

京都大学工学部 正会員 亀田弘行

1. まえがき 構造物の地震応答に対して地震動の継続時間が影響を持つことは、実地震記録の応答スペクトルや不規則振動論により指摘されてきたが^{1)~4)}、その定量的な関係は未だ明確ではない。その理由の一つに地震動の継続時間そのものの定義法が十分に整備されていないことがある。筆者らは、最大加速度の期待値および加速度波形の全パワーから継続時間を定義する二つの方法を提案したが^{2), 3)}、それらも構造物の応答との関連を明らかにするうえでは十分ではなかった。そこで、本研究では、構造物の応答に対する影響を端的に表わすような地震動の継続時間の定義法を見出すことを目的とし、そのための方法を提案した。また、応答量としては、線形応答スペクトルのみでなく、継続時間の影響がより大きいと考えられる非弾性応答、特に消費された全履歴エネルギーをも考慮した。

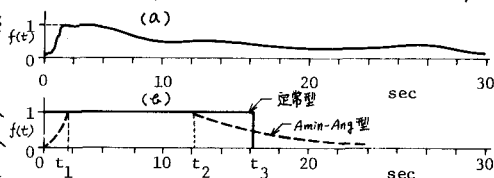
図-1 非定常包絡線(EI Centro, 1940, NS: $m=1$, $T_1=14.2$ sec)

表-1 解析に用いた加速度記録とその諸元

No.	Site	Date	Comp.	Max. acc. (gal)	σ_{max} (gal)	Filter	f_p (Hz)	β_f
1	EI Centro	5-08-40	S00E	342	114.0	B	1.19	0.80
2	Centro		S90W	210	74.8	A	1.91	0.42
3	Taft	7-21-52	N21E	153	52.1	C	1.46	1.08
4	Taft		S69E	176	58.1	A	2.37	0.45
5	Olympia	4-13-49	N04W	162	64.3	C	1.59	1.13
6	Olympia		N86E	275	69.2	A	3.03	0.43
7	Pacoima Dam	2-09-71	S16E	1148	270.9	C	1.63	1.14
8	Pacoima Dam		S74W	1055	266.4	B	2.01	0.61
9	Orion Blvd.	2-09-71	N00W	250	87.0	C	0.88	1.08
10	Orion Blvd.		S90W	132	52.4	C	0.40	1.89
11	Castaic	2-09-71	N21E	309	88.6	B	1.85	0.74
12	Castaic		N69W	265	92.0	B	1.82	0.37

2. 地震動の非定常性と等価継続時間の定義 地震動の振幅の非定常性は、加速度記録から移動平均によって求めた rms 強度の時間的変動 $g(t)$ で表わすことができる⁵⁾。 $g(t)$ の最大値を σ_{max} , $f(t) = g(t)/\sigma_{max}$ とすれば、 σ_{max} が地震動の強度を表わす最大 rms 値、 $f(t)$ が継続時間の影響を含む非定常包絡線である。ここでは、移動平均のためのウィンド関数にベル型の cosine 1 波を用い、平均化の等価幅を 4 sec として計算を行なった。得られた $f(t)$ の 1 例を図-1(a)に、また表-1 の加速度記録に対する σ_{max} の値を同表中に示した。こうして得られた $f(t)$ を用いて、地震動の等価継続時間を次式で定義する。

$$T_n = \int_0^\infty \{f(t)\}^n dt \quad \text{----- (1)}$$

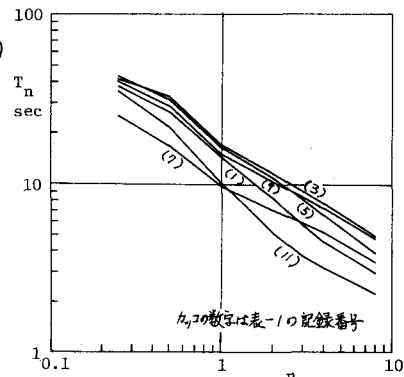


図-2 等価継続時間

表-1 の加速度記録に対する T_n の計算結果の一部を図-2 に示した。式(1) の n は任意の数値をとりうるが、 n の増加と共に地震動の最強部 ($f(t)=1$ となる時刻の近傍) のみが積分結果に貢献するため、 T_n の値は n と共に減少する。

