

(83) 地震動の加速度/速度のrms振幅比と非定常特性の関係

徳島大学工学部 正員 〇沢田 勉 徳島大学工学部 正員 平尾 潔
和歌山高専 正員 辻原 治 徳島大学大学院 学正員 岡本 康

1. はじめに 構造物の耐震設計を合理的に行うためには、入力情報である地震動の特性を的確に把握することが必要である。地震動特性は、強度特性、周波数特性および非定常特性に大別される。これらのうち最大地動で代表される強度特性は、耐震設計のための地震荷重の基本となる。また、周波数特性はフーリエスペクトル等で表現され、その大まかな特性は、卓越振動数やスペクトルの拡がりを含むスペクトル定数に集約される。他方、非定常特性は、波形包絡線や非定常スペクトルによって表される。耐震設計では、これらの特性を適切に反映した地震荷重を設定することが必要であるが、その際に、上述の地震動の諸特性がなるべく少ないパラメータで表現できれば便利である。このような観点より、筆者らは、地震動の最大加速度と最大速度の比 a_{max} / v_{max} に着目し、この比がスペクトル定数と密接に関係することを指摘し、 a_{max} / v_{max} が地震動の周波数特性を表す良好な指標となることを示した。^{1), 2)} このことより、最大加速度 a_{max} と最大速度 v_{max} が分かれば、地震動の強度特性と周波数特性のかなりの部分が説明できることになる。他方、非定常特性は、振幅の非定常性と周波数の非定常性に大別され、それらは前述の波形包絡線や非定常スペクトルにより表される。このうち、波形包絡線は地震記録の各時刻におけるrms振幅より容易に求められる。また、非定常スペクトルについては、各種の方法が提案されており、周波数の非定常性を詳細に把握するのに用いられている。ところで、前述の加速度と速度の振幅比に着目すると、地震記録より得られる加速度と速度の各時刻におけるrms振幅の比をとると、周波数の非定常性を大まかに捉えられることが予想できる。

このような観点より、本報告では、加速度および速度時刻歴より得られるrms振幅の比 $a_{rms}(t) / v_{rms}(t)$ を用いて、地震動の周波数の非定常性を大まかに捉えることを試みる。具体的には、地震動の卓越振動数の時間的変動を $a_{rms}(t) / v_{rms}(t) / 2\pi$ を用いて表す。

2. 地震動の加速度/速度のrms振幅比の時間変動 地震動の加速度記録 $a(t)$ が得られているとき、速度時刻歴 $v(t)$ は $a(t)$ を一度積分することにより求められる。これらの $a(t)$ および $v(t)$ を用いると時刻 t におけるそれぞれのrms振幅 $a_{rms}(t)$ および $v_{rms}(t)$ が次式より計算できる。

$$a_{rms}(t) = \left[\frac{1}{T_a} \int_{t-T_a/2}^{t+T_a/2} a^2(t) dt \right]^{1/2} \quad (1)$$

$$v_{rms}(t) = \left[\frac{1}{T_a} \int_{t-T_a/2}^{t+T_a/2} v^2(t) dt \right]^{1/2} \quad (2)$$

ここで、 T_a はアークウィンドウの幅である。

いま、地震動加速度 $a(t)$ が角振動数 $\omega_0 = 2\pi f_0$ の調和波からなる場合を考えると、 $a(t)$ 、 $v(t)$ は次式のように表される。

$$\begin{cases} a(t) = A \cdot \cos \omega_0 t \\ v(t) = A \cdot \sin \omega_0 t / \omega_0 \end{cases} \quad (3)$$

これらを式(1) および(2) に代入し、 $T_a = 2\pi / \omega_0$ としてrms振幅 $a_{rms}(t)$ 、 $v_{rms}(t)$ を求めると、次式ようになる。

$$a_{rms}(t) = \left[\frac{\omega_0}{2\pi} A^2 \int_{t-\pi/\omega_0}^{t+\pi/\omega_0} \cos^2 \omega_0 t dt \right]^{1/2} = \frac{A^2}{2} \quad (4)$$

$$v_{rms}(t) = \left[\frac{\omega_0}{2\pi} \left(\frac{A}{\omega_0} \right)^2 \int_{t-\pi/\omega_0}^{t+\pi/\omega_0} \sin^2 \omega_0 t dt \right]^{1/2} = \frac{A^2}{2\omega_0^2} \quad (5)$$

