

I-B 261

大地震の地震荷重を応力として考える

大成建設（株）正会員 五十嵐 俊一

1 はじめに

1993年釧路沖地震、1994年ノースリッジ地震、1995年兵庫県南部地震など相次ぐ地震では、1 Gに近い大きさの最大加速度を持つ地震動が観測され、構造物にも大きな被害を生じた。このような地震動に対して構造物を設計する場合に、地震動をどのように定めるかは耐震工学上の重要な課題である。現在は、応答スペクトルによって地震荷重を構造系の固有周期に応じて慣性力で与える考え方が用いられているが、ここでは、地震動が構造物に及ぼす作用は、実際は応力という近接作用力であることに注目し、大きな地震動に対して、現実的に地震荷重を与える方法を述べる。

2 応答スペクトルの仮定と適用限界

現行の耐震基準では、構造物に設計上作用させる地震荷重を応答スペクトルによって規定しているものが多い。これは、図1のような剛床の上に弾性的に支持された1質点系の支点Gが慣性系に対して運動する時の質点Aの支点に対する相対速度 dx/dt または、加速度 $d^2(x+z)/dt^2$ の地震動の継続時間内の最大値を系の固有周期に対してプロットしたものである。通常、支点Gの運動の加速度 d^2z/dt^2 がある特定の地震動の加速度に等しく取られ、その地震動の応答スペクトルと呼ばれる。設計応答スペクトルは、既往の強震動や理論的に予測される地震動の応答スペクトルを参考にして定められるもので、構造物の固有周期に応じて、地震荷重として考慮すべき最大せん断力または、入力エネルギーの大きさを規定するものとして用いられている（Housner, 1956）。

図1のモデルは、構造物地盤系の力学的性質ををもっとも単純に表現するもので、現在まで耐震設計の基本モデルとして用いられている。これは、構造物地盤系の変形が小さく、弾性範囲内にとどまっている場合は、地震荷重の代表値を与えるモデルとしてもっとも適当であると考えられる。また、構造系が塑性変形をしても、応答スペクトルからエネルギー等価則などの簡便的な方法を用いて必要靱性率などの設計指標を計算できることが確かめられ、各種の構造物の設計に使われている。結局、地震入力とは、地震動の加速度に対する慣性力として式（1）で与えられる。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m\ddot{z} \quad (1)$$

実際に地震動のエネルギーが構造物に入力されるのは、構造物と地盤の境界面を介しての応力の作用による。図1のモデルでも、支点Gで発生する力 $f = c\dot{x} + kx = -m(\ddot{z} + \ddot{x})$ が伝達されると仮定されている。応力は、近接作用力であり、慣性力とは異なるが、上述の仮定が成立すれば、あたかも慣性力が作用したように式（1）で応答計算が出来る。しかし、地震動の最大加速度が1 Gに近いような大きな地震動に対しては、この仮定が満たされないことが多いので、図1のモデルにもとづく応答スペクトルを用いて地震荷重を計算することは妥当とは言えない。

3 境界面のずれ変位を考慮したモデル

通常、地盤と構造物の間には、支圧力が作用して全体系として釣り合っている。図2は、これを模式

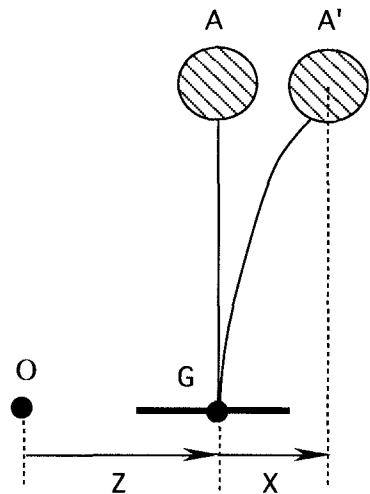


図1 応答スペクトルの計算モデル

的に示したものである。地震によって地盤が運動したり、地盤内部を応力波が伝わってくると境界面の圧力 P とせん断力 Q が変動し、この作用を介して、構造物内部に応力変動を生じ、構造物全体として振動する。一般に、境界面が伝達し得る応力には限界があり、この限界を越えると境界面で地盤と構造物の間にずれ変位を生ずる。大きな地震動では地震動のエネルギーの一部が、この過程で失われる。図1の基本モデルで境界面のずれ変位を考慮すると図3のようになる。

