーソンの動きとの関係については、今後研究を行なうこととした。

まず、水の挙動に時間的遅れを考える場合、非粘性流体では考えられない。そこで、粘性流体の方程式を用いて計算する必要がある。実在の流体では、流体の変形に対する抵抗、すなわち内部摩擦を有する。この抵抗は粘性と言われ、気体や水などでは小さいが、油、グリセリンなどでは大きい。したがって、粘性流体の力学で取扱うことが可能で、粘性流体の運動に関する式として、一般によく知られているNavier-Stokesの運動方程式を用いることから始める。

もうひとつの仮定は流体を非圧縮性流体と仮定していることである。これは以下に示す解を境界値問題として解くことを考えたためである。圧縮性流体とすると定常流とはならず、初期値問題となり、さらに解が複雑になるので今後検討することとし、ここでは非圧縮性流体の仮定を用いることとした。

2.1 粘性流体の運動におけるNavier-Stokesの運動方程式

粘性流体の運動においてはせん断応力の影響が入る。 x , y , z , 方向の速度成分を u , v , w として、

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial x} &= a, \frac{\partial v}{\partial y} = b, \frac{\partial w}{\partial z} = c \\ \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} &= 2f, \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} = 2g, \\ \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} &= 2h \\ \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} &= 2\xi, \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} = 2\eta \\ \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} &= 2\zeta \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

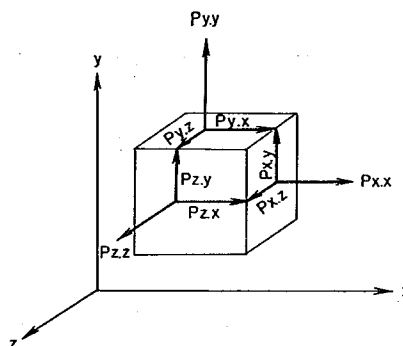


図-1 微少要素と座標系

で表わすと、図-1 に示す微小要素の直応力およびせん断応力は次のように表わすことができる。

$$\left. \begin{aligned} p_{xx} &= -p + \lambda (a + b + c) + 2\mu a \\ p_{yy} &= -p + \lambda (a + b + c) + 2\mu b \\ p_{zz} &= -p + \lambda (a + b + c) + 2\mu c \\ p_{xy} &= p_{yx} = 2\mu f, \quad p_{xz} = p_{zx} = 2\mu g, \quad p_{yz} = p_{zy} = 2\mu h \end{aligned} \right\} \dots (2)$$

ここに、 p は平均圧力で、 $p_{xx} + p_{yy} + p_{zz} = -3p$ であり、 $\lambda = -\frac{2}{3}\mu$ 、 μ は粘性係数である。これらの応力を考えて、Euler の運動方程式

$$\left. \begin{aligned} \frac{Du}{Dt} &= X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{Dv}{Dt} &= Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \\ \frac{Dw}{Dt} &= Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \end{aligned} \right\} \dots (3)$$

と同様にして、粘性流体の運動方程式を考えれば、

$$\left. \begin{aligned} \frac{Du}{Dt} &= X + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial p_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial p_{zx}}{\partial z} \right) \\ \frac{Dv}{Dt} &= Y + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial p_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial p_{zy}}{\partial z} \right) \\ \frac{Dw}{Dt} &= Z + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial p_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial p_{zz}}{\partial z} \right) \end{aligned} \right\} \dots (4)$$

と表わされる。

ここに

$$\begin{aligned} \frac{Du}{Dt} &= \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \\ \frac{Dv}{Dt} &= \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \\ \frac{Dw}{Dt} &= \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \end{aligned}$$

X, Y, Z は微少要素に働く質量力,

ρ は流体の密度

これに(1)式および(2)式を代入し、体積変化を $\varphi = a + b + c$ と書けば、

$$\left. \begin{aligned} \rho \frac{Du}{Dt} &= \rho X - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{3} \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \mu \nabla^2 u \\ \rho \frac{Dv}{Dt} &= \rho Y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu}{3} \frac{\partial \varphi}{\partial y} + \mu \nabla^2 v \\ \rho \frac{Dw}{Dt} &= \rho Z - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\mu}{3} \frac{\partial \varphi}{\partial z} + \mu \nabla^2 w \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

$$\text{ただし, } \nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

となる。これを Navier-Stokes の運動方程式という。

2.2 基礎方程式の誘導

Navier-Stokes の運動方程式を整理して示すと、

$$\left. \begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) &= \rho X - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{3} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \\ &\quad + \mu \nabla^2 u \\ \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= \rho Y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu}{3} \frac{\partial \varphi}{\partial y} \\ &\quad + \mu \nabla^2 v \\ \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= \rho Z - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\mu}{3} \frac{\partial \varphi}{\partial z} \\ &\quad + \mu \nabla^2 w \end{aligned} \right\} \dots\dots(6)$$

ただし, u, v, w : x, y, z 方向の速度成分

ρ : 流体の密度

p : 平均圧力

X, Y, Z : 単位質量に対する質量力

μ : 粘性係数

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

$$\varphi = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}$$

(6)式において対象を非圧縮性流体に限定すると、連続の方程式が成り立ち

$$\varphi = 0 \quad \dots\dots\dots (7)$$

となる。また、流体の運動量は小さいと考えると、 $u, v, w, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial x}$
 $\dots\dots\dots$ の積は無視することができ、さらに質量力は作用していないので

$$X = Y = Z = 0 \quad \dots\dots\dots (8)$$

とする。以上の関係により簡略化されると、(6)式の方程式は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \mu \nabla^2 u &= \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} \\ \mu \nabla^2 v &= \rho \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial y} \\ \mu \nabla^2 w &= \rho \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (9)$$

したがって、(9)式に初期条件、境界条件を与えて解を見出すことを考えればよい。しかし(9)式は u, v, w, p の4つの未知数を含んでいるので、未知数の数に比べて方程式の数が少ない。

そこで、連続の方程式を加えると、(7)式より

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \dots\dots\dots (10)$$

次に、定常流であると考えると

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial w}{\partial t} = 0 \quad \dots\dots\dots (11)$$

また、支持地盤と基礎底面間のすきまは小さく、 xz 面に基礎底面があり、 y 軸方向にのみ粘性が影響すると考え、さらに傾斜が小さいとすると

$$\left. \begin{aligned} \nabla^2 u &= \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \\ \nabla^2 v &= 0 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (12)$$

が成り立つ。(11), (12)式を用いると、(9)式は

$$\left. \begin{aligned} \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} &= \frac{\partial p}{\partial x} \\ 0 &= \frac{\partial p}{\partial y} \\ \mu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} &= \frac{\partial p}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (13)$$

となる。この式をMichell の潤滑理論の式と称しており、これを基礎方程式として解くことを考える。

2.3 水の挙動に関する方程式の誘導

基礎底面の運動を図-2に示すような回転運動と考え、水平力が作用したとき、時間 t 秒後に ϕ の回転角を生ずると考える。底面の平面形状は図-3に示すような $2a \times 2b$ の矩形とする。

境界条件としては

$$\left. \begin{array}{l} t = 0, \quad y = 0 \quad : \quad u = v = w = 0 \\ t = t, \quad y = y_0 + cx : u = w = 0, \quad v = \frac{cx}{t} = kx \end{array} \right\} \dots\dots\dots (14)$$

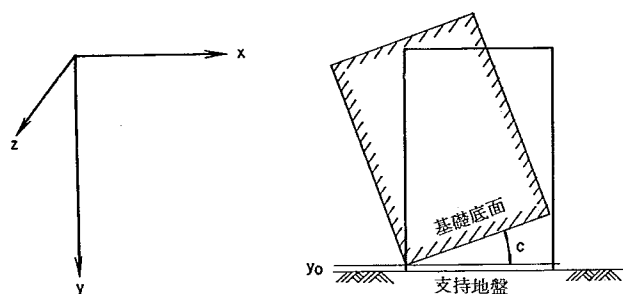


図-2 基礎の運動による底面の状況

ここに、

- k : 回転角速度
- t : 時刻
- ϕ : 回転角 ($\phi = kt$)

また,

$$\left. \begin{array}{l} x = 0, 2a : p = 0 \\ z = \pm b : p = 0 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (15)$$

とする。

(14)式において、回転運動のみを与えたとき、時間 t 秒後には $y = cx$ になると考えられるが、(13)式を変形して解くときに、 $y = cx$ なる境界条件を与えると、解の得られない点が生ずるので、便宜的に $y = y_0 + cx$ と考え、初期に y_0 だけ変化するとしたものである。この値は、以下の説明でも理解できるように、実測ができないので、便宜上の値であり、今後修正する必要がある。

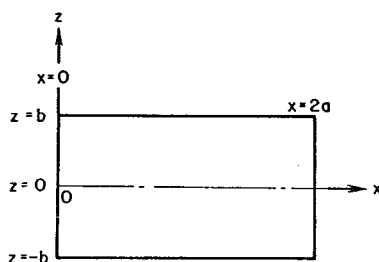


図-3 底面形状

(13)式より p は y に無関係であるので、(13)式の第1, 第3式を y で2回積分すると、

$$\left. \begin{array}{l} u = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} y^2 + C_1(x, z) y + C_2(x, z) \\ w = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial z} y^2 + D_1(x, z) y + D_2(x, z) \end{array} \right\} \dots\dots\dots (16)$$

となり、(14)式の条件によって

$$\left. \begin{array}{l} C_2(x, z) = D_2(x, z) = 0 \\ C_1(x, z) = -\frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} (y_0 + cx) \\ D_1(x, z) = -\frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial z} (y_0 + cx) \end{array} \right\} \dots\dots\dots (17)$$

が得られる。したがって

$$\left. \begin{array}{l} u = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} y \{ y - (y_0 + cx) \} \\ w = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial z} y \{ y - (y_0 + cx) \} \end{array} \right\} \dots\dots\dots (18)$$

となる。⑩式を⑪式に代入すれば

$$v = -\frac{1}{2\mu} \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \right) \left\{ \frac{y^3}{3} - \frac{(y_0 + cx)}{2} y^2 \right\} + \frac{C}{4\mu} y^2 \frac{\partial p}{\partial x} \quad \dots\dots\dots (19)$$

となる。上式に境界条件式, $y = y_0 + cx : v = kx$ を代入して整理すると,

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{3c}{(y_0 + cx)} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{12\mu kx}{(y_0 + cx)^3} \quad \dots\dots\dots (20)$$

が得られ, これを解いて p を求めればよい。

いま, $y_0 = 0$ の場合には簡単に,

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{3}{x} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{12\mu k}{c^3} \cdot \frac{1}{x^2} \quad \dots\dots\dots (21)$$

となる。しかし, この式は $x = 0$ において発散するので, 解を得ることはできない。

2.4 数 値 解 析

⑩式を解析的に解くことは不可能であるので, ここではこれを差分方程式におして数値解析する。図-4のように差分点をとると,

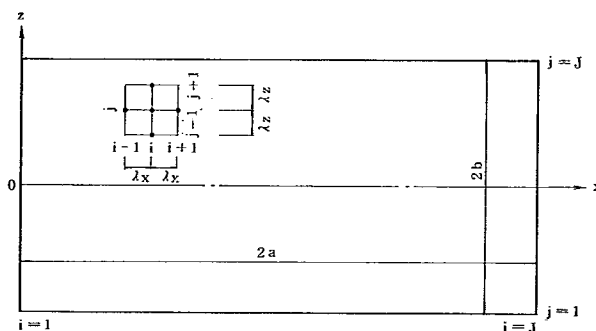


図-4 供試体底面のメッシュ

$$\left. \begin{aligned}
 \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \right)_{i,j} &= \frac{1}{\lambda_x^2} (p_{i+1,j} - 2p_{i,j} + p_{i-1,j}) \\
 \left(\frac{3c}{(y_0 + cx)} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right)_{ij} &= \frac{3c}{[y_0 + (i-1)c\lambda_x]} \cdot \frac{1}{2\lambda_x} (p_{i+1,j} - p_{i-1,j}) \\
 \left(\frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \right)_{i,j} &= \frac{1}{\lambda_z^2} (p_{i,j+1} - 2p_{i,j} + p_{i,j-1}) \\
 \left(12\mu k \frac{x}{(y_0 + cx)^3} \right)_{ij} &= 12\mu k \frac{(i-1)\lambda_x}{[y_0 + (i-1)c\lambda_x]^3}
 \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

より、次のように差分方程式が得られる。

$$\left. \begin{aligned}
 &\left\{ \frac{1}{\lambda_x^2} + \frac{1}{2\lambda_x} \cdot \frac{3c}{[y_0 + (i-1)c\lambda_x]} \right\} p_{i+1,j} \\
 &+ \left\{ \frac{1}{\lambda_x^2} - \frac{1}{2\lambda_x} \cdot \frac{3c}{[y_0 + (i-1)c\lambda_x]} \right\} p_{i-1,j} \\
 &+ \frac{1}{\lambda_z^2} p_{i,j+1} + \frac{1}{\lambda_z^2} p_{i,j-1} - \left(\frac{2}{\lambda_x^2} + \frac{2}{\lambda_z^2} \right) p_{ij} \\
 &- 12\mu k \frac{(i-1)\lambda_x}{[y_0 + (i-1)c\lambda_x]^3} = 0
 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots (23)$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned}
 a_i &= \frac{1}{\lambda_x^2} + \frac{1}{2\lambda_x} \cdot \frac{3c}{[y_0 + (i-1)c\lambda_x]} \\
 b_i &= \frac{1}{\lambda_x^2} - \frac{1}{2\lambda_x} \cdot \frac{3c}{[y_0 + (i-1)c\lambda_x]} \\
 c_i &= \frac{1}{\lambda_z^2} \\
 d_i &= \frac{1}{\lambda_z^2} \\
 e_i &= - \left(\frac{2}{\lambda_x^2} + \frac{2}{\lambda_z^2} \right) \\
 f_i &= - 12\mu k \frac{(i-1)\lambda_x}{[y_0 + (i-1)c\lambda_x]^3}
 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (24)$$

とおくと方程式は

$$a_i p_{i+1,j} + b_i p_{i-1,j} + c_i p_{i,j+1} + d_i p_{i,j-1} + e_i p_{i,j} + f_i = 0 \quad \dots\dots\dots (25)$$

となる。ただし、(25)より境界条件としては、次のものが与えられる。

$$\left. \begin{aligned} p_{1,j} &= p_{I,j} = p_{i,1} = p_{i,J} = 0 \\ i &= 1, I \\ j &= 1, J \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (26)$$

方程式を(26)式の条件のもとで解けばよい。いま、逐次式加速緩和法を用いて解くと、 ω を加速係数として、 $(n+1)$ 次の p_{ij} は次式のように表わされる。

$$p_{i,j}^{(n+1)} = p_{i,j}^{(n)} - \omega (a_i p_{i+1,j}^{(n)} + b_i p_{i-1,j}^{(n)} + c_i p_{i,j+1}^{(n)} + d_i p_{i,j-1}^{(n)} + e_i p_{i,j}^{(n)} + f_i) / e_i \quad \dots\dots\dots (27)$$

方程式の右辺の第2項は n 次の $p_{i,j}$ の修正量となり、これを $E_{i,j}$ で表わすと、すべての差分点での $E_{i,j}$ の絶対値の合計を $p_{i,j}$ の絶対値の合計で除したものの

$$\frac{\sum |E_{i,j}|}{\sum |p_{i,j}|} \quad \dots\dots\dots (28)$$

は NORM と呼ばれる。これに、あらかじめ小さい値を与えておき、

$$\text{NORM} \leq \epsilon \quad \dots\dots\dots (29)$$

のときに、収束するものという条件で求めることとする。

次に、初期値としては、 p が近次的に次式のように表わされると仮定すると、

$$p = A_0 \sin^2 \pi \frac{x}{2a} \sin^2 \pi \frac{z}{2b} \quad \dots\dots\dots (30)$$

この p はいずれの点にても成立たなければならない。いま、 $x=a$ 、 $z=b$ の点に着目してみると、

$$\frac{\partial p}{\partial x} = A_0 \frac{\pi}{a} \sin \frac{\pi}{2a} x \cos \frac{\pi}{2a} x \cdot \sin^2 \frac{\pi}{2b} z \quad \dots\dots\dots (31)$$

より

$$\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)_{x=a, z=b} = 0 \quad \dots\dots\dots (32)$$

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = A_0 \frac{\pi^2}{2a^2} \left[\cos^2 \frac{\pi}{2a} x - \sin^2 \frac{\pi}{2a} x \right] \cdot \sin^2 \frac{\pi}{2b} z \quad \dots\dots (33)$$

より

$$\left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \right)_{\substack{x=a \\ x=b}} = -A_0 \frac{\pi^2}{2a^2} \quad \dots\dots\dots (34)$$

$$\frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = A_0 \frac{\pi^2}{2b^2} \left[\cos^2 \frac{\pi}{2b} z - \sin^2 \frac{\pi}{2b} z \right] \sin^2 \frac{\pi}{2a} x \quad \dots\dots (35)$$

より

$$\left(\frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \right)_{\substack{z=c \\ z=d}} = -A_0 \frac{\pi^2}{2b^2} \quad \dots\dots\dots (36)$$

これらを、(33)式へ代入して A_0 を求めると、

$$A_0 = \frac{24\mu k}{\pi^2} \cdot \frac{a^3 b^2}{(a^2 + b^2)(y_0 + ca)^2(2y_0 - ca)} \quad \dots\dots\dots (37)$$

加速係数 ω について、収束を速めるための最適値 ω_{opt} は

$$\omega_{opt} = \frac{2}{1 + \sqrt{1 - \mu^2}} \quad \dots\dots\dots (38)$$

で表わされる。いま、辺の長さが a の正方形領域については、

$$\mu = \cos \left(\frac{\Delta a}{a} \pi \right) \quad \dots\dots\dots (39)$$

となることから

$$\omega_{opt} = 2 / \left[1 + \sin \left(\frac{\Delta a}{a} \pi \right) \right] \quad \dots\dots\dots (40)$$

