

Ⅲ-A 400

拡張カルマンフィルタによる急速载荷試験の解析における非線形復元力特性の検討

山口大学工学部 正会員○麻生稔彦, 會田忠義
九州共立大学工学部 正会員 鳥野清, 荒巻真二

1. はじめに

急速载荷試験中の杭の挙動は地盤ばねとダッシュボットからなる1自由度系の振動としてモデル化できることが良く知られている¹⁾。ここで、地盤ばねを何らかの非線形ばねと仮定し、このばねの特性を推定できれば杭の挙動のみならず静的支持力も推定できるものと考えられる。そこで本報では地盤ばね(復元力特性)を完全弾塑性型とワイプル型²⁾に仮定して、それぞれの特性パラメータを拡張カルマンフィルタにより推定し、非線形復元力特性の違いが杭の挙動および推定支持力に与える影響を検討する。

2. 解析方法

急速载荷試験における杭の挙動は図-1に示すように質量 m 、減衰係数 c を有する1自由度系の振動にモデル化でき、この系の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、 $q(y)$ は地盤ばねによる復元力である。図-1のモデルから計算される変位は動的影響を含むが、復元力特性が決定できれば静的な荷重-変位関係が求められ、支持力を推定することが可能となる。この復元力特性として①完全弾塑性型および②ワイプル型とした場合の検討を行う。ただし、ワイプル型では変位指数を1とする。図-2はそれぞれの復元力の模式図である。図中のA点は降伏点をB点は反転点をそれぞれ表している。完全弾塑性型復元力の初期剛性を K_1 とし、いずれについても降伏支持力を P_y 、極限支持力を P_u 、降伏変位を δ_y 、反転点変位を y_r とすれば変位と荷重が共に正の範囲での復元力は次式で得られる。

①完全弾塑性型

$$\text{区間 } 0 \sim A \quad (0 \leq y \leq \delta_y, 0 \leq \dot{y}) : q(y) = K_1 y \quad (2)$$

$$\text{区間 } A \sim B \quad (\delta_y \leq y, 0 \leq \dot{y}) : q(y) = K_1 \delta_y \quad (3)$$

$$\text{区間 } B \sim \quad (0 \geq \dot{y}) : q(y) = K_1 (\delta_y - y_r + y) \quad (4)$$

$$P_y = P_u = K_1 \delta_y \quad (5)$$

②ワイプル型

$$\text{区間 } 0 \sim B \quad (0 \leq \dot{y}) : q(y) = P_u (1 - \exp(-(y/\delta_y))) \quad (6)$$

$$\text{区間 } B \sim \quad (0 \geq \dot{y}) : \text{この場合の履歴特性は不明なため、今}$$

回は文献1)を参考に次式とした。

$$q(y) = P_u (1 - \exp(-(y_r/\delta_y))) + 2P_u (1 - \exp(-(\bar{y}/\delta_y))), \quad \bar{y} = (y - y_r)/2 \quad (7)$$

$$P_y = P_u (1 - \exp(-(\delta_y/\delta_y))) = 0.632P_u \quad (8)$$

これらの式において未知パラメータは完全弾塑性型において初期剛性 K_1 と降伏変位 δ_y 、ワイプル型では極限支持力 P_u と降伏変位 δ_y である。これらの未知パラメータを拡張カルマンフィルタを用いて同定するために状態量は次に示す $x_1 \sim x_5$ とする。

$$x_1 = y, x_2 = \dot{y}, x_3 = c/m, x_4 = P_u/m \text{ (または } x_4 = K_1/m \text{)}, x_5 = \delta_y, u = P(t)/m \quad (9)$$

復元力特性を決定するパラメータが時間によって変化しないものとする状態方程式は次式となる。

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 & \dot{x}_2 & \dot{x}_3 & \dot{x}_4 & \dot{x}_5 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} x_2 & -x_3 x_3 - q(x_1, x_4, x_5) + u & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (10)$$

また、杭頭変位および杭頭速度を観測するものとし、観測ノイズを v とすれば観測方程式は次式となる。

$$y_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 \end{bmatrix} + v_k \quad (11)$$

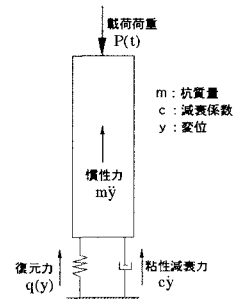


図-1 1自由度系モデル

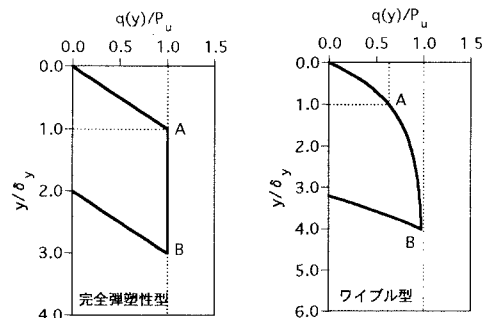


図-2 復元力特性

キーワード：杭、急速载荷試験、支持力、拡張カルマンフィルタ

〒755-8611 山口県宇部市常盤台2丁目16番1号、Tel. 0836-35-9934、Fax. 0836-35-9429

式(10)および式(11)を拡張カルマンフィルタのアルゴリズムに適用して未知パラメータを推定する。

3. 解析結果

実杭について実施された急速荷試験結果を解析し、復元力特性の違いが解析結果に与える影響を検討した。解析対象杭は図-3に示す杭長13.0m、杭径0.4m、肉厚12.0mmの鋼管杭である。表-1に試験データから拡張カルマンフィルタにより同定された未知パラメータを示す。推定された降伏支持力は完全弾塑性型で2.86MN、

