

層構造を有する硬質岩盤における剛体基礎の逸散減衰特性

A STUDY ON RADIATION DAMPING OF RIGID FOUNDATION ON LAYERED BEDROCK

平田和太*・松田泰治*・塩見哲**・上島照幸*

By Kazuta HIRATA, Taiji MAZDA, Satoshi SHIOMI and Teruyuki UESHIMA

This paper presents results of theoretical analyses on in situ vibration test results of large-scale rigid foundations on bedrock, and estimation method of interaction characteristics of foundation on bedrock, where attention is paid to the layered structure of the bedrock. Stiffness and damping of the foundation estimated from theoretical analysis using ground material properties based on elastic wave detection proves to compare well with experimental ones. Using the results of parameter survey with two-layered ground model, damping characteristics of the foundation on layered bedrock is shown to be estimated by simple two-layered ground model.

Keywords : rigid foundation, radiation damping, layered ground, vibration test, soil-structure interaction

1. 序論

硬質岩盤上に基礎を置く構造物と地盤の動的相互作用特性は、原子力発電施設のように上部構造物が比較的剛である場合にはその評価が地震時応答評価に大きな影響を及ぼすため、最も重要な評価項目の一つとなっており、原子力立地地点における原子炉建屋-基礎岩盤系の動的相互作用特性に関する実証的研究が、原位置での大型模型基礎の振動実験によりここ数年来実施されてきた^{1)~8)}。

一方、動的相互作用問題についての解析的手法の開発が多くて研究者によって、精力的に実施されてきている。手法を大別すると、三次元波動論に基づくもの、エネルギー伝達境界あるいは薄層要素法を併用する有限要素法、境界要素法などがあり、特に、根入れのない表面基礎(surface foundation)については成層地盤上の基礎の動的相互作用特性に関してこれらの手法を用いたパラメータサーベイが実施され、層のない一様地盤における場合とでは、その特性の差が顕著となり、層構造の特性を規定するパラメーター（たとえば、2層地盤にお

ける表層と第2層のインピーダンス比、表層厚さと基礎寸法の比）がある範囲にある場合には、層構造の影響が無視できなくなること等^{9)~15)}が指摘されている。

また、原位置での基礎の起振実験とその解析においても従来は成層地盤上で実施された実験結果に対しても一様地盤における理論解との対比がもっぱらなされていたが^{1),4)}、実験値と理論値の差異を説明づけるために2層あるいはそれ以上の多層地盤モデルによる解析も実施されている^{3),6),16),17)}。しかしながら、これらの解析では解析に用いた地盤モデルと弾性波探査等によって事前に知り得る地盤情報との関連が必ずしも明確にされているとはいえない、耐震設計に用いる地盤のばね定数、減衰定数に関する評価手法の適用性が実証されているとはいがたい。

本研究は硬質岩盤上（一部軟質岩盤を含む）で実施された既往の大型模型基礎の起振実験結果を統一された手法で解析、整理した結果^{23),24)}をもとに、特に、地盤の成層性に着目して実験から得られる剛体基礎の逸散減衰特性が弾性波探査等で得られる地盤の物性値をもとにした解析によりどの程度の精度で評価可能か検討を行うとともに多層地盤上の剛体基礎の減衰特性の2層地盤モデルによる簡易評価の可能性について検討を行ったものである。

* 正会員 工修 電力中央研究所我孫子研究所
(〒270-11 我孫子市我孫子1646)

** 正会員 工博 電力中央研究所我孫子研究所
(同上)

2. 実験の概要

検討の対象とした起振実験は国内の原子力発電所建設地点 7 地点で実施された岩盤上の剛体基礎の起振実験で、基礎の断面形状は正方形（6 地点）または円形（1 地点）で辺長または直径はいずれも 10 m 以上の大型模型基礎の起振実験を対象としたものである。また、実験地点のうち 5 地点は岩盤が成層構造を有している。実験地点での地盤構造、基礎寸法を表-1 に示す。実験の詳細および実験結果を統一的に整理してまとめた結果が文献 23), 24) に述べられている。これらによると、地盤に成層構造が認められず、一様地盤とみなされる場合には、振動アドミッタンス理論^{21,22)}等の一様地盤に対する理論値と実験値の間に良好な一致がみられるが、成層地盤上で得られた実験結果については、地盤の減衰定数あるいは地盤の複素ばねの虚数部について理論値との間に差異が認められ、実験値は理論値を下回る等の結果が示されている。これは、理論解析に用いる一様地盤のせん断弾性係数として、成層地盤と等価な剛性を与えるせん断弾性係数を用いているため、地盤剛性あるいは地盤の複素ばねの実数部については成層地盤を一様地盤でモデル化した場合、理論値と実験値の一致は良好であるものの、地盤の減衰に関しては、層間での逸散波の反射の影響により、成層地盤上では、一様地盤上におけるよりも、実際には減衰が小さくなるためと考えられる。したがって以下では、成層地盤に対する基礎-地盤系の理論解を用いた実験の解析を行う。

3. 検討に用いた理論解

ここでは、理論解としてグランドコンプライアンス理論^{18)~20)}(Dynamical Ground Compliance Theory: 以下 D.G.C.理論と略記)で得られる基礎-地盤間のコンプライアンスから、地盤の剛性と減衰性を評価する。D.G.C.理論では、地盤を等方等質な三次元半無限弾性体とし、水平成層構造を有する多層の成層地盤に近似する。地盤の内部減衰は、地盤材料を粘弾性体(Voigt 体)と仮定して粘性減衰の形で与えるかあるいは複素剛性の形で与えることが可能であるが、粘性減衰を採用する場合、内部減衰は振動数依存性を有し、逸散減衰の振動数依存特性に内部減衰の影響が混入するために、ここでは後者の複素剛性型(非粘性型)を採用する。また、基礎形状は矩形とし、基礎と地盤間の動的接地圧分布としては、一様分布(回転動に対しても三角形分布)、放物線分布、剛板分布が仮定される。

グランドコンプライアンス $J_{\alpha} + iJ_{\beta} (\alpha = \sqrt{-1})$ は加振方向の基礎版の変位と加振力の比で定義されるため、地盤の複素ばね $K_{\alpha} + iK_{\beta}$ との間には次の関係が成立する。

$$K_{11} = J_{11}/(J_{11}^2 + J_{12}^2) \\ K_{12} = -J_{12}/(J_{11}^2 + J_{12}^2), \quad (l = V, H, R : \text{加振方向})$$

