

# (1) 1979年 Imperial Valley 地震に注目した震源域内での地盤変動の算定

京都大学工学部 正 山田 善一 同 正 野田 茂  
 運輸省港湾局 正 ○大脇 崇

1. 緒言 1979年10月15日23時16分54.5秒(現地時間), 米国California州のImperial断層とBrawley断層が、高まりくる応力に耐えきれなくなって動き、 $M_L=6.6$ の地震(1979 Imperial Valley地震)が発生した。U.S. G.S. 他による強震観測Arrayは震源近傍での地震動波形を記録した。同記録の検討は、地震の本質の解明を目的とする震源過程論のみならず、地震工学的な側面に視点を置いた問題を解決するのに大きな意義が認められる。

本研究では、1979年に破壊したImperial Valley断層に断層モデルを適用し、断層の走向と直角方向における地盤の地震時における変位と速度波形を算出した。このため、SH波とLove波を対象にした合成法をとっている。得られた計算結果を、Array観測結果と比較し、地盤変動が断層モデルによってどの程度推定できるかを検討した。また、実測記録を用いて地盤ひずみを求め、やや長周期の、長大・地中構造物のライフラインに作用する外力を推定する手段として、地盤ひずみの簡易推定法を検討した。

## 2. 震源近傍での地震動のシミュレーション

観測点と断層面の関係を図-1に示す。断層面(幅 $W$ 、長さ $L$ )を $N \times N$ 等分する。深さ $h_{ij}$ の $P$ ( $i, j$ )要素に発生した小地震の断層面の長さを $L_{ij}$ 、幅を $W_{ij}$ 、地震モーメントを $M_0^{ij}$ 、破壊伝播速度を $V_R^{ij}$ 、ライズタイムを $\tau_{ij}$ とする。また、その他のパラメータは図中の通りである。

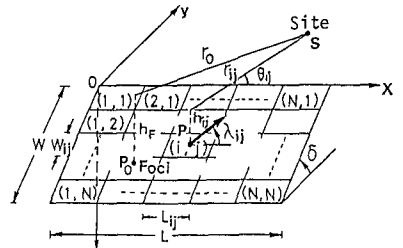


図-1 断層面および要素の幾何と観測点との関係

観測点 $S$ での地震波動は、断層面上に適当に分布した要素から射出された小地震をGreen関数の重ね合せとして算出する。その際、地点 $P$ から発した波の $S$ での到着時刻と震源 $P_0$ からのそれとの差は、波の伝播速度と断層面のすべり速度とによる遅れ時間を考慮して決定する。各要素波は半無限多層地盤内の点震源から励起された波動である。本研究ではこれを断層震源モデルと波数積分法を適用して求めている。この地震動の合成法の詳細については文献2)を参照されたい。

### (1) 1979 Imperial Valley 地震と地盤構造

同地震は1940年のImperial Valley地震と破壊様式が異なる。図-2に示すように、断層面上の破壊が南々東の端(国境の南約5km)から開始して、 $2.5 \sim 2.7 \text{ km/s}$ の速度で北々西に約35kmにわたって一方向に伝播している。地震モーメントは $6 \sim 7 \times 10^{25} \text{ dyne}\cdot\text{cm}$ である。断層面上での破壊の食い違い量は一樣でない。Hartzellらが試行錯誤的に行ったInversionによれば、深さ105kmの破壊開始点近傍を含めて、大きな破壊箇所が3箇所あったものとされている。また、藤野ら<sup>4)</sup>、 $V_R$ が $2.3 \text{ km/s}$ であることと、Hartzellらの結果と調和するおおよそ3つの多重震源の位置を指摘している。

Imperial Valley断層の周りには30数個の強震計が設置されている。El Centro Array No.1 からNo.13までの観測点は断層をまたいで直交して配置されており、図-2はその位置を示している。

この地域の地盤構造はFuisらの<sup>5)</sup>探査により明らかになっている。それによれば、深さ4.5kmのところに基盤が存在し、断層の走向に合う南々西方向には地盤構造の変化はほとんど認められない。断層をまたぐ東北東方向には変化がみられ、傾斜構造となっている。プロファイル6 NNW-13 SSEのショットポイントSP13からSP6へ38kmの位置での地盤構造が図3である。この地域は断層の北西端の部分に相当している。

