

湿陷性黄土地基处理

罗宇生

(陕西省建筑科学研究院 西安 710082)

摘要 本文结合《湿陷性黄土地区建筑规范》(GBJ25—90)中地基处理的有关规定,分析论述了湿陷性黄土地基处理的目的、消除地基全部湿陷量和部分湿陷量的处理厚度以及局部处理与整片处理的作用,并阐述了了几种常用地基处理方法的适用范围及其效果。

关键词 湿陷性黄土 地基处理 湿陷量

1 地基处理及其常用方法选择的原则

湿陷性黄土在天然湿度下,其压缩性较低,强度较高,但遇水浸湿时,土的强度则显著降低,在饱和土自重压力或在附加压力与饱和土自重压力的共同作用下,往往具有突然下沉的性质。工程实践表明,当工业与民用建(构)筑物(以下简称建筑物)的地基不处理或处理不足时,建筑物在使用期间,由于各种原因的漏水或地下水位上升,地基湿陷是经常发生的。因此,在湿陷性黄土地区进行建设,对建筑物地基需要采取处理措施,以改善土的物理力学性质,减小或消除湿陷性黄土地基因偶然浸水而引起的湿陷变形,保证建筑物的安全与正常使用。

湿陷性黄土地基的变形,除一般压缩变形外,主要为湿陷变形。压缩变形是地基土处于天然湿度下由于建筑物的荷载所引起,它随时间增长而逐渐减小,稳定较快,建筑物竣工后一年左右即趋于稳定。湿陷性黄土地区的年降雨量稀少(约300~500mm),蒸发量远大于年降雨量,属于干旱或半干旱气候地区,湿陷性黄土的天然湿度一般在10%~22%以内,其饱和度大都在40%~60%以内。当基底压力不大于地基土的承载力时,压缩变形值很小,通常不超过上部结构的容许变形值,对建筑物不致产生有害影响。

湿陷变形是当地基的压缩变形还未稳定或稳定后,建筑物的荷载未改变,它是由于地基局部受水浸湿引起的附加变形,经常是突然发生的,而且很不均匀,尤其是地基受水浸湿初期,一昼夜内往往可产生15~25cm的湿陷量,因而建筑物的上部结构很难适应和抵抗这种量大、速率快及不均匀的地基变形,对建筑物的破坏性较大,危害性较严重,湿陷性黄土地基处理的目的:一是消除其全部湿陷量,使处理后的地基变为非湿陷性地基,或采用基础、桩基础穿透全部湿陷性土层,使上部荷载通过基础或桩基础转移至非湿陷的土(或岩石)层中,防止地基产生湿陷;二是消除地基的部分

湿陷量,减小被处理地基的总湿陷量,控制下部未处理湿陷性土层的剩余湿陷量不大于设计规定。

鉴于甲类建筑的重要性,地基受水浸湿的可能性和使用上对不均匀沉降的严格限制等与其它类建筑都有所不同,而且甲类建筑的数量少、投资规模大、工程造价高,一旦出问题,在政治上或经济上将会造成严重影响和损失,后果不堪设想。为此对甲类建筑不允许出现任何破坏性的变形,也不允许因变形而影响使用。故对地基处理规定从严,要求消除其全部湿陷量。

乙、丙类建筑量大面广,地基处理规定过严,建设投资明显增加,不符合我国现有的技术经济水平,因此只要求消除其部分湿陷量,然后根据地基处理的程度或剩余湿陷量的大小采取相应的防水措施,以弥补地基处理的不足,防止建筑物产生有害变形,确保其整体稳定和主体结构的安全,地基一旦浸水湿陷,次要部位出现裂缝易于修复,并保持其正常使用。

2 地基处理厚度的确定

湿陷性黄土地基的湿陷变形包括由附加压力与饱和土的自重压力(以下简称外荷)引起的湿陷和仅由浸湿土体的饱和和自重压力引起的湿陷两种。由外荷引起的湿陷,在基础底面下产生竖向位移的同时,还伴随着明显的侧向位移,并与基础型式、基底面积及其压力大小有关。据测试,由外荷引起的湿陷是发生在基础底面下一定深度(即受力层)的湿陷性土层内,由浸湿土体的饱和和自重压力引起的自重湿陷是发生在全部湿陷性土层内,并与自重湿陷性的土层厚度及其性质有关。

