

## 大深度連続地中壁構造体の周波数応答解析

### A FREQUENCY RESPONSE ANALYSIS OF A CONTINUOUS UNDERGROUND DEEP WALL

岸 徳光\* 松岡健一\*\* 能町純雄\*\*\* 和田忠幸\*\*\*\*

by Norimitsu KISHI, Kenichi MATSUOKA, Sumio NOMACHI and Tadayuki WADA

In this paper, we dealt with the seismic stability of continuous underground walls which will be used for the construction of the main tower foundations of the Hakucho Bay Bridge (in Muroran Harbor). The analysis of the dynamic response of this structure, which composed of an artificial island, continuous underground walls and submarine ground, was performed by means of the finite ring element method taking into account the three dimensional effects. Three construction stages of this structure are analyzed. Those dynamic characteristics were evaluated in the frequency domain considering the Kolsky's damping model. The results obtained by these calculations are as follows: 1) The fundamental natural frequencies of all construction stages are almost 0.9Hz. 2) The frequency response functions of acceleration show a similar distribution for two different damping coefficients in the frequency domain less than 1Hz.

#### 1. はじめに

周囲を海で囲まれた我国では、住民生活の利便や産業振興の上から、湾岸横断道、海上空港、海洋レクリエーション施設などの海洋構造物の建設が増加する傾向にある。近年の施工技術の進歩はめざましく、水深の深い海中や堅固な基礎地盤が海底面下百米に近いような軟弱地盤においても大規模海洋構造物の基礎の施工が行なわれるようになっている。このような構造物は、その性格上大規模基礎の施工の可否が重要な問題となる。その一つの例として、海中に鋼管矢板等で囲った人工島を築いた上で連続壁工法により大深度基礎を施工する方法がある。この工法は、海中に築いた人工島を利用し止水、土留め用として、大深度の連続壁を施工し、この内側をディープウェル等でドライ状態にして掘削して順次地中連続壁の内側に支保工を兼ねた基礎本体の側壁を構築し、やがて底版、隔壁、中頂版等を施工して基礎本体を完成させるものである。このように、大深度地中連続壁は、本体または仮設構造物として取り扱われるものであるが、仮設構造物としても内部掘削等基礎本体完成までの施工期間が長期にわたることや、かなりの深さまで直接人間の手によって機械作業を行なうこと等より細心の注意のもとに設計されなければならないものと考えられる。特にこの種の基礎工法は、施工中に於て地震等が作用したとき築島がトップヘビーの状態を作りだすため十分な検討が必要である。

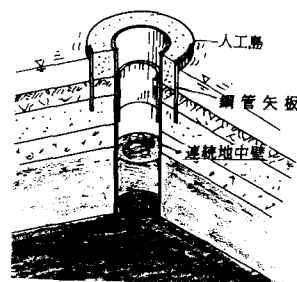


図-1 構造概要

\* 工博 室蘭工業大学助教授 工学部土木工学科 (050 室蘭市水元町27番1号)

\*\* 工博 室蘭工業大学教授 工学部土木工学科 (050 室蘭市水元町27番1号)

\*\*\* 工博 日本大学 教授 生産工学部土木工学科 (275 習志野市泉町1丁目2番1号)

\*\*\*\* 北海道開発局室蘭開発建設部 (051 室蘭市入江町1番地14)

現在室蘭港で建設中の白鳥大橋主塔基礎工はこの工法で施工されているが、本論文はこの種の構造を対象として、深く根入れされた連続地中壁基礎の施工中の状態における動的応答特性を把握するため、周波数応答解析により感度分析を行ったものである。基礎と地盤を一体とした動的応答解析は、動的相互作用の問題に帰されるが、これを厳密に解析することは、地盤の動的な諸定数を含めた動特性が、必ずしも明かでないことからかなり困難である。基礎と地盤の動的相互作用の解析には、弾性波動理論を用いた連続系としての解析、質点系モデルや FEM による離散系としての解析、基礎と地盤を別々の構造単位として解析する動的サブストラクチャ法による解析などがある。特に動的サブストラクチャ法は、現時点ではいくつかの利点を持つ合理的な解析方法とされているが、ここで対象とする構造は、図-1 に示すように、多層地盤中に、連続地中壁が岩盤まで達しているため、構造体と地盤との境界節点数を減少することができず、また非線形性を考慮していないこと、構造体がほぼ円形状であることなどから、本論文ではリング状の有限プリズム要素を用いたモード解析法により解析を行った。

