

道路事業調査費
本州四国試験調査
耐震調査資料 468

土木研究所資料

第202号

水中ケーソンの振動時における
水圧増加に関する室内実験調査

昭和41年10月

建設省土木研究所

目 次

はじめに

1. 実験の目的	1
〔1〕 動水圧に関する今日までの各種の研究	1
〔2〕 実験の目的	5
2. 実験の方法	6
〔1〕 仮想質量と動水圧	6
〔2〕 実験法	7
(1) 実験柱状体	7
(2) 実験法	7
〔3〕 実験一覧表	7
〔4〕 実験施設	11
3. 実験結果及び考察	12
〔1〕 並進振動時の仮想質量と動水圧	12
(1) 次元解析による実験式の誘導	12
(2) 測定の結果	12
(3) 考察	13
〔2〕 ロッキング振動時の仮想質量と動水圧	16
〔3〕 水の減衰効果	16
4. 結 論	17
〔1〕 仮想質量及び動水圧	17
〔2〕 水による減衰効果	18
5. 参 考 文 献	19
6. 実験結果図表集	21
附表 1. 並進振動(一次実験), 固有振動数及び減衰定数	23
附図 1. 並進振動(一次実験), $a/h - \psi$ 曲線(1)~(5)	24
附表 2. 並進振動(一次実験), 実験結果	29
附表 3. 並進振動(二次実験), 固有振動数及び減衰定数(1)~(3)	30

附図 2. 並進振動 (二次実験), $a/h - \psi$ 曲線 (1)~(5) ————— 3 3

附表 4. 並進振動 (二次実験), 実験結果 ————— 3 8

附表 5. ロッキング振動 (二次実験), 固有振動数

減衰定数及び振動モード (1)~(9) ————— 3 9

附図 3. ロッキング振動 (二次実験), $a/h - \psi$ 曲線 (1)~(4) ————— 4 8

はじめに

海峡連絡橋の水深の深い位置にある下部構造物では地震時に作用する荷重の一つとして、水圧変動による増加荷重（いわゆる動水圧）を考慮しなければならない。

一方、かかる構造物に関する地震応答などの動力学的解析に於いては、そのモデルに水の質量効果を考慮しなければならないとされている。

地震時におけるダムของ動水圧については各種の研究が行われ、それと同時に実際問題にも適用されている。しかし、ダムでは長い壁体の片側にのみ水があるのに対し、橋梁下部構造の場合は柱状構造物であり、水が完全に周囲に周っており振動時に前後面から側面へ逃げる事が可能であるため、ダムの場合とはかなり様相が異なっているといえる。

この点に鑑みて水中の独立した柱状体に対する動水圧に関して各種の研究が行われているが、この実験では本州・四国連絡橋の下部構造として予想される断面（主に矩形断面）をもつた柱状構造物の振動時における仮想質量を実験的に求めると共に動水圧を算定した。

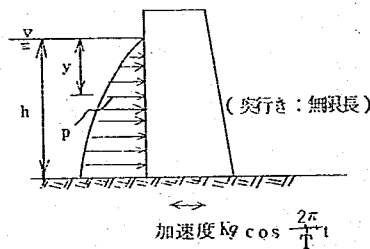
構造橋梁部耐震調査室

岩 崎 敏 男

1. 実験の目的

1.1 動水圧に関する今日までの各種の研究

水中構造物に加わる地震時の動水圧については、ダムに関する H. M. Westergaard¹⁾ (1933年)の研究がある。(図 1 参照)



$$p = \frac{7}{8} Kr \sqrt{hy}$$

但し p : 水深 y における単位面積当りの動水圧

K : 水平震度

r : 水の単位体積重量

図 1.1 Westergaard の動水圧

Westergaard は幅が無限に大きい直立した壁体の片側に貯水がある場合に、
ついて二次元解析を行い、動水圧を与える次の近似式を導いた。

$$p = 0.816 Kr \sqrt{hy} / \sqrt{1 - 7.75 (h/1000 T)^2} \dots\dots\dots (1.1)$$

ここに p : 水面より y の深さにおける単位面積当りの動水圧 (t / m²)

K : 水平震度

r : 水の単位体積重量 (= 1 t / m³)

h : 水深 (m)

T : 地震の水平振動周期 (sec)

この式は鉛直壁の突行方向単位幅当りの動水圧を与えるもので、水深に比して突行が長いものに限って適用できるものである。

又 h/T が 150 m/sec 以下で水の圧縮性が無視できる場合には次式を提案している。

$$p = \frac{7}{8} Kr \sqrt{hy} \dots\dots\dots (1.2)$$

この理論はいわゆる、実際の耐震設計にとり入れられ²⁾ 等号 (1.3.4) は

動水圧((1.2.)式による)を考慮した重力ダムの断面決定法を提案した。この論文には、水面における波動の影響(Westergaardはこれを無視した)を考慮した松村の解が紹介されている。

今日においても重力ダムの動水圧は特殊な場合を除いて、Westergaard式(主に(1.2.)式)が使用されている。

ダムに関しては、その後も佐藤、畑野、小坪らによつて各種^{3),4)5)6)}の研究が行われ、アーチダムあるいは傾斜壁等に関して、動水圧が解析的、突発的に求められた。

一方橋脚の如き柱状構造物に関しても多くの研究があり、J. L. Savage⁷⁾〔1939〕は、Pit River Bridgeの耐震設計に関連して、模型実験から柱状体に対する水の仮想質量を求めた。その実験結果によると、矩形断面の截頭錐体の橋脚に考えるべき仮想質量として振動に直交する橋脚の幅に等しい円錐(但し水面の位置で円錐を切つたもの)中の水の質量をとつてよいとしている。

⁸⁾
P. W. Werner, K. J. Sundquist〔1949〕は種々の水槽および剛体の円柱が正弦振動する場合の動水圧分布を水の圧縮性を考慮して解析的に求めた。

⁹⁾
T. E. Stelson, F. T. Mavis〔1957〕は各種の形状の剛体が水中で振動する場合の仮想質量を実験的に求めた。

¹⁰⁾
又 R. W. Clough〔1960〕は模型振動実験によつて比較的細長い円柱及び角柱が軸直角方向に振動する場合の仮想質量及び減衰性を求め、また柱が撓む場合についても実験を行い表1.1、表1.2に示す結果を得ている。

表 1.1 剛体柱の仮想質量及び減衰 (R. W. Clough による)

モデル断面	振動直角 方向の巾 a	仮想質量係数 ※		減衰定数 ※※	
		模擬地震試験	自由振動試験	空 中	水 中
直径 $1\frac{1}{2}$ in	$1\frac{1}{2}$ in	1.00	0.96	0.4%	1.0%
" 3 in	3 in	0.97	0.95	0.3	0.6
3 in × 3 in	3 in	1.26	1.22	0.4	0.6
3 in × $1\frac{3}{4}$ in	3 in	1.26	1.17	0.3	0.8
3 in × $\frac{3}{8}$ in	3 in	1.33	1.26	0.4	0.8

※ 仮想質量係数とは、振動に直角方向の断面寸法を直径とする円柱内の水の質量に対する仮想質量の比である。即ち、 $\text{仮想質量} = (\text{仮想質量係数}) \times \frac{\pi}{4} \rho a^2$
(ρ は水の密度)

※※ 減衰定数は減衰係数の臨界減衰係数に対するパーセントで表わしている。

※※※ モデルの長さは、約 36.5 in であり、軸を水平にした二次元実験の結果である。

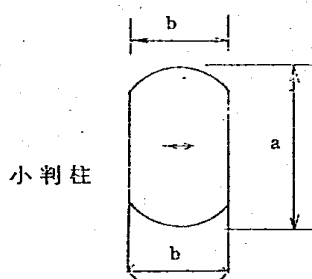
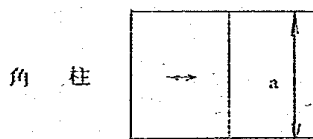
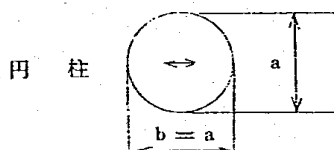
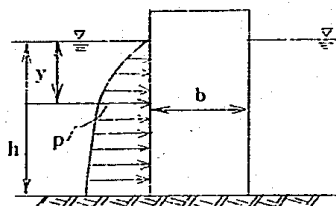
表 1.2 可撓柱の仮想質量及び減衰 (R. W. Clough による)

モデル断面	仮想質量 係 数	減 衰 定 数			
		一 次 モ ー ド		二 次 モ ー ド	
		空 中	水 中	空 中	水 中
直径 3 in	0.58	0.2%	1.6%	2.2%	4.5%
3 in × 3 in	0.82	0.2	2.2	0.3	3.5
3 in × $\frac{7}{4}$ in	0.94	0.1	1.6	0.6	2.5
3 in × $\frac{1}{4}$ in	0.95	0.2	4.2	0.6	4.4
3 in × $\frac{1}{4}$ in (頂部に重錘)	0.95	0.5	6.7	0.9	2.6

※ 仮想質量係数，減衰定数の定義は表 1.1 と同様

※※ モデルの長さは 2.4 in であり，軸を鉛直にした三次元実験の結果である。

一方，桜井¹¹⁾〔1961〕は水中にある撓み振動を伴う円柱構造物について，動水圧分布を仮想質量から解析的に導き，更に水中における柱の振動方程式を立てその一般解を求めている。これによると，比較的細長い円柱が撓み振動せずに並進振動するときの仮想質量 m （単位長さ当り）は近似的に次式を表わしうるとしている。（図 1.2 参照）



桜井式

$$\text{円柱} \cdots p = Kr \frac{\pi}{4} a^2 (y/h)^{a/2h}$$

$$\text{角柱} \cdots p = Kr \frac{1}{2} a^2 (y/h)^{a/2h}$$

但し $a/h \leq 0.3$ の範囲で適用

p : 水深 y における単位長

さ（深さ方向）当りの動水圧

後藤・土岐式

$$P = Kr CA \left(1 - \frac{a}{4h}\right) \sqrt[3]{\frac{y}{h}}$$

但し $a/h \leq 2.0$ の範囲で適用

P : 水深 y における単位長さ

（深さ方向）当りの動水圧

$$C = a/b$$

A : 断面積

図 1.2 桜井・後藤・土岐の動水圧

$$m = \rho \frac{\pi}{4} a^2 (y/h)^{a/2h} \quad \text{但し } a/h \leq 0.3$$

ρ : 水の密度

a : 柱の直径

動水圧 p (単位長さ当り) は仮想質量に水平加速度を乗じて

$$p = K \gamma \frac{\pi}{4} a^2 (y/h)^{a/2h} \quad \text{但し } a/h \leq 0.3 \quad (1.3)$$

で表わされる。

又、矩形柱の場合は実験結果から $\frac{\pi a^2}{4}$ のかわりに a^2 をとればよいとしている。
12)

岡本、加藤、伯野〔1962〕は水中橋脚の振動性状を模型実験から求め、水中では固有周期が伸び減衰がやや大きくなるとし、固有周期の伸びは減衰の増大だけでは説明できず仮想質量の概念を導入することにより、比較的よく説明できるとしている。

13), 14)

又、後藤、土岐〔1963〕は桜井と同様に円柱構造物に関して、波動方程式とオイラーの方程式を基にして三次元的解析を行い動水圧を求めた。これによると、柱状構造物が撓わらずに並進振動する場合の動水圧は近似的に次の式で表わされる。(図1.2.参照)

円柱の場合

$$p = K \gamma \frac{\pi}{4} a^2 (1 - a/4h) \sqrt[3]{y/h} \quad \text{但し } a/h < 2 \quad (1.4)$$

円柱以外の場合(例えば矩形あるいはこぼん形断面の柱)については実験により、次式で表示できるとしている。

$$p = K \cdot \gamma \cdot C \cdot A (1 - a/4h) \sqrt[3]{y/h} \quad a/h < 2 \quad (1.5)$$

但し、 A : 断面積 $C = a/b$. その他の記号は(1.3)式と同様

尚、並進振動以外のモードについては、上式に適当な補正係数を乗ずることになっている。

(2) 実験の目的

この実験は、本州・四国連絡橋の下部構造として予想される断面(主に矩形断

面)をもつた比較的太短い(水深に対する巾の比が1程度以上のもの)柱状構造物の振動時における仮想質量を求めると共に、動水圧を算定し、また水の減衰効果を求めようとするものである。

2. 実験の方法

(1) 仮想質量と動水圧

R. W. Clough¹⁰⁾は流体中を加速度運動する物体の仮想質量について次のように説明している。

一般に実質量 M の運動系の運動エネルギー T は

$$T = \frac{1}{2} M V^2 \quad \text{-----} (2.1)$$

で与えられる。

ここに、 V は運動系の代表点の速度である。

しかし、この運動系が水中にあると水はエネルギーをもつことになり、このエネルギーを T_v とすると

$$T_v = \frac{1}{2} M_v V^2 \quad \text{-----} (2.2)$$

で表わされる。

この式の M_v は仮想質量(あるいは附加質量)と称され、液体の運動エネルギーを系の速度に関係づける定数で質量の単位をもつものである。 M_v の値は運動系の形状、大きさ、運動の方向、運動の形式及び液体の密度等により決まるものである。水の粘性、圧縮性、表面波、造波抵抗等を考慮した場合には更に水の粘性係数、体積弾性率、時間(振動周期)等に関係する。

運動系と液体の合エネルギー T_t は

$$T_t = \frac{1}{2} (M + M_v) V^2 = \frac{1}{2} M_t V^2 \quad \text{-----} (2.3)$$

$$\text{但し } M_t = M + M_v$$

で表わされる。

物体に働く外力の合力を F とすれば $T_t = \int F V \cdot dt$ であるから、

$$F = (M + M_v) \frac{dv}{dt} = (M + M_v) a \quad (a \text{ は加速度}) \quad \text{-----} (2.4)$$

この式は質量 $M + M_v$ を定義する式であるから、水中で加速度運動する場合の運動系は空中で運動する質量 $M_1 = M + M_v$ の運動系として扱える訳である。以上が Clough の説明である。

(2.4) 式において、水による外力の増分 $M_v a$ を動水圧と定義すると、動水圧は仮想質量に加速度を乗じたもので、一般の質量の場合と全く同様を取扱いができる。

以上の事は厳密には完全流体中における二次元流の場合でしか成立しないのであるが、一般に取扱いの容易さという点で仮想質量の概念を導入する訳である。

本実験においても振動時の水圧増加を仮想質量の形で求めている。

〔2〕 実 験 法

(1) 実 験 柱 状 体

吊橋の下部構造として予想される矩形及び円形の断面からなる相対的に高さの小さい柱体（高さが断面寸法の3倍以下）をアルミニウムで作製し供試体とした。柱状体の種類は表 2.1 に示す通りである。

