

松江高専における土質力学の実力向上に関する取組み

松江高専 正会員 河原莊一郎

1. まえがき

土質力学は、構造力学、水理学と並ぶ土木基礎力学の3本柱の1つで、土の物理的および力学的性質を扱う。覚える式が多く、土の物理量の計算では2つ以上の式を組み合わせる必要がある。しかも、計算問題だけではなく、専門用語を理解する必要があるため、一般に難しい科目である。

ここでは、本校における土質力学の実力向上に関する様々な取組みとその成果について報告する。

2. 土質力学の学習内容

表-1 に示すように本校では以下のとおり 3, 4 年生の2年間で5単位の土質力学の授業がある。高専の講義科目の1単位(90分授業×15回)が、大学の2単位に相当する。検定教科書¹⁾は、2)の教科書(現在はJABEEのため4年生でやむなく使用)が難しいとの多くの学生の指摘で、平成18年度から採用し、学習内容をやや減らしている。検定教科書は、安価で誤りがほとんどなく、説明や例題(土の物理量を除く)も十分な量がある。しかし、式の誘導がほとんどないので板書で補足している。また、国家公務員採用試験Ⅱ種土木職(以下、国家Ⅱ種)の問題が解けるよう、記載のない相対密度、圧力水頭、粘着力がある土圧などを追加し学習している。その他5年生の「設計演習」で擁壁、矢板、杭の設計を行っている。

表-1 土質力学の学習内容

3 年前期 「土質力学 1」 1 単位 土質力学の基本(生成, 物理量, 分類, 締固め)
3 年後期 「土質力学 2」 2 単位 透水, 地中応力(浸透力, 有効応力), 圧密 地中応力(載荷), せん断
4 年前期 「土質力学 3」 1 単位 土 圧
4 年後期 「土質力学 4」 1 単位 支持力, 斜面安定
4 年前期または後期 「土質実験」 3 単位 土粒子密度, 液塑性, 粒度, 締固め, 圧密 三軸 CD 試験, 定圧一面せん断試験

3. 取組み概要

筆者が赴任した平成 12 年度に試しに行った実力試験でたった平均 15 点であった。2 年間土質力学を学習したのに、実力が付いていない。このままでは就職試験や大学編入学試験に対応できないのではないか。継続的な復習および忘れにくい解法が必要と感じた。

そこで、土質力学の全範囲を対象とした実力試験を次年度より正式に導入した。また、4 年生当初には復習試験を実施している。さらに、択一問題、および専門用語・正誤問題のチェックシートの作成を実施している。表-2 にこれらの概要を示す。

4. 実力試験結果の分析

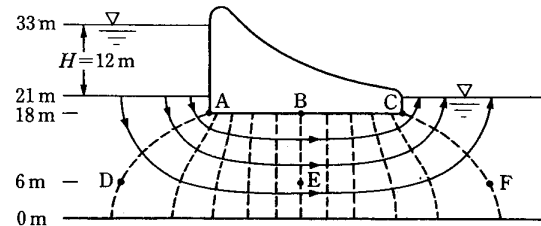
平成 23 年度の実力試験は、文章問題 34 点、計算問題 66 点で 1 月 26 日に 13 回目の授業で実施した。表-3 に試験問題の抜粋を示す。試験問題の 3 分の 1~半分程度が、前年度と同様の問題である。

図-1 に実力試験結果の経時変化を示す。最近は過去問を配布・添削した効果もあり、ここ 4 年間は 60 点前後の平均点が取れるようになっている。とくに、平成

表-2 実力向上の取組み

① 復習試験： 4 年 4 月 60 分, 3 年の範囲(圧密まで) 電卓可, 持込用紙(前日提出, 手書き)
② 実力試験： 4 年 1 月 60 分, 全範囲 電卓可, 持込不可
③ 択一試験：五肢 4 年 各 15 分, 各 5 問, 計 50 問 前期 4 回, 後期 6 回 国家公務員試験の過去問, 電卓不可
④ チェックシート：H21 より 正誤問題, 用語, 用語説明 記述式問題, 分類, 覚えるべき数式
⑤ シラバス： 覚えるべき数式および用語を記載 数式は, 国家Ⅱ種の出題が基準 例) 相対密度, c のある土圧, 安定係数

