

復元力特性にワイブル曲線を用いた拡張カルマンフィルタによる スタナミック試験の支持力推定

九州共立大学 正会員○荒巻真二, 島野 清
山口大学 正会員 麻生稔彦

1. まえがき

スタナミック(STN)試験は、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载荷試験方法である。この測定結果から杭の静的支持力を推定する方法は除荷点法、一次元波動解析による方法等が提案されており¹⁾、著者らはこれまでに拡張カルマンフィルタを用いた方法を提案してきた²⁾。

本研究は拡張カルマンフィルタによる杭の静的支持力の推定精度の向上を目的に、地盤の復元力特性にワイブル曲線の変位指数 m を取り入れた場合の検討を行った。

2. 解析方法

STN試験の杭の挙動は図-1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。

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

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, $\dot{y}$: 速度, $\ddot{y}$: 加速度

図-2に復元力 $q(y)$ の骨格曲線を示す。骨格曲線は、杭の静的载荷試験結果の支持力評価に用いられているワイブル型の指数関数を用いることとした³⁾。ただし、除荷過程は過去の静的载荷試験結果を参考に線形関数と仮定した。

$$y > 0 \quad q(y) = Pu \cdot \{1 - e^{-(y/\delta y)^m}\} \quad (2)$$

$$y < 0 \quad q(y) = Pu \cdot \{1 - e^{-(y_r/\delta y)^m}\} - K(y_r - y) \quad (3)$$

Pu : 極限支持力, δy : 降伏変位, m : 変位指数

K : 除荷過程の勾配, y_r : 反転変位

STN試験結果より杭の静的支持力を推定するには、式(1)の動的項を排除すればよい。よって、式(1)～式(3)における未知量 c , Pu , δy , m , K をSTN試験の観測値よりパラメータの同定を行うことで、式(2), (3)より杭の静的支持力を推定することができると考えた。パラメータの同定手法は、拡張カルマンフィルタに重み付きのグローバルな繰り返し法を併用したEK-WGI法⁴⁾を用いた。また、同定途中で δy が負になると復元力の計算ができないため、 δy が常に正の値となるようにした。この手法の検証を模擬波形で行ったが、繰り返し計算を行うのでほとんど影響ないことが確認できた。

拡張カルマンフィルタによるパラメータ同定は、推定しようとするパラメータと支配方程式を要素として組み込んだ状態方程式、および観測方程式を設定する必要がある。

そこで状態量を次式のように設定する。

$$X^T = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6 \ x_7] = [y \ \dot{y} \ c/M \ Pu/M \ \delta y \ m \ K/M] \quad (4)$$

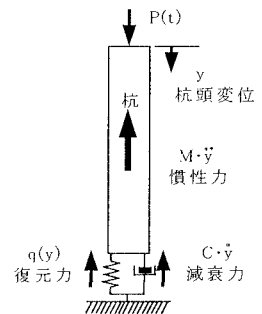


図-1 STN試験中の杭の振動モデル

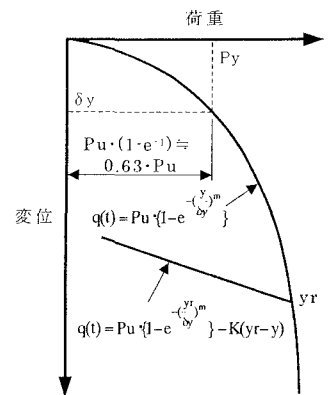


図-2 復元力の骨格曲線

これより状態方程式および観測方程式は次式で表現できる．

$$\frac{dX^t}{dt} = [x_2 \quad -x_2 \cdot x_3 - q(x_1, x_4, x_5, x_6, x_7) + u \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0] \quad u = P(t)/M \quad (5)$$

$$y_{tk} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 & x_6 & x_7 \end{bmatrix}^t + V_{tk} \quad (6)$$