実験は第一次実験と第二次実験に分れている。第一次実験は予備の実験であり、並進振動のみについて実験した。

第二次実験では、柱状体の製作精度を入念に行っており、並進振動及びロッキング振動について実験した。本報告は主に二次実験の結果について報告することにした。

並進振動に於ては、縦の面を振動方向に平行にし、ロッキング振動に於ては、横の面を振動方向に平行にした。

(2) 実 験 法

(1) で記した各種の柱状体を水槽振動台上に板バネで支持し、気中及び任意の水深における自由振動記録から、固有振動数及び減衰定数を求め、固有振動数の変化から、水の仮想質量を計算し、動水圧を定めることにした。

柱状体の支持方法は図 2.1 に示す通りである。

〔3〕 実験一覧表

2.〔2〕(1) に示した各種の柱状体について、板バネの種類、柱状体の重量を種々と変えて実験を行った。柱状体の振動様式は並進振動及びロッキング振動の二種

表2.1 柱状体の種類

	No	名 称	形 状	寸 法 (mm)		
				横 a	縦 b	高さ l
第 一 次 実 験	1	A-34	円 柱	直経 a 300		400
	2	A-36		300		600
	3	A-24		200		400
	4	A-26		200		600
	5	B-314	矩 形 柱	300	100	400
	6	B-316		300	100	600
	7	B-324		300	200	400
	8	B-326		300	200	600
	9	B-334		300	300	400
	10	B-336		300	300	600
第 二 次 実 験	1	C-225	矩 形 柱	200	200	500
	2	C-335		300	300	500
	3	C-425		400	200	500
	4	C-435		400	300	500
	5	C-445		400	400	500
	6	D-25	円 柱	直経 200		500
	7	D-35		300		500
	8	D-45		400		500

とした(図2.1参照)

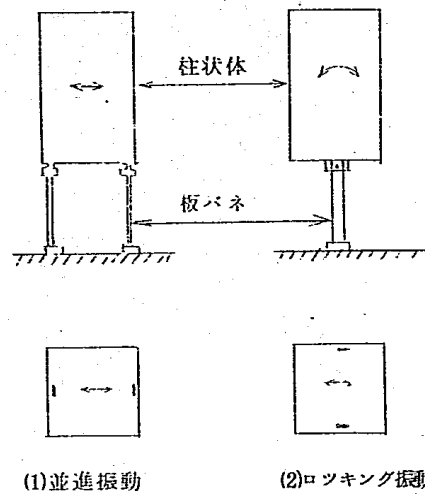


図 2.1 柱状体の支持方法

並進振動とは模型の全高にわたって一定振幅で振動する場合であり，ロッキング振動とは，柱状体底部に比して，柱状体の頂部が大きく振動している場合を指す。

表 2.2.に実施した実験一覧表を示す。

表2.2. 実験一覧表

	Test 名	柱 状 体	形 状	柱状体重量	気中における固有振動数		備 考
					振 並 動 数	ロッキング振動	
第 一 次 実 験	1	A 3 4	円 柱	1 2 3 8kg	6.14	—	
	2-1	A 3 6		18.40	4.68	—	
	2-2				11.9	—	
	3				A 2 4	6.30	
	4	A 2 6		9.80	8.18	—	
	5	B 3 1 4	矩 形 柱	7.85	7.18	—	
	6	B 3 1 6		10.96	6.96	—	
	7	B 3 2 4		9.80	8.97	—	
	8	B 3 2 6		13.90	6.22	—	
	9	B 3 3 4		9.80	7.53	—	
10	B 3 3 6	16.60	7.62	—			
第 二 次 実 験	1-1	C 2 2 5	矩 形 柱	1 0 2 5	4.95	5.64	
	1-2 (1)				9.00	7.41	
	1-2 (2)				8.94	—	
	2-1	C 3 3 5		1 5 6 0	5.06	4.86	
	2-2				9.63	6.47	
	2-3				7.92	—	
	3-1	C 4 2 5		1 6 3 0	9.45	6.36	
	3-2				4.87	4.74	
	3-3				14.31	—	
	3-4				25.19	12.2	
	3-5		16.24		15.28	—	
	3-6		18.18		21.26	—	
	4-1	C 4 3 5	柱	2 2 1 5	5.75	4.54	
	4-2				9.23	5.57	
	5-1 (1)	C 4 4 5		2 6 3 5	3.77	3.83	
	5-1 (2)				5.07	—	
	5-2			2 3 5 0	9.13	5.38	
	5-3				14.0	—	
	5-4			68.50	8.36	—	
	5-5			113.50	6.44	—	
	5-6			25.50	3.86	—	
	5-7			68.50	2.15	—	
	6-1	D 2 5	円 柱	9.45	6.36	6.39	
	6-2				12.64	8.55	
	7-1	D 3 5		15.40	4.92	5.06	
	7-2			16.70	7.62	6.65	
	7-3			22.90	8.01	5.49	
	8-1	D 4 5		2 1 3 5	5.83	4.82	
	8-2				8.46	5.47	

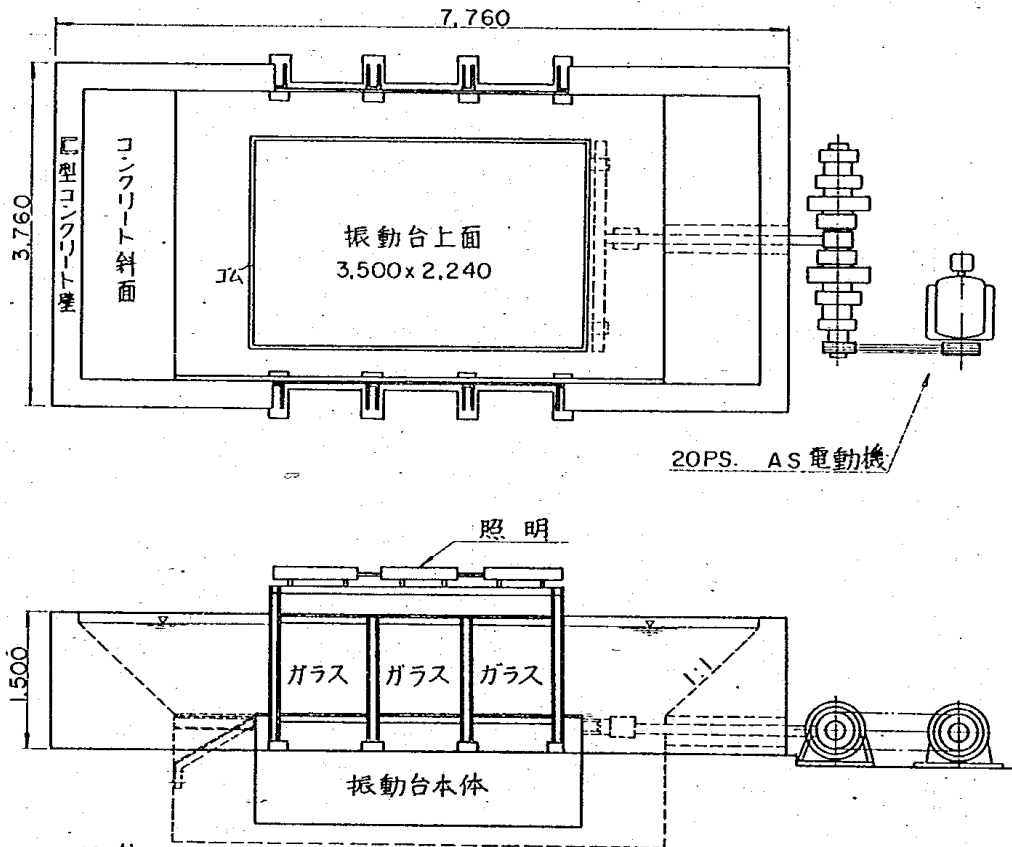
〔4〕 実験施設

この実験は水槽振動台を使用して実施した。

図 2.2 に水槽振動台の概略図及び概略仕様を示す。

振動は抵抗線式加速度計により直記式電磁オシログラフに記録した。

図 2.2 水槽振動台



性能 その他

1. 加振方向は水平一方向のみ
2. 水槽表面 $7.2\text{m} \times 3.16\text{m}$, 最大水深 1m , 満水量約 20ton
3. 振動台上面寸法 $3.5\text{m} \times 2.24\text{m}$
4. 加振振動数 $1 \sim 20\text{c/s}$
5. 最大振幅 2cm
6. 最大載荷重量 2ton

3. 実験結果及び考察

(1) 並進振動時の仮想質量と動水圧

(1) 次元解析による実験式の誘導

柱体が正弦的に並進振動する場合における水の仮想質量は、柱の振動方向の断面寸法、振動振幅、振動速度、振動加速度にはほとんど関係なく断面形状、振動周期ごとに近似的に次の諸量によつて表示できることが実験から確かめられた。

(a) 水の密度 ρ ($1 \text{ t/m}^3 / 9.8 \text{ m/sec}^2$)

(b) 水 深 h (m)

(c) 振動方向に直角な断面の幅 a (m)

以上の3つの量について、次元解析を行うと、次の式が得られる。

$$M_v = C \rho h^3 \left(\frac{a}{h} \right)^\delta \quad \text{----- (3.1)}$$

ここに M_v ; 柱全体に関する水の仮想質量

C 及び δ ; 実験により定める無次元定数

仮想質量を重量に換算したものを仮想重量 W_v と定義すると、

$$W_v = C \gamma h^3 \left(\frac{a}{h} \right)^\delta \quad \text{----- (3.2)}$$

ここに、 $\gamma = \rho g$; 水の単位体積重量 (1 t/m^3) である。 M_v あるいは W_v が得られれば動水圧 P (t) の最大値 P (正弦振動の場合を考えると

$$P(t) = P \cos \frac{2\pi}{T} t \quad (T \text{ は振動周期}) \text{ の形となる) は}$$

$$P = \alpha M_v = K W_v \quad \text{----- (3.3)}$$

ここで α ; 振動の最大加速度 (m/sec^2)

K ; 震 度 (α/g)

と表わされる。

(2) 測 定 の 結 果

1) 一 次 実 験

一次実験の10箇の柱体について得られた気中及び各水深の固有振動数及び減衰定数を附表1に示す。

減衰定数 n/p とは減衰係数の臨界減衰係数に対する比である。

結果の整理は次のようにした。

今柱体の自重 W (Kg)、これを支持するバネのバネ定数を k (Kg/cm) とすると気中における固有振動数 f_0 は減衰項を無視すると

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{Ek}{W}} \quad \text{----- (3.4.)}$$

で表わされる。

柱体の底面から測つて h (cm) 高さまで水がある場合の仮想重量を W_v とすると この時の固有振動数 f_h はバネ定数 k を一定とみなすと

$$f_h = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{Ek}{W + W_v}} \quad \text{----- (3.5.)}$$

で表わされる。

(3.4)、(3.5) の両式から

$$W_v = W \left\{ \left(\frac{f_0}{f_h} \right)^2 - 1 \right\} \quad \text{----- (3.6.)}$$

が得られる。従つて、仮想重量 W_v は柱状体の自重 W 、気中の固有振動数 f_0 、水中の固有振動数 f_h を測定すれば求められる。

一方 (3.2) 式を変形して、 ψ なる量を定義する。

$$\psi = \frac{W_v}{\gamma h^3} = C (a/h)^\delta \quad \text{----- (3.7.)}$$

実験結果から $a/h - \psi$ 曲線を両対数グラフに描き、これが直線で表わされるなら C 、 δ を求めることが出来る。

附図 1 にこの曲線を示しているが、ほぼ直線となつており、 C 、 δ を求めることが出来た。得られた C 、 δ の一覧表を附表 2 に示す。

ii) 二次実験

二次実験に関する同様の結果を附図 2、附表 3、4 に示す。第二次実験は柱体、バネ及バネ支持具等の工作を入念に行ひ、実験の精度を上げた。

(3) 考 察

i) 仮想質量と動水圧

定数 C は円柱と矩形で異なり、同一条件での実験から、円柱における C の値は矩形柱における C の値の $\frac{\pi}{4}$ 倍にほぼ等しい。

C の値は、フルート数にも支配され振動の周期によつて変化する。振動周期が短いほど、 C は大きくなる傾向がみられる。

実験を行つた振動周期の範囲は 0.05 sec ~ 0.22 sec である。周期 0.05 sec のときの条件は水深 50 cm, 柱の断面寸法 40 cm であつて、その時の C の値は $C = 0.60$ であつた。これにフルート数が一致するような実物構造を想定すると、水深 50 m の場合には 幅 40 cm, 周期 0.5 sec という ことになる。想定する実物はこの程度のものであると仮定すると $C = 0.60$ とつてよい。

一方、定数 δ は断面形状が円形であれ、矩形であれ有意の差はなく、又、振動周期による差も少く、平均値として $\delta = 4/3$ が得られた。

以上の結果から、 $\delta = 4/3$ とし、矩形柱での C の値を前述の如く 0.60 とすると、円柱及び矩形柱に共通した仮想質量 M_v , 仮想重量 W_v , 全動水圧 P を与える式としてそれぞれ次式が得られる。

$$M_v = 0.6 \rho A_0 h / (a/h)^{\frac{2}{3}} \quad \dots \dots \dots (3.8)$$

$$W_v = 0.6 \gamma A_0 h / (a/h)^{\frac{2}{3}} \quad \dots \dots \dots (3.9)$$

$$P = 0.6 k r A_0 h / (a/h)^{\frac{2}{3}} \quad \dots \dots \dots (3.10)$$

$$\text{但し } 0.8 \leq a/h \leq 4.0$$

ここに

$$A_0 = \begin{cases} a^2 & (\text{矩形柱}) \\ \frac{\pi}{4} a^2 & (\text{円柱}) \end{cases}$$

全動水圧 P を a/h の関数として図 3.1 に示す (但し、 $P/Kr a^2 h = f(a/h)$ なる無次元量で示してある。)。比較のために Westergaard 式 (1.2) 式を積分したもの、桜井式 (1.3) 式を積分したもの、後藤、土岐式 (1.4) 式を積分したものを同時に示してある。

ii) 仮想質量及び動水圧の鉛直分布

仮想質量の鉛直分布は円柱に関する 後藤、土岐による 三次元解析の結果によると近似的に深さの $1/3$ 乗に比例する。従つて (3.8) ~ (3.10) 式から

