

講 座

農業土木技術者のための最新土質工学（その1）

— 総 論 —

長 谷 川 高 士*

I. ま え が き

最近の十数年間における土質力学分野の発展には、めざましいものがある。理論式や経験式の開発、室内・原位試験および計測技術の進展、さらにはこれらの理論および試験結果を組込んだ解析設計法の開発など、その発展内容は応用学である土質力学が目指す土質工学と呼ぶにふさわしく、具体的には枚挙に暇がない。このような土質工学は農業土木学の基礎学のひとつでなければならず、その理論・実験・解析設計の現況を把握し理解することは、今後の農業土木に課せられた問題を解決し、発展を図る上できわめて重要である。

しかし、このめざましい発展に伴って、関連理論や解析手法は複雑化し、簡単に理解しがたくなってきている点も事実である。また、理論や解析手法の発展とともに、室内試験および原位試験の役割も重要視され、試験装置や試験方法も精緻化・専門化してきている。したがって、技術者の中には、

- 最近の土質工学の発展には興味はあるが、理解するのが難しい。
- 室内試験結果や現場計測データはたくさんあるが、これらをどのように解釈すればよいのか、また解析にどのように使えばよいのか、わからない。
- 理論や解析法を使ってどのような問題がどの程度まで解決できるかが、知りたい。

など、最近の土質工学に対する問題点を抱えている方も多いのではないだろうか。そこで本講座では、

- 土質工学が過去十数年間において、どのように発

展してきたのか。

○ 現在どのような問題を中心に、研究および現場での問題解決がなされているか。

○ 将来、どのような問題がどの程度まで解決できるようになるのか。

などについて、やさしく解説しようというものである。

図-1 に示すように、少しでも、本講座を「料理講座」にたとえるならば、受講者の希望する点、すなわち、

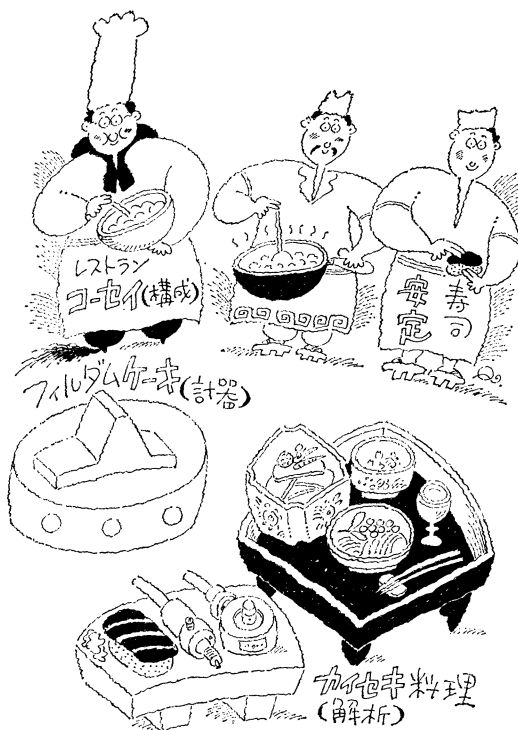


図-1 多士済々の料理人と献立

* 京都大学農学部 (はせがわ たかし)
実験, 計測, 土質力学

キーワード

- おいしい料理を作るための最新の料理器具にどのようなものがあるか、またその使い方を知りたい。
- どのようなネタ（材料）が使われるか、また、その料理法を知りたい。
- 健康的あるいは栄養的にバランスのある料理法を知りたい。

等の点に対して、多士済々の「腕に自信の料理人」の先生方をお迎えして、「最新の料理器具の性能と特徴」、「新鮮なネタ（材料）の調達と料理方法」をやさしく説明しようとするものである。また、食べてもなるべく消化不良を起こさないように、講座自体の料理法にも工夫をこらしているつもりである。

近年における土質力学の発展でみられる特徴は、従来から教科書にあった各項目の分野、たとえば圧密、剪断、浸透、土圧、…などのそれぞれにおける知識の著しい深まりとともに、これら相互の関係を規定するメカニズムが徐々に明らかにされてきていることである。

そもそも上記の各分野は、土という対象が力や変形など、外から加えられる何らかの作用に対して示す応答を、設計や施工に利用しやすい形で理論体系化されてきたものである。しかし、圧密という現象をとっても明らかかなように、圧密現象が他の現象と全く無関係なものではない。圧密によって土の間隙から水が排除されると、粒子から成る骨格の緊密度が増し、それによって剪断強

