

三角パルス波形モデルを用いた 強震動特性の評価

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

内陸地殻内地震においては、震源近傍でパルス状の地震動が観測されることがある。振幅の大きいパルス状の地震動は高い破壊力を示すことがあり、将来発生する地震動予測や地震防災対策で考慮することが重要課題となっている。本研究では三角パルスの集合で構成した骨格波形で加速度波形を表現し、その振幅・周期・繰り返し特性を評価する方法を提案する。2016年熊本地震の本震および過去の内陸地殻内地震を対象として、加速度波形とその三角パルス波形、パルス周期およびパルス振幅の時系列特性、局所最大振幅スペクトル評価し、波形の特徴を把握した。さらに最大振幅のパルス周期、等価卓越周期、絶対加速度応答スペクトルおよび速度応答スペクトルの卓越周期を比較し、それらの類似性に関する考察を行った。

Key Words: pulse-like ground motion, triangular pulse wave model, inland crustal earthquake, amplitude, predominant period, number of cycles, The 2016 Kumamoto Earthquake

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震などの内陸地殻内地震では、震源断層近傍において指向性パルスを含む地震動が観測されており、継続時間は短くても振幅の大きい少数のパルス状の波形が構造物に大きな被害を及ぼすことが指摘されている¹⁾²⁾。わが国では1995年兵庫県南部地震以降、パルス地震動に関して様々な検討がなされてきた。

例えば堺ら³⁾は、地震動の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、個別のパルスが構造物の線形応答に与える影響について検討を行った。短い継続時間の地震動では、主要な1つのパルスによっても全継続時間の場合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。また正弦波1波の模擬パルス地震動に対する非線形応答については、地震動の固有周期の0.9倍程度の固有周期の構造物の応答が最大となることが明らかにされた。

鈴木ら⁴⁾は、断層近傍でのパルス性地震動の影響を設計用地震荷重に取り入れるための検討を行った。パルス性地震動を正弦波パルスで理想化し、非減衰1自由度系の応答スペクトルを固有周期 T とパルス周期 T_p の比 $\tau = T/T_p$ の関数として定式化した。また周期軸をパルス周期 T_p で無次元化し、振幅軸を振幅値 $S_a(T=1.5T_p)$ で無次元

化した正規化加速度応答スペクトルを定義し、これに基づく設計用加速度応答スペクトルの設定法を提案した。また安井ら⁵⁾は、正弦波1波でモデル化されたパルス性地震動に対する線形1自由度系の基本応答特性について理論的考察を行った。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が定式化され、設計用の簡便な近似式も示された。

こうした中で2016年熊本地震が発生した。震源近傍ではパルス状の地震動成分が大きな影響を及ぼした可能性がある。本研究では文献¹⁾を参考にゼロ・クロス点でパルスを分解し、三角パルスの集合で構成した骨格波形で加速度波形を表現して、その振幅・周期・繰り返し特性の評価を試みる。以下のように、2016年熊本地震と過去の内陸地殻内地震を対象とした評価事例を示す。

- ・2016年熊本地震 (本震, 2016年4月16日, $M=7.3$)
KiK-net 益城 (KMMH16, 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, $M=7.3$)
JMA 神戸 (NS 成分)
- ・2004年新潟県中越地震 (2004年10月23日, $M=6.8$)
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, $M=6.8$)
K-NET 柏崎 (NIG018, EW 成分)

2. 従来の手法による地震動特性の評価

パルスに関する検討の前に、地震動の特性の分析に従来用いられる手法による地震動特性の評価を行う。

(1) 応答スペクトルによる評価

図-1 に対象 5 観測点の速度応答スペクトル（減衰定数 $h=0.05$ ）の比較を示す。KiK-net 益城, JMA 神戸, K-NET 小千谷は互いに速度応答スペクトルの概形が似ている。ただし卓越周期には違いが見られる。KiK-net 益城は周期 1.0s で卓越しているのに対して、K-NET 小千谷はそれよりやや短周期側の 0.69s で卓越している。JMA 神戸は周期 1s 付近で高いレベルの応答が確認できるが、明瞭なピークは見られない。速度応答スペクトルの最大値は K-NET 小千谷が最も大きい、構造物への影響が大きいとされる周期 1s 付近では KiK-net 益城が K-NET 小千谷を上回っている。

