

岩盤の変形特性の評価における不連続面の影響

國井 仁彦¹・谷本 親伯²・中村 真³・岸田 潔⁴

¹正会員 工修 (株)ニュージェック 取締役 (〒542 大阪市中央区島之内 1-20-19)

²正会員 工博 京都大学助教授 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒606-01 京都市左京区吉田本町)

³正会員 工修 (株)ニュージェック 技術開発部 (〒542 大阪市中央区島之内 1-20-19)

⁴正会員 工修 京都大学助手 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒606-01 京都市左京区吉田本町)

不連続性岩盤の変形挙動を把握するためには、不連続面の変形特性を正確に評価することが重要である。一方、原位置岩盤の変形特性を把握するために行われる平板載荷試験では、岩盤を等方均質と考えており、不連続面の評価がほとんどなされていないのが現状である。

そこで本研究では、不連続面を考慮した原位置岩盤の変形特性の評価法として、永久変形係数に着目し、既存の試験結果の再評価を行い、不連続面の特性を考慮した分類を実施した。このことにより、変形特性の評価における永久変形係数の有効性を示した。さらに、原位置平板載荷試験法の実施にあたり、不連続面を考慮する方法を提案した。

Key Words : jointed rock, load-displacement curve, plate bearing test, rock classification, modulus of permanent deformation, DEM

1. はじめに

岩盤の変形特性を把握する上で、不連続面の影響を考慮することは、大変重要な問題である。土木の分野では、ダムや地下空洞などの構造物を構築する場合、比較的岩盤の良好な地点のみに建設されていたので、岩盤変形は無視して差し支えないもの、あるいは等方均質の弾性体とみなせるものとして扱われてきた¹⁾。岩盤の変形特性が注目され始めたのは、1959年のフランスのマルパッセダムの破壊が契機である。マルパッセダムでは、異方性の強い片麻岩からなるダム基盤内の割れ目に地下水が浸入し、この影響でアーチダムの破壊を引き起こしたとされている²⁾。

この時期は第2次世界大戦後の復興期にあたり、各国とも高度な設計技術を駆使して、より経済的なダムを設計し、施工することに主な関心が向けられていた。こうしてダム本体の設計技術は大幅に進歩したが、マルパッセダムが岩盤の欠陥(割れ目)から破壊したものであることが判明すると、ダムの安定を考える上で、基礎岩盤の安定がダム本体と同等またはそれ以上に重要であるとの認識が生まれ、岩盤の変形特性を原位置試験により捉えようという

機運が高まってきた³⁾。それを受けて、当時着工していた黒部ダムでは、1961年から日本で初めて大規模な原位置試験を組織的に行った。これが後に土木の分野の大規模工事で岩盤試験の実施を定着させる先駆的なものとなった。

岩盤の力学的性質は、主に岩盤を構成する岩石の性質と不連続面の性状に支配される。すなわち、不連続面の存在が著しくなく、不連続面の開口もほとんどない岩盤は、岩石の固結度の強弱にかかわらず、岩石と同じような力学的性質を示すことが多い。一方、不連続面が発達し、緩みのある岩盤では、岩石の固結の弱い場合には岩石実質部の性質が卓越することもあるが、一般には不連続面の影響が卓越する傾向にある。そのために、不連続面の間隔や性状を指標とした岩盤分類も試みられている。現在最も一般に用いられている岩盤分類は、田中⁴⁾によって提案された、いわゆる電力中央研究所(電研)方式に準じたものである。田中は、岩盤観察による風化の程度によってA, B, C_H, C_M, C_L, Dで6区分に分類した。これ以後、国内でも不連続面の間隔や岩石の強度を定量的に評価した分類手法^{5)~9)}が提案されている。また海外では、Bartonら¹⁰⁾、Müller¹¹⁾、O'Neil¹²⁾、Bieniawski¹³⁾らも、不連続

面の性状を定量的に評価した分類を試み、かなり普及している。しかしながら、岩石と不連続面が岩盤の力学的性質に寄与する機構について考察した例は少ない^{14), 15)}。

さらに、岩盤の変形挙動を数値解析で捉えようとする試みも数多く見受けられる。これらの解析手法は大別して2種類に分けられる。ジョイント要素を用いたFEM¹⁶⁾やDEM^{17), 18)}やDDA¹⁹⁾、さらには亀裂ネットワークモデル^{20), 21)}等は、個々の不連続面をモデル化した不連続体解析手法である。一方、不連続面を含む岩盤を等価な連続体モデルとして考える手法として、クラックテンソル理論²²⁾や損傷テンソル理論²³⁾を用いたFEM解析や、マイクロメカニクス²⁴⁾に基づく連続体モデルによるFEM解析などが提案されている。しかし、いずれの解析手法においても、不連続面の物性を正確に把握する必要があり、原位置試験から不連続面の物性を評価できる手法の確立が望まれている。

岩盤の変形特性に対する不連続面の影響を、原位置試験結果から評価する指標として、R.E.Goodmanが提案した永久変形係数²⁵⁾に注目した研究が谷本ら^{26)~28)}により行われている。そこで本研究では、既存の試験結果を永久変形係数を用いて評価し、その適用性について考察する。さらに、現在の原位置変形試験の問題点についても指摘し、不連続面の影響を考慮した試験法および解析法について提案を行う。

