



不連続性岩盤の調査・解析と評価

3. 不連続面の調査と評価（その2）

島内 哲哉 (しまうち てつや)

明治コンサルタント(株)技術部

中井 卓巳 (なかい たくみ)

(株)アーステック東洋地質部

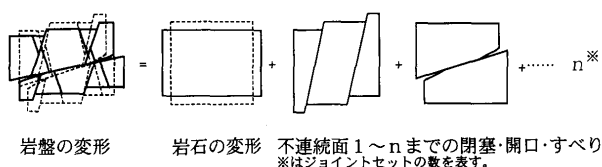
3.5 不連続面の变形と強度に関する試験と評価

3.5.1 解析に必要な物性と試験法

岩盤の变形は、図—3.15に示すように、岩石自体の变形と、岩石中に存在する不連続面の変位（開口・閉塞・すべり）によって生ずる。その挙動を支配する不連続面の性質は、粗さと壁面強度、充填物の有無である。

4章以後で解説される各種の解析法は、手法によって相違はあるものの、表—3.5に示すように岩石と不連続面の物性を分けて扱うことを基本としている。本稿では、このうち、不連続面の試験や評価を中心に概説する。岩石の試験法については、例えば「岩の調査と試験」（土質工学会編）¹⁾などを参照されたい。

不連続面の代表的な試験法を、表—3.6にまとめた。不連続面の性質は、充填物による影響が大きいため、その有無によって、試験や評価の方法が異なる。また、重要度の高い構造物では原位置試験を行うこともあるが、通常はコストなどの問題から、室内試験が中心である。

図—3.15 中規模不連続面による岩盤の变形の概念²⁰⁾

表—3.5 不連続性岩盤解析に必要な基本パラメーター

	岩 石	不連続面(n個)
単位体積重量	○	
弾性係数	○	
ポアソン比	○	
粘着力	○	
内部摩擦角	○	○
垂直剛性		○
せん断剛性		○

表—3.6 不連続面の变形と強度を求める代表的な試験方法

区 分	試 験 方 法	変 形※	強 度	摘 要
不連続面試験	粗さ計測試験	—	○	大規模不連続面～中規模不連続面
	壁面強度試験	—	○	
	原位置せん断試験	—	○	
	一面せん断試験	○	○	主に中規模不連続面
	三軸圧縮試験	○	○	
	一軸圧縮試験	○	—	
室内試験	粗さ計測試験	—	○	垂直剛性のみで、別途補正が必要 レーザー変位計などによる。
	壁面強度試験	—	○	
	チルト試験	—	○	
	標準貫入試験	△	△	
充填物試験	原位置試験	○	△	主に断層粘土などの变形強度特性を調べる。
	孔内水平載荷試験	○	○	
	原位置せん断試験	○	○	
	三軸圧縮試験	○	○	
室内試験	一面せん断試験	—	○	

○ 直接の情報 △ 間接の情報 ※ 変形は、垂直剛性とせん断剛性を示す

試料は、地下空洞や岩盤斜面などでは、ブロックを切り出して供試体とすることもありますが、一般には試料の整形や採取位置（特に深度）の制約が大きいため、ボーリングコアを用いることが多い。また、どうしても試料が採取できない場合には、不連続面を含む落下岩塊などから、目的を満足する試料を選別することもある。いずれの場合も、間隙幅やかみ合わせの状態などについて、事前に十分な観察を行っておくことが重要である。なお、ブロックの安定問題では、それにかかわる特定の不連続面の強度を調べるのが目的となるが、変形解析を目的とする場合には統計論的に処理された各ジョイントセット毎の代表値を調べることになる。試料採取時には、あらかじめ設計や施工で想定される変形や破壊の方向を基に、試験時のせん断方向を決めておかなければならない。

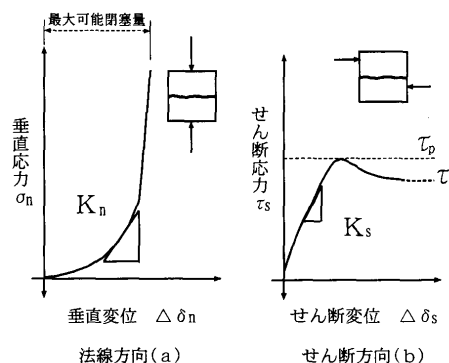
3.5.2 不連続面の变形試験と変形特性の評価

(1) 調査・試験法

不連続面の变形特性は、不連続面に垂直な方向の圧縮変形特性（垂直剛性）と、平行な方向のせん断変形特性（せん断剛性）で表される。

垂直剛性（ K_n ）は、一軸圧縮試験時の垂直応力と垂直変位の関係を表す曲線の勾配から求められる（図—3.16 (a)）。ただし、この方法で計測される垂直変位には、不連続面と岩石自体の両方の変位が含まれるため、別途岩石自体の試験を行って、不連続面自体の変形量を求める必要がある。不連続面が完全に閉塞した時の変形量を最大可能閉塞量と呼ぶ。この値は、現地で観察される間隙幅より小さい⁴⁾。

