弾性波探査による風化岩石の Rippability についての研究

林 田 精 郎

The study on the rippability of the
Weathered rocks with seismic soundings.

by Yoshiro Hayashida

(Abstract)

Since it is known that the progress of rock weathering lead to the decrease of its seismic Velocity, the seismic velocities of rock are used to decide the weathered grades of the rocks, and we can determine whether or not a weathered rock can be excavated with ripper.

This method is based on a correlation between seismic velocities and rippability. Rippable and nonrippable seismic Velocities are determined for the different types of rock.

はじめに

岩石は風化が進むにしたがってそのもつ弾性波速度は低下してゆくものである、この現象を逆に利用して風化岩石の弾性波速度を測定することによって、それらの風化程度を知り、掘削機械の選定を行うことができる。

Engineering Seismograph によって風化岩石の Rippability を測定することは時間的にもまた経済的にも有利であることから近年米国においては広く利用されているが、我が国ではいまだ研究もあまりされていない。Ripper — dozer の対象は風化岩石であるために、岩石そのもののなりたちかたもちがう上に、気候風土のちがいが風化のされかたにもかなりなちがいのある米国における研究結果をすぐにそのまま我が国で利用することは危険である。それで我が国の風化岩石によくあった Rippability Velocity chart を作製することがのぞまれる。といった考えから著者が今日までに経験したものをまとめてみた。これについて諸先輩の御批判、御指導を賜りたい。

測定器

風化岩石を掘削するための調査は探査対象深度が浅いことから dynamite を使用する従来の弾性波探査による必要はなく、いわゆる Engineering Seismograph を使用して浅部の細部探査をした方がよい。測定器そのものの作動原理や構造については既に報告があったので省略して、ここでは側定上特に問題になる点について記述する。この側定器は取扱上非常に簡便であるが Geophone が一個であることから従来の側定器のような側定法ではいい側定値を得ることはむずかしい。主たる注意事項は、Geophone のそばに立っている人がいないこと、風が強くないこと、Geophone の接地が完全であること、hammering の場所に厚いルーズな腐植土がないこと及び hammering の際に足でキックを出さないことなどが列記できる。Geophone の接地の良否はいろいろと問題があるが、著者は 10~20 cm 程度土層を切削して接地し、側定器を作動せしめて Gain Control を 0 ぐらいにして、1.0 m ぐらいの距離の地点を指で軽くたたいて作動するか否かをみて、作動すれば完全な接地とみなしている。こうすることによって接地が良くなるので Gain をあまりあげることなくして Noise による作動もしやすくなる。Gain を半分以上にあげないと Noise によって作動しないような不良な接地では普通の場合初動を catch することはむずかしく、第二動以下の伝播速度のおそい、振巾の大きな横波によって作動する結果となり、作動が不安定となって側定値のばらつきが大きく 1/2000 秒以内にばらつきをおさえることができず、誤差の大きな側定が行われることとなる。側定精度は走叶のばらつきの少い側定をすることによって向上するもので、本側定器の場合には側定値の最大と最小の差が 1/2000 秒以内であることがのぞましい。

hammering の距離が 10 m 以内である場合に hammering のとき足でキックを入れると、それが振動になって側定しようとする振動より先に geophone に到着することがある、これも側定値のばらつきを大きくすることとなり誤差の原因になるので注意しなくてはならない。こうした注意のもとに側定を行うと実に安定した Data が得られきれいな走時図を画くことができる。

hammering の距離が 20 m 以上になると初動と第二動とが観測されるようになることもある。この場合の第二動の走時は比較的安定しているが初動も観測できるので走時図を見誤って誤った地下構造を求めることは避けられる。

岩石の風化と弾性波速度の低下

岩石の風化現象については従来からいろいろと研究されてきている、それらによれば物理的な作用によるものと化学的な作用によるものに大別されている。これらの両風化作用は気候条件によって作用のしかたにちがいがあることも周知のとおりである。ここではこれらの風化作用について詳述する意志はなく、岩石が風化作用を受けた結果どのような風化岩石が生じ弾性波速度が

掘削現場

560m/sec.

640m/sec.

680m/sec.

870m/sec.

