

構造物へのエネルギー入力に着目した パルス波の衝撃的效果の評価

山本 大喜¹・能島 暢呂²

¹学生会員 岐阜大学大学院 自然科学技術研究科修士課程（〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1）

E-mail: w4523027@edu.gifu-u.ac.jp

²正会員 岐阜大学教授 工学部社会基盤工学科（〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1）

E-mail: nojima@gifu-u.ac.jp

本研究は、エネルギー入力に着目した地震動の継続時間を定義し、パルス波がもたらす衝撃的效果の特徴を評価する手法を提案するものである。2016年熊本地震本震のKiK-net 益城、西原村記録では、卓越周期において短継続時間となった。また長周期領域において最大速度応答に達する時刻が早く、周期によらずほぼ同時刻となり、かつ、速度応答スペクトルは広い長周期帯域で高水準かつフラットな形状となった。この衝撃的效果はパルス波の一種の特徴であると考えられる。また振幅特性・経時特性の双方を考慮し、複数の記録間で比較を行った。KiK-net 益城、西原村、K-NET 小千谷（2004年新潟県中越地震）、JMA 神戸（1995年兵庫県南部地震）では衝撃的效果が優勢であることを明らかにした。

Key Words: pulse wave, impulsive effect, velocity response, energy input, duration

1. はじめに

内陸地殻内地震の震源断層近傍では、パルス状の波形が観測されることがある^{1,2)}。2016年熊本地震本震でも特徴的なパルス波が観測され、より一層関心が高まっている。この波形の特徴として、振幅の大きいパルス状の波形が短時間で出現することが挙げられる。文献³⁾では、速度パルスとして、(1)断層の破壊フロントの伝播に伴って破壊進行方向において生じる指向性効果によるパルス波と、(2)フリングステップ（断層すべりの変位運動によって生じるステップ状の変位波形）に起因するパルス波、の2種類を挙げている。いずれの要因が支配的となるかについては、観測地点と断層との距離や位置関係、および、断層長さやすべり速度時間関数の形状などに依存する⁴⁾。

こうしたパルス波によって、想定外の構造物被害が発生する可能性がある。例えば、パルス波による衝撃が免震装置の想定を上回り、建物が擁壁に衝突し上部構造が損傷する可能性が指摘されている⁵⁾。2016年熊本地震では、阿蘇市で設計時に想定した変位を超える応答を生じた免震材料があったことが報告されている⁶⁾。また、フリングステップによる大変位を受ける建物の転倒などの被害も考えられる⁷⁾。

このように構造物への被害が予想されることから、

1995年兵庫県南部地震以降、パルス波に関する様々な検討がされてきた^{8,9)}。

堺・川島¹⁰⁾は、加速度記録の主要動部分をゼロ・クロス点でパルスに分解し、個別のパルスによる構造物の線形応答について検討した。短い継続時間の直下型地震では、単独の主要パルスのみでも全継続時間に匹敵する加速度応答スペクトルが得られることが示された。

理想化された入力波形に対する応答特性についても検討されている。鈴木ら¹¹⁾は、正弦波パルスに対する1自由度系の最大応答を定式化し、断層近傍でのパルス性地震動の影響を反映した設計用加速度応答スペクトルを提案した。安井ら¹²⁾は、正弦波1波に対する線形1自由度系の基本応答特性について理論的考察を行い、最大応答とその発生時刻、および、減衰による応答低減効果の理論解を示すとともに、設計用の簡便な近似式も提案している。

文献^{13,14)}の発展により実地震動をモデル化する検討もされている。亀井ら¹⁵⁾は内陸地殻内地震の断層近傍で発生する観測波からsin波およびGabor波で模擬したパルス波モデルを求め、周期や振幅等のパルス特性を評価する方法を提案した。2016年熊本地震の観測波（断層平行成分、断層直交成分）のパルス特性を評価した。また、観測波に対する高層建築物の層間変形角応答特性についても、複数のパルス波モデルの応答特性によって解釈でき

ることを示した。

これらの研究⁵⁻⁹⁾ではパルス波の応答特性に関して極めて重要な知見が得られており、パルス波を評価する手法も確立され始めている。しかし、経時的に変化するパルスが広帯域にわたって様々な構造物応答に与える影響については十分に議論されておらず、その評価方法の検討には至っていない。このため著者ら⁹⁾は、パルス波の振幅、作用方向、タイミングに着目し、構造物の応答に及ぼす影響について考察した。加速度パルスの振幅と符号、および、速度応答の振幅と符号との複合的作用が応答を支配することを明らかにした。しかしパルスがもたらす動的効果（衝撃的效果、共振的效果）に関しては定量的に評価する余地があり、今後の課題としていた。

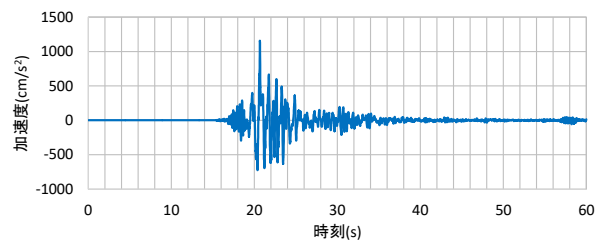
そこで本研究では、パルスのもたらす動的効果のうち、特に「衝撃的效果」として「短時間で大振幅に達する動的効果」に着目し、エネルギー入力に基づく継続時間を尺度として、その定量的評価方法について検討を行うものである。

2. 本検討で使用する観測記録

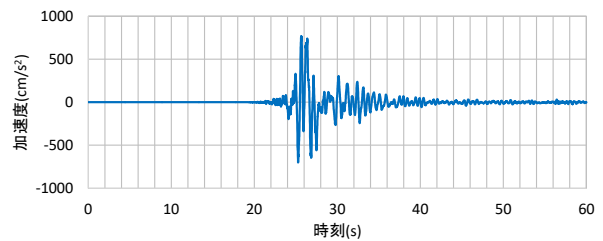
今回の検討では、4つの内陸地殻内地震での以下の記録を用いた評価事例を示す。

- ・2016年熊本地震（本震，2016年4月16日， $M_f=7.3$ ）
KiK-net 益城（KMMH16，EW成分）
西原村（EW成分）
K-NET一の宮（KMM004，EW成分）
- ・1995年兵庫県南部地震（1995年1月17日， $M_f=7.3$ ）
JMA 神戸（NS成分）
- ・2004年新潟県中越地震（2004年10月23日， $M_f=6.8$ ）
K-NET小千谷（NIG019，EW成分）
- ・2007年新潟県中越沖地震（2007年7月16日， $M_f=6.8$ ）
K-NET 柏崎（NIG018，EW成分）

