

不動建設(株)中央研究所 正員 小川 充郎

同 正員 〇謝 明潔

1. まえがき

起振力あるいは衝撃力によるクイの動的貫入現象は、従来、クイの支持力に関連して研究されてきたが、本研究はクイの動的貫入現象そのものに焦点を当ててクイー地盤系をモデル化し、モデルの運動を理論的に解析するとともに、実際の現象を説明し、動的クイ打ち工法の施工性の問題やクイの動的支持力の推定に役立てようとするものである。本報文は、中間報告として、モデル化の過程、モデルの運動の解析結果、実際の現象との比較を述べたものである。なお、特にモデルのひとつとして選んだ質量-弾塑性バネ系に起振力が作用する場合の運動について詳述する。

2. クイー地盤系のモデル化

一般的なクイ (Driven Pile) の静的載荷試験による荷重-沈下関係を図-1に示す。静的な場合に現れる地盤の弾塑性的性質が動的な場合にも保存されると仮定すると、クイー地盤系を図-2に示すモデル1, 2などで表現することができる。ここで F_d は動的な貫入力で起振力あるいは衝撃力であり、 F_s は静的な貫入力で普通はクイと貫入機の自重である。クイの周面のまさつについては問題を簡単にするため無視するが、特に振動貫入の場合にはかなり小さいと考えられる。したがって、モデルにおけるバネ定数 K 、定値まさつスライダ-強度 s 、粘性係数 C がクイ下端の地盤の特性を表わしていると考ええる。静的な載荷試験からこれらを求めるとすれば、図-1に示すような解釈が可能である。

K , s , C は地盤以外にクイ下端の形状、断面積などに影響されると考えられるが、この点についての検討は次の機会に譲る。なお、場合によっては、動的貫入中、クイが上向きに変位したときにクイ下端の地盤に引張りがかかり、クイ下端と地盤が分離する可能性もあるが、定刻値からこの可能性はあまりないと考えられるので、分離現象はないとして解析する。

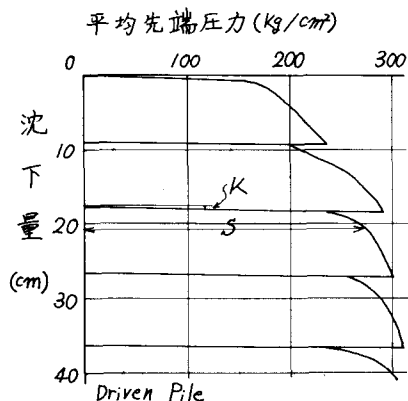
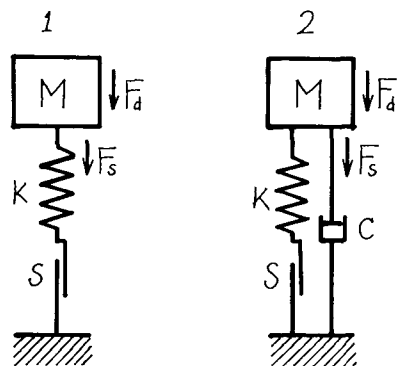
図-1 クイの載荷試験結果¹⁾

図-2 クイー地盤系のモデル1, 2

3. モデルの運動

モデル1に起振力が作用する場合は、 $M. \text{Я. Kyшыль}$ 及 $A. B. Шляхтин$ ⁴⁾ が、特殊な場合について解いており、モデル2に衝撃力が作用する場合は、 $D. D. Barkan$ ⁵⁾ が解いているが、ここではモデル1, 2に起振力および衝撃力が作用する場合について理論解を示し、簡単に説明する。

(i) モデル1, 2に起振力が作用する場合

図-3は質量Mに起振力が作用する場合の模式図である。バネとスライダは直列に結ばれているため両方が同時に作用することはないことに注目してバネが作用している $t_0 \sim t_1$ の変位 x_1 とスライダが作用している $t_1 \sim t_2$ の変位 x_2 に分けて考える。

t_0 は前のサイクルの、 t_2 はこのサイクルのスライダ-滑動終了時刻で、当然 t_0, t_2 において速度はゼロである。式を簡単にするため、 $S - F_0$ を S' と表わし、 t_0 においてバネが S'/k 縮んでいるとして変位の基準を定める。まずモデル1について考える。

