

累積損傷を評価するための地盤震動の振幅と繰り返し回数の検討

鹿林¹・安中正¹・田邊成²・河村直明²

¹正会員 東電設計(株)技術開発本部 (〒110 東京都台東区東上野3-3-3)

²正会員 東京電力(株)送変電建設本部 (〒100 東京都千代田区内幸町1-1-3)

耐用年数内に期待される地震時地盤震動による構造物の累積疲労損傷を評価するため、非定常地震動に対してその振幅と繰り返し回数の評価手法を検討した。まず、地震波形に対してMiner則に適用できる振幅を定義し、それを用いて地震波形を離散化した。次に、離散化した振幅を用いて振幅の分布と繰り返し回数の評価を検討した。最後に、地震の発生を確率過程とする地震活動モデルに基づき耐用年数内に発生する振幅と繰り返し回数の期待値を評価する手法を提案した。その結果は線形累積被害則が適用できる各種構造物の累積疲労損傷の問題に適用することができる。

Key Words : Cumulative fatigue, Miner's rule, seismicity, variable amplitude, expected number of cycles

1. はじめに

重複荷重を受ける構造物の設計において耐用年数内に生じる累積疲労損傷の評価は重要な課題である。構造物が受ける重複荷重として使用載荷による重複荷重以外に、温度変化による重複荷重や地震時地盤震動による重複荷重を考慮する場合がある¹⁾。地震による重複荷重は、振幅が使用載荷と同レベルの場合には、地震動の継続時間が短いため構造物の高サイクル疲労(high-cycle fatigue)に対して大きな問題にならないが、振幅が使用載荷より大きく上回る場合には構造物の低サイクル疲労(low-cycle fatigue)に大きな影響を与えると考えられる。地盤震動は強い非定常性を持ち、その性質は振幅とともにマグニチュード、震源距離、地盤条件などに影響される。非定常重複荷重による累積疲労損傷について確率過程理論に基づく研究例がある^{2), 3), 4)}が、耐用年数内に遭遇する地震による重複荷重を地震動の特性を考慮して検討した例はほとんど見られない。

定常振幅重複荷重下の構造物の疲労寿命は、一般的にS-N曲線

$$N = AS^{-B} \quad (1)$$

で記述される。ここで、 N は破壊までの繰り返し回数(疲労寿命)、 S は応力振幅、 A 、 B は実験による係数である。非定常振幅重複荷重下の疲労問題に対しては、次式のように定常振幅条件下のS-N曲線を用いた線形累積被害則が応用されている^{5), 6)}。

$$D = \sum D_i = \sum \frac{n_i}{N_i} \quad (2)$$

ここで、 D は非定常振幅に対する累積疲労損傷、 D_i は応力振幅 S_i による疲労損傷、 N_i は応力振幅 S_i に対応する定常振幅で繰り返されたときの疲労寿命、 n_i は応力振幅 S_i の繰り返し回数である。式(2)は一般にMiner則と呼ばれている。

地震による重複荷重の評価は、地震発生の際の対象地点での地震動振幅と繰り返し回数の評価と耐用年数内に遭遇する地震の回数の評価からなると考えられる。つまり、耐用年数 Y に対応する構造物の累積疲労損傷 D_{life} はマグニチュード M の地震が発生した場合にMiner則に基づき求められるその地震による累積疲労損傷 $f(M)$ とその地震発生回数の積を考慮すべき全地震に対して積分することにより求めることができる。

$$f(M) = \sum_i \frac{n_i^m}{N_i^m} \quad (3)$$

$$D_{life} = Y \int \nu(M)f(M)dM \quad (4)$$

ここで、 N_i^m は地震 M による応力振幅 S_i に対応する疲労寿命、 n_i^m は振幅 S_i の繰り返し回数、 $\nu(M)$ は地震 M の年期待発生回数である。

