

大型機械基礎の動的設計

角 田 智 彦 此 上 典 文
島 口 正三郎

Dynamic Design of Large-Scale Vibrating Machine Foundation

Tomohiko Tsunoda Norifumi Konoue
Shosaburo Shimaguchi

Abstract

In dynamic design of a certain large-scale vibrating machine foundation, the authors carried out a series of operations from preliminary examinations on site to vibration analysis of a full-size model after construction. In particular, dynamic spring constants of ground relative to vibration amplitude levels of a model circular base and various conditions of ground were studied. Dynamic effects of ground improvement were found to be good. Simple analyses of effective masses of soil were performed for comparison studies with measured results. The results obtained with the full-size model were satisfactory as anticipated in the dynamic design.

概 要

本報告は、某大型機械基礎の動的設計に際して、現位置における予備調査から本設基礎躯体完了時における振動測定までの一連の作業の実施内容について述べたものである。特に、動的地盤係数に焦点をあわせ、基礎の変位レベルや地盤状態の相違に伴う地盤係数の変化などについて述べた。地盤改良による地盤の動的効果に関しても良好な結果となり、今後の設計資料となろう。また、土の付加質量についての簡単な解析により、実測値との比較検討を行った。最後に、予備調査結果に基づいて動的設計を行った実大基礎の振動測定では、ほぼ設計通りの満足すべき結果となった。このように、地盤係数法的な解析手法も、地盤の諸定数が適格に把握できれば実務の面から考えると有用な解析手段といえよう。

1. まえがき

機械基礎を設計する者にとっては、5W1Hとは次のように解釈できるであろう。すなわち、

When : 設計期限

Where : 地盤状態

What : 機械の仕様

Who : 設計依頼者

Why : 基礎の振動と要求項目との関係

How : 解析手法

上記6項目中、基礎の振動解析を行う者にとっては、Where, What, Why, Howの4項目に特に着目する必要がある。もう少し詳細に検討すれば

Where : 基礎設置地盤の状態を把握する。

地耐力, N値, 地下水位, 卓越周期, S波伝播速度, など

What : 外力となる機械の性質を把握する。

機械の形状と重量および重心位置, 動荷重の大きさと回転数および動荷重作用点, など

Why : 与えられた許容値の内容を把握する。

機械自体が振動を嫌う性質のものか, あるいは外部に及ぼす振動障害に基づく規制値なのかを把握する。

How : 振動解析理論の選択と入力データの把握

などとなろう。

「命題を知り, 結論を出す」これが設計者に課せられた任務であると考え。

本報告は, 上述の方針に基づき, 某疲労試験機基礎の動的設計およびその予備調査に関する一連の作業を実施した結果を述べるものである。

2. 予備調査と調査結果

本試験機基礎の設計資料を得るため、現地において3種の地盤状態について模型基礎による強制振動実験を実施した。写真-1に実験状況を、図-1に地盤柱状図と模型円型基礎を示す。

