

機械基礎における杭および側面土の効果に関する実験的研究

市之瀬 絃一
広瀬 道孝

§ 1. はじめに

機械基礎において、杭および基礎の周囲に埋め戻された土がどんな効果を持つだろうか、甚だ重要な興味深い問題である。

一般に機械基礎の設計に当り、このような効果はほとんど考慮されていないのが実情である。

最近、鋼管杭の普及によって、杭体に生ずる応力の測定が容易になり、杭の支持力機構の解明に大いに役立っている。

このような測定技術を動的荷重の場合に応用し、機械基礎に関する長年の疑問を実験的に調べてみようという計画されたものである。

実験は、動的荷重に対する杭の効果および側面土の効果を調べることに焦点を合わせ、比較の意味で、静的載荷試験等も組み込んで行なった。

§ 2. 実験の概要

本実験は、徳山曹達・川崎工場、並びに生コンプラント新築工事現場において、工事と併行して行なわれたもので、39年7月上旬から9月中旬の期間で準備、実験等を行なった。

試験体は図-1に示すように、寸法 3m×1.5m×1m のコンクリート基礎(重量10.8ton)を2基並べ施工した。

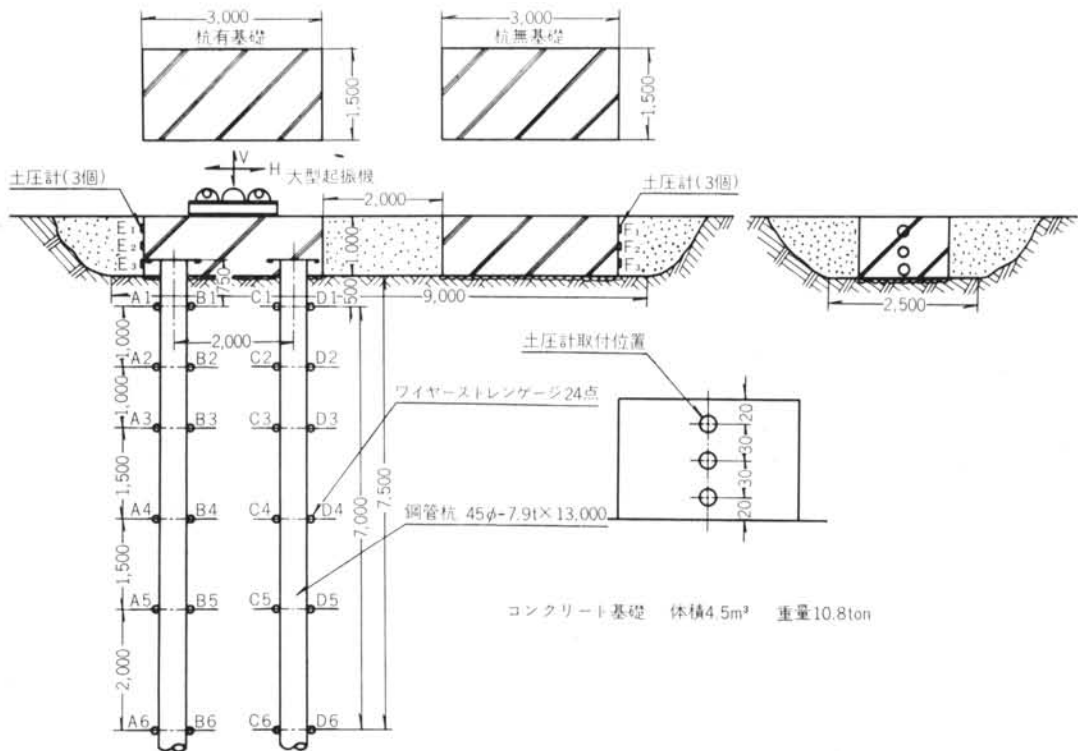


図-1 試験体概要図

このうち、一方の基礎には、径450φ、長さ13m、厚さ7.9mmの鋼管杭を2m間隔に2本打ち込んである。また他方の基礎には、杭は打ち込んでない。杭を2本とした理由は、1本であるとcantileverの振動となり、実際の条件と著しく異なるため、2本の組杭とした。杭体には24箇所にワイヤー・ストレンゲージを貼り、杭体を生ずる応力の分布を測定した。

また、基礎のコンクリート部には、その側面に各々3個の抵抗線土圧計を取り付け、側面の土圧を測定するようになっている。

これらの応力、土圧の測定は、動荷重時にすべて動的に自動記録するようになっている。

実験は、

- (1) 側面土の無い場合
- (2) 側面土の有る場合

の2段階について、静的載荷試験と強制振動試験を行った。強制振動試験とは、それぞれの基礎に起振機をすえ付け、動的に交番荷重を加えたときの、基礎の変位振幅、側面土圧、杭体応力を動的に記録する。起振力の方向は、水平および上下について行なった。

