



港口工程中非均质土地基的承载力

王娜娜, 罗文华, 杨继超

(中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 湖北 武汉 430071)

摘要: 港口工程中非均质土地基的工程越来越常见。针对非均质土地基的承载力计算, 通过对 JTS 147-1—2010《港口工程地基规范》中的计算公式及参数进行分析, 从理论假定和计算模式上与原规范 (JTJ 250—1998) 的相应方法进行对比。通过工程实例计算, 着重研究了上层硬土层厚度在两种方法计算中对结果的影响, 得出的结论可为相关工程提供参考。

关键词: 港口工程; 地基承载力; 非均质土地基; 对数螺旋线条分法

中图分类号: TU 431

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)06-0162-06

Bearing capacity of heterogeneous soil foundation in port engineering

WANG Na-na, LUO Wen-hua, YANG Ji-chao

(CCCC Second Harbor Consultants Co., Ltd., Wuhan 430071, China)

Abstract: The heterogeneous soil foundation is more and more commonly used in the port engineering. In view of the calculation of the bearing capacity of heterogeneous soil, we compare the methods with the original code (JTJ 250—1998) from the theoretical assumptions and calculation model to analyze the calculation formula and parameter in the *Code for Soil Foundation of Port Engineering* (JTS 147-1—2010). The influence of the hard upper soil layer on the calculations results by two methods is studied based on engineering examples. The conclusion can provide reference for related projects.

Keywords: port engineering; foundation bearing capacity; non-isotropic soil; logarithmic spiral line slice method

地基承载力是港口工程设计的控制性参数, 是地基土极限承载能力与容许变形的综合反映。对地基承载力的计算和把握、结构设计的安全与经济等问题, 是工程师面临的基本课题。

2010版《港口工程地基规范》与1998版规范相比, 对非均质土地基承载力的计算方法有较大调整。在1998版规范中, 计算非均质土地基承载力时, 需将有效深度内不同厚度土层的加权平均强度指标等效为均质土地基进行计算。但不同土层的强度指标相差较大或边载分布不均时, 计算结果能否正确反映工程地基的实际承载能力尚不清楚。在2010版规范中, 对

非均质土地基、非均布边载的一般情况, 采用了假定破坏面为对数螺旋滑动线的条分法计算, 较为合理地考虑了非均质土地基、非均布边载的影响。

由于2010版规范的计算公式较原方法的公式有较大变化, 且公式本身较为复杂, 设计人员在计算时, 对地基承载力的计算结果及影响因素很难有直观认识, 因此本文对比了两种算法的理论假定和计算的模式, 并通过工程实例的计算结果, 着重分析“上硬下软”地基中上层土体厚度对抗力分项系数和最大影响深度的影响, 为非均质土地基承载力计算提供参考。

收稿日期: 2014-10-03

作者简介: 王娜娜 (1987—), 女, 硕士, 助理工程师, 从事港口工程结构设计及研究工作。

1 两种地基承载力计算方法

1.1 1998 版规范地基承载力计算方法

1998 版规范地基承载力按式(1)~(5)验算。

$$\gamma_R = F'_k / V'_d \quad (1)$$

式中: V'_d 为作用在抛石基床底面合力设计值; γ_R 为抗力分项系数。

1998 版规范的地基承载力计算方法是修正的汉森公式, 对于有抛石基床的条形基础, $\varphi > 0$ 时, 该公式的 Sokolovskii 的数值解见式(2)~(5)。

$$F'_k = B_e (0.5\rho_k g B_e N_r + q_k N_q + c_k N_c) \quad (2)$$

$$N_c = \left\{ \exp \left[\left(\frac{\pi}{2} + 2\alpha - \varphi_k \right) \tan \varphi_k \right] \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi_k}{2} \right) \cdot \frac{1 + \sin \varphi_k \sin (2\alpha - \varphi_k)}{1 + \sin \varphi_k} - 1 \right\} \tan \varphi_k \quad (3)$$

$$N_q = N_c \tan \varphi_k + 1 \quad (4)$$

$$N_\gamma \approx 1.25 \{ (N_q + 0.28 + \tan \delta') \cdot$$

$$\tan [\varphi_k - 0.72\delta' (0.9455 + 0.55 \tan \delta')] \} \cdot$$

$$\left\{ 1 + \frac{1}{\sqrt{1 + 0.8[\tan \varphi_k - 0.7(1 - \tan \delta')] + (\tan \varphi_k - \tan \delta')\lambda}} \right\} \quad (5)$$