また、地盤の減衰定数 h_i は複素ばねの実部と虚部の比を用いて次式で与えられる。

地盤の剛性評価にはD.G.C.理論のほかに地盤のばね定数が陽な形で与えられる振動アドミッタンス理論^{21),22)}に基づいた理論解も用いる。振動アドミッタンス理論に基づく一樣地盤上の正方形基礎の水平、回転に関する地盤の複素ばね K_H 、 K_R は接地圧分布を一樣分布（水平複素ばね K_H に対して）、三角形分布（回転複素ばね K_R に対して）とした場合、半無限弾性地盤上の点加振解を用いて次式で与えられる。

$$K_H = K_{H1} + iK_{H2} = K_{HS}/(g_{H1} - ig_{H2}), \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

$$K_{HS} = 2\pi G a (1/C_1) / (2 - \nu)$$

$$g_{H1} = 1 - (1/6)(C_3/C_1)(\omega \Gamma_2 a/V_3)$$

$$+(1/120)(C_5/C_1)(\omega\Gamma_2a/V_S)^4 - \dots$$

$$g_{H2} = (1/2)(C_2/C_1)(\omega F_2 a/V_s)$$

$$-(1/24)(C_4/C_1)(\omega\Gamma_2a/V_s)$$

$$+ (1/720)(C_6/C_1)(\omega \Gamma_2 a/V_S)^5 - \dots$$

$$K_R = K_{R1} + iK_{R2} = K_{RS}/(g_{R1} - ig_{R2}), \quad \dots \dots \dots \quad (4)$$

$$K_{RS} = 2\pi G a^3 (1/C_1)/3(1-\nu)$$

$$= 1 + (1/6)(C_3/C_1)(\omega F_1 a/V_s)^2$$

$$-(1/40)(C_5/C_1)(\omega \Gamma_1 a/V_s)^4 + \dots$$

$$q_{R2} = (1/2)(C_4/C_1)(\omega \Gamma_1 q/V_S)$$

$$= (1/180)(C_6/C_1)(\omega F_1 \rho/V_S)^5 + \dots$$

ここに、 G : 地盤のせん断弾性

3. ポアソン比 ν : 加振固有振動数

ここに, G : 地盤のせん断弾性係数, a : 基礎の半幅, ν : 地盤のポアソン比, ω : 加振円振動数, V_s : 地盤の S 波速度, Γ_1 , Γ_2 : ν および $\omega a/V_s$ の関数 (近似的に $\Gamma_1 \approx 1.212$, $\Gamma_2 \approx 0.912: \omega a/V_s = 1$ の近傍で $\nu = 1/3$ のとき), また, C_i は次式で与えられる量である.

$$C_i = \int_0^{\pi/4} (1/\cos^n \theta) d\theta \quad (i=1, 2, \dots) \quad \dots \dots \dots \quad (5)$$

4. 成層地盤に対する地盤剛性の評価

(1) 檢討方法

起振実験の結果から得られた地盤の剛性と弾性波探査(PS検層または地表弾性波探査)から得られる地盤のP波、S波速度分布を用いて得られる地盤構造モデルを用いて、理論解から評価される地盤剛性との比較を行う。両者の比較は以下の手順で評価される地盤の等価S波速度によって行う。

a) 起振実験による地盤の等価 S 波速度の評価

各地点における水平方向の起振実験で得られる剛体基礎の共振曲線から、基礎-地盤系の共振振動数が得られ

層構造を有する硬質岩盤における剛体基礎の逸散減衰特性

る。一方、式(3)、(4)で与えられる半無限一様地盤に対する水平、回転方向の複素地盤ばねの理論解を用いて、起振実験を想定した剛体基礎の水平方向の上部加振問題に対する共振曲線が得られる。理論解によるシミュレーションでは、地盤のS波速度をパラメーターとしたシミュレーションを行い、共振振動数が実験値のそれに一致するような地盤の“等価なS波速度”，等価 V_s を定める。このようにして得られた等価 V_s を $(V_s)_{exp}$ で表わす。

b) 弹性波探査から得られる地盤構造に基づく等価S波速度の評価

表-1に示す各地点における弾性波探査から得られる地盤の成層構造(表中LAYEREDで表示)をもとに、振動アドミッタンス理論に基づく静的地盤ばねの成層補正解²²⁾と等しい静的地盤ばね値を与える一様地盤のS波速度を理論解から得られる地盤の等価S波速度とし、 $(V_s)_A$ で表わす。ここで、等価 V_s に対して理論値と実験値の比較を行ったのは、剛体基礎-地盤系の固有振動数は地盤のせん断弾性係数の平方根、すなわち、地盤の V_s に比例するため、等価 V_s の評価誤差が、固有振動数の評価誤差とみなすことができるからである。

(2) 検討結果

検討の対象とする実験地点は、地盤に成層性が認められるON¹⁾、TH³⁾、TG⁴⁾、SN⁶⁾、HM⁷⁾の5地点と一様地盤とみなされるSD²⁾、HG⁵⁾の2地点、計7地点であり、

一様地盤に対しては、上記 $(V_s)_A$ は弾性波探査による結果をそのまま用いることにする。また、等価 V_s を評価する際の理論解はすべて接地圧分布を一様(回転動に対しても三角形分布)と仮定して得られるものを用いた。以下に示す図で各地点(HMを除く)において、2点ずつ等価 V_s が求まっているのは、水平2方向(NS、EW方向)に対する起振実験が実施され、その結果を用いたためである。硬質岩盤では、節理等による岩盤の異方性がある場合が多く、このような場合、弾性波探査では岩盤剛性の異方性を検知することは困難であるが起振実験によって、基礎-地盤系の応答に及ぼす岩盤の異方性の影響評価が可能となる。図-1には、起振実験より求めた $(V_s)_{exp}$ と静的地盤ばねの成層補正解より求めた $(V_s)_A$ の比を示すが、図より両者の比は1.0の周りに分布し、ばらつきの範囲も小さいことがわかる。 $(V_s)_{exp}/(V_s)_A$ の平均値は0.97、標準偏差は0.15となっている。 $(V_s)_{exp}$ が $(V_s)_A$ を上回る地点は3地点、 $(V_s)_{exp}$ が $(V_s)_A$ を下回る地点は4地点となっているが、両者間の大小関係についての特定の関係は見出せない。また、岩盤の異方性により、同一地点でも $(V_s)_{exp}$ の値に差が認められるものの、その影響は小さいといえる。