一般性を失うことなく、応力 S —ひずみ ϵ 関係は

$$S = E\epsilon \quad (5)$$

により記述される。パイプラインなどに対して構造物のひずみは地盤ひずみとほぼ等しいと考えられる。また、地震波が地表に斜め入射する場合には、地盤ひずみ $\varepsilon(t)$ は地盤速度 $v(t)$ を用いて求められる。

$$\varepsilon(t) = v(t)/c \quad (6)$$

ここで、 c は見かけ伝播速度である。すると、この場合の応力振幅は地盤速度振幅と比例し、繰返し回数は地盤速度の繰返し回数と同一である。従って、本研究では、地盤速度を対象としてマグニチュード M の地震に対応する振幅と繰返し回数の評価手法及びその方法と地震の発生を確率過程とする地震活動モデルを組み合わせた耐用年数内の振幅と繰返し回数の評価手法を提案した。

2. 振幅と繰返し回数の定義

地震動波形から分かるように地震動の振幅はランダムであり、基線に対して対称になっていない。そのような重複荷重に対してピーク応力計数法などにより繰返し回数が求められている。その方法は安全側であると言われている。ここでは、振幅と繰返し回数をより精確に計算するため、地震動波形をサイクルに分解し、それぞれのサイクルの両振幅を計算してその二分の一をサイクルの振幅とし、同じ振幅のサイクル数をその振幅の繰返し回数とする方法を検討した。ただし、サイクルの定義として2つの定義を用いた。一つ目は図-1に示すように地震波の基線を基準にしてサイクルに分解する方法であり、正側にゼロクロッシング(zero-crossing)する2点間の振動を一サイクルとする。この時の振幅はサイクル内の正側の最大値と負側の最大値の絶対値の和として定義される。その振幅をゼロクロッシング振幅と呼ぶ。二つ目は地震波形を円周波数 2π を基準にして分解する方法であり、それに対応する振幅は 2π サイクル内の極大値と極小値の差を用いて定義さ

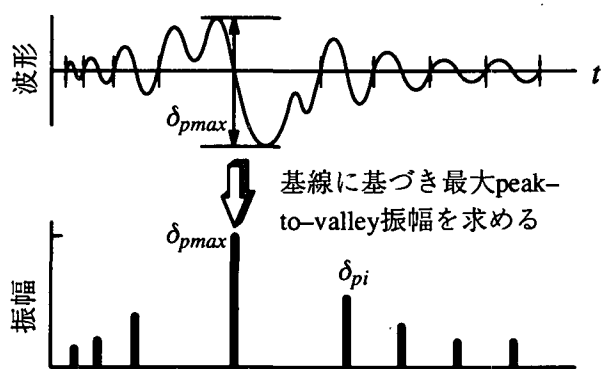


図-1 Zero-Crossing振幅の定義

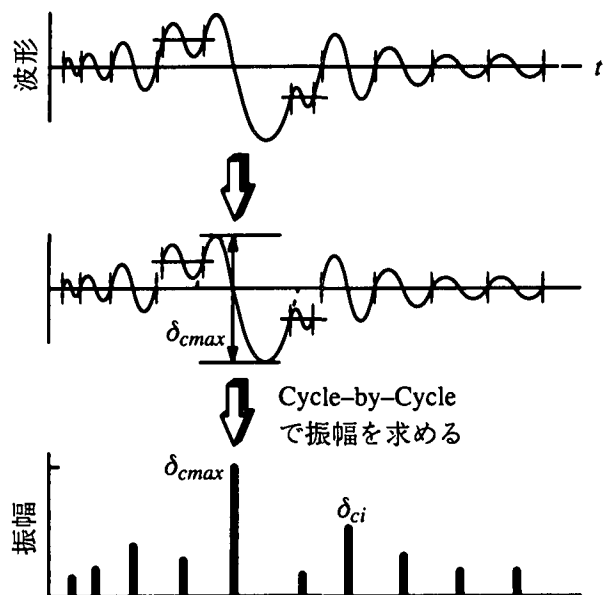


図-2 Cycle-by-Cycle振幅の定義

れる。この定義についての説明を図-2に示す。この振幅をサイクルバイサイクル(cycle-by-cycle)振幅と呼ぶ。実際の地震動波形においてサイクルバイサイクル振幅の最大値は場合によってゼロクロッシング振幅の最大値より小さくなる可能性があるが、サイクルバイサイクル振幅による定義を用いたサイクルの数の方がゼロクロッシング振幅による定義を用いたサイクルの数より一般に多くなる。