K-NET 一の宮と K-NET 柏崎についても速度応答スペクトルの概形が似ているが、卓越周期はそれぞれ 3.2s, と 2.2s である。K-NET 一の宮の方がかなり長周期となっている。

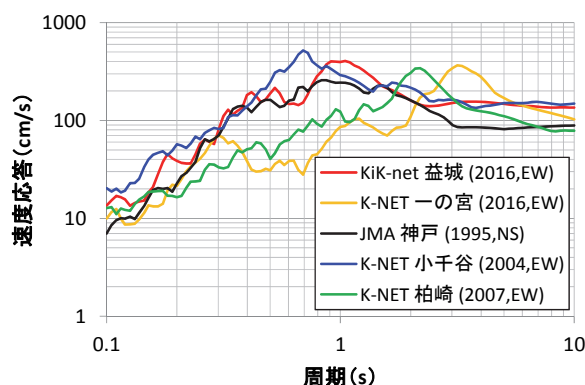


図-1 速度応答スペクトルの比較 ($h=0.05$)

(2) 等価卓越周期による評価

PGA（最大加速度）と PGV（最大速度）を用いる方法で振幅特性と周期特性の評価を行う。等価卓越周期 T_{eq} はピーク付近の正弦波近似により次式で算出される。

$$T_{eq} \cong \frac{PGV}{PGA} \times 2\pi \quad (1)$$

図-2 は対象 5 観測点に対して、縦軸に PGV[cm/s]、横軸に PGA[cm/s²] をとり、4 直線で等価卓越周期 $T_{eq}=0.2, 0.5, 1, 2s$ を表したものである。ピンク色で示すのは構造物に対して大きな被害が出るといわれる目安⁴⁾である。KiK-net 益城と K-NET 小千谷はピンク色の範囲内にある。JMA 神戸は PGA は 800 cm/s² を超えているが、PGV が 100 cm/s を下回ったため範囲外になっている。K-NET 一の宮

と K-NET 柏崎は他の 3 点と比較して、PGA も PGV も小さく、等価卓越周期は長周期側にあることが分かる。

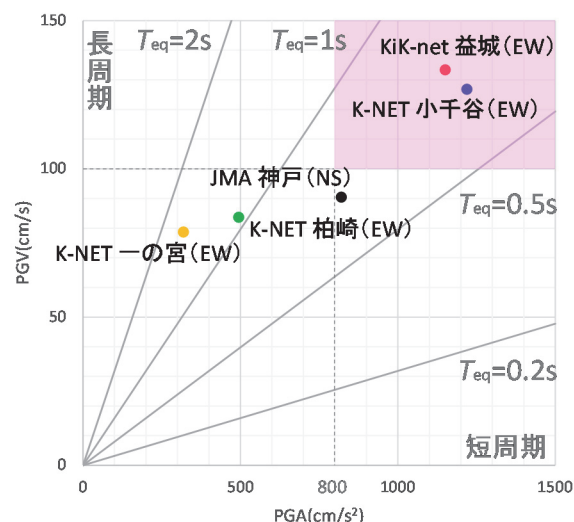


図-2 PGA と PGV の関係と等価卓越周期 T_{eq}

3. 三角パルス波形の定義

本研究では、地震動の加速度波形をもとにした三角パルス波形の表現法を提案する。図-3 に三角パルス波形の算出方法の概念図を示す。青線は地震動の加速度波形であり、隣り合うゼロ・クロス点間を 1 つのパルスとし、加速度波形を三角パルスの集合としてとらえた赤線を三角パルス波形とする。元の加速度波形の概形を捉えながら、加速度波形を複数のパルスの集合として単純化することができる。以下に三角パルス波形の作成手順を示す。

- 1) 加速度波形におけるゼロ・クロス点 Z_i を取りだす。時間経過に沿って順番に 1, 2, 3, ..., i 番目とする。ゼロ・クロス点 Z_i に対応する時間 t をゼロ・クロス時間 $t_{\alpha}(i)$ とする。
- 2) 隣り合うゼロ・クロス点間におけるピークを局所最大振幅 $A_{\max-\alpha}(i)$ とする⁵⁾。隣り合うゼロ・クロス点間の中央にその局所最大振幅 $A_{\max-\alpha}(i)$ を取った点を P_i とする。
- 3) Z_i と P_i を時間経過に沿って結んだ波形が三角パルス波形である。