また、外部からの地盤振動による影響を調べるために試験体から適当な距離の地点でダイナマイトを爆発させ地盤から振動を伝えた場合の各基礎の運動を測定した。

その他、補足的に、地表面を伝播する弾性波の速度、周囲地盤上の振動分布等も測定した。

§ 3. 測定装置

3.1 試験杭

試験杭は450φのスパイラル鋼管杭を使用した。杭体

に生ずる応力を測定するために、2本の試験杭には外表面に総計24点のストレンゲージを貼り付けてある。これらの防水防湿と保護の目的で、それぞれのストレンゲージにはゲージプロテクターを、リード線にはリードプロテクターを溶接してある。

試験杭の詳細は図-2に示してある。

3.2 ワイヤー・ストレンゲージ

本実験に使用したストレンゲージは、ポリエステルゲージKP-1(共和電業)で、ゲージ長さ20mm、ゲージ抵抗120Ωである。

温度補償のためのダミーゲージは、動的なバランスをとりやすくするため、それぞれのゲージプロテクターの中に組み込むことにした。

3.3 土圧計

コンクリート基礎の側面土圧を測るため、側面に合計6個の土圧計を取り付けた。この土圧計は抵抗線式で、その性能および仕様は次に示すとおりである。

外 径	100φ
受圧部外径	70φ
定格容量	1 kg/cm ²
出力感度	2500×10 ⁻⁶ ±2%
直線性およびヒステリシス	定格容量に対し±2%
温度変化による零点移動	0.5%/°C
ゲージ抵抗	240 Ω(4 gauge 法)

3.4 起振機

本実験には、高速起振機と大型起振機の2種類の起振機を使用した。いずれも不平衡質量型機械式のもので、それぞれ次の性能を有している。

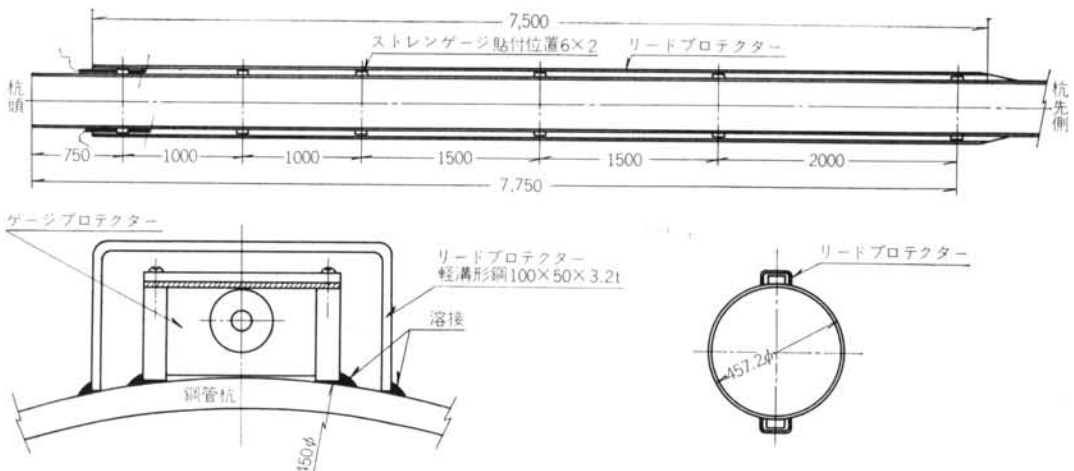


図-2 試験杭詳細図

・高速起振機

回転数 0~3600 r. p. m.
最大加振モーメント 20kg・cm
最大起振力 2.7 ton

・大型起振機

回転数 0~800 r. p. m.
最大加振モーメント 896kg・cm
最大加振力 6 ton

なお大型起振機は896kg・cm, 432kg・cm, 290kg・cmと加振モーメントを3段階に変えて加振力を調整するようになっている。

3.5 静的載荷試験加力装置

ジャッキは10ton ジャーナル型のもので、荷重の計測は10ton ループダイナモメーターを使用した。その装置を図-3に示してある。

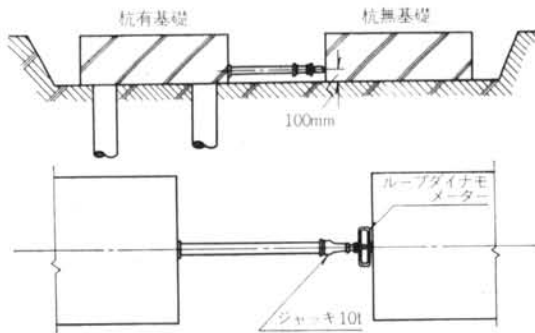


図-3 静的載荷試験加力装置

3.6 静的歪および変位の測定機器

静的載荷試験時に生ずる杭体応力の測定は静歪計 SM 4J (共和電業)を使用し、変位の計測には1/100mm単位目盛のダイヤルゲージを使用した。

3.7 動的歪測定機器

動的試験における杭体応力と土圧の測定は、動歪計 D S 6 R (新興通信)を使用し、その記録はペン書きオシログラフ EO3 (渡辺測器)を使用して、6点同時測定記録とした。

