注册土木工程师(岩土)执业资格考试讲座
土工结构、边坡与支档结构、基坑与地下工程(下)

陈　轮
(清华大学水利水电工程系　北京市　100084)

提要　针对考生在专业考试复习中最常见的问题,指出在备考阶段要注重打好基础、突出重点、攻克难点、熟悉规范并加强模考练习。根据《注册土木工程师(岩土)执业资格考试专业考试大纲》的要求,该文提出了第五部分"土工结构、边坡与支档结构、基坑与地下工程"专业案例考试必备知识的重点内容,并密切结合规范,给出了模考练习和解答。

关键词　注册工程师　岩土　土工结构　边坡与支档结构　基坑　地下工程

3　边坡稳定分析的必备基础知识

在边坡稳定性分析中,常用极限平衡法,即先假定破坏是沿土体内某一滑裂面滑动,根据土体的静力平衡条件和摩尔—库仑破坏准则计算抗滑动安全系数的大小。

3.1　无粘性土坡的稳定分析

由粗粒土所堆筑的土坡称为无粘性土坡。无粘性土坡的稳定分析比较简单,但这种思路是比较重要和常用的。

由一种土组成、完全在水位以上及完全在水位以下,没有渗透水流作用的土坡,分别称为均质干坡和水下坡。对于这类边坡,由无粘性土组成的只要坡面上的土颗粒在重力作用下能够保持稳定,整个土坡就处于稳定状态。土坡的稳定安全系数为 $F_s = \mathrm{tg}\phi/\mathrm{tg}\alpha$,式中 α 为土坡的坡角。安全系数与土坡的高度 H 无关,与土料的重度 γ 或 γ' (水下)无关。

3.2　土坡稳定分析的直线滑动面法

如果边坡一部分在水位线以下,一部分在水位以上,或者坡顶有附加荷载以及坡面角度改变等,土坡的最危险滑动面可能就不在表面,而在一定深度处发生,滑动面通常呈折线或直线。土坡沿直线滑动面下滑的稳定安全系数 $F_s = \dfrac{W\cos\alpha\,\mathrm{tg}\phi + cL}{W\sin\alpha}$。式中 W 为作用在滑动面上的土重与附加荷载之和;α 为滑动面的倾角;L 为滑动面的长度。

岩石类边坡的破坏形式通常较为复杂。将边坡破坏假设为沿单一剪切面滑动,是一种简单的岩石类边坡稳定分析方法。该方法与上述土坡稳定分析的直线滑动面法相同。

3.3　粘性土坡的稳定分析

粘性土坡中,危险滑动面在土体的内部,常与圆弧面相似。基于圆弧滑动面的边坡稳定分析方法称为圆弧滑动法,属极限平衡法。

1) 整体圆弧滑动法。又称瑞典圆弧法,用于分析均质粘性土边坡的稳定性,只能分析内摩擦角 $\phi = 0$ 时的边坡稳定问题。边坡稳定安全系数为抗滑力矩与滑动力矩之比。

2) 简单圆弧条分法。又称瑞典条分法,仍假定滑动面为一个圆弧面。为分析 $\phi > 0$ 时边坡的稳定性,将土坡分成若干个条块,但只考虑作用在条块上的重力、滑弧面上的法向力和切向抗滑力,忽略条块侧面法向力和切向力的作用。边坡稳定安全系数可以直接求解。

3) 简化毕肖普法。简化毕肖普法仍假设滑动面为圆弧,将滑动土体分为若干个条块。在进行第 i 个条块的受力分析时,考虑条块侧面法向力的作用,但忽略切向力的作用。简化毕肖普法的安全系数计算公式中,F_s 不是显函数,需用迭代法求解。