2. 原位置変形試験の現状

現在最も多く用いられている原位置変形試験の1つに平板载荷試験がある。この試験は、岩盤表面に荷重を与えて生ずる変位を測定することにより、疑似的に等方均質な連続体の仮定のもとで半無限弾性体における力と変位の関係から変形特性を得るものであり、主に弾性係数(E)と変形係数(D)で評価する。各係数は、平板载荷試験で得られた応力(荷重) - 変位関係に基づき図-1に示す各勾配から変形係数や弾性係数が求められる。変形係数は、応力 - 変位曲線の包絡線より算出し、弾性係数は最大荷重に近い荷重レベルで得られた直線部分の接線勾配または割線勾配として求められる。等変位载荷(剛板)の場合、次式で算出されている^{29), 30)}。

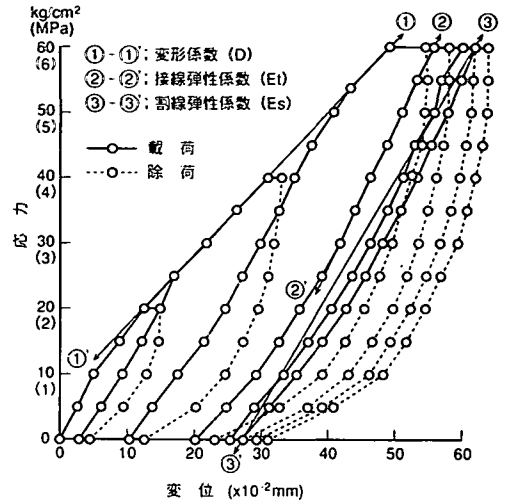


図-1 平板载荷試験における応力-変位曲線の例²⁹⁾

$$D \text{ または } E = \frac{(1 - \nu^2)}{2a} \cdot \frac{\Delta F}{\Delta \delta} \quad (2.1)$$

ここに、 ν : 岩盤のポアソン比

a : 剛板の半径

ΔF : 係数を求める区間の荷重増分

$\Delta \delta$: 係数を求める区間の変位増分

ところが、このようにして求められた弾性係数は、原位置岩盤に内在する不連続面の影響で、岩石実質部の弾性係数とは一致せず、変形係数に関してはあくまで試験位置での評価であり、不連続面の走向、傾斜、間隔等が考慮されていないことがほとんどであるため、試験位置以外の変形特性としては適用できず、大まかな指標として活用している程度である³¹⁾。

図-2に著者らがこれまでに行ってきた平板载荷試験結果から求めた変形係数および弾性係数と、岩級区分の関係を示す。同図より変形係数、弾性係数共に、岩級Bから岩級Dへと移行するにつれ右下がりの分布、すなわち低下を示している。しかし、同じ岩級に分類された岩盤でも、各係数共にその値にはバラツキが大きく、例えば同じ岩種でもB級の平均値よりもC_H級の最大値が大きくなるなど各係数は1対1に対応していない。これらの現象は岩盤の変形特性に不連続面の性状が複雑に関係するために生ずるものであり、岩盤の定性的、定量的評価を行う時には、不連続面の傾度だけではなく存在する不連続面の走向や傾斜や性状など、不連続面の影響を考慮した評価が必要であることを示している。