図 3.1 柱状体の全動水圧 P および作用角 $f\theta$

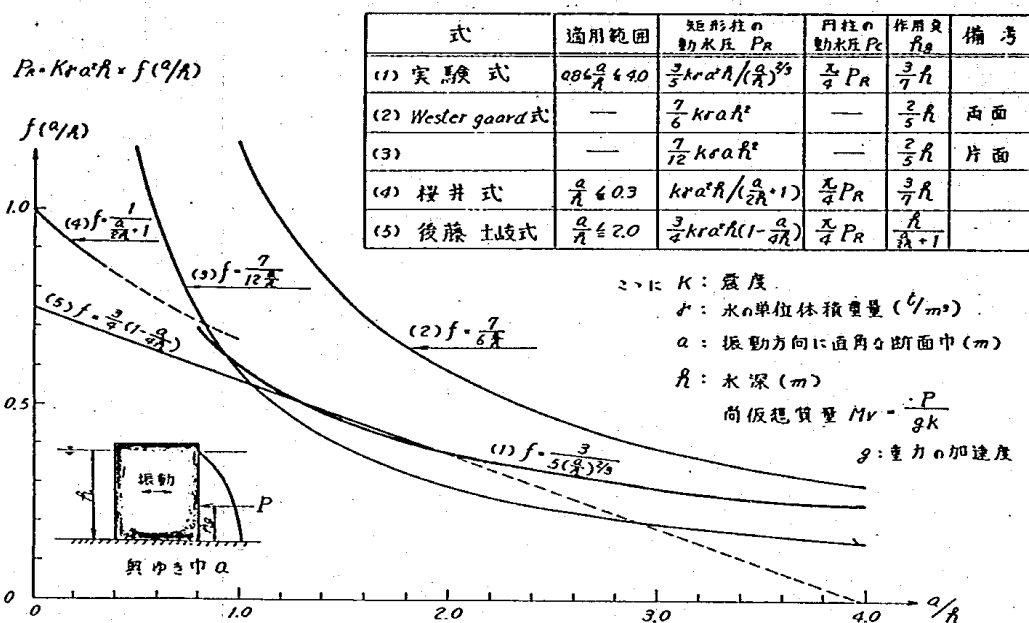
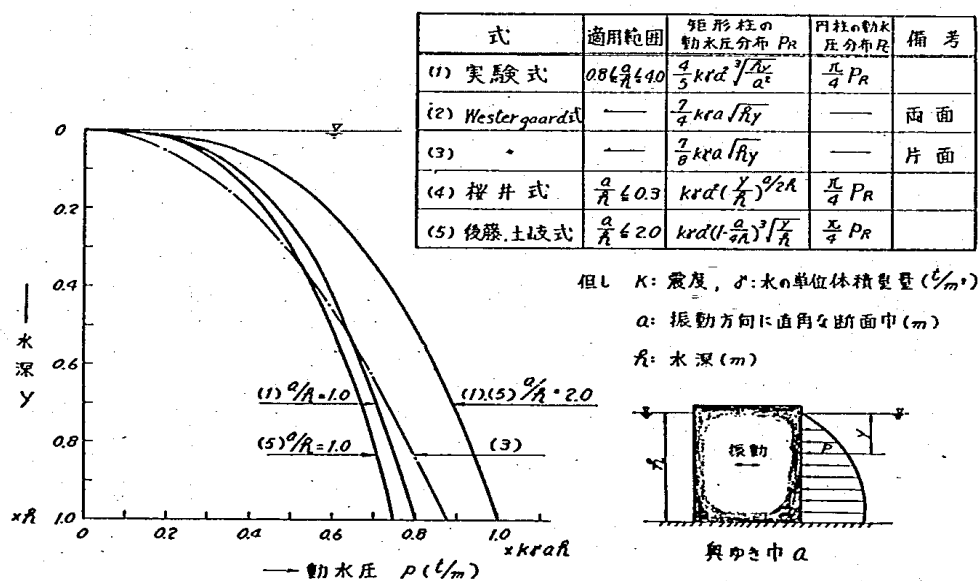


図 3.2 柱状体の動水圧分布 p (t/m)



単純な式の変形により水深 y の点で単位長さ当りの仮想質量 m_v , 仮想重量 w_v , 及び動水圧 p はそれぞれ

$$m_v = 0.8 \rho A^3 \sqrt{\frac{hy}{a^2}} \quad \text{----- (3.11)}$$

$$w_v = 0.8 \gamma A^3 \sqrt{\frac{hy}{a^2}} \quad \text{----- (3.12)}$$

$$p = 0.8 K \gamma A^3 \sqrt{\frac{hy}{a^2}} \quad \text{----- (3.13)}$$

で表わされる。

動水圧分布 P を図 3.2 に示す。

参考のために Westergaard 式 ((1.2) 式), 桜井式 ((1.3) 式), 後藤, 土岐式 ((1.4) 式) を同時に示す。

これらについては更に今後の実験によつて検討する必要がある。

[2] ロッキング振動の仮想質量と動水圧

ロッキング振動は前述した方法で行つたが, 定常的な振動を水中で起させることは非常にむずかしく, 一定のモードは得られにくく, 実験結果は相当のばらつきが生じた。

ロッキング振動の実験結果を附表 (I) ~ (III) に示す。ここには, 水深 h , 振動数 f , 減衰定数 n/p , 振動モード等を示している。

又, 仮想質量を求むべく, 前と同様に $a/h - \psi$ 曲線を描き, 附図 3 (I) ~ (III) に示した。この図を見ると判る如く, 並進振動時のように一本の直線では表わせず, C , δ を定めることは不可能である。しかし, 並進振動の場合に比し, ψ の値は, 約 $1/2 \sim 1/3$ 程度に低下していることが判る。即ち, ロッキング振動時の仮想質量は並進振動時に比して低下することが判る。

ロッキング振動については, 実験法自体にも問題があり, 定量的な評価のためには, 更に調査が必要であると思われる。

[3] 減 衰 効 果

縮小模型実験によつて, 実物構造物がもつ振動減衰性を定量的に求めることは非常に困難である。

この種の実験においては減衰は支持条件のちよつとした変化によつてかなり影響されられると思われる。

即ち、水の浮力が作用することにより、板の支持条件が多少変化することが予想されるから、減衰の変化には水の減衰効果によるものと、支持条件の変化によるものが含まれていると思われる。

今回の実験の範囲においては附表1.3及び5に見る如く水による減衰効果はやや表われているが、比較的小さいという結果が得られた。これから実物における減衰性を直接に云々することは出来ないが、定性的には水による減衰効果は幾分あるが、さほど大きくないといえよう。

一方、実物構造物の実測結果によると、水による減衰効果は小さいと報告されている。¹⁵⁾

これらから、水による減衰効果は地盤の逸散減衰に比較して、さほど大きくは期待できないものと思われる。

4. 結 論

〔1〕 仮想質量及び動水圧

(1) 並進振動

実験の結果から並進運動時の柱状構造物の仮想質量及び動水圧を与える次の実験式が得られた。

単位長さ当りについて

$$m_v = 0.8 \rho A \sqrt{\frac{h y}{a^2}}$$

$$p_v = 0.8 K_T A \sqrt[3]{\frac{h y}{a^2}}$$

構造物全体について

$$M_v = 0.6 \rho A h / (a/h)^{2/3}$$

$$P = 0.6 K_T A h / (a/h)^{2/3}$$

$$\text{但し } 0.8 \leq a/h \leq 4.0$$

これより動水圧の適用式としては、 a/h が2程度以下の場合には後藤、土岐式が妥当であり、 a/h が大きくなるに従つて、Westergaard式に接近することが判る。

a/h が0.3程度以下に小さくなると、実験の範囲外であるが、椋井式が妥当であると思われる。

(2) ロッキング振動

ロッキング振動時における仮想質量は、並進振動時のそれに比して低下することが予想される。しかし定量的には、まだ判然とせず、今後の調査を待つところであり現段階では並進運動時の式を採用することが妥当である。

〔2〕 減 衰 効 果

水による減衰効果は不明な点が多いが地盤への逸散減衰に比べると、さほど大きいとは考えられず期待しない方が安全であろう。

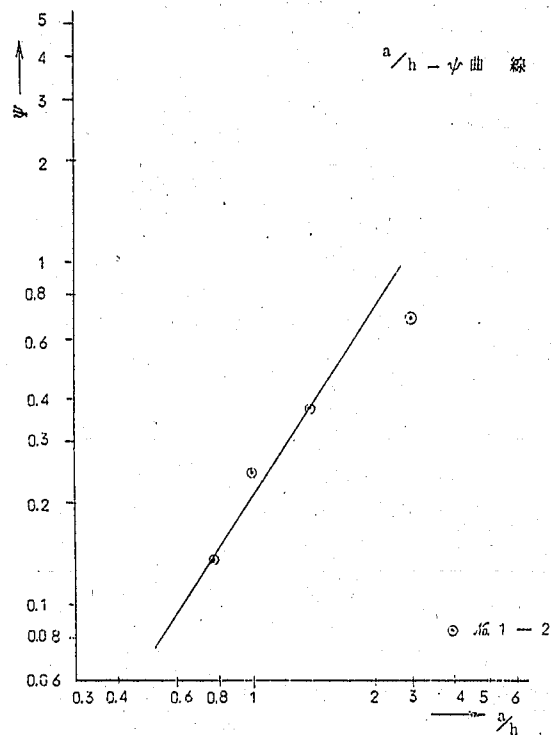
参 考 文 献

- 1) Westergaard : Water pressure on dams during earthquake, Trans.
ASCE.Vol 98(1933)
- 2) 物 部 長 穂 : 地震による動水圧を考慮せる動堰堤の断面決定法, 土木試験所報告
第 26 号 (昭和 9 年 3 月)
- 3) 佐 藤 清 一 : 堤体に作用する地震時動水圧について, 建設省第 1 技術研究所概報 3
号 (1948)
- 4) 畑 野 正 : 動堰堤に作用する地震の影響 (その 2), (その 3)
土木学会論文集 昭和 22, 23 年号, 及び第 5 号 (昭和 25 年)
- 5) 小 坪 清 真 : アーチダムに働く地震時動水圧 土木学会論文集 44 号
- 6) C.N.Zanger : Hydrodynamic Pressures on dams due to horizontal
earthquake effects, Engineering Monograph No 11,
U.S.Bureau of Reclamation
- 7) J.L.Savage : Earthquake investigation for the Pit River Bridge,
Civil Engineering, Vol 9 (1939)
- 8) Werner, Sundquist: On hydrodynamic earthquake effects,
Trans.Am.Geophysical Union, (Oct 1949)
- 9) Stelson, Mavis : Virtual mass and acceleration in fluids,
Trans. ASCE Vol. 22 (1957)
- 10) R.W.Clough : Effects of earthquakes on under-water Structures
Proc. 2nd WCEE Vol II (1960)
- 11) 桜 井 彰 彦 : 水中に立てられた柱状構造物の振動, 土木技術第 16 卷 6 号
(1961)
- 12) 岡本, 加藤, 伯野 : 水中構造物の模型振動実験
土木学会, 第 17 回年次講演 工部 (1962)
- 13) 後藤, 土岐 : 水中構造物の振動と耐震設計に関する基礎的研究,
土木学会, 論文集第 100 号 (1963)
- 14) 土 木 学 会 : 本州・四国連絡橋技術調査, 第 1 次報告書 (昭和 40 年 5 月)
- 15) 堀 井, 桜 井 : 水中構造物の振動 (実在構造物の実測と解析)
電研所報 vol. 13 No 3 (1963)

6. 実 験 結 果 図 表 集

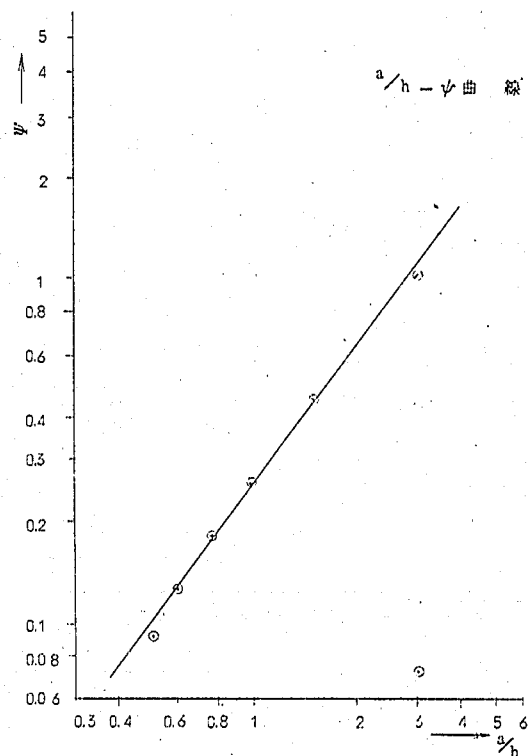
附表 1. 並進振動 (1 次実験), 固有振動数及び減衰定数

Test No	水 深 (cm)													柱状体	パネ	全重量
		空 中	0	10	20	30	38	39	40	50	55	58	59			
1	f %	—	61.4	528	486	436	407							A-34	3×30×270	12.38 K _p
	n/p	—	0.00879	0.0103	0.0187	0.0138	0.0142									
2-1	f %	469	468	455	427	397	—	—	365	341	332	325	—	A-56	3×30×270	18.4 K _p
	n/p	0.00903	0.00875	0.0127	0.0118	0.0113	—	—	0.0131	0.0125	0.0172	0.0119	—			
2-2	f	11.9	11.9	11.5	10.6	9.76	—	—	9.00	8.55	8.33	7.85	—	"	3×30×170	"
	n/p	0.0107	0.0113	0.0127	0.0133	0.0116	—	—	—	—	—	—	—			
3	f	7.76	7.56	7.19	6.50	5.87	5.44	5.39	—	—	—	—	—	A-24	3×30×270	68 K _p
	n/p	0.0215	0.0258	0.00970	0.00785	0.00838	0.00880	0.00812	—	—	—	—	—			
4	f	8.24	8.18	7.62	7.03	6.47	—	—	5.99	5.59	—	5.28	5.27	A-26	3×40×270	9.8 K _p
	n/p	0.0178	0.0256	0.0403	0.0117	0.0100	—	—	0.00903	0.00850	—	0.00751	0.00880			
5	f	7.22	7.18	6.62	5.30	4.63	4.09	4.02	—	—	—	—	—	B-314	3×30×270	7.35 K _p
	n/p	0.0139	0.0117	0.0125	0.0150	0.0160	0.0155	0.0176	—	—	—	—	—			
6	f	7.00	6.96	6.46	5.59	4.81	—	—	4.23	3.82	—	—	—	B-316	3×40×270	10.96 K _p
	n/p	0.00882	0.00882	0.00993	0.0106	0.0129	—	—	0.0152	0.0180	—	—	—			
7	f	9.02	8.97	8.47	7.03	5.93	5.43	5.38	—	—	—	—	—	B-324	3×40×230	9.8 K _p
	n/p	0.0114	0.0128	0.0233	0.0106	0.0128	0.0136	0.0114	—	—	—	—	—			
8	f	6.33	6.29	5.99	5.35	4.69	—	—	4.20	3.80	—	3.56	—	B-326	3×40×270	13.9 K _p
	n/p	0.00677	0.00818	0.0124	0.0152	0.0169	—	—	0.0164	0.0161	—	0.0200	—			
9	f	7.44	7.53	7.09	6.24	5.48	4.95	4.88	—	—	—	—	—	B-334	3×30×230	9.8 K _p
	n/p	0.00723	0.00953		0.0086	0.0103	0.0110	0.0115	—	—	—	—	—			
10	f	7.62	7.62	7.24	6.55	5.92	—	—	5.31	4.77	—	4.53	4.66	B-336	3×40×230	16.6 K _p
	n/p	—	—	0.0117	0.0187	0.0103	—	—	0.0121	0.0128	—	0.0117	0.0128			