ここで、 V_{tk} ：観測ノイズ

以上の方程式を拡張カルマンフィルタのアルゴリズムに適用すれば、未知量を推定することができる．

3. 試験杭および載荷試験概要

本解析に用いた杭は打込み杭工法で施工された外径400mm、板厚12mm、長さ13.0mの鋼管杭であり、試験杭付近地盤は砂質地盤で構成されており、GL-5.0m以深でN値が30～50程度である．試験工程は杭施工後4週間の養生期間を置き、静的載荷試験（SLT）が実施され、その3週間後にSTN試験を実施されている．

4. 解析結果

図-3にSTN試験の観測値と同定値をもとに式(1)より求めた応答値の時刻歴を示す．変位、速度ともに観測値に非常に近い応答値が得られている．

図-4にSTN試験における観測値と応答値の荷重-沈下曲線を示す．応答値は変位指数を同定した場合と変位指数を $m=1.0$ と固定して同定した場合を示す．なお、 $m=1.0$ の場合は、復元力の除荷過程に $masing$ 則を適用した結果である． $m=1.0$ の応答変位は最大載荷荷重位置から観測値に対してずれが生じている． $m=1.14$ の場合は最大変位位置近傍からずれが生じているが、そのずれ量は $m=1.0$ の場合と比較して小さくなっている．

図-5はSLTと復元力 $q(y)$ を比較したものである．変位指数を同定した方が固定した場合より、SLT結果によく一致していることがわかる．

5. まとめ

解析結果をまとめると、復元力特性をワイブル型指数関数とし、変位指数 m を考慮することで、同定値の精度を向上させることができ、静的支持力に近い挙動の推定が可能となった．

<参考文献>

- 1)加藤・堀越・松本・日下部、「杭のスタナミック試験結果の解釈法」，土木学会論文集No.624/Ⅲ47，1999.6
- 2)鳥野・麻生・荒巻，「ワイブル曲線を用いた拡張カルマンフィルタによるSTATNOMIC試験の支持力推定」，第34回地盤工学研究発表会，1999
- 4)宇都・冬木・近藤・桜井，「クイの載荷試験結果の一整理法」，第13回土質工学研究発表会講演集，1978
- 5)星谷・斉藤，「建設技術者のためのデータ解析と応用－カルマンフィルタを中心として－」，鹿島出版会

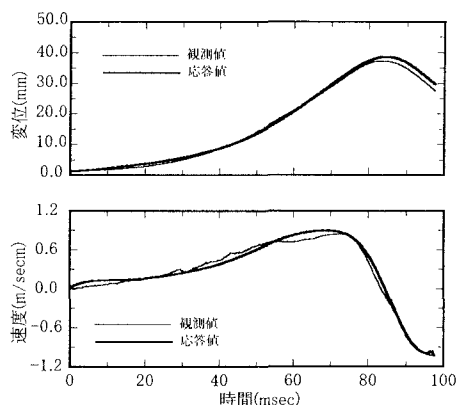


図-3 STN 試験の観測値と応答値の比較

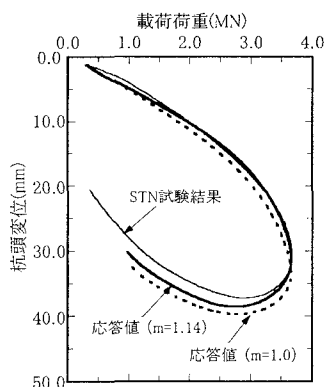


図-4 STN 試験の荷重－変位曲線の比較

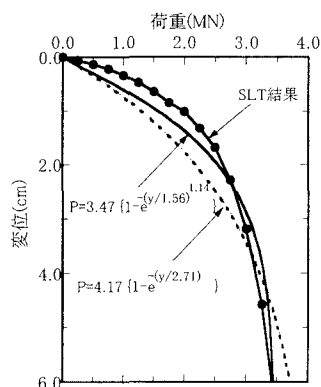


図-5 SLT との比較