

令和 6 年度 特別研究テーマ A 報告書

～フランス・シャモニーにおける氷河湖を形成するモレーンの安定性評価～

東京大学大学院 修士 2 年 今井 克実

東京大学大学院 修士 2 年 江 孟源

東京大学 学部 4 年 符 祥林

1. 研究の背景と目的

金属鉱山における採掘作業は、大量の土や岩石を掘削し、水中で薬品を用いて有用鉱物を抽出している。有用鉱物の含有量はとても少なく、有用鉱物に対して多くの岩石、土、水及び薬品の懸濁液が生じてしまう。この懸濁液および、掘削、粉碎された岩石や土のことを鉱さいと呼ぶ。その成り立ちから鉱さいは、粒子の形状や細粒分の含有率、塑性特性などが一般的な砂試料とは異なる特殊な材料として知られている。また、環境や人体に悪影響を及ぼす重金属や薬品が含まれているため、廃棄が許されていない。そのため、鉱さい集積場に鉱さいを堆積させ、水分と分離させる。しかし、鉱さい集積場は、高い地下水位を維持しているため、液状化や流動によって崩壊する事例が報告されている。例えば、2019 ブラジル・ミナスジェライス州のブルマジーニョ近郊にある コレゴ・ド・フェイジョン鉱山の鉱さい集積場が崩壊し、流出した鉱さいが 10 km にわたって流動したことで 250 名以上の死者を出した。

現在、鉱さい集積場の建設に際しては 2012 年に改正された技術指針「鉱業上使用する工作物等の技術基準を定める省令の技術指針」に基づいて設計されている。この技術指針によると、液状化に関する安全性の評価は一般的な砂試料と同様の手法で行われている。しかし、鉱さいは、一般的な砂試料とは異なる力学的特性をもつことが近年の研究より報告されており、鉱さい集積場の安全管理について検討の余地は大きい。

一方でアルプス地方に見られる氷河湖は鉱さい集積場と似た特徴を有している。湖を囲む土手が、削られた岩石の粉末によって成り立っていることである。氷河湖はモレーンと呼ばれる、「氷河が谷を削りながら時間をかけて流れる際に削りとられた岩石や岩屑などが堆積した土手」に囲まれており、そのモレーンには細粒分が多く含まれることが予想される。通常、氷河湖は氷河が融解することでモレーンとの間に形成されるが、近年の地球温暖化の影響により氷河の融解、後退が急激に進み、氷河湖の水位が上昇したことで、モレーンの崩壊による氷河湖の決壊洪水が発生し、甚大な被害をもたらしたことが報告されている。アルプス地方は、高緯度で標高が高いことから氷河地形を形成しており数多くの氷河やモレーンを有している。一方で地球温暖化の影響が深刻になっており、産業革命前と比べ平均気温が 2 度上昇し、2 年間で氷河の 10% が消失している。さらに、日本と同様に造山帯に位置しており、地震被害も懸念

されることから，将来，モレーンの崩壊により氷河湖洪水決壊が発生する恐れがある．そこで本研究では，鉾さいと同様の成り立ちを持ち，細粒分を多く含むモレーン構成試料に関して現地での調査を行うことで，特殊な砂試料の知見を深め，日本国内の鉾さい集積場の維持管理および地盤防災に役立てることを目的とする．

また，ヨーロッパで土木工学の研究を行なっているフランスの国立土木学校（École nationale des Pontes et Chaussées，略称 ENPC）への視察も行うこととした．国立土木学校はヨーロッパにおける理工系教育機関のトップ校であり，弊学とも学生交流協定を結んでいるため関係が深く，協力を得る見込みがある．国立土木学校を訪問し，現地学生との交流を通してヨーロッパにおける土木工学の最先端に触れることで，その研究手法やアプローチ新たな視点を学習することを目的とする．学習して得た知見を活かして将来的に土木工学の発展ならびに防災力の向上に活かすことを目指す．

2. 訪問先情報

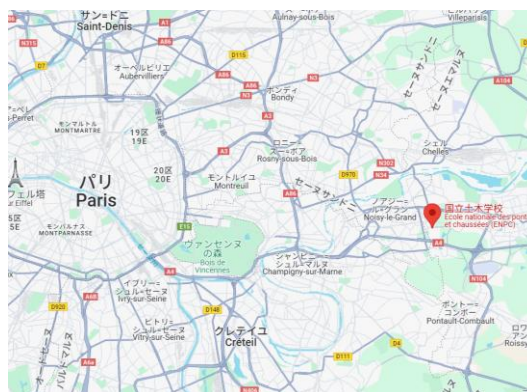
本研究の訪問先は，フランス国立土木学校（École nationale des Pontes et Chaussées，略称 ENPC）とメールドグラス氷河（Mer de Glace）である．

