

# 不連続面を含んだ石膏供試体の 圧縮荷重下における変形破壊挙動

石井 建樹<sup>1\*</sup>・伊藤 理大<sup>2</sup>・田中 健嗣<sup>2</sup>

<sup>1</sup>木更津工業高等専門学校 環境都市工学科 (〒292-0041 千葉県木更津市清見台東2-11-1)

<sup>2</sup>木更津工業高等専門学校専攻科 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

岩盤などの不連続面を含む脆性材料が圧縮されると、ウイングクラックと呼ばれる引張亀裂や二次亀裂と呼ばれるせん断破壊のような亀裂が生じる。本稿は、単一不連続面を含む石膏供試体を用いた圧縮試験を実施して、不連続面の特性と供試体の変形破壊挙動との関連性を調査したものである。供試体には、開口不連続面、テフロンシートを挟んだ接触面の2種類の不連続面を配置した。実験結果から、不連続面の特性によって供試体の変形特性が異なることを確認した。また、亀裂進展挙動にはいくつかのパターンがあることを確認し、それらのパターンは供試体の変形特性によって分類されることを確認した。

**Key Words :** wing crack, secondary crack, compressive load, discontinuity

## 1. はじめに

岩盤のように不連続面を含む脆性材料に圧縮荷重が作用すると、ウイングクラック、二次亀裂と呼ばれる2種類の亀裂が発生する(図-1)。ウイングクラックは、不連続面先端付近から曲線的な経路を辿って進展する引張亀裂である<sup>2)</sup>。一方、二次亀裂はせん断破壊的な亀裂であり、既存の不連続面先端からほぼ同一平面上に進展するものと、ウイングクラックと同一面で反対方向に進展するものがある<sup>3)</sup>。既存不連続面に沿って発生する二次亀裂は、実験で多く観察されるのに対して、ウイングクラックの反対方向に生じる二次亀裂は非常に稀にしか観察されない<sup>3)</sup>。

これらの既往の実験で用いられた試験体の不連続面は、開口しているものがほとんどである。試験体作成の困難さから、閉じた不連続面(接触面)を配置した実験の例は圧倒的に数が少ない。

本研究では、開口不連続面と閉じた不連続面(接触面)を有する2種類の石膏供試体を作製し、それぞれの供試体に対して圧縮条件下でのウイングクラックや二次亀裂の進展挙動を実験的に観察する。まず、変位計やひずみゲージによる計測結果から各種供試体の変形特性を調べる。次に、それらの変形特性と破壊性状との関連性、特に、岩盤の破壊挙動に大きな役割を果たすと言われていた二次亀裂の進展経路との関連性について考察を加える。

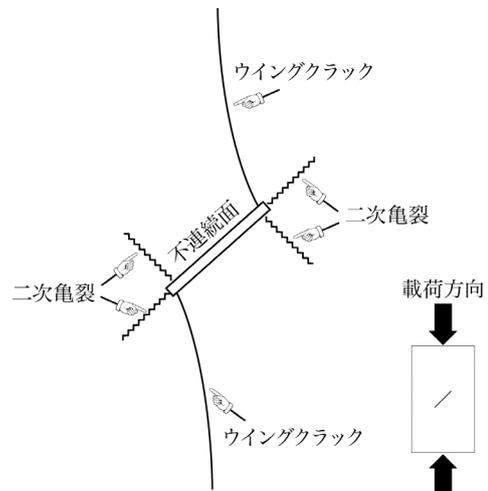


図-1 ウイングクラックと二次亀裂<sup>3)</sup>

## 2. 実験の概要

本研究では、図-2に示すように、一軸圧縮試験において単一不連続面を中心に配置した石膏供試体で生じる変形破壊挙動を観察する。供試体の寸法は88×160×40mm、その中心に水平からの角度 $\theta$ で長さ20mmの不連続面を配置する。不連続面には、幅1.0mmの鉄板を石膏が固まった後に引き抜いて形成した開口不連続面(シリーズO)、2枚重ねたテフロンシートを設置したまま石膏を固めた接