3. 振幅の分布と繰返し回数の評価手法

耐用年数内に生じる構造物の累積疲労損傷を評価するためには、まず、構造物が耐用年数内に遭遇する地震に対応する振幅と繰返し回数を予測しなければならない。しかし、現状では、地震動の最大値は距離減衰式を用いて推定できるが、振幅の分布、繰返し回数の推定についてはまだ実用的な方法が提案されていない。地震動の振幅及び繰返し回数は地震のマグニチュード、震源距離、地盤条件などに影響され、ここでは、振幅の分布と繰返し回数の推定手法について検討する。

最初に、図-1あるいは図-2に示したように地震動波形をゼロクロッシング振幅あるいはサイクルバイサイクル振幅で離散化する。Miner則では、一サイクルによる疲労損傷はそのサイクルの周期と無関係であるので、このような離散化は累積疲労損傷の評価には影響がない。ゼロクロッシング振幅あるいはサイクルバイサイクル振幅を用いて離散化した振幅を $\{\delta_1, \dots, \delta_i, \dots, \delta_{max}, \dots, \delta_n\}$ とする。それを最大振幅 δ_{max} を用いて正規化すると、正規化振幅 $\{\lambda_1, \dots, \lambda_i, \dots, \lambda_n\}$ とする。

$1, \dots, \lambda_n$ が求められる。ここで、 $\lambda_i = \delta_i / \delta_{max}$ である。そうすると、地震動の振幅特性を代表する最大振幅 δ_{max} と振動特性を表す正規化振幅をそれぞれ独立に処理することが可能になる。ゼロクロッシング最大振幅あるいはサイクルバイサイクル最大振幅については、それぞれの距離減衰式を設定し、それを用いて推定することができる。問題は振幅の分布の評価である。

ゼロクロッシング振幅の分布の評価手法、サイクルバイサイクル振幅の分布の評価手法は同じであるので、ここでは、サイクルバイサイクル振幅を用いた振幅分布の評価手法を説明する。図-3に示すよう

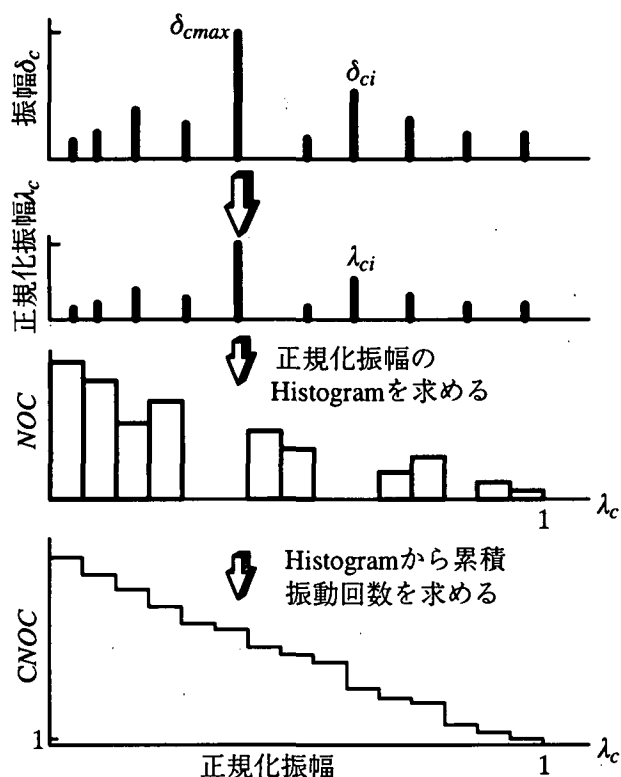


図-3 振幅の分布と繰返し回数の評価手法

に、まず、離散化振幅 $\{\delta_{c1}, \dots, \delta_{ci}, \dots, \delta_{cmax}, \dots, \delta_{cn}\}$ より正規化振幅 $\{\lambda_{c1}, \dots, \lambda_{ci}, \dots, 1, \dots, \lambda_{cn}\}$ を求める。次に、正規化振幅においてヒストグラムを計算する。そのヒストグラムは振幅の分布を表しているが、実際のヒストグラムを見ると図に示すように不連続点が多く連続関数で当てはめるのは難しい。そこで、ヒストグラムより正規化振幅の累積発生回数 $CNOC$ を求める。累積発生回数と正規化振幅の関係について地震観測記録を用いて考察した。いくつかの地震記録を用いたが、ここでは、1968年5月16日十勝沖地震($M_J=7.9$)の八戸の記録($\Delta=187km$)の結果を例として示す。地盤速度波形から求めた正規化振幅のヒ

