不連続面を含む石膏供試体の一軸圧縮下での破壊挙動と強度特性

Failures and Strengths of Gypsum Specimens containing Pre-existing Flaws under Uniaxial Compression

石井建樹*・村井 凌**・月崎良一**・関口佳那**・嶋野慶次***

Tateki ISHII, Ryo MURAI, Ryoichi TSUKIZAKI, Kana SEKIGUCHI and Keiji SHIMANO

*正会員 博(工) 木更津工業高等専門学校准教授 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)

***正会員 木更津工業高等専門学校技術職員 (〒 292-0041 千葉県木更津市清見台東 2-11-1)

Uniaxial compression experiments were carried out to study the strengths and failures of gypsum samples with some pre-existing flaws in non-overlapping geometry. These prepared samples were expected to have same strength by the stress analysis¹⁴⁾ which is based on the simplified linear mechanism. The experimental results demonstrate the effect of the sample's geometries on the compressive strengths, and the failure mechanisms governing the strength characteristics. And then the stress analyses were improved by using the extracted failure mechanisms. The improved analyses show that the predicted compressive strength agrees fairly well with that of experiments.

Key Words : compressive strength, failure, wing crack, secondary crack, coalescence

1. はじめに

岩盤は、不連続面や弱部を無数に含んでおり、複雑な構造を有する材料である。その力学応答は、内在する不連続面の形状や配置、それに伴う不連続面周りの破壊挙動の影響を強く受ける。岩盤の破壊挙動や力学応答については、従来より、理論解析や実験、数値解析などを用いて数多く研究がなされている^{1)~11)}。

既往研究では、不連続面の配置パターンと破壊（ひび割れ）の関係、あるいは不連続面を含む試験体の強度特性のいずれかに注目した検討が行われている。近年は、前者に注目した研究が盛んに行われ、ひび割れの連結作用など破壊挙動の新しい知見が多く報告されている^{2)~11)}。しかし、ひび割れの連結作用と強度特性の関係はあまり議論されることがない。

一方、試験体の強度特性に注目した研究は圧倒的に数が少なく、その中でも供試体の幾何形状と強度特性の関連性についての報告^{12)~14)}がほとんどである。ひび割れの連結作用などの破壊挙動と岩盤の強度特性との関連性については、十分な知見が得られていない。

本研究では、一軸圧縮試験を実施して、一軸圧縮強さの違いから不連続面を含む脆性材料の強度特性に影響を及ぼす破壊メカニズムの解明を目指す。その際、簡易な強度予測式¹⁴⁾を基準とした数種類の実験供試体を準備する。それらの実験供試体の中で、実験結果が予測値と異なった場合に着目して、特徴的な破壊挙動を抽出する。最後に、抽出した破壊メカニズムを考慮した強度予測式を新たに構築し、実験結果との比較検討を行う。こうした段階的な検討手順を実施して、不連続面を有する脆性材料の不連続面の配置パターン、破壊挙動、強度特性を関連づけて考察を加える。

図-1 不連続面を含む供試体の一軸圧縮試験

2. 実験の概要

2.1 一軸圧縮試験の概要

実験では、図-1に示すように、単一不連続面や3つの不連続面を配置した石膏供試体に対して一軸圧縮試験を行う。供試体の寸法は全て88×160×40mmで、水平からの角度 θ で開口不連続面を配置する。

試験では、0.01MPa/secで圧縮荷重を増加させ、ピーク荷重を発現した後は変位制御により載荷される。載荷面には、2枚重ねたテフロンシートを試験機と供試体の間に挟んで試験を行った。挟んだテフロンシートの内、供試体側の1枚は、複数の切れ目を入れて、載荷面での摩擦抵抗の軽減を図った。

図-2 ウイングクラックと二次亀裂⁴⁾

図-3 供試体柱部に生じる圧縮応力

2.2 線形メカニズムに基づく強度予測式¹⁴⁾

本研究では、文献¹⁴⁾に基づいて実験条件を決定したので、ここで文献の内容を簡潔に述べる。

不連続面を有する脆性材料が圧縮荷重を受けると、図-2のようなウイングクラックや二次亀裂と呼ばれるひび割れが生じる¹⁾⁻¹¹⁾。文献¹⁴⁾では、単一不連続面を有する石膏供試体の一軸圧縮強さは、初期不連続面の両横にある柱部での破壊（二次亀裂）に影響されることを突き止め、単純に力の伝達のみを考慮した線形メカニズムに基づく応力計算を行っている。

