

構造物基礎の非線形水平地盤反力について

京都大学工学部 後藤尚男, 京都大学工学部 吉原 進
 京都大学大学院 北浦 晴, 京都大学大学院 宮脇幸治郎

1. はしがき 地盤中に根入れされた構造物基礎の振動特性を解析するため、従来から種々の手法が取られてきたが、それぞれに長一短があり、現在のところいまだ決定的な手法はないようである。いわゆる地盤係数なる考えのもとに地盤の弾性効果をばねに置換する方法もそれらのうちの一つであり、いろいろの問題を包含しながらも解析の簡便さという点でしばしば利用されているのが現状であろう。この地盤係数を定める方法についても、半無限弾性理論を適用する方法やその他の考え方があり、とくに地表面上に設置された構造物基礎の上下あるいは回転振動については多くの研究が行なわれているが、地盤中に根入れされた構造物基礎の水平方向の地盤係数については、信頼できる研究成果があまり多く提供されていないようである。そこで本研究においては地盤中に根入れされた剛な構造物基礎の水平方向の地盤反力を室内実験から求めて検討すると同時に、従来からいわれている地盤係数についてその非線形部分をも考慮に入れて考察を加えた。しかる後その構造物基礎の回転応答を求めて実験結果と比較しようとしたものである。

2. 実験より求めた地盤反力

実験装置および実験方法に関しては、すでに発表したもの¹⁾とほとんど同様であるので省略する。用いた模型も先に用いたものと同じであって、厚 ± 20 mmの鋼板製(重量5 kg)で、その下部にヒンジを設けたものである。模型地盤は京都市内伏見産の粉粘土を含水比約40%で練り混ぜたものを均等に十分締め固めて用いた。模型の根入れ長は200 mmとした。使用した計測器その他も先のものと同一である。

模型側面に働く振動土圧あるいはこの局部ヒンジまわりのモーメント M_0 と基礎模型の回転角(以後基礎体回転角という)との関係を示したのが図-1である。これによると振動土圧は基礎体回転角に対してほぼ直線関係にあるが、二つの直線よりなるバネ γ 型の関係にあるとみることもできる。さらにその非線形性をみると、いずれの測定位置でも基礎体回転角が比較的小さい時に生じており、この更以後は P_0 を除いてはほぼ直線比例関係にある。つぎに図-2には振動土圧の深さ方向の分布を示したが、乾燥砂についての報告¹⁾と異なり地表面近くでもかなりの振動土圧が生じていることがわかる。一方図-3は

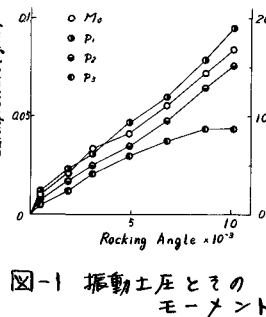


図-1 振動土圧とそのモーメント

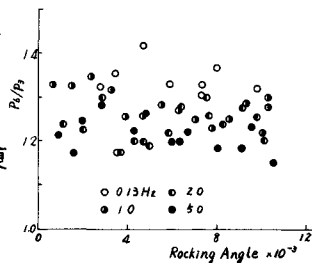


図-3 振動土圧の水平方向分布を表す指標 P_1/P_0

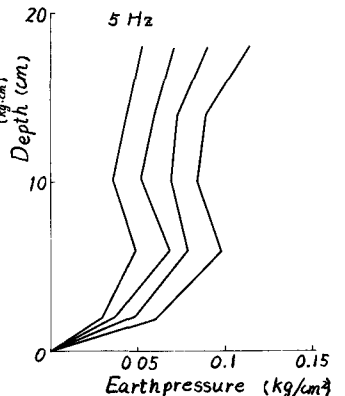


図-2 振動土圧分布

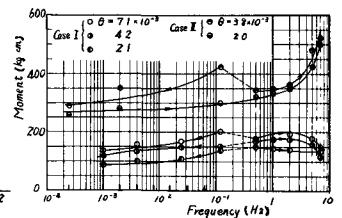


図-4 振動土圧モーメントの振動数特性

振動工圧の水平方向の分布を表す一つの指標として、 p_0/p_3 (p_0 , p_3 の測定位置は前報告参照)と基礎体回転角との関係を示したものである。これによると p_0/p_3 の値は乾燥砂の場合と同程度であるが、加振振動数が大きくなるにつれて少し小さくなり、水平方向の分布が一様になることと示している。他方振動工圧あるいはそのヒンジまわりのモーメントは同振数特性を有すると考えられるので、振動数とモーメントの関係を示したのが図-4である。これによるとこれらの関係が実験により要になっているが、一例として示しておく。これに関してさらに実地盤での実験を計画している。

