蛇紋岩の割れ目分布と変形係数 —山口県宇部市丸尾地域の例—

津田 秀典*

要 旨

山口県宇部市丸尾海岸に露出する未風化の蛇紋岩のボーリングコアにおいて、割れ目の存在状態および分布形態を記載した。ボーリング割れ目柱状図を作成すると、複数の割れ目が集合していくつかのゾーン（割れ目集合体）を形成することが確認された。この蛇紋岩体における割れ目集合体には、一般に5～20枚程度の割れ目が含まれ、平均割れ目間隔は約20～40mmであった。一方、同じボーリング孔で実施した孔内水平載荷試験では、変形係数30～500MPaを計測した。この値を、割れ目集合体の分布に対応した局所的な変形係数に換算し直すと、それはほとんどの割れ目集合体で約30～40MPaに集中しており、割れ目に乏しい部分に比べて1/10程度を示した。割れ目集合体の変形係数は、未風化の蛇紋岩で変形が集中する最も弱いゾーンでの平均的な変形係数を示していると考えられる。

Key words : 割れ目分布 fracture distribution, 割れ目集合体 fracture zone, 変形係数 deformation modulus, 蛇紋岩 serpentinite

1. は じ め に

蛇紋岩は地すべりや膨張性地山など応用地質的な問題が多い岩石である^{1)～3)}。これは蛇紋岩が初生的に構造運動を受けて形成される際に、塊状、片状～葉片状など多様な岩相が発達するうえに、後生的にも様々な程度に風化・粘土化することによって、岩盤の状態変化が著しいことが大きな原因になっていると考えられる。蛇紋岩の問題を詳細に理解するためには、状態変化の初期条件となる未風化岩盤での特性をまず明らかにする必要がある。

今回、山口県宇部市丸尾海岸に露出する未風化の蛇紋岩体において、ボーリング調査と孔内水平載荷試験を行った。載荷試験によって得られる変形係数（弾性係数）は、岩盤の力学的特性に関して強度と並ぶ材料の2大基本特性⁴⁾である。これまで変形係数は多くの載荷試験に基づいて主として岩級区分（あるいは岩盤区分⁵⁾、岩盤分類⁵⁾との関係で議論されてきたが^{5)～7)}、最新の岩盤試験データベース⁷⁾を見てもここ20年以上、議論の観点はあまり変わっていない。変形係数に影響する要素には多くのものがあるが、なかでも割れ目は未風化岩盤では最も重要な要素であり、岩盤力学は“割れ目の力学⁸⁾”とよばれることがある。割れ目による変形係数の解釈はこれまで主として割れ目の間隔

によって決まるボーリングコア形状やRQD（Rock Quality Designation）などに着目する程度であって、これらの取扱い以上に定量的な割れ目分布との関係が議論されることはあまりなかった。この理由の1つには割れ目分布の記載が十分でなかった面がある。

この点で、先に著者はボーリング孔における割れ目分布の記載に重点をおいた「ボーリング割れ目柱状図」の作製を提唱した⁹⁾。津田⁹⁾は、割れ目は一様あるいは不規則に分布するのではなく、何枚か集まって「割れ目集合体」を形成することを明らかにした。割れ目集合体とは、これまでボーリングコア（以下、コア）ではある深度に集合した割れ目のゾーンとして記載されてきたものである。割れ目集合体は岩盤中で変形が集中する弱いゾーンとなるため、割れ目が乏しいゾーンと比べて、割れ目集合体の変形係数が低いことは明らかである。したがって、漠然と高い低いという一般論に終わるのではなく、孔内水平載荷試験による変形係数と割れ目集合体の変形係数との対応関係を明らかにする必要がある。

そこで、丸尾海岸での未風化の蛇紋岩コアを例として、割れ目スケッチからボーリング割れ目柱状図を作成し、割れ目集合体の記載に基づいて、割れ目分布と変形係数との関係を示す。また、割れ目集合体の変形係数に言及する。なお割れ目（fracture）とは、岩盤中に肉眼で明瞭な密着状～開口状の隙き間をなし、脆性破壊によって割れている不連続面を総称するものである^{9), 10)}。亀裂（crack）とは小さい割れ目を指すことが多く¹⁰⁾、本稿ではこの用語は用

*常盤地下工業(株) Tokiwa Underground Engineering Co., Ltd. (会員)
 E-mail : h.tsuda@tokiwack.co.jp

いない。また、ハンマー打診などに伴う人為的な割れ目は観察対象から除外する。

2. 丸尾地域の地質概要と蛇紋岩の岩相

2.1 地質概要

山口県宇部市丸尾地域には蛇紋岩類^{11),12)}が広く分布する(図-1)。これらは中生代三畳紀の地層である周防変成岩中^{11),12)}に挟在し、蛇紋岩メランジを構成する¹³⁾。また、白亜紀の広島花崗岩によって接触変成作用を受け、蛇紋岩中の割れ目には方解石、ドロマイト、マグネサイトなどの炭酸塩鉱物が生じている¹²⁾。

