

(12)地殻変動解析システムの開発

埼玉大学工学部 正会員 ○浜島良吉
地質調査所 正会員 小出 仁
非線形力学研究所 山田俊雄

Development of Crustal Movement Analysis System

Ryokichi HAMAJIMA, Saitama University
Hitoshi KOIDE, Geological Survey of Japan
Toshio YAMADA, Nonlinear Mechanics Laboratory

Abstract

Big earthquakes occur periodically along the San Andreas Fault. At present, USGS also makes active studies to forecast such large earthquakes. Though many systematic experiments and studies have been made on the faults from the mechanical viewpoint, it can not always be said that numerical analytic approaches to them are sufficient. In conjunction with the high level radioactive nuclide waste disposal, it is recently considered necessary to examine the long term safety of the disposal site taking crustal movements into account. This paper describes a new numerical analytic method needed in such crustal movement analysis and its entire system.

1. はじめに

カリフォルニアは1857年の Fort Tejon地震 (M8.3) そして1906年のSan Francisco地震 (8.3) により大きな被害を受けている。このことは久しく忘れられていたようであるが、規模こそ小さいが1989年のLoma Prieta地震 (M7.1) によって、改めてその危険性が再認識されている。これらサンアンドレアス断層沿いに生ずる大地震の予知が急務であるが、サンアンドレアス断層についてはUSGS発行の "The San Andreas Fault System, California" (1990年)¹⁾ にかかなり詳しくまとめられており、カリフォルニアにおける地震発生メカニズムの外観を知ることができる。しかしこれは地質学的な立場に立ってまとめられたものであり、力学的な見地からは必ずしも充分とは言えない。力学的な立場からは、同じUSGSにおいて断層に対する体系的な実験的研究が永年続けられており、地震発生メカニズム解明に対する多くの示唆が与えられている。しかし数値解析の面からのアプローチは必ずしも十分ではなく、本研究では、これらの実験結果から数値解析を行なううえで何が必要とされるかについて検討した。

2. 地殻変動におけるブロック構造運動

図-1はカリフォルニアにおけるサンアンドレアス断層を含む主な断層系であり、1906年及び1857年の大地震時のサンアンドレアス断層の活動領域とクリープが生じている断層領域が示されている¹⁾。サンアンドレアス断層は、太平洋プレートと北米プレートの境界部であり、ほぼ鉛直な右横ずれのトランスフォーム断層である。両端には海嶺部があり、カリフォルニアの断層系はせん断力と同時に圧縮力を受けているといえよう。こうした応力場の中で何故クリープが生じる部分と断層がブロックされている領域が生じるかについて、USGSにおいて体系的な実験的研究がなされ、ミクロな立場と実際の断層の特性の比較検討がなされている。図-2は円柱供試体(花崗岩)を60度の面でスライスし厚さ3mmの粘土層をはさんだ三軸試験結果であるが、拘束圧、温度、間隙水圧、さらに載荷速度の変化により断層面での安定的な滑りと不安定なスティックスリップが生じることを明らかにしている²⁾。そして粘土層内の顕微鏡写真結果から、図-3aの雁行割れ目が進展し図-3dにみられる Shear Band の形成によりスティックスリップが発生することを明らかにしている。こうした Shear band の形成とそれに伴う連続的なひずみ軟化現象に対して数

