

I-565

地盤と基礎の動的相互作用と耐震設計法に関する考察

宮崎大学工学部土木工学科 正会員 原田隆典

1. まえがき、線形系を対象として地盤と基礎の動的相互作用の定式化を整理し、これと現行の耐震設計法の関係および地震動のアレー観測との関係を考察している。

2. 動的相互作用の定式化、図-1に示すように、基礎B点の運動 $\{U_B\}$ とそれと同じ位置にある自由地盤のA点の運動 $\{U_A\}$ が異なる場合に動的相互作用があると言うものとする。ここで、基礎の慣性力の効果を分離するため、質量=0の仮想基礎（剛性は考慮）のC点の運動 $\{U_C\}$ を考察する。一般に、このような無質量の基礎C点の運動は自由地盤A点のものと違うと考えられる。したがって、この場合にも動的相互作用があるわけで、この動的相互作用に対しては慣性力の効果と区別するため、キネマチック相互作用または基礎入力地震動相互作用という名称が使われる。B点の運動 $\{U_B\}$ は慣性力による付加的運動 $\{U_D\}$ と $\{U_C\}$ の和で与えられる。ここで、地盤に対して単位振幅の強制変位を与えときの地盤反力として定義されるインピーダンス $[K]$ を導入すると、振動数 ω の領域で次の力のつり合いが成立する。

$$\underbrace{-\omega^2[M]\{U_B\}}_{\text{慣性力}} + \underbrace{[K_F]\{U_D\}}_{\text{基礎剛性反力}} + \underbrace{[K]\{U_D\}}_{\text{地盤反力}} = 0, \quad \{U_B\} = \{U_C\} + \{U_D\} \quad (1)$$

上式を $\{U_D\}$ または $\{U_B\}$ で表すと

$$[-\omega^2[M] + [K_F+K]]\{U_D\} = \omega^2[M]\{U_C\} \quad (2)$$

$$[-\omega^2[M] + [K_F+K]]\{U_B\} = [K_F+K]\{U_C\} \quad (3)$$

式（3）の右辺はドライビングフォースとも呼ばれる。

式（2）（3）より動的相互作用の問題では、インピーダンス $[K]$ と無質量基礎の地震応答 $\{U_C\}$ （有効地震動）が必要となる。また、基礎の剛性 $[K_F]$ 、インピーダンス $[K]$ 、有効地震動 $\{U_C\}$ と自由地盤の運動 $\{U_A\}$ には次式の関係が成立する（Ref. 1）。

$$[K_F+K]\{U_C\} = [K]\{U_A\} + \{f_A\} \quad (4)$$

ここに $\{f_A\}$ は自由地盤A点の節点力を表す。

3. 動的相互作用の定式化による耐震設計の考察（Ref. 2） 式（2）または式（3）および式（4）を耐震設計との関係において考察してみる。図-2に示すように比較的浅い基礎を有する上部構造物では慣性力相互作用が卓越するが、地下タンク、地中パイプなどのような地中構造物では逆に基礎入力地震動相互作用が卓越することが知られている。このような2つの極端な場合では、式（2）において $\{U_C\} = \{U_A\}$ 、式（3）において $[M] = 0$ とおけるため運動方程式はそれぞれ次のようになる。

$$[-\omega^2[M] + [K_F+K]]\{U_D\} = \omega^2[M]\{U_A\} \quad \cdot \text{慣性力相互作用} \gg \text{基礎入力地震動相互作用} \quad (5)$$

$$[[K_F+K]\{U_B\} = [K_F+K]\{U_C\} = [K]\{U_A\} + \{f_A\} \quad \cdot \text{基礎入力地震動相互作用} \gg \text{慣性力相互作用} \quad (6)$$

現行の応答スペクトル法では、自由地盤の地震動 $\{U_A\}$ の応答スペクトルを与えて式（5）によって構造物に作用する地震力が計算されるため、厳密な式（2）と比べると応答スペクトル法は基礎入力地震動相互作用を無視して、慣性力相互作用のみを考慮したものになっているものと解釈できる。また、地中構造物に対する現行の応答変位法ではインピーダンス $[K]$ を介して自由地盤の地震動 $\{U_A\}$ を構造物に作用させているため式（6）で $\{f_A\}=0$ としていることになる。

4. まとめ 以上の考察から、線形系を対象とした動的相互作用系の定式化に基づいて現行の耐震設計法の考え方の改良点を整理すると

- （1）インピーダンス $[K]$ の値をどのように評価するかという問題は本質的に重要であるが、現行の応答スペクトル法と応答変位法は自由地盤の運動 $\{U_A\}$ に基づいており、基礎入力地震動相互作用または有効地震動 $\{U_C\}$ については直接的評価を行っていない。
- （2）有効地震動 $\{U_C\}$ を評価するには、式（4）からわかるように、インピーダンス $[K]$ と基礎の寸法程度の自由地盤の領域における地震動 $\{U_A\}$ と節点力 $\{f_A\}$ の空間的分布に関する資料が必要となる。地震動のアレー記録はこのような地震動の空間分布を定量化するのに有効であると思われる。

Ref.1 Ad Hoc Group, Analysis for Soil-Structure Interaction Effect for Nuclear Power Plants, ASCE, pp.122-127, 1980.

Ref.2 KASHIMA, N. et al., Soil-Structure Interaction and Its Implication for Seismic Design of Structures, Proc. of 9th WCEE, Vol. III, pp.507-512, 1988.

Fig. 1 Definition of Soil Structure Interaction (Kinematic and Inertial Interaction)

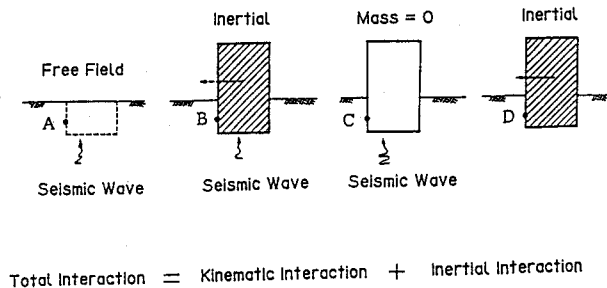


Fig. 2 Implication of Kinematic and Inertial Interaction for Seismic Design Methods

