

節理の方向が岩盤のせん断強度に与える影響に関する実験的検討

MODEL TEST ON INFLUENCE OF JOINT DIP ON SHEARING STRENGTH OF ROCKMASS

永山 功*・太田 道男**・藤田 徹***

Isao NAGAYAMA, Michio OHTA and Toru FUJITA

The shearing strength of rock mass is influenced by hardness of rock, spacing of joints, the conditions of joint-planes and other factors. This paper discusses the influence of joint dip on shearing strength of rock mass using plaster models. The results of the study are as follows.

- (1) Let β, θ be the angle between the load line and expected shearing plane, and the joint dip respectively. In the rock model shear test, there are two modes of failure. One is the shearing failure when $\beta \geq \theta$ and the other is the bending failure when $\beta < \theta$.
- (2) The failure criterion of the rock model is composed of two lines in the regions of $\beta \geq \theta$ and $\beta < \theta$. Failure criterion in the region of $\beta < \theta$ depends on θ . Failure criterion in the region of $\beta \geq \theta$ is almost the same as that of plaster (model material).

1. はじめに

安全なダムを経済的に造るためには、ダム基礎岩盤のせん断強度を精度よく把握することが重要である。このため、ダムの設計を行うにあたっては、ダムサイトの岩盤を数種類の岩級に分類し、各岩級ごとに原位置せん断試験を行い、岩盤の設計せん断強度を求めている。しかしながら、このような岩級区分を実施しても、原位置せん断試験によって求まる岩盤せん断強度のばらつきをなくすることは難しく、岩盤のせん断強度を正確に把握するためには岩級区分の基準についてさらに詳細な検討が必要である。

岩級区分は基本的に①岩片の硬さ、②亀裂の頻度、③亀裂面の状態の3要素の組み合わせによって構成されている。これらの3要素が岩盤のせん断強度と深く関わっていることは明らかであるが、これらの3要素以外にもせん断強度に影響を及ぼす因子が存在し、その一つに④岩盤内の亀裂の方向がある^{1), 2)}。本論文は、亀裂の方向を荷重の載荷方向に対してさし目とした岩盤亀裂模型の破壊試験を行い、亀裂が岩盤のせん断破壊特性に与える影響について検討した結果をとりまとめたものである。

2 せん断試験の概要

2.1 せん断試験装置

岩盤亀裂模型のせん断強度を求める試験方法は、想定せん断面に対する載荷角度を任意に設定でき、また多くの試験ケースを実施できる簡便な方法として、図-1に示すダイス型せん断試験装置を用いることとした。

* 正会員 建設省土木研究所ダム部ダム構造研究室 室長

** 正会員 建設省土木研究所ダム部ダム構造研究室 主任研究員

*** 正会員 八千代エンジニアリング(株) 東京事業部水工部 (元建設省土木研究所交流研究員)

この試験装置は岩盤亀裂模型の想定せん断面に斜め方向から荷重を載荷することによりせん断荷重と垂直荷重を同時に与えるもので、せん断面上にモーメントを発生させないように、荷重は模型の中心を通るように載荷した。なお、荷重の載荷はアムスラー型圧縮試験機によって行い、荷重の大きさはロードセルによって測定、制御した。

想定せん断面上の平均せん断応力 τ と平均垂直応力 σ は次式によって求められる。

$$\tau = (P/A) \cos \beta \tag{1}$$

$$\sigma = (P/A) \sin \beta \tag{2}$$

ここに、 P ：載荷重、 A ：想定せん断面の面積、 β ：載荷角度である。なお、 β はせん断用治具とスペーサーを組み合わせることにより種々に設定できる。

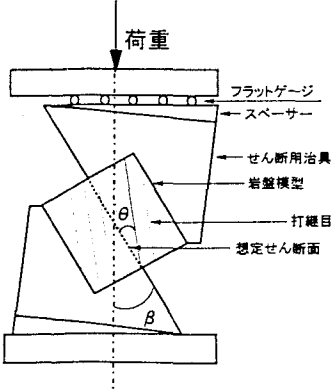


図-1 せん断試験装置

2.2 岩盤亀裂模型の作製と実験ケース

岩盤亀裂模型は図-2 に示すとおり 1 辺 15cm の立方体とし、想定せん断面でせん断破壊が生じるように想定せん断面の端部に深さ 10mm の切り込みを入れ、上下の模型内に鉄筋を配した。亀裂の状態は、密着亀裂と開口亀裂の 2 種類とし、石膏を層状（層厚 15mm）に打ち継ぐことにより密着亀裂を、石膏打設時に厚さ 0.5 mm の金属板を設置し、後からこれを引き抜くことにより開口亀裂を表現した。なお、石膏模型は石膏と水の質量混合比を 1:0.67 として作製した。また、模型の脱型は石膏を打設して 1 時間後に行い、約 25℃ の恒温室で約 1 ヶ月間養生した後に試験を行った。

