

I - 35 石炭灰スラリー固化体を使った築島海上モデルの振動試験について

北海道開発局土木試験所 正員 石田 悦一
北海道開発局稚内開発建設部 正員 吉田 紘一
北海道開発局土木試験所 今野 久志

1. まえがき

一般国道37号白鳥大橋の主塔基礎は、地中連続壁併用円形逆巻込工法を採用することとしている。本工法は、鋼管矢板締切内に中詰を施して人工島を築造したのち、地中連続壁を仮設の土留止水壁としてドライ掘削を行ない、基礎本体を構築するものである。

築島中詰材としては、石炭灰と火山灰（概ね 7:3）に数パーセントのセメントを添加し、含水比 50%程度で混練した石炭灰スラリーが非常に有望視されている。

石炭灰スラリーの築島中詰材としての適合性に関しては種々の検討がされているが、その振動特性については未知の部分が多い。そこで、現地海上モデルで振動試験を行い築島海上モデルの振動特性を明らかにする。さらに、簡単なモデルで理論解析を行い、その結果も併せて報告する。

2. 海上モデルと試験方法

(1) 海上モデル

海上モデルは、水深5.0mの海域に構築した。海上モデルの構造概要は図-1に示すように鋼矢板（Ⅲ型、 $t=12.0$ mm）で締切り、石炭灰スラリーを打設して 5.0×5.0 mの築島を構築したものである。石炭灰スラリーの代表的な配合例を表-1に示す。なお、矢板内の海底地盤には50cm程度の軟弱なヘドロ層が堆積しており築島の不等沈下や性状変化が予想されるために、これをスラリー打設前に予め除去した。

表-1 石炭灰スラリーの配合例

設計強度 σ_{14} (kg/cm^2)	スランブ (cm)	含水比 (%)	重 量 (kg/m^3)			
			水	セメント	火山灰	石炭灰
4.0	12 ± 1.0	60	463	28	275	641

石炭灰スラリー硬化後の固化体は自立しており、矢板とはほぼ締切り状態にあることが確認されている。¹⁾

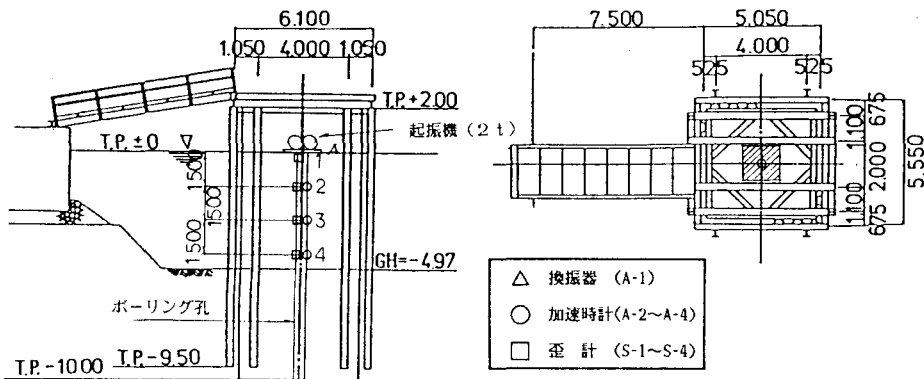


図-1 海上モデルの構造概要

(2) 振動試験方法

図-1のように海上モデル天端に起振機（2t）を設置し、上下方向に起振力を与える。起振機本

体(740 Kg)に鋼板(1.4×1.4m t=30mm W=1050 Kg)を取付け、起振力の分散と起振機の跳上がりの防止を図った。

換振機（PK130v 勝島製作所製）、超小型加速度計（水平 2G 共和電業を鉛直に使用）および歪計（BS 共和電業製）を図-1に示すように設置し、アナログ計測を行い、データレコーダー（SR 51 TEAC）に収録した。試験を行った周波数は 2.1~17.5Hzで、その諸元を表-2に示す。なお、加速度計および歪計の設置にあたってはボーリング孔を利用して所定の位置に設置し、石炭灰スラリーと同質のものでグラウトした。また、加速度計および歪計は予め防水加工が施してある。