となる。これに仮に、

$$2a = 0.4 \text{ m}$$

$$MESH = 20$$

$$2b = 0.2 \text{ m}$$

$$MESH = 20$$

$$y_0 = 0.0001 \text{ m}$$

を代入して, w を 1.1, 1.2, 1.4, ... と変化させて計算を行なった結果, 図-5 のようになり, 収束の早い w_{opt} が得られる。

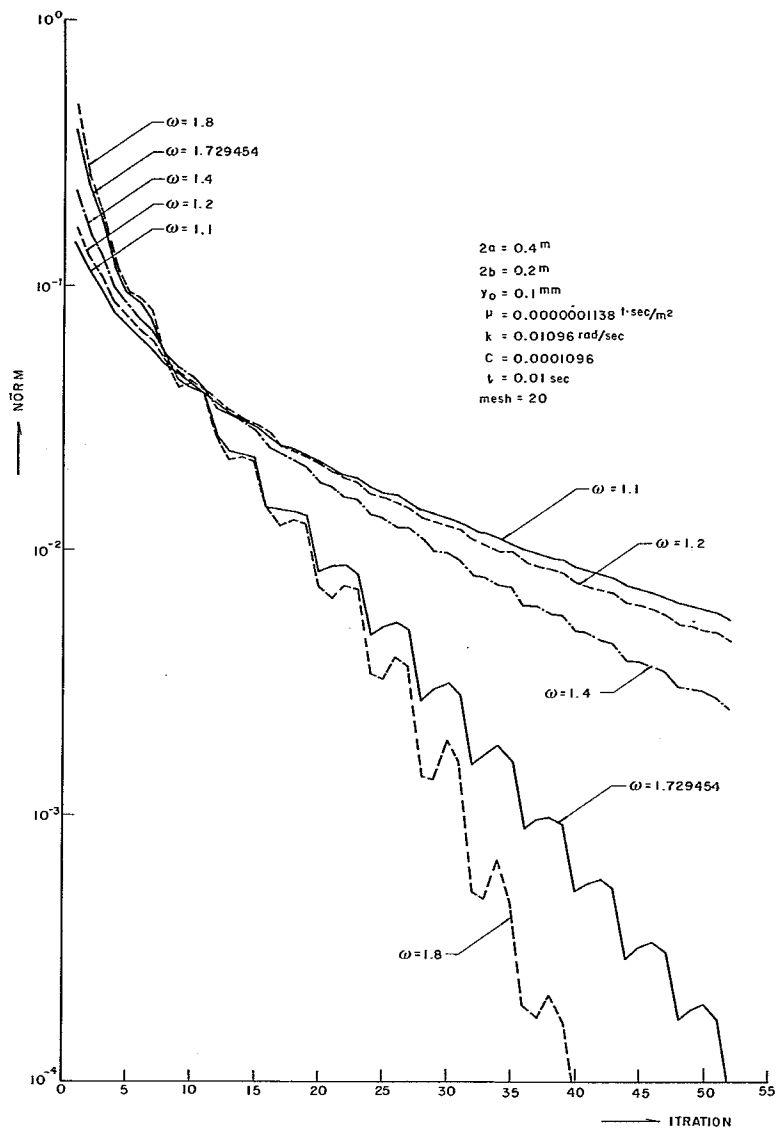


図-5 加速係数

以上のことを考慮して、電子計算機 Tosbac-3400 にてプログラムを組んだ。この場合に、収束は図-6 に示すように i) → ii) → iii) → iv) → i) → ii) → iii) → iv) の順序で図式を用いて行ない図式を満足するまでこれを繰返した。

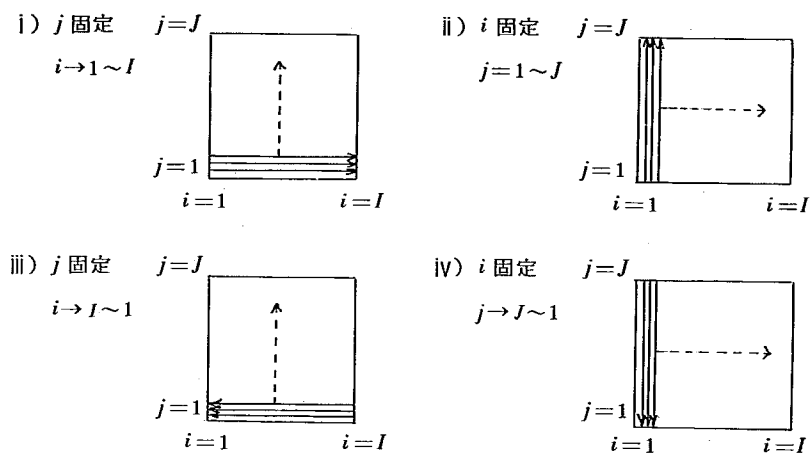
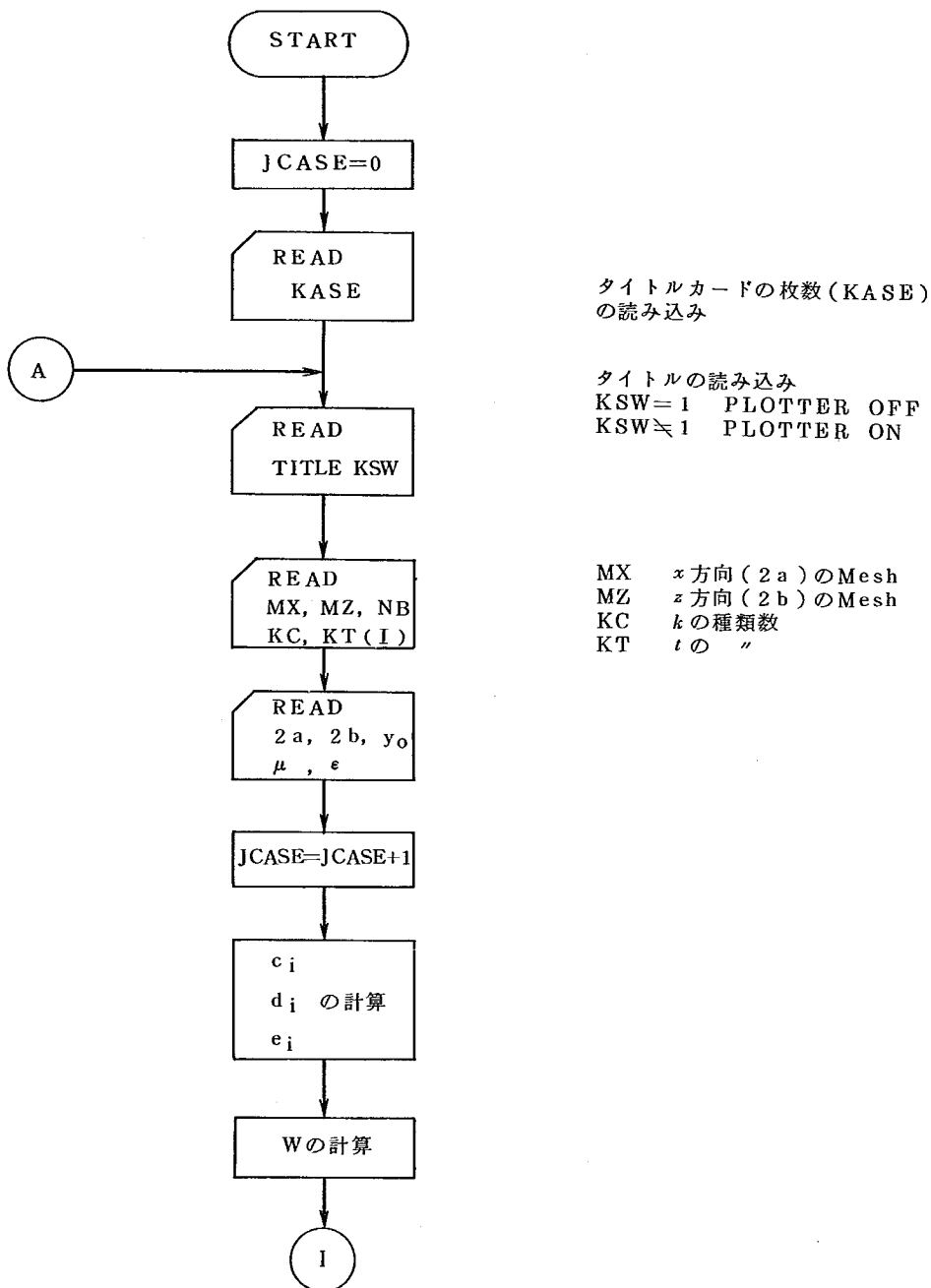
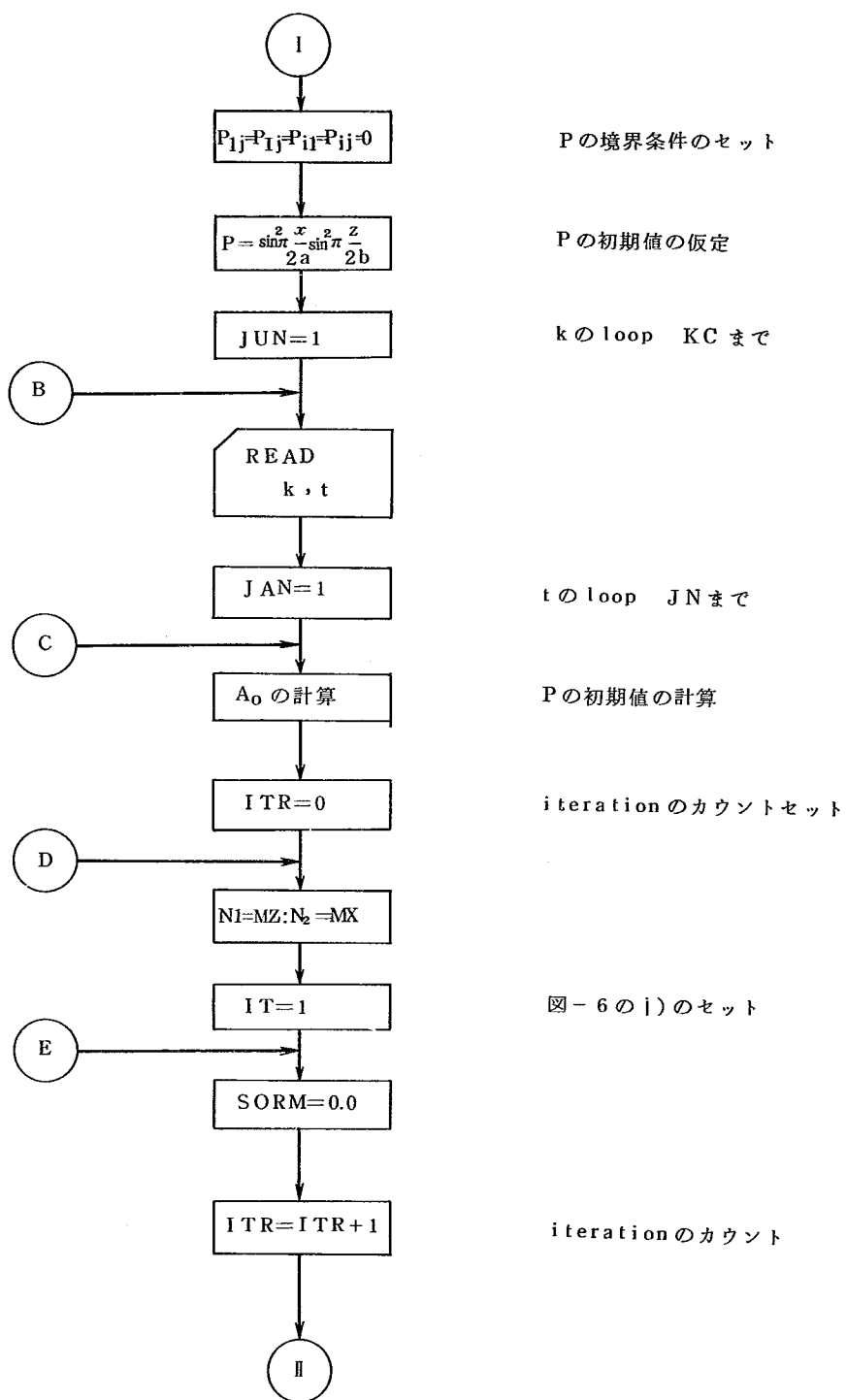
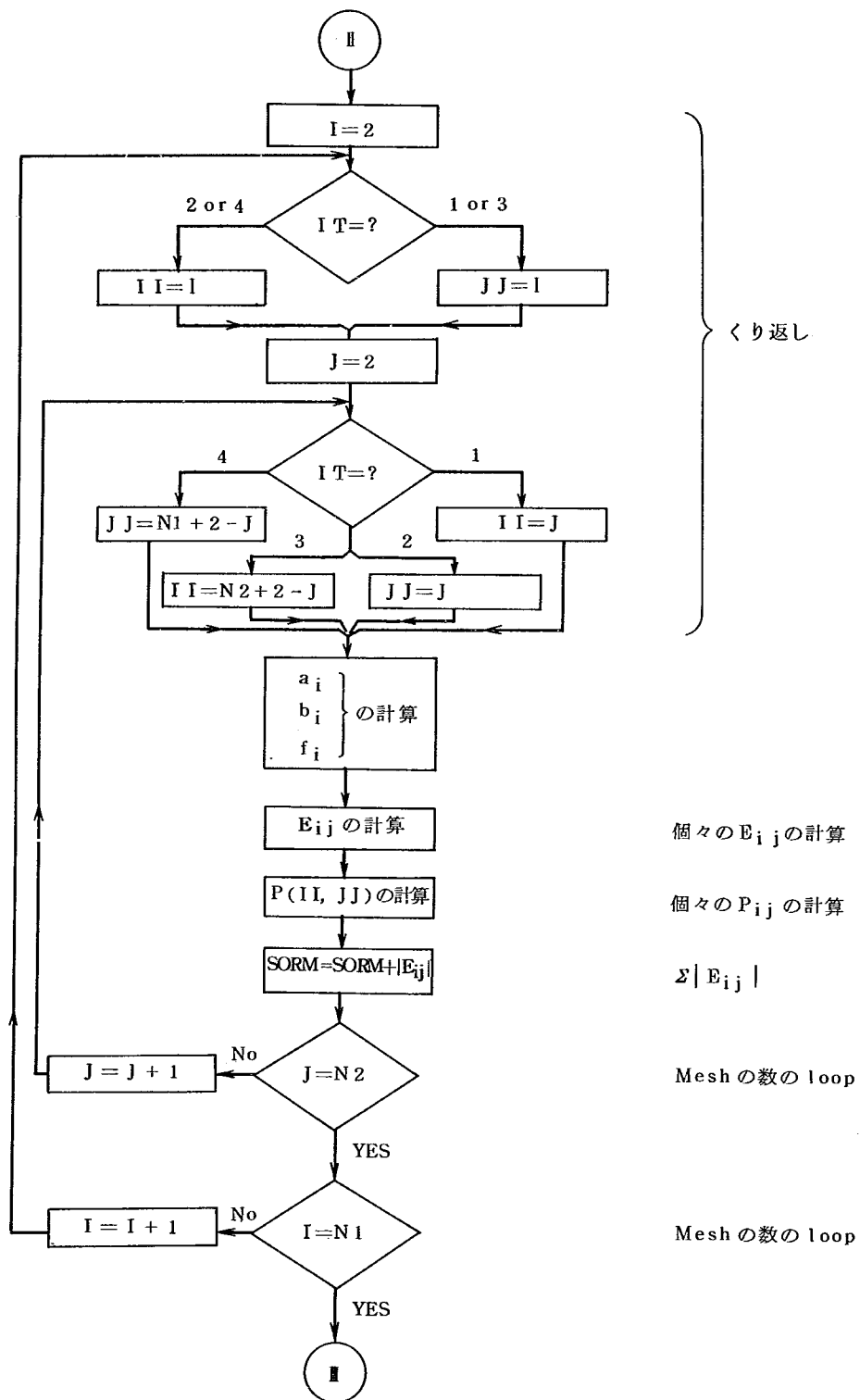


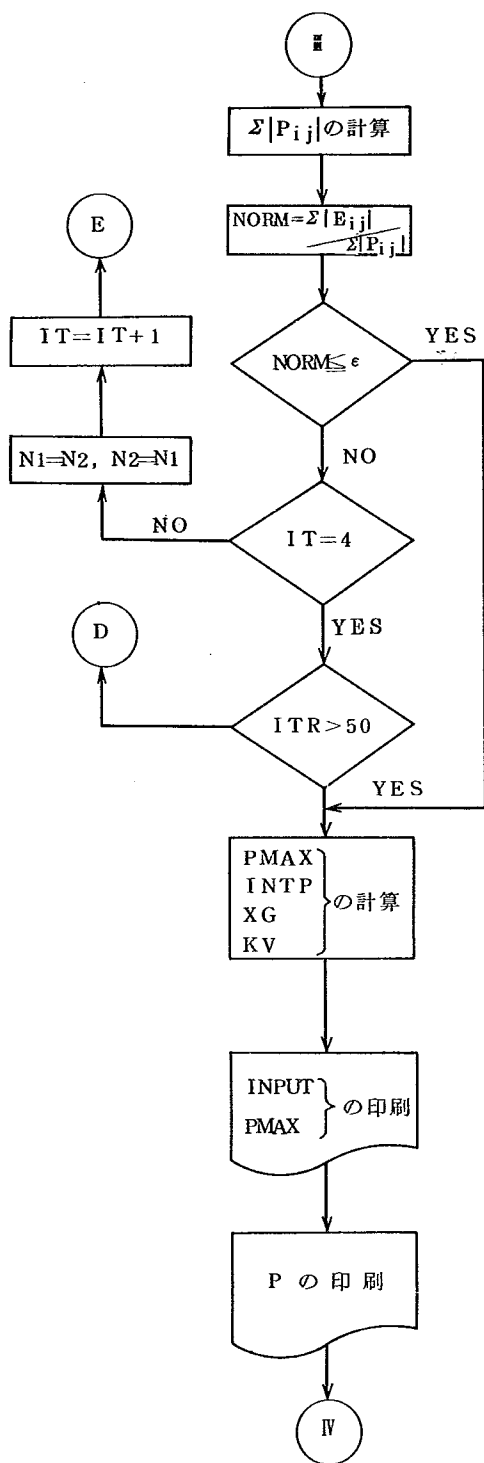
図-6 反復順序

以下にフローチャートを示す。









収束の判定として $NORM \leq \epsilon$ となったとき収束とみなしている。しかし iteration の回数が増して $NORM$ があまり減少しない場合電子計算機ではぐるぐるまわる可能性があるので、このプログラムでは iteration の回数を 50 回と制限した。したがって $NORM \leq \epsilon$ となった場合か、iteration の回数が 50 回を越えた場合のどちらかで、この loop を抜けるようにしてある。

