

I-547

直接基礎の振動特性同定手法

東京電機大学 大学院 学生員○大滝 晋
東電設計㈱ 技術開発本部 正員 松島 学
東京電機大学 理工学部 正員 松井邦人

1. はじめに

構造物の耐震安全性を評価することは重要な問題の一つである。本研究では、直接基礎を持つ変電機器を対象として、図-1に示すように地盤と基礎の動的相互作用をばねとダンパーでモデル化した。そして、基礎上部は基礎版上に固定された架台と機器（がいし）を多質点系でモデル化した。このような構造系に作用する地震動の入力と、それに対する加速度応答観測値より、地盤～基礎系の剛性および減衰係数を推定しようとするものである。

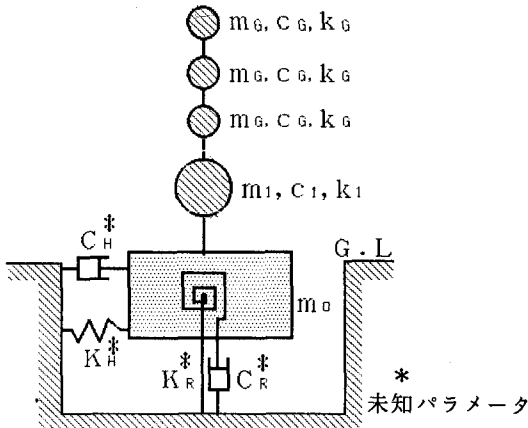


図-1 解析モデル

2. 動的解析と同定手法

変電機器と基礎からなる系は、図-1に示すモデルのように多自由度系となり、運動方程式は(1)式のようになる。

$$M\ddot{z} + C\dot{z} + Kz = Q \quad (1)$$

$$z(t_0) = a, \quad \dot{z}(t_0) = b$$

ここで、 M, C, K は質量、減衰、剛性のマトリックス、 $\ddot{z}, \dot{z}, z, a, b$ はそれぞれ、応答加速度、応答速度、応答変位、初期変位、初期速度のベクトル、 Q は外力のベクトルである。本研究では、変電機器の質量、減衰係数および剛性は既知であるとし、基礎版上で測定される $\ddot{\theta}, \dot{z}$ の値より地盤～基礎系のパラメータ C_R, C_H, K_R, K_H を同定しようとするものである。ここで、 $\ddot{\theta}$ および $\dot{z}$ は基礎版の角加速度および水平加速度の測定値である。モデルの基礎版上での観測点 i における測定値を $v_i(t)$ 、解析値を $u_i(t)$ 、測定

誤差を $\varepsilon_i(t)$ とし、解析値と真値が一致すると仮定すると、次式の関係が成立する。

$$v_i = z_i + \varepsilon_i \quad (2)$$

地盤～基礎系の未知パラメータ(C_R, C_H, K_R, K_H)を $x_\ell (\ell=1 \sim M)$ とすると、 $x = (x_1, x_2, \dots, x_M)^T$ であり u_i は $x_\ell (\ell=1 \sim M)$ の関数である。Gauss-Newton法に基づき、評価関数 J を次のように定義する。

$$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_1} \sum_{i \in A} w_i (v_i - u_i - \sum_{k=1}^M \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \delta x_k)^2 dt \quad (3)$$

$t_0 \sim t_1$ は観測データの継続時間、 $w_i(t)$ は重み関数であり次式で表される。

$$w_i = \frac{1}{S_i} \quad S_i = \int_{t_0}^{t_1} v_i^2 dt \quad (4)$$

次に、式(3)を最小にするように同定パラメータ $x = (x_1, x_2, \dots, x_M)^T$ を決定する。そのための必要条件 $\partial J / \partial \delta x_k = 0$ より

$$\sum_{i=1}^M \left\{ \int_{t_0}^{t_1} \left(\sum_{i \in A} w_i \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_\ell} \right) dt \right\} \delta x_\ell = - \int_{t_0}^{t_1} \sum_{i \in A} w_i (v_i - u_i) \frac{\partial u_i}{\partial x_k} dt \quad (k=1 \sim M) \quad (5)$$

式(4)は $\delta x_\ell (\ell=1 \sim M)$ に関する連立方程式である。 u_i の同定パラメータに関する偏微分係数は動的感度であり、式(1)を x_ℓ で偏微分し、数値積分により求められる。式(4)を δx_ℓ について解き、 $x_\ell = x_\ell + \delta x_\ell$ として繰り返し計算を行うことにより、 x_ℓ の最適推定値を求めることになる。

