

断層を含む岩盤の長期挙動の解析検討

小尾博俊¹⁾・山本卓也²⁾・原田芳金³⁾・伊東 守⁴⁾・中村英孝⁴⁾

1. はじめに

岩盤の持つ安定性や難透水性等の性質を利用するため、地下深部の岩盤内に構造物を構築することが今後ますます進むものと思われる。非常に長期間にわたって地下深部の岩盤を利用する場合は、地下深部に存在する岩盤の性質を把握し、岩盤の長期にわたる変動を検討することが重要となる。ここでは、地表から地下深部にわたる広い領域の岩盤と、岩盤内に存在する断層の長期にわたる挙動を数値解析により検討した。

モデル地域として、地下深部のデータが比較的豊富な東北地方の仙岩地域を選定した。当地域に存在する断層の解析上の挙動は、垂直ばねおよびせん断ばねで表現した。また、モデル地域は地熱地帯であることから、地下の温度分布状態を考慮し、熱の影響により、解析上は岩盤物性のうち変形特性が変化すると仮定した場合についても検討を実施した。

解析手法としては、有限要素法 (FEM) および剛体ばねモデル (RBSM) を用い、両者の解析結果の比較を行った。

2. 解析モデル

側方境界が評価領域に与える影響を小さくするため、かつ、岩盤深部の挙動を考慮するため、解析領域は評価領域を中心として側方および深部方向へ広げるものとした。荷重は評価期間を1万年として算定した。

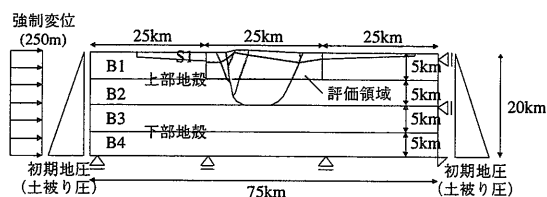
また、仙岩地域は地熱地帯であることから、地下深部の温度の影響を考慮しない場合 (第1図) と、地下深部の温度の影響を岩盤物性値の変化により考慮した場合 (第2図) との解析結果の比較を行った。

(1) 荷重条件

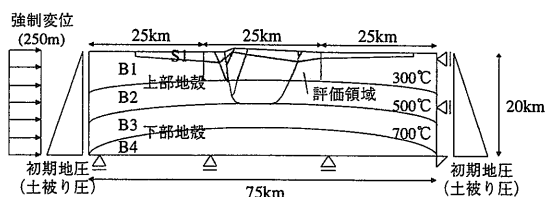
荷重はモデルの左側面境界に、等分布の強制変位として与えた。強制変位量は、既往の研究結果 (佐藤, 1982) を参考に、 $10^{-14}/\text{sec}$ のひずみ速度から換算した。本モデルでは1万年あたり約0.3%のひずみであり、これを強制変位に換算すると250mの強制変位となる。

(2) 境界条件

左右の側方境界は鉛直方向自由の境界条件とした。また、下方の境界条件は水平方向自由の境界条件とした。



第1図 解析モデル図 (温度分布を考慮しない場合)



第2図 解析モデル図 (温度分布を考慮した場合)

1) 大成建設(株)情報システム部開発室
〒169 新宿区百人町3-25-1
2) 大成建設(株)エネルギー部土木技術室
3) (財)原子力環境整備センター
4) 佐藤工業(株)中央技術研究所

キーワード：岩盤、断層、熱、長期挙動、有限要素法、剛体ばねモデル

3. 解析条件

(1) 初期応力

初期応力は、以下に示す静水圧分布とした。

- ・水平応力 $\sigma_x : 1.0 \times \sigma_y$ MPa
- ・鉛直応力 $\sigma_y : \gamma H$ MPa
- ・せん断応力 $\tau_{xy} : 0.0$ MPa

ただし、H：土被り厚さ m

γ ：岩盤の単位体積重量 kg/m³

(2) 岩盤物性値

深部岩盤の物性値は、電研式岩盤分類を基本として第1表のように設定した。また、温度の影響を考慮する場合は、緒方(1987)、島田(1990)、Althaus(1994)の研究結果に基づいて、岩盤の変形係数およびポアソン比を第2表に示すように、常温での値よりも低減させた。

