

夯坑基础

郭志恭

(西安交通大学建筑与结构工程系)

一、前言

夯坑基础的实质是:基础的基坑不是挖出来的,而是用夯锤(一般重为30—250kN)夯成需要深度(一般为0.7—5 m)的基坑。基坑具有基础的形状与尺寸。用起重机械将夯锤起吊到高3—15 m夯下。在夯出的基坑内不用支模板,直接浇筑基础混凝土。在夯成基坑的同时,基坑下部及周围的土被夯实,减少了土的压缩性,提高了土的承载能力,保证能往基础上传递很大的垂直荷载和水平荷载。为了进一步提高基础的承载能力、减小基础的沉降,在夯坑底部的地基内可夯入刚性材料(碎石、砾石、大粒砂等),以形成扩大的土核。

设置这样的基础,比挖基坑再回填土的作法能减少土方工程量 $2/3—4/5$;实际上不再需要模板;与一般带形基础、独立基础及桩基础比较,可降低基础工程造价 $1/3—2/3$,减少劳动力消耗量 $4/9—3/5$;可减少混凝土及水泥用量 $1/6—2/3$,减少钢材用量 $1/3—3/4$ 。夯出一般独立基础下的基坑,如不夯入刚性材料,夯出深度为1.2—1.5 m的基坑,需5—20击(5—15min)。夯出深3—3.5 m的基坑,再夯入刚性材料时,需30—40击(20—25min)。

夯坑基础可用于基础(柱)上的垂直荷载为0.1—5 MN的框架式工业、民用及农业建筑物;如与承台结合起来,垂直荷载可允许达10MN;对无框架的住宅和其他民用建筑物,垂直荷载可达每延长米0.8 MN。就地基土的情况而言,这种基础可广泛而有效地采用于湿陷性黄土,轻亚粘土、亚粘土以及填土和砂土。

在各种类型的土上用静荷载进行的大量夯坑基础的现场试验及几百个建筑物使用的经验证实,这种基础能保证承载能力高、沉降量小及充分可靠。

在苏联,从1972年至1981年,这种基础的研究取得6个发明证书^[1];1981年制订了“夯坑基础设计与施工指示”^[2]。

二、夯坑基础的施工工艺

夯坑基础可分为两种。第一种:地基内未夯入刚性材料的夯坑基础(一般夯坑基础);第二种:基坑底部夯入刚性材料、形成具有扩大刚性土核的夯坑基础(扩大土核夯坑基础)。前一种的施工方法见图1(a),后一种的施工工艺过程见图1(b)^[3,4]。