丸尾海岸の蛇紋岩(以下、丸尾蛇紋岩)では、海食を受け風化・粘土化部分がほとんど取り去られた未風化岩盤が広く露出しており(図-1)、今回の海岸付近のボーリング調査においてもこれと同じ蛇紋岩が存在することを確認した。一般に産出する蛇紋岩はしばしば風化・粘土化しているが、今回の蛇紋岩コアには割れ目は多いものの、そうした風化はほとんど認められず、その意味で未風化岩盤と表現しておく。

丸尾蛇紋岩の岩相は肉眼で片状岩相と塊状岩相に大別される。片状岩相の片理面は全体に波状に起伏し、うねりが著しい。割れ目には節理・小断層・片理面に沿った割れ目の3種があり、片理面に沿った割れ目が多い。割れ目分布には粗密があり、割れ目が集中するゾーン(割れ目集合体)

の存在が認められる(写真-1)。割れ目集合体は不規則にうねり、複雑に分岐・交差・尖滅しながら全体としてつながっているものが観察される。

2.2 コアにおける蛇紋岩の岩相

丸尾蛇紋岩のコア写真、割れ目スケッチおよび岩相/岩級区分図を、図-2に示す。コアは長さ7.0mであり、孔内水平載荷試験(後述)を連続的にを行い一連の変形係数を得ている。このコアは、回転式スピンドル型の油圧ボーリングでスリーブ内蔵ダブルコアチューブによって採取した鉛直コアである。掘削ビットはインプリグネイテッド型のダイヤモンドビットで外径66mm、コア径48mmである。なお、孔内地下水は認められなかった。

図-2の蛇紋岩は、深度0.7~4.3m付近まで片状岩相、深度4.3~7.0mまでは塊状岩相がそれぞれ卓越し、岩相ごとに割れ目分布が異なる。以下、岩相ごとの特徴を記す。

2.2.1 片状岩相 (Sg)

片状岩相は主として暗緑~淡緑色を帯びる不均質な部分が混在して片状構造をなす岩相である(図-2のSg)。このうち暗緑層では滑感・脂肪光沢を呈することが多く、方解石脈を部分的に伴う。岩級区分ではC_M級に相当するもの

図-1 山口県宇部市丸尾地域の蛇紋岩類

西村ら¹¹⁾から調査地周辺の関連する地質を抽出した。

写真-1 丸尾海岸での蛇紋岩露頭の例

割れ目分布には粗密があり、割れ目集合体が存在する。

図-2 丸尾蛇紋岩のコア写真、割れ目スケッチおよび岩相/岩級区分図

が多い。

割れ目は全体に数十mm以下の割れ目間隔で比較的に存在するものが多いが、コアは円柱状を保つ。固着している片理面は指圧～ハンマー軽打程度では分離しない。片理面が転化した割れ目面は湾曲～凹凸状をなすことがある。また、割れ目面上には不定形の滑石や繊維状の蛇紋石が認められることがある。深度4.0mの方解石脈では脈沿いに割れ目が存在している。

また、片状岩相には割れ目の密集によって角礫状をなす部分（ C_L 級）が200mm以下の厚さで所々挟在する。角礫状部は礫径数十mm以下をなし、各割れ目は区別できないほどに密集している。深度0.9～1.2m付近、2.0m付近、2.9～3.0m付近、3.8～4.0m付近の角礫状部では岩質が軟化している部分が局在する。

2.2.2 塊状岩相（Mw, Mg）

塊状岩相には、灰白色で炭酸塩鉱物に富み、ざらつき感を呈する岩相（図-2のMw、深度4.3～6.0m）と、暗緑色で滑感・脂肪光沢があり、方解石脈を多く伴う岩相（図-2のMg、深度6.0～7.0m）とがある。これらの割れ目は全体に少なくコア長50～150mmに1枚程度である。また、岩級区分では C_H 級に相当するものが多い。

Mw相の深度4.4m、4.8m、5.4m、5.9m付近では、コア軸に平行する高角度の割れ目が湾曲して存在する（図-2）。深度5.2mには角礫状部を50mm程度の厚さで挟在する。また、深度6.2～7.0mには方解石脈が多いが固着しており、前章で述べた割れ目は生じていない。

3. 蛇紋岩の割れ目分布の記載

3.1 ボーリング割れ目柱状図と割れ目間隔図の作成

ボーリング割れ目柱状図（以下、割れ目柱状図）の作成法については、津田⁹⁾にしたがう。ただし、今回は割れ目の方向や開口幅など割れ目そのものの観察は目的ではないため、ボアホールテレビカメラ観察を用いず、コアの割れ目スケッチ（図-2）に基づいて、図-3のように割れ目柱状図と割れ目間隔図を作成した。