(3) 断層物性値

断層部は、FEMではジョイント要素で、RBSMではばね要素でモデル化した。当地点の断層は、その活動度に応じ、活動性断層(AF系)とその他の断層(F系)に分類される。どちらの場合も、せん断方向のばね定数は断層のすべりを表現するため、岩盤の変形係数の1/1,000～1/10,000の小さな値とした。本検討で使用した断層物性値を以下に示す。

- ・垂直ばね定数 kn：岩盤相当
- ・せん断ばね定数 ks：岩盤の1/1,000～1/10,000
- ・粘着力 C：0.0 MPa
- ・内部摩擦角 ϕ ：20.0°

4. 解析ケース

地層境界、岩盤物性値および断層物性値を変化させ、第3表に示す5つのケースについて、評価期間1万年での挙動を検討した。

5. 解析結果および考察

解析結果のうち、ケースBおよびEの地表面における断層の相対変位を第4表に示す。

第4表を含む解析結果とその考察を以下にまとめて示す。

① 第4表に示すFEMとRBSMの解析結果によれば、両手法とも断層の相対変位の方向は一致してい

第1表 岩盤物性値(温度分布を考慮しない場合)

	単位体積重量 γ (kg/m ³)	変形係数 E (MPa)	ポアソン 比 ν	粘着力 C (MPa)	内部摩擦 角 ϕ (度)
堆積層 S1	2,300.0	2,500.0	0.30	2.0	30.0
上部地殻 B1 (～5km)	2,700.0	2,700.0	0.27	2.5	35.0
上部地殻 B2 (5～10km)	2,700.0	3,000.0	0.25	3.0	40.0
下部地殻 B3 (10～15km)	3,000.0	2,000.0	0.35	2.5	35.0
下部地殻 B4 (15～20km)	3,000.0	1,200.0	0.40	2.0	30.0

第2表 岩盤物性値(温度分布を考慮した場合)

	単位体積重量 γ (kg/m ³)	変形係数 E (MPa)	ポアソン 比 ν	粘着力 C (MPa)	内部摩擦 角 ϕ (度)
堆積層 S1	2,300.0	2,500.0	0.30	2.0	30.0
上部地殻 B1 (～300℃)	2,700.0	2,160.0 (0.8×E0)	0.32	2.5	35.0
上部地殻 B2 (300～500℃)	2,700.0	1,080.0 (0.4×E0)	0.41	3.0	40.0
下部地殻 B3 (500～700℃)	3,000.0	540.0 (0.2×E0)	0.46	2.5	35.0
下部地殻 B4 (700～900℃)	3,000.0	270.0 (0.1×E0)	0.48	2.0	30.0

備考) E0=2,700.0MPa

第3表 解析ケース

CASE	地層境界 (温度分布の考慮)	岩盤物性値 (温度分布の考慮)	断層のせん断ばね定数	
			A F系 (活動性断層)	F系 (その他の断層)
A	無考慮	無考慮	岩盤の10 ⁻³	岩盤の10 ⁻³
B	無考慮	無考慮	岩盤の10 ⁻⁴	岩盤の10 ⁻³
C	考慮	無考慮	岩盤の10 ⁻³	岩盤の10 ⁻³
D	考慮	考慮	岩盤の10 ⁻³	岩盤の10 ⁻³
E	考慮	考慮	岩盤の10 ⁻⁴	岩盤の10 ⁻³

る。絶対値としては、RBSMの方がFEMよりも、水平方向で約3倍大きく、鉛直方向で約2倍大きい傾向がある。これより、同様の解析条件でも、RBSMによれば、断層のすべりが大きめに計算される可能性がある。

② 第4表を含むFEMとRBSMの解析結果から、断層の相対変位、増分応力ともにオーダーはほぼ一致していることが分かった。これより、FEMとRBSMのいずれの解析手法でも、断層の変形挙動を概ね説明できる可能性がある。

