

III-18

均質化法に基づいた不連続性岩盤の支持力解析

東北大学工学部 学生員○堂ノ脇将光
東北大学工学部 正 員 京谷 孝史
東北大学工学部 正 員 岸野 佑次

1. はじめに

岩盤は無数の不連続面を含んだ複雑な構造体であり、その強度は構成岩石の材料特性や不連続面の配置状態、不連続面の力学特性など様々な要素に影響される。本研究では、極限支持力解析法をベースに規則的な不連続面を持つ材料の一面せん断試験のシュミレーションを行って、不連続性岩盤の極限支持力が、岩石の強度に不連続面による変形特性と強度特性の異方性を取り込むことによって合理的に評価できることを示す。

2. 解析方法

本研究では、均質化法によって、一定方向に規則的に並んだ不連続面を持つ岩盤を、それと等価な異方弾性体に置き換える。そして有限要素法によって材料にある荷重Fが載荷されたとき各要素の応力を求め、この応力と不連続面の強度特性とから、各要素の降伏関数を決定する（2.1参照）。最後に降伏関数を線形近似して、線形計画法により荷重Fを単調載荷させたときの極限荷重 αF を求める。

2.1 c ϕ 材に不連続面を考慮した降伏関数

母材はc ϕ 材とし、全ての点で不連続面方向に關しては小さなせん断抵抗を示すと仮定する。この材料内の要素が任意の外力を受けるとき、二次元で考えてx軸と角度 θ をなす弱面に働く垂直応力とせん断応力とをそれぞれ σ 、 τ とすると、力の釣り合い条件から次式が得られる。

$$\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \frac{-\sigma_1 + \sigma_2}{2} \cos 2\theta - \tau_{12} \sin 2\theta \quad (1)$$

$$|\tau| = \frac{-\sigma_1 + \sigma_2}{2} \sin 2\theta + \tau_{12} \cos 2\theta \quad (2)$$

弱面がすべりを起こさずに耐えうる限界の強さを表す基準として、モール・クーロンの降伏基準を用いる。

$$|\tau| = c - \sigma \tan \phi \quad (3)$$

ここに、 $|\tau|$ は弱面のせん断強さ、 c は粘着力、 ϕ は内部摩擦角である。(1)式と(2)式を(3)式に代入すると、弱面の強度を支配する次式(4)を得る。

$$a_1 \tau_{12} + a_2 \sigma_1 + a_3 \sigma_2 = c \quad (4)$$

ただし、 $|\tau| \geq 0$ のとき、

$$a_1 = \cos 2\theta - \sin 2\theta \tan \phi$$

$$a_2 = -\frac{1}{2} \sin 2\theta + \frac{1}{2} \tan \phi - \frac{1}{2} \cos 2\theta \tan \phi$$

$$a_3 = \frac{1}{2} \sin 2\theta + \frac{1}{2} \tan \phi + \frac{1}{2} \cos 2\theta \tan \phi$$

$|\tau| \leq 0$ のとき、

$$a_1 = -\cos 2\theta - \sin 2\theta \tan \phi$$

$$a_2 = \frac{1}{2} \sin 2\theta + \frac{1}{2} \tan \phi - \frac{1}{2} \cos 2\theta \tan \phi$$

$$a_3 = -\frac{1}{2} \sin 2\theta + \frac{1}{2} \tan \phi + \frac{1}{2} \cos 2\theta \tan \phi$$

である。

一方、c ϕ 材の降伏関数は、

$$f = \sqrt{J_2} + \alpha I_1 - \sigma_0 \quad (5)$$

$$\left(J_2 = \frac{1}{2} s_{ij} s_{ij}, I_1 = \sigma_{kk} (= 3P) \right)$$

で表される。

規則的な不連続面を持つ材料の降伏関数は、弱面の降伏関数(式(4))と、c ϕ 材の降伏関数(式(5))で同時に評価し(図1)、材料の破壊は応力がこれら二つの降伏基準のどちらかに達したときに起こるものとする。

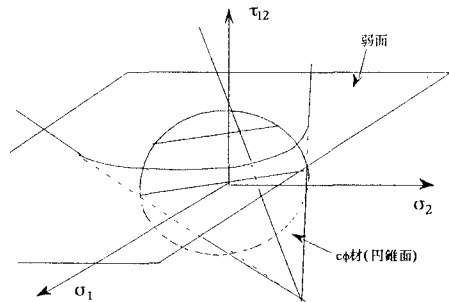


図1 c ϕ 材に不連続面を考慮した降伏関数

3. 一面せん断試験の数値解析

川本ら¹⁾は、規則的な節理あるいは成層面を有する脆性材料の供試体を用いて一面せん断試験を行い(図2)、不連続面の角度を仮想せん断面(図2の破線部)から時計回りに 0° , $\pm 22.5^\circ$, $\pm 45^\circ$, $\pm 67.5^\circ$, 90° の8通りに変化させ、それぞれの場合でせん断破壊荷重を求めている。