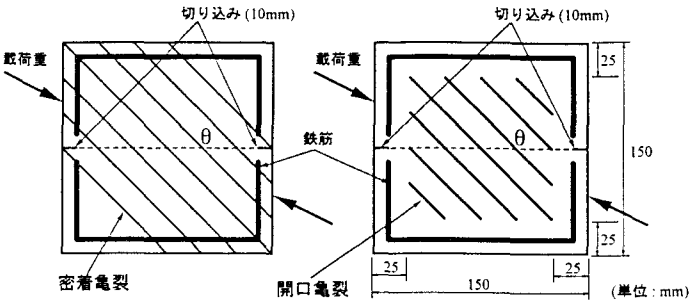


図-2 岩盤亀裂模型の形状

ことにより開口亀裂を表現した。なお、石膏模型は石膏と水の質量混合比を 1:0.67 として作製した。また、模型の脱型は石膏を打設して 1 時間後に行い、約 25℃ の恒温室で約 1 ヶ月間養生した後に試験を行った。

表-1 試験ケース

亀裂方向 θ (°)	載荷角度 β (°)	亀裂の状態
20	10, 15, 20, 25, 30	密着, 開口
30	10, 20, 25, 30, 35	密着, 開口
45	10, 20, 25, 30, 35	密着, 開口

表-2 石膏材料の強度 (単位: kgf/cm²)

一軸圧縮強度	129
弾性係数	65,000
せん断強度(石膏)	$\tau = 19.9 + 1.29 \sigma$
せん断強度(石膏打継目)	$\tau = 11.8 + 1.06 \sigma$

試験は、表-1 に示すとおり亀裂の方向 θ を 3 種類、載荷角度 β を 5 種類、亀裂の状態を 2 種類とし、計 30 ケースについて実施した。また各ケースについて 2 個の模型を作製し、合計 60 個の模型に対してせん断試験を実施した。なお、載荷状態における岩盤亀裂模型のひずみを把握するため、模型側面に三方向ひずみゲージを想定せん断面を挟んでそれぞれ 3 ケ所、計 6 ケ所貼り付けた。

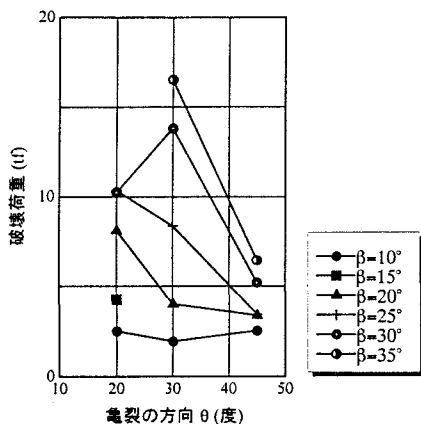
2.3 石膏材料の試験

亀裂模型のせん断試験を実施するに先だって、石膏の材料強度を求めるために、石膏の一軸圧縮強度試験と本試験装置によるせん断試験を実施した。一面せん断試験は石膏の打継目に対しても実施した。これらの結果は表-2 に示すとおりである。