応力計算で考慮されるメカニズムは、図-3に示すように、载荷に伴う変形や破壊パターンの違いなどは一切考慮せず、単一不連続面を有する石膏供試体において生じる圧縮応力を単純に力の伝達のみを考えた。既存の開口不連続面を空隙と考えると、供試体载荷面と不連続面が存在する供試体中央部付近では圧縮力を伝達する断面積が異なる。図-3では、断面 AA' が柱部における最も危険側の断面と見なすことができる。

断面 AA' の断面積は、初期不連続面の配置角度 θ によって変化する。供試体の幅を $2b$ 、奥行きを単位長さ

とし、初期不連続面の長さを $2l$ とすると、载荷面の断面積 $S = 2b$ に対して断面 AA' の断面積 S' は

$$S' = b - l \cos \theta \quad (1)$$

で与えられる。したがって、载荷面に圧縮荷重 P [MPa] が作用するとき、断面 AA' には

$$P' = \frac{Pb}{S'} = \frac{Pb}{b - l \cos \theta} \quad (2)$$

の圧縮応力が作用する。

式 (2) で与えられる圧縮応力 P' [MPa] が、材料である石膏の圧縮強さ σ [MPa] を超えたときにピーク強度を発現すると評価できる。したがって、開口不連続面を含む供試体の圧縮強さは、 $P' = \sigma$ として、

$$P = \sigma \frac{b - l \cos \theta}{b} \quad (3)$$

とで求められる。長さ 20mm、厚さ 1.0mm の単一不連続面を配置した石膏供試体では、式 (3) による計算値と実験値がよく一致する¹⁴⁾。

2.3 供試体の種類

式 (3) によれば、開口不連続面を含む石膏供試体の圧縮強さは、不連続面の長さ l と配置角度 θ のみに依存する。このとき、不連続面の長さ l は空隙の量を表す変数であり、配置する不連続面の数を規定するものではない。複数の不連続面を配置した場合、配置の形式に依存して種々のひび割れが発生し、複雑な破壊挙動を示すことがわかっている^{3), 4), 6)-8)}。個々に異なる破壊挙動を示した場合に、等しい圧縮強さを示すとは考えにくい。

そこで、式 (3) では同じ圧縮強さが計算されるが、不連続面の配置パターンの異なる数種類の石膏供試体を準備して、それら供試体の一軸圧縮強さを調査する。

図-4に実験供試体の種類を示す。配置パターン O と称する供試体では、文献¹⁴⁾と同様に、供試体の中心に水平からの角度 θ で長さ 30mm の開口不連続面を 1 つ配置する。文献¹⁴⁾では長さ 20mm の開口不連続面を用いており、配置パターン O は不連続面長さが異なる供試体となっている。一方、配置パターン A～D の供試体では、不連続面の全長 $2l$ が 30mm となるように 10mm の開口不連続面を 3 つ配置する。どのパターンにおいても、不連続面は全て水平からの角度 θ で配置する。

3 つの不連続面を配置するパターン A～D では、供試体の中心に 1 つの不連続面を配置して、その不連続面を基準として、以下のように残り 2 つの不連続面を配置している。

- 配置パターン A では、単一不連続面に対して水平方向にずらすことなく、鉛直方向のみに 15mm ずらして配置する。ウイングクラックにより不連続面が連結されることが予想される^{2), 3)}。
- 配置パターン B では、単一不連続面に対して鉛直方向にずらすことなく、水平方向のみに 15mm ず

図-4 供試体の種類

表-1 使用した石膏の物性値 (円柱供試体の平均値)

ヤング率 (MPa)	圧縮強さ (MPa)	ポアソン比
5535	12.49	0.251

図-5 一軸圧縮試験の載荷曲線例 (A30)

らして配置する。不連続面が互いに連結にくく、式 (3) と一致する可能性が高い供試体と予想される。

- 配置パターン C³⁾では、角度 θ の同一直線上に3つの不連続面が並ぶように、不連続面中心間の水平距離を 23mm あけて配置する。
- 配置パターン D では、45° となる直線上に3つの不連続面の中心が並ぶように、不連続面中心間の水平距離を 15mm あけて配置する。

