

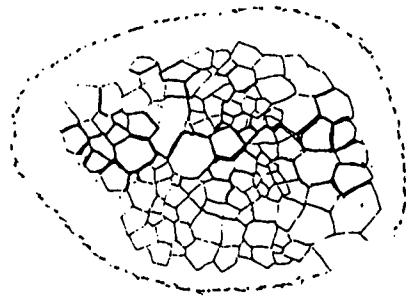
# 連鎖破壊型震源モデルによる神戸海洋気象台記録の試算

横浜防災システム(株) 横山正義\*

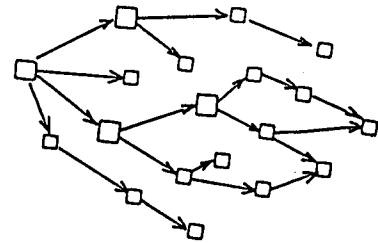
兵庫県南部地震における神戸海洋気象台の観測記録は表層の非線形増幅効果の影響が少なく、かつ震源近傍であるため、この地震の短周期地震波の震源過程を考える上で重要な情報を含んでいる。本研究は最近提案された連鎖破壊型震源モデルをこの記録に適用し、短周期波動に関する発震メカニズムを考察する。

## 1. 概説

兵庫県南部地震では近地実体波や遠地実体波の逆解析により1 Hz以下の地震動についてその震源過程の研究が進められている。一方、構造物に被害をもたらした短周期加速度波は散乱や表層の非線形増幅効果など伝播過程で変化を受けやすいため、その震源過程を複数点の観測値から一律な逆解析で求めるのは、条件を満たす記録が少なく困難である。そこで本研究では工学的見地から短周期地震動に問題を限定し、神戸海洋気象台の記録を用いてその震源メカニズムを考察する。まず、短周期地震波を対象とする連鎖破壊型震源モデルについてパラメータスタディを示す。次に提案するモデルにより観測記録の再現を試みる。



(a) 分布する微小断層の概念模式図



(b) 連鎖破壊の模式図

## 2. 短周期地震動の連鎖破壊モデル

### (1) 微小要素の連鎖破壊の概念

微視的視点に立ち、断層は図-1 a のような多数の微小クラックの集合体であると考え、岩盤がせん断力を受けて大きな破壊領域を形成する過程において加速度波形と関連する短時間の岩盤の破壊を考える。これは断層面の1部分から短時間に波動エネルギーが放出される運動であり、この破壊形態に問題を限定し、断層が拡大する過程を簡潔な時間の漸化式<sup>1)</sup>で表す。

### (2) 連鎖破壊過程の漸化式表現

振動数がおよそ1 Hz以上の高周波地震動の震

源過程を微小なクラックが連鎖的に拡大する過程と考えモデル化する(図-1 b)。まず、ある岩盤の領域に多数の微小要素が存在し、各微小要素にせん断力が作用している場を想定する。微小要素に亀裂が生じるとき要素のモーメントが解放され、応力波が生まれる。このとき亀裂の先端の応力集中が次の亀裂の生成を促し、その結果次々に亀裂の拡大が起きるとする。これを「時刻  $t_i$  の解放地震モーメントは時刻  $t_{i-1}$  の解放地震モーメントに亀裂の成長率を乗じたものとなる」と表す。このとき、亀裂の拡大は領域の応力緩和を伴ない、亀裂の成長率を低下させる。これを「連鎖過程の亀裂の成長率は場の未解放の地震モー

