杭基礎の地震時挙動について

九州大学工学部　小坪清真
同　大学院　〇荒牧軍治
〃　川人達男

1. 緒言

著者等[1]は先に斜組杭において耐震設計を行なう場合は地盤変形の影響を考慮しなければならないことを理論的に明らかにし，模型実験により定性的に確かめた。特に内力においては従来の震度法と全く異った応力分布をすることを示し，地盤変形の影響が無視出来ないことを明らかにした。しかし，前研究においては定常的な場合，特に$\omega=0$の場合のみを取り扱った。また地盤は杭頭まで土がある場合だけであった。本研究においては実際のランダム地震波に対する地盤変形を考慮した応答計算を行ない，従来までの地盤変形を考慮しない場合の計算結果と比較検討したものである。また斜組杭の計算をする場合非常に重要な要素となる軸方向周面地盤反力係数，および杭先端変形係数に関して，運輸省第四港湾建設局が博多港須崎埠頭工事の際行なった静的垂直載荷試験のデータを利用して計算を行なったので併せて発表する。

2. 杭周面地盤反力係数および杭先端変形係数について

計算に使用したデータは，昭和41年博多港須崎埠頭10m岸壁において行なわれた，杭No3の単杭鉛直載荷試験のものである。詳しくは第四港湾建設局博多港工事事務所の発行した『博多港須崎埠頭−10M岸壁鋼管試験報告　第3報資料編　1966年　7月』参照

実験は外径65.0cm，厚さ1.1cm，長さ23m（地上部分11.0m，地中部分13.0m）の鋼管杭に防水保護を施した歪ゲージを貼付したものを用いた。測定は緩速載荷5サイクル，急速載荷1サイクルに対して，歪およびダイヤルゲージを用いて杭頭変位について行なった。

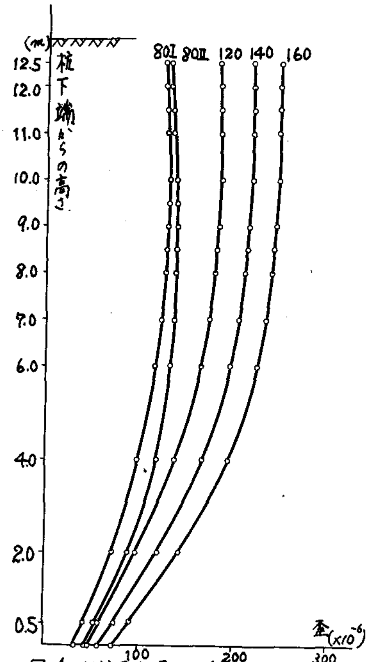

図-1　測定歪より最小二乗法で求めた歪曲線

実験データの整理および計算は次の要領で行なった。

イ) 歪分布を3次曲線と仮定して最小二乗法より求める。

ロ) $dN = EA\,d\varepsilon$ より単位長さ当りの周面摩擦力を求める。

ハ) 杭の変位＝（杭頭沈下量）−（杭の縮み）より各点の変位を求める。

ニ) 周面地盤反力係数＝（その点における周面摩擦力）／（杭の変位）
　　杭先端変形係数＝（杭先端変位）／（杭先端軸力）

イ)で求めた歪分布の1例を図−1に示す。図−2は杭先端軸力と杭先端沈下量の関係を示したものである。図より明らかなようにほぼ1次比例していると見なしてさしつかえない。杭基礎は通常本実験に用いられた杭と同様基盤層（N値50以上）まで到達させて支持杭として用いるのが普通である。その場合杭先端変形係数は$0.5\sim0.7\times10^{-5}$ cm/kg 位とすればよ

いと思われる。しかしこの係数は地盤の影響を非常に顕著に受けるので実際使用する場合には現場実験を行ない確かめることが望ましい。図-3は周面地盤反力係数の分布の1例を示したものである。図から明らかなようにほゞ三角形分布をしていると見なしてよいようである。しかしこれは必ずしも地盤の硬さが三角形分布をしていることにはならない。すなわち土の非線型性の影響が大きく表われていると見なすべきであろう。しかし静的な設計計算のみを行なう場合にはこのことは問題とはならない。しかし動的な計算を行なう場合はこの値をこのまゝ用いることには問題がある。今後は動的な場合についてより厳密な実験、解析が必要である。