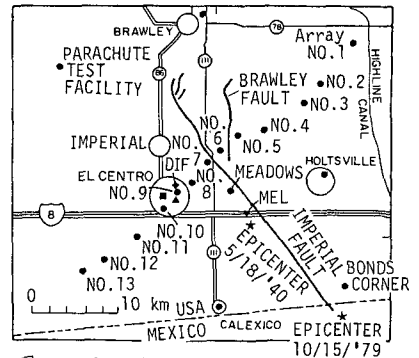


図-2 1979 Imperial Valley 地震の震央および断層とEl Centro Arrayの位置

(2) 断層面上で一樣な破壊過程をもつ円状破壊モデル

鉛直な断層面をもつ右横ずれ断層を考え、断層面を  $35\text{km} \times 10\text{km}$  の矩形とする。断層は長手方向と幅方向とも3個に分割する。 $M_0$ を  $5 \times 10^{25} \text{ dyne cm}^3$  とすれば、相似則から、 $M_0^j = 1.85 \times 10^{24} \text{ dyne cm}$  となる。<sup>2)</sup>断層の破壊は震源を含む要素の中心(深さ8.33 km)を破壊開始点とし、一定の速度  $V_R = 2.5 \text{ km/s}$  で同心円状に伝播するものと仮定した。ライズタイムについては全要素について  $\tau = 4 \text{ s}$  とした。

断層の走向と直角水平方向  $N230^\circ E$  成分について、Array 観測点 No.3 と No.6 の地盤変動(変位と速度)を示したのが図-4である。上段に合成波を、下段に実測記録を示す。図中の数字は波形の最大値である。絶対時刻は強震計 Trigger Time を勘案して合せてある。震源スペクトルの有効周波数範囲は  $0.01 \sim 5 \text{ Hz}$  である。

移動震源の振幅方位分布を考えれば、断層破壊の進行方向で断層と直角方向のSH波成分が卓越する。断層近傍の  $N230^\circ E$  成分の振幅は大きく、パルス的であり、周期  $1 \sim 4 \text{ s}$  程度のSH波を多く含んでいる。図に見られるように、No.6の波形はほぼ満足に再現されている。No.3では  $15 \sim 20 \text{ s}$  付近で波が出現している。これは破壊の最終要素より励起した波動が卓越したからである。このように断層から遠いと、合成波は実

測記録に比べて主要動の振幅が小さく、粗もずれている。遠方ではP波、SV波、Rayleigh波も  $N230^\circ E$  成分に混在して発現するからである。合成波のピークが観測波に比べて遅れて到着したのは以下の理由による。断層面からみて観測点が節面上にあって、Array 観測線の交わる付近の断層要素から発したSH波は断層と直角方向で卓越する。そのため、合成波では遅れて励起した波動のピークが相対的に大きく現われるからである。

図-5には、El Centro ArrayのNo.9を除く12地点での変位と速度の最大値を、実測値と計算値について断層からの距離の関数として示した。なお、変位成分については、HartzellとHembergerの結果も併記した。数値的なオーダーと傾向は特にNo.6~No.13の速度成分について比較的一致を見ている。断層の東北側4~16 kmの観測点では計算値が観測値を下回っている。これは、断層の不規則な破壊過程以外に、鉛直の断層面ではなく北東側にやや傾斜している、東側での地盤構造の変化が側面に比べて複雑なことを考えれば説明できる。このことは、観測値が断層をまたぐ両側で非対称なこと、地震観測網による余震分布などの発震点のデータに適っていることからもある程度裏づけられる。事実、Archuleta<sup>6)</sup>が最近実施した断層モデルの推定によれば、傾斜角は  $\delta = 80^\circ NE$  である。また、No.3~No.6の波には経路の影響も見がせないのであろう。

なお、震源近傍での地動の挙動を明確にするためには、本来、断層面を非常に多くのメッシュに細分割して解析を行うことが最も理想的である。しかし、このような方法ではいたずらに問題を複雑にする。各種震源パラメーターや要素分割等々を変えて不規則破壊を導入することによって、合成波を観測波により近づけることは可能である。しかし、ここでは地震動予測を目的としているので、なるべく単純化した震源モデルを用いた。

(3) 3点震源モデル 前述の如く、この地震は断層上で局所的に大きな3つの食い違いを生じたことが認められている。したがって、本節では、これらの主な破壊面を含む数個の点震源モデルから放出された震動の重ね合わせにより、問題の本質を解明することにした。

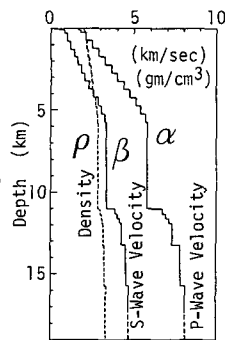


図-3 地下構造モデル (Fuis G1による)

