

横ずれ断層近傍の地震動および相対変位地震動の特性

原田隆典¹・黒川丈史²

¹正会員 工博 宮崎大学教授 工学部土木環境工学科 (〒889-2192 宮崎市学園木花台西1-1)

²正会員 株式会社クボタ建設 (〒104-0033 東京都中央区新川 1-8-8)

1995年兵庫県南部地震(M7.2)による1G近くの大加速度を持つ長周期(1-2秒)パルスの揺れに多くの技術者が驚かされたように、このような断層近傍の揺れに関する概略的知識はこれまでの耐震工学の分野では乏しかった。

本研究では、内陸地震の典型的な横ずれ断層を想定した運動学的断層モデルから求められる地震動合成波形に基づいて、断層近傍の速度波形並びに、従来、全く観測記録の存在しない地盤歪み、地盤の傾き、地盤の回転などの物理的意味を持つ9成分から構成される相対変位地震動波形の特性について調べたので、その概要をここに報告する。

Key Words: earthquake ground motions, kinematic model, ground strain, differential motion, rotational motion, strike slip

1. まえがき

これまでの耐震工学分野では、観測記録の統計処理を主体とした経験的方法によって地震動を解釈し実務設計に使用する場合が多かった。そして、1995年兵庫県南部地震による1G近く大加速度を持つ長周期(1-2秒)パルスの揺れに耐震工学を専門とする多くの技術者が驚かされたことから推察されるように、このような断層近傍の揺れの概略的把握はなされていなかった。すなわち、経験的方法のみに頼るのは危険であるということを改めて認識したのである。このため、理論的方法を援用して、どのような強震動が起こるのかをシミュレーションによって確認しながら、抜かりなく揺れの特徴を把握して構造物の耐震設計をしておかなければならない。

そこで、本研究では、内陸地震の典型的横ずれ断層を想定した運動学的断層モデルから求められる合成波形に基づいて、断層近傍の速度波形並びに、従来、全く観測記録の存在しない地盤歪み、地盤の傾き、地盤の回転などという物理的意味を持つ9成分から構成さ

れる相対変位地震動波形の特性について調べるものとする。

2. 断層モデルと相対変位地震動の定義

断層長さ方向に x 軸を取った直交座標系における地震波動場の解析解を用いて¹⁾、表-1のような震源断層パラメータを持つ地表面に垂直な横ずれ断層近傍の地震動と、相対変位地震動を計算する。断層破壊は、断層の端から一様に断層長さ方向に2.2km/sの速度で伝わるものとする。地盤条件としては、半無限地盤中にある横ずれ断層の上に、厚さ1.5kmの表層地盤を考えている。地盤の物性値は、表層地盤のP波とS波速度および密度とQ値は、それぞれ、2.8km/s、1.6km/sおよび2.3t/m³、150である。一方、半無限地盤のP波とS波速度および密度とQ値には、それぞれ、6.0km/s、3.5km/sおよび2.8t/m³、400、を仮定している。図-1は、断層近傍の地表面観測点(計算点)と、垂直な横ずれ断層の地表面への投影位置(AからLの所)並びに、断層破壊方向を示している。

表ー１ 計算で用いた震源断層パラメータ

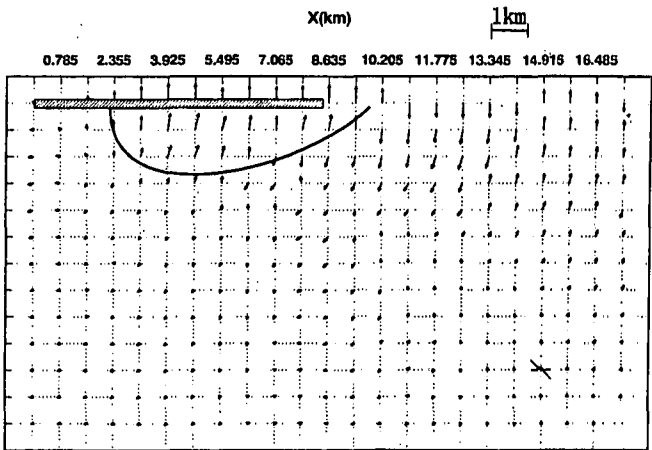
Seismic moment	$M_0 = 2.23 \times 10^{17} \text{ N} \cdot \text{m}$ ($2.23 \times 10^{24} \text{ dyne} \cdot \text{cm}$)
Rise Time of the Ramp Function	$\tau = 0.3 \text{ s}$
Length of Fault	$L = 8500 \text{ m}$
Width of Fault	$W = 8500 \text{ m}$
Velocity of Rupture	$v_r = 2200 \text{ m/s}$
Depth of Upper Edge of Fault	$z_{so} = 0 \text{ m}$
Strike Angle	$\phi = 0^\circ$
Dip Angle	$\delta = 90^\circ$
Slip Angle	$\lambda = 0^\circ$

