

斜組杭の地震時応力について

九大 正員 小 平 清 真
同 〇 学生員 荒 牧 軍 治

1. まえがき

最近の杭基礎の発達 特に鋼管杭の発達に著しく、軟弱な地盤における長大な構造物の建設を可能にしている。それと共にその耐震性が重要な問題となり、多くの研究がなされている。地震時水平力に抵抗する方法として二つの方法が考えられる。一つは杭の曲げ剛性で地震時水平力に抵抗しようとする考え方であり、もう一つは斜杭を組み合わせる事により曲げ剛性と共軸力で抵抗させようとする考え方である。しかしその設計法はいずれも上部構造物の地震時慣性力を杭頭に水平に静的に作用させるものである。しかし杭基礎が多く用いられている軟弱な地盤は地震時にせん断振動を行い大きく変位し、杭基礎に大きな影響を及ぼすと考えられる。特に斜組杭のように水平変位を小さくするように作られた構造物は地盤のせん断振動の影響を大きく受け、従来考えられていたものとは異った挙動をすることが考えられる。本研究はかかる見地から斜組杭基礎に及ぼす地盤変形の影響について考察を行い、特に斜杭の軸方向周面マサツカおよび先端地盤反力などの境界条件について考察し、さらに振動台の上に置いた砂箱を用いて模型実験を行い、地盤変形の影響を調べたものである。

2. 地盤変形を考えた杭の横方向および軸方向抵抗理論

斜組杭は図-1のように3本より成り、頭部に載荷荷重 W があるものとする。斜杭1, 3は逆対称であり、地震時水平力に対して、軸力と曲げモーメントで抵抗し直杭2は曲げモーメントのみで抵抗する。また地盤からは横方向には変位に比例した反力を受け、軸方向には軸方向変位に比例した周面マサツカと先端からの先端反力をうけるとする。また上載荷重は水平方向にのみ変位し、ロッキング振動は行わないとする。

図-1, 図-2に示すように、上層地盤厚を H 、空中部分高を h 、杭の外径を D 、単位体積重量を w 、断面二次モーメントを I 、弾性係数を E 、杭頭の載荷重量を W 、また上層地盤のせん断弾性係数を G_m 、単位体積重量を w_m 、横方向地盤反力係数を K 、重力の加速度を g 、下層地盤の地震動を u_0 、杭および上層地盤の変位を \bar{y} 、 \bar{u} 、下層地盤に対する相対変位 y 、 u 、地震時杭に付着すると考えられる重量を $w_m b D$ 、とすれば直杭2の曲げ変形に対する微分方程式は次のように表わされる。

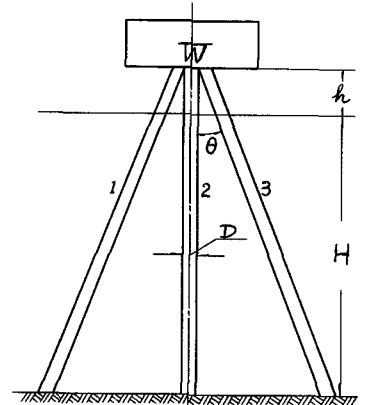


図-1

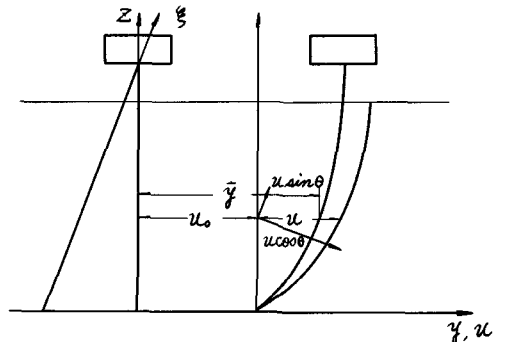


図-2

$$EI \frac{\partial^4 \bar{y}_2}{\partial z^4} = -\frac{wA}{g} \frac{\partial^2 \bar{y}_2}{\partial t^2} + P_{2m} \quad (1)$$

$$P_{2m} = KD(\bar{u} - \bar{y}_2) - \frac{wmbD}{g} \frac{\partial^2 \bar{y}_2}{\partial t^2} \quad (2)$$