以上の検討結果から、弾性波探査から得られる地盤構造に基づく等価S波速度と起振実験から評価される等価S波速度は良好な対応を示し、弾性波探査で求まる地盤の V_s を用いた理論解による一様および成層構造を有

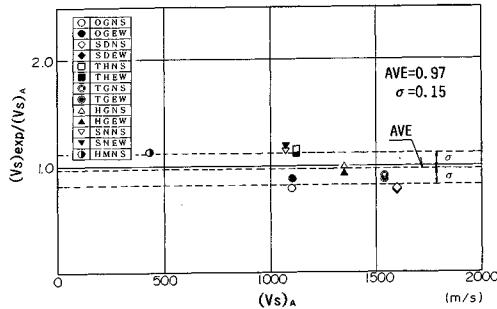
表-1 各実験地点の地盤構造および解析に用いた地盤物性

MODEL SITE	\sqrt{A} 1)	DEPTH(m)	LAYERED 2)		LAYERED (II)		2-LAYERED		2-LAYERED (II)			Poisson's Ratio ν
			Vs(m/s)	Vs(m/s)	Vs(m/s)	Vs(m/s)	Vs(m/s)	Vs1/Vs2	H/A			
OG	14.0	0.0~2.0	700	1400	700	1400	0.70	0.36				0.43
		2.0~5.0	1400		1400							0.32
		5.0~	2000	2000		2000						0.35
TH	15.0	0.0~1.0	500	1350	500	1350						
		1.0~2.5	1350									
		2.5~5.0	2050	2050								
		5.0~	2400	2400								
TG	10.0	0.0~2.0	1350									
		2.0~	1700	1700								0.22
SN	15.0	0.0~1.5	600	1550	600	1550						0.44
		1.5~8.0	1550									0.38
		8.0~14.0	2000	2000								0.33
		14.0~18.0	1600	1600	1550	2000	0.78	0.53				0.41
		18.0~24.0	2000	2000								0.35
		24.0~	1600	1600								0.38
HM	14.0	0.0~1.5	300	490	300	490						0.40
		1.5~4.5	490									0.35
		4.5~10.5	610	610	490	610						0.43
		10.5~13.0	370	370								0.47
		13.0~	550	550								0.47
SD	12.0 3)	0.0~	1600	1600								0.36
HG	14.0	0.0~	1350	1350								0.38

1) 基礎幅

2) 弹性波探査で得られ V_s 分布

3) 直径(円形基礎のため)

図-1 実験値等価 (V_s)_{exp} に対する理論値等価 (V_s)_A の比

する硬質岩盤の地盤剛性の評価が十分な精度を有していることが明らかとなった。

5. 地盤の減衰性の評価

(1) 検討方法

各地点の地盤構造を大別すると、一様地盤(SD, HG), 多層地盤(OG, TH, TG, SN, HM)に分類できる。文献24)によれば水平方向の減衰定数 h_H に着目すると、半無限一様弾性体に対する理論解を用いた場合、一様地盤である SD, HG の両地点では実験値は理論解から得られる値と良好な一致を示すが、多層地盤の地点では、実験値は理論値よりも低めとなり、多層地盤における減衰定数の評価においては、地盤の成層性を考慮した解析の必要性が指摘されている。ここでは、成層地盤上での実験結果に対して、多層地盤に対する D.G.C. 理論を用いて地盤の減衰性についての諸検討を行う。計算に用いた地盤モデルは以下の4種とする。図-2に上記4種の地盤モデルの概念図を示す。また、これらの地盤モデルの V_s 分布を表-1に示す。

① 多層地盤モデル：弾性波探査に基づく地盤モデル（表-1 中 LAYERED モデル）。

② 修正多層地盤モデル：①の多層地盤モデルの表層（第1層）の V_s を第2層の V_s に等価した地盤モデル。このモデルは、多層地盤モデルの表層を“ゆるみ領域”と考え、これを無視したものである（表-1, 図-2 中 LAYERED(II) モデル）。

③ 2層地盤モデル：①の多層地盤モデルの第1層と第2層からなる2層地盤モデル（表-1, 図-2 中 2-LAYERED モデル）。

④ 修正2層地盤モデル：②の修正多層地盤モデルの第1層と第2層からなる地盤モデル（表-1, 図-2 中 2-LAYERED(II) モデル）。

なお、D.G.C.の計算条件として、接地圧分布は水平動、回転動に対してそれぞれ一様分布、三角分布とし、変位評価は水平動に対して中心点評価、回転動に対しては基礎端の鉛直変位を基礎半幅で除して回転角を評価してい

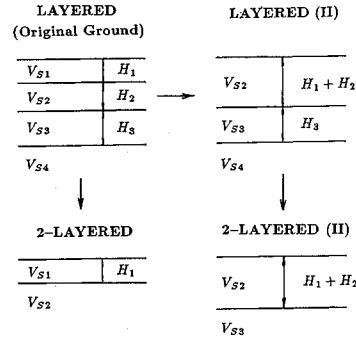


図-2 解析に用いた地盤モデル

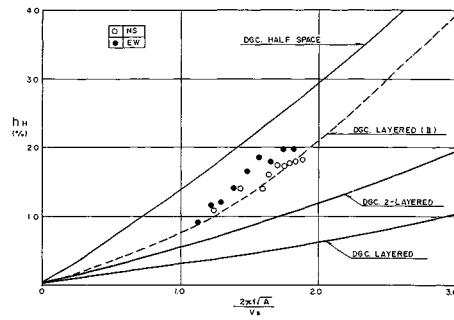
る。また、内部減衰は各層に一律 0.5% の非粘性型の減衰を与えており、逸散減衰に及ぼす材料減衰の影響は材料減衰分 (0.5%) が付加するだけで、剛体基礎の減衰性にはほとんど影響を及ぼさないと考えてよい²⁰⁾。

