

拡張カルマンフィルタによる杭の急速載荷試験の解析

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
島根県 秋月晃一

1. はじめに

急速載荷試験による杭の支持力推定は，その簡便さにより注目されており試験実績も増えつつある．一般に急速載荷の解析には除荷点法¹⁾が用いられているが，著者らは急速載荷試験中の杭の動的挙動が非線形地盤ばねにより支持された剛体の挙動としてとらえられ，完全弾塑性型に仮定した非線形地盤ばねが拡張カルマンフィルタにより推定されることを示した²⁾．本報では非線形地盤ばねをより現実に近いと考えられるワイブル型に仮定し，地盤ばねの降伏変位，極限支持力および粘性抵抗の減衰係数を拡張カルマンフィルタを用いて同定する．

2. 解析方法

急速載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．この復元力として今回は次式で示されるワイブル型を用いる．

$$q(y) = P_u \left(1 - \exp(-(y/\delta_y)^s) \right) \quad (2)$$

ここで， P_u ：極限支持力， δ_y ：降伏変位， s ：変位指数である．式(2)のワイブル型の関数は静的載荷試験における荷重-沈下関係を良く表現できるとされており，静的な復元力特性をこの形に仮定することは妥当であると考えられる．また，変位指数 s は詳細に荷重-沈下関係を考察する場合を除いて $s=1$ としてよいとされているため³⁾，今回の解析では $s=1$ とする．式(1)中の m は既知であり $P(t)$ は試験中に測定されるため，未知パラメータは c ， P_u および 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．

$$x_1 = y, x_2 = \dot{y}, x_3 = c/m, x_4 = P_u/m, x_5 = \delta_y, u = P(t)/m \quad (3)$$

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．

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 & \dot{x}_2 & \dot{x}_3 & \dot{x}_4 & \dot{x}_5 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} x_2 & -x_2x_3 - q(x_1, x_4, x_5) + u & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

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．

$$y_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 \end{bmatrix} + v_k \quad (5)$$

式(4)および式(5)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．安定した解を得るため拡張カルマンフィルタの数値計算にはグローバルな繰り返し法を併用したEK-WGI法を用いる．本研究ではEK-WGI法における繰り返し回数は50回とし，重みを20とした．

3. 解析結果

急速載荷試験への拡張カルマンフィルタの適用性を検討するために， $P_1 \sim P_{12}$ の計12本の杭に対し解析を行った．解析例としてそのうちの P_{11} 杭についての同定結果を示す． P_{11} 杭は杭長11.0m，杭径0.8m，肉厚12.1mmの鋼管杭であり，急速載荷試

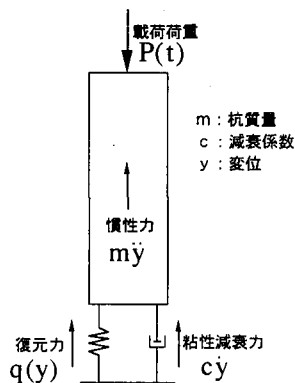


図-1 解析モデル

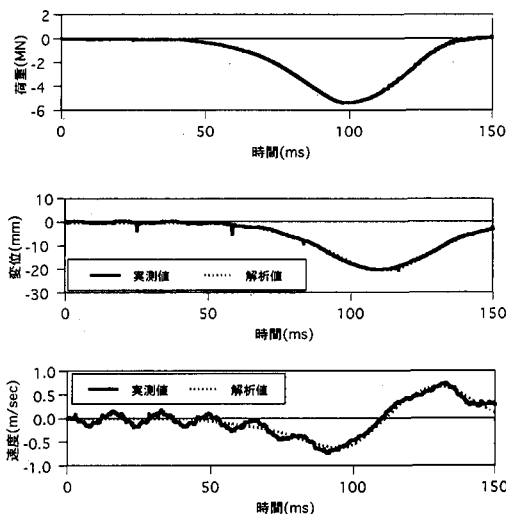


図-2 時刻歴波形

験により測定された杭頭載荷荷重、杭頭変位、杭頭速度の各時刻歴を図-2に示す。表-1は同定に用いた初期値および50回の繰返し計算を行った時点での同定値である。各パラメータの繰返し回数に対する収束状況を図-3に示す。この図より各パラメータとも約20回の繰返しで収束し、それ以降は一定値に収束していることがわかる。解析により同定されたパラメータから杭の応答を計算し、得られた応答変位および応答速度を図-2中に示す。また、杭頭における荷重-変位関係を実測値と比較して図-4に示す。これらの図ではいずれも解析値と実測値とが良く一致しており、同定されたパラメータは妥当なものと考えられる。