以上地盤中に投入された剛基礎硬土に働く地盤反力についての実験結果をみたが、それによるとバイリニア型に近い非線形特性を有すること、また何らかの同振数特性を有することがわかった。つぎにこれらの得られたデータより、その非線形性をも考慮して、その地盤反力係数を求める(なお文中あるいは図中の Case I, Case II に関しては前報告参照のこと)。

3. 地盤反力係数 一般に地盤反力係数は地盤材料、構造物基礎の形状および高さ、構造物基礎と地盤との剛性比等によって大きな影響を受け、その分布形状も種々の形をとるといわれている。しかしその分布は砂地盤では三角形分布、粘土地盤では矩形分布に近いものになるともいわれているので、一般には図-5(c)に示されるような指数型で表わしうるものと考えられる。またある深さにおける振動工圧一変位の関係は、変位の多項式の形で表わしうるものとすれば、構造物基礎の任意の深さに働く振動工圧は次式のように表わせよう。

$$p(z, \theta(t)) = K_5 \cdot f(\theta) \cdot z \quad \text{----- (1)}$$

ここに

$$K_5 = K_0 (1 - z/H)^n \quad \text{----- (2)}$$

K_0 ; 基礎底部での地盤反力係数, n ; 地盤反力係数 (a) 構造物基礎 (b) 作用す力 (c) 地盤反力係数の分布を表す形状指数, $f(\theta)$; θ に関する多項式, $\theta(t)$; 基礎体回転角, z ; 構造物基礎の底面からの高さ, H ; 構造物基礎の投入埋深。

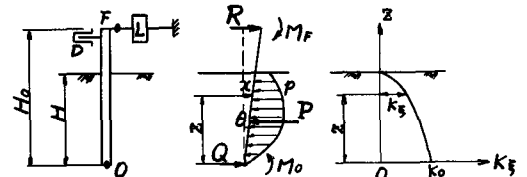


図-5 構造物基礎に働く力と地盤反力係数

上式(1)の K_5 は地盤反力係数を示す項であり、その分布形状は形状指数 n で決められる。たとえば $n=1$ のとき三角分布, $n=0$ のとき矩形分布となる。つぎに $f(\theta)z$ は振動工圧の非線形部分を表す項である。すなわち $f(\theta)$ を θ に関する最小多項式の形式に置くことにより

$$f(\theta)z = \theta z (1 \cdot \theta^{m-1} + a_2 \theta^{m-2} + a_3 \theta^{m-3} + \dots + a_m) \quad \text{----- (3)}$$

となる。ここに $a_2, a_3, \dots, a_m$ および m は最小乗法などによって決められる定数である。また θ は基礎体回転角であり、時間 t の関数である。

いま図-5(a)に示すように構造物基礎底部でヒンジとして、その上端に強制変位を加えた場合(実験の Case I に相当する)を考える。まず振動工圧 p による水平方向の合力 P は次式となる。

$$P = B \int_0^H p(z) dz = B K_0 f(\theta) H^2 \frac{1}{(n+1)(n+2)} \quad \text{----- (4)}$$

ここに B ; 構造物基礎の奥行きである。また振動工圧 p による O 点(ヒンジ)まわりのモーメント M_0 は

$$M_0 = B \int_0^H p(z) z dz = B K_0 f(\theta) H^3 \frac{2}{(n+1)(n+2)(n+3)} = \alpha H_0 R \quad \text{----- (5)}$$

となる。ここに α は振動土圧による変りまわりのモーメント M_0 と頭部での加力 R によるモーメント $H_0 R$ の比率である。さらに下変(構造物基礎の上端)まわりの振動土圧によるモーメント M_F は

$$M_F = B \int_0^H p(z) (H_0 - z) dz = B K_0 f(\theta) H^2 \frac{(n+3) H_0 - 2H}{(n+1)(n+2)(n+3)} = H_0 Q \quad \text{----- (6)}$$

となる。式(5), (6)より地盤反力係数の形状指数 n は

$$n = \frac{Z(Q + \alpha R) H}{\alpha R H_0} - 3 = \frac{2 P H}{\alpha R H_0} - 3 \quad \text{----- (7)}$$

