

(30) 節理性岩盤のモデル化における節理面物性と粗度の関連の検討

東電設計(株)

藤枝 誠

東電設計(株)

清水 肇

鹿島建設技術研究所

永井博史

鹿島建設技術研究所 正会員 ○稲生道裕

1. はじめに

地下空洞や斜面等の岩盤構造物の安定性を検討するとき、これまでは岩盤を連続体として扱ってきたが、岩盤には不連続面が存在し、その分布性状により岩盤の挙動が大きく支配されている。したがって岩盤構造物の安定性検討に当っては、岩盤を不連続体として扱うのがより現実的であると考えられる。近年不連続体の解析手法として、DEM(個別要素法)等が注目されているが、これらの解析を行う上では節理性岩盤のモデル化が重要であり、モデル化のためには、節理の幾何学的分布性状を把握するとともに、節理面物性の調査・評価手法の確立が必要とされる。

節理の分布性状を支配する要素としては、①方向性、②長さ、③密度・間隔、④組合せ、⑤開口幅、⑥粗度、⑦充填物がある。これまで筆者らは、①～⑤についての調査・評価手法を検討し、岩盤節理モデル図作成手法を提案してきた。¹⁾²⁾また節理面の粗度については、現地測定データを各種手法で定量化した結果、既存の粗度の指標と相関が高いのは筆者らが提案した高低差 HD ・標準偏差 SD ・ I_p 指標(詳細は3.2参照)であることを把握した。²⁾したがって次には節理面物性と粗度の指標との関連の検討が必要となる。

そこで今回、石こうブロック及び岩盤ブロックを用いて室内試験(Bartonの方法及び一面せん断試験)を実施し節理面物性を求めた。本報告はこれらの試験結果から節理面物性と粗度との関連を検討したものである。

2. 供試体と試験方法

試験は、規則的に粗度を変えることが可能な石こうブロックで予備的に行ったのち、不規則な粗度をもつ岩盤ブロックで実施した。

2.1 供試体

石こうブロックの供試体は、長さ 28cm ×幅 28cm ×高さ 20cm で、高さの中間位置に規則的なサインカーブの節理面を設けている。波長は 14cm で高低差(振幅)を $0, 10, 20, 30, 40, 50\text{mm}$ と6段階に変化させている(図-1参照)。

岩盤ブロックの供試体は、稲田花崗岩を用い、石こうブロックと同じ大きさである。高さの中間位置に破断面をつくり、これを粗度を有する節理面と見なしているため、せん断方向だけでなく直角方向にも粗度がある。試験数量は10個とした。

2.2 試験方法

試験はBartonの方法と一面せん断試験を行った。Bartonの方法とは、図-2に示すように供試体を板の上にのせ、板の傾斜角をしだいに大きくして滑動または転倒する角度を測定し、これを内部摩擦角 ϕ とするものである。

また一面せん断試験は、図-2に示すようにこの粗度を有する面をせん断面とし、垂直応力を何段階か変化させてせん断応力を測定するものである。荷重は手動式油圧ジャッキで載荷して、ロードセルで測定し、変位は高感度型変位計で測

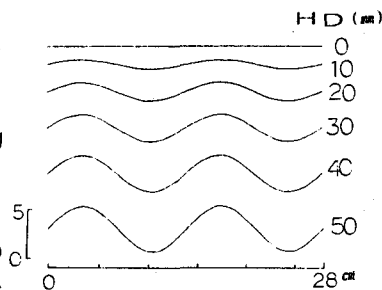


図-1 供試体の粗度
(石こうブロック)

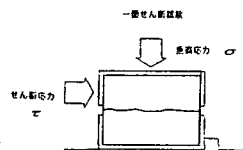
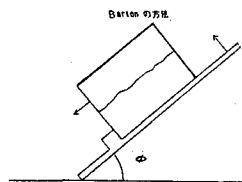