配置パターン C, D は、ウイングクラックでは連結せず、二次亀裂により連結する可能性が高い供試体として期待している。

それぞれの配置パターンに対して不連続面を配置する角度 θ は 15°, 30°, 45°, 60° の4種類とし、計 20 種類の供試体を準備する。開口不連続面は、単一不連続面および3つの不連続面ともに、厚さ 1.0mm の鉄

図-6 一軸圧縮強さ (配置パターン O : 単一不連続面)

板を石膏が固まった後に引き抜いて形成した。実験供試体 2 体と同時に円柱供試体も作製し、物性値が大きく異なった場合は供試体を再度作製した。こうした作業を通じて、各種供試体について2セットずつ供試体を準備した。本稿では、各供試体を配置パターン名と角度を組み合わせる呼ぶことにする。

円柱供試体から得た物性値を表-1 に、不連続面を含む石膏供試体の載荷曲線例 (A30) を図-5 に示す。

3. 不連続面を有する供試体の圧縮強さ

3.1 単一不連続面を有する供試体の圧縮強さ

既往の研究¹⁴⁾では、長さ 20mm の不連続面を有する石膏供試体を用いて一軸圧縮試験を行い、式 (3) による計算値と実験とを比較している。本稿では、単一不連続面の長さを 30mm として、実験値と式 (3) による計算値を比較する。

図-6 に、単一不連続面を配置したパターン O に関する一軸圧縮強さを示す。実験では複数体の供試体を用

図-7 一軸圧縮強さ (配置パターン A)

図-9 一軸圧縮強さ (配置パターン C)

図-8 一軸圧縮強さ (配置パターン B)

図-10 一軸圧縮強さ (配置パターン D)

いたので、図中の実験値は平均値を示している。一方、予測値は、式 (3) に表-1 の圧縮強さ $\sigma = 12.49[\text{MPa}]$ を代入して計算した。

図-6 では、式 (3) による予測値と実験値がほぼ一致した。これより、単一の開口不連続面を含む石膏供試体であれば、簡単な線形メカニズムを考慮することで一軸圧縮強さを概算できる可能性が確認できた。

3.2 複数の不連続面を有する供試体の圧縮強さ

複数の不連続面を有する場合、不連続面の配置に応じて異なるひび割れが生じ、それらのひび割れを生じる圧縮荷重も不連続面配置に依存して違いが生じる^{9),10)}。そのため、複数の不連続面を有する供試体では、それぞれの破壊メカニズムに応じた圧縮強さが得られるはずである。

図-7 に、不連続面を鉛直方向のみにずらした配置パターン A の一軸圧縮強さを示す。式 (3) による予測値の傾向と同様に、配置角度 θ が大きくなるほど、圧縮強さは大きい。また、配置パターン O ほどではないが、実験値と予測値はおおよそ一致している。

図-8 に、不連続面を水平方向のみにずらした配置パターン B の一軸圧縮強さを示す。実験値は配置角度 θ が大きくなるほど、圧縮強さは大きい。しかし、B15 と B60 では予測値とよく一致しているものの、B30 と B45 では予測値よりも大きな実験値を示している。配置パターン B は、不連続面同士の水平方向の間隔が最も広い供試体であるため、不連続面の連結が生じにくい供試体と予想されたが、予想とは異なる結果となった。

図-9 に、不連続面を傾き θ の同一直線上に配置した配置パターン C の一軸圧縮強さを示す。実験値は、予測値よりわずかに大きな値を示しているものの、配置角度 θ による影響は式 (3) の傾向とよく一致している。

図-10 に、不連続面の中心を傾き 45° の直線上に配置した配置パターン D の一軸圧縮強さを示す。他の配置パターンと同様に、配置角度 θ が大きくなるほど、圧縮強さは大きくなる。しかし、他の配置パターンと異なり、実験による一軸圧縮強さは大きく予測値を下回る結果となった。配置パターン D では、他の配置パターンの供試体や式 (3) で考慮したメカニズムとは明らかに異なる破壊挙動が生じていることが示唆される。

図-11 破壊直前の供試体の様子（配置パターン D：左から $\theta = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ ）

図-12 破壊直前の供試体の様子（配置パターン A：左から $\theta = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ ）

