

# 不連続面を含む脆性材料の 圧縮条件下における変形破壊挙動に関する実験的研究

Experimental Study on Fracture Responses in Pre-cracked Brittle Solids under Compression

石井建樹\*・伊藤理大\*\*・田中健嗣\*\*

Tateki ISHII, Masahiro ITO and Kenji TANAKA

\*正会員 博(工) 木更津工業高等専門学校講師 環境都市工学科(〒292-0041 千葉県木更津市清見台東 2-11-1)

\*\*非会員 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)

In brittle materials under compression, two crack patterns under compression are observed: wing (tensile) cracks and secondary (shear) cracks. The orientations and geometrie of secondary cracks play a major role in the failure process of brittle materials under compression. In this paper, an experimental approach on wing cracks and secondary cracks in gypsum mortar samples is carried out. Two kinds of preformed cracks are prepared: open cracks and frictionless contact cracks. Some different failure patterns are observed and classified by the deformation characteristics of samples.

**Key Words :** compressive failure, crack growth, wing crack, secondary crack

## 1. はじめに

岩盤は、節理などの無数の不連続面や弱部を含まれている<sup>1)</sup>。その力学応答は、母岩の物性だけでなく、内部に含まれる節理などの不連続面の特性により決まる。

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)-4)</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。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ていない<sup>5)-7)</sup>。また、二次亀裂の形状が岩盤の破壊挙動に大きな役割を果たすため、種々の材料を用いた室内実験や数値シミュレーションによって二次亀裂発生メカニズムが調査されている。

しかしながら、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<sup>2),3),5)-7)</sup>。対して、断層や節理などの不連続面では、摩耗により角礫化、細粒化するなど、不連続面を介して力のやりとりが行われた痕跡が見受けられる<sup>1)</sup>。そのため閉じた不連続面などを配置して、不連続面間での力のやりとりを考慮することは有意義であると考えられる。既往の研究においては、試験体作成の困難さから、閉じた不連続面を配置した実験例は圧倒的に数が少ない。

そこで本研究では、開口不連続面、テフロンシートを挟んだ接触面を有する石膏供試体を用いて、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

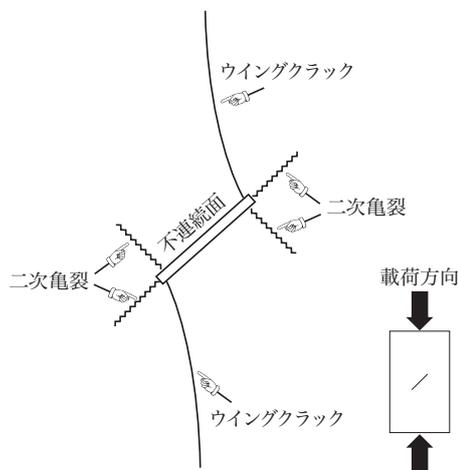


図-1 ウイングクラックと二次亀裂<sup>5)</sup>

験的に観察する。特に、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、破壊性状との関連性について考察を加える。

## 2. 実験の概要

### 2.1 準備した供試体と試験方法

本研究では、図-2に示すように、一軸圧縮試験下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対象とする。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。中心に配置した不連続面には、幅1.0mmの開口不連続面(シリーズO)、2枚のテフロンシートを挟んで摩擦抵抗を軽減した接触面(シリーズC)の2種類を考える。各種供試体は、不連続面の配置