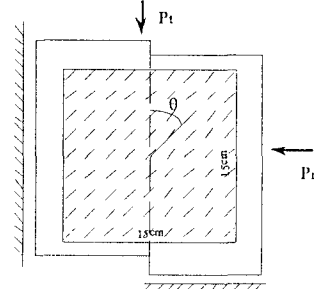


図2 不連続面を配置した供試体の一面せん断試験

図3に垂直荷重 $P_n = 250, 500\text{kg}$ が作用した場合の節理体の破壊荷重 P_t と、 $P_n = 500\text{kg}$ が作用した場合の積層体の破壊荷重 P_t を示す。 $P_n = 500\text{kg}$ での破壊荷重を比較すると、積層体の破壊荷重が著しく異方性を示すのに対し、節理体のそれは $0 - 22.5^\circ$ 付近で大きくなる以外、あまり節理面の方向に影響されないことが確かめられる。また、積層体における破壊の方向特性は P_n の大きさにも影響され、拘束圧の大きい場合に、より顕著な方向依存性が見られる。

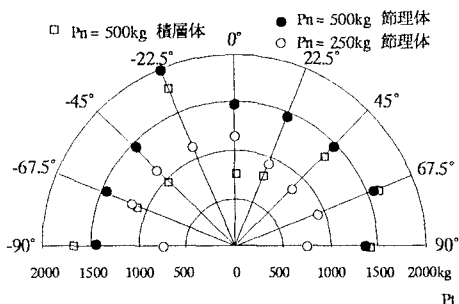


図3 一面せん断試験における節理体および積層体の破壊荷重

この試験に対し、母材を $E_{11}:E_{22}=1:7$ の直交異方性体と仮定したモデルと、比較のため母材を等方体と仮定したモデルについてFEM極限支持力解析を行い、不連続面方向と極限荷重の関係を調べた。解析は図4に示すような境界条件の下に行うこととし、側方荷重 P_n およびせん断荷重 F を比例载荷することにより破壊荷重を求める。表1に解析に用いた諸定数の値を示す。また F および P_n として実際に計算に用いた値は、ケースA) $F=300\text{kg}$ 、 $P_n=300\text{kg}$ 、ケースB) $F=300\text{kg}$ 、 $P_n=100\text{kg}$ とし、これに対する破壊荷重 αF 、 αP_n における荷重係数 α の値を求めた。図5に、ケースA)、B)の結果を示した。

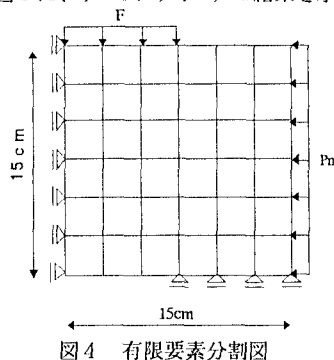


図4 有限要素分割図

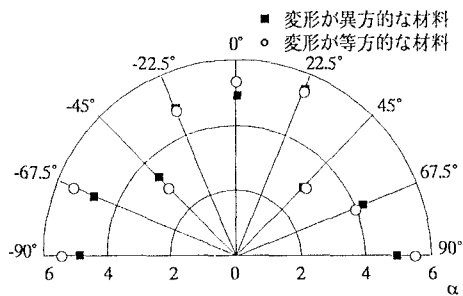
ケースA)では、不連続面の方向によって α の値は異なり、差し目($-90 < 0 < 0$)と流れ目($0 < 0 < 90$)とでも違いが見られる。また、変形が異

	cφ材	弱面
粘着力 c (kg/cm^2)	33.3	5.0
内部摩擦角 ϕ	56.3°	10°
弾性係数 E_{22}	1.0×10^4	
ポアソン比 ν	0.16	

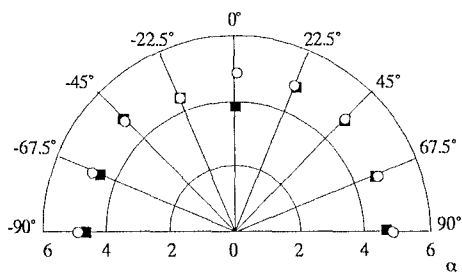
表1 解析定数

方的な材料と等方的な材料とで α に差が見られ、不連続面の方向性が極限荷重に影響を与えていることがわかる。しかし、ケースA)では荷重係数 α が不連続面の方向に影響されているのに対し、ケースB)でのそれはほとんど異方性を示していない。このことは、図3に示した一面せん断試験における傾向に類似している。

以上のように、不連続面を持つ材料の極限支持力は、不連続面の性状や、不連続面の構造と拘束条件との関係に左右される。これらの影響を詳しく検討するために、均質化法を用いて変形特性の厳密な評価を行っているが、その結果については当日発表の予定である。



ケースA) $F=300\text{kg}$ 、 $P_n=300\text{kg}$



ケースB) $F=300\text{kg}$ 、 $P_n=100\text{kg}$

図5 破壊荷重時の α

<参考文献>

- 1) 川本 昭万、吉田 英生：節理体および積層体の巨視的なせん断破壊特性について、材料、17 (181)、1968、pp.42-49.
- 2) 北川 浩：塑性力学の基礎、日刊工業新聞社、1987.