2.1 フランス国立土木学校

フランス国立土木学校は，グランゼコールと呼ばれるフランス独自の国立学術機関群の一つであり，1747 年に設立された社会基盤全分野を対象にした教育機関である．図-1 に国立土木学校の外観と位置を示す．パリ中心地から東に約 20km のやや郊外に位置しており，アクセスには中心地から地下鉄に乗って 1 時間である．



(a) 国立土木学校の外観 Wikipedia より引用



(b) 所在地

図-1 国立土木学校の外観と所在地

2.2 メールドグラス氷河(Mer de Glace)

アルプス山脈モンブラン北壁に位置し、長さ 7 km 深さ 200m のフランス最大の氷河である。図-2 にメールドグラス氷河 (Mer de Glace) の位置を示す。フランスの東端、スイス、イタリアとの国境付近に位置している。登山道を徒歩で登るほか、麓のシャモニからモンタンベール登山鉄道に乗車して展望台へアクセスすることができる。展望台には、ロープウェイが整備されており、氷河の上に降り立つことができる。本研究で訪れた時期は、メンテナンスの関係でロープウェイを利用することができなかった。また、展望台からはロープウェイ以外に登山道も整備されていたが、雪の関係で冬季は閉鎖されていたため、本研究では氷河の上まで降り立つことができなかった。



(a) メールドグラス氷河の外観



(b) 所在地

図-2 メールドグラス氷河の外観と所在地

3. 研究日程

本研究での活動日程を以下に示す。活動の期間は 11/28～12/4 の 7 日間とした。

- 11/28 東京羽田空港出発
- 11/29 パリ・シャルルドゴール空港到着
- 11/30 国立土木学校 (ENPC) 訪問
- 12/1 パリからシャモニーへ移動, サンプルング①
- 12/2 サンプルング②, メールドグラス氷河訪問後, パリへ移動
- 12/3 パリ・シャルルドゴール空港出発
- 12/4 東京羽田空港到着

4. 研究活動記録

4.1 国立土木学校 (ENPC)

ヨーロッパにおける土木工学の最先端に触れることで、その研究手法やアプローチ、新たな視点を学習することを目的としてフランス国立土木学校の視察を行った。また、現地では、学生との交流を通して、施設の見学および意見交換を実施した。見学の様子を写真-1～写真-4に示す。写真2はENPC内部の様子を撮影したものである。入口をはいると、広い吹き抜けの空間が広がっており奥のカフェテリアで多くの学生が交流を深めている様子が確認できた。写真-3は実際に演習を行っていた様子である。後のインタビューで判明したが、座学だけではなく、実務と同じ条件での測量や設計計算をしたコンクリートを打設するなど即戦力となるように演習が頻繁に行われており、測量の様子を観察すると、指導者からの指示ではなく自分達で考えて行動しているような印象を受けた。写真-4は建物の外側から撮影した授業風景（座学）の様子である。一コマが2時間以上もあり非常に長い間集中することが求められるが、誰一人居眠りせずに集中している印象を受けた。

インタビュー結果を整理したものを以下に示す。

「ENPCはどんなところですか？」

- ヨーロッパにおける理工系教育機関のトップ校
- 普通の大学に入るよりもエリートコースとされる。
- フランスはかなり学歴社会であり、インターンや就職活動では強いコネクションが発揮される。
- 高校卒業後の2年間「グランゼコール準備学校」に通って猛勉強
- 3年制であり、最初の1年間は共通授業、2年以降から学科に分かれる

「ENPCに行こうと思ったきっかけ・選んだ理由はなんですか？」（留学生）

- 日本で普通に修士取るより面白そうだったから
- 交換留学よりも内容が濃くて、長い
- 入試が楽。同プログラムの先輩も多く、一人で海外修士に直接進学するよりもリスクが低い。
- 米英よりも授業料が安く、経済支援も手厚い（近年悪化傾向）
- 日本と生活も教育も結構違いそうで興味があつた
- 海外に住んでみたかった
- フランス語が無料で習える
- インターンもできる