1380m/sec. none ripping

流紋岩の風化岩
(黒岡山)

第1表 測定値表 (Engineering Seismographによる)

North side									Time in Millisecond					
DISTANCE	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26 meter	
GAIN	2.5								3.0					
TIME	5.25	9.25	13.75	16.50	19.50	24.25	26.50	29.50	31.00	33.75	37.25	40.50	44.50	
	5.50	10.00	13.25	16.00	19.50	24.25	26.75	29.75	30.75	34.25	37.50	40.25	43.75	
	5.00	9.75	13.25	16.50	19.25	23.75	26.50	29.50	30.75	33.75	37.00	40.00	44.00	
	5.00	9.25	13.00	16.00		24.00	26.25	26.75	30.50	34.00	37.00		43.75	
							26.25							
AVERAGE TIME	5.00	9.50	13.25	16.25	19.50	24.00	26.50	29.50	30.75	34.00	37.25	40.25	44.00	
South side														
DISTANCE	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26 meter	
GAIN	2								4.5					
TIME	6.25	10.00	14.00	17.75	19.75	22.25	24.25	26.50	29.75	31.50	34.00	36.25	40.50	
	6.00	10.50	13.50	18.00	19.75	22.25	24.50	27.25	29.25	31.25	34.00	36.50	40.00	
	6.00	10.75	13.75	18.25	19.75	21.75	23.75	26.50	29.50	31.50	33.75	36.75	40.00	
		10.25		18.75		21.75	24.00	27.00		31.25	33.50	36.75	40.00	
							26.75	26.75						
AVERAGE TIME	6.00	10.50	13.75	18.25	19.75	22.00	24.00	26.75	29.50	31.50	33.75	36.50	40.00

第1図 測定値 (Engineering Seismographによる)

第2図 V, ϕ, α の關係(1)式による

第3図 V と ϕ の關係(2)式による

どのように低下してゆくかについて略述しようとするものである。Soil の部分については著者の研究目的とはちがった取扱いをしなくてはならないのでここでは記述しない。

風化作用は気候条件によって物理的な作用が優勢であったり、化学的な作用がそうであったりする他に作用を受ける岩石の種類によって何れかが優勢になることが多にみられる。

granite や gneiss, schist のように原岩の結晶構造をそのまま残して造岩鉱物が化学的に変質しているものとか、砂岩、頁岩のように造岩鉱物そのものはあまり変質せずに割れ目が多くなり細粒化してゆくものもある。砂岩、頁岩は化学的な風化に対して比較的安定であるが、granite や diorite などの火成岩類は化学的な風化作用によって変質しやすい鉱物を多く含有しているのでこのようになるが岩石は岩相の変化の著しいものもあるので、岩相のちがいは鉱物組成のちがいによることが多いことから風化の受けかたにもちがいが生ずる、granite や diorite などでは石英の多い岩相が boulder 状に風化岩の中に残っていることがある。このように岩石または岩相によって風化作用の受けかたがちがうことから結果的には種々の風化岩石の構造が生ずる。堆積岩では単層の厚さが風化岩石の構造に大きく影響することから、風化岩石の構造は原岩の構造にも左右されている。

砂岩、頁岩の風化岩石は岩石が破碎されて岩片の集合体ようになってゆき、各々の岩片は低風化で硬く弾性波速度も速いが、全体からみると空隙が多くなって弾性波速度は低下している、もし Wyllie の Average Velocity の式と同じかたちの式がこの場合にもあてはまるとすれば

$$\frac{1}{V} = \frac{1-\phi}{V_s} + \frac{\phi-\alpha}{V_a} + \frac{\alpha}{V_e} \dots\dots\dots(1)$$

なる式が成立する、ここに V は風化岩石の、 V_s は岩片の、 V_a は空気の、 V_e は水の弾性波速度で、 ϕ は岩石の割れ目の割合、 α は空隙をみたしている水の割合である。

$V_s=5700\text{m/sec}$, $V_e=1500\text{m/sec}$, $V_a=330\text{m/sec}$, として ϕ を 0.1 から 0.8, α を 0 から ϕ まで変化せしめて計算したのが第 2 図である。この式では割れ目を porosity と同等に考えていることに問題があろうが一応そのようにして考察してみる。

変化岩石の弾性波速度は ϕ と α とに関係している、 ϕ の増加は速度の減少を、 α の増加は速度の増大をまねく、このことから同じ程度に風化した岩石でも水による飽和の程度によって弾性波速度にちがいがでてくる。1500m/sec, より小さい弾性波速度をもつ砂層や砕層の場合に空隙の水による飽和度が顕著にそのものの速度に影響してくるが風化岩においてもそれは同じことである。

