

土粒子の損傷が ^{222}Rn 溶出量に及ぼす影響の評価

環境社会基盤工学分野 近藤聡 指導教員 太田朋子 准教授

1. はじめに

地震発生前には大気中や地下水中のラドン（これ以降 ^{222}Rn という）濃度が変動する現象が報告されている。1995年に発生した兵庫県南部地震（阪神・淡路大震災）において、震源断層付近に位置する兵庫県西宮市南部の井戸を対象に地下水 ^{222}Rn 濃度のモニタリングが実施され、その結果、地震発生直前に ^{222}Rn 濃度が急激に上昇した後、急激に低下する挙動が確認された¹⁾（図-1）。このような特徴的な濃度変化が地震発生前に観測されることから、地震発生の前兆現象と捉えることができ、地震予測技術への応用が期待されている。

^{222}Rn は、ウラン系列の放射崩壊過程で生成されるラジウム (^{226}Ra) の娘核種であり、気体として土粒子内部の空隙や亀裂を通じて移動する性質を持つ。しかし、地震前兆として観測されるラドン濃度変化が、どのような力学的作用により生じたかについては不明である。

これに関連した先行研究²⁾では、三軸試験装置を用いて砂及び細礫に応力履歴を与え、 ^{222}Rn 溶出量を測定する試みが行われており、その結果、応力履歴を受けた土粒子からの ^{222}Rn 溶出量が増加する傾向が示されている。その要因として、土粒子を構成する粒子骨格の各接点において粒子破碎や亀裂が発生し、 ^{226}Ra を含む粒子内部で生成された ^{222}Rn の溶出のしやすさが増加した可能性があるとして述べられている。しかし、三軸試験は間接せん断であることに加え、供試体を飽和状態にさせているため、最も損傷が生じたと推定されるせん断帯付近から試料を直接採取できない問題がある。そのため、土粒子の損傷の有無や程度が十分に評価されておらず、土粒子の損傷と ^{222}Rn 溶出量の関係を明らかにするには至っていない。

そこで本研究では、前述の問題を解決する方法として、試験の機構上、予めせん断面が特定されている一面せん断試験装置を用いて、乾燥状態の土粒子を意図的に損傷させ、粒子損傷数や亀裂長などと ^{222}Rn 溶出量の関係性を定量的に評価することを目的とする。

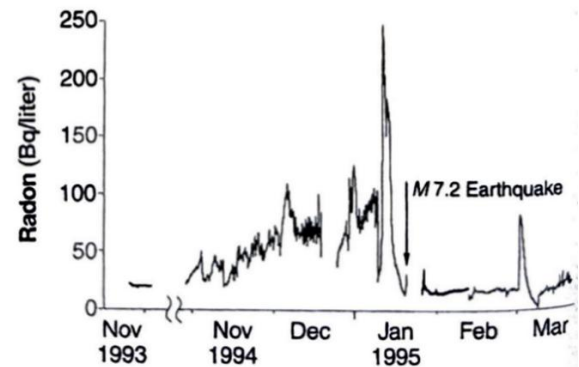


図-1 地下水中の ^{222}Rn 濃度変化¹⁾

2. 実験方法

2.1 実験試料

本研究の実験で使用する試料は、新品の豊浦砂（土粒子密度 $\rho_s=2.650\text{g/cm}^3$ ）と花崗岩細礫（ $\rho_s=2.621\text{g/cm}^3$ ）である。供試体の作製には一面せん断試験用せん断箱を用い、スプーンによる空中落下法により試料を均一に充填した。その際に充填量や落下高さを調整することで、目標とする初期相対密度及び初期間隙比を満たすように供試体を作製した。供試体寸法は、直径 60mm、高さ 20mm とした。

2.2 実験装置

本研究では、土粒子の表面及び内部構造に生じる損傷を把握するため、複数の観察装置を用いた。土粒子表面の損傷状態を評価するために、卓上走査電子顕微鏡（SEM, Hitachi TM3030Plus）を使用し、粒子表面における亀裂や破碎痕の有無を観察した。また、粒子内部構造や内部損傷、空隙の有無を把握するため、X線CT装置（3DX線顕微鏡, Bruker SkyScan1272）で三次元的な内部観察を行った。