同様の解析を計12本の杭に実施し、得られたパラメータ値と推定された極限支持力を表-2に示す。これらのうち6本の杭について静的載荷試験が実施されており、拡張カルマンフィルタにより同定された極限支持力と静的載荷試験より得られた極限支持力を比較した。その結果、今回の解析により得られた支持力は静的載荷試験より大きな値を示している。この理由を検討するために、 P_3 杭と P_{10} 杭における静的載荷試験結果との比較を図-5、図-6に示す。図中の点線は急速載荷試験における最大荷重および最大変位を示す。図-5において最大荷重が降伏支持力以下の場合には、最大荷重までの荷重-沈下履歴は概ね一致するが極限支持力の推定は困難であることがわかる。一方、図-6においては最大荷重が降伏支持力以上の場合であり、極限支持力はほぼ一致している。荷重-沈下関係は解析値と静的載荷試験で異なった傾向を示しているが、これは変位指数 s を1に固定しているためと考えられる。

4. おわりに

急速載荷試験をワイブル型の非線形ばねを持つ1自由度系にモデル化し、拡張カルマンフィルタを適用することにより杭の動的挙動と静的支持力の推定が可能であることが示された。

<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) 麻生他: 急速載荷試験への拡張カルマンフィルタの適用, 第33回地盤工学研究発表会, pp.151-152,1998,
3) 浅沼他: 杭のP-S曲線のハ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 初期値および同定値

	初期値		同定値 (50回繰返し)
	状態ベクトル	共分散	
c/m (N/ts)	2.0×10^2	10.0	2.26×10^2
P_u/m (Ncm/ts ²)	2.0×10^4	10.0	1.94×10^5
δ_y (cm)	1.0	1.0×10^2	7.45

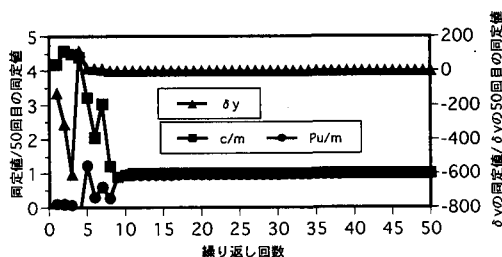


図-3 収束状況

表-2 同定値および静的載荷試験結果との比較

杭名	杭種	直径 (mm)	杭長 (m)	急速載荷試験			静的載荷試験 P_{us} (MN)	P_u / P_{us}
				減衰係数 c (MN/s/m)	極限支持力 P_u (MN)	降伏変位 δ_y (mm)		
P_1	P H C 杭	300	7.0	0.567	5.54	42.22	0.48	11.54
P_2		300	7.0	0.591	1.15	7.84	0.48	2.40
P_3		300	7.0	0.574	1.12	5.10	0.73	1.53
P_4		300	7.0	0.667	0.96	9.11	-	-
P_5		300	7.0	0.557	0.36	1.85	-	-
P_6		300	7.0	0.309	0.64	6.18	-	-
P_7	鋼管杭	1300	14.8	1.801	9.45	6.82	-	-
P_8		1200	18.2	5.921	31.21	200.05	-	-
P_9		600	54.0	0.418	17.96	79.67	-	-
P_{10}		400	13.0	1.081	3.53	26.37	3.50	1.01
P_{11}		800	11.0	2.484	21.26	74.45	4.73	4.52
P_{12}		800	11.0	2.353	10.97	37.02	4.73	2.33

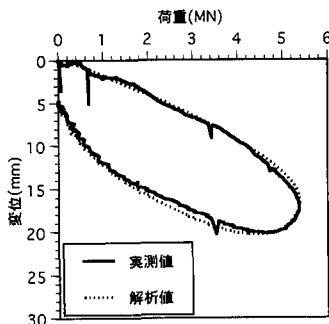


図-4 P11 荷重-変位関係

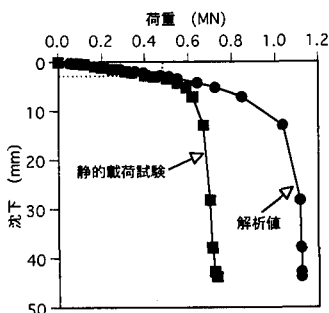


図-5 P3 荷重-沈下関係

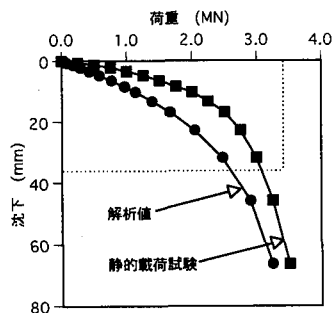


図-6 P10 荷重-沈下関係