図-2 試験方法

定している。垂直応力は目安として、石こうブロックでは0, 1, 2, 3, 4 kgf/cm²、岩盤ブロックでは0, 1, 2, 4, 6, 8 kgf/cm²としている。垂直応力 σ とせん断応力 τ との関係から、粘着力Cと内部摩擦角 ϕ を求めた。

3. 供試体の粗度

3. 1 粗度の測定方法と測定位置による違い

岩盤ブロックについては、表面の粗度を図-3に示す装置で測定した。測線はせん断方向に3本(A, B, C)、それに直角な方向に3本(D, E, F)とり、5 mm間隔で高さを測定して輪郭を描いた。その例を図-4に示すが、測線により粗度の状況にかなりの違いがあることがわかる。

3. 2 粗度の定量化手法と供試体の粗度

供試体表面の粗度の定量化を、前報²⁾で提案した以下の(a)～(c)の手法及びJRCで実施した。

- (a) 高低差HD：一定区間の節理面の最高点と最低点の差を指標とする(図-5参照)。
- (b) 標準偏差法SD：一定区間を10等分した位置で基準線と節理面との差を測定し、その11個のデータの標準偏差を求めてこれを指標とする。節理の凹凸の細かさの程度を反映した指標である(図-5参照)。
- (c) 指標 I_p ：HDとSDを組合せたもので、両者の積の平方根の値を指標とする(つまり $I_p = \sqrt{HD \times SD}$)。これは節理の凹凸の大きさと細かさの両方を反映した指標である。
- (d) JRC (Joint Roughness Coefficient)：この方法はBartonによるもので、基準の表面粗さ断面形と比較して、0～20のJRC値を決めて、これを粗度の指標とするものである。

以上の手法で、供試体の粗度の指標を求めたものを、表-1及び2に示す。石こうブロックについては、 $SD \cdot I_p$ はHDと比例して規則的に変化している。また岩盤ブロックについては、測線によりかなり値が違うものの、供試体No. 3の粗度がとび抜けて大きく、No. 8が最も小さく、他はほぼ同じようなオーダーであることがわかった。

なお、HD・SDのような簡易な指標を用いれば、現場で節理面の粗度をより簡易な方法で測定できる。従来は、表面に露出した節理面でその面の輪郭を描いていたが、現実には節理面が露出している例は少なかった。ところがHD・SDは、露頭面と節理面が交わっていればその交線上に基準線をはって直接測定することが可能である。

4. 試験結果

4. 1 石こうブロックを用いた試験

Bartonの方法の試験結果は、表-1に示すように、高低差HDの増大とともに ϕ が増大するという傾向が明確に見られた。このうちHD20mm以上の供試体は転倒し、0・10mmのものは滑

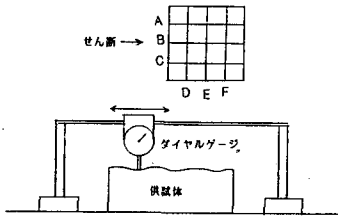


図-3 供試体の粗度の測定方法 (岩盤ブロック)

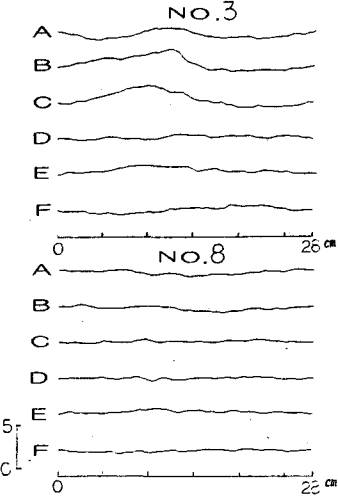


図-4 供試体の粗度の測定例 (岩盤ブロック)

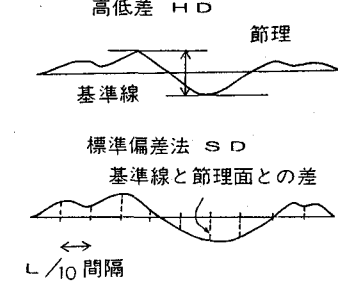


図-5 粗度の定量化手法

表-1 粗度の指標とC, ϕ の一覧表 (石こうブロック)