4. 複数の初期不連続面を有する石膏供試体に生じる圧縮破壊挙動

4.1 実験時に観察された圧縮破壊挙動

一軸圧縮強さの実験値と式 (3) による予測値の比較では、配置パターン D だけが明らかに異なる結果を示した。ここでは、配置パターン D とその他の供試体における圧縮破壊挙動を比較し、配置パターン D の一軸圧縮強さに強く影響する破壊挙動を調査する。

図-11 に、破壊直前における配置パターン D の各供試体を示す。石膏供試体は白色であるため、撮影した写真では破壊の様子がわかりにくい。そこで図には、撮影時刻の異なる 2 枚の写真の差分画像を示している。差分画像では、変形が小さい箇所では画素の濃淡が滑らかに表現され、変形が大きい箇所では濃淡の起伏が強

調されて表現される。例えば、D15 の供試体の右下部分では画素が滑らかに表現され、左上部は画素の凹凸が強調されている。これより、D15 の供試体では左上部分が主に変形していることが見て取れる。

図-11 では、D15, D30, D45 において、初期不連続面を連結する線（ひび割れ）を境に、画素の濃淡が極端に変化している。また供試体左右両端の柱部では、画素の濃淡には顕著な境界は確認できない。これらの点から、D15, D30, D45 の供試体では、破壊直前に初期不連続面を繋ぐ二次亀裂が生じ、圧縮荷重は柱部で支えられていると考えられる。D60 では、初期不連続面を連結する二次亀裂がうっすらと写っているが、二次亀裂を境とした変形挙動の顕著な違いは確認できなかった。

図-12 に、破壊直前における配置パターン A の各供試体を示す。3 つの不連続面を鉛直方向にずらした配

図-13 破壊直前の供試体の様子（配置パターン B：左から $\theta = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ ）

図-14 破壊直前の供試体の様子（配置パターン C：左から $\theta = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ ）

置パターン A では、それぞれの不連続面から発生したウイングクラックによって、供試体の左右部分が分断されるように変形していることが見て取れる。各初期不連続面から発生したウイングクラックは互いに連結することなく、互いに異なる経路をたどって隣接する他の不連続面に向かって進展している。図からは、破壊直前での二次亀裂の発生は確認できない。

図-13 に、破壊直前における配置パターン B の各供試体を示す。3つの不連続面を水平方向にずらした配置パターン B では、ウイングクラックの進展は確認できるものの、それぞれの初期不連続面が連結する様子は見て取れない。供試体によっては、ウイングクラックと二次亀裂が連結する様子が見られた。またウイングクラック以外にも、载荷軸方向に発生した引張亀裂が認められる。配置パターン B では、図-8 で式 (3) に

る予測値と実験値が異なったが、図-13 を見るかぎり、式 (3) で考慮した線形メカニズムと異なる破壊挙動は確認できなかった。

図-14 に、破壊直前における配置パターン C の各供試体を示す。配置角度と同じ傾きを有する同一直線上に不連続面を配置したパターン C では、配置角度の大きさによって異なるひび割れが発生している。C15, C30 では、配置パターン B と同様に、ウイングクラックの発生のみが観察される。一方、C45, C60 では、初期不連続面の間に二次亀裂の発生が確認できる。既往の研究^{9), 10)}でも、不連続面と同一平面上に生じる二次亀裂によって初期不連続面が連結するとされており、本実験でも同様の破壊挙動が得られた。しかし C60 では、D60 と同様に、二次亀裂を境とした変形挙動の顕著な変化については確認できない。

図-15 弾塑性解析による相当塑性ひずみ分布（配置パターン D：左から $\theta = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ ）

図-16 弾塑性解析による相当塑性ひずみ分布（配置パターン A：左から $\theta = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ ）

4.2 弾塑性解析による破壊挙動の検討

4.1 節で観察した破壊挙動の妥当性を検討するために、関連流れ則の Drucker-Prager モデルを降伏基準とした弾塑性有限要素解析を行った。解析には、表-1 に示す物性値を用い、Drucker-Prager モデルの解析パラメータは $2c = 1.0\text{MPa}$, $\phi = 20^\circ$ と設定した。すべての供試体モデルに圧縮荷重 10MPa を载荷して、相当塑性ひずみ分布を確認した。解析パラメータのいくつかは本実験で用いた供試体のものではないが、供試体に生じる破壊挙動の傾向を調べる上では妥当な結果を得たものとする。