度などが変化し、その変化は圧密の程度と直接的に関係しており、そこには一貫したメカニズムが存在するはずである。

すなわち、上記の各分野は土という対象のもつそれぞれの側面であり、その関連が明らかにされてきたことは、土の複雑な力学像の輪郭にせまる努力が実を結んできたものといえよう。

さて、このような土質工学の発展の礎には、理論・解析と実験・計測とのバランスのとれた発展があったことを忘れてはならない。つまり、理論・解析と実験・計測は、図-2に示すようなコンビネーションのよいピッチャーとキャッチャーのようなものであり、パラメータやデータというボールを互いに投げ返して、互いに進歩してきたわけである。いかえると、理論・解析面の研究が発達すると、必ずそのパラメータの誘導や理論の検証を目的とした実験・計測面の研究に対する要求が増し、実験・計測面の研究が発達すると、その一般化のために理論・解析面の研究の発展を促す、というように互いに一流のピッチャーとキャッチャーに成長し、「土質工学」というチームの進歩に貢献してきたわけである。本講座でもこの点を十分考慮して、理論・解析と実験・計測の関連性について、特別な項目を設けて説明している。

II. 土質工学問題と本講座のトピックス

土質工学問題は、安定（強度）問題と変形問題に大別でき、土質工学の発展は、安定・変形問題に関する予測理論の発展の歴史である、といっても過言ではない。前者は、斜面安定や地盤支持力、地震時の液状化問題などに関する安定（強度）問題であり、その解決には、土塊の破壊に対する精度のよい予測が必要である。一方、後者は、浸透・圧密問題や、間隙水圧、クリープ・圧縮・沈下などの変形問題である。これらの変形量や間隙水圧などの予測は時間依存問題となるため、精度のよい予測はさらに難しい。

こうした土質工学問題解決にむけて精度のよい予測をするためには、まず、理論・解析により、

- ①種々の状態における土の挙動をうまく表すことのできる土のモデルとそのモデルパラメータを求めめるための理論を開発する。
- ②これらを用いた解析を行う。

ことが必要である。さらに室内・原位置試験によって、

- ③土の強度・変形挙動の基本的理解を深める。
- ④試験結果からモデルパラメータを誘導する。
- ⑤破壊に近い極限状態での理論解析結果を模型あるいは実物大試験によって検証する。

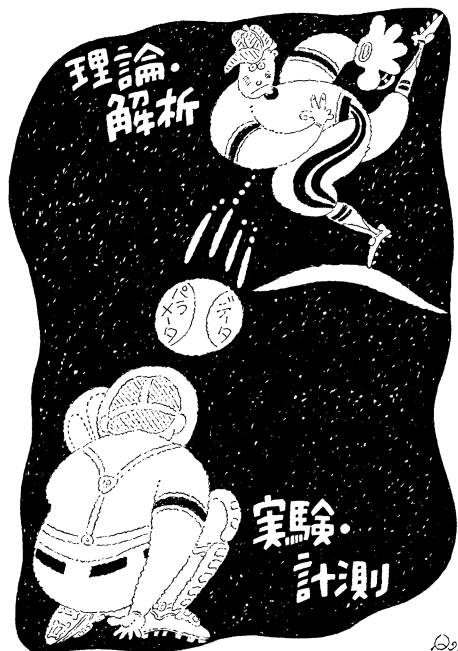


図-2 理論・解析と実験・計測間のキャッチボール

ことが必要である。

このうち、まず、①に関しては、土の圧密や剪断時の挙動をうまく統一的に表すことのできる土のモデルが、いわゆる「土の構成則」と呼ばれるものである。具体的に説明すると、たとえば、同一の粘土を用いた三軸圧縮試験での、「圧密と剪断」、「排水と非排水」、「正規圧密粘土と過圧密粘土」の挙動は、それぞれ別なものとして、土質力学の教科書などで説明されているが、「土の構成則」では、いくつかの数式とパラメータによって、こうした土の挙動を統一的に解釈しようとするものである。「土の構成則」の中でも最も有名であり、現在使われている土の構成則のオリジナルといわれている「カムクレイ (Cam Clay) モデル」¹⁾では、図-3に示すように、主応力面に間隙比の軸を加えた3次元空間内で定義される「限界状態面」の概念を使って、はじめてこれらを統一的に解釈することに成功した。この基礎には、Roscoeらの綿密な三軸試験の実施とデータの蓄積（上述の③）があったことはいうまでもない。さらに現在、この構成則の発達によって、