3.1.1 割れ目柱状図の作成

各々の割れ目の位置（深度）と相互の割れ目間隔を特定するため、割れ目スケッチ（図-2）上において、コア中心線を設け、これとコアに現れた割れ目の線が交わる点の深度を割れ目の深度とし、割れ目を直線（角礫状部を四角形）で図示した。

図-3 岩相/岩級柱状図、割れ目柱状図および割れ目間隔図

F1～F8：割れ目集合体、5枚程度以上の各割れ目が60mm程度以下の割れ目間隔で集合する割れ目ゾーン

今回の割れ目集合体の抽出では、割れ目間隔sが60mmの線を参考線とした。sa：平均割れ目間隔（mm）

岩相/岩級柱状図の凡例は図-2と同じ。

コア中心線に交わらないコアに平行する割れ目は、スケッチした割れ目の線の中点を割れ目の深度とした（図-2）。また、これらの深度区分は接近した割れ目どうしを区分できるようにmm単位とした。図-3の割れ目柱状図は図-2の1mごとの割れ目スケッチを深度方向に継ぎ合わせて作成した。なお、コアに平行する長い割れ目が多いと、割れ目の深度の特定が難しくなり割れ目柱状図を作成する意味は乏しくなると考えられる。

3.1.2 割れ目間隔図の作成と平均割れ目間隔の算出法

割れ目間隔図（図-3）では、割れ目柱状図での各割れ目の深度を縦軸（1目盛0.1m）に、隣り合う割れ目どうしの間隔を横軸（1目盛100mm）に表した。

割れ目間隔は一様ではないため、全体のグラフ形状は階段形状となる。隣り合う割れ目間隔が狭ければ階段の幅は狭く高さは低くなり、間隔が広ければ階段の幅は広く高さは高くなる。グラフの階段面積は、着目した深度区間でのそれぞれの割れ目間隔を2乗して足し合わせた値となり、グラフ上で単にこうよぶだけの1つの指標値である。角礫状部では割れ目が集中していて間隔が判読できないため、階段の高さを与えない。

また、角礫状部が存在すると、割れ目間隔の単純算術平均が算出できないため、平均割れ目間隔（sa, 単位:mm）は割れ目間隔図での階段の高さ0mmの角礫状部を含めた階段面積の総和を区間長で除した数値として算出する。前述の割れ目間隔図の作成過程上、平均割れ目間隔（sa）は割れ目間隔の2乗（グラフの階段面積）の総和に比例する量となる。

図-4は割れ目間隔図を用いてsaを算出する方法を最も簡単な1ケースとして示したものであり、単一の割れ目が深度100mm（X₁）と200mm（X₂）に、角礫状部が深度500～600mm（X₃～X₄）にあったとする。

ここで、深度100～600mm（X₁～X₄）では $sa = \{(X_2 - X_1)^2 + (X_3 - X_2)^2 + ((X_4 - X_3) \times 0)\} / (X_4 - X_1) = \{(100^2 + 300^2 + (100 \times 0))\} / 500 = 200\text{mm}$ となる。

角礫状部を含まない深度100～500mm（X₁～X₃）では $sa = \{(X_2 - X_1)^2 + (X_3 - X_2)^2\} / (X_3 - X_1) = (100^2 + 300^2) / 400 = 250\text{mm}$ となる。この値は割れ目間隔図の各階段面積を重みづけとする加重調平均と等しく（図-4）、各割れ目間隔の単純算術平均 $\{(X_2 - X_1) + (X_3 - X_2)\} / 2 = (100 + 300) / 2 = 200\text{mm}$ とは異なる。

なお付表-1には、今回の検討で用いたデータの一覧を示す。同表中の深度欄には後述する孔内水平載荷試験の区間境界を併記している。

3.2 割れ目集合体と平均割れ目間隔

図-3の割れ目柱状図での割れ目が密集するゾーンが割れ目集合体であり、これは割れ目間隔図での階段形状の落ち込んだゾーンと対応している。

図-4 割れ目間隔図での平均割れ目間隔の算出法

sa: 平均割れ目間隔 (mm)