4) 普遍条分法。普遍条分法又称简布法,其特点是对条块间正压力和切向力都给予考虑,滑动面不必是圆弧而可以是任何滑动面。普遍条分

作者简介:陈轮,男,1963 年生,博士、副教授,主要从事土力学、基础工程的教学以及岩土工程方面的研究。

收稿日期:2003 - 05 - 12

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

法的边坡稳定安全系数需用迭代法求解。

4 案例分析考试模考题和解答

在“土工结构、边坡与支挡结构、基坑与地下工程”这一科目的案例分析考试复习中,除了静止土压力计算方法,朗肯土压力理论和库仑土压力理论、边坡稳定分析和基坑、边坡渗透稳定分析的基本原理和计算方法以及支挡、支护结构的计算分析以外,考生还必须熟练掌握相关规范、规程的计算方法。例如,《建筑基坑支护技术规程》(JGJ120 - 99)[1](以下简称 JGJ120 - 99)中,考生应熟练掌握水平荷载标准值和水平抗力标准值的计算,这是正确进行各种支护结构计算的基础;排桩和地下连续墙、水泥土墙以及土钉墙的设计计算;常用排水、降水的计算;对于《建筑地基基础设计规范》(GB50007 - 2002)[2](以下简称 GB50007 - 2002),这一科目应熟练掌握第 6.6 节“土质边坡与重力式挡墙”的计算;对于《建筑边坡工程技术规范》(GB50330 - 2002)[3](以下简称 GB50330 - 2002),应熟练掌握第 6 章“边坡支防结构上的侧向岩土压力”的计算和第 10 章“重力式挡墙”的设计计算等。在考试中应根据题意选用相应的规范、规程。要注意上述 JGJ120 - 99、GB50007 - 2002 和 GB50330 - 2002 三个规范、规程中有关规定的异同,如计算公式中符号的含义,水土合算与分算的应用条件等。

以下对本科目中几个很基本的问题,给出了模考题和解答。考生应当熟练掌握这些基本内容。

模考题 1. 某地基土层剖面如图 1,砂层为承压水层。由测压管水位知承压水头高出砂层顶面 5m。现在粘土层中开挖深度为 4m 的基坑。若要基坑底板不致发生流土,水深 h 至少应为:

(A) 0m; (B) 1.0m; (C) 1.4m; (D) 3.0m。

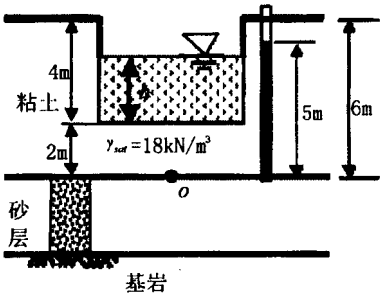

图 1 某地基土层剖面

题解:

方法一,按有效应力原理计算。当粘土层底部 O 点有效应力 σ 为 0 时,粘土层发生流土破坏。O 点的总应力 σ 和孔隙水压力 u:

$$\sigma = h\gamma_w + (6 - 4)\gamma_{sat} = h\gamma_w + 2\gamma_{sat}$$

$$u = 5\gamma_w$$

当流土发生时,O 点处有效应力 $\sigma' = 0$:

$$\sigma' = \sigma - u = 0$$

$$h\gamma_w + 2\gamma_{sat} - 5\gamma_w = 0$$

$$h = \frac{5\gamma_w - 2\gamma_{sat}}{\gamma_w} = \frac{5 \times 10 - 2 \times 18}{10} = 1.4(\text{m})$$

方法二,按渗透力计算。当渗透力 $j = \gamma'$ 时,土层发生流土破坏。粘土层的渗透力 j 为:

$$j = i\gamma_w = \frac{\Delta h}{\Delta l}\gamma_w = \frac{5 - h - 2}{6 - 4}\gamma_w$$

因 $j = \gamma'$,$\gamma' = 8\text{kN/m}^3$,解得 $h = 1.4\text{m}$。故答案选(C)。

练习题:如果保持基坑底面水深为 0,则承压水头 H 为多高时即可发生流土?(答案 3.6m)

模考题 2. 某重力式挡土墙如图 2,高 h = 4.0m,$\varepsilon = 10°$,$\beta = 5°$。墙后回填砂土,$c = 0$,$\varphi = 30°$,$\gamma = 18\text{kN/m}^3$,墙背与填土间的摩擦角为 δ。挡土墙重度 $\gamma_c = 24\text{kN/m}^3$。土与挡土墙基底的摩擦系数 μ 为 0.5,问:

1) 当 $\delta = \varphi/2$ 时,作用于墙背上的总主动土压力为下列何值?

(A) 38.6kN; (B) 58.3kN;

(C) 65.4kN; (D) 72.5kN。

2) 当 $\delta = \varphi/2$ 时,挡土墙是否满足抗滑移稳定性要求?