到稿日期:1989年8月23日。

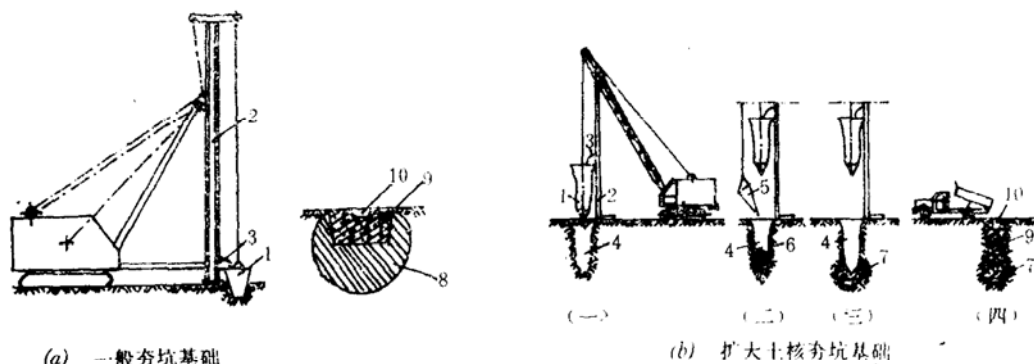


图1 夯坑基础的施工步骤

- ①夯锤。②导向架。③滑托。④夯坑 ⑤吊斗。⑥刚性材料。⑦夯入地基内的刚性材料(扩大土核)。
⑧夯实区。⑨混凝土基础。⑩杯口。

扩大土核夯坑基础的施工步骤是：

第一步：整平场地，抄平放线，夯机就位，把夯锤对准基础中心，夯出基坑，使达到设计要求的深度；

第二步：在夯出的基坑内分批装入一定量的刚性材料；

第三步：将分批装入夯坑内的刚性材料分批夯入地基内，夯至设计要求的基坑底面标高；

第四步：在夯坑内按设计要求安设好钢筋，浇筑混凝土并捣固，基础即完成。

夯出基坑所用的夯锤有多种类型^[5-7]：一般夯坑基础所用夯锤常为方形、六角形或圆形。夯锤上部尺寸为0.7—2 m (方形为边长，六角形为外接圆直径，圆形为直径)，下部尺寸为0.4—1.4 m，锤高一般为1—2 m，锤侧面的坡度为1:20—1:5，多为平底，如土较为密实，可用带尖的夯锤，尖端的角度为90—120°；扩大土核夯坑基础，用带尖端的六角形或圆形夯锤，上部尺寸为0.6—1.3 m，下部尺寸为0.4—1 m，锤高多为1.5—4.5 m，尖端夹角为60°—90°。部分锤型如图2所示^[8]。

夯坑基础的基本类型如图3所示^[4]。

如作用在基础上的垂直荷载很大，或基础上作用有较大的水平力或弯矩，或需要有悬臂以支承基础梁、墙或其他结构时，可以作成组合夯坑基础，如图4所示。

例如，当有较大的水平荷载时，可以使用图4(a)所示一侧带附加夯坑的基础^[8]。此基础所处场地土为湿陷性亚粘土，其物理力学性质为：天然含水量 $w = 0.16$ ，内摩擦角 $\varphi = 20^\circ$ ，土容重 $\gamma = 17.4 \text{ kN/m}^3$ ，孔隙比 $e = 0.71$ ，变形模量 $E_0 = 13 \text{ MPa}$ ，地下水位在地面下2.8—5 m，作用在基础上的垂直荷载为160—350 kN，水平荷载为4—140 kN。所用夯锤为六角形，六角形外接圆半径上部为1.38 m，下部为0.92 m，锤高2 m (不包括0.5 m的尖端)，锤重为45 kN。主副坑用同样的锤夯成，只是夯坑深度不同。

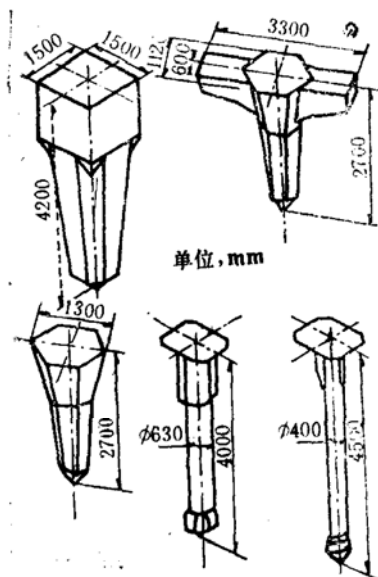
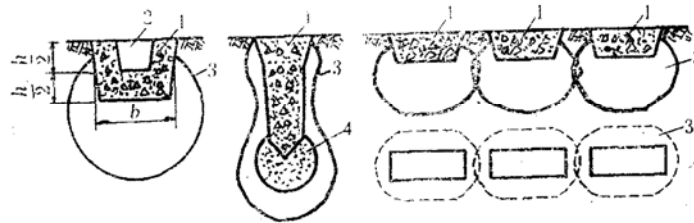