不連続面のせん断変形特性は、せん断剛性（ K_s ）で表され、一面せん断試験時のせん断応力とせん断変位の関係を表す曲線の勾配から求められる（図—3.16 (b)）。

図—3.16 不連続面の变形特性²⁰⁾

講 座

(2) 変形特性と評価

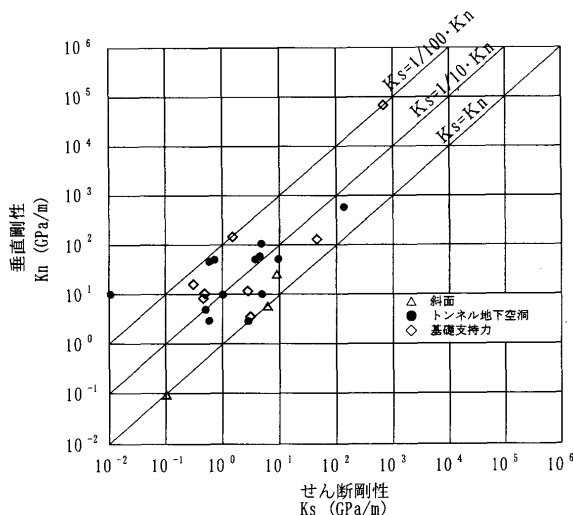
垂直剛性とせん断剛性は、岩盤の変形解析において、閉塞とすべりを表現する物性値である。試験や評価に当たっては、いずれも応力依存性が顕著であることから、設計や施工で想定される応力やひずみの大きさに十分注意する必要がある。図—3.17は、既往の文献をもとに、垂直剛性 (K_n) と、せん断剛性 (K_s) を、施工の問題別にプロットしたものである。一般的には、 $K_s = K_n$ とされる¹⁰⁾が、斜面では $K_s = K_n \sim 1/10 \cdot K_n$ の範囲に、トンネルや地下空洞では $K_s = 1/10 \cdot K_n$ を中心として $K_s = K_n \sim 1/100 \cdot K_n$ の広い範囲にばらついている。経験的に、 $K_s = 1/10 \cdot K_n$ を推奨する報告もあるが¹¹⁾、現在のところは解析者の判断に委ねられている。

不連続面による岩盤の変形は、閉塞やすべりのほかに、開口によっても生ずる。地下空洞掘削に際して、不連続面の変位を開口変位として捉えた例では、岩盤の変位に占める不連続面の開口変位は火成岩で60%以上、堆積岩では20%以上という報告がある⁴⁾。変形特性にも、岩種や成因による特徴のあることが伺える。

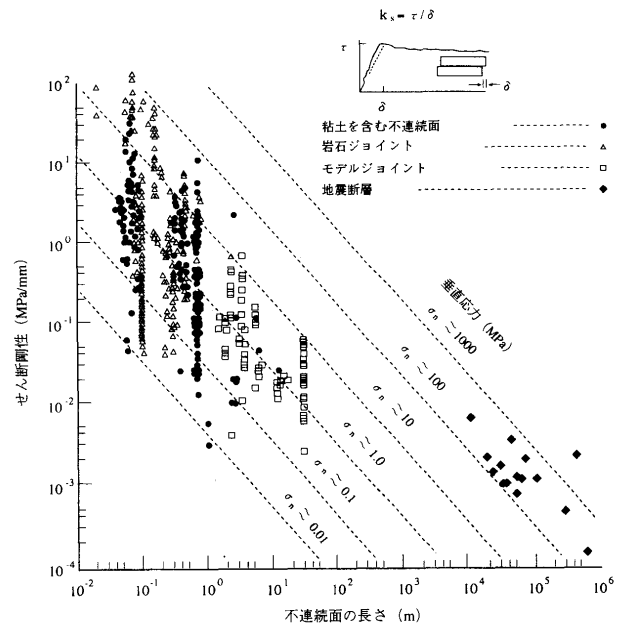
なお、不連続面のせん断剛性は、せん断長さが長くなるにつれて減少する (図—3.18⁴⁾)。垂直剛性にも、同様の効果のあることが知られている⁴⁾。