第 一 次 試 驗
Test No. 1
平 行 運 動
A - 34

Test	C	δ
No. 1-2	0.240	1.248

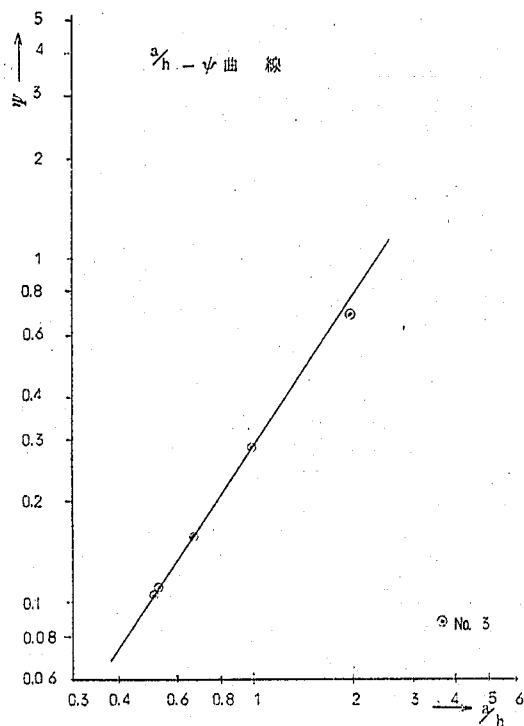


第 一 次 試 驗
Test No. 2
平 行 運 動
A - 36

Test	C	δ
No. 2-1	0.260	1.304

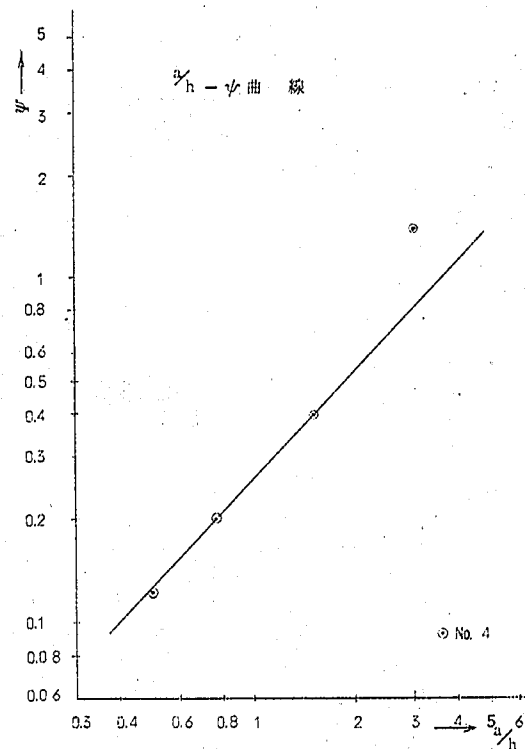
附圖 1 (1)並進振動 (一次試驗)

$a/h - \psi$ 曲 線



第一次試験
Test No. 3
平行運動
A - 24

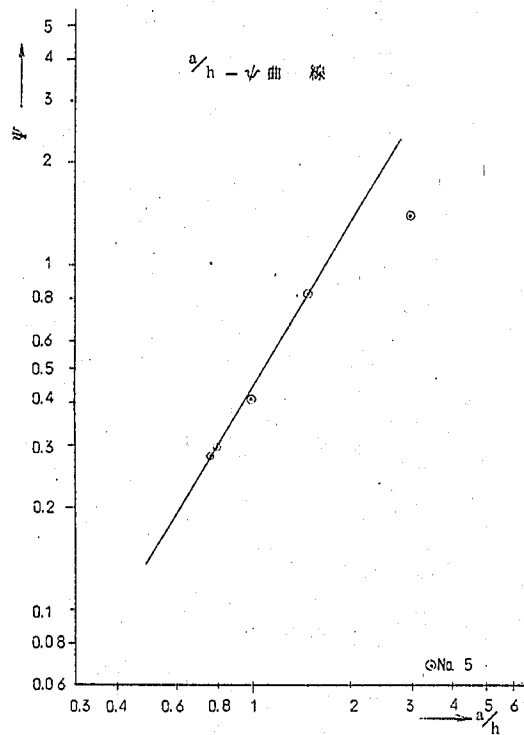
Test	C	δ
No. 3	0.280	1.406



第一次試験
Test No. 4
平行運動
A - 26

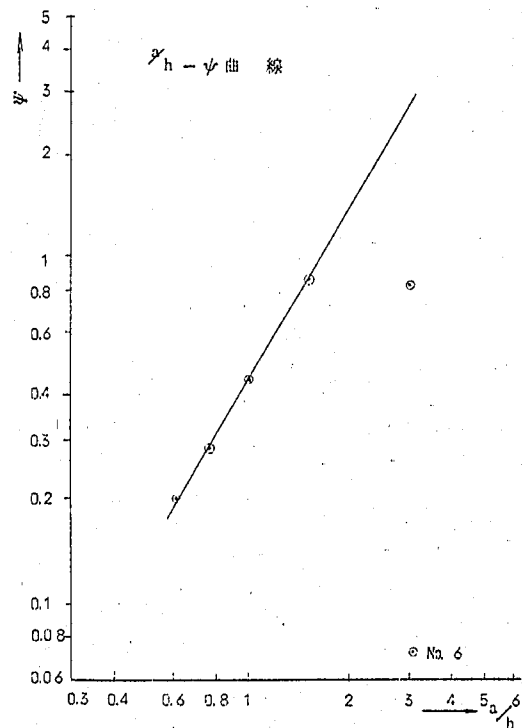
Test	C	δ
No. 4	0.256	1.020

附 圖 1 (2)



第一次試驗
Test No. 5
平行運動
B-- 31.4

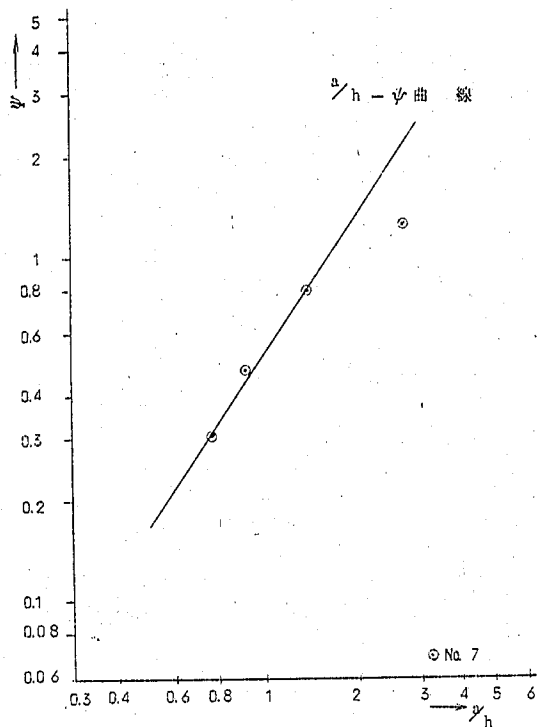
Test	C	δ
Na. 5	0.428	1.614



第一次試驗
Test No. 6
平行運動
B - 31.6

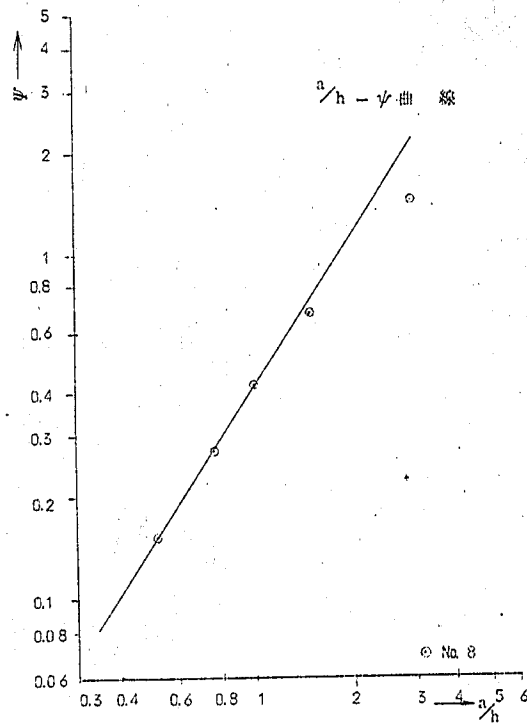
Test	C	δ
Na. 6	0.441	1.656

附圖 1 (3)



第一次試驗
Test Na 7
平行運動
B - 324

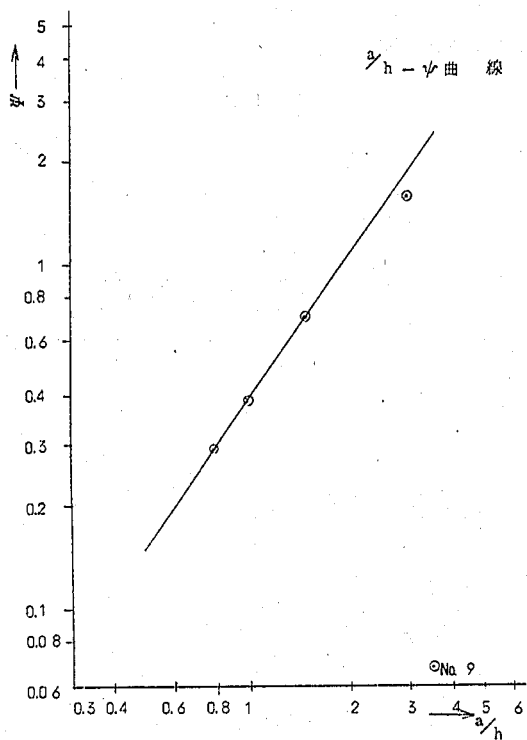
Test	C	δ
Na 7	0.440	1.423



第一次試驗
Test Na 8
平行運動
B - 326

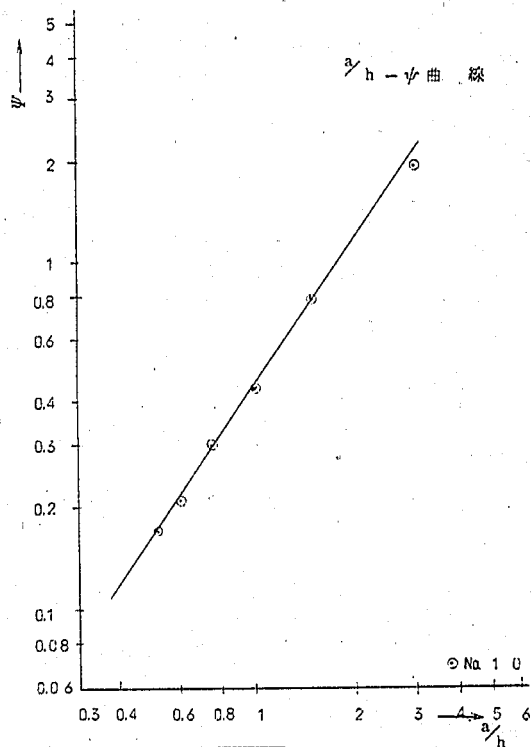
Test	C	δ
Na 8	0.410	1.463

附圖 1 (4)



第 一 次 試 驗
Test Na 9
平 行 運 動
B - 334

Test	C	δ
Na 9	0.400	1.350



第 一 次 試 驗
Test Na 10
平 行 運 動
B - 336

Test	C	δ
Na 10	0.442	1.403

附圖 1 (5)

附表 2 並進振動（一次夾驗），實驗結果

Test 點	柱 狀 體	C	δ
1 ~ 2	A - 3 4	0.2 4 0	1.2 4 8
2 ~ 1	A - 3 6	0.2 6 0	1.3 0 4
3	A - 2 4	0.2 8 0	1.4 0 6
4	A - 2 6	0.2 5 6	1.0 2 0
5	B - 3 1 4	0.4 2 8	1.6 1 4
6	B - 3 1 6	0.4 4 1	1.6 5 6
7	B - 3 2 4	0.4 4 0	1.4 2 3
8	B - 3 2 6	0.4 1 0	1.4 6 3
9	B - 3 3 4	0.4 0 0	1.3 5 0
1 0	B - 3 3 6	0.4 4 2	1.4 0 3
平 均			1.3 8 9

附表 3. 並進振動（二次実験），固有振動数及び減衰定数

(11)

Test No.		水深 (cm)														柱状体	バネ	全重量
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	48	49	50	60			
1-1	f %	4.95	4.47	4.27	4.12	3.93	3.73	3.54	3.40	3.25	3.13	3.05	3.01	—	—	C225II	1610	Kg 10.25
	n/p	0.0085	0.0202	0.0217	0.0153	0.0147	0.0194	0.0223	0.0156	0.0168	0.0167	0.0169	0.0183	—	—			
-2 (1)	f %	9.00	8.86	8.55	8.14	7.69	7.32	6.92	6.58	6.32	6.11	5.96	5.90	5.84	—	"	168	"
	n/p	0.0057	0.0050	0.0069	0.0069	0.0069	0.0080	0.0053	0.0050	0.0048	0.0060	0.0060	0.00663	0.0066	—			
-2 (2)	f %	8.94	8.78	8.50	7.95	7.48	7.10	6.60	6.41	6.10	5.85	—	—	5.62	—	"	"	"
	n/p	0.00711	0.0096	0.0174	0.0218	0.0145	0.0126	0.0129	0.0115	0.0103	0.0108	—	—	0.0039	—			
2-1	f %	5.06	5.00	—	4.60	4.44	4.09	3.89	3.74	3.66	3.44	3.38	3.37	3.27	—	C335	9	Kg 15.6
	n/p	0.0290	0.0348	—	0.0161	0.0165	0.0150	0.0158	0.0117	0.0099	0.0227	0.015	0.0205	0.0088	—			
-2	f %	9.63	9.35	8.92	8.63	8.09	7.63	7.19	6.83	6.41	6.17	5.95	5.91	5.76	—	"	7	"
	n/p	0.0197	0.0149	0.0122	0.0115	0.0067	0.0053	0.0055	0.0051	0.0051	0.0071	0.0071	0.0053	0.0064	—			
-3	f %	7.92	7.82	7.67	7.45	7.14	6.84	6.49	6.13	5.89	5.66	5.54	5.47	5.41	—	"	"	231
	n/p	0.0059	0.0060	0.0080	0.0121	0.0110	0.0124	0.0108	0.0128	0.0131	0.0108	0.0062	0.0073	0.0156	—			
3-1	f %	9.45	9.31	8.78	8.23	7.49	7.00	6.41	6.00	5.66	5.30	5.14	5.09	5.01	4.77	C425	7	Kg 16.30
	n/p	0.0112	0.0112	0.0115	0.0087	0.0103	0.0057	0.0053	0.0050	0.0046	0.0060	0.0060	0.0062	0.0053	0.0050			
-2	f %	4.87	4.86	4.58	4.30	4.01	3.78	3.53	3.32	3.09	2.94	2.84	2.81	2.77	—	"	"	"
	n/p	0.0094	0.0147	0.0183	0.0126	0.0140	0.0151	0.0137	0.0151	0.0173	0.0183	0.0183	0.0192	0.0147	—			
-3	f %	14.31	13.86	13.00	11.96	10.97	9.96	9.29	8.62	8.01	7.48	7.22	7.03	—	—	"	6	"
	n/p	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
-4	f %	12.20	11.93	11.46	10.79	10.14	9.57	8.96	8.44	7.95	7.54	7.31	7.20	—	—	"	4 × 20 × 200	Kg 251.9
	n/p	0.0051	0.0073	0.0073	0.0051	0.0048	0.0051	0.0048	0.0051	0.0070	0.0081	0.0084	0.0092	—	—			
-5	f %	15.28	14.86	13.85	12.71	11.67	10.73	9.89	9.21	8.59	8.08	7.77	7.67	—	—	"	"	14.24
	n/p	0.00514	0.00323	0.0066	0.0088	0.0056	0.0048	0.0055	0.0057	0.0063	0.0066	0.0073	0.0075	—	—			