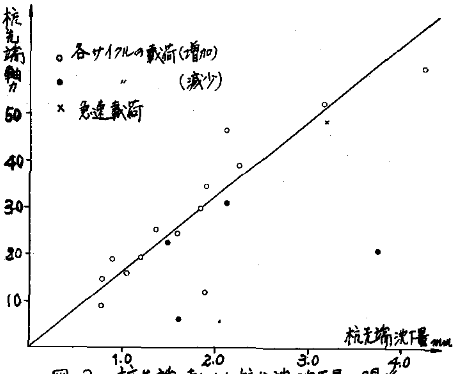

図-2　杭先端軸力と杭先端沈下量の関係

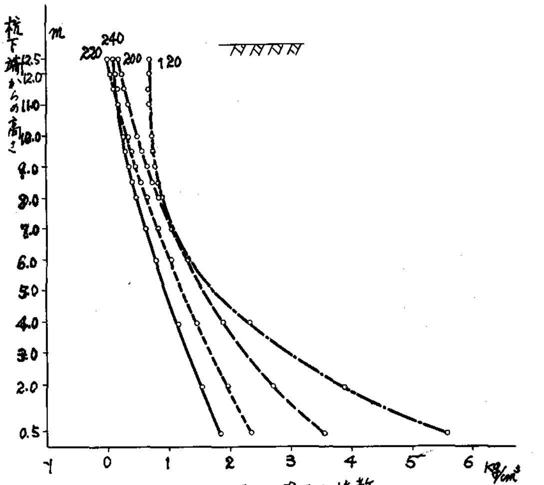

図-3　周面地盤反力係数

3. 杭基礎の地震応答計算

3.1. 序

地震時における地盤の応答計算法には種々の方法が考えられる。広く一般に用いられている方法としては質点系に分ける方法, Modal Analysis, 波動論による方法等がある。実際には基礎地盤を伝わって来たせん断波が表層下端から入射し, 表層をせん断波が反射屈折して複雑な挙動をすると考えるべきであろう。しかし実際に波動として構造物との interaction を考えるのは非常に困難であるのでより簡便な方法が必要である。

そこで著者等は, Modal Analysis を用いて杭基礎の地盤変形を考慮した応答計算法を提案し, 前論に用いた斜組杭の応答計算を行ない, その動的挙動を明らかにした。

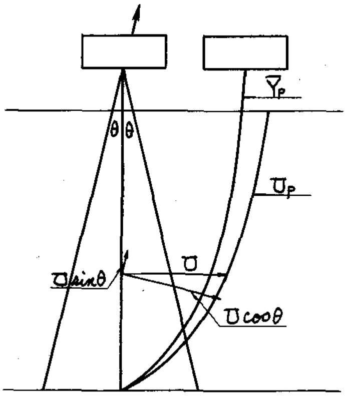

図-4

3.2. 基本的考え方

Modal Analysisの特徴は計算の簡便さにあるといえる。しかし地盤変形の影響,すなわち構造物と地盤との相対変位に比例する反力をLagrangeの方程式で一般力として用いた場合は計算が非常に複雑になるばかりでなく, 地盤が深くなると計算値に相当の誤差が出て来る。以上のような欠点を除くために次のような考えに基づいて計算を行なった。

まず地盤は変形せず杭基礎はバネだけで支えられていて減衰はないものとする。考えている系の振動数方程式を求め, 固有振動数n_r, および振動型Y_rを求める。振動型Y_rを基準座標とし, 一般座標をa_rとすると基盤層における地震加速度$\ddot{\phi}$と表層地盤と基盤層との相対変形により生じる加速度による応答変位yは次式で表わされる。　$y=\sum_{r=1}^{R} a_r Y_r$ ……(1)　(Rは計算に用いる最高次数)

次に地盤はセン断振動を行なってるとして地盤のせん断振動の方程式より p次の振動型 $\bar{U}_p$ を求めると，地盤の変位 u は b_p を一般座標として次式で表わされる。 $u=\sum_{p=1}^{N} b_p \bar{U}_p$ ……(2)

次に地盤が振動型 $\bar{U}_p$ のように静変位した時の杭基礎の変位を $\bar{Y}_p$ とすると(2)式で表わされる一般座標 b_p を用いて，地盤が(2)式で示されるような変形をした時の杭基礎の変位は次式で表わされ得る。 $y=\sum_{p=1}^{N} b_p \bar{Y}_p$ ……(3)