実験条件における土粒子の粒度分布特性を把握するため、レーザー回折式粒度分布計（Mastersizer3000）を用いて土粒子の破碎状況の把握した。

^{222}Rn 溶出量の測定には、Bertin Technologies社製の ^{222}Rn モニタリング用のパルス型電離箱 Alpha GUARD DF2000 を用いて測定を行った。後述の試料を Alpha GUARD に取り付け、バブリングにより ^{222}Rn を脱ガスさせ、ポンプで循

環させることで電離箱内に ^{222}Rn を導入し、溶出量を測定することが可能である。通期循環速度は 0.3L/min, 測定間隔は豊浦砂が 10 分, 溶出量が多い花崗岩は 1 分とした。測定時間は 70 分間である。

2.3 実験条件および手順

一面せん断試験における実験条件は表-1 に示す通りである。豊浦砂は Case0~5 の計 6 ケース, 花崗岩は Case0~6 の計 7 ケースを実施し, 両試料とも Case2 を基本ケースとして比較を行う。本研究では, 先行研究が非排水三軸試験であることを踏まえて, 体積変化を拘束する定体積一面せん断試験を採用した。

圧密時間は垂直変位が十分に落ち着いたことを確認した後, 30 分間継続した。せん断過程におけるせん断速度は 0.2mm/min, 試験終了条件は, せん断変位が 7mm または垂直応力が測定限界に達した段階とした。繰返しせん断を行う Case6 においては, 既定の載荷回数に達した段階で終了とした。

花崗岩細礫は粒径が比較的大きく, 損傷の有無が観察しやすいことから, 試験に供する前の試料を用いて, SEM 及び X 線 CT により粒子表面及び内部構造を観察し, 土粒子の初期状態を把握した。試験後は, せん断帯付近の粒子を採取して, 同様に観察を行った。観察に用いた土粒子は, 事前に粒子全体に着色処理を施し, せん断面付近に堆積させた。これにより, 試験前後で, 同一粒子かつ同一部位を用いて比較検討することがし易くなる。

^{222}Rn 溶出量の測定は, 試験後の土試料をガラス容器内に堆積させ, 蒸留水を加えて密閉し, 放射平衡に達するまで (約 1 カ月間) 静置させたものを用いた。

^{222}Rn 溶出量 (Bq/kg) は, 表-1 に示す通り, せん断履歴の有無, 相対密度の大小, 粒度分布に加えて, 試験前後の粒子表面と内部の損傷の程度による溶出量の差異に着目して比較検討を行った。なお, ^{222}Rn 溶出量は, ^{222}Rn 測定値 (Bq) を土粒子の質量 (kg) で除することにより, 単位質量当たりの溶出量 (Bq/kg) として算出した。

表-1 実験ケース

Case	初期相対密度 $D_r(\%)$	圧密応力 $\sigma(\text{kPa})$	せん断時垂直応力 $\sigma(\text{kPa})$	繰返しせん断応力 $\tau(\text{kPa})$	載荷回数
0	-	-	-	-	-
1	60	200	-	-	-
2	60	200	200	-	-
3	40	200	200	-	-
4	78	200	200	-	-
5	60	400	400	-	-
6	60	200	200	12.5	100

3. 実験結果

3.1 土粒子観察結果

本研究における粒子損傷とは, 土粒子表面から粒子内部に進展したクラックを指すものとし, クラック数は, 対象粒子中に目視で確認できたクラック数と定義した。観察で対象とした粒子は, 豊浦砂では任意に抽出した 20 粒子中, 花崗岩では 1 粒子とした。

図-2 は, 試験後の花崗岩 Case5 において新たに確認されたクラックの一部を示したものである。オレンジ線で示したものが新規に発生したクラックであり, 表面付近では微細なクラックが確認された。また, 青線で示したものは表面までは伸展せず, 粒子内部に留まった亀裂である。これらの損傷箇所については空隙とした。