(2) 検討結果

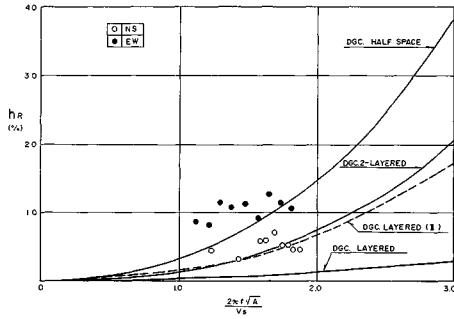
各地点の実験結果について、実験値と図-2に示す地盤モデルを用いて計算される減衰定数の理論解との比較を行った結果を図-3～図-7に示す。図の横軸は無次元振動数 $2\pi f \sqrt{A} / V_s$ で f は起振振動数、 A は剛体基礎の断面積、 V_s は成層地盤に対する静的コンプライアンス S.G.C. と等しい S.G.C. を与える一様地盤の等価な S 波速度を (V_s)_c としている。各地点ごとの減衰定数の実験値と理論値の対比を行った結果を以下に述べる。

a) OG 地点 (図-3)

水平方向の減衰定数 h_H についてみると、オリジナルの地盤構造である多層地盤モデルでの理論値 (図中 D.G.C. LAYERED) は実験値を大きく下回っている。これは、表層 ($V_s = 700$ m/s, 層厚 2 m) と第2層 ($V_s = 1400$ m/s, 層厚 3 m) 間のインピーダンスのコントラストが大きく評価され過ぎているためと考えられる。表層では、層厚が薄いために弾性波探査の精度が落ちること、さらに、基礎直下においては、基礎の上載圧等により表層のゆるみが低減している可能性等を考えて、表層の物性を第2層のそれと同一としたのが修正多層地盤モデルである。修正多層地盤モデルによる理論値 (図中 D.G.C. LAYERED(II)) は実験値と良好な一致を示している。実験値と理論値の相違については、岩盤の材料減衰に起因しているとの考えもあるが、起振実験時のひずみレベルは岩盤の非線形挙動による減衰定数の増加が見込まれるほどの大きさではないこと、また、岩盤材料の Q 値あるいは減衰定数については振動数依存性はないとしており、このため非粘性型の内部減衰を付加したとしても図中 D.G.C. LAYERED で示される曲線が平行に上方に移動するだけで、理論値と実験値の無次元振動数に対する増加率の差は変化しない等の理由により、その考えは

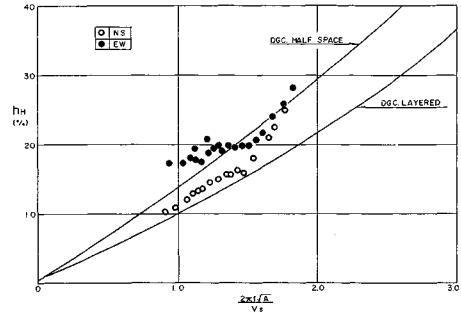


(a) Horizontal Damping

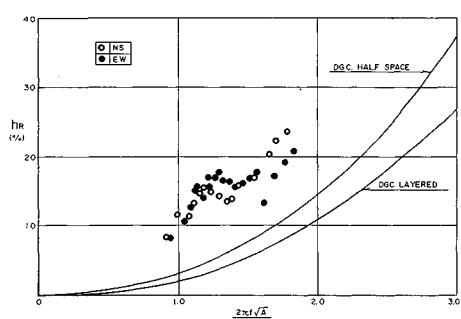


(b) Rotational Damping

図-3 地盤の減衰定数 (OG 地点)

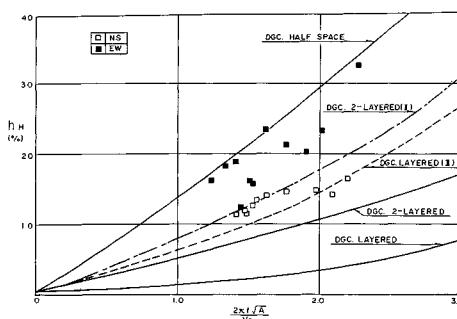


(a) Horizontal Damping

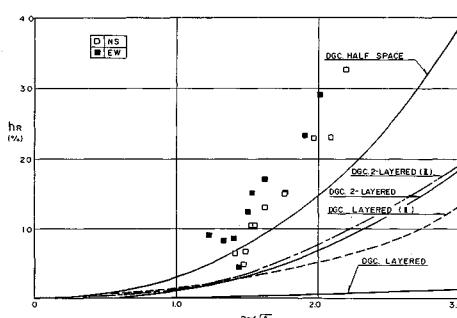


(b) Rotational Damping

図-5 地盤の減衰定数 (TG 地点)

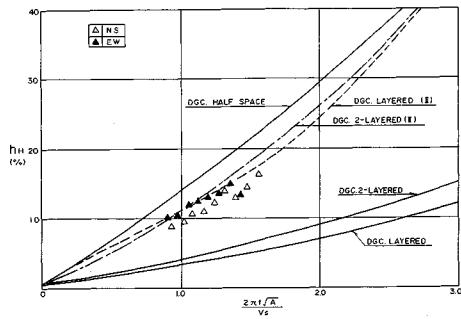


(a) Horizontal Damping

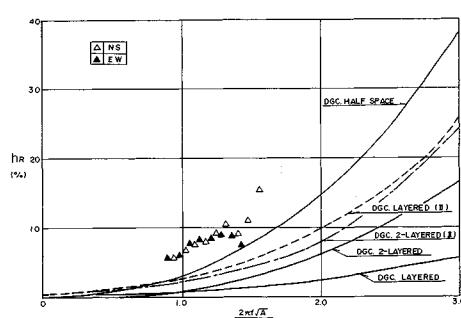


(b) Rotational Damping

図-4 地盤の減衰定数 (TH 地点)



(a) Horizontal Damping



(b) Rotational Damping

図-6 地盤の減衰定数 (SN 地点)