式中: ρ_k 为计算面以下土的密度; $\tan \delta'$ 为作用在抛石基床底面合力的倾斜率; φ_k 为土体的内摩擦角标准值; 计算参数 $\lambda = \rho_k g B_e / (c_k + q_k \tan \varphi_k)$ 。

当受力层由多层土组成、各土层的抗剪强度指标相差不大且边载变化不大时, 可采用加权平均的强度指标和密度。受力层的最大深度可用式(6)~(7)表示。

$$Z_{\max} = B_e e^{\varepsilon \tan \varphi_k} (\sin \varepsilon) e^{-\frac{0.87\lambda^{0.75}}{4.8 + \lambda^{0.75}}} \quad (6)$$

$$\varepsilon = \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_k}{2} - \frac{\delta'}{2} - \frac{1}{2} \sin^{-1} \left(\frac{\sin \delta'}{\sin \varphi_k} \right) \quad (7)$$

式中: Z_{\max} 为受力层最大深度; $\overline{\varphi_k}$ 为以弧度表示的 φ_k ; $\overline{\delta'}$ 为以弧度表示的 δ' 。规范指出若各土层的抗剪强度指标相差较大时, 仍用该方法计算 F'_k , 但 γ_R 宜取较高值^[1]。

1.2 2010 版规范地基承载力计算方法

2010 版规范将地基承载力的竖向合力统一成

条分法的表达式, 将计算宽度分成 M 个小区间 $[b_{j-1}, b_j]$ ($j=0, 1, 2, \dots, M$), 见图 1。

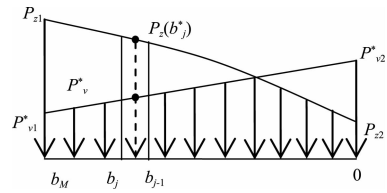


图 1 地基承载力竖向合力计算

$$b_j = j\Delta B (j=0, 1, 2, \dots, M) \quad (8)$$

$$\Delta B = B_e / M \quad (9)$$

式中: b_j 为小区间分点坐标, $b_0 = 0$; B_e 为计算面宽度。

地基承载力竖向合力标准值按下式计算:

$$F_k = \sum_{j=1}^M \min \{ p_{zj}, p_{vj}^* \} \Delta B \quad (10)$$

$$p_{vj}^* = K^* p_{vj} \quad (11)$$

$$K^* = P_z / V_d \quad (12)$$

$$P_z = \sum_{j=1}^M p_{zj} \Delta B \quad (13)$$

式中: F_k 为地基承载力竖向合力标准值; p_{zj} 为 $[b_{j-1}, b_j]$ 极限承载力竖向应力平均值; p_{vj} 为作用于 $[b_{j-1}, b_j]$ 竖向应力的平均值; P_z 为计算面上极限承载力竖向合力的标准值; V_d 为作用于计算面上竖向合力的设计值。