図-3 及び図-4 は, 花崗岩 Case5 試験前後の概ね同一断面の画像である。試験前に確認できたオレンジ線で示したクラックが試験後では伸展していることが確認できた。試験前では約 800 μm であったが, 試験後では約 1400 μm まで伸びており, 力学的作用により損傷規模が拡大することが分かった。

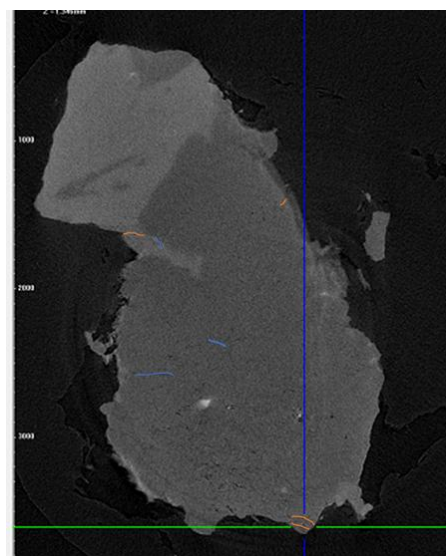


図-2 新規のクラック (花崗岩 Case5)

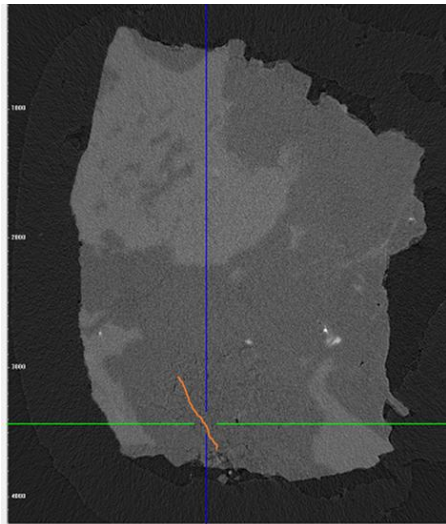


図-3 花崗岩 Case5 試験前

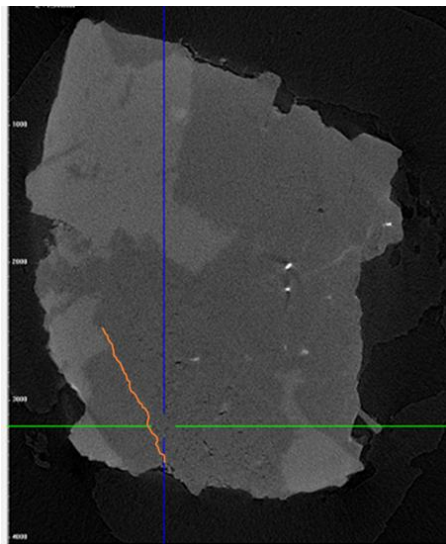


図-4 花崗岩 Case5 試験後

3.1 粒子損傷と ^{222}Rn 溶出量について

一面せん断試験後に得られた粒子損傷と ^{222}Rn 溶出量の比較を行い、図-5~7 にそれぞれ結果を示した。

実験条件における ^{222}Rn 溶出量について整理する。豊浦砂では試料自体の ^{222}Rn 溶出量が小さく、測定値にばらつきが見られたため、ケース間における ^{222}Rn 溶出量の差異を把握することが困難であった。一方、花崗岩では Case3 で最も溶出量が低く、Case4 及び Case5 で高い値を示した。実験条件より、垂直応力や初期相対密度が大きいケース程溶出量が増加しており、結果は先行研究条件と整合性が取れていると考えられる。このことから、本研究で用いた試験及び測定手法は、 ^{222}Rn 溶出挙動の比較・評価することに差し支えないといえる。

対象粒子中のクラック数と ^{222}Rn 溶出量を比較すると、豊浦砂では、ケースごとの溶出量の差異が小さく、測定値のばらつきも大きいため、実験条件とクラック数との対応関係が確認できなかった。一方、花崗岩では、基本ケースである Case2 において、対象粒子中のクラック数が 23 箇所、 ^{222}Rn 溶出量が 97.6Bq/kg であったのに対し、相対的に垂直応力が大きい Case5 ではクラック数が 32 箇所、 ^{222}Rn 溶出量が 118Bq/kg となり、クラック数が多いほど ^{222}Rn 溶出量が高まる傾向が確認できた。