供試体	高低差 HD (mm)	標準偏差 SD (mm)	I _p (mm)	ϕ (deg)		C (kgf/cm ²)
				Barton の方法	一面せん断試験	
1	0	0	0	36	34.0	0
2	10	3.37	5.81	43	36.8	0.062
3	20	6.74	11.61	(57)	41.9	0.019
4	30	10.11	17.42	(61)	—	—
5	40	13.48	23.22	(65)	—	—
6	50	16.85	29.03	(68)	—	—

()は転倒

動している。

一面せん断試験で求めたCとφを表-1に示す。試験は供試体にまず一定の垂直応力を載荷し、次にせん断応力を載荷するのだが、ある程度せん断応力を加えると、表面の凸部を乗り越えようとするため、せん断応力と垂直応力がともに上昇するようになる。そこでこの上昇する直前をせん断強度と判断した。Cは平均 0.027 kgf/cm^2 で、ほぼ0という結果になっており、φは高低差HDの増大とともに増大している。

内部摩擦角φと粗度の指標との関係をまとめて図-6に示す。Bartonの方法は転倒と滑動に分け、回帰式を求めると、両試験法ともほぼ直線上にのることがわかった。

4.2 岩盤ブロックを用いた試験

Bartonの方法の試験結果は、表-2に示すように、内部摩擦角φは67~74°となっている。このうち供試体No. 3は転倒したのに対し、他の供試体は滑動している。

一面せん断試験の結果は、図-7及び表-2に示す。Cは平均 0.35 kgf/cm^2 でほぼ0という結果になっており、φは36~46°の範囲にある。

次に粗度の指標と内部摩擦角φとの関係を検討するのだが、粗度についてはA~Fの6測線で求めており、何を代表値とするかが問題となる。そこで代表値として次のものを検討した。

- ①せん断方向A, B, Cの3個の値の平均値。
- ②A, B, Cの3個の値の最大値。
- ③A, B, Cとせん断方向に直角方向D, E, Fの6個の値の平均値。
- ④せん断方向の値の方が影響が大きいと見て、せん断方向を2倍に重みづけした平均値。
- ⑤せん断方向を3倍に重みづけした平均値。

以上の方法を用い指標SDについて代表値を求め、Bartonの方法及び一面せん断試験のφとの間の相関係数を求めたのが表-3である。①、④、⑤の方法が比較的高い値を示すものの、それ程の差がない。この傾向は他の指標でも同様なので、粗度の代表値のとり方としてせん断方向に直角方向の粗度は考慮しない①の方法を採用することとした。(この値を表-2に示してある。)

次に、内部摩擦角φと粗度の指標との関係を検討した。図-8に示すように、各指標とも指標の値の増大につれφが増大するという傾向が見られる。回帰式と相関係数を求めてみたが、相関係数は0.75~0.85程度で、かなりの相関が認められる。指標ごとに検討してみると、HD, SD, Irについてはそれ程相関係数に差がないという結果

表-2 粗度の指標とC, φの一覧表 (岩盤ブロック)

供試体	測線	高低差 HD (mm)	断面粗度 SD (mm)	$I_r = \sqrt{\text{断面粗度 SD}}$ (mm)	JRC	φ (deg)	C (kgf/cm ²)
1	A	7.5	278	4.64	9	67	42.0
	B	6.8	158	3.98			
	C	11.9	341	8.25			
2	A	9.2	260	4.89	9	68	41.7
	B	11.0	289	5.84			
	C	8.0	217	4.17			
3	A	13.6	372	7.11	13	74	46.2
	B	24.7	692	13.07			
	C	24.3	798	13.82			
4	A	10.0	316	5.62	9	70	37.1
	B	11.0	309	5.53			
	C	6.3	184	3.40			
5	A	10.0	298	5.46	9	71	43.5
	B	8.3	251	3.39			
	C	16.1	470	8.70			
6	A	11.1	319	5.87	11	69	40.0
	B	12.2	345	6.49			
	C	10.3	358	6.07			
7	A	12.0	301	5.01	11	70	40.1
	B	12.0	429	7.17			
	C	6.8	196	3.65			
8	A	8.5	205	4.17	9	68	36.4
	B	9.4	234	4.69			
	C	4.4	113	2.23			
9	A	7.5	192	3.79	9	71	37.4
	B	10.5	316	5.76			
	C	12.0	359	6.58			
10	A	7.0	245	4.14	9	70	40.7
	B	11.5	310	5.97			
	C	17.0	635	10.29			