表-2 振動試験諸元

周波数 (Hz)	2.10	3.03	3.96	4.93	5.81	6.59	7.57	8.40	9.38
単位荷重(kg/m ²)	3.59	7.46	12.74	19.81	27.50	35.39	46.64	57.43	69.44
周波数 (Hz)	10.30	11.18	12.01	12.99	13.82	14.80	15.72	16.65	17.53
単位荷重(kg/m ²)	69.29	68.58	67.44	67.99	67.03	67.57	67.69	67.64	67.37

3. 理論解析

海上モデルは矢板によって完全に縁切りされ、自立していると仮定して、図-2のようなモデルを考える。

Aはスラリー-固化体、Bは矢板内の土で地盤と同質のものとする。自立部分を Voigtモデルと考えることにより、位置 x における時間 t の鉛直変位を $u(x, t)$ とすると次の運動方程式で表わされる。

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \mu \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right) - E \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0 \quad (1)$$

ここで μ : 粘性係数

E : 弾性定数

ρ : 密度

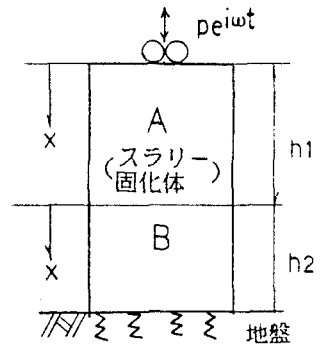


図-2 理論解析モデル

円振動数 ω で調和振動する変位 u は次式のような変数分離型で一般解が与えられる。

$$u = U(x) e^{i\omega t} \quad (2)$$

②式を①式に代入して次式が導かれる。

$$(E + i\omega\mu) \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \rho\omega^2 U = 0 \quad (3)$$

③式より次式が得られる。

$$U = a e^{ikx} + b e^{-ikx} \quad (4)$$

$$\text{ここで } k^2 = \frac{\rho\omega^2}{E + i\omega\mu} = \frac{\rho\omega^2}{E^*} \quad (E^* : \text{複素弾性定数}) \quad (5)$$

Voigtモデルでは減衰定数 β と粘性係数 μ の関係は

$$\omega\mu = 2E\beta \quad (6)$$

$$\text{したがって } E^* = E + i\omega\mu = E(1 + 2\beta i) \quad (7)$$

また、剪断応力 $\sigma(x, t)$ は次式で表わされる。

$$\begin{aligned} \sigma &= E \frac{\partial u}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial t \partial x} \\ &= E^* \frac{\partial U}{\partial x} e^{i\omega t} \\ &= ikE^* (a e^{ikx} - b e^{-ikx}) e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (8)$$

上記の④⑧式がA, Bそれぞれに成り立ち、以下、添字 1,2はA, Bを表わすとする。

海上モデル天端の起振力とA層上端の剪断応力の釣合条件から次式が成り立つ。

$$\sigma_1|_{x=0} = -p e^{i\omega t} \quad (p = P/A, \quad P: \text{起振力}, \quad A: \text{海上モデル断面積})$$

$$\therefore i k_1 E_1^* (a_1 - b_1) = -p \quad (9)$$

A, B層の境界における変位および剪断応力の釣合条件から次式が成り立つ。

$$U_1|_{x=h} = U_2|_{x=0} \quad \therefore a_1 e^{i k_1 h_1} + b_1 e^{-i k_1 h_1} = a_2 + b_2 \quad (10)$$

$$\sigma_1|_{x=h} = \sigma_2|_{x=0} \quad \therefore E_1^* k_1 (a_1 e^{i k_1 h_1} - b_1 e^{-i k_1 h_1}) = E_2^* k_2 (a_2 - b_2) \quad (11)$$