湿陷性黄土地基的处理厚度,根据其湿陷变形范围可分为处理湿陷变形范围内的全部湿陷性土层和处理湿陷变形范围内的部分湿陷性土层两种。前者在于消除建筑物地基的全部湿陷量,后者在于消除建筑物地基的部分湿陷量。

2.1 消除建筑物地基全部湿陷量的处理厚度

试验研究成果表明,在非自重湿陷性黄土场地,仅

在上覆土的自重压力下受水浸湿,往往不产生自重湿陷或自重湿陷量小于 7cm,在外荷作用下,建筑物地基受水浸湿后的湿陷变形范围,通常发生在基础底面以下各土层的湿陷起始压力值(P_{si})小于或等于该层底面处的附加压力(P_s)与土自重压力(P_{si})之和的全部湿陷性土层内,湿陷变形范围以下的湿陷性土层,由于附加应力很小,地基即使充分受水浸湿,也不会产生湿陷变形,故对非自重湿陷性黄土地基,消除全部湿陷量的处理厚度,应为基础底面以下 $P_{si} \leq P_s + P_{si}$ 的全部湿陷性土层,如果湿陷起始压力资料不能满足设计要求,则可按地基受压层深度确定,处理至附加压力等于土自重压力 20% (即 $P_s = 0.2P_{si}$) 的土层深度止。

自重湿陷性黄土地基,在外荷作用下建筑物地基受水浸湿后,除产生湿陷外,同时还产生自重湿陷,故对自重湿陷性黄土地基消除全部湿陷量的处理厚度,应为基础底面以下的全部湿陷性土层。

2.2 消除建筑物地基部分湿陷量的处理厚度

消除地基部分湿陷量的处理厚度,系针对乙、丙类建筑所作的规定,乙类建筑包括高度为 24~40m 的高层建筑,其重要性仅次于甲类建筑,差异沉降亦不宜过大,避免建筑物产生不允许的倾斜和裂缝,消除地基部分湿陷量的最小处理厚度:在非自重湿陷性黄土地基不应小于地基受压层厚度的 2/3;在自重湿陷性黄土地基,不应小于湿陷性土层厚度的 2/3,并应控制下部未处理湿陷性土层的剩余湿陷量不大于 20cm。

如湿陷性土层厚度大或基础宽度大,按上述规定处理地基确有困难时,在建筑物范围内宜采用整片处理,因为整片处理既可消除地基的部分湿陷量,又具有隔水、防水作用。整片处理地基的厚度:在非自重湿陷性黄土地基,不应小于 4m;在自重湿陷性黄土地基不应小于 6m。否则,一是地基处理后的剩余湿陷量大;二是防水效果不理想,难以达到阻止生产、生活用水以及大气降水渗入下部未处理的湿陷性土层。

丙类建筑包括多层办公楼、住宅楼、教学楼等,建筑物的室内外一般装有上、下水管和暖气管道,使用期间,地基存在受水浸湿的可能性,影响建筑物安全使用,为此必须采取措施消除地基的部分湿陷量,其最小处理厚度:对 II 级湿陷性黄土地基不应小于 2m;对 III、IV 级自重湿陷性黄土地基,分别不应小于 3m 和 4m,多层丙类建筑并宜采用整片处理,下部未处理土层的剩余湿陷量不宜大于 30cm。

经处理后的地基承载力,可根据现场测试结果或结合当地建筑经验确定,同时应验算下卧层顶面的承载力,使其满足下式要求:

$$P_s + P_{si} < f_s \quad (1)$$

式中 P_s —— 下卧层顶面的附加压力 kPa;

P_{si} —— 下卧层顶面的土自重压力, kPa;

f_s —— 下卧层顶面经深度修正后的承载力设计值, kPa。

地基处理后,下卧层顶面的附加压力 P_s ,对条形基础和矩形基础,可分别按下式计算:

条形基础

$$P_s = \frac{b(P - P_c)}{b + 2Ztg\theta} \quad (2)$$

矩形基础

$$P_s = \frac{lb(P - P_c)}{(b + 2Ztg\theta)(l + 2Ztg\theta)} \quad (3)$$

式中 b —— 条形(或矩形)基础底边的长度 m;

l —— 矩形基础底边的长度, m;

P —— 基础底面的平均压力设计值, kPa;

P_c —— 基础底面土的自重压力, kPa;

Z —— 基础底面至处理土层底面的距离, m;

θ —— 地基压力扩散线与垂直线的夹角,一般为 $22^\circ \sim 30^\circ$,用素土处理宜取小值,用灰土处理宜取大值,当处理厚度小于基底短边长度的 1/4 时(即 $Z < 0.25b$),取 $\theta = 0$ 。

3 湿陷性黄土地基几种常用的处理方法

湿陷性黄土地基常用的处理方法,在国内目前主要有以下几种:

- (1) 土垫层法;
- (2) 夯实法;
- (3) 土(或灰土)挤密桩法;
- (4) 化学加固法;
- (5) 桩基础;
- (6) 其它方法。

湿陷性黄土地基处理,应根据建筑物的类别,拟建场地的湿陷类型,天然地基的湿陷等级和湿陷系数,自重湿陷系数、湿陷起始压力沿土层深度的分布,并考虑因地制宜、就地取材以及施工条件的可能性等因素,通过技术经济综合分析比较后,选用上述一种或几种相结合的处理方法,使处理后的地基达到技术先进、经济合理、确保质量。

4 土垫层法

4.1 设置土垫层的作用

土垫层法系指用素土或灰土做成的垫层,并可将其分为局部土垫层和整片土垫层。这是一种以土治土的处理湿陷性黄土地基的传统方法,在我国西北和华北等地区使用较广泛,具有因地制宜、就地取材和施工简便等特点,处理厚度,自基础底面起一般为 1~3m。

在湿陷性黄土地上设置局部或整片土垫层,具有下列作用:

(1)通过处理基底下的部分湿陷性土层,可以消除地基的部分湿陷量,湿陷性黄土层的厚度和地基的总湿陷量得以减小;

(2)降低土垫层地基的压缩性和透水性;

(3)减小土垫层下卧层顶面的附加压力;

(4)设置整片土垫层,同时具有隔水、防水作用,保护下部未处理的湿陷性土层不受上部水浸湿,则不致引起湿陷。

土垫层的设计主要包括垫层的厚度、宽度、夯(压)实后土的压实系数和承载力设计值的确定等内容。使所设计的垫层既要满足建筑物对地基变形及稳定的要求,又要符合经济合理的原则,因此垫层厚度应大于1/4基底宽度,垫层宽度通常按应力扩散角设计。

局部土垫层一般设置在矩形、方形或条形的基础底面下,其平面处理范围,可按下列式计算确定,超出基础边缘的宽度一般不应小于垫层厚度的一半,并不应小于0.5m,以防止垫层土产生侧向挤出。

$$B = b + 2Ztg\theta + 2C \quad (4)$$

式中 B ——需处理土层底面的宽度, m;

b ——条形或矩形基础短边的长度, m;

Z ——基础底面至处理土层底面的距离, m;

C ——考虑施工机具影响而增设的附加宽度,不得小于0.2m;

θ ——应力扩散角,见公式3。

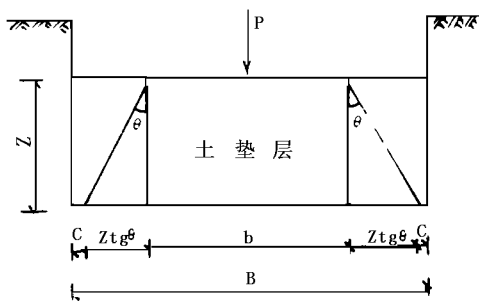


图1 土垫层地基

鉴于局部土垫层的处理宽度超出基础底边的宽度较小,地基处理后,地面水及管道漏水仍可从垫层侧向渗入下部未处理的湿陷性土层引起湿陷,因此,设置局部土垫层不考虑起防水、隔水作用,对地基受水浸湿可能性大及有防渗要求的建筑物,不得采用局部土垫层