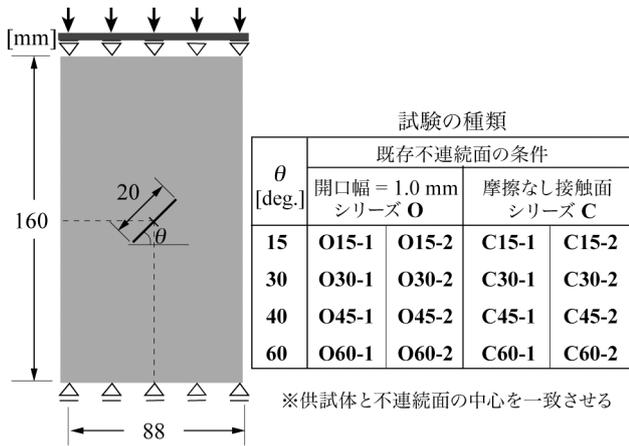


図-2 単一不連続面を含む供試体の一軸圧縮試験

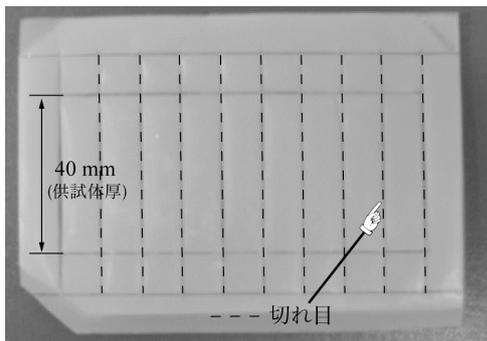


図-3 載荷面に挟む切れ目を入れたテフロンシート

触面(シリーズC)の2種類を考える。各供試体は、不連続面の配置角度 $\theta$ に対して2体ずつ準備する。各供試体に対する実験は、図-2に示す通りに、シリーズ名、角度、供試体番号を組み合わせる呼ぶこととする。

供試体は、各種の供試体2体と物性評価用に円柱供試体1体を同時に作製した。実験本番に先んじて、円柱供試体による要素試験を行い、概ね同一の物性で各供試体を作製できていることを確認している。

試験では、0.01MPa/secで圧縮荷重を増加させる。試験に際して試験機に直接供試体を載せると、載荷面に摩擦抵抗が生じて水平方向への変形を抑制する。亀裂進展を取り扱う場合、亀裂を境として供試体の左右がそれぞれ逆方向に動く事が予想されるので、載荷面で水平方向左右に変形できることが望ましいと考える。そこで、図-3のように、供試体厚さよりも長めに切れ目を入れたテフロンシートを準備する。その切れ目を入れたシートを通常の切れ目のないテフロンシートと重ね、試験機と供試体の間に挟んだ状態で、全ての試験を行った。

試験中、開口変位や載荷軸方向の変形を調べるために、図-4に示す位置にひずみゲージとダイヤルゲージ(変位計)を取り付ける。ひずみゲージ1~3は、供試体内部での変形挙動を計測することを目的としている。一方、ダイヤルゲージは、載荷面から15mm離れた位置と中央部での側方変位を調べる

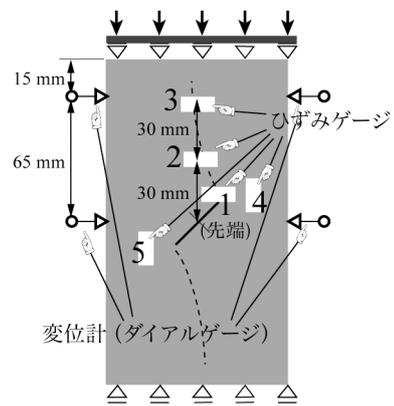


図-4 ひずみゲージ・変位計の計測箇所

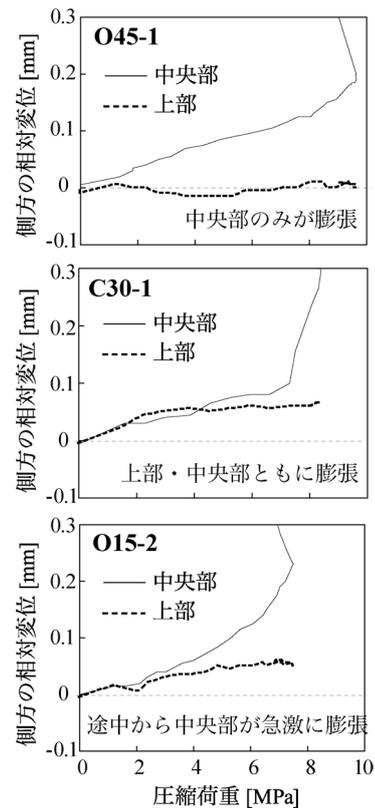


図-5 側方変形の3種類のパターン例

### 3. 供試体の変形特性

#### (1) 供試体側方への変形

供試体の側面に設置したダイヤルゲージのデータの中で、高さの等しい箇所についてデータを足しあわせると、計測した高さでの供試体の側方への変形量を知ることが出来る。本実験において、側方への変形には大きく分けて次の3種類のパターンが観察された(図-5)。

