

拡張カルマンフィルターを用いた STATNOMIC 試験による支持力推定

九州共立大学工学部 学生員 松井 稔昌

九州共立大学工学部 正 員 荒巻 真二

山口大学工学部 正 員 麻生 稔彦

九州共立大学工学部 正 員 鳥野 清

1. まえがき

静的载荷試験(SLT)は杭の支持力の確認試験として信頼性が高く一般的な方法である。しかし、近年、反力杭を必要としないため、経済的で短時間に SLT に近い結果を得る新しい载荷試験法として、STATNOMIC 载荷(STN)試験と呼ばれる急速载荷試験が数多く実施されるようになり、SLT と STN 試験の支持力の比較により、支持力推定法の検討が行われている。本研究は拡張カルマンフィルターを用いることにより、時刻歴から減衰係数および復元力特性の同定を行うことを目的としたものである。

2. STN 試験装置と試験方法

図-1 に STN 試験の载荷装置を示す。試験方法は、杭頭部に設計最大支持力の5～6%の反力重量(コンクリート)を設置し、ガス室の推進剤(火薬)を燃焼させた時発生するガス圧により、杭を地盤に準静的に押し込む現象を利用したものである。通常、杭頭において载荷荷重と変位を測定する。

3. 解析方法

STN 試験の杭の挙動は図-2 に示すように地盤バネに支持された一質点系の剛体振動と見なすことができ、振動方程式は次式となる。

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + q(y) = P(t) \quad (1)$$

ここで、 m :振動質量(定数)、 c :減衰係数(定数)、 $q(y)$:復元力、

$P(t)$:载荷荷重、 y :杭頭変位、 $\dot{y}$:杭頭速度、 $\ddot{y}$:杭頭加速度

一般に、地盤バネの復元力特性は非線形性を示すため、復元力 $q(y)$ は杭の静的载荷試験における荷重-変位関係として知られている。本解析の復元力特性は式(2)に示すワイプルの指数関数(本解析では $m=1$)とした。ただし、式(2)は変位が増加の時に適用され、減少の時は Masing 則を適用した式(3)とする。

$$\dot{y} > 0 \quad q(y) = Pu \left\{ 1 - e^{-\left(\frac{y}{\delta y}\right)^m} \right\} \quad (2)$$

$$\dot{y} < 0 \quad q(y) = Pu \left\{ 1 - e^{-\left(\frac{y}{\delta y}\right)^m} \right\} + 2Pu \left\{ 1 - e^{-\frac{y}{\delta y} \left(\frac{y - yr}{2} \right)} \right\} \quad (3)$$

ここで、 Pu :極限支持力、 y :杭頭変位、 δy :降伏変位、 yr :反転変位

式(1)～式(3)において未知量は c 、 Pu 、 δy となり、拡張カルマンフィルターによりパラメーター同定を行う。そこで、状態量を次式のようにおく。

$$X^t = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y & \dot{y} & \frac{c}{m} & \frac{Pu}{m} & \delta y \end{bmatrix} \quad (4)$$

これより状態方程式は次式となる。

$$\frac{dX^t}{dt} = \begin{bmatrix} x_2 & -x_2x_3 - q(x_1, x_4, x_5) + u & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad u = \frac{P(t)}{m} \quad (5)$$

また、観測方程式は次式で表される。

$$y_{tk} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 \end{bmatrix}^t + V_{tk} \quad (6)$$

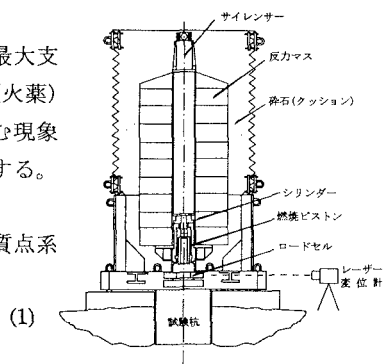


図-1 STN 試験装置

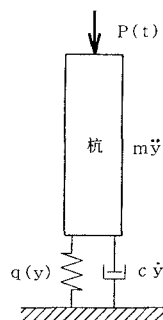


図-2 杭-地盤系モデル

ここで、 V_{tk} :観測ノイズ

4. 解析結果

図-3は鋼管杭 P1(外径 $\phi=400\text{mm}$ 、長さ $L=13.0\text{m}$ 、厚み $t=9\text{mm}$)のSTN試験観測結果をもとにパラメーター同定を行った時の繰り返し回数による収束図である。 c/m 、 P_u/m は比較的容易に収束するが、 δy は100回以上繰り返し計算を行わないと収束していない。図-4に観測値と同定値から求めた変位と速度の時刻歴を示したもので、観測値に等しい推定値が得られている。図-5は荷重-沈下曲線であり、観測値と推定値では3mm程の誤差が見られる。