3. 継続時間パラメータ n の決定法 周波数特性は等しいが、 $f(t)$ の形状が異なる二つの地震動から、等しい応答解析結果が得られたとすると、両者の T_n が等しくなるように式(1) の n を定めれば、応答量との関連で継続時間を定義することができ。すべての記録に対しこの方法を適用して、唯一つの n の値を定めるのは不可能であるから、ここでは以下のように、シミュレーションの手法を用いて、応答の平均誤差が十分小さくなるような n の値を見出すことを目標とした。

表-1 の加速度記録に対し、各 1 個の模擬地震波を作成する。その形は $\sigma_{max} f(t) g(t)$ とする。ただし、 σ_{max} は表-1 の最大 rms 値、 $f(t)$ は図-1(b) に示したような二種の非定常包絡線関数であり、それぞれ定常型包絡線、Amin-Ang 型包絡線と呼ぶ。同図の t_1, t_2, t_3 は、これらの関数から得られる等価継続時間 T_n が、元の加速度記録の T_n に等しくなるように定めた。また $g(t)$ は正規定常過程のサンプル関数であり、次の三つのうち

それぞれの形のパワースペクトルを有する。

$$\text{Type A: } G_n(\omega) = \frac{\gamma_A}{\omega_g} \frac{1 + 4\beta_g^2 (\omega/\omega_g)^2}{H(\omega)} \dots (2.a)$$

$$\text{Type B: } G_n(\omega) = \frac{\gamma_B}{\omega_g} \frac{(\omega/\omega_g)^2}{H(\omega)} \dots (2.b)$$

$$\text{Type C: } G_n(\omega) = \frac{\gamma_C}{\omega_g} \frac{\omega/\omega_g}{H(\omega)} \dots (2.c)$$

ただし、 $H(\omega) = \{1 - (\omega/\omega_g)^2\}^2 + 4\beta_g^2 (\omega/\omega_g)^2$ 、
また、 $\gamma_A, \gamma_B, \gamma_C$ は、 $g(t)$ の分散 σ に
するための係数である。表-1の各記録に
ついて、 β_g と ω_g を独立変数とする2次元
最小自乗法によって式(2)の中から最適フ
ィルター関数を決定した。フィルターのタイ
プ、卓越振動数 f_g 、形状パラメータ β_g の
値を表-1に示した。

このようにして作成した模擬地震波と原
加速度記録について弾塑性系の応答解析を
行ない、与えられた動性率 μ に対する降伏変
形スペクトル V と全履歴エネルギー E を求
めた。シミュレーションによる誤差を

$$\left. \begin{aligned} r_d &= \ln(V_s/V_r) \\ r_e &= \ln(E_s/E_r) \end{aligned} \right\} \dots (3)$$

で表わす。ただし、添字 s, r はそれぞれ
模擬地震波、実地震記録を表わす。

4. 計算結果 r_d, r_e の平均値 $\bar{r}_d, \bar{r}_e$ の
例を図-3, 4に示した。一般に n の増加
とともに $\bar{r}_d, \bar{r}_e$ は減少するが、 n に対す
る依存度は $\bar{r}_e$ の方が大きい。これは、最
大応答のみに関係する $\bar{r}_d$ より、応答の全
過程を通じて蓄積される $\bar{r}_e$ の方が、継続時間の定義法の影響を受け易いことを表わしている。定常型包絡線と