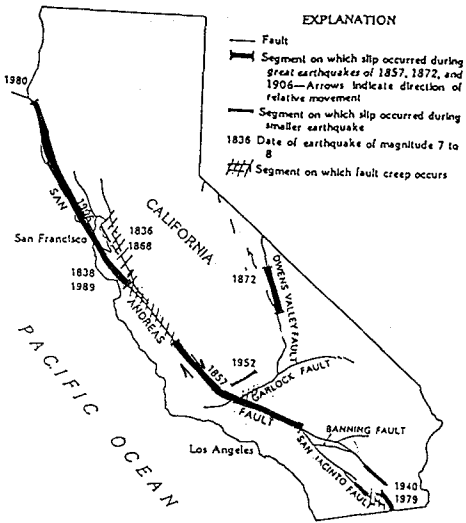


図-1 San Andreas 断層系と断層運動¹⁾

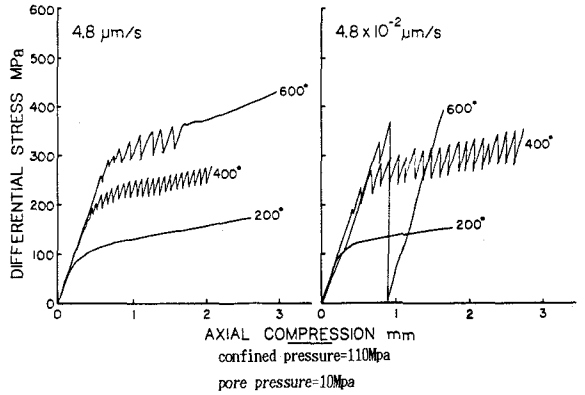


図-2 切断面に illite gouge をはさんだ granite の 3 軸試験結果²⁾

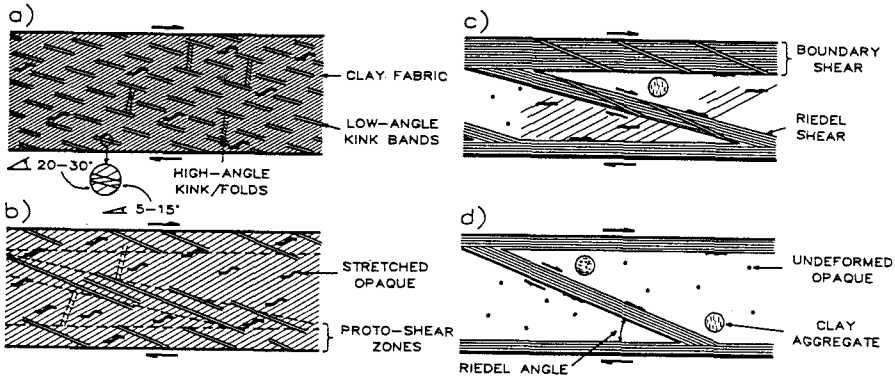


図-3 顕微鏡写真による粘土層内の割れ目進展と shear band の形成図²⁾

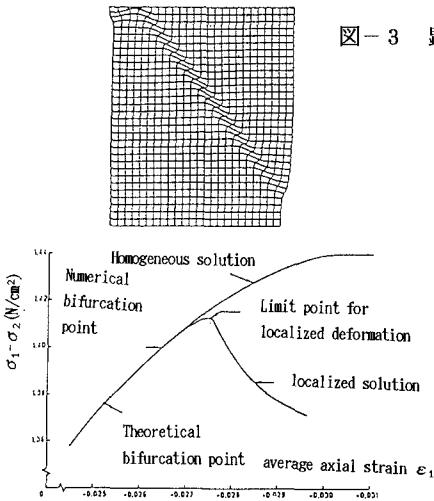


図-4 連続体場での有限要素解析による Shear band の形成と Strain softening³⁾

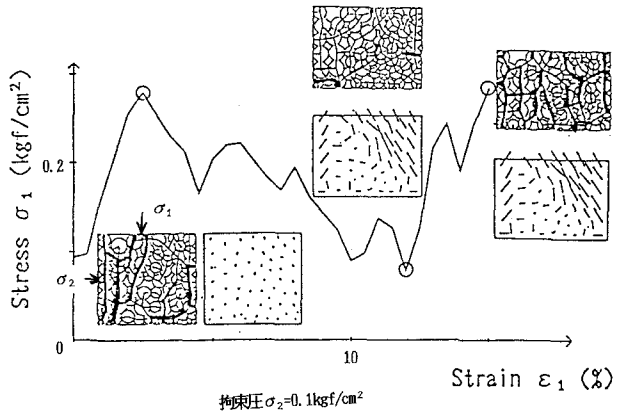


図-5 粒状体要素解析を用いた 2 軸圧縮場での $\sigma_1 - \epsilon_1$ 曲線

値解析の観点からの力学的考察はなされていないが、Shear band 形成に伴う不安定破壊現象は有限要素解析によって概略説明することができる。図-4 は2軸圧縮場における有限変形解析による分岐座屈解析結果でありShear Band 形成による非対称な変形の局所化によりひずみ軟化現象が生じていることが分かる⁸⁾ (ただし、本解析結果は非関連流れ則を用いたものであり、関連流れ則を用いた場合、対称な剛性マトリックスから対称なShear Band発生が得られる)。しかしこうした連続体としての分岐座屈解析だけでは図-2に見られるようなスティックスリップによる連続的な応力降下(ひずみ軟化現象)を説明することはできない。これにたいし図-5は2軸圧縮場におけるスティックスリップによる不安定破壊現象を岸野の粒状体要素を用いてミクロ的な立場から考察したものである。これにより要素内部のせん断帯の形成と力の伝達およびひずみ軟化の力学的特性が明かとなる。荷重がピーク荷重に近づくにつれ粒子間の伝達力は最大主応力の方向を向き、ピーク荷重時において粒子間伝達としての柱は座屈し急速な荷重低下(ひずみ軟化)を示し最終的には粒子の伝達力は方向性を失う。変形がさらに進むと再び粒子間伝達力は主応力の方向に向き強度が増加してゆく。