いま、半径 r の円板と弾性体との接触圧を板の全域において一定であるとし、板に作用する上下方向の全荷重を P 。とすれば板の中心点での変位量 z 。はライスナーによって次式で表わされる。²⁾

$$z_0 = \frac{P_0 e^{i\omega t}}{G r_0} (f_1 + i f_2) \quad (12)$$

ここで、 f_1 と f_2 はポアソン比 ν ならびに次式で定義される無次元の振動数 a_0 。との関数である。

$$a_0 = \omega r_0 \sqrt{\frac{\rho}{G}} = \frac{\omega r_0}{V_s} \quad (13)$$

a. , f_1, f_2 の関係を図-3に示す。

B下端における剪断応力の釣合条件を⑫式を使って表すと

$$U_2|_{x=h_2} = -\frac{\sigma_2|_{x=h_2} A}{G r_0} (f_1 + i f_2)$$

$$\therefore a_2 e^{i k_2 h_2} + b_2 e^{-i k_2 h_2}$$

$$= -\frac{A E_2^*}{G r_0} k_2 i (f_1 + i f_2) (a_2 e^{i k_2 h_2} - b_2 e^{-i k_2 h_2})$$

ここで $\alpha = \frac{A}{G r_0}$, $F = f_1 + i f_2$ とおくと

$$\begin{aligned} & a_2 e^{i k_2 h_2} + b_2 e^{-i k_2 h_2} \\ & = -\alpha E_2^* F k_2 i (a_2 e^{i k_2 h_2} - b_2 e^{-i k_2 h_2}) \end{aligned} \quad (14)$$

ただし r 。 : 面積等価半径

上記で誘導した式⑨, ⑩, ⑪, ⑭の連立方程式を解くことにより理論解を得る。

ちなみに、 a_1 , b_1 は次式によって表わされる。

$$a_1 = b_1 + n i \quad (15)$$

$$b_1 = \frac{-n i \{ e^{i l} (1 + \gamma i) (l + 1) + e^{i m} (1 - \gamma i) (l - 1) \}}{2 \{ (l + 1) (\cos l - \gamma \sin l) + (l - 1) (\cos m + \gamma \sin m) \}} \quad (16)$$

ここで $l = k_1 h_1 + k_2 h_2$, $m = k_1 h_1 - k_2 h_2$

$$n = \frac{p}{E_1^* k_1} , \quad l = \frac{E_2^* k_2}{E_1^* k_1}$$

$$\gamma = \alpha E_2^* F k_2$$

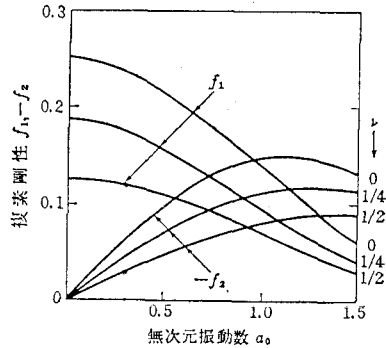


図-3 複素剛性の実数部と虚数部

4. 実験結果および考察

振動試験によって得られた時系列の一例を図-4に示す。これは $f=15.7$ Hzで起振した場合の結果でS-4, $h=4.5$ mの歪計以外はきれいな正弦波が得られている。計器回収時に分ったことであるが、 $h=4.5$ mの歪計はグラウトが不充分であったために残念ながらデータを取ることができなかった。

ここで得られたデータをAD変換したのちFFT解析した結果を以下に示す。

表-2のデータの諸元を示すように起振機の特性から周波数によって起振力が変わるために $h=0$ mの歪DU0によってデフレートし整理した。(前章の理論解析より $DU0=p/E^*$ となるので、理論値は p/E^* で実験値はS-1でデフレートした。) また、位相に関してもDU0 (S-1)との位相差によって整理した。

図-5は変位(加速度/ ω^2)の周波数応答特性を示したものである。約16 Hzをpeakとするきれいな曲線が得られる。つまり、本海上モデルの共振周波数が16 Hzであることが解る。また、図中に併記した実線および破線はA-1およびA-4に対応する理論値を示したものである。計算に用いた諸元を表-3に示す。海上モデル位置の地盤条件についてはボーリングなどの詳しい調査を行っていないので推定値である。さらに、石炭灰スラリー固化体および地盤の剪断弾性定数を決める場合に歪