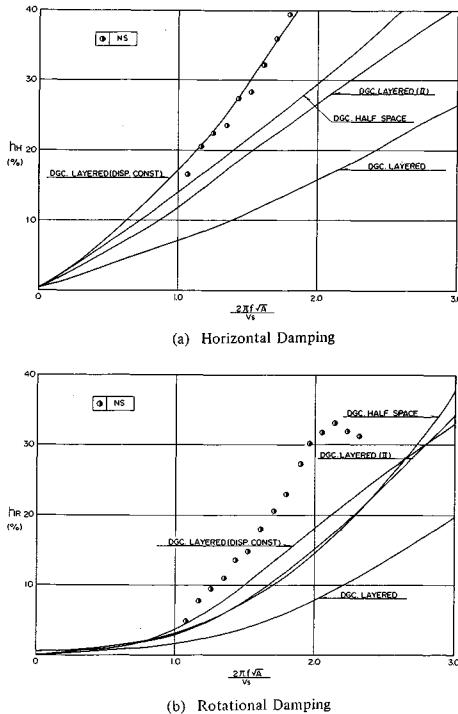


図-7 地盤の減衰定数 (HM 地点)

採用しなかった。

2層地盤モデルでは、理論値(図中 D.G.C. 2-LAYERED)は実験値よりも低めとなるが、3層目の $V_s=2000$ m/s の層を考慮していないため、多層地盤モデルの場合よりも理論値は大きくなる。OG 地点では、オリジナルの地盤が3層であるため、修正地盤モデルは修正多層地盤と同一となる。

回転方向の減衰定数 h_R についてみると、多層地盤モデルによる理論値(図中 D.G.C. LAYERED)は実験値を大きく下回っているが、修正多層地盤による理論値(図中 D.G.C. LAYERED(II))は実験値(NS 方向)と良好な一致がみられる。2層地盤モデルの理論値(図中 D.G.C. 2-LAYERED)は、修正地盤モデルの理論値と近い値を示している。

b) TH 地点(図-4)

水平方向の減衰定数についてみると、多層地盤モデルによる理論値は、実験値を大きく下回っている(図中 D.G.C. LAYERED)。ここでも OG 地点と同様に、表層($V_s=500$ m/s, 層厚 1 m)と第2層($V_s=1350$ m/s, 層厚 1.5 m)間のインピーダンス比を過小に評価したことがその主たる原因と考えられる。修正多層地盤モデルでは、理論値と実験値(NS 方向)はおおむね一致している(図中 D.G.C. LAYERED(II))。2層地盤モデルによる検討

では、多層地盤モデルの場合よりも理論値は増加するが、実験値よりも低めの値を示している(図中 D.G.C. 2-LAYERED)。修正2層地盤モデルによる理論値(図中 D.G.C. 2-LAYERED(II))は修正多層地盤モデルの場合に近い値を示し、実験値との対応もよくなる。

回転方向の減衰定数についてみると、多層地盤モデルによる理論値は実験値を大きく下回っており、修正多層地盤モデルの場合でも、理論値は増加するものの、実験値の半分以下の値となっている。2層地盤モデルと修正2層地盤モデルによる値の差は小さく、両者とも、修正多層地盤による値を上回ってはいるものの、実験値より低めの値を示している。

c) TG 地点(図-5)

水平方向の減衰定数についてみると、多層地盤モデルによる理論値(図中 D.G.C. LAYERED)は、実験値とおおむね一致している。この地点の地盤は2層構造で、表層($V_s=1350$ m/s, 層厚 2 m)と第2層($V_s=1700$ m/s)のインピーダンスのコントラストが大きくなく、弾性波探査で求められたオリジナルの地盤構造をもとにした理論値と実験値の対応はよい。この地点における修正多層地盤は、一様地盤となるが、この場合には実験値と理論値との対応はより良くなっている。回転方向の減衰定数についてみると、多層地盤モデルで計算される理論値は、実験値の半分以下の値を示しており、一様地盤モデルでも実験値の半分程度の値にとどまっている。

d) SN 地点(図-6)

水平方向の減衰定数についてみると、多層地盤モデルによる理論値(図中 D.G.C. LAYERED)は、実験値よりも低めの値を示しており、ここでも表層($V_s=600$ m/s, 層厚 1.5 m)と第2層($V_s=1550$ m/s, 層厚 6.5 m)間のインピーダンス比が小さく、それが主な理由として挙げることができる。ここでも修正多層地盤モデル(図中 D.G.C. LAYERED(II))を採用すると、減衰定数の値は増加し実験値とおおむね一致する。2層地盤モデル(図中 D.G.C. 2-LAYERED)では多層地盤モデルに比べ減衰定数の値は増加するが両者間の差異は小さい。これは3層目以深の地盤物性が2層目と余り変わりがないためである。修正2層地盤モデル(図中 D.G.C. 2-LAYERED(II))では修正多層地盤モデルの場合と非常に近い値を示しているがこれも上記理由による。この場合も理論値と実験値はおおむね一致している。

回転方向の減衰定数についてみると、多層地盤モデルで計算される減衰定数は実験値より低めの値を示している。修正多層地盤では、減衰定数の値は増加するものの実験値の半分程度にとどまっている。2層地盤モデルでは多層地盤モデルの場合より減衰定数の値は増加し、増加の割合は水平方向の減衰定数に比べて大きなものと

層構造を有する硬質岩盤における剛体基礎の逸散減衰特性

なっている。修正2層地盤モデルの場合には、修正多層地盤に近い値を示している。

e) HM 地点 (図-7)

ここではa)~d)の場合と異なり、接地圧分布を一様分布とした場合と剛版分布とした場合の両方における理論値が示されている。剛版分布として計算を行っているのは、当地点の岩盤は泥岩と砂岩の互層岩盤で、他の地点に比べて基礎の剛性が岩盤の剛性に比べて高いためで、これは実験時の接地圧分布の測定結果⁷⁾とも照合している。水平方向減衰定数についてみると、接地圧分布を一様と仮定した場合には多層地盤(図中D.G.C. LAYERED)、修正多層地盤(図中D.G.C. LAYERED (II))、一様地盤(図中D.G.C. HALF SPACE)の順に理論値は増加するが、一様地盤の場合でも、実験値より低めの値を示している。これに対して、接地圧分布を剛版分布とした場合には多層地盤モデルによる理論値(図中D.G.C. LAYERED (DISP. CONST.))が実験値と良い一致を示している。