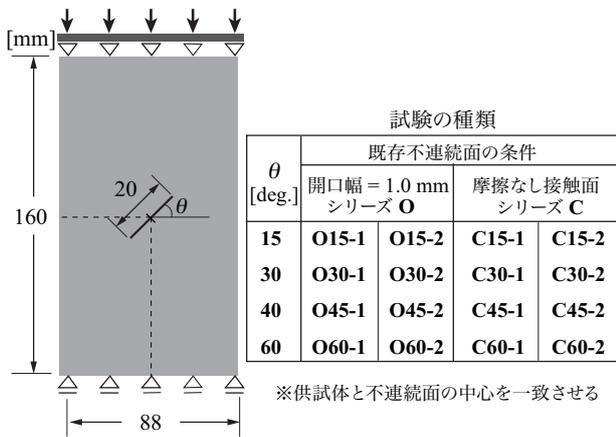


図-2 単一不連続面を含む供試体の一軸圧縮試験

表-1 使用した石膏の物性値			
要素試験 (平均値)			
ヤング率	圧縮強さ	ポアソン比	引張強さ
5386 (MPa)	10.31 (MPa)	0.263	2.18 (MPa)
各シリーズでの円柱供試体			
シリーズ名	ヤング率	圧縮強さ	ポアソン比
O15	5140 (MPa)	9.65 (MPa)	0.204
O30	5120 (MPa)	10.38 (MPa)	0.193
O45	5121 (MPa)	9.48 (MPa)	0.259
O60	5676 (MPa)	10.12 (MPa)	0.266
C15	5112 (MPa)	9.43 (MPa)	0.237
C30	5256 (MPa)	9.78 (MPa)	0.267
C45	5783 (MPa)	9.82 (MPa)	0.206
C60	5341 (MPa)	9.88 (MPa)	0.281
平均	5318 (MPa)	9.81 (MPa)	0.239

角度に対して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て呼ぶこととする。

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、その物性値の妥当性を検証した。円柱供試体に基づく石膏の物性値を表-1に示す。概ね同一の物性で各供試体を作製できている。

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、切れ目の入ったシートを供試体側にして試験機と供試体の間に挟んで試験を行った。このような載荷面

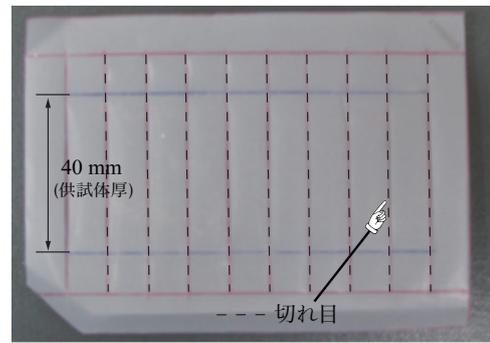


図-3 切れ目を入れたテフロンシート

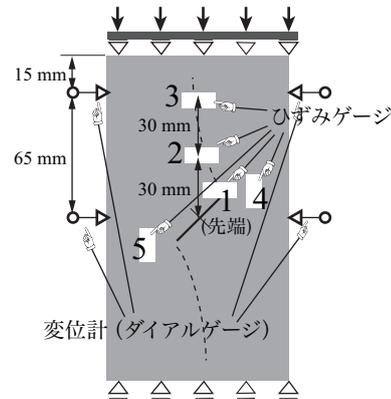


図-4 ひずみゲージ・変位計の計測箇所

境界への処理をすることにより、摩擦抵抗による拘束の軽減を図った。

## 2.2 計測装置

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や、ウイングクラックの到達距離とその開口変位を計測することを目的としている。またひずみゲージ4,5は、不連続面両横の柱部における載荷軸方向ひずみを計測する。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ことで、載荷面における摩擦拘束の影響や、供試体がどのような変形をするのかを測定する。