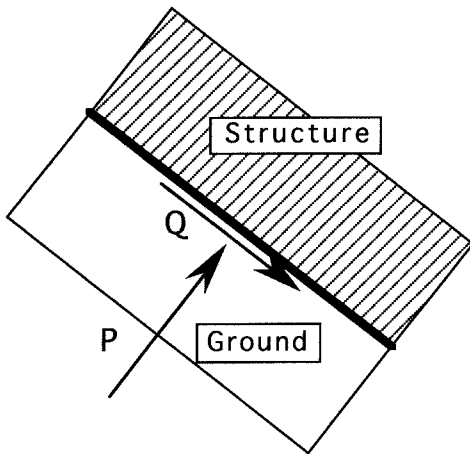


図2 構造物と地盤の境界面に働く応力

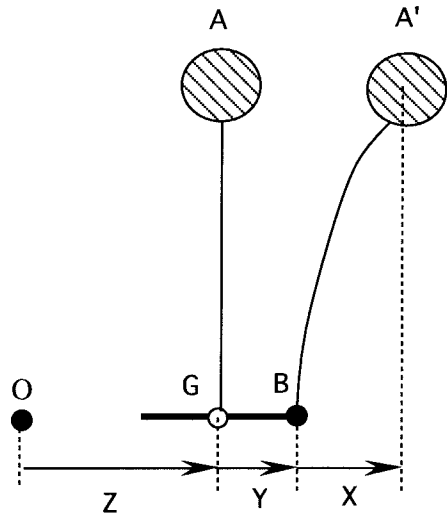


図3 境界面のずれ変位を考慮した1質点系

地盤の変位 z に対する質点の運動方程式と支点Bでの釣り合い式は、それぞれ、

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m\ddot{y} - m\ddot{z} \quad (2)$$

$$f = c\dot{x} + kx \quad (3)$$

ただし、 f は、支点Bに地盤が及ぼす力である。式(2)と式(1)を比較すると入力に地盤の加速度にずれの加速度 d^2y/dt^2 が加わった形をしており、地盤と構造物の境界面のずれによって入力に変化することを表している。通常、 f にはそれほど大きくない限界値があると考えられるので、構造物の受ける地震力にも限界があることが式(3)からわかる。

構造物と地盤の境界面の応力伝達特性を定量化して、式(3)の f を x 、 y 、 z 等と物性値の関数として書けば、式(2)、(3)から、応答を計算することが出来る。これは、基礎および周辺地盤の形状、力学的性質を定量的にモデル化する作業である。端的な事例として、周辺地盤が液状化したり、基礎が部分的に破壊した構造物が、上部構の被害が軽微であった事例などは、図3のモデルの境界面のずれ変位 y が生じた結果、入力が減少したものと解釈することが出来る。一方、地盤の液状化によって橋脚が大きく変位し、落橋した例などは、ずれ変位 y が、構造系を破壊した事例と考えられる。図3では、構造部材に作用する力を決めるのは、現在の支点からの変位 x であるが、構造物の機能性を左右するのは、初期位置からの変位 $x+y$ で表される。

従来は、地盤の非線型性による地震動の減衰、構造部材の塑性化によるエネルギー吸収などの効果を図1のモデルに取り入れる方法が設計に用いられてきた。図3のモデルは、地盤と構造物の間のずれを指標に加える事によって、より現実的に構造物に対する地震荷重を論じられるという利点がある。

参考文献：Housner, G.W., Limit design of structures to resist earthquakes, 1WCEE, 1956.