

施工性による岩盤分類の適用に関する研究

——橋梁基礎杭の重錘掘削工事の場合——

平 間 邦 興
鈴木 健 一 郎

丸 山 誠 桑 原 徹
三 好 哲 也
(広島支店 内海大橋工事事務所)

Applications of Rock Classification for Judgements of Construction Efficiency

——Case of Counterweight Excavation Method for Large Bridge Foundation——

Kunioki Hirama Makoto Maruyama Tohru Kuwahara
Ken-ichiro Suzuki Tetsuya Miyoshi

Abstract

Generally, when classifying bedrock on the basis of laboratory test results, for example, compressive strength, excessively large values are obtained, especially in case of crushed rock, since for testing purposes it is unavoidable for specimens to be obtained from undisturbed rock, which give results that do not match the real condition of the bedrock. In this report, the authors apply rock classification to obtain an idea of crushing energy from the grain-size properties using the Gates-Gandin-Schuhmann theory. This theory was applied to the construction of a large bridge foundation which was by a counterweight excavation method.

As a result, it was recognized that rock properties in laboratory tests have correlations with crushing energy of rock, and it was proved possible for rock classification to be applied in case of crushed rock.

概 要

一般に、圧縮強度などの室内試験結果を用いて岩盤分類を行なう場合、特に破碎性の岩盤ではボーリングコア試料による試験片は、破碎されていない部分から採取せざるを得ないため、見かけ上過大な値が得られてしまい、実態と合わないことが多い。そこで、この報文では破碎物質の粒径特性を表わすゲーツ・ゴダン・シューマン分布による岩盤分類の考え方をさらに押し進め、破碎エネルギーの考えを導入した。これを、橋梁基礎工事における重錘落下による岩盤掘削の場合に適用した。その結果、室内試験より得られる岩石物性値と破碎エネルギーとに相関関係を認めることができ、破碎性岩盤の岩盤分類への適用が可能であることが判明した。

1. まえがき

一般的な岩盤分類では、圧縮強度や弾性係数あるいは弾性波速度などがそのパラメーターとして用いられることが多い。特に圧縮強度は、試験方法が簡便で設計荷重に対する耐荷力の目安となるなどの理由から、多く用いられている。ところが破碎性の岩盤では、圧縮試験は必然的に良好な部分でしか行なうことができず、見かけ上大きな強度が出て、試験結果が実際と合わないことが多い。このような欠点を補う一つの方法として、筆者らは、

ボーリングコア試料が破碎物質の粒径分布を表わすゲーツ・ゴダン・シューマン分布に従うことを示し、そのパラメーターを用いて岩盤分類を行なうことを提案した¹⁾。今回は、この考え方をさらに押し進め、重錘掘削法による岩盤掘削施工のための岩盤分類について検討した。ここでは、前回より試験方法をかなり簡略化し、掘削時の「破碎エネルギー」と各種の岩石物性値との相関について調べるとともに、施工性に対応させた岩盤分類の適用性について検討した。以下に検討結果の概要について示す。

2. 破碎エネルギーの算定

2.1. ゲーツ・ゴダン・シューマン分布と破碎エネルギー

粒子形状の不規則な破碎物質の粒度や粒径分布を調べるには、ふるい分け試験を行なって粒径加積曲線を求めるのが一般的である。この粒径分布を簡単な関数形で表わすために種々の関数が考えられ、そのうちの 하나가ゲーツ・ゴダン・シューマン分布で、次式で表わすことができる。

$$y = (x/k)^\alpha \quad \dots\dots\dots(1)$$

ただし、x: 粒径, y: 通過率, k: 粒度指数, α: 分布指数である。(1)式の対数をとると、

$$\log y = \alpha \log x - \alpha \log k \quad \dots\dots\dots(2)$$

となる。ここで、岩盤を破碎する「破碎エネルギー」は、母岩を重錘落下によって搬出可能な大きさまで破碎するのに必要なエネルギーと定義する。実際には、掘削機下にある岩盤をズリ排出管に入る大きさまで破碎することになる。したがって、(1), (2)式に表わされる粒径分布をもった岩盤を搬出可能な粒径まで破碎することは、粒径分布曲線を平行移動させることを意味している。この粒径分布を変えるのに必要なエネルギーが「破碎エネルギー」である。このような岩盤の破碎エネルギーEは次式で与えられる²⁾。

$$dE = C(\rho/f)^{n-1} \cdot S^{n-2} \cdot dS$$

$$E = (\rho/f)^{n-1} \cdot C/n \cdot 1 \cdot (S^{n-1} - S_0^{n-1}) \quad \dots\dots\dots(3)$$