附表3. 並進振動（二次共振），固有振動数及び減衰定数

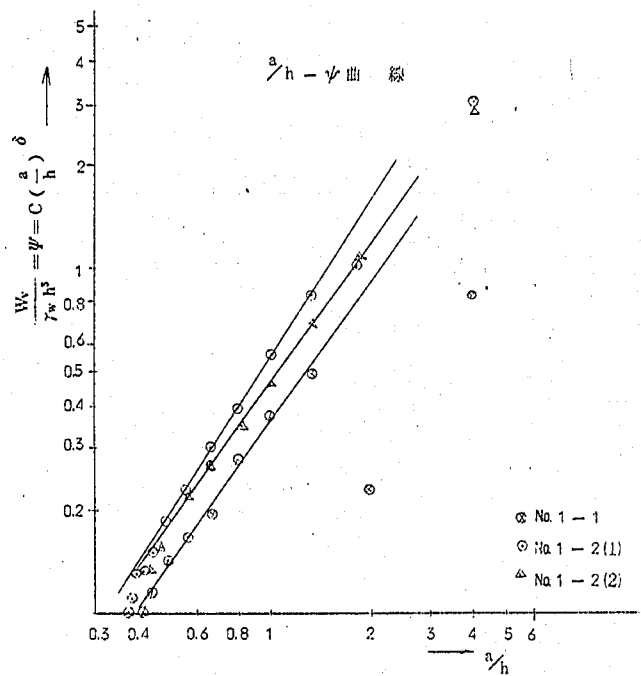
(2)

Test No.	水深 (cm)															柱状体	バネ	全重量
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	48	49	50	60			
3-6	f %	212.6	209.0	188.0	175.5	16.60	15.13	140.6	128.5	120.2	113.1	109.1	108.0	—	—	C425	4×20×170	18.18
	n/p	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
4-1	f %	5.75	5.78	5.52	5.26	4.95	4.66	4.33	4.14	3.93	3.73	3.62	3.58	3.53	—	C455	8	22.5 kg
	n/p	0.0105	0.0119	0.0096	0.0089	0.0092	0.0087	0.0076	0.0062	0.0096	0.0069	0.0078	0.0078	0.0068	—			
-2	f %	9.23	9.15	8.40	8.40	7.88	7.53	6.93	6.50	6.13	5.83	5.59	5.53	5.44	—	"	6	"
	n/p	0.0117	0.0121	0.0084	0.0089	0.0073	0.0053	0.0059	0.0051	0.0051	0.0062	0.0066	0.0099	0.0101	—			
5-1 (1)	f %	3.77	3.75	3.78	3.55	3.43	3.27	3.16	3.03	2.76	2.74	2.72	2.70	2.62	—	C445	9	24.45 kg
	n/p	0.0100	0.0128	0.0144	0.0126	0.0121	0.0135	0.0149	0.0152	0.0149	0.0165	0.0174	0.0180	0.0163	—			
-1 (2)	f %	5.07	5.06	4.92	4.77	4.54	4.53	4.12	3.91	3.72	3.57	3.43	3.42	3.40	—	"	8	26.35 kg
	n/p	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
-2	f %	9.13	9.07	8.63	8.40	7.95	7.53	7.12	6.72	6.36	5.98	5.84	5.78	5.69	—	"	6	26.5 kg
	n/p	0.0099	0.0077	0.0080	0.0080	0.0106	0.0077	0.0115	0.0104	0.0097	0.0075	0.0070	0.0068	0.0061	—			
-3	f %	14.0	13.71	13.12	125.4	116.5	110.8	10.50	10.05	8.72	8.43	8.16	—	—	—	"	2	23.5 kg
	n/p	0.0018	0.0057	0.0064	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
-4	f %	8.56	8.52	8.20	8.01	7.80	7.55	7.34	7.09	6.83	6.66	6.53	—	—	—	"	"	68.5 kg
	n/p	0.00275	0.00358	0.00355	0.00365	0.00429	0.00389	0.00365	0.00381	0.00389	0.00389	0.00365	—	—	—			
-5	f %	6.44	6.45	6.38	6.32	6.18	6.08	5.98	5.83	5.73	5.61	5.53	5.55	—	—	"	"	113.5 kg
	n/p	—	0.0042	0.0041	0.0051	0.0057	0.0037	0.0020	0.0042	0.0037	0.0040	0.0040	0.0040	—	—			
-6	f %	3.86	3.79	3.70	3.58	3.59	3.28	2.99	2.85	2.74	2.62	2.54	—	—	—	"	10	23.5 kg
	n/p	0.0172	0.0143	0.0128	0.0154	0.0293	—	—	0.0340	0.0408	0.0488	0.0536	—	—	—			
-7	f %	2.15	2.19	2.20	2.204	2.18	2.15	2.11	2.05	2.10	1.97	1.96	—	—	—	"	"	68.5 kg
	n/p	0.00172	0.0091	0.0239	0.0267	0.0264	0.0261	0.0290	0.0261	0.0268	0.0318	0.0296	—	—	—			

附表3. 並進振動（二次実験），固有振動数及び減衰定数

(5)

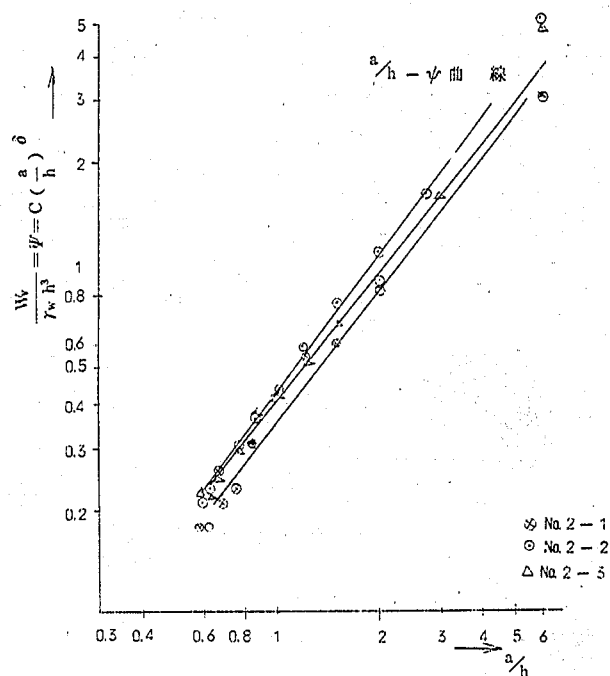
No.		水 深 (cm)														柱状体	ネジ	全重量
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	48	49	50	60			
6-1	f%	6.32	6.30	6.54	6.05	5.64	5.48	5.27	5.05	4.83	4.71	4.67	4.66	4.56	—	D 2.5	9	9.45 ^{Kg}
	n/p	0.0055	0.0077	0.0131	0.0202	0.0119	0.0065	0.0108	0.0032	0.011	0.0168	0.0298	—	0.00105	—			
-2	f%	12.64	12.47	11.97	11.57	10.92	10.40	10.20	9.73	9.44	8.99	8.83	8.74	8.64	—	"	7	9.45 ^{Kg}
	n/p	0.0231	0.0180	0.0249	0.0363	0.0268	—	0.0076	0.0105	0.0048	0.0023	0.0066	0.0060	0.0060	—			
7-1	f%	4.92	4.90	4.79	4.64	4.44	4.25	4.08	3.88	3.73	3.55	3.52	3.48	3.45	—	D 3.5	9	15.40 ^{Kg}
	n/p	0.0089	0.0119	0.0110	0.0150	0.0080	0.0147	0.0128	0.0110	0.0137	0.0124	0.0124	0.0135	0.0140	—			
-2	f%	9.62	9.57	9.29	8.89	8.49	8.13	7.74	7.36	7.03	6.75	6.59	6.47	6.47	—	"	7	16.7 ^{Kg}
	n/p	0.0348	0.0241	0.0188	0.0183	0.0114	0.0060	0.0068	0.0076	0.0062	0.0044	0.0080	0.0078	0.0071	—			
-3	f%	8.01	7.97	7.83	7.59	7.53	7.09	6.83	6.59	6.39	6.16	—	—	—	—	"	"	22.9 ^{Kg}
	n/p	0.0048	0.0037	0.0037	0.0069	0.0040	0.0037	0.0037	0.0040	0.0048	0.0048	0.0051	—	—	—			
8-1	f%	5.83	5.81	5.66	5.47	5.21	4.98	4.72	4.49	4.23	4.10	3.96	3.91	3.87	—	D 4.5	8	21.35 ^{Kg}
	n/p	0.0092	0.0089	0.0080	0.0112	0.0083	0.0103	0.0151	0.0165	0.0166	0.0158	0.0163	0.0171	0.0170	—			
-2	f%	8.46	8.20	8.03	7.83	7.55	7.05	6.68	6.32	5.96	5.58	5.42	5.38	5.30	—	"	7	21.35 ^{Kg}
	n/p	0.0222	0.0205	0.0097	0.0165	0.0186	0.0199	0.0131	0.0183	0.0220	0.0253	0.0282	0.0249	0.0244	—			



第二次試驗	
Test	No. 1
平行運動	
C	225

實驗結果

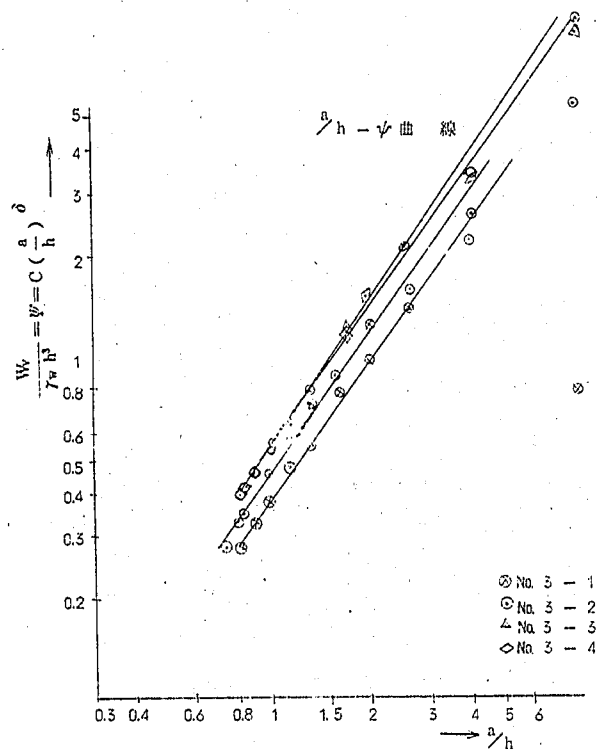
Test	C	δ
1-1	0.349	1.346
1-2(1)	0.538	1.370
1-2(2)	0.459	1.313



第二次試驗	
Test	No. 2
平行運動	
C	335

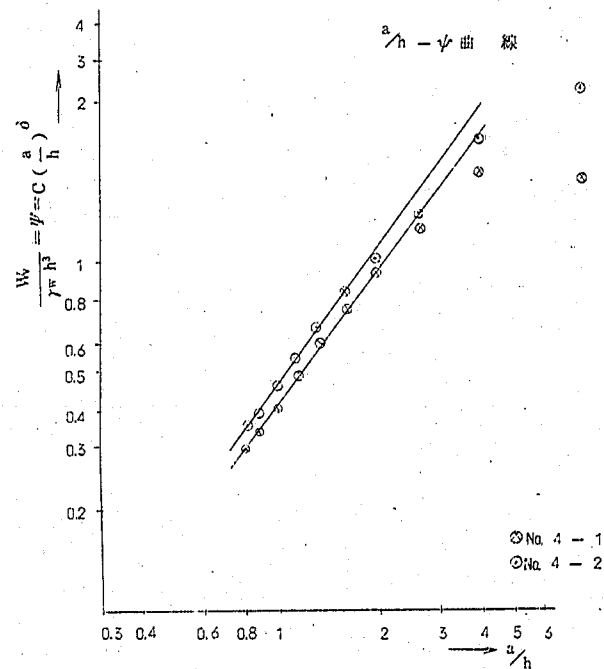
Test	C	δ
2-1	0.351	1.238
2-2	0.434	1.288
2-3	0.402	1.267

附圖 2(1)並進振動(二次試驗) $\frac{a}{h} - \psi$ 曲线



第二次試驗	
Test	No. 3
平 行 運 動	
C	— 4.25

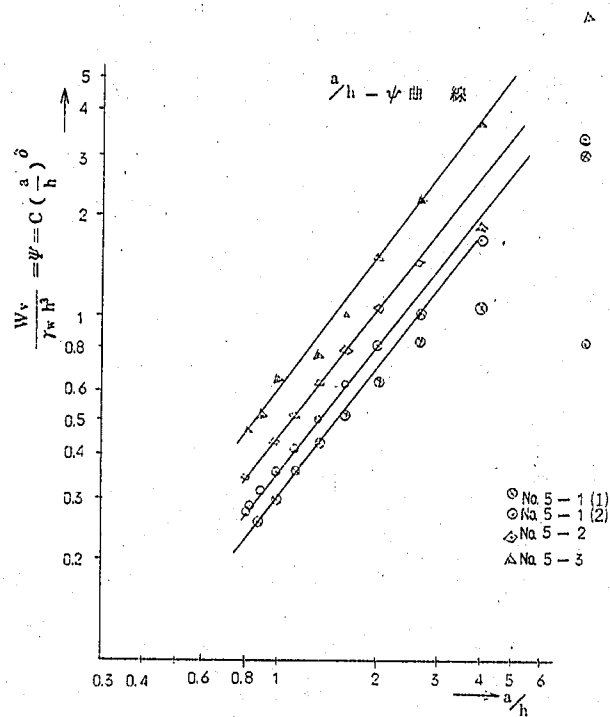
Test	C	δ
3-1	0.378	1.307
3-2	0.453	1.357
3-3	0.550	1.327
3-4	0.523	1.421