图2 扩大土核夯坑基础所用锤型举例

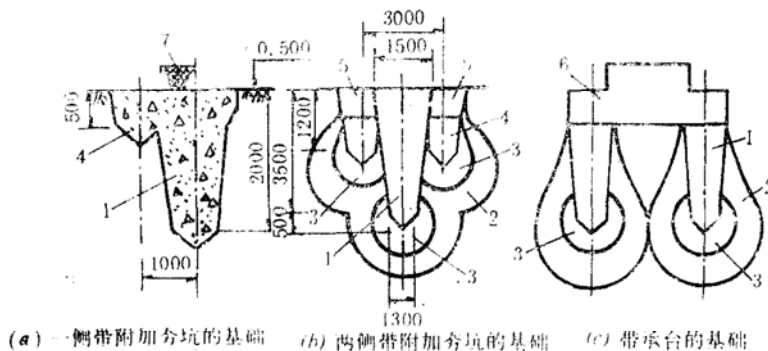
图4(b)两侧带附加夯坑的基础当为图示尺寸时,可以承载3 MN的柱荷载^[8]。场地土主要为轻亚砂土,其物理力学性质为: $\gamma = 17.2 \text{ kN/m}^3$, $\varphi = 20^\circ\text{--}24^\circ$, $c = 0.006\text{--}0.009 \text{ MPa}$, $E_p = 12\text{--}16 \text{ MPa}$ 。其施工方法是:先夯出左边的副基坑,坑深1.2m,坑底夯入碎石 2 m^3 ;在距左边副坑3 m处夯出右边副坑,作法与左边相同;然后在两个副坑中间夯出深



(a) 一般夯坑基础 (b) 扩大土核夯坑基础 (c) 间断带型基础

图3 夯坑基础的基本类型

①基础。②杯口。③夯实区。④夯入刚性材料(扩大土核)。



(a) 一侧带附加夯坑的基础 (b) 两侧带附加夯坑的基础 (c) 带承台的基础

图4 组合夯坑基础

①基础。②夯实区。③扩大土核。④附加夯坑基础。⑤悬臂。⑥承台。⑦基础梁

3.5 m的主坑(深度皆未包括尖端0.5 m),坑底夯入碎石 4 m^3 ,清理夯坑,放入钢筋,浇筑混凝土。

当在含水量很高($S_r > 0.7$)的粘土中设置夯坑基础时,可采取图5所示步骤^[2,4]。

第一步:在基础位置铺填一层粘土,其含水量为0.75—0.8倍塑限,塑性指数 $I_P = 0.12\text{--}0.14$;当土层上部粘土含水量为最佳含水量时,可不另铺粘土;

第二步:夯出基坑至要求的深度。如有必要,当基坑夯至深度大于夯锤宽度(或直径)的0.5—0.8倍时,反覆补充填入最佳含水量的粘土;