三角パルス波形の定義および特性についての整理を行う。

$t_{\alpha}(i)$: ゼロ・クロス時間[s]

$A_{\max-\alpha}(i)$: 1 パルスの局所最大振幅[cm/s²]

$t_{\max-\alpha}(i)$: 1 パルスのピーク時間[s]

$p_{\alpha}(i)$: パルス半周期[s]

$T_{ps}(i)$: パルス周期[s]

三角パルス波形において、1 パルスの時間幅が 1 パルスの半周期 $p_{\alpha}(i)$ とすると、それを 2 倍することでパルス周

期 $T_{\text{pls}}(i)$ に変換することができる (式(2)参照)．本研究では，パルスのイメージを直感的にとらえるために 1 パルスのピーク時間 $t_{\text{max-zc}}(i)$ は 1 パルスの中央にとることとしている (式(3)参照)．

$$T_{\text{pls}}(i) = 2 \times tp_{\text{zc}}(i)$$

$$\text{ただし } tp_{\text{zc}}(i) = t_{\text{zc}}(i+1) - t_{\text{zc}}(i) \quad (2)$$

$$t_{\text{max-zc}}(i) = t_{\text{zc}}(i) + \frac{1}{2} \times tp_{\text{zc}}(i) \quad (3)$$

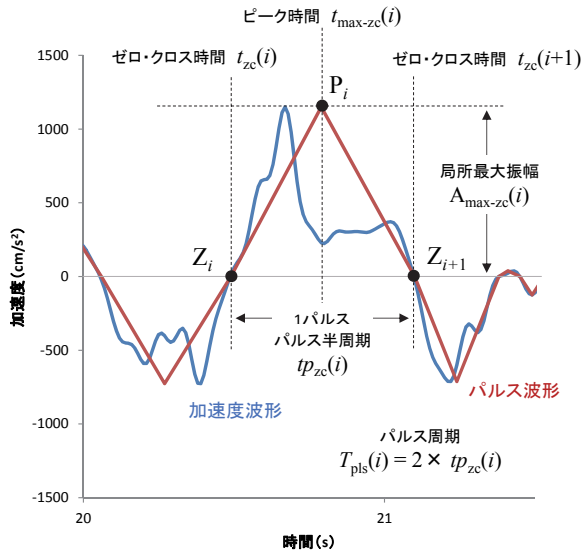


図-3 三角パルス波形の定義

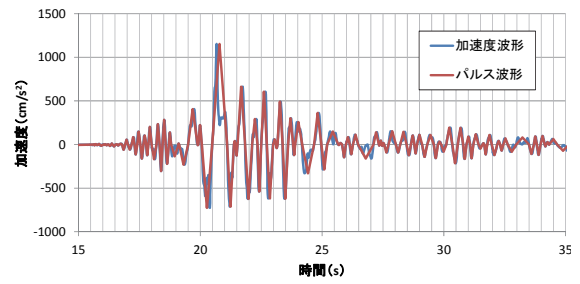
4. パルス地震動に関する評価

対象 5 観測点のパルス地震動に関する評価を図-4～図-8 に示す．各図ではそれぞれ，(a)に加速度波形とその三角パルス波形，(b)にパルス周期の時系列変化（円の大きさと各パルスの局所最大振幅を表現），(c)にパルス周期 T_{pls} を横軸，局所最大振幅 $A_{\text{max-zc}}$ を縦軸とした局所最大振幅スペクトル⁵⁾を示す．

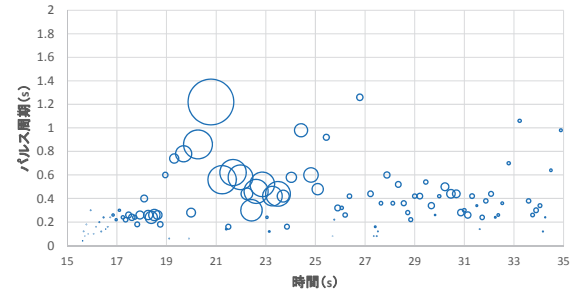
(1) KiK-net 益城 (KMMH16) (図-4)