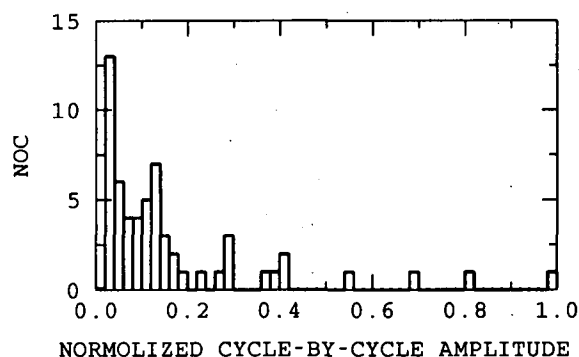


図-4 正規化振幅のヒストグラム

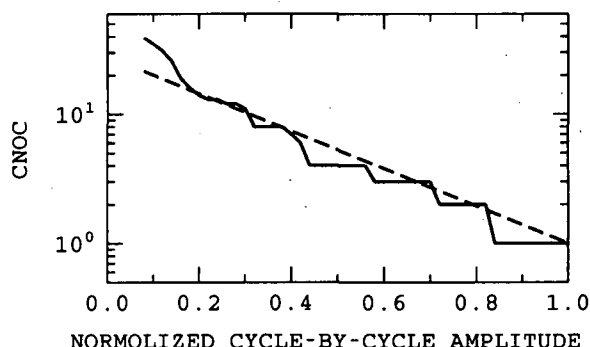


図-5 正規化振幅の累積発生回数とその近似

ストグラムを図-4に示す。また、ヒストグラムから求めた正規化振幅の累積発生回数を図-5の実線で示す。 λ - $CNOC$ の関係は振幅1に対応する発生回数が常に1であることを考慮すると次のように設定することができる。

$$\log(CNOC) = b(1-\lambda) \quad (7)$$

八戸の記録における正規化振幅の累積発生回数を式(7)により回帰した結果を図-5に破線で示す。破線は実線をよく近似していることが見られ、累積発生回数と正規化振幅の間に式(7)のような線形関係を設定することが可能であると考えられる。地震動の振幅の分布、つまり、勾配 b は直接的には地震動波形の包絡形状、継続時間、周波数特性などに影響されるが、それらはマグニチュード、震源距離、地盤条件などに依存していると考えられる。従って、勾配 b を多数の記録に対して求め、記録条件(マグニチュード、震源距離など)を説明変数とした推定式を設定すれば、特定の地震に対する振幅の分布を正規化振幅の累積発生回数の差分から推定することができる。

4. 地震活動モデルによる繰返し回数の評価

耐用年数内に発生する地震の規模、発生回数を確定的に評価するのはほぼ不可能である。そのため、

地震危険度解析では地震の発生を確率過程と見なし、地震動の強さを評価している。ここでは、地震危険度解析と同様に地震の発生を確率過程として耐用年数内の地震の期待発生回数を評価し、それに基づき耐用年数に発生する地震動の振幅と期待繰返し回数を評価する手法を検討した。