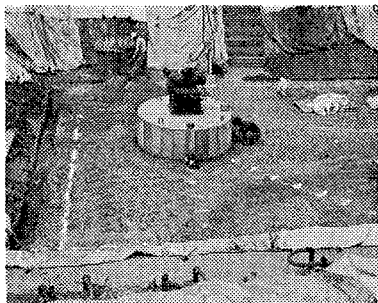


写真-1 実験状況

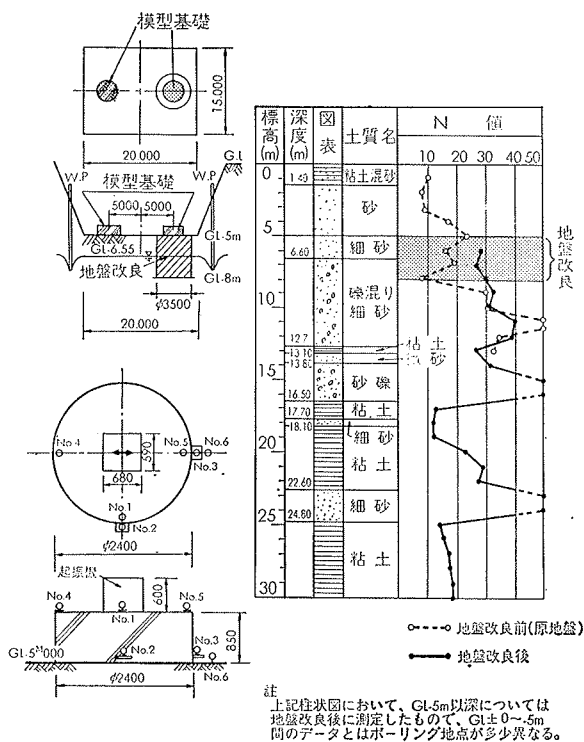


図-1 地盤柱状図と模型円型基礎

なお、模型基礎は、本設基礎の設置される地盤，すなわち本工事による根伐底である GL-5m の地盤上に設置している。また、起振機はバイエル無段変速機で加振振動数範囲は 200~1200RPM，回転中心から不平衡重錘までの偏心距離は 16cm，最大不平衡モーメントは 3.2・kg・m である。

2.1. 原地盤気乾状態における実験について

図-1 に示すように、実験地盤周囲にウェルポイントを設置し、地盤係数に及ぼす影響が大きいと考えられる基礎直下の地表面付近の地下水位を下げ、気乾状態として実験を実施した。まず、当地盤の動特性を把

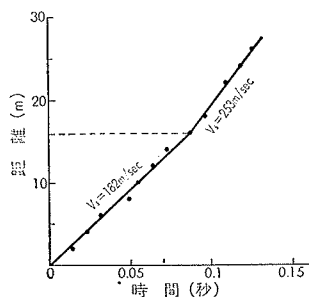


図-2 走時曲線

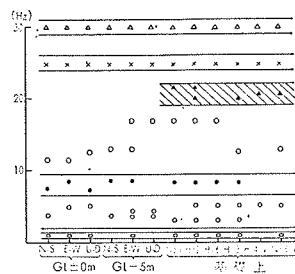


図-3 常時微動結果

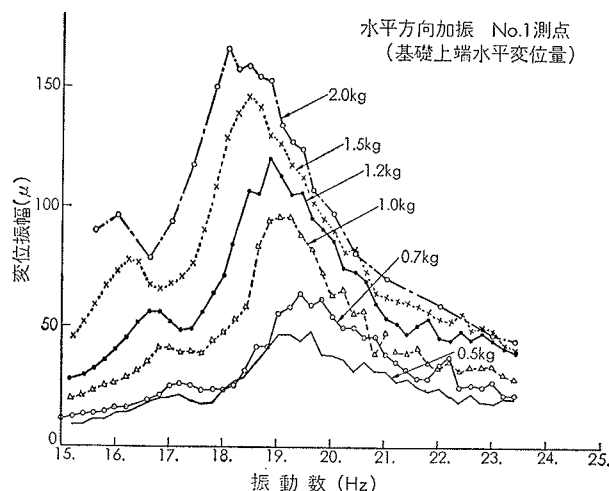


図-4 気乾状態における共振曲線

握る目的で、板たたき法による S 波伝播速度 (V_s) および常時微動測定を行った。図-2 に走時曲線を示す。第 1 層および第 2 層の V_s 値は、それぞれ $V_1=182$ m/sec, $V_2=253$ m/sec となり、第 1 層の層厚 H_1 は、

$$H_1 = 0.5x_0 \sqrt{(V_2 - V_1) / (V_2 + V_1)}$$

より算出できる。 $x_0=16$ m とすれば $H_1=3.2$ m となり 1/4 波長則による第 1 層の固有振動数 f_1 は $f_1=14$ Hz となる。一方、第 1 層および第 2 層における平均速度 \bar{V} は $\bar{V} = \sum H_j / \sum (H_j / V_j)$