3.5.3 不連続面のせん断モデル

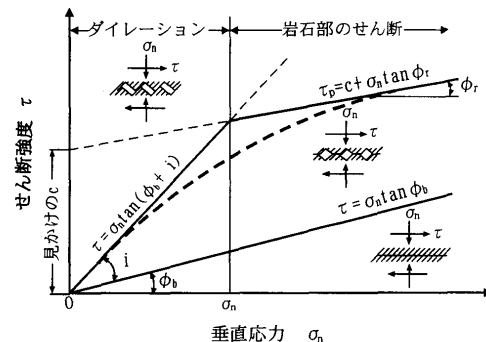
不連続面は、引張り強度が無視できるほど小さいので、その強度は主に、せん断強度や圧縮強度によって規定される。図—3.19²⁾は、せん断試験時の、せん断応力と垂直応力との関係を模式的に示したものである。平滑な不連続面を持つ供試体のせん断試験では、せん断応力と垂直応力の関係は原点を通る直線で表され、この直線の傾きを基本摩擦角 (ϕ_0) と呼ぶ。せん断試験の初期には、不連続面の粗さやかみ合わせの状態に応じた抵抗角 (i) が基本摩擦角に加わる。この時、粗さの凹凸の部分乗り越えるために、せん断方向だけでなく、垂直方向にも変位を生じる。この初期の段階をダイレクションと呼んでいる。さらにせん断変形が進行し、ピークせん断強度



図—3.17 垂直剛性とせん断剛性の関係
(既往文献資料より)



図—3.18 せん断剛性の寸法効果 (BANDIS ら, 1983)⁴⁾



図—3.19 不連続面のせん断モデル²⁾

(τ_p) を越えると、凹凸部の破壊が始まり、岩石としてのせん断変形に転ずる。この後、抵抗角 (i) は減少し、最終的に残留摩擦角 (ϕ_0) となる。もちろん、実際のせん断強度と垂直応力の関係はこれほど単純ではなく、粗さの程度や壁面強度の影響を受け、図—3.19中の太い点線で表したような非線形な関係を示す。一般に、垂直応力 (拘束力) や粗さの凹凸部の強度が大きくなるほど、ダイレクションの影響は減少し、せん断強度は増加する。

3.5.4 不連続面の強度試験と強度特性の評価

(1) 調査・試験法

不連続面のせん断強度は、一面せん断試験や三軸圧縮試験などから求められるが、同一の不連続面を持つ複数の供試体を準備することは一般には難しい。このため近年では、同一供試体で試験が可能な、多段階一面せん断試験や多段階三軸圧縮試験などの利用も増えている。

一方、不連続面のせん断強度は、粗さの程度や壁面強度と密接な関係がある。このような関係を利用してせん断強度を求める経験的方法に、Barton (パートン) の式がある^{4), 18)}。本方法は、岩盤斜面や地下空洞などを中心に、広く用いられている。

$$\tau = \sigma_n \tan \{ \phi_r + \text{JRC} \cdot \log_{10} (\text{JCS} / \sigma_n) \} \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

ここに τ : せん断強度

σ_n : 不連続面にかかる垂直応力

ϕ_r : 残留摩擦角 (ϕ_b とする場合もある)

JRC : 粗さ係数

JCS : 壁面強度

ただし、本式は $\sigma_n \leq \text{JCS}$ 、また $\sigma_n \leq \text{JCS}/100$ の場合には $\tau = \sigma_n \tan 70^\circ$ 、という条件のもとで有効である。

1) 粗さと壁面強度を求めるための試験

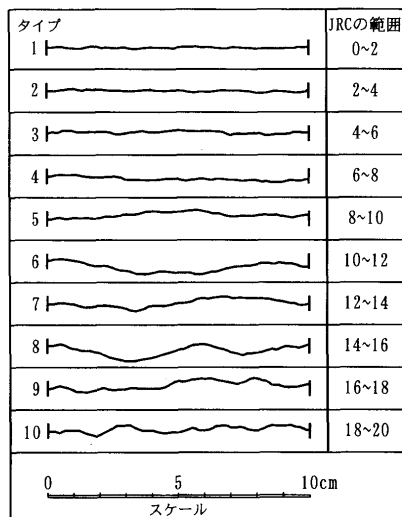
ISRM 指針³⁾では、不連続面の粗さの断面形状を、0~20の粗さ係数 (JRC: Joint Roughness Coefficient) で表している (図—3.20)。JRC は、供試体断面の粗さ形状と図—3.20を、目視で対比して求めるが、近づくと粗く、離れると滑らかに見えるため、正確にとらえることが難しい。このため、JRC と相関がよいとされる指標 (例えば粗さの勾配、フラクタル次元など) を導入し、定量化する方法も研究されている³⁾。一方、現場で不連続面が確認できるなら、図—3.21を用いて、供試体より大きなスケールの粗さ (起伏) を計る方法もある。測定長を、現場の不連続面の波状の特徴に合わせて任意に選択 (0.2~1.0 m 位で測定) できるため、より現場を反映した JRC を求めることができる。