震源から約 7km 北東に位置する観測点（益城町内）である．最大加速度は 1150.4cm/s^2 ，主要動は 15 秒間程度である．パルス周期 T_{pls} の時系列変化を見ると， $t=19\text{s}$ あたりから $T_{\text{pls}}=0.8\text{s}$ 程度と長くなり $t=20.8\text{s}$ で最長の $T_{\text{pls}}=1.22\text{s}$ となっていることが確認できる．その後すぐに短周期となりほぼ $T_{\text{pls}}=0.4\sim 0.6\text{s}$ の範囲に収まっている．部分的に $T_{\text{pls}}=1\text{s}$ 程度まで長くなることもあるが，振幅は比較的小さい．

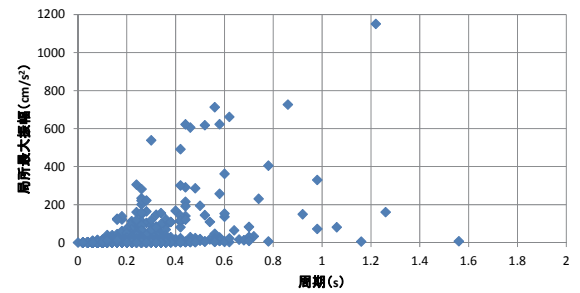
局所最大振幅スペクトルを見ると，ピークをなすパルスは局所最大振幅 $A_{\text{max-zc}}=1150.4\text{cm/s}^2$ ，パルス周期



(a) 加速度波形と三角パルス波形



(b) パルス周期の時系列変化



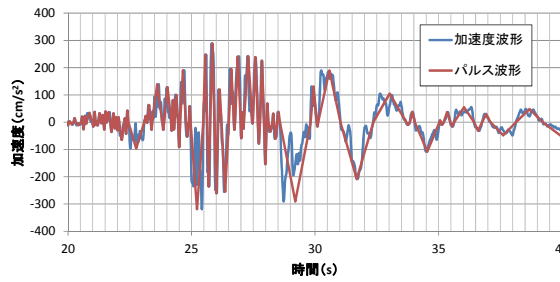
(c) 局所最大振幅スペクトル

図-4 KiK-net 益城 (KMMH16, EW 成分)

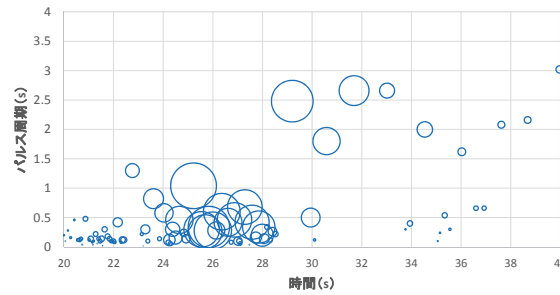
$T_{\text{pls}}=1.22\text{s}$ であり，他のパルスと比較しても突出して大振幅であり，構造物の被害に大きな影響を及ぼすと言われる固有周期 $1\sim 2\text{s}$ にも一致する．局所最大振幅 $A_{\text{max-zc}}=600\sim 800\text{cm/s}^2$ のパルスは周期 $T_{\text{pls}}=0.4\sim 0.9\text{s}$ とやや短周期側にあり，ピークをなすパルスの前後に出現している．局所最大振幅 $A_{\text{max-zc}}$ が 400cm/s^2 以下の比較的小さなパルスの多くは短周期領域に集中している． $T_{\text{pls}}=1\text{s}$ 付近の中周期帯のパルスも存在する．

(2) K-NET 一の宮 (KMM004) (図-5)

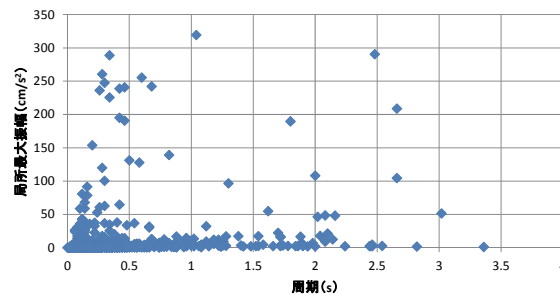
震源から約 39km 北東に位置する観測点（阿蘇市内）である．最大加速度は 319.2cm/s^2 ，主要動は 20 秒間程度である．KiK-net 益城ほど振幅は大きくないが，長周期の波形が目立つ．阿蘇地方では，長周期地震動階級の階級 4 を記録した⁶⁾．パルス周期 T_{pls} の時系列変化を見る