3.8 振動測定機器

振動測定には低周波振動計 AVL-3 (明石製作所)を使用し、ペン書きオシログラフ WTR211-3C (渡辺測器)にて、3点同時測定記録とした。

なお、試験体と起振機の模様を、写真-1, 2に示す。

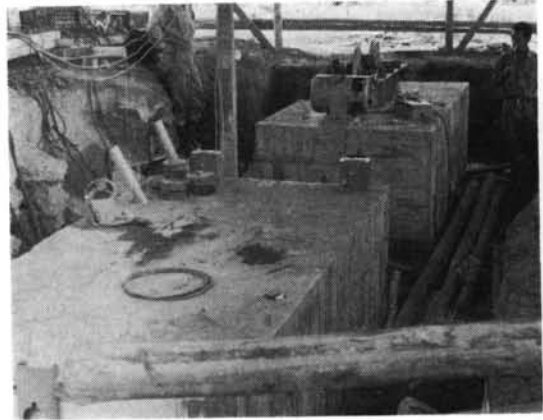


写真-1 試験基礎 (手前が杭基礎)

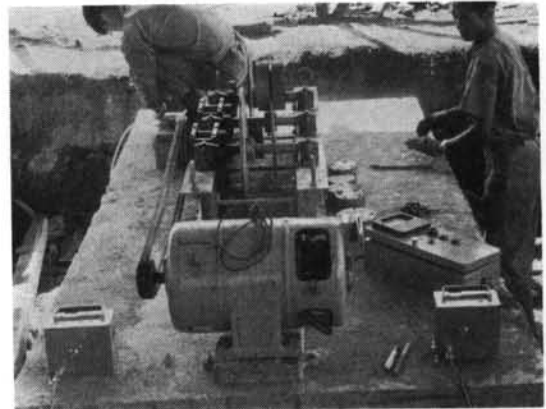


写真-2 起振機

§ 4. 実験結果

4.1 静的水平載荷試験

図-3に示す装置で、杭有、杭無の両基礎について水平載荷試験を行なった。

荷重は5 ton までとし、両基礎の水平変位および杭体応力を測定した。

杭体応力は極めて微少で、計器誤差の範囲であったため、荷重が小さい範囲での傾向は把握できなかった。

水平変位の測定結果を図-4に示し、処女荷重における荷重-変位曲線を図-5に示してある。

両基礎は、杭の有ると無いだけの差であるから、両曲線の差は杭の効果によるものと判断してよい。

杭体に生ずる歪の測定結果を図-6に図示した。

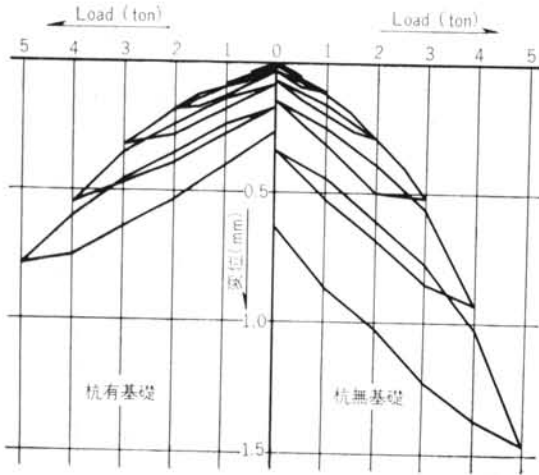


図-4 荷重-変位曲線

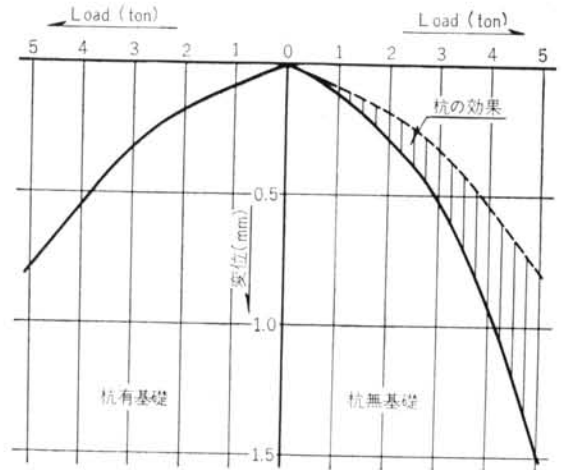


図-5 荷重-変位曲線

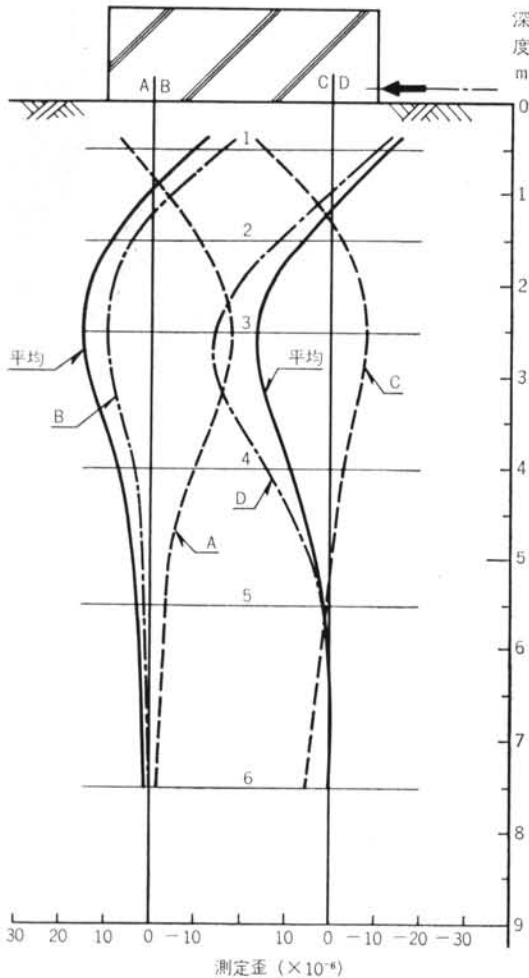


図-6 水平荷重による杭体応力分布図 (5 ton)

4.2 側面土の無い場合の強制振動試験

4.2.1 高速起振機による強制振動試験:

両基礎の振動数-振幅特性を調べる目的で、まず両基礎について高速起振機による強制振動試験を行なった。