図ー１ 地表面観測点と横ずれ断層の地表面への投影位置

本研究で計算した地表面における相対変位地震動の定義は、以下のようなものである。

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_{xx} &= \frac{\partial u}{\partial x} \quad (x \text{ 軸方向の軸歪み}) \\
 \gamma_y &= \frac{\partial v}{\partial x} \quad (y \text{ 軸方向の単純せん断歪み}) \\
 \omega_y &= \frac{\partial w}{\partial x} \quad (y \text{ 軸回りの傾き}) \\
 \gamma_x &= \frac{\partial u}{\partial y} \quad (x \text{ 軸方向の単純せん断歪み}) \\
 \varepsilon_{yy} &= \frac{\partial v}{\partial y} \quad (y \text{ 軸方向の軸歪み}) \\
 \omega_x &= \frac{\partial w}{\partial y} \quad (x \text{ 軸回りの傾き})
 \end{aligned}
 \tag{1a}$$

$$\begin{aligned}
 \gamma_{xy} &= \frac{1}{2}(\gamma_x + \gamma_y) \quad (xy \text{ 平面のせん断歪み}) \\
 \omega_z &= \frac{1}{2}(\gamma_y - \gamma_x) \quad (z \text{ 軸回りの回転}) \\
 \varepsilon_D &= \frac{1}{2}(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}) \quad (xy \text{ 平面の粗密歪み})
 \end{aligned}
 \tag{1c}$$



図ー２ 水平２成分の合成速度波形の最大値とその方向の分布（実線の領域内では大振幅パルス波が現れる）

$$\begin{aligned}
 \gamma_{xy} &= \frac{1}{2}(\gamma_x + \gamma_y) \quad (xy \text{ 平面のせん断歪み}) \\
 \omega_z &= \frac{1}{2}(\gamma_y - \gamma_x) \quad (z \text{ 軸回りの回転}) \\
 \varepsilon_D &= \frac{1}{2}(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}) \quad (xy \text{ 平面の粗密歪み})
 \end{aligned}
 \tag{1c}$$

上式の相対変位地震動は、線形弾性理論においてよく知られてるので説明は省略するが、これらのうち、 ω_z はSH波のみによるせん断歪み、 ε_D はP-SV波による軸歪みに、それぞれ、対応するということを注釈しておく。

3. 速度波形と相対変位波形の計算例

図ー２は、地表面における速度の水平２成分の合成波形の最大値と、その震動方向をプロットしたものである。図ー２の実線は、大振幅のパルスの波形が現れた大体の領域を示している（全波形は省略するが、図ー４の波形を参照²⁾）。この図より、横ずれ断層近傍では、断層直交方向の震動が卓越し、断層中央から破壊進行方向の終端にかけて大振幅のパルスの波形が現れ、断層からの距離とともに急激に振幅が小さくなることがわかる。実線の内側と外側では、最大値の震動方向が逆転している。