处理地基。

整片土垫层是设置在整个建(构)筑物(跨度大的工业厂房除外)的平面范围内及其基础底面以下,超出建筑物外墙基础外缘的处理宽度通常与土垫层的厚度相同,并不小于2m。

在地下水位不可能上升的自重湿陷性黄土地,当未消除地基的全部湿陷量时,对地基受水浸湿可能性大或有严格防水要求的建筑物,采用整片土垫层处理地基较为合适。但地下水位有可能上升的自重湿陷性黄土地,应考虑水位上升后,对下部未处理的湿陷性土层引起湿陷的可能性。

4.2 土垫层地基的变形

土垫层地基是由垫层及其下卧天然土层所组成。这两部分土层的变形包括压缩变形和浸水后引起的湿陷变形,并与基底面积基底压力和垫层的厚度、宽度、施工质量以及下部天然土层的性质等因素有关。

在土性基本相同的场地上所作的静载荷试验资料表明,土垫层的厚度和宽度不同,其地基浸水前在200~250kPa压力下的压缩变形很小(1.0~1.7cm),压板沉降与压力的关系接近直线变化(见图1),素土垫层的变形模量约为11~14MPa,灰土垫层的变形模量达20MPa以上。土垫地基浸水后,在上述压力作用下产生的湿陷量与垫层的厚度、宽度、回填夯实的土料不同而有明显的不同。厚度和宽度大的土垫层,其地基的湿陷量小;反之,地基的湿陷量大。厚度不同,宽度相同的土垫层,其地基受水浸湿后的湿陷量见表1。

表1 厚度不同、宽度相同的土垫层与湿陷量的关系

土垫层尺寸 (长×宽×厚) cm×cm×cm	基底		实测湿陷量 /cm	减小比例 /%	垫层材料
	面积 /cm ²	压力 /kPa			
200×200×50	10000	200	24.05	33	素土
200×200×100	10000	200	6.346	82.3	素土
200×200×100	10000	200	6.488	82.0	素土
200×200×150	10000	200	1.285	96.4	素土
天然黄土地基	10000	200	35.85		
250×250×60	5000	250	17.45	64.6	素土
250×250×105	5000	250	5.82	88.2	素土
天然黄土地基	5000	250	49.32		
210×210×68	10000	200	0.23		灰土
200×200×100	10000	225	0.07		灰土
天然地基	10000	200	55.24		

由表 1 不难看出,在 1m^2 的方形基础底面下,厚度为 0.5m 的素土垫层,地基的湿陷量较大,与天然地基相比,只减小湿陷量 33% ,而且湿陷速率较快,浸水后第一昼夜的湿陷量达 15cm 以上,危害性未能消除。素土垫层厚度与基底宽度相同的(均为 1m),减小湿陷量达 80% 以上,并能降低湿陷等级。素土垫层厚度等于基底宽度的 1.5 倍时,湿陷量很小,减小湿陷量达 96% 以上,已降为非湿陷性黄土地基。未处理的天然地基受水浸湿引起的湿陷量主要集中在相当于 1.5 倍方形基础宽度的深度内,而在 $0.5\sim 1.0$ 倍基础宽度的深度内湿陷量更为集中,因此,素土垫层的厚度不应小于基底宽度,并不应小于 1m 。

灰土垫层比素土垫层的效果更好,当采用灰土垫层处理非自重湿陷性黄土地基时,可以适当减小其厚度。

宽度不同,厚度相同的土垫层,其地基受水浸湿后的湿陷量见表 2。

表 2 宽度不同、厚度相同的土垫层与湿陷量的关系

土垫层尺寸 长×宽×厚 /cm	基底		实测湿陷量 /cm	减小比例 /%	垫层材料
	面积 /cm ²	压力 /kPa			
130×130×105	5000	250	17.56	64.4	素土
160×160×105	5000	250	10.565	73.6	
250×250×105	5000	250	5.82	88.2	
天然黄土地基	5000	250	49.32		