○有効応力に基づく土質力学現象の統一的理解を促進した。

○有限要素法などの数値解析手法の実際問題への適用を容易にした（上述の②）。

などの土質工学の発展に対する波及効果もきわめて重要である。

また、実際問題の複雑化に伴い、その予測に必要な土のモデルも複雑化すると、そのモデルの必要とする土のパラメータの数も増大するため、室内・原位置試験からこれらのすべてを正確に求めることは難しく、地盤の不均一性などを考慮すると、さらに難しさは増すばかりで

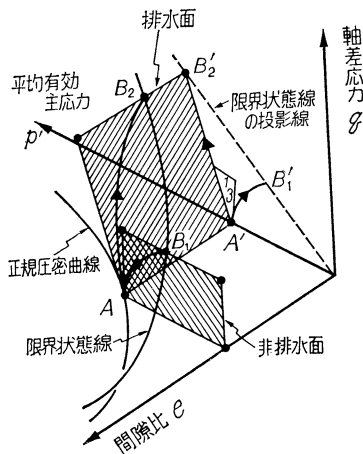


図-3 限界状態面の概念¹⁾

ある（上述の④の問題）。そこで考えられたのが「逆解析」という方法である。これは、土のパラメータや荷重・変形の境界条件などのデータをもとに数値解析手法を用いて構造物各部分の変形や応力などを予測する、いわゆる「順解析」に対するものであり、応力や変形などの実構造物の実測結果を用いて逆方向に解析を進めることによって、解析に必要なパラメータなどを求めようとする手法である。逆解析法は、パラメータ推定だけでなく、今後の挙動予測にも利用される。さらにこれを用いることによって安定性を評価するための計測器の配置場所の決定や、施工中の構造物の挙動を計測し、その結果に応じて設計時の解析パラメータを修正して予測をやり直す、あるいは施工法を変更する、いわゆる「情報化施工」に関しても、非常に強力な役割を果たしえる。つまり、図-4²⁾に示すように「情報化施工」において、逆解析法は施工業務における観測・計測結果を設計業務にフィードバックするための手法であるということが出来る。トンネルの施工法である「NATM 工法」はこの「情報化施工」の応用の最たるものである。こうした手法の発展の基礎には、現場計測技術のめざましい発展があり、実測結果の高精度化があることを見逃してはならない。また、こうした手法の発展およびデータの蓄積は、今後の設計施工法の改良にも大いに影響し、施工機械のロボット化につながっていくことが期待される。

