



遠心力で地盤の性質を探る

竹村研究室～土木工学科



竹村次朗助教授(右)と院生の岡本道孝さん(左)

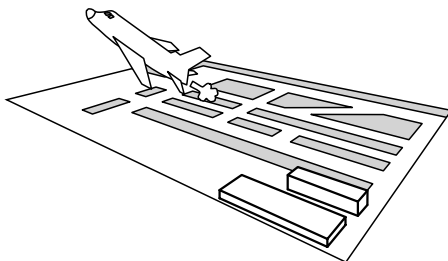
我々の住む街を構成する様々な建造物。住宅や電柱といった比較的小さなものから、ビル、鉄橋、トンネル、そして空港といった大規模なものまで様々なものが存在する。これらの建造物なくして私達の生活は成り立たないのである。そんな建造物を文字通り根底から支えるのが土木工学である。その中で「土」を研究対象にするのが「地盤工学」という分野なのだ。ここ、竹村研究室ではこの地盤工学の研究が行われている。粘土や砂の振る舞いを調べ、その結果を建設現場にどのようにして役立てるかを日夜考えているのである。



地盤工学とは？

建造物の基礎部分が地盤において、どのように挙動するかを予測し対策を講じる。このようなことを行うのが地盤工学という学問である。この地盤工学について、具体例を交えながら説明していこう。

地盤に刺さった杭の挙動を予測したいときには、杭がどの方向の力に、どれくらい耐えられるのかを実験で調べる。しかし、実際にはこれだけでは不十分なのである。杭には地盤だけでなく、地震や雨といった外的要因による影響も受けるので、これも考慮に入れなくてはならないのだ。このようにして予測するわけだが、予測についての対策は合理性が重視される。空港を建設する場合



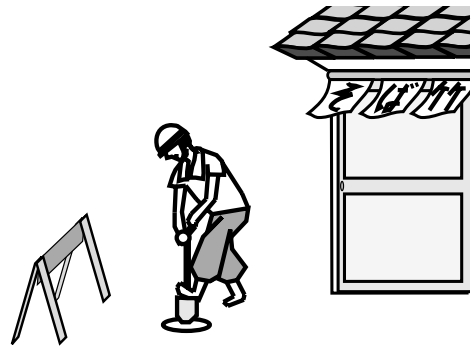
を考えよう。普通、空港を建設するには何兆円もの費用がかかる。そのため、仮に費用全体の1%を削減しただけでも、何百億円という費用が節約できる計算になる。ちょっとした工夫で、大きな経済的効果を生み出せるというわけだ。こうした理由で、合理的な設計と対策が重要になってくるのである。しかし合理性を追求し過ぎて建造物の安全性を軽視してしまうと人命に関わる事故が起こり易くなる。合理性と安全性を両方とも満たすのが理想なのだが、この理想を達成するためには実際に現場で実験を何回か行って、現場の地盤についての情報を収集する必要があるのだ。だが現場での実験に要する費用は膨大なので、そう頻繁には出来ない。でも実験しないと始まらない。土木工学にはこうしたジレンマが存在する。そこでこのジレンマを解決するのが遠心模型実験装置というものである。模型実験は屋内で行うことができるため、現場での実験よりも安価で、頻繁に行うことができるという利点がある。遠心模型実験には、この利点に加えて、さらに別のメリットがあるのだが、その説明に入る前にまずは装置の構造について以下に述べておく。



遠心模型実験装置の仕組み

遠心模型実験装置の概形は、図1のようになる(以下の文中に示した括弧内の数値は全て東工大の装置のものである)。ビーム(アームの部分、回転半径2.3m)の両端に試料容器を吊り下げて回転させるもので、試料容器の中に模型地盤を前もって作成しておく。ビームを高速(毎分20回転から150回転)で回転させると、地球の重力加速度と遠心加速度の合成加速度の方向に試料容器は振り上がる。しかし重力は遠心力よりも十分に小さい。そのため、合成加速度はほぼ水平方向にはたらい、模型地盤の鉛直下向きに遠心力が作用するのである。

では、このように高速回転している模型地盤をどう観測するのか。遠心模型実験装置は、その回転半径とほぼ等しい円柱の中にあり、この円柱の側面には、外部から観察するための小窓がついている。回転中の試料容器のマクロ的な挙動はここからカメラで撮影する。回転数が速い場合、カメラをビームに載せてカメラと模型を同時に回転させて撮影する。ただ、このときカメラにも遠心力がはたらくため、遠心力が小さくて済む小型カメラを設置する必要がある。一方で、地盤中の構造物のミクロ的な挙動を測定するためには、ひずみゲージと呼ばれるセンサーを用いる。これは、構



造物に電流を流し、そのときの電圧の変化を調べるものである。構造物にひずみが生じると電気抵抗が変化し、それに伴って電圧が変化する。つまり電圧の変化を調べる事で、ひずみ、すなわち変形を間接的に測定するセンサーなのだ。