図-7 より、花崗岩ケースにおいて、試験前後の内部観察画像を比較し、新たに発生したクラック数と ^{222}Rn 溶出量との関係と比較検討した。その結果、新規で発生したクラック数が多いほど ^{222}Rn 溶出量が高くなる傾向が確認できた。せん断により粒子内部に新たなクラックが形成されることで、内部領域が外部と連結し、 ^{222}Rn の移動経路が拡大したことで溶出効率が促進されたためであると考えられる。つまり、土粒子の内部構造の変化が溶出挙動に直接影響している可能性があると考えられる。

繰返し一面せん断試験を実施した Case6 では、他のケースと比較して新規に発生したクラック数が多くなる傾向が確認された。これは、繰返しせん断に対象粒子に繰返し応力が作用し、粒子内部の損傷が進行したことによるものと考えられる。一方で、 ^{222}Rn 溶出量は他のケースと比較すると低い結果となったが、試験を実施していない Case0 と比較すると高い数値を示した。

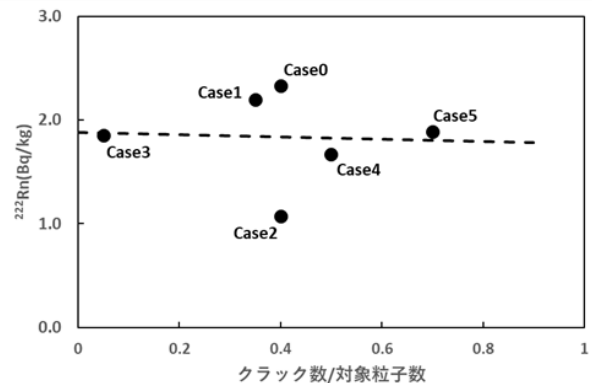


図-5 クラックと ^{222}Rn 溶出量 (豊浦砂)

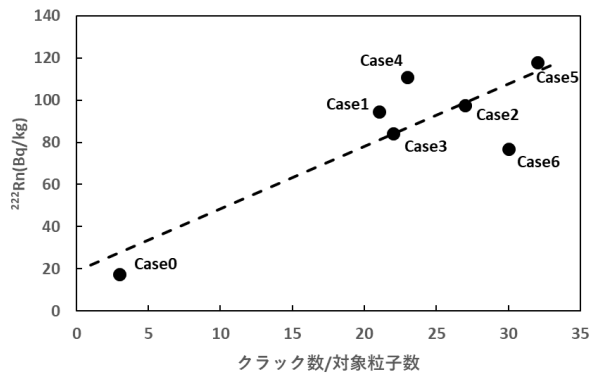


図-6 クラックと ^{222}Rn 溶出量 (花崗岩)

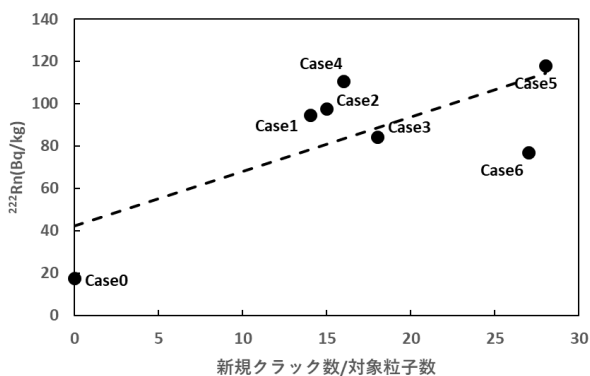


図-7 新規クラックと ^{222}Rn 溶出量 (花崗岩)