「ENPCの土木教育の特徴はなんですか？」

- 日本（東大）とは異なり、設計や技術戦略と、政策・計画を比較してみても完全に分離されている。つまり、計画を専攻する人は、土質力学など技術よりな

ことは学習しない

- 2年次以降の専門授業では、講師や研究者が授業を行うのではなく、民間企業から講師がやってくる。学問というよりは職業に直結する内容を教わる。

- プロジェクト演習が多いが、座学の比率は日本と同じくらい

- 1コマが長い（2時間 45分程度）

- 言語学も専攻する必要がある（英語、フランス語、スペイン語など）

- 最近は脱炭素の話題や学問が中心になっている。例えば交通系では自家用車交通を減らす議論を行っている

- 国の省庁の管轄にあり、アカデミアというよりは官僚/エンジニアの即戦力養成所の意味合いが強い。

- インターンシップは授業で学んだことの実践の場という位置づけ。

卒修論よりも楽。

- 日本人のように卒修論を行っていた学生達はプレゼンが上手に感じる。

- より実務的な設計課題に取り組み、建築のことも少し学ぶ。

「地盤の学習はどのように行っていますか？」

- 水理や構造も含め、高度な数式/理論を用いて実務設計に取り組むことが多い

- 地震については考えたことがない

「将来について」

- フランス語、英語ができるため国際機関への就職で重宝される

- 実務よりの設計課題や、インターンシップを経験するので即戦力としてエンジニアもしくは官僚として働ける



写真-1 ENPC 正面



写真-2 ENPC 内部



写真-3 演習（測量，コンクリート養生）の様子



写真-4 外から撮影した授業の様子

4.2 メールドグラス氷河

鉱さいと同様の成り立ちを持ち、細粒分を多く含むモレーン構成試料を採取するため、フランス南東部に位置するメールドグラス氷河を訪問した。しかし、積雪の影響で氷河へ降り立つことができなかったため、氷河での試料採取は諦めた。そこで、試料採取は次節で示す河川において実施した。本節では主に展望台から観察した様子を記述する。2.2 節で示した通り、山の中に氷河が流れている様子が確認できる。写真-5 は展望台から見た氷河と接する山肌の様子である。写真中央下あたりから、明確に色が変わっている様子が確認できる。これは、数十年前まではその位置まで氷河があったことを示している。すなわち、地球温暖化によって莫大な量の氷河が融解したと判断できる。写真-6 は山肌を拡大した様子である。この写真から、山肌が氷河によって削られていたことが確認できる。また、写真-7 に示す地面も積雪はあれど同様の色をしていることから、氷河によって地面も削られていたことが伺える。すなわち、非常に細かい砂が発生している可能性が考えられる。



写真-5 昔の氷河があったライン



写真-6 氷河によって削られた山肌の様子



写真-7 氷河によって削られた地面の様子

4.3 氷河から流れてきた河川の様子

氷河での試料採取が困難なことから、氷河から流れてくるアルヴェロン川（図-3）で試料の採取を行った。採取した試料は帰国後に顕微鏡による粒子形状の観察と、ふるい分析を行い、鉱さいとの比較を行った。



(a) 採取したアルヴェロン川の様子

(b) 氷河と採取地点の位置関係

図-3 採取地点と氷河の関係

5. 研究室での実験

5.1 ふるい分析

研究室でのふるい分析を実施した。結果の粒系加積曲線と、比較のために鉱さい試料の粒系加積曲線を図-4 に示す。一般に細粒分と呼ばれる土粒子は $0.075\ \mu\text{m}$ 以下の土粒子である。図-4 より、鉱さい試料には約 35%含まれているのに対し、今回採取した試料には数%しか含まれていなかった。この原因として二つ考えられる。一つ目は河川で採取したために細粒分が含まれなかったこと、二つ目はそもそも細粒分が含まれていないことである。今回採取した試料からはこれ以上の考察は困難である。