(a) 加速度波形と三角パルス波形

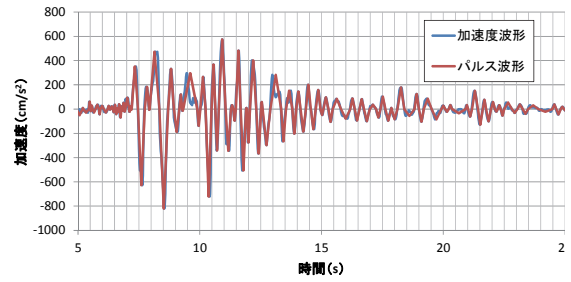


(b) パルス周期の時系列変化

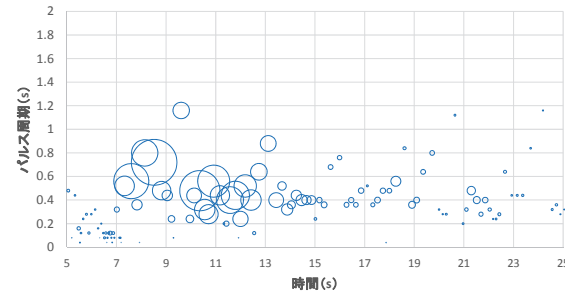


(c) 局所最大振幅スペクトル

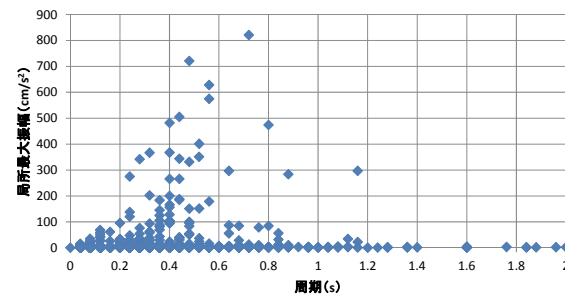
図-5 K-NET 一の宮 (KMM004, EW 成分)



(a) 加速度波形と三角パルス波形



(b) パルス周期の時系列変化



(c) 局所最大振幅スペクトル

図-6 JMA 神戸 (NS 成分)

と、 $t=25$ s 付近に $T_{pk}=1$ s 程度のパルスが認められ、その後、 $t=28$ s までは T_{pk} が 1s 以下の短周期に集中している。 $t=29$ s からは急激に長周期になり、ほぼ $T_{pk}=1.5\sim 3$ s の範囲で変化している。

局所最大振幅スペクトルを見ると、ピークをなすパルスは局所最大振幅 $A_{max-x}=319.2\text{cm/s}^2$ 、パルス周期 $T_{pk}=1.04$ s である。振幅の大きい局所最大振幅 A_{max-x} が 200cm/s^2 以上のパルスにおけるパルス周期は $T_{pk}=0.5$ s 付近と $T_{pk}=2.5$ s 付近に集中しており、短周期と長周期に二極化している。局所最大振幅 A_{max-x} が 50cm/s^2 以上のパルスにおけるパルス周期 T_{pk} はおよそ $0.1\sim 3$ s で周期の幅が広い。

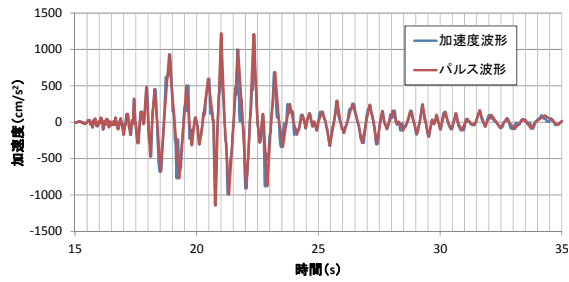
(3) JMA 神戸 (図-6)

震源から約 16km 北東に位置する神戸海洋気象台 (神戸市内) の観測記録である。最大加速度は 820.6cm/s^2 、主要動は 15 秒間程度である。 $t=7\sim 9$ s にかけて振幅の大

