

I - 448

ひずみエネルギー理論を用いた地中構造物の動的解析

筑波大学大学院 学生会員 伊藤隆至
筑波大学 正会員 西岡隆

1. はじめに

地盤には、重力などの影響によってひずみエネルギーが蓄えられている。このひずみエネルギーがその限界量に達すると、地震が生じる。

地震が生ずれば、現代社会において地中に縦横無尽に張り巡らされている地中構造物（トンネルなど）は被害を受けることになる。このことは、地震が放出するひずみエネルギーが地中構造物の変形に許容されうるエネルギーの範囲を超えた時に地中構造物が全壊とか半壊に至ることに等しい。

本研究では、こういった地中のひずみエネルギーに着目することにより、地中構造物、特にシールド・トンネルの動的解析を行うものである。

2. FEM による非線形を考慮した動的解析

本研究では、等価線形化法（ここでは、Ramberg-Osgood モデルを適用した。）を用いて FEM による強制振動解析を行った。なお、解析にあたっては、シールド・トンネルを覆う土は平面とした節点数 228、要素数 384 から成る三角形平面要素の解析モデルを使用し、地盤の物性値（変形係数 1000 tf/m^2 、単位体積重量 1.80 tf/m^3 、側圧係数 0.75、ポアソン比 0.45、粘着力 0.00 tf/m^2 、内部摩擦角 30 度）および、ライニングの物性値（曲げ剛性 $5.4 \times 10^3 \text{ tf/m}^2$ 、単位体積重量 2.50 tf/m^3 、ポアソン比 0.20、内径 5 m、肉厚 0.3 m）を用いた。また、境界条件については、上端では水平方向自由・鉛直方向自由、下端では水平方向固定・鉛直方向固定、右端及び左端では水平方向自由・鉛直方向自由とした。

3. ライニングの動的応答

図 1 は、エル・セントロ地震波をフーリエ変換して求められたスペクトルについて各振動数ごとに解析を行い、結果として求められたライニングに作用する曲げモーメント（正）の最大値を各振動数ごとにプロットして線で結んだものである。振動数変化による顕著な違いはほとんど見られないのが分かる。

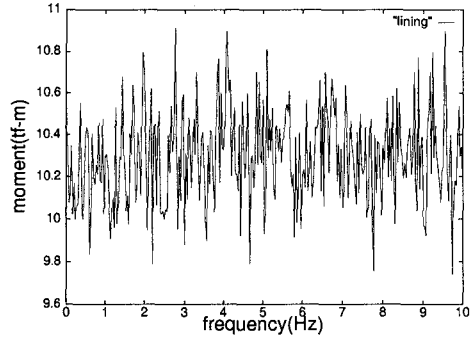


図 1 振動数とライニングに作用する曲げモーメント（正）の最大値との関係

4. 形状弾性ひずみエネルギーとその消費

地震動をフーリエ変換し、スペクトルの重ね合わせとみることによって、調和外力 ($F \sin \omega t$) による定常振動を考えると、

$$E + D - L = \text{一定} \quad (1)$$

ただし、

$$E = \frac{1}{2} m \dot{y}^2 dt + \frac{1}{2} k y^2 dt \quad (2)$$

$$D = \int c \dot{y}^2 dt \quad (3)$$

$$L = \int F \sin \omega t y dt \quad (4)$$

が成立する。（ここで、 m , k , c はそれぞれ質量、剛性、減衰係数を表す。）

これから、(運動エネルギー + 減衰力のした仕事) の変化は、その間に外力のなした仕事の変化に等しく、定常振動では半サイクル後に運動エネルギーは変化しないことから、半サイクル間に外力のなした仕事は減衰力によって消費された仕事に等しいことがわかる。

従って、定常振動の解を

$$y = \gamma_a \sin(\omega t - \delta) \quad (5)$$

とすれば、半サイクル間に減衰力のなす仕事 (ΔW) は、

$$\Delta W = \oint c \dot{y} dy = \frac{1}{2} \pi c \omega \gamma_a^2 \quad (6)$$

と表され、粘性減衰定常振動の半サイクル間の消費

エネルギー ΔW は振動数に比例し、振幅の2乗に比例することがわかる。(なお、静的な場合は $\omega = 0$ であるから、 ΔW は0である。)