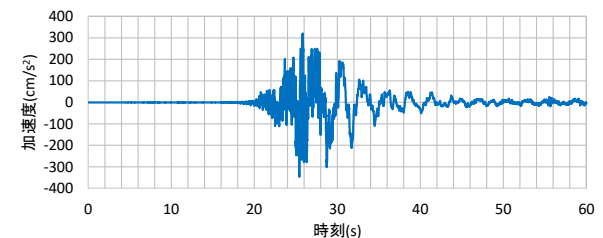
図-1にそれぞれの加速度波形を示す。いずれも主要動部分の継続時間は10s程度以下と短い記録である。KiK-net 益城，西原村，JMA 神戸，K-NET小千谷はパルス状の波形が顕著に見られる点で類似している。K-NET一の宮は波形前半で短周期成分，後半で長周期成分が目立っている。K-NET 柏崎はスパイク状のパルスが特徴的である。これはごく表層の液化化等の影響によるものではなく、周辺地域を代表する地震動と考えられている¹⁰⁾。



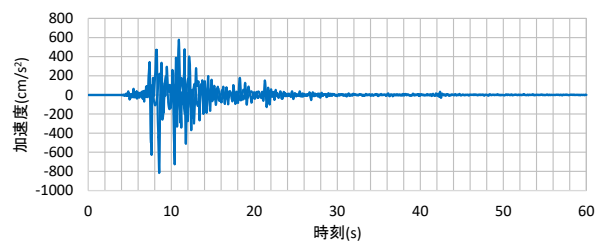
(a) KiK-net 益城（KMMH16，EW成分，2016年）



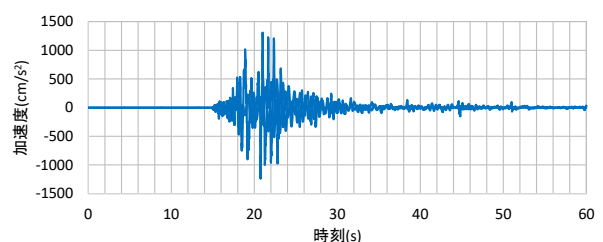
(b) 西原村（EW成分，2016年）



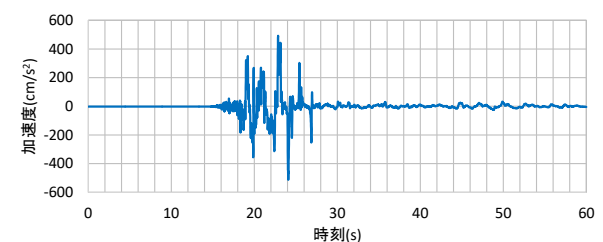
(c) K-NET 一の宮（KMM004，EW成分，2016年）



(d) JMA 神戸（NS成分，1995年）



(e) K-NET 小千谷（NIG019，EW成分，2004年）



(f) K-NET 柏崎（NIG018，EW成分，2007年）

図-1 対象とする加速度記録

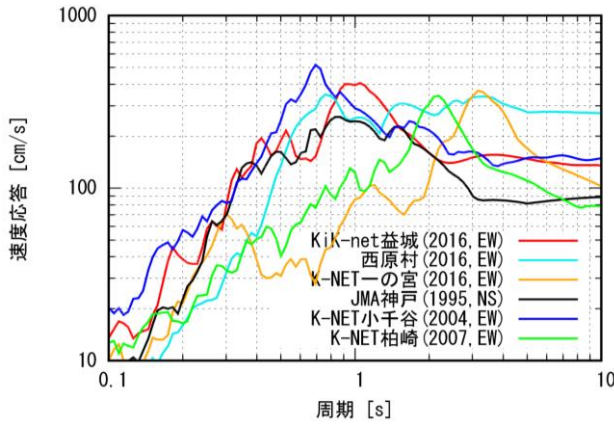


図-2 速度応答スペクトル

図-2に速度応答スペクトルを示す。卓越周期は上記順に $T=1.05s, 0.76s, 3.16s, 0.87s, 0.69s, 2.19s$ である。

以下、3.では経時特性に着目した動的効果の定量化について検討する。4.では2016年熊本地震本震における上記の3記録にこの手法を適用して詳細な評価を行う。さらに5.では、経時特性と振幅特性の両面を考慮した評価方法を検討する。他の3地震の記録も加え、複数の記録を用いた比較について示す。

3. 経時特性に着目した動的効果の定量化

本章では、入力波形と相対速度応答との関係によって規定されるエネルギー入力の考え方¹¹⁾¹⁴⁾に基づいて継続時間を算出する方法について検討する。なおここでは、2016年熊本地震本震におけるKiK-net 益城 (EW成分) の観測記録を用い、継続時間の算出例を示す。

(1) 線形1自由度系への地震動のエネルギー入力

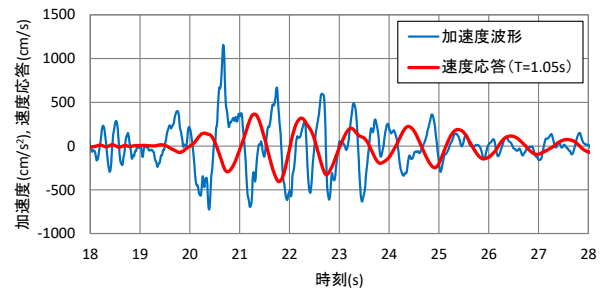
線形1自由度系の振動の運動方程式は次式で表される。

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

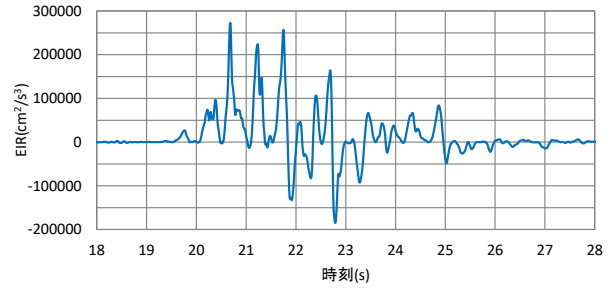
ここに、 m ：質点の質量、 c ：減衰係数、 k ：剛性、 y ：質点の相対変位、 $\ddot{z}_0$ ：地動加速度である。式(1)の両辺に微小時間 $d\tau$ における変位増分 $dy = \dot{y}d\tau$ を乗じて時刻0から t まで積分し、 m で除すると、単位質量あたりのエネルギーの釣り合い式¹¹⁾¹²⁾が得られる。

$$\int_0^t \ddot{y}y d\tau + 2h\omega_0 \int_0^t \dot{y}^2 d\tau + \omega_0^2 \int_0^t y\dot{y} d\tau = - \int_0^t \ddot{z}_0 \dot{y} d\tau \quad (2)$$

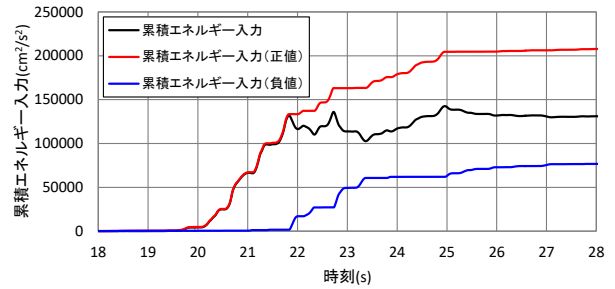
ここに、 $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ ：固有円振動数、 h ：減衰定数で