## 3. 実験結果

### 3.1 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。全ての供試体における側方への変形量を図-5に示す。図では、引張(膨張)を正としてい

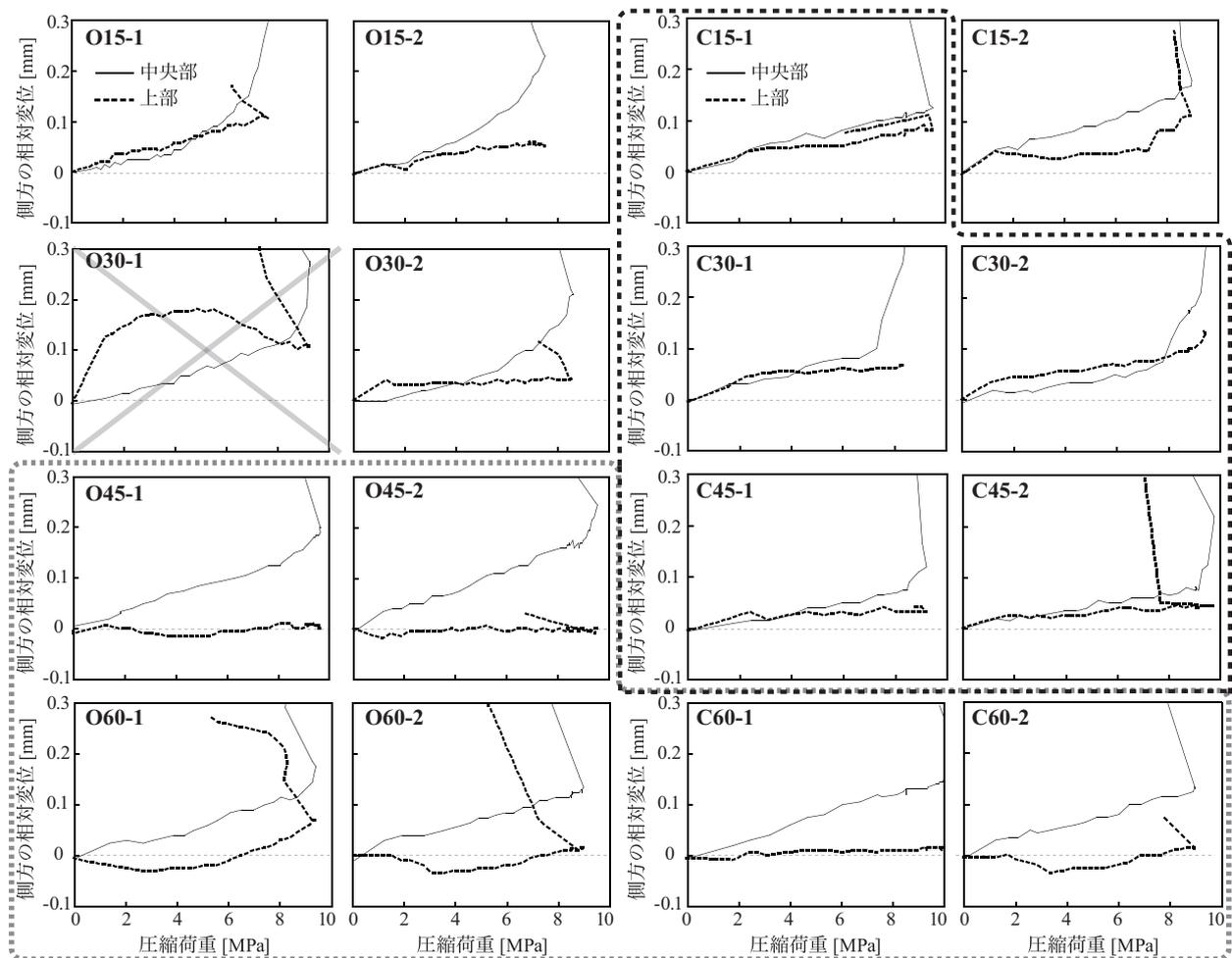


図-5 供試体の側方への変形量

る．これらの結果から，側方への変形には大きく分けて次の3種類のパターンがあることがわかる．ただし，O30については2体の結果が異なった．本来，どちらの結果が妥当なのかは不確定であるが，後述のデータも含めて全16体の結果と比べて大きく異なったので，O30-1を除外することとした．

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．
3. 先の2つのパターンの特徴を併せ持つパターン．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．載荷初期では，中央部・上部ともに膨張するが，載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.のパターンと同様に，2.のパターンに比べて大きい．

1.のパターンについては，摩擦抵抗による載荷面での拘束が疑われるが，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．したがって，載荷面での摩擦拘束の影響は軽減されており，この結果は対象の供試体固有の挙動であると考えられる．

既存不連続面の条件別に見ると，開口不連続面を有するシリーズOでは，中央部の膨張量が大きくなった．一方，接触面を有するシリーズCでは，上部，中央部ともに同様に膨張し，その膨張量はシリーズOの中央部よりも小さくなる傾向が見られた．しかしC15-2, C60の供試体は，シリーズOに近い傾向を示した．

### 3.2 供試体内部での変形とウイングクラック進展

図-6に各供試体におけるひずみゲージ1~3の計測値を示す．ひずみゲージ1~3はウイングクラックの進展経路に並べて，各箇所の水平方向の変形を計測している．ゲージの箇所が健全で損傷が生じていない場合，線形弾性体を想定すれば，図-7のように線形的な挙動を示すはずである．やがて亀裂が進展すると損傷したり，完全に分割されて変形しやすさが変化して，ひずみゲージの値は圧縮荷重などの載荷履歴に対して傾きを変えて増加するようになる．