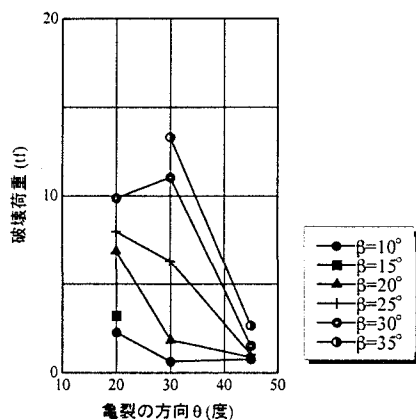
3. 試験結果と考察

3.1 破壊荷重・破壊形態と載荷角度 β 、亀裂の方向 θ の関係

せん断試験結果より破壊荷重 P と載荷角度 β 、亀裂の方向 θ の関係を整理すると図-3(1)、(2)のようになる。



(1) 密着亀裂



(2) 開口亀裂

図-3 破壊荷重

なお、図中の点は2個の試験値の平均値を示している。 β が大きくなると破壊荷重が大きくなるのは当然であるが、図によれば、密着亀裂、開口亀裂とも $\theta = \beta$ 付近でピークが現れ、これを境に θ が大きくまたは小さくなるにつれて破壊荷重が低下する傾向にある。ここで、 $\theta = \beta$ 付近で破壊荷重が最大となるのは岩片が柱として荷重に抵抗するためと考えられ、 $\theta < \beta$ の領域では亀裂面を含んだ形でせん断破壊が生じ（写真-1）、また、 $\theta > \beta$ の領域では亀裂間の岩片の端部で曲げ破壊が生じ（写真-2）、それぞれ破壊荷重が小さくなるものと考えられる。

なお、亀裂の開口の有無による破壊荷重の相違を比較したものが図-4である。図によれば、亀裂の方向 θ が大きくなるほど開口亀裂の影響が大きく現れており、亀裂の開口によって曲げ破壊が生じやすい環境になっているものと考えられる。一方、 $\theta = \beta$ 付近および $\theta < \beta$ の領域（例えば、 $\beta = 35^\circ$ における $\theta = 20^\circ, 30^\circ$ など）では亀裂の開口の有無による破壊荷重の相違は小さく、亀裂部のせん断強度は破壊荷重の大きさに大きな影響を及ぼさないと考えられる。この点については、3.3で詳しく考察する。

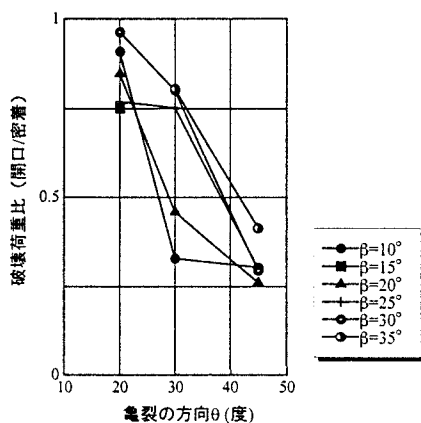


図-4 破壊荷重比

3.2 岩盤亀裂模型内のひずみ

次に、岩盤亀裂模型内のひずみから応力分布を求めた結果の一例を図-5(1)～(3)に示す（載荷重は破壊荷重の約50%）。ここで、図-5(1)は $\theta < \beta$ の場合、図-5(2)は $\theta = \beta$ の場合、図-5(3)は $\theta > \beta$ の場合である。 $\theta < \beta$ の場合、模型内の応力分布は密着亀裂、開口亀裂とも類似しているように見えるが、開口亀裂では主応力が亀裂の方向に傾いていることがわかる。また、 $\theta = \beta$ の場合、模型内の応力分布は密着亀裂と開口亀裂でよく一致している。一方、 $\theta > \beta$ の場合、模型内の応力分布は密着亀裂と開口亀裂で大きく異なり、開口亀裂では模型中央部の応力がほとんど発生していない。これは、開口亀裂が応力を伝達していないためと考えられる。