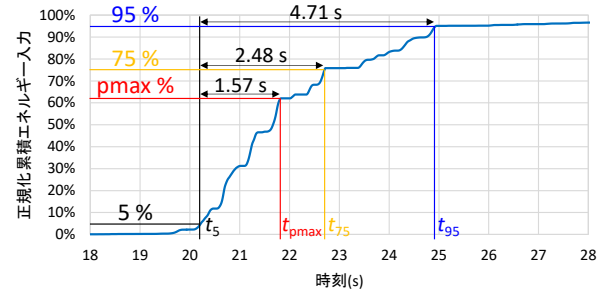
(a) 地動加速度 $\ddot{z}_0$ と速度応答 $\dot{y}$



(b) エネルギー入力率 e



(c) 累積エネルギー入力 E



(d) 正規化累積エネルギー入力および継続時間の算出例

図-3 継続時間の算出例 (KiK-net 益城, KMMH16, EW成分, $T=1.05s, h=0.05$)

ある。式(2)の右辺は地震動が時刻 t までに構造物に行う単位質量あたりの仕事¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾ (累積エネルギー入力)を表し、その時間微分はエネルギー入力率(EIR: Energy Input Rate) (仕事率)を表す¹³⁾。

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

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

また、総累積エネルギー入力の変換値は「エネルギー・スペクトル」と呼ばれる^{11),12)}。

$$V_E(T) = \sqrt{2E(T, t_{\text{end}})} \quad (5)$$

ここで、 t_{end} は記録の最終時刻である。

図-3(a)～図-3(c)に KiK-net 益城 (EW 成分) の速度応答スペクトル (図-2 参照) の卓越周期 $T=1.05\text{s}$ を対象として $h=0.05$ としたエネルギー入力に関する結果の例を示す。図-3(a)において時刻 $t=20.7\text{s}$ の速度応答の局所的ピーク時に逆方向の最大加速度 (順方向の最大慣性力) が作用することで、図-3(b)のエネルギー入力率 e は急激に最大値に達している。これを挟んだ時刻 $t=19.5\sim 21.8\text{s}$ の間は、 e がほぼ正値を保ち、図-3(c)に黒線で示す累積エネルギー入力 E が急増している。最大速度応答が生じた時刻 $t=21.8\text{s}$ では、最終的な累積エネルギー入力とほぼ同値に達している。この間、およそ 2 秒間の現象であり、衝撃的な加速度入力による短時間内の応答増幅効果を示している。時刻 $t=21.8\sim 23.5\text{s}$ においては e は負値が支配的で E は平均的に減少しており、速度応答は抑制されている。時刻 $t=23.5\sim 25\text{s}$ では再び e は正値が支配的となり E は増加するが、上記ほど急激ではなく、応答増幅には結びついていない。このように、加速度パルスの振幅と符号、および、速度応答の振幅と符号との複合作用が応答を支配する⁹⁾。

(2) 正規化累積エネルギー入力に基づく継続時間の算出方法

正規化累積パワー¹⁵⁾ (“Husid plot”と呼ばれる) に基づく継続時間 (Significant duration) は、一般的な経時特性指標である。正規化累積パワーにおける 5～95% の占有時間 (波形全体の傾向を表す) もしくは 5～75% の占有時間 (主要動部あるいは実体波の傾向を表す) がよく用いられる¹⁶⁾。

正規化累積パワーの考え方を式(3)の累積エネルギー入力に適用し、継続時間の算出を試みる。ただし、式(4)の EIR は負値にもなり得るため、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、EIR を符号に応じて分離し、図-3(c)に示すように正值部分のみの累積エネルギー入力 P_{E+} および、負値部分のみの累積エネルギー入力 P_{E-} を求める。

$$P_{E+}(T, t) = \int_0^t \max\{-\ddot{z}_0(\tau)\dot{y}(\tau), 0\} d\tau \quad (6)$$

$$P_{E-}(T, t) = -\int_0^t \min\{-\ddot{z}_0(\tau)\dot{y}(\tau), 0\} d\tau \quad (7)$$

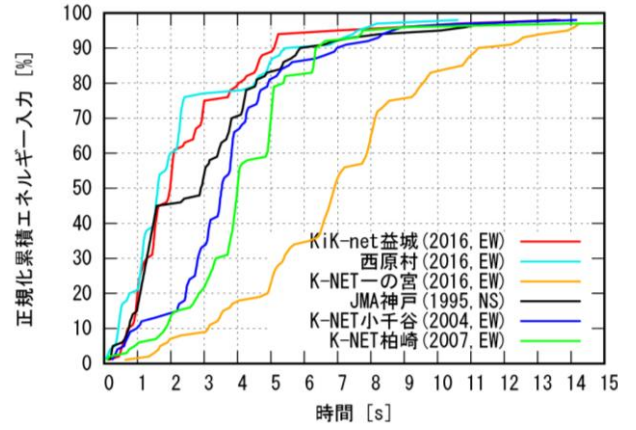


図-4 卓越周期における正規化累積エネルギー入力の比較
(t_1 を 0s に揃えて表示)

このうち、衝撃的效果を表す式(6)の正の累積エネルギー入力に着目し、これを正規化したものを「正規化累積エネルギー入力 H_{E+} 」とする (図-3(d)参照)。

$$H_{E+}(T, t) = 100 \cdot \frac{P_{E+}(T, t)}{P_{E+}(T, t_{\text{end}})} \quad (8)$$

式(8)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¹⁷⁾。

$$t_i = H_{E+}^{-1}(i) \quad (i = 1, \dots, 99) \quad (9)$$

図-1 の 6 波形を用いて、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を図-4 に示す (卓越周期は図-2 を参照)。ここでは、 t_1 を 0s に揃えて示している。KiK-net 益城、西原村、JMA 神戸の開始部分の立ち上がりが急激であり、KiK-net 益城、西原村では 3s 程度で約 70% まで達している。K-NET 小千谷、K-NET 柏崎では始めの 2s 程度は緩やかな立ち上がりであるが、その後急増する。K-NET 一の宮は全体を通して緩やかな増加を示す。

これらの正規化累積エネルギー入力を用いて、その $a\% \sim b\%$ に相当する継続時間を次式で定義する。

$$D_{a-b}[H_{E+}(T)] = H_{E+}^{-1}(b) - H_{E+}^{-1}(a) = t_b - t_a \quad (10)$$

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を t_{pmx} とし、その時点におけるパーセンタイル値を pmx とする。本研究では主に最大応答に達するまでの継続時間 $D_{5\text{pmx}}$ に注目し、 D_{575} および D_{595} と比較しながら、衝撃的效果についての考察を行う。図-3(d)

に KiK-net 益城（EW 成分）の速度応答スペクトルの卓越周期 $T=1.05\text{s}$ を対象とした継続時間の算出例を示す。このケースでは $D_{5\text{pmax}}=1.57\text{s}$, $D_{5.75}=2.48\text{s}$, $D_{5.95}=4.71\text{s}$ である。最大速度応答に達するまでの波数はわずか $1.57/1.05=1.5$ 波程度であり、衝撃的效果があったと判断される。