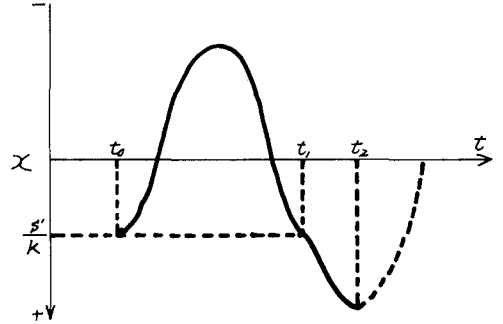


図-3 振動変位変位の模式図

$$t_0 \leq t \leq t_1 \quad M \frac{d^2 x_1}{dt^2} + k x_1 = P \sin \omega t \quad \text{---(1)}$$

$$t = t_0 : x_1 = S'/k, \frac{dx_1}{dt} = 0 \quad t = t_1 : x_1 = S'/k \quad \text{---(2)}$$

$$t_1 \leq t \leq t_2 \quad M \frac{d^2 x_2}{dt^2} + S' = P \sin \omega t \quad \text{---(3)}$$

$$t = t_1 : x_2 = x_1 = S'/k, \frac{dx_2}{dt} = \frac{dx_1}{dt} \quad t = t_2 : \frac{dx_2}{dt} = 0 \quad \text{---(4)}$$

以上から運動はつぎのように定まる。

$$t_0 \leq t \leq t_1 \quad x_1 = -\frac{P}{M(\omega^2 - \lambda^2)} \sin \omega t + C_1 \sin(\lambda t - \phi) \quad \text{---(5)}$$

$$t_1 \leq t \leq t_2 \quad x_2 = -\frac{P}{M\omega^2} \sin \omega t - \frac{S'}{M} \frac{t^2}{2} + C_2 t + C_3 \quad \text{---(6)}$$

ここで $\lambda^2 = k/M$, C_1, ϕ, C_2, C_3 は(2), (4)の条件により定まる定数

同様に1モデル2についてもつぎの通りである。

$$t_0 \leq t \leq t_1 \quad x_1 = \frac{P}{M\sqrt{4\varepsilon^2\omega^2 + (\lambda^2 - \omega^2)^2}} \sin(\omega t - \alpha) + \begin{cases} e^{-\varepsilon t} C_1 \sin(\sqrt{\lambda^2 - \varepsilon^2} t - \phi) & \text{for } \varepsilon < \lambda \\ e^{-\varepsilon t} (C_2 t + C_3) & \text{for } \varepsilon = \lambda \\ e^{-\varepsilon t} C_1 \sinh(\sqrt{\varepsilon^2 - \lambda^2} t - \phi) & \text{for } \varepsilon > \lambda \end{cases} \quad \text{---(7)}$$

$$t_1 \leq t \leq t_2 \quad x_2 = -\frac{P}{M\omega\sqrt{4\varepsilon^2 + \omega^2}} \sin(\omega t + \beta) - \frac{S'}{C} + C_4 e^{-2\varepsilon t} + C_5 \quad \text{---(8)}$$

ここで $\varepsilon = c/2M$, $\tan \alpha = 2\varepsilon\omega/(\lambda^2 - \omega^2)$, $\tan \beta = 2\varepsilon/\omega$, $C_1, \phi, C_2, C_3, C_4, C_5$ は(2), (4)の条件で定まる定数

(ii) モデル1, 2に衝撃力が作用する場合

図-4に示すように、運動はバネが作用している $0 \sim t_1$ の変位 x_1 と、スライダが作用している

$t_1 \sim t_2$ の変位 x_2 , 再びバネの作用している t_2 以後の変位 x_3 に分けられる。

時刻0に衝撃が加えられ質量が v_0 の速度で変位し始めたとし、この時の位置を変位の基準とする。

x_1, x_3 は、モデル1においてはモデル2の式の $\varepsilon = 0$ とした式に相当するので省略し、 x_2 のみ分けて示す。

$$x_1 = \begin{cases} \frac{v_0}{2\sqrt{\lambda^2 - \varepsilon^2}} e^{-\varepsilon t} \sin \sqrt{\lambda^2 - \varepsilon^2} t & \text{for } \varepsilon < \lambda \\ v_0 t e^{-\varepsilon t} & \text{for } \varepsilon = \lambda \text{ --- (9)} \\ \frac{v_0}{2\sqrt{\varepsilon^2 - \lambda^2}} e^{-\varepsilon t} \sinh \sqrt{\varepsilon^2 - \lambda^2} t & \text{for } \varepsilon > \lambda \end{cases}$$