第二次試驗	
Test	No. 4
平 行 運 動	
C	— 4.35

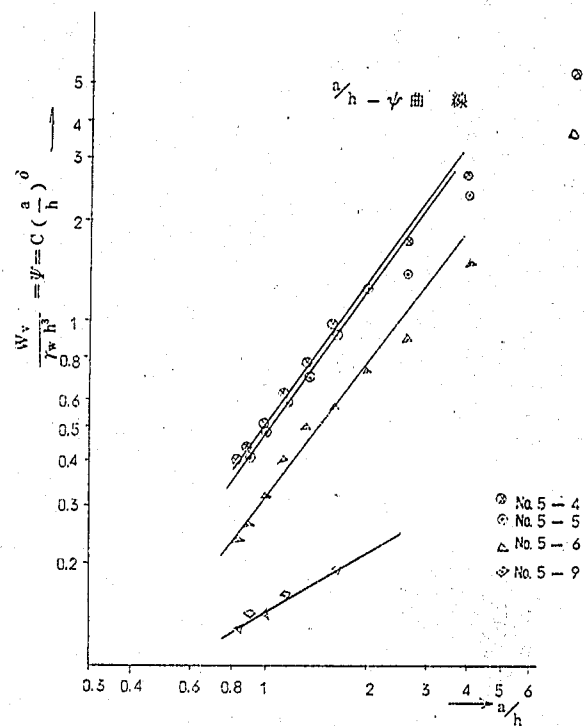
Test	C	δ
4-1	0.395	1.281
4-2	0.449	1.332

附圖 2 (2)



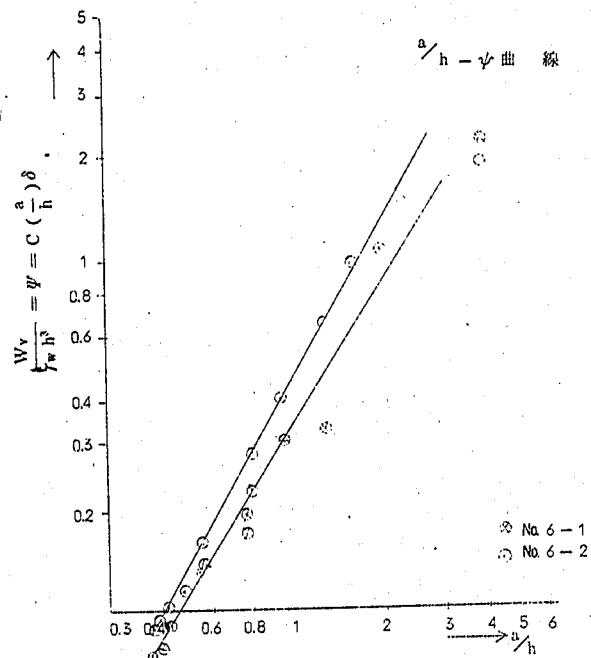
第二次試驗	
Test	No. 5
平行運動	
C - 445	

Test	C	δ
5-1(1)	0.294	1.231
5-1(2)	0.353	1.216
5-2	0.434	1.288
5-3	0.602	1.288



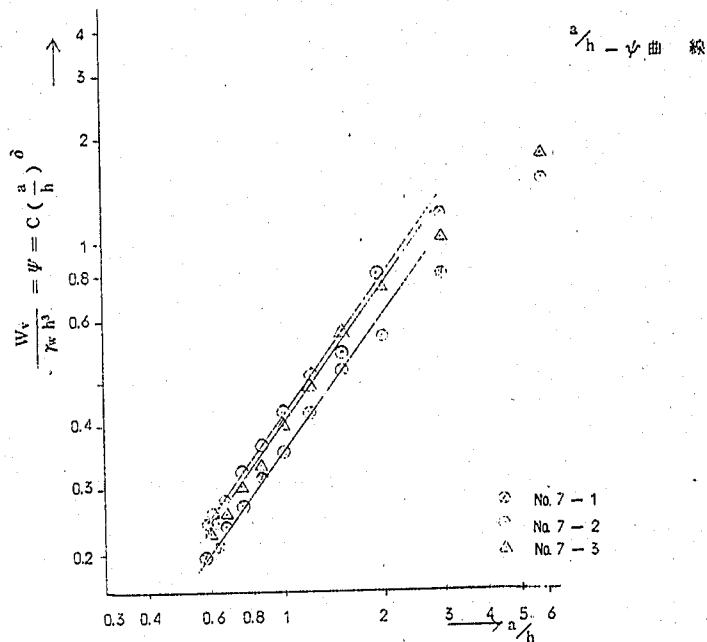
第二次試驗	
Test	No. 5
平行運動	
C - 445	

Test	C	δ
5-4	0.509	1.342
5-5	0.482	1.352
5-6	0.311	1.265
5-7	0.144	0.605



第二次試驗	
Test	No. 6
平行運動	
D - 25	

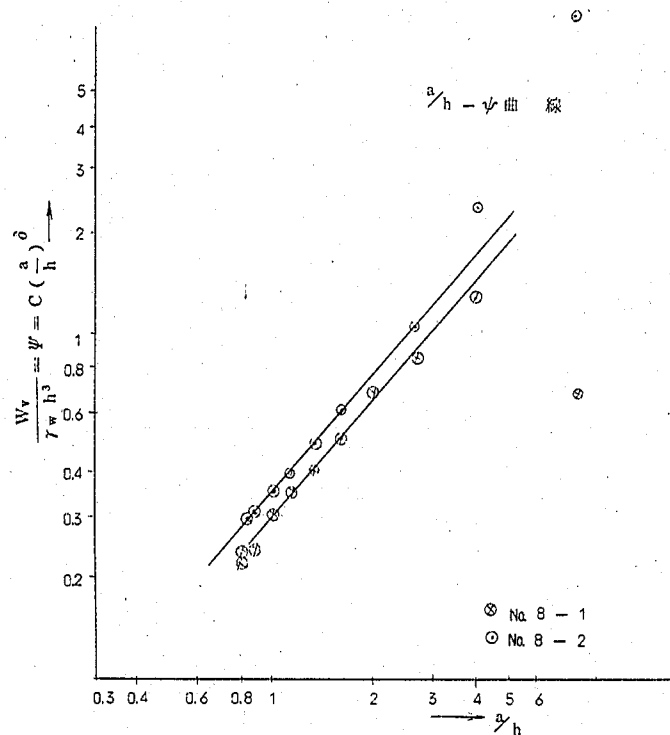
Test	C	δ
6-1	0.305	1.479
6-2	0.404	1.686



第二次試驗	
Test	No. 7
平行運動	
D - 35	

Test	C	δ
7-1	0.256	1.334
7-2	0.327	1.327
7-3	0.304	1.341

附圖 2 (4)



第二次試驗	
Test	Na 8
平行運動	
D - 45	

Test	C	δ
8-1	0.298	1.114
8-2	0.353	1.106

附圖 2 (5)

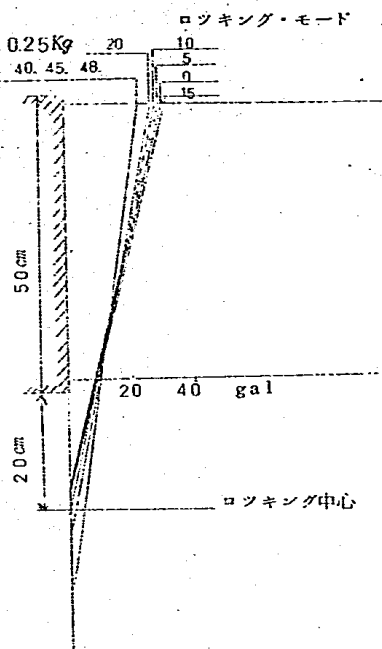
附表4. 並進振動(二次實驗), 實驗結果

Test 系	柱 状 体	C	δ
1 - 1	C - 225	0.349	1.346
1 - 2 (1)		0.538	1.370
1 - 2 (2)		0.459	1.313
2 - 1	C - 335	0.351	1.238
2 - 2		0.434	1.288
2 - 3		0.402	1.207
3 - 1	C - 425	0.378	1.307
3 - 2		0.453	1.357
3 - 3		0.550	1.327
3 - 4		0.523	1.421
4 - 1	C - 435	0.395	1.281
4 - 2		0.449	1.332
5 - 1 (1)	C - 445	0.294	1.231
5 - 1 (2)		0.353	1.216
5 - 2		0.434	1.288
5 - 3		0.602	1.288
5 - 4		0.509	1.342
5 - 5		0.482	1.352
5 - 6		0.311	1.265
5 - 7		0.144	1.605
6 - 1	D - 25	0.305	1.479
6 - 2		0.404	1.686
7 - 1	D - 35	0.256	1.334
7 - 2		0.327	1.327
7 - 3		0.304	1.341
8 - 1	D - 45	0.298	1.114
8 - 2		0.353	1.106
平 均			1.324

附表 5 (I) ロッキング振動 (二次実験), 固有振動数, 減衰定数及びモード

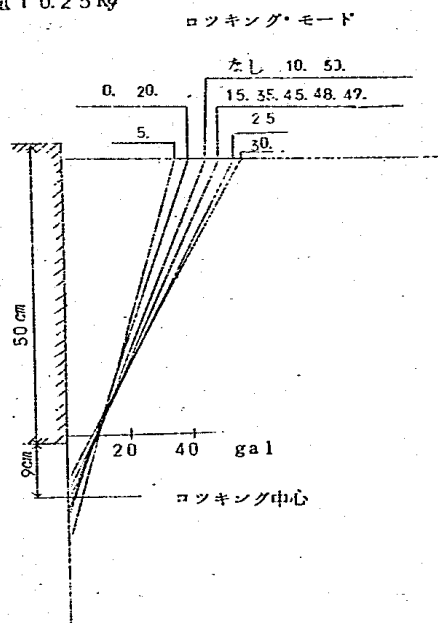
Test №1-1 柱状体 №C255-II パネ №10 全重量 10.25 Kg

水深 (cm)	f (%)	$\tan \theta$	n / p
0	5.64	0.025	0.00916
5	5.59	0.035	0.0128
10	5.55	0.035	0.0128
15	5.39	0.0427	0.0157
20	5.29	0.0356	0.0130
25	5.05	0.0337	0.0123
30	4.84	—	—
35	4.56	0.0486	0.0178
40	4.32	0.0413	0.0153
45	4.03	0.0487	0.0178
48	3.87	0.0607	0.0222
49	3.42	0.0563	0.0202



Test №1-2 柱状体 №C225-II パネ 8 全重量 10.25 Kg

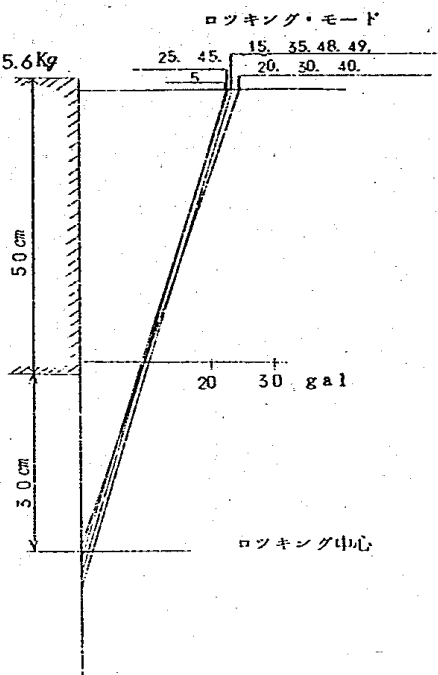
水深 (cm)	f (%)	$\tan \theta$	n / p
なし	7.41	0.0238	0.00872
0	7.35	0.0325	0.0119
5	7.33	0.0281	0.0103
10	7.21	0.0250	0.00917
15	7.11	0.0250	0.00917
20	6.91	0.0244	0.00893
25	6.65	0.0263	0.00964
30	6.29	0.0275	0.0101
35	5.89	0.0265	0.00987
40	5.52	0.0306	0.0112
45	5.21	0.0288	0.0106
48	4.96	0.0313	0.0115
49	4.90	0.0319	0.0117
50	4.79	0.0338	0.0124



附表 5 (2)

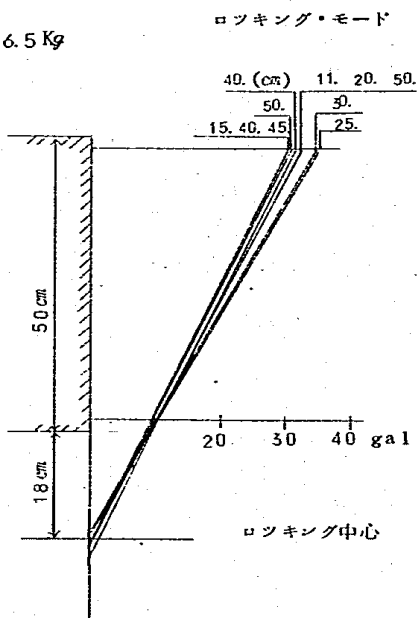
Test 162-1 柱状体 16C335-II パネ169 重量15.6Kg

水深 (cm)	f (%)	$\tan \theta$	n / p
0	4.86	0.142	0.0520
5	4.84	0.134	0.0491
10	4.76	0.147	0.0540
15	4.65	0.158	0.0579
20	4.41	0.172	0.0631
25	4.19	0.152	0.0557
30	3.94	0.192	0.0704
35	3.78	0.070	0.0257
40	3.71	0.070	0.0257
45	3.43	0.086	0.0315
47	—	—	—
48	3.31	0.070	0.0257
49	3.30	0.088	0.0323
50	3.25	0.128	0.0469