5. 体積弾性ひずみエネルギーとその消費

今、系が振動を起こす前の体積弾性ひずみエネルギーを U_v 、振動によって半サイクル間に生じる損失エネルギーを ΔW とすると、損失エネルギーは物質内の個々の分子同士の結合力を弱めると考えるならば、体積弾性ひずみエネルギーの減少に等しいと置くことができるため、半サイクル間において物質に蓄えられる体積弾性ひずみエネルギー (U'_v) は、

$$U'_v = U_v - \Delta W \quad \dots\dots\dots (7)$$

ただし、

$$U_v = \frac{1}{2K} \sigma_m^2 \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad \dots\dots\dots (9)$$

となる。(σ_m は、平均主応力を表す。)

従って、平均主応力の減少分 ($\sigma_m - \sigma'_m$) は、間隙水圧の上昇分 (Δu) に等しいと考え、冪級数展開を行い近似すると、

$$\Delta u = \frac{E}{3(1-2\nu)\sigma_m} \Delta W \quad \dots\dots\dots (10)$$

が得られる。(E : 変形係数, ν : ポアソン比)

これから、半サイクルにおける間隙水圧の上昇分と消費エネルギーの関係は比例関係になっていることがわかる。このことは、消費エネルギーが増大するほど間隙水圧の上昇分が高くなり、変形係数が大きな値であるほどこの傾向が大きくなることを意味している。しかしながら、分母に σ_m が存在しており、間隙水圧が上昇する前の体積変化に関する応力、すなわち、平均主応力が高いほど間隙水圧の上昇分は低くなることもいえ、土塊は圧縮されていればいるほど、軟弱化しにくいということもできる。

6. ひずみエネルギーの消費率

半サイクル間におけるエネルギー消費率 ($\Delta W/W$) は、

$$\frac{\Delta W}{W} = 2\pi h \quad \dots\dots\dots (11)$$

ただし、

$$c = \frac{2h}{\omega} G \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad \dots\dots\dots (13)$$

で表わされる。

従って、エル・セントロ地震波をフーリエ変換して求められたスペクトルについて各振動数ごとと解析を行い、各地盤要素において半サイクル間におけるエネルギー損失率を算出してその平均値および標準偏差を求め、表示すると図2のようになる。(ただし、 $\diamond$ は平均値を表し、TおよびLは標準偏差を表す。)

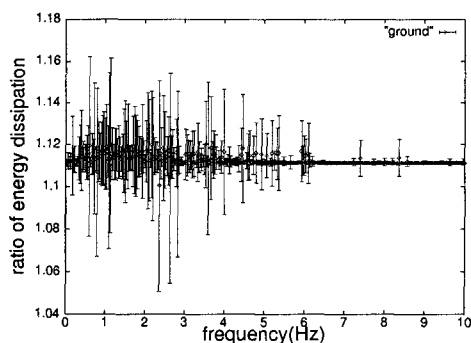


図2 振動数とエネルギー消費率の関係

7. まとめ

1) ライニング

ライニングに発生する軸力およびせん断力、曲げモーメントに関して、振動数変化による顕著な違いはみられなかった。これは、土の非線形化により、ライニングに作用する力が軽減されたためである。

2) ひずみエネルギー

エネルギー消費率についていえば、振動数が6 Hz 付近のところを境にしてエネルギー消費率のばらつきが異なっている。すなわち、0～6 Hz まではエネルギー消費率の標準偏差の値が大きくており、このことは、地盤の軟弱化が不均質に生じていることを示している。また、6～10 Hz までは、エネルギー消費率の標準偏差の値が小さいため、地盤の軟弱化が均質に生じていることを示している。さらには、1.0 Hz 付近および2.6 Hz 付近、4.0 Hz 付近にエネルギー消費率の標準偏差の値がかなり大きな値を示しており、地盤特性と何らかの関係があることを示している。

参考文献

- 1) 武島, 大野, 西岡: 不規則入力波に対する弾塑性構造物の線形的応答評価, 土木学会論文集, 第344号/I-1, pp253-262, 1984.