

I-464

地盤の非線形震動問題に対するBeckの同定手法の応用

清水建設(株)技術研究所 (正) 清水 勝美 (正) 田蔵 隆
(正) 佐藤 正義 (正) 広瀬 利光

1. ま え が き

本報はJ. L. Beck⁽¹⁾が提案している記録の時間領域に対する同定手法に多少の修正を加え、地盤の非線形震動問題に対する応用方法について述べたものである。強震記録に基づき、実地盤の問題に対して検討した結果については文献(2)に示している。

2. 地盤の非線形震動問題に対するBeckの方法の応用

地震入力 $\ddot{x}_0$ を受ける多自由度系の運動方程式をモード分解し、 j 次モードに対応する振動方程式の両辺に j 次モードの i 自由度成分のモード値 ϕ_{ij} を乗じると、次式のように書ける。

$$\ddot{u}_{ij} + 2h_j\omega_j\dot{u}_{ij} + \omega_j^2 u_{ij} = -\beta^0_{ij}\ddot{x}_0 \quad (1)$$

ここに、 $u_{ij} = \phi_{ij}q_j$ 、 $\beta^0_{ij} = \phi_{ij}\beta_j$ であり、 ω_j 、 h_j 、 β_j および q_j は、それぞれ j 次モードの固有円振動数、減衰定数、刺激係数および基準関数である。 u_{ij} は i 自由度の変位成分 x_i の j 次モードによる変位成分を表している。

基盤で得られた加速度波形 $\ddot{x}_0(t)$ を入力波とし、(1)式の1自由度系の振動方程式を解くことによって、 $u_{ij}(t)$ が求められる。Beckの方法は(1)式を解いて得られた応答 $u_{ij}(t)$ と観測記録 $x^*_i(t)$ を用いて、次式による J_{ij} 値を計算し、 J_{ij} 値が最小となる固有円振動数 ω_j 、減衰定数 h_j および刺激係数 β^0_{ij} を求めようとする方法である。

$$J_{ij} = \int_{t_0}^{t_1} \{x^*_i(t) - u_{ij}(t)\}^2 dt / \int_{t_0}^{t_1} x^*_i(t)^2 dt \quad (2)$$

ここに、 t_0 および t_1 は、 $u_{ij}(t)$ と $x^*_i(t)$ の適合度を判定しようとする時間区間の開始時刻と終了時刻である。 J_{ij} が小さいほど $x^*_i(t)$ と $u_{ij}(t)$ の一致度が高いことになる。

ところで、地盤の非線形震動問題においては $x^*_i(t)$ と $u_{ij}(t)$ との間に位相のずれが生じることが予想され、本研究ではこの位相ずれが考慮できるように J_{ij} 値を次式から計算することにした。

$$J_{ij}(\pm d\tau) = \int_{t_0}^{t_1} \{x^*_i(t) - u_{ij}(t \pm d\tau)\}^2 dt / \int_{t_0}^{t_1} x^*_i(t)^2 dt \quad (3)$$

ここに、 $d\tau$ は適当に定めなければならない時間の移動幅で、 $0 \leq d\tau \leq (t_1 - t_0)$ である。

また本研究では、 J_{ij} 値の最小値の探索はコンプレックス法⁽³⁾によって行うことにした。

3. 線形系の地盤モデルに対する数値実験

Beckの方法の特徴を考察する目的で、線形系の地盤モデルに対する数値実験を行った。線形系地盤モデルとは、図1に示すような均質一様地盤である。この地盤の1次固有周期は $T_1 = 1.0$ sであり、1次の刺激係数は $\beta_1 = 1.27$ である。この地盤を20質点の1次元多質点ばね系モデルによってモデル化し、1940年El-Centro記録NS成分の100ガル入力に対する地表部の応答波形を求めた。なお、減衰定数 h_1 は全次一律5%とした。

この解析によって得られた地表部の応答波形を観測記録 $x^*_1(t)$ とし、2.に示したBeckの方法により1次モードに対応する固有周期 T_1 、減衰定数 h_1

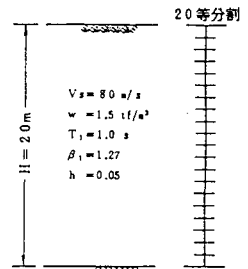


図1 地盤モデル

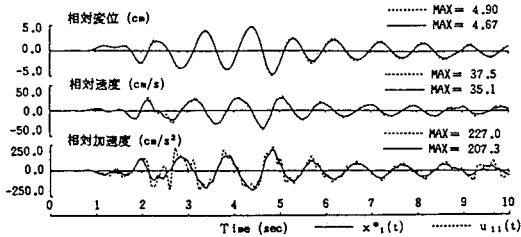
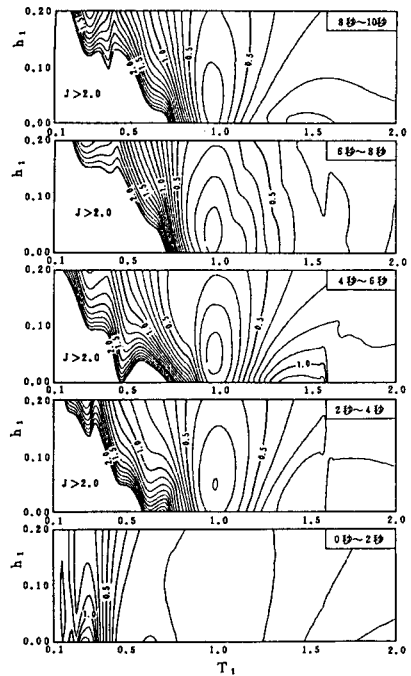
および刺激係数 β_1 (この場合 $\phi_{11} = 1.0$ とし、 $\beta^0_{11} = \beta_1$ とした)の同定を試みた。表1は相対変位、相対速度、相対加速度に関して、計算時間区間を2秒として行った同定結果である。正解値は線形系であることから、全時刻を通して $T_1 = 1.0$ s、 $h_1 = 0.05$ 、 $\beta_1 = 1.27$ である。固有周期 T_1 に関する同定結果は妥当なものになっているが、減衰定数 h_1 および刺激係数 β_1 は必ずしも十分ではないことが分かる。また、相対速度および相対変位に関する J_{11} 値の方が、相対加速度の J_{11} 値より小さくなっている。