なお、深度100～500mm（X₁～X₃）において、平均割れ目間隔を加重調平均を用いて計算すると、 $sa = 1 / [\{(1/(X_2 - X_1)) \times ((X_2 - X_1)^2 / ((X_2 - X_1)^2 + (X_3 - X_2)^2))\} + \{(1/(X_3 - X_2)) \times ((X_3 - X_2)^2 / ((X_2 - X_1)^2 + (X_3 - X_2)^2))\}] = 1 / [\{(1/100) \times (1/10)\} + \{(1/300) \times (9/10)\}] = 250\text{mm}$ となる。ここで、 $(X_2 - X_1)^2 / ((X_2 - X_1)^2 + (X_3 - X_2)^2) = (1/10)$ とは深度100～500mm（X₁～X₃）までの階段面積の総和に占める深度100～200mm（X₁～X₂）区間の階段面積の重みづけ、また、 $(X_3 - X_2)^2 / ((X_2 - X_1)^2 + (X_3 - X_2)^2) = (9/10)$ とは同じく総和に占める深度200～500mm（X₂～X₃）区間の階段面積の重みづけである。

割れ目分布の粗密は、割れ目間隔でとらえると全体的に数mm以下で接近するものから100～200mm以上離れているものまで存在する。コア全体での割れ目分布を考慮し、孔口側から割れ目の密集の程度を大局的に見ていく。この見方は、割れ目間隔の絶対値に基づくものではなく、コア全体を見て割れ目が相対的に多い区間を抽出するものである。まず深度0.678～1.185mの割れ目は周辺と比べて密集しており、割れ目集合体と識別できる。これを「1次オーダーの割れ目集合体⁹⁾」とし、F1の記号を与える。

以下、同様に、深度1.445～2.145mにF2、深度2.296～2.597mにF3、深度2.855～3.135mにF4、深度3.289～3.946mにF5、深度4.104～4.460mにF6、深度4.777～4.910mにF7、深度5.149～5.323mにF8、と計8か所の割れ目集合体が抽出できる（図-3、付表-1）。各集合体の厚みはいずれも0.1～0.7m程度である。深度6m付近にも割れ目がいくつかあるが、これらはF1～F8に比べて割れ目枚数が少ないことから

ら集合体とはしない (図-3)。

以上のことをふまえて割れ目集合体を抽出すると、1つの集合体には5～20枚程度の割れ目が包含され、かつ割れ目間隔は60mm程度以下 (図-3) であった。これはこのコアでの集合体の1つの抽出基準となる。

また、3.1.2項で示した平均割れ目間隔 (sa) を集合体の分布区間ごとに求めると、saは18～43mmとなる (図-3、付表-1)。

4. 孔内水平載荷試験と蛇紋岩の変形係数

4.1 孔内水平載荷試験法と変形係数の計測

孔内水平載荷試験とは、試験孔の孔壁面に対して垂直方向に載荷し、そのときの圧力と孔壁面の変位から、地盤の変形係数 (弾性係数)、降伏応力、極限応力を求める試験をいう¹⁴⁾。本稿では変形係数だけに着目する。変形係数 (Db) とは岩石などのように応力-ひずみ関係が必ずしも直線的でない物体における弾性係数¹⁵⁾である。Dbが高いほど変形抵抗は大きく、変形しにくい状態にある。

Dbの計測では、地盤工学会基準「地盤の指標値を求めるためのプレッシャーメータ試験方法 (JGS1531-2012)¹⁴⁾」にしたがい、高圧載荷方式 (最大20MPa) である応用地質製エラストメータMODEL-4022を用いた。この試験機器では、測定探子のゴム筒 (長さ520mm) にハンドポンプで注水して孔壁に対し垂直方向へ等圧分布で載荷する。孔壁

変位はゴム筒の中央部に内蔵されているキャリパーアームの開口度によって、ゴム筒の膨張変位として計測される。

また、Dbは処女荷重度-孔半径変位曲線 (P-r図、図-5) における⑤の変形過程の近似直線が急勾配であるほど高い数値となる。岩石のポアソン比 ν は一般に0.2～0.4程度⁴⁾であることを考慮し、0.3とした。また今回のように、試験区間を連続的に区切って載荷する場合では、隣接試験の影響を可能な範囲で小さくするため、試験中リアルタイムでモニター表示されるP-r図で降伏点 (図-5の⑥) を単調載荷の過程で確認直後、変位が大きくないうちに速やかに除荷し試験を終了した。実際、降伏時の孔壁変位はすべて0.5～1mm程度以下、降伏荷重は5～10MPa程度であった。

4.2 平均割れ目間隔と変形係数との関係

4.2.1 載荷試験区間での平均割れ目間隔と変形係数との関係

図-3の割れ目柱状図の深度1.25～6.25m区間を対象として、孔内水平載荷試験を0.5mピッチで連続的にを行い、変形係数を計10回計測した。載荷試験探子のゴム筒長さは前述のように520mmであるため、隣り合う試験区間 (0.5m) どうしでのゴム筒の重複や、ゴム筒を取りつけたボーリングロッドの昇降に伴う試験区間の設置誤差の影響が実際の試験値には含まれる。

