

急速载荷試験への拡張カルマンフィルターの適用性に関する検討

日特建設 正会員 ○鈴木崇文
 山口大学 正会員 麻生稔彦
 山口大学 フェロー会員 會田忠義

1. はじめに 急速载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、わが国における試験実績も増えつつある¹⁾。急速载荷試験結果の解析には除荷点法が用いられているが、地盤の非線形性を仮定して拡張カルマンフィルターを適用する方法も提案されている²⁾。本研究ではこの方法による支持力推定精度向上のために、適切な初期値の決定法および観測の際のノイズが解析に与える影響を検討した。

2. 解析方法 急速载荷試験中の杭の挙動は杭が伸縮しない完全な剛体と仮定すると、図-1 に示す 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。

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

式(1)中の $q(y)$ は地盤ばねと杭の変位との関係により定まる復元力である。本研究では地盤の復元力特性は非線形であるとし、地盤ばねとして図-2 に示す完全弾塑性型の非線形ばねを用いる。このばねの特性値は初期剛性 k と降伏変位 X_e である。

式(1)中の復元力 $q(y)$ が図-2 の完全弾塑性型で与えられる場合の状態量を次のようにおく。

$$x_1 = y, x_2 = \dot{y}, x_3 = \frac{c}{m}, x_4 = \frac{k}{m}, x_5 = X_e, u = \frac{1}{m}P(t) \quad (2)$$

式(2)に示す減衰係数および復元力を決定するパラメーターが時間によって変化しないものとする、状態方程式は次式で与えられる。

$$\frac{dx}{dt} = [\dot{x}_1 \quad \dot{x}_2 \quad \dot{x}_3 \quad \dot{x}_4 \quad \dot{x}_5]^T = [x_2 \quad -x_2x_3 - x_4q(x_1, x_5) + u \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T \quad (3)$$

また、杭頭における変位および速度が観測されるとすれば観測方程式は次式となる。

$$y_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_4 \quad x_5]^T \quad (4)$$

式(3)および式(4)を拡張カルマンフィルターのアルゴリズムに適用して未知のパラメーターを推定する。この推定にあたっては初期値を入力する必要があるが、妥当な推定値を得るためには適切な推定値を入力する必要がある。また、観測値に含まれる観測ノイズの影響についても、あらかじめ評価しておかなければならない。

3. 初期値および観測ノイズ 本研究では拡張カルマンフィルターに用いる初期値の決定法として、復元力特性が線形であると見なし線形解析を行うことで、減衰係数および地盤ばね定数の推定を行い、これらの推定値を初期値として用いる方法を提案する。この初期値決定の線形解析に使用するデータの範囲を決定するために、図-3 に示す Type1 ~ Type2 の解析を行う。一方、観測ノイズは観測された最大変位および最大速度のそれぞれ 5%、3%、1% の場合について検討した。

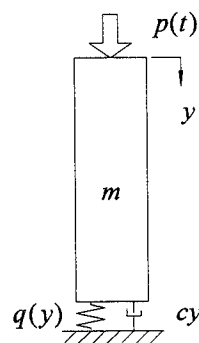


図-1 解析モデル

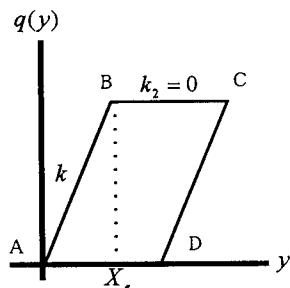


図-2 完全弾塑性型の履歴曲線

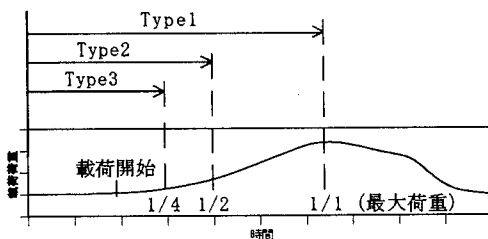


図-3 初期線形解析での入力観測値の設定

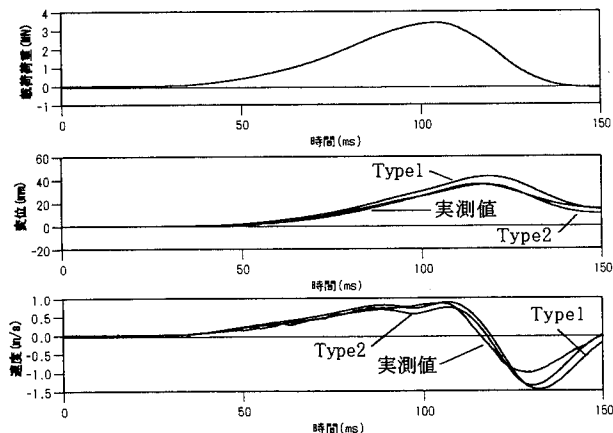


図-4 鋼管杭の観測波形と解析値の比較

4. 解析結果

解析結果の例として外径400mm、杭長13.0m、管厚12mmの鋼管杭について示す。図-4は急速載荷試験によって得られた杭頭荷重、杭頭変位および杭頭速度の時刻歴である。初期値を決定するために行った線形解析の推定値を初期値として、非線形復元力特性の推定を行った結果を表-1に示す。この杭では各Typeで異なる