(3) エネルギー入力効率の定義

前節で示した継続時間に加え、エネルギーの入力される効率についても指標化を検討する。式(5)の考え方と同様に、式(6)および式(7)の累積エネルギー入力の最終値を速度換算したものをそれぞれ V_{E+} および V_{E-} とする。

$$V_{E+}(T) = \sqrt{2P_{E+}(T, t_{\text{end}})} \quad (11)$$

$$V_{E-}(T) = \sqrt{2P_{E-}(T, t_{\text{end}})} \quad (12)$$

V_E と V_{E+} を用いて「エネルギー入力効率 R_E 」を次式で定義する。

$$R_E(T) = \frac{V_E(T)}{V_{E+}(T)} = \sqrt{\frac{P_{E+}(T, t_{\text{end}}) - P_{E-}(T, t_{\text{end}})}{P_{E+}(T, t_{\text{end}})}} \quad (13)$$

これは、最終時刻 t_{end} において、正の累積エネルギー入力（速度換算値）に対してトータルの累積エネルギー入力（速度換算値）が占める割合を表している。所定の継続時間を通じて、入力加速度が応答の増幅に寄与した割合の平方根を定量化している。

本章では卓越周期のみに着目したが、4. では、より広帯域にわたって様々な構造物に与える衝撃的效果に関して考察を行うため、継続時間の表現方法を全周期帯に拡張し、動的効果の評価を試みる。

4. 2016 年熊本地震本震での評価例

本章では、2016 年熊本地震本震の 3 記録を扱い、対象記録の全周期帯についての評価結果を図-5～10 に示す。(a) に速度応答スペクトル S_V 、擬似速度応答スペクトル pS_V 、エネルギースペクトル（トータル V_E 、正 V_{E+} 、負 V_{E-} ）の比較を示す。(b) にエネルギースペクトルを元に算出したエネルギー入力効率スペクトル R_E を示す。(c) に時刻 t 、(d) に継続時間 D_{ob} を示す。なお、本研究では $h=0.05$, $t_{\text{end}}=60\text{s}$ とする。

(1) KiK-net 益城 (KMMH16) (図-5, 図-6)

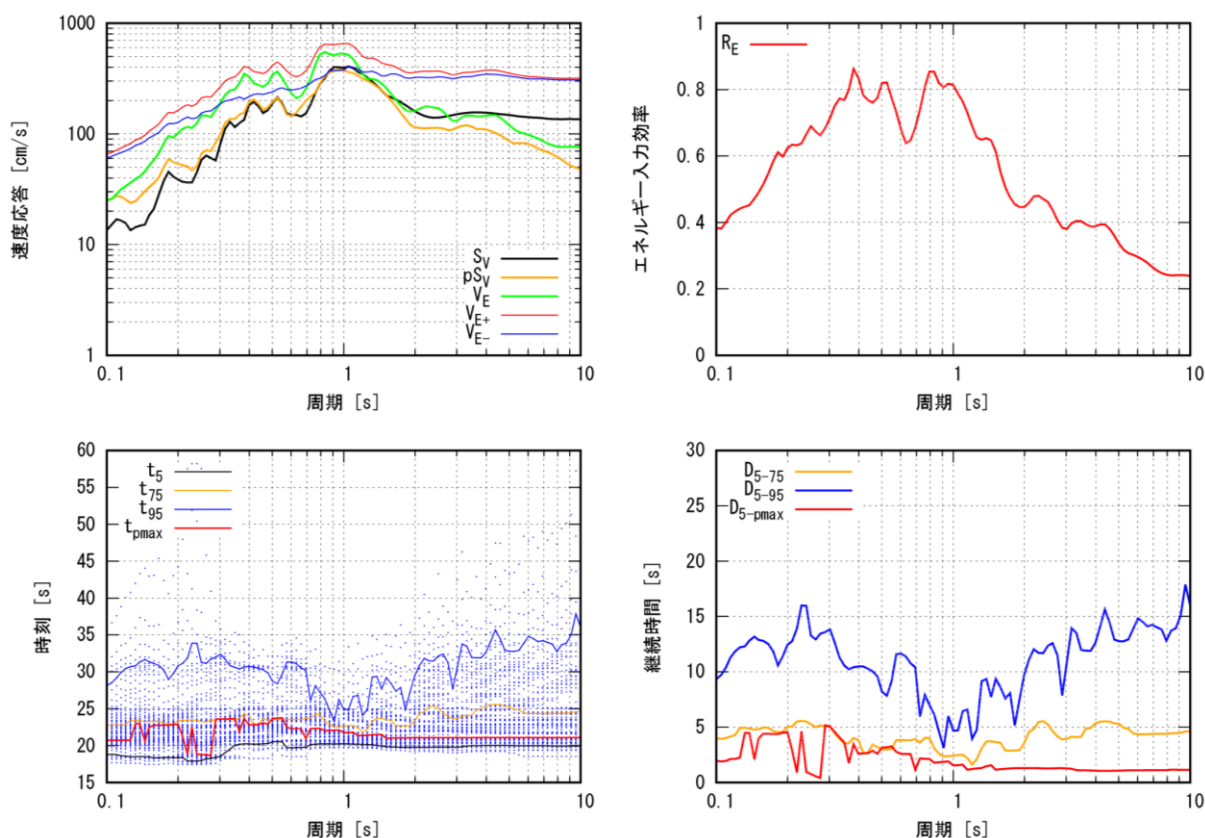
図-5(a)の速度応答スペクトルの卓越周期は $T=1.05\text{s}$ である。卓越周期付近では V_E と V_{E+} が接近している。この結果を反映し、卓越周期付近ではエネルギー入力効率 R_E が 0.8 を超えている。EIR が負になることが少なく、

応答が増幅される傾向にあったことが分かる。一方、長周期領域では V_{E+} と V_{E-} が接近しており、 R_E は小さくなる。入力加速度はやや短周期であるが応答は長周期であるため、EIR が加速度の周期で正負交互に切り替わり、 V_{E-} が大きくなったためだと考えられる。

図-5(c)における青点は、周期ごとの時刻 $t_1 \sim t_{99}$ を示している。時刻 t の範囲は、卓越周期付近では $t=35\text{s}$ までであるのに対し、短周期側および長周期側では $t=60\text{s}$ までに及ぶ。青点の密度が高い時間帯では累積エネルギー入力の急激な増加が生じたといえる。全周期帯で $t=20 \sim 25\text{s}$ 付近までの密度が高い。この 5s 間は主要動部分であり、応答が急激に増幅したといえる。図-5(c)における実線は代表とする時刻 t_5 (黒線), t_{75} (黄線), t_{95} (青線), t_{pmax} (赤線) である。

