

開口量の異なる不連続面を配置した供試体の亀裂進展と強度特性に関する実験

田中 健嗣¹・石井 建樹^{1*}

¹ 木更津工業高等専門学校 環境建設工学専攻 (〒292-0041 千葉県木更津市清見台東 2-11-1)
*E-mail: cishii@kisarazu.ac.jp

不連続性岩盤は、節理と呼ばれる不連続面を多く含んでいる。それらの内在する不連続面には、開口しているものや閉じているものなど、開口量の異なる不連続面が存在している。そこで本研究では、圧縮载荷時にも接触しない十分に開いた不連続面(開口不連続面)や接触するように作製した不連続面(接触面)を含んだ 2 種類の供試体を用いて、一軸圧縮試験を行った。これら内在する不連続面の違いによって、不連続面から発生するウイングクラックの進展速度や供試体の降伏強さやピーク強さなどの強度特性に異なる傾向が認められたので本稿で報告する。

Key Words : wing crack, crack growth ,yield strength ,peak strength ,flaw

1. はじめに

不連続性岩盤は、節理と呼ばれる不連続面を多く含んでいる¹⁾。従来より、不連続性岩盤を対象として、不連続面とそれにまつわる破壊挙動について多くの研究が行われている。その中で不連続面を含む脆性材料において、既存不連続面先端からウイングクラックと呼ばれる引張亀裂が生長することが知られている²⁾⁴⁾。ウイングクラックは、材質や不連続面の配置角度によって進展経路などの破壊性状が異なる。既往の研究では、不連続面を一つの形状で作製した供試体を用いることが多い。

内在する不連続面には、開口しているものや閉じているものなど、個々の不連続面はそれぞれ開口量が異なっていると考えられる。こうした不連続面の違いも強度特性や破壊挙動に影響を及ぼすことが予想される。

そこで本研究では、载荷の間、接触することのない十分に開いた開口不連続面、接触するように作製した接触面をそれぞれ有する 2 種類の石膏供試体を用いて、それらの供試体における破壊挙動や強度特性を比較する。岩盤には複数の不連続面が含まれているが、本実験では不連続面の接触の有無によって破壊挙動がどのように変化するかを明らかにすることに注目し、不連続面を一つだけ含んだ供試体で一軸圧縮試験を行う。なお本稿では、供試体に前もって配置する既存不連続面を不連続面と呼び、载荷時に生じる不連続面を亀裂と呼ぶこととする。

2. 実験概要

本実験では、図-1 に示す寸法で石膏供試体を作製する。基質部に用いる石膏の材料特性値は、ヤング率 5.38GPa、ポアソン比 0.263、圧縮強さ 10.87MPa、引張強さ 2.17MPaである。供試体の中央には、長さ 20mm の単一不連続面を配置する。単一不連続面は、水平からの角度 θ ° をそれぞれ 15°、30°、45°、60° で配置する。

供試体に配置する不連続面は、载荷の間にも接触しない開口不連続面と、摩擦のない接触面の 2 種類を考える。以後、開いた不連続面を有する供試体を開口供試体、接触面を有する供試体を接触供試体と呼ぶこととする。

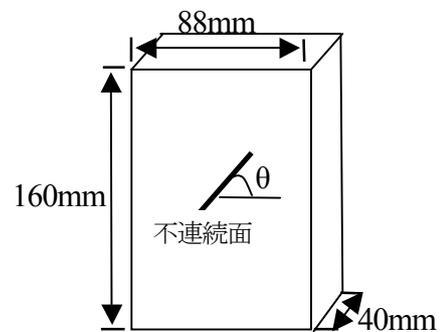
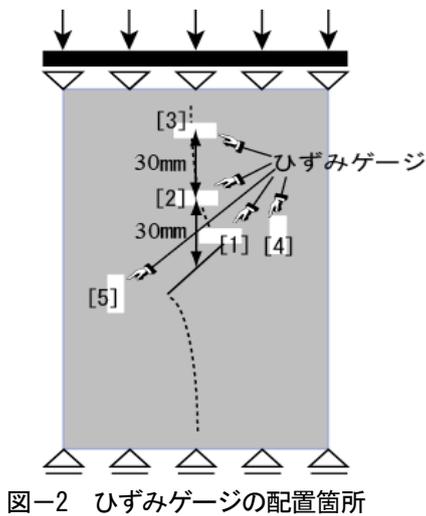


図-1 実験供試体の形状



開口供試体は、型枠に厚さ 1.0mm、幅 20mmの鉄板を設置して、石膏が固まった後に鉄板を引き抜くことで作製する。また接触供試体は、テフロンシートを幅 20mm 短冊状に切り、それらを 2 枚重ねて型枠の中心に配置する。その型枠に石膏を流し込み、固まった後もテフロンシートはそのまま残して作製する。

