

土 質 工 学 と 模 型 実 験

MODEL TESTING IN SOIL ENGINEERING

三 笠 正 人*

1. 土質工学における模型実験の役割

相似模型による実験は、ジェット機の設計から大気汚染の広がり方に至るまで、あらゆる工学の分野において問題解決のために活用されている手法である¹⁾。

工学はもともと“論より証拠”，とにかくやってみようという実践的な育ちの学問である。発明家はまず理論家ではなかったし、技術の先端をリードするのは技術者の現場経験と勘であり、それを理論が追う形で工学が発達してきた。その現場経験の代わりとして、小規模ながら明確に設定された条件の下で、より体系的に実験室で行われるのが模型実験である。材料試験が対象物の構成材料の特性を調べる要素試験であるのに対し、模型実験は対象物の全体又は部分の挙動や機能を調べるもので、その主な役割は理論（工学においては一般に近似的）の表し得ない事実そのままを示すことにあるが、それは同時に理論の近似度や正確さをチェックすることにもつながるわけである。

さて土質工学は、初期の段階では土をごく単純に粉体あるいは弾性体と見なし、他の水や構造物を扱う分野と同様に材料よりは全体の挙動に目を向け、土圧論、支持力論等マクロの研究を主としてきた。したがって、その時代には材料(土質)試験よりは土圧等の模型実験が主として行われたに違いない。実験室の比重が土質試験に傾いてきたのはテルツァーギの Erdbaumechanik が土の物理的、力学的性質の重要さを世に知らしめた1925年以来であろう。特に1948年にボシュレフがピストンサンプラーを発明して以来、乱さない試料の重要性が認識され、それを用いた力学試験や原位試験の比重がますます大きくなった。そして現場の土質の仕事は、すでに土質調査(試験)→設計→施工というパターンができあがり、ルーチンワークでは模型実験の出る幕はあまりない。大学の研究も土の材料力学的な面に重点がおかれ、現在我が国では構成式や粒状体の理論、特殊せん断試験機を用いた実験が花盛りである。

もちろん土要素の挙動がはっきり分かれば、有限要素法などの手段を駆使して土構造物全体の挙動はたちまち(?)計算できる道理であるから(幸い土構造物は鋼構造物ほど複雑な形をしていない)、まずエレメントを攻めるのはまさに正攻法であろう。しかしこの演繹的な行き方だけでな

く土構造物全体の挙動を直接調べることも大切である²⁾。たとえば破壊に近づいたときのすべり面やクラックの発生機構、進行性破壊の状況などは、要素試験(特に単純せん断などの一様変形試験)のデーターを使って演繹的に計算するのは無理ではなからうか。やはり模型実験等で事実をまず確かめた上でそれを説明するための解析手段を工夫すべきで、それが工学の尋常な行き方であろう。

土の構成式の研究のパイオニアとして有名なスコフィールド(Schofield)、ロウ(Rowe)の両教授がいずれも遠心力模型実験の最も熱心な推進者であるという事実の意味をよく考えてみる必要があると思う。

さて現場においては、前記の作業パターンを機械的に進めるだけでは不安があるので、施工中の現場の観測を重視し、その結果によって途中で適宜計画を修正するなどテルツァーギの唱導した Observational method が一般にすすめられる。しかし特に重要な構造物や、工法や様式の新しい工事ではあらかじめ小規模の現場実験か、室内の模型実験を実施して設計の妥当性をチェックしておくことが好ましい。特に模型実験は、手軽に破壊の状況を観察したり、関係要因の影響を調べたりできるのでしばしば行われるが、土質と応力の相似性に注意しないと、かえって誤った情報を提供することになりかねないので、慎重な計画と考察が必要である。

2. 土の模型実験の相似則について

現場の代用としての模型は、現場の状況そっくりそのままが理想であるが、それはなかなか難しい。

もし問題が杭先端の支持力のように局部的なものであれば、容器全体を加圧タンクとする³⁾ことで現場の状況を再現できるが、土構造物全体の挙動を見る実験ではそうはいかない。例えば粘土の斜面や主働土圧の実験では、小さい自重応力に見合った弱い土を用いないと模型を破壊させることができない⁴⁾。

粘着力を持たない砂の場合は自重応力に比例して強度が増減するから、模型では土圧や支持力を含めて全体的な応力レベルが寸法に比例して低くなるが、とにかく模型実験は常に可能で、応力の分布は実物(厳密な意味の実物ではなく、不必要な細部を捨象したモデル化の対象をここでは実物と呼ぶ)とほぼ相似的になる。ただし変形は別である⁴⁾。

このような相似則、つまり模型の挙動から実物のそれを

*工博 大阪市立大学教授 工学部土木工学科

論 説

推定するルール, あるいは実物と関係づけて模型実験を計画するためのルールを明らかにしておくことが模型実験を行う前提となる。

一般的にバッキンガムの π 定理などで相似則を考えるわく組は用意されている¹⁾。つまり関係する因子の組み合わせから重要と思われる無次元量(π ナンバー)を拾い出し, これが実物と模型で等しくなるように模型の諸元を決定していく方法である。しかし π ナンバーを選ぶ規準は結局土の力学についての本質的な理解に基づいて判断するほかない。例えば(土粒子の平均直径/模型の大きさ)という無次元量は, 土を連続体と見る現在の土質力学の理論には出てこないで, これを無視して同じ土で模型を作ることが是認されているが, ロックフィルダムの場合⁴⁾などは無視できないし, またすべり面の発生機構などのミクロな問題になるととり上げざるを得ないように思われる。