回転方向の減衰定数についてみると、ここでは一様地盤モデル、多層地盤モデル間の差は小さいが、理論値は実験値を下回っている。

(3) 検討結果のまとめ

各地点における地盤の減衰特性を成層地盤に対する理論解と比較、検討した結果をまとめると以下のようになる。水平方向の減衰定数の実験値は、振動数依存性を示し、振動数とともに増加する。これは、理論解で示される傾向と一致する。多層地盤における水平方向減衰定数の実験値は、地盤の等価 V_s を用いて評価される一様地盤の理論値より低めの値を示し、地盤の成層構造が基礎の減衰特性に影響を及ぼすことが確認された。弾性波探査から得られる地盤のS波分布をもとに作成される地盤モデルを用いて計算される水平方向減衰定数の理論値は、実験値を下回り、減衰を過小に評価する結果となつたが、表層の V_s の低い領域を無視した地盤モデルを採用した場合、理論値と実験値の一致の度合いはよい。これは、硬質岩盤においては、岩盤掘削の際一般に表層に緩み領域が発生するが、弾性波探査の精度が薄い層に対しては期待できないこと、基礎の上載圧により緩み領域が回復されること等を考慮したものである。また、軟質岩盤での水平方向減衰定数の実験値は、接地圧分布を剛版分布と仮定し、弾性波探査から得られる地盤モデルを用いて計算される理論値と良好な一致を示す。これは軟質岩盤においては掘削時の表層の乱れ等の影響が小さく、また、表層近傍の弾性波探査の精度も硬質岩盤に比べて高いためと考えられる。回転方向の減衰定数は、硬質岩盤、軟質岩盤両地点において多層地盤に対する理論値は実験値を下回っている。これについては接地圧分布、

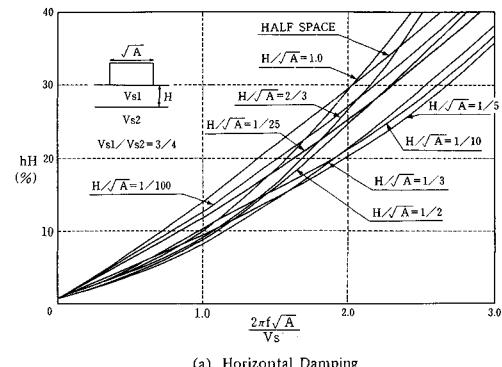
岩盤の異方性、内部減衰等に帰着させることも考えられるが、これらの要因を分析するのに十分な試験データが得られていないため、原因の解明はできなかった。

6. 2層地盤モデルによるパラメータサーベイと多層地盤に対する結果の適用性

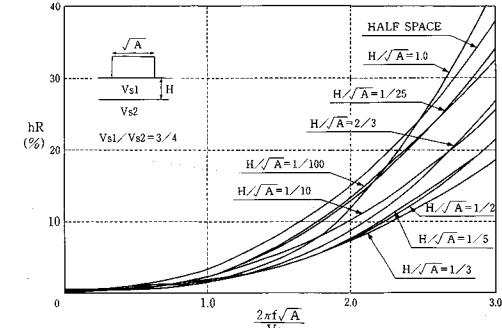
(1) 2層地盤モデルによるパラメータサーベイ

上記検討結果によると地盤の成層構造が基礎の剛性、減衰性に及ぼす影響は無視できず、また、多層硬質岩盤上の剛基礎の減衰特性については表層の緩み領域を無視した修正多層地盤モデルあるいは修正2層地盤モデルで近似的に評価可能であることが判明した。ここでは表層地盤の剛性が基礎の減衰特性に及ぼす影響を調べるとともに、2層地盤に対する剛体基礎の減衰特性の簡易評価に便宜をはかる目的で、2層地盤に対して、表層厚さおよび表層と第2層とのインピーダンス比をパラメーターとした解析を実施する。

図-8～図-10に水平方向減衰定数 h_H 、回転方向減衰定数 h_R と無次元振動数 $2\pi f \sqrt{A} / V_s$ の関係を表層厚さと基礎幅の比 H/\sqrt{A} をパラメーターとして計算した結果を示す。表層と下層の V_s の比 $(V_s)_1/(V_s)_2$ はそれぞれ $1/3$ 、 $1/2$ 、 $3/4$ としている。ここでの無次元振動数算出に

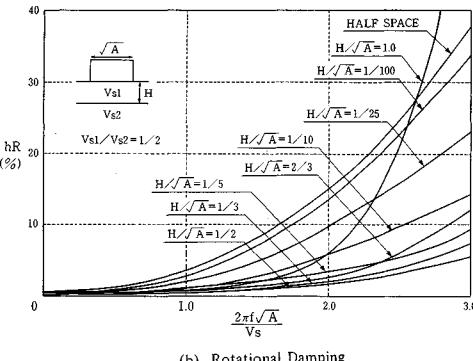
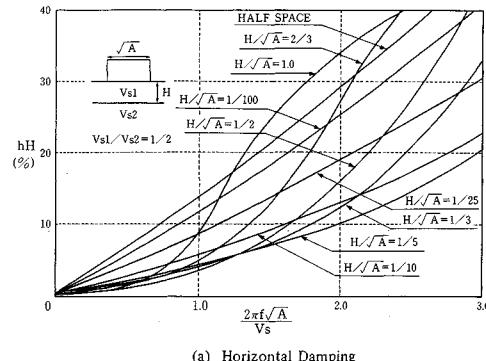


(a) Horizontal Damping



(b) Rotational Damping

図-8 2層地盤の減衰定数 ($V_{s1}/V_{s2}=3/4$)

図-9 2層地盤の減衰定数 ($V_{s1}/V_{s2}=1/2$)

用いた V_s は 2 層地盤の静的剛性と等しい剛性を有する一様地盤の等価な S 波速度 (V_s)_c としている。これらの図より以下のことが示される。2 層地盤では h_H , h_R とともに表層と下層の S 波速度の比が減少するに従い一様地盤に対する値 (図中 HALF SPACE) より減少する。たとえば、 $H/\sqrt{A}=1/100$ の場合には、 $2\pi f\sqrt{A}/V_s=1.0$ のとき一様地盤の h_H に対する 2 層地盤の h_H の比率は、 $(V_s)_1/(V_s)_2=3/4$ で約 90% であるが $(V_s)_1/(V_s)_2$ が $1/2$, $1/3$ になるに従い 85%, 70% 程度の値となり、表層の層厚が基礎幅に比して小さくとも、表層と下層間のインピーダンス比が小さい場合には表層の影響は無視できなくなる。層厚比 H/\sqrt{A} が小さい範囲では H/\sqrt{A} が増加するに従い減衰定数 h_H , h_R は減少する傾向を示すが層厚比がある程度以上になると h_H , h_R の減少の傾向は逆転し、反対に増加の傾向を示す。たとえば図-8 の $(V_s)_1/(V_s)_2=3/4$ の場合において $2\pi f\sqrt{A}/V_s=2.0$ では $H/\sqrt{A}=1/100 \sim 1/5$ の範囲では H/\sqrt{A} の増加に従い減衰定数は減少するが $H/\sqrt{A}=1/5 \sim 2/3$ の範囲では逆に増加する傾向を示す。この傾向は $(V_s)_1/(V_s)_2=1/2, 1/3$ の場合についても同様である。