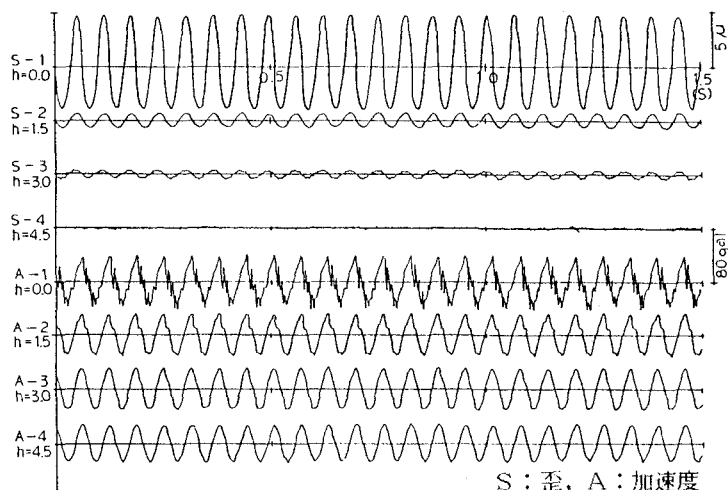


図-4 加速度および歪の時系列($f=15.7$ Hz)

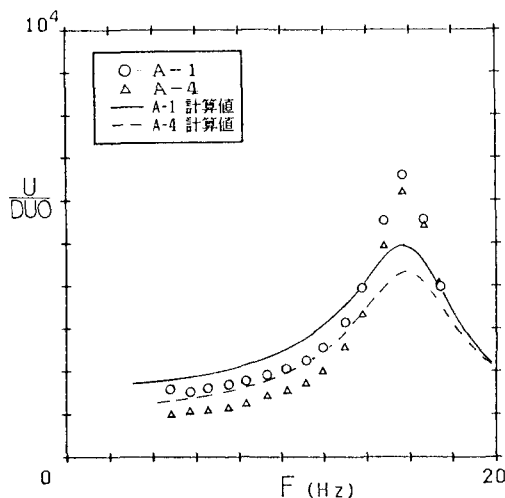


図-5 変位の周波数応答特性

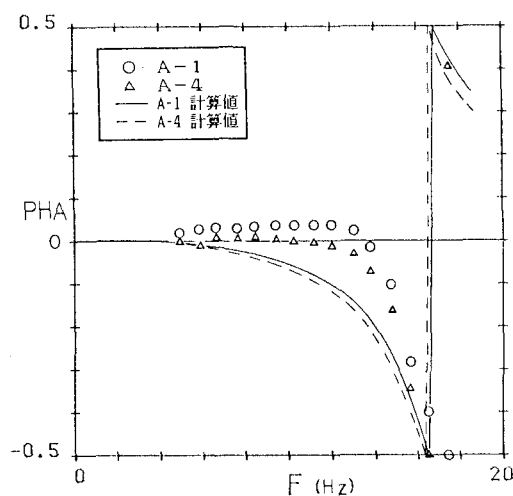


図-6 変位の位相の周波数特性

依存性を考慮する必要があるが、本実験においては全ケースにわたって歪は 10^{-6} のオーダーであるので、弾性定数は歪に対して一定であると仮定した。以下、理論計算値はすべてこの諸元によって計算した。なお、表中の括弧書きはPS検層および振動三軸試験により得られた結果で、参考のために示した。図より実験結果と計算値は定量的には差が見られるものの、傾向はよく一致している。

次に、図-6は変位の位相の周波数特性を示したものである。DU0との位相差は約17Hzで半波長ずれることになる。実験結果と計算値を比べると比較的よく一致している。

次に図-7、8は歪の周波数応答特性と位相を示したものである。DU0 (S-1)でデフレートしているのでS-2とS-3の結果を示した。歪の振幅および位相の実測値は共に周波数による変化はほとんどなく、計算値では低周波側でDU0よりも増幅され高周波側で減衰するという結果に対し、実験結果ではすべての周波数に対してS-2、S-3ともにDU0の約80%で一定となる。その原因としては、起振機の構造から起振力が集中荷重となることによる影響が考えられるが、今後さらに検討が必要である。