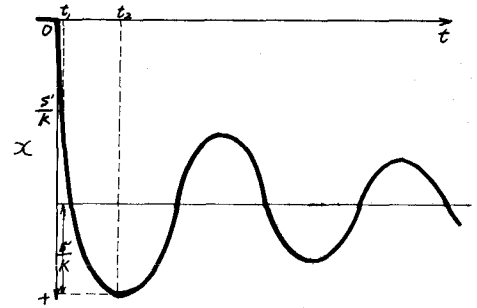


図-4 衝撃貫入変位の模式図

$t_1 \leq t \leq t_2$ ただし、 $t = t_1$ で x_1, x_2 は連続かつ $x_1' = x_2' = \frac{S'}{K}$

モデル1 $x_2 = -\frac{S'}{M} \frac{t^2}{2} + C_1 t + C_2$ ----- (10)

モデル2 $x_2 = -\frac{S'}{C} t + C_1 e^{-\varepsilon t} + C_2$ ----- (11)

$t_2 \leq t$ ただし、 $t = t_2$ で $\frac{dx_2}{dt} = 0$, x_2, x_3 は連続

$$x_3 = \begin{cases} \frac{S'}{K} e^{-\varepsilon t} \frac{\lambda}{\sqrt{\lambda^2 - \varepsilon^2}} \sin(\sqrt{\lambda^2 - \varepsilon^2} t + \alpha) + C_3 & \text{for } \varepsilon < \lambda \\ \frac{S'}{K} e^{-\varepsilon t} (\varepsilon t + 1) + C_3 & \text{for } \varepsilon = \lambda \text{ --- (12)} \\ \frac{S'}{K} e^{-\varepsilon t} \frac{\lambda}{\sqrt{\varepsilon^2 - \lambda^2}} \sinh(\sqrt{\varepsilon^2 - \lambda^2} t + \alpha) + C_3 & \text{for } \varepsilon > \lambda \end{cases}$$

4. モデル1に起振力が作用する場合の検討

(i) $\omega t_0, \omega t_2$ の存在範囲

$t = t_0$ において(2)の条件以外に、 $\frac{dx_1}{dt_2} < 0$ でなければ、前のサイクルのスライダ-滑動終了時刻とは言えないので、これらの条件を(5)式に入れると次式が得られる。

$$\sin \omega t_0 < \frac{S'}{P} \text{ ----- (13)}$$

これから、強度 S' が起振力に比べて小さい時には、 ωt_0 の位相に制限が生じることが判明する。全く同じ結果が、当然、 ωt_2 についても求まる。

(ii) 定常貫入状態について

地盤定数 (K, S') が一定な地盤中をクイが貫入してゆく場合には、3-(i)で述べたモデルの運動を連続すればよい。ところで一回の貫入(スライダ-の滑動)を含む運動は、 t_0 より始まって t_2 で終わり、次の運動は前の t_2 をあらためて t_0 と考えることによって得られる。ここで $\omega t_0, \omega t_2$ の位相を考えてみる。仮に $\omega t_2 = \omega t_0 + 2n\pi$ が一度成立したとすると、それ以後の運動は全く同じ波形の繰返しとなる。このように、定常貫入状態においては、位相に何か安定点が見られることに注目して、(5), (6)の運動に実際の数値(軟地盤に鋼管クイを打つことを想定して $S = 23$ ㍉, $K = 10 \frac{\text{㍉}}{\text{㍉㍉}}$, $M = 12.4$ ㍉, $P = 33.3$ ㍉, $\omega = 56.55$)を入れてみた。図-5は、仮定した ωt_0 によって得られた ωt_2 の位相関係を示したもので、 $\omega t_0 = \omega t_2 = 4.73$ に安定点があり、図中の矢印で示したように任意の位相から運動を開始しても、やがてこの安定点に落ちつくことが判明する。

図中、破線は、この部分の ωt_0 で運動を始めるとスライダ-の滑動が強制振動の2サイクルごとに生じること示している。また、図-5の下部には、各 ωt_0 に対するスライダ-滑動量 δ が示してあ