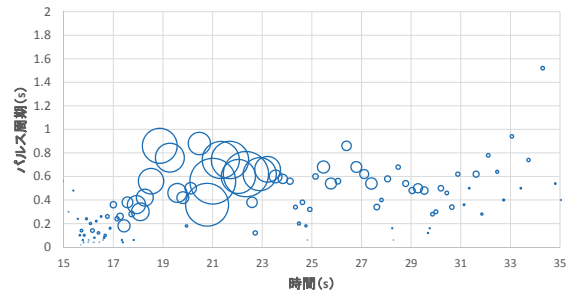
きなパルス状の波が見られる。パルス周期 T_{pk} の時系列変化を見ると、振幅の大きな $t=7\sim 13$ s 付近では、ほぼすべてのパルスの T_{pk} は $0.2\sim 0.9$ s の範囲で変化している。 $t=20$ s 付近に振幅が大きく、 $T_{pk}=1$ s 程度のパルスが突如現れるということを除けば、パルス周期の変化の傾向が KiK-net 益城と似ている。

局所最大振幅スペクトルの形状は、KiK-net 益城と似ている。ピークをなすパルスは局所最大振幅 $A_{max-x}=820.6\text{cm/s}^2$ 、パルス周期 $T_{pk}=0.72$ s であり KiK-net 益城よりもやや短周期側のパルスが多いことが見て取れる。

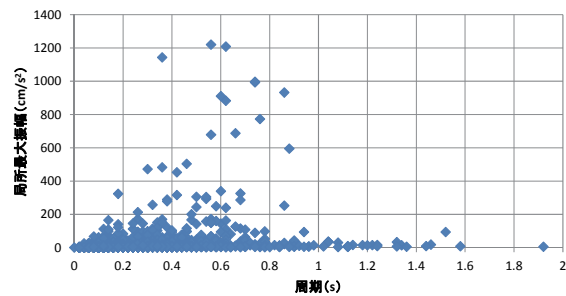
一方、速度応答スペクトルの $1\sim 2$ s 付近の卓越を説明できるようなパルス周期を持つパルスは、 $A_{max-x}=296.5\text{cm/s}^2$ の一つを除いて見られない。パルス周期そのものではなく、 $t=7.64$ s, 8.54 s, 10.4 s の 3 つのパルス間の時間間隔である 0.9 s および 1.86 s が、応答の増幅に関与し



(a) 加速度波形と三角パルス波形

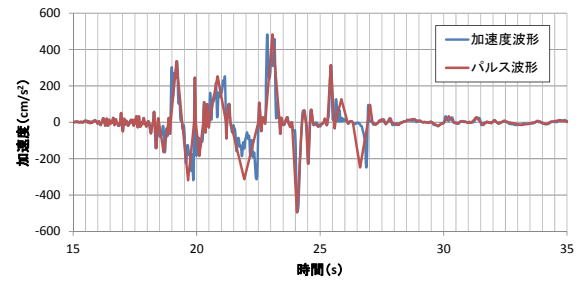


(b) パルス周期の時系列変化

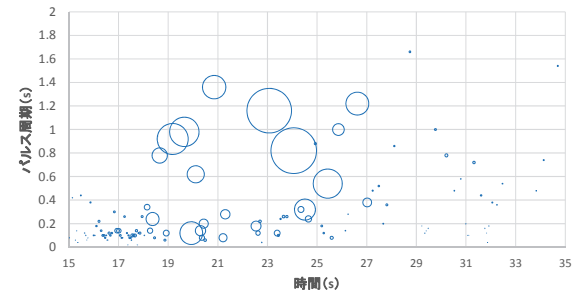


(c) 局所最大振幅スペクトル

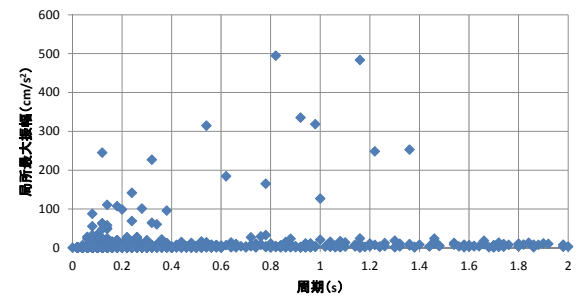
図-7 K-NET 小千谷 (NIG019, EW 成分)



(a) 加速度波形と三角パルス波形



(b) パルス周期の時系列変化



(c) 局所最大振幅スペクトル

図-8 K-NET 柏崎 (NIG018, EW 成分)

ている可能性を指摘することができる。インパルス列⁷⁾やクリティカル外乱⁸⁾としての波形を解釈することも考えられる。

(4) K-NET 小千谷 (NIG019) (図-7)