ゆえに基盤から入力波が与えられた場合の杭基礎の応答変位 y は(1)式と(2)式の和として示される。

次にモーメント，軸力，せん断力等，内力Mを求めるには変位と同様にして次式で求められる。

$$M=\sum_{r=1}^{R} a_r M_r + \sum_{p=1}^{N} b_p M_p \quad \cdots\cdots (4)$$

ただし，M_rは杭基礎が振動型 Y_r の形に変形した時に杭に生ずる内力の型であり，$\bar{M}_p$ は地盤が $\bar{U}_p$ の形に静変位した時に生じる内力の型を示している。

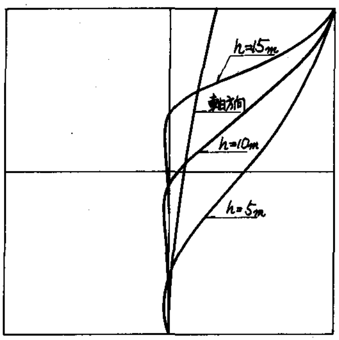

図-5 振動型(変位) Y_1

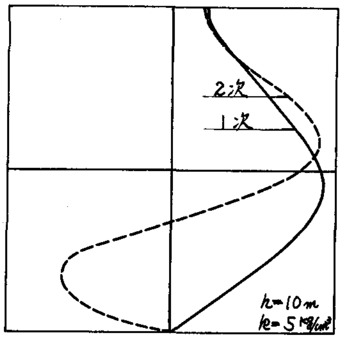

図-6 振動型(変位) $\bar{Y}_p$

3.3. 地盤および杭の応答計算式

地盤の応答計算式は Lagrange の方程式に代入して次式で示される。

$$\ddot{b}_p + 2h_p n_p \dot{b}_p + n_p^2 b_p = -\beta_p \ddot{\phi} \quad \cdots\cdots (5)$$

ただし，h_pは第p次の減衰定数，β_pは刺激係数，$\ddot{\phi}$は基盤層における地震加速度，n_pは固有円振動数である。

次に杭基礎の応答計算式は次式で示される。

$$\ddot{a}_r + 2h_r n_r \dot{a}_r + n_r^2 a_r = -\frac{1}{{}_0M_r}\left\{ {}_1M_r \ddot{\phi} + \sum_{p=1}^{N} \ddot{b}_p \bar{M}_{pr} \right\} \cdots\cdots (6)$$

ただし，h_rはr次の減衰定数，n_rはr次の固有円振動数，${}_0M_r$，${}_1M_r$，$\bar{M}_{pr}$ 慣算質量である。右辺の一般力の項の第1項は基盤層における地震加速度$\ddot{\phi}$による慣性力の項，第2項は，表層地盤と基盤層との相対変形により生じる慣性力の項である[2]。