表-3 平成 23 年度 実力試験問題

【問 1】用語説明 4 題(12) 10.0 括弧内は配点，後ろの数字は平均過転圧，クイックサンド ダイレイタンシー，正規圧密状態
【問 2】用語記述 6 題(12) 6.8 アースダム堤体を浸透する水の自由水面
【問 3】正誤問題 10 題(10) 7.7 締固めの品質管理方法で，最も一般的なのは含水比による方法である。 主働土圧係数は，密な砂質土より緩い砂質土の方が大きい。
【問 4】簡単な計算 6 題(24) 20.9 含水比，透水係数，土被り圧，圧密沈下量 圧密時間，せん断強さ
【問 5】圧密沈下量の計算(11) 9.1 厚さ 4 m の飽和粘土層の含水比が，増加圧力 50 kN/m² によって 50 %から 30 %に変化した。土粒子の密度は 2.65 g/cm³ である。圧密沈下量 S_r および体積圧縮係数 m_v を求めなさい。
【問 6】擁壁土圧と作用位置の計算(10) 7.8 水平な裏込め土上に $q=20$ kN/m² なる等分布荷重が作用する高さ $H=5$ m の鉛直壁がある。ランキンの主働土圧 P_A と作用位置 h_A を求めなさい。土の湿潤単位体積重量 $\gamma=18$ kN/m³，内部摩擦角 $\phi=25^\circ$，粘着力 $c=0$ である。
【問 7】垂直応力とせん断応力の計算(9) 3.5 内部摩擦角 $\phi=25^\circ$，粘着力 $c=0$ の砂が，最小主応力 $\sigma_3=50$ kN/m² にてせん断破壊した。せん断破壊面と水平面のなす角度 θ，せん断破壊面上の垂直応力 σ，せん断応力 τ を求めなさい。
【問 8】透水量と圧力水頭の計算(12) 7.5 コンクリートダムが施工された砂地盤の流線網は図の通りである。この地盤の透水係数 k は 3.50×10^{-3} cm/s である。(1)奥行き 1 m，1 日当たりの透水量 q [m³/d]，(2)B 点での圧力水頭 h_p を求めなさい。 

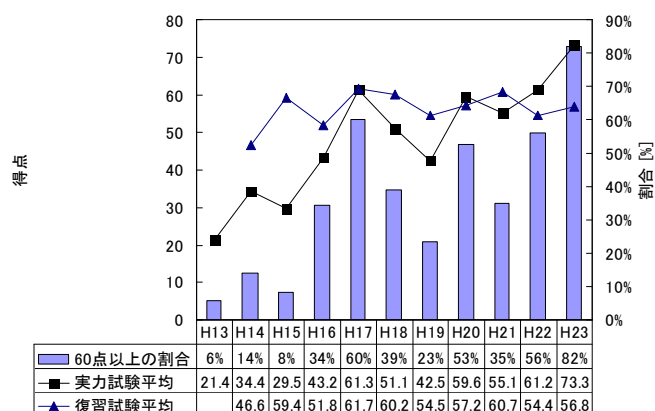


図 1 実力試験結果

23 年度は平均点が 70 点を越え，過去最高となった。一方，復習試験は持込用紙があっても，60 点前後である。

5. 択一試験結果の分析

択一試験では，国家Ⅱ種・Ⅲ種の過去問より出題している。ここ 4 年間の問題分類別の正答率を図-2 に示す。平成 20～22 年度の平均正答率は 40 %前後で大きな変化がみられないが，平成 23 年度は 33 %と大幅に低下した。このことは，今年度の実力試験の平均点が大幅に向上にしていることと反している。実力試験は年 1 回であり過去問を公開しているの，それなりの試験対策が取れる。一方，択一試験は試験範囲が広く，細切れに 10 回に分けて行うので，試験対策がほとんどできないこと，評価割合が低い(1 問 0.5%)ので真摯に取り組まないことが影響していると考えられる。このことは，今年度の実力試験で【問 7】は最近 3 年間の問題にはなかった問題なので正答率 20 %とかなり低く，見

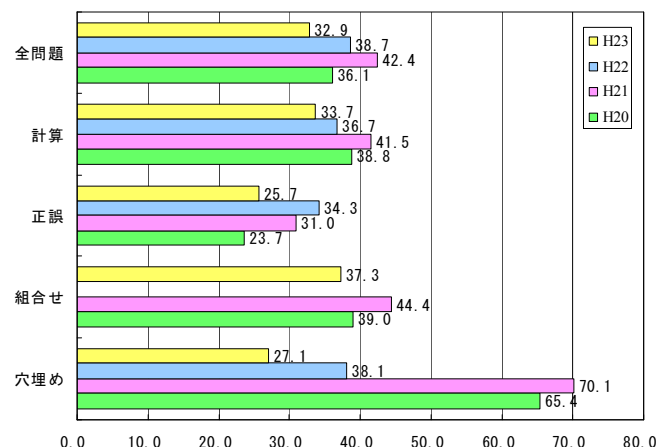


図-2 問題分類別の正答率

たことのない問題になかなか対応できてないことから裏付けられる。

問題分類別にみると、計算問題が得意で、正誤問題は苦手であることがわかる。正誤問題の正答率は平成 22 年度までわずかに向上していた。これには平成 21 年度から作成したチェックシートが寄与していると思われる。一方、実力試験や定期試験の正誤問題の正答率はとても高い(H23 実力試験で 77%)。五肢択一形式の正誤問題の正答率が低いのは、初めて見る問題であることの影響が大きいと考える。