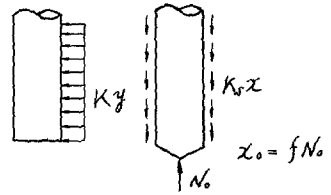


図-3

図-2のように z の方向を定めると斜杭上の曲げ変形に対する基本微分方程式は次のようになる。

$$EI \frac{\partial^4 \bar{y}_1}{\partial z^4} = -\frac{wA}{g} \frac{\partial^2 \bar{y}_1}{\partial t^2} + P_{1m} \quad (3)$$

$$P_{1m} = K_0 D(\bar{u} \cos \theta - \bar{y}_1) - \frac{wmbD}{g} \frac{\partial^2 \bar{y}_1}{\partial t^2} \quad (4)$$

K_0 は斜杭軸直角方向の地盤反力係数である。軸方向には周面より変位に比例した抵抗を受けるとし、その比例定数を K_s とすると基本微分方程式は次のように書ける。

$$\frac{wA+Q}{g} \frac{\partial^2 \bar{x}}{\partial t^2} = EA \frac{\partial^2 \bar{x}}{\partial z^2} - K_s D(\bar{x} - \bar{u} \sin \theta) \quad (5)$$

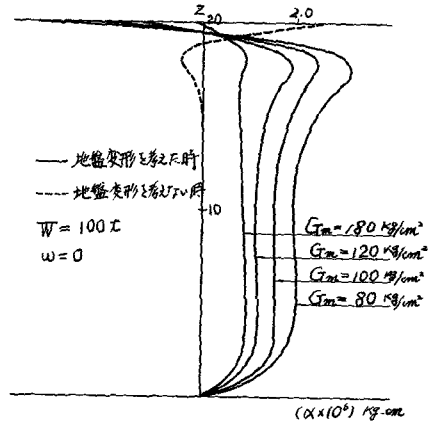


図-4 曲げモーメント分布

なお Q は杭の軸方向振動の際、杭に付着すると考えられる工の重量であり、 z は下層地盤に対する杭の軸方向(z 方向)の相対変位、 \bar{x} は軸方向の変位である。

(2), (4), (5) の式中の \bar{u} は地盤のせん断振動に関する次の微分方程式を解くことにより得られる。

$$\frac{\partial}{\partial z} (G_m(z) \frac{\partial \bar{u}}{\partial z}) = \frac{w_m}{g} \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial t^2} \quad (6)$$

(6) 式は次のような境界条件で解くことができる。

(i) $z=0$ において $\bar{u} = u_0$

(ii) $z=H$ において $G_m \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = 0$

以上の式で G_m , K , K_0 を深さ方向に一定とし下層地盤からの地震波を定常振動 $u_0 = (\alpha g / \omega^2) \sin \omega t$ とすると解は容易に求まる。その解に境界

条件を入れて未知定数を決定することができる。特に軸方向の先端では $X = f N_0$ 、すなわち、先端の軸力に比例した変位を x とす。 f は地盤の性質によって定まる定数で通常のバネ定数の逆数の dimensionを持つ。先端で軸方向に固定された時は 0 である。

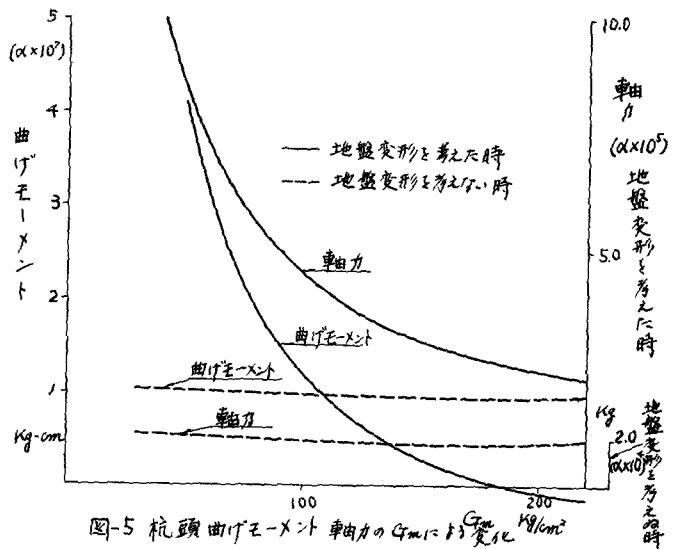


図-5 杭頭曲げモーメント 軸力の G_m による変化

3. 数値計算

数値計算においては簡単のために空中部分のない杭を選び、土の諸性質および先端支持の条件によって斜組杭がどのような影響を受けるかを考察してみた。斜組杭の横方向地盤反力係数 K_0 は直組杭の横方向地盤反力係数 K とは異った値を取ると思われるが、 θ を 15° という小さい値を取ったので $K_0=K$ とみなして計算を行った。また杭に付着すると考えられる土の重量はまだ不明な点が多いのでここでは考えなかった。