で与えられる。この式(7)の右辺の P (振動土圧合力), R (頭部での加力), α , H および H_0 (構造物基礎の高さ)の各値はそれぞれ既知であるので、地盤反力係数の分布形状は容易に求められる。

つぎに式(4)に式(3)の $f(\theta)$ を代入すれば

$$P = A_1 \theta^n + A_2 \theta^{n-1} + A_3 \theta^{n-2} + \dots + A_m \quad \text{----- (8-a)}$$

と表わせる。ここに

$$A_1 = B \frac{K_0 H^2}{(n+1)(n+2)}, \quad A_i = B \frac{K_0 H^2}{(n+1)(n+2)} a_i \quad (i=2, 3, \dots, m) \quad \text{----- (8-b)}$$

とおけば模型実験により得られる $P-\theta$ の測定値を用いて、最小自乗法により式(8-a)の各係数 $A_1, A_2, \dots, A_m$ を決定できるので、同式(b)により

$$K_0 = A_1 (n+1)(n+2) / (B \cdot H^2) \quad \text{----- (9)}$$

として、構造物基礎底部での地盤反力係数が決められる。

このように実験結果をもとにして、構造物基礎模型に働く地盤反力を、地盤反力係数として評価することを試みた。つぎにこの地盤反力係数をいわゆる等価ばねに置換することが必要になる。いま構造物基礎はその底部のヒンジまわりの回転振動のみを行なう場合を対象としているので、当然このばねは回転ばねとなり、そのばね係数 k_r は次のように表わされる。

$$k_r = \frac{M_0}{\theta} = B \frac{f(\theta)}{\theta} K_0 H^2 \frac{Z}{(n+1)(n+2)(n+3)} = \alpha \frac{M_F}{\theta} \quad \text{----- (10)}$$

このばね係数は当然ながら必ずしも定数とはならず、 $f(\theta)$ と直接関係しているのがわかる。

また地盤反力は一般には履歴減衰を持つことはよく知られておりであるが、上式のばね係数 k_r の中にはその履歴は含んでいない。したがってこの k_r を用いて構造物基礎の振動挙動を解析すれば履歴減衰を無視したことになる正しい解析とはいえない。そこで本研究ではその履歴減衰を等価粘性減衰定数として取り入れることにした。

4. 結果と考察

以上のようにして地盤反力係数等を求めた結果を以下に示すが、式(3)の $f(\theta)$ はバリーニア型であるとして各係数を求めた。

まず図-6に振動土圧モーメントと加力モーメントの比率 α と基礎体回転角 θ の関係を示した。これによると乾硬砂における場合と同様に、 α は θ に対してほぼ一定であることがわかる。ただしCase IIの場合にはその比率 α がかなり小さく、振動土圧モーメントが非常に小さく計測されている。以下の図においてはこの α を用いることにした。

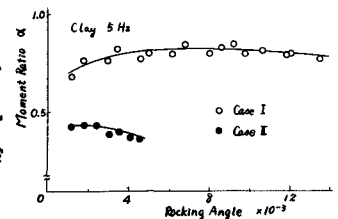


図-6 モーメント比

図-7および図-8は式(7)および式(9)より求めた地盤反力係数の形状指数 n および基礎模型底部での地盤反力係数 K_0 を図示したものである。これらによると n 、 K_0 とも基礎体回転角、加振振動数に対してほぼ一定値をとっていること、すなわち地盤反力係数はそれとあまり関係なくほぼ一定の値および類似した分布を示していることがわかる。しかしCase IIの場合には形状指数 n が振動数とともに大きくなっている。