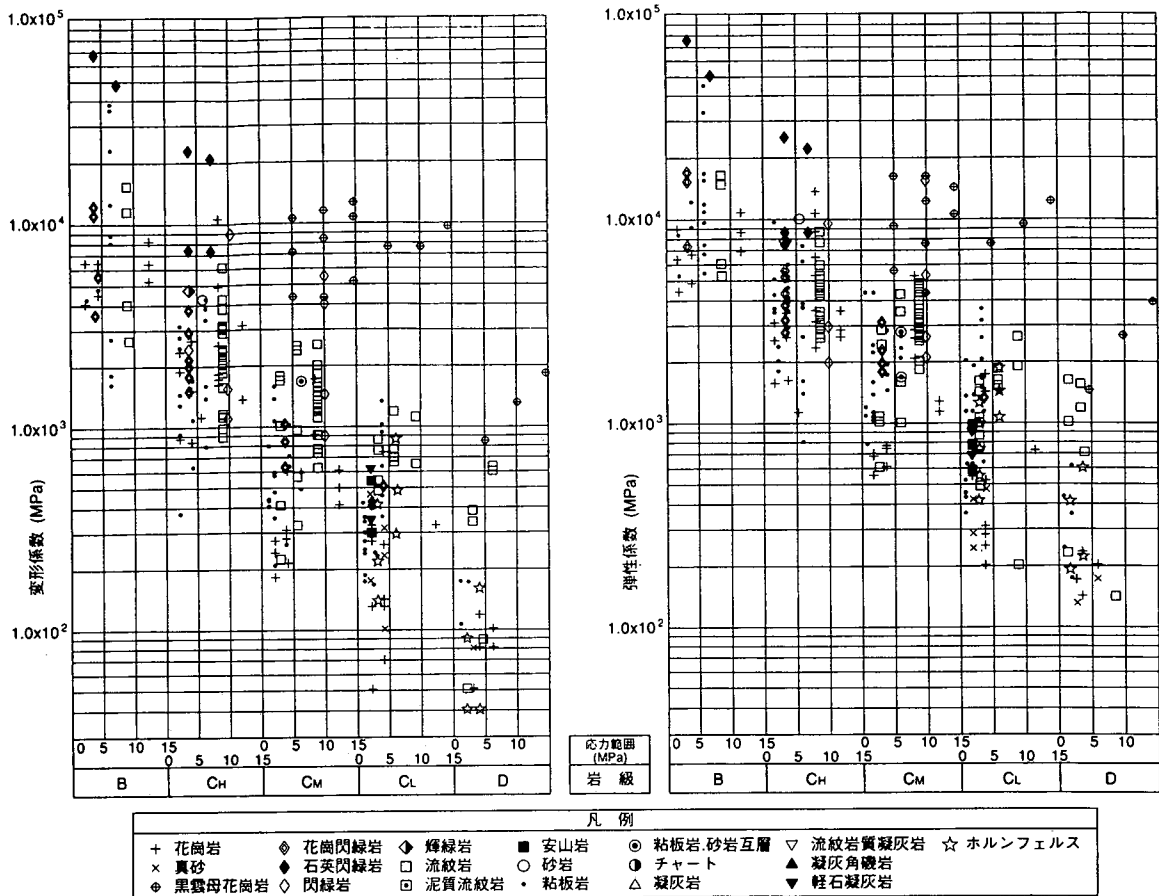


図-2 変形係数および弾性係数と岩種・岩級の比較

以上のことから、本研究では不連続面を考慮した評価手法として、永久変形係数による岩盤評価について提案を行う。

3. 永久変形係数による岩盤評価

平板載荷試験において、図-3 に示すような繰り返し載荷を行うと、荷重をゼロに戻した状態で永久変形量が現れる。そこで Goodman は、繰り返し載荷時の各サイクル毎で、応力の増分と永久変形量の増分の比として永久変形係数 (M) を定義している。彼は、永久変形係数は応力レベルによらず、概ね一定勾配であると考えているが、本研究で荷重-変位曲線を解析し M を算出したところ、Goodman が一定と想定した M は荷重レベルによって変化しているものがかかり認められたため、本研究では各応力の増分区間での勾配が変化すると考えて評価を行う。

既存の試験結果から、繰り返し載荷時の各サイ

クル毎で、応力の増分と永久変形量の比として永久変形係数を求めた一例を図-4 に示す。対象地点の岩種は頁岩で、岩級は C_M、C_L および D 級である。また、当地点での原位置変形試験は、載荷板の直径が 30cm の等変位載荷である。同図より、概ね岩級がよいほど永久変形係数も大きくなっている。さらに永久変形係数の分布は、載荷応力のレベルにかかわらず、ほぼ一定であることが多いが、他に右上がりの分布、すなわち応力の増分と共に永久変形係数が増加するタイプと、右下がりの分布、すなわち応力の増分と共に永久変形係数が減少するタイプの 3 種類がある。右上がりの分布を示すのは、不連続面が閉合するにつれ、永久変形量の増分が少なくなるためだと思われる。一方、右下がりの分布を示すのは、不連続面の破壊が進み、永久変形量の増分が大きくなるためだと思われる。

図-4 に示すように算出した永久変形係数と、各段階の載荷応力増分の平均値の関係を岩種および岩級別に分類したのが図-5 である。同図より概ね

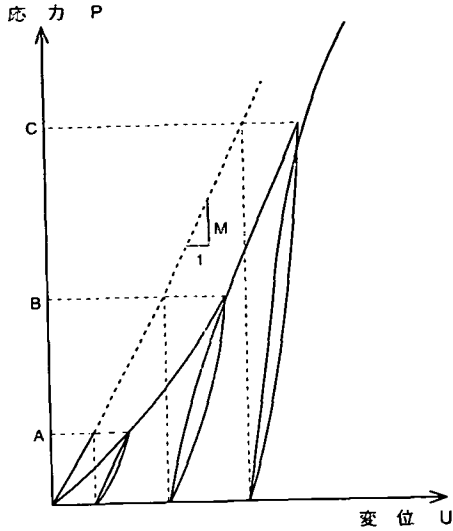


図-3 永久変形係数の概念

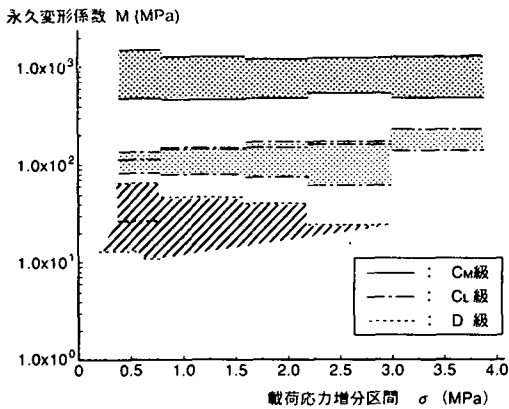


図-4 各載荷応力増分区間と永久変形係数の関係

永久変形係数によって岩級が分類できる。しかし、この分類から外れる例を示すと、永久変形係数が C_M 級の分布域である $3 \times 10^2 \sim 1 \times 10^3$ MPa の範囲内に D 級岩盤での永久変形係数が存在するのが見受けられる。この地点の岩種はチャートであり、岩塊は堅固であるが、破碎帯に位置しているため、周辺地盤には節理が発達している。そのために、岩級としては D 級と評価された。ところが、試験位置の地質観察結果をみると、載荷面には試験結果に影響を及ぼすような節理があまり存在せず、岩石実質部の変形特性が支配的であるために、永久変形係数が高くなったと思われる。