第三步:在夯出的基坑底部分批填入刚性材料,夯入夯坑底部。

这样作,就能保证夯坑壁稳定,防止土中的自由水进入基坑。

当在砂土中设置夯坑基础时,可按图6所示方法施工^[2]。当砂土的含水量很大或饱和时,可多加粘土。

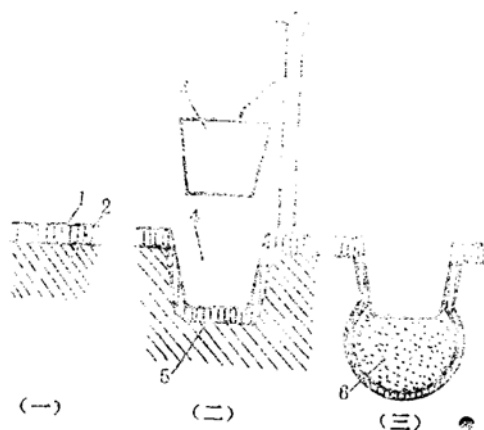


图5 在饱和粘土中夯出基坑的步骤

①低含水量土层。②饱和粘土。③夯锤。④夯坑。

⑤形成的低透水性土壳。⑥刚性材料扩大土核。

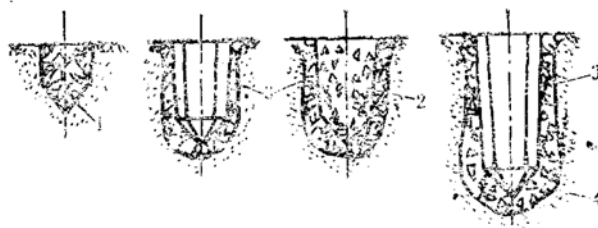


图6 在砂土中夯出基坑的步骤

①亚粘土。②碎石。③土壳。④扩大土核。

三、影响夯坑质量的若干因素

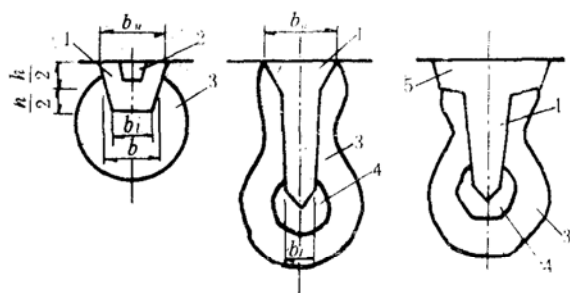
夯坑基础是重夯与强夯的一种发展: 它是用圆锥形、角锥或截角锥形的夯锤楔入土中, 不仅把锤下面的土动力压密, 而且使夯坑侧面的土在水平方向也得到很大的挤密, 基础各侧面的土与基础下面的土共同承担基础传来的垂直荷载和水平荷载, 基础是将混凝土直接浇筑入夯坑而形成的, 基础与周围的土更加密切地共同工作, 应该把基础与其周围的土体结合起来考虑; 夯坑基础下部如夯入碎石、砾石等刚性材料, 在地基内形成一个扩大的刚性土核, 使地基的承载能力与压缩变形都发生了非常有利的正面变化。由于夯出基坑与重夯或强夯的施工方法类似, 所以影响夯坑质量的因素与规律有许多共同点, 而夯坑基础又有其独特的地方, 是重夯与强夯的一种新发展, 所以需要简要地讨论一下一些应予注意的问题。

(一) 锤型对夯实区形状、尺寸的影响

实验研究表明^[2,4], 在一般情况下, 单个夯坑下土的夯实区形状接近椭球体, 只有个别情况下才接近球体, 如图7所示。椭球体在平面上及在深度上半轴的比值主要取决于夯锤的宽度(直径)、锤底形状、基坑深度及土的物理力学性质。当用平底锤时(如图1(a)), 夯实区的形状为在垂直方向伸长的椭球体, 因为夯击过程中, 动力作用的方向主要是向下, 而向侧面较小; 当用尖底夯锤时(如图1(b)), 动力作用的方向垂直于夯锤倾斜的侧面, 夯锤强烈地楔入土中, 增大了夯实区在侧面的尺寸, 而减小了在深度方向的尺寸, 一般形成向侧面伸长的椭球体; 当夯出较浅的基坑(其深宽比 h/b 小于1.5)时, 夯坑周围及下部的夯实区联成一体, 具有垂直方向稍稍伸长的截椭球体的形状(图7(a)); 当夯出深的基坑时, 则基坑下部的夯实区为椭球体, 基坑周围为圆筒体(图7(b)); 当用平底锤及尖底锤往松散及中等密度的土中夯入刚性材料时, 扩大土核都具有近似椭球体的形状; 当夯锤上部有悬出部分时, 则在悬出部分的下部造成夯实区(图7(c))。

(二) 土的密度及种类对夯击效果的影响

土的密度对夯出基坑的效果有明显的影响。在干容重 $\gamma_d \geq 15.7-16.2 \text{ kN/m}^3$ 的较密实黄



(a) 一般夯坑基础 (b) 扩大土核夯坑基础 (c) 带悬臂夯锤夯出的夯坑基础

图7 夯坑基础夯实区的形状

①基础。②杯口。③夯实区。④扩大土核。⑤悬臂。

土状亚粘土内夯出基坑，比在干容重 $\gamma_d < 14.7 \text{ kN/m}^3$ 同样的土内夯出基坑，夯击次数一般要多0.5—1倍；土的种类对夯出基坑的效果也有重要影响。例如，当比静压力为 $p_s = 0.04 \sim 0.06 \text{ MPa}$ 的夯锤夯出深为1 m的基坑时，对回填的黄土状亚粘土比对天然状态的同样的土，夯击次数要少1/3—1/2；在轻亚砂土中夯出基坑比在亚粘土中夯出基坑，夯击次数要多0.5—1倍。

(三) 刚性材料对扩大土核尺寸的影响

夯入基坑底部刚性材料的体积增加时，扩大土核的直径与高度都增大，如图8所示。当碎石的粒径在20—40 mm时，对土核的扩大效果最好，碎石粒径为5—20 mm及40—80 mm时，效果就要差些。