$A_{min}-Ang$ 型包絡線を比較すると、 $A_{min}-Ang$ 型の結果の方が特に低振動数域で n に対する依存度が相対的に
小さく、模擬地震波の作成に用いる包絡線関数として、定常型包絡線より優れていることを示している。

これらの結果を用いて、 $\bar{r}_d \approx 0, \bar{r}_e \approx 0$ となるような n の単一の値を決定することはできないが、図-3, 4
の破線のように、 $\bar{r}_d, \bar{r}_e$ に対して ± 0.5 の許容範囲を設定すると、継続時間パラメータとして適当な n の
範囲が図-5のように求められる。(ただし、 f_0 は固有振動数)。

- 1) 後藤他：松代地震地域における震動観測結果，土木学会論，145号，昭.42.9.
- 2) 亀田：不規則地震動に対する構造物の最大応答，土木学会論，201号，昭.47.5.
- 3) 亀田・泉並・山田：強震地震動の継続時間の評価法，土木学会全国大会，I-31，昭.47.10.
- 4) 亀田・杉戸：地震応答スペクトルの不確定変動，土木学会地震工学研究発表会，昭.57.7.
- 5) Goto and Toki: "Structural Response to Nonstationary Random Excitation," *WCEE, Vol.1, 1967*.

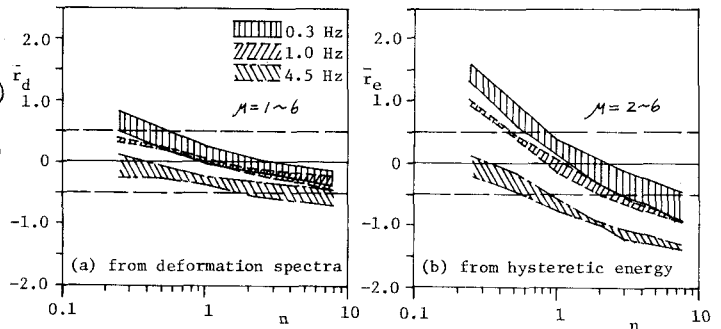


図-3 平均応答誤差($A_{min}-Ang$ 型包絡線)

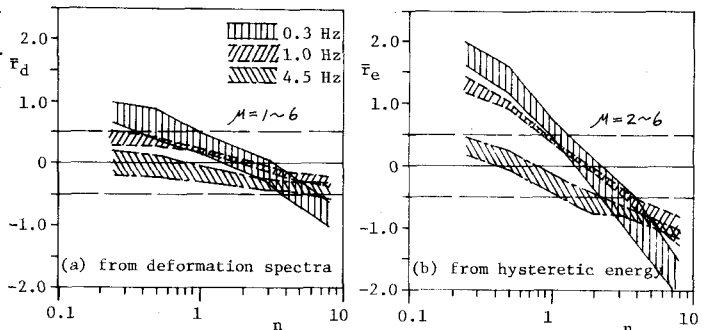
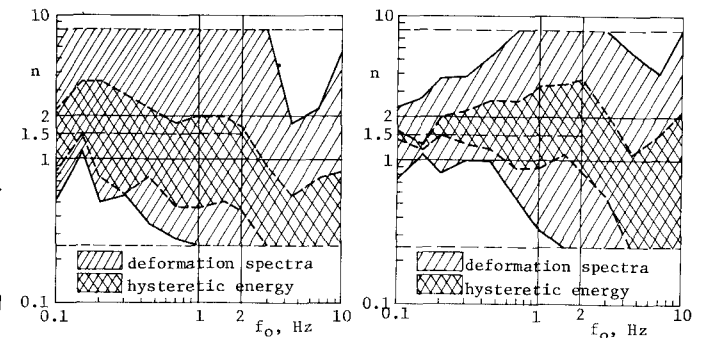


図-4 平均応答誤差(定常型包絡線)



(a) $A_{min}-Ang$ 型包絡線

(b) 定常型包絡線

図-5 継続時間パラメータ n の許容範囲