これら 2 種類の供試体を用いて、0.01MPa/sec で一軸圧縮試験を行う。実験では、図-2 に示す位置にひずみゲージを取り付ける。ひずみゲージ 1,2,3 は、ウイングクラックの進展挙動を計測するために、ウイングクラックが進展すると予測される経路に取り付ける。また、ひずみゲージ 4,5 は、既存不連続面両側の柱部の載荷軸方向に配置し、降伏を求めるために取り付ける。

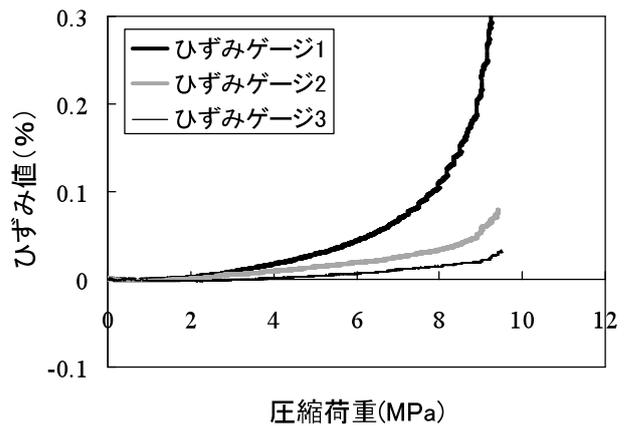
3. 実験結果

(1) ウイングクラックの進展挙動について

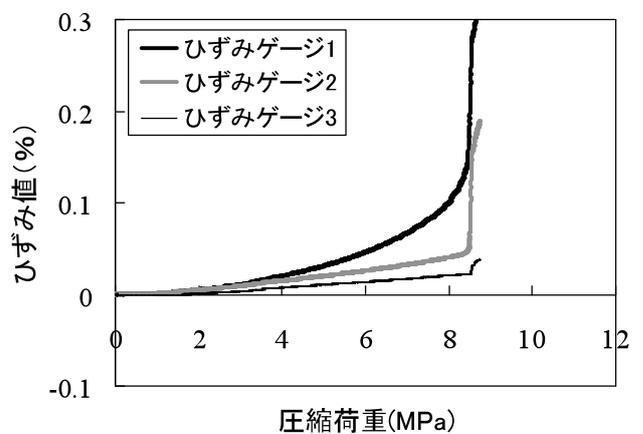
図-3 に荷重過程におけるひずみゲージ 1,2,3 の計測値の例を示す。図-3(a) は、不連続面を 45°に配置した開口供試体、図-3(b) は同じく不連続面を 45°に配置した接触供試体の計測値である。図は、横軸に荷重履歴である圧縮荷重、縦軸にひずみ値を記している。

開口供試体では、ひずみゲージの挙動が緩やかに増加するのに対して、接触供試体ではひずみゲージの挙動が、折れ曲がるように値が急増しているように見える。これは、開口供試体では不連続面先端から徐々に亀裂が進展することで緩やかに増加するのに対し、接触供試体では瞬時に亀裂が進展するために折れ曲がるような推移となったと考えられる。

本来、供試体に亀裂が無く健全である場合、ひずみゲージは線形的に反応するはずである。そして、ひずみゲージの箇所を亀裂が通過すると、供試体に変形しやすくなるため、そのひずみゲージの計測値は増加するはずで



