

I-387

変電機器基礎の振動特性同定の理論

東電設計(株) 技術開発本部 正員○松島 学
東電設計(株) 技術開発本部 正員 大木晴雄
東電設計(株) 技術開発本部 正員 久保賀也

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、上部機器は基礎版上に固定された一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、剛性及び減衰係数を測定しようとするものである。本研究では、同定の精度そのものを検討するために、EL-Centro地震波を入力波として数値モデルに作用させ、その応答値を用いて同定を行い、得られた結果について述べる。

さらに、実際の観測値は一般にノイズを含んでいることが普通である。そこで、応答観測値にホワイトノイズを付加し、その大きさが同定結果にどのような影響を与えるか検討した。ただし、応答解析、感度解析にはNewmark- β 法を、同定手法にはGauss-Newton法を用いる。

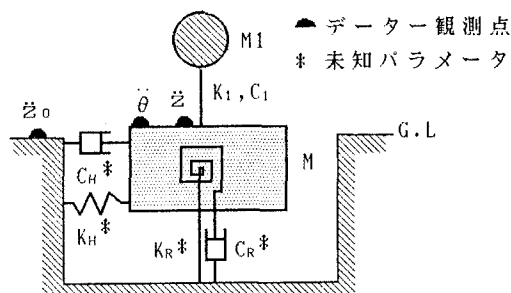


図-1 解析モデル

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、機器の M, C, K およ

び基礎版と地盤の相互作用に関する M, C, K を仮定し、そのもとでの応答値を求め、基礎版上で測定される $\ddot{\theta}, \ddot{z}$ の値より同定を行い、得られた基礎と地盤に関するパラメータ C_R, C_H, K_R, K_H の精度を論じようとするものである。ここで、 $\ddot{\theta}$ および $\ddot{z}$ は基礎版の角加速度および水平加速度である。解析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、

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

の関係が成立する。ここで、地盤～基礎系の未知パラメータ(C_R, C_H, K_R, K_H)を x_ℓ ($\ell=1 \sim M$)とすると、 $x = (x_1, x_2, \dots, x_M)^T$ であり、 u_i は x_ℓ ($\ell=1 \sim M$)の関数である。Gauss-Newton法の考え方に基づき、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、 $w_i(t)$ は重み関数である。ここで、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

$$\sum_{\ell=1}^M \left\{ \int_{t_0}^{t_1} \sum_{i \in A} w_i \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_\ell} dt \right\} \delta x_\ell = - \int_{t_0}^{t_1} \sum_{i \in A} w_i (v_i - u_i) \frac{\partial u_i}{\partial x_k} dt \quad (k=1 \sim M) \quad (4)$$

式(4)は δx_ℓ ($\ell=1 \sim M$)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測値(日本電気協会の指針により算定)を表-1に示す。以後の解析では、この推測値を同定における未知パラメータの真値とする。図-1に示したモデルに、El-Centro地震波の最大振幅を300galに修正したものを入力波として作用させ、応答

解析の結果を測定値として用いた。次に未知パラメータの初期値を $C_R=150\text{tf}\cdot\text{s}/\text{rad}$, $C_H=270\text{tf}\cdot\text{s}/\text{m}$, $K_R=55000\text{tf}/\text{rad}$, $K_H=50000\text{tf}/\text{m}$ として同定を行った。減衰係数 C_R, C_H の収束状況を図-2に、剛性 K_R, K_H の収束状況を図-3に示す。結果より、減衰係数に関しては、ロッキングに関する減衰(C_R)より並進運動に関する減衰(C_H)のほうが収束がスムーズであること、剛性に関してはロッキングと並進運動とで、収束過程の大きな違いは見られないことがわかる。また、減衰係数より剛性のほうが収束性がよい。表-2に推測値に対する収束値の誤差 ($| \text{収束値} - \text{推測値} | / \text{推測値}$)を示す。これよりどのパラメータも精度よく同定されていることがわかる。

