

震源近傍の強震動特性について

清野純史¹・土岐憲三²・三浦房紀³・江尻譲嗣⁴・横山圭樹⁵

¹正会員 工博 京都大学助教授 工学研究科土木システム工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

²フェロー 工博 京都大学教授 工学研究科土木システム工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

³正会員 工博 山口大学教授 理工学研究科環境共生工学専攻 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2557)

⁴正会員 工修 (株)大林組技術研究所 (〒204-0011 清瀬市下清戸 4-640)

⁵工修 三菱商事(株) (〒100-0005 東京都千代田区丸の内 2-6-3)

本研究では、逆断層型の地震動を対象に、ジョイント要素を用いた FEM 断層モデルによるシミュレーションを行ない、断層運動と震源近傍における強震動特性の関係を検討した。本手法を用いれば、複雑な震源過程を破壊の伝播、すべり時間関数、食い違い量などを仮定せずに断層面上での応力降下の特性を与えるのみで断層運動をうまく表現できる。ジョイント要素の構成関係をすべり弱化型とし、この構成関係を規定する各種パラメータが生成地震動に及ぼす影響を調べた。さらに、兵庫県南部地震で見られた土木構造物の衝撃的破壊現象、及び地震時の証言から推測される衝撃的地震動について考察を加えた。

Key Words: *impulsive seismic ground motion, inverse fault, joint element, constitutive law*

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震では、建築物や高速道路、そして鉄道高架橋等多くの構造物が崩壊し、我国の構造物の安全性に疑問を投げかけた。これまで、何故構造物が壊れたかについて様々な議論がなされてきた。予想をはるかに越えた被害の背景には、予想し得なかった入力が存在したとする説もその一つである。

地震動を対象とした研究では、(1)通常我々が強震動の周期範囲として考える帯域(数十 Hz から数十秒:以後、「通常の周期帯域」と呼ぶ)内での水平動、あるいは上下動を対象としているものと、(2)数 msec から数十 msec の周期を持つ衝撃的な波動を仮定したものに大別できる。

主に地震学的な立場からは、前者の内、特に水平動を対象とした振幅の大きなパルスという観点からの議論が主流である。扱われている数は少ないが、通常の周期帯域の上下動を対象としたものは、水平動に匹敵する、あるいはそれを上回る地動という観点からの議論である。

一方、主に工学的な立場から構造物被害を通して地震動を論じたものは、通常の周期範囲における強震動を対象としたものに加え、前述した 2 つの分類の後者に当たる、さらにハイサイクルの震動の存在を仮定しての議論も多い。すなわち、「衝撃問題」の範疇に入るような数 msec から数十 msec の衝撃的な波動を対象としたも

ので、建築構造物の被害のみならず、橋梁や基礎構造物などの土木構造物の被害から入力した地震動を論じたものである。ただし、通常周期帯域の水平動、あるいは上下動から構造物の破壊メカニズムを論じたものも少なくない。

本研究では、まず FEM による地震動シミュレーションによって、断層破壊過程と震源近傍域における強震動特性との関係を調べる。FEM による地震動シミュレーションではメッシュサイズよりも短い波動を表現することはできないが、パラメトリックスタディによる相対的な結果から、衝撃的な入力が発生する可能性があるのかどうかについて考察を加える。さらに、もし衝撃的な入力が存在した場合、既存の地震計ではどのように記録されるのか、あるいは記録されないのかを調べる為に、圧電型トランスデューサとサーボ型加速度計を用いた観測について言及する。

2. FEM 断層モデルによる解析

解析に用いた断層モデルは、名古屋市直下にある天白河口断層を参考にモデル化を行なった。濃尾平野には、養老断層系や根尾谷断層延長部の岐阜—宮構線、また名古屋市南部の天白河口断層など多数存在する。これらのうち、名古屋市直下にある天白河口断層は確実度 II、活動度 A、長さ 16km、走向 NE で、東端