さてもし現行の設計理論が十分正確であれば, それに基づいた相似則によって模型実験の結果を直接実物へと外挿することができるわけだが, 一般に理論も実験も極端な外挿を許すほど正確ではない。例えば, テルツァーギの支持力公式の示す砂地盤の支持力と載荷幅 B の比例関係を機械的に適用して, 小さい模型フーチングの支持力から実物のそれを推定するのは危険で, もし砂にわずかの見掛けの粘着力 c があったならば, 極めて過大な値を得ることになる。したがって B の値を数通り変えた比較実験によって B と支持力の関係を求めてから実物へと外挿すべきである。

しかし模型フーチングの大きさには限度があるので, スケールを大きくする代わりに模型に遠心加速度を与えて大きな自重応力を生じさせ, 実物と等しい応力状態を, したがってまた等しい支持力を生じさせ, この外挿の不安を解消しようというのが遠心力模型実験⁴⁾の意図である。この方法のよって立つ原理は, “同じ土を同じ状態で同じ応力下におけば, 同じ挙動をするだろう”^{注)}という, ごく常識的, 一般的なものであるから, あらゆる土質, あらゆる問題に適用することができ, 重力場での模型実験に比べて一段高位の相似性を約束するものである。その具体例については別報⁴⁾に譲るが, 上記の砂地盤の支持力に関しては東京工大の山口研究室で数年来綿密な研究が続けられ, 貴重な資料が蓄積されつつあることは喜ばしい。

次に最も簡単な模型実験でありながら, 正しい相似則が今なお明らかにされていない顕著な例として圧密試験をとり上げよう。これは普通は力学試験に分類されているが, ある荷重段階での圧密過程に関しては, 要素試験ではなく模型実験であると言える。すなわち圧密は供試体の中で一様に進行するのではなく, 排水面から始まって中央に及ぶが, 実際の地盤中のこのような圧密の経過を小さな供試体に再現して調べ, それを現場に外挿するという点でこれはまさ

に模型実験であり, しかも乱さない試料を用いる点ではその模範生と言えよう。通常用いる相似則は熱伝導型の圧密理論から導いた H^2 則(H : 層厚)である。実際には c_v を求めた上あらためて圧密の時間経過を計算するが, JISの方法で c_v を求めた場合は結果的に H^2 則を適用したのと同じことになる。

ところがこの相似則には熱伝導型の圧密理論がその粘土に正しく適用される, すなわち二次圧密がないという前提がある。実際はそうでないからこの H^2 則は修正を要するというのが, かつてせん断試験法委員会がまとめた c_v に一次圧密比 r を乗じるという補正法の趣旨である⁵⁾。この提案は考え方としては支持されたが, 実際的な配慮から今回のJIS改訂においては省かれた。この問題の解決のため網干が試みた大がかりな比較実験⁶⁾では, 時間-沈下曲線の変化については両者の中間的なデータが得られ, 圧密速度は H^2 則よりいくらか速くなった。筆者の追試でも類似の結果を得ているが, そのメカニズムは今のところ不明で, 相似則の確立も宿題として残されている。

この例からも相似則には現象の理解の程度に応じていくつもの段階があり, 結局は精密な比較実験データの集積と, それを統一的に説明できる理論(考え方)の確立を待たねば結論に達し得ないことが理解できよう。

3. あとがき

触れ得なかった問題として, 模型実験や現場実験の実態, 大型化の問題, 解析との関連などがあるが, これらについては文献⁷⁾を参照されたい。最後に二つばかり付言したい。まず「再現可能性」は模型実験が科学的手段であるための要件である。土質材料と模型の作製方法及び実験条件は適確に記述し, 追試を可能としておくこと。次に理論のチェックのために土以外の単純な素材を用いることは, アナログ計算をやるのと同じで土の本質には迫り得ない。たとえ低位の相似性しかない模型実験でも, 土を用いる限りひとつの“ミニ現場”であり, 必ず既成の理論でカバーできない土の真実がひそんでいる。十分考えた上は, とにかく何が起こるかやってみよう。“Let us try and see what happens!” 未知への期待をこめて。

参 考 文 献

- 1) 江守・シュering: 模型実験の理論と応用, 技報堂, 1973
- 2) 三笠: 土の力学における2つの視点について, 「土質工学展望」, 土質工学会関西支部, 1978
- 3) 岸田ほか: 加圧砂地盤タンクの試作と杭の載荷試験, 第8回土質工学研究発表会, 1973
- 4) 三笠・高田・望月: 遠心力を利用した土構造物の模型実験, 土と基礎(本号), pp.15~23, 1980
- 5) 三笠: 圧密試験方法の問題について, 第19回土質工学シンポジウム, 1974
- 6) 網干: 圧密試験結果の沈下解析への適用性について, 同上
- 7) 土木学会誌特集・現象/数値解析/模型, 1976. 5月号所載の諸論文, 特に吉田巖, 柴田徹, 伊藤文人の諸氏のもの

注) この表現は一見公理風であるが先に述べた土粒子のサイズの問題を考えても分かるようにアプリオリ(先験的)に正しいものとは言えない。