図-3に10回の試験区間 (①～⑩) の変形係数 (Db) の値を加え、図-6とした。これらのDbは30～500MPaであった。また図-6には、3.1.2項に基づいて計算した試験区間ごとの平均割れ目間隔 (sa) の値を併記した (詳細は付表-1)。これらのsaは30～120mmであった。

図-6のDb-sa関係は図-7となり、正の相関が有意に認められる (相関係数 $R=0.71$)。この関係は、図-6において割れ目間隔図とDbの深度分布図のグラフ形状が大まかには類似していることからもうかがえる。

以上のように丸尾蛇紋岩では、割れ目が多いほど (割れ目間隔が狭くなるほど)、変形係数が低くなることが確認される (図-7)。このことは、一般に節理頻度 (Joint Frequency¹⁶⁾) は岩石中に蓄積されるひずみエネルギーと比例関係をもち、岩石の弾性係数に関係すること^{16), 17)}と整合的である。

ただし、Db-sa関係の相関係数 $R \approx 0.7$ であることから、割れ目分布だけでは説明できない余分が残る。この原因には、割れ目それ自身の特性 (開口幅、含水状態など) や、載荷試験法上の制約 (試験区間の取り方など) があるのではないかと考えられる。

4.2.2 割れ目集合体の平均割れ目間隔と変形係数との関係

蛇紋岩 (結晶片岩) は片理に沿って割れやすいこと¹⁾と同様、一般に岩盤が変形する際には、割れ目がない部分が

図-5 処女荷重度-孔半径変位曲線 (P-r図) の概念図

図-6 割れ目柱状図，割れ目間隔図および変形係数の深度分布図
凡例は図-3と同じ。

脆性破壊して新たに割れ目が発生するよりも，すでに破壊された断層などの弱線部あるいは既存の割れ目から変形が進行する¹⁸⁾。この意味においては，割れ目の多いゾーンである割れ目集合体の変形係数が欠かせない。

一方，孔内水平載荷試験によるDbは，試験区間での平

均化された巨視的な変形係数（巨視的弾性係数⁶⁾）である。この試験は，4.1節で述べたように試験法上の制約から一定区間を区切って行われ，任意の試験区間長を設けることはできない。試験区間がコアスケッチで特定した割れ目分布とは必ずしも対応せず，得られた変形係数（Db）は割

れ目集合体をまたいだり（例えば、F2、図-6）、あるいは試験区間に割れ目集合体を内包したり（例えば、F4、図-6）するためである。

そこで、次に各試験区間で得られた変形係数（Db）から、割れ目集合体の変形係数（Dbz）を推測する方法について述べる。これは、割れ目間隔図の階段面積から算出した平均割れ目間隔（sa）が載荷試験区間での変形係数（Db）との間に有意の相関性（図-7）があり、また、割れ目集合体F1～8の厚みは約0.1～0.7mであり、載荷試験区間のスケール（0.5m）と大差はないことに基づいている。

〔割れ目集合体の変形係数の推測法〕：例えば、図-6のF4（深度2.855～3.135m）は載荷試験区間2.75～3.25m（変形係数Db=109.6MPa）の間に内包される。以下、F4の変形係数を推測する。

載荷試験2.75～3.25m間に対応する割れ目間隔図のグラフ上の階段面積（割れ目間隔の2乗の総和）は16,806mm²である（付表-1）。この階段面積が変形係数Db=109.6MPaと対応する。F4の階段面積は5,070mm²であり、これに対して変形係数を割りふると、Dbz=109.6MPa×5,070mm²/16,806mm²=33.1MPaとなる（付表-1）。

また、割れ目集合体F2のように、集合体が載荷試験区間をまたいでいる場合も同様にして、またいでいる集合体区間どうしでの割りふった変形係数を最後に足し合わせる（付表-1）。

このようにして、割れ目間隔図の階段面積（割れ目間隔の2乗の総和）を指標とすることによって、載荷試験区間で得られた変形係数を割れ目集合体の変形係数に比例配分して割りふる。

以下同様にして、割れ目間隔図を用いて割れ目集合体の変形係数（Dbz）を推定した結果を図-7のプロットに加えると、Dbz-sa関係は図-8のようになる。丸尾蛇紋岩での各割れ目集合体ごとの変形係数は、ほとんどが30～40MPaでほぼ一定の値に集中し、それらの平均割れ目間隔（sa）は20～40mm程度であった（図-8）。

また、載荷試験による変形係数と割れ目集合体の変形係数との対応関係を見ると、割れ目集合体の変形係数は割れ目の乏しい部分（図-7の載荷試験区間⑨⑩、Db≒450～500MPa）のそれと比べて1/10程度となることが認められた（図-8）。