その際，計測値が急変した場合，亀裂の急激な生長

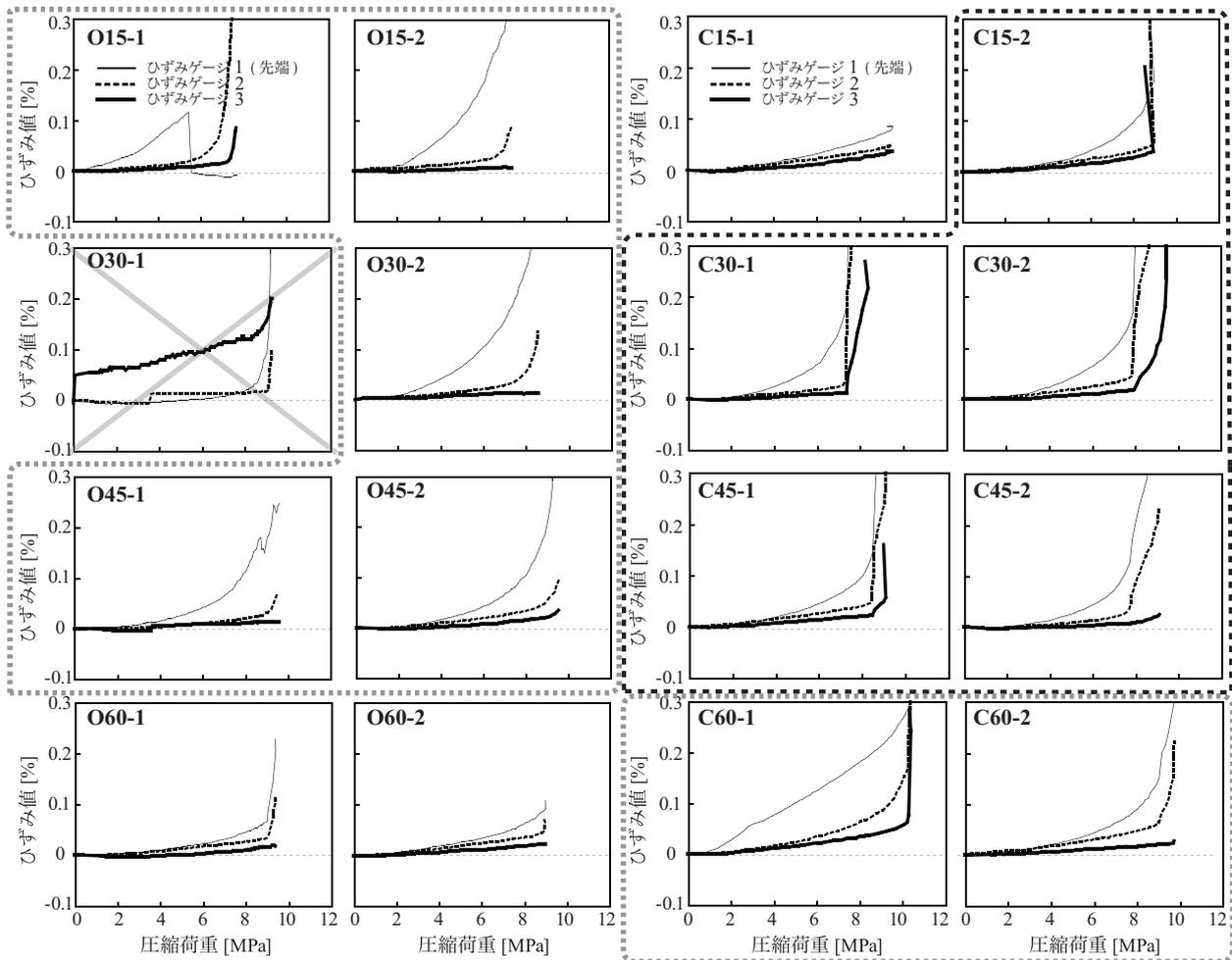


図-6 ウイングクラック進展経路に配置したひずみゲージの計測値

が示唆される一方で、計測値に緩やかで非線形的な増加が見られた場合は、ウイングクラックの緩やかな生長が考えられる。このときの非線形的な挙動は、亀裂先端で徐々に損傷する破壊進行領域の応答であると推察される。以上のように、図-6の傾向を調べることで、供試体内部の変形と併せて、ウイングクラックの進展形態を推し量ることができる。

図-6では、ほぼ全ての供試体でひずみゲージ1は緩やかで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の計測値に着目して、次のように分類する。

1. ゲージ2の計測値が、緩やかに非線形的に増加 (O15, O30, O45, C60)。
2. ゲージ2の計測値が、急激に折れ曲がるように増加 (C15-2, C30, C45)。この場合、ほぼ同時期にゲージ3でも変化が認められる。
3. 3つのひずみ値全てが小さく、不連続面先端に変形があまり集中していない (C15-1, O60)。理由には、C15-1では接触面にテフロンシートを挟ん