また、減衰定数に関してはRayleigh減衰モデル等が考えられるが、ここでは以下に述べるようなKolsky<sup>1)</sup>による三要素モデルを提案し、これに基づいて減衰定数を設定している。

## 2. 解析理論

### 2.1 三要素モデルを用いた振動方程式の定式化

通常の振動解析において、減衰定数はRayleigh減衰を基本にして決定しているものと考えられる。しかしながら、このRayleigh減衰を理論的に考えると、質量に比例する減衰のみを考える場合は固有振動数無限小で、また、剛性に比例する減衰のみを考える場合は固有振動数無限大で、いずれも減衰が無限大になる。この結果は、固有振動数、あるいは弾性波の波動伝播速度が無限小、あるいは無限大時に減衰が無限大となり、振動あるいは波動伝播現象が現れないことを意味している。これは実際の現象と異なるものと考えられる。本論文ではこのような矛盾を改善するために、以下に示すようなKolskyによって示された三要素モデルを用いた減衰定数の評価を試みた。<sup>2)</sup>

図-2 に示すような、一質点系の三要素モデルを考える。全体の変形を  $\delta$ 、 $E_2$ 部、 $\eta$ 部の変形をそれぞれ $\delta_a$ 、 $\delta_b$ とすると、次のような関係式が求まる。

$$E_1 \delta + E_2 \delta_a = -m \ddot{\delta} + P_0 \quad (1)$$

$$E_2 \delta_a = \eta \delta_b \quad (2)$$

$$\delta_a + \delta_b = \delta \quad (3)$$

これを整理すると、最終的に次のような三要素モデルを用いた一質点系の運動方程式が求まる。

$$\delta + 2h \omega \dot{\delta} + \omega'^2 \delta = \frac{P_0}{m} \quad (4)$$

ここで、 $\omega^2 = E_1/m$ 、 $c = \eta/E_2$ であり、

$$h = \frac{\omega c}{2 \{1 + (\omega c)^2\}} \frac{E_2}{E_1} \quad (5)$$

$$\omega' = \omega \left[ 1 + \frac{E_2}{E_1} \frac{1}{\{1 + 1/(\omega c)^2\}} \right]^{1/2} \quad (6)$$

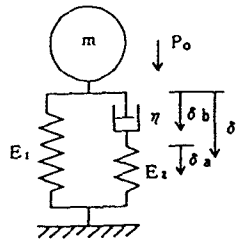


図-2 三要素モデル

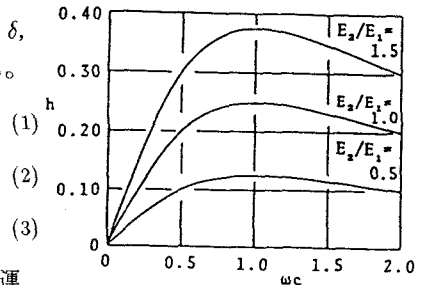


図-3  $\omega c$ と $E_2/E_1$ をパラメータにしたときの $h$ の分布図

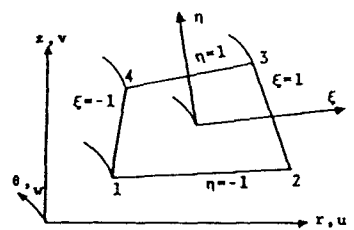


図-4 四辺形リング要素

図-3には、 $\omega c$ と $E_2/E_1$ をパラメーターにしたときの $h$ の分布を示した。図のように、減衰定数 $h$ は中間部でピークを示すものの、この部分を境として固有振動数が減少する方向と、増大する方向ともに減衰定数が減少する関数となっている。なお、これらのパラメーターは、本質的には実験などにより決定されるべきものであるが、ここでは後述するような2ケースを仮定して解析している。

## 2.2 任意四辺形リング要素を用いた動的基礎式

図-4に示すような任意のリング状四辺形プリズム要素において、全体座標を $r, z, \theta$ 、対応する変位を $u, v, w$ 、任意の $i$ 点における節点力を $(f_{r_i}, f_{z_i}, f_{\theta_i})$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ )、節点変位を $(d_{r_i}, d_{z_i}, d_{\theta_i})$ とする。また、定式化を容易にするために、断面重心を原点として局所座標 $(\xi-\eta)$ をとると、プリズム内の座標、各変位はアイソパラメトリック要素を考え、次のように示される。

$$\begin{Bmatrix} r \\ z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \{N\}^T & \\ & \{N\}^T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{r_i\} \\ \{z_i\} \end{Bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \{N\}^T & & \\ & \{N\}^T & \\ & & \{N\}^T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{dr_i\} \\ \{dz_i\} \\ \{d\theta_i\} \end{Bmatrix} \quad (8)$$