このことは、見た目の不連続面の傾度だけではな

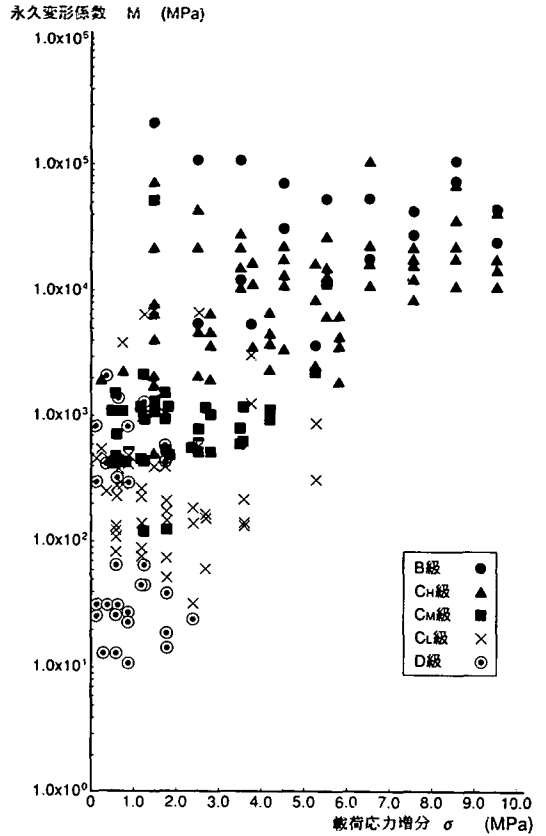


図-5 永久変形係数と載荷応力増分の関係

く、載荷方向との関係を考慮した評価法が必要であることを示している。さらに、永久変形係数の分布（一定、右上り、右下り）から不連続面の性状を推定することも可能である。一般に、岩級による分布帯から外れる試験位置では、変形に支配的な低傾斜の不連続面や、変形にあまり関与していない高傾斜の不連続面が存在するなど、不連続面の性状に関係が深いと考えられる。そこで、このような試験位置の不連続面の性状についての考察を以下で行う。

4. 原位置平板載荷試験における一提案

現在の原位置平板載荷試験では、岩盤の変形特性を擬似的に等方均質な連続体と仮定し、半無限弾性体における力と変位関係から求めているが、岩盤は本来非均質、異方的であり、亀裂等の影響を含む。そこで、原位置平板載荷試験における不連続面の影響を検討するために、通常計測される載荷方向の変位に加えて、それに直交する方向の変位についても計測を行った。

表-1 岩級区分と変形特性が逆転する例

	岩級	変形係数 D (MPa)	割線弾性 係数 E _s (MPa)	接線弾性 係数 E _t (MPa)
K地点	C _H	370	1,040	1,210
H地点	C _M	1,490	3,350	3,770

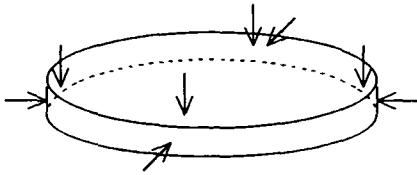


図-6 載荷板変位測定位置

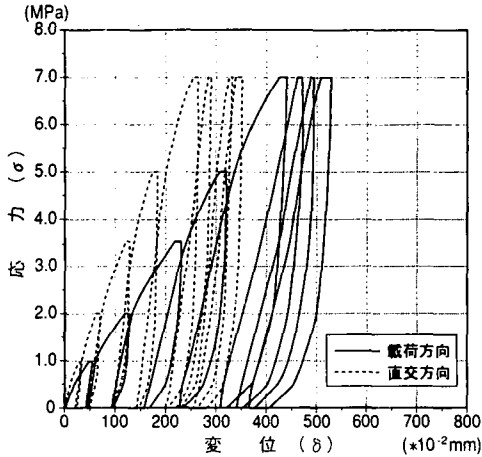


図-7 応力-変位曲線図(K地点)

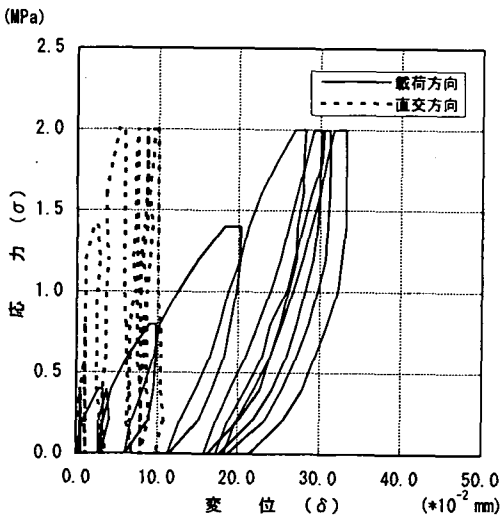


図-8 応力-変位曲線図(H地点)

計測を行ったのはK地点およびH地点の2地点である。K地点の岩種は頁岩であり、岩級はC_H級の硬質な岩盤であるが、強い構造作用を受け連続性のある節理が発達している。試験位置付近の節理には、顕著なシームは認められないが、載荷面の直下へ差し込む北落ち40°の節理が見受けられる。

一方、H地点の地質は淡緑色を帯びた凝灰岩からなり、直径2mm程度以下の長石や岩片を含む。節理は高角度傾斜のものが5~10cm間隔で発達しているために岩級区分はC_M級ではあるが、岩石実質部は硬質である。

両地点において実施した載荷板の直径は30cmとし、最大載荷応力をK地点では7MPa、H地点では2MPaとして等変位載荷を行った。載荷方向の変位は、載荷板上の4点の変位の平均とし、直交方向の変位は、通常載荷板上でのみ測定する変位計を、図-6に示すように載荷板側面にも設置し、載荷板側面の4点の変位量から載荷面中心の変位を算出した。

K地点およびH地点での載荷および直交方向の変位と載荷応力の関係を図-7および図-8に示す。同図より、K地点では直交方向の変位が載荷方向の変位の3分の2程度、H地点では直交方向の変位が載荷方向の変位の3分の1程度生じていることがわかる。また、表-1に示すように各地点での変形係数と弾性係数を比較すると、K地点では岩級がC_H級であるにもかかわらず、C_M級のH地点よりも低い値となっている。