なお、せん断強度には異方性があるが、ここで述べた方法では考慮できない。異方性を考慮する場合には、室内せん断試験や、後述するチルト試験によらなければならない。

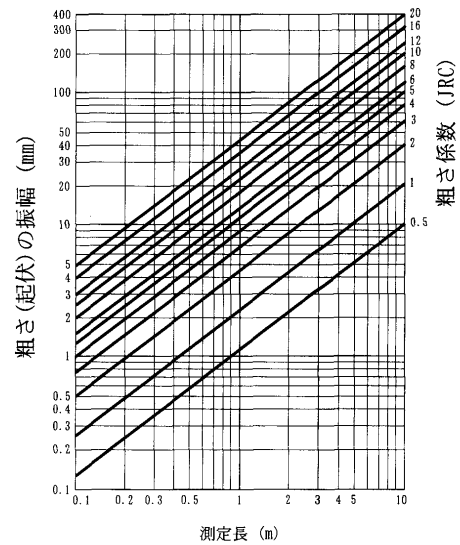
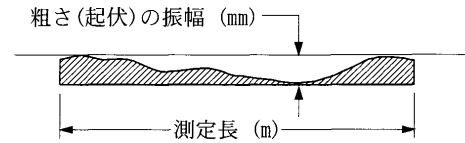
壁面強度 (JCS: Joint Wall Compression Strength) は、粗さの凹凸部分の破壊にかかわる強度であり、不連続面に垂直な方向の、シュミットハンマー反発度から求められる³⁾。試験が行えない場合は、岩石の一軸圧縮強度の 1/4 程度を目安とすることが推奨されている⁶⁾。

なお、JRC, JCS とともに、その寸法 (せん断長さ) の影響が、大きいことが知られている。Barton らは、その補正の方法を以下のように提案している^{5), 6)}。

$$\text{JRC}_n \approx \text{JRC}_0 (L_n / L_0)^{-0.02 \cdot \text{JRC}_0} \quad \dots\dots\dots (3.2)$$



図—3.20 粗さ形状と JRC 値の範囲³⁾



図—3.21 粗さ (起伏) の山と山の間の振幅から JRC を求める方法 (Barton 1982)²¹⁾

$$\text{JCS}_n \approx \text{JCS}_0 (L_n / L_0)^{-0.03 \cdot \text{JCS}_0} \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

L_n : 実際の不連続面の測定長

L_0 : 室内試験での測定長 (10 cm)

$\text{JRC}_n, \text{JCS}_n$: 不連続面の測定長を考慮した JRC と JCS

$\text{JRC}_0, \text{JCS}_0$: 室内試験 (測定長 10 cm) で求めた JRC と JCS

2) 摩擦角を求めるための試験

残留摩擦角 (ϕ_r) は、大せん断変位後の摩擦角であるが、室内試験では求められないことも多い。Barton は、 ϕ_r と不連続面の風化による劣化との関係を調べ、以下のような経験式を提案している⁹⁾。

$$\phi_r = (\phi_b - 20) + 20(r/R) \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

ここに r : 風化した飽和状態の不連続面におけるシュミットハンマー反発度

R : 乾燥した新鮮な岩盤表面におけるシュミットハンマー反発度

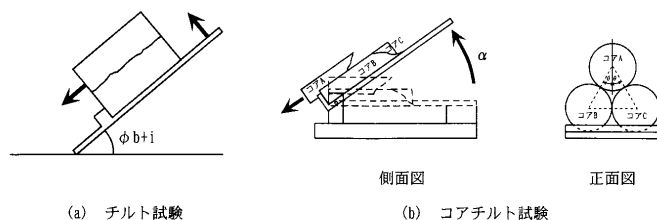
ϕ_b : 基本摩擦角

基本摩擦角 (ϕ_b) は、図—3.22に示すチルト試験から求められる。不連続面を挟んだ 5~10 cm 四方程度のブロックサンプリング試料の下半分を固定し、上半分がすべり始めた時の角度がピーク摩擦角 (ϕ_{b+i}) である (図—3.22(a))。この試験を、プレカットした滑らかな面で行うことで、基本摩擦角 (ϕ_b) が求められる。ボーリングコアの表面が滑らかであれば、図—3.22(b)に示すような方法により次式を用いて求めることも可能である⁷⁾。

$$\phi_b = \tan^{-1} (1.155 \tan \alpha) \quad \dots\dots\dots (3.5)$$

ここに α : 最上部のボーリングコアがすべり出す時の角度
また、Barton は、過去の様々な実験データから、種

講 座



図—3.22 チルト試験

表—3.7 様々な岩石の基本摩擦角 (Barton 1973)