第 2 図で dry のときに 1000m/sec. 以下の領域になる ϕ は 0.3 より大きいものであるが、porosity が 0.3 より大きい領域では Wyllie の式で fresh Rock を取扱ったときに、計算値よりも実験値の方が速度が小さくでてくることから実験にはこの図に示されているよりも

少し小さい速度をもつものと判断される。

Shumwcy の式にならって割れ目が多い場合の風化岩の速度 V を

$$V = \frac{1}{[(1-\phi)\rho_s + \phi\rho_w][(1-\phi)C_s + \phi C_w]} \dots\dots\dots(2)$$

とする、ここに ϕ は(1)式と同じで、 ρ_s は岩片の密度の平均値、 ρ_w は水の密度、 C_s は岩片の圧縮率の平均値、 C_w は水の圧縮率である。

この(2)式は Loose に岩片が集合したものであるために Rigidity は考えられていない。

第3図は(2)式によって計算したもので、割れ目が多くなると(2)式の方が(1)式よりもより妥当なように考えられる。

岩片そのものの速度の低下による影響を考慮して(1)式を取扱うためには V_s を変化せしむればよいことになる。したがって風化の進行にしたがい V_s を小さくしてゆけばよいこととなる。

第4図はいろいろと V_s をかえて速度の変化をみたもので速度変化 V_s/V のかたちで示してある。図から如何なる岩石でも dry の状態では 25~30% Loose な変質物や割れ目をもつと速度は 1000m/sec. 以下になることがわかる。

風化岩石の Rippability

風化岩石を掘削する場合に近年 Ripper をよく用いるようになった。Ripper とは Bull—dozer の後部につけるツメのことで大型機では油圧式になっている。このツメによって風化岩石などを掘りおこすことを Ripping と称している、Ripping する能力は使用する Bull—dozer と Ripper の種類によってことなる。Caterpillar 社は数年前から米国において、Cat.D—9 Bull—dozer と No9 Ripper による Rippability Velocity chart を作って一般に公開している。前述したように岩石は風化の進行とともに弾性波速度を低下せしめ、やがては 300m/sec ぐらいの速度をもつ Soil になってゆく、そこで各種の岩石の弾性波速度からその Rippability を検討することができる。この場合に作られる Rippability Velocity chart は一機種について一種類の chart を作ってゆかねばならない。Cat.社からは前述した chart が発表されているが、我が国で風化岩掘削に使用されている Bull—dozer は D—8 ぐらいのものが多く、また Cat. 社の chart は Engineering News Record などに発表されているものとなりちがっていることから、我が国の風化岩石に適した chart を作ることで、各現場で掘削しようとする風化岩石の Rippability Velocity chart を作ってゆかねばならぬ。

著者が引用した chart は Engineering News Record に発表されていたものであるが、これも砂岩、頁岩などの速度領域には疑問がある。これは原岩ならびに風化岩石の構造上

のちがいによるものであろう。図でmarginal zone とされているのは条件がよいかわるいかによってRipping できたりできなかったりする領域のことである。

Rippability Velocity chartで問題になるのは風化岩石の構造である、これは原岩の構造および鉱物成分によって左右されるものである、頁岩、砂岩・頁岩の互層などのように薄層からなっているものの風化岩はVelocity が比較的大きなものでRipping が容易であるが、同じ砂岩でも厚い層からなっているものや、granite やdiorite などのように低風化の、boulder を多く含有するものなどはVelocityの低下の割にRipping が困難である場合が多い。このようにVelocity の低下だけから Rippability を云云することができない場合もある。

これらのことを考慮して弾性波速度から Rippability を検討することは極めて有効な方法である。弾性波探査法による調査は直接肉眼ではみることのできない地下の速度層を推定することができるので、掘削しようとする現場の掘削計画をたてるために有効な資料を提供することができる。

応用例

兵庫県太子町黒岡山の造成地、姫路市英賀保の造成地はいわゆる流紋岩質岩石からなっている。この附近の流紋岩質岩石は角碎凝灰岩、熔結凝灰岩および流紋岩で、これらの各岩相は分布の形が極めて複雑であることからそれぞれを分離して図に示すことが困難な場合もある。黒岡山で調査後掘削し、その後この種岩石のRippability Velocity chart を作製した地区では流紋岩体からなっていた。