岩盤中において割れ目集合体は力学的に弱いゾーンとなり、岩盤が変形する過程では割れ目集合体に変形が集中すると考えられる¹⁸⁾。今回の丸尾蛇紋岩では多くの割れ目集合体において、変形係数（Dbz）は30～40MPaであり、こ

図-7 変形係数（計測値）と平均割れ目間隔の関係

Db：変形係数（計測値）

sa：平均割れ目間隔

R：相関係数

図-8 変形係数（計測値、推測値）と平均割れ目間隔の関係

Db：変形係数（計測値）、図-7と同じ。

Dbz：割れ目集合体の変形係数（推測値）

sa：平均割れ目間隔

の値が未風化蛇紋岩の力学的に最も弱いゾーンの1つの目安値となる。

割れ目集合体の存在は未風化岩盤では見過ごせない不連続構造の要因となる。岩盤を不連続体としてモデル化する場合の不連続面の変形特性をどのように評価するかが問題となっている⁶⁾。Dbzはこのような問題への対応に寄与できる可能性がある。今回の丸尾蛇紋岩の事例のように、割れ目柱状図を作成して割れ目分布を記載し、割れ目集合体ごとに変形係数など各種の測定値を議論することは、他の蛇

紋岩や異種岩相においても、岩盤の諸性質を割れ目分布の実態に即して推測するうえで役立つと期待される。

5. ま と め

(1) 山口県宇部市丸尾地域での未風化の蛇紋岩のコア観察（コアの割れ目スケッチ、図-2）に基づいて、割れ目柱状図と割れ目間隔図を作成し、割れ目集合体を抽出した（図-3）。割れ目集合体の平均的な厚さは0.1～0.7m程度、割れ目の数は5～20枚程度、平均割れ目間隔は20～40mm程度であった。

(2) 孔内水平載荷試験の区間ごとに平均割れ目間隔（sa）を求めると、平均割れ目間隔（sa）と変形係数（Db）との間に正の相関が認められ、変形係数は割れ目分布によっておおむね説明可能であることを示した（図-6, 7）。

(3) 一定間隔ごとに機械的に区切った孔内水平載荷試験の結果では変形係数は30～500MPaであったが（図-6, 7）、載荷試験結果を割れ目集合体ごとに割りふると、変形係数はほぼ30～40MPaの範囲に集中する（図-8）。これが丸尾蛇紋岩が割れ目集合体（平均割れ目間隔は20～40mm程度）に沿って変形する際の変形係数を与えていると考えられる。

謝辞 本稿をまとめるにあたり、山口大学名誉教授加納隆先生には原稿をお読みいただき、貴重なご意見を頂戴した。心からお礼申し上げます。

引 用 文 献

- 1) 梅津一晴 (1995) : 蛇紋岩の土木地質的一検討, 応用地質, Vol.36, No.5, pp.46-55.
- 2) Coleman, R.G. (1977) : Ophiolites, Ancient Oceanic Lithosphere?, Minerals and Rocks 12, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, pp.98-103.
- 3) 平内健一・片山郁夫 (2015) : 蛇紋岩の力学的性質とそのテクニクな意義, 地学雑誌, Vol.124, No.3, pp.371-396.
- 4) 日比野 敏 (2007) : 技術者に必要な岩盤の知識, 鹿島出版会, 166p.
- 5) ダム工学会編 (2012) : 総説 岩盤の地質調査と評価 現場技術者必携 ダムのボーリング調査技術の体系と展開, 古今書院, pp.307-328.
- 6) 地盤工学会 設計用地盤定数の決め方—岩盤編—編集委員会編 (2014) : 設計用地盤定数の決め方—岩盤編—, 地盤工学会, pp.93-148.
- 7) 地盤工学会 原位置岩盤試験データベース (2008年度版) 編集委員会編 (2009) : 原位置岩盤試験データベース (2008年度版), 地盤工学会, pp.84-131.
- 8) 全国地質調査業協会連合会編 (2003) : ボーリングポケットブック (第4版), オーム社, pp.442-447.
- 9) 津田秀典 (2014) : ボーリング割れ目柱状図と割れ目系孔間断面図—グリムゼル岩盤試験場での事例—, 応用地質, Vol.55, No.5, pp.216-228.
- 10) 端山好和・皆川 潤 (1996) : 割れ目, 新版地学事典 (地学団体研究会新版地学事典編集委員会編), 平凡社, pp.1441-1442.
- 11) 西村祐二郎・今岡照喜・金折裕司・亀谷 敦 (2012) : 山口県地質図第3版 (15万分の1), 山口地学会.
- 12) 西村祐二郎 (2009) : 山口県宇部—小野田地域, 日本地方地質誌 6 中国地方 (日本地質学会編), 朝倉書店, pp.204-205.
- 13) 山口地学会編 (1991) : 山口県の岩石図鑑, 第一学習社, p.131.
- 14) 地盤工学会地盤調査規格・基準委員会編 (2014) : 地盤工学会基準 (JGS1531-2012) 地盤の指標値を求めるためのプレッシャーメータ試験方法, 地盤調査の方法と解説—二分冊の2—, 丸善出版, pp.664-668.
- 15) 土木学会監修, 土木用語辞典編集委員会編 (1974) : 変形係数, 土木用語辞典, コロナ社・技報堂, p.188.
- 16) Price, N.J. (1959) : Mechanics of Jointing in Rocks, Geol. Mag., Vol.96, pp.149-167.
- 17) 三木幸蔵・古谷正和 (1996) : 土木技術者のための岩石・岩盤図鑑, 鹿島出版会, pp.232-233.
- 18) ショルツ, H. (2010) : 地震と断層の力学 第二版, 柳谷俊・中谷正生訳, 古今書院, pp.104-107.

