

P 16. 地中貯留と誘発地震活動との関連に関する事例検討

Case study on the connection with geological storage and triggered seismicity

○近藤はるか, 佐々木勝司, 橋本 励, 佐々木猛 (サンココンサルト (株))

楠瀬 勤一郎 (産業技術総合研究所)

1. はじめに

地球温暖化対策として期待されている二酸化炭素の地中貯留では、事業化に必要なステークホルダーの合意を得る必要があり、二酸化炭素の圧入に伴った地震誘発に対する危惧の払拭や、安全に対する合理的説明と対策の提示が必要と考えられている。

地震発生と地下水の関係は、長岡他が湧水量と地震活動との関連を1969年に報告¹⁾し、當舎他は深部地層水の移動メカニズムの検討²⁾を行っている。1975年に北信微小地震・地殻変動観測所は、奈川渡ダムの水位が高い時期と微小地震発生回数とが一致³⁾し、1977年に田中他は、廃坑による水没により微小地震が発生し、この誘発地震は断層面内の間隙水圧の上昇と地殻応力の増加に起因している⁴⁾とした。その後、寺島他は日本の大ダムに関して、ダム貯水と地震活動の関係について検討^{5), 6)}し、ダム貯水に伴う誘発地震は国内5箇所(黒部、奈川渡、一ツ瀬、九頭竜、水殿ダム)で発生しているとした。

海外での誘発地震に関する報告は数多く、誘発地震の初期の文献は、1968年のH. Healy et. al. による米国デンバー近郊で観測された深さ3.8kmへの排水圧入に伴う誘発地震の報告があり、両者に相関が見られる事例⁷⁾である。1973年にはGibbs et. al. が油田近傍での地震観測から年間注入水量と地震件数との相関を指摘⁸⁾し、1976年には、Simpson et. al.⁹⁾, Klein¹⁰⁾, Talwani¹¹⁾ 他がダム湛水に伴う誘発地震例を、Yerkes et. al.¹²⁾, Milen et. al.¹³⁾ 等が油田での誘発地震例を報告している。近年では、P. Talwani, et. al. が約90の事例について、ダムの水位変動と井戸の注入時間と地震発生の関係について、破碎帯の透水係数を理論式により推定、整理し、Seismogenic permeability (ks, 地震発生透水率)を提案¹⁴⁾している。

国内外の既往文献によれば、ダムの湛水、石油掘削・地熱開発・における地中への注入、排水・塩水等の地中への注入が地震を誘発する事例の報告は多く、湛水高、注入圧と地震発生件数との相関が認められる。本事例検討では、国内外の誘発地震に関する論文を收集整理し、誘発地震の特性を整理すると共に、誘発地震と地質ならびに地質構造との関係を検討することが目的である。誘発地震は各種原因により発生すると考えられるが、本事例検討では主に、事例と長期的観測が比較的多いダム貯水に伴う誘発地震に付いて実施している。

2. 検討方法

本検討では、国内の公開資料を対象に、地盤内注水あるいはダム湛水による誘発地震について論文収集を行った。海外では、Googleの検索機能を用いて関連文献を収集した。事例数ではダムに起因する例が最も多く、石油・天然ガス生産井の増産のための

注入、地熱開発のための注入、液体廃棄物の注入、試験孔を用いた注入実験の順であった。ダムに起因する文献が多いので、世界各地に点在するダムの地質および地質図に記載のある周辺の断層を抽出し、ダム本体から断層までの最短距離を断層距離とした。

3. 誘発地震の特性

3.1 誘発地震規模 (マグニチュード: M)

国内11箇所、海外78箇所のデータであり、マグニチュード(M)=7の誘発地震が発生している箇所もあるが、約80%がマグニチュード(M)<5であり、M=2~5が多い。よって、誘発地震は比較的小規模の地震と言え、国内と海外で差異は認められない。図3.1に地震規模別の発生頻度を示す。