由表 2 可见,土垫层的厚度各自尽管相同,但由于其宽度超出基底边缘的宽度不同,其垫层地基的湿陷量则有很大的不同。超出基底边缘宽度小的垫层,不能有效地阻止土的侧向挤出,地基受水浸湿后的湿陷量较大,而超出基底边缘宽度大的垫层,地基受水浸湿后的湿陷量明显减小。

4.3 土垫层地基的施工与质量检验

在湿陷性黄土地基上设置土垫层,是先将拟处理范围内的湿陷性黄土挖出,然后将就地挖出的土料,经过筛或配成最优含水量,并根据选用的夯(或压)实设备,按一定厚度分层铺土,分层夯(或压)实,至设计标高止,以作为地基的受力层,用素土回填夯(压)实的垫层,称为素土垫层,用灰土回填(压)实的垫层,称为灰土垫层。消石灰与土的体积配合比,宜为 $2:8$ 或 $3:7$,由于湿陷性黄土害怕受水浸湿引起湿陷,故不允许使用砂、石等粗颗粒的透水性材料做垫层。

可见,土垫层是由完全扰动的松散土料经分层夯

(压)实而成,土的天然结构已经破坏,固有的湿陷性也已消除,土垫层质量的好坏与其干密度有关。干密度大的土垫层,孔隙体积小,土粒接触紧密,结构强度高;反之,孔隙体积大,土粒间接触点少,结构强度低。目前在工程实践中,一般按室内击实试验求得的最大干密度 ρ_d 乘以压实系数 $\lambda_c=0.93\sim 0.95$ 作为土垫层施工质量的控制指标。

压实系数 λ_c 是土垫层的设计干密度 ρ_d 与室内击实试验在最优含水量状态下求得的最大干密度 ρ_{dmax} 之比值(即 $\lambda_c = \frac{\rho_d}{\rho_{dmax}}$),对地基受水浸湿可能性大和厚度大于 3m 的土垫层,取 $\lambda_c=0.95$,对其它情况和厚度小于 3m 的土垫层,取 $\lambda_c=0.93$ 。

干密度的大小是检验土垫层施工质量好坏的重要指标。调查资料表明,施工质量不好的土垫层,地基受水浸湿后,其湿陷事故与未经处理的湿陷性黄土地基的湿陷事故同样严重。

为了确保土垫层的施工质量,施工中将灰土拌合均匀,控制虚铺土厚度不要过大,在最优或接近最优含水量状态下将素土或灰土分层回填夯(压)实,分层(自每层表面以下 $2/3$ 厚度处)取样检验是非常重要的,发现不合格处,应及时采取补夯(压)或其它补救措施。

5 夯实法

夯实法是指借助起吊设备,将设计所需质量的夯锤提升至预定高度,然后自由落下,直接在基础底面标高以上预留夯实的土层上进行反复夯击,使基础底面下一定深度内的土层得以夯实,改善被处理范围内土的物理力学性质。

夯实法包括重锤表层夯实法和强夯法两种。两者是前苏联 IO. M 阿别列夫教授于本世纪 50 年代提出来的,后者是法国梅纳于本世纪 60 年代末提出来的,原名为动力固结法或动力压密法,当初仅用于处理粗粒土(如松散砂土,碎石土)地基,后来随着施工方法的改进,逐步推广应用于细粒土地基的处理。由于强夯法处理地基的效果显著,设备简单,我国于 70 年代后期引进强夯法处理地基的技术后,迅速在湿陷性黄土地区获得推广应用。