ワイブル型で2.23MNと近い値となった。この同定値を用いて計算された杭頭変位および杭頭速度の時刻歴を実測値と比較して図-4に示す。また、杭頭における荷重-変位関係を図-5に示す。応答変位、

応答加速度とも解析値は実測値の傾向をよく表している。しかし、復元力特性としてワイブル型を用いた場合には応答変位に実測値との差が見られる。特に図-5において最大変位以後の差が大きいため式(7)で仮定した履歴特性に問題があると推測される。この履歴特性については今後の重要な検討課題である。図-5に示した杭頭変位は慣性力と減衰力の影響を受けた動の変位である。これらの動的影響を除くために復元力のみによる荷重-沈下関係を求めると図-6となる。なお、今回の杭には静的荷試験（SLT）が実施されているため、この結果も併せて示している。復元力特性として完全弾塑性型を用いた場合には静的荷試験における折れ点付近を降伏支持力として推定しているものの、極限支持力の推定はできない。また、荷重-沈下関係は直線となる。一方、ワイブル型の場合には極限支持力として3.53MNが得られ、静的荷試験結果である3.50MNとほぼ一致する。荷重-沈下関係は静的荷試験結果とやや異なるが、これは変位指数を1.0としているためである。しかし、完全弾塑性型よりもより現実に近い形状が得られている。

4. おわりに

地盤ばねの非線形復元力特性をワイブル型とすれば、より精度良く杭の支持力を推定できることが明らかとなった。

<参考文献>

- 1) Middendorp, P. et. al., Statnamic load testing of foundation piles, Proc. of 4th Int. Conf. on the Application of Stress-Wave Theory to Piles, pp.581-588,1992
- 2) 浅沼他：杭のP-S曲線のパターン分類について，第17回土質工学研究発表会，pp.2085-2088,1982

表-1 同定値

	完全弾塑性型	ワイブル型
同定値		
減衰係数 c (MNs/m)	0.62	1.08
降伏変位 δ_y (mm)	22.59	26.37
初期剛性 K_i (MN/m)	126.7	-
極限支持力 P_u (MN)	-	3.53
支持力		
降伏支持力 P_y (MN)	2.86	2.23
極限支持力 P_u (MN)	2.86	3.53

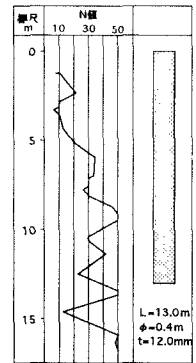


図-3 解析杭概要

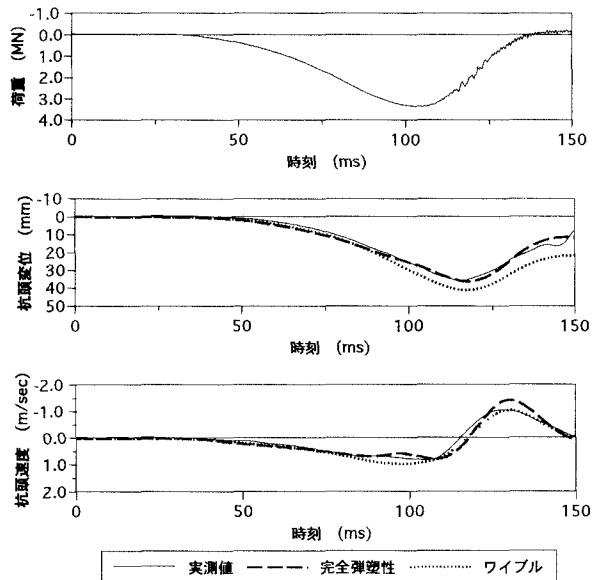


図-4 時刻歴波形

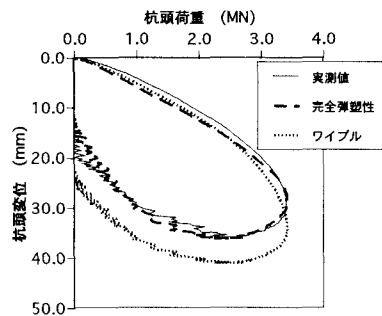


図-5 荷重-杭頭変位関係

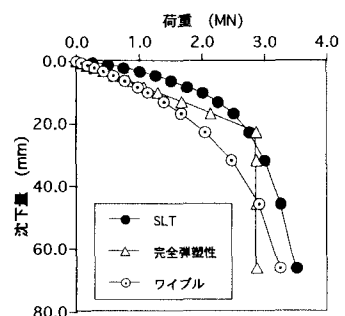


図-6 荷重-沈下関係