提案する手法を図-6に示す。地震活動域Aに対

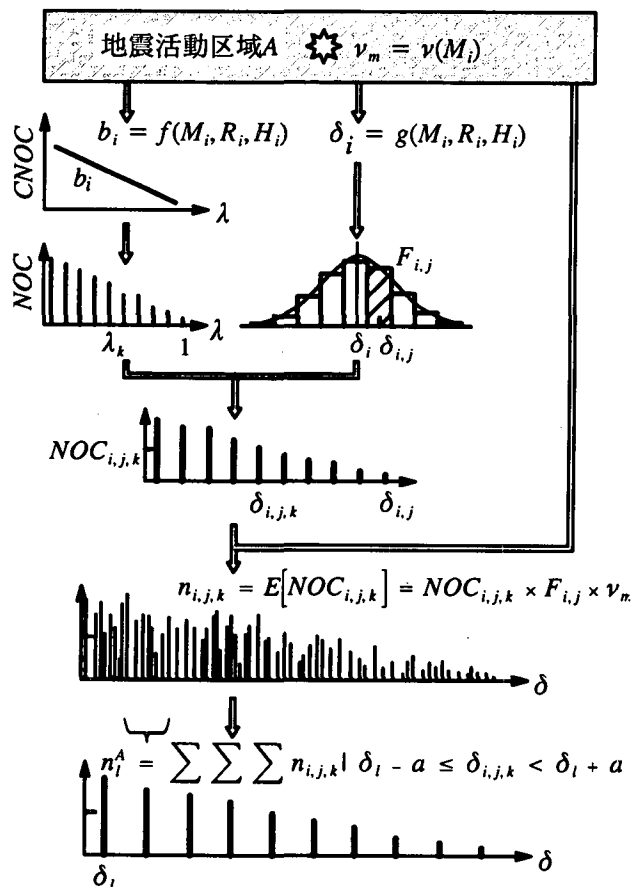


図-6 地震活動モデルによる繰返し回数の評価

してマグニチュード M_i の地震の年期待発生率を ν_m とする。その地震が発生した場合の対象地点の最大振幅 δ_i 、正規化振幅の累積発生回数 $CNOC$ はそれぞれの距離減衰式により求めることが可能である。また、累積発生回数の差分から正規化振幅の分布 NOC を求め、最大振幅のばらつきを考慮した $\delta_{i,j}$ を用いて振幅 $\delta_{i,j,k}$ とその繰返し回数 $NOC_{i,j,k}$ が求められる。すると、式(4)を用いて耐用年数内の累積疲労損傷を評価することができるが、そのままの形では違うMiner則を持つ構造物に対しては同一地点であってもそれぞれに対する積分を計算しなければならない。ただし、Miner則が線形累積則であることを利用すると、次のように全地震による繰返し回数の関数の形に表現できる。すなわち、式(4)を離散化の形にし、

$$D_{life} = Y \times D_{year} = Y \sum_m \sum_i \frac{\nu_m n_i^m}{N_i^m} \quad (8)$$

和を計算する順序を交換すると、

$$D_{year} = \sum_i \sum_m \frac{\nu_m n_i^m}{N_i^m} = \sum_i \frac{n_i^{allm}}{N_i} \quad (9)$$

となる。どの地震に対しても振幅 δ_i が同じであれば疲労寿命が同じ、つまり、 $N_i^m = N_i$ であることを用いている。この形にすると、ある振幅においてその繰返し回数を累積疲労損傷を計算する前に全ての地震に対して整理することができる。従って、地震活動域Aで発生する全ての M に対して整理すると、 n_i^A が求められ、また、全部の地震活動域を考慮すると、対象地点の振幅と繰返し回数の年期待値 n_i^{allm} が評価される。一般に、地震の発生はポアソン過程と仮定されるので、耐用年数 Y 内の繰返し回数は $Y \times n_i^{allm}$ である。

最大振幅のばらつきや累積繰返し回数のばらつきも分布形を仮定すれば容易に考慮することができる。

5. 結論

耐用年数内に期待される地震時地盤震動による構造物の累積疲労損傷を評価するため、地震波形に対して、Miner則に適用できる二種類の振幅を定義し、その振幅を用いて振幅の分布について検討した。また、地震の発生を確率過程とする地震活動モデルに基づき耐用年数内に発生する振幅と繰返し回数の期待値を評価する手法を提案した。その結果は線形累積被害則が適用できる各種構造物の累積疲労損傷の問題に適用できると考えられる。

参考文献

- 1) 日本ガス協会: ガス導管耐震設計指針, 1982.
- 2) Karadeniz, H.: Spectral analysis and fatigue reliability assessment for offshore structures, 5th ICOSSAR, pp.135-142, 1989.
- 3) Nielsen, R. J. et al.: Fatigue reliability under nonstationary loads: model formulation, *J. Struc. Eng., ASCE*, Vol.119, No.2, pp.662-669, 1993.
- 4) Nielsen, R. J. et al.: Fatigue reliability under nonstationary loads: model application, *J. Struc. Eng., ASCE*, Vol.119, No.8, pp.2441-2460, 1993.
- 5) American Association of State Highway and Transportation Officials: Guide specifications for fatigue of steel bridges, 1989.
- 6) 日本鋼構造協会: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説, 技報堂出版, 1989.