

# ブロックせん断試験におけるせん断面形成の機構

岡山大学環境理工学部 正会員 西山竜朗  
近畿大学農学部 正会員 長谷川高士

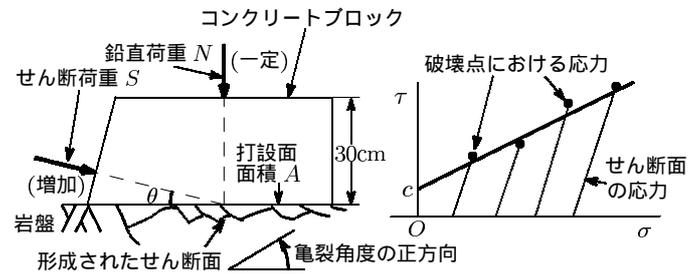
**1. 目的** ダム基礎岩盤の破壊強度を評価するために行われるブロックせん断試験の力学的機構は明らかでないが、関連するこれまでの検討から、せん断過程における局所破壊による影響を強く受けながらせん断面が形成されるものと予想される。そこで、ブロックせん断試験における岩盤の破壊機構を明らかにすることを目的とし、局所破壊に注目しながら石膏模型試験および有限要素解析を行った。

実際のブロックせん断試験における破壊機構として、岩盤を構成する材料の破壊および岩盤中の不連続面に沿った破壊が考えられる。本稿においては、不連続面による影響を取り除いた試験法自体の特性を知るために、不連続面を含まない脆性材料に対するブロックせん断試験を対象として考察した。

**2. 模型試験における局所破壊** 図2に示すように、ブロックせん断試験における岩盤接触部付近を想定した石膏模型に荷重を与え、岩盤接触部付近を破壊に至らせた[3]。模型試験において最初に見られる局所破壊として、まず接触部岩盤内上流端に引張亀裂が生じ、このとき変位-荷重関係の変曲点を記録した。上記の引張亀裂は曲線状に進展を続け、やがて先端がせん断荷重方向を向いて進展を終えた。次に、岩盤接触部下流端付近に面外方向の表面剥離が生じてから接触部中央付近に引張亀裂が現れ、その直後に変位-荷重関係の破壊点を記録した。その後、接触部中央の引張亀裂を介してブロックを分離させる破壊が生じ、分離面が強く摩擦されながら岩盤接触部全体のせん断に至った。模型試験から得た、せん断面全体に関して平均したせん断抵抗は、石膏の物性値から Hoek[1] を参照して得た材料の破壊包絡線を明らかに下回った。

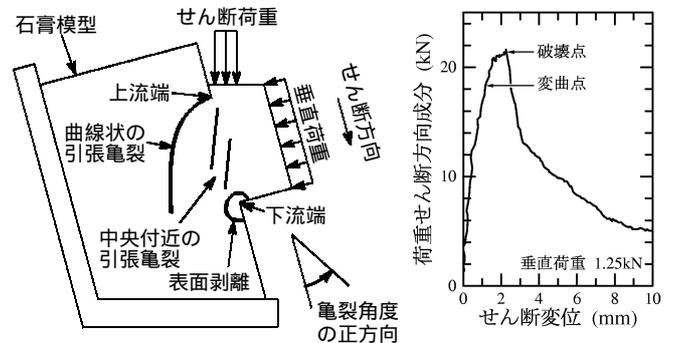
**3. 接触部岩盤内に作用する応力** 上記模型試験における接触部岩盤内の応力を知るために、石膏模型試験に関する2次元有限要素解析を行った[4]。解析においては以下の条件を与えて局所破壊を考慮した：1) 荷重により破壊される前の材料は等方線形弾性体である。2) 応力が材料強度に至った要素は破壊され、生じた亀裂により二分される。3) 亀裂面上には摩擦強度以上の応力が作用せず、また引張応力は作用しない。条件1)の材料強度として Hoek[1] の破壊規準を用いた。条件3)は Jaegerら[2]による不連続面を含む材料のせん断に関する理論に基づいており、計算においては Zienkiewiczら[5]による手法を応用した。解析における物性値には模型試験に用いた石膏の物性値を置き、また亀裂面の摩擦強度として Coulomb 則： $\tau = \sigma \tan 40^\circ$  を仮定した。

上記の解析において、局所破壊および最大荷重に関して模型試験にほぼ同様の結果を得た。図3に示すように、接触部岩盤内の全体に関して平均した応力から算定されるせん断抵抗は、上記の模型試験同様、材料の破壊包絡線を明らかに下回った。



せん断面を水平とみなし、破壊点におけるせん断面全体に関して平均した応力を Coulomb 則により評価し、岩盤のせん断抵抗とする。

図1: ブロックせん断試験



一定の垂直荷重を空気圧シリンダにより与え、増加させるせん断荷重を岩石圧縮試験機により与えた。 $\theta = 15^\circ$ 、垂直荷重載荷面長さを10cm、奥行きを5cmとした。石膏の物性値は、一軸圧縮強度16.56MPa、圧裂試験から得た引張強度2.844MPa、弾性係数3697MPa、Poisson比0.35であった。

図2: 石膏模型試験

解析において、模型試験で観察された接触部下流端付近の表面剥離に相当すると考えられる破壊として、接触部から下流側へ外れた位置の岩盤内に局所のせん断破壊が生じた。その後の破壊点においては、接触部中央に局所の引張破壊が生じた。