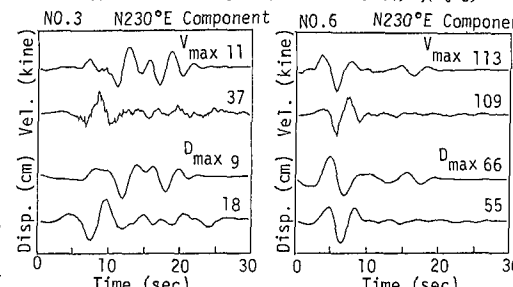


図-4 一樣破壊モデルによるNo.3とNo.6の地点での  $N230^\circ E$  成分の合成例

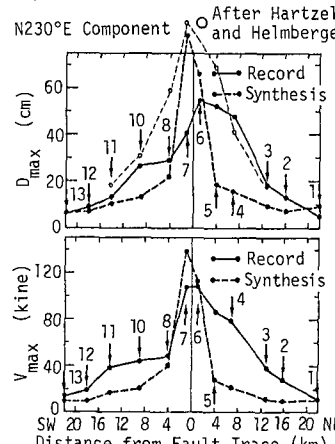


図-5 実測記録および合成波の断層からの最大地動の7デューション

Hartzell<sup>3)</sup>によれば、図6において、特に断層面上のAとB付近で大きな破壊が、深さ7kmで起っている。A,Bでの破壊がCよりもやや大きく、観測点はAに近いことから、地震の主要部はAから射出されたものと考えられる。やや不規則な破壊位相様式を勘案して、3点震源モデルを考えた。モデルの概略が図6である。

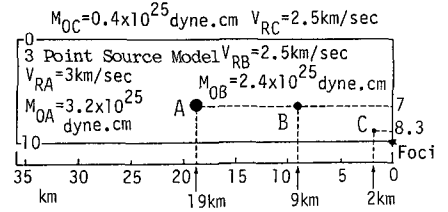


図7はNo.3とNo.6の両地点における計算結果である。図4の結果に比べて、波形全体の改善がかなり見られる。これは断層の中ほどで大きな食い違いを与えたことに裏づけられる。No.6地点では、特にパルス状の波以降の部分がより実測波形に近づいている。また、断層からやや離れたNo.3地点では、最大値を与える波の到着時刻も実測波形とほぼ一致している。しかし、振幅の絶対値はやはり相違しており、また高周波成分も減衰しすぎている。断層モデルの食い違い分布または地震モーメント分布や破壊形態を詳細に考慮することが、実測波形の再現に当りいかに顕著な影響を及ぼすかわかる。いずれにしても、文献3)のように詳細な理論地震記象の算定を実施しなくても、やや長周期の成分に関しては大まかな食い違い分布を知るだけで、特に断層近傍において実測波形を比較的精度良く再現できたことは耐震工学上有意義だと考えられる。

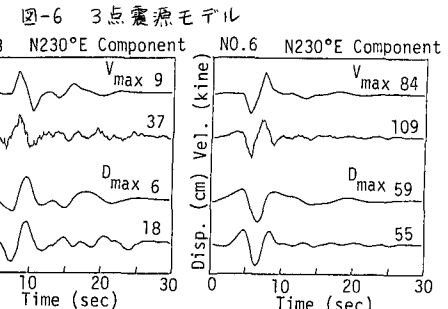
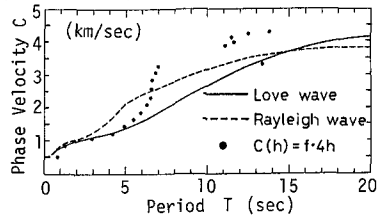


図-7 破壊の非一様性を考慮した合成波と観測波との比較

### 3. 地盤ひずみの簡易推定法

地震時の地盤ひずみを実測することは難しい。従って、短い距離を隔てて得られたArray記録を対象として、地震時地盤ひずみを詳細に検討することは有用な工学的情報を提供するものである。ここでは、高田<sup>7)</sup>らの方法を1979 Imperial Valley地震記録に適用し、Array観測点での局部ひずみや相関距離に対する平均ひずみを求めた。