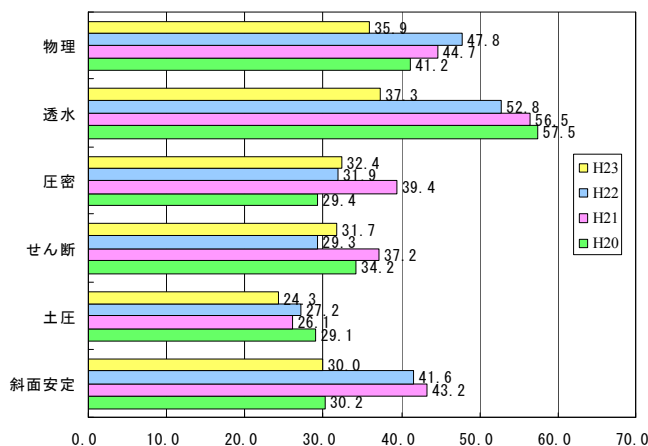


図-3 問題分野別の正答率

6. 公式によらない計算方法

(1) 土の物理量

後述するように、含水比、間げき比といった土の物理量の計算が、公務員試験で多く出題される。それなのに検定教科書ではたったの 1 題、教科書 2) では 2 題と例題が少ない。しかも、解法が公式によるものだけで、公式を使わない解法があることすら触れていない。ちなみに、筆者は赴任した平成 12 年度に高専生のノートを見て、公式を使わない解法があるのを初めて知った。

表-4 に示す定義式による土の物理量の計算方法は、忘れにくい解法である。この解法では土の構成図、表-5 に示す若干のテクニックと定義式のみで解ける。

(2) 擁壁土圧とその作用位置

平成 23 年度の実力試験問題【問 6】を換算高さよる公式を使わずに解くと表-6【別解】のとおりである。この方法によると、手間は掛かるが、覚えるべき式が少ないので忘れにくい方法であり、実力試験ではほと

表-4 土の物理量計算の例

【問題】 ある湿潤土の体積と質量を測定したところ、それぞれ $V=56.52\text{ cm}^3$ 、 $m=101.74\text{ g}$ であり、これの炉乾燥後の質量は $m_s=79.13\text{ g}$ になった。また、土粒子の密度試験の結果は $\rho_s=2.65\text{ g/cm}^3$ であった。この土試料の含水比 w 、湿潤密度 ρ 、乾燥密度 ρ_d 、間げき比 e 、飽和度 S_r を求めよ。

【解答】 公式による方法

含水比

$$w = \frac{m - m_s}{m_s} \times 100 = \frac{101.74 - 79.13}{79.13} \times 100 = 28.6\%$$

乾燥密度 $\rho_d = \frac{m_s}{V} = \frac{79.13}{56.52} = 1.40\text{ g/cm}^3$

間げき比 $e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 = \frac{2.65}{1.40} - 1 = 0.893$

飽和度 $S_r = \frac{w\rho_s}{e\rho_w} = \frac{28.6 \times 2.65}{0.893 \times 1.00} = 84.9\%$

【別解】 定義式による方法

$V[\text{cm}^3]$	$m[\text{g}]$	土の構成図
4.05	A	0 A : 空気
22.61	W	22.61 $= m - m_s$
29.86	S	79.13 W : 水, S : 土粒子
56.52	101.74	

$V_s = \frac{m_s}{\rho_s} = \frac{79.13}{2.65} = 29.86$

$V_a = V - V_s - V_w = 56.52 - 29.86 - 22.61 = 4.05$

間げき比 $e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{22.61 + 4.05}{29.86} = 0.8928$

飽和度

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100 = \frac{22.61}{22.61 + 4.05} \times 100 = 84.81\%$$

表-5 土の物理量計算の解法テクニック

- ① 飽和、地下水面下：空気の体積 $V_a=0$

② 質量 m 、体積 V と不明：
土粒子の体積 $V_s=1\text{ cm}^3$ とおく。

③ 質量 m と含水比 w が既知：
 m 、 w の連立方程式より m_s 、 m_w を求める。

んどの学生が利用している。

ここでいう土圧は、擁壁奥行き 1 m 当たりの力の単位を持つが、表-7 に示すように大学と高校では用語の使い方が異なるので注意が必要である。

公式によらない土圧とその作用位置の計算問題の解き方をまとめると、表-8 のとおりである。主働土圧の作用位置 h_A を求めることは、台形の重心高さを求めることに等しい。