さらに、図-9、図-10に示すような載荷面の中心の直交方向移動軌跡と、図-11、図-12に示す地質観察結果より、K地点では北落ち40°の不連続面の影響を受けてこの不連続面の走向に直行する方向に変位していることが考えられる。一方、H地点では節理が発達しているにもかかわらず、南落ち70°前後の不連続面が支配的であるため、直交方向の変位が小さいと思われる。このように、直交方向の変位と地質観察結果との比較により、不連続面の走向、傾斜との相関があることがわかった。

現在の原位置平板載荷試験の評価では、載荷方向の変位のみから、岩盤の変形特性を求めているが、直交方向の変位と載荷方向の変位をベクトルとして合成した変位で評価すると、K地点では垂直方向の変位の約1.2倍の変位が生じていることになり、変形係数は、載荷方向の変位で考えていた時よりも小さくなる。すなわち、現状では岩盤の変形特性を

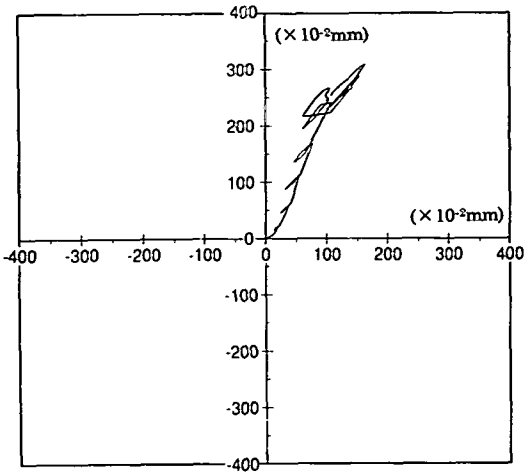


図-9 直交方向移動軌跡(K地点)

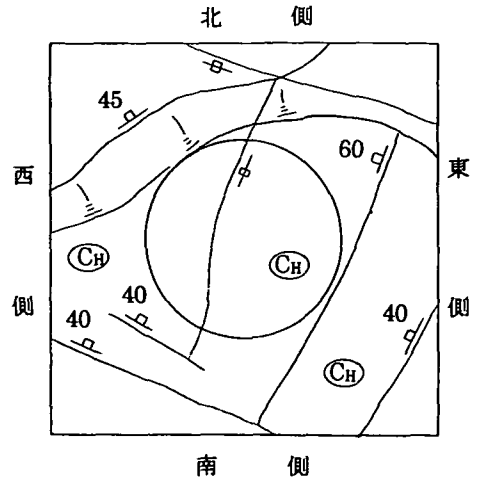


図-11 地質観察結果(K地点)

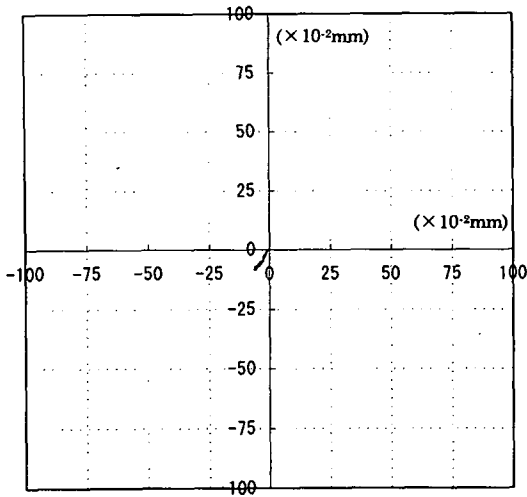


図-10 直交方向移動軌跡(H地点)

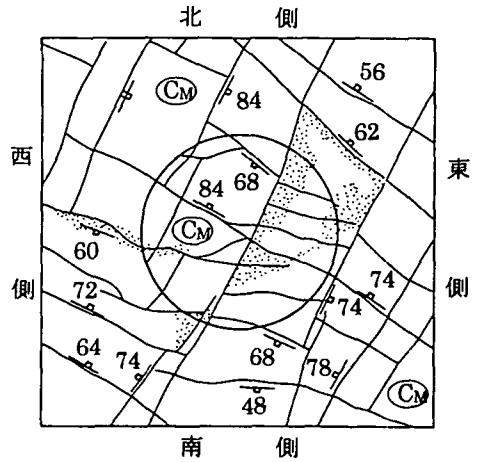


図-12 地質観察結果(H地点)

過大に評価していることになると考えられる。しかし、現在評価している変形特性の減らしかたについての定量的評価は、載荷方向と合成変位の方向が異なる場合の変形係数の求めかたに帰着するが、この問題については、今後の検討課題である。そこで、載荷方向に対する不連続面の傾斜の違いによって異方性の大きさの異なる岩盤挙動を把握するために、次章において数値シミュレーションによる検討を実施する。

5. 数値シミュレーションにおける岩盤挙動の把握

従来行なわれている原位置平板載荷試験において、載荷面に直交方向の変位を測定したところ、不連続面の存在によると考えられる直交方向の変位が生じていることがわかった。そこで、まず原位置平板載荷試験のシミュレーションを行い、不連続性岩盤の挙動について検討を行った。解析手法としては、個々の不連続面を直接モデル化するDEM(個

表-2 解析に用いる物性値

上載荷重 q	7 MPa
弾性係数 E	60 GPa
ポアソン比 ν	0.25
密度 ρ	2.6 g/cm ³
不連続面の角度 α	40°
不連続面の間隔 d	20 cm
不連続面の垂直剛性 K_n	150 GPa/m
不連続面のせん断剛性 K_s	1.5 GPa/m