こうした理論・解析による予測手法が発展すると、その予測結果を検証することが必要となる（上述の⑤）。この検証は、一般に、現場計測や模型試験によって行わ

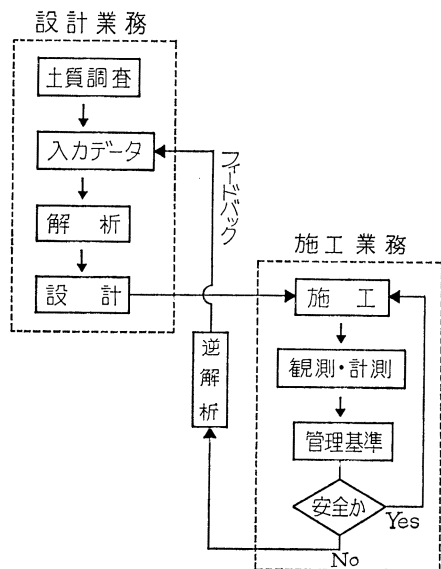


図-4 逆解析と情報化施工²⁾

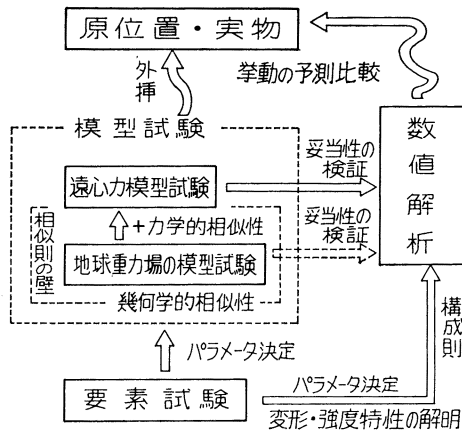


図-5 遠心力模型試験の位置づけ

れる。とくに、破壊に近い極限状態では、実物を用いて試験を行うことは困難あるいは不可能であるため、模型試験に頼らざるを得なくなる。模型試験には本質的に実物との相似性という問題が存在する。相似性には「幾何学的な相似性」と「力学的な相似性」があり、通常の地球重力場での模型試験では、後者の相似性を満足することは難しい。この問題点を解決するための手段として考案されたのが、「遠心力模型試験」である。この試験法は、幾何学的に $1/n$ の模型に地球重力場の n 倍の遠心力加速度を加えることによって、実物と同じ応力・ひずみ場で模型試験を行おうとする方法である。つまり、要素試験と同様な考え方で、「同じ土を同じ応力場において試験すれば同じ挙動が得られる」という原理に基づいている。この原理によって、たとえば斜面のすべり面はほぼ模型と実物で同じ位置に発生し、局部ひずみやすべり面に沿った間隙水圧もほぼ同じ大きさが得られ、解析結果やモデルの検証が可能となる。図-5 には、遠心力模型試験をはじめとした室内模型試験の役割、つまり理論解析、室内要素試験、原位置試験との関連性や位置づけを図示している。

III. 本講座の構成

これらの理論解析と実験計測の結果を関連づけた解釈あるいは予測結果に従って、土質工学の設計あるいは問題解決を行うわけであるが、本講座では、こうした土質工学の問題解決に向けた流れに沿って、表-1 に示すような、理論(4編)・実験(3編)・解析設計(2編)のそれぞれの内容を配置し、さらにこれらの関連性に十分配慮した構成をとっている。

本講座の最初は、「土の圧密・浸透問題」を選んだ。これは、モンスーン多雨気候帯に位置する日本では、地下

水や浸透水に起因した現場問題やトラブルが多く、土中水を抜きにして土質工学は語れないからである。技術者の中には、「もし水がなければ、問題はきわめて簡単になるのに…」と感じている方も多くことであろう。また、軟弱土に関する圧密沈下問題も日本ではきわめて多い。本項目では、こうした土と水の相互作用に関連する圧密・浸透理論の現況について解説される予定である。さらに、飽和・不飽和浸透流解析手法を中心とした解析手法に対する最新情報についても適用事例を交えて説明される予定である。

「土の構成則」に関する解説は、従来、他学会誌にも見られるが、研究者向きに書かれたものが多く、技術者の中には「難しい数式や図表の羅列で理解しがたい」と思われた方も多いのではないだろうか。そこで本講座では、「なぜ構成則が必要であるのか」、「構成則を使うと何がわかるのか」などについて、実例を挙げて、平易に解説される予定である。

次の「逆解析」については、上で説明したような事情によって、質のよい土質調査を行い、複雑な力学モデルを組込んだ高度な解析を行っても、設計時の予測結果と施工中あるいは後の構造物の挙動が異なる場合があり、こうした設計と施工のギャップを埋める有力な方法がこの「逆解析」である。逆解析結果は、設計時の解析パラメータの評価法の改良だけでなく、上述したような現場計測場所の選定などを通して、土質調査や室内・原位置試験に対しても影響を及ぼすことが期待される。本講座では、こうした逆解析手法の原理、各方法の分類と特質、適用例を含めた予測能力や限界などについて平易に

表-1 講座「最新土質工学」掲載予定

No.	表題	執筆者	掲載予定号
1	総論	京都大学農学部 長谷川高士	平成元年7月号
2	土の圧密・浸透問題	(株)間組技術研究所 小林 晃 島根大学農学部 鳥山 暁司	8月号
3	土の構成則	金沢大学工学部 太田 秀樹	9月号
4	逆解析	京都大学農学部 村上 章	10月号
5	安定問題	京都大学農学部 菊沢 正裕	11月号
6	室内試験	京都大学農学部 内田 一徳	12月号
7	原位置試験・計測技術	応用地質(株) 近藤 達敏 南部 光広 岡部 幸彦	平成2年1月号
8	試験結果の解釈と理論・解析との関連性	東京大学生産技術研究所 龍岡 文夫	2月号
9	動的問題	九州工大工学部 安田 進 基礎地盤コンサルタント 酒井 運雄	3月号
10	将来への展望	岐阜大学農学部 仲野 良紀	4月号