図3の地下構造の位相速度分散曲線を基本モードについて示したのが、図8である。深さ $h$ でのS波速度 $\beta(h)$ と周波数 $f$ から、図中の $\bullet$ は位相速度を $\beta(h) = f \cdot 4h$ でプロットしたものである。周期6S以下ではLove波の分散曲線と整合している。それ以上の周期では深層の地盤構造を明瞭にする必要があるため、位相速度の近似推定式の精度は良くない。



ある地点で得られた変位波形を基本モードの分散曲線に従って伝播させ、局部ひずみ、平均ひずみと相対変位を算出した<sup>7)</sup>。この場合、N230°E成分はLove波を、N140°E成分はRayleigh波を対象にした。N230°E成分の波形による局部ひずみの最大値はNo.7の地点で生じ、その値は $1.2 \times 10^{-3}$ であった。また、No.9を除く12の観測地点で、最大局部ひずみ $\epsilon_{max}$ と最大速度 $V_{max}$ (kine)について、線形回帰を行なった。

$$N230^\circ E \text{ 成分}; V_{max} = 9.21 \times 10^4 \epsilon_{max} \quad (\text{相関係数 } \rho = 0.997)$$

$$N140^\circ E \text{ 成分}; V_{max} = 7.98 \times 10^4 \epsilon_{max} - 1.6 \quad (\rho = 0.939)$$

みかけの位相速度は各々921 m/sと798 m/sとなる。上記の関係式は、地盤の地震時ひずみを直接与えるものではないが、そのおおよその目安を与えていると考えて大過ない。

相関距離 $\Delta$ と最大平均ひずみ $\bar{\epsilon}_{max}(\Delta)$ の関係を求めたのが図9である。断層より東北側の記録が用いられている。平均ひずみの距離変化の傾向は観測点によらずほぼ同一である。図中には、2~6 kmほど離れたNo.iとNo.jの両地点の変位波形の差から直接求めたひずみを $\bullet$ でプロットした。波動のシミュレーションから計算したひずみは地盤震動の振舞をほぼ再現して

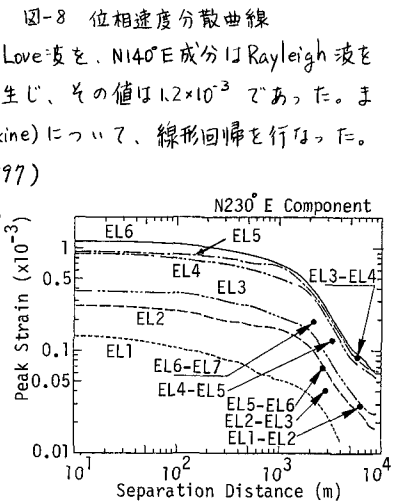


図-9 No.1~No.6 地点での平均ひずみと相関距離の関係

いるものと予想される。後述するように、波長の大きさを考えれば、なお一層の慎重な検討が必要であるが、地盤ひずみ推定のための本解析法の妥当性を示すものである。

N230°E成分について、相対変位 $\Delta u$ を求めてみた。相関距離 $\Delta$ の増加に伴い、相対変位は大きくなり、 $\Delta=2\text{km}$ 付近でピークとなる。その後、減少していく傾向がみられた。直観的にも理解できるように、ある卓越周期の波の伝播による相対変位 $\Delta$ が半波長( $\frac{\lambda}{2}$ )に等しくなるとき最大となる。従って、この場合の卓越波長は $4\text{km}$ 程度と推察される。 $\Delta u_{\text{max}}$ は、No.5,6,7の各地点で各々 $79\text{cm}$ ,  $88.2\text{cm}$ ,  $71.8\text{cm}$ であった。同様に、Rayleigh波の基本モードの伝播に伴うN140°E成分について相対変位を求めたところ、 $\Delta=1.5\text{km}$ で最大となった。

### (1) 簡易推定法について

本研究の目的が耐震設計の検討にあることを考慮し、各地点の最大平均ひずみ $\bar{E}_{\text{max}}$ を最大局部ひずみ $E_{\text{max}}$ で正規化し、相関距離に伴う地盤変動の挙動に注目した。N230°EではLove波、N140°EではRayleigh波成分の寄与が大きいとする。No.1~No.13の各地点について計算した。図-10にはその正規化ひずみ $E_{\text{max}}/|\bar{E}_{\text{max}}|$ のオーダーの把握を考慮して、平均値、最大値と最小値を示す。

N140°E成分では、 $50\text{m} < \Delta < 1\text{km}$ においてNo.1地点のひずみの最大値が反映することにより、N230°E成分に比してそのばらつきが増大している。しかし、平均的傾向としては両波形成分ともよく似ている。