次に図-15に示す主応力図では、主応力の流れがGaziev&Erlikhmanの実験結果³⁴⁾から示された応力球根に近い分布を程している。

さらに、不連続面のせん断変位を図-16に示す。同図より、解析領域のブロックの挙動は、載荷板から100cm程度の深さまでの不連続面に沿った、せん断挙動が支配的であることがわかる。

原位置試験での実測値と、DEMでの計測値を比較したのが図-17である。本シミュレーションを不連続面を考慮しない、例えば等方均質のFEM解で実施すれば、載荷面に直交方向の変位は、ポアソン効果分しか生じないのは明らかである。ところが不連続面を考慮した本解析では、載荷応力が5 MPa程度までの範囲では、実測値および計算値は載荷方向、直交方向共に概ねよい相関を示すことができた。

但し、実測値においては、載荷応力5 MPaを越えた付近から変位が大きくなっている。これは、載荷面近傍の不連続面での応力レベルがある大きさに達した時点で、せん断破壊を生じたために、変位が大きく出たものと考えられる。解析では、不連続面の剛性を一定値として行ったが、別途に実施する不連続面の一面せん断試験などから、不連続面の強度特性を設定し、破壊後の剛性を評価することができれば、ある応力レベルから変形のモードが異なる挙動についてもシミュレーションできる。

次に、原位置平板試験に及ぼす不連続面の角度の影響を検討するために、傾斜角(図-13に示す α)を水平の0°から15°ピッチに変えてシミュレーションを行った。解析モデルおよび解析に用いた物性値は、不連続面の角度を除いて先のシミュレーションと同様である。

不連続面の角度の違いによる載荷方向変位を示したのが図-18である。同図より、不連続面の角度によって岩盤の変形挙動に異方性を呈することを

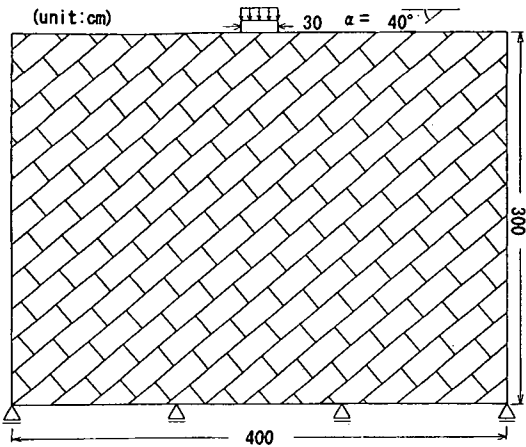


図-13 解析モデル

別要素法)を適用した。

解析の対象としたのは、水平方向の変位が顕著に現れているK地点とし、載荷板の挙動に影響を及ぼしたと思われる走向が北西方向で傾斜が北落ち40°の不連続面の系の走向に直交する断面において、2次元個別要素解析コード(UDEC)を用いて行った。

図-13に解析モデルを示す。解析領域は、縦300cm、横400cmとし、個々の要素は長辺40cm、短辺20cmのブロックを傾斜角40°で千鳥に配置した。さらに、載荷板については、幅30cm、高さ10cmの剛体としてモデル化した。

解析に用いた物性値を表-2に示す。岩石実質部の弾性係数、ポアソン比および密度については、頁岩のコアによる試験結果を、不連続面の角度および間隔は、地質観察結果を用いた。上載荷重は、原位置試験での最大荷重の7MPaとし、載荷ステップを 1.0×10^{-6} secとして解析を行った。不連続面の剛性については、著者らが別途実施している不連続面コアによる剛性試験結果^{32), 33)}を参考に、新鮮で密着性の高い節理が卓越していることを考慮して垂直剛性をせん断剛性の100倍と仮定した。そして、載荷方向と直交方向の変位が実測値と近くなるように、繰り返し計算を行うことによって垂直剛性を150GPa/m、せん断剛性を1.5GPa/mと推定した。なお、本解析では不連続面の破壊は考慮していない。

解析の結果得られた変位ベクトルを図-14に示す。同図において、載荷面付近の変位ベクトルに着目すると、載荷方向に加えて直交方向にも変位が生じている。また、載荷板下部のブロックが不連続面に沿って挙動していることがわかる。