夯实法处理地基,既不需要挖除被处理范围内的土层,也不需要换土分层回填,具有省工、省料、施工速度快和造价较低等优点。

夯锤质量、落距、锤底面积、锤底静压力等参数,可根据土性和设计所要求的有效夯实厚度确定。夯实效果、夯击次数与上述参数也可通过试夯获得。

夯锤可采用 C30 号钢筋砼预制或用金属制作。为

了使夯锤落下时保持平稳和垂直,锤的重心位置尽量接近锤底,锤底面积宜为圆形。

地基夯实的质量除与锤的质量、落距、锤底面积及其静压力有关外,同时还与地基土的含水量有密切关系。工程实践表明,含水量小于10%的土,呈坚硬状态,表层土容易夯松,夯击能量消耗在表层土上,深部土层不易夯实,有效夯实厚度小;含水量太大的土,夯击时呈软塑状态,容易出现“橡皮土”;处于或接近最优含水量的土,夯击时土粒间的阻力较小,颗粒易于互相挤密,夯击能量向纵深方向传递,在相应的夯击次数下,夯击总下沉量和有效夯实厚度均大。为了方便,在工地常以塑限含水量 W_p (1%~3%)或 $0.6W_L$ (液限)含水量作为最优含水量。

当天然土的含水量低于最优含水量5%以上时,宜对欲夯实地基土加水增湿,每 $1m^2$ 地基面积的加水量可按下式计算:

$$Q = (W_p - W) \frac{\rho}{1 + W} h \quad (5)$$

式中 W_p ——土的最优含水量, %;

W ——在拟夯实范围内,天然地基土的平均含水量 %;

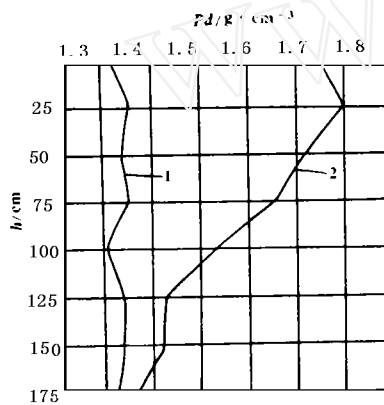


图2 重锤表层夯实
1——天然土;2——强夯土

ρ ——在拟夯实范围内,天然地基土的平均密度, g/cm^3 ;

h ——从起夯面算起的有效夯实厚度,对重锤表层夯实(锤重为2~3t),一般为1~2m;对强夯(锤重为10~25t),一般为3~6m。

在夯前1~2昼夜,将计算水量均匀地浸入地基土内。如土的含水量过大,为了避免出现“橡皮土”,待土晾干或采取其它措施(如夯入吸水性的干土、砧碴、生石灰等)处理后再进行夯击。

经夯实后的地基,土的干密度如同夯击能和振动波的传递一样,自上向下随土层深度增大而减小,土的干密度随土层深度的变化见图2、图3。

有效夯实厚度的大小是评定夯实效果好坏的重要标志。它是从起夯面起,其下部界限以湿陷系数 $\omega_s < 0.015$ 或土的最小干密度 $\rho_{d \min} \geq 1.5g/cm^3$ 为准。在有效夯实厚度内,土的干密度(ρ_d)显著增大, (平均干密度 $\rho_d > 1.6g/cm^3$), 压缩性降低,承载力和压缩模量提高,渗透性减小,湿陷性消除,水稳性增强。地基处理后,通常直接利用有效夯实厚度作为建筑物地基的主要受力层。

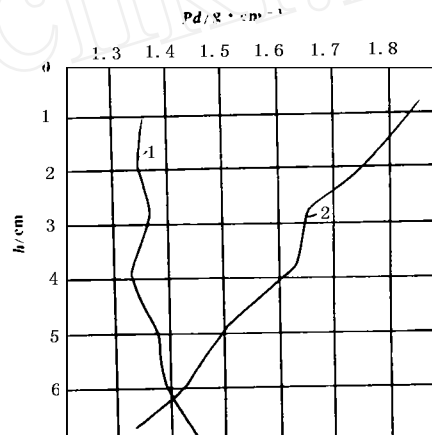


图3 强夯
1——天然土;2——强夯土

5.1 重锤表层夯实法

重锤表层夯实法适用于土的饱和度 $S_r \leq 65\%$ 的 I、II级非自重湿陷性黄土地基的处理,采用1.8~3.5t的重锤,落距 $\geq 4.0m$,在同一位置连续夯击8~12次,可以获得1~2m的有效夯实厚度。