(A) 1.46 > 1.3,满足抗滑移稳定性要求;

(B) 1.24 < 1.3,不满足抗滑移稳定性要求;

(C) 1.53 > 1.3,满足抗滑移稳定性要求;

(D) 1.53 > 1.4,满足抗滑移稳定性要求。

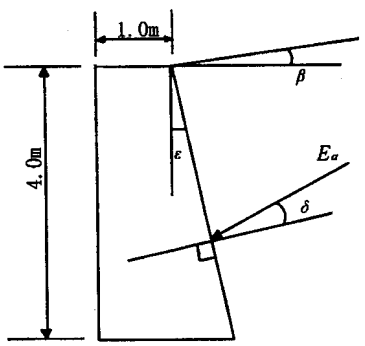

图 2 重力式挡土墙示意

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

题解:

由 GB50007 - 2002 附录 L,得 $\delta = \varphi/2 = 15°$ 时,主动土压力系数 $k_a = 0.405$,按 GB50007 - 2002 公式 6.6.3 - 1 计算,其中 $\Psi_c = 1.0$。则挡土墙每延米上的主动土压力为::

$$E_a = \Psi_c \gamma h^2 k_a/2 = 58.3\text{kN}$$

根据 GB50007 - 2002 第 6.6.5 条,抗滑移稳定性应按下式计算(即阻滑力与滑动力之比大于或等于 1.3,式中符号参见 GB50007 - 2002 中式 6.6.5 - 1 符号说明):

$$\frac{(G_n + E_{an})\mu}{E_{at} - G_t} \geq 1.3$$

$$G_n = G\cos\alpha_0, \quad G_t = G\sin\alpha_0$$

$$E_{at} = E_a \sin(\alpha - \alpha_0 - \delta)$$

$$E_{an} = E_a \cos(\alpha - \alpha_0 - \delta)$$

本题中挡土墙基底的倾角 $\alpha_0 = 0$;挡土墙墙背的倾角 $\alpha = 90° - \varepsilon = 80°$;$\delta = 15°$。挡土墙每延米自重:

$$G = \frac{1}{2}(1 + 1 + 4\text{tg}10°) \times 4 \times 1 \times 24 = 129.9(\text{kN})$$

可求得:$G_n = G = 129.9\text{kN}$, $G_t = 0$,而

$$E_{at} = E_a \sin 65° = 52.84\text{kN}$$

$$E_{an} = E_a \cos 65° = 24.64\text{kN}$$

代入公式求得抗滑移稳定安全系数为:

$$\frac{(G_n + E_{an})\mu}{E_{at} - G_t} = \frac{(129.9 + 24.64) \times 0.5}{52.84}$$

$$= 1.46 > 1.3$$

挡土墙满足抗滑移稳定性的要求。答案为(A)。作为练习,考生可对挡土墙的抗倾覆稳定性进行验算。

考生还应当按照 GB50330 - 2002 第 6 章"边坡支护结构上的侧向岩土压力"和第 10 章"重力式挡墙"的有关规定进行比较,以利于熟练掌握相关的内容。

模考题 3. 某一长条形基坑开挖深度 8m,围护墙采用 600mm 厚钢筋混凝土地下连续墙,墙体深度为 18.0m,支撑为一道 Φ500 ×11 钢管支撑,支撑平面间距为 5m,支撑轴线位于地面以下 2.0m。地质条件为:地层为细砂,地下水位以上砂的天然重度 $\gamma = 18\text{kN/m}^3$,地下水位以下砂的饱和重度 $\gamma_{sat} = 20\text{kN/m}^3$。$\varphi = 30°$, $c = 10\text{kPa}$,地下水位在地面以下 3m,不考虑地面荷载。按 JGJ120 - 99 计算下列各项:

1) 每延米地下连续墙水平荷载 E_{ak} 为:

(A) 211kN;　　(B) 1433kN;

(C) 1762kN;　　(D) 4569kN。

2) 每延米地下连续墙水平抗力 E_{pk} 为:

(A) 279kN;　　(B) 1514kN;

(C) 1278kN;　　(D) 2346kN。

题解:

按 JGJ120 - 99 第 3.4 节水平荷载标准值 e_{ajk} (主动土压力)和第 3.5 节水平抗力标准值 e_{pjk} (被动土压力)的规定计算土压力。

首先画一简图,如图 3。将基坑支护结构的主要尺寸和土层的主要参数,以及计算过程的中间数据和计算结果标注在图上。这样有助于减少计算错误,且便于对计算过程进行校核。花一点时间是很有必要的。

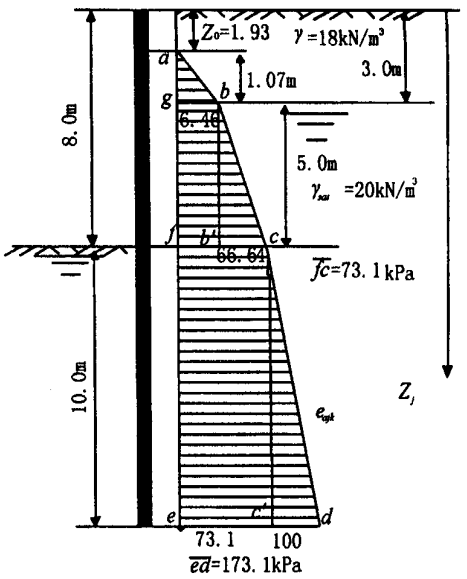

图 3　基坑计算示意

按 JGJ120 - 99 计算水平荷载标准值 e_{ajk} 和水平抗力标准值 e_{pjk} 时,即使为水土分算法,抗剪强度指标也使用三轴固结不排水试验的标准值 c_{ik} 和 φ_{ik},而不是有效应力强度指标。本题中所给的 c 和 φ,视为 c_{ik} 和 φ_{ik}。

1) 地下连续墙水平荷载 E_{ak}

首先求水平荷载标准值 e_{ajk} 的分布,然后再求其合力。主动土压力系数 $K_{ai} = 0.333$;填土 $c \neq 0$,可求得土压力为 0 的墙顶范围 $Z_0 = 1.93\text{m}$;水平荷载标准值 e_{ajk},在地下水位以上,按 JGJ120 - 99 公式 3.4.1 - 1 计算。在地下水位处,g 点的主动土压力分布值如图 3 中 $\overline{gb}$ 所示,为:

$$e_{ajk} = \sigma_{ajk} K_{ai} - 2c_{ik}\sqrt{K_{ai}} = 6.46\text{kPa}$$

按 JGJ120 - 99 公式计算水平荷载标准值,当

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

计算点位于基坑开挖面以下时,竖向自重应力按开挖面以上土的加权平均天然重度计算,不再随深度的增加而增加(参见 JGJ120 - 99 中 3.4.2 节)。因此水平荷载标准值的分布图在基坑开挖面处通常会有转折,需计算该点的水平荷载标准值$\overline{fc}$。该点位于地下水位以下,使用 JGJ120 - 99 的3.4.1 - 2式计算。注意在地下水位以下,求 σ_{ajk} 仍需直接用饱和重度 γ_{sat} 代入公式计算。

$$\sigma_{ajk} = \sum(\gamma_i Z_i) = 154\text{kPa}$$

$$Z_j - h_{wa} = 8 - 3 = 5\text{m}$$

$$\eta_{wa} = 1,(h_w \leq h)$$

$$m_i - h_{wa} = Z_j - h_{wa} = 5\text{m},(Z_j < h)$$

f 点的水平荷载标准值,如图中线段$\overline{fc}$所示。f 点的主动土压力分布为:

$$e_{ajk} = \sigma_{ajk} K_{ai} - 2c_{ik}\sqrt{K_{ai}} + [(Z_j - h_{wa}) - (m_j - h_{wa})\eta_{wa} K_{ai}]\gamma_w = 73.1\text{kPa}$$

对于地下连续墙底部 e 点的水平荷载标准值,因该点位于基坑开挖底面以下,σ_{ajk} 需取基坑开挖底面处的竖向压力,即 154kPa。

$$\eta_{wa} = 1,(h_{wa} \leq h)$$

$$m_j - h_{wa} = h - h_{wa},(z_j \geq h)$$

$$Z_j - h_{wa} = 18 - 3 = 15\text{m}$$

可得 e 点的水平荷载标准值,如图 3 中$\overline{ed}$所示:

$$e_{ajk} = \sigma_{ajk} K_{ai} - 2c_{ik}\sqrt{K_{ai}} + [(z_j - h_{wa}) - (m_j - h_{wa})\eta_{wa} K_{ai}]\gamma_w = 173.1\text{kPa}$$