図-15 に、配置パターン D の供試体における相当塑性ひずみ分布を示す。図では、D60 を除いて、初期不連続面を繋ぐように塑性ひずみが卓越している。D60 でも、初期不連続面を繋ぐような塑性ひずみの発生が見て取れるが、他の 3 つと比べると連結しにくい供試

体であると言える。これは図-11 で観察された傾向とよく一致しており、配置パターン D の供試体には不連続面を連結する二次亀裂が発生しやすいことが裏付けられた。

図-16 に、配置パターン A の供試体における相当塑性ひずみ分布を示す。図では、初期不連続面を繋ぐように塑性ひずみが卓越している。しかし、図-15 とは異なり、不連続面先端を鉛直に繋ぐように塑性ひずみが卓越している。この塑性ひずみ分布は、図-12 でのウイングクラックと関係するものと考えられる。

図-17 に、配置パターン B の供試体における相当塑性ひずみ分布を示す。配置パターン B では、図-15 や図-16 とは異なり、初期不連続面を直線的に繋ぐような塑性ひずみの卓越は認められない。これより、配置パターン B は不連続面は連結しにくい供試体であることが示唆される。

図-17 弾塑性解析による相当塑性ひずみ分布（配置パターン B：左から $\theta = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ ）

図-18 弾塑性解析による相当塑性ひずみ分布（配置パターン C：左から $\theta = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ ）

なお、不連続面周りに分布する塑性ひずみに着目すると、図-15、図-16 では供試体左右両端の柱部で塑性ひずみが卓越するのに対し、図-17 では載荷面に沿って満遍なく塑性ひずみが生じている。こうした違いは、図-8 の結果に何らかの影響を与えているものと考えられる。詳しい検討は今後の課題としたい。

図-18 に、配置パターン C の供試体における相当塑性ひずみ分布を示す。C15、C30 は配置パターン B と似た傾向を示し、C45、C60 では配置パターン D に近い結果が得られている。これらは図-14 の実験時の画像から得られた知見と一致する。

弾塑性解析により、すべての配置パターンについて実験時の破壊挙動を裏付ける結果を得ることができた。特に、式 (3) の予測値と大きく異なる実験値を示した配置パターン D では、初期不連続面を連結する二次亀裂の存在が顕著であった。こうした二次亀裂を考慮す

ることで、配置パターン D の石膏供試体に対して一軸圧縮強さをより精度よく評価できると予想される。

5. 不連続面の連結を考慮した強度予測

5.1 不連続面の連結を考慮した強度予測式の検討

配置パターン D の供試体では、圧縮荷重を受けると、ピーク強さを発現する前に初期不連続面を繋ぐ二次亀裂が発生することを確認した。そのため、線形メカニズムに基づく式 (3) は適用範囲外であり、実験での一軸圧縮強さを精度よく評価できない要因が明らかとなった。そこで、初期不連続面が連結されることを考慮した新たな強度予測式を検討する。

図-19 に、初期不連続面が二次亀裂によって連結された供試体における力の伝達経路を示す。ピーク強さは、供試体両横の柱部（断面 AA'）の破壊によって発

図-19 連結を考慮した強度計算の考え方

現すると考えて、柱部に生じる圧縮荷重 P'' [MPa] を算出する。この際、二次亀裂による破壊面は接触摩擦面として考えることとする。供試体の幅を $2b$ 、奥行きを単位長さとし、1つの初期不連続面の長さを l 、接触摩擦面の長さを l_c とする。接触摩擦面の角度 α は、初期不連続面の配置条件とその配置角度 θ より求めることができる。

供試体形状をそのまま取り扱うと問題設定が難解になるので、図-19に示すように、開口不連続面、接触摩擦面、柱部に関わる領域に整理して考える。図-19から、長さ $2l_o (= 3l)$ の開口不連続面と $2l_c$ の接触摩擦面による影響を考慮して、柱部に生じる圧縮力 P'' [MPa] を導く。