図2は $x^*_1(t)$ と $u_{11}(t)$ を対比したものである。相対変位、相対速度に関しては両者きわめて良い対応状況にあるが、高振動数成分が励起されている相対加速度に関しては必ずしも十分でない結果になっている。

図3は横軸を周期 T_1 、縦軸を減衰定数 h_1 、刺激係数を $\beta_1 = 1.27$ として、相対加速度に関して計算した

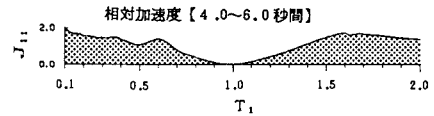
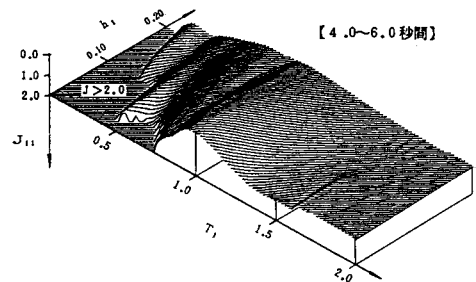
表1 変位、速度、加速度に対する同定結果

	同定項目	同定区間				
		0~2 sec	2~4 sec	4~6 sec	6~8 sec	8~10 sec
変位	固有周期 T_1 (sec)	0.986	0.993	0.986	1.000	1.004
	減衰定数 h_1	0.051	0.046	0.044	0.030	0.025
	刺激係数 β_1	1.310	1.322	1.304	1.226	1.273
	J 値	0.005	0.005	0.002	0.006	0.015
速度	固有周期 T_1 (sec)	1.013	0.981	0.985	0.999	0.963
	減衰定数 h_1	0.028	0.087	0.045	0.030	0.040
	刺激係数 β_1	1.264	1.796	1.259	1.187	1.456
	J 値	0.019	0.029	0.005	0.008	0.050
加速度	固有周期 T_1 (sec)	0.977	0.982	0.982	0.983	0.978
	減衰定数 h_1	0.010	0.035	0.049	0.033	0.035
	刺激係数 β_1	1.179	1.275	1.285	1.022	1.314
	J 値	0.062	0.198	0.051	0.045	0.253

図2 観測記録 $x^*_1(t)$ と応答波形 $u_{11}(t)$ との比較図3 相対加速度に対する J_{11} 値の等値線図

J_{11} 値の等値線図である。等値線図のパターンは時間によって変化しているが、各図において $T_1 = 1.0$ s、 $h_1 = 0.05$ 付近が J_{11} 値の最小値になっており、この点を中心とした縦長の楕円状の等値線が共通して描かれている。等値線が楕円状になるということは、減衰定数に関する同定の難しさを表しており、このことが表1の減衰定数 h_1 の同定結果に反映されている。

図4は図3の時刻4秒から6秒の等値線図の $h_1 = 0.05$ 、 $\beta_1 = 1.27$ における T_1 と J_{11} の関係について示したものである。 $T_1 = 1.0$ s の点で J_{11} 値は最小値(Global Minimum)になっているが、その他いくつかの局所的な最小値(Local Minimum)が存在しており、コンプレックス法による最小値の探索において、初期値の設定に十分な配慮が必要であることが分かる。図5は図3の時刻4秒から6秒における J_{11} の鳥瞰図である。

図4 固有周期 T_1 と J_{11} 値の関係 ($h_1 = 0.05$, $\beta_1 = 1.27$)図5 相対加速度に対する J_{11} 値の鳥瞰図

4. あとがき

Beckの方法の特徴として、固有周期の時間的変化に対する同定は有効であるが、減衰定数および刺激係数の同定は必ずしも十分ではない。また、コンプレックス法によって J_{11} 値の最小値を探索する場合、局所的な最小値が多く発生することから、初期値の設定に注意する必要がある。

5. 参考文献

- (1) J.L.Beck: Determining Models of Structures from Earthquake Records, Report No. EERL 78-01, California Institute of Technology, Pasadena, 1978.
- (2) 田蔵、清水、佐藤、広瀬、小山、渡辺: 強震記録に基づく軟弱地盤の卓越周期と減衰定数の時間的変化の同定、第22回土質工学研究発表会、1987年6月。
- (3) M.J.Box: A New Method of Constrained Optimization and a Comparison with Other Methods, Computer Journal No. 8, 1965.