1. O45, O60, C60など概ね高角度に不連続面を配置した場合のパターンで、中央部では大きく膨らむのに対して、載荷面付近ではあまり膨らまない。
2. C30, C45, C15-1などシリーズCで見られたパターンで、

中央部と上部がほぼ同様に膨張する。その膨張量は、O45, O60, C60の中央部と比べて小さい。先の2つのパターンの特徴を併せ持つパターン。

3. O15, O30-2, C15-2などの低角度に不連続面を配置した供試体で見られる。载荷初期では、中央部・上部ともに膨張するが、载荷が進むにつれて徐々に中央部の変形量が大きくなり、上部の挙動と乖離が生じる。中央部の膨張量は、1.と同様、2.のパターンに比べて大きい。1.のパターンだけ見ると、载荷面の摩擦が十分に軽減できていないとも思える。しかし、2.または3.のパターンを示した供試体では上部での変形も許されているので、载荷面での摩擦拘束は軽減されている。この結果は、各供試体毎に側方への膨らみ方が異なることを示している。

### (2) 供試体内部の変形

図-6にひずみゲージ1~3の計測値における推移の代表例を示す。ほぼ全ての供試体でひずみゲージ1は緩やかに非線形的な増加傾向を示した。またひずみゲージ3は、ピーク荷重が発現されるまで変化がない場合があった。そこで、ひずみゲージ2の計測値に着目すると、開口不連続面を有するシリーズOでは緩やかに非線形的に増加するのに対して、シリーズCでは折れ曲がるように急増する傾向が見て取れた。ただしC60の供試体では、ひずみゲージ2の計測値が緩やかに増加していた。

### (3) 供試体の変形特性

表-1に全ての供試体における変形特性をまとめる。併せて、それぞれが同じになる組み合わせに対して、順に分類番号を振った。ここで、ひずみ値が小さい場合、本来どのような変形をするのか判別しにくいいため側方への変形挙動を元に分類している。分類番号から、各供試体が4つの変形パターンを示すことが見て取れる。

既存不連続面の条件別に見ると、シリーズOでは、供試体中央部が膨張し、ひずみゲージ2でのひずみ値の推移は比較的緩やかであることがわかる。一方、シリーズCでは、供試体は鉛直上下にわたって一様に膨張し、ひずみゲージ2でのひずみ値の推移は急激に変化する。しかしC60では、中央部のみが膨張し、ひずみゲージ2の増加も緩やかになる傾向が認められる。不連続面が高角度に配置されていると、不連続面の影響自体があまり顕著ではなくなる考えられる。

## 4. ピーク荷重到達時の供試体の破壊形態

### (1) 二次亀裂の進展方向

ピーク荷重到達時の供試体には、ウイングクラック以外に既存不連続面両側の柱部に大規模な損傷が見て取れ

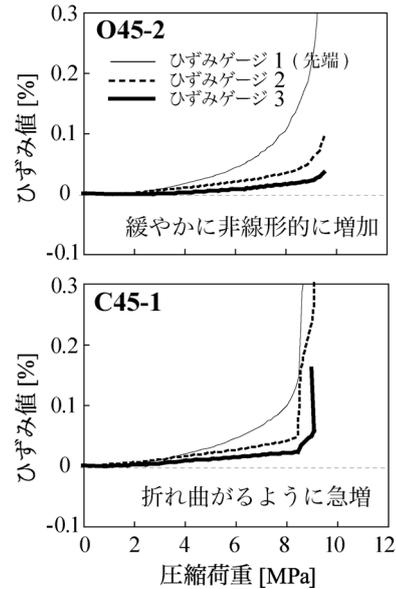


図-6 ウイングクラック進展経路のひずみゲージ値の例

表-1 本実験で確認された各供試体の変形特性

供試体	側方への変形	内部での変形	分類 No.
O15-1	後に中央部膨張	ゲージ 2 緩やか増	1
O15-2	後に中央部膨張	ゲージ 2 緩やか増	1
O30-2	後に中央部膨張	ゲージ 2 緩やか増	1
O45-1	中央部のみ膨張	ゲージ 2 緩やか増	2
O45-2	中央部のみ膨張	ゲージ 2 緩やか増	2
O60-1	中央部のみ膨張	ひずみ小さい	2'
O60-2	中央部のみ膨張	ひずみ小さい	2'
C15-1	上下一様に膨張	ひずみ小さい	3'
C15-2	後に中央部膨張	ゲージ 2 急増	1 or 3
C30-1	上下一様に膨張	ゲージ 2 急増	3
C30-2	上下一様に膨張	ゲージ 2 急増	3
C45-1	上下一様に膨張	ゲージ 2 急増	3
C45-2	上下一様に膨張	ゲージ 2 急増	3
C60-1	中央部のみ膨張	ゲージ 2 緩やか増	2
C60-2	中央部のみ膨張	ゲージ 2 緩やか増	2

た。こうした損傷は、二次亀裂の発生方向に起因している。二次亀裂は2種類の亀裂が存在するとされている<sup>3)</sup>が、本実験では、図-7のように次の3種類が確認された。

1. 不連続面と同一平面方向への亀裂(O45, O60, C15-2, C60).
2. ウイングクラックの反対方向への亀裂(O15, O30-2).
3. 水平方向につぶれた亀裂(C15-1, C30, C45).