但し、 $N$ は形状関数であり、

$$\{N\}^T = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} (1-\xi)(1-\eta) & (1+\xi)(1-\eta) & (1+\xi)(1+\eta) & (1-\xi)(1+\eta) \end{bmatrix} \quad (9)$$

歪と変位の関係式は三次元弾性論より次のように示される。

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_r \\ \varepsilon_z \\ \varepsilon_\theta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial r} \\ \frac{\partial v}{\partial z} \\ \frac{u}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} \end{Bmatrix} \quad \begin{Bmatrix} \gamma_{rz} \\ \gamma_{r\theta} \\ \gamma_{z\theta} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial r} \\ \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} + \frac{\partial w}{\partial r} - \frac{w}{r} \\ \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} \end{Bmatrix} \quad (10)$$

$\varepsilon_r, \varepsilon_z, \varepsilon_\theta, \gamma_{rz}$ に関しては cosine、 $\gamma_{r\theta}, \gamma_{z\theta}$ に関しては sine の有限 Fourier変換を周方向に施し、Jacobian マトリックス $[J]$ 、弾性マトリックス $[D]$ を導入して整理すると、歪ベクトル $\{\bar{C}_m[\varepsilon]\}$ 、応力ベクトル $\{\bar{C}_m[\sigma]\}$ は

$$\{\bar{C}_m[\varepsilon]\} = [B] \{\bar{C}_m[d]\}, \quad \{\bar{C}_m[\sigma]\} = [D] [B] \{\bar{C}_m[d]\} \quad (11), (12)$$

ここで、 $\{d\}$ は要素の変位ベクトルを意味し、 $\bar{C}_m[\ ]$ は有限 Fourier変換を意味するものとする。仮想仕事の原理を用いて要素の運動方程式を誘導し、剛性マトリックス、質量マトリックスをそれぞれ $[K]$ 、 $[M]$ とすると

$$[M] \{\bar{C}_m[d]\} + [K] \{\bar{C}_m[d]\} = \{\bar{C}_m[r_0 f]\} \quad (13)$$

ここで、 $r_0$ は節点力が作用する点の半径を意味する。地震波入力に対する応答解析式は、荷重項を零、基盤変位を $\{ds\}$ とすると、

$$[M] \{\bar{C}_m[d]\} + [K] \{\bar{C}_m[d]\} = -[M] \{\bar{C}_m[d_s]\} \quad (14)$$

ここで、固有角振動数 $\omega_r$ 、固有モード $\{X_r\}$ を求め基準関数 $\phi_r$ を導入して直交性を考慮すると、固有角振動数 $\omega_r$ 、質量 $m_r^*$ 、強制力 $P(t)$ なる第 $r$ 次の一質点系の振動モデルに置換することができる。

$$P(t) = \frac{1}{m_r^*} \{X_r\}^T [M] \{\bar{C}_m[d_s]\}, \quad \text{但し、} \quad m_r^* = \{X_r\}^T [M] \{X_r\} \quad (15)$$

さらに、上で求められた一質点系の振動モデルを2.1で提案している三要素モデルに適用し、考慮する全ての固有値

に対して重ね合せを行ない整理すると、 $\{\bar{C}_m[d]\}$ 、 $\{\bar{C}_m[d]\}$ が求まる。したがって、真の変位、加速度ベクトルは周方向に逆変換を施すことによって求まる。また、応力ベクトルは、変位ベクトルが明らかになっているので容易に求めることができる。

以上に示したように、本論文では減衰定数をより合理的な形で組み込み解析を行なっている。解析プログラムでは、入力および固有値の最大周波数を基準として、時間刻みや波数を決め解析を行ない、絶対最大応答値を求め整理している。