図-11 は 2 層地盤の h_H と一様地盤の h_H の比と層厚基礎幅比 H/\sqrt{A} の関係を $(V_s)_1/(V_s)_2$ と無次元振動数 $2\pi f\sqrt{A}/V_s$ をパラメーターにとって示したものである。

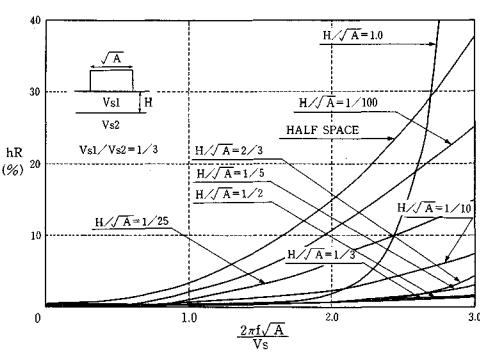
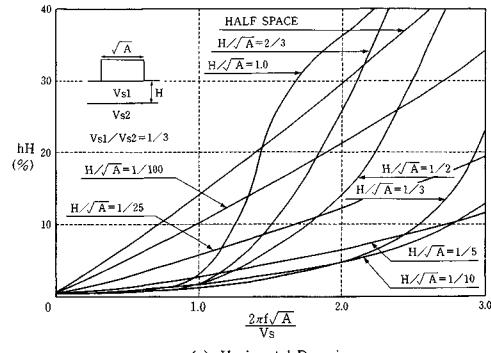
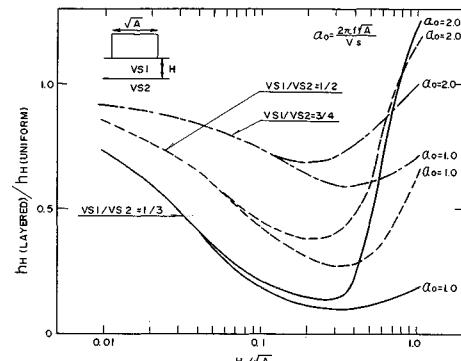
図-10 2層地盤の減衰定数 ($V_{s1}/V_{s2}=1/3$)

図-11 2 層地盤の減衰定数に及ぼす各パラメーターの影響
が、この図からも $(V_s)_1/(V_s)_2$ が低下するに従い減衰定数の値が低下することがわかる。また、 H/\sqrt{A} が大きくなるに従い減衰定数の値が低下するが、層厚比がある値を越えると減衰定数は増加の傾向を示す。これは第 1 層の層厚の増加に従い、第 1 層の影響が支配的になり地盤の動特性が 2 層地盤の第 1 層からなる一様地盤のそれに近づいていくからである。

(2) 2 層地盤による解析結果と実験値の比較

ここでは前項で示した水平方向減衰定数について 2 層地盤によるパラメーターサーベイ結果と実験値の比較を

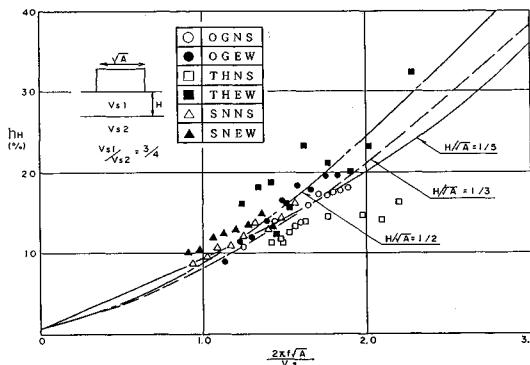


図-12 2層地盤の減衰定数と実験値

行う。実験値は修正2層地盤による解析を行ったOG, TH, SN地点で、対応するパラメーターは表-1に示す2-LAYERED(II)モデルの $(V_s)_1/(V_s)_2$ および H/\sqrt{A} から $(V_s)_1/(V_s)_2$ は全地点について3/4, H/\sqrt{A} はTH地点で1/5, OG地点で1/3, SN地点で1/2とした。実験値と理論値を比較した結果を図-12に示す。OG, SN地点については実験値と2層地盤による理論値の間に良好な一致がみられる。TH地点については、実験値そのものが加振方向によってばらついているが、理論値は両者の中間に位置している。図に示す結果から、多層地盤に対する減衰定数は多層地盤を本論文で示した方法に従って2層地盤でモデル化することにより理論解による評価が可能であることがわかる。

また、基礎寸法が増加した場合にもそれに対応するパラメーター H/\sqrt{A} を選定することにより図-9～図-12に示すパラメーターサーベイの結果を用いた減衰定数の評価が可能と考えられるが、これについては実規模構造物の起振実験結果や地震観測結果が蓄積された段階で検証を要するものと考えられる。

7. 結 論

硬質岩盤上で実施された剛体基礎の起振実験から評価された基礎-地盤系の動的相互作用特性を特に地盤の成層性に着目して検討した。各地点における地盤の剛性、減衰特性について成層地盤に対する理論解との比較、検討を実施した結果、以下の結論を得た。

(1) 剛体基礎の共振振動数から得られる地盤の剛性を弾性波探査から評価したものと比較すると両者の間に地盤の成層性の有無にかかわらず良好な対応がみられ、硬質岩盤上の基礎-地盤系の剛性は弾性波探査に基づく地盤物性による評価が可能であることが示された。

(2) 多層地盤における弾性波探査から得られる地盤物性を用いて計算される減衰定数の理論値は、実験値を下回り、減衰を過小に評価する傾向を示すが、表層近傍

の V_s の低い緩み領域を無視した地盤モデルを採用した場合、特に水平方向の減衰定数について理論値と実験値の良好な一致が示された。回転方向の減衰定数については、理論値は実験値に比べて低めに評価されるが、成層地盤に対する理論解を用いることにより“安全側”的評価が可能であることが示された。