IN PUT DATA
CALCULATION
RESULTの印刷

収束時の DISTRIBUTION
OF PRESSUREの印刷


```

1      COMMON /AAA/  P(40,40)
2      COMMON /BBB/  IX, IZ
3      COMMON /CCC/  PI, NX, NY
4      COMMON /DDD/  PMAX
5      COMMON /EEE/  VV, XG, SK, SM, Y0, X, Z, CC, GX, TK, MX, MZ, NEJ
6      COMMON /FFF/  NB
      C
7      DIMENSION  NAME(39), KT(40), ST(40), RA(40), RB(40), RF(40)
      C
8      REAL  NORM
      C
9      PI = 3.1415926536
      C
10     JCASE = 0
11     READ(5,1100) KASE
      C
12     50 READ(5,1000) ( NAME(I),I=1,39 ), KSW
13     READ(5,1100) MX, MZ, KC, ( KT(I),I=1,KC )
14     READ(5,1200) X, Z, YZ, SM, EP
15     IPAGE = 1
16     JCASE = JCASE + 1
17     Y0 = 1000.0 * YZ
18     DX = X/FLOAT(MX)
19     DZ = Z/FLOAT(MZ)
20     IX = MX + 1
21     IZ = MZ + 1
22     T = 1.0/DX**2
23     C=1.0/DZ**2
24     D=C
25     E=-2.0*(T+C)
26     OMEGA = 2.0 / ( 1.0 + SIN( PI / FLOAT(MX) ) )
      C
27     DO 2 I = 1, IX
28     P(I,1) = 0.0
29     P(I,IZ) = 0.0
30     2 CONTINUE
      C
31     DO 3 I = 1, IZ
32     P(1,I) = 0.0
33     P(IX,I) = 0.0
34     3 CONTINUE
      C
      C      INITIAL P  COEFFICIENT
      C
35     DO 4 I = 2, MX
36     Q1 = SIN( DX * FLOAT(I-1) * PI / X )**2
37     DO 4 J = 2, MZ
38     Q2 = SIN( DZ * FLOAT(J-1) * PI / Z )**2
39     P(I,J) = - Q1 * Q2
40     4 CONTINUE
      C
41     CN = 3.0 * SM * X**3 * Z**2 / ( PI**2 * ( X**2 + Z**2 ) )
42     AB = 1.0
      C
43     DO 40 JUN = 1, KC
44     JN = KT(JUN)
45     READ(5,1200) SK, ( ST(I),I=1,JN )
      C
46     DO 30 JAN = 1, JN
47     CC = SK * ST(JAN)
48     AA = CN * SK / ( YZ + CC * X / 2.0 )**3
49     I1 = JAN - 1
50     Q = AA / AB
      C
      C      INITIAL P
      C
51     DO 5 I = 2, MX
52     DO 5 J = 2, MZ
53     P(I,J) = P(I,J) * Q
54     5 CONTINUE
      C
55     DO 1 I = 2, MX

```

```

56      S = YZ + CC * DX * FLOAT(I-1)
57      R = 3.0 * CC / ( 2.0 * DX * S )
58      RA(I)=T+R
59      RB(I)=T-R
60      RF(I) = - 12.0 * SM *SK * DX * FLOAT(I-1) / S**3
61      1 CONTINUE
      C
62      ITR = 0
53      N1 = MZ
64      N2 = MX
      C
65      DO 20 IT = 1, 4
66      SORM = 0.0
67      ITR = ITR + 1
      C
68      DO 15 I = 2, N1
69      GO TO ( 56, 57, 56, 57 ), IT
70      JJ = I
71      GO TO 58
72      57 II = I
      C
73      58 DO 10 J = 2, N2
74      GO TO ( 59, 60, 61, 62 ), IT
75      59 II = J
76      GO TO 63
77      60 JJ = J
78      GO TO 63
79      61 II = N2 + 2 - J
80      GO TO 63
81      62 JJ = N1 + 2 - J
82      A = RA(II)
83      B = RB(II)
84      F = RF(II)
85      EIJ = ( A * P(II+1,JJ) + B * P(II-1,JJ) + C * P(II,JJ+1) +
      * D * P(II,JJ-1) + E * P(II,JJ) + F ) * OMEGA / E
86      P(II,JJ) = P(II,JJ) - EIJ
87      SORM = SORM + ABS(EIJ)
      C
88      10 CONTINUE
89      15 CONTINUE
      C
90      BN = 0.0
91      DO 6 I = 1, IX
92      DO 6 J = 1, IZ
93      BN = BN + ABS( P(I,J) )
94      6 CONTINUE
      C
95      NORM = SORM/BN
96      IF( NORM.LT.EP ) GO TO 70
97      I = N1
98      N1 = N2
99      N2 = I
100     20 CONTINUE
      C
101     IF( ITR.LT.50 ) GO TO 53
      C
      C      CONVERGENCY      AFTER PLOTTER
      C
102     70 R = ABS( P(1,1) )
103     DO 8 I = 1, IX
104     DO 8 J = 1, IZ
105     IF( R.GT.ABS( P(I,J) ) ) GO TO 8
106     R = ABS( P(I,J) )
107     NX = I
108     NY = J
109     8 CONTINUE
      C
110     PMAX = P(NX,NY)
111     Q1 = 0.0
112     Q2 = 0.0
113     DO 9 I = 1, IX

```

```

114      DO 9 J = 1, IZ
115      Q1 = Q1 + P(I,J)
116      Q2 = Q2 + P(I,J) * DX * FLOAT(I-1)
117      9 CONTINUE
C
118      VV = Q1 * DX * DZ
119      XG = Q2 * DX * DZ / VV
120      GX = XG / DX - FLOAT(NX-1)
121      Q1 = DX * FLOAT(NX-1)
122      TK = ABS( PMAX / ( Q1 * CC ) )
123      WRITE(6,2000) ( NAME(I),I=1,39 ), IPAGE
124      IPAGE = IPAGE + 1
125      WRITE(6,2100) X, MX, Z, MZ, YO, SM, SK, CC, ST(JAN)
126      WRITE(6,2200) OMEGA, EP, NORM, ITR
127      IF( KSW.EQ.1 ) GO TO 71
128      WRITE(6,2500)
129      GO TO 72
130      71 WRITE(6,2600)
131      72 WRITE(6,2300) PMAX, Q1, VV, XG, TK
C
132      WRITE(6,2000) ( NAME(I),I=1,39 ), IPAGE
133      IPAGE = IPAGE + 1
134      WRITE(6,2400)
C
135      CALL PRINP
C
C
136      75 AB = AA
C
137      30 CONTINUE
138      40 CONTINUE
C
139      IF( JCASE.EQ.KASE ) GO TO 99
140      GO TO 50
C
141      1000 FORMAT( 39A2, I2 )
142      1100 FORMAT( 16I5 )
143      1200 FORMAT( 8F10.0 )
144      2000 FORMAT( 1H1 /// 5X, 7HTITLE , 39A2, 3X, 12H** PAGE - , I4,
* 4H ** // )
145      2100 FORMAT( 10X, 14H* INPUT DATA * / 68X, 4HMESH // 15X, 4HSIZE, 15X,
* 2H2A, 6X, F11.3, 6H ( M ), 11X, I2 // 34X, 2H2B, 6X,
* F11.3, 6H ( M ), 11X, I2 // 34X, 2HYO, 6X, F11.3,
* 7H ( MM ) // 15X, 9HVISCOISITY, 10X, 2HMU, 6X, E11.4, 1X,
* 12H( T*SEC/M2 ) // 15X, 16HANGULAR VELOCITY, 3X, 1HK, 7X,
* E11.4, 13H ( RAD./SEC ) // 15X, 13HROCKING ANGLE, 6X, 1HC,
* 7X, E11.4, 9H ( RAD. ) // 15X, 15HTIME ( = C/K ), 4X,
* 1HT, 7X, E11.4, 8H ( SEC ) // )
146      2200 FORMAT( 10X, 15H* CALCULATION * // 15X, 14HDAMPING FACTOR, 13X,
* F11.4 // 15X, 12HNORM ( SET ), 15X, E11.4 // 20X,
* 9H( FINAL ), 13X, E11.4 // 15X, 9HITERATION, 26X, I3, 1X,
* 9H( CYCLE ) / )
147      2300 FORMAT( 10X, 10H* RESULT * // 15X, 12HPRESSURE MAX, 7X, 4HPMAX,
* 4X, E11.4, 9H ( T/M2 ), 8X, 2H( , F8.3, 4H M ) // 15X,
* 9HRESULTANT, 10X, 5HINT.P, 3X, E11.4, 6H ( T ) // 15X,
* 12HACTING POINT, 7X, 2HXG, 6X, F11.3, 6H ( M ) // 15X,
* 15HSPRING CONSTANT, 4X, 2HKV, 6X, E11.4, 9H ( T/M3 ) / )
148      2400 FORMAT( 6X, 30H** DISTRIBUTION OF PRESSURE **, 84X, 10H( T/M**2 )
* / )
149      2500 FORMAT( 15X, 7HPLOTTER, 28X, 4H ON // )
150      2600 FORMAT( 15X, 7HPLOTTER, 28X, 4HOFF // )
C
151      99 CONTINUE
152      STOP
153      END

```

/EXC FTC

```
1          SUBROUTINE PRNP
2          C
3          COMMON /AAA/  P(40,40)
4          COMMON /BBB/  IX, IZ
5          C
6          M = IX/11 + 1
7          IS = 1
8          C
9          DO 2 I = 1, M
10         IE = 11 * I
11         IF( I.EQ.M ) IE = IX
12         WRITE(6,2000) ( II,II=IS,IE )
13         WRITE(6,2200)
14         C
15         DO 1 J = 1, IZ
16         JJ = IZ + 1 - J
17         WRITE(6,2100) JJ, ( P(II,JJ),II=IS,IE )
18         1 CONTINUE
19         WRITE(6,2200)
20         WRITE(6,2000) ( II,II=IS,IE )
21         WRITE(6,2200)
22         IS = IE + 1
23         2 CONTINUE
24         C
25         2000 FORMAT( 12X, 11( 3X, I3, 5X ) )
26         2100 FORMAT( 6X, I3, 3X, 11( E10.3, 1X ) )
27         2200 FORMAT( 1H )
28         C
29         RETURN
30         END
```

(1) インプットデータの順

1) ケース数

15

CASE	
1 5 6	80

2) タイトル

39A2

12

TITLE		
1	.	78 80

カラム 1 ～ 7 8 まで工事番号、橋梁名、年月日等英数字及び特殊記号(., * 等)を組み合わせて自由に記入する。カラム 8 0 はプロッター不要の時 1 を記入、必要の時は 0 を記入する。

3) コントロールデータ(1)

1 6 I 5

MX 1 5	MZ 6 10	NB	KC	KT(1)	KT(2)		KT (KC) 80
-----------	------------	----	----	-------	-------	-------	-----------------

MX..... x 方向 (2 a) の Mesh

M Z..... z 方向 (2 b) の Mesh

NB..... PLOTTER 必要の時 $p-X$ LINE の本数

KC..... k の種類

KT () k に対応する t の種類。KC 個データを読み込む。

4) コントロールデータ(2)

5 F 10.0

X	Z	YZ	SH	EP	
1 10	11 20				

X x 方向 (2 a) の長さ (m)

Z z 方向 (2 b) の長さ (m)

YZ y_0 の値 (m)

SM μ (t . sec / m²)

EP ϵ

5) 回転角速度 k と時間 t

8 F 1 0 . 0

k ₁	t ₁	t ₂	...	t _{KT(1)}
k ₂	t ₁	t ₂	...	t _{KT(2)}
k ₃	t ₁	t ₂	...	t _{KT(3)}
⋮	⋮	⋮	...	
K k c	t ₁	t ₂	...	t _{KT (K5)}

2) ~ 5) までは 1 組として C A S E に組を記入する。なお、枠内の数字はカラムを表わす。

(2) 計算した結果のアウトプットデータの順序

i) 最大の圧力 P_{max}

圧力 P の分布状態の絶対値の最大値でその点は z 方向に対称なので x の距離だけを out put した。

ii) 合成力 $I_{NT \cdot p}$

$$I_{NT \cdot p} = \int p dA$$

プログラム上では

$$I_{NT \cdot p} = \lambda_x \lambda_z \sum P_{ij}$$

で求めた。

iii) 作用点 X_c

$$X_c = \int p x dA / I_{NT \cdot p}$$

プログラム上は

$$X_c = \lambda_x \lambda_z \sum \{ p_{ij} \lambda_z (i-1) \} / I_{NT \cdot p}$$

で求めた。

iv) バネ定数 K_v

$$K_v = P_{max} / (x_{pmax} \times c)$$

3 水の挙動に関する性状

4 節において詳しく説明するが、負の水圧の物理的現象を調べるために水圧変動測定装置を製作して試験を行なっている。そのうち、昭和46年度に実測したデータを取りまとめてみると、回転角速度は $0.0005 \sim 0.01 \text{ rad./sec}$ の範囲内に存在し、最大負圧の生じる時間は $0.01 \sim 0.10 \text{ sec}$ の範囲内に存在する。したがって、この結果を利用して、その間の角速度、時間を細かく分割し、その両者を組み合わせて、初期間隔 y_0 が $0.10, 0.15, 0.20 \text{ mm}$ の場合について計算を行ない、傾向を調べることにした。 μ の値は $0.1138 \times 10^{-5} \text{ sec/m}^2$ である。以下に、これらの計算結果を取りまとめて説明する。

- (1) 図-7~9は最大負圧 $P_{\max} (\text{Kg/cm}^2)$ と回転角 $c (\text{rad.})$ の関係を回転角速度 $k (\text{rad./sec})$ を変化させて調べたものである。
- (2) 図-10~12は最大負圧 $P_{\max} (\text{Kg/cm}^2)$ と回転角速度 $k (\text{rad./sec.})$ の関係を時間 $T (\text{sec})$ を変化させて調べたものである。
- (3) 図-13~15は最大負圧 $P_{\max} (\text{Kg/cm}^2)$ と時間 $T (\text{sec})$ の関係を回転角速度 $k (\text{rad./sec})$ を変化させて調べたものである。
- (4) 図-16~27は中心線上の圧力分布を $c (\text{rad.})$, $k (\text{rad./sec})$ を一定として y_0 が $0.10, 0.15, 0.20 \text{ mm}$ の場合について計算したものである。
- (5) 図-28~34は $P (\text{Kg/cm}^2)$ と $x (\text{cm})$ の関係を回転角速度 $k (\text{rad./sec})$ を一定にして時間 $T (\text{sec})$ を変化させて図示したものである。
- (6) 図-35 $P_{\max}/y_0 + c x (\text{Kg/cm}^2)$ と $c (\text{rad.})$ の関係を時間 $T (\text{sec})$ を変化させて書いたものである。
- (7) 図-36~39は $p_i/y_0 + c x_i (\text{Kg/cm}^2)$ と $x (\text{cm})$ の関係を回転角 $c (\text{rad.})$ を変えて計算したものである。
- (8) 図-40は $P_{\max} (\text{Kg/cm}^2)$ と $c (\text{rad.})$ の関係を時間 $T (\text{sec})$ を変化させて調べたものである。

以上の計算結果よりは次のことが理解できる。

- (1) 回転角 c が小さい場合には、負圧は一定値になり、 y_0 の影響のみと考えられる。これは $k t$ が小さい場合にも同様の傾向があることから納得できる。
- (2) 回転角 c が大きくなると、負圧も漸減する。
- (3) y_0 の値で負圧が大きく変化するので、この点より計算された値への信頼性に若干問題がある。また、 y_0 の決め方が大変むずかしい。

- (4) 回転角速度が大きくなった場合にも、負圧が大きくなる。
- (5) 時間的变化を考えた場合には、ある回転角速度で負圧が最大となる。
- (6) 時間が大きくなると、負圧は小さくなっていく。
- (7) 計算上の分布は放物線分布となり、計算上の最大値は回転中心より長さの $\frac{1}{2} \sim \frac{1}{3}$ の位置で生じる。
- (8) p / p_{max} に対する y_0 の影響は少ない。
- (9) バネに相当する値は $2 \sim 5 \text{ Kg/cm}^2$ 程度である。

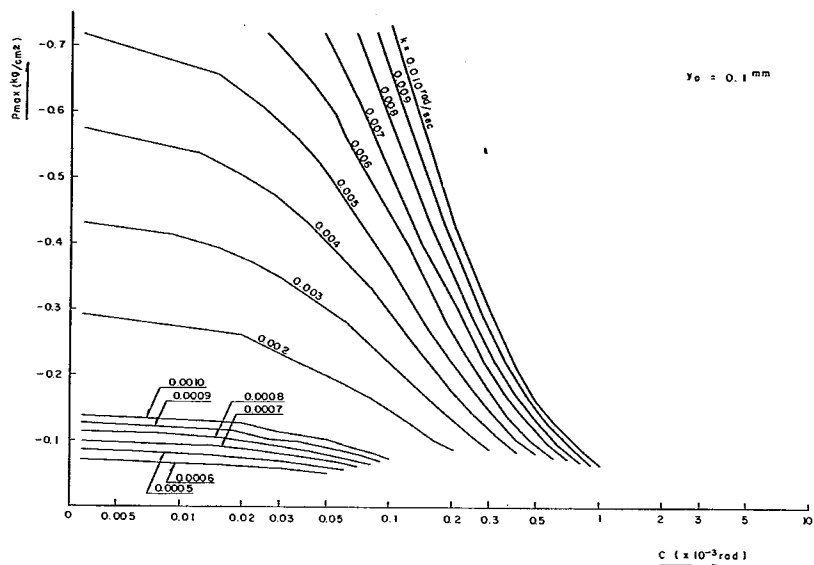


図 - 7 $p_{max} \sim c$ の関係(1) ($y_0 = 0.1$ mm)

