

IAEG Bulletin紹介 (32)

層理面に直交する節理の形成模擬実験

国際委員会
山崎新太郎

1. はじめに

筆者の勤務地である京都大学防災研究所・徳島地すべり観測所が位置する徳島県三好市周辺には、和泉層群に代表される砂岩泥岩互層が広く分布している。これらの露頭において最も特徴的な構造の一つが、砂岩層に刻まれた無数の「層理面に直交する節理 (BPJ: bedding-perpendicular joint)」である。この節理は硬質な砂岩層を貫通する一方で、隣接する泥岩層との境界 (界面) で停止するという特異な性質を持つ。これは、変形能力の高い泥岩層が境界部で応力を遮断・吸収するためであり、節理の形成が砂岩層内の局所的な応力分布に強く支配されていることを示唆している。こうした節理は斜面上において開口しやすく、和泉層群で頻発する重力斜面変形や地すべり、さらには深層崩壊の主要な要因となり得る。したがって、層理面に直交する節理がどのような場所で、いかなるパターンで発生するかを解明することは、斜面災害の場所予測において極めて重要な関心事である。本稿で紹介する論文は、地層境界の幾何学的な「不均一性」が節理発達の支配要因であることを、最新の実験技術と数値解析を用いて明らかにしたものである。

2. 論文の概要

紹介する論文 (Evolution characteristics of bedding-perpendicular joints development in soft-hard interbedded strata considering interface morphology: a case study of the Ordos Basin, China)¹⁾ (2025年12月オンライン掲載) は、中国オルドス盆地における約5,000個の節理データの統計解析結果を出発点に、砂岩・泥岩互層における層理面に直交する節理の不均一な分布メカニズムを、層理面の「粗さ (界面形態)」という視点から検証した。従来の理論では解析を簡略化するため「界面は平滑である」と仮定されてきたが、本研究では3Dレーザースキャナーによる界面形状の取得、3Dプリンタによる物理モデル実験、および個別要素法 (PFC2D) によるシミュレーション

を駆使し、界面の粗さが応力集中を介して節理密度に及ぼす影響を詳細に論じている。

3. 節理発達プロセスの再現

研究チームは、3DS MAXソフトウェアと3Dプリンタを用い、「硬層・軟層・硬層」の三層構造を備えた物理モデルを作成した。このモデルに対し垂直方向の圧縮試験を実施することで、軟層の変形が硬層に引張応力を引き起こす「非調和変形」を再現し、天然の節理形成環境を実験室内で構築することに成功した。この実験および数値シミュレーションを通じて、荷重の増大に伴い節理が逐次的あるいは一斉に形成されていく「進行的充填 (Progressive filling)」のプロセスが鮮明に再現された。これにより、岩盤の破壊が段階的に進行し、節理ネットワークが構築されていく物理的裏付けが得られた。

4. 界面の不均一性が及ぼす影響

複数の模型を用いた圧縮実験によって界面の凹凸が激しい地層ほど、低いひずみレベルの段階から節理が発生し始め、最終的な節理間隔も狭くなることが判明した。これは、粗い界面形態が岩層内部に局所的な応力集中を誘発し、周囲に先んじて破壊を生じる限界応力に到達させる火種として機能するためである。さらに応力状態の変遷に注目すると、節理が形成されるたびに周囲の引張応力は一度解放されるものの、界面が粗い場合にはその解放が不均一になり、部分的に残留し続けるという特性が示された。平滑な界面を前提とした従来理論では、節理密度の増加に伴い層内応力が引張から圧縮へと転じ、新たな節理が生じない「飽和状態」に至る。しかし本モデルでは、界面の幾何学的な凹凸がこの応力転換を妨げるため、「未破壊領域」に高い引張応力が維持され続け、節理が発達し続けることが明らかになった。

5. 界面の「凹み」による制御

本論文では、節理の発生起点となる「凹み (Depression/

Concave zone)」を、砂岩層側から見て界面が内側に食い込んでいる局所的な谷状の部分と定義している。個別要素法シミュレーションでは、この凹みには周囲の数倍に達する引張応力が集中するため、ほぼ全ての節理がこの領域を起点として発生することが確認された。界面の粗さと節理の平均間隔の間には負の指数関数関係が存在し、界面が粗いほど応力集中が強まることで節理間隔は狭まる。また、界面の粗さが小さいほど節理間隔の対数正規分布における歪度は小さくなる傾向が示された。

模型実験では、節理発達の指標であるS/T比（節理間隔と層厚の比）に関しても、重要な知見が得られている。従来の理論では、SはTに比例すると考えられており、S/T比が1.0付近に達すると層内応力の圧縮転換により飽和状態となるとされてきた。しかし、粗い界面を持つ地層では「凹み」が強力な応力集中の起点となり続けるため、S/T比が0.43という小さな値に至るまで節理が発達し続けることが実証された。また、層厚と強度の調節効果についても言及されている。砂岩層の厚みが増すと凹みでの応力集中は緩和されて節理間隔は広がり、逆に砂岩の引張強度が向上すると粗い界面による節理発生への抵抗力が増し、節理の発達が遅延する傾向が確認された。

6. おわりに

和泉層群などの露頭で観察される節理パターンは、堆積

時に形成された「界面の粗さ」が物理的に反映された結果であるかもしれない。本論文は、地層境界の「凹み」が応力集中を生み、そこから節理が派生・発達するメカニズムを明確に示した極めて興味深い研究である。これらの知見は、斜面安定性評価や、不連続性のある岩盤の性質を評価する上で、新たな科学的根拠を提供するものと思われる。

Abstractは以下のURLで閲覧できます。国際会員になれば、IAEG Bulletinの全論文を閲覧・ダウンロードすることが可能です。Abstract閲覧：<https://www.springer.com/journal/10064>

国際委員会からのお知らせ

IAEG Bulletinは、国際会員になれば購読することができます（年会費：3,500円）。2025年の1年間限定で、IAEGでは35歳以下の若手を対象に会費無料キャンペーンを実施中です。

国際会員の入会案内

<https://jseg.or.jp/02-committee/international.html>

引用文献

- 1) Li, X., Bao, H., Lan, H., Yan, C., Qiang, S., Sun W., Liu, S (2026) : Evolution characteristics of bedding-perpendicular joints development in soft-hard interbedded strata considering interface morphology: a case study of the Ordos Basin, China. Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 85, 4. <https://doi.org/10.1007/s10064-025-04695-0>