

岩盤の直接せん断を解析するための有限要素法によるひび割れ解析手法の改善
 An improvement of the method of finite element analysis for direct shear on rock masses

○西山竜朗* 長谷川高士**

○ Tatsuro Nishiyama* and Takashi Hasegawa**

1 目的

ダム基礎岩盤の強度評価への貢献を目的として、著者ら¹⁻³⁾はこれまでに、過去に実施した石膏模型実験(著者ら^{4,5)}を検証材料としながら、有限要素法によるひび割れ解析手法に対する検討を進めてきた。石膏模型実験では原位置岩盤せん断試験を想定した条件が与えられ、模型の岩盤部に無傷と層状の数ケースが考慮されている。有限要素解析からはせん断抵抗とともに、破壊様式や巨視的応答として概ね妥当と考えられる結果が得られている。しかし一方で、破壊過程における亀裂の発生・進展のうち、特に進展の再現性向上を必要としている。

ここでは、有限要素解析における模型実験の再現性向上を目的として、特に亀裂進展の再現性を主体として、解析手法の改善を図った。

2 手法

図3上段に示すように、既報¹⁻³⁾の計算結果には、模型実験で確認されているような亀裂の進展ではなく、破壊によって通常要素に取って代わった界面内蔵要素に再び破壊が生じ、弾性係数低下の処理が施された要素が多く現れている。このような結果は、界面の新設によって起こるはずの応力解放が適切に引き起こされていないために生じていると考えられる。

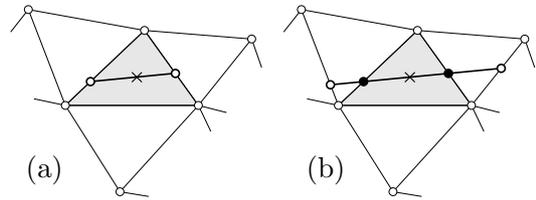


図 1: 界面の新設. (a) 当該要素への界面の設置. 界面節点が要素辺上に生成される. 通常要素が隣接するため, 界面節点には変位不連続が生じない. (b) 隣接要素まで貫通する界面の設置. 当該要素の界面節点が活性化され, 応力解放が引き起こされる.

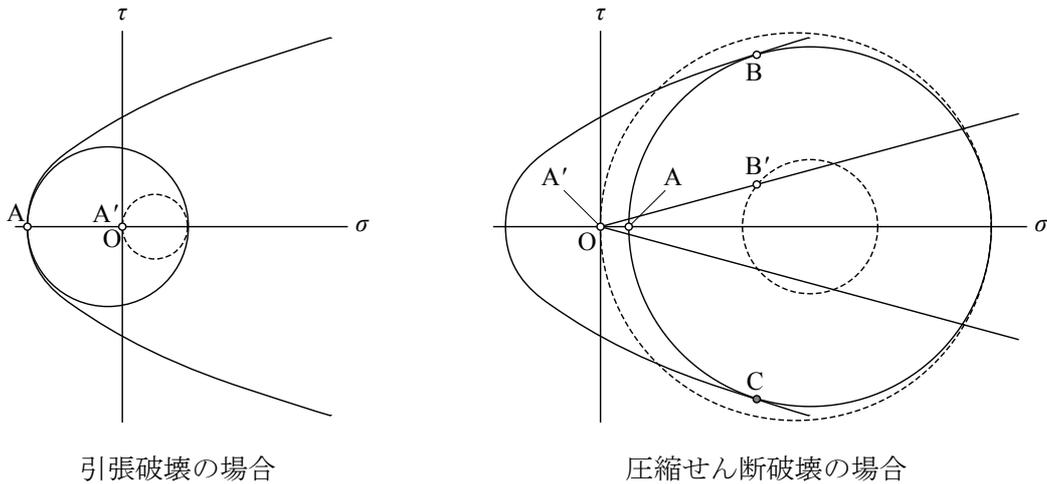


図 2: 破壊直後における応力の解放. 放物線が Mohr の包絡線, 実線 Mohr 円が破壊時応力, 破線 Mohr 円が破壊直後の応力, 直線が破壊面のすべり強さを表す. 圧縮応力下では, 引張破壊の場合のような点 A の移動では破壊面上における応力の解放を表せないことが分かる. Mohr の包絡線に従う破壊面を考え, 共役な 2 方向を表す点 B と点 C のうち点 B を選択すると, 点 B から点 B' への移動により破壊面上におけるせん断応力の解放が表現される.