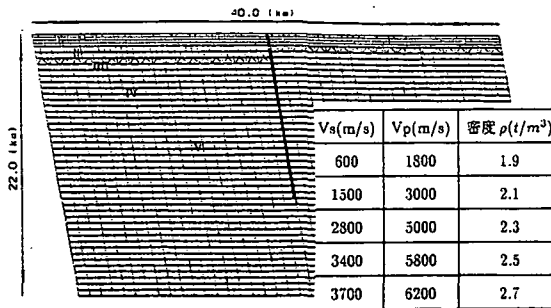


図-1 有限要素網による断層モデル

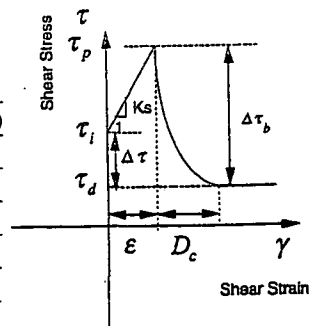


図-2 ジョイント要素の構成関係

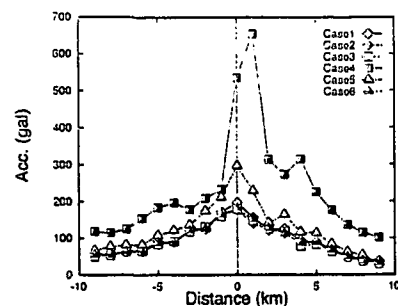


図-3 最大加速度分布(上下動)

表-1 モデル 1 の各パラメータ

Case	$\epsilon(cm)$	$D_c(m)$	$\Delta\tau(bar)$	$\Delta\tau_b(bar)$
Case1	1.0	1.0	30	50
Case2	1.5	1.0	30	50
Case3	3.0	1.0	30	50
Case4	1.0	0.1	30	50
Case5	1.0	0.5	30	50
Case6	1.0	2.0	30	50

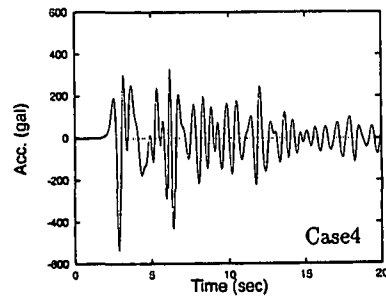
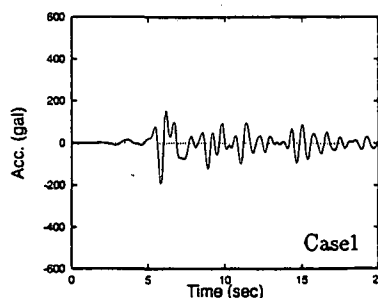


図-4 モデル 1 の上下動加速度波形の比較

部で落差 0m, 西部に向かって徐々に大きくなり最大 300m に達する北落ちの断層となっている。また、これまでの調査結果から傾斜角 80 度の逆断層とされている。上記の他に、断層幅 13km, すべり方向 70 度といった情報が与えられている。解析に用いた断層モデルの有限要素網を図-1 に示す。図中の太実線がジョイント要素でモデル化した断層面であり、節点数、及び要素数はそれぞれ 2172, 2125 である。境界条件は x, y 方向共に自由とし、図中に示す地殻構造、及び I~V に対応する材料定数は爆破探査によって得られたデータを用いている。地盤要素の粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ はそれぞれ $150tf/m^3$, 0 とした。

(1) 断層面におけるジョイント要素の構成関係

岩石実験による典型的なせん断応力～すべり量関係ジョイント要素の構成関係に適用した²⁾。すなわち、断層の構成則をすべり弱化型として断層面のモデル化を行なった(図-2)。初期応力 τ_i から降伏応力 τ_p に達するとき、極めて僅かではあるが相対変位 ϵ が存在し、 τ_p に達した直後はすべりの進行とともに急激に応力は低下し、やがてほぼ一定値 τ_d となる。ここに、破壊が始まる応力レベル τ_p が静摩擦力に、 τ_d が動摩擦力に相当する。この静摩擦力から動摩擦力レベルまで降下する際のすべり量を臨界変位量 D_c 、初期応力から動摩擦応力までを応力降下量 $\Delta\tau$ と称し、静摩擦応力から動摩擦応力までを破損応力降下量あるいは、実効応力降下量 $\Delta\tau_b$ と称す。これら τ_i , τ_p , τ_d , ϵ , D_c が構成関係の特徴づけるパラメータである。