解説される予定である。

「安定問題」は、斜面安定や支持力などの問題である。安定解析理論は極限平衡理論を中心とした古典的な理論ではあるが、構造物の設計施工時の安定性と直結するきわめて重要な理論である。現在では、円弧すべり面の分割スライス側面の不静定力の考慮、非円形すべり面の適用、剛塑性解析手法や3次元斜面安定解析など、安定問題に対する理論的手法は着実に進歩している。こうした進歩の基礎には、有限要素法の発展を抜きにしては考えられず、解析結果から従来からの円弧すべり面法などの理論的背景も明らかになってきている。本講座では、安定問題に適用されてきた理論的手法の歴史や現況、設計との関連性などについて、適用事例を交えて、できるだけ平易に解説される予定である。

次の「室内試験」も、構成則や解析手法の発達という需要面からの要求と、センサー技術などに見られる供給面からの発達が相まって、後述する原位置試験とともに、ここ数年急速な発展を遂げている。室内試験は、要素試験と模型試験に大別される。まず要素試験については、中空ねじり試験や多軸試験などの新たに開発された試験法と、単純剪断試験や平面ひずみ試験などの改良試験法を中心とした要素試験法の現況、試験目的や特徴、試験結果の比較について解説される予定である。また、模型試験に関しては、先述した遠心力模型試験などを中心に、その意義や特徴、相似則との関連性などについて述べられるとともに、要素試験や解析手法との関連性についても説明される予定である。

「原位置試験・計測技術」も、理想的な「あるがままの状態」での調査・試験の実施という観点から、その必要性は年々増加しつつあり、その結果は設計施工だけでなく、理論解析や室内試験などの土質工学一般に大いなる影響を及ぼしている。本講座では、プレッシャメータ試験、ピエゾコーン貫入試験、地震探査、地下レーダなどの原位置試験・土質調査法に関する最新の試験・計測技術についての現況や発展の歴史、室内試験結果との比較・関連性などについて、平易に解説される予定である。また、コンピュータによる自動化試験技術やリモートセンシング技術、センサーを含めた測定機器の現況に

ついても説明される予定である。

次の「試験結果の解釈と理論・解析との関連性」は、本講座の目玉商品の一つである。土の構成則や解析法の向上により、物理的に意味のある強度・変形パラメータを室内・原位置試験結果から求めようとする需要が増大し、室内・原位置試験の測定精度も向上してきており、種々の影響因子を考慮した試験結果の解釈がきわめて重要視されている。こうした観点から、室内・原位置試験の試験結果を解釈する上で、考慮すべき影響因子や結果のばらつき等に関する注意点について、わかりやすく解説されるとともに、構成則などの理論や設計解析との関連性についても説明される予定である。

次の「動的問題」は、相次ぐ大地震時における砂地盤の液状化問題や、ダムなどの重要構造物の耐震設計、波浪力の作用を受ける海洋構造物の挙動解明などの問題から、最近重要度が増しつつある問題である。ここでは、こうした土の動的変形・強度特性に関する理論と数値解析法へ定式化、さらにこれらの理論解析と室内・原位置試験結果との関連性、また地震時における土構造物や地盤の安定性の判定法などについて、実際問題の予測結果と実測結果の比較とともに、説明される予定である。

最後の「将来への展望（土質工学の進歩と農業土木実務への応用）」は、上述した土質工学の理論・実験・解析設計に関する現況と農業土木実務への応用について具体例を交えてまとめられるとともに、21世紀における土質工学・農業土木学の発展に必要な計測試験技術・解析設計手法の展望について、解説される予定である。

IV. あとがき

本講座により、過去数十年間における土質工学の歴史的な発展経過、現況における実際問題と土質工学研究の対応、さらにその将来像が理解され、農業土木学の今後の発展に少なからず役立つことを念願するものである。

参考文献

- 1) J.H. Atkinson and P.L. Bransby: The Mechanics of Soils—An Introduction to Critical State Soil Mechanics, McGraw-Hill (1978)
- 2) 土質学会編: 地盤工学における数値解析の実務, pp. 337~358 (1987)

[1989. 4. 13. 受稿]