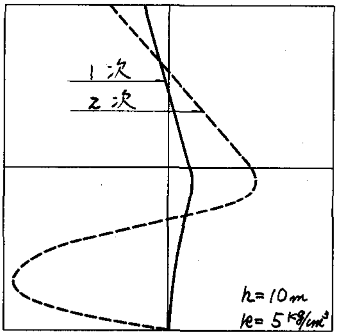

図-7 振動型(モーメント) $\bar{M}_p$

(5),(6)式を用いれば地盤の応答と杭の応答が個々に得られ非常に簡単に地盤変形を考慮した応答計算を行なうことができる。

3.4 斜組杭の地震時応答計算例

数値計算に当っては前論と同様に図-4の様な系を用い，次のような仮定を設けた。

(1)地盤のせん断弾性定数，横方向および軸方向の地盤反力係数は深さ方向に一定であるとする。

(2)杭下端ではピン構造およびバネ支持とし，杭頭は回転拘束でロッキング振動は行なわないとする。

(3)杭長は20m，土の深さは5m，10m，15mで代表させる。

(4)土の付着質量は無視する。

(5)基盤層から与えられる地震加速度$\ddot{\phi}$としては比較的硬い地盤で得られた地震記録(Elcentro 地震 NS成分，1940)を用いる。

図-5,6,7は振動型Y及び内力の型Mの1例を示したものである。図-8は杭頭の応答変位である。図からも明らかなように地盤が浅い場合は(h=5m)ほとんど杭の固有周期で振動し地盤変形の影響をそれ程大きく受けない。しかし地盤が深くなると(h=15m)ほゞ地盤の固有振動数で振動し，地盤変形の影響が非常に大きいことがわかる。その中間の所では(h=10m)複雑な挙動を示し，地盤変形がむしろ，変位を小さくする方向に働くことがある。これらのことは図-9からも明らかである。図-10は直杭の杭頭曲げモーメントの最大応答であるが変位と全く同様に地盤が深い程地盤変形の影響を大きく受けることがわかる。斜組杭は直杭に比し，杭頭変位を小さくすることは出来るが地盤変形の影響を顕著に受けるので設計の際十分考慮しなければならない。地盤が浅い場合は斜組杭を用いることは十分有効であろう。

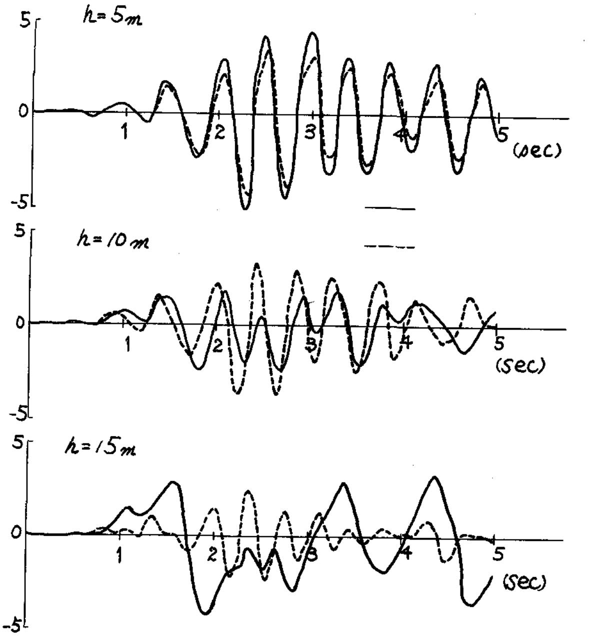

図-8 杭頭地震応答変位 (k=5kg/cm³, Gm=50kg/cm²)

4. 結語

本計算法は振動型さえわかれば非常に簡便に杭基礎の地盤変形を考慮した計算を行なうことができる。また，斜組杭においては地盤が深くなった場合地盤変形の影響を考慮して計算を行なわなければならないことが明らかになった。しかし，地盤変形は土のせん断弾性定数に大きく支配されるので，その絶対量，深さ方向の分布が更に明らかにされねばならない。

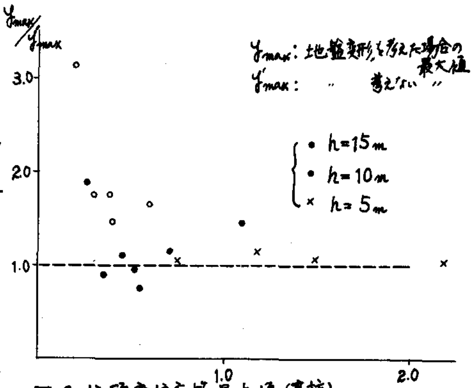

図-9 杭頭変位応答最大値(直杭)

5. 参考文献

(1) 小坪，荒牧：「斜組杭の地震時応力について」第9回地震工学研究発表会講演概要集 S42

(2) 小坪，荒牧：「地盤変形を考慮した斜組杭の地震時応答計算法について」九大工学集報 第42巻 2号 P129

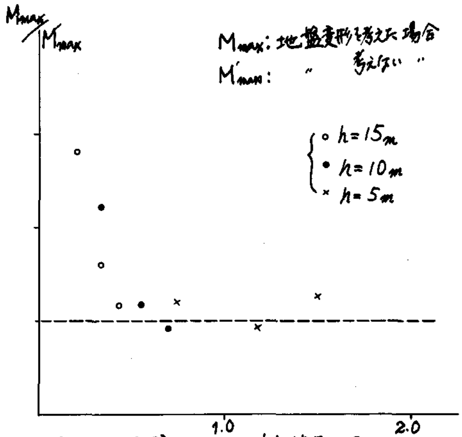

図-10 杭頭曲げモーメント応答最大値