まず、開口不連続面は空隙であり、力を伝達しないことから、開口不連続面以外の領域には面積比に応じた圧縮荷重 P' [MPa] が伝達される。よって、圧縮荷重 P' [MPa] は、2.2節の式(2)と同様に、計算される。

$$P' = \frac{Pb}{b - l_o \cos \theta} \quad (4)$$

次に、接触摩擦面が分担する圧縮荷重を求める。接触摩擦面には、式(4)で与えられる圧縮荷重 P' [MPa] が作用するので、接触摩擦面が受け持つ圧縮力は、面積比から $2P'l_c \cos \alpha$ となる。よって、接触摩擦面に作用する垂直抗力 N は

$$N = 2P'l_c \cos^2 \alpha \quad (5)$$

と求まる。また、接触摩擦面接線方向には摩擦力 T が作用する。摩擦係数 $\mu = \tan \phi$ とすると、摩擦力 T は

$$T = \mu N = 2\mu P'l_c \cos^2 \alpha \quad (6)$$

で与えられる。以上より、載荷軸方向の圧縮荷重のう

図-20 連結を考慮した強度計算の結果（パターンD）

ち、垂直抗力 N および摩擦力 T の鉛直方向成分

$$N_v = N \cos \alpha = 2P'l_c \cos^3 \alpha \quad (7)$$

$$T_v = T \sin \alpha = 2\mu P'l_c \cos^2 \alpha \sin \alpha$$

がそれぞれ接触摩擦面を介して伝達されることとなる。

柱部には、接触摩擦面を介して伝達されない圧縮力が作用する。柱部の断面積は $2(b - l_o \cos \theta - l_c \cos \alpha)$ であり、その断面に全圧縮力 $2Pb = 2P'(b - l_o \cos \theta)$ から N_v, T_v を除いた圧縮力が作用する。よって、柱部に作用する圧縮荷重 P'' [MPa] は次式で求められる。

$$P'' = \frac{P'(b - l_o \cos \theta) - \frac{1}{2}N_v - \frac{1}{2}T_v}{b - l_o \cos \theta - l_c \cos \alpha} \quad (8)$$

$$= P' \frac{b - l_o \cos \theta - l_c \cos^2 \alpha - \mu l_c \cos^2 \alpha \sin \alpha}{b - l_o \cos \theta - l_c \cos \alpha}$$

供試体の圧縮強さは、柱部に作用する圧縮荷重 P'' [MPa] が、材料の圧縮強さ σ [MPa] に達した時の圧縮荷重 P [MPa] であると評価できる。そこで、式(8)に $P'' = \sigma$ と式(4)を代入して、載荷面に作用する荷重 P [MPa] について整理すると、不連続面の連結を考慮した新しい強度予測式

$$P = \sigma \frac{b - l_o \cos \theta - l_c \cos \alpha}{\left(b - \frac{bl_c \cos^2 \alpha (\cos \alpha + \mu \sin \alpha)}{b - l_o \cos \theta} \right)} \quad (9)$$

が得られる。

5.2 不連続面の連結を考慮した予測式による強度評価

図-20に、不連続面の連結が確認された配置パターンDを対象として、式(9)を用いた強度評価の結果を示す。予測値は、式(9)に表-1の圧縮強さ $\sigma = 12.49$ [MPa] を代入して計算している。なお、摩擦係数 μ は0.1および0.5と仮定し、 $\mu = 0.1$ の結果を□と点線、 $\mu = 0.5$ の結果を実線で表す。

図-20では、 $\mu = 0.1$ とした場合、D15、D30、D45が示した実験値とよく一致する。しかし、D60について実験値より1MPaほど低い圧縮強さを算出した。一方、

$\mu = 0.5$ とした場合には、D15, D60 の実験結果とよく一致している。

配置パターン D では、図-11 において、すべての供試体で初期不連続面を連結する二次亀裂が観察されている。しかし、D60 の供試体では、二次亀裂に沿ってそのような変形は確認できなかった。式 (9) において、摩擦係数を大きくすると D60 の結果でよく一致し、摩擦係数が小さい場合には D15, D30, D45 の結果で一致したことから、式 (9) では、摩擦係数の違いによって、図-11 で観察された変形破壊挙動を適切に評価できると考えられる。

なお、図-12 や図-16 において、ウイングクラックによる不連続面の連結が示唆された配置パターン A では、接触摩擦面の角度 $\alpha = 90^\circ$ となるため、式 (9) は式 (3) と完全に等価になる。そのため、式 (9) は図-7 と完全に同じ結果を算出する。