(2015年7月31日受付, 2017年1月20日受理)

深度欄の薄墨部は孔内水平載荷試験の区間境界を示す。

岩相	割れ目 集合体	深度 (m)	割れ目間隔図				孔内水平載荷試験 区間	割れ目集合体区間												
			階段 縦長 L (m)	階段 横長 B (mm)	階段面積 A = Σ (L × B) (mm ²)			平均 割れ目 間隔 sa (mm)	変形係数 Db (MPa)	平均 割れ目 間隔 sa (mm)	階段面積 A = Σ (L × B) (mm ²)	変形係数 (推測) Dbz (MPa)								
片状岩 (Sg)	F1	0.678	—	—	—	15, 246	27	—	22	—	—	—								
		0.729	0.051	51	2601															
		0.781	0.052	52	2704															
		0.841	0.060	60	3600															
		0.887	0.046	46	2116															
		1.185	0.298	0	0															
	—	1.250	0.065	65	4225	22, 239	44	212. 1	—	—	—	—								
		1.272	0.022	22	484															
		1.281	0.009	9	81															
		1.296	0.015	15	225															
		1.378	0.082	82	6724															
		1.445	0.067	67	4489															
		1.458	0.013	13	169															
		1.495	0.037	37	1369															
		1.550	0.055	55	3025															
		1.581	0.031	31	961															
	F2	1.590	0.009	9	81	16, 408	33	66. 0	30	10, 236	97. 6	140. 9								
		1.607	0.017	17	289															
		1.661	0.054	54	2916															
		1.700	0.039	0	0															
		1.736	0.036	36	1296															
		1.747	0.011	11	121															
		1.750	0.003	3	9															
		1.775	0.025	25	625															
		1.821	0.046	46	2116															
		1.890	0.069	0	0															
		1.947	0.057	57	3249															
		1.986	0.039	39	1521															
		2.000	0.014	14	196															
		2.069	0.069	0	0															
		2.116	0.047	47	2209															
		2.145	0.029	29	841															
		—	2.216	0.071	71								5041	21, 200	42	81. 8	33	9, 905	38. 2	38. 2
			2.229	0.013	13								169							
	2.250		0.021	21	441															
	2.296		0.046	46	2116															
	2.328		0.032	32	1024															
	2.338		0.010	10	100															
	2.351		0.013	13	169															
	2.410		0.059	59	3481															
	2.422		0.012	12	144															
	2.444		0.022	22	484															
	F3	2.465	0.021	21	441	16, 806	34	109. 6	18	5, 070	33. 1	33. 1								
		2.486	0.021	21	441															
		2.514	0.028	28	784															
		2.548	0.034	34	1156															
		2.557	0.009	9	81															
		2.597	0.040	40	1600															
		2.676	0.079	79	6241															
		2.703	0.027	27	729															
		2.750	0.047	47	2209															
		2.772	0.022	22	484															
	F4	2.783	0.011	11	121	16, 052	32	33. 6	22	14, 531	30. 4	30. 4								
		2.855	0.072	72	5184															
		2.866	0.011	11	121															
		2.900	0.034	34	1156															
		3.000	0.100	0	0															
3.007		0.007	7	49																
3.028		0.021	21	441																
3.055		0.027	27	729																
3.069		0.014	14	196																
3.092		0.023	23	529																
—	3.135	0.043	43	1849	16, 052	32	33. 6	22	14, 531	30. 4	30. 4									
	3.200	0.065	65	4225																
	3.204	0.004	4	16																
	3.209	0.005	5	25																
	3.250	0.041	41	1681																
	3.289	0.039	39	1521																
	3.301	0.012	12	144																
	3.319	0.018	18	324																
	3.332	0.013	13	169																
	3.390	0.058	58	3364																
F5	3.398	0.008	8	64	16, 052	32	33. 6	22	14, 531	30. 4	30. 4									
	3.415	0.017	17	289																
	3.437	0.022	22	484																
	3.458	0.021	21	441																
	3.492	0.034	34	1156																
	3.506	0.014	14	196																
	3.551	0.045	45	2025																