ただし、ρ: 密度, f: 6.5~8.0, C: 定数, n: Bondの法則に対応する定数, 1.5, S₀・S: 掘削前後に、ある粒度分布をもつ時の比表面積で、S=f/100 ρ ∑ {W_i/x_i} (W_i: 重量, x_i: ふるい粒径) と表わされる。

また、

$$S = (f/\rho) (1/k) F(\alpha) \quad \dots\dots\dots(4)$$

(4)式を(3)式に代入すると、

$$E = CF(\alpha)^{n-1} (k^{1-n} - k_0^{1-n}) / (n-1) \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$= K(k^{1-n} - k_0^{1-n}) / (n-1) \quad \dots\dots\dots(6)$$

ただし、k, k₀: 掘削前後の粒度指数, F(α)ⁿ⁻¹・K: 定数である。(6)式のうち、kはボーリングコア試料の各分割区間にある試料の試験結果から求めることができる。一方、重錘掘削機(φ2, 100mm)とズリ排出管(φ250mm)との口径の比例関係から、ボーリング孔径に対応する掘削後の最大粒径を決定した。これから、α₀=ᾱ=1.43, k₀=0.36とした。

2.2. 規格化破碎エネルギー

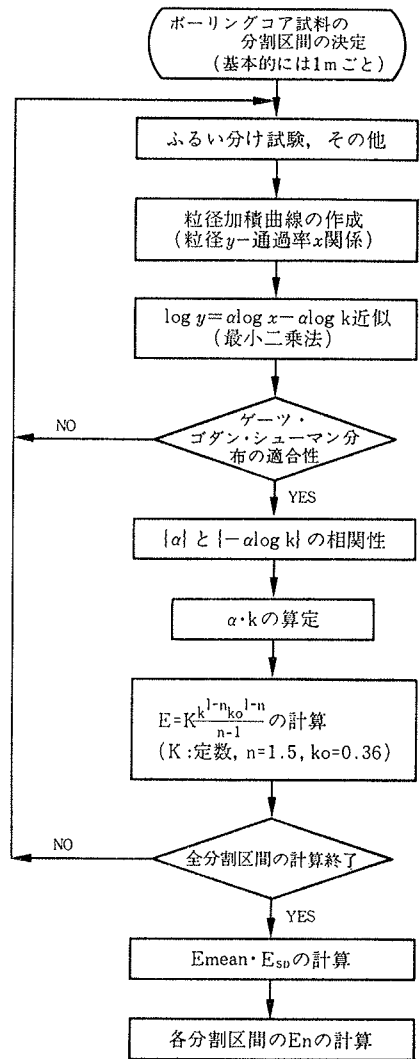
以上のように(6)式から破碎エネルギーを算定することができるが、(6)式には未知の定数Kが含まれているため絶対的なエネルギー量を求めることができない。したがって、定数Kを除き、他の試料との比較のために以下の式を用いて規格化を行なった。今後は、この「規格化破