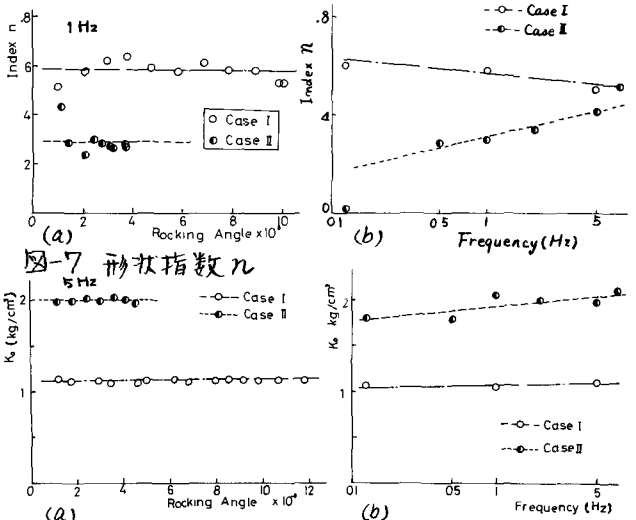


図-7 形状指数 n

これについてはよくわからないが、モーメントの比率 α が小さな値を示したことも関連しているようだが、この場合の計測が必ずしもうまくできなかったのかも知れない。またこのようにして得られた地盤反力係数の分布を図-9に示した。これによると必ずしも矩形分布(深さ方向に一様)であるとはいえず、むしろ三角分布に近い形状であることがわかる。またCase IIの場合には図-7(b)で見たとおり低振動数域には一様分布に近くなっている。さらに図-10には式(1)より求めた振動土圧分布を示した。

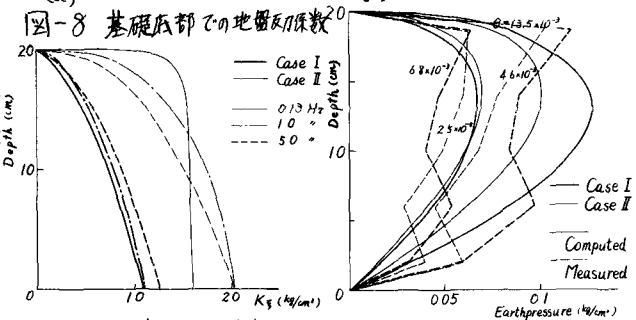


図-8 基礎底部での地盤反力係数 K_0

この振動土圧分布は実験結果と細部にわたって完全に一致しているとはいえないとしても、全体的にはかなり一致しているといえよう。さらにこのようにして得られた地盤反力係数の非線形性の効果を見るために、構造物基礎に働く抵抗力を回転ばねに置換したときのばね係数 K_0' (10)より求めて図示したのが図-11である。

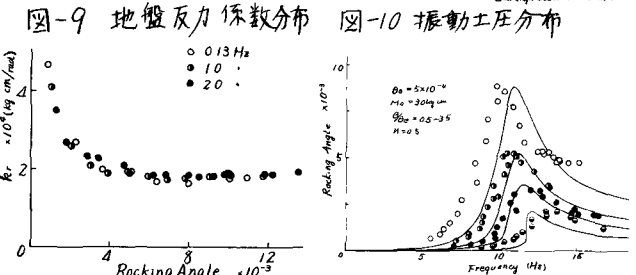


図-9 地盤反力係数分布

これによると基礎体回転角が 4×10^{-3} 程度までにはよく非線形性が現われており、以後はほぼ定数となり線形になっていることがわかる。これは図-11に示した振動土圧の動向とよく類似しているといえよう。最後に図-12は構造物基礎模型の抵抗モーメントを図-11より求めると同時に、減衰は別の実験結果より得られた履歴形状より等価粘り減衰係数を定めて、いわゆる slowly varying parameter method により求めた共振曲線と、実験より得られた共振曲線を示したものである。この計算に使用したパラメータは図中に記入してある。これによると両者は必ずしも完全に一致しているとはいえないが、計算結果は比較的良好にその傾向を現わしているといえよう。すなわち本研究で求めたばね係数はかなり実現象を表わしているものといえる。

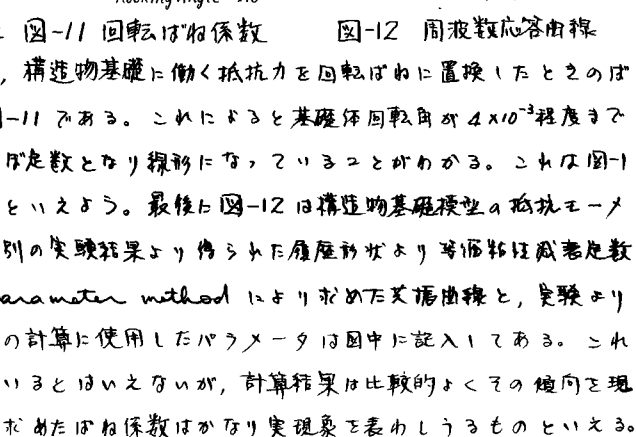


図-10 振動土圧分布

1) 吉原進, 北浦勝; 第3回日本地震工学シンポジウム(1970), IV-18, pp.611~618