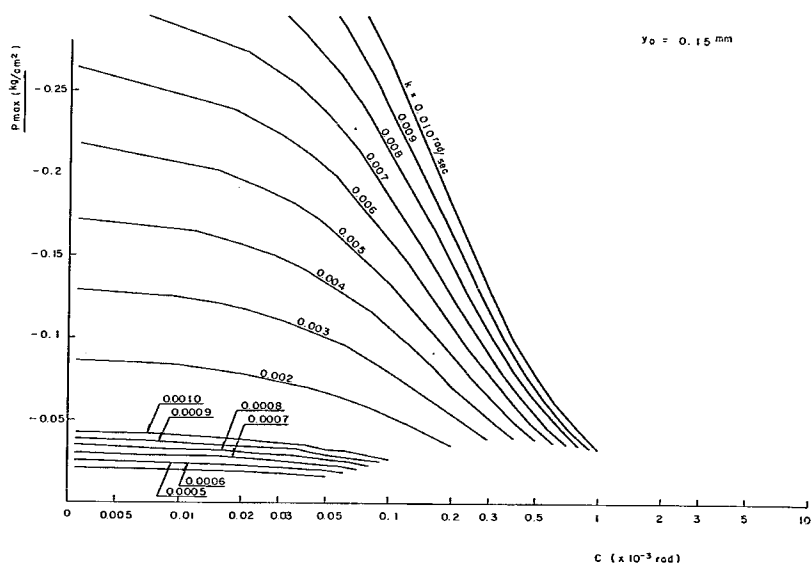


図 - 8 $p_{max} \sim c$ の関係(2) ($y_0 = 0.15$ mm)

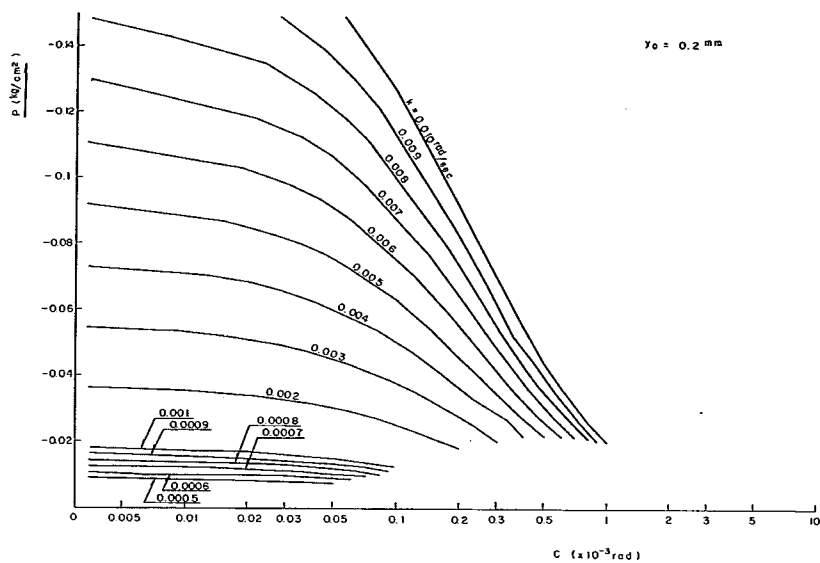


図-9 $p_{max} \sim c$ の関係(3) ($y_0 = 0.2$ mm)

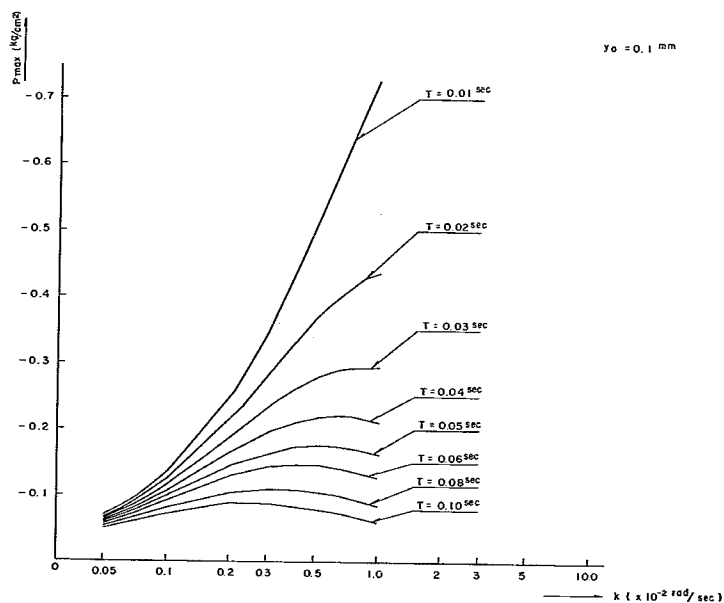


図-10 $p_{max} \sim k$ の関係(1) ($y_0 = 0.1$ mm)

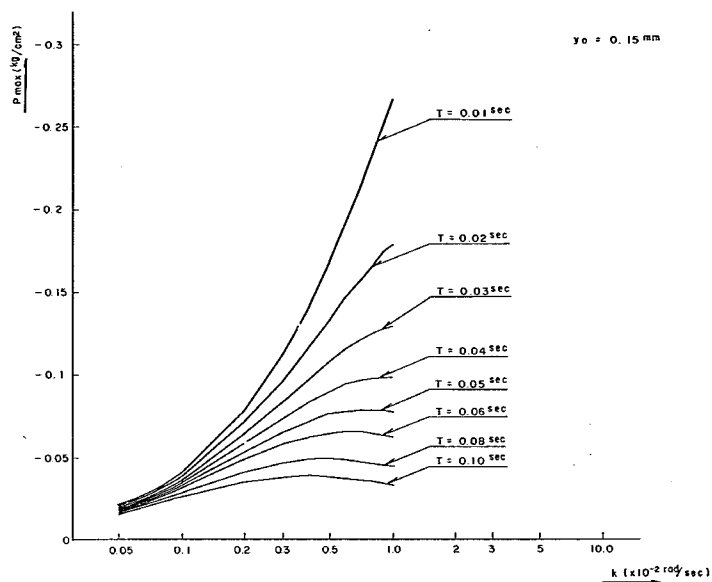


図-11 $p_{max} \sim k$ の関係(2) ($y_0 = 0.15 \text{ mm}$)

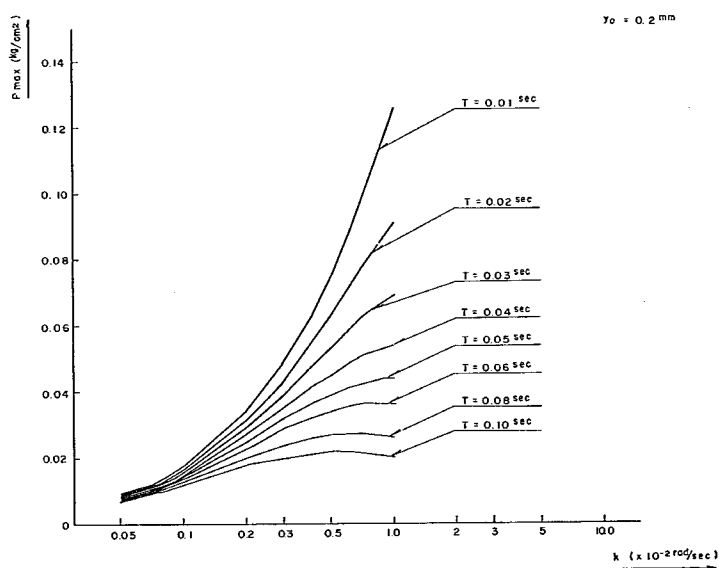


図-12 $p_{max} \sim k$ の関係(3) ($y_0 = 0.2 \text{ mm}$)

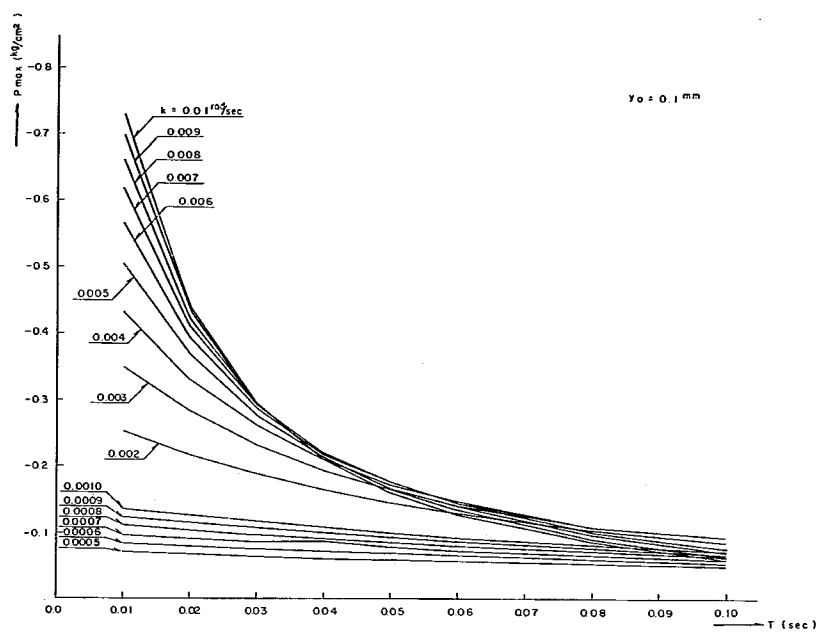


図 - 13 $p_{max} \sim T$ の関係(1) ($y_0 = 0.1$ mm)

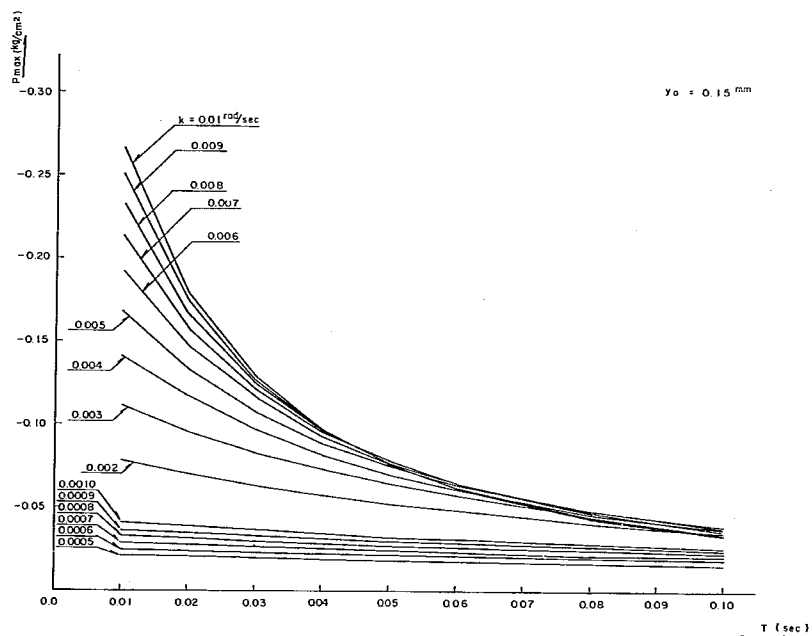


図 - 14 $p_{max} \sim T$ の関係(2) ($y_0 = 0.15$ mm)

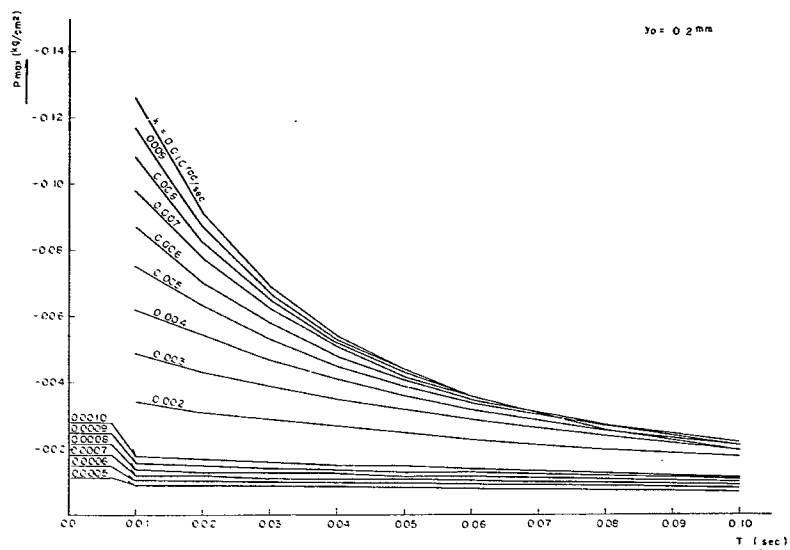


図 - 15 $p_{max} \sim T$ の関係(3) ($y_0 = 0.2 \text{ mm}$)

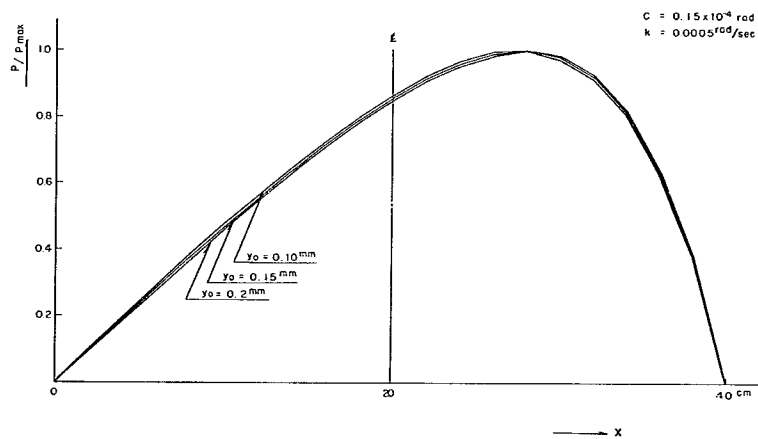


図 - 16 $p/p_{max} \sim x$ の関係(1) (中心軸線上での圧力分布)

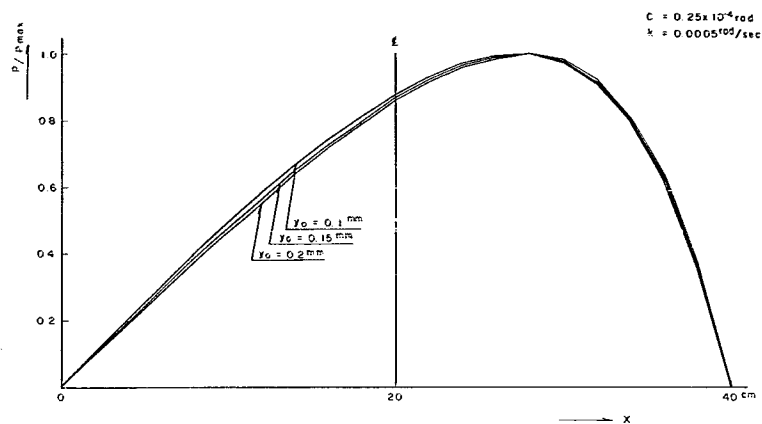


図 - 17 $p/p_{max} \sim x$ の関係(2) (中心軸線上での圧力分布)

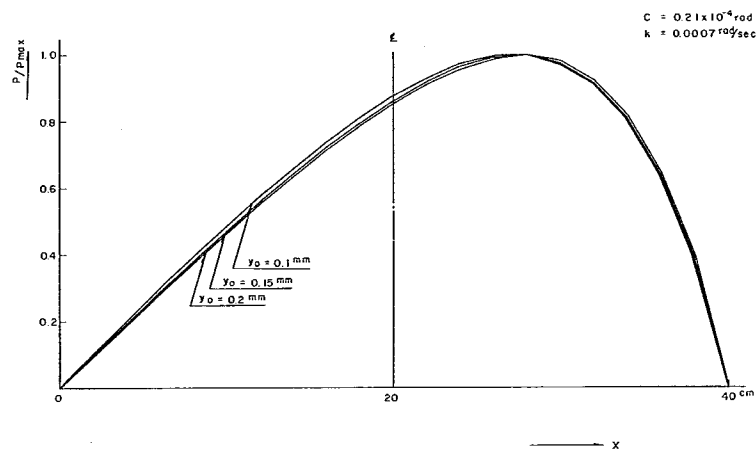


図 - 18 $p/p_{max} \sim x$ の関係(3) (中心軸線上での圧力分布)

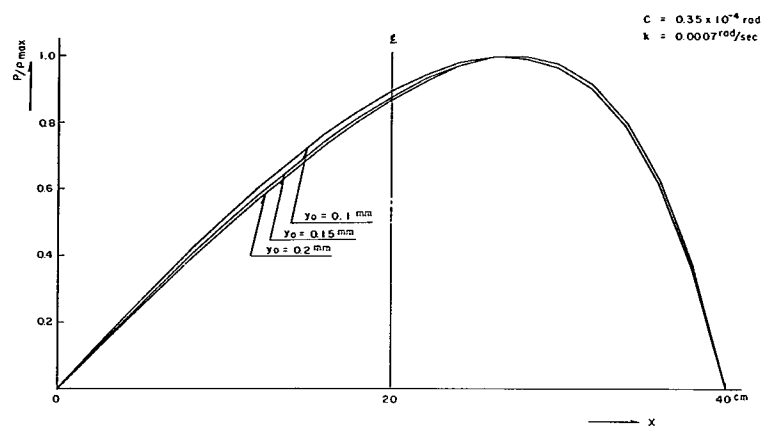


図-19 $p/p_{max} \sim x$ の関係(4) (中心軸線上での圧力分布)

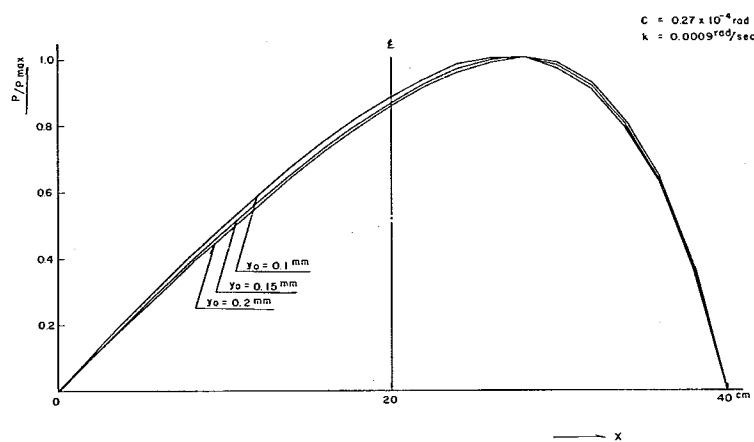


図-20 $p/p_{max} \sim x$ の関係(5) (中心軸線上での圧力分布)