碎エネルギー」E_nを用いることにする。

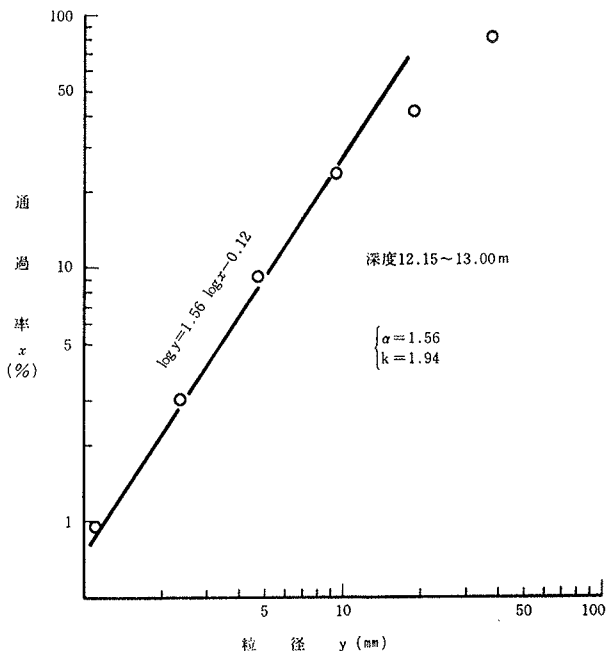
$$E_n = (E - E_{mean}) / E_{SD} \quad \dots\dots\dots(7)$$

ただし、E: 各分割区間の破碎エネルギー, E_{mean}・E_{SD}: 破碎エネルギーの標本平均, 標本標準偏差である。

この破碎エネルギーを求めるまでの基本的な流れを図一に示す。今回はボーリングコア試料を原則的に1mおきに区分し、標準網ふるいの大きさは0.59, 1.19, 2.38, 4.76, 9.52, 19.1, 38.1, 76.2 (mm)のJIS規格を採



図一 試験・解析の流れ



図二 粒径加積曲線の一例

用した。また、コア試料が大きい場合は、重量と単位体積重量から試料体積を求め、その換算粒径で補正を行なった。粒径加積曲線から粒径分布特性を算定した一例が図一2である。粒度一通過率関係では両対数グラフ上で、おおむね直線関係が得られた。

3. 破碎エネルギーと岩石物性値との相関

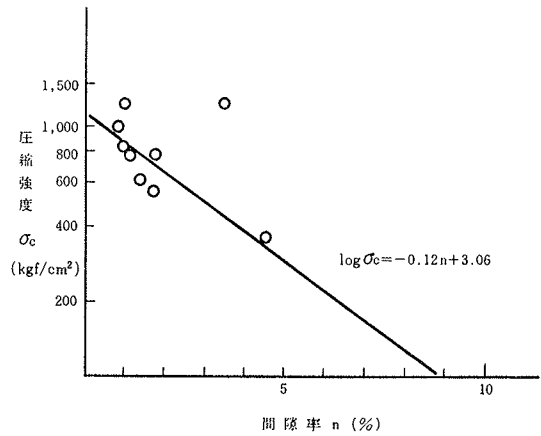
今回試験・解析を行なった試料は、全長35mのボーリングコア試料の一部で、風化の激しい亀裂の多いホルンフェルス化した砂質粘板岩である。一般の岩盤区分によると、D級～B級の範囲にはいり、特にD～C_M級を示すRQD≒0の破碎性の岩である。実施した岩石試験結果と「規格化破碎エネルギー」（以下「破碎エネルギー」と略す）の計算結果の一部を図一3に示す。岩石試験のうち、物理性状では密度・間隙率・吸水率などが得られており、力学性状では深部の一部を除いて試験結果は得られていない。破碎エネルギーの計算では、ゲーツ・ゴダン・シューマン分布のパラメーターとして、分布指数α、粒度指数kも合わせて示した。破碎エネルギーE_nは、すべての試験結果では-3<E_n<3の範囲にあり、正規分布を示している。

この破碎エネルギーの妥当性を検討するために、2.3.の試験結果との相関性を求めた。試験結果のうち、圧縮強度σ_c・間隙率nと破碎エネルギーE_nのそれぞれの関係を図一4、5に示す。圧縮強度は、数少ない試験データではあるが、間隙率との間には従来から指適される傾向を認めることができる。この関係を最小二乗法によって求めてみると、