岩石名	含水条件	垂直応力 (MPa)	基本摩擦角 (°)
角閃岩	乾燥	0.1~4.1	32
玄武岩	乾燥	0.1~8.3	35~38
玄武岩	湿潤	0.1~7.7	31~36
礫岩	乾燥	0.3~3.3	35
チョーク	湿潤	0.0~0.4	30
ドロマイト	乾燥	0.1~7.1	31~37
ドロマイト	湿潤	0.1~7.1	27~35
片麻岩	乾燥	0.1~7.9	26~29
片麻岩	湿潤	0.1~7.7	23~26
片麻岩	乾燥	0.1~7.4	31~35
花崗岩	乾燥	0.1~7.3	29~31
花崗岩	湿潤	0.1~7.2	31~35
花崗岩	乾燥	0.1~7.4	31~33
花崗岩	湿潤	0.0~0.5	33~39
石灰岩	乾燥	0.0~0.5	33~36
石灰岩	湿潤	0.1~7.0	37~40
石灰岩	乾燥	0.1~7.0	35~38
石灰岩	湿潤	0.1~8.1	37~39
班岩	乾燥	0.1~8.1	35
班岩	湿潤	0.0~1.0	31
班岩	乾燥	4.0~13.0	31
砂岩	乾燥	0.0~0.5	26~35
砂岩	湿潤	0.0~0.5	25~33
砂岩	乾燥	0.0~0.3	29
砂岩	湿潤	0.3~2.9	31~33
頁岩	乾燥	0.1~6.7	32~34
頁岩	湿潤	0.1~7.2	31~34
頁岩	乾燥	0.1~0.3	27
頁岩	湿潤	0.1~0.3	31
シルト岩	乾燥	0.1~7.4	31~33
シルト岩	湿潤	0.1~7.1	27~31
粘板岩	乾燥	0.0~1.1	25~30

々の岩石の基本摩擦角を、表—3.7のようにまとめている。

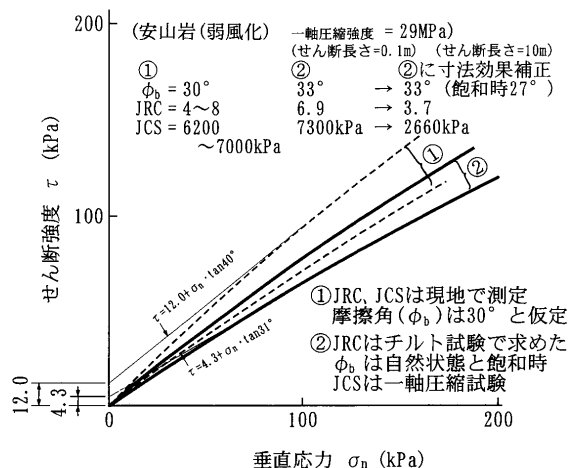
なお、式(3.1)中の残留摩擦角は、新鮮な不連続面を対象とする場合には、 $\phi_r = \phi_0$ として扱われる。直接 ϕ_r を求めることが困難な場合には、飽和時の ϕ_0 を参考に、 ϕ_r を推定するとよい。

(2) 強度特性と評価

Bartonの方法は、低いコストで容易にせん断強度を求められる便利な方法である。しかし、各パラメータの決定には注意も必要である。図—3.23は、くさび型崩壊発生後の、崩壊面（傾斜 40°）のせん断強度を求めた例である。各パラメータは、試験の方法や供試体の含水条件によって、大きく変動する。寸法効果、すなわちブロックサイズの影響も無視できない。

各パラメータには、例えば堆積岩（特に層理面）では粗さの効果は低く、火成岩や深成岩では高い、といった傾向もみられる。しかし、現段階では、岩種や成因による違いや特徴は、必ずしも明らかではない。このため、既にせん断変位を生じた不連続面は、残留強度にまで低下している、といった調査結果に基づく判断によって、試験の目的や条件を決めることが重要である。

なお、設計時のせん断強度は、崩壊面の傾斜が緩い場合には、粘着力（ c ）と摩擦角（ ϕ ）で評価することが多い。しかし、急崖をなす岩盤斜面のように崩壊面が急



図—3.23 Bartonの方法により求めたせん断強度（例）

な場合には、 ϕ_0 や ϕ_r のみで評価することもある。

Bartonの方法では c と ϕ は、ブロックの規模に対応する垂直応力の、放物線上の接線から求めることになる。詳しくは、文献6),8),あるいは<http://software@rock-science.com>などを参照されたい。

