

I - 1

分岐理論を用いた地盤挙動の定性的予測

東北大学工学部 ○学生員 白戸 真大
 東北大学工学部 正 員 岩熊 哲夫
 東北大学工学部 正 員 中沢 正利

1. まえがき

日本海中部地震などの津波予測では津波の沿岸への到達時間が合わないなど、津波発生初期条件としての海底地盤の挙動を正確に予測していない可能性を示している。また、断層をモデル化した模型実験の結果を種々の構成則を用いて数値解析した場合に、応力レベルでは比較的よい結果が得られるが、変位に関してはオーダーさえ異なる程の予測しかできない場合が多い¹⁾。このような変位予測精度の悪さは、降伏後の地盤の変位挙動における局所化の発生やその後の比較的大きいと考えられる局所化された変形に関する構成則への考慮といったものの欠如が原因ではないかと考えられる。

そこで本研究では、まず変形局所化の発生の上に焦点を絞り、主すべり面を有する一様に圧縮された地盤におけるある種の変形局所化発生の可能性を探る。解析に当たっては応力場は線形理論の範囲で求めるが、局所化発生規準は大変形理論における分岐理論を用いる。また増分構成則には地盤挙動をより良く表現し得るように非共軸の塑性流れ則も考慮した。

2. 基礎理論

連続体に発生する分岐現象としてせん断帯を考える。ここに言うせん断帯とはある不連続線をまたいで、せん断変形速度が不連続になるモードとしてモデル化される。この不連続面を $x_1 - x_3$ 面内にあるものとし、その法線方向に座標軸 ξ をとれば、速度勾配の jump 量は、

$$\left\langle \frac{\partial v_i}{\partial \xi} \right\rangle = g_i, \quad i = 1, 2, 3 \dots \dots \dots (1)$$

で表されるから、空間固定直角座標系成分の速度勾配に座標変換するとその分岐モードは、

$$\langle v_{ij} \rangle = g_i v_j, \quad i = 1, 2, 3, j = 1, 3 \dots \dots \dots (2)$$

となる。ここに v_j は法線ベクトル ν の成分である。

このような不連続を含む場合は支配方程式を満足しなければならないのはもちろんであるが、連続体であるので不連続面をまたいで速度そのものが連続し、さらに、表面力も連続していなければならず、

$$\nu_j \langle \dot{n}_{ji} \rangle = 0 \dots \dots \dots (3)$$

が成立している必要がある。ここに、 $\dot{n}$ は nominal 応力速度テンソルである。

増分構成則を式 (3) に代入し、さらに式 (2) を代入して g_i が非零で存在するための条件を満足する状態が、その点で変形の局所化が発生する可能性となる。

3. 解析例

構成則は拘束圧とダイラテンシーとを考慮した塑性理論モデルに非共軸性を加えたモデルの一つとして、次のようなモデル²⁾を用いた。

$$D_{ij}^p = \frac{1}{H} \left(\frac{\sigma'_{ij}}{2\bar{\sigma}} + \frac{\beta}{3} \delta_{ij} \right) \left(\frac{\sigma'_{kl}}{2\bar{\sigma}} + \frac{\alpha}{3} \delta_{kl} \right) \bar{\sigma}_{kl} + A \left\{ \bar{\sigma}'_{ij} - \frac{1}{2\bar{\sigma}^2} \sigma'_{kl} \bar{\sigma}_{kl} \sigma'_{ij} \right\} \dots \dots \dots (4)$$

表-1 解析に用いた材料パラメータ

	E (Pa)	ν	α	β	$\bar{\mu}/\mu$	H/μ
日本海地盤	8.9×10^{10}	0.26	0.0	0.0	0.028	0.0015
断層内部	1.0×10^7	0.26	0.0	0.0	1.0	0.0