其中计算面内 p_{zj} 可采用对数螺旋滑动面的条分法计算, 见图 2。

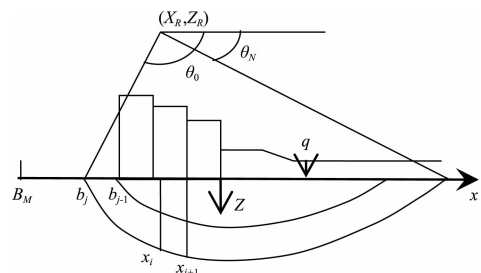


图 2 极限承载力竖向应力计算

具体的承载力计算公式见式(14)~(20)。

$$p_{zj} = \left\{ \sum_i [w_i (x_i^* - x_R) + c_{Fi} (h_i^* - Z_R) (x_i - x_{i-1}) - (x_i^* - x_R) (h_i - h_{i-1})] + \sum_{i=1}^{j-1} (b_i^* - x_R + Z_R \tan \delta) p_{zi} \Delta B \right\} / (x_R - b_j^* - Z_R \tan \delta) / \Delta B \quad (j = 1, 2, \dots, M) \quad (14)$$

$$b_j^* = -0.5(b_{j-1} + b_j) \quad (15)$$

$$\begin{cases} x_i^* = 0.5(x_{i+1} + x_i) \\ h_i^* = 0.5(h_{i+1} + h_i) \end{cases} \quad i=0,1,2,\dots \quad (16)$$

$$\begin{cases} x_i - x_R = R_i \exp(-F_{\varphi_i} \theta_i) \cos \theta_i \\ h_i - z_R = R_i \exp(-F_{\varphi_i} \theta_i) \sin \theta_i \\ R_{i+1} = R_i \exp[(F_{\varphi_{i+1}} - F_{\varphi_i}) \theta_i] \\ \theta_i = \theta_0 - i \Delta \theta \end{cases} \quad i=0,1,2,\dots \quad (17)$$

$$R_0 = \sqrt{(x_R + b_j)^2 + z_R^2} \exp(F_{\varphi_0} \theta_0) \quad (18)$$

$$\tan \theta_0 = z_R / (x_R + b_j) \quad (19)$$

$$\begin{cases} c_{Fi} = c_{ki} / (1.09 + 0.06 \tan \delta) \\ F_{\varphi_i} = \tan \varphi_{ki} / (1.05 + 0.06 \tan \delta) \end{cases} \quad (20)$$

式中： w_i 为包括边载 q_i 在内的第 i 土条的重力标准值； x_i^* 、 h_i^* 为第 i 土条滑动面上中点坐标值； x_R 、 z_R 是使 p_{zj} 为极小值的对数螺旋面极点水平、垂直坐标值； x_i 、 h_i 为第 i 土条滑动面上坐标值， $x_0 = -b_j$ ， $h_0 = 0$ ； θ_i 为滑动面第 i 、 $i+1$ 土条分点和螺旋面极点的连线与水平线的夹角； $\Delta\theta$ 表征第 i 土条宽度的极角增量； c_{ki} 为第 i 土条滑动面上的粘聚力标准值； φ_{ki} 为第 i 土条滑动面上的内摩擦角标准值； δ 为作用于计算面上的合力方向与竖向的夹角^[2]。

由于2010版规范公式较复杂，手算难以得出结果，设计时常用程序计算，这里简析规范公式的数学含义。 $w_i(x_i^* - x_R)$ 为边载及土条自重对对数螺旋线极点的力矩； $c_{Fi}[(h_i^* - z_R)(x_i - x_{i-1}) - (x_i^* - x_R)(h_i - h_{i-1})]$ 为土条滑动面上粘聚力(对数螺旋线的切线方向)对极点的力矩； $(b_i^* - x_R + z_R \tan \delta)p_{zi} \Delta B$ 为第 i 条分区间上地基极限承载力对极点取矩，该处不仅考虑了竖向 $p_{zi} \Delta B$ 对极点的力矩，也考虑了水平向极限承载力的作用。式(14)即由力矩平衡得到的第 j 个小区间上的地基极限承载力，式(17)为对数螺旋线方程。

2 两种方法的理论及计算的比较

2.1 基本理论假定的区别

2.1.1 基础下方破坏区假定

两种方法均是基于土体极限平衡理论推导而来。1998版规范为汉森公式的基本假定^[4]，即宏

观上，根据受力状态将承载地基划分为3个区域，I区为弹性区，II区及III区为塑性极限平衡区；2010版规范地基极限承载力是采用微观分析的思路，按土体极限平衡理论建立了滑动面上任意一点的平衡微分方程，使得滑动面上每点均满足莫尔-库仑屈服条件，并未采用经典分区理论。