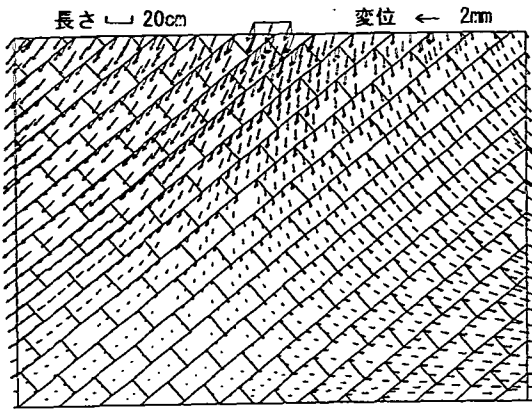


図-14 変位ベクトル図

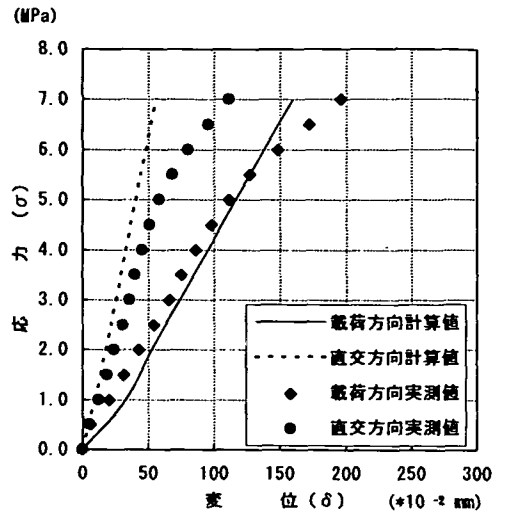


図-17 計算値と実測値の比較

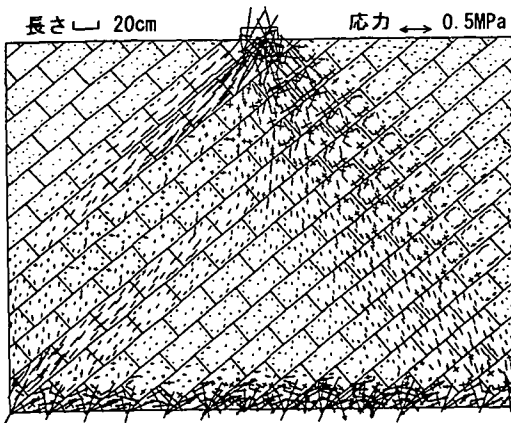


図-15 主応力図

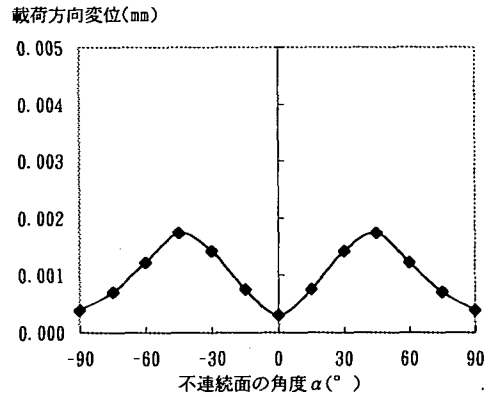


図-18 不連続面の角度の比較

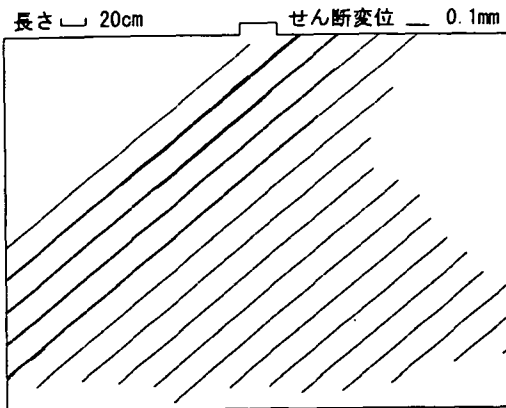


図-16 不連続面のせん断変位図

示している。さらに不連続面の系が複雑存在する場合には、より複雑な挙動を示すものと思われる。

6. 結言

本研究では、まず著者らが今までに実施した、原位置平板載荷試験の結果の再評価を行った。その結果、変形係数や弾性係数と岩級との関係で、同じ岩級に分類された地点でもその値にはバラツキが大きいことから、岩盤の力学特性の定性的、定量的評価を行うためには不連続面の頻度や、存在する不連続面の走向や傾斜や性状など、不連続面の影響を考慮した評価が必要であることを示した。

そこで次に、不連続面を考慮した原位置試験の評価法として、永久変形係数を用いて評価を行った。

その結果、不連続面の特徴を考慮した分類を行うことにより、永久変形係数との相関が概ねよく得られ、本研究での評価法の有効性を示すことができた。

一方、平板載荷試験において通常計測されている載荷方向の変位に加えて、それに直交する方向の変位について計測を行った結果、不連続面の走向、傾斜と相関を持って直交方向にも変位を生じていることがわかった。したがって、原位置岩盤の変形特性を、載荷方向と直交方向の合成変位で評価すると、変形係数は載荷方向の変位だけで考えた場合よりも小さくなる。このことは、現状では岩盤の変形特性を過大に評価していると考えられ、今後さらに検討する必要がある。

最後に、原位置平板載荷試験の数値シミュレーションと実際の岩盤挙動の分析を試みたところ、全体の挙動に対して不連続面の及ぼす影響をより明瞭に表すことができた。今後、本研究で実施したように、原位置平板載荷試験において載荷面の直交方向の変位を測定して、別途実施する不連続面コアによる剛性試験^{32), 33)}などを参考に、従来の載荷方向の変位と併せて2方向の変位から逆解析的に不連続面の垂直剛性とせん断剛性を正確に推定できれば、定量的な不連続性岩盤の変形特性の同定が可能になる。