### 3. 数値解析

数値解析は、現在室蘭港に建設中の白鳥大橋主塔基礎部の各施工段階のうち、

- 1) 構造物建設前の状態 (CASE-0)
- 2) 鋼管矢板を打設し、中詰材(石炭灰スラリー)を投入した状態 (CASE-1)
- 3) CASE-1の状態に、さらに連続地中壁を構築した状態 (CASE-2)
- 4) 連続地中壁内側を-11mまで掘削した状態 (CASE-3)
- 5) 連続地中壁内側を-29mまで掘削し、逆巻を5mから28mまで打設した状態 (CASE-4)
- 6) 連続地中壁内側を底盤を打設する-58mまで掘削し、逆巻を-5mから-51.5mまで打設した状態 (CASE-5)

の計6ケースを取りあげた。解析に用いた材料定数及び構造概形図を、表-1及び図-5に示す。

各部の材料定数は、PS検層から得られた値を用いている。また、築島部の鋼管矢板構造の物性値は、あらかじめ文献3)の方法を用いてより厳密な解析を行ない、杭中間部の変形を等しくするように換算の弾性定数を設定して行なっている。

また、減衰定数に関しては、最低次固有値に対する減衰定数を  $h=0.1$  と仮定し、 $E_2/E_1$  を 1.2 変化させて数値解析を行なっている。以下の解析は、基礎部に 100 gal の複素振幅波を入力した場合の周波数応答を求め、若干の結果について整理している。

精度の検討は、2つの解析ケースに対して、考慮する固有値の数を徐々に増加させたときの加速度および応力の応答性状について、固有値の値を

30項まで5項刻みに増加させ検討を行なった。検討結果の一部を図-6に示した。図はCASE-5で  $\alpha=E_2/E_1=1.5$  の場合であるが、非常に良く収斂していることがわかる。25項程度でも十分収斂しているものと判断されるが、本解析では一応30項まで考慮して詳細な解析を行なうことにした。

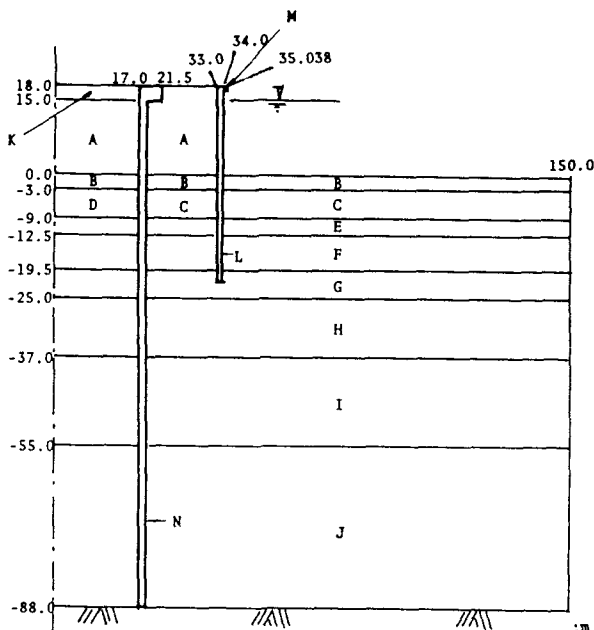


図-5 解析に用いた構造概形図

表-1 材料の動弾性係数およびポアソン比

記号	種別	E (kg/cm <sup>2</sup> )	$\nu$	$\rho$ (t/m <sup>3</sup> )
A	石炭灰スラリー	1000.0	0.05	1.66
B	砂	500.0	0.45	1.70
C	シルト	100.0	0.45	1.70
D	改良地盤	645.0	0.45	1.70
E	砂	820.0	0.45	1.70
F	砂	580.0	0.45	1.80
G	シルト	715.0	0.45	1.65
H	砂	2630.0	0.45	1.75
I	礫混り凝灰質シルト~砂	7840.0	0.45	1.80
J	凝灰質粗粒砂	15600.0	0.30	1.70
K	砂	1000.0	0.05	1.66
L	鋼管矢板	20000.0	0.30	0.30
M	リソクビーム	$2.1 \times 10^6$	0.30	7.85
N	連続地中壁	$3.0 \times 10^5$	0.20	2.45

応答解析の結果は、電子計算機の容量により、全節点あるいは全要素の加速度、応力の応答値を求めることは困難であるので、ここでは、設計上重要と考えられる地中連続壁の節点あるいは要素を中心に、数点を選んで整理を行なっている。