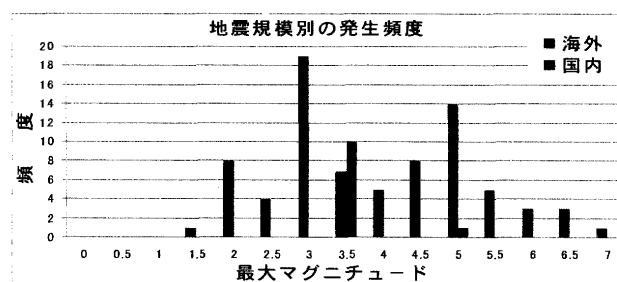


図3.1 地震規模別発生頻度

3.2 ダム高さ (M) と地震規模 (M)

誘発地震を発生しているダム高は、絶対数であるため一概に言えないが、50m~200mの高さのダムである。国内の事例ではダム高とマグニチュードとに相関が認められ、ダム高による周辺地盤への間隙水圧上昇の影響が大きいと考えられ、妥当な傾向であるが、海外のダムではほとんど相関が認められず、国内の事例は単にサンプル数が少ないことに起因していると考えられる。ダム高と誘発地震規模との関係を図3.2に示す。

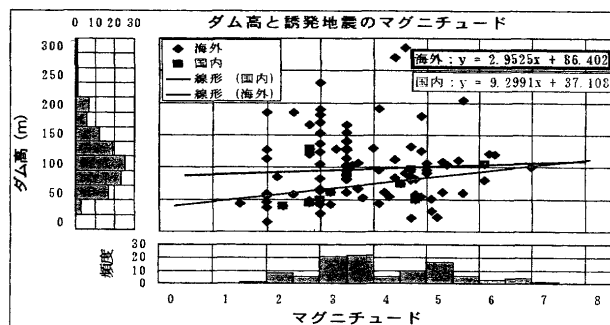


図3.2 ダム高と地震規模との関係

3.3 震央距離

収集事例には、少数であるが誘発地震発生位置とダムとの距離のデータもあり、ダム本体と誘発地震発生箇所との距離を震央距離として、震央距離の頻度分布図を図3.3に示す。大部分の誘発