3.5.5 充填物による不連続面の変形および強度特性への影響

不連続面の強度を支配する重要な要因の一つに、充填物がある。充填物を含む不連続面の物理的な性質は、充填物の鉱物学的性質、粒度分布、過圧密の程度、含水比と透水性、過去の応力履歴、壁面粗さ、間隙幅、壁面の破碎状況など、多くの要因に依存している³⁾。しかも、充填物は、その厚さが数 mm 程度であっても、不連続面の強度や変形性を著しく低下させる（図—3.24）。充填物がある場合の強度や変形性を推定することは難しいが、露頭や掘削斜面で直接充填物の状況を観察できれば、式(3.6)によって推定することもできる⁵⁾。

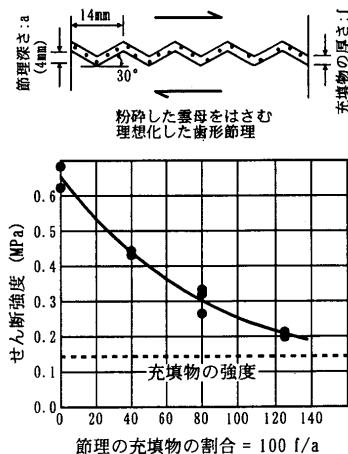
$$\phi_r = \tan^{-1}(J_r/J_a) \quad (3.6)$$

ϕ_r : 不連続面の接触状態や挟在物の介在によって異なる摩擦角

J_r : 不連続面の粗さ係数（表—3.8a）

J_a : 不連続面の変質係数（表—3.8b）

一方、断層破碎帯などの大規模不連続面でも、その強度が問題となる。試料の採取が可能な場合には、不攪乱

図—3.24 充填物の厚みとせん断強度の関係^{4), 6)}

表—3.8 不連続面の粗さ係数 (J_r) と変質係数 (J_a)¹⁷⁾

不連続面の粗さ係数	J_r ※
連続していないジョイント	4.0
粗い、波状のもの	3.0
なめらかな、波状のもの	2.0
粗い、平面的なもの	1.5
なめらかな、平面的なもの	1.0
すべすべした、平面的なもの	0.5
「充填された」不連続面	1.0

※ もし平均ジョイント間隔が3m を越える場合には1.0 を加える。

充填物および壁面の変質係数	J_a
a) 本質的に充填されていない場合	
癒着した(healed) 場合	0.75
ひずんでいるだけ；変質していない場合	1.0
シルト質あるいは砂質の被覆	3.0
粘土質被覆	4.0
b) 充填されている場合	
砂あるいは砕岩の充填物	4.0
堅い粘土の充填物(<5mm 厚さ)	6.0
柔らかい粘土の充填物(<5mm 厚さ)	8.0
膨潤した粘土の充填物(<5mm 厚さ)	12.0
堅い粘土の充填物(>5mm 厚さ)	10.0
柔らかい粘土の充填物(>5mm 厚さ)	15.0
膨潤した粘土の充填物(>5mm 厚さ)	20.0

試料による試験を行うことが望ましい。しかし、横坑や掘削施工時のように、直接観察が可能な場合を除けば、事前調査の段階で充填物の試料が得られることはまれである。あらかじめ破碎帯が想定される場所でボーリングする場合、破碎帯幅が厚ければ、孔内水平載荷試験や標準貫入試験などによって推定するのも、一つの方法である。

3.6 不連続性岩盤の透水性に関する調査

3.6.1 不連続面中の水の流れ

岩盤では、岩石部分を通過する流れがきわめて小さく、不連続面を通過する流れが岩盤全体の流れを支配する。その浸透流は、一様な間隙幅を持つ不連続面中を流れるものとして、解析されるのが一般的である^{4),6)}。

しかし、実際の不連続面は、粗さや間隙幅も一定でないうえ、接触の状態も場所によって異なる。当然、流れの状態も、その状況に応じて変化する。図—3.25は、花崗岩中の不連続面の流れの状態を、ボーリング孔から超微粒子セメントグラウトを行った後岩盤を掘削して、不連続面上の流路を調査した例である¹²⁾。この図から、不連続面内の複雑に入り組んだ浸透流路の様子が読みとれる。このような岩盤不連続面中の選択的な流れを、水みちあるいはチャンネル流れと呼んでいる。

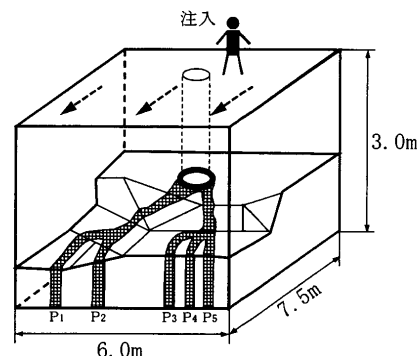
実際の岩盤中の浸透流は、不連続面相互の連結状態も大きく影響するため、さらに複雑な水みちを形成し、流れていると考えられる。