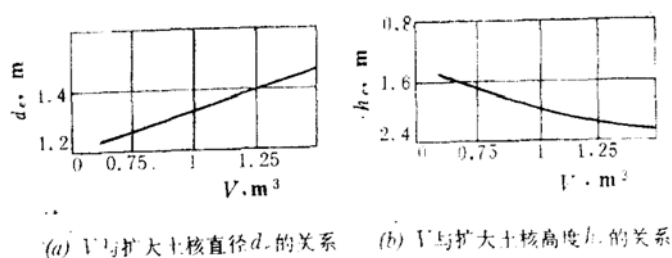


图8 夯入碎石体积 V 与扩大土核尺寸关系

四、夯坑基础的计算[2, 4]

(一) 无扩大土核浅夯坑基础($h/b \leq 1.5$)的计算(图9)

当采用独立夯坑基础或间断带形基础时，“相当基础”（其高度为 h ，其宽度为基础半高处宽度 b ）基底边缘压力为

$$p_{\min} = \frac{N + G}{F} \pm \frac{\sum M - 0.5 q b h^2}{W} \quad (1)$$

式中 G 为基础自重; F 为基础深度一半 ($0.5h$) 处的基础截面积; W 为 F 的抵抗矩; q 为基础侧表面上夯实土的反作用推力。

q 值根据试验结果, 按下式确定 (但取值不得大于 300kPa):

$$q = a + b p \quad (2)$$

式中 $a = 60\text{ kPa}$, $b = 0.4$, $p = \frac{N+G}{F}\text{ kPa}$

$p_{\max}$ 及 $p_{\min}$ 的值应符合下列条件:

$$p_{\max} \leq 1.2 R_{(1,2)}, \quad p_{\min} > 0 \quad (3)$$

式中 R_1 为“相当基础”底面处夯实土的计算强度; R_2 为位于夯实区以下土的计算强度。

要注意的是: 确定 R_1 时, 要使用饱和夯实土的内聚力及内摩擦角; 确定 R_2 时, 对于湿陷性土, 要利用下卧层的湿陷起始压力, 对于非湿陷性土则要用下卧层土在饱和状态下的强度特征值。 R_1 及 R_2 的计算公式参见有关文献^[2,10]。

(二) 扩大土核夯坑基础的计算 (图10)

扩大土核夯坑基础在垂直荷载下的承载能力按下列三个承载能力值中的最小值确定:

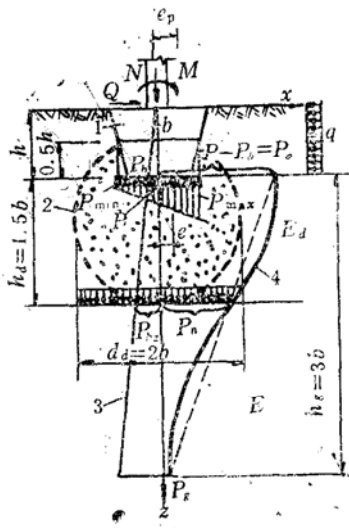


图9 一般夯坑基础的计算草图

① 夯坑基础。② 夯实区。③ 自重压力分布线。④ 附加压力分布线。

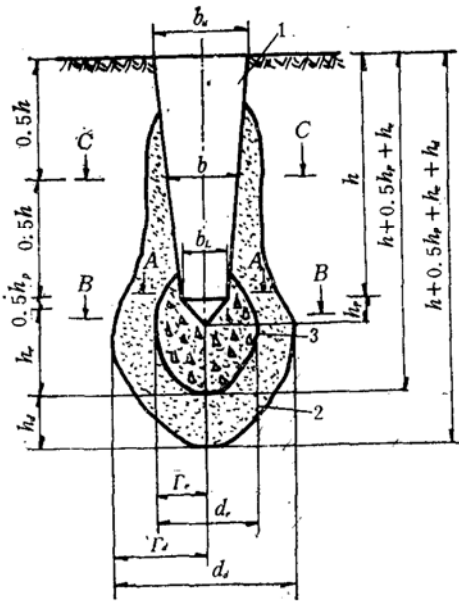


图10 扩大土核夯坑基础

① 基础。② 夯实区 ③ 扩大土核。

刚性材料扩大土核的承载能力 ϕ_1 ;

夯实区土的承载能力 ϕ_2 ;