これは図-2で示されるスティックスリップによる不安定破壊現象のメカニズムを基本的にはよく表現しており、これらは有限変形をともなった不安定破壊現象と解されよう。ところで図-5の解析結果から、図-4の解析結果と同様なShear bandの形成がみられるが、粒子はせん断面に沿って回転しこの粒子の回転(ブロックローテーション)がスティックスリップの力学的特性を支配していると考えられる。図-1にはSan andreas 断層の内、クリープを生じている部分とロックされている部分が表示されているが、しかしなぜクリープを生じる部分とロックされている部分が存在するのか。Byerlee等はサンアンドレアス断層系の観察結果から、このクリープを生じている断層部分は図-6aに示されるようなタイプ(Aタイプ)の雁行割れ目が、そしてロックされている断層部分では図6bに示されるようなタイプ(Bタイプ)の雁行割れ目が生じていること、さらに実験においてスティックスリップを生じるものはBタイプの雁行割れ目に対応していることを示している⁴⁾。しかし、こうした異なった断層系の発生に関しては地形的なものが大きく影響していると考えられる。特にGarlock断層とサンアンドレアス断層が交差するカリフォルニア南部においてサンアンドレアス断層が大きく屈曲しており、こうした屈曲部において1857年の巨大地震が発生している。また1989年のLoma Prieta地震も規模は小さいけれども屈曲部において発生している。こうしたことからカリフォルニア南部の屈曲部近傍の変形の考察が多くなされている^{5, 6)}。この地域の断層系は図7に示されるように極めて複雑であるが、これをいくつかのブロックに分割し、このブロックが主として横ずれと回転により図8-1に示される現在の位置に移動したとして地殻変動を考察している。これらのブロックローテーションを主体とした地殻変動は日本島弧でも考察されており⁷⁾、島弧の地殻構造運動を考える上で重要である。勿論これらのブロックローテーションモデルは正確に地殻の変形を表わすものではないが、全体の動きを知る上で重要な情報を与えてくれる。また地殻の変動を考える場合当然三次元構造を考慮する必要があり、特に深さ方向の温度変化の影響によりせん断強度が著しく変化しこれらを考慮した解析が必要となる⁸⁾。