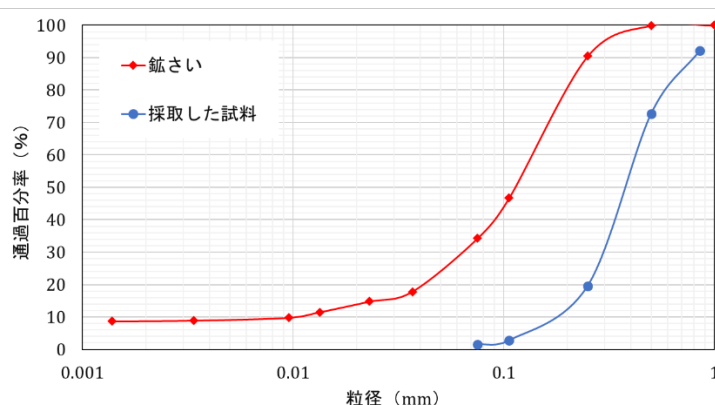
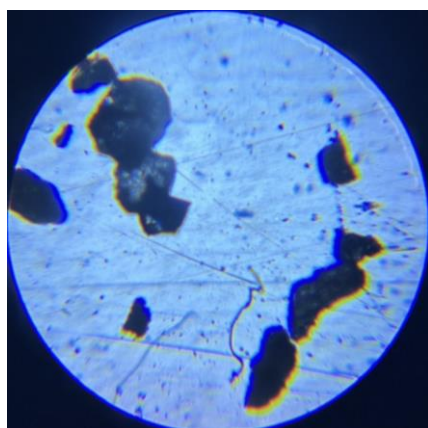


図-4 粒径加積曲線

5.2 顕微鏡観察

観察結果を図-5 に示す。既往の研究より土粒子形状の定量的な評価手法は明確に定まっていないこと、顕微鏡の精度の二つの理由より本研究では目視による定性的な評価を実施した。鉦さいと比較して、同様にシャープな形状を持っていることが確認できる。一般的な砂試料の結果はここに載せていないが、鉦さいは一般的な砂試料と比較してシャープな形状であることが既往の研究より報告されている。すなわち、今回採取した試料も一般的な砂試料に比べてシャープな形状を持つといえる。この粒子形状に関して、土粒子形状がシャープな形状ほど液状化や流動に対して強くなることが報告されている。仮に今回採取を行った試料がモレーン構成試料とすると、細粒分は少なく、粒子形状もシャープなことから一般的な砂試料よりも液状化や流動に対して強い抵抗性を発揮することが予想される。にもかかわらずモレーンが崩壊するのは、自然に形成された堤防であり締固めが不十分なことによる低密度化および透水によるパイピングなどの可能性が考えられる。



(a) 採取した試料



(b) 鉦さい試料

図-5 顕微鏡で観察した粒子形状の様子

6. 活動を通しての感想

今井

まず初めに全体を通して、土木（インフラ整備）の有難さを実感し、日本が提供するインフラ整備のクオリティの高さを再確認した調査となった。

移動では主に鉄道を利用した。フランスに行く前は遅延やストライキなど時間にルーズだと聞いており、警戒していたが実際利用すると、気になるほどの遅延を経験することはなく、パリからシャモニーまでの長距離移動ではバスや電車を組み合わせて容易に移動ができた。日本と異なる点は、車両が進行方向に対して直角になっていた点や料金体系である。座席に関しては、日本は利用者が多く乗り降りも多いことが予想されるために進行方向と平行に座席を設置しているのだと考えられる。フランスの鉄道料金は駅間ではなく、ゾーン間によって定められており、中心地での移動は定額での利用となり、理由は定かではないが、日本人のように通勤通学を地下鉄で長距離移動する人が少ないからではないかと現地の方は話した。このように、日本の常識が海外では通用しないことで、普段当たり前に利用しているものの意図を考えるきっかけになることから、海外での経験は非常に価値のあるものだと感じる。

パリの街並みは建築物が豪華で圧巻であったが、土木の視点で眺めると残念に感じる部分があった。特に印象的だったのは、地下鉄車両の汚さや交通マナーの悪さ、セーヌ川の汚さである。地下鉄の車両は至る所に落書きがされており、乗客にはやや緊張感があった。交通マナーに関しては、歩行者が信号を守る気がなく、ほとんどの人が赤信号でも車が来なくなると横断をしていた。これらの状況は土木技術というより人間的な倫理観に問題があると考えられ、日本のインフラ整備のクオリティには、少なからず国民の倫理観にも支えられていると感じた。セーヌ川に関しては、ミルクティー色に濁っていた。パリを訪れた期間に雨は降っていないため、セーヌ川に流入する水が十分に処理されていないことを示唆している。日本では下水処理場で十分な水質を確保してから河川に流している。幸い、セーヌ川から異臭はなかったが、市内の中心を流れている河川に対する対応としては疑問の残るものであった。