(2) パラメータの決定

解析に際して、すべり弱化型の構成関係を規定する初期せん断応力 τ_i 、最大せん断強度 τ_p 、残留強度 τ_d 、最大せん断強度に達するすべり量 ϵ 、そして臨界変位量 D_c の各パラメータを決定しなければならないが、断層面上の初期応力 τ_i 、降伏強度 τ_p 、残留強度 τ_d の絶対値は明らかでない。したがって、 τ_i , τ_p , τ_d のうち 1 つを何らかの方法で決定もしくは仮定しなければ他の 2 つのパラメータを決めることができない。

パラメータの決定方法は以下の手順に従った。

- τ_d の分布形状を仮定する。
- $\Delta\tau$, $\Delta\tau_b$ の分布形状を決定する。
- ϵ , D_c を決定する。
- $k_s = (\tau_p - \tau_i) / \epsilon$ によって k_s を決定する。

計算法は Newmark-β法($\beta=1/4$)、各ステップでの収束計算は荷重伝達法を用いている。

(3) 解析モデル

仮定した断層構成則の各種パラメータを変化させた解析を行ない、各パラメータが地震動特性に及ぼす影響を調べた。本研究では、解析モデルとして以下の 6 つのモデルを想定した。

モデル 1: ϵ , D_c を変化させた場合

モデル 2: $\Delta\tau$, $\Delta\tau_b$ の分布形状を変化させた場合

モデル 3: 断層面上の応力降下特性が不均質な場合

モデル 4: 破壊開始点、断層上端位置を変化させた場合

モデル 5: 断層の傾斜角を変化させた場合

モデル 6: 断層近傍領域の非線形効果を考慮した場合

表-2 モデル2の各パラメータ

Case	ε (cm)	Dc(m)	$\Delta\tau$ (bar)	$\Delta\tau_0$ (bar)
Base	1.0	1.0	30	50
Case1	1.0	1.0	45	50
Case2	1.0	1.0	45	75
Case3	1.0	1.0	60	75
Case4	1.0	1.0	24	35

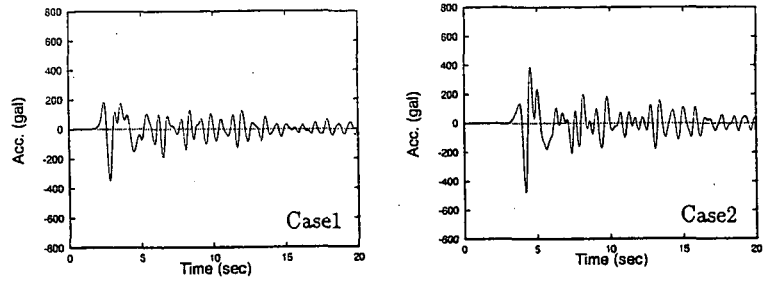


図-5 断層線上における上下動加速度波形

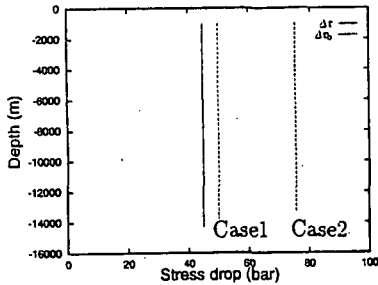


図-6 応力降下量の分布

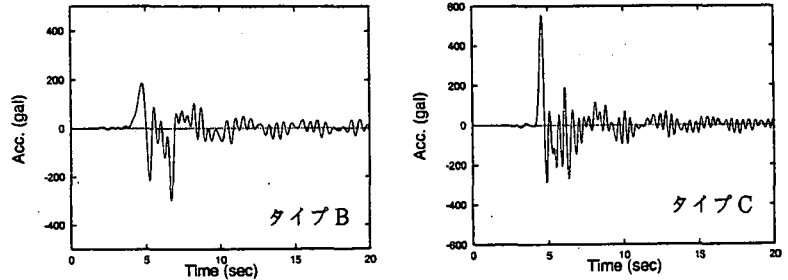


図-7 上盤側 1km における上下動加速度波形

ここでは、特にモデル 1, モデル2, モデル 5, モデル 6 の、加速度上下成分について検討を行なった。

(4) 解析結果

モデル 1 では、表-1 に示す 6 つの Case についてシミュレーションを行なった。図-3 は断層の走向に直交する方向における上下成分の最大加速度の距離減衰を示している。Case1～Case3 より、 ε が推定加速度に及ぼす影響は小さいことがわかる。これに対し、 D_c の影響は上盤側の上下成分に顕著に表れている。また、最も D_c の小さい Case6 では上下成分のピークが断層線上からやや上盤側にずれている。図-4 は Case1 と Case4 の加速度波形を比較したものである。応力降下量は同じでも、 D_c の小さい Case4 の方が短周期成分が卓越し、ピーク加速度も大きくなっている。