3. 対象構造物の同定

対象とした変電機器基礎の諸元及び、地盤～基礎系パラメータの推定値（日本電気協会の指針により算定）を表-1に示す。

既設変電機器基礎における地震観測は、図-2の①～④に示す個所に加速度センサーを設置し、時刻歴データを記録した。観測点②に於いては基礎版の水平加速度 $\dot{z}$ を観測した。観測点①の加速度センサーは実際には地表面より50cm下にあるが、この観測値を地表面入力地震波の観測値とする。観測点③、④では、基礎版の上下方向の加速度を観測し、

$$\ddot{\theta} = (u_3 - u_4) / \ell \quad (6)$$

(u_i : 観測点 i における観測値 ℓ : 観測点間の距離)により基礎版のロッキング角加速度 $\ddot{\theta}$ を算出した。

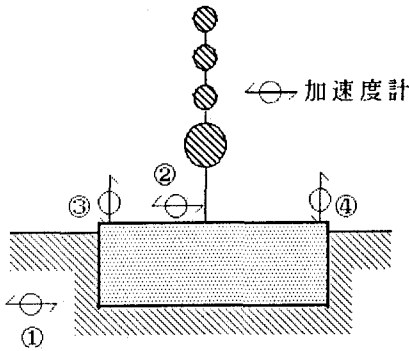


図-2 観測地点

表-1 対象構造物の性能

フーチング (m) 長さ の寸法		幅	2.35
		高さ	4.40
			0.90
フーチングの質量		M_0 (tf・s ² /m)	1.735
上部	質量	m_G	0.210
		m_1 (tf・s ² /m)	0.158
構造物	剛性	k_G	2000.0
		k_1 (tf/m)	47600.0
	減衰係数	C_G	2.05
		C_1 (tf・s/m)	8.680
地盤～基礎系 の剛性*		K_H (tf/m)	32584.4
		K_R (tf・m/rad)	37665.0
地盤～基礎系 の減衰係数*		C_H (tf・s/m)	177.9
		C_R (tf・m・s/rad)	94.9

*)日本電気協会の指針により算定

観測データには、常にノイズが含まれている。このノイズの大きさは、今までの観測記録から0.1～0.3gal程度であることがわかっている。地震観測記録の全ての時間領域を同定に使用すると、応答の小さな時間領域ではこのノイズの影響が大きく、同定が収束しないことが想定される。そのため地震動の主要動を用いて解析することとし、その継続時間の範囲を次式で定義して求めた。

$$E_p = \frac{E_t}{E_c} = \frac{E_a}{E_c}, E_t = \int_0^{t_0} Z_a^2 dt, E_c = \int_0^{t_e} Z_a^2 dt, E_c = \int_0^{t_e} Z_a^2 dt \quad (7)$$

ここで、 Z_a は入力地震波の観測値、0～ t_e は観測継続時間である。図-3にその概念図を示す。この、 $E_p \sim 1.0 - E_p$ に対応する時間 $t_0 \sim t_1$ を継続時間として採用した。この E_p の値をパラメータにして、得られた実地震波から各剛性、減衰定数を求めたものを図-4.a, bに示す。図中の地震動は、収束した地震動で最も大きなもの(○)と小さなもの(△)である。同図にみられるように、全ての継続時間を使うと収束しないパラメータもあり、5%以上になると解は収束する。しかしながら、 E_p が大きくなっても、収束値にはばらつきが見られ、特に小さな地震波では顕著である。本研究では、ばらつきがあるものの E_p の値を20%と設定した。

束する。しかしながら、 E_p が大きくなっても、収束値にはばらつきが見られ、特に小さな地震波では顕著である。本研究では、ばらつきがあるものの E_p の値を20%と設定した。

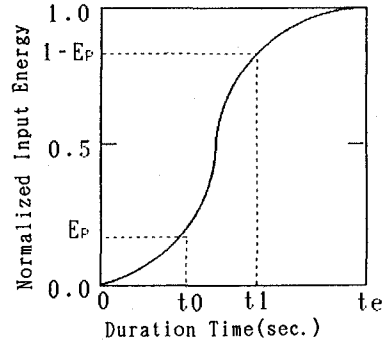


図-3 無次元エネルギーの定義

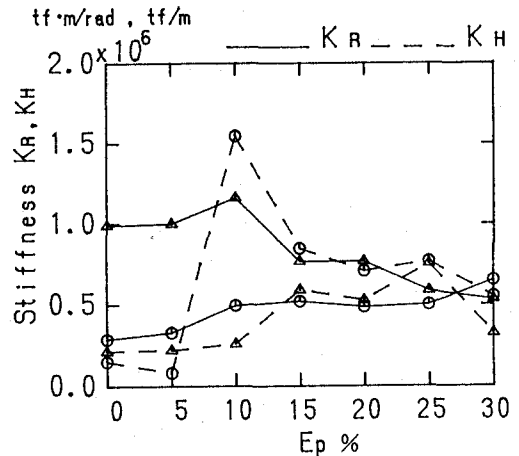


図-4.a E_p と収束パラメータの関係(K_H, K_R)

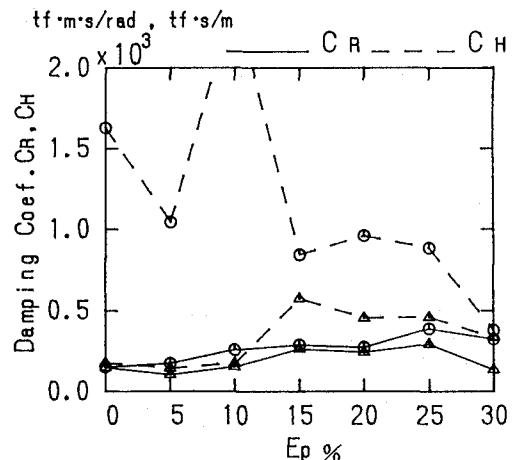


図-4.b E_p と収束パラメータの関係(C_H, C_R)