より求めることができ、今、第 2 層として図-1 に基づき GL-11m までを考えると、GL-11m 以浅の固有振動数 \bar{f} は $\bar{f}=5$ Hz となる。図-3 は、各測点における常時微動波形のフーリエスペクトル中、振幅の大小を考慮しないでピークのあらわれている振動数を全てプロットしたものである。図中、5 Hz 付近および 12 Hz 付近における振動数が上述の結果と対応する。また、24.5 Hz と 29 Hz の振動数は、全測点で顕著にあらわれており、値も変動することがないので実験現場周辺における周波数一定の外乱と考えられる。このような特性をもつ地盤上で模型円型基礎の強制振動実験を実施した。図-4 に、起振機の偏心重量 (W) 6 段階についての基礎水平成分の共振曲線を示す。同図と振動レベルが微少である図-3 の常時微動測定結果とをあ

わせて考えると、加振力の増大すなわち基礎の変位量の増大に伴って系の共振振動数が低下する様子が明確である。ここで、図-3における20Hz付近の振動数は基礎上でのみあらわれており、基礎の固有振動数と推定される。

2.2. 原地盤湿潤状態における実験について

本実験は、前述のウェルポイントを一時停止させ、模型基礎設置地盤の表面が少し潤う程度の状態において実施した。図-5にW=0.7kg時の基礎上各測点における共振曲線を示す。W=0.7kgに限定したのは、気乾状態において、実験計画段階でW=1.0kg加振では、基礎底面と地盤とが分離し、密着状態でなくなると推定しており、実験においてこの現象を確認したため、本状態においてもW=1.0kg加振では基礎と地盤とが密着状態でなくなるとの判断から1段加振力を小さくしたためと、現場作業における安全性と工程との関係上、1ケースに限定せざるを得なかったという理由からである。

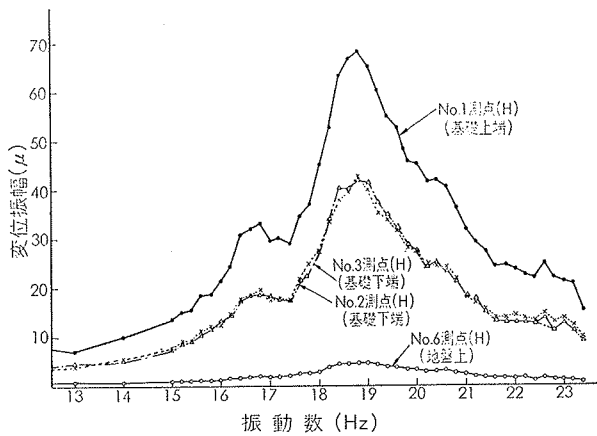


図-5 湿潤状態における共振曲線(W=0.7kg)

2.3. 改良地盤における実験について

本実験は、原地盤における実験結果で本工事に於いては何らかの地盤改良を必要とする結論が出た場合を想定して実施したものである。いくつかある地盤改良の一つとして本実験では薬液注入工法を採用した。実験地盤は砂質土であるので、まず水ガラス系のLWを先行注入し、ついでアクリルアミド系と同等の浸透能力を有するOH-GROUTを注入し、この地盤の注入充填度を高める。OH-GROUTは任意の割合で容易に水にとけ、接着性を発揮しながら短時間で固まる性質があり、固結体は強力なゴム状弾性体となる。表-1に注入材の配合を、図-6に注入範囲を示す。このような地盤改良を施した後、同様な実験を実施した。図-7にW=0.7kg加振時の共振曲線を示す。本ケースに於ける共振振動数が他の2状態よりも高く、しかも振

L.W		200ℓ 当り	
A 液	B 液		
ケイ酸ソーダ	50ℓ	セメント	35kg
水	50ℓ	ベントナイト	3.5kg
		水	残
	100ℓ		100ℓ