モデル 2 では表-2 に示す 4 つの Case を考えた。最終的なくい違い量を比較すると、平均応力降下量 $\Delta\tau$ が 24bar と最も小さい Case4 が最小で、60bar と最も大きい Case3 が最大になっている。断層線上における Case1 と Case2 の加速度波形を図-5 に示す。図-6 に示すように両者の応力降下量 $\Delta\tau$ は等しいが、破損応力降下量 $\Delta\tau_0$ が異なっている。振幅の最大値は Case1 が約 400gal であるのに対して、Case2 では約 600gal と Case2 の方が大きくなっている。したがって、実際の断層を考えた場合に、 $\Delta\tau$ が大きい程解放されるエネルギーが多くなり振幅の大きな波動となるが、さらに破損応力降下量 $\Delta\tau_0$ が大きい場合には、より大きな振幅の波動が生成されることを示唆している。しかしながら、現在行なわれている断

層モデルに基づく強震動評価では、応力降下量 $\Delta\tau$ が震源断層破壊の静的パラメータとして必要になるが、破損応力降下量 $\Delta\tau_0$ についてはほとんど考慮されていないのが現状である。 $\Delta\tau$ や $\Delta\tau_0$ を正確に求めることは困難ではあるが、今後、強震動評価において $\Delta\tau_0$ の影響を取り入れることが必要であろう。

モデル 5 では断層傾斜角度が地震動特性に及ぼす影響を調べた。タイプ B とは、図-1 に示した断層(タイプ A と呼ぶ)の最小のメッシュを上下方向にはサイズを変えず、水平方向に 2 分の 1 の長さにしたもので、メッシュのサイズは縦横 250m である。タイプ B, C では、タイプ A のモデルではメッシュサイズが大きいため表現できなかった波動伝播を表タイプ C は、タイプ B と同様のメッシュサイズで断層傾斜角を 45 度としたものである。図-7 はタイプ B, C の上盤側 1km の地点での地表面加速度上下成分を比較したものである。タイプ C の場合、傾斜角度が 45 度であることを考慮すると、断層線から上盤側へ 1km ずれた地点の直下に断層上端が位置しており、震源から上方に伝播してきた破壊が地表面下 1km のところで急激な破壊速度の変化を伴い停止することになる。このときに短周期成分が生成されることが考えられる。実際の断層においても破壊が浅いところで停止、あるいは急激な破壊速度の変化がある場合、このような現象の顕著な例として衝撃的なパルス波が発生する可能性がある。

モデル 6 では、ジョイント要素を囲む領域に図-8 に示すような降伏歪み ε_y と剛性比 k_2/k_1 の 2 個のパラメータによって表される非線形特性を仮定した。解析は表-3

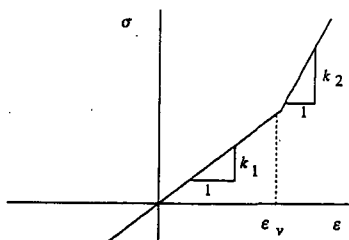
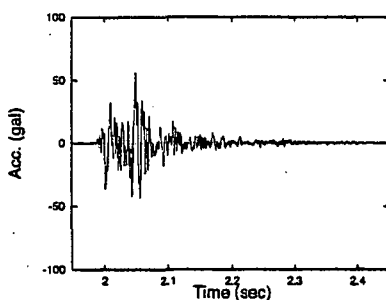
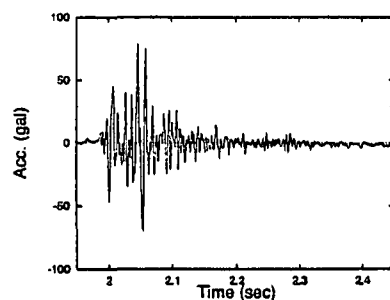