夯实区以下下卧层土的承载能力 ϕ_3 。

要注意的是, 当为湿陷性土时, 认为土全部浸湿; 当为非湿陷性土时, 认为下卧层土为饱和状态。

三种承载力按下列公式确定:

$$\phi_1 = R_m F_h \quad (4)$$

式中 R_m 为基础下端以下刚性材料的计算强度, 对碎石、卵石、混凝土碎块, 采用 10 MPa; 对大粒砂、砂卵石混合物及矿渣, 采用 5 MPa; F_h 为基础下部截面积 (图 10 的 A-A 截面)。

$$\phi_2 = m_r R_e F_e + h u_a (f_i m_f + i E k' \xi) \quad (5)$$

式中 m_r 为扩大土核下夯实区土的工作条件系数, 这里用 $m_r = 1$; R_e 为扩大土核下部夯实的计算强度, 按表 1 确定; F_e 为扩大土核扩大部分的横截面积 (图 10 的 B-B 截面), 按公式 (6) 计算; h 为基础高度; u_a 为基础高度一半处 (图 10 的 C-C 截面处) 的周长; f_i 为基础倾斜侧表面上土的计算阻力, 按表 2 确定; m_f 为基础侧表面上土的工作条件系数, 取 $m_f = 0.8$; i 为基础侧壁倾斜度, 当 $i \geq 0.025$ 时, 采用 $i = 0.025$; E 为位于基础倾斜部分范围内顶层土的变形模量 kPa, 用饱和状态的天然结构土样进行压缩试验确定, 土样上压力的变化, 对湿陷性土, 从零到湿陷起始压力, 对非湿陷性土, 从零到 0.3 MPa; k' 为工作条件系数, 取 $k' = 0.5$; ξ 为流变系数, 取 $\xi = 0.8$ 。

表 1

由地表至扩大土核下部的深度, (m)	夯实的计算强度 R_e (MPa); 当粘性土的液性指数 I_L 为						
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
2.0	6.5	2.9	2	1.4	0.9	0.7	0.5
2.5	7.0	3.5	2.5	1.75	1.1	0.9	0.55
3.0	7.5	4.0	3	2.0	1.2	1.1	0.6
3.5	7.9	4.5	3.4	2.25	1.4	1.15	0.65
4.0	8.3	5.1	3.8	2.5	1.6	1.25	0.7
5.0	8.8	6.2	4.0	2.8	2.0	1.3	0.8
6.0	9.25	6.55	4.15	3.05	2.1	1.35	0.825

表 2

夯 实 深 度 (m)	侧表面的计算强度 f_i , (kPa) 当液性指数 I_L 为						
	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	1
1.0	35	23	15	12	8	4	2
1.5	35	23	15	12	8		
2.0	42	30	21	17	12	5	4
2.5	45	32	23	19	13		
3.0	48	34	25	20	14	7	5
3.5	50	36	26	21	15		
4.0	52	38	27	22	16	8	5
5.0	56	40	29	24	17	8	6
6.0	58	42	31	25	18	8	6

$$F_e = 3.14 r_e^2 = 3.14 (k_e \sqrt[3]{V})^2 \quad (6)$$

式中 r_e 为扩大土核的半径, k_e 考虑扩大土核形状的系数, 对球形, $k_e = 0.62$, 对半轴比 $h_e/r_e = 1.4$ 的椭球体, $k_e = 0.55$, 对半轴比 $h_e/r_e = 1.8$ 的椭球体, $k_e = 0.51$; V 为刚性材料的体积。

$$\phi_s = m_r' R_d F_d + h u_a (f_i m_f + i E k' \xi) \quad (7)$$

式中 m_r' 为下卧层土的工作条件系数, 当夯坑深度分别为 2, 2.5, 3 及 3.5m 时, 相应地采用 1, 1.2, 1.4 及 1.6; R_d 为下卧层土的计算强度; F_d 为夯实区水平尺寸最大处的截面积, 如图 10 的 B-B 截面, 其余符号与公式 (5) 相同。