6. おわりに

本研究では、不連続面を有する脆性材料に対して、既往の強度予測式¹⁴⁾を基準に計画した一軸圧縮試験を実施して、画像解析および弾塑性解析により圧縮破壊挙動を考慮した新たな強度予測式を提案した。

一軸圧縮試験では、線形メカニズムに基づく強度予測式¹⁴⁾を基準とした種々の実験供試体を準備して、それぞれの一軸圧縮強さの違いを確認した。単一の開口不連続面を有する供試体では、既往の強度予測式によって一軸圧縮強さを精度よく予測評価できた。これに対して、複数の不連続面を有する供試体では、強度予測値に比べて、著しく小さい一軸圧縮強さを示す供試体があり、既往の強度予測式が適用できない配置パターンがあることを確認した。

画像解析や弾塑性有限要素解析では、初期不連続面の配置パターンに依存して、

- ウイングクラックにより初期不連続面が連結する
- 二次亀裂により初期不連続面が連結する
- 初期不連続面は連結しない

など、生じやすい圧縮破壊挙動が異なることを確認した。これらは、既往の研究^{9), 10)}で報告されている知見と合致している。

最後に、以上の知見に基づいて不連続面の連結という破壊挙動を考慮した強度予測式を新たに提案した。新たな強度予測式では、既往の予測式では予測評価できなかった供試体に対しても、実験結果を精度よく予測評価できることを確認した。したがって、二次亀裂によって初期不連続面が連結される場合には、他の供試体や基準とした既往の予測値と比べて、一軸圧縮強さが大幅に低下することを突き止めた。

ただし、提案した強度予測式は、十分な汎用性を有しているわけではない。複数の不連続面の配置パターン

は無限通りの組み合わせが存在するため、強度特性に関わる破壊メカニズムの一つを見出したに過ぎず、その全容は十分には解明できていない。しかし、本研究で基準とした既往の強度予測式¹⁴⁾と同様に、提案式は、不連続性岩盤の合理的な強度評価手法を構築する上で、有用な知見を見出せる可能性を有していると考えられる。それらの発展的な検討が今後の課題である。

参考文献

- 1) 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.
- 2) Shen, B., Stephansson, O., Einstein, H. H. and Ghahreman, B.: Coalescence of fractures under shear stress experiments, *Journal of Geophysical Research*, Vol.100(6), pp.5975–5990, 1995.
- 3) Bobet, A., Einstein, H.H.: Fracture coalescence in rock-type materials under uniaxial and biaxial compression, *International Journal of Rock Mechanics, Mining Sciences and Geomechanics Abstract Fracture Mechanics*, Vol. 35, No. 7, pp. 863–889, 1998.
- 4) Bobet, A.: The initiation of secondary cracks in compression, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.66, pp.187–219, 2000.
- 5) Wong, R.H.C., Chau, K.T., Tang, C.A., Lin, P.: Analysis of crack coalescence in rock-like materials containing three flaws – Part I: experimental approach, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol.38, pp.909–924, 2001.
- 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) Lee, S., Ravichandran, G.: Crack initiation in brittle solids under multiaxial compression, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.70, pp.1645–1658, 2003.
- 8) 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.
- 9) Park, C.H., Bobet, A.: Crack coalescence in specimens with open and closed flaws: A comparison, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol.46, pp.819–829, 2009.
- 10) Park, C.H., Bobet, A.: Crack initiation, propagation and coalescence from frictional flaws in uniaxial compression, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.77, pp.2727–2748, 2010.
- 11) Pook, L.P.: Crack Paths (Advances in Damage Mechanics, Vol2), Wit Press, 2002.
- 12) Yang, S.Q., Jiang, Y.Z., Xu, W.U., Chen, X.Q.: Experimental investigation on strength and failure behavior of pre-cracked marble under conventional triaxial compression, *International Journal of Solids and Structures*, Vol.45, pp.4796–4819, 2008.
- 13) 石井建樹, 伊藤理大, 田中健嗣: 不連続面を含む脆性材料の圧縮荷重条件下における変形破壊挙動に関する実験的研究, 土木学会応用力学論文集, Vol.12, pp. 265–272, 2009.
- 14) 石井建樹, 田中健嗣: 単一不連続面を含む石膏供試体の圧縮破壊挙動とその強度特性, 土木学会応用力学論文集, Vol.13, pp. 293–300, 2010.

(2012 年 3 月 8 日 受付)