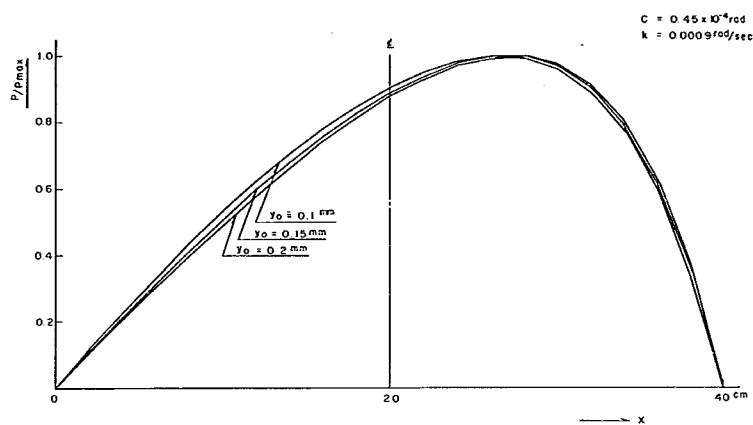


図-21 $p/p_{max} \sim x$ の関係(6) (中心軸線上での圧力分布)

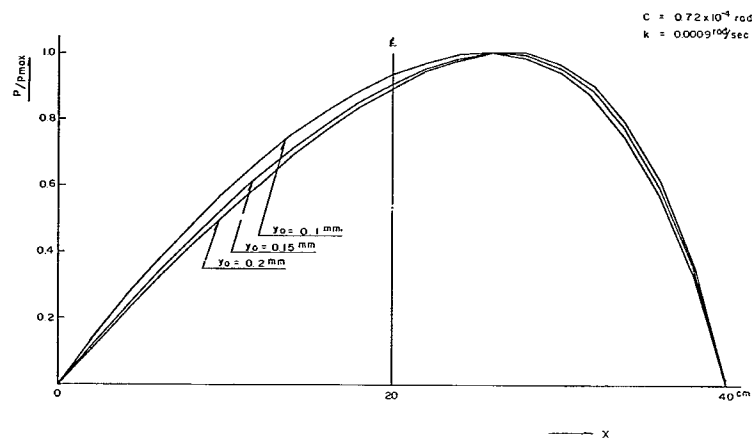


図-22 $p/p_{max} \sim x$ の関係(7) (中心軸線上での圧力分布)

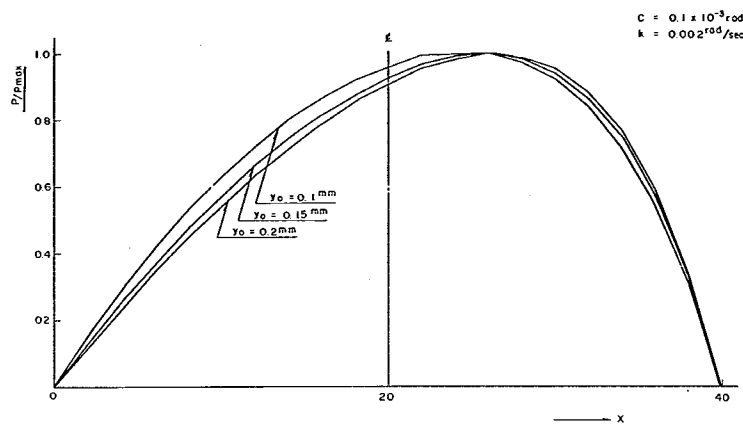


図-23 $p/p_{max} \sim x$ の関係(8) (中心軸線上での圧力分布)

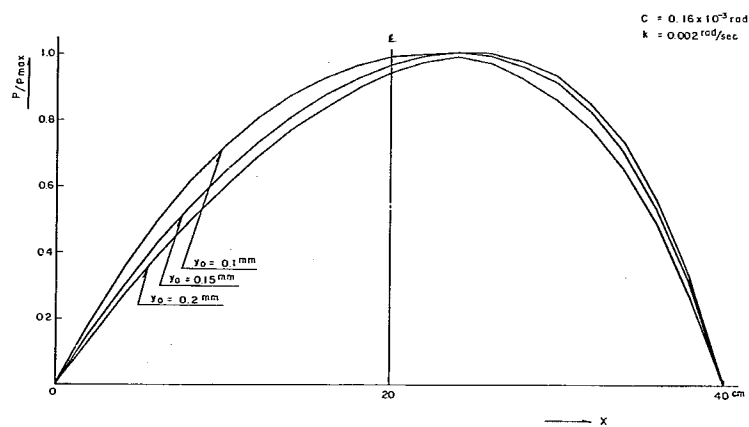


図-24 $p/p_{max} \sim x$ の関係(9) (中心軸線上での圧力分布)

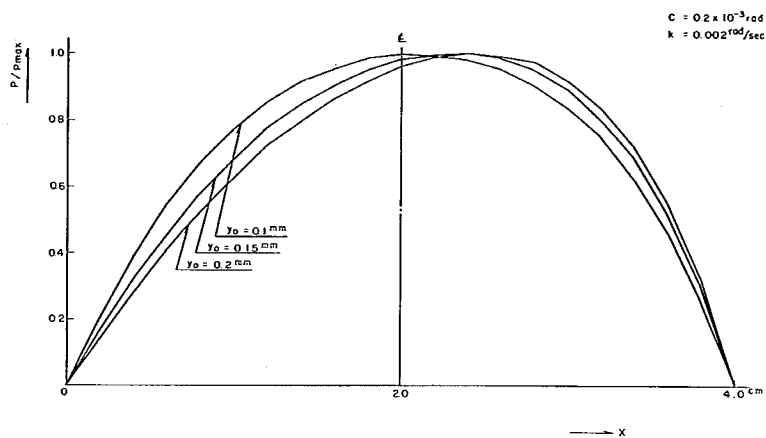


図-25 $p/p_{max} \sim x$ の関係(10) (中心軸線上での圧力分布)

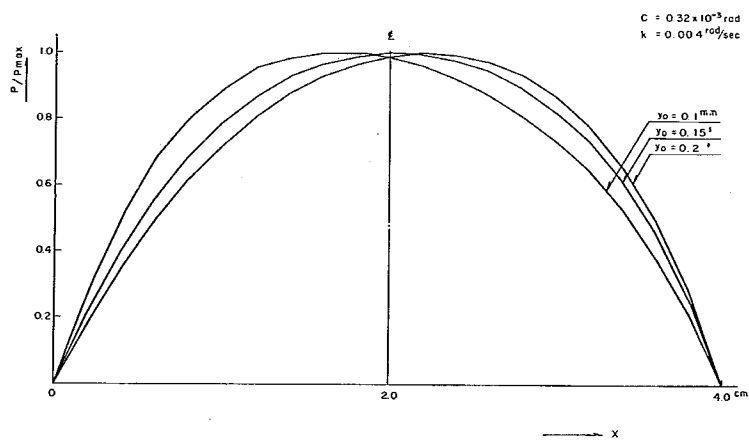


図-26 $p/p_{max} \sim x$ の関係(11) (中心軸線上での圧力分布)

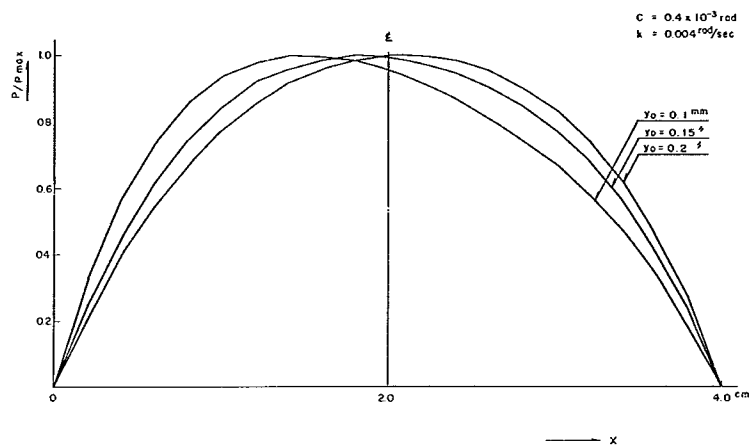


図 - 27 $p/p_{max} \sim x$ の関係(2) (中心軸線上での圧力分布)

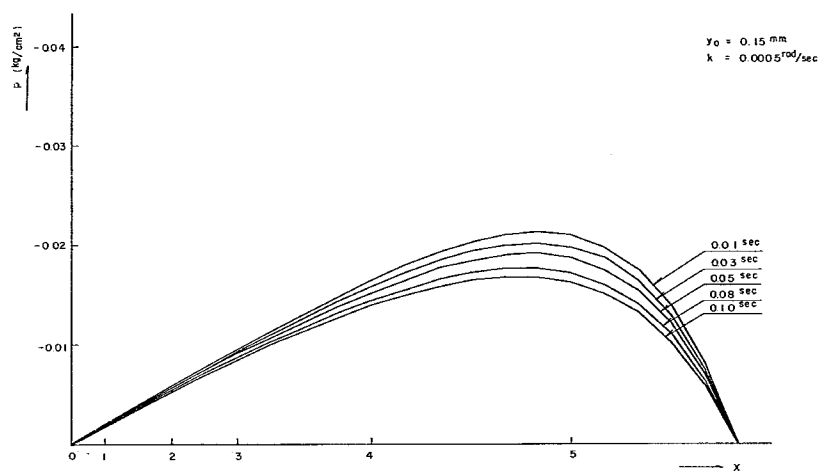


図 - 28 $p \sim x$ の関係(1) (中心軸線上での圧力分布)

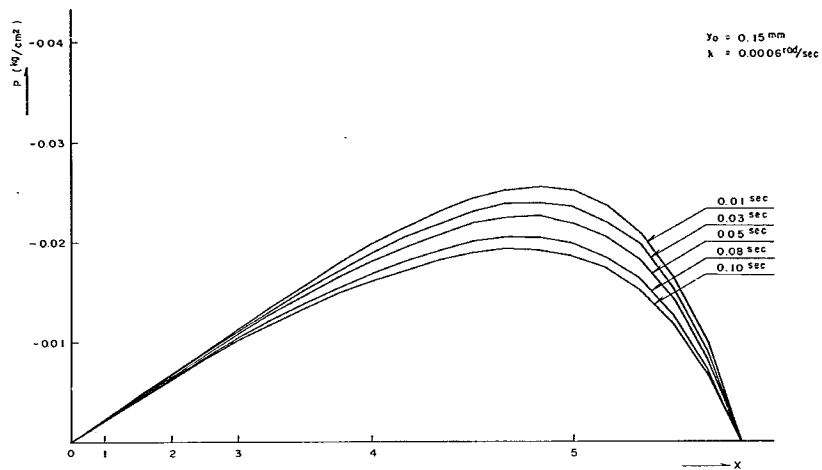


図 - 2 9 $p \sim x$ の関係(2) (中心軸線上での圧力分布)

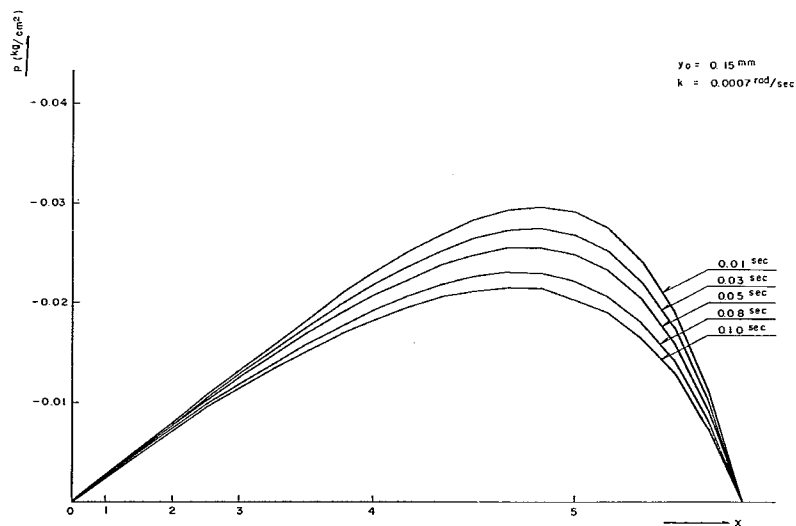


図 - 3 0 $p \sim x$ の関係(3) (中心軸線上での圧力分布)

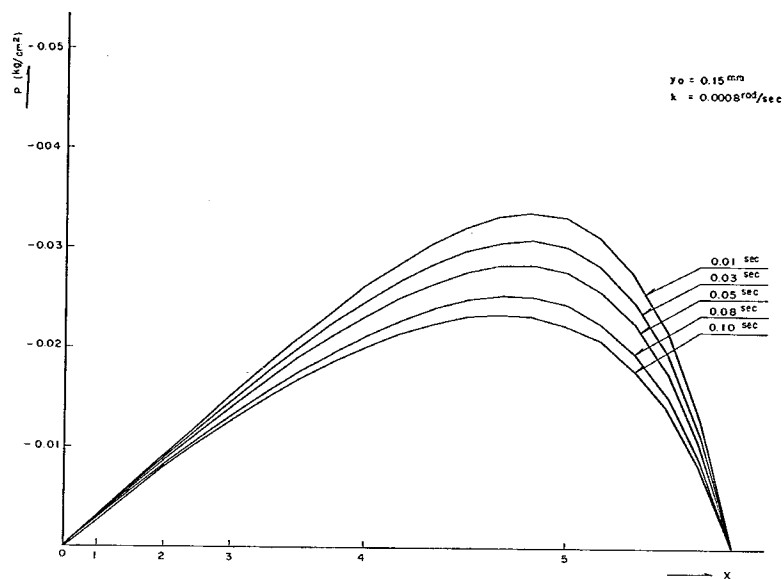


図-3 1 $p \sim x$ の関係(4) (中心軸線上での圧力分布)

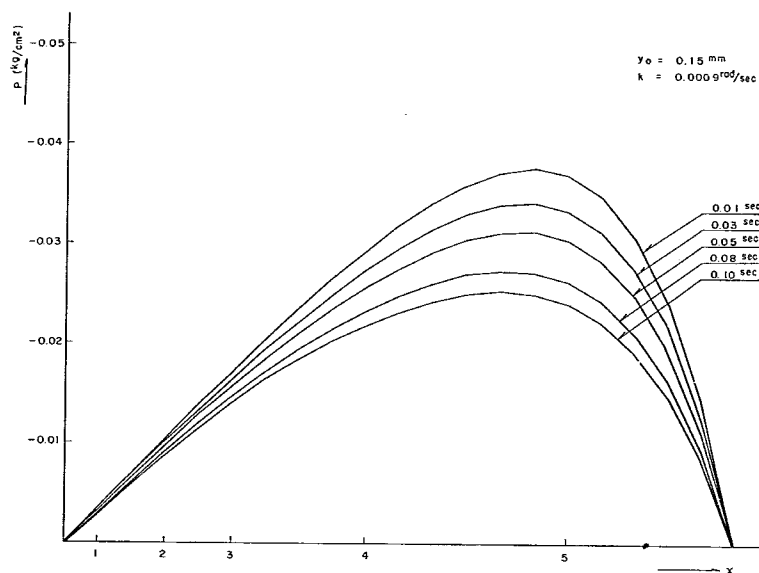


図-3 2 $p \sim x$ の関係(5) (中心軸線上での圧力分布)

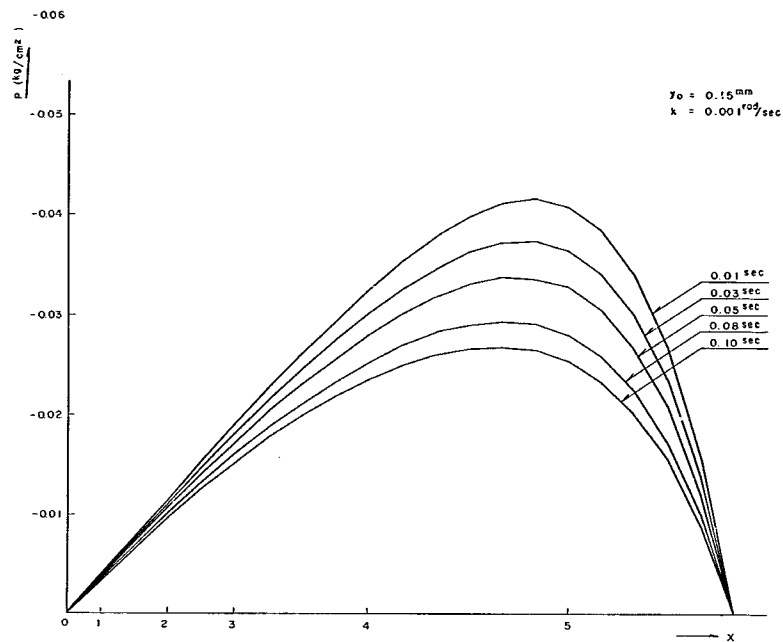


図-33 $p_{max} \sim t$ の関係(6) (中心軸線上での圧力分布)

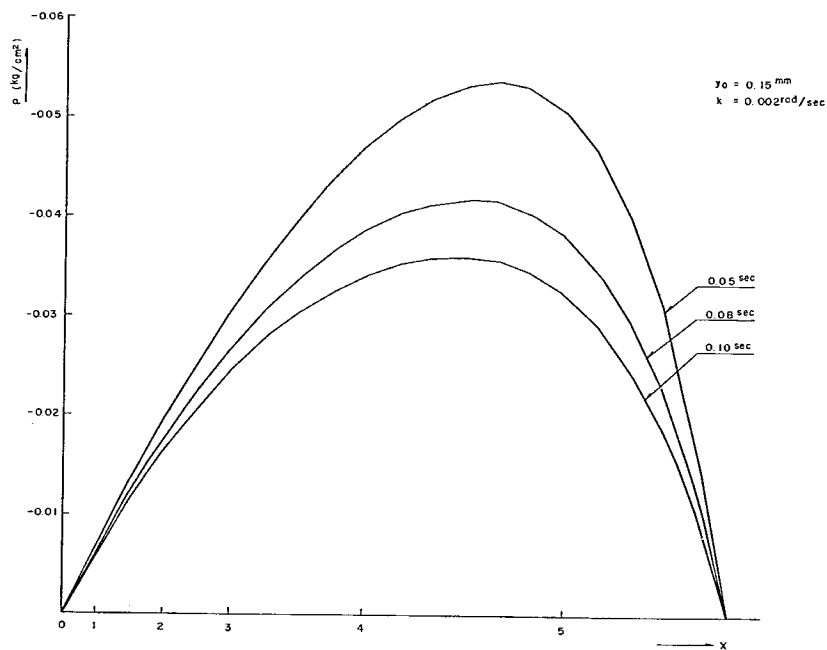


図-34 $p \sim x$ の関係(7) (中心軸線上での圧力分布)