式(10)に従い、図-5(c)における黒線 t_5 を基準として、黄線 t_{75} まで、青線 t_{95} まで、赤線 t_{pmax} までの継続時間をそれぞれ図-5(d)における黄線 $D_{5.75}$ 、青線 $D_{5.95}$ 、赤線 $D_{5\text{pmax}}$ で示す。 $D_{5.75}=2 \sim 6\text{s}$ 程度、 $D_{5.95}=3 \sim 18\text{s}$ 程度、 $D_{5\text{pmax}}=1 \sim 5\text{s}$ 程度である。卓越周期付近ではいずれの継続時間も短い。 $D_{5.75}$ と $D_{5.95}$ は短周期および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、 $D_{5\text{pmax}}$ に着目すると、長周期側ではほぼ $D_{5\text{pmax}}=1\text{s}$ であり、固有周期よりもはるかに短時間である。特に固有周期 2s 以上では、ほぼ同時刻に最大応答に達していることが分かる。正弦波パルスに対する衝撃的な応答の特徴が実地震動のパルス波形でも表れる結果となった。長周期領域におけるこの現象はパルス波による衝撃的效果の一つと言えよう。

長周期領域での応答をより詳細に考察するために、図-8 に加速度波形および速度応答波形（長周期領域）を示す。黒丸は最大速度応答を表す。 $T=2.00\text{s}$ よりも長周期側では、 $t=21\text{s}$ までの速度応答波形の位相はほぼ一致しており、 $t=21\text{s}$ 付近で最大速度応答（いずれも約 150cm/s ）に達している。 $t=21\text{s}$ 以降はそれぞれの固有周期で振動している。最大速度応答は大振幅パルスが入力される $t=20.5\text{s}$ の直後に出現している。これは、衝撃的な入力に対しては応答が追従できず、地動速度そのものが相対速度応答として現れることを示唆している。一般に周期を無限大とすると相対応答は地動と一致するが、パルス波入力は長周期領域で広く同様のことが起き、相対応答はその衝撃的效果に支配されるものと考えられる。その様子は図-5(a)の速度応答スペクトルにも反映されており、 $T=2\text{s}$ よりも長周期側で約 150cm/s で一定の値を示している。速度応答スペクトル S_V がフラットな形を示すのはパルス波による衝撃的效果の特徴の一つと考えられる。擬似速度応答スペクトル pS_V の長周期領域ではこの特徴が表現できておらず、 S_V と比較して過小評価となっている。パルス波が支配的な地震動記録に擬似速度応答スペクトル



左上：(a) スペクトルの比較，右上：(b) エネルギー入力効率スペクトル，左下：(c) 時刻 t_i ，右下：(d) 継続時間 D_{t-b}

図-5 KiK-net 益城 (KMMH16, EW 成分)

ルを用いる際は，この点に留意すべきといえる。

(2) 西原村 (図-7, 図-8)

図-7(a)の速度応答スペクトルの卓越周期は $T=0.76s$ である。卓越周期付近において， V_{E-} は周囲の周期よりかなり低く，エネルギー入力効率 R_E はおよそ 0.9 である。KiK-net 益城よりも EIR が負になる割合が小さく，パルス入力が応答の増幅に大きく寄与したといえる。

継続時間は $D_{5-75}=2\sim 7s$ 程度， $D_{5-95}=7\sim 16s$ 程度， $D_{5-pmax}=1\sim 4s$ 程度である。卓越周期付近では継続時間が短い，その特徴はKiK-net 益城ほど顕著ではない。 D_{5-75} と D_{5-95} は長周期側で継続時間が長時間になる傾向がある。 $T=2\sim 5s$ を除く長周期側では $D_{5-pmax}=1\sim 2s$ と非常に短時間であり，パルスによる衝撃的効果が伺える。

図-8 に長周期領域の速度応答を示す。KiK-net 益城と同様に， $T=2.00s$ よりも長周期側では， $t=26s$ までの速度応答波形の位相は類似している。これは KiK-net 益城と同様に，地動速度そのものが相対速度応答として現れていると考えられる。これは図-7(a)の速度応答スペクトルにも表れており，長周期領域において約 300cm/s でフラットな形を示している。KiK-net 益城の長周期領域よりもむしろ振幅レベルは高い。擬似速度応答スペクトルはここでも過小評価となっている。図-8の長周期領域の速

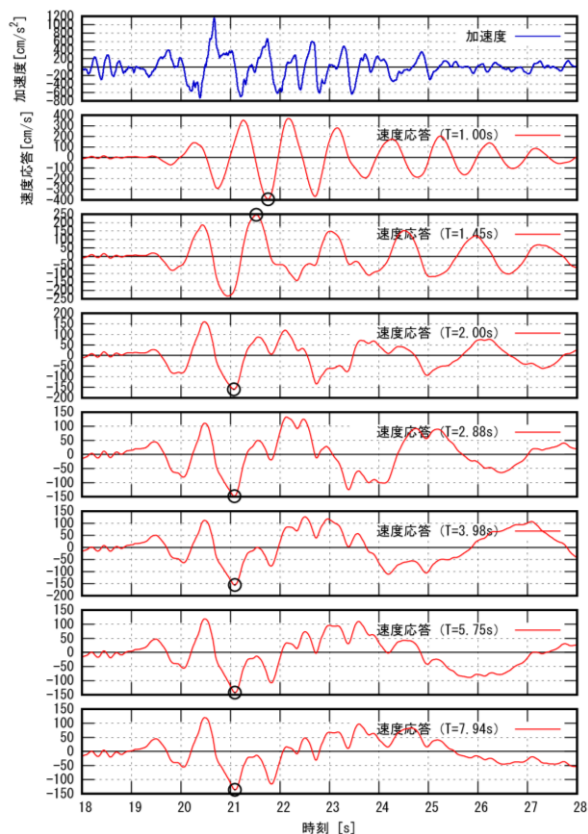
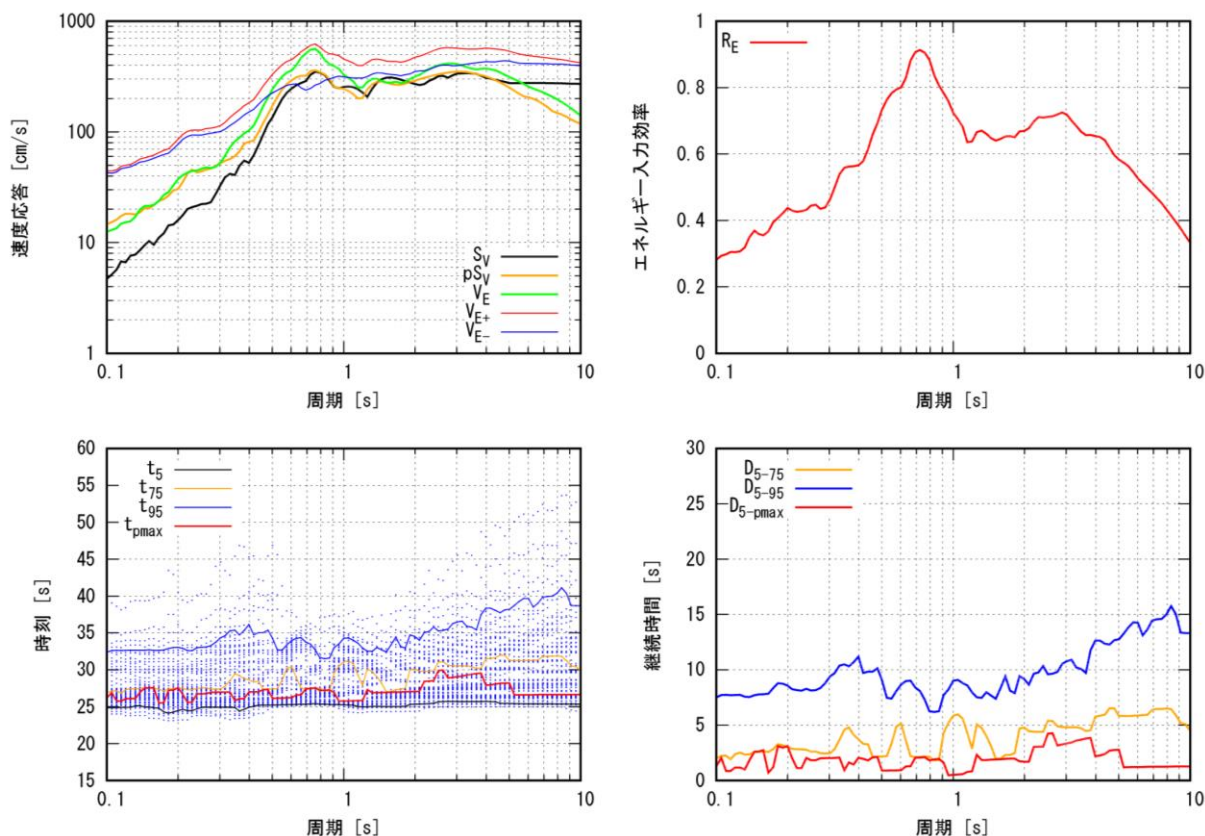