OH-GROUT		200ℓ 当り	
A 液	B 液		
OH-GROUT	20ℓ	水	180ℓ

表-1 注入材の配合

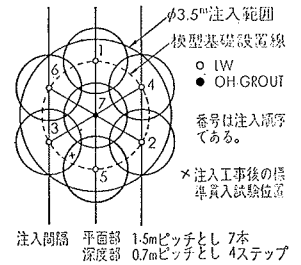


図-6 注入範囲

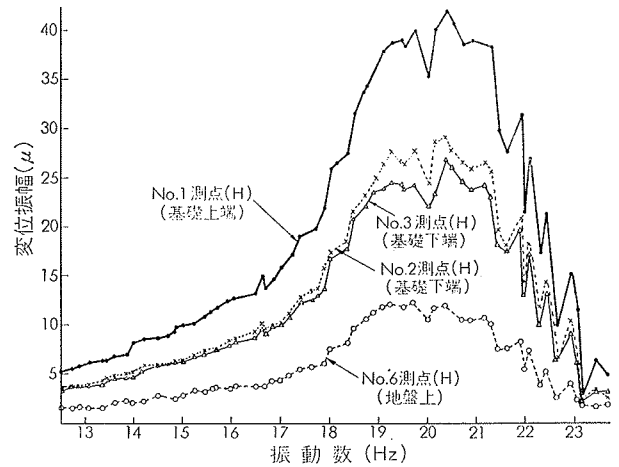


図-7 改良地盤における共振曲線(W=0.7kg)

幅は最小である。一方、本実験に先だって実施した標準貫入試験結果では、図-1に示すように、地盤改良を施した層だけがN値において約50%の増加がみられる。

2.4. 周辺地盤の振動距離減衰について

模型基礎設置地盤が、原地盤気乾状態であるときに、周辺地盤において振動の距離減衰効果について調査した。図-8に測定点を、図-9に距離減衰曲線を示す。使用計器は公害振動計 (TYPE VM-13A) で速度振幅を記録する。図-9に示す地盤の距離減衰曲線の形状(直線の勾配)を本設基礎設置後の試験機運転時における当地盤の形状とした。

2.5. 調査結果の検討

2.1. 項で述べたように、同一地盤においては基礎の変位量の増大につれて系の共振振動数は低下する。すなわち地盤のバネ定数は小さくなると考えられる。表-2は、全ケースについての地盤のバネ定数および共振曲線の形状より推定される減衰定数等を示したもので図-10は、原地盤気乾状態の場合の基礎底面変位量