解析は前に示したように、最低次固有振動数に対する減衰定数が  $h=0.1$  になるものとして  $\alpha(=E_2/E_1)$  のパラメーターを与え行っている。解析は各ケースについて行ったが、ここではCASE-0,1,5のみを取り上げ検討する。

まず、図-7にメッシュ図および1~3次の振動モードを示した。それぞれ原地盤の振動性状に近いモードであるが、CASE-1,5では構造物の影響を受け変化していることが分かる。

CASE-0は構造物が施工される前のオリジナルな地盤に対する応答であるが、結果(図-8)より全体的に第1次固有振動数が0.9Hz前後にあり、第2次の主振動が2.2Hz前後にあることが分かる。 $\alpha$ が1.5の場合は、一次の固有振動数より高い振動数に対して減衰定数がまだ増加状態にあるため、節点232を除いて周波数の増加と共に応答加速度は減少の傾向にある。一方、 $\alpha=0.5$ の場合は減衰定数もほぼ一定の傾向にあり、2次の卓越する周波数部では $\alpha=1.5$ の場合の倍程度の応答性状を示している。節点番号232は海底下29mの地点であるが、 $\alpha=0.5$ では第2主振動数域の値の方が第1主振動数域の値より大きい値を示しているのが興味深い。また、節点番号21の点が仮定した自由境界部の応答値である。

CASE-1は築島が完成した時点における状態である(図-9)。築島部の質量の効果により、CASE-0よりも最低固有振動数が若干減少していることがわかる。応答関数の性状は基本的にはCASE-0の場合と同じであるが、鋼管部の加速度はCASE-0の最大加速度と比較してもかなり大きい。しかし自由境界(節点153)での値はCASE-0とはほぼ同様である。応力 $\sigma_z$ に関しては鋼管と補助リングに注目して整理したが、最大応力時でも数10kg/cmである故、構造的には問題ないものと考えられる。また、 $\alpha$ の影響は加速度に対してCASE-0と同様であるが、応力に対しては少なく海底部付近の応力に多少影響がある程度である。

CASE-5は築島、連壁が完成し、掘削段階も最終段階に到達した状態である。構造が複雑になっているため、1.0Hz以後の周波数領域では前CASE-0,1の場合に比較してやや煩雑な分布性状を示している(図-10)。

加速度の応答性状を調べると、連壁天端部(節点1)では最大応答値が $\alpha=0.5, 1.5$ とも450galである。また、連壁の加速度は、 $\alpha$ の影響をあまり受けないようである。さらに、節点番号189の自由端部の加速度の応答性状は、CASE-0,1のそれとはほぼ同じであり、この点の応答は中心部の構造物の影響をほとんど受けていないことが明らかとなった。応力に関しても、特に1.0Hz前後の時に最も大きい応力を示し、基礎部とともに逆巻下端部近傍の連壁部の応力も比較的大きいことがわかる。連壁の応力は、 $\alpha$ の影響を多少受け $\alpha=1.5$ の方が $\alpha=0.5$ の場合より約1割大きく、これまでの他の傾向とは異なる。

以上、リング要素を用いたモード解析法による周波数応答解析を行った。減衰定数の決定は三要素モデルによったが、 $\alpha=E_2/E_1$ の値が、応答に影響し、要素のパラメーターの決定が重要な問題となる。これは先に述べたように、