我国于50~60年代中期,在西北、华北等地区,广泛采用重锤表层夯实法处理湿陷性黄土地基,建造了

大量的工业与民用建筑物。几十年来的工程实践表明,在非自重湿陷性黄土场地,地基经重锤表层夯实后,没有发生严重湿陷事故,轻微湿陷事故也罕见。例如,河北保定某厂,地基采用重锤表层夯实后,建筑物在使用期间,地基曾经受洪水浸泡,没有发生湿陷事故。又如,河南三门峡印染厂的漂染车间,生产大量用水,地面直接受水浸湿,属于地基受水浸湿可能性大的生产车间,

湿陷性黄土层厚度为 14m,按基础下 5m 湿陷性土层计算的分级湿陷量为 27.9cm,地基采用重锤表层夯实消除湿陷性的土层厚度为 1.75m,该车间于 1965 年建成投产以来,地基未发生湿陷事故,建筑物沉降最大为 5cm,一般为 1~3cm,使用正常,沉降观测结果见表 3,表 4,重锤表层夯实地基的静载荷试验结果见表 5。

表 3 各车间柱基沉降量/mm

车间名称	柱基(个)	投产前的平均沉降	投产四年后的平均沉降	累计总沉降
漂染车间	9	7	8	15
染色车间	4	5	4	9
印花车间	8	5	6	11
整装车间	7	4	—	4
平均	—	5	6	11

表 4 各车间墙基及个别柱基沉降量/mm

车间名称	轴线号	屋面板安装后土建主体完成后		土建全部完成后三个月		投产四年后的沉降量
		(P=115kPa)的沉降量	(P=145kPa)的沉降量	(P=145kPa)的沉降量	(P=145kPa)的沉降量	
漂染车间	F-20	3	4	7	53	
	F-25	1	3	7	23	
染色车间	H-10	3	4	6	12	
印花车间	P-20	3	6	7	29	

从表 5 的数据不难看出,在非自重湿陷性黄土场地,重锤表层夯实地基的有效夯实厚度大于 1m 的,在荷载作用下浸水后的附加下沉量很小,湿陷性消除,效果良好。

表 5 重锤表层夯实地基的载荷试验结果

地点	基底		重夯		变形模量	
	面积 /m ²	压力 /kPa	锤重 /t	锤底直径 /m	浸水前 /MPa	浸水后 /cm
西安东郊	1.0	200	2.8	1.5	66	2.248 1.644
	1.0	200	天然黄土地基		12	11.987 35.85
	2.25	200	2.8	1.5		1.117
	2.25	200	天然黄土地基			56.40
三门峡	4.0	180	3.0	1.5	18.0	1.296 2.120
印染厂	4.0	180	天然黄土地基		22.0	1.062 28.720

5.2 强夯法

强夯法是利用 100kN 以上的重锤自由下落时,在

夯击能和冲击波的作用下,将地表下一定深度内的湿陷性黄土夯至密实状态。它是对重锤表层夯实法的发展,二者的工艺和设备有些类似,但强夯法的夯击功能较重锤表层夯实法的夯功能大得多。因此,强夯地基的夯击下沉量和有效夯实厚度亦大得多。此外,强夯法可能直接夯成基坑或基槽,从而大大减少地基处理土方开挖。

目前我国湿陷性黄土地区采用的锤重一般为 10~20t,最大锤重达 44t,但多数情况为低、中能量(10~20t),锤底面积为 4~8m²,锤底净压力为 25~60kPa,落距为 10~30m,湿陷性黄土的孔隙中一般无自由水,采用连续夯击,可减少吊车移位,提高施工效率,消除湿陷性的土层厚度为 3.5~6.0m,试夯结束后可挖探井取土样按室内试验结果确定,按梅纳公式确定有效夯实厚度时,在该公式($H=\sqrt{Mh}$)中应乘以 $\alpha=0.3\sim 0.5$ 系数进行修正。采用强夯法处理湿陷性黄土地基的静载荷试验结果见表 6。