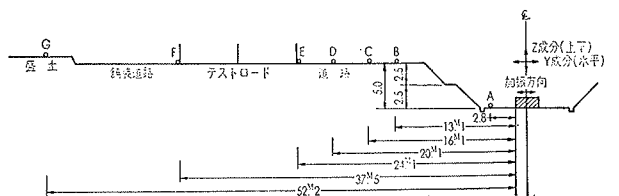


図-8 振動距離減衰測定点

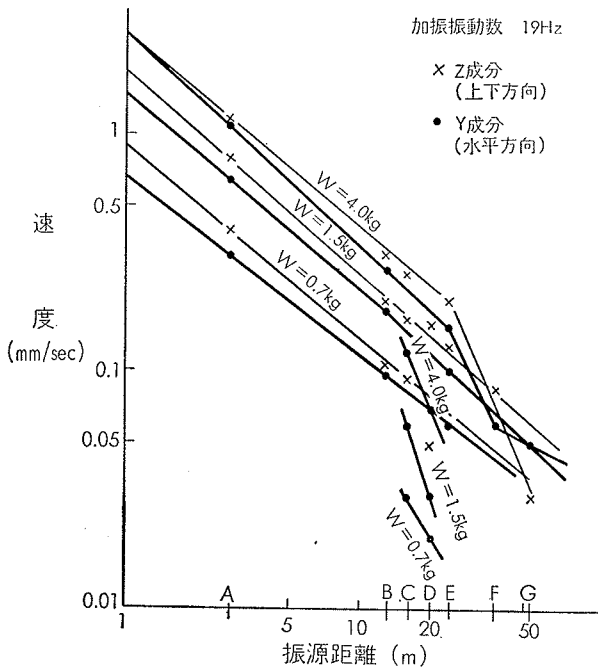


図-9 距離減衰曲線

地盤状態	偏心重量	共振点	基礎上部変位量	基礎下部変位量	振幅比	減衰定数	水平地盤係	鉛直地盤係
原地盤	0.5kg	19.3Hz	49.6 μ	19.6 μ	2.54	4.4%	6.04kg/cm ²	8.21kg/cm ²
	0.7	19.4	70.7	29.8	2.37	4.4	5.79	8.59
	1.0	19.0	95.5	53.1	1.80	3.7	4.56	10.06
	1.2	18.8	120.3	66.4	1.81	4.8	4.48	9.80
	1.5	18.4	145.7	79.9	1.82	4.9	4.31	9.33
	2.0	18.0	165.1	91.1	1.81	5.8	4.11	8.98
原地盤(湿潤状態)	0.7	18.8	68.0	34.8	1.95	4.5	4.72	9.17
改良地盤	0.7	20.4	42.0	25.0	1.68	7.4	5.01	12.49

表-2 振動実験結果一覧表

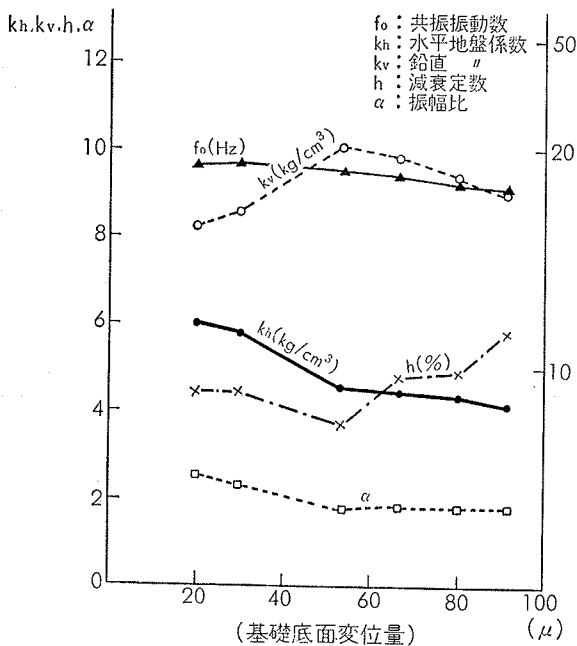


図-10 原地盤気乾状態における基礎底面変位量と諸定数との関係

に対する諸定数の関係である。同図より、基礎底面変位量がある変位量に達すると諸定数が一変している。このときの起振機の偏心重量は1.0kgであり、前述したように基礎底面が地盤と縁が切れた状態となっている。次に、同一加振力による地盤状態の相違による共振曲線の変化を図-11に示す。共振振動数については、原地盤湿潤状態、同気乾状態、改良地盤の順に高くなっているが、地盤係数あるいは減衰定数について上図では必ずしも上記の関係とは対応しない。一方、2.1項で示したS波伝播速度 V_s より地盤のバネ定数を算出すると $k_h=15.7 \text{ kg/cm}^2$, $k_v=23.6 \text{ kg/cm}^2$ となる。以上の如く、基礎底面の変位量あるいは地盤状態の変化に伴ない地盤の諸定数も変化するので、本設基礎の振動計算においては、このことを考慮して検討した。また、地盤の付加質量についても簡単な実験解析を試みた。結果を図-12に示す。ここで振源振幅の1/3になる範囲までの逆4角錐体の土を基礎と一緒に振動する付加質量と考える。まず、系の固有値を算出するが、この場合、地盤係数自体に土の付加質量の影響も含まれているみかけのバネ定数であるため実験値のK値をそのまま用い、振幅計算の段階において上述の土の質量のみを考慮して計算した結果を実測値と対応して図示したのが図-13である。実測値と計算値がほぼ一致している。今後、この方面に関するデータを蓄積し、上述の現象をさらに確認する予定である。