図-6 加速度波形および長周期領域における速度応答波形 (KiK-net 益城, KMMH16, EW 成分)



左上：(a) スペクトルの比較，右上：(b) エネルギー入力効率スペクトル，左下：(c) 時刻 t_i ，右下：(d) 継続時間 D_{5-i}

図-7 西原村 (EW 成分)

度応答に示すように、 $T=3s$ 付近では他の周期とは異なり、最大応答の出現時刻には約 1 周期分のずれが認められる。卓越周期 $T=0.76s$ 付近と $T=3s$ 付近ではほぼ同レベルの速度応答を示しているが、図-7(d)に示すように、卓越周期付近では $D_{5-pmax}=2s$ 程度、 $T=3s$ 付近では $D_{5-pmax}=4s$ 程度である。前者は衝撃的效果によるものである一方、後者にはやや共振的效果も働いたと考えられる。周期 $T=1s$ 付近および $T=5s$ 以上については、 $D_{5-pmax}=1.5s$ 未満であり、さらに強い衝撃的效果があったと考えられる。応答スペクトルにおいては、最大応答の発現時刻に関する情報が失われているため、継続時間との比較は理解の助けになる。

(3) K-NET 一の宮 (KMM004) (図-9, 図-10)

図-9(a)の速度応答スペクトルの卓越周期は $T=3.16s$ である。卓越周期付近では、 V_E は大きく落ち込んでいる。エネルギー入力効率 R_E は、 $T=0.3s$ 付近では 0.8 を超え、卓越周期付近では 0.9 を超える。図-1 に示した加速度波形の前半部分と後半部分の異なった周期特性がそれぞれに影響していると考えられる。すなわち、 $T=0.3s$ 付近では加速度波形の前半部分が、卓越周期付近では後半部分が応答の増幅に寄与したといえる。

継続時間は $D_{5-75}=2\sim9s$ 程度、 $D_{5-95}=6\sim17s$ 程度、 D_{5-}

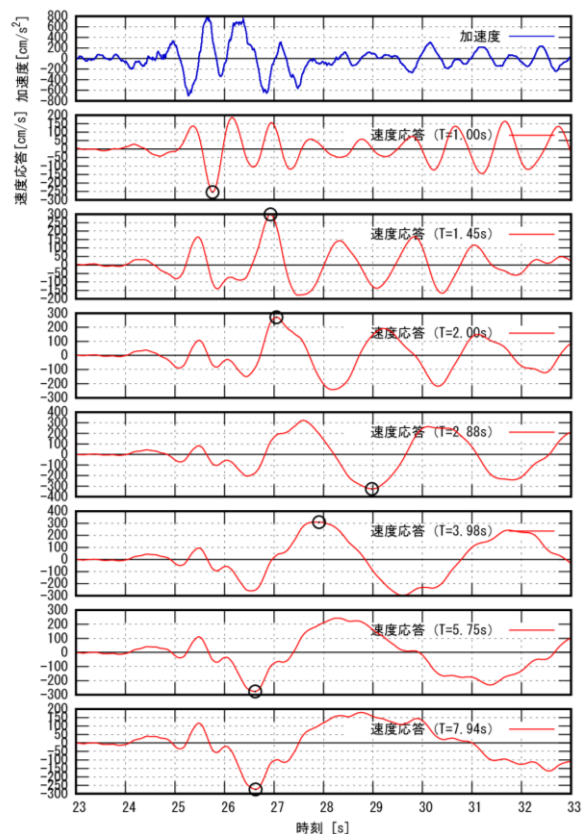
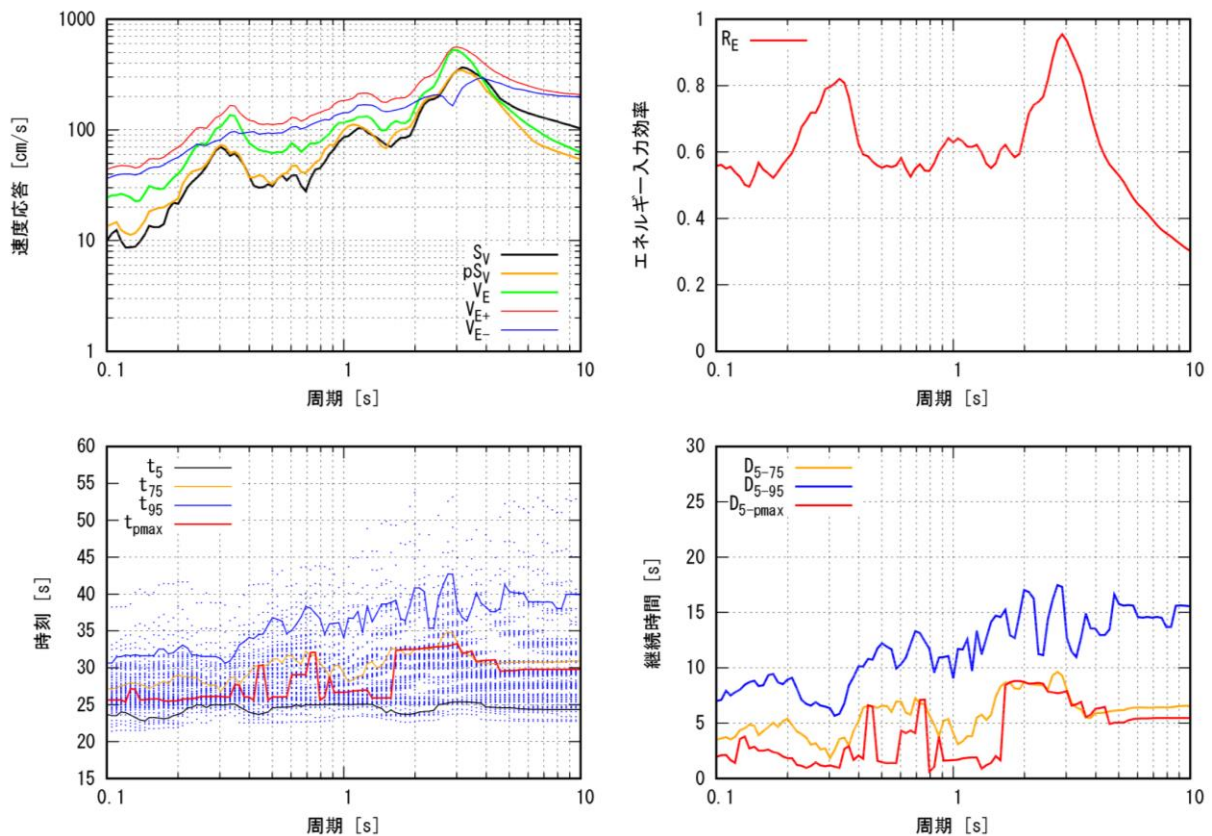