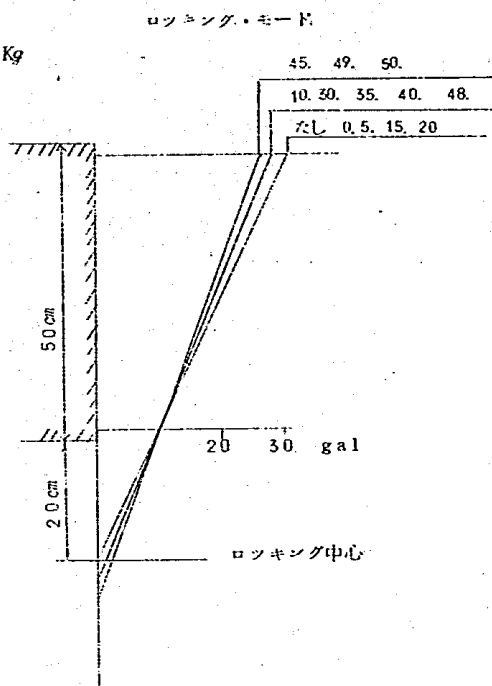
TEST 162-2 柱状体 16C335-II パネ167 重量16.5Kg

水深 (cm)	f (%)	$\tan \theta$	n / p
0	6.47	0.0238	0.00872
5	6.47	0.0642	0.00236
11	6.31	0.0243	0.00892
15	6.25	0.0264	0.00970
20	6.10	0.0292	0.01070
25	5.89	0.0525	0.01920
30	5.62	0.0530	0.01950
35	5.29	0.0550	0.02040
40	4.84	0.0870	0.03190
45	4.53	0.0750	0.02760
47	4.32	0.0550	0.02040
48	4.32	0.0481	0.01770
49	4.27	0.0494	0.01810
50	4.17	0.0529	0.01940



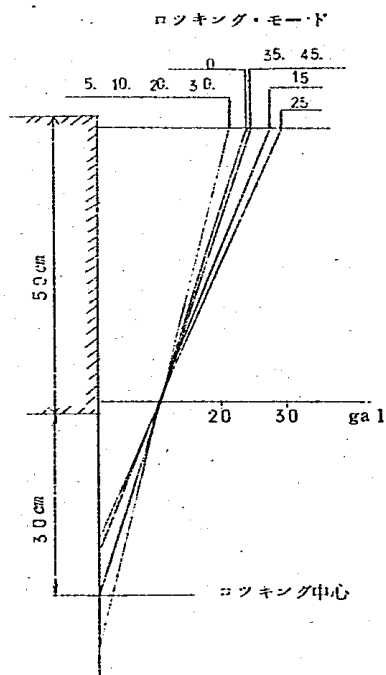
Test №3-1 柱状体 C425 パネル7 重量1630Kg

水深 (cm)	f (%)	$\tan \theta$	n / p
なし	6.36	0.0344	0.0126
0	6.28	0.0275	0.0101
5	6.28	0.0300	0.0110
10	6.27	0.0142	0.00519
15	6.15	0.0325	0.0119
20	6.01	0.0340	0.0125
25	5.93	0.0340	0.0125
30	5.84	0.0206	0.00756
35	5.57	0.0225	0.00814
40	5.29	0.0256	0.00938
45	5.03	0.0269	0.00984
48	4.89	0.0300	0.0110
49	4.81	0.0288	0.0116
50	4.73	0.0263	0.00963



Test №3-2 柱状体 C425 パネル6 重量1630 kg

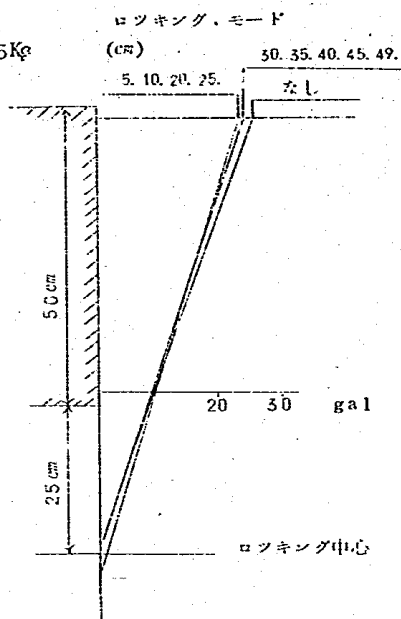
水深 (cm)	f (%)	$\tan \theta$	n / p
0	4.74	0.0263	0.00965
5	4.73	0.0313	0.0115
10	4.72	0.0331	0.0121
15	4.64	0.0217	0.0080
20	4.56	0.0412	0.0151
25	4.45	0.0292	0.0107
30	4.36	0.0385	0.0141
35	4.14	0.0419	0.0154
40	3.97	0.0550	0.0202
45	3.83	0.0393	0.0144
48	3.67	0.0450	0.0165
49	3.68	0.0442	0.0162
50	3.61	0.0379	0.0139



附表 5 (4)

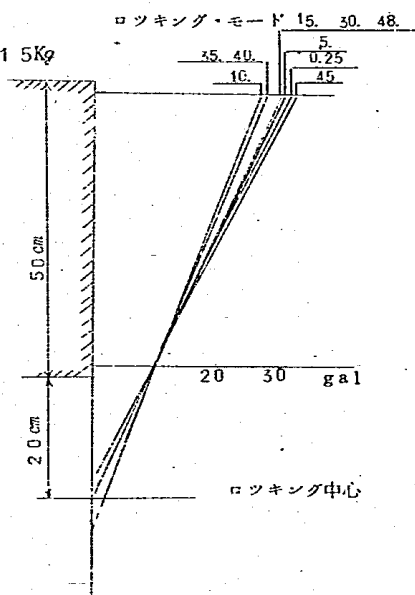
Test №4-1. 柱状体 C435 パネル8 重量 22.15Kg

水深 (cm)	f (%)	$\tan \theta$	n / p
なし	4.54	0.0185	0.00676
0	4.97	0.0225	0.00825
5	4.51	0.0170	0.00623
10	4.48	0.0206	0.00756
15	4.43	0.0185	0.00677
20	4.32	0.0154	0.00564
25	4.22	0.0213	0.00779
30	4.03	0.0208	0.00762
35	3.88	—	—
40	3.73	0.0256	0.00939
45	3.47	0.0306	0.01120
48	3.14	0.0262	0.00962
49	3.07	0.0417	0.01530
50	3.22	0.0422	0.01550



Test №4-2 柱状体 C-435 パネル6 重量 22.15Kg

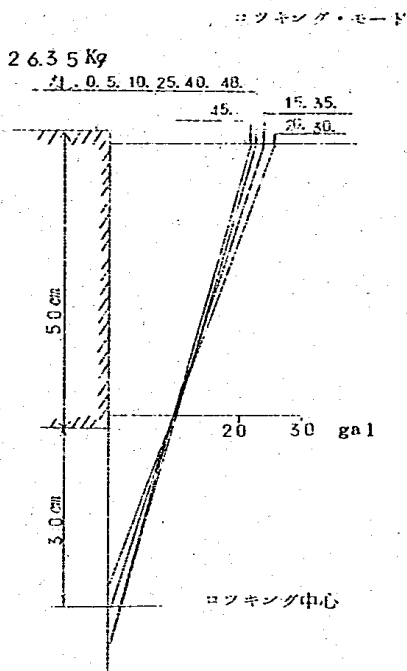
水深 (cm)	f (%)	$\tan \theta$	n / p
0	5.57	0.0280	0.0103
5	5.55	0.0230	0.00842
10	5.51	0.0251	0.00919
15	5.42	0.0290	0.0106
20	5.35	0.0265	0.00971
25	5.17	0.0250	0.00916
30	5.01	0.0350	0.0138
35	4.78	0.0230	0.00842
40	4.51	0.0310	0.0117
45	4.27	0.0300	0.0110
48	4.09	0.0350	0.0128
49	4.00	0.0350	0.0128
50	3.95	0.0275	0.0101



附表 5 (5)

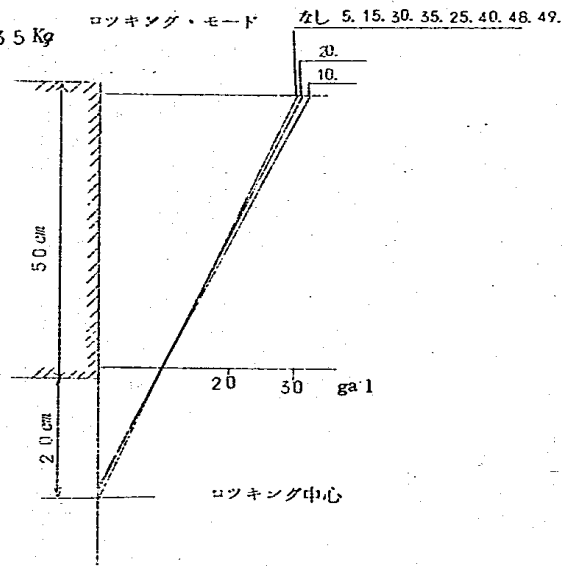
Test 5-1 柱状体 C445-II パネル9 重量 26.35 Kg

水深 (cm)	f (%)	$\tan \theta$	n / p
なし	3.83	0.0313	0.0126
0	3.73	0.0413	0.0152
5	3.70	0.0350	0.0128
10	3.71	0.0375	0.0138
15	3.73	0.0388	0.0143
20	3.55	0.0436	0.0160
25	3.25	0.0492	0.0180
30	3.35	0.0492	0.0218
35	3.18	0.0657	0.0241
40	3.00	0.0720	0.0264
45	2.79	0.0860	0.0316
48	2.70	0.091	0.0334
49	2.72	0.102	0.0375
50	2.61	0.092	0.0347



Test 5-2 柱状体 C445-II パネル3 重量 26.35 Kg

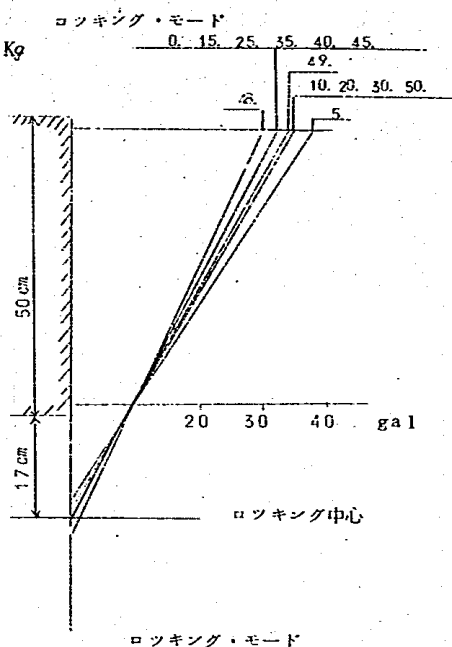
水深 (cm)	f (%)	$\tan \theta$	n / p
なし	5.38	0.0313	0.0115
0	5.34	—	—
5	5.33	0.051	0.0187
10	5.26	0.036	0.0132
15	5.18	0.034	0.0143
20	5.09	0.034	0.0125
25	4.87	—	—
30	4.72	0.029	0.0106
35	4.44	0.025	0.00917
40	4.09	0.034	0.0125
45	3.93	0.037	0.0136
48	3.76	0.033	0.0121
49	3.71	0.041	0.0150



附表 5 (6)

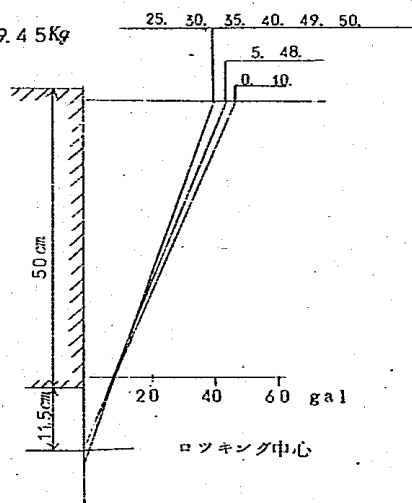
Test №6-1 柱状体 №D 25-II パネ №9 重量 9.45 Kg

水深 (cm)	f (%)	$\tan \theta$	n / p
0	6.39	—	—
5	6.36	0.0775	0.0284
10	6.06	0.103	0.0376
15	5.88	0.075	0.0275
20	5.77	0.101	0.0371
25	5.67	0.068	0.0249
30	5.79	0.0813	0.0298
35	5.43	0.0750	0.0275
40	4.87	0.0800	0.0293
45	4.72	0.0750	0.0265
48	4.59	0.0817	0.0300
49	4.63	0.0825	0.0302
50	4.46	0.081	0.0297



Test №6-2 柱状体 №D 25-II パネ №7 重量 9.45 Kg

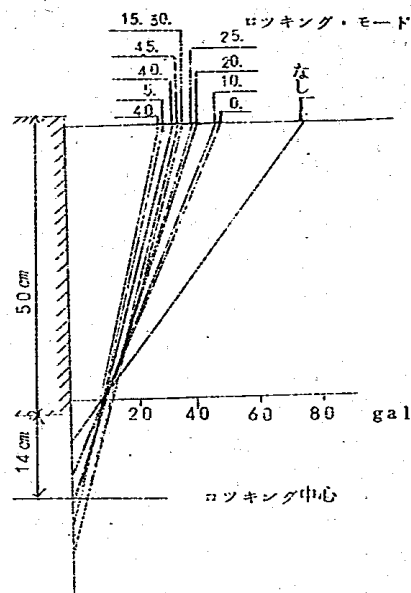
水深 (cm)	f (%)	$\tan \theta$	n / p
なし	—	0.0433	0.0159
0	8.55	0.0388	0.0142
5	8.53	0.0381	0.0140
10	8.45	0.0394	0.0145
15	8.33	0.0369	0.0135
20	8.13	0.0331	0.0121
25	7.95	0.0350	0.0128
30	7.63	0.0356	0.0131
35	7.30	0.0464	0.0170
40	6.85	0.0471	0.0173
45	6.51	0.0406	0.0149
48	6.31	0.0542	0.0198
49	6.17	0.0375	0.0137
50	6.07	0.0356	0.0131



附表 5 (7)

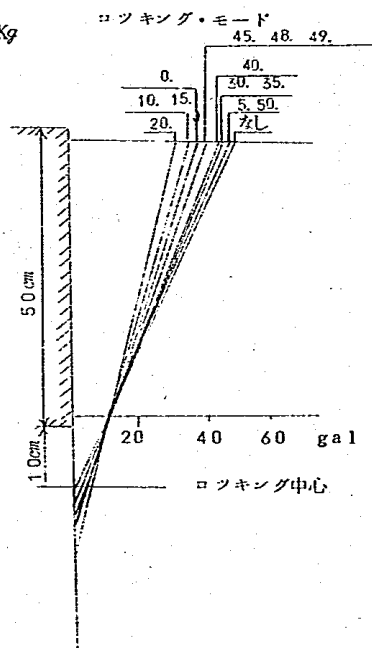
Test 167-1 柱状体 D-35 パネ169 全重量 15.4 Kg

水深 (cm)	f (%)	tan θ	n / p
なし	5.06	0.0767	0.0281
0	5.11	0.0500	0.0183
5	5.09	0.0750	0.0275
10	5.04	0.0642	0.0235
15	4.90	0.0508	0.0186
20	4.78	0.0444	0.0163
25	4.65	0.0319	0.0117
30	4.63	0.0519	0.0191
35	4.18	0.0506	0.0186
40	3.99	0.0500	0.0183
45	3.71	0.0756	0.0277
48	3.64	0.0517	0.0189
49	3.58	0.0543	0.0199
50	3.50	0.0567	0.0208