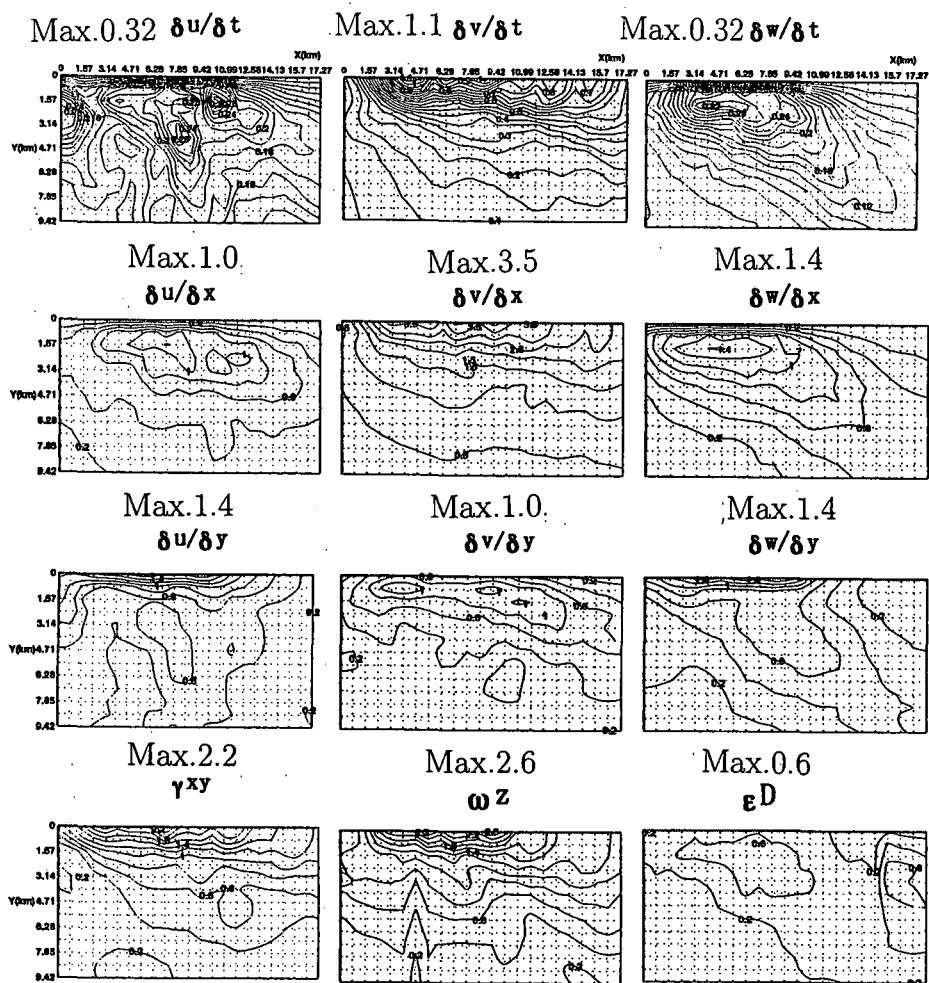


図-3 速度波形の3成分および相対変位地震動波形の9成分の最大値分布

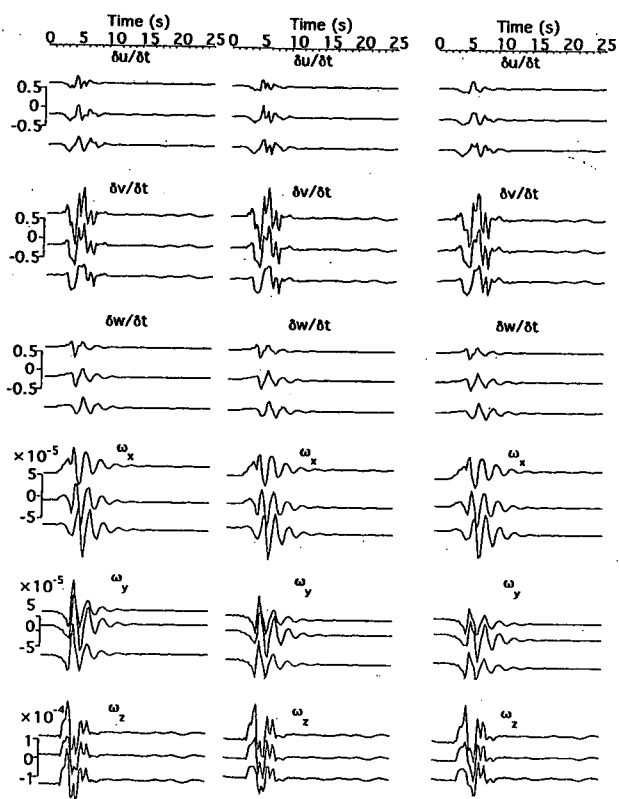


図-4 図-1の白丸地点における速度波形の3成分および回転地震動波形の3成分

図-3は、速度波形3成分および、2節の相対変位地震動波形9成分の各観測点での最大値の分布を示す。ただし、これら全ては断層の平均すべり量 D で基準化した値であり、さらに、相対変位地震動は、これを 10^5 倍した値である。図-3の上段に示す速度波形の3成分(左から、断層軸方向速度、断層直交方向速度、鉛直方向速度の最大値分布を示す)の最大値分布から、繰り返しになるが、断層直交方向の速度振幅が圧倒的に大きく、断層方向と鉛直方向の速度振幅は、その1/3程度であることがわかる。また、断層近傍の等振幅線が密になっており、断層から離れると速度振幅が急激に小さくなることがわかる(図-2も参照、断層から約2.5km離れると振幅は約3分の1となる)。

一方、図-3の上から2段、3段、4段に示す相対変位地震動の等振幅線は、上段の速度振幅のものに比べると、あまり密になっておらず、断層から遠くにまで振幅が減少せずに伝わっているようである。

ここで注目したいことは、上段と2段に示す速度波形と、変位波形の x 軸方向の微分で定義される $(\partial u/\partial x, \partial v/\partial x, \partial w/\partial x)$ の最大値分布がよく似ていることである。事実、図は省略するが、速度波形を断層破壊速度 $V_r=2.2\text{km/s}$ で割り、符号を逆転した波形は、変位波形の x 軸方向の微分から決まる相対変位地震動波形とほとんど一致している。

また、 $(\partial u/\partial x)(\partial w/\partial x)$ の最大値は、断層軸上ではなく、断層から2km程度離れた地域で生じていることも特徴である。

