エネルギー入力に着目したパルス波の衝撃的効果の評価法

1. 本研究の背景と目的

近年,内陸地殻内地震の震源断層近傍でパルス状の 波形が観測されている.パルス波の構造物応答への影 響を詳細に考察するには,構造物に作用する慣性力と しての振幅・方向・タイミングおよび応答との相互関係 を考慮する必要がある¹⁾.文献¹⁾では累積エネルギー入 力²⁾とエネルギー入力率³⁾に基づく考察を行い,地動加 速度と速度応答のそれぞれの振幅・符号の複合的作用 が応答を支配することを明らかにした.一方で,パルス 波のもたらす動的効果(衝撃的効果もしくは共振的効 果)の解明については検討課題としていた.本研究では, エネルギー入力の時間的な集中度合いを定量化して, パルス波の動的効果を評価する手法について検討する.

2. 線形1自由度系への地震動のエネルギー入力

線形1自由度系の運動方程式は次式で表される.

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = -m\ddot{z}_0 \tag{1}$$

ここに, m: 質点の質量, c: 減衰係数, k: 剛性, y: 質 点の相対変位, \ddot{z}_0 : 地動加速度 である.式(1)の両辺に 微小時間 $d\tau$ における変位増分 $dy = \dot{y}d\tau$ を乗じて時刻 0 からtまで積分し, mで除すると,単位質量あたりのエ ネルギーの釣り合い式²⁾が得られる.

 $\int_{0}^{t} \ddot{y} \dot{y} d\tau + 2h\omega_{0} \int_{0}^{t} \dot{y}^{2} d\tau + \omega_{0}^{2} \int_{0}^{t} y \dot{y} d\tau = -\int_{0}^{t} \ddot{z}_{0} \dot{y} d\tau$ (2) ここに, $\omega_{0} = \sqrt{k/m}$:固有円振動数, h:減衰定数 で ある.式(2)の右辺は地震動が時間 t までに構造物に行 う単位質量あたりの仕事 (累積エネルギー入力)³⁾を表 し,その時間微分はエネルギー入力率を表す³⁾.

$$E(T,t) = -\int_0^t \ddot{z}_0(\tau)\dot{y}(\tau)d\tau \tag{3}$$

$$e(T,t) = \dot{E}(T,t) = -\ddot{z}_0(\tau)\dot{y}(\tau) \tag{4}$$

3. 正規化累積エネルギー入力を用いた継続時間

正規化累積パワー⁴⁾ ("Husid plot"と呼ばれる)の主要 部の占有時間 (Significant duration)の考え方を式(3)に適 用する.ただし式(4)のエネルギー入力率は負値にもな り得るため,式(3)の累積エネルギー入力は単調増加関 数とはならない.従って,その逆関数は多価関数となり, パーセンタイル値が一意に定まらない.そこで式(4)を 符号に応じて分離し,正値部分のみの累積エネルギー 入力 *P*_{E+}を求め,これを正規化する.

岐阜大学大学院	学生会員	〇山本大喜
岐阜大学工学部	正会員	能島暢呂

$$P_{E+}(T,t) = \int_0^t \max\{-\ddot{z}_0(\tau)\dot{y}(\tau), 0\}\,d\tau \tag{5}$$

$$H_{E+}(T,t) = \frac{100 P_{E+}(T,t)}{P_{E+}(T,t_{end})}$$
(6)

ここで, tend は記録の最終時刻である.式(6)の正規化累 積エネルギー入力を1%刻みで離散化し,99 個のパーセ ンタイル値を求める.

 $t_i = H_{E+}^{-1}(i)$ (*i* = 1,...,99) (7) これを用いて,正規化累積エネルギー入力 $a\% \sim b\%$ に相 当する継続時間は次式で求められる.

 $D_{a-b}[H_{E+}(T)] = H_{E+}^{-1}(b) - H_{E+}^{-1}(a)$ (8) ある固有周期 T の速度応答波形において,最大速度応 答に達した時刻 t_{pmax} におけるパーセンタイル値を pmax とする.本研究では主に D_{5-pmax} に注目して, D_{5-75} および D_{5-95} と比較しながら考察を行う.