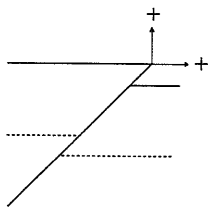
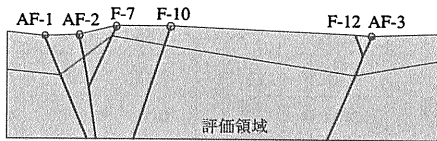
③ 深部岩盤の温度分布を考慮した場合、評価領域が凸状に盛り上がるような変形状態となった。この理由として、温度の影響を考慮することにより、結果的に下部地殻が変形しやすい物性となり、評価領域がその影響を受けたことが考えられる。

第4表 地表面における断層の相対変位

(強制変位量：250m / 1万年後)

	CASE	解析手法	AF-1	AF-2	F-7	F-10	AF-3
水平方向 相対変位 (m)	B	FEM	-4.80	-0.71	-0.51	-0.37	-4.53
		RBSM	-7.40	-2.27	-1.58	-1.40	-8.11
	E	FEM	-5.32	-0.77	-0.52	-0.37	-3.88
		RBSM	-8.24	-2.67	-1.56	-1.41	-9.04
鉛直方向 相対変位 (m)	B	FEM	10.11	3.12	-1.03	-0.96	-9.31
		RBSM	13.14	3.19	-2.44	-1.73	-14.00
	E	FEM	11.20	3.39	-1.05	-0.96	-7.96
		RBSM	15.54	5.47	-2.30	-1.79	-16.99

相対変位：断層の左側を基準とした右側の変位



④ 深部岩盤の温度分布を考慮しない場合と、温度分布を考慮する場合のいずれも、活動性断層(AF系)のせん断方向のばね定数が、変形に大きく寄与していることが分かった。これは、FEMとRBSMの異なる解析手法に対しても成り立つ。

6. おわりに

断層を含む岩盤の長期にわたる挙動を検討することを目的とし、評価期間を1万年として数値解析による検討を行った。また、解析の対象とした地点の熱特性を考慮して、岩盤の変形特性を変化させた場合の断層の挙動の検討も併せて行った。

その結果、今回用いたFEMとRBSMの2つの解析手法のいずれによっても、断層が相対的にすべりを生じるような挙動を表現することができた。

ここでの検討は、あくまでも数値解析的な検討であることから、解析結果が岩盤や断層の実際の挙動

と整合性を有することを何らかの方法により確認する必要がある。

この確認の方法自体が一つの検討事項ではあるが、岩盤の比較的短期間の挙動を説明し得る確からしい解析手法を用いて、信頼性の高い物性値、荷重条件、境界条件を設定した結果を外挿して長期にわたる挙動を検討することが現実的な方法として考えられる。

このような観点から、今後検討すべき事項を以下にまとめて示す。

① 岩石・岩盤物性について

地下深部の等温線分布を見直し、より現実に近い等温線分布を設定する必要がある。また、熱の影響を受けた深部岩盤の物性値について、さらに文献調査を行い、温度と岩石または岩盤物性の関係に関するデータを蓄積する必要がある。

深い地点までの試錐により岩石コアを採取し、力学特性に関する知見を補完することも重要である。

② 解析用物性の設定について

室内や原位置での試験結果から、岩盤や断層の長期挙動の解析に用いる物性値を設定する方法についても検討する必要がある。

謝辞：本検討を行うにあたり、大久保教授(東京大学)、西村教授(京都大学)、竹内教授(明星大学)にご指導、ご助言を頂きました。ここに深く謝意を表します。

引用文献

- 佐藤比呂志(1982)：羽丘の隆起モデルについて、構造地質研究会誌, 27, pp109-122.
- 緒方義弘(1987)：高圧熱水環境における岩石の力学的特性、岩の力学国内シンポジウム, 7, pp461-466.
- 島田充彦(1990)：高温高封圧下における岩石の破壊強度と摩擦強度、岩の力学国内シンポジウム, 8, pp193-198.
- E.Althaus(1994)：Effect of water on strength and failure mode of coarse-grained granites at 300°C, Rock Mech. Rock Engng., 27, No.1, pp1-21.

OBI Hirotooshi, YAMAMOTO Takuya, HARADA Yoshikane, ITOH Mamoru and NAKAMURA Hidetaka(1996)：Numerical Analysis for Estimating Long-Term Behavior of a Rock Mass Including Faults.

<受付：1996年8月1日>