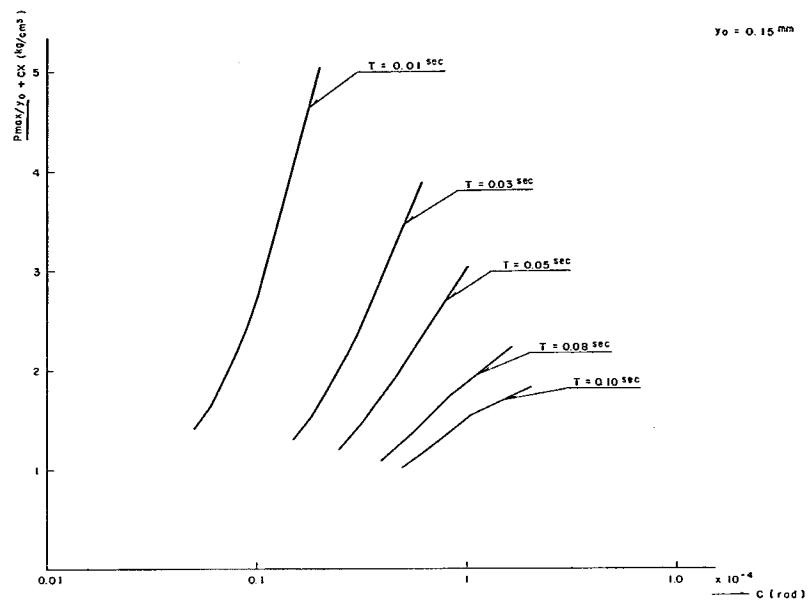


図-35 $\frac{p_{max}}{y_0 + cx} \sim c$ の関係

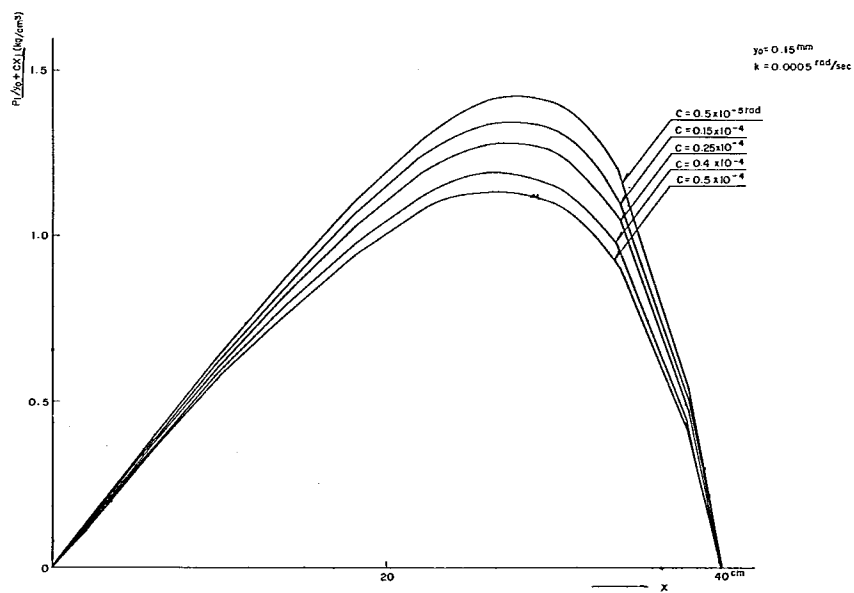


図-36 $p_i / (y_0 + c x_i) \sim x$ の関係(1)

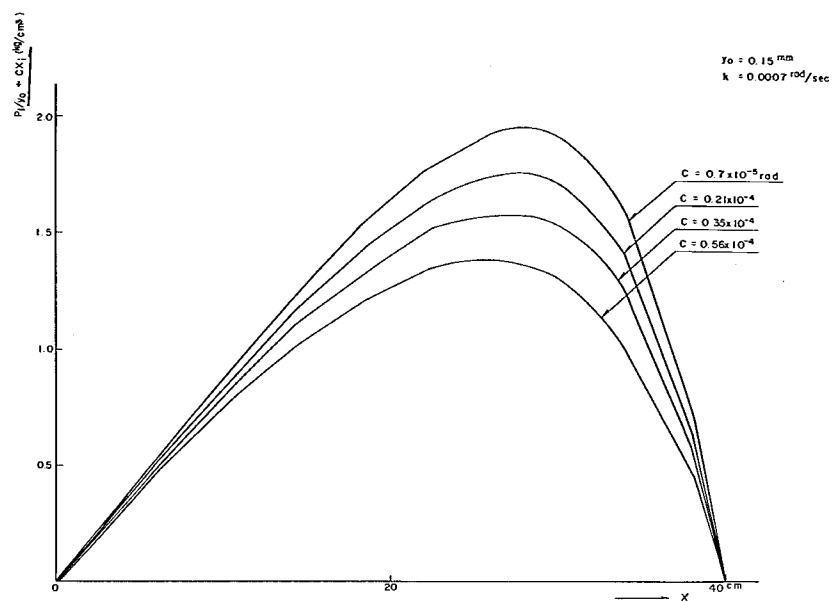


図-37 $p_i / (y_0 + C x_i) \sim x$ の関係(2)

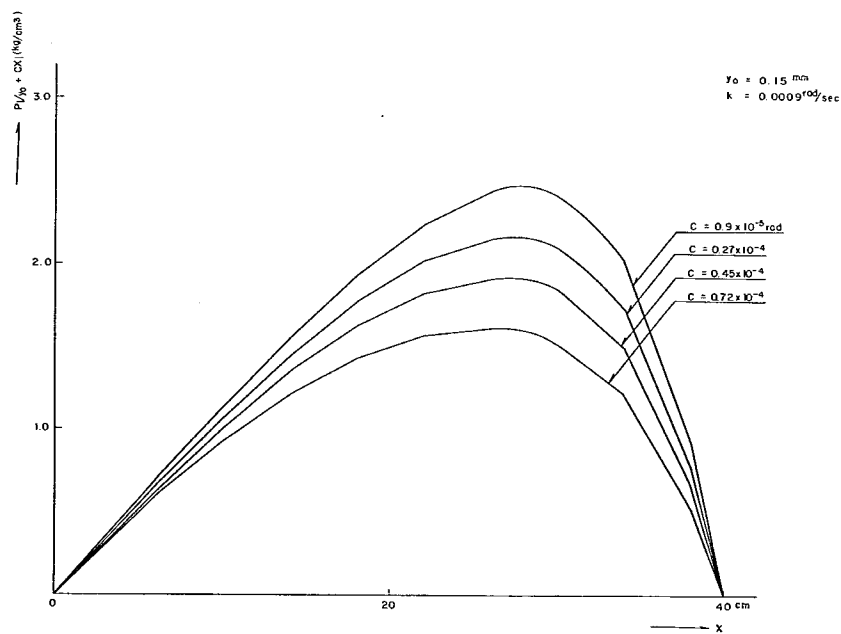


図-38 $p_i / (y_0 + C x_i) \sim x$ の関係(3)

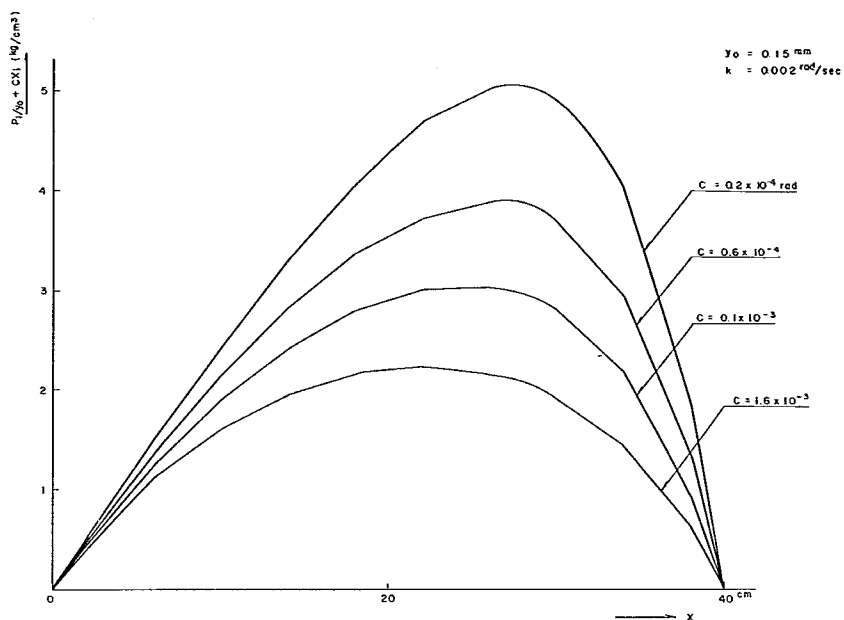


図 - 3 9 $P_i / (y_0 + C x_i) \sim x$ の関係(4)

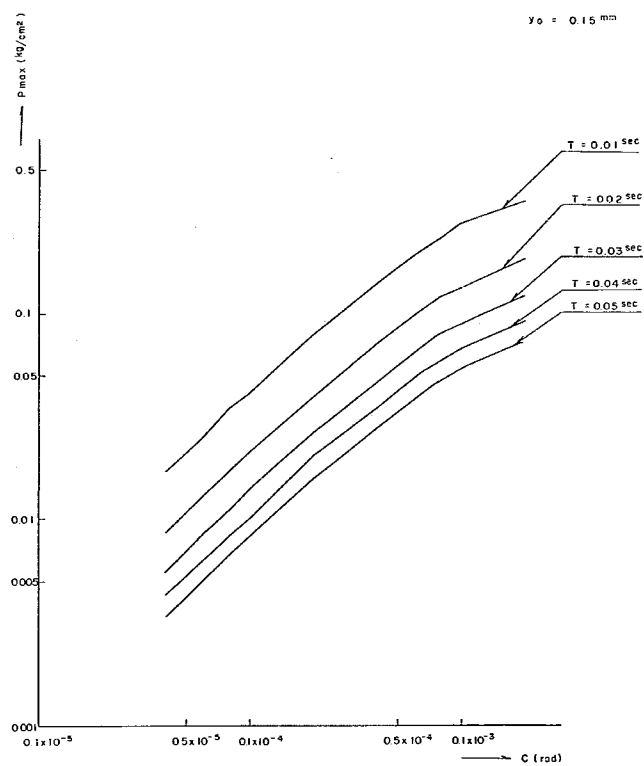


図 - 4 0 $p_{max} \sim C$ の関係

4 模型試験方法

模型試験装置は図-41に示すようなものである。120cm×60cm×80cmの水槽の中に、40cm×20cm×85cmの真ちゅう製の模型を入れ、ちっ素ガスをシリンダー内に封入し、それを開放することにより、ブランジャーが前方に進入し、試験体に回転を与えるものである。負圧の測定は供試体の底面にひずみゲージ方式の小型水圧計を取り付けて行なうことにした。水深を一定に保ち、回転角速を逐次変えて試験し、それが終わると水深を25cm, 35cm, 45cm, 55cmと順次変化させて行なった。具体的な試験の方法は次の通りである。

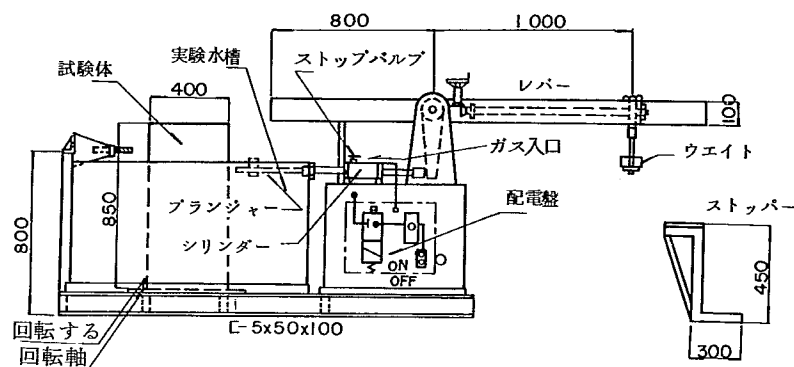


図-41 水圧変動測定装置

1) 供試体の回転運動の作用方法

図-41の押釦②をONにすると窒素ガスは電磁弁及び調整弁を通り、シリンダー内に入り、レバーのウェイトとバランスを保って、供試体は図-41のように水平位置に保たれる。次に押釦②をOFFにすると電磁弁が開き、ウェイトの重みでシリンダー内のガスが排出され、シリンダー内のブランジャーは逆に左側に移動して、供試体を転倒させる。

2) 速度調整

供試体の転倒速度は窒素ガスの排気量によって急速にも、緩速にもなり、シリンダー上部にあるストップバルブを調整することにより、任意の速さに調整できる。

3) 測定方法

供試体底面に生じる負の水圧の測定方法をまとめて図-42に示す。供試体底面にとりつけた圧力変換器は水圧計を改良した直径2cmのねじ込み型である。

これは正、負両方の圧力を 2 Kg/cm^2 まで動的に測定することが可能である。また、回転角速度を調べるための変位計は電子光学式の遠隔変位計を利用した。

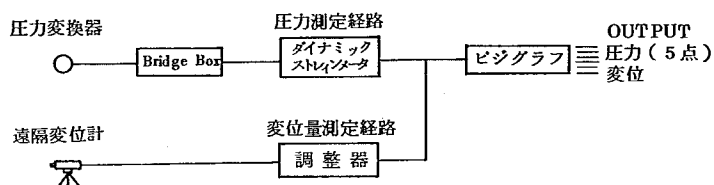


図-42 測定経路

5 模型試験結果

3節で掲げた図に水深が2.5 cm, 5.5 cmの実測データをプロットし, 計算結果と比較した。以下に対比結果を示す。

- (1) 図-4.3～4.5は3節で説明した項目(1)に実測データをプロットして調べたものである。
- (2) 図-4.6～4.8は3節で説明した項目(2)に実測データをプロットして調べたものである。
- (3) 図-4.9～5.1は3節で説明した項目(3)に実測データをプロットして調べたものである。
- (4) 図-5.2～5.4は3節で説明した項目(4)に実測データをプロットして調べたものである。
- (5) 図-5.5～5.9は3節で説明した項目(5)に実測データをプロットして調べたものである。
- (6) 図-6.0は3節で説明した項目(6)に実測データをプロットして調べたものである。
- (7) 図-6.1～6.3は3節で説明した項目(7)に実測データをプロットして調べたものである。
- (8) 図-6.4は3節で説明した項目(8)に実測データをプロットして調べたものである。

以上の対比結果よりは次のことが理解できる。

- a) y_0 の値としては $y_0 = 0.15 \text{ mm}$ において計算値は実測された範囲をほぼカバーでき, かつばらつきが少ない。したがって, この模型試験では $y_0 = 0.15 \text{ mm}$ 程度と判断できる。
- b) 最大値は比較的よく一致させることができるが, 分布はかなり異なっている。特に最大の負圧を生ずる位置が異なっている。
- c) 水深にはあまり関係がない。
- d) $P/y_0 + \alpha x$ でばねに修正したとき, やはり最大値ではよく一致するが, 分布は異なってくる。

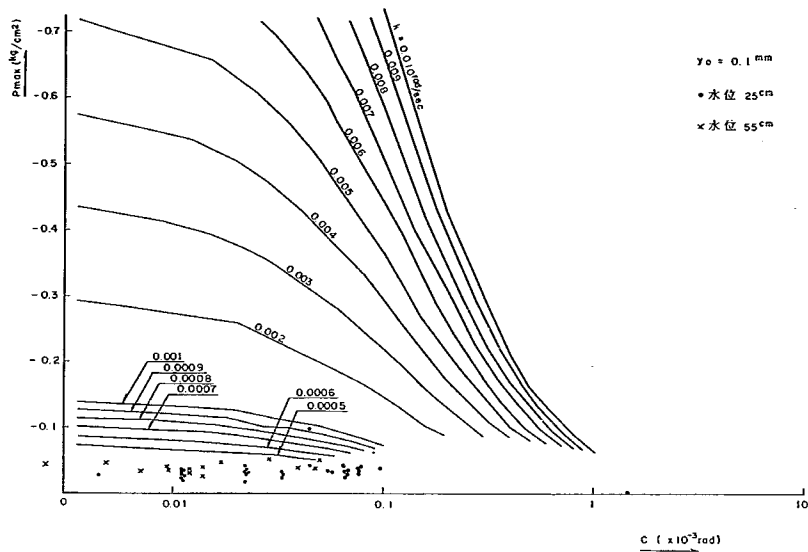


図-43 $p_{max} \sim c$ (回転角速度 k の影響)

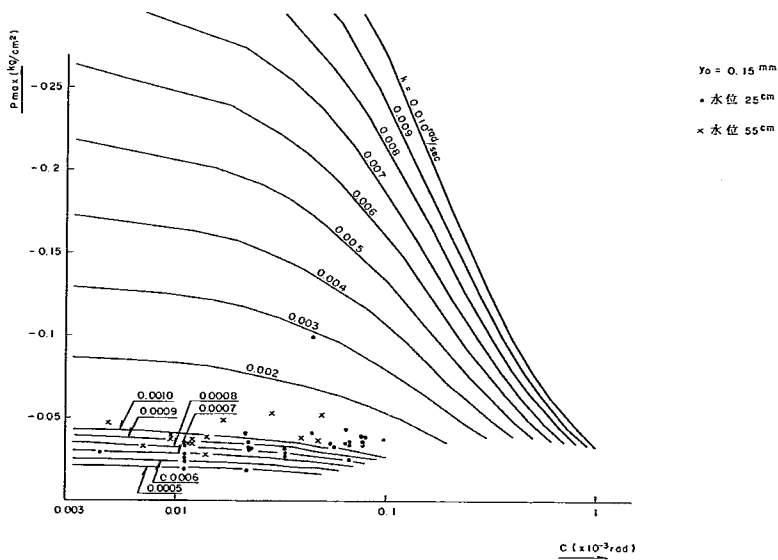


図-44 $p_{max} \sim c$ (回転角速度 k の影響)