表-1 非線形解析結果

データ範囲		Type1			Type2			Type3		
観測ノイズ		5%	3%	1%	5%	3%	1%	5%	3%	1%
初期値	c(MNs/cm)	2.23	2.23	2.23	1.57	1.57	1.57	0.52	0.52	0.52
	k(MN/cm)	60.06	60.06	60.06	99.94	99.94	99.94	237.25	237.25	237.24
	Xe(cm)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
初期共分散	c/m	100			100			100		
	k/m	100			100			100		
	Xe	100			100			100		
観測ノイズ	変位	0.179	0.107	0.036	0.179	0.107	0.036	0.179	0.107	0.036
	速度	4.295	2.577	0.859	4.295	2.577	0.859	4.295	2.577	0.859
解析結果										
推定値 (50回目)	c(MNs/cm)	1.51	1.51	1.51	0.68	0.68	0.68	5.44	5.44	5.44
	k(MN/cm)	98.32	98.31	98.32	122.92	122.92	122.92	1E-09	1E-08	7E-04
	Xe(cm)	3.38	3.41	3.44	2.31	2.31	2.31	-1E+12	-1E+12	-3E+05

値を推定する結果となった。しかし、観測ノイズによる推定値への影響は少ない。Type3では降伏変位の推定値が負となり、初期剛性もほぼ0となっている。これは、初期線形解析を行う際に用いた観測波形の範囲が短すぎたため、非線形解析の初期値としては適当でないためと考えられる。Type1とType2で推定されたパラメーターを用いて応答解析を行った結果を図-4中に示す。また、荷重-変位関係を実測値と比較して図-5に示す。これらより、Type1よりType2の方がよく一致している。これは、Type1の範囲では杭頭速度が最大荷重作用時前に増加から減少し、さらに増加に転じている。Type1ではこの観測値の影響を受けたものと考えられる。

繰り返し計算中の観測ノイズ1%時のType別によるパラメーターの収束状況を図-6に示す。Type1およびType2では20回程度の繰り返し計算で収束しているが、Type3では各パラメーターともに変動している。図-7にType2での観測ノイズの大きさ別によるパラメーターの収束状況を示す。観測ノイズを変えても、パラメーターの収束状況には差がない結果となった。

図-8はパラメーター推定を行った鋼管杭について実施された静的載荷試験による荷重-沈下関係と、今回の解析結果を比較したものである。静的載荷試験結果の荷重-沈下曲線より、この杭の第1限界荷重は2.55MNであり、第2限界荷重は3.15MNである。これに対して、解析で得られた降伏荷重は2.84MNである。解析結果は第1限界荷重と第2限界荷重のほぼ中間の値を与えている。

5. おわりに あらかじめ線形のばね特性を推定することにより、これを非線形ばね特性を推定するための初期値として使用できると考えられる。さらに、今回仮定した程度の観測ノイズでは推定値への影響は少ないことが明らかとなった。

参考文献 1) 杭の急速載荷試験法研究委員会, 杭の急速載荷試験の載荷メカニズムと適用性, 地盤工学会, 1999、2) 麻生他, 杭の急速載荷試験への拡張カルマンフィルターの適用性に関する検討, 土木学会論文集No. 673/Ⅲ-54, pp. 133-141, 2001

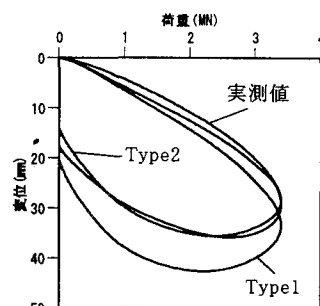


図-5 荷重-変位関係

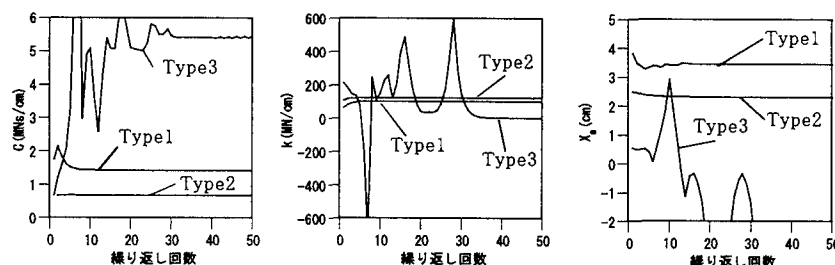


図-6 Type別のパラメーターの収束状況

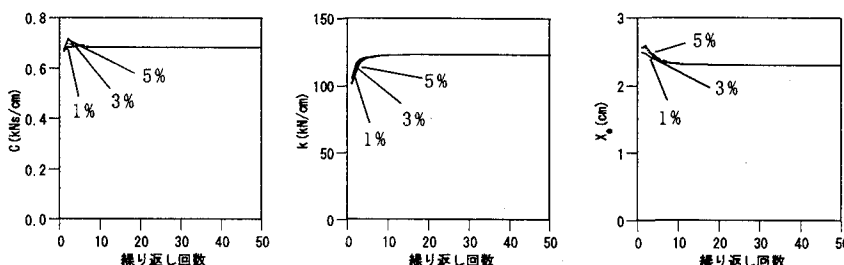


図-7 観測ノイズ別のパラメーターの収束状況

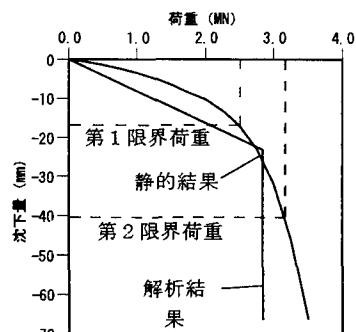


図-8 静的載荷試験との比較