表-1 対象構造物の性能

フーチング の寸法 (m)	幅	2.35
	奥行き	4.4
	高さ	0.9
フーチングの質量 M ($\text{tf}\cdot\text{s}^2/\text{m}$)		1.735
上部 構造物	質量 M_1 ($\text{tf}\cdot\text{s}^2/\text{m}$)	0.789
	剛性 K_1 (tf/m)	575.77
	減衰係数 C_1 ($\text{tf}\cdot\text{s}/\text{m}$)	2.131
地盤～基礎系 の剛性	K_H (tf/m)	32584.4
	K_R (tf/rad)	37665.0
地盤～基礎系 の減衰係数	C_H ($\text{tf}\cdot\text{s}/\text{m}$)	177.9
	C_R ($\text{tf}\cdot\text{s}/\text{rad}$)	94.9

表-2 推測値に対する収束値の誤差

	C_H	C_R	K_H	K_R
収束値	175.7	95.6	32503	37649
誤差(%)	1.2	0.5	0.25	0.05

4. ノイズ混入時の同定

実際地震は、観測データにはノイズ（観測誤差）が含まれている。このノイズの大きさが同定結果に及ぼす影響を調べるため、バンド幅を0.1~25Hzとしたホワイトノイズを作成し、SN比で0%~20.0%まで5%刻みで変化させたものを、応答加速度に加えたものについて同定を行った。ここでSN比とは、 $\text{SN比} = |\varepsilon(t)_{\text{max}}| / |A(t)_{\text{max}}| \times 100$ ($\varepsilon(t)_{\text{max}}$: 最大ノイズ, $A(t)_{\text{max}}$: 最大応答加速度)とした。減衰係数の収束結果を図-4に、剛性の収束結果を図-5に示す。図では同定結果を真値（推測値）で除しているの、この比が1.0のとき両者の値が一致していることを意味している。SN比の増加と共に減衰係数の収束結果は悪くなっていくが、剛性は比較的真値に近い値に収束する。このことより、減衰係数は剛性よりもノイズの影響を受け易く、減衰係数の同定の精度は、ノイズの大きさに大きく影響されるといえる。また、

ロッキングに関するパラメータは並進運動のパラメータよりも、ノイズの影響を受け易いこともわかる。

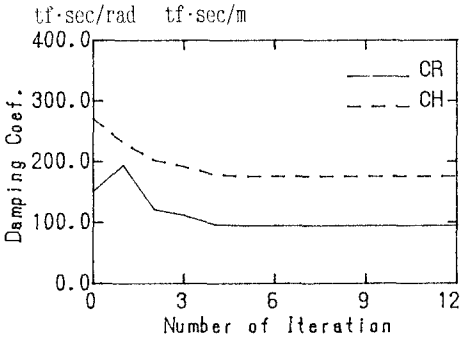


図-2 減衰係数の収束過程

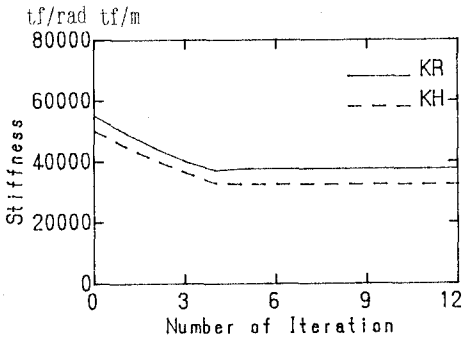


図-3 剛性の収束過程

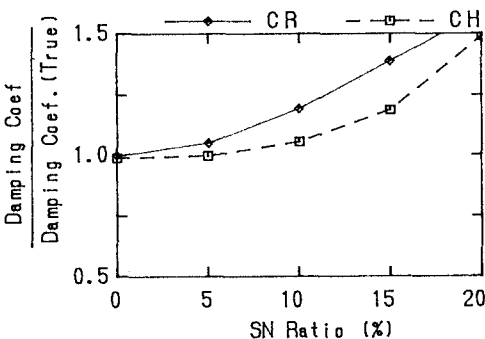


図-4 SN比と収束値の関係（減衰係数）

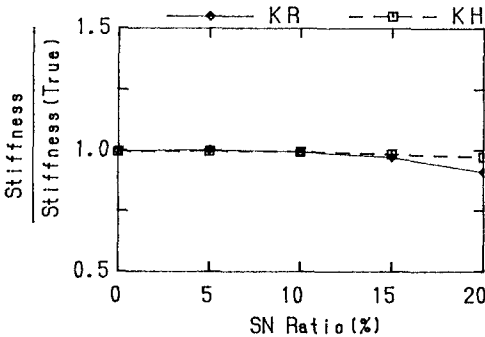


図-5 SN比と収束値の関係（剛性）