(○) 転倒, (●) 滑動

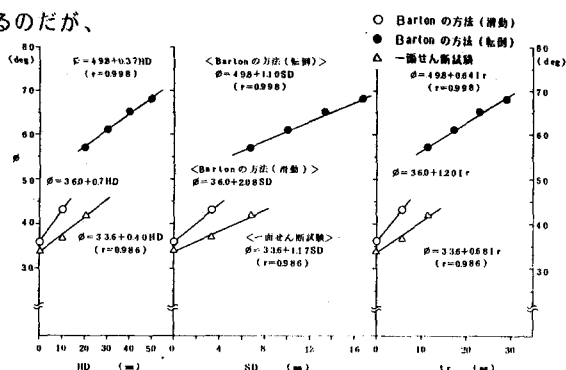


図-6 φと粗度の指標との関係 (石こうブロック)

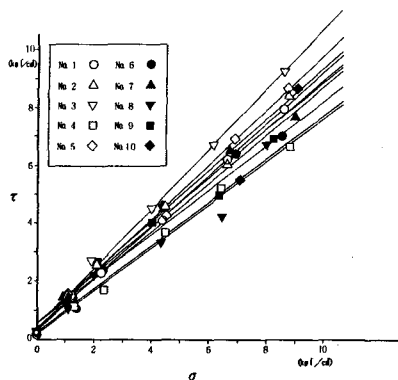


図-7 一面せん断試験結果 (岩盤ブロック)

を得た。

表-3 SDとφとの相関係数の
代表値のとり方による違い

代表値のとり方	φ	
	Bartonの方法	一面せん断試験
① $\frac{A+B+C}{3}$	0.834	0.747
② $A, B, C \text{ の } \max$	0.787	0.717
③ $\frac{A+B+C+D+E+F}{6}$	0.804	0.621
④ $\frac{2(A+BC)+(D+E+F)}{9}$	0.834	0.689
⑤ $\frac{3(A+BC)+(D+E+F)}{12}$	0.839	0.712

5. 考察

今回、規則的な粗度をもつ石こうブロックと不規則な粗度の岩盤ブロックを用いて試験を行ったが、いずれの場合もBartonの方法の方が一面せん断試験より内部摩擦角φの値が大きくなっている。一般に垂直応力が大きくなる程φが小さくなる傾向にある。したがってφの値の差は、一面せん断試験が最大9 kgf/cm程度まで垂直応力をかけているのに対し、Bartonの方法は垂直応力がきわめて小さい(0.01 kgf/cm程度)ためであると考えられる。そこでBarton

nの方法のφは垂直応力の小さい斜面に適用できるが、垂直応力が高い時(例えば地下空洞)は一面せん断試験のφを用いるのがよいと考えられる。

またBartonの方法については、滑動と転倒の2種のパターンがあるが、その境界は図-6及び図-8を比較検討してみると、高低差HDで15mm程度、標準偏差SDで5mm程度、 I_r で8mm程度が目安と考えられる。なおこれは28cmの供試体の場合であり、供試体の寸法に影響されるものである。また代表値のとり方の項で述べたように、せん断方向に直角方向の粗度は考慮しなくてもよいと考えられる。

今回の岩盤ブロックを用いた試験で、簡易に測定できるHD・SD・ I_r 指標とφとの間にかかなりの相関が認められたことから、実岩盤の節理面のφのオーダーの推定にはこれらの指標が役立つと思われる。例えば、垂直荷重がきわめて小さい場合のφは65~75°の範囲に、垂直荷重が大きい場合のφは35~50°の範囲に粗度の状況に応じて決められそうである。