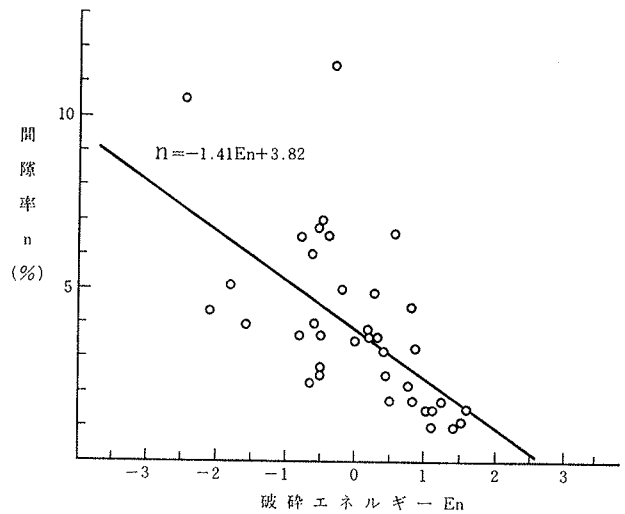
$$\log \sigma_c = -0.12n + 3.06 \quad \dots\dots(8)$$

あるいは、

$$\sigma_c = 10^{(-0.12n + 3.06)} \quad \dots\dots(9)$$



図一4 圧縮強度σ_c—間隙率nの関係



図一5 間隙率n—破碎エネルギーE_nの関係

となる。また、間隙率と破碎エネルギーとの関係では、多少のパラッキはあるものの、かなり明確な関係が得られた。破碎エネルギーが分類要素の一つとして有効に利用できる可能性を示すものである。両者の関係を求めてみ

深度 (m)	標高 TP (m)	地盤柱状 図	岩盤 区分	R ^u Q	物理試験結果					粒度特性																	
					密度 ρ _{app} (t/m ³)	吸水率 Wa(%)	間隙率 n(%)	含水比 w(%)	分布指数					規格化された破碎エネルギー													
									α	k	En	1	2	3	4	5	-2	-1	0	1	2						
10.0	25.0	シルト	D	0.100	2.5	2.6	2.7	2.8	2.0	2.5	3.0	2	4	6	1	2	1	2	3	4	5	-2	-1	0	1	2	
15.0	30.0	強風化砂質粘板岩	CL																								
20.0	35.0	弱風化砂質粘板岩	CM																								

(1)RQD=Rock Quality Designation (2)岩盤区分はコアの形状と硬軟の程度により判定した。

図一3 岩石試験結果と破碎エネルギー(No. 15 一部)

ると、

$$n = -1.41E_n + 3.82 \quad \dots\dots\dots(10)$$

と表わすことができる。

ところで、岩盤分類する上で最もよく用いられるのは圧縮強度や弾性波速度であるが、(8)、(9)式および(10)の関係より、圧縮強度と破砕エネルギーの関係を求めることができる。(10)式を(8)、(9)式に代入すると

$$\log \sigma_c = 0.17E_n + 2.60 \quad \dots\dots\dots(11)$$

あるいは

$$\sigma_c = 10^{(0.17E_n + 2.60)} \quad \dots\dots\dots(12)$$

となる。これらの計算結果を、得られた試験結果と比較してみたのが図-6である。圧縮試験では、コア試料の形状などに制約されて、 $0 < E_n < 1.5$ の範囲しか試験結果が得られず、しかもバラツキがかなり大きい。実験式(11)、(12)は、数少ない試験結果の比較的平均値に近い部分を示しており、妥当な傾向を示すものと考えられる。したがって、破砕エネルギーより圧縮試験の困難な $E_n < 0$ の岩盤に対しても、(11)、(12)式を外挿することによって圧縮強度を推定することができる。また、図-6に示すように、平均値としての(11)、(12)式の他に、分布範囲の上限・下限を設定し圧縮強度の上限・下限を考慮することもできる。