さらに、図-3の下段に示す ω_z の最大値は2.6で ε_D の最大値0.6に比べ圧倒的に大きいため、2節で述べたように ω_z は、SH波によるせん断歪みを、 ε_D は、P-SV波による軸歪みという物理的意味を持っていることを思い出すと、この計算例における地表面地震動は、主に、SH波成分から合成されていることがわかる。

図-4は、図-1の白丸で示す断層破壊終了付近の9地点における速度波形3成分並びに、回転地震動波形3成分($\omega_x, \omega_y, \omega_z$)の波形をプロットしたものである。この図から、速度波形や回転地震動波形は、狭い領域内(約1.5km四方)でもかなり違っていることがわかる。このような速度波形や回転地震動波形が構造物の応答にどのように影響するのかについては、今後検討しなければならない。

4. まとめ

本研究のまとめは、以下のようである。

- (1) 横ずれ断層近傍では、断層直交方向の速度波形が卓越し、断層中央から破壊終了付近の断層最短距離にして約2.5kmの狭い領域に大振幅の長周期パルスの波形が現れる。
- (2) 断層直交方向の振幅は、断層上で最も大きい。その振幅に比べると1/3程度となる断層方向と鉛直方向の振幅は、断層上では小さく断層から1から2km離れた領域で最大となる。
- (3) 横ずれ断層近傍の地震動は、ほぼ断層の破壊速度で断層軸方向に伝播している。
- (4) 地震動3成分並びに、従来、全く観測記録が存在しない相対変位地震動の9成分が、どのように構造物や地中構造物の地震応答に影響するのか関しては、これまで研究例がないと思われるため、今後検討しておかなければならない課題である。

参考文献

- 1) 原田隆典ほか(1999), 3次元直交座標系における波動場の解析解とその地震動波形作成への応用, 土木学会論文集, No.612/I-46, pp.99-108.
- 2) 原田隆典ほか(1998), 断層近傍の地震動特性と地盤増幅特性, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, 建築学会, Vol.1, pp.845-850.