キーワード：震源過程 強震動

\* 横浜防災システム(株) 地震防災室

045-303-5130

メントに1次比例する」と表す。以上の過程を次の漸化式で表す。

$$\Delta M(t_i) = p_0 [M(t_{i-1})/M(t_0)] \Delta M(t_{i-1}) \quad (1)$$

ここに、 $M(t_0)$ :場の未解放地震モーメント、 $\Delta M(t_i)$ :時刻  $t_i$  の $\Delta t$  間に解放される地震モーメント、 $p_0$ : $\Delta t$  間の亀裂成長率、 $p_0$ の値は用いる $\Delta t$ に依存するので1秒当たりの換算値を基準亀裂成長率  $P_0$ として、 $P_0 = p_0^{1/\Delta t}$  で表し、併記して用いる。漸化式から地震モーメント関数  $M_0(t)$  を以下の手順で導く。まず、場の地震モーメント関数の初期値  $M(t_0)$ 、解放モーメントの初期値 $\Delta M(t_0)$ および亀裂成長率  $p_0$  の3つパラメータを設定する。対象とするパルスの継続時間を考慮して時間きざみ $\Delta t$  とステップ数を設定する。初期値から順次、 $\Delta M(t_i)$ を計算する。この値は場の地震モーメントの減少値であり式の中では常に負の値となる。そこで、その絶対値をとり、初期値零で積分する。これを地震モーメント関数  $M_0(t)$  とする。この関数は滑らかであり、ラグランジェの数値微分法により、微分関数  $M_0^{(n)}(t)$ が求められる。ここで  $M_0^{(n)}(t)$ は地震モーメント関数のn次の微分関数を表す。また  $M_0(\omega)$ を地震モーメント  $M_0$ で表す。この漸化式による震源過程は概略、次の様な経過をたどる。地震モーメントの解放は初め極めてゆるやかに進み、やがて加速的に増加し極大値に至る。その後滑らかな減少過程を経て最後に零へ収束する。次に、双対力モデルを用いて地震モーメントの解放による無限弾性体の任意点の動的変位<sup>2)</sup>を次式で表す。

$$\begin{aligned} u(x,t) = & \sin 2\phi \sin^2 \theta (4\pi\rho\alpha^3r)^{-1} M_0^{(1)}(t-r/\alpha) \mathbf{e}_r \\ & + \sin 2\phi \sin 2\theta (8\pi\rho\beta^3r)^{-1} M_0^{(1)}(t-r/\beta) \mathbf{e}_\theta \\ & + \cos 2\phi \sin \theta (4\pi\rho\beta^3r)^{-1} M_0^{(1)}(t-r/\beta) \mathbf{e}_\phi \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、 $\mathbf{u}$ :観測点の動的変位、 $\mathbf{e}_r, \mathbf{e}_\theta, \mathbf{e}_\phi$ :各々P波、SV波、SH波の単位ベクトル、 $M_0^{(1)}(t)$ :地震モーメント速度関数、 $\phi, \theta$ :震源から見た観測点の球座標の角度(図-2a参照)、 $\rho$ :密度、 $\alpha, \beta$ :P波速度とS波速度、 $r$ :震源距離、(2)式は垂直な横ずれ型断層を想定し(図-2b参照)、震源距離の(-1乗)項を考慮した場合の動的変位を表す式である。この式に伝播経路の内部減衰と表層地

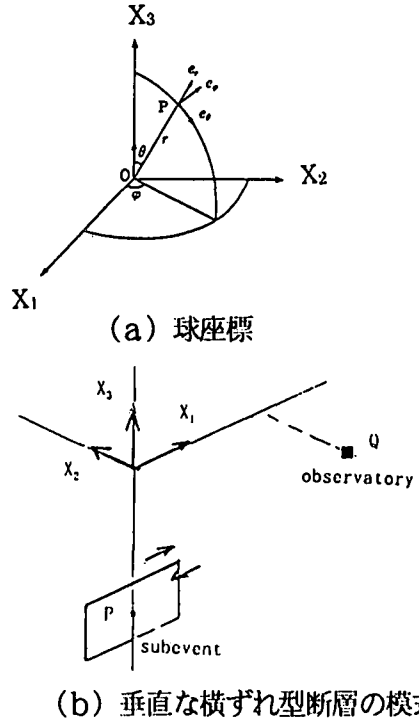
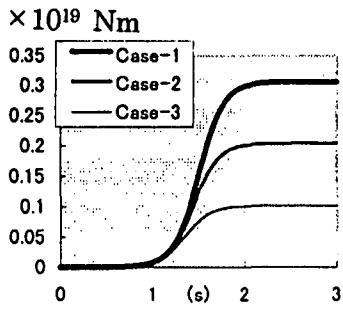


図-2 座標系

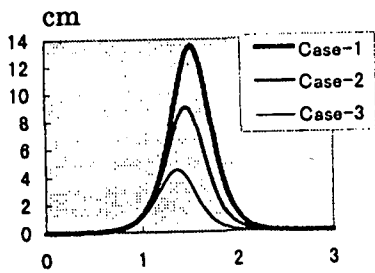
盤の増幅効果を別に考慮する。(2)式の地盤変位時刻歴から数値微分を用いて速度時刻歴と加速度時刻歴を算定する。