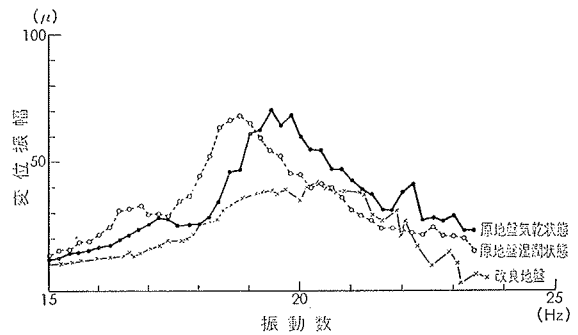


図-11 地盤状態の相違による共振曲線の変化 (W=0.7kg)

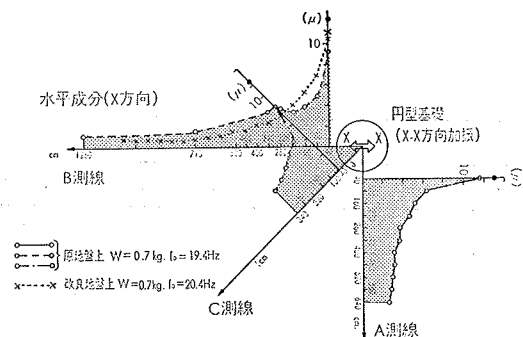


図-12 周辺地盤振動測定結果

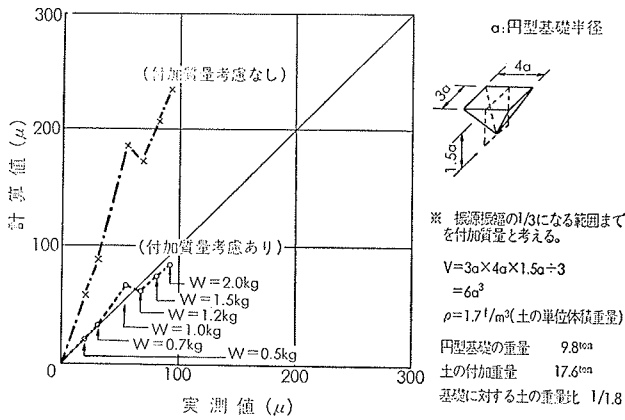


図-13 土の付加質量を考慮した計算値と実測値との比較

3. 本設基礎の動的設計

以上のような予備調査結果に基づき、本設基礎の動的設計を行った。設置される試験機の動荷重は上下方向のみに作用しており、従って外力作用点、重心、剛心が同一軸上であれば、系の振動としては純上下動のみを考えればよい。この方針に基づき図-14のように基礎形状を定めた。振動計算に用いる不平衡力Fは下式によって算出すると

$$F = m\omega^2 x$$

ここで

- m : ラムの質量
- ω : ラムの往復運動の円振動数
- x : ラムの変位量

F=7.3ton となる。

振動障害に対処するた

め、2.4.項で示した距離減衰曲線を考慮すると本設試験機運転時における基礎の振動振幅を20μ以内にすることがあり、従って動的地盤係数を図-10に基づき $k_v=8.0\text{kg/cm}^3$ とした。なお、本値は模型基礎に対しての値であるため、本設基礎の如く形状の大きな基礎に対しては低減し、 $k_v=6.5\text{kg/cm}^3$ とした。表-3に振動計算結果を示す。