解析において局所破壊が生じた要素に関する主応力軸の方向が、図4に示すように、局所破壊時に大きく変化した。まず、接触部から下流側へ外れた位置の要素に注目すると、せん断変位の増加に伴い主応力軸の方向がほぼ一定となった状態において局所破壊が生じ、このとき主応力軸の方向が大きく変化している。変化した後は、再び方向がほぼ一定となっている。図4に示した下流側要素に生じた亀裂の角度が $-44^\circ$ であったことから、局所破壊により生じた亀裂の周辺における最大主応力軸の方向は、亀裂面に沿った方向へ大きく近づいたことが分かる。次に、接触部岩盤内中央の要素に注目すると、上記の下流側における局所破壊の影響は見られず、該当要素に局所破壊が生じたときに大きい変化が見られる。破壊点において局所破壊を生じた接触部岩盤内中央の要素についても、生じた亀裂の角度が $-39^\circ$ であったことから、局所破壊により最大主応力軸の方向が

大きく亀裂面に沿った方向へ近づいたと言える。なお、ブロック部の弾性係数に異なる値を用いて解析を行うと、破壊点において局所破壊が生じる位置が変化した。たとえば、ブロック部の Poisson 比以外の物性値に岩盤部の10倍を与えたとき、破壊点における局所破壊は接触部岩盤内下流端に生じた。

**4. 結論** 上記の結果から、不連続面を含まない岩盤に対するブロックせん断試験において、次のようにせん断面が形成されると考えられる。まず、変位-荷重関係の変曲点を記録してから、接触部岩盤内上流端から引張亀裂が進展する。次に、接触部から下流側へ外れた位置の岩盤内の圧縮応力が増大し、局所破壊が生じる。その後、荷重の増加により応力が増大した接触部岩盤内に局所破壊が生じ、変位-荷重関係の破壊点を記録する。破壊点において局所破壊が生じる位置は、ブロックの弾性係数により変化する。破壊点の後、変位の増加に対して荷重が減少しながら、破壊点において局所破壊が生じた位置の周囲から順次局所破壊が起こり、主応力の方向が大きく変化しながら、やがて破壊が岩盤接触部全体に及びせん断面が形成される。

模型試験および有限要素解析において、せん断面全体に関して平均されたせん断抵抗は、材料の破壊包絡線より小さい材料強度を示した。このような結果は、破壊点における破壊がせん断面全体に関するものでなく、局所破壊であることに起因して生じている。したがって、破壊点において局所破壊が生じる位置の応力が既知となれば、ブロックせん断試験から明確な理論的根拠を持った材料強度を知ることが出来る。

**謝辞** 建設省土木研究所 平山大輔氏より模型作製に関する助言を得、模型試験において岡山大学 深田敦之氏の助力を得た。計算および模型試験は科学研究費補助金により行った。ここに記し、感謝の意を表します。

**参考文献**

[1] Hoek, E.: "Strength of jointed rock masses," *Geotechnique*, **33**(3), 187-223, 1983.  
 [2] Jaeger, J. C. and Cook, N. G. W.: *Fundamentals of Rock Mechanics*, Chapman and Hall, 3rd ed., 1979.  
 [3] 西山竜朗・深田敦之・村上 章・長谷川高士：“原位置岩盤せん断試験の力学的機構に関する実験的検証,” 平成12年度農業土木学会大会講演会講演要旨集, 2000.  
 [4] 西山竜朗・長谷川高士：“不連続面を含まない岩盤に対するブロックせん断試験の応力解析,” 第35回地盤工学研究発表会 平成12年度発表講演集, 2000.  
 [5] Zienkiewicz, O. C., Valliappan, S. and King, I. P.: "Stress analysis of rock as a 'no tension' material," *Geotechnique*, **18**, 56-66, 1968.

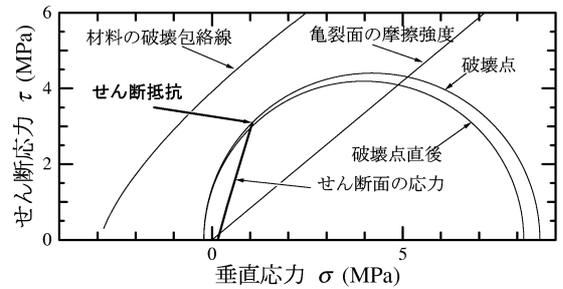


図3: 解析結果：接触部直下の岩盤内全体に関して平均した応力（垂直荷重1kN）

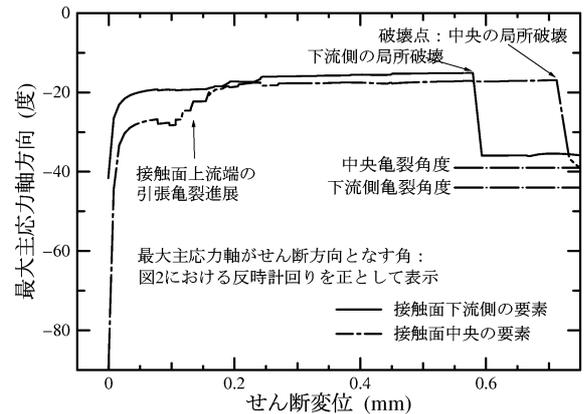


図4: 解析結果：最大主応力軸の方向の変化