上式より、 $a_{rms}(t)/v_{rms}(t)$ は

$$\frac{a_{rms}(t)}{v_{rms}(t)} = \omega_0 = 2\pi f_0 \quad (6)$$

となり、調和波の場合には、 $a_{rms}(t)/v_{rms}(t)$ は ω_0 と一致する。一般の地震動の場合には、上述のような簡単な関係を導くことはできないが、地震動の卓越振動数（又は平均振動数）の時間変動と $a_{rms}(t)/v_{rms}(t)$ の間に次のような近似的な対応関係のあることが予想できる。

$$\frac{a_{rms}(t)}{v_{rms}(t)} \simeq 2\pi f_a(t) \quad (7)$$

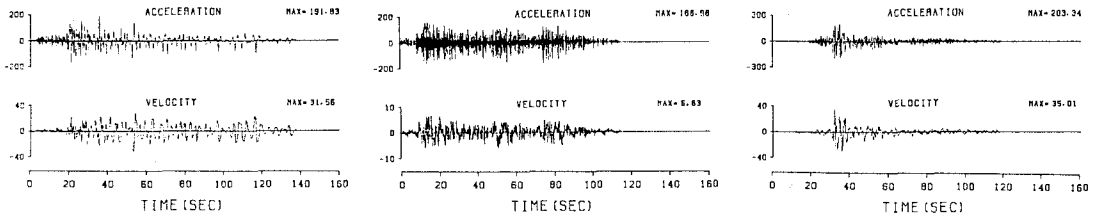
ここで、 $f_a(t)$ は時刻 t 近傍における地震動時刻歴の卓越振動数又は平均振動数である。上式より、地震動の時刻歴 t における卓越振動数 $f_a(t)$ が次のように表される。

$$f_a(t) \simeq a_{rms}(t)/v_{rms}(t)/2\pi \quad (8)$$

すなわち、地震動の加速度と速度のrms振幅比を 2π で除した値が卓越振動数 $f_a(t)$ と近似的に対応することになる。

3. 数値解析および考察 実地震記録を用いて前述の加速度と速度のrms振幅比 $a_{rms}(t)/v_{rms}(t)$ を計算し、その時間変動と周波数の非定常性の関係を検討する。解析に用いた地震記録は、1968年十勝沖地震の際に青森、宮古および八戸で得られた加速度記録である。図-1に、これらの記録の加速度時刻歴とそれを一度積分して求めた速度時刻歴を、図-2にはそれらのフーリエスペクトルを示す。

(1) rms振幅比 $a_{rms}(t)/v_{rms}(t)/2\pi$ の時間変動 式(1)および(2)より加速度と速度のrms振幅 $a_{rms}(t)$ および $v_{rms}(t)$ を計算し、両者の比 $a_{rms}(t)/v_{rms}(t)$ を求めた。ただし、式(1)、(2)におけるデータウィンドウの幅 T_a は、試行錯誤により決定し、 $T_a=4$ secを用いた。図-3には、図-1の加