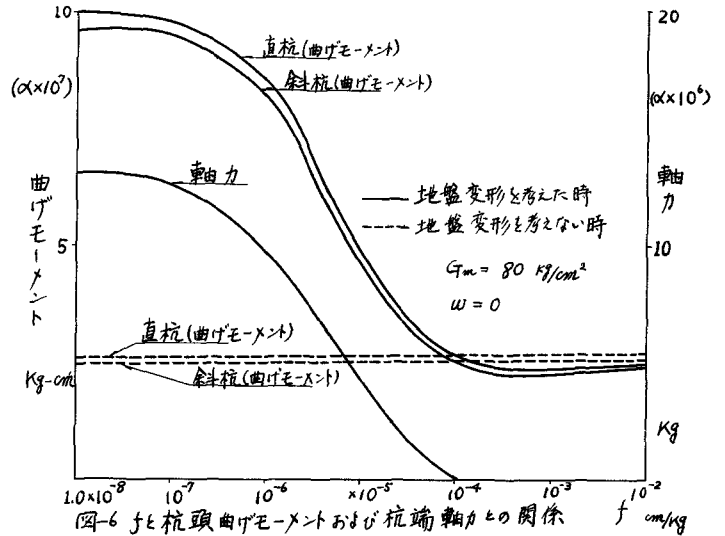
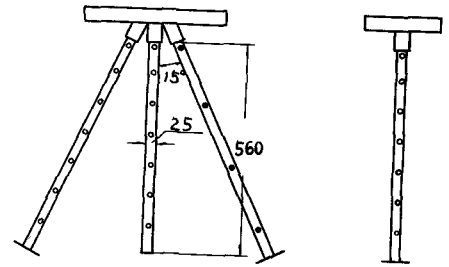


図-4 f と杭頭曲げモーメントおよび杭端軸力との関係

図-4は直組杭の曲げモーメント分布を地盤変形を考えた場合と考えない場合について示したものである。 G_m が小さくなるにしたがって、すなわち、地盤が軟弱になるにしたがって地盤変形が大きくなるのでその影響を大きく受け、相当大きな曲げモーメントを生じる。地盤変形を考えた場合に曲げモーメントが地盤変形を考えた場合と逆符号になるのは、地盤変形を受ける杭が斜組杭の軸力によって定められているためであろう。またこの二つの方法によって得られた曲げモーメントの差が地盤変形の影響である。

図-5は杭頭における曲げモーメントおよび軸力の G_m に対する変化を示している。杭頭の曲げモーメントが最大値ではないけれども一応の比較にはなると思われる。曲げモーメントの符号は逆であるが絶対値を比較したものであり、軸力はオーダーが違っているので別の座標で示した。これから明らかのように、 G_m が 100 kg/cm^2 以下になると頭部における曲げモーメントは急激に増大し、従来の方法で求めた値よりはるかに大きな値を示す。また軸力はオーダーが異なるほど大きな影響を受けていることがわかる。



- モーメント測定ゲージ
- 軸力測定ゲージ

図-6は先端変位定数 f の変化に対する軸力、曲げモーメントの変化を示したものである。 f が 1×10^{-6} までは軸力、曲げモーメント共にほとんど影響はないが $10^{-4} \sim 10^{-7}$ の間で曲げモーメント、軸力共に急激に増大する。 10^{-7} 以下になると曲げモーメント、軸力共に一定となり、下端ヒンジの場合に一致してくる。実際には f は $10^{-4} \sim 10^{-6}$ の間にあると考えられるので先端の条件によって曲げモーメント、軸力に相違の差異が生ずることが考えられる。計算に用いた諸元は

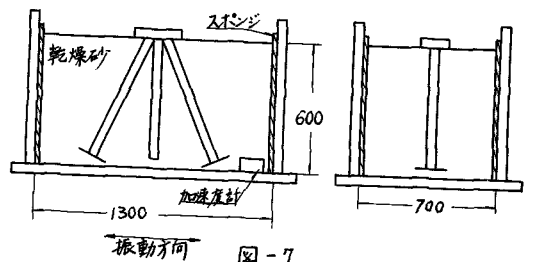


図-7

は次の通りである。

$D = 50 \text{ cm}$, $E = 2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$, $H = 20 \text{ m}$, 鋼管厚 $t = 0.9 \text{ cm}$
 $\omega = 7.8 \text{ T/m}^3$, $\omega_m = 1.8 \text{ T/m}^3$, $\theta = 15^\circ$ $K_s = 1.0 \text{ kg/cm}^2$, $W = 100 \text{ T}$