なお、破壊時付近における模型内のひずみは模型毎に大きく異なり、一般的な傾向は認められなかった。これは、破壊の過程が個々の模型で微妙に異なるためと考えられる。

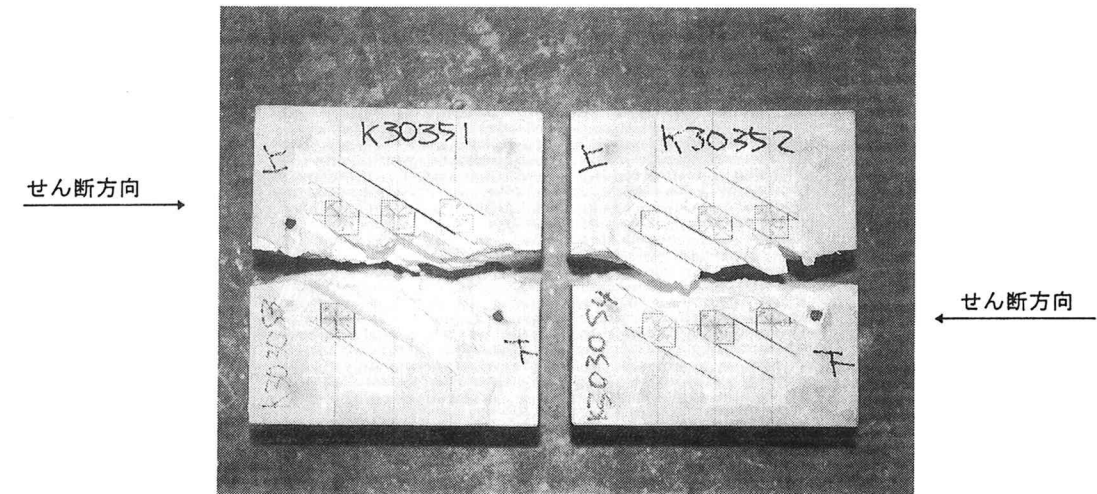


写真-1 せん断破壊形状の例 ($\theta=30^{\circ}$, $\beta=35^{\circ}$, 開口亀裂)

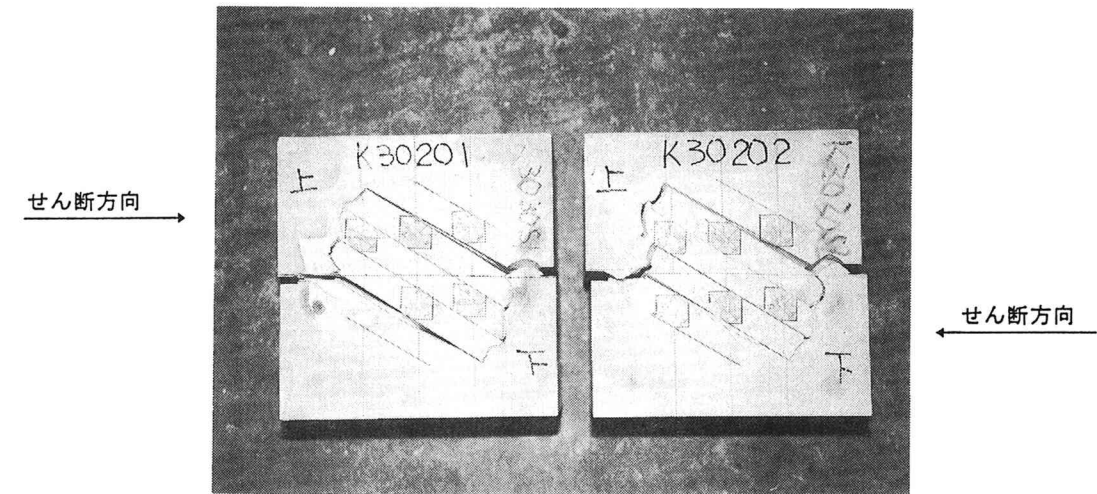


写真-2 曲げ破壊形状の例 ($\theta=30^{\circ}$, $\beta=20^{\circ}$, 開口亀裂)