図-8 断層近傍要素の非線形特性



(a) サーボ型加速度計



(b) 圧電型トランスデューサ

図-10 発破記録の例

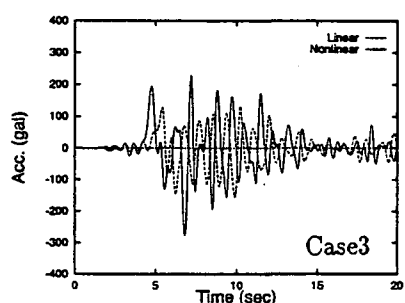
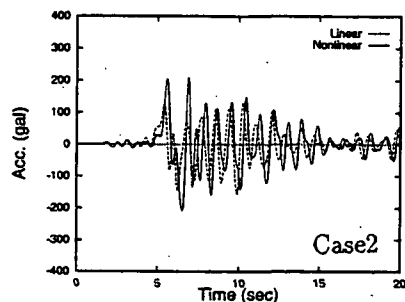
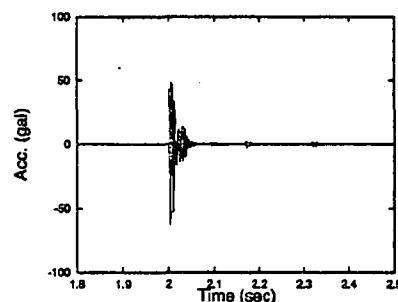
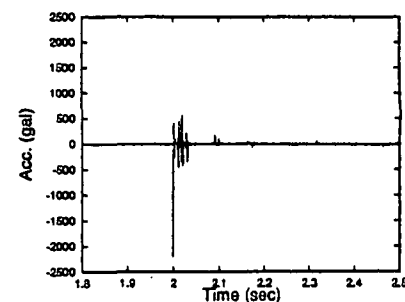


図-9 上盤側 1km における上下動加速度波形



(a) サーボ型加速度計



(b) 圧電型トランスデューサ

図-11 衝撃入力記録の例

に示すように降伏歪み ϵ_y と剛性比 k_2/k_1 を変えた3ケースについて行なった。Case2とCase3の上盤側1kmの地点における加速度波形(上下動成分)を図-9に示す。明らかに線形の場合に比べて振幅が大きくなっていることが認められる。

3. 地震観測

既存の強震計が対象としていない高周波成分がどのような形で地震計に記録されるのか、あるいは記録されないのかを確認する為に、地震観測を実施している。観測点は笠間市街から西方へ約4kmの稲田地区にある稲田石材の敷地内である。ここは花崗岩が露頭しており、両加速度計は花崗岩内の深度15cmの位置に埋設した。現在のところ、実際の地震動を記録するには至っていないが、現地で採石の際に行なう発破の記録を図-10に、また現地で行なった衝撃入力の出力例を図-11に示す。パルス幅が数msecであっても、サーボ型地震計にはその名残が記録されている。しかしながら、その振幅レベルは小さくなるため、他の記録の中に埋もれてしまう可能性がある。

4. まとめ

断層構成則を規定する各種パラメータが地震動特性に及ぼす影響をFEM断層モデルにより検討した。その結果、臨界変位量 D_c が小さい方が短周期成分が卓越し、ピーク加速度も大きくなること、破損応力降下量 $\Delta\tau_0$ が大きい場合には、より大きな振幅の波動が生成されること、破壊が浅いところで停止、あるいは急激な破壊速度の変化がある場合、衝撃的なパルス波が発生する可能性があること、断層近傍地盤の非線形性を考慮したケースでは、上下動の短周期成分が増加することもあることなどがわかった。また、観測記録の中に数十から数百Hzの振動成分が含まれていても、サーボ型加速度計ではその振幅レベルが小さくなるため、他の記録の中に埋もれてしまう可能性があることもわかった。

参考文献

- 1) Toki, K. and F. Miura: Simulation of a fault rupture mechanism by a two-dimensional finite element method, J. Phys. Earth, Vol.33, pp.485-511, 1985.
- 2) 坪井利弘, 三浦房紀:断層運動を模擬する岩石すべり破壊実験の有限要素解析, 土木学会論文集, No.537/I-35, pp61-76, 1996.