図-8 加速度波形および長周期領域における速度応答波形 (西原村, EW 成分)



左上：(a) スペクトルの比較，右上：(b) エネルギー入力効率スペクトル，左下：(c) 時刻 t_i ，右下：(d) 継続時間 $D_{t,b}$
 図-9 K-NET 一の宮 (EW 成分)

$p_{max}=1\sim 8s$ 程度である。KiK-net 益城や西原村と比較して継続時間が長い傾向を示す。特に D_{5-pmax} は卓越周期付近で約 2 周期分長い継続時間である。図-10 に長周期領域の速度応答を示す。KiK-net 益城や西原村に見られたような、速度応答波形の位相の一致や最大応答出現の同時性は認められない。K-NET 一の宮においては衝撃的效果はなく、入力地震動の周波数非定常性の影響が大きく出たものと考えられる。

5. 複数記録間での動的効果の比較

前章では経時特性に着目し、パルスのもたらす動的効果について考察を行った。1.でも述べたが、本研究では「短時間で大振幅に達する動的効果」に着目している。そこで本章では、振幅特性についても定量化し、経時特性と振幅特性を総合的に評価し、複数の記録で比較を行う。

前章で用いた 2016 年熊本地震本震の 3 記録に加え、JMA 神戸 (1995 年, NS 成分), K-NET 小千谷 (2004 年, NIG019, EW 成分), K-NET 柏崎 (2007 年, NIG018, EW 成分) の記録も扱い比較を行う。

図-11 は縦軸に速度応答スペクトルの卓越周期におけ

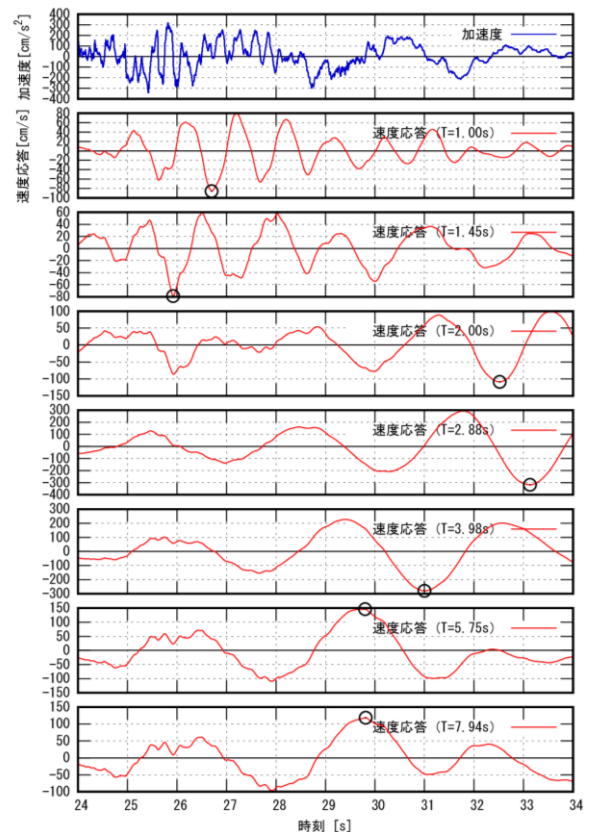


図-10 加速度波形および長周期領域における速度応答波形 (一の宮, KMM004, EW 成分)

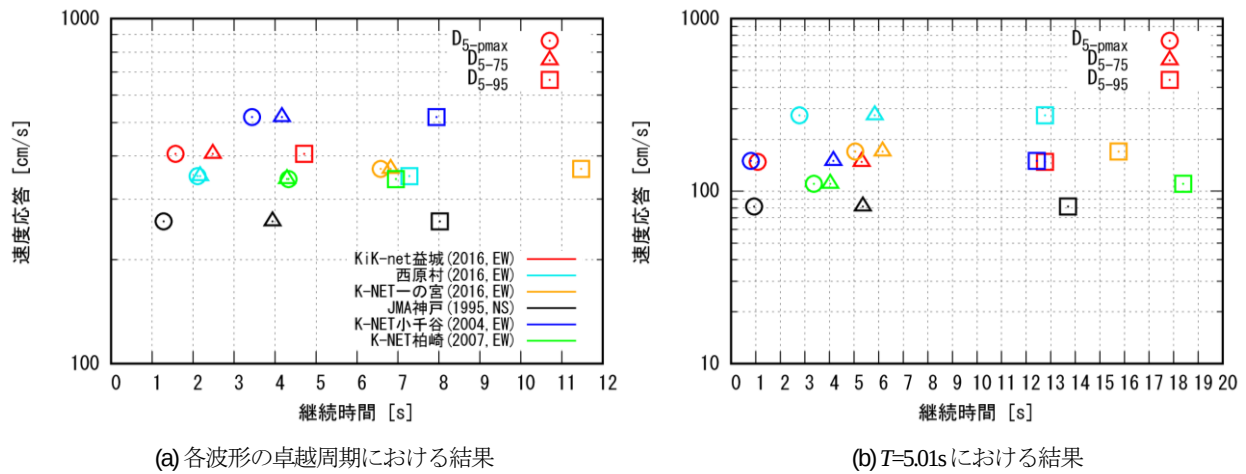


図-11 パルスの動的効果の比較

る速度応答、横軸に卓越周期における継続時間 D_{5-pmax} , D_{5-75} , D_{5-95} とした比較である。 D_{5-pmax} (○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時間が時間的に集中し、パルス入力の衝撃的効果が優勢である（逆に右上に位置するほど徐々に応答が増幅する共振的效果が優勢である）ことを表す。