黒岡山での第一次調査はRipperdozer で掘削できる深度を決定しようとして、弾性波探査とボーリングによる地質調査を行った。そして小松製作所のD-120 Ripperdozerによって掘削を行い、第二次調査で掘削断面の各所で弾性波速度の測定を実施して速度分布を求めRippability とVelocity との関係を検討した。第6図から400~600m/sec.のTopsoil 部、600~800m/secの高風化帯、800~900m/secの中風化帯、1200~1400m/secの低風化帯となっている。高風化帯には未調化の岩片は殆んどみられない、中風化帯は外見からは高風化帯ににているが、全体的にやや硬く低風化の岩片がみられる。低風化帯には未風化に近い岩片が多くみられ全体としてよくしまっている。

弾性波速度と標準貫入試験との間には400~600m/sec. はN値20以下、600~900m/sec N値30~40、1200~1400m/secはN値40~50ぐらいであった。掘削前の調査では1000m/sec N値40 を掘削の限界として報告したが、施工後それが妥当な値であったことが立認された。この場合のRippability Velocity は小松D-120. Cat. D-8.三菱BD23 などのいわゆる23~24 ton Ripperdozer では

V_s : Sound Rock の Velocity
 V : Weathered Rock の Velocity

第4図 V_s/V と ϕ との関係

第5図 RIPPABILITY VELOCITY CHART WITH D-9, No-9 RIPPER
 (From caterpillar co.)

第6図 太子町黒岡山造成地掘削図

600m/sec. 以下	Bulldozer 使用領域
600~ 900m/sec.	Ripperdozer 使用可
900~1100m/sec.	Ripperdozer 使用困難
1100m/sec. 以上	Ripperdozer 使用不能

として設計基準を定めることができるものと判断され、またCat. D-9 を使用する場合には、

800m/sec. 以下	Bulldozer 使用領域
800~1100m/sec.	Ripperdozer 使用可
1100~1300m/sec.	Ripperdozer 使用困難
1300m/sec. 以上	Ripperdozer 使用不能

となるものと判断される。Ripperdozer の使用が困難といわれる速度範囲は条件によってはRipping が可能になったり、また不能になったりする範囲のことで、margincl zone と同じものである。

英賀保の造成地は黒岡山と同じ岩質であったことから同じRippability Velocity chartを利用したが、ここは900m/sec. 以下の風化岩およびTop soilが非常にうすかったためにRipperdozer による掘削をとりやめdynamite による掘削に設計変更をした。

滋賀県下の花崗斑岩地域における実驗は掘削後に実施した。この岩石の風化帯の一部には低風化のboulder がみられたり、低風化帯の下部に300m/sec ぐらいの速度をもつ風化岩が存在したりして相当複雑な構造をもっているところがあったり、また風化帯の深度も場所によりかなり著しくことなるものであった。これは岩相のちがいがばかりでなく断層帯の存在も影響している。ここでのRippability Velocity chartはCat. D-8 クラスの機種で

500m/sec. 以下	Bulldozer 使用領域
500~900 m/sec.	Rippaozer 使用可
900~1200m/sec.	Ripperdozer 使用困難
1200m/sec. 以上	Ripperdozer 使用不能

であることがわかったが、750~900m/sec. の速度をもつ風化岩石でもBoulder を含有する場所ではRipperdozer の使用が困難なことがあったといわれていた。

ここに述べたchartは経済効果を考えてのことであるので、それを無視した場合にはここに示したものより速い速度までもRipping できる。

ま と め

Rippability Velocity chart は一客観的な尺度であるが、同じ岩石でも場所がちがったり、風化のしかたがちがったりすると当然少しことなったchartが作られることとな

る。しかし肉眼によって判定していたものをこうした尺度でみることは設計基準をきめる上に有効なものであると考えられる。

この研究に対して御便宜をあたえて下さいました関係会社の担当者ならびに研究について御指導下さいました当学の諸先生に深謝します。

参考文献

- (1) Shumway George

Sound Velocity Vs. Temperature in Water-Saturated
Sediments.

Geophysics Vol. 23. No3, 1958

- (2) Pickett G. R.

The use of Acoustic Logs in The Evaluation of Sandstone
Reservoirs

Geophysics Vol. 25. No1, 1960

- (3) Wyllie M. R. J. and other

Elastic Wave Velocities in Heterogeneous and porous
Media. Geophysics Vol. 21 No1, 1956

- (4) Wyllie M. R. J. and other

An Experimental Investigation of Factor Affecting
Elastic Wave Velocities in porous Media.

Geophysics Vol. 23 No3, 1958

- (5) 渡辺貞夫

サイズモグラフィによる地質調査概要

応用地質 Vol. 2. No34, 1961

- (6) Engineering News Record

July. 16 and Dec. 10., 1959