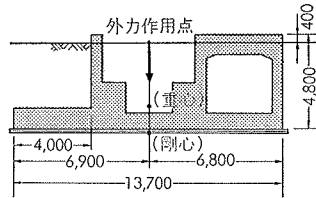


図-14 本設基礎略断面

系の諸定数		変位量の計算 (外力の回転数 10Hz の場合)	
系の総重量	1,074ton	外力の大きさ	7,252kg
基礎底面積	119m ²	共振倍率	2.26
地盤係数と減衰定数	6.5kg/cm ² 4.4%	動的変位	21.2×10 ⁻⁴ cm
系の固有振動数 (上下振動)	13.4Hz	速度振幅	1.33mm/sec

表-3 本設基礎振動計算結果

4. 本設基礎の自由振動実験

本設基礎の躯体施工完了時に、図-15に示すように、引張切断による自由振動実験を実施し、系の固有振動数を実測した。図-16に、測定記録波形を示す。本実験においては、記録波形からは Rocking成分も多少あらわれているが、主に Sway 振動が卓越していると考え、予備調査結果に基づき $k_h=4.9\text{kg/cm}^3$ として Sway振動だけの固有振動数を算出すると12Hzとなり、実測値とほぼ一致した。

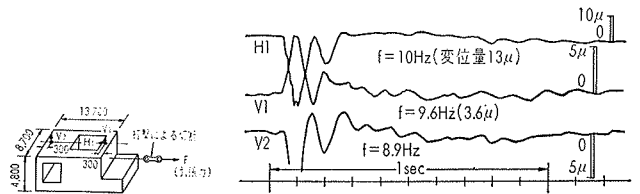


図-15 実験概要

図-16 自由振動波形

5. むすび

以上、予備調査、本設基礎の動的設計振動測定という一連の作業内容を述べてきたが、設計上、最も重要でかつ不明確な要素として地盤係数があげられよう。表-4に筆者らの調査例のまとめを示すが、振動レベルによるK値の変動が顕著

CASE	試験方法	基礎支持状態	K 値				減衰定数 (2%)	
			変位 (μ)	k_h (kg/cm ³)	k_v (kg/cm ³)	k_b/k_v		
I	パネーマス	ベタ基礎	360	1.8	3.2	0.56	16.9	
		液動	—	—	16.4	23.2	0.71	—
II	パネーマス	ベタ基礎	—	—	9.0	—	—	
		杭基礎 (改良土)	1150	1.1	3.4	0.32	14.4	
	static	杭基礎 (改良土)	430	2.2	9.2	0.24	15.4	
		杭基礎 (改良土)	790	1.8	8.4	0.21	11.6	
III	パネーマス	ベタ基礎	—	—	2.4	—	—	
		液動	600	0.7	1.9	0.37	8~11.5	
IV	パネーマス	ベタ基礎	—	—	1.7	2.3	0.73	16~22.0
		杭基礎 (改良土)	120	2.0	8.0	0.25	10.1	
	液動	杭基礎 (改良土)	130	0.4	1.0	0.40	10.7	
		杭基礎 (改良土)	660	0.4	4.3	0.09	2.4	
	V	パネーマス	杭基礎 (改良土)	370	0.1	0.2	0.50	5.9
			液動	—	—	4.1	4.7	0.87
VI	パネーマス	ベタ基礎	20	2.5	3.7	0.68	14.9	
		液動	30	5.8	8.6	0.67	4.4	
VII	パネーマス	ベタ基礎	35	4.7	9.2	0.51	4.5	
		液動	25	5.0	12.5	0.40	7.4	

表-4 動的地盤係数に関する調査例

に際しては充分注意する必要がある。また、地盤改良の効果も静力学的 (例えばN値など) にはもちろんのこと、振動的にも良好である。最後に、地盤係数法的な解析手法も、K値あるいは土の付加質量といった地盤の諸定数が適格に把握できれば、実務の面から考えると有用な解析手段といえよう。