震源から約 5km 東に位置する観測点 (小千谷市内) である。最大加速度は 1219.4cm/s^2 、主要動は 15 秒間程度である。パルス周期 T_{ps} の時系列変化を見ると、ほぼすべてのパルスの T_{ps} が 1s 以下であるが時間的な変化は小さく、JMA 神戸と類似の傾向を示す。

局所最大振幅スペクトルの形状も JMA 神戸と似ているが、パルスの振幅レベルは JMA 神戸よりも大きい。ピークをなすパルスは局所最大振幅 $A_{\text{max-acc}}=1219.4\text{cm/s}^2$ 、パルス周期 $T_{\text{ps}}=0.56\text{s}$ である。振幅は非常に大きい周期が短い。また JMA 神戸とは異なり、卓越周期 0.69s 程度

のパルス周期を持つパルスは多数見られる。局所最大振幅 $A_{\text{max-acc}}$ が 200cm/s^2 以上のパルスにおけるパルス周期 T_{ps} はおよそ 0.1~0.9s で短周期側にある。

(5) K-NET 柏崎 (NIG018) (図-8)

震源から約 21km 北に位置する観測点 (柏崎市) である。最大加速度は 494.4cm/s^2 、主要動は 10 秒間程度である。パルス的であることがはっきりしている波形である。パルス周期 T_{ps} の時系列変化を見ると、 $t=19\sim 27\text{s}$ では、振幅の大きなパルスの T_{ps} は 0.5~1.4s の範囲で変化している。

局所最大振幅スペクトルを見ると、振幅の小さい小刻みなパルスと振幅の大きいパルスが明確に分かれている。ピークをなすパルスについては、局所最大振幅 $A_{\text{max-acc}}=494.4\text{cm/s}^2$ 、パルス周期 $T_{\text{ps}}=0.82\text{s}$ である。局所最大振幅 $A_{\text{max-acc}}$ が 300cm/s^2 以上のパルスにおける T_{ps} はほぼ 0.8~

1.2s 付近に集中しているが、主要動が短いためパルスの個数は少ない。

5. パルス周期と卓越周期の比較

三角パルス波形に関する検討で得られたパルス周期と、従来の手法で得られた様々な周期を比較する。対象 5 観測点における周期の比較を図-9 に示す。青色は最大振幅のパルスのパルス周期 T_{ps} 、赤色は等価卓越周期 T_{eq} 、緑色は加速度応答スペクトルの卓越周期、黄色は速度応答スペクトルの卓越周期を表す。基本的には速度応答スペクトルの卓越周期が最も長くなっているが、KiK-net 益城のみパルス周期 T_{ps} の方がやや長い。

パルス周期 T_{ps} と等価卓越周期 T_{eq} を比較すると、JMA 神戸、K-NET 小千谷、K-NET 柏崎では近い周期を取っている。一方で、KiK-net 益城と K-NET 一の宮では 2 つの周期に開きがある。K-NET 一の宮については、加速度と速度の時刻歴上のピークがずれているため等価卓越周期が実際の現象をうまく表現できていないと考えられる。

4 つの周期を比較すると、K-NET 小千谷ではすべての周期がほぼ等しい。これは図-7(a)に示した波形の不規則度合いが、他の波形と比較して低いことによると考えられる。一方、K-NET 一の宮ではばらつきが極めて大きい。図-5(a)に示した波形の周期特性が、強い非定常性を持つことによると考えられる。

絶対加速度応答スペクトルおよび速度応答スペクトルの卓越周期については、構造物の応答を通した周期特性を表すのに対し、パルス周期 T_{ps} と等価卓越周期 T_{eq} は地震動波形そのものの周期特性を示している。これら以外にも、スペクトルモーメントを用いた等価卓越周期の評価方法⁹⁾があり、多面的な考察が必要である。