3.2 粒度分布と ^{222}Rn 溶出量について

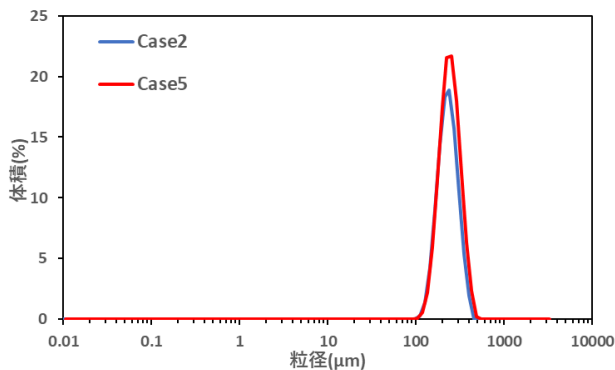


図-8 豊浦砂ケースの粒度分布

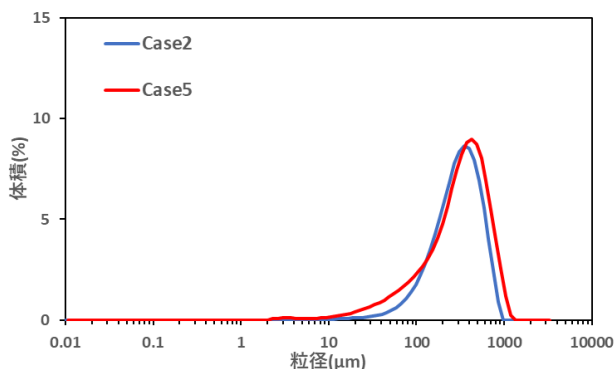


図-9 花崗岩ケースの粒度分布

豊浦砂及び花崗岩の Case2, Case5 の粒度分布測定結果を図-8,図-9 に示した。

粒度分布と ^{222}Rn 溶出量との関係について、比較を行うと、豊浦砂においては、ケース間で粒度分布に顕著な差異はなく、試験条件における粒度変化はほとんど生じていないことが確認できた。花崗岩を用いたケースでは、Case2 よりも圧密時及びせん断時の垂直応力が高い Case5 において、粒径 $100\mu\text{m}$ 以下の割合が増加する結果が得られた。しかし、 $500\sim 1000\mu\text{m}$ の粒径が大きく減少せず、収支が取れていない結果となった。これは、採取できた試料量が Case5 の方が多かったことや、粒度分布測定に用いた試料量がケース間で統一されていないことが影響した可能性がある。

花崗岩ケースの ^{222}Rn 溶出量を比較すると、Case2 よりも Case5 の方が細粒分の割合が多い Case5 の方が溶出量は高い数値が得られた。

4. まとめ

以下に本研究で得られた成果を示す。

- ① 豊浦砂を用いたケースでは測定値のばらつきが大きく、クラック数との対応関係は確認できなかった。しかし、垂直応力が高い条件ではクラック数及び溶出量が増加する傾向が確認でき、粒子損傷が溶出挙動に少なからず影響を与えている可能性が示唆された。
- ② 花崗岩を用いたケースでは、対象粒子中にクラック数が多いケースほど ^{222}Rn 溶出量が高くなる傾向が確認できた。特に、新規に発生したクラックの増加に伴い溶出量が増加する結果が得られ、せん断による土粒子の内部構造の変化が ^{222}Rn の溶出のしやすさを高めたと考えられる。
- ③ 垂直応力が高い条件下では粒子破碎が進行し、 $100\mu\text{m}$ 以下の小粒径粒子の増加が確認された。また、小粒径の粒子が多いケースの方が ^{222}Rn 溶出量が高まる結果も確認できた。粒径の細粒化に伴う比表面積の増大が ^{222}Rn の溶出効率を高めた可能性があり、粒子損傷及び粒度変化が溶出挙動に影響を及ぼしていることがわかった。

参考文献

- 1) G. Igarashi, S. Saeki, S. Tasaka, K. Sumikawa, K. Sumikawa, S. Tasaka, Y. Sasaki, M. Takahashi and Y. Sano, Ground-water Radon Anomaly Before the Kobe Earthquake in Japan, *Science*, **269**, 60(1995).
- 2) 高田晋, 矢澤透唯, 小峰一耕, 太田朋子, 三軸装置を用いた砂及び細礫の ^{222}Rn 溶出実験, 第 60 回地盤工学研究発表会, 2025 年