2.1.2 滑动面的假定

1998版规范的滑动面由3段组成，I区圆弧段、II区的对数螺旋面及III区被动破裂面；2010版规范的滑动面统一为对数螺旋面^[3]。

2.1.3 破坏模式的假定

1998版规范的抗力分项系数可以按式(1)较为直观地理解为计算面上地基极限承载力与设计竖向荷载的比值；2010版规范的抗力分项系数的概念按式(10)~(13)可以理解为单向、场破坏，即对计算宽度范围内一簇(M 个)滑动面上极限承载力与设计竖向荷载的综合反应。确定地基承载力时要综合考虑极限荷载和 K^* 倍的设计荷载，并取两者的较小值，从而反映的地基为单侧破坏。

2.2 计算过程中的区别

2.2.1 最大影响深度的区别

最大影响深度即塑性开展区的最大深度，1998版规范对非均质土地基，采用了土体指标加权平均的方法，将地基近似看作均质地基，再通过式(6)计算得到；2010版规范的最大深度可以认为是第 M 个对数螺旋面的最深处，成层土体并不会改变对数螺旋面的形状^[5]，因此可以直接计算得到。

2.2.2 边载的考虑

两种方法均将基础埋深等效成边载考虑，故滑动面不会穿过基础埋深层，相当于减小了滑动面长度作为安全储备。

在非均布边载情况下，采用1998版规范计算时，设计者往往根据经验适当预估边载，例如将最大边载乘以一个小于1的折减系数，但最终的计算结果是偏安全还是偏危险，由于理论未涉及，结果不得而知；2010版规范由于按条分法计算，可将一定区域内的不均匀边载划分成若干小的

均布荷载, 计算中分别计入, 从而避免了人为假定, 相应提高了计算精度。

2.2.3 土体指标的运用

1998 版规范直接选用土体强度指标的标准值进行计算, 而 2010 版规范(式(20))对土体指标略为调整。据规范条文说明可知, 与 1998 版规范相比, 对数螺旋面的条分法计算的极限荷载偏大, 根据大量均质土的工程实例计算, 对该法进行调整校正, 使之在均质土情况下两种方法结果基本一致。调整校正的手段就是土体强度指标关联了设计荷载的倾斜率, 并进行了折减, 如式(20)。

若按 $0 \leq \tan\delta \leq 1$ 考虑, 则 c_{Fi} 介于 $(c_k/1.15, c_k/1.09)$, F_{φ_i} 介于 $(\tan\varphi_k/1.11, \tan\varphi_k/1.05)$ 。然后再将校正过的指标及方法运用至非均质土体的计算中, 这种对比运用的方式在工程中也经常用到。

3 计算结果对比

如图 3, 某港重力式沉箱码头, 码头顶高程 5.0 m, 基顶高程 -15.8 m, 基底高程 -22.5 m, 沉箱宽度 15.05 m, 前后趾各 1 m 宽。基床下方第 1 层为 3.2 m 厚②₂黏土, 其下为③₂粉质黏土, 土体参数见表 1。