まず、水平振動における振動数-振幅曲線を記録から読み取ると、図-7になる。同図より共振振動数は、

杭無基礎 15.2c/s

杭有基礎 16.4c/s

となっていることがわかる。

また振幅は、杭有の場合、約30~40%小さくなっているが、傾向はほぼ同じようになっている。

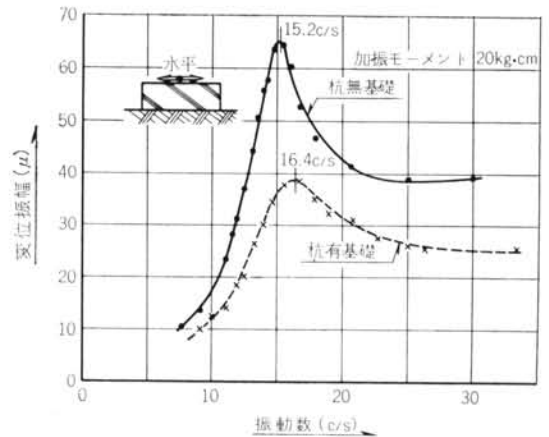


図-7 水平方向の振動数-変位振幅曲線

上下動の場合であるが、測定の結果を図-8に示しておいた。杭無基礎の場合、水平動の共振振動数よりやや高いところにわずかな起伏があり、さらに振動数が高くなると、振幅は一様に増加する。これは一般に上下動の強制振動試験における特有の傾向である。

杭有基礎の場合、傾向は杭無基礎の場合とほぼ同じであるが、振幅が約20~30%小さく、また、杭無基礎の場合に生じた起伏に相当するものがほとんど現れない。

なお、振幅の測定は図-9に示す3個所に pick up を置き、これらの振動を同時記録し、3点の平均振幅として求めたもので、振幅とはすべて半振幅を意味している。

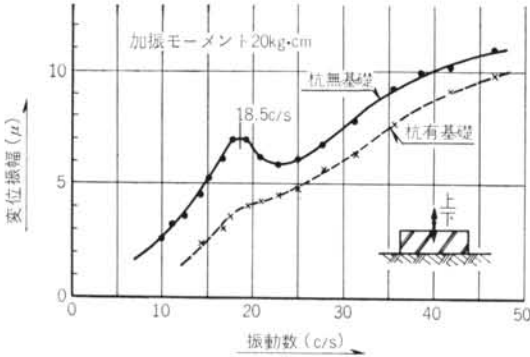


図-8 上下方向の振動数一変位振幅曲線

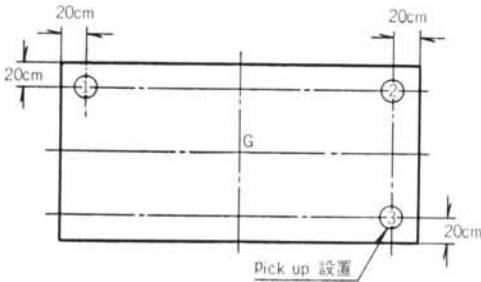


図-9 pick up の設置図

4.2.2 大型起振機による強制振動試験：

高速起振機による強制振動試験について、大型起振機による強制振動試験を行なった。同起振機は最大モーメントが896kg・cmで、高速起振機の約45倍であるが、振動数は最高12c/sまでで、特に低い振動数における動的特性を調べる目的で設計されている。