ただし、 $\bar{\mu} \equiv (\mu^{-1} + 2A)^{-1}$

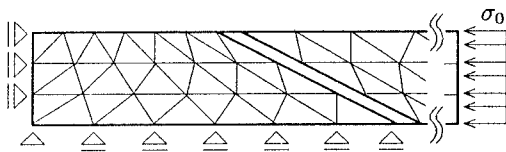


図-1 解析に用いたモデル

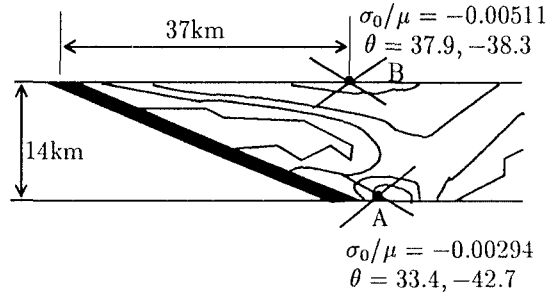


図-2 せん断帯発生応力 σ_0/μ の contour line

ここに、 D^p は塑性変形テンソル、 ∇ は Cauchy 応力の Jaumann 速度、 σ' は偏差応力、そして $\bar{\sigma}$ は相当応力である。また、 H は硬化係数であり、 α は内部摩擦係数、 β はダイレタンシー係数と呼んでよい。そして A が非共軸性を代表する係数である。

ここでは日本海中部地震発生海底地盤を対象とする。余震分布等³⁾から図-1に示したようなパターンの有限要素メッシュで応力解析をするが、実際には深さ方向に10分割、両側面から断層までを20分割した。この地盤を右端で一様な応力 σ_0 で圧縮する。用いる材料定数は地震波速等³⁾から算定できる値として表-1のようにした。ここに E はヤング率、 ν はポアソン比、 μ と κ はそれぞれせん断弾性係数と体積膨張率である。 α と β はあまり結果に影響しないので零とした。簡単のため主断層は表にあるような柔らかい弾性体でモデル化した。これ以上柔らかくしても結果には影響しないことを確認してある。

図-2に式(3)から得られるせん断帯発生可能な外力レベル σ_0/μ の値をコンターラインで示した。ただし有限要素法は定ひずみ三角形要素を用いているので、このコンターは各要素図心における応力値を内挿外挿して求めたものである。一番先に局所化する可能性があるのは図中の点Aであるが、局所化によって応力の乱れはあまり無いとすると、海底面上で局所化が可能になるのが一番早いのが点Bである。ここは海底面に現われた主断層から秋田側に約37kmの位置に当たり、津波からの逆算によって予測される津波発生位置⁴⁾に近い。変形の局所化後の構成則をここでは考慮していないが、もし局所化によって大きな塑性変形が生じ、海底面が大きく変形したとすると二次的な津波発生位置になり得るだろう。新潟地震で開放された応力は12.6(MPa)、男鹿地震で開放された応力は3.6(MPa)と求められている⁵⁾。実際地殻に働いている地殻応力はその10倍程度と言われており、また深さ15(km)の地殻に働く応力が300(MPa)とモデル化されている⁶⁾事からもここで得られた外力レベル(点Bなら180(MPa))は現実的なオーダーである。

4. まとめ

上で得られた点Bの付近に余震分布があまり得られていないことは、主断層のようなすべり以外の大変形が地盤に起こったことを示唆している。ここでモデル解析に用いた変形の局所化の考慮が、いわゆる「すべり線場」の理論で得られる終局状態よりはるかに前の段階で大きな変形が発達する可能性を示した。今後は、実際にどの程度の変形が生じ得るかについて、大変形解析及び地殻材料の構成則の研究が必要となる。

参考文献

- 1) 谷 和夫：ジョイント要素を用いたFEMによる逆断層の模型実験のシミュレーション、地盤の破壊とひずみの局所化に関するシンポジウム発表論文集、土質工学会、pp215-222,1994.
- 2) Iwakuma,T. and Nemat-Nasser,S.: An analytical estimate of shear band initiation in a necked bar. Int. J. Solids Structures, Vol.18, pp.69-83,1982.
- 3) 首藤 伸夫 (研究代表者)：日本海中部地震津波の発生・増幅機構と破壊力、文部省科学研究費自然災害特別研究研究成果、1988.
- 4) 千田 健一：日本海中部地震津波の波源の再検討、東北大学修士論文、1993.
- 5) 佐藤 良輔 編著：日本の地震断層パラメーター・ハンドブック、鹿島出版会、1989.
- 6) 日本材料学会 編：岩の力学、丸善株式会社、1994.