(3) 3層以上からなる多層地盤を2層地盤に置換して評価した地盤の減衰特性は実験値との間に良好な対応がみられ、併せて実施した層間のインピーダンス比、表層厚さをパラメーターとする2層地盤に対するパラメーターサーベイの結果を用いることにより地盤の減衰定数が簡便に評価できることが示された。

謝 辞：本研究は電力中央研究所内に電力各社および電力中央研究所の参加による「起振法による岩盤の減衰性・弾性評価検討委員会」を設置し実施した研究成果の一部をまとめたものであり、本論文は文献24)の内容に追加、修正を加えたものである。本研究の実施にあたってご協力頂いた関西電力建設部(当時)瀬戸川篠氏、日本原子力発電土木建築部 加藤朝郎氏をはじめとする電力各社の方々に末筆ながら謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 上島照幸・平田和太・塙見 哲ほか：基礎起振実験による岩盤の弾性及び減衰特性の評価、土木学会論文報告集、第329号、pp.13～26、昭和58年1月。
- 2) 土佐木上・塙田 睦・池田昭男ほか：硬質地盤上の模型基礎の振動実験、第6回日本地震工学シンポジウム講演集、pp.1657～1666、1982。
- 3) 瀬戸川篠：成層構造の硬質地盤における正方形基礎のDynamical Ground Compliance、日本建築学会論文報告集、第319号、pp.64～74、昭和57年9月。
- 4) 加藤宗明・渡部征男・加藤朝郎ほか：起振実験による大型コンクリートブロック-岩盤系の動的相互作用に関する研究(その1)～(その3)、日本建築学会学術講演梗概集、pp.1555～1560、昭和58年。
- 5) Hirata, K., Ueshima, T., Shiomi, S.: Vibration Test of Foundations on Bedrock, Proc. 8th World Conference on Earthquake Engineering, pp.849～856, 1984.
- 6) 久道雄治・木村 文・平木和男ほか：硬質岩盤上のコンクリートブロック振動実験とその解析(その1)～(その4)、日本建築学会学術講演梗概集、pp.727～734、昭和59年。
- 7) 杉山信夫・柴田泰彦・太田外氣晴ほか：岩盤振動実験による動的相互作用に関する研究(その1)～(その5)、日本建築学会学術講演梗概集、pp.175～184、昭和60年。
- 8) 塩谷常吉・森 晋一・河村壮一ほか：岩盤上の模型基礎の振動実験(その1)～(その6)、日本建築学会学術講演梗概集、pp.1017～1027、昭和60年。
- 9) Kawase, H., Yoshida, K., Nakai, S., et al.: Dynamic

- Response of a Structure on a Layered Medium, Proc. 6th Japan Earthquake Engineering Symposium, pp. 1641~1648, 1982.
- 10) 吉田一博・中井正一：弹性表層上の円形基礎の動特性，日本建築学会学術講演梗概集, pp.711~712, 昭和 57 年。
 - 11) 吉田一博・川瀬 博・佐藤俊明：境界要素法を用いた剛基礎-地盤相互作用解析（その 2），日本建築学会学術講演梗概集, pp.805~806, 昭和 58 年。
 - 12) 増田 潔・佐々木文夫・浦尾謙二ほか：成層地盤を考慮した動的解析（その 1），日本建築学会学術講演梗概集, pp.789~790, 昭和 58 年。
 - 13) 増田 潔・佐々木文夫・浦尾謙二ほか：成層地盤を考慮した動的解析（その 2），日本建築学会学術講演梗概集, pp.791~792, 昭和 58 年。
 - 14) 鬼丸貞友・犬飼伴幸・今沢民雄ほか：地盤の成層性が地表面剛基礎のインピーダンスに及ぼす影響，日本建築学会学術講演梗概集, pp.523~524, 昭和 62 年。
 - 15) 北村泰寿・桜井春輔：二層弾性地盤上の長方形剛基礎底面の複素剛性，土木学会論文集, 第 362 号 / I - 4, pp. 391~396, 1985 年 5 月。
 - 16) 田守伸一郎・入江康隆・北川良和ほか：地盤・建物連成系における動的相互作用特性評価，第 6 回日本地震工学シンポジウム講演集, pp.1721~1728, 1982.
 - 17) 丹羽正徳・八幡夏恵子・石橋敏久ほか：ブロック基礎の起振機実験結果に基づく成層地盤の動的相互作用問題の一考察，日本建築学会構造系論文報告集, 第 364 号, pp. 92~109, 昭和 61 年 8 月。
 - 18) 小堀鐸二・南井良一郎・鈴木 有ほか：長方形基礎の Dynamical Ground Compliance (その 1), 京大防災研年報, 第 10 号 A, pp. 1 ~ 32, 昭和 42 年 3 月。
 - 19) 小堀鐸二・南井良一郎・鈴木 有ほか：長方形基礎の Dynamical Ground Compliance (その 2), 京大防災研年報, 第 10 号 A, pp. 1 ~ 32, 昭和 42 年 3 月,
 - 20) 小堀鐸二・南井良一郎・鈴木 有：成層構造を持つ基礎地盤の動特性, 京大防災研年報, 第 19 号 B, pp.167~217, 昭和 51 年 4 月。
 - 21) 田治見宏：耐震理論に関する基礎的研究, 東大生研報告, 昭和 34 年 3 月。
 - 22) 金井 清・田治見宏ほか：地震工学, 彰国社, pp.66~105, 昭和 52 年。
 - 23) Ueshima, T., Hirata, K., et al.: Estimate of Dynamic Stiffness and Damping by Forced-Vibration Test of Foundation on Bedrock and their Numerical Simulations, 土木学会論文集に投稿中
 - 24) Ueshima, T., Shiomi, S. et al.: Estimate of dynamic stiffness and damping by forced excitation tests of foundation on bedrock (PART 1), Trans. 9th SMiRT, pp.249~254, 1987.
 - 25) Hirata, K., Matsuda, T. et al.: Estimate of dynamic stiffness and damping by forced excitation test of foundation on bedrock (PART 2), Trans. 9th SMiRT, pp.255~260, 1987.

(1989.4.22・受付)