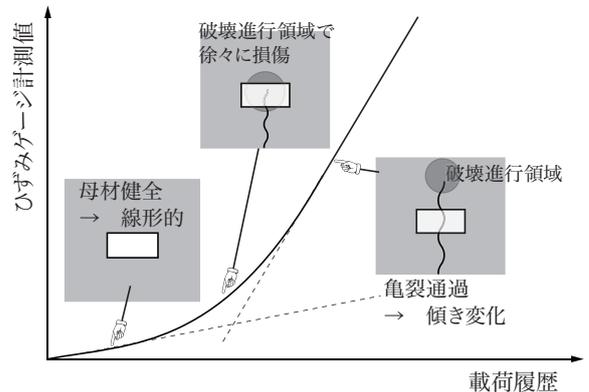


図-7 ひずみゲージ計測値からの亀裂の進展挙動の推定

でいるが、接触面の摩擦抵抗は完全には零でなく、それによって変形が抑制されていると考えられる。またO60では、開口不連続面が高角度であるため、不連続面の開口にあまり寄与しないと推察される。

図-6において、シリーズOでは、ひずみゲージ2の緩やかで非線形な増加傾向が見られる。シリーズOで

は、ウイングクラックが徐々に緩やかに進展すると考えられる。また、同じ載荷レベルでのひずみゲージ1での計測値は、配置角度が水平になるほど大きくなることわかる。

シリーズCでは、ひずみゲージ2の計測値が急激に折れ曲がるように増加する様子が見られる。したがって、シリーズCにおいてウイングクラックは、急激に進展することが伺える。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る。また、同じ載荷レベルでの不連続面先端のひずみ値は、C30、C45が最も大きかった。しかし、シリーズOと比べて、その差異はあまり顕著ではない。

### 3.3 ピーク荷重到達時の供試体の破壊形態

図-8、図-9に、ピーク荷重到達時における開口不連続面および接触不連続面を配置した各供試体を示す。亀裂長さとの対比のために、内径10mmのリングを供試体の左上に設置している。各供試体では、ウイングクラックの他に不連続面両側の柱部に大規模な損傷が見取れる。こうした大規模な損傷は、供試体に応じて異なる形態を示している。

まず大規模な損傷が生じている箇所に着目する。先に除外したO30-1についてはここでも除外した。供試体中心部を原点として4つの象限に分割すると、損傷の発生位置が、

- 右上、左下の象限に集中する (O45, O60, C15-2, C30-1, C45, C60-2)。
- 右下、左上の象限に集中する (O15, O30-2, C60-1)。
- 水平につぶれるように損傷する (C15-1)。

の3つに大別できることわかる。ただしC60-1は、図-6でひずみゲージ1の計測値が他の結果と比べて大きいことから、不連続面先端近傍が元々脆弱であった可能性が考えられる。

次に、二次亀裂に着目する。二次亀裂は2種類の亀裂が存在するとされている<sup>5)</sup>が、本実験結果では以下の3種類の二次亀裂が確認された。

1. 不連続面と同一平面方向に伸びる亀裂 (O45, O60, C15-2, C60-2)。
2. ウイングクラックの反対方向に伸びる亀裂 (O15, O30-2)。
3. 圧壊したように水平方向につぶれた亀裂 (C15-1, C30, C45)。

ちなみに、3.の水平方向につぶれた二次亀裂は、接触面を有する供試体(シリーズC)のみで確認された。

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。

## 4. 変形と破壊性状に関する考察

これまでの結果を踏まえて、不連続面の特性に基づく供試体の変形特性と破壊性状との関連づけを試みる。表-2に、図-5, 図-6より得られた変形特性についての知見をまとめる。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、図-6の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、それぞれの供試体が4つのパターンに分類できることわかる。

シリーズOでは、供試体中央部が膨張し、ウイングクラックの進展は比較的緩やかであることがわかる。配置角度が鉛直に近づくほど、供試体全体としては中央部のみが膨張するが、不連続面先端での変形は小さくなることも見て取れる。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、ウイングクラックは急激に進展する。しかしC60では、中央部のみが膨張し、ウイングクラックの進展も緩やかになる傾向が認められる。これは、不連続面が高角度に配置されているために、不連続面を開口するような変形(ひずみゲージ1に計測される変形)が顕著に生じないためと考えられる。