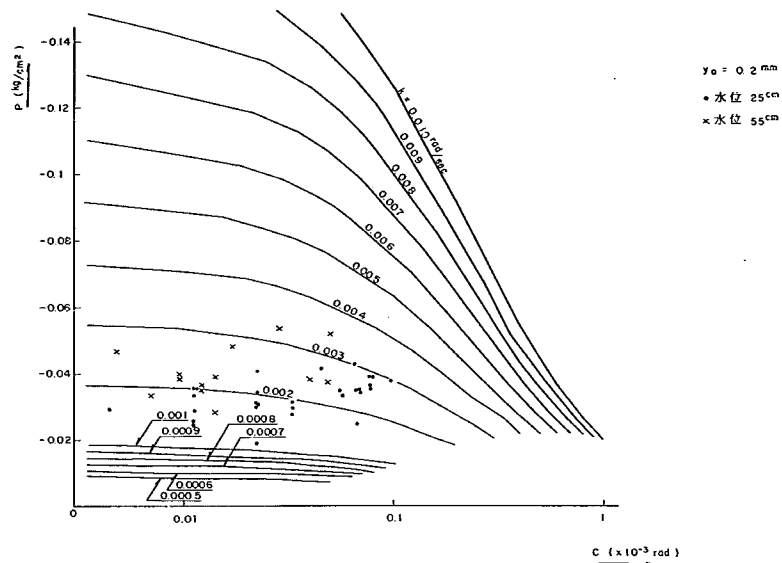


図 - 4 5 $p_{max} \sim c$ (回転角速度 k の影響)

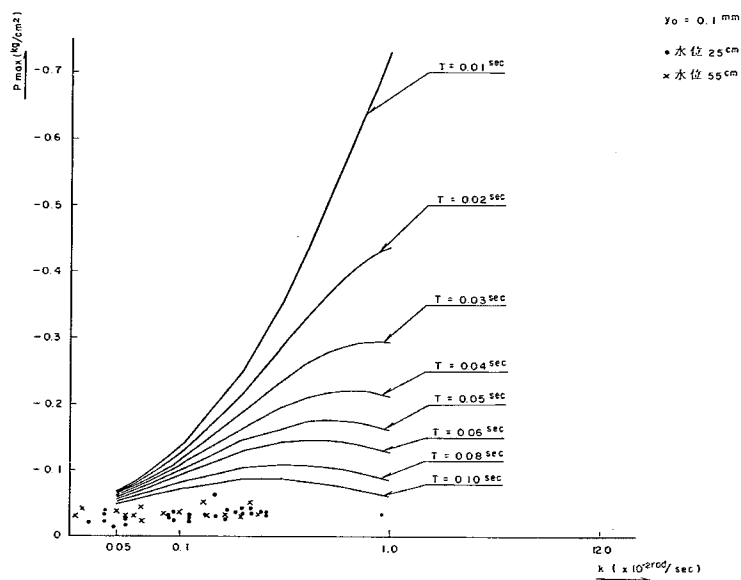


図 - 4 6 $p_{max} \sim k$ (時間 T の影響)

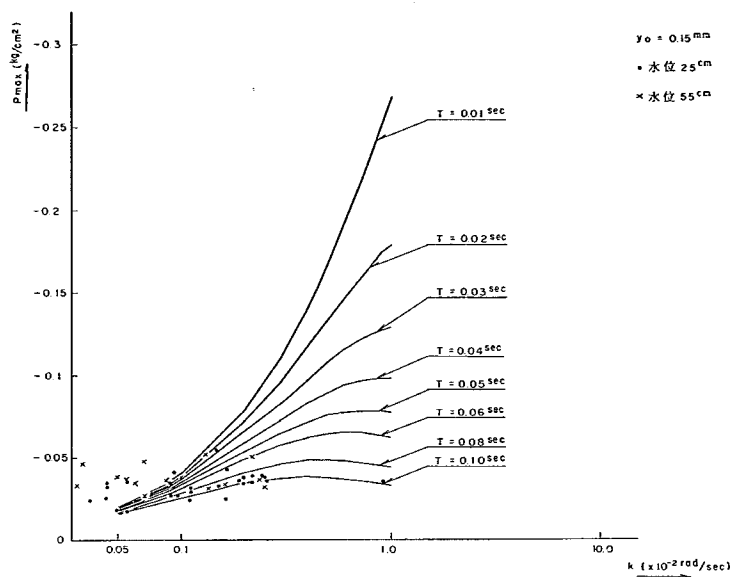


図 - 4 7 $p_{max} \sim k$ (時間 T の影響)

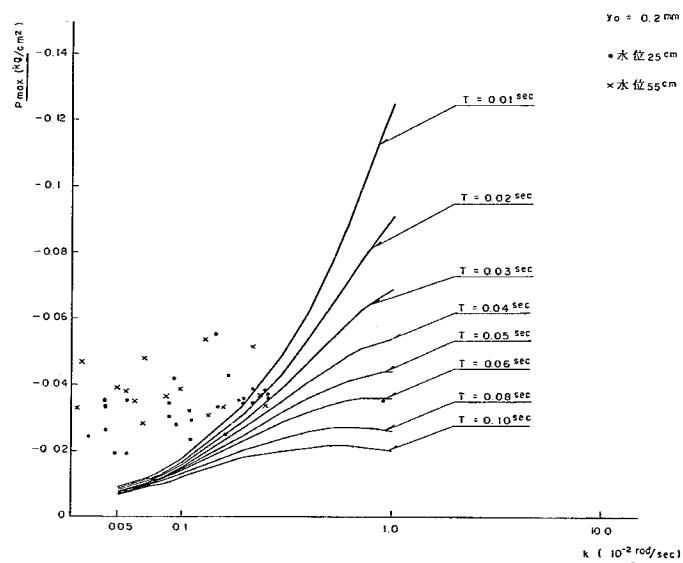


図 - 4 8 $p_{max} \sim k$ (時間 T の影響)

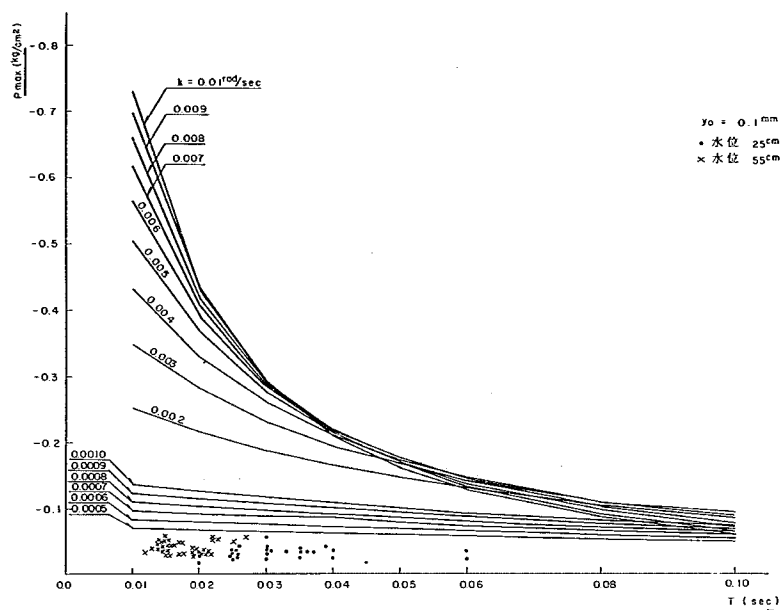


図 - 4 9 $p_{max} \sim T$ (回転角速度 k の影響)

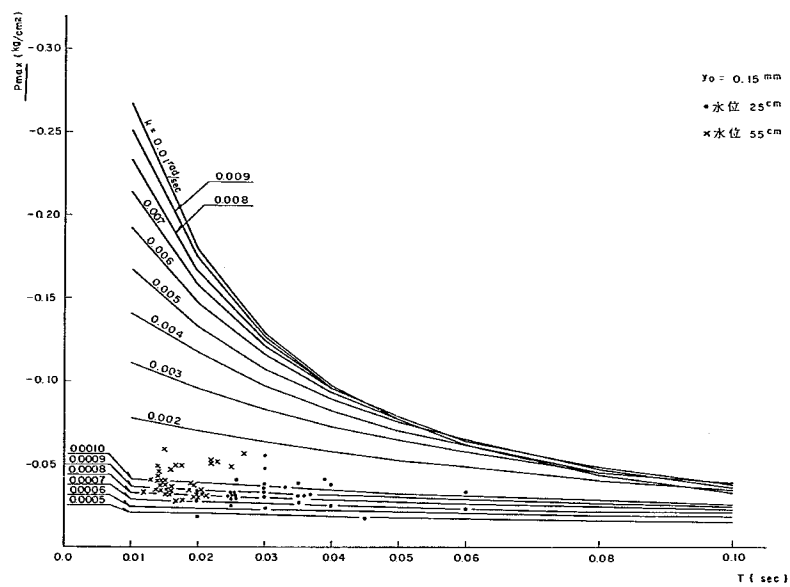


図 - 5 0 $p_{max} \sim T$ (回転角速度 k の影響)

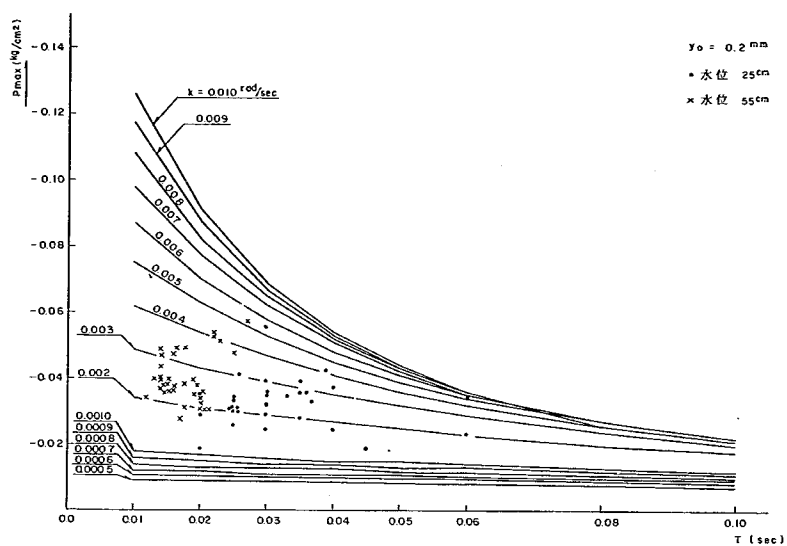


図 - 5 1 $p_{max} \sim T$ (回転角速度 k の影響)

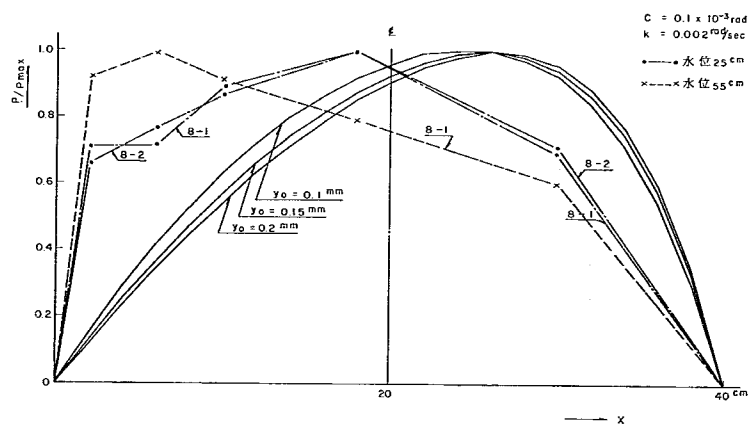


図 - 5 2 $p/p_{max} \sim x$ (中心軸線上での圧力分布)

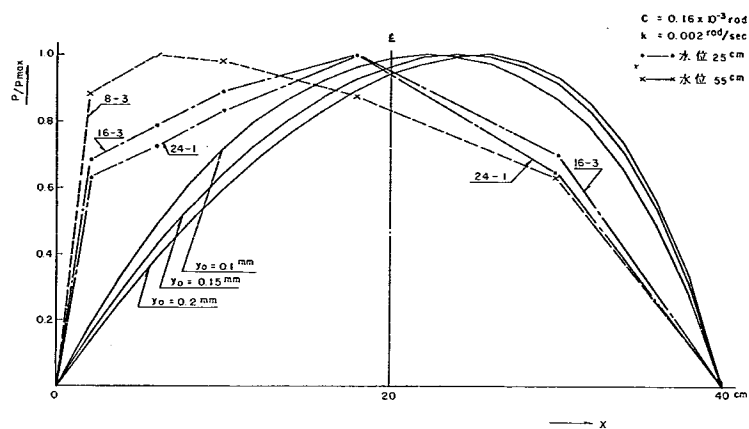


図 - 5 3 $p/p_{max} \sim x$ (中心軸線上での圧力分布)

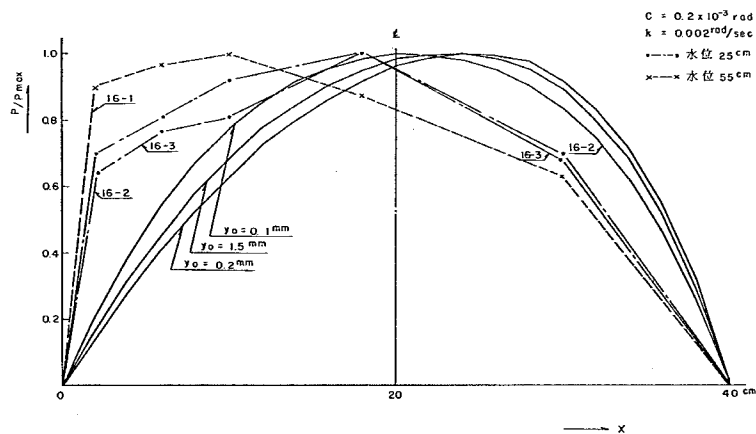


図 - 5 4 $p/p_{max} \sim x$ (中心軸線上での圧力分布)

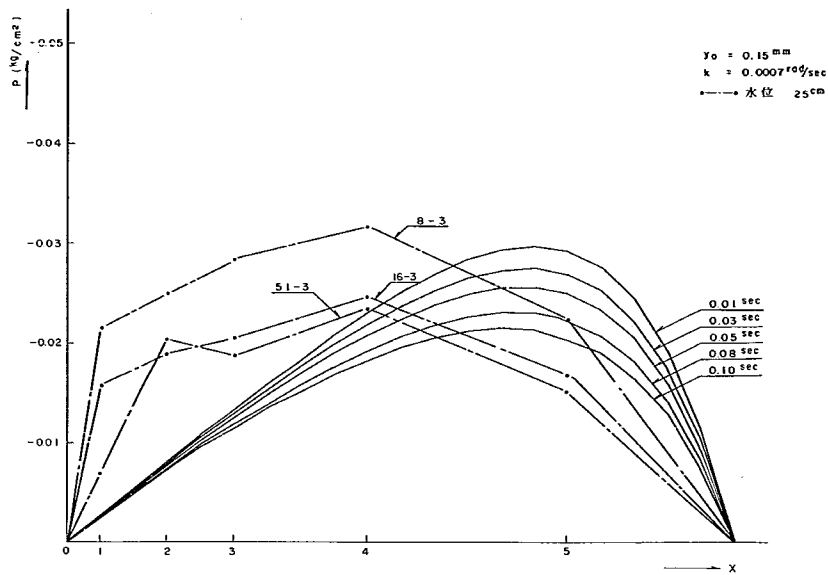


図-55 $p \sim x$ (中心軸線上での圧力分布 時間 T の影響)

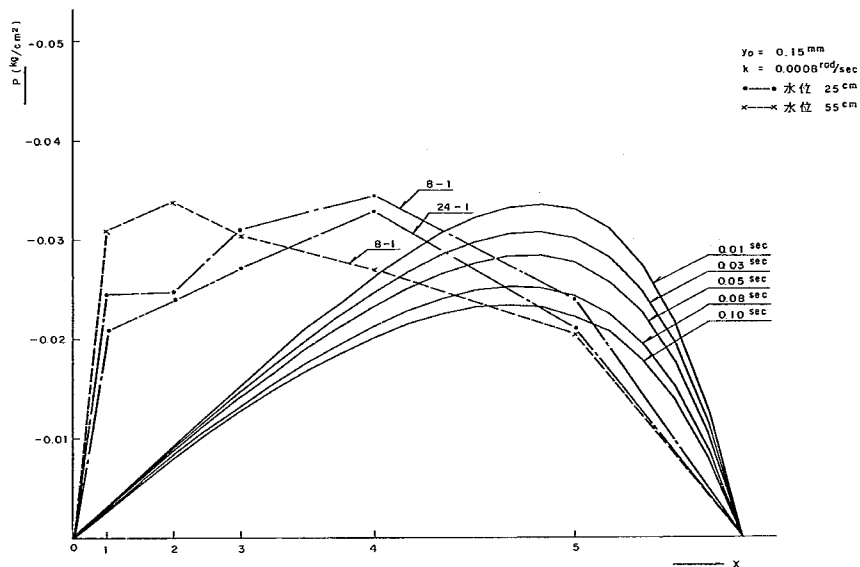


図-56 $p \sim x$ (中心軸線上での圧力分布 時間 T の影響)

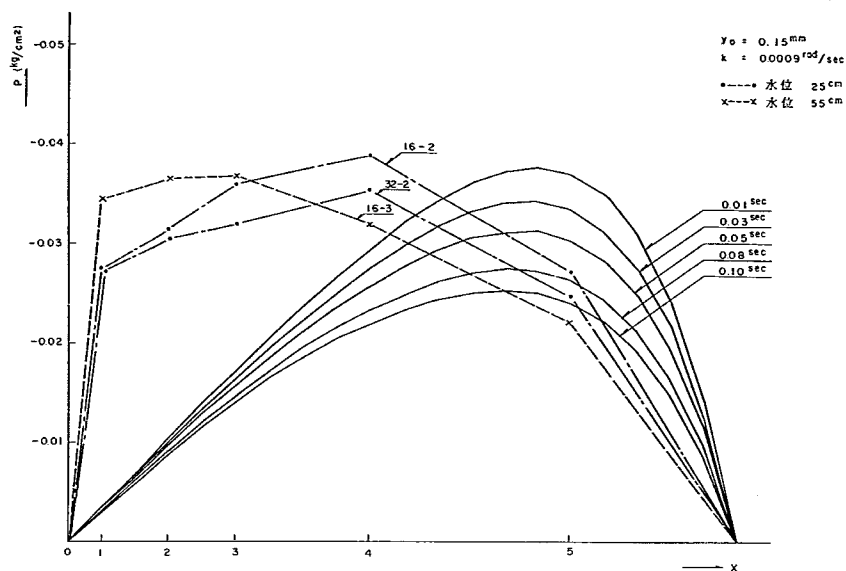


図-57 $p \sim x$ (中心軸線上での圧力分布 時間Tの影響)