メールドグラス氷河ではモレーン構成試料の採取は叶わなかったが、河川で代わりの試料採取に成功した。その特徴は鉋さいと同様の土粒子形状をしていたが細粒分含有率はまったく異なる値を示した。安全性の観点よりモレーンから直接採取できる機会に恵まれず、はっきりとした考察は叶わなかったが、今回採取した試料をモレーン構成試料として扱うのならば、材料的な特殊性や危険度は高くないため、既存の対策工法を導入することでモレーンの崩壊は十分に防げると考えられる。一方でメールドグラス氷河では地球温暖化に関しても考えさせられた。日本で生活をしていると、日常生活のなかでは体感温度しか温暖化の影響を感じる機会がない。今回、氷河を観察していて、数十年で莫大な量の氷河が融解したことが目に見えて理解でき、初めて焦りを感じる機会となった。

将来は建設会社に就職するため、日本の土木技術の発展に貢献したいと考えている。今回の経験から、今一度日本のインフラ整備に携わるという誇りを再確認したと同時に、人とは異なる広い視野を身に付けられたと感じている。この経験を活かし、日本の防災力の向上ならびにさらなる発展に貢献していきたい。

江

今回、フランスの氷河地帯に行き、氷河が地形をどう変えるのかを実際に見ることができた。氷河が岩や土を削って運び、それが堆積する様子を見て、その影響の大きさを実感した。防災の視点でも、とても勉強になったと感じられる。

今回の調査では、大きな氷河湖は見られなかったが、モレーン（氷河が運んだ土砂の山）のような面影は確認できた。今まで地震（地盤防災）のことばかり考えていたが、モレーンが決壊することで洪水や土砂災害が起こるかもしれないと考ええると、氷河による地形の変化など、防災についてもっと広い視点を持つことが大切だと感じた。

また、中国、日本、フランスの建物の違いもおもしろかった。中国では鉄筋コンクリートの高層ビルが多いが、日本では木造、鉄骨造、コンクリート造などいろいろな建物がある。フランスでは、中世の石造りの建物や産業革命のころの鉄骨建築を見ることができた。それぞれの国で建築の歴史や都市の作られ方が違うことを知り、建物の強さや特徴についても考えさせられた。

最後に、氷河はただの「氷のかたまり」ではなく、地形を変え、環境に影響を与える。氷河が溶けると、災害のリスクも変わる。今回の経験を生かして、これからは地震だけでなく、地形の変化や建築のことも視野にいった防災を研究していきたい。

符

フランスにおいて、構造物のデザインに対する哲学が日本とは大きく異なることに気づいた。パリ＝シャルル・ド・ゴール空港では、各階の間を結ぶエスカレーターが巨大な吹き抜けにおいて複雑に交差している。建築物に限らず橋などの土木構造物も、例えば非常に線が細かいアーチ橋など、デザインに非常に工夫を感じる。一方で、昔ながらの街並みもよく保存されており、古典とモダンが違和感なく共存してまち全体に一体感を感じる。洗練されたモダンなデザインからは、利用者に驚嘆を与えようとする意図がはっきり伝わり、対照的に日本のデザインは梁と柱に支配され2次元的だと感じた。

公共交通のシステムについても興味深かった。運賃はエリアにより決められているため、東京でよく感じるような東京メトロと都営地下鉄と JR 間で乗り換えるような事業者の違いによる不便をあまり感じなかった。また、地方鉄道 RER や高速鉄道 TGV はオンラインでの予約が可能で、これを含め様々な場面で QR コードによる発券が導入されており、フランスにおいてもオンライン化の潮流を感じた。

メール・ド・グラス氷河では地球温暖化の影響の大きさに改めて気付かされた。展望台において氷河の強い侵食力により形成された深い谷の底面が見えたということは、それだけの深さだけ氷河が融解したということである。実際、メール・ド・グラス氷河は毎年 5m もの深さを失っており、そのスピード感を現場で実感できたことは貴重な体験であった。

その他にも、英語が必ずしも通じないことや、寒い夜でもテラス席が賑わう国民性など、生活している場所が異なるだけで、これほど様々な違いが生じることに驚いた。そのような違いから学べることも、自分のアイデンティティとして守るべきこともあるのだということを再認識した。

最後にこのような貴重な機会を支援して下さった皆様や、快くインタビューを引き受けて下さった ENPC 学生の皆様に、グループ一同厚く御礼申し上げます。