次に粘着力Cについては、石こうブロック・岩盤ブロック試験ともほぼ0という値が出ており、解析に用いる場合は節理面のCは0とみなしてよいと考えられる。

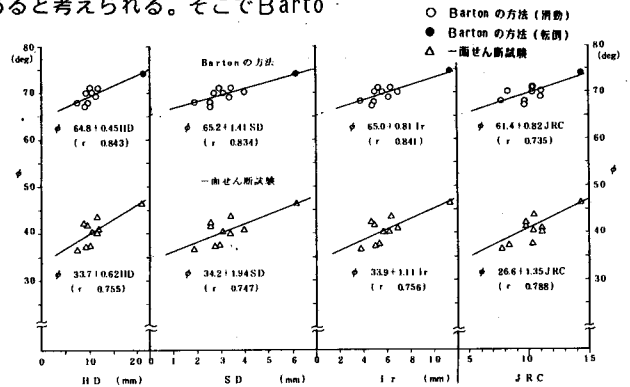


図-8 φと粗度の指標との関係(岩盤ブロック)

6. おわりに

今回、石こうブロック及び岩盤ブロックを用いた室内試験により、節理面物性と粗度との関連を検討したが、簡易に測定できる粗度の指標とφとの間にかかなりの相関が認められたことによって、φのオーダーの推定が可能になったとともに、Cはほぼ0とみなしてよいことがわかった。

今後の課題としては、より垂直応力が高い領域での試験や寸法効果の問題であり、また残された節理要素である充填物についても検討を加える必要がある。これにより、解析に用いる節理面物性をより的確に把握し、節理の幾何学的性状のモデル化と合わせて、岩盤節理モデルをより現実的なものに近づけていきたい。

参考文献

- 1) 三宅俊昭、小林隆志、菊地宏吉、永井博史、稲生道裕、加藤克行、上野勇武：岩盤内の節理分布性状の定量的評価とモデル化に関する検討、第6回岩の力学国内シンポジウム(1984)
- 2) 三宅俊昭、小林隆志、菊地宏吉、稲生道裕、塩釜幸弘：節理性岩盤のモデル化における節理の組合せ及び節理面粗度の検討、第17回岩盤力学シンポジウム(1985)

(30) A Study on the Relationship between
Shear Strength and Joint Roughness

M.Fujieda and H.Shimizu
(Tokyo Electric Power Services Co., Ltd)

H.Nagai and M.Inou
(Kajima Institute of Construction Technology)

For examining the stability of underground cavern and slope, it is necessary to treat for discontinuous rock mass. Recently the analyzing methods of discontinuous rock mass, i.e. DEM, RBSM and so on, are noticed. At times using these methods, it is important to model of jointed rock mass. For the modelling, it is necessary not only to know the joint distribution, but also to estimate the shear strength of joint plane.

In this paper, we examined the relationship between shear strength and joint roughness. For the purpose, the laboratory tests (Barton's method and shear test) using the specimens of plaster and rock were carried out, and the shear strength (C, ϕ) was calculated. While the roughness of the specimens was quantitated by the following indexes we had proposed.

- a. HD(The difference of height) : the vertical distance of top and bottom point for the standard line of unit length
- b. SD : the standard deviation of vertical distance data of standard line and joint plane
- c. $I_r = \sqrt{HD \times SD}$

The results obtained are summarized as follows.

- 1) The internal friction angle ϕ calculated by Barton's method is larger than ϕ calculated by shear test in spite of the kind of specimens.
- 2) It has a correlation between the indexes (HD, SD, I_r) and ϕ on the test using rock specimens. Consequently these indexes are useful to estimate ϕ of joint plane on actual rock mass.
- 3) It is cleared that the cohesion C of joint plane is nearly zero as the result of shear test.

Further study on the scale effect and larger normal stress should be carried out. Consequently we aim to make the rock joint model more realistic.