4. 模型実験

実験装置は図-7に示すように $1000 \times 700 \times 700$ の木製の砂箱の内側四方にスポンジを張り、乾燥砂を入れ、杭として3本の斜組杭を用いた。直杭と1本の斜杭には曲げモーメント測定用の歪ゲージをはり、もう一本の斜杭には軸力測定用の歪ゲージをはった。杭は外径 25 mm 、内径 22 mm のベークライトチューブを用い、杭頭部は回転拘束とした。斜杭の先端には先端及力の条件を変えられるようにアクリライトの正方形の板をはり、この大きさを種々変えて行った。また載荷重量 W を種々変えて実験を行った。

この模型杭を設置した砂箱を振動台上で水平に振動させて加速度 αg を種々に変えた場合の曲げモーメントおよび軸力を測定し、次に振動台を停止させて、杭の頭部に水平力 $H = \alpha H$ を水平に加えた時の杭に生ずる静的曲げモーメントおよび軸力を測定した。図-8はいろいろの α に対する曲げモーメントと軸力の振動歪と静的歪を加えた場合の歪とを示した一例である。図から分るように地盤変形を考えた場合は静的に荷重をかけた場合よりもはるかに大きな歪が生ずる。また振動させた場合の歪が必ずしも震度 α に比例してはいないのは震度の大小により砂の動きが異なるためであると考えられる。

5. まとめ

以上のように地震時において杭に生じる曲げモーメントおよび軸力は地盤変形を考慮する場合には、地盤変形を考慮しない場合よりも相当大きな値を示すことが分った。理論式からも明らかのように、地盤の変位はせん断弾性係数 G_m によって大きく変わるので、 G_m の値、その深さ方向の変化、 G_m と横方向及び軸方向地盤反力との関係を知らねばならない。また先端の条件、すなわち f によっても曲げモーメント、軸力に大きな違いがあることが理論的に明らかになったが、現在実験的に考察を行っている。また実験に用いた乾燥砂の種々の性質、せん断弾性定数、横方向および軸方向のバネ定数、先端変位定数等についても現在考察中である。さらに、本研究では定常振動のみを取り扱ったが Random 振動では相当異った挙動を示すことが考えられる。これらについては、今後さらに研究を進めていく予定である。

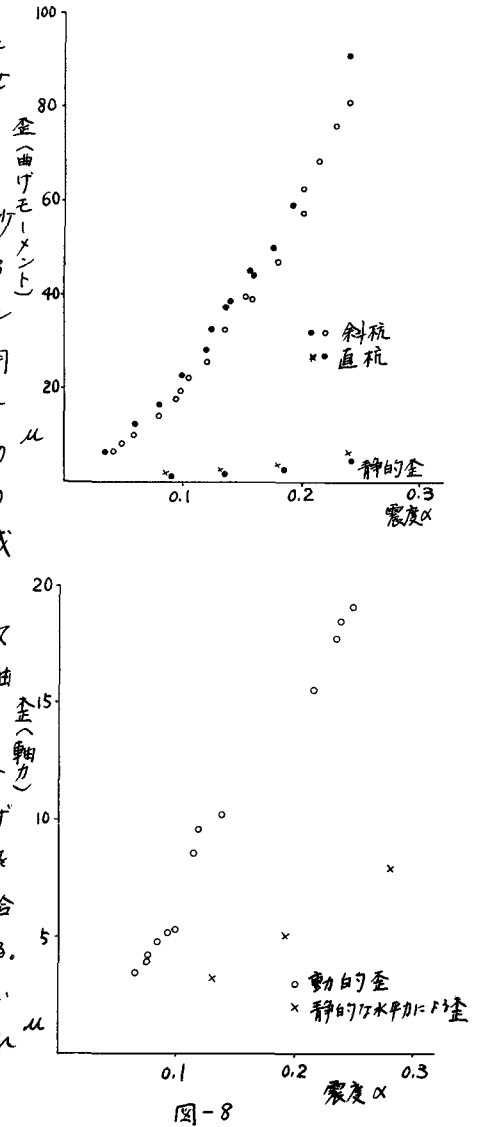


図-8