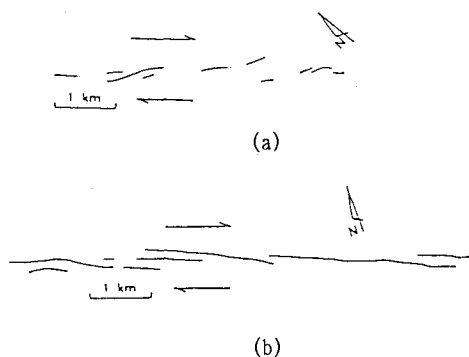


図-6 サンアンドレアス断層における2種類の雁行割れ目⁴⁾

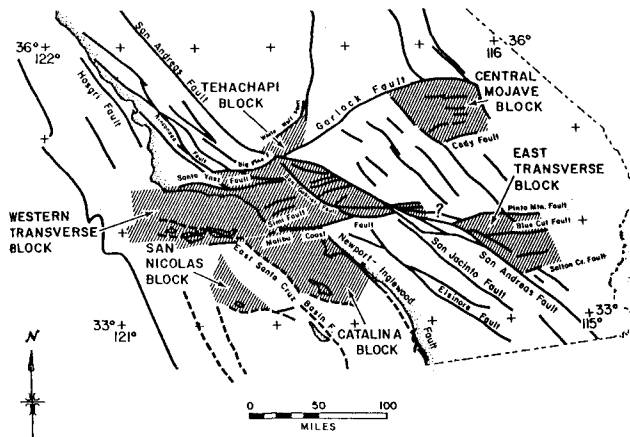


図-7 南カリフォルニア地域の断層図⁵⁾

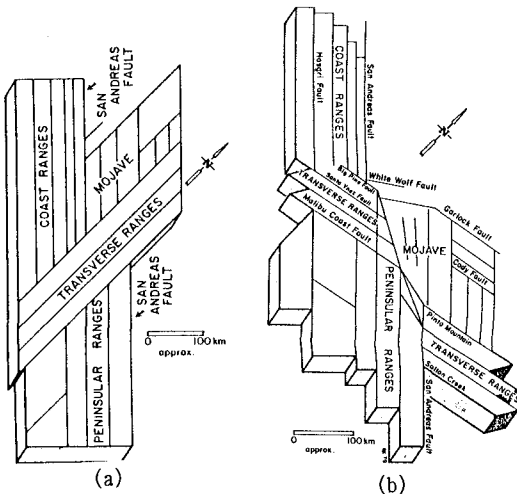


図-8 南カリフォルニア地域の地殻変動過程⁸⁾：
(a)初期ブロック構造、(b)現在のブロック構造

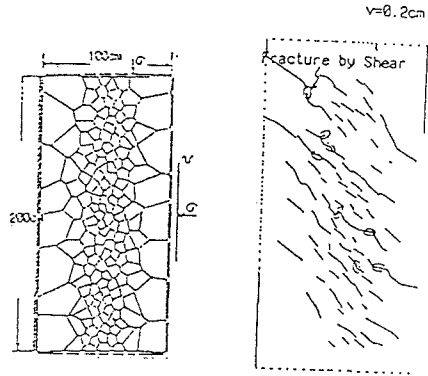


図-9 ボロノイ分割を用いた解析による
雁行割れ目の形成

3. 地殻変動解析に必要な解析モデル

上記の検討から地殻変動解析には次の事が要求されよう

- (1) 実際の地質構造および雁行地震断層を表現しうるような解析手法であること
- (2) 断層不連続面のラフネスを考慮し得る解析であること
- (3) 大きな断層から、中小規模の不連続面まで考慮し得る解析であること
- (4) 地殻変動は本質的に不安定破壊であることから、有限変形解析による不安定破壊解析が可能であること
- (5) 圧密、クリープ解析、さらにはダイナミックな破壊挙動解析が可能であること
- (6) 断層の進展を考慮しながら不連続性岩盤内での熱、流体、応力の連性解析が可能であること。
- (7) 上記の解析が三次元場で可能であること