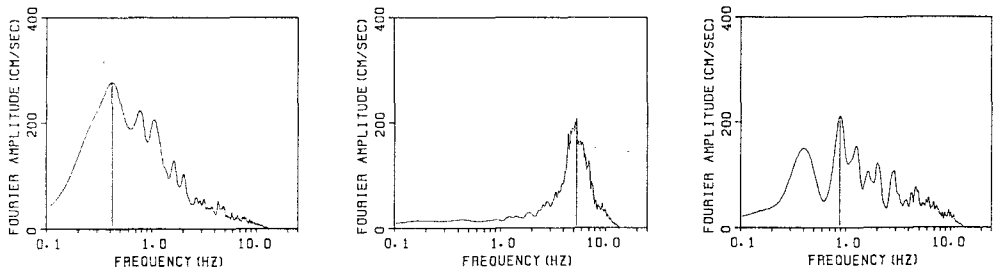


(a) 青森 E-W

(b) 宮古 N-S

(c) 八戸 E-W

図-1 加速度および速度時刻歴



(a) 青森 E-W

(b) 宮古 N-S

(c) 八戸 E-W

図-2 加速度記録のフーリエスペクトル

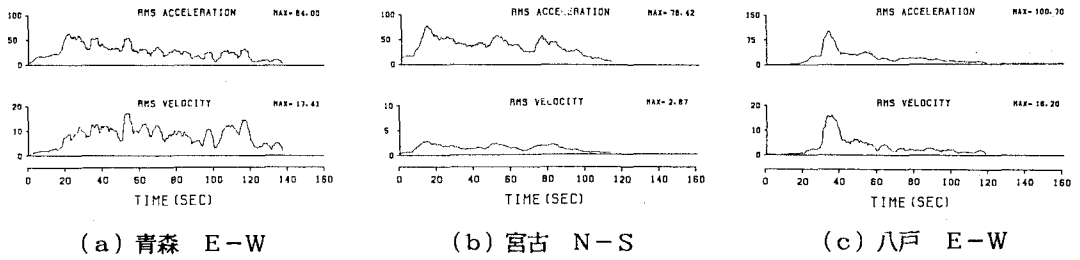


図-3 加速度rms振幅および速度rms振幅

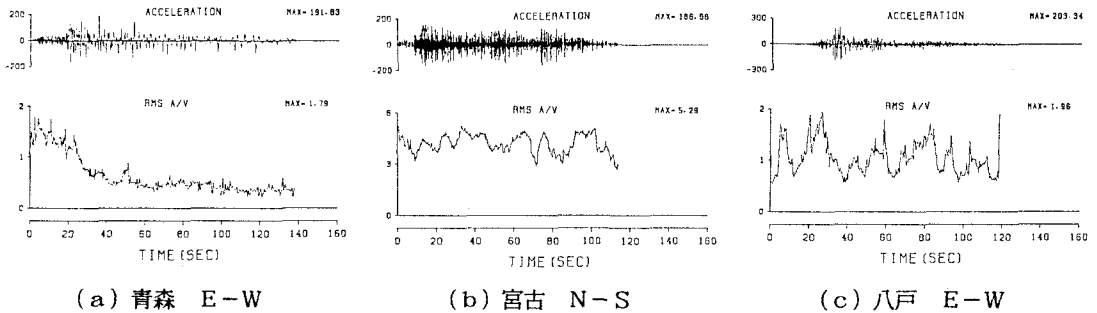


図-4 $f_a(t) = a_{rms}(t)/v_{rms}(t)/2\pi$ の時間変動

速度および速度時刻歴のrms振幅を示す。図-4には、rms振幅比を 2π で除した $f_a(t) = a_{rms}(t)/v_{rms}(t)/2\pi$ (式(8))を加速度時刻歴とともに示した。図において横軸は時間、縦軸は $f_a(t) = a_{rms}(t)/v_{rms}(t)/2\pi$ である。この図より、以下のことがわかる。

- (a) 青森 (E-W) では、波形の初期部で $f_a(t) \approx 1.5 \text{ Hz}$ 、後半部で $f_a(t) \approx 0.4 \text{ Hz}$ であり、卓越振動数 $f_a(t)$ が初期部、強震部、後半部で異なっている。後半部の $f_a(t)$ は、図-2のフーリエスペクトルの卓越振動数とほぼ対応している。また、加速度波形を詳細に見ると、初期部で高振動数成分が卓越し、後半部で低振動数成分が卓越している。これは $f_a(t)$ の傾向と一致している。このことより、 $f_a(t)$ が卓越振動数の時間的変動を捉えていることがわかる。
- (b) 宮古 (N-S) では、 $f_a(t)$ はほぼ $3 \sim 5 \text{ Hz}$ の間にあり、多少の凹凸はあるが平均的な傾向は時間的に変化していない。図-2のフーリエスペクトルのピーク振動数は約 5 Hz であり、この場合の $f_a(t)$ はそれより若干小さめであるが、ほぼ対応している。
- (c) 八戸 (E-W) では、 $f_a(t)$ の平均は約 1 Hz であり、図-2のピーク振動数と対応する。しかし、この場合の $f_a(t)$ は $0.5 \sim 2 \text{ Hz}$ の間で激しく変動しており、 $f_a(t)$ の局所的な変化は大きい。

以上のように、rms振幅比から得られる $f_a(t) = a_{rms}(t)/v_{rms}(t)/2\pi$ の平均的傾向や時間的変化は、フーリエスペクトルの卓越振動数、波形に現れる大まかな卓越振動数の変化によく対応している。

(2) rms振幅比 $a_{rms}(t)/v_{rms}(t)/2\pi$ と非定常スペクトルの関係 前述のように、地震動の周波数の非定常性は、各種の非定常スペクトルにより詳しく調べることができる。ここでは、上述のrms振幅比より得られる $f_a(t) = a_{rms}(t)/v_{rms}(t)/2\pi$ と非定常スペクトルの対応関係を検討する。ここでの非定常スペクトル解析法としては、亀田による方法⁽³⁾を用いた。図-5は、 $f_a(t) = a_{rms}(t)/v_{rms}(t)/2\pi$ と非定常スペクトルを同一図中に示したものである。図において、横軸は時間、縦軸は振動数であり、非定常スペクトルは等高線で、また $f_a(t)$ は太い実線で示されている。ただし、図中の等高線の内部以外の空白部分はパワーが小さい領域である。図より、以下のことがわかる。