当有水平荷载与弯矩作用时, 扩大土核夯坑基础下部及周围夯实土的承载能力按下式计算

$$\phi_h = k_h q b h \geq \Sigma Q + \frac{\Sigma M}{h} \quad (8)$$

式中 k_h 为工作条件系数, 用 $k_h = 0.8$; q 为按公式 (2) 确定; ΣQ 为水平力之和; ΣM 为力矩之和。

五、注意事项及讨论

1. 夯坑基础的适用范围为: 最适用于湿陷性黄土, 各种粘性土, 塑性指数 $I_P \geq 0.03$ 的回填粘性土 (其干容重 $\gamma_d \leq 16.7 \text{ kN/m}^3$, 饱和度 $S_r \leq 0.75$); 此外, 也可用于塑性指数 $I_P < 0.03$ 的轻亚砂土, 砂土及 $\gamma_d > 16.7 \text{ kN/m}^3$ 的密实粘性土, 以及 $S_r \geq 0.8$ 的饱和粘性土及砂土; 当用于自重湿陷性黄土地区时, 条件是自重湿陷与荷载沉降的总计值不得超过所设计建筑物的极限允许沉降值。

2. 夯坑基础的经济效果还可由下列实例说明^[1]: 苏联对使用夯坑基础的 34 个大型工业厂房作了统计, 基础混凝土的工程量为 24000 m^3 , 混凝土用量减少 34—40%, 钢筋减少 62—70%, 木材减少 92%, 劳动力消耗减少 70%, 费用节约超过 2 百万卢布。因此, 我们应大力研究和应用夯坑基础。

3. 苏联正在研究用 500—600 kN 的长夯锤, 解决在自重湿陷性黄土地区使用夯坑基础的问题, 我们应予以重视。

4. 根据实践经验, 夯锤提升高度应使每击的夯沉量不超过夯坑深度的 15%, 这样可避免夯锤被吸住, 而且可以保证坑壁的完好。

参 考 文 献

- [1] ВНИИОСТ, Фундаменты в вытрамбованных котлованах, Основания, Фундаменты и механика грунтов, 1989, 2, pp.29.
- [2] Крутов, В.И., Багдасаров, Ю.А., Рабинович, И.Г., Фундаменты в вытрамбованных котлованах, М. Стройиздат, 1985, pp.5—92.
- [3] Смородин, М.И., Справочник строителя, Основания и фундаменты, М. Стройиздат, 1983, pp.31—32.
- [4] Крутов, В.И., Основания и фундаменты на просадочных грунтах, М. Стройиздат, 1982, pp.154—176.

- [5] Пономаренко, Ю.Е. и т.д., Технология и механизация устройства фундаментов в выштампованных котлованах, Механизация строительства, 1987.5. pp.14—15.
- [6] Быков, В.И., Еще о технике для вытрамбовывания, Механизация строительства, 1987.3. pp.8—9.
- [7] Сальников, Б.А. и т.д., Вытрамбовывание котлованов под опоры высоковольтных линий автоблокировки в транспортном строительстве, Основания, фундаменты и механика грунтов, 1988.1. pp.15—17.
- [8] Багдасаров, Ю.А. и т.д., Опыт сельскохозяйственного и жилищного строительства на фундаментах в вытрамбованных котлованах с уширенным основанием, Основания, фундаменты и механика грунтов, 1987.3. pp.7—9.
- [9] Константиновский, Д.И. и т.д., Фундаменты в вытрамбованных котлованах повышенной несущей способности для промышленных зданий и сооружений, Промышленное строительство, 1988.10. pp.32—34.
- [10] 铁梯奥尔, А.Н.等, 基础设计手册, 李席珍译, 中国铁道出版社, 1985, pp.15—19.
- [11] Константиновский, Д.И. и т.д., Совершенствование способа устройства фундаментов в вытрамбованных котлованах под крупные промышленные сооружения, Основания, фундаменты и механика грунтов, 1988, 3, pp.18—20.

国际滑坡与岩土工程学术会议预告

国际滑坡与岩土工程学术会议将于1991年5月21日至23日在武汉召开。截至90年底为止,中国、苏联、英国、意大利、智利、希腊、捷克和斯洛伐克、保加利亚和台湾省纷纷寄来学术论文150余篇。会议前将出版论文集。

会议地点: 武汉喻家山, 华中理工大学。

会议代表需提前交纳注册费300元, 汇款到: 中国工商银行 武昌关山办 144—1154 华中理工大学科协收 (注明滑坡会议注册费)。

(国际滑坡与岩土工程学术会议秘书组)