### (3) 漸化式のパラメータスタディ

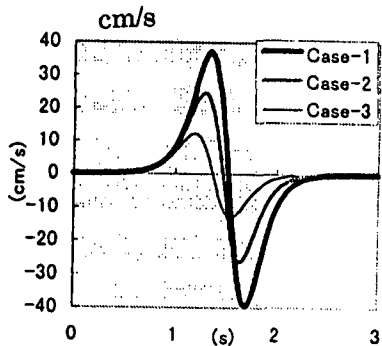
モーメントマグニチュード6程度の地震を想定し、パラメータスタディを示す。場の地震モーメントの初期値  $M(t_0)$ を変化させ、他の条件を変えない3つのケースについてパラメータスタディを示す。場の地震モーメントの初期値  $M(t_0)$ はCase 1,2,3について各々、 $1.2 \times 10^{19}$  Nm,  $0.8 \times 10^{19}$  Nm,  $0.4 \times 10^{19}$  Nm とする。時間のきざみは $\Delta t = 0.02$ 秒とする。亀裂成長率は各ケース共通に、 $p_0 = 1.15/\Delta t$  ( $P_0 = 1.08 \times 10^3/s$ )とする。解放地震モーメントの初期値は $\Delta M(t_0) = 0.8 \times 10^{13}$  Nmとする。このようにして計算された地震モーメント関数と変位、速度、加速度波形を図-3に示す。想定震源は震央距離15km、震源深さ13kmにあるとし、基盤の上昇波について示す。図から次の知見が得られる。ひとつの連鎖過程から、ひと山の変位パルス、正・負の交番速度パルス、正・負(最大)・正の交番加速度パルスが生じる。このパルスは1方向に大きく作用する非対称の地震荷重となる。地震モーメント  $M_0$ は場の初期地震モーメント  $M(t_0)$ に1次比例する。