3.6.2 モデル化のための調査と水みちに関する近年の知見

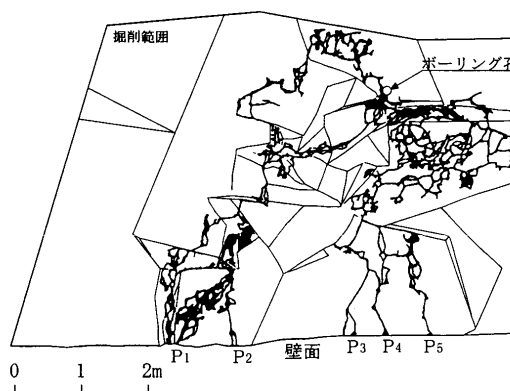
(1) モデル化のための調査の考え方

これまで、不連続面を決定論的および統計論的にモデル化することを述べたが、浸透の問題においても同様に考えられる。すなわち、決定論的に分布を決定する大規模不連続面については水みちという概念をあてはめ、統計論的に処理する中小規模不連続面では連続体としての透水性をあてはめて考える。

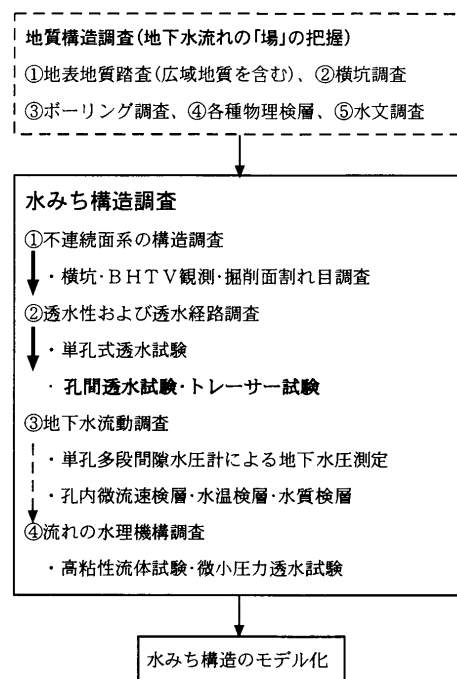
図—3.26は、ダムサイトでの、水みち構造調査のため



(a) 透水試験および流露調査



(b) 確認されたチャンネル流れ ((a)を上から見た図)

図—3.25 グラウト実験により確認されたチャンネル流れ¹²⁾図—3.26 水みち構造調査の例¹³⁾

のフローの例¹³⁾である。調査は、まず地質構造調査によって、不連続面の分布を把握することから始める。次いで、透水経路の調査によって水みちを把握し、最終的に、水みちのネットワークによる解析モデルを構築することを目指している。その際、水みち相互の連続性や連結状態と透水性の把握が重要となるが、このための調査法として、孔間透水試験¹⁴⁾やトレーサー試験などが試みられている。

講 座

一方、大規模地下空洞における調査では、大小の不連続面と透水性の関係を、直に観察して調査できるという利点がある。岡本ら(1993)は、空洞壁面の不連続面の分布状態と透水性の関係を、主として中小規模不連続面の幾何情報に基づくクラックテンソルの手法を用いて調べ、地下空洞での高透水性ゾーンの範囲設定に活用している¹⁵⁾。この手法は、不連続面を統計論的に処理して、連続体としての透水性を求める方法である。

(2) 断層構造の解釈によるモデル化への援用

空洞壁面での不連続面と透水性の関係を、地質構造的観点から、決定論的に調査しようとする試みがある。これは、図—3.27に示すような横ずれ断層の不連続部や、断層終端にみられるステップやスプレイなどの、引張り(解放)の応力場にかかわる断層構造が水みちを形成しやすい、という点に着目したものである¹⁶⁾。水みちのモデル化にあたっては、浸透経路を面ではなく交差線部、すなわちパイプ状の水みちを考えている。このような断層構造の存在を、事前の調査によって推定し、水みちとの関係を明らかにすることは、通常はきわめて困難である。しかし、水みちを形成しやすい不連続面と地質構造との間に、何らかの規則性が見いだせれば、岩盤を対象とした透水性調査の一つの手がかりともなるため、今後の研究が注目される。

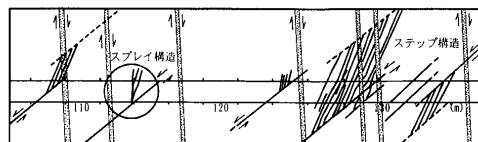
3.7 おわりに

前回および今回と、岩盤の不連続面に着目したモデル化のための調査やデータの整理方法と、変形・強度特性や透水性について概説した。不連続面に関し、より詳しい内容を知りたい場合は、文献¹⁷⁾、¹⁸⁾を参照されたい。なお、本稿では、通常の岩盤調査でしばしば問題となる、不連続面が載荷試験や一軸圧縮試験などの結果に与える影響については触れていない。これについては、文献¹⁹⁾が参考となる。