次に、図-8, 図-9から得られた破壊形態の知見を表-3にまとめる。表では、二次亀裂の進展方向と破壊の発生箇所の組み合わせが、表-2の分類とほぼ一致することがわかる。このことから、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。

シリーズOの供試体は中央部が大きく膨らむことで、供試体に対して斜め方向に二次亀裂が生長しやすくなっていると考えられる。この際、不連続面が低角度に配置された供試体のように、載荷面近傍も多少でも水平方向に膨張しているとウイングクラックの反対方向に二次クラックが生じ、高角度に配置された供試体のように、中央部のみが膨張する場合には同一平面方向に二次亀裂が生じると考えられる。一方、シリーズCの供試体は上下一様に膨張し、不連続面両側の柱部が側方へスライドするような動きをするため、圧縮により潰されるような二次亀裂が生じると考えられる。

## 5. おわりに

本論文では、不連続面を含む岩盤のような脆性材料において圧縮時に生じるウイングクラックや二次亀裂の進展挙動を検討するために、石膏供試体を作製して一軸圧縮試験を行った。

試験に際しては、載荷面での摩擦抵抗による拘束を軽減するために、切り目を入れたテフロンシートを用いて水平方向への変形を許容するよう工夫した。その

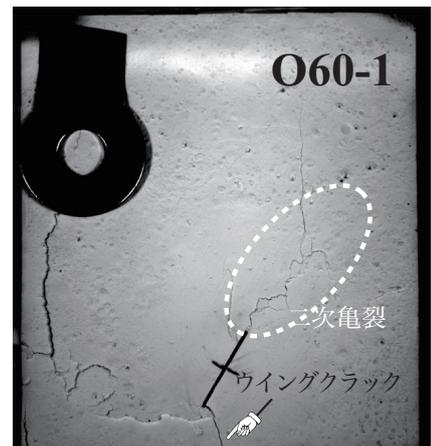
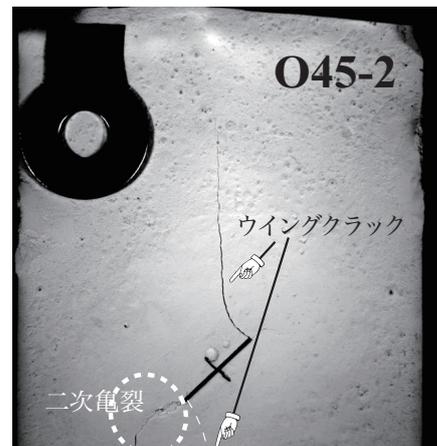
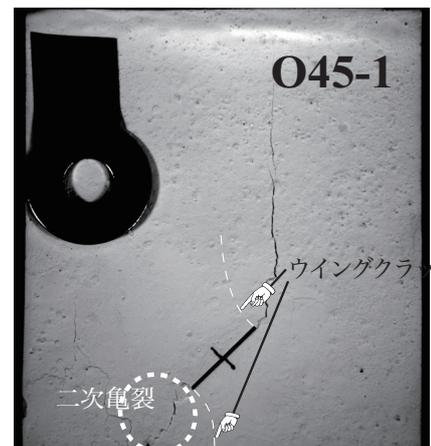
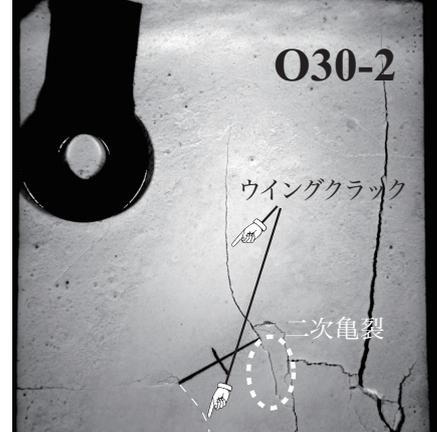
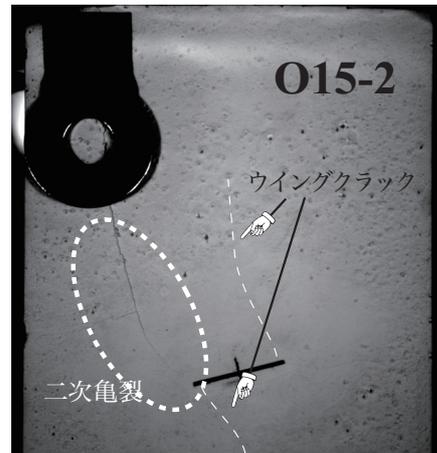
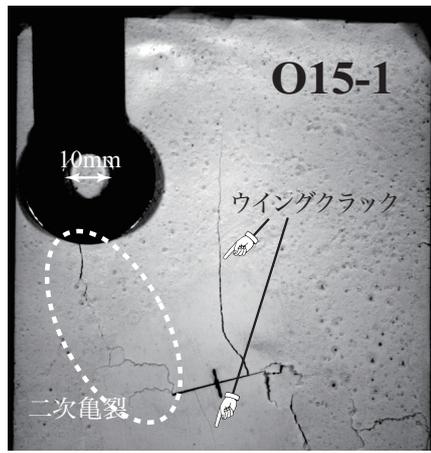