(1)に関しては図-9に示されるように、ボロノイ分割された剛体バネモデルによる解析により図-3aに示されるような雁行割れ目を再現する事が出来る。これはボロノイ分割が結晶構造をよく表現し得るモデルであることによるものであり、こうした地殻変動解析にはボロノイ分割がもっとも適しているといえ、また、(2)は剛体バネモデルによって表現し得る。(3)に関しては、大きな断層をメッシュ分割に反映させ、中小規模の割れ目を構成則として評価し得る解析法が必要となる。図-10aはサンアンドレアス断層系であり図-10bはサンアンドレアス断層のみをメッシュ分割に含むボロノイ分割、そして図-10cはサンアンドレアス断層とそれに付随する主な断層系を含んだボロノイ分割である。サンアンドレアス断層はほぼ垂直に断層が入っているので、こうしたメッシュ分割を層状的に3次元化すれば求める3次元メッシュ分割が得られる。一般的な3次元不連続面を含むモデル化に関しては検討中である。ただしこうしたメッシュ分割で得られる一つのメッシュの大きさは、大きいものでは一辺が数10kmにもなり当然その中にさらに中小規模の断層系を含むことになる。これに関しては、これを構成則で評価した解析をするために、要素を剛とした解析でなく要素変形を考慮し、かつボロノイ分割が適用し得る解析が必要になりこれに対しては修正仮想変位法が有効である^{9,10)}。この解析法は剛体バネモデルと連続体解析としての有限要素法とを混合した方法であり、有限要素解析で定式化され得ることはそのまま定式化でき、有限変形による不安定破壊解析への応用⁹⁾、さらに動的解析への発展も有限要素法と同様に出来る。ただし(6)に示される応力と熱、流体との連成解析に関しては、ボロノイ分割された不連続体解析が可能な定式化でなければならない。これに対しては連続体解析に用いられるガレルキン法を基にした有限要素解析は適用できない。そこで応力解析に関しては修正仮想変位法を用い熱、流体に関しては、積分差分法を用いた連成解析を行う^{11,12)}。この解析手法は3次元場への拡張も可能であり、結晶構造の3次元場での破壊解析¹³⁾と、高温岩体水圧破碎への適用を行っている。