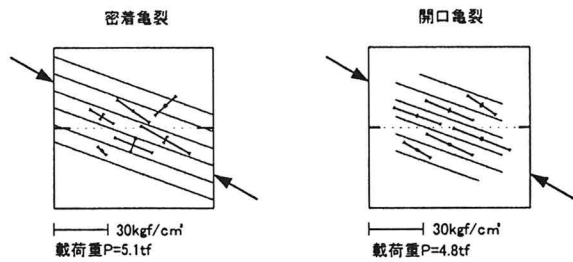


図-5 主応力状態 (1) $\theta=20^{\circ}$, $\beta=30^{\circ}$

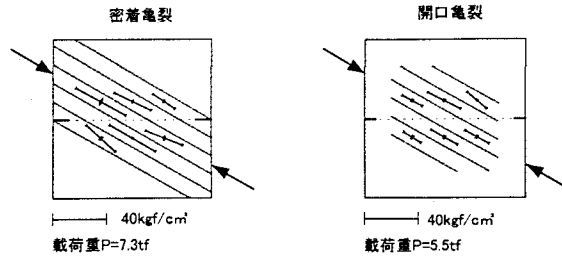


図-5 主応力状態 (2) $\theta=30^\circ$, $\beta=30^\circ$

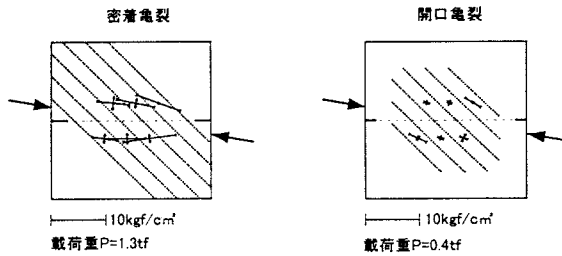
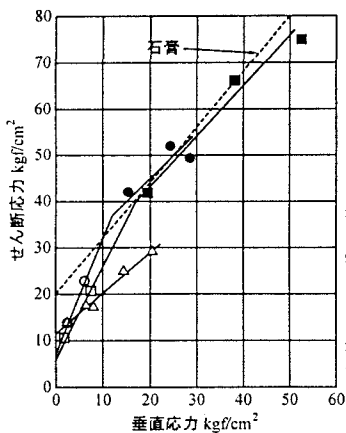


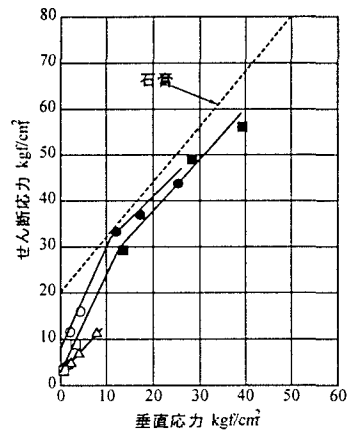
図-5 主応力状態 (3) $\theta=45^\circ$, $\beta=10^\circ$

3.3 岩盤亀裂模型の破壊規準

今回のせん断試験結果から、岩盤亀裂模型毎に(1), (2)式から求められる破壊時の応力を τ - σ 平面に落とすと図-6(1), (2)のようになる。なお、図中の点は2個の試験値の平均値を示している。図によれば、岩盤亀裂模型の破壊規準線は曲げ破壊からなる領域($\beta < \theta$)とせん断破壊からなる領域($\beta > \theta$)で構成され、 $\beta = \theta$ 付近で折れ曲がる折れ線となっている(ただし、 $\theta = 45^\circ$ は $\beta < \theta$ のため曲げ破壊の領域しか存在しない)。ここで、破壊時の応力の大きさについて詳細に見ると、 $\beta < \theta$ の領域では、亀裂の方向 θ が大きいほど破壊規準線は下位に位置し、より低い荷重で曲げ破壊が生じることを示している。また、 $\beta > \theta$ の領域では、破壊規準線は概ね同一の線になり、亀裂の方向 θ はせん断強度の大きさにあまり影響しない結果となっている。