図-8 ピーク荷重到達時の供試体（シリーズO：開口不連続面）

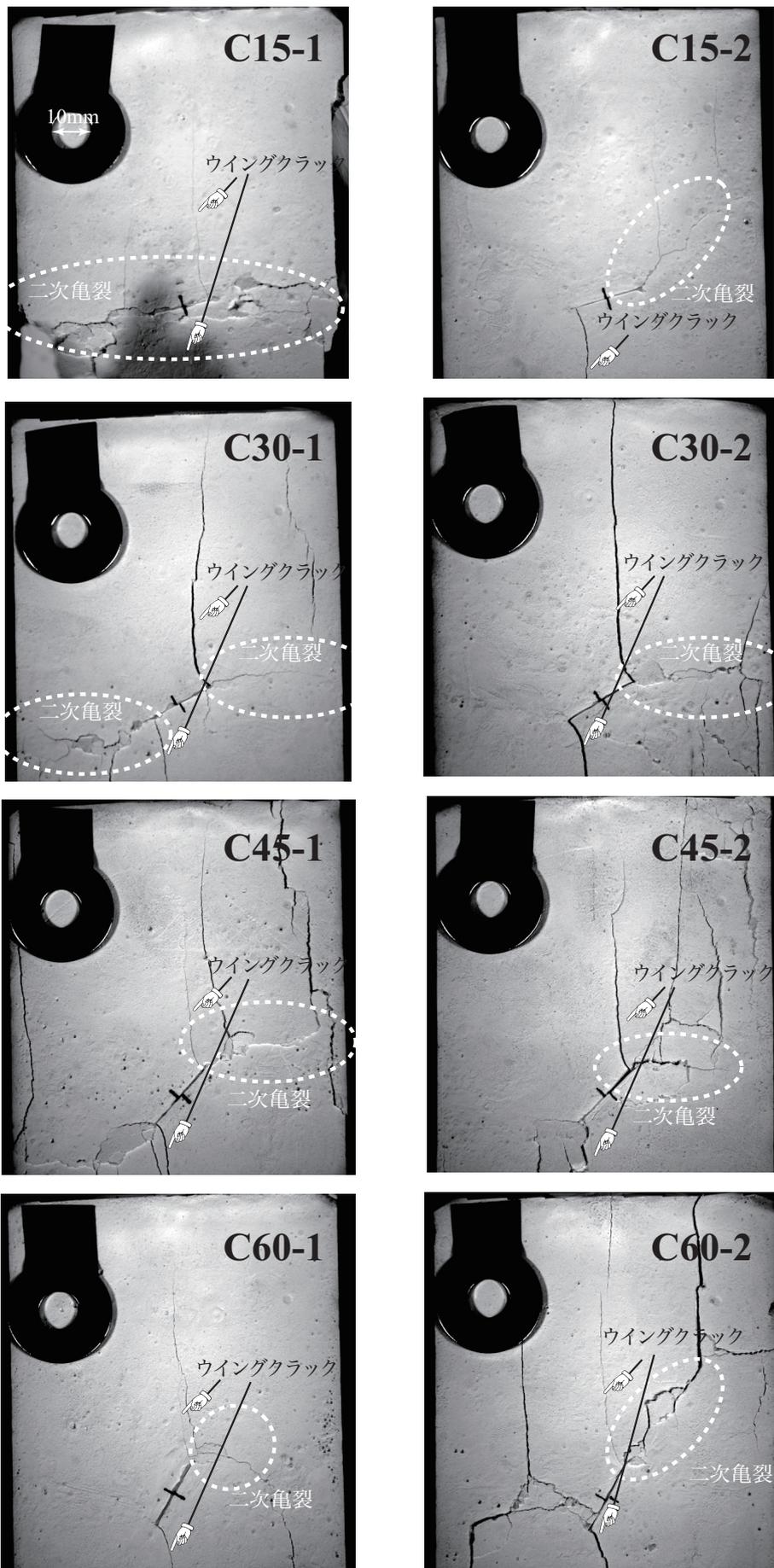


図-9 ピーク荷重到達時の供試体（シリーズC：接触不連続面）

表-2 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

結果として、供試体固有の側方への変形までを計測することが可能となり、供試体の変形挙動に対して、供試体の全体挙動と局所的な変形挙動の両者から考察を加えることができた。そして得られた知見から、開口不連続面や接触面を有する石膏供試体では、大きく分類して 4 種類の変形パターンが存在することを突き止めた。

また破壊形態と確認された二次亀裂の方向を写真により確認した。一般的に、二次亀裂は 2 つの方向に進展することが知られているが、本実験ではその他の経路に進展する二次亀裂を確認した。この亀裂に関する詳細な検討は出来ていないが、ピーク付近での損傷の集中箇所や 3 方向への二次亀裂とを分類すると、変形挙動での分類結果と極めて一致した結果を得た。

それらの結果から、二次亀裂について以下のような考察を加えた。

- シリーズ O のように、中央部のみが大きく膨らみ、ウイングクラックの進展が緩やかに進展・生長する供試体では、二次亀裂が既存不連続面のほぼ同一面方向に進展する。
- しかし、不連続面を低角度に配置した場合、載荷初期には上下一様に膨張するが、載荷に伴って中央部が大きく膨張する。このような供試体では、二次亀裂はウイングクラックの反対方向に進展する。
- 一方、シリーズ C のように接触面を有する供試体では、多くの場合、上下一様に膨張して不連続面両側の柱部が側方へスライドするような動きをするため、圧縮により潰されるような二次亀裂が生じる。

表-3 本実験で確認された各供試体の破壊形態

供試体	二次亀裂の方向	破壊の発生箇所	表-2 の分類
O15-1	反対方向	右下, 左上	1
O15-2	反対方向	右下, 左上	1
O30-2	反対方向	右下, 左上	1
O45-1	同一平面	右上, 左下	2
O45-2	同一平面	右上, 左下	2
O60-1	同一平面	右上, 左下	2'
O60-2	同一平面	右上, 左下	2'
C15-1	水平	水平	3'
C15-2	同一平面	右上, 左下	1 or 3
C30-1	水平	右上, 左下	3
C30-2	水平	右下, 左上	3
C45-1	水平	右上, 左下	3
C45-2	水平	右上, 左下	3
C60-2	同一平面	右上, 左下	2

本研究は、実験により得られた変形特性に関するデータと、観察した破壊性状のデータを単に組み合わせた基礎的な検討に過ぎない。今後はさらにデータを集め、破壊メカニズムについて考察を深めていく。また今回異なる結果を示した種類の供試体についてもデータを補填し、より正確なデータ整理を行っていく。併せて、強度特性と破壊挙動がどのように関連するのかについても研究を進めていく予定である。

謝辞： 本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金（若手研究 B:18760356）の援助により行った。ここに記して感謝します。

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) Hoek, E., Bieniawski, Z.T.: Brittle fracture propagation in rock under compression, *International Journal of Fracture Mechanics*, Vol.1, pp.137-155, 1965.
- 3) Nemat-Nasser, S., Horii, H.: Compression-induced nonplanar crack extension with application to splitting, exfoliation, and rockburst, *Journal of Geophysical Research*, Vol.87, pp. 6805-6821, 1982.
- 4) Nemat-Nasser, S., Horii, H.: Rock failure in compression, *International Journal of Engineering Science*, Vol.22, No.8-10 pp. 999-1011, 1984.
- 5) Bobet, A.: The initiation of secondary cracks in compression, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.66, pp.187-219, 2000.
- 6) Wong, R.H.C., Tang, C.A., Chau, K.T., Lin, P.: Splitting failure in brittle rocks containing pre-existing flaws under uniaxial compression, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.69, pp.1853-1871, 2002.
- 7) Li, Y.P., Chen, L.Z., Wang, Y.H.: Experimental research on pre-cracked marble under compression, *International Journal of Solids and Structures*, Vol.42, pp. 2505-2516, 2005.

(2009 年 4 月 9 日 受付)