Test 167-2 柱状体 16D-35 パネ167 全重量 16.7 Kg

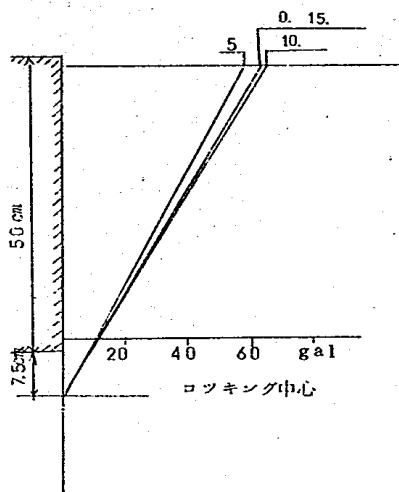
水深 (cm)	f (%)	tan θ	n / p
なし	6.65	0.0679	0.0249
0	6.67	0.0644	0.0236
5	6.62	0.0600	0.0220
10	6.57	0.0733	0.0269
15	6.47	0.0612	0.0224
20	6.33	0.0337	0.0124
25	6.11	0.0388	0.0142
30	5.86	0.0637	0.0234
35	5.55	0.0493	0.0181
40	5.18	0.0544	0.0200
45	4.92	0.0500	0.0183
48	4.77	0.0475	0.0174
49	4.64	0.0531	0.0195
50	4.58	0.0500	0.0183



Test №7-3 柱状体 D-35 パネル 7 全重量 22.9 Kg

ロッキングモード

水深 (cm)	f (%)	$\tan \theta$	n / p
0	5.4	0.0255	0.00921
5	5.49	0.0300	0.0110
10	5.49	0.0301	0.0110
15	5.35	0.0270	0.00990
20	5.39	0.0220	0.00805
25	5.24	0.0270	0.00990
30	5.07	0.0220	0.00805
35	4.88	0.0240	0.00880
40	4.68	0.0270	0.00987
45	4.46	0.0290	0.0106
48	4.31	0.0310	0.0135
49	1	—	—
50	—	—	—
	—		
	—		

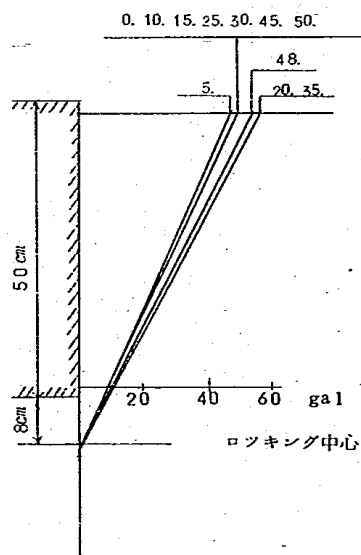


附表 5 (9)

Test №8-1 柱状体 D45-II パネル 8 重量 21.35 Kg

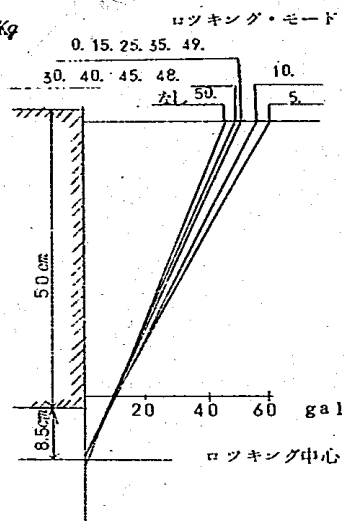
ロッキングモード

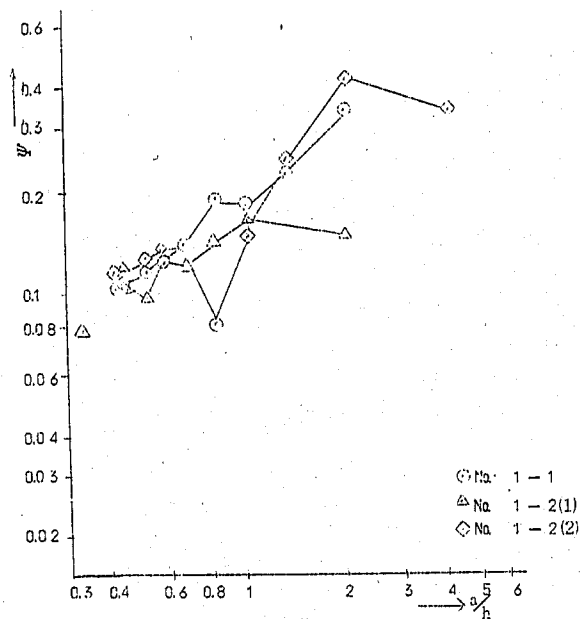
水深 (cm)	f (%)	$\tan \theta$	n / p
0	4.82	0.0575	0.0211
5	4.76	0.0562	0.0206
10	4.74	0.0556	0.0204
15	4.67	0.0569	0.0209
20	4.51	0.0606	0.0222
25	4.42	0.0650	0.0238
30	4.23	0.0700	0.0257
35	4.02	0.0781	0.0286
40	3.74	0.0594	0.0218
45	3.54	0.0625	0.0229
48	3.38	0.0600	0.0220
49	3.32	0.0858	0.0315
50	3.25	0.0594	0.0218



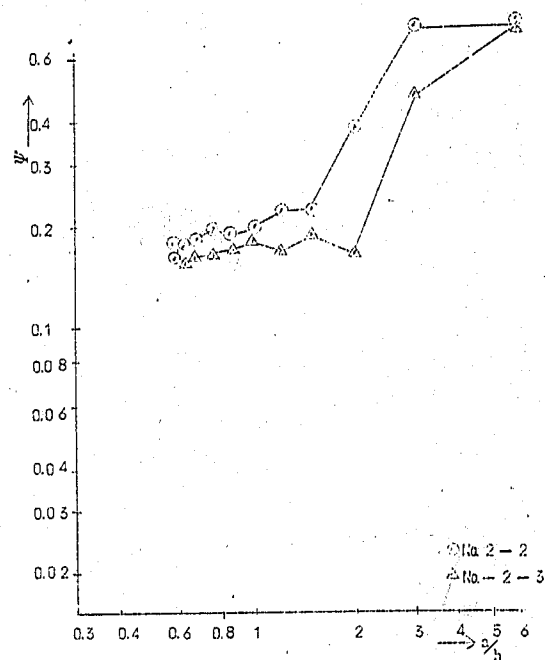
Test №8-2 柱状体№D45-II パネル№7 重量 21.35kg

水深 (cm)	f (%)	$\tan \theta$	n/p
なし	5.47	0.0275	0.0108
0	5.43	0.0312	0.0143
5	5.41	0.0315	0.0115
10	5.37	—	—
15	5.30	0.0313	0.0115
20	5.17	0.0312	0.0114
25	5.02	0.0314	0.0115
30	4.81	0.0325	0.0119
35	4.57	0.0417	0.0153
40	4.31	0.0314	0.0115
45	4.02	0.0393	0.0144
48	3.87	0.0430	0.0158
49	3.82	0.0438	0.0161
50	3.70	0.0437	0.0160



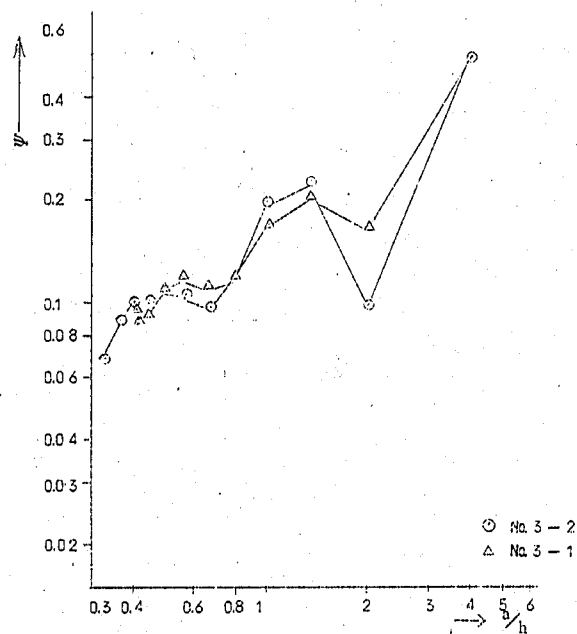


第 二 次 試 験
Test No. 1
ロッキング運動
C - 225

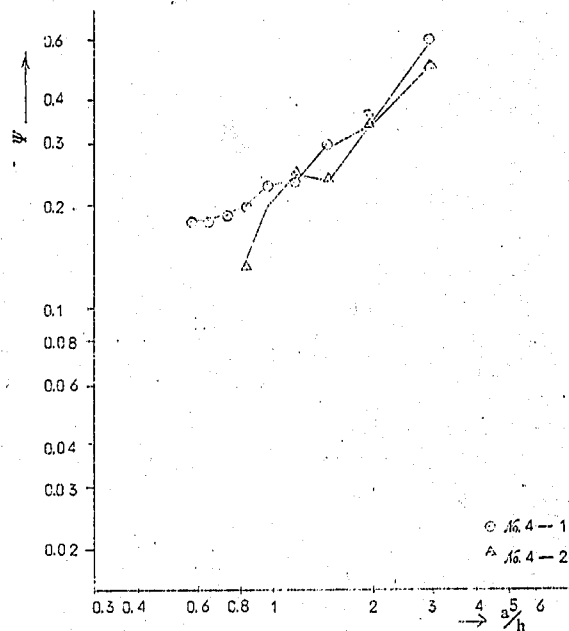


第 二 次 試 験
Test No. 2
ロッキング運動
C - 335

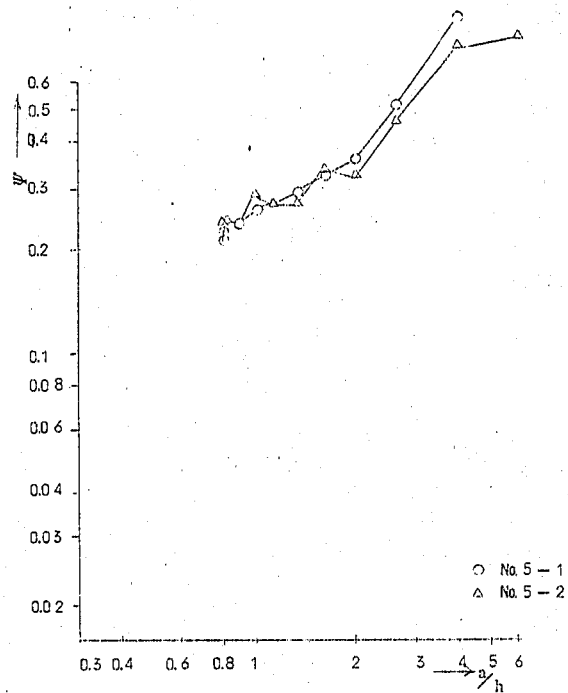
附図 3 (1) ロッキング振動 (二次試験) $\frac{3}{h} - \psi$ 曲線



第二次試験
Test No. 3
ロッキング運動
C - 425

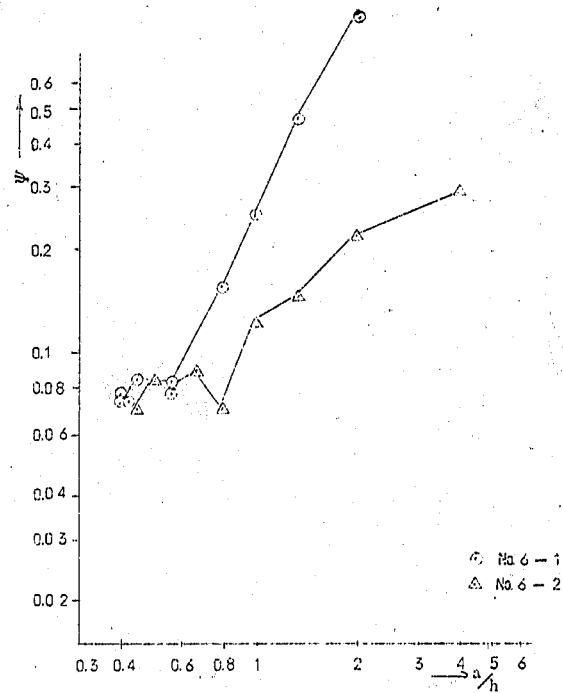


第二次試験
Test No. 4
ロッキング運動
C - 435

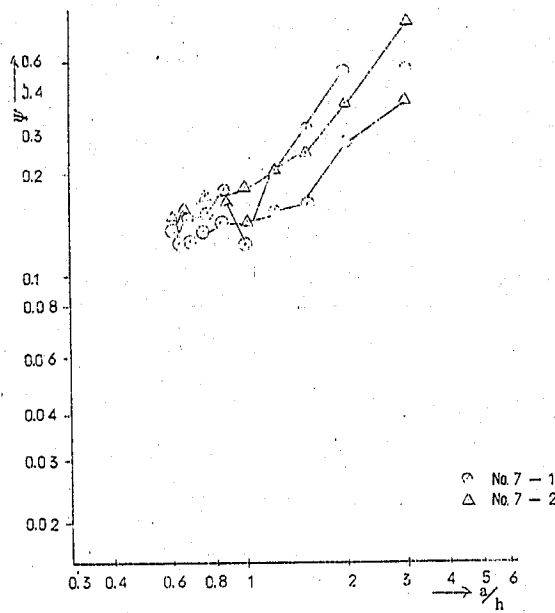


第二次試験
Test No. 5
ロッキング運動
C - 445

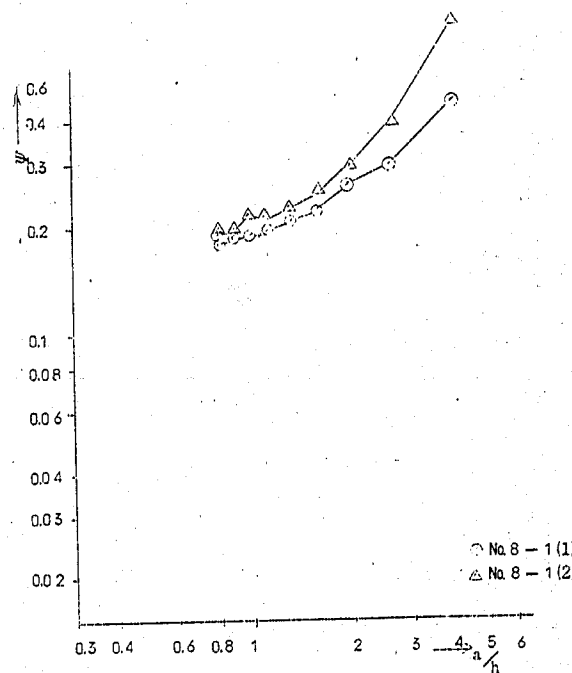
附図 3 (3)



第二次試験
Test No. 6
ロッキング運動
D - 25



第二次試験
Test No. 7
ロッキング運動
D - 35



第二次試験
Test No. 8
ロッキング運動
D - 45