4. KiK-net 益城の評価例

2016 年熊本地震の本震における KiK-net 益城の加速 度記録(EW 成分)を用いた評価例を示す. なお,本研 究では *h*=0.05, *t*_{end}=60s とする. 速度応答スペクトル(後 出図 5(a))より卓越周期は *T*=1.05s である.

図1はT=1.05sにおける加速度波形と速度応答波形 を示す.時刻t=20.5s付近で加速度波形に大振幅のパル ス波が見られ,最大応答を与える時刻はその直後の tpmax=21.8sである.図2に正規化累積エネルギー入力の 結果を示す.加速度と速度応答の振幅がともに大きく, 互いが逆符号の時刻(t=20~22s付近)で累積エネルギ ー入力が急激に増加しており,D5-pmax=1.57s,D5-75=2.48s, D5-95=4.71sである.最大応答に達するまでの波数はわず か1.57/1.05=1.5波程度である.衝撃的効果があったと 判断される.このことは図1からも見て取れる.

全周期帯について評価を行った継続時間スペクトル を図3に示す. $D_{5-pmax}=1\sim5s$ 程度, $D_{5-75}=2\sim6s$ 程度, $D_{5-95}=3\sim18s$ 程度である.卓越周期付近では3種類の継 続時間はいずれも短い. D_{5-95} は長周期になるにつれて 徐々に長時間化する傾向にある一方, D_{5-pmax} においては 変化がほとんど見られない.すなわち,長周期領域の最 大速度応答はパルス波入力に起因するものと考えられ, これもまた衝撃的効果の一つであるといえる.

キーワード パルス波,エネルギー入力,継続時間,衝撃的効果,共振的効果 連絡先 〒501-1193 岐阜市柳戸1-1 岐阜大学工学部社会基盤工学科 TEL:058-293-2416



5. 既往地震における観測記録を用いた比較

内陸地殻内地震による観測記録で同様の評価を行い 比較する.ここで用いた 6 観測記録の速度応答スペク トルを後出の図5(a)に示し,卓越周期に〇印を付した. 図4はそれぞれの卓越周期における正規化累積エネル ギー入力の比較である(1パーセンタイル値 t₁を 0s に 揃えて表示).図5(b)は縦軸に卓越周期における最大速 度応答,横軸に卓越周期における継続時間 D₅₋₇₅, D₅₋₉₅,



D_{5-pmax}をとった比較である.同図で○印が左上に位置す るほど振幅が大きくかつエネルギー入力が集中し,パ ルス入力の衝撃的効果が大きい(逆に,右上に位置する ほど徐々に応答が増幅する共振的効果が大きい)こと を表す.JMA神戸,KiK-net益城,西原村は最大応答に 達するまでの時間が2s以内(1~2波程度)であり,衝 撃的な効果が表れている.また,K-NET一の宮やK-NET 柏崎は継続時間が長く,D₅₋₇₅とD_{5-pmax}が接近している. 徐々に応答が増幅し,全累積エネルギー入力の75%程 度で最大応答に達したことが見て取れる.

今後,本手法をパルス波が顕著な様々な観測記録に 適用し,その動的効果について,さらに検討を進める方 針である.

参考文献

- 1) 山本大喜・能島暢呂:地震動要素としてのパルス波がも たらす作用に着目した強震動特性の評価法,土木学会論 文集 A1(構造・地震工学), Vol.74, No.4, 2018.(登載決定)
- 秋山宏:エネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計, 技報堂出版,228p.,1999.11.
- 大井謙一,高梨晃一,本間靖章:地震動のエネルギー入 力率スペクトル,日本建築学会構造系論文報告集,第420 号,pp.1-7,1991.2.
- Trifunac, M. D. and Brady, A. G.: A Study on the Duration of Strong Earthquake Ground Motion, *BSSA*, Vol.65, No.3, pp.581-626, 1975.



図4 各記録の卓越周期における正規化累積エネル ギー入力の比較