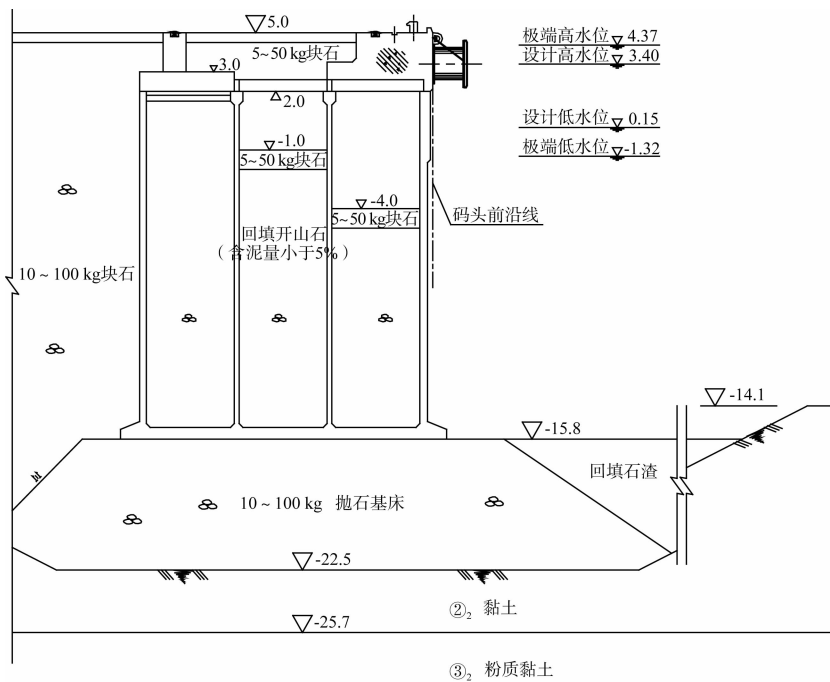


图 3 某港重力式码头断面 (高程: m)

表 1 地质参数

土层编号	土名	密度/ (t·m ⁻³)	固结快剪	
			粘聚力/kPa	摩擦角/(°)
② ₂	黏土	19.2	18.5	17.6
③ ₂	粉质黏土	19.5	38.9	19.7

由表 1 可知, 该地基受力层的两层土体抗剪强度指标相差较大, 为非均质成层土, 利用《港口工程地基计算系统 (2008 版)》对该工程分别按两规范进行承载力计算, 其中 1998 版规范计算得 $\gamma_R = 2.834$, $Z_{\max} = 10.31$ m, 2010 版规范计算得到的抗力分项系数 $\gamma_R = 2.553$, $Z_{\max} = 11.37$ m,

需要指出的是, 2010 版规范计算的抗力分项系数 $\gamma_R = 2.553$ 是按式(8)~(9)将 B_e 分成 M 个区间 ($M = 20$), 每个区间都对应一个对数螺旋滑动面, 该值是一簇对数螺旋滑动面上计算结果的综合反映, 其求解应满足式(10)~(13)以保证地基处处不破坏。而最大影响深度 Z_{\max} 为 M 个滑动面的最大深度。图 4 中的 2010 版规范下的最大滑动面仅为第 M 个区间 ($M = 20$) 的滑动面, 该区间的抗力分项系数 $\gamma_j = 3.407$, 该值即为式(12)的 K^* 。

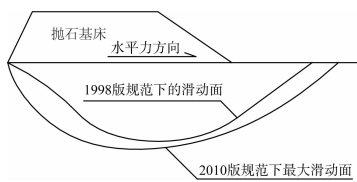


图4 2种计算方法的滑动面

本工程基床下方上层土层为相对软弱的②₂黏土，下层是③₂粉质黏土。而某些工程中会出现上层土体较好、下层较差的情况，往往遇到这种上硬下软的情况时，设计人员要格外谨慎。因此这里将2层土体指标对换，以分析计算结果的变化。

土体指标对换后，2010版规范计算得到的抗力分项系数 $\gamma_R = 2.456$ 、 $Z_{max} = 12.633$ m，1998版规范计算的 $\gamma_R = 2.380$ 、 $Z_{max} = 9.485$ m。计算结果表明，土体指标改变，2010版规范的抗力分项系数下降了3.8%，1998版规范下降了16%。对于本工程实例，在两层地基的模式下，2010版规范的计算结果与1998版规范对比变化较小。