参考文献

- 1) 村上省一：土木における実用岩盤力学，pp.1～5，オーム社，1985。
- 2) Goodman, R. E. 著，赤井浩一他訳：不連続性岩盤の地質工学，pp.1～9，森北出版，1978。
- 3) 飯田隆一：土木工学における岩盤力学概説，彰国社，pp.3～5，1978。
- 4) 田中治雄：土木技術者のための地質学入門，山海堂，1964。
- 5) 広田秀一：鉄道地質学，1942。
- 6) 土木学会：第11回岩盤力学シンポジウム，1975。
- 7) 日本道路協会：道路トンネル便覧，pp.56～57，1975。
- 8) 日本道路公団：日本道路公団設計要領，第三集，トンネル。
- 9) Kikuchi, K., Saito, K., and Kusunoki, K. : Geotechnically Integrated Evaluation on the Stability of Dam Foundation Rocks, *Trans. 14th Int. Congress Large Dams*, Vol.2, pp.49～74, 1982.
- 10) Batou, N., Lien, R. and Lunde, J. : Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support, *Rock Mechanics*, Vol.6, No.4, pp.189～236, Springer-Verlag, 1974.
- 11) Müller, L. : *Der Felsbau, Ferdinand Enke*, pp.264～252, 1963.
- 12) Alan L. O'Neil : Rock reinforcement in underground construction, *Proc. Fourth Annual Symposium of Engineering Geology Soils Engineering*, University of Idaho, Moscow, pp.1～9, 1966.
- 13) Bieniawski, Z. T. : Geomechanics classification of rock masses and its application in tunneling, *Proc. 3rd Int. Cong. Rock Mech.*, Vol.2, Part A, pp.27～32, 1974.
- 14) Müller, L., Sauer, G. und Vardar, M. : Dreidimensionale Spannungsumlagerungsprozesse im Bereich der Ortbrust, *Rock Mechanics*, Suppl.7, pp.67～85, 1978.
- 15) Deere, D. V. and Miller, R. P. : Engineering classification and index properties for intact rock, *Tech. Rept. No. AFWL-TR-65-116, Air Force Weapons Lab.*, Kirtland Air Force Base, New Mexico, 1966.
- 16) Goodman, R. E., Tatlor, R. L. and Brekke, T. L. : A model for the mechanics of jointed rock, *Journal of SM & FD*, Vol.94, pp.637～659, ASCE, 1968.
- 17) Cundall, P. A. : The measurement and analysis of acceleration in rock slope, *Ph. D. Dissertation, University of London, Imperial College of Science and Technology*, 1971.
- 18) Cundall, P. A. : A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock systems, *Proc. of Symp. on Rock Fracture (ISRM)*, Nancy, paper II-8, 1971.
- 19) Shi, G. H. : Discontinuous deformation analysis: a new approach to the statics and dynamics of block systems, *Ph. D. Dissertation, University of California at Berkeley*, 1985.
- 20) Long, J. C. S., Remer, J. S., Wilson, C. R. and Witherspoon, P. A. : Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures, *Water Resource Research*, Vol.18, No.3, pp.645～658, 1982.
- 21) Dershowitz, W. S., Gordon, B. M. and Kafritsas, J. C. : A new three dimensional model for flow in fractured rock, *IAH Conference Jan. 7-12, 1985, Tuscon Arizona, Vol. XV II proceedings published by a committee of USA members of the International Association of Hydrologists*, pp.449～462, 1985.
- 22) Oda, M., Suzuki, K. and Maeshibu, T. : Elastic compliance for rock-like materials with random cracks, *Soils and Foundations*, Vol.24, No.4, pp.27～40, 1984.
- 23) 京谷孝史，市川康明，川本脩万：岩盤の力学特性評価における損傷力学的アプローチ，土と基礎，Vol.35-3, pp.23～28, March, 1987.
- 24) 吉田秀典，堀井秀之：マイクロメカニクスに基づく岩盤の連続体モデルと地下発電所空洞掘削の解析，第26回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.426～430, 1995.
- 25) Goodman, R. E. : *Introduction to Rock Mechanics*, pp.170～189, John Wiley & Sons, 1980.
- 26) 谷本親伯，岸田潔，岡村正典：孔内載荷試験による岩盤不連続面剛性の決定，第26回土質工学研究発表会発表講演集，pp.1147～1150, 1991.

- 27) 谷本親伯, 岸田潔, 梅澤孝行, 吉津洋一: 孔内載荷試験による不連続性岩盤の荷重～変位曲線の解釈, 第25回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.556～560, 1993.
- 28) Tanimoto, C., Kishida, K., Umezawa, T., Yosizu, Y., Kunii, K. and Kiyama, H.: Elastic and inelastic behaviour of rock masses in the load-displacement obtained through borehole jacking, *EUROCK'93*, Lisboa, Vol.1, pp.727～734, 1993.
- 29) 土木学会岩盤力学委員会: 原位置岩盤の変形およびせん断試験の指針, 土木学会, pp.3～16, 1983.
- 30) Timoshenko, S. and Goodier, J. N.: *Theory of Elasticity*, 2nd ed., McGraw-Hill, New York, 1951.
- 31) 谷本親伯, 岸田潔, 安東直紀, 吉津洋一, 園井仁彦: 原位置載荷試験による永久変形係数と載荷スケールの影響に関する基礎的研究, 第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.403～408, 1994.
- 32) 岸田潔, 谷本親伯, 藤崎淳: ラフネスおよび壁面強度を考慮した岩盤不連続面せん断挙動の評価, 第27回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.241～245, 1996.
- 33) 谷本親伯, 岸田潔: 岩盤不連続面剛性の評価と原位置岩盤の変形特性, 第28回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.119～123, 1997.
- 34) Gaziev, E. G. and Erlikhman, S. A.: Stress and strains in anisotropic rock foundation-model studies, *Symposium Soc. Internat. Mecanique des Roches*, Nancy, 1971.

(1996. 11. 14 受付)

EFFECT OF DISCONTINUITY TO ROCK DEFORMABILITY

Kimihiko KUNII, Chikaosa TANIMOTO, Makoto NAKAMURA
and Kiyoshi KISHIDA

It is important to evaluate the deformability of discontinuity accurately to understand the behavior of rock masses. However, the evaluation of the discontinuity is hardly performed in the plate bearing test to understand the deformability of the rock masses, but the rock mass is considered as an equal homogeneous.

Then, in this paper the modulus of permanent deformation is applied as an evaluation method of the deformability of the jointed rock masses. As a result, the effectiveness of the modulus of permanent deformation in the evaluation of the deformability is shown by this classification.