表-6 擁壁土圧とその作用位置の計算の例

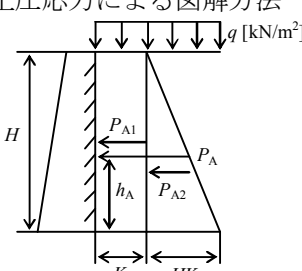
【解答】公式による方法	
主働土圧係数	
$K_A = \tan^2\left(45 - \frac{\phi}{2}\right) = \tan^2\left(45 - \frac{25}{2}\right) = 0.4058$	
換算高さ $\Delta H = \frac{q}{\gamma_t} = \frac{20}{18} = 1.111$	
主働土圧	
$P_A = \frac{\gamma_t}{2} K_A \left\{ (H + \Delta H)^2 - \Delta H^2 \right\}$	
$= \frac{18}{2} \times 0.4058 \times \left\{ (5 + 1.111)^2 - 1.111^2 \right\} = 131.88$	
主働土圧の作用位置	
$h_A = \frac{H}{3} \times \frac{H + 3\Delta H}{H + 2\Delta H} = \frac{5}{3} \times \frac{5 + 3 \times 1.111}{5 + 2 \times 1.111} = 1.923$	
【別解】土圧応力による図解方法	
	
主働土圧係数 $K_A = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} = \frac{1 - \sin 25^\circ}{1 + \sin 25^\circ} = 0.4058$	
主働土圧応力 $\sigma_{hA}(z) = \gamma_t z K_A + q K_A - 2c \sqrt{K_A}$	
$\sigma_{hA}(5) = 18 \times 5 \times 0.4058 + 20 \times 0.4058$	
$= 36.522 + 8.116 = 44.638$	
$P_{A1} = 8.116 \times 5 = 40.58$	
$P_{A2} = \frac{1}{2} \times 36.522 \times 5 = 91.30$	
主働土圧 $P_A = P_{A1} + P_{A2} = 40.58 + 91.30 = 131.88$	
擁壁下端でのモーメントの釣合いより	
$h_A = \frac{1}{P_A} \left(P_{A1} \times \frac{H}{2} + P_{A2} \times \frac{H}{3} \right)$	
$= \frac{1}{131.88} \times \left(40.58 \times \frac{5}{2} + 91.30 \times \frac{5}{3} \right) = 1.923$	

表-7 土圧の意味の違い

教育機関 試験	P [kN/m]	σ_h [kN/m²]
高校 国家Ⅲ種	土圧	土圧応力
大学 国家Ⅱ種	全土圧 土圧の合力	土圧

7. 外部講師による特別授業

履歴書にある得意科目や興味ある科目に「土質力学」を挙げる学生が少ないのは、残念に思っていた。イメージアップとして、今年度初めて「土質力学 4」で外部講師による特別授業を2回行った。

第1回は、平成23年12月22日に市内の地盤系コンサルタントの方に来てもらった。前半の45分間は、「斜面の安定解析と対策工法について」と題して、写真や解説図をふんだんに利用したパワーポイントによる講演であった。後半の45分間は、「模型を使った土木事象の説明」と題して、①地すべり、②擁壁、③地下水と地すべり、④土のう、⑤支持力に関する模型実験を3班のローテーションで行った。これらの模型はすべて講師の方が自ら設計製作されたものであり、住民に対する工事説明会で使われたことである。「土のう」では、トイレットペーパー1枚では2kgの重りを持ちあげられないのに、土を模したストローを束ねて巻くと体重約70kgの人が載っても大丈夫だった。また、地すべりの実験では、土を2種類のサイズの六角ナットで表現するとともに、法枠工やアンカー工の効果を分かりやすく再現していた。

第2回は、平成24年2月2日に島根県砂防課の防災広報担当の方に来てもらった。まず、土石流と地すべりの迫力のある動画を見せてもらった。特別授業開始前のアンケートでは、土砂災害危険箇所と土砂災害警戒区域という行政用語を、一人を除き学生誰もが知らなかった。「島根県の土砂災害対策」と題するパワーポイントによる講演では、島根県は広島県に次いで全国第2位の土砂災害危険箇所数があり、自然災害が非常に多いことを学生は認識した。学生の感想を読むと、二つの特別授業とも大変好評であった。

9. あとがき

松江高専における土質力学の実力向上に関する取り組みを報告した。実力試験の結果をみると、学生の実力が着実に付いているといえる。しかし、択一試験の結果をみると、必ずしも実力が付いているとはいえない。択一問題は、再度同じ問題を出題することによって慣れさせる必要がある。

本研究は、財団法人理工学振興会より平成23年度研究助成を受けた。

参考文献

- 1) 井上和也, 岡二三生, 田村 武ほか著: 土木基礎力学 2 水理学・土質力学の基礎 (検定教科書), 実教出版, 2003.
- 2) 澤 孝平 編著: 地盤工学 第2版, 森北出版, 2009.