地震の震央距離は 10km 以下であり、4km にもピークが認められ、比較的近い位置で誘発地震が発生している。

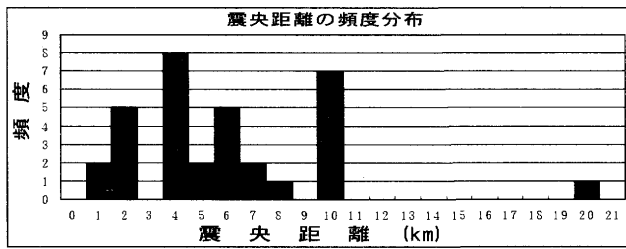


図 3.3 誘発地震の震央位置

3.4 タイムラグ

ダム放水後に誘発地震が発生し、発生までのタイムラグの頻度を図 3.4 に示す。約 6 年後に発生している事例もあるが、多くは 1 年以内に発生している。

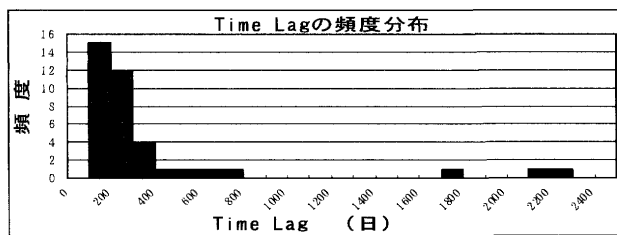


図 3.4 湛水後の誘発地震発生までのタイムラグ

4. 地質との関連

4.1 ダム本体と地質

ダム堤体部の地質と誘発地震の頻度を図 4.1 に示す。ダムサイトの地質は、第四紀から始生代まで様々である。特に海外では古第三紀の地層に集中する。

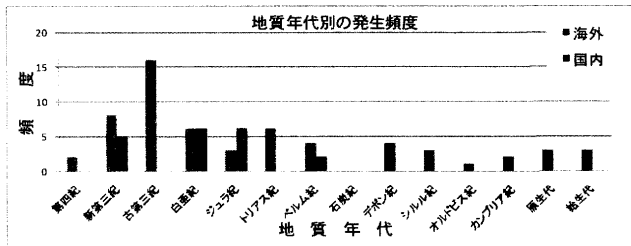


図 4.1 地質年代別の発生頻度

4.2 ダム本体と断層

ダム堤体と既往地質図に記載のある断層との最短距離を断層距離として、断層距離別の発生頻度を図 4.2 に示す。

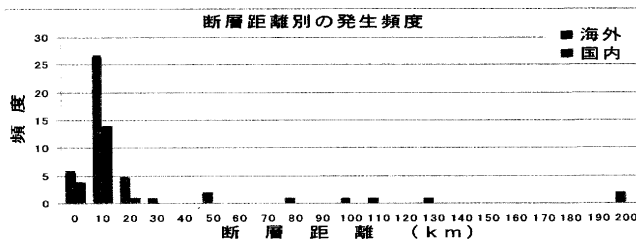


図 4.2 断層距離の発生頻度

断層距離は最大 200km であるが、大部分は 10km 以下である。これらの断層位置は既往地質図に記載のある断層であり比較的大規模の断層と考えられる。図 3.3 に示すように、誘発地震はダム本体から 10km 以内の近傍での発生が多く、断層距離と震央距

離とが共に 10km 以内であることは、関連の可能性を今後検討する必要がある。

5. 岩野原 CO₂ 圧入実験と中越地震との関連性

中越地震は、マグニチュード 6.8、注入地点から 20km 離れているので、誘発地震の一般的傾向に合致しない。また、1923 年以降の、岩野原地域で発生したマグニチュード 3 以下の地震活動に着目し、その頻度を図 5.1 に示す。岩野原周辺では、CO₂ 圧入以前から地震活動があり、圧入開始から中越地震発生までの期間においても、その分布域や地震の規模に大きな変化は見られなかった。よって、岩野原 CO₂ 圧入実験と中越地震の直接的な関連性は低いと考えられる。

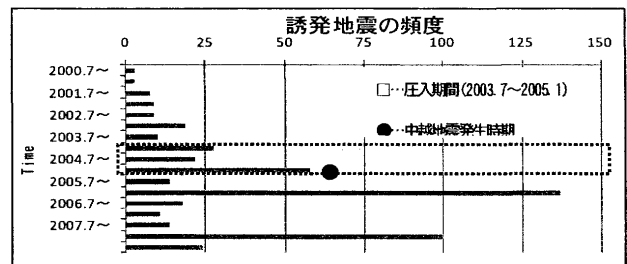


図 5.1 M3 以下の微小地震発生回数

6. 参考文献

- 1) 長岡他、長野県東筑摩郡坂井村草湯における湧水の変化と地震活動、防災科学技術研究所研究報告、1969
- 2) 當舎他:CO₂ 地中貯留のチャルナワグ、地学雑誌 117 巻、4 号、2008
- 3) 北信微小地震・地殻変動観測所、長野県奈川渡ダムにおける微小地震観測、1975
- 4) 田中豊、西田良平：山はねおよび廃坑内注水による誘発地震の発生機構、岩の力学国内シンポジウム、1977
- 5) 寺島敦：ダム貯水と地震活動 (I)、地震 36 巻、1983
- 6) 寺島敦、神谷郁代：ダム貯水と地震活動 (第 3 報)、地震 41 巻、1988
- 7) J. H. Healy et. al. : The Denver Earthquakes, Science 161 1301-1302, 1968
- 8) A. F. Gibbs et. al. : Seismicity in the Rangely, Colorado area: 1962-1970, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 63, No. 5, 1973
- 9) D. W. Simpson: Seismicity changes associated with reservoir loading, Engineering Geology, Vol. 10, 1976
- 10) F. W. Klein: Tidal triggering of reservoir associated earthquakes, Engineering Geology, Vol. 10, 1976
- 11) P. Talwani: Earthquakes associated with the Clark Hill reservoir South Carolina - A case of induced seismicity, Engineering Geology, Vol. 10, 1976
- 12) R. F. Yerkes et. al. : Seismicity and faulting attributable to fluid extraction, Engineering Geology, Vol. 10, 1976
- 13) W. G. Milen et. al. : Induced seismicity in Canada, Engineering Geology, Vol. 10, 1976
- 14) P. Talwani et. al. : Seismic permeability ks, Journal of Geophysical Research, Vol. 112, 2007