4 计算因素分析

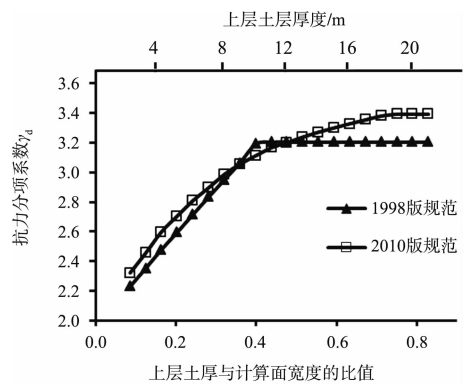
通过假定两组工程参数，着重对设计人员关心的“上硬下软”的非均质土体地基承载力计算结果进行分析，以求找到上层硬土层厚度与基底计算宽度的比值与计算结果的关系。

图3所示的重力式码头，假定基床下方的两层土体分别为指标较好的③₂粉质黏土和指标较差的②₂黏土。通过改变使用荷载得到“一小一大”2组（算例1、算例2）基床应力数据（表2）。以表2中应力数据为基础，通过逐渐增加上层硬土层厚度（从2.2 m递增至21.2 m），分析该参数对计算结果的影响。

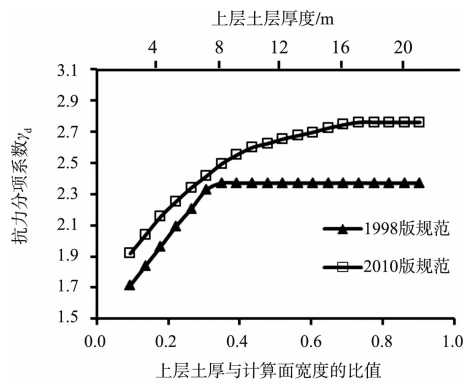
表2 工程算例基床应力

算例	基顶最大应力 /kPa	基顶最小应力 /kPa	基底最大应力 /kPa	基底最小应力 /kPa	基顶合力角 $\delta/(^\circ)$	计算面宽度/m
1	491.53	101.78	342.16	123.98	12.85	25.61
2	613.16	15.38	410.24	75.61	15.19	23.45

通过按两规范方法计算，得到了2个算例在不同硬土层厚度下的计算结果（图5~6）。

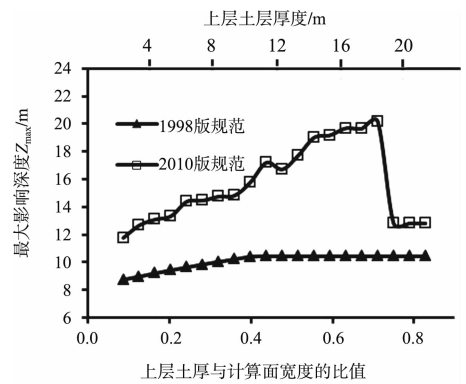


a) 算例1

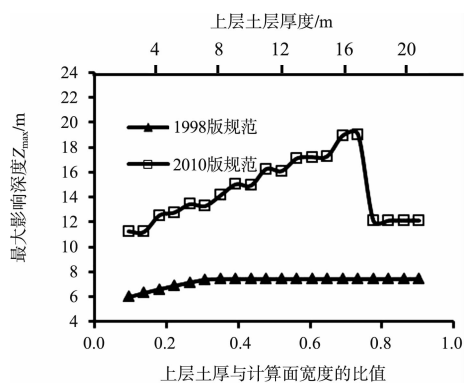


b) 算例2

图5 抗力分项系数的对比曲线



a) 算例1



b) 算例2

图6 最大影响深度的对比曲线

由图5的算例1可见,2种算法的计算结果在上层硬土厚度较薄时,吻合较好,误差小于5%,随着硬土层厚度的增加,2个规范计算的抗力分项系数都增大,但当上层硬土层厚度增大到1998版规范按均质地基计算的 Z_{\max} 时,增加硬土层厚度对1998版规范的 γ_R 无影响,而2010版规范的 γ_R 将继续增大,直到一个恒定值,2种算法的最大恒值误差为6%;由算例2可知,硬土层厚度小于1998版规范的 Z_{\max} 时,2种算法结果误差在4%~11%,当硬土层厚度增大后,2种算法误差在5%~16%。