表-3 理論解析諸元

石灰灰スラリー固化体			地 盤				
密 度	弾性定数	減衰定数	密 度	弾性定数	せん断弾性定数	減衰定数	ポアソン比
$\rho_1 (\text{g/cm}^3)$	$E_1 (\text{kg/cm}^2)$	β_1	$\rho_2 (\text{g/cm}^3)$	$E_2 (\text{kg/cm}^2)$	$G (\text{kg/cm}^2)$	β_2	ν
1.56	15000	0.05	1.6	8640	2880	0.05	0.5
(1.56)	(10400)	(0.04)					

注) 括弧内はPS検層および振動三軸試験より得られた結果である。弾性定数は、平均S波速度 $V_s=500\text{m/s}$ および平均ポアソン比 $\nu=0.3$ より算定した。

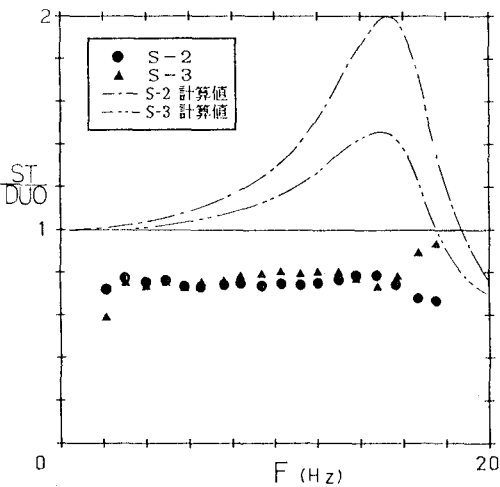


図-7 歪の周波数応答特性

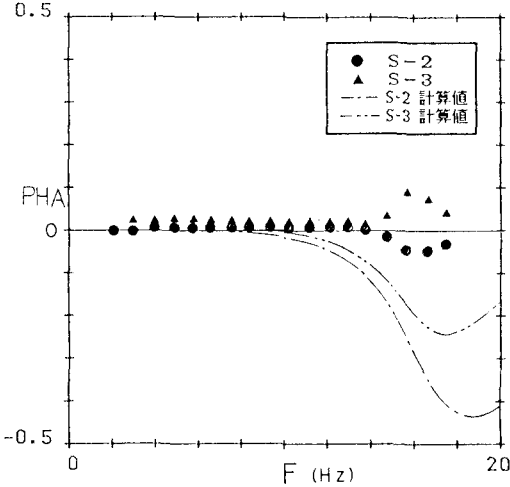


図-8 歪の位相の周波数特性

5. あとがき

地盤に直接加速度計，歪計を埋込んで振動試験を行った例は少ないと思うが、 $h=4.5\text{m}$ まで乱れの無いデータを得ることができた。また、そのデータは対象とした築島海上モデルの振動特性を表すことができた。このような方法は今後地盤の振動試験を行う場合に有効な手法となるであろう。

次に、本研究では実験で得られた振動特性に合致するように定数を仮定し理論値を求めた。その結果、理論値と実験値はかなりの相関を見出せる。仮定した定数と設計定数がある程度の一致を見ることからそれらの定数は当面の設計定数としては差支えないと思われる。ただし、歪の周波数応答特性に関しては両者の相関が不明瞭であり、変位に関しても相関は見出せるものの絶対値が異なることから今後さらに実験方法を含めた検討が必要である。

最後に、本試験に対して協力して頂いた室蘭開発建設部室蘭道路事務所の関係各位に、そして理論解析にあたり御助言頂いた室蘭工業大学松岡健一先生に謝意を表します。

参考文献

- 1) 佐藤，渋谷，安保：白鳥大橋中詰材の試験工事について：第30回開発局技術研究発表会資料
- 2) 土岐憲三：新体系土木工学11構造物の耐震解析 P182：土木学会編