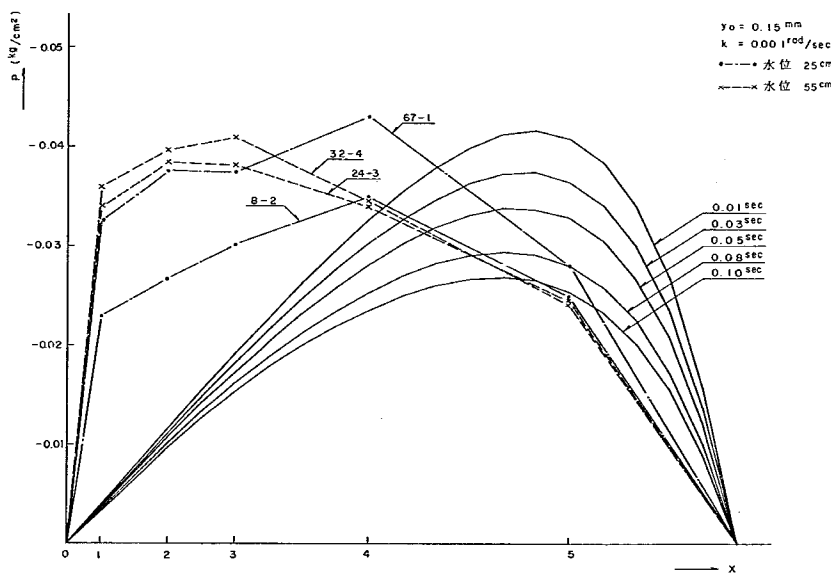


図-58 $p_{max} \sim c$ (中心軸線上での圧力分布 時間Tの影響)

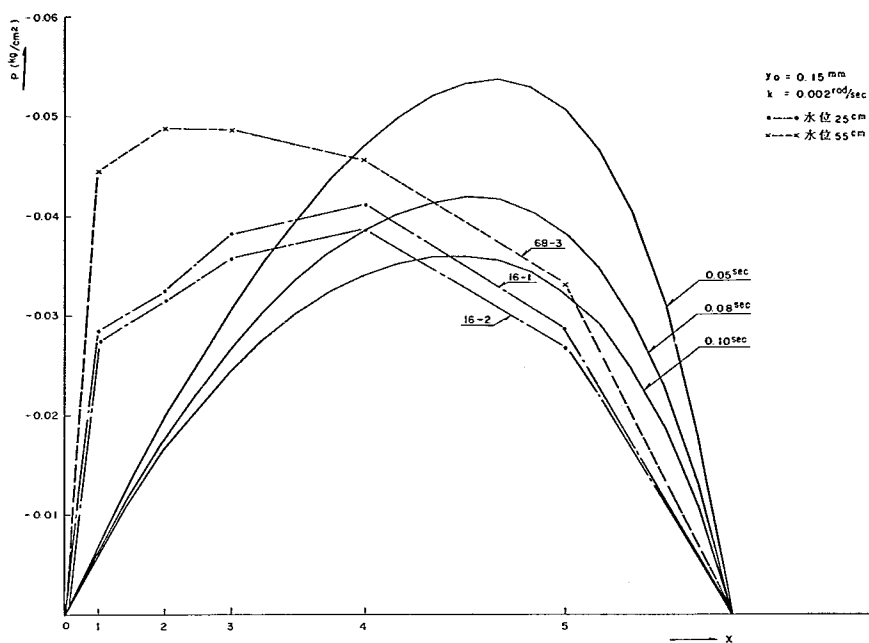


図 - 60 $\frac{p_{max}}{y_0 + cx} \sim c$ (時間 T の影響)

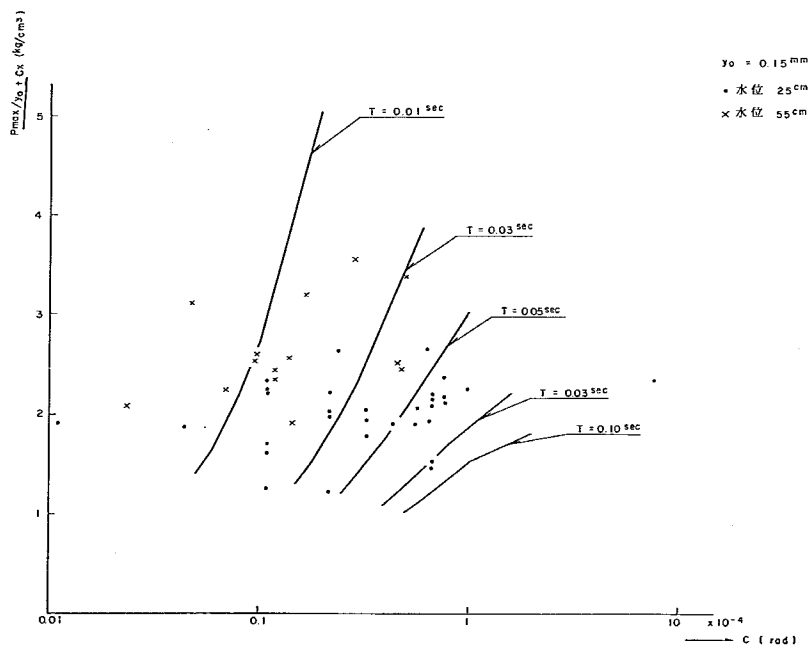


図 - 59 $p \sim x$ (中心軸線上での圧力分布 時間 T の影響)

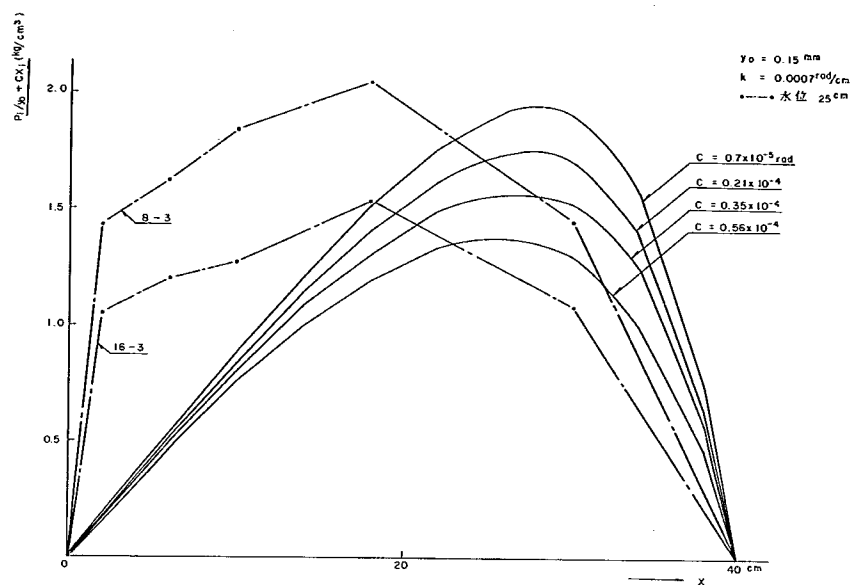


図 - 6 1 $P_i / y_0 + C x_i \sim x$ (回転角 C の影響)

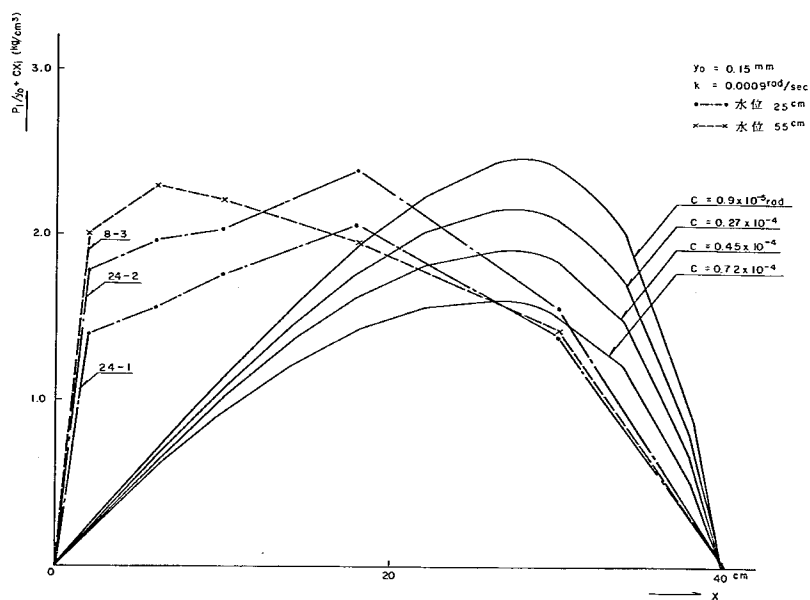


図 - 6 2 $P_i / y_0 + C x_i \sim x$ (回転角 C の影響)

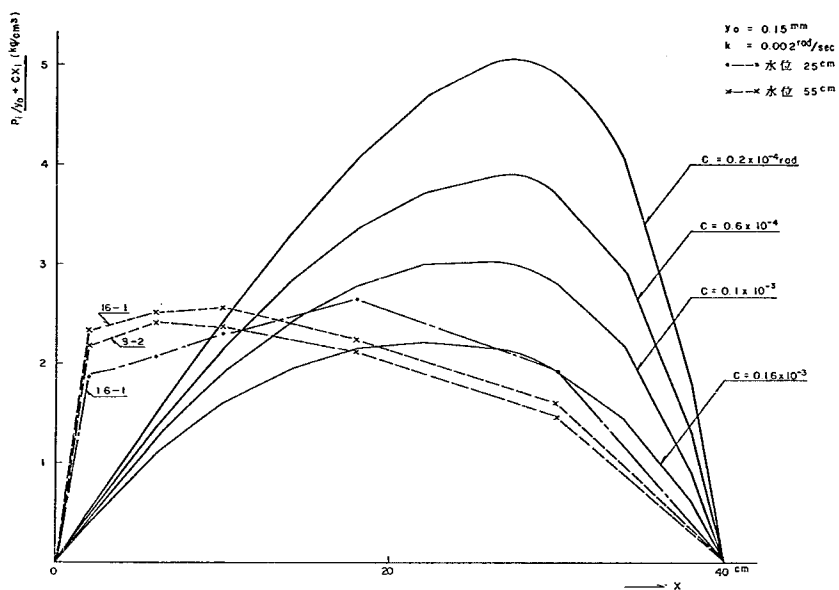


図-63 $p_i / y_0 + c x_i \sim x$ (回転角 c の影響)

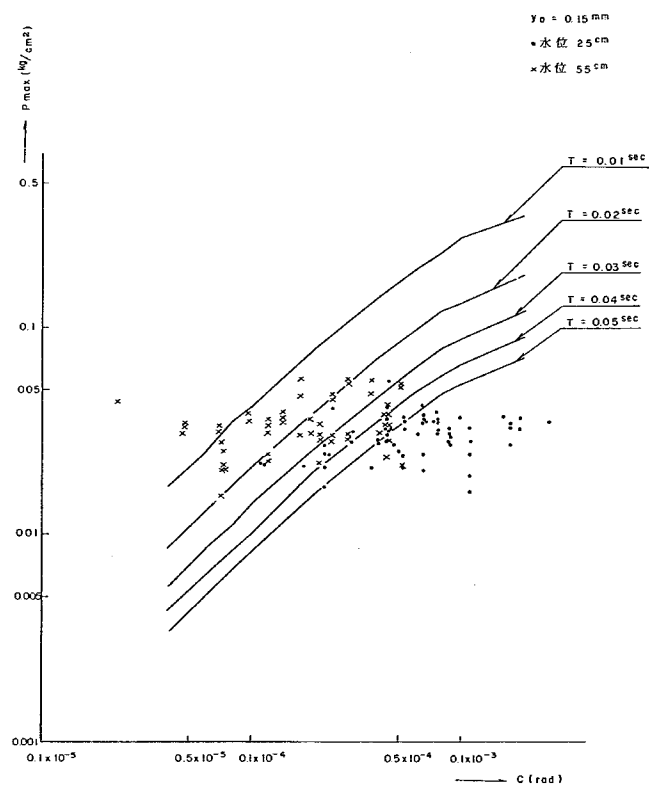


図-64 $p_{max} \sim c$ の関係

6 結果のまとめ

以上の結果より、剛体基礎が回転運動を行なうときに、それを拘束しようとする作用の存在することが判明した。しかも、その値を一種のばねとして評価したときに、模型寸法に比して非常に大きな値であることがわかる。このことより考えると、剛体基礎は地震時にその一端の浮上ることを抑制され、回転中心が底面に存在すると判断してもおかしくない。しかし、 y_0 の値が介入していること、ケーソンへの適用が現段階では全くできないこと、水深の影響が入っていないこと、生じている負圧が少し大き過ぎることなど不明な点が多く存在している。今後それらの点について解明する必要がある。

7 あ と が き

ここに報告した剛体基礎底面下の水の挙動については、昭和45年度より、負の水圧分布に関する調査として、特殊大規模調査の一部で行なってきたものであり、本報告には昭和45、46年度の2ヶ年間の成果がまとめられている。この調査は、解析、試験とも大変むずかしく、なかなか調査が進行しなく、漸く第1回目の報告書を作成するに至ったという感じである。

昭和48年度よりもう少し詳細に行なってみる予定である。最後に本研究を始めることについて示唆下さった前基礎研究室長吉田巖氏（現本州四国連絡橋公団）、並びに、本調査に御助力下さった基礎研究室浅間達雄室長に感謝の意を表する。

8 そ の 他

1節で述べた“地切り”の問題として、比較的やさしい、摺動片が円板で、しかも傾きのない場合について、負の水圧の物理的現象を調べてみる。

底面の平面形状は図-65に示すような半径 a の円形とする。境界条件としては

$$\left. \begin{aligned} t=0, y=0 : u=v=w=0 \\ t=t, y=Vt : u=w=0, v=V \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(41)$$

(40)式に(41)式の条件を代入すれば

$$\left. \begin{aligned} C_2(x, z) = D_2(x, z) = 0 \\ C_1(x, z) = -\frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} Vt \\ D_1(x, z) = -\frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial z} Vt \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(42)$$

が得られる。したがって、

$$u = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} (y - Vt) y$$

$$w = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial z} (y - Vt) y$$

となる。(42)式を(40)式に代入すれば、

$$V = -\frac{1}{2\mu} \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \right) \left\{ \frac{y^3}{3} - \frac{1}{2} Vt y^2 \right\} \dots\dots\dots(43)$$

となる。上式に境界条件式 $y=Vt$, $v=V$ を代入して整理すると、

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{12\mu_0}{V^2 t^3} \dots\dots\dots(44)$$

が得られ、これを解いて P を求めればよい。

円の方程式 $x^2 + z^2 = a^2$ で $p=0$ の境界条件を入れて(44)式を積分すれば

$$p = \frac{3\mu}{V^2 t^3} (x^2 + z^2 - a^2) \dots\dots\dots(45)$$

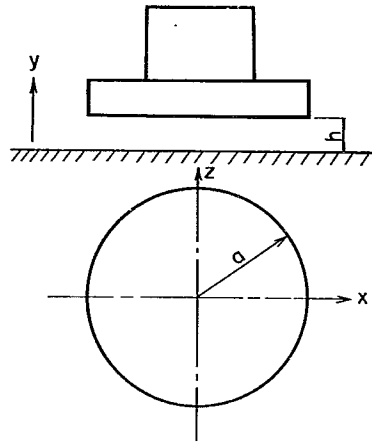


図-65

となる。これ積分して合力 P を求めれば、

$$P = \int_0^a 2\pi r p dr = -\frac{3}{2} \frac{\pi \mu a^4}{V^2 t^3} \quad \text{.....(46)}$$

が得られる。 $S = \pi a^2$ とすれば、

$$P = -\frac{3\mu S}{2V^2 t^3} a^2$$

となり、 $Vt = h$ とおきかえると、

$$P = -\frac{3\mu S V a^2}{2h^3} \quad \text{.....(47)}$$

となる。

この結果に若干の数字を代入して計算すると、図-66 のようになる。これより動き始めにはかなり大きな、動きを抑制しようとする力が働き、数 10 cm 離れるとすぐに著しく減少することがわかる。

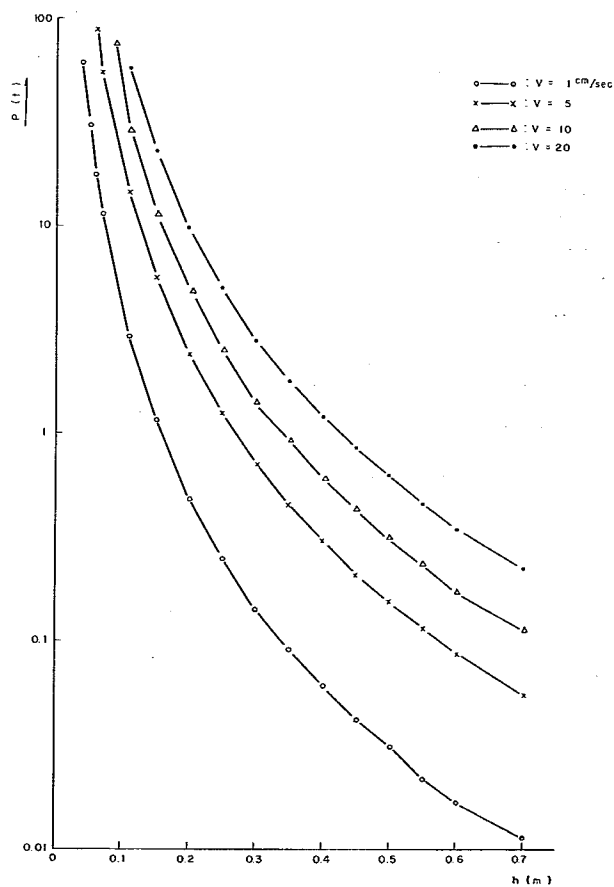


図-66 $P \sim h$ の関係

以上