杭無基礎と杭有基礎を、それぞれ水平、上下振動させた場合の振動数一振幅特性を作図すると、図-10のようになる。

また、ロッキングの模様を調べる目的で、両基礎を水平振動させたときの水平振幅と上下振幅を、それぞれ同時測定した。その実測値より、両基礎の重心まわりの回転角を各々の振動数に対して計算し、その結果を図-11に示した。

杭体に生ずる応力の測定は、基礎上的変位測定と同時に杭体に生ずる応力の測定を行なった。本測定において24点のストレインゲージのうち6点が、絶縁不良のため使

用不能であった。たまたまA列の6点がそろって健全であったので、同列について、杭体に沿った6点の振動数一歪振幅特性を図示すると、図-12のようになる。同図から、振動数6c/s, 8c/s, 10c/sにおける歪振幅を読み取り、その分布を図-13に示した。同図より、歪(応力)の最大はA-3、すなわち深度2.5m付近に生じていることがわかる。また、基礎の変位が大きくなるにつれて最大モーメントを生ずる深さがやや深くなる傾向が、同図より把握できる。

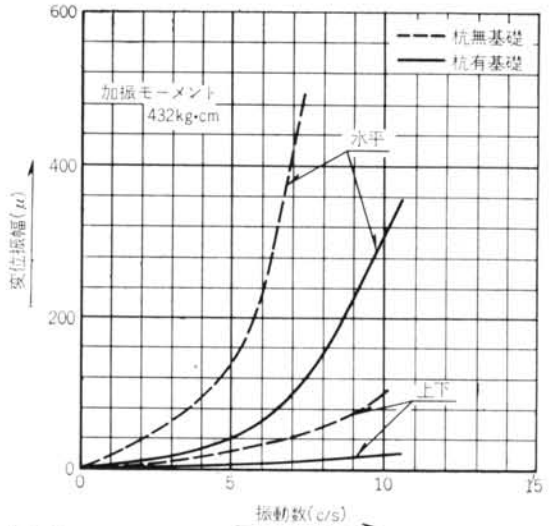


図-10 水平、上下動加振における振動数一変位振幅曲線

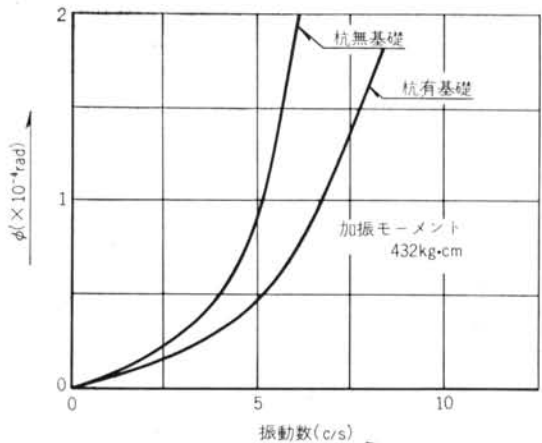
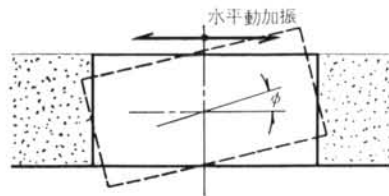