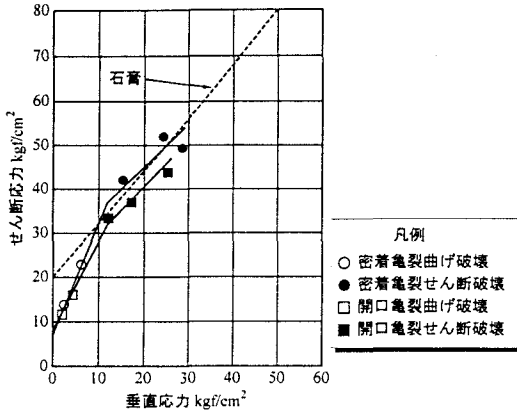


(1) 密着亀裂

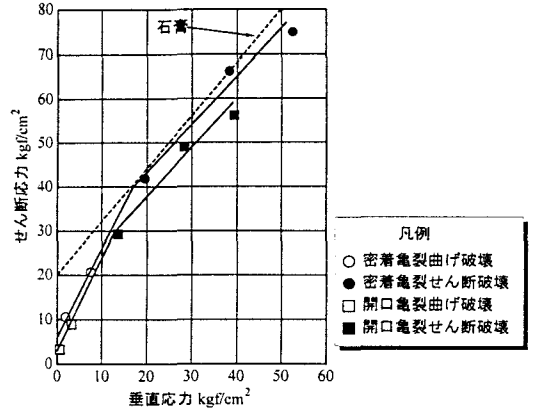


(2) 開口亀裂

図-6 岩盤亀裂模型の破壊規準の比較

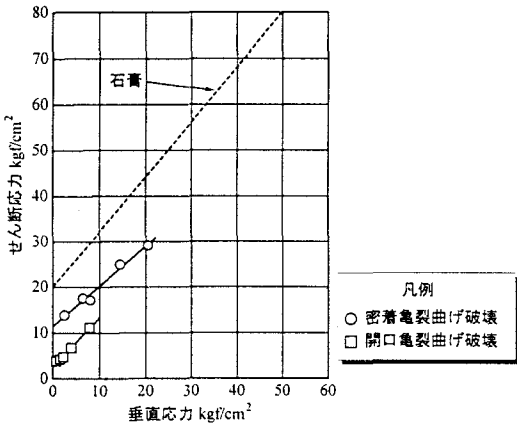


(1) $\theta = 20^\circ$



(2) $\theta = 30^\circ$

図-7 岩盤亀裂模型の破壊規準の比較



(3) $\theta = 45^\circ$

図-7 岩盤亀裂模型の破壊規準の比較

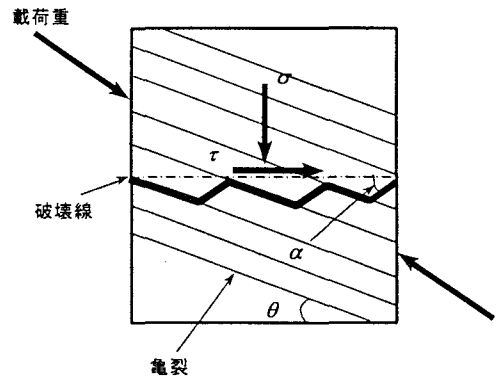


図-8 岩盤亀裂模型のせん断破壊形状

一方、密着亀裂模型と開口亀裂模型の破壊時の応力を比較したものが図-7(1)～(3)である。図によれば、曲げ破壊領域、せん断破壊領域とも開口亀裂の方がやや低い値を示しているが、その差は比較的小さい。ただし、亀裂の方向 θ が大きくなると両者の差は次第に大きくなっている（例えば $\theta = 45^\circ$ の場合）。

次に、せん断破壊からなる領域で、亀裂の方向や亀裂の開口状態が破壊荷重にあまり大きな影響を及ぼさなかった理由を考える。いま、図-8に示すように、亀裂の影響で図のようなせん断破壊が生じたと考える。このとき、亀裂面は既に開口し、亀裂面に応力が発生しないものと仮定すると、想定せん断面に作用する平均応力に対する破壊規準は次式で表される。

$$\tau = \frac{\tan \theta}{(\tan \theta + \tan \alpha)(1 - f \tan \alpha) \cos^2 \alpha} \tau_0 + \frac{f + \tan \alpha}{1 - f \tan \alpha} \sigma \quad (3)$$

ここに、 θ ：亀裂の方向、 α ：岩片の破壊面と想定せん断面のなす角度、 τ_0 ：石膏のせん断強度、 f ：石膏の内部摩擦係数、 τ ：想定せん断面上の平均せん断応力、 σ ：想定せん断面上の平均垂直応力である。

図-9(1)は、表-2に示した石膏のせん断強度 τ_0 、内部摩擦係数 f を用いて、 $\theta = 20^\circ$ の場合について(3)式をグラフ化したものである。図によれば、 $\sigma \leq 7 \text{ kgf/cm}^2$ の領域では $\alpha \neq 0$ となる面でせん断破壊が生じるが、