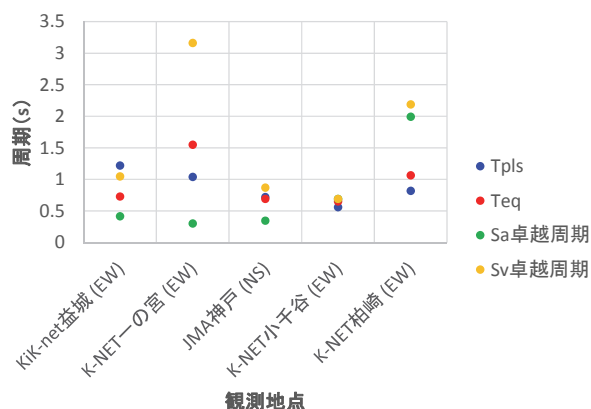


図-9 最大振幅のパルス周期 T_{ps} と様々な周期の比較

6. まとめ

本研究で得られた成果を以下に要約する。

- 1) 加速度波形を三角パルスの集合で構成した骨格波形として表現する方法を提案した。加速度波形の振幅・周期・繰り返し特性を、簡略化した三角パルス波形により評価することができる。
 - 2) 2016 年熊本地震 (KiK-net 益城, K-NET 一の宮), 1995 年兵庫県南部地震 (JMA 神戸), 2004 年新潟県中越地震 (K-NET 小千谷), 2007 年新潟県中越沖地震 (K-NET 柏崎) の 5 波形を用いて三角パルス波形を求め、パルス周期の時系列変化と局所最大振幅スペクトルを用いて、三角パルス波形の振幅特性、周期特性、繰り返し特性の関係を考察した。
 - 3) K-NET 益城ではパルス周期 $T_{ps}=1.22s$ で局所最大振幅 $A_{max}=1150.4cm/s^2$ の大振幅パルスが認められた。JMA 神戸では速度応答スペクトルの 1~2s 付近の卓越に対応するパルスは見られず、パルス間の時間間隔が応答の増幅を支配した可能性がある。K-NET 一の宮では、パルス周期 T_{ps} が 1s 未満から時間経過とともに徐々に長くなり 2s 以上の長周期に達することを示した。
 - 4) 最大振幅のパルス周期 T_{ps} と従来の手法より得られる 3 種類の周期 (最大加速度と最大速度から求められる等価卓越周期、絶対加速度応答スペクトルの卓越周期、速度応答スペクトルの卓越周期) の比較を行った。K-NET 小千谷では 4 種類の周期がほぼ一致する一方、K-NET 一の宮ではばらつきが大きく、加速度波形の非定常性を反映する結果となった。
- 今後は、三角パルスに加えて他の表現方法も検討対象として、パルス地震動の振幅・周期・繰り返し特性について、さらに考察を進める予定である。

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) 堀淳一, 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.
- 2) 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.
- 3) 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.

- 4) 川瀬博：震源近傍強震動の地下構造による増幅プロセスと構造物破壊能，第10回日本地震工学シンポジウム，パネルディスカッション資料集，pp.29-34，1998.
- 5) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門，1994.5.
- 6) 気象庁：長周期地震動に関する観測情報（試行），http://www.data.jma.go.jp/svd/cew/data/ltpgm_explain/data/past/past_list.html
- 7) 盛川仁，澤田純男，土岐憲三，金子康史：ランダムに生起するインパルス列のスペクトル特性について，第24回地震工学研究発表会講演論文集，pp.25-28，1997.7.
- 8) 竹脇出：非定常ランダム地震入力におけるクリティカル包絡線関数，日本建築学会構造系論文集，Vol.67，No.559，pp.85-91，2002.9.
- 9) Hancock, J. and Bommer, J. J.: The effective number of cycles of earthquake ground motion, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.34(6), pp.637-664, 2005.

(2017.?.? 受付)

EVALUATION OF STRONG GROUND MOTION CHARACTERISTICS USING TRIANGULAR PULSE WAVE MODEL

Taiki YAMAMOTO and Nobuoto NOJIMA

When an inland crustal earthquake occurs, strong ground motions containing a directivity pulse are frequently observed. Pulse-like waves with large amplitude are important consideration in earthquake ground motion prediction and disaster countermeasures because they can be extremely destructive. In this study, a triangular pulse wave model representing the skeleton a strong motion has been proposed in order to evaluate strong motion characteristics such as amplitude, predominant period and the number of cycles. Ground motion accelerations recorded in the main shock of the 2016 Kumamoto Earthquake and past inland crustal earthquakes have been used to evaluate pulse waves and their characteristics in terms of amplitude and period and local peak amplitude spectra. Furthermore, several kinds of predominant period have been compared; specifically, similarity among the pulse period with peak amplitude, the equivalent dominant period using PGA and PGV and the predominant period of the absolute acceleration and relative velocity response spectra are discussed.