由此可见,当硬土层厚度较薄时,2种算法的抗力分项系数结果大致相当;特别是基床应力较小时,2种算法误差更小;基床应力越大,计算的 γ_R 越小,达到最大恒值所对应的上层硬土厚度越小,当上层硬土层厚度大于1998版规范的 Z_{\max} 时,1998版规范计算结果不再增大,而2010版规范得到的结果仍会增大。这主要是由于2种算法所对应的 Z_{\max} 不同,相应结果见图6。

由图6可知,1998版规范的 Z_{\max} 随硬土层厚度是线性增大的,直到硬土层厚度大于均质地基的 Z_{\max} 后,该值保持不变;2010版规范的 Z_{\max} 基本也是线性增大,当增加到某一厚度时,该值会突变减小至某一恒定值。以算例1为例,当上层硬土层厚13.2 m时,2010版规范计算得到的 Z_{\max} 为17.71 m;当上层硬土层厚增加到19.2 m时, Z_{\max} 突减至12.81 m。此时可以认为,计算的一簇对数螺旋线均在12.81 m这个深度以内。这表明对数螺旋线法在试算时,程序为了得到极小值会不断往下试算穿过下层软土,直至再滑深下层软土影响不到计算结果为止;此时影响深度会突然减小至上层硬土中,并且保持恒定。分析其原因主要是:当硬土层足够厚时,滑动面要再穿过软土,虽软土的粘聚力较小,但此时软土埋深较大,对数螺旋线的弧长增大远大于软土粘聚力减小对地基承载力的贡献,因此为得到极小值,影响深度只能减小到上层硬土中较浅的位置, Z_{\max} 即突变至一较小值,算例2的计算结果类似。

在计算地基承载力时,须重视两种算法计算结果的差异,笔者认为当遇到硬土层厚度大于1998版规范的 Z_{\max} 时,考虑到均质土计算理论较

成熟,可按均质土体的承载力公式计算。

5 结论

1) 2010版规范中非均质土体的地基承载力计算是一套新的方法,与1998版规范一样,均基于极限平衡理论推导而来。新的方法与1998版规范方法在理论假定上有3个明显区别,即:下方承载土体不再人为分区,滑动面统一为对数螺旋线,破坏模式为单向、场破坏。

2) 2010版规范确定的地基承载力较为合理地考虑了极限荷载的偏心作用并对局部荷载进行了修正,因此该方法确定的地基承载力能保证地基处处不破坏。

3) 对数螺旋线的条分法计算模式较为合理地考虑了非均质土体的最大影响深度和非均布边载的影响。

4) 对于基床应力不大的工程结构,2010版规范与1998版规范计算结果吻合较好,对于基床应力较大的工程结构,2010版规范计算结果比1998版规范略大。

5) 2010版规范与1998版规范计算得到的最大影响深度差异较大。1998版规范得到的最大影响深度随着上层硬土层厚增大而线性增大,直至恒定;2010版规范得到的最大影响深度当上层硬土层较薄时,基本上随着上层硬土层厚度增大而线性增大,当硬土层增大至某一界限时,2010版规范得到的最大影响深度会突然减小,并保持恒定。

6) 非均质土体上层硬土层厚度对计算结果影响较大,当上层硬土层厚度大于1998版规范的均质地基最大影响深度时,可以认为地基为均质土体,从而建议采用相应的均质土体的计算公式。

参考文献:

- [1] JTJ 250—1998 港口工程地基规范[S].
- [2] JTS 147-1—2010 港口工程地基规范[S].
- [3] Hansen J B. A revised and extended formula for bearing capacity[R]. Denmark, Copenhagen: Bulletin of Danish Geotechnical Institute, 1970: 5-11.
- [4] 杨进良.土力学[M].3版.北京:中国水利水电出版社,2006.
- [5] 袁凡凡,栾茂田,闫澍旺,等.港口工程中非均质层状地基承载力计算方法[J].岩土力学,2006,27(4):1 124-1 128.