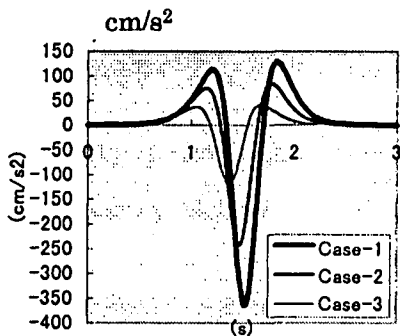
(a) 地震モーメント関数



(b) 変位波形



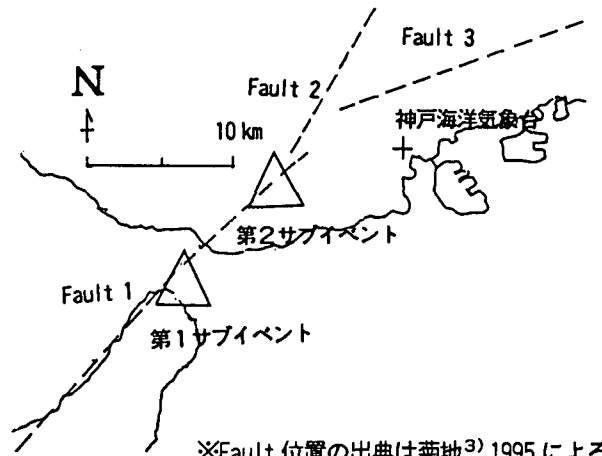
(c) 速度波形



(d) 加速度波形

図-3 地震モーメント関数と基盤の波形図

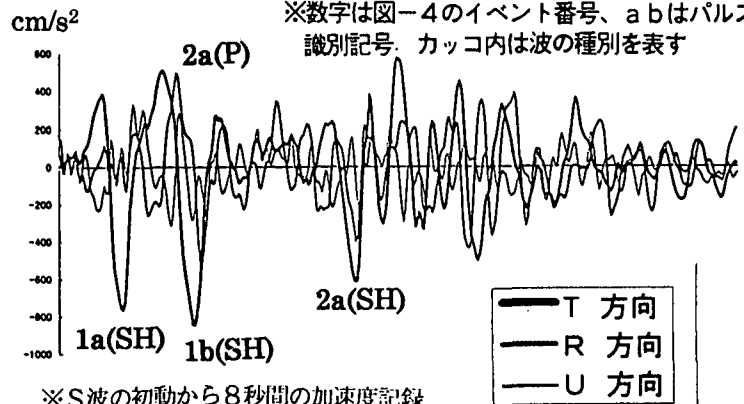
場の地震モーメント関数の初期値  $M(t_0)$  が大きくな



※Fault 位置の出典は菊地<sup>3)</sup> 1995 による

図-4 短周期地震動の震源のモーメント中心位置

※数字は図-4のイベント番号、a bはパルスの識別記号。カッコ内は波の種類を表す



※S波の初動から8秒間の加速度記録

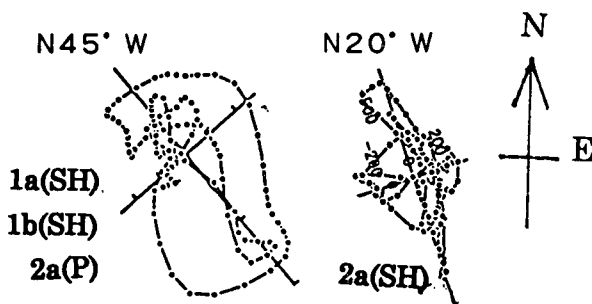
図-5 加速度パルスと対応サブイベント

ると連鎖過程のプロセスタイムは長くなる。亀裂成長率は無数の小さな破壊フロントの平均的速さの指標と考えられ、場の初期地震モーメントと対になってプロセスタイムを決定する。これは1方向破壊モデルのプロセスタイムが破壊伝播速度と断層長さで評価されることに対応する。

### 3. 神戸海洋気象台の加速度記録

#### (1) 加速度パルスの発震源位置

複数地点の観測記録を用いた震源過程の解析によれば、この地震は多重震源を持つことが示されている。Kikuchi は観測記録の逆解析から3つのサブイベントを識別している<sup>3)</sup>。また著者らは神戸海洋気象台の加速度パルスの到着時刻の分析から主要な加速度パルスと対応するサブイベントを分析した<sup>4)</sup>。図-4 と図-5 はこれらのサブイベントのモーメント中心と対応する加速度パルスである。



※左図と右図の主要動は各々第1、第2イベントに対応する  
 図-6 加速度の水平面内のリサーチ図

これらの短周期のパルスの発震メカニズムは概略、次のような断層運動と関連していると考えられる。すなわち、断層は淡路島北部から始まり、南西方向へ約20 km、北東方向へ約25 km 拡大した。この南西方向の断層は野島断層に相当し、北東方向の断層運動は須磨断層（海峡への延進部を含む）を動かし、次々と六甲断層系が運動した。淡路島北部でこの2つの断層が始まる時岩盤の亀裂生成に伴う巨大なエネルギーが放出された。神戸海洋気象台の加速度波形の2つのパルス（図-5, 1a, 1b）はそれぞれ野島断層と須磨断層延進部の始まりの運動に対応するものと考えられる。また、2aは六甲断層系のひとつの断層の始まりに対応すると考える。

## (2) 波動の識別

観測点における3成分の加速度ベクトルの方向の特徴からその種類を識別する。まず水平2方向の加速度記録を波動進行方向（R方向）と進行直交方向（T方向）に座標変換する。震源から斜め上方に伝播する波動が地表に達するとき、U（上下動）とRが正の相関を持つときP波、UとRが負の相関を持つときSV波、TがUと相関を持たないときSH波とする。図-5の加速度ベクトルの特徴と図-6の加速度の水平面内のリサーチ図から1aと1b、2aはSH波と考えられる。