図-6はSLTとSTN試験の地盤の復元力を比較したものであるが、SLTから得られた極限支持力は1.10MNであった。それに対してSTN試験結果より同定した極限支持力は1.01MNで、ほぼ等しい値となっている。

図-7に鋼管杭 P2(外径 $\phi=400\text{mm}$ 、長さ $L=13.0\text{m}$ 、厚み $t=12\text{mm}$)の荷重-沈下曲線の観測値と推定値を示す。観測値と推定値はほぼ等しい値となっている。しかしながら、図-8に示すSLTとSTN試験の地盤の復元力を比較してみると、SLTでは極限支持力は3.0MNに対して、STN試験結果より同定した極限支持力は4.2MNとなっており、その差が大きい。

過去の杭の载荷試験結果を式(2)ワイブル型の指数関数に適用した場合、変位指数 m は0.7~1.0の範囲で分布することが知られている。P1杭はSLT結果とよい一致を示すが、P2杭は精度よく推定することができていない。この理由として、P1杭の変位指数 m は1近傍の値であるのに対して、P2杭の変位指数 m は1以下になっているものと考えられる。

5. まとめ

解析結果をまとめると以下の通りである。

- (1) 拡張カルマンフィルターを用いることにより減衰係数および復元力特性の同定が可能である。
- (2) ワイブル型を用いることにより、SLTに近い値が推定できるが、今後は変位指数 m も同定できる手法の開発が重要であろう。

<参考文献>

- 1) 日本道路協会, 「杭基礎設計便覧」, 1992.10
- 2) 日下部治・松本樹典, 「急速载荷試験(スタナミック試験)方法とその実施例」, 土と基礎, Vol. 43 No. 5

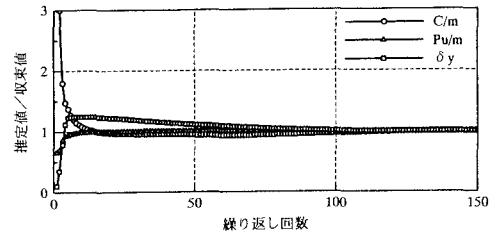


図-3 繰り返し回数による収束図

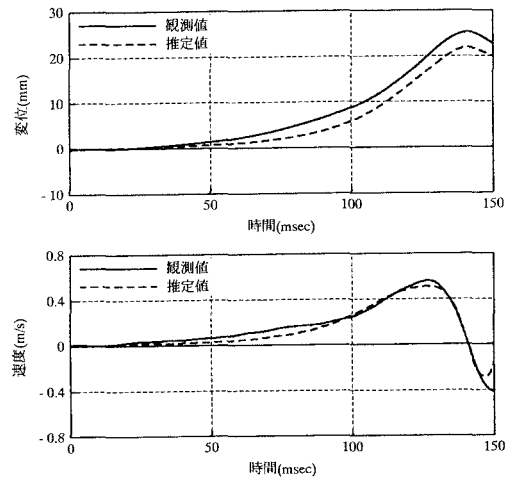


図-4 時刻歴波形

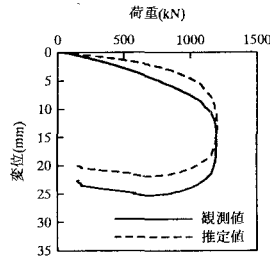


図-5 荷重-沈下曲線

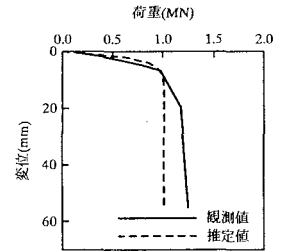


図-6 SLT との比較

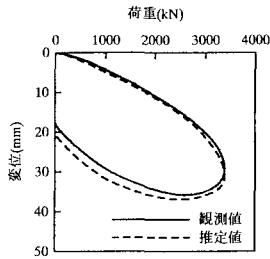


図-7 荷重-沈下曲線

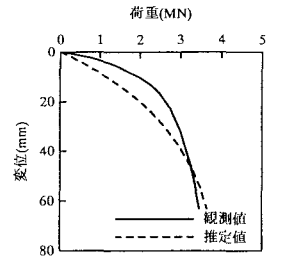


図-8 SLT との比較