- (a) rms振幅比 $f_a(t) = a_{rms}(t)/v_{rms}(t)/2\pi$ の時間変動は、非定常スペクトルの平均的な傾向とほぼ一

致している。すなわち、 $f_a(t)$ は、非定常スペクトルの比較的大きい領域を通っている。しかし、八戸

(E-W)のように、ある時刻で非定常スペクトルが2つのピークをもつ場合には、それらのピークの間領域を通り、最大ピークの振動数点を正確に捉えていない。

(b) 青森 (E-W)のように、卓越振動数が後半になるほど低振動数側へ移行する場合、また、宮古 (N-S)のように、卓越振動数が時間的に変動しない場合にも、 $f_a(t)$ は非定常スペクトルの平均的な傾向とよく対応している。

以上のように、加速度と速度のrms振幅比より得られる $f_a(t) = a_{rms}(t) / v_{rms}(t) / 2\pi$ は、地震動の周波数の非定常性の平均的な傾向を捉えるのに適した指標となる。

4. おわりに 地震動加速度と速度のrms振幅比より得られる $f_a(t) = a_{rms}(t) / v_{rms}(t) / 2\pi$ と非定常性の関係を、フーリエスペクトル、非定常スペクトルとの対比により検討した。その結果、 $f_a(t)$ が地震動の周波数の非定常性の大きな傾向とよく対応することがわかった。ただし同一時刻にスペクトルが複数のピークをもつような場合には、この $f_a(t)$ では最大ピーク振動数を正確に捉えられない。本報告で提示した $f_a(t)$ は、加速度時刻歴さえ与えられれば容易に計算できる指標であり、そのモデル化も比較的簡単であるので、模擬地震動への非定常性の導入などに適用可能と考えている。また、地震動による構造物の損傷度を逐次的に捉えるためにも利用できると考える。

参考文献

- (1) 沢田・平尾・山本・川手：第21回地震工学研究発表会、1991.
- (2) SAWADA, HIRAO, YAMAMOTO and TSUJIHARA: 10WCEE, Vol. 2, 1992.
- (3) 亀田：土木学会論文報告集、第 235号、1975年.

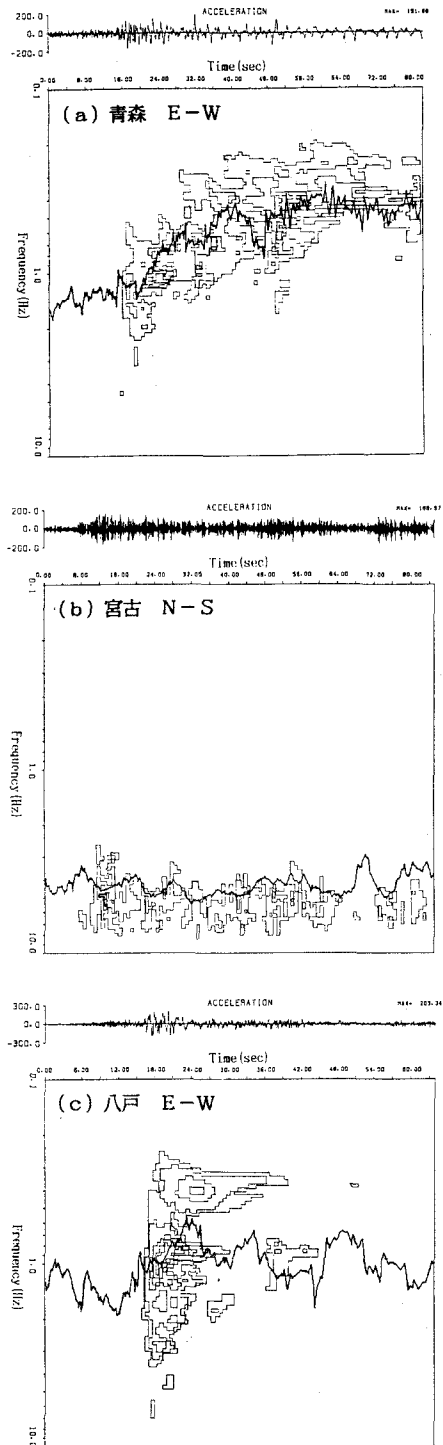


図-5 $f_a(t) = a_{rms}(t) / v_{rms}(t) / 2\pi$ と非定常スペクトルの関係