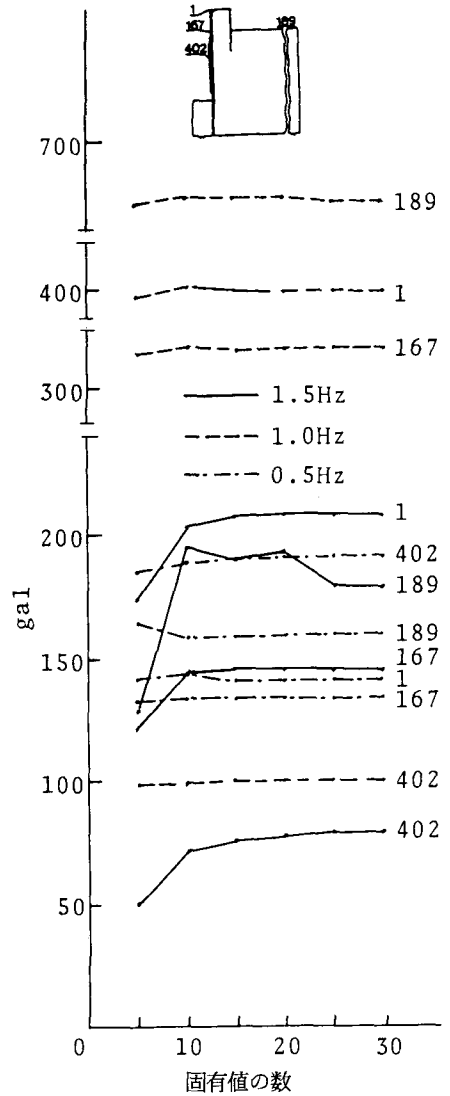


図-6 精度の検討

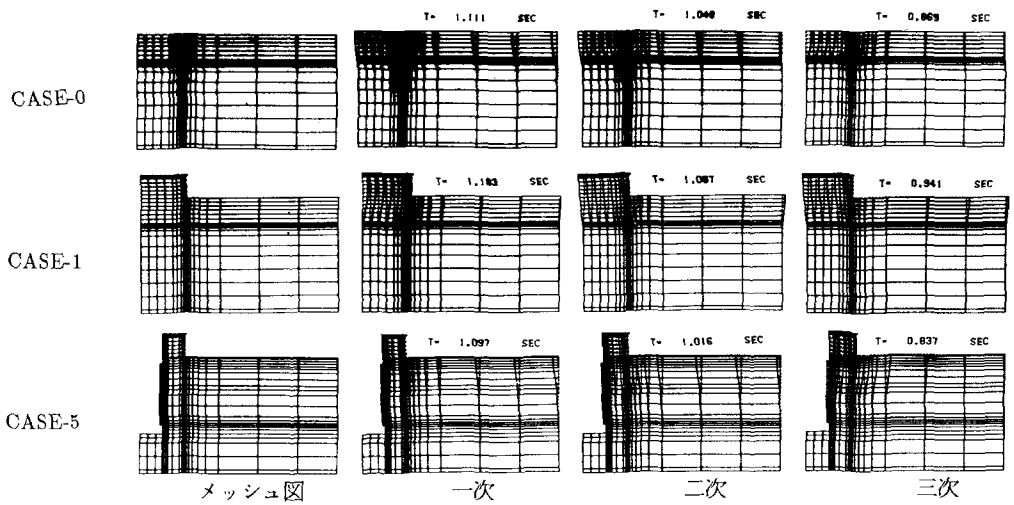


図-7 メッシュ図および振動モード図

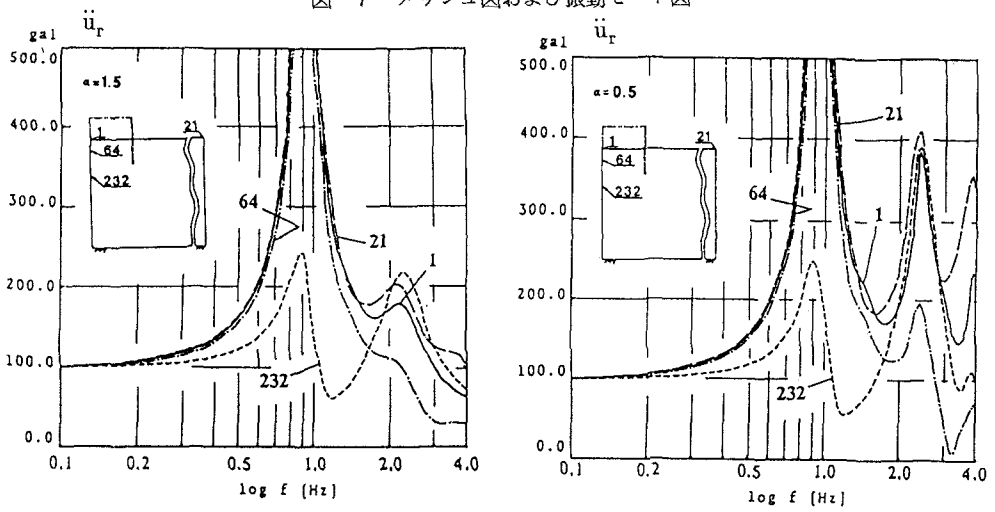


図-8 各点の加速度の周波数応答関数 (CASE-0,  $\alpha = 1.5$  及び  $0.5$ )

