

## 審査の結果の要旨

本論文は、地表地震断層を念頭に、構造や材料特性に関する確率モデルが与えられた非線形弾塑性材料からなる物体に関し、変位・歪・応力等の応答に関して、平均・分散等の確率特性を計算する数値解析理論を構築し、それに基づく有限要素法を利用した数値解析手法を開発したものである。論文の主要な内容は次の2点である。第一点は数値解析理論の構築である。この理論は、1)カルーネンローベ(Karhunen-Loeve)展開と多項式カオス(polynomial chaos)展開を確率的に変化する挙動に施し、2)平均挙動の上下限を与えるバウンディングメディアを用いて応答の摂動をとる、という二つの手法を用いており、モンテカルロシミュレーションとの比較により、妥当性・有効性が検証されている。第二点は効率的な数値解析手法の開発である。地表地震断層の解析は3次元であり、確率特性を考慮すると極めて大きい自由度の問題を数値計算しなければならない。より効率的な並列化処理も確率有限要素法に施し、計算量は通常の有限要素法よりも多いものの、十分実用に耐えるものとした。

本論文に関する審査会の評価は、論文の質に関して全く問題がない、というものであった。特に、地震断層の発生・伝播のシミュレーションに成功の見込みがあること、新しい解析手法を提案し、その解析結果も妥当と思われること、効率的な並列計算を可能とした新しいアルゴリズムを考案し解析手法に組み込んだこと、に関して十分高いレベルにあるとの意見が出された。

論文の審議は、次の2項目に関して集中して行われた。

### 1)分岐解の安定性

地表地震断層の形状にさまざまなものが観測されていることに対応して、開発された数値解析手法では断層形成過程に分岐現象が伴うことが得られている。この分岐解の意味について物理的な解釈が議論された。特に、分岐過程にはさまざまな経路があるものの、最終的には一つの解に収束するという、カオス的挙動が得られており、最終的に収束する解が本当に安定なものかが質疑された。この間に関して、非線形方程式の特性として一つの解に収束することは十分可能性があること、分岐解の確率特性も一つの解に集中するように見受けられること、そして、収束する分岐解が持つエネルギーは他の解に比べて小さく、物理的な点からみてもこの解が最も実現しそうであることが、が答弁された。

### 2)局所化の解釈

塑性ひずみが局所化した狭い領域としてモデル化された地表地震断層に対して、数値解析では妥当と思われる形状を再現している。ひずみの確率特性も奇異なものではなく、特に、期待値に対応する分布は雁行状断層に対応している。しかし、ひずみの分散も局所化しており、表面全体に広がったものではない。この分散も局所化する点に関して、物理的解釈が求められた。主な答弁は、確率応答を期待値に関して摂動を取った上で関数展開を行っているため、期待値に対応する応答が局所化すると、分散も同じ箇所に局所化することは自然であること、また、境界条件の影響もあり、より緩やかな境界条件を課して拘束を外すと分散は広がるため、数値計算は妥当と思われること、の2点である。

### 3)手法の合理性の確認

提案・開発された数値解析手法は、変位やひずみの確率密度関数を追跡することが可能である。例題として解かれた2次元問題では、モンテカルロシミュレーションとの比較により、計算された確率密度関数は十分高い精度であることが示されている。しかし、実験観測との比較がないため、実際の物理現象に対し

て、手法が正しい解を出すか否かは必ずしも定かではない。例えば、平面ひずみ状態での2軸試験の数値計算を行い、斜めに発達するせん断帯を再現することが議論された。その時、対応する確率密度関数はどうのようなものが得られるかも質問された。この問題に関して、通常有限要素法と同様、適切な設定を行えば斜めに発達するせん断をシミュレートすることは可能であり、また、対応する確率密度関数も計算できることが答弁された。

以上の点に関しても、本論文では、現時点での十分な検討がなされていることや、また、将来の課題として明確に問題点を示していることが審査会で示された。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。