ちなみに新しく観察された水平方向の二次亀裂は、シリーズCでのみ確認された。

シリーズOにおいて、低角度の不連続面を有する供試体ではウイングクラックの反対方向に伸びる二次亀裂が生じ、高角度のものになると同一平面方向に伸びる二次亀裂が生じる傾向が認められた。一方、シリーズCでは、C15-2, C60を除いて、水平につぶれる二次クラックが生じる傾向が認められた。

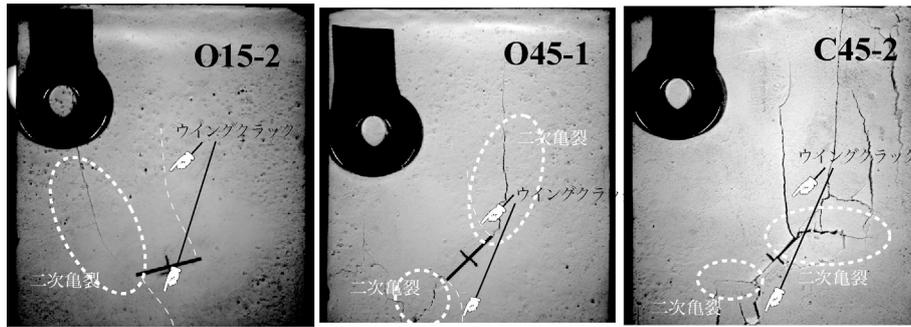


図-7 本実験で観察された3種類の二次亀裂

## (2) 変形特性との関連性

表-2に、二次亀裂の進展方向と表-1に記した変形特性の分類番号を併記する。表では、二次亀裂の進展方向が、変形特性の分類とほぼ一致することがわかる。このことから、既存不連続面の特性によって定められた各供試体固有の変形特性によって、最終的な破壊形態が決定されていると考えられる。

ウイングクラックの反対方向に進展する二次亀裂は稀にしか観察されないとされている<sup>3)</sup>が、本実験では多くの供試体で観察できた。載荷面付近でも膨張しながら、中央部で大きく膨張する供試体では、この二次亀裂が発生する。これは、載荷面の水平方向への膨張を許した本実験だからこそ解明できた知見であると言えよう。

表-2 変形特性と二次亀裂との関連性

供試体	二次亀裂の方向	変形特性の分類
O15-1	反対方向	1
O15-2	反対方向	1
O30-2	反対方向	1
O45-1	同一平面	2
O45-2	同一平面	2
O60-1	同一平面	2'
O60-2	同一平面	2'
C15-1	水平	3'
C15-2	同一平面	1 or 3
C30-1	水平	3
C30-2	水平	3
C45-1	水平	3
C45-2	水平	3
C60-2	同一平面	2

## 5. おわりに

本稿では、2種類の不連続面を含む石膏供試体を用いて、側方への膨張も許容する圧縮実験を試みた。その結果、既存不連続面の条件の違いにより新しく3種類の二次亀裂が生じることを確認した。またそれらの二次亀裂は、供試体の変形特性に依存して発生することを突き止めた。これにより、岩盤の変形特性から岩盤の変形破壊挙動を推定できる可能性を確認した。

## 参考文献

- 1) 岩盤崩落問題研究小委員会編：岩盤崩落の考え方，土木学会，2004.
- 2) Nemat-Nasser, S. Horii, H. : Rock failure in compression, *International Journal of Engineering Science*, 22, pp. 999-1011, 1984.
- 3) Bobet, A. : The initiation of secondary cracks in compression, *Engineering Fracture Mechanics*, 66, pp.187--219, 2000.

## FRACTURE RESPONSES IN GYPSUM MORTAR SAMPLES CONTAINING A CRACK UNDER COMPRESSION

Tateki ISHII, Masahiro ITO and Kenji TANAKA

In brittle solids with pre-existing cracks under compression, two crack patterns are observed: wing (tensile) cracks and secondary (shear) cracks. The orientations and geometries of these cracks play a major role in the failure process. We carried out uniaxial loading tests by using two gypsum mortar samples. Each sample have a pre-existing crack with different orientation: an open crack or a frictionless contact crack. The varieties of preformed cracks within the specimens resulted in different patterns of crack propagations, and these patterns were classified by the deformation characteristics of the samples.