る。図-6は、図-5の安定点における変位波形を描いたものである。

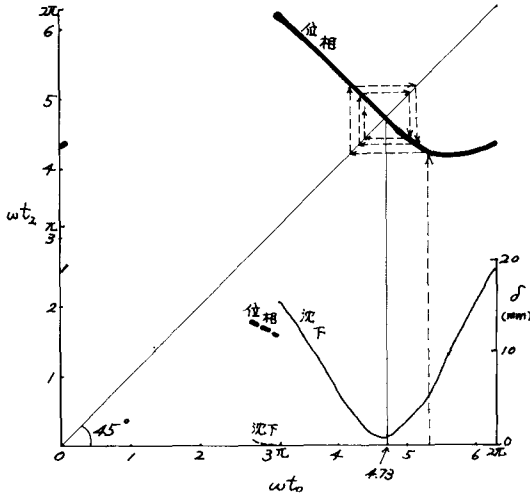


図-5 ωt_0 と ωt_2 の位相関係

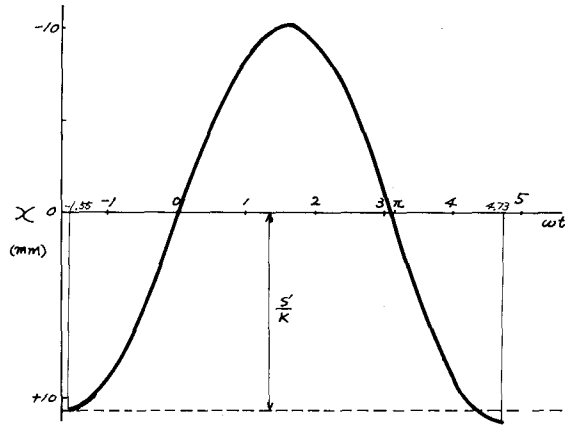


図-6 安定位相における変位波形

5. 実際の現象との比較

図-7は、クイ下端が軟地盤および硬地盤にあるときのクイの振動貫入加速度の記録例である。これを(5)、(6)式の観点から検討してみると、一側の波に軟地盤では毎サイクル、硬地盤では隔サイクルに見られるくびれた部分が塑性沈下(スライダの滑動)を示していること、硬地盤では k が大なため(5)式の自由振動項の影響が大きく現われて隔サイクルごとの塑性沈下となっていること、4で述べた定常貫入状態が存在することなどが推定される。

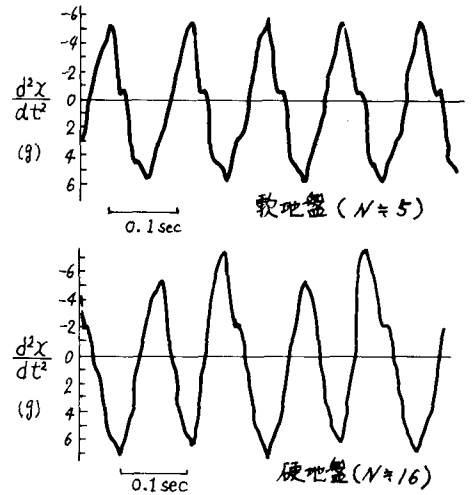


図-7 加速度記録例

6. あとがき

クイの貫入現象を、質量-弾塑性バネ系でモデル化することによって、実際の現象の一部を定性的に説明することができたが、今度はこれを定量的にすべし。 K , S , C と地盤の関係を追求する予定である。

参考文献

- 1) B.C.P. Committee (1971): "Field Tests on Piles in Sand", Journal of J.S.S.M.F.E., Vol 11, No. 2, pp 29~49.
- 2) P.K. Wu (1965): "The Resistance of Soils in Vibro-Sinking of Precast Reinforced Concrete Pipe Piles of Large Diameter", Proc. 6th I.C.S.M.F.E., Vol 2, pp 352~355.
- 3) 小川 勲 他 (1972): "クイの振動貫入について(1)", 第7回土質工学研究発表会講演概要集, pp. 721~724.
- 4) М.Я. Кушуб и А.В. Шихахин (1954): "К Теории Вибрационного Потружения Цилиндрического Столба в Упруго-Пластическую Среду", Известия Академия Наук СССР, Отделение Технических Наук.
- 5) D. D. Barkan (1948): "Dynamics of Bases and Foundations", New York, McGraw-Hill.