以上が遠心模型実験装置の構造と測定システムである。構造の項から分かると思うが、高速回転中の模型地盤にはたらく遠心力は非常に大きい。あたかも、模型地盤に作用する重力が大幅に増加された状態になっているのだ。実はこの状態にしたいがために遠心模型実験装置を用いるのである。この状態にすることの必要性とは何か、それを次に示していこう。

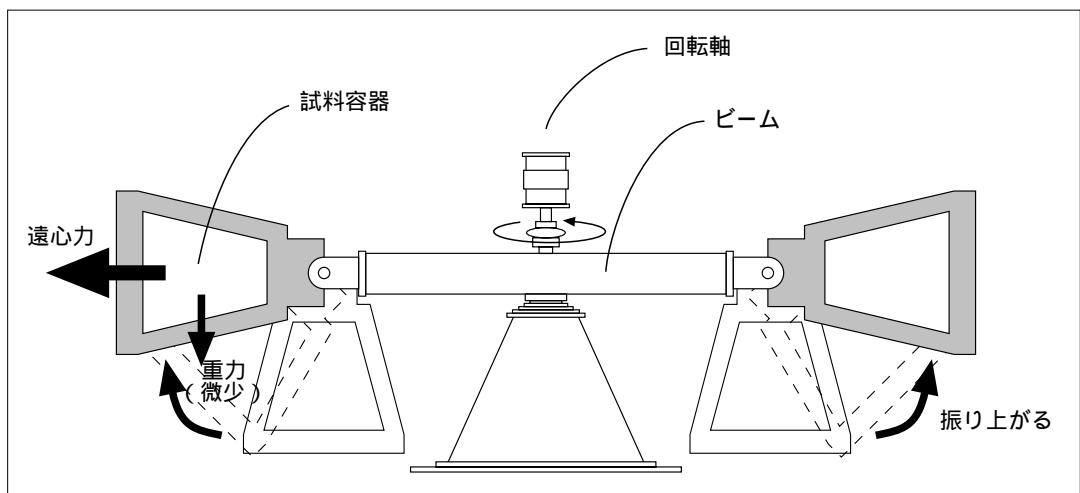


図1 遠心模型実験装置の概形



遠心模型実験装置の意義

地盤を構成する土は、自身にはたらく圧力が増加すると、圧縮されて密度が増し、固くなるという性質を有している。よって、深いところにある地盤ほど、自身にはたらく圧力が大きく、強度が大きいのである。強度が違えば、挙動も変わってくる。従って、深さの異なる現場の地盤と模型実験用の地盤とでは、地盤としての性質が全く異なるのである。ここで遠心模型実験装置を用いて模型地盤に遠心力をかけ、現場の地盤にはたらく圧力に等しい力を作用させる。すると、模型地盤の土の固さが現場の地盤のそれと等しくなり、地盤としての性質は同じになる。これを具体的な例で以下に説明しよう。

深さ十メートルの穴Aの土の強度を調べる場合を考える。ここでは、深さ十センチの穴の模型(穴Bとする)を用いて調べていく。すると穴Bの土より穴Aの土の方が深いところにあるため、穴Aの方がはたらく圧力が大きく、固いのである。従ってこのままでは、穴Bは穴Aを表す模型としては不適切である(図2参照)。そこで、遠心模型実験装置を穴Bに用いる。穴Bに重力が100倍になるように遠心力をはたらかせれば、穴Bの土が穴Aのそれと同様の強度になる。当然、両者に作用する圧力も等しくなる。幾何学的な条件以外はほぼ同じ状況が作れるというわけだ。模

型に遠心力を与えるメリットはここにある。

現場のスケールに似ていて、かつ費用もかからない。このように、一見非の打ち所がないように見える遠心模型実験だがそれでも問題はあある。遠心模型実験と通常の模型実験の違いは、単に模型にはたらく重力を実物のそれと同じにするかどうかの違いでしかない。だから、遠心模型実験には通常の模型実験と共通する問題点を有しており、さらには、遠心模型実験に特有の問題も抱えているのである。ただ、これらの問題は複雑なのでその説明は割愛させていただく。要は遠心模型実験も完璧ではないことを理解して頂ければよい。あくまで模型実験は、現場での現象を予測し、破壊や変形のマカニズムを知って、対策の大まかな方針を決めるために行われるのである。最後の詰めはやはり現場での実験や何らかの予測手法によってなされるものなのだ。現場での実験を行って、それと模型実験を比較することは大切なのである。ただし、予測手法の適用性を模型実験で確認できれば、現場での実験を行わなくても、精度の高い予測が可能となる。

こうして得た模型実験のデータを現場での現象の予測に利用するわけだが、どのような方法で予測するのか。原理的には通常の力学現象と同じである。このことについて次に説明していこう。