付表-1 (続き) 割れ目データおよび孔内水平載荷試験データ

地相	割れ目集合体	深度 (m)	割れ目間隔図				平均 割れ目 間隔 sa (mm)	孔内水平載荷試験 区間 Db (MPa)	割れ目集合体区間				
			階段 縦長 L (m)	階段 横長 B (mm)	階段面積 A = Σ (L × B) (mm ²)				平均 割れ目 間隔 sa (mm)	A = Σ (L × B) (mm ²)	変形係数 (推測) Dbz (MPa)		
片状岩 (Sg)	F5 続き	3.554	0.003	3	9	16,052 続き	32 続き	33.6 続き	22 続き	14,531 続き	30.4 続き	30.4 続き	
		3.586	0.032	32	1024								
		3.589	0.003	3	9								
		3.618	0.029	29	841								
		3.635	0.017	17	289								
		3.644	0.009	9	81								
		3.691	0.047	47	2209								
		3.723	0.032	32	1024								
		3.740	0.017	17	289								
		3.750	0.010	10	100								
—	3.946	0.196	0	0	31,550	63	54.7	—	0	0.0	—		
	4.104	0.158	158	24964					—	—	—	—	
	4.149	0.045	45	2025					43	6,586	11.4	37.3	
	4.155	0.006	6	36									
	4.200	0.045	45	2025									
	4.250	0.050	50	2500									
	4.262	0.012	12	144									
	4.321	0.059	59	3481									
	4.333	0.012	12	144									
	4.342	0.009	9	81									
4.347	0.005	5	25										
4.355	0.008	8	64	50,742	101	152.7	8,594	25.9					—
4.362	0.007	7	49										
4.421	0.059	59	3481										
4.427	0.006	6	36										
4.460	0.033	33	1089										
4.598	0.138	138	19044						—	—	—	—	
4.750	0.152	152	23104										
4.777	0.027	27	729										
4.787	0.010	10	100										
4.804	0.017	17	289										
4.849	0.045	45	2025										
4.905	0.056	56	3136										
4.910	0.005	5	25										
5.025	0.115	115	13225										
5.149	0.124	124	15376	F7	36,993	74	183.2	42					5,575
5.167	0.018	18	324										
5.208	0.041	0	0										
5.250	0.042	42	1764										
5.269	0.019	19	361										
5.319	0.050	50	2500										
5.323	0.004	4	16										
5.394	0.071	71	5041										
5.412	0.018	18	324										
5.471	0.059	59	3481										
—	5.679	0.208	208	43264	60,028	120	468.1	29	2,088	10.3	32.7		
	5.750	0.071	71	5041									
	5.815	0.065	65	4225									
	5.817	0.002	2	4									
	5.896	0.079	79	6241									
	5.897	0.001	1	1									
	6.029	0.132	132	17424									
	6.037	0.008	8	64									
	6.041	0.004	4	16									
	6.049	0.008	8	64									
塊状岩 (Mw)	6.140	0.091	91	8281	41,370	83	498.5	—	—	—	—		
	6.174	0.034	34	1156									
	6.187	0.013	13	169									
	6.189	0.002	2	4									
	6.250	0.061	61	3721									
	6.475	0.225	225	50625									
	6.491	0.016	16	256									
	6.552	0.061	61	3721									
	6.709	0.157	157	24649									
	6.821	0.112	112	12544									
塊状岩 (Mg)	6.998	0.177	177	31329	123,128	164	—	—	—	—	—		
	7.000	0.002	2	4									

Fracture Distribution and Deformation Modulus on Serpentine —A Case Study in the Maruo District, Ube City, Yamaguchi Prefecture, SW Japan—

Hidegori TSUDA

Abstract

Mode of occurrence and distribution of fractures are described on a boring core drilled in non-weathered serpentinite, exposed at the Ube coastal area, Yamaguchi Prefecture. The fracture tends to form a zone, named the fracture zone, composed of several fractures on the borehole fracture column. In the case of the Ube serpentinite body, a fracture zone includes 5~20 fractures and the mean fracture spacing is around 20~40 mm. The deformation modulus obtained by pressure meter test in the borehole ranges 30~500MPa, however, the re-calculated value of deformation modulus corresponding to the most fracture zone concentrates within 30 to 40MPa. This value is ca. 1/10 of the non-fractured part, which gives the mean deformation modulus of fracture zones (weakened parts) of serpentinite.

Key words : fracture distribution, fracture zone, deformation modulus, serpentinite