$\sigma \geq 7\text{kgf/cm}^2$ の領域では $\alpha = 0$ となる面でせん断破壊が生じることを示している。ここで、 $\alpha = 0$ は想定せん断面に沿ってせん断破壊が生じることを表し、そのときのせん断強度は石膏のせん断強度と一致する。したがって、 $\sigma \geq 7\text{kgf/cm}^2$ の領域では亀裂の強度や開口状態は岩盤亀裂模型の破壊荷重に影響を及ぼさないことになる。今回の試験に用いた3つの岩盤亀裂模型 ($\theta = 20^\circ, 30^\circ, 45^\circ$) について破壊規準線を求めると図-9(2)のようになる。図によれば、 $\theta = 30^\circ, 45^\circ$ の場合、その破壊規準線は石膏の破壊規準線に一致し、また、 $\theta = 20^\circ$ の場合もその破壊規準線は石膏の破壊規準線にほぼ一致している。このため、亀裂の方向や開口状態が岩盤亀裂模型の破壊荷重に大きな影響を及ぼさなかったものと考えられる（なお、 $\theta = 20^\circ$ において、岩盤模型の破壊規準線が石膏の破壊規準線から外れる領域は岩盤亀裂模型が曲げ破壊を生じる領域に当たっている。）。

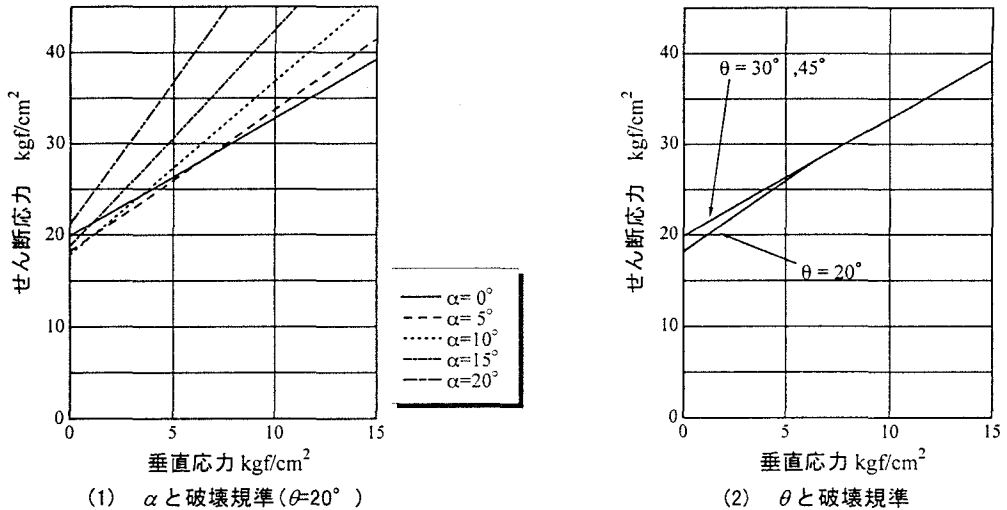


図-9 理論より得られる岩盤亀裂模型の破壊規準

4. まとめ

本研究は、岩盤内の亀裂の方向がさし目である場合について、亀裂の方向が岩盤のせん断強度に与える影響を岩盤亀裂模型のせん断試験を実施して検討したものである。本研究の結果をとりまとめると以下のとおりである。

- (1) 想定せん断面に対する亀裂の方向（さし目角度）を θ 、荷重載荷方向を β とするとき、亀裂の状態が密着、開口ともに、 $\beta \geq \theta$ の領域ではせん断破壊、 $\beta < \theta$ の領域では曲げ破壊を生じる。
- (2) 岩盤亀裂模型の破壊規準は、 $\beta < \theta$ の領域の破壊規準と $\beta \geq \theta$ の領域の破壊規準から構成され、 $\beta = \theta$ 付近で折れ曲がる折れ線を示す。 $\beta < \theta$ の領域では、岩盤亀裂模型の破壊規準は亀裂の方向 θ に応じた値を示したが、 $\beta \geq \theta$ の領域では、その破壊規準は模型材料である石膏の破壊規準と概ね同じになった。
- (3) 理論的な考察と今回の模型実験結果を総合的に評価すると、亀裂の方向が載荷方向に極めて近い場合、または岩盤内に曲げ破壊が生じるような場合を除き、さし目の亀裂は岩盤のせん断強度に大きな影響を及ぼさないといえる。

参考文献

- 1) 永山功・則松秀晴・片平博・小沢裕二・森田信吾：岩盤のせん断強度に及ぼす節理の角度と節理面のせん断強度の影響について、第9回岩の力学国内シンポジウム pp.391-396, 1994.1.
- 2) 永山功・片平博・森田信吾：岩盤のせん断強度に及ぼす節理の方向および節理面のせん断強度の影響に関する実験的研究，建設省土木研究所資料第3240号，1994.3.