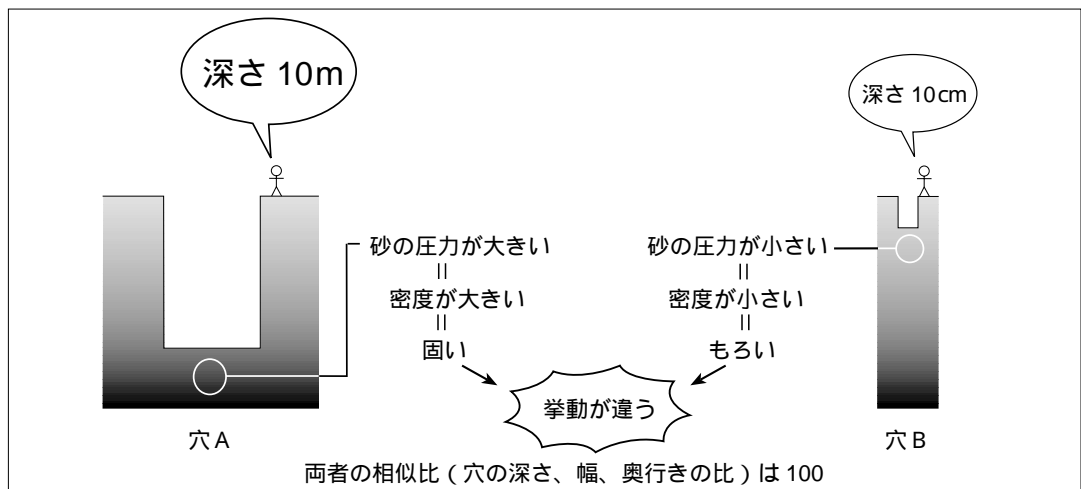


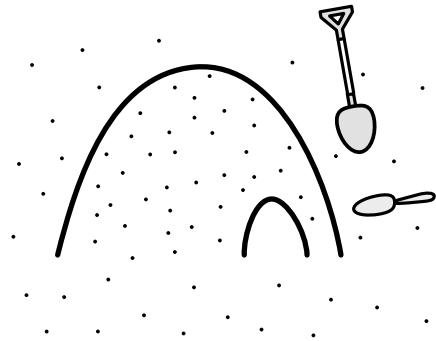
図2 深さ10mの穴Aと深さ10cmの穴Bの違い



モデルと境界条件で全てが分かる？

理想的な古典力学現象は、初期条件と境界条件（運動する物質と境界との関係を表した条件）とニュートン方程式で全て解析することができる。地盤中での現象も基本的にはこの理論が成り立つ。地盤におけるニュートン方程式は、土の性質や材料としての特性を表すモデルに当たる。初期条件は、地盤と建造物の内部が最初にどうなっているかの情報であり、境界条件は対象とする領域の境界がどのような力や変位を受けるかといった情報である。つまり、土のモデルと、地盤と建造物との間で起こる現象を実験から見れば、現場での予測は可能なのである。しかし、ここで土のモデルにどれだけ普遍性を持たせるのかという問題が生じる。現場における現象を予測するのに用いるわけだから当然その現場の土により近いモデルがよいと考えたくなる。だが、仮に現場の土にそっくりのモデルを作ってしまうと、それはその現場にしか通用しないモデルということになる。結局やってることが建設会社と同じになり、学問としての研究ではなくなってしまうのだ。かといって、あまりに単純化し過ぎても現場に活用することができなくなる。やや普遍的な地盤とその中における建造物の挙動を模型実験から知る。それが地盤工学でのモデルの求め方なのだ。

次に境界条件について説明していく。境界条件は、現場における個々の問題に関係するもので、たとえ土の材料特性が同じでも境界条件が変われ



ば結果は一変する。従って、土のモデルが精密でも、境界条件が不明だと結果を予測することが全くできないのである。そのため、実際の企業や公的機関が求めているのは、土のモデルよりもむしろこの境界条件なのだ。つまり、境界条件の影響を模型実験を用いて解析することが、合理的な予測をすることに直結するのである。

こうして土のモデルと境界条件を求めるわけだが、実物より単純化しているので、当然、誤差が生じる。これを補うのはやはり現場での実験に他ならない。土木工学、地盤工学というものは、模型実験で得られた結果を、現場での実験の裏付けのもとで、いかに現実社会に役立てられるかを基本的な方針としている。竹村研究室においては、遠心模型実験装置を用いて、この方針を実践しているのである。

人類が誕生した頃には、シビルエンジニアリングとミリタリーエンジニアリングと呼ばれる学問以前の二つの工学があった。前者の意味はざっくり「土木工学」である。つまり土木というものは、学問として成り立つよりもはるかに昔から存在している。他の学問に比べて歴史がとても古いということなのだ。それだけ人の生活に密着したものである。竹村先生はこういった土木の起源に即して、土木を学問として研究するだけでなく、どのように実社会に役立てるかを考えておられる。取材を終えて、学問を実用化することの大切さを改めて理解することができた。

竹村研究室で行われる研究テーマは多岐に渡り、最近では、汚染物質の地盤中における拡散の仕方や地盤の液化現象などの研究に取り組まれている。これらは近年話題になっている深刻な環境問題であるだけに、一刻も早く解決したいというのが人々の率直な願いであろう。研究成果の現れる日が楽しみに思われる。

最後になりましたが、突然の取材の依頼を快く承諾して頂いた竹村先生及び研究室の皆さんに深い感謝の意を表すとともに、竹村研究室が以後、益々発展することを願って止みません。

（君島 雅人）