本解析では、これらの影響をより一般化するために、地盤ひずみを安全側で評価することを試みた。波長 $L$ 、伝播速度 $C$ の波動が卓越する場合を考えると、平均ひずみは、 $\bar{E}(\Delta, t) = \frac{u(t)}{C} \frac{\sin(\frac{\pi\Delta}{L})}{\frac{\pi\Delta}{L}}$ 、( $u$ ; 地動速度)となる。両辺の最大値をとると、 $E_{\text{max}}$ と $|\bar{E}_{\text{max}}|$ の関係は、 $|\bar{E}_{\text{max}}|/E_{\text{max}} = \left| \frac{\sin X}{X} \right|$ 、 $X = \frac{\pi\Delta}{L}$ で表わせる。ここで、 $\left| \frac{\sin X}{X} \right|$ のsinc関数を評価することにより、ひずみは近似的に見積られる。図-10の挿入図のように、安全側の値をとって、この関数の包絡線をとって、頭打ちの傾向を想定する。以上のことを勘案すれば、ある地点の地盤の最大局部ひずみ $E_{\text{max}}$ は、次式を用いて近似的に算出可能である。

$$|\bar{E}_{\text{max}}| = E_{\text{max}} ; \Delta \leq \frac{L}{2}, \quad E_{\text{max}} = \frac{\pi L}{L} |\bar{E}_{\text{max}}| ; \Delta > \frac{L}{2} \quad \text{---(1)}$$

上式は、ひずみを推定すべき地点での変位波の卓越波長と相関距離 $\Delta$ だけ離れた2地点の変位波がわかれば、容易に評価できる。この方法は、局部ひずみを実測する困難さを考えれば、簡易法と言えよう。

図-10の実線は、上式に基づいて決められたものである。波長 $L$ は、N230°E成分で $4\text{km}$ 、N140°E成分で $3\text{km}$ としている。いずれも $\bar{E}$ で示した推定値よりもやや過大であるが、設計に考慮すべき地盤ひずみとしては妥当と思われる。

### 4. 結言

本研究により得られた主な結論は以下の通りである。

(1) 断層面全域を分割した要素に震源パラメーターを付与し、破壊伝播様式を考へて各要素波から地震動を合成した。特にN230°E成分のSH-Love波型の理論地震記録に注目した。地震時の観測記録と比較してみたところ、近地の合成波は記録の主要動をよく再現した。断層からやや離れた北東部の観測点の記録は、波動伝播の経路だけでなく断層面の傾斜や破壊の不規則性に影響されているものと考えられる。

(2) 波動のシミュレーションから求めた平均ひずみは、2地点の地震記録から推定した地盤ひずみに近い。断層のごく近傍地点での最大地盤ひずみは $1.2 \times 10^{-3}$ にも達する。地盤ひずみの簡易推定法として式(1)を示したが、これは設計で考慮すべき荷重としては妥当と思われる。

最後に、地震記録の利用に当ってお世話頂いた、東京大学工学部・藤野陽三助教授に深甚なる謝意を表します。  
参考文献 1) Archuleta, R.J.; BSSA, Vol.172, Part A, No.6, December 1982. 2) 山田・野田・大脇; 日本鋼構造協会第17回大会研究集会マトリクス解析法シンポジウム, 1983.7. 3) Hartzell, S. and Helmhberger, D.V.; B.S.S.A.; Vol.172, No.2, April 1982. 4) Fujino, Y. et al.; A paper Presented at the Review Meeting of U.S.-Japan Coop. Res. on Generalized Seismic Risk and Development of a Model seismic Code Format, Honolulu, March 1983. 5) Fuis, G.S. et al.; U.S.G.S. Professional Paper 1254, 1982. 6) Archuleta, R.J.; Earthquake Notes, Vol.54, No.1, 1983. 7) 高田・JP.Wright; 土木学会論文報告集, 第297号, 1980.7.

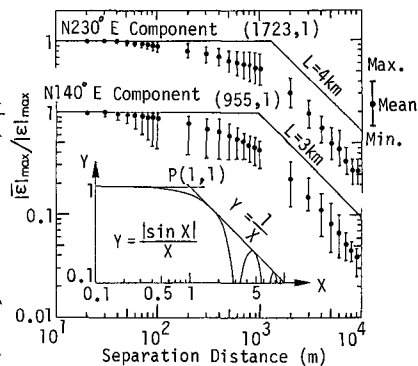


図-10 地盤ひずみの簡易算定例