図-11 水平動加振における基礎の回転角

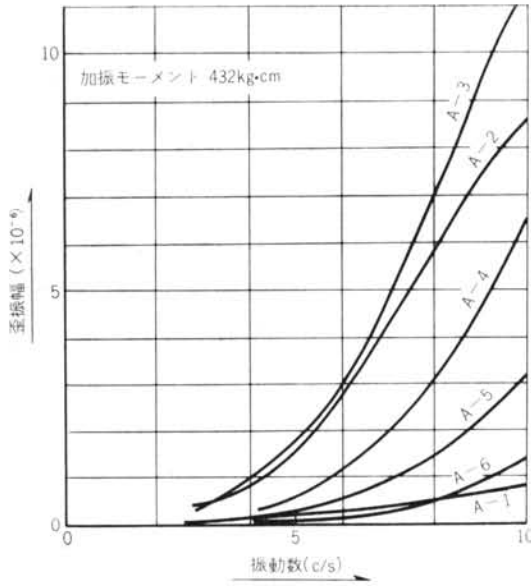


図-12 杭体に生ずる歪振幅—振動数曲線

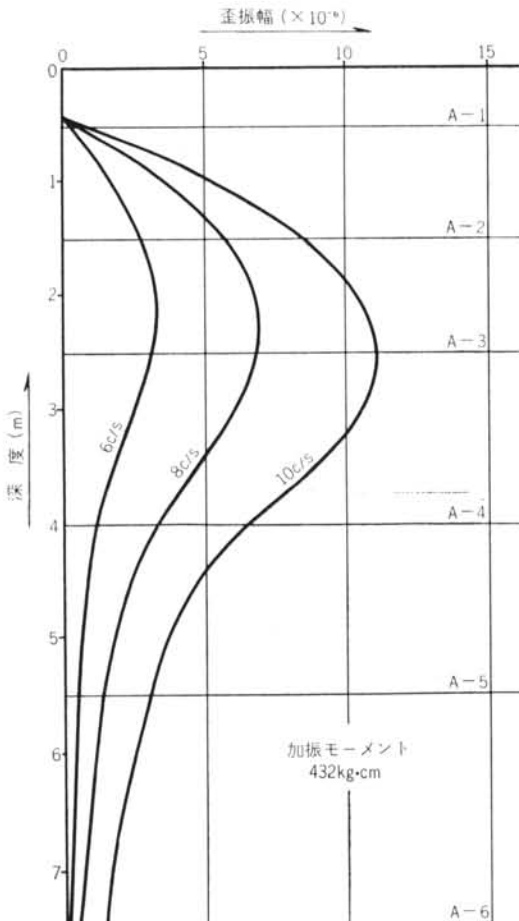


図-13 A列における歪振幅の分布図(水平動加振)

つぎに、上下動加振時における杭体応力の分布を歪測定の結果から整理し、それらの平均値特性を求めると、図-14のようになる。すなわち、杭頭において歪は最大で、深くなるにしたがって指数的に減少している。

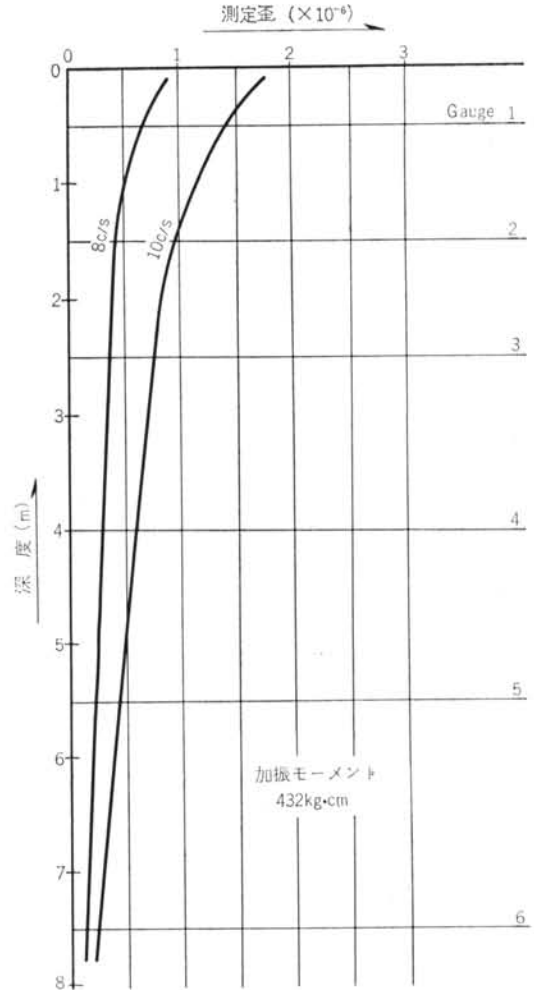


図-14 上下動加振における杭体歪分布図

以上の結果より、動的に加振力を加えたとき、基礎の荷重—変位特性を調べてみると、図-15になる。

なお、静的荷重—変位特性は、静的水平載荷試験の結果から引用した。図-15において、原点における勾配(荷重/変位)が静的な場合と動的な場合と一致するか否かに興味があった。