4. 掘削施工性による検討

破砕エネルギーと各種岩石物性値との間には、相関関係の得られることが判明したが、ここで実際の掘削施工性との比較について検討してみた。掘削施工データとしては、各地層ごと(ほぼ1m間隔)の総掘削時間と純掘削時間および重錘の総打撃回数などについて、すべての基礎杭について検討した。ちなみに、基礎杭の掘削孔径は2.1m、平均掘削長19.5mで、重錘は重量7.5~8.5t、線圧17~24 kg/cmの規模である。純粹の掘削時間は、1本当たり平均28時間、2万回の打撃回数になり、1時間当りの掘削能力は平均0.7m程であった(P₉施工実績)。以上の測定結果より、わかりやすくするために施

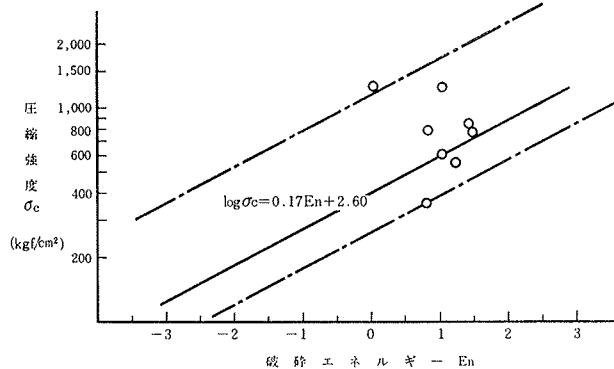


図-6 圧縮強度 σ_c - 破砕エネルギー E_n の関係

工速度として、①掘削速度(分/m)②掘削打撃回数(回/m)を算定し、以下のデータ整理に用いた。

ここでは、実際の重錘掘削に要する掘削時間について、1mごとに換算し、破砕エネルギーとの相関性を検討したのが図-7である。破砕エネルギーは $-3.0 < E_n < 1.0$ に分布し、施工速度との間には比例傾向を認めることができる。しかしかなりバラツキもあり、特に、問題となる $-1 < E_n < 0$ に分布が集中しており、容易に分類することは困難が伴う。ちなみに、両者の間には、

$$E_n = 0.035C - 4.5 \quad \dots\dots\dots(13)$$

なる関係が得られ、Cは施工性を表わすパラメーターである。このように、「破砕エネルギー」による岩盤分類も可能性のあることが判明した。

5. あとがき

掘削施工性に注目した破砕性岩盤の岩盤分類手法の確立を目的に、室内岩石試験結果より求まる「破砕エネルギー」を提案し、その適用性について述べた。また、これを実際の施工例に適用し、施工性データとの比較を行なった。その結果、従来から用いられている岩盤分類のパラメーターとともに、破砕エネルギーもある程度適用できることが判明した。今後は、破砕エネルギーの算定式や施工データの妥当性などを詳細に検討を行ない、広く岩盤分類への適用を考えていくつもりである。

なお、この報文作成にあたり、広島県内海大橋架橋事務所および、関大林組・関住友建設共同企業体関係各位の多大の協力を得た。ここに、深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 永井, 平間, 丸山, 桑原: Gates-Gandin-Schuhmann 分布による破砕岩岩盤分類の提案, 第19回土質工学研究発表会講演集, (昭和59.6), pp. 807~810

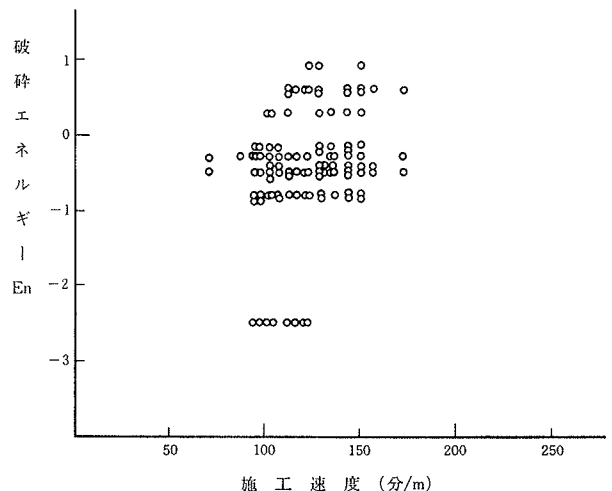


図-7 破砕エネルギーと施工性の関係 (P₉)