每延米主动土压力合力为 e_{ajk} 的分布面积即:

$$E_{ak} = \square agb + \square gbb'f + \square bcb' + \square fcc'e + \square cdc' = 1433\text{kN}$$

第 1)题答案为(B)。如果以为是水土分算,便在套用 JGJ120 - 99 公式 3.4.1 - 2 计算地下水位以下水平荷载标准值 e_{ajk} 中的 σ_{ajk} 时用有效重度 γ',就会得到错误答案;如果在计算地下连续墙底部处水平荷载标准值 e_{ajk} 时,自重竖向应力采用该点的实际自重应力,而不是按 JGJ120 - 99 规定取用基坑开挖底面处的竖向压力(即 154kPa),就会得到错误的答案。考生需注意 JGJ120 - 99 计算中的规定及其与朗肯土压力理论的区别。

2)地下连续墙水平抗力 E_{pk}

首先求水平抗力标准值 e_{pjk} 的分布,然后求其合力。被动土压力系数为 $K_{pi} = 3.00$,水平抗力标准值 e_{pjk} 按 JGJ120 - 99 第 3.5 节计算。水土分算的计算公式为式 3.5.1 - 1. 将各已知条件代入,得地下连续墙底部 d 点的被动土压力标准值,如图 4 中$\overline{bd}$所示:

$$e_{pjk} = \sigma_{pjk} K_{pi} + 2c_{ik}\sqrt{K_{pi}} + (Z_j - h_{wp})(1 - K_{pi})\gamma_w = 434.6\text{kPa}$$

将被动土压力计算的中间数据和计算结构标注在图 4 上。

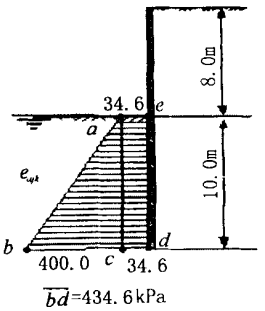

图 4 被动土压力计算

每延米地下连续墙的水平抗力标准值的合力 E_{pk} 由 e_{pjk} 的分布总面积即梯形 $abde$ 的面积求得(h 为被动土压力的分布高度,$h = 10\text{m}$):

$$E_{pk} = \frac{1}{2}\overline{bc}h + \overline{cd}h = 2346\text{kN}$$

第 2)题答案为(D)。如以为是水土分算,便在套用 JGJ120 - 99 公式 3.5.1 - 1 计算水平抗力标准值 e_{pjk} 中的 σ_{pjk} 时用有效重度 γ',就会得到错误答案。套用该公式时,须直接以饱和重度 γ_{sat} 值代入。

得到水平荷载标准值和水平抗力标准值后,进一步可按 JGJ120 - 99 第 4.1.1 条第 2 款的规定及式 4.1.1 - 3 求支撑的轴力 T_{cl}(每延米为 90.2kN,每根支撑负担 5m,故每根支撑的轴力为 451kN);可根据剪力为 0 的条件求出截面最大弯矩计算值 M_c(每延米 260.7kNm),然后由 JGJ120 - 99 式 4.2.3 - 1 得截面最大弯矩设计值 M(为每延米 325.9kNm);还可根据 JGJ120 - 99 第 4.1.1 条第 1 款之式 4.1.1 - 1 求得悬臂式支护结构嵌固深度设计值 h_d,根据第 4.1.1 条第 2 款之式 4.1.1 - 4 求得单层支点支护结构嵌固深度设计值 h_d,并按 JGJ120 - 99 第 5 章"水泥土墙"给出的公式,对基坑支护结构水泥土墙进行设计计算等。考生可以自己熟悉一下这些公式的应用。

参考文献

1 JGJ120 - 99 建筑基坑支护技术规程
2 GB50007 - 2002 建筑地基基础设计规范
3 GB50330 - 2002 建筑边坡工程技术规范

(续完)

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net