この点に関し、本実験の結果から、次のような結論が得られる。

- (1) 鋼管杭のようにバネ特性の明確なもので、しかも外力に対してその負担率が高い場合、動的な場合のバネ常数は、静的な場合と完全に一致する。

(2) 杭が無く、地盤のみによって支持されている場合、動的な場合のバネ常数は、静的な場合に比べて相当に小さくなる。本実験の場合、

静的バネ常数 = 9.7×10^4 kg/cm

動的バネ常数 = 6.0×10^4 kg/cm となっている。

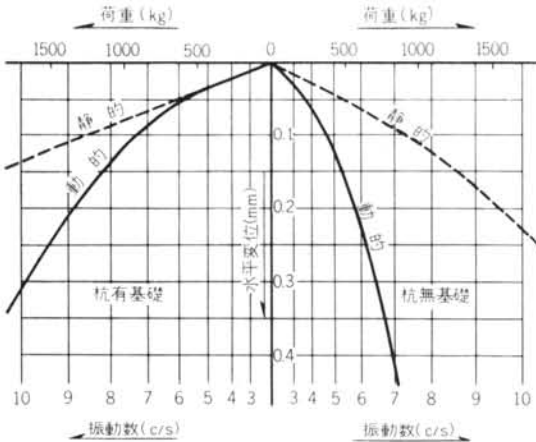


図-15 動的荷重—変位曲線と静的荷重—変位曲線との比較図

4.3 側面土の有る場合の強制振動試験

本実験は基礎周辺に土を埋め戻し、強制振動における側面土の効果を調べたものである。

実験の順序は側面土の無い場合と同様で、基礎上の変位と杭体応力を測定した。その他、本実験では基礎の側面に加わる土圧を動歪計にて測定した。

基礎の振動測定結果を整理して、図-16 に振動数—振幅曲線を、またロッキングの模様は、水平振動させたときの回転角—振動数の関係を実測値より計算し、図-17 に示した。

杭体の応力測定は、側面土が有る場合に基礎上の振幅が約 1/2 に減っているように、杭体応力も約 1/2 に減少している。分布の傾向は全く同じで、当然の結果が得ら

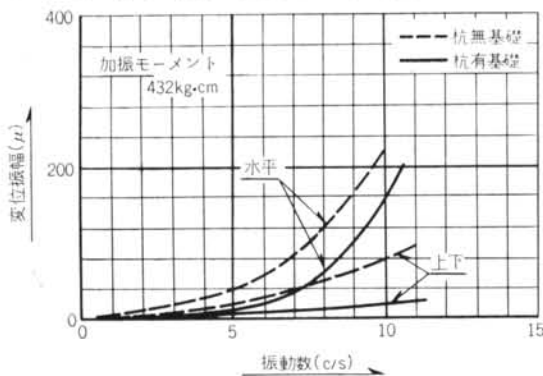


図-16 水平、上下動加振における振動数—変位振幅曲線

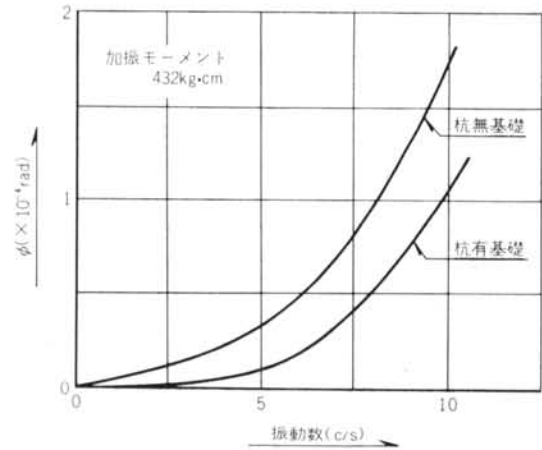
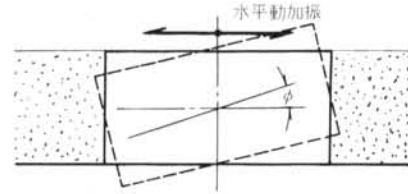