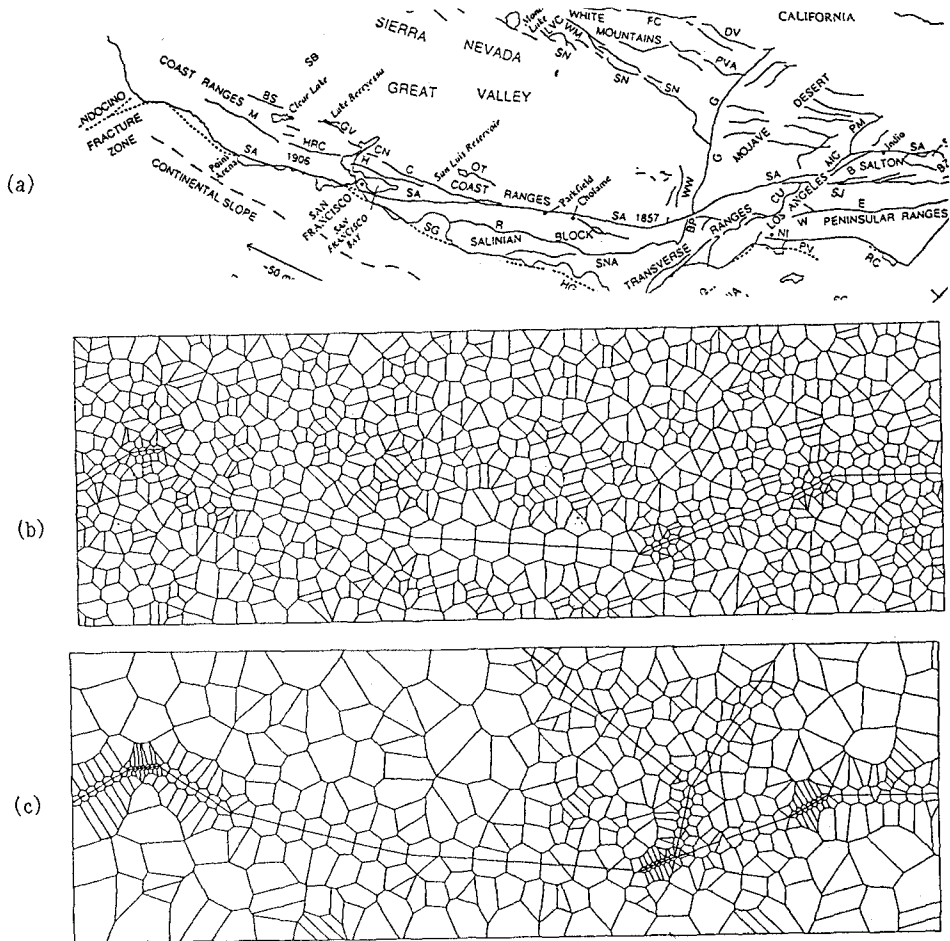


図-10 サンアンドレアス断層とそのモデル化: (a)サンアンドレアス断層系¹⁾、(b)サンアンドレアス断層のみを含んだボロノイ分割、(c)サンアンドレアス断層と主な断層系を含んだボロノイ分割

4. 結論

地殻変動解析は地震予知、火山噴火予知は勿論であるが、高レベル放射性廃棄物処分場の長期安定性評価、高温岩体地熱発電の可採量増大技術の開発、大深度地下掘削問題といった多方面への発展が期待できる。ここではこうした解析手法の糸口を述べたに過ぎないが、今後相当の発展が期待し得る解析手法のように思われる。勿論こうした解析が実際に適用できるためには、画像処理による不連続面の抽出とそれからのモデル化、さらには構成則の構築といったものを実用的なところまでもっていかなければならない。しかしこれに関しても既に実用化に向けた研究が進められており、総合的な地殻変動システムとしての構築が可能な段階にきているといえよう。

参考文献

1. U.S Geological Survey Professional Paper 1515, 1990. The San Andreas Fault System, California.
2. Moore, D. E., Summers, R. & Byerlee, J. D., 1989. Sliding behavior and deformation textures of heated illite gouge. J. Str. Geol., Vol. 11, No. 3, pp. 329-342.
3. Borst, R. D., 1988. Bifurcations in finite element models with a non-associated flow law. Int. J. Numer. Anal. Methods in Geomech., Vol. 12, pp. 99-116.
4. Moore, D. E. & Byerlee, J. D., (in press). Relationships between sliding behavior and internal geometry of laboratory fault zones and some creeping and locked strike-slip faults of California. Tectonophysics.
5. Luyendyk, B. P., Kamerling, M. J. & Terres, R., 1980. Geometric model for Neogene crustal rotations in southern California. Geo. Soc. Am. Bull., Vol. 91, pp. 211-217.
6. Garfunkel, Z. & Ron, H., 1985. Block rotation and deformation by strike-slip faults. J. Geophys. Res., Vol. 90, No. B10, pp. 8589-8602.
7. Kanaori, Y., 1990. Late Mesozoic-Cenozoic strike-slip and block rotation in the inner belt of Southwest Japan., Tectonophysics, 177, pp. 381-399.
8. Rowshandel, B. & Nemat-Nasser, S., 1986. A mechanical model for deformation and earthquakes on strike-slip faults, PAGEOPH, Vol. 124, No. 3, pp. 531-566.
9. 塚本耕治, 浜島良吉, 1993. 地殻の変形強度解析, 第25回岩盤力学に関するシンポジウム.
10. 鈴木隆次, 浜島良吉, 1993. 要素変形を考慮した不連続体境界による脆性帯の変形強度解析, 第25回岩盤力学に関するシンポジウム.
11. 大西朝晴, 浜島良吉, 1993. タム基礎層盤の変形を考慮した変形強度解析, 第25回岩盤力学に関するシンポジウム.
12. 福原俊一, 中井仁彦, 浜島良吉, 1993. 不連続性帯の熱、流体、応力の連成解析, 第25回岩盤力学に関するシンポジウム.
13. 中井仁彦, 山田俊雄, 浜島良吉, 1993. 3次元粘弾性構造解析と地殻変動, 第25回岩盤力学に関するシンポジウム.