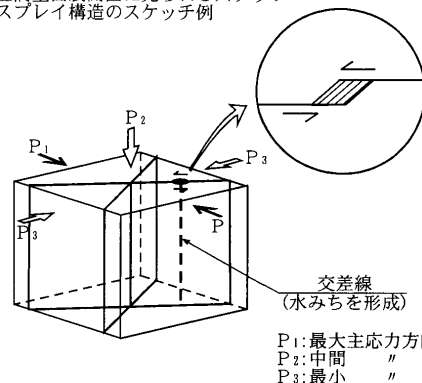
本来、それぞれの不連続面には、地質的成因がある。したがって、岩盤中の不連続面を扱う限り、地質に関する基本的知識無くして、適切な解析を行うことは困難である。しかしながら、その地質的知識を解析に的確に反映させるためには、解析技術に熟知することも必要となる。この意味でも、調査技術者と解析技術者との緊密な連携が重要である。

参 考 文 献

- 1) 土質工学会：岩の調査と試験，土質工学会編，1989。
- 2) 吉中龍之進・小野寺透：岩盤分離面の表面形状とせん断強さとの関連，土と基礎，Vol. 24, No. 1, pp. 7~12, 1976。
- 3) 岩の力学連合会：ISRM 指針，岩盤不連続面の定量的記載法，Vol. 3, 1985。
- 4) 地盤工学会，岩の力学委員会：不連続性岩盤と構造物に関する研究報告書，1995。
- 5) Barton, N. (伊藤 淳訳)：ノルウェートンネル工法(NMT)の概要(UDEC-BBと3DECを用いたNMTの設計検証のための数値モデル化)，トンネルと地下，Vol. 26, No. 12, pp. 37~51, 1995。
- 6) 土木学会：岩盤斜面の調査と対策，1999。



空洞壁面展開図に見られるステップ・スプレイ構造のスケッチ例



図—3.27 空洞観察結果によるステップ・スプレイ構造の例と，ステップ構造の模式図¹⁶⁾

- 7) Stimpson, B.: A Suggested Technique for Determining the Basic Friction Angle of Rock Surfaces Using Core, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr., Vol. 18, pp. 63~65, 1980。
- 8) Priest, Stephen D.: Discontinuity Analysis for Rock Engineering, Chapman & Hall, 1993。
- 9) Barton, N. and Choubey, V.: The shear strength of rock joints in theory and practice, Rock Mechanics, Vol. 10, pp. 1~54, 1977。
- 10) 西松裕一：岩盤力学，東京大学出版会，p. 169, 1999。
- 11) 蔣 宇静・江崎哲郎・金子和宏・野崎明人・笹田俊治：自然の岩盤不連続面のせん断特性の実験的評価，第10回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，pp. 73~78, 1998。
- 12) 菊地宏吉・水戸義忠：節理性岩盤の幾何学的モデルを用いた浸透流解析に関する現場実験の検討，土と基礎，Vol. 40, No. 11, pp. 416~421, 1992。
- 13) 杉村淑人・森田 豊・渡辺邦夫：ダム基礎岩盤の水みち構造把握の試み，土木学会論文集，No. 582/III-41, pp. 229~246, 1997。
- 14) 杉村淑人・森田 豊・渡辺邦夫：孔間透水試験圧力応答パターン水みちネットワークモデル数値実験による検討，土木学会論文集，No. 596/III-43, pp. 223~237, 1998。
- 15) 岡本 淳・有 元平・山本和彦・大津宏康：菊間地下石油備蓄基地建設工事での空洞掘削に伴う地下水挙動に関する検討，土木学会論文集，No. 480/VI-21, pp. 33~42, 1993。
- 16) 渡辺邦夫：地下水研究に関する最近の話題—特に岩盤浸透流の場の評価について—，土と基礎，Vol. 43, No. 9, pp. 1~5, 1995。
- 17) グッドマン，R. E. (赤井浩一・川本昴万・大西有三訳)：不連続性岩盤の地質工学，森北出版，1978。
- 18) フック，ブレイ (小野寺透・吉中龍之進訳)：岩盤斜面工学，朝倉書店，1979。
- 19) 川本昴万・吉中龍之進・日比野 敏：岩盤力学，土木学会編，新体系土木工学20，技報堂出版，1985。
- 20) 佐々木猛・吉中龍之進・永井文男：有限要素法による節理性岩盤の複合降伏モデルに関する研究，土木学会論文集，No. 505/III-29, pp. 59~68, 1994。
- 21) Barton, N. R. and Bandis, S. C: Effects of block size on the shear behaviour of jointed rock. 23rd U. S. symp. on rock mechanics, Berkeley, pp 739~760, 1982。