図-17 水平動加振における基礎の回転角

れたというだけにすぎない。

基礎側面土圧の測定は、基礎の側面に土圧計を取り付け、振動時に基礎側壁面に生ずる土圧を測定した。

杭無基礎の場合、不平衡質量を最大としたときの 3 個の土圧計の平均圧力を求め、図-18 に示した。

同図より、8c/s (加振力 2259kg, 基礎上の変位 0.27 mm) のとき、約 8 kg/m^2 という意外に小さい結果となっている。

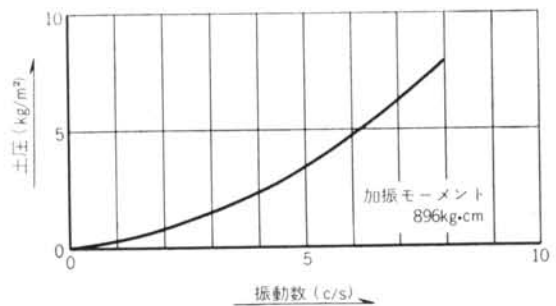


図-18 基礎側面土圧—振動数曲線

§ 5. 埋め戻した側面土の効果

以上の実験結果より、基礎上の変位について埋め戻し前後を比較すると、図-19、図-20 のようになる。

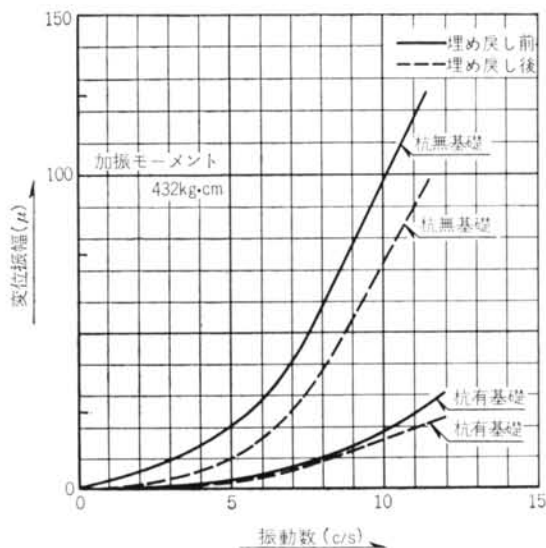


図-19 上下方向の埋め戻し前後の比較図

これらの測定結果でみる限り、埋め戻し土による効果は想像したよりはるかに大きい。本実験に関する限り、測定結果から次のような結果が要約される。

- (1) 埋め戻し土による効果は、上下動に比べて水平動の場合の方がはるかに著しい。
- (2) 埋め戻し土による効果は、杭有基礎に比べて杭無基礎の場合に著しい。
- (3) 水平動においては、基礎の振幅が大きくなるほど効果が著しい。
- (4) 上下動においては、埋め戻し土による効果は、基礎の振幅にあまり関係しない。

このように、基礎の周辺に土を埋め戻すことによって、特に水平動の場合に基礎の振幅が著しく小さくなることは事実である。しかし、図-18に示したように、基礎の側面で基礎が地盤から受ける抵抗は、意外に小さいのである。

実験中に、基礎と周囲の地盤との界面にわずかな隙間すら認められたぐらいで、側面土によって基礎の運動が拘束されたと考えるだけでは、上記の効果は説明されない。周辺土の運動は、むしろ基礎底の地盤から伝えられるものであろう。ともかく、周辺土の無い場合に比べて、周辺に約 13m^3 の土が付加され、これが基礎と一緒に相当な振幅で運動するのであるから、加振力に対する負荷が大幅に増えたことになる。すなわち、側面土は基

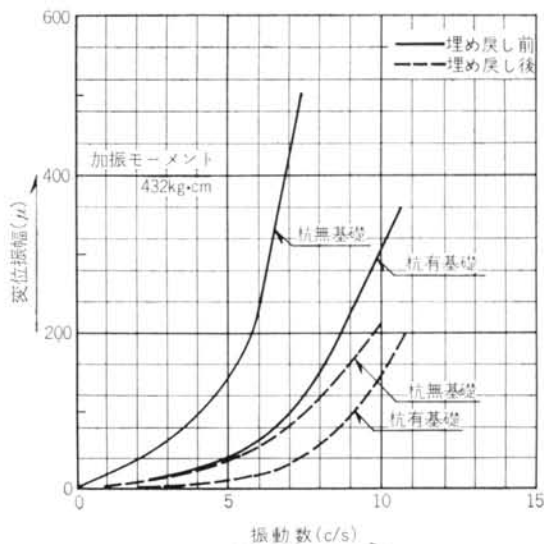


図-20 水平方向の埋め戻し前後の比較図

礎に対して **spring action** を与えることよりも、付加された **mass** に効果が優越し、**virtual mass** が増えたような効果として考えられるのではないだろうか。

ただ、杭無基礎の場合に、水平動が上下動の場合に比べて効果が著しいのは、水平動の場合には埋め戻した土の重量によって、基礎底の接触地盤の水平剛性が増えることも手伝っているのではなかろうか。

結局、側面土の効果は、側面土によって基礎の運動が直接拘束されると考えるよりも、**virtual mass** の増加と、土質力学でいう「土かぶり圧」に似た効果で説明されるように思える。この辺の疑問は、地震時の構造物の地下壁の効果に関連して、後日の研究課題として残しておくことにしたい。

その他、ダイナマイトを爆発させ、地盤を伝播する弾性波の速度、また起振機の運転中における基礎周辺地盤上の振動分布等も測定したが、紙面の都合等で略したい。

なお、本論文は実験結果の報告と簡単な考察程度にとどめ、本資料をもとに、機械基礎に関する理論解析等を別の機会に行なってみたいと思っている。

最後に、実験の計画、試験体の製作に当り、いろいろとご援助をいただいた徳山曹達・施設部の下本五郎氏、現場責任者の荒瀬義晴氏に感謝の意を表します。

また、今回の実験は、当研究所の山原浩氏の計画、指導のもとで行なったことを付記しておく。