図-11(a)は各波形の卓越周期における結果を示す。KiK-net 益城、西原村、K-NET 小千谷は振幅レベルが大きく、最大速度応答に達するまでの時間が1.5～3.5sであり、衝撃的効果が表れているといえる。KiK-net 益城が最も左上に位置することから、卓越周期における衝撃的效果が最も強かったことが分かる。JMA 神戸については速度応答が他よりも小さいものの、継続時間 D_{5-pmax} は1s程度で非常に短い。西原村では D_{5-pmax} と D_{5-75} がほぼ等しく2s程度であり、エネルギー入力が急速で短時間に最大応答に達したことが見て取れる。これは図-4で確認されたとおりである。K-NET 柏崎に関しては全記録の中間的な位置にある。

図-11(b)は長周期領域において対象周期を揃えた比較例として、周期 $T=5.01s$ における結果を示す。KiK-net 益城、K-NET 小千谷、JMA 神戸は D_{5-pmax} が1s程度である。西原村は上記の記録よりも D_{5-pmax} は若干長いが3s未満であり、振幅レベルが非常に高い。長周期領域における衝撃的效果が最も強いといえる。図-2の速度応答スペクトルにおいて長周期側でフラットな傾向を示すのは、西原村、KiK-net 益城、K-NET 小千谷、JMA 神戸である。これらの記録は図-11(b)に示す D_{5-pmax} が短い傾向がある。4.で述べたように、衝撃的な地動入力がそのまま相対応答として現れ、瞬時に最大速度応答に達したためと考えられる。

6. まとめ

本研究で得られた成果を以下に要約する。

- 1) 正規化累積エネルギー入力に基づいて地震動の継続時間を算出する方法を提案し、累積5%から最大応答出現までの継続時間 D_{5-pmax} を定義した。そのスペクトル表現はパルス波の動的効果を周期ごとに評価・考察するのに有効な手段である。
- 2) エネルギー入力に基づいて動的効果を評価する指標として、パルス波が応答の増幅に寄与した割合を定量化した「エネルギー入力効率」を提案した。
- 3) パルス波による衝撃的效果の典型例として、長周期領域において地動入力が相対応答として現れ、ごく短時間で最大応答に達することと、継続時間 D_{5-pmax} が短くはば一定の値を示すことを挙げた。
- 4) パルス波が卓越する地震動では、長周期領域の速度応答スペクトルがフラットな形を示す。擬似速度応答スペクトルでは長周期領域においてこの特徴を表現できず、過小評価となる点に留意すべきである。
- 5) 振幅特性と経時特性の両面を考慮し、パルスによる動的効果の比較を行った。KiK-net 益城、西原村、K-NET 小千谷、JMA 神戸では衝撃的效果が優勢であることを示した。

謝辞：本研究では、国立研究開発法人 防災科学技術研究所の K-NET, KiK-net の強震記録を使用させていただいた。記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 宮武隆：断層近傍の強震動パルスの成因，地震第2輯，第51巻，pp.161-170，1998.
- 2) 久田嘉章：活断層と建築の減災対策，活断層研究，28号，pp.77-87，2008.
- 3) 三輪田吾郎，小巻潤平，佐藤浩太郎，佐野剛志，勝俣英雄，多幾山法子，林康裕：実大免震建物の擁壁衝突実験とそのシミュレーション解析，日本建築学

- 会構造系論文集, Vol.76, No.663, pp.899-908, 2011.5.
- 4) 国土交通省国土技術政策総合研究所, 国立研究開発法人建築研究所:平成 28 年(2016 年)熊本地震による建築物等被害第九次調査報告(速報)(免震建築物に関する調査), 2016.6.
 - 5) 堺淳一, 川島一彦:パルス応答スペクトルに基づく断層直近地震動の特性, 構造工学論文集, Vol.45A, pp.819-828, 1999.3.
 - 6) 鈴木恭平, 川辺秀憲, 山田真澄, 林康裕:断層近傍のパルス特性を考慮した設計用応答スペクトル, 日本建築学会構造系論文集, Vol.75, No.647, pp.49-56, 2010.1.
 - 7) 安井雅明, 西影武知, 見上知広, 亀井功, 鈴木恭平, 林康裕:パルス地震動に対する 1 自由度系最大応答理論解と応答特性, 日本建築学会構造系論文集, Vol.75, No.650, pp.731-739, 2010.4.
 - 8) 亀井功, 村瀬詩織, 杉野未奈, 林康裕:パルス特性化提案手法を用いた 2016 年熊本地震断層近傍観測波のパルス特性評価と応答特性の考察, 日本地震工学会論文集, Vol.18, No.1, pp.18-34, 2018.
 - 9) 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)
 - 10) 防災科学技術研究所強震観測管理室: K-NET 柏崎(NIG018)に関して, 2007.8.
 - 11) 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.
 - 12) 加藤勉, 秋山宏:強震による構造物へのエネルギー入力と構造物の損傷, 日本建築学会論文報告集, 第 235 号, pp.9-18, 1975.9.
 - 13) 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.
 - 14) 井上範夫, 堀則男, 中村孝也:RC 構造物の応答に対する地震動のエネルギー入力性状の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.2, pp.531-536, 1997.
 - 15) 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.
 - 16) 能島暢呂:累積パワーに基づく地震動継続時間の経験的予測式の構築, 日本地震工学会論文集, Vol.15, No.6, pp.25-43, 2015.
 - 17) 能島暢呂, 久世益充, 高島拓也:地震動の経時特性の特徴抽出と階層的クラスター分析による分類, 日本地震工学会論文集 第 17 巻, 第 2 号, pp.2_128-2_141, 2017.

EVALUATION OF IMPULSIVE EFFECT OF PULSE WAVE BY USE OF ENERGY INPUT TO STRUCTURES

Taiki YAMAMOTO and Nobuoto NOJIMA

By use of energy input to structure, a new definition of strong motion duration is proposed. On this basis, dynamic effects of pulse waves have been characterized with emphasis on the impulsive effects. Strong motion records observed at KiK-net Mashiki and Nishihara Village (The 2016 Kumamoto Earthquake) have short duration at each predominant period of the velocity response spectra. In long-period range, peak velocity response is reached in extremely short time and occurs almost simultaneously regardless of the period. As a result, velocity response spectra remain high and flat in wide range of long-period. Such impulsive effects are considered to be representative of the pulse waves. Considering both amplitude and duration, dynamic effects have been compared among various records. Impulsive effects are found to be dominant in KiK-net Mashiki, Nishiharamura, K-NET Ojiya (the 2004 Niigata-ken Chuetsu Earthquake) and JMA Kobe (the 1995 Hyogo-ken Nambu Earthquake).