## 4. 強震パルスの再現

神戸海洋気象台の加速度波がどのような震源プロセスと伝播経路および表層の効果で生じたか、モデルを仮定して推定を試みる。

### (1) 表層の増幅に関する予備検討

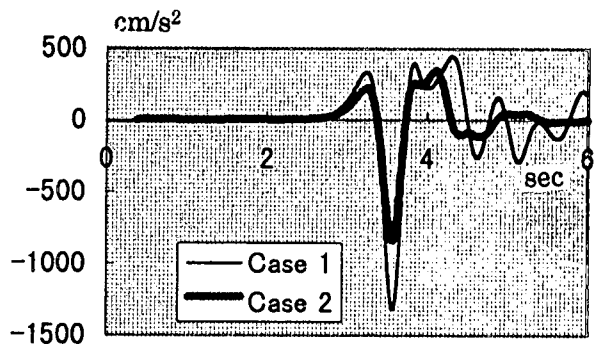


図-7 パルス入力に対する表層の応答加速度波

第1サブイベントから到来したと考えられる1aのパルスの波形が表層でどのように変化するか、1次元重複反射モデルで考察する。表層モデルは次の2つである。

#### a) 軟岩モデル

深さ5 kmまでの速度構造のモデルを用いる。せん断波速度は1,000 m/sから3,500 m/sとする<sup>5)</sup>。

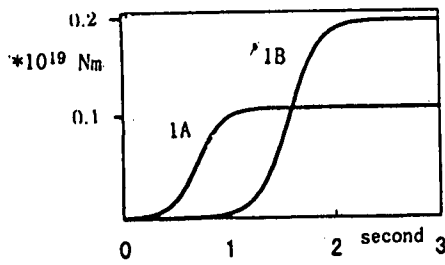
#### b) 洪積層モデル

上記の軟岩モデルの上に層厚200mの洪積層を考慮する。洪積層のせん断波速度を310m/sから550 m/sとする<sup>6)</sup>。このモデルについては次節で再度説明する。図-7のCase 1は洪積層モデル、Case 2は軟岩モデルの地表の応答加速度である。両者の地表の波はそれぞれパルスの後に重複反射の後続波を持つが、入射パルスの形は両者とも保存されている。これはそもそも入射パルスが周波数成分において狭帯域の波であり、対応する周波数伝達関数の対応周期の振幅倍率をかけたものと同等になるからと考えられる。ここではパルスの部分だけを考えることにし、対応する周波数の伝達関数を定数の形で用いる。

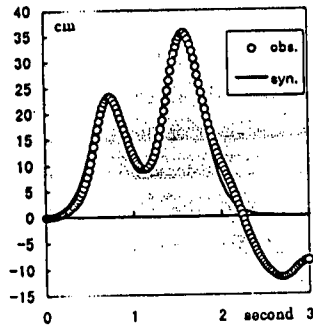
## (2) 震源パラメータの同定

### a) モデルの制約条件と前提

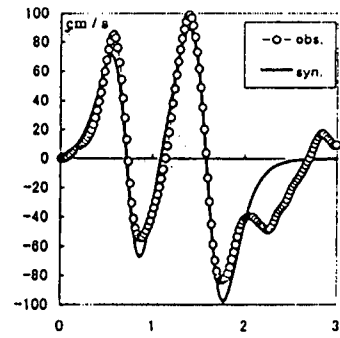
第1サブイベントに由来する2つの加速度パルス1a, 1bについて、(1)式の震源パラメータを仮定し、試行的に合成波形を観測波に一致させる。震源のモーメント中心は図-4を参照し、与条件として与える。第1サブイベントのモーメント中心は淡路島北端の深さ13kmを想定する。ここで算定される震源パラメータは神戸海洋気象台の観測値を説



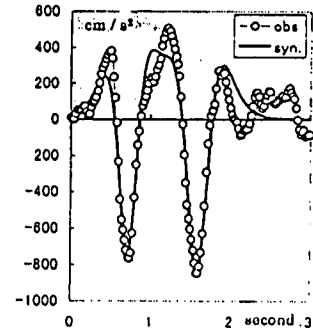
(a) 地震モーメント関数



(b) 変位波形



(c) 速度波形



(d) 加速度波形

図-8 第1サブイベントの地震モーメント関数  
および神戸海洋気象台の観測記録と合成記録  
の比較

明するモデルであり、破壊伝播の効果はモデルのパラメータに包含されている。

#### b) 計算手順

本計算における時間ステップは観測記録と同じ0.02秒とし、S波の到着時刻の0.3秒前から2つの最大の加速度パルスが終息する3秒間の計算を行う。なお、図-6を参照して、この解析ではN45°W(+), S45°E(-)の座標軸に変換した加速度記録を観測値とし、フィルターを通さない波形で使う。また、速度記録、変位記録は各々、3秒間の観測加速度記録を積分したものである。

#### c) 基盤層の内部減衰の導入

基盤層の内部減衰による振幅低減率は、佐藤らの内部減衰の評価法<sup>7)</sup>を参照し、陽な形式で用いる。ここでは $Q=200$ を仮定し、震源距離20km、振動数1Hzに対応する振幅の低減率を $H_1 = 0.91$ とする。断層近傍の問題では基盤の内部減衰効果はさほど支配的なものではない。