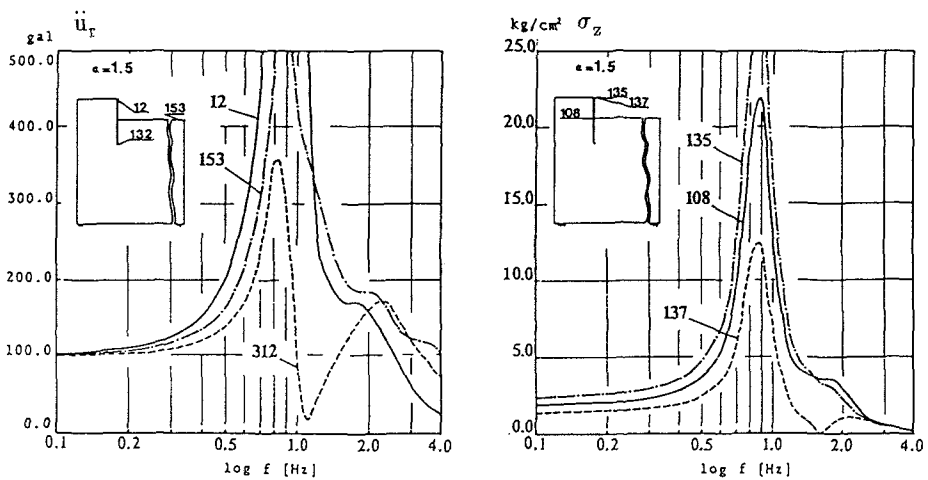


図-9(a) 各点の加速度及び $\sigma_z$ の周波数応答関数 (CASE-1,  $\alpha = 1.5$ )

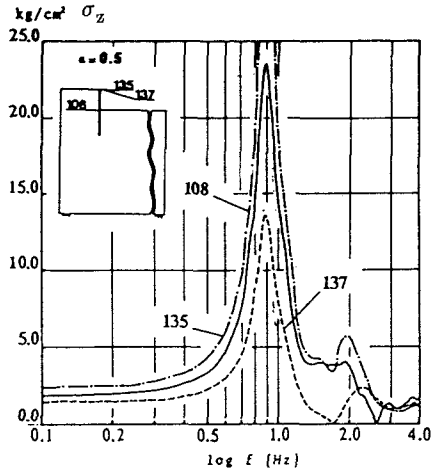
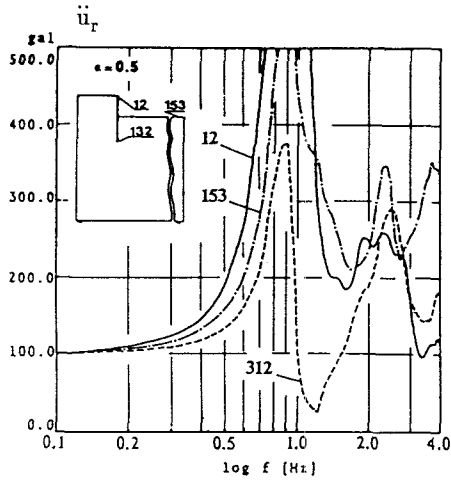


図-9(b) 各点の加速度及び $\sigma_z$ の周波数応答関数 (CASE-1,  $\alpha = 0.5$ )

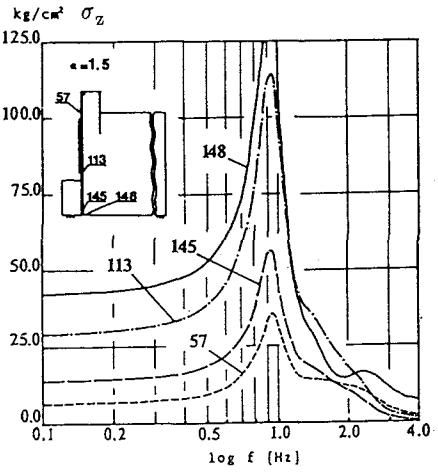
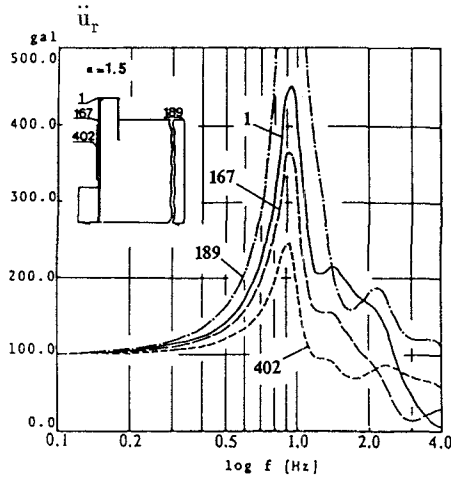