* 愛媛大学農学部 Faculty of Agriculture, Ehime University; ** 京都大学名誉教授 Professor Emeritus, Kyoto University; 岩盤力学, 構造物の設計手法, 数値解析

ここで、界面節点の位置する要素辺が通常要素と共有されている場合には、要素辺上の変位が適合するよう、当該界面節点における変位不連続が生じないものとして扱われる。したがって、たとえば図1(a)のように1個の要素に破壊が生じて界面新設が起こったとき、このままでは界面節点に変位不連続が生じず、界面内蔵要素は元の通常要素と同じ挙動を示すだけである。そこで、ここでは第一に、界面の新設が起こり次第、直ちに界面を介した応力解放が起こるように、破壊が生じた要素と隣接要素を貫通する界面を設置することとした(図1(b))。

また、ひび割れ解析においては一般に、ひび割れを最大引張方向に考慮する。しかし、このような扱いによれば、圧縮応力下でのひび割れによる応力解放は表現されない。そこで、第二に、ここではMohrの包絡線が示す破壊角を新設界面の方向として採用することとした(図2)。

ただし、Mohrの包絡線が2個の共役な破壊角を与える一方で、1個の界面内蔵要素は単一の界面しか扱うことができない。ここでは、まず共役な2方向の破壊面を考えた上で、破壊が生じた増分段階における表面力増分が小さい方を新設界面の方向として選択し、採用した。

界面新設時の扱いに関するこれらの変更に加えて、ここでは、石膏模型に接する载荷治具を新たに考慮した解析モデルを用いた。すなわち、解析モデルにおいて、ブロック部の被覆枠を想定するとともに、外部境界上の移動支点およびブロック部と被覆枠の境界において接触解析を実施した。被覆枠を構成する要素にはステンレス材料を想定し、弾性係数20 GPa、Poisson比0.3を与えた。

計算ケースは、既報¹⁻³⁾の全29ケース、すなわち無傷模型に対する初期垂直応力8ケースおよび層状模型7種に対する初期垂直応力各3ケースとした。

3 結果および議論

全29ケースの中から代表して1ケースについて、計算から得られた破壊様式を図3下段に示す。手法改善前の計算と比較すると、たとえば傾斜荷重載荷面直下の曲線状の亀裂に、進展の再現性向上が確認される。他のケースにおいても、同じ傾向が確認されている。

ここでは掲載を割愛するが、荷重-変位曲線の形状やせん断抵抗の値には、手法改善の有無による大きな相違は現れなかった。その理由は、本来は改善後の計算で現れたように大きく進展した亀裂を介して起こるべき応力解放が、改善前の計算では要素領域の破碎を想定した弾性係数低下が施された領域の存在によって引き起こされたためと考えられる。しかし今後、直接せん断の力学的機構を考察するためには、局所の亀裂の影響を正しく解析することが必要であり、ここで示した解析手法が貢献すると考えられる。

参考文献 1) 西山・長谷川(2010)平成22年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集 318-319. 2) 西山・長谷川(2011)平成23年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集 410-411. 3) 西山・長谷川(2012)平成24年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集 664-665. 4) 西山・長谷川(2002)応用力学論文集 5 349-356. 5) Nishiyama T, Hasegawa T and Murakami A (2005) *Prediction, Analysis and Design in Geomechanical Applications* 2 159-166.

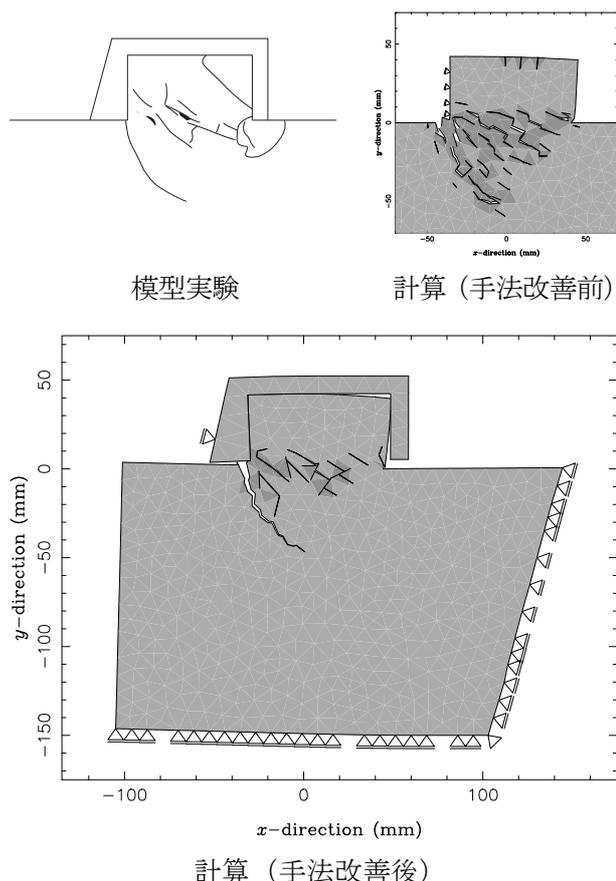


図3: 破壊様式の比較. 無傷模型, 初期垂直応力0.625 MPaのケースにおけるピーク後について示す. 計算については, 変位を30倍に強調して表示している. 濃い灰色は複数回の破壊あるいは亀裂の合流によって弾性係数が低下した要素を表す.