#### d) 表層の増幅効果

基盤面を深度5kmに設定し、基盤層のせん断波速度をこの地震でのS波の走時の算定値<sup>4)</sup>より、3,500 m/sとする。表層のモデルは洪積層モデルを

想定する。深度200mまでの物性値は神戸海洋気象台付近のボーリングの洪積層のデータ<sup>6)</sup>を参照し、深い岩盤の物性値は深度5kmまでの推定物性値<sup>4)</sup>を参照する。1次元重複反射モデルの計算の結果、基盤入射パルスの周期に対対応する地表振幅の倍率は $H_2 = 2.45 [(E+F) / 2E]$ となる。

#### e) モデルのパラメータと計算結果

2つのパルスに対して2組のパラメータを求め、試行計算の結果、観測記録を最も良く説明するパラメータは以下のものである。地震モーメントの初期値 $M(t_0)$ は1a, 1bについて各々、 $0.40 \times 10^{19}$  Nm,  $0.82 \times 10^{19}$  Nm、ここで解放地震モーメントの初期値は共通に、 $\Delta M(t_0) = 1.0 \times 10^{13}$  Nmとする。亀裂成長率は $p_0 = 1.1645 / \Delta t$  ( $P_0 = 2.03 \times 10^3 / s$ : 1a)と $p_0 = 1.1407 / \Delta t$  ( $P_0 = 0.72 \times 10^3 / s$ : 1b)である。1a, 1bに対応する地震モーメントは各々、 $0.11 \times 10^{19}$  Nm,  $0.20 \times 10^{19}$  Nmである。この値から換算されるモーメントマグニチュードは各々、6.0と6.1である。計算結果は図-8のように観測されたパルス波形

を良好に再現する。

## 5. 考察

漸化式モデルは断層の形状と伝播の形態を陽な表現で用いることなく、震源から放出される地震モーメントの時間変動を直接記述する。震源の各破壊点と観測点の距離が近似的に等しいときはモーメント中心位置だけが唯一の位置のパラメータである。それ以外の場合は複数の点震源を断層面の格子点に分散させるモデルが必要となる。

## 6. おわりに

断層近傍の地震動を評価するには短周期地震動に関係する震源のメカニズムを理論的かつ実証的に把握する必要があると考えられる。その特性を明らかにするには断層近傍の硬質地盤の加速度記録をフィルター処理しない原波の形で分析し、そこから短周期地震動の震源過程を解明することが重要と考えられる。本研究では短周期地震動の震源モーメント関数を漸化式で示し、神戸海洋気象台の加速度記録の再現を試みた。今後、連鎖破壊モデルの理論的根拠を明確にし、加速度記録への適用実績を積み、耐震工学の実務に役立つものとしたい。

## 参考文献

- 1) 横山正義：高周波パルスの震源過程の漸化式モデル，地震第2輯（投稿中）
- 2) 菊地正幸：地震の発生機構，地震の事典，朝倉書店，p.221, 1994
- 3) Kikuchi, M.: Report of the Coordinating Committee for Earthquake Prediction, the 112<sup>th</sup> meeting, 1995
- 4) 横山正義・宮本英治：神戸海洋気象台で観測された大振幅加速度の発震源に関する検討，第51回土木学会年次学術講演会講演概要集 1B, pp.466-467, 1996
- 5) Pitarka, A., K.Irikura and T.Kagawa : Source Complexity of the January 17,1995 Hyogoken-nanbu Earthquake Determined by Near-field Strong Motion Modeling, Preliminary Results, Journal of Natural Disaster Science, Vol.16, No.3, pp.31-37, 1995
- 6) 岡本晋・他：兵庫県南部地震の神戸付近の基盤地震動の推定，第50回土木学会年次学術講演会講演概要集 1B, pp.1230-1231, 1995
- 7) 佐藤忠信・塩見祐二，震度7の帯内において最大地動を推定することは可能か，阪神・淡路大震災に関する学術講演会，pp.45-52, 1996

## Simulation of Impulsive Ground Acceleration at JMA Kobe observatory Using Chain- Fracture Model

Masayoshi Yokoyama

A new recursion formula of chain-fracture process is proposed for the high-frequency seismic sources. Parametric trials of computing impulsive waves are shown using the present model. Strong impulsive accelerations at JMA Kobe observatory from the 1995 Hyogo-ken nanbu earthquake are simulated and a good agreement is shown between observed and simulated. It is shown that two major parameters of chain-fracture process determine the characteristics of impulsive waves.