(a) 開口供試体

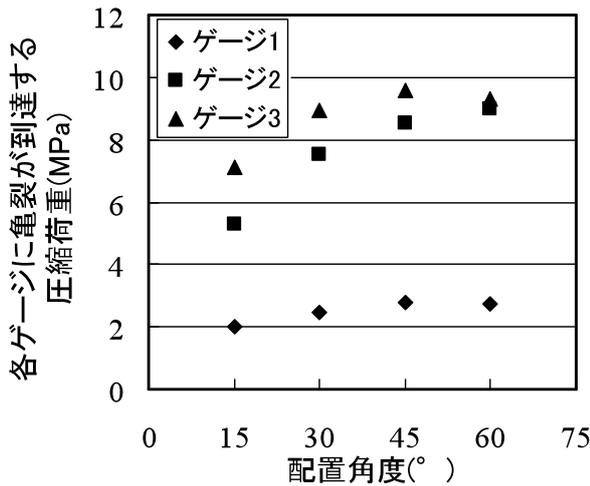


(b) 接触供試体

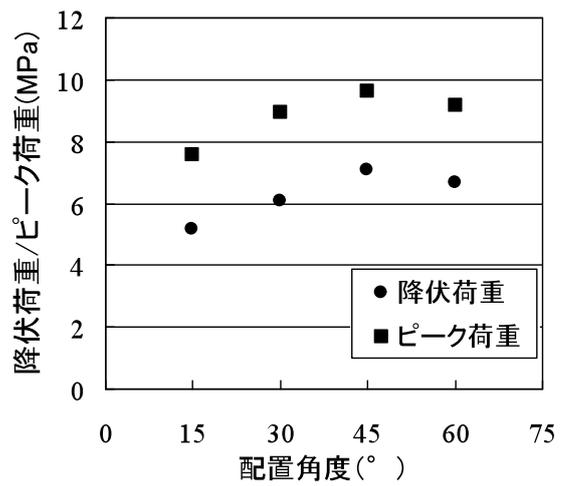
図-3 ひずみゲージの計測値

ある。したがって、ひずみゲージが線形的な挙動から非線形的な挙動に変わる変化点での荷重を亀裂の到達時の荷重と考えることができる。本稿では、ひずみゲージの計測値のグラフで、原点から直線を引いて、その直線上に載らなくなった点を目視により確認した。

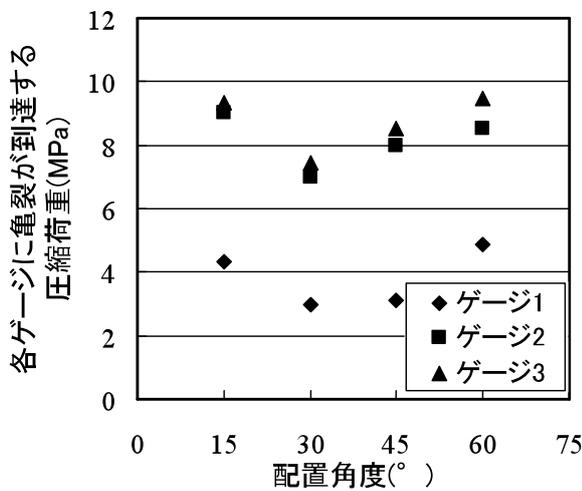
図-4 に、上記の変化点と確認された圧縮荷重を示す。図-4(a) は開口供試体、図-4(b) は接触供試体のものである。図では、横軸に既存不連続面の配置角度、縦軸に変化点での圧縮荷重を記している。図-4 では、開口供試体、接触供試体ともに、ゲージ 1 からゲージ 2 までの間隔がゲージ 2 からゲージ 3 までの間隔よりも大きいことがわかる。したがって、ウイングクラックは次第に進展速度が早くなると考えられる。また図-4(a) と (b) を比較すると、開口供試体では、2MPa程度で不連続面先端にウイングクラックが生じるのに対して、接触供試体では、3MPa程度荷重されないとウイングクラックは生じない。更に、各点間の間隔はそれぞれ、接触供試体よりも開口供試体の方が大きい。これは接触供試体の方が開口供試体よりも亀裂進展が速いという図-3 での推測を裏付け



(a) 開口供試体

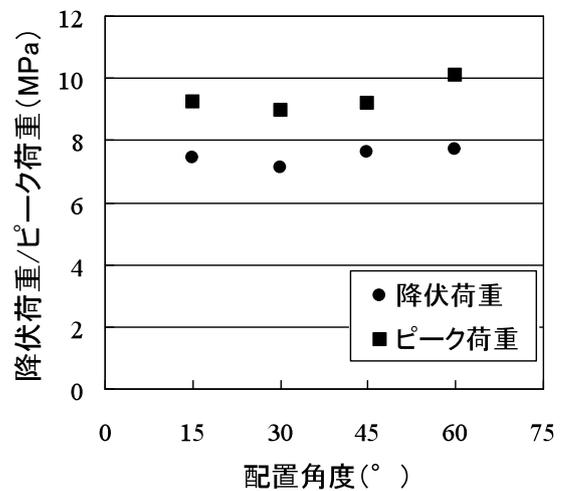


(a) 開口供試体



(b) 接触供試体

図-4 亀裂到達時の圧縮荷重



(b) 接触供試体

図-5 降伏荷重とピーク荷重

ていると考えられる。

また、配置角度による違いをみると、開口供試体では、配置角度が大きくなるにつれて、各ゲージの箇所に亀裂が到達する圧縮荷重が大きくなる。一方、接触供試体では、配置角度 15°の供試体が最も大きな値を示し、30°を最小として配置角度が大きくなるにつれ、開口供試体同様に各ゲージに亀裂が到達する圧縮荷重が大きくなる傾向が見られる。

次に、配置角度によって各点の間隔がどう変化するかをみる。開口供試体では、ゲージ1からゲージ2に亀裂が進展する場合、不連続面の配置角度が大きくなるにつれ、図-4(a)の2点間の間隔が大きくなる。しかし、ゲージ2からゲージ3に亀裂が進展する場合、配置角度が大きくなるにつれ、2点間の間隔は狭くなっている。したがって、開口供試体において、ゲージ2の箇所にウイングクラックが到達する速度は、配置角度が大きくなるにつれて遅くなり、逆にゲージ2からゲージ3に到達