図-10(a) 各点の加速度及び $\sigma_z$ の周波数応答関数 (CASE-5,  $\alpha = 1.5$ )

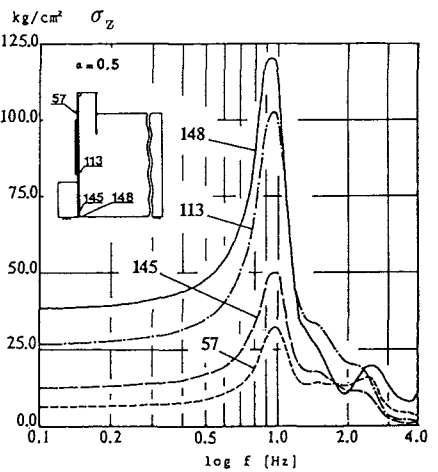
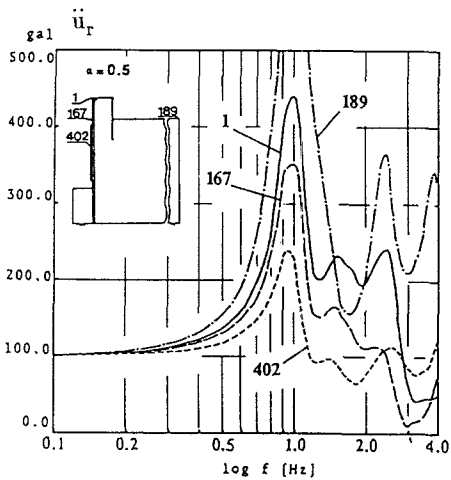


図-10(b) 各点の加速度及び $\sigma_z$ の周波数応答関数 (CASE-5,  $\alpha = 0.5$ )

実験などにより決定しなければならないものであり、今後の課題である。

#### 4. まとめ

人工築島を利用した大深度地中連続壁構造体の動的解析を、現在室蘭港で建設中の白鳥大橋の主塔基礎に用いられている地中連続壁をモデルとし、地盤と構造体を一体として周波数応答解析を行ない、各施工段階ごとの周波数特性を検討した。ここに報告した施工ケースは3ケースであり、着目点も多くなく、減衰係数の決定に当たっても、Kolskyの三要素モデルを仮定したもののみであるが、本解析の結果、以下の点が明らかとなった。

- 1) 各ケースとも応答の傾向は同じであり、卓越周波数に対する掘削の影響は小さい。
- 2) 各ケースとも一次の固有振動数は約 0.9Hzであり、二次の固有振動数は約 2.2Hzである。
- 3) 地盤や鋼管部の加速度に対する減衰係数の影響は 1Hz 以上の周波数に対してかなり大きい。
- 4) 連壁の加速度に対する減衰係数の影響は小さい。
- 5) 連壁の応力に対しては、1Hz 以下の周波数に対しても減衰係数の影響があり、 $\alpha=1.5$ の方が $\alpha=0.5$ の場合より約1割程度大きい。

以上、構造物と地盤を一体とした三次元周波数応答解析を行なった。全体的な挙動に対する掘削の影響はあまり大きくないが、連壁の応力は根入部と逆巻下端部近傍で大きくなり、この点に関する詳しい検討が必要と思われる。また、本論の減衰モデルを用いた場合、減衰係数の決定により高周波領域で応答にかなりの影響があることが示された。

なお、本モデルは外側が自由境界となっており、多少問題はあるが連壁周辺の応答特性を知る資料としては十分利用できると思われる。より厳密な解析については、現在検討中である。

#### 参考文献

- 1) Kolsky : Stress Waves in Solids, Dover Publication, 1963.
- 2) 能町、松岡、磯田、和田、小針 : 大深度地中連続壁構造体の周数応答解析, 土木学会北海道支部論文報告集, 第45号, 165-170, 1989.
- 3) 澤田、二宮、松岡、能町 : フーリエ定和分変換を用いた鋼管矢板円筒形構造物の解析, 構造工学論文集, Vol.34A, 9-18, 1988.

(1989年10月2日受付)