する速度は速くなっている。

(2) 各供試体の強度特性と既存不連続面の接触の有無による影響

図-5に、降伏荷重とピーク荷重を示す。図-5(a)は、開口供試体、図-5(b)は接触供試体の降伏荷重およびピーク荷重である。図は、横軸に不連続面の配置角度、縦軸に降伏荷重およびピーク荷重の値を記す。開口供試体では、降伏荷重、ピーク荷重ともに配置角度が大きくなるにつれて大きくなり、図-4(a)で見られた傾向に似ている。接触供試体でも、図-4(b)ほど差が顕著ではないが、30°の供試体で最小となる図-4(b)と同様の傾向が得られている。

しかしながら、ウイングクラックがゲージ3に到達した荷重とピーク荷重を比べると、接触供試体では、ゲージ3に亀裂が到達した荷重がピーク荷重より小さい。したがって、ウイングクラックがかなり進展しても、強度

低下を示すような破壊に至っていないことを示唆している。一方、開口供試体では両者の荷重値がほぼ一致している。このことから、開口供試体は、強度低下を引き起こすような大きな破壊が生じ、初めてウイングクラックが大きく進展する。よって、開口供試体はウイングクラックの伸びにくい供試体であると考えられる。以上から、ウイングクラックは、供試体の強度特性に直接影響を及ぼす亀裂ではないと推測される。

また図-5 の降伏荷重をみると、開口供試体では載荷重が 5~7MPaまでにはほぼ全ての供試体が降伏するのに対して、接触供試体では 7~8MPaで降伏している。材料の降伏強さが一定であることを考えれば、同一の圧縮荷重に対して、柱部で生じる応力は開口供試体の方が大きくなるのがわかる。不連続面周りの変形を考えると、接触供試体では不連続面が接触しているため滑るような変形しかできない。それに対して、開口供試体では、不連続面が潰れるような変形も許容できる。こうした不連続面の変形特性がこうした降伏荷重の違いに現れると考える。

したがって、接触面を有していると、一軸圧縮を受けた際に不連続面がずれるように変形するため、ウイングクラックのような引張亀裂は早く急激に進展するが、供試体の強さは開口不連続面のように空隙欠損部を有する場合の方が弱くなると考えられる。

4. おわりに

本研究では、単一の不連続面を有する石膏供試体の一軸圧縮試験を行った。特に、既存不連続面の開口量に着目し、開口不連続面と接触させた不連続面それぞれを

有する2種類の石膏供試体を準備した。これら2種類の供試体におけるウイングクラックの進展挙動および降伏荷重・ピーク荷重について比較検討した。その結果として、次のような知見を得た。

ウイングクラックは、接触面を有する接触供試体では速く進展するのに対して、開口不連続面を有する開口供試体ではゆっくりと進展する。しかしながら、単一不連続面を含む供試体の場合、降伏荷重およびピーク荷重は、開口供試体の方が小さい値を示した。このことから、ウイングクラックは強度低下を直接引き起こす破壊ではないことを明らかにした。そして、不連続面の接触の有無によって生じる変形挙動の違いから、その理由を検討した。

本研究は、単一不連続面を配置した実験であるため、ウイングクラックの進展が直接強度低下を引き起こすような結果にはならなかったが、不連続面が多数存在する場合は、引張亀裂が早く生じることにより連結等を引き起こす可能性がある。それら不連続面が多数存在する場合については今後の課題としたい。また、拘束圧の影響についても検討していく予定である。

参考文献

- 1) 日比野敏：技術者に必要な岩盤の知識，鹿島出版会（2007）
- 2) Hoek,E.,Bieniawski,Z.T.: Brittle fracture propagation in rock under compression, *International Journal of Fracture Mechanics*, 1, 137-155 (1965)
- 3) Bodet, A.: The initiation of secondary cracks in compression, *Engineering Fracture Mechanics*, 66,187-219 (2000)
- 4) Wong, R.H.C. et al.: Splitting failure in brittle rocks containing pre-existing flaws under uniaxial compression, *Engineering Fracture Mechanics*, 69,1853-1871 (2002)

EXPERIMENTAL STUDY ON CRACK GROWTH AND STRENGTH CHARACTERISTICS OF SPECIMENS INCLUDING A CRACK WITH DIFFERENT WIDTH

Kenji TANAKA and Tateki ISHII,

The rockmass contains many discontinuities so called joints. They effect on the strength and mechanical behavior of the rockmass. The widths of discontinuities are generally different of each. In this paper, uniaxial loading tests were carried out by using several specimens with two kinds of a performed crack: open crack and closed crack. The varieties of width of discontinuities produced different results of wing-crack growths and strength.