表 6 强夯处理湿陷性黄土地基的静载荷试验结果

地点	基底		重夯		变形模量		变形量	
	面积 /m ²	压力 /kPa	锤重 /t	锤底直径 /m	浸水前 /MPa	浸水后 /cm	浸水前 /cm	浸水后 /cm
渭河电厂 冷却塔	1	250	10	2.3	16.9	2.29	0.89	
	1	200	10	2.3	10.6	2.51	7.204	
	1	200	天然黄土地基		9.7	2.69	31.63	
内蒙梧桐花 铅锌矿厂	4	200	13	2.3	14.5	2.142	1.20	
	1	150	饱水黄土地基				17.30	
三门峡 纸浆厂	1	250	10	2.3	17.9	0.92	0.24	
	1	200	天然黄土地基		6.6	8.61	21.10	(未稳定)

近些年来,我国湿陷性黄土地区有关施工、设计、科研和高校等单位,在山西潞城、陕西蒲城和河南三门峡等地,结合工程先后采用 6250~8000kNm 能级的强夯(以下简称高能量强夯)处理大厚度的湿陷性黄土地基,可使起夯面下 9~12m 土层内的干密度显著增大,孔隙体积缩小,压缩性降低,承载力提高,渗透性减弱,湿陷性消除,地基的总湿陷量大大减小,而且自重湿陷性黄土场地可降为非自重湿陷性黄土场地,利用该地层作为高、重型建(构)筑物地基的主要受力层,使用期间,上部结构未产生过大的附加沉降及有害变形,从而为湿陷性黄土地区的高、重型建(构)筑物,采用高能量强夯处理大厚度的湿陷性黄土地基提供了经验和依据。

(1) 高能量强夯的设备和工艺

① 设备

目前,我国在湿陷性黄土地区用于高能量强夯的起吊设备一般为50t履带式起重机,根据高、重型建筑物对消除湿陷性土层厚度不小于9m的要求,前述三个试夯场地的单击夯能分别为6250kNm、8000kNm、7980kNm,夯锤质量及有关参数见表7。

表7 夯锤的质量及有关参数

试夯地点	夯锤质量	夯锤			夯锤落距/m
		直径/m	锤底面积/m ²	锤底净压力/kPa	
山西潞城化肥厂	25	2.99	7.0	35.7	25.0
陕西蒲城电厂	44	3.20	8.0	55.0	18.3
河南三门峡电厂	30	2.52	5.0	60.0	26.6
	25	2.52	5.0	50.0	21.6

为了利用现有起吊设备进行高能量强夯,地基强夯试验和施工过程中,在起重机的臂杆顶部采取增设门架或人字架等装置用以承受夯锤,并借助滑轮组和自动脱钩装置起落夯锤,从而强夯对起重机的倾覆和振动以及钢丝绳的磨损等影响均可大大减小,夯锤移位也由上述装置完成,这种改进能充分发挥起吊能力不足的履带式起重机的作用。

② 工艺

夯击工艺与低、中(1000~4000kNm)能级的强夯工艺基本相同,分为主夯、满夯和拍夯三道工序。

主夯系采用高能量进行夯击,目的在于夯实夯坑底面以下的深部土层,主夯点多按正三角形布置,也可根据拟处理的基础底面的形状布置,主夯点之间的中心距离约为锤底直径的2倍,当地基土接近塑限(或最优)含水量时,每个主夯点通常采取连续夯击,至最佳(或额定)击数止,最佳击数可通过试夯从夯击次数和夯沉量的关系曲线上确定一般为12~18击,其累计夯沉量随夯击次数增加而增大,最大值超过500cm,并与各地夯锤的质量、落距、锤底净压力、主夯点之间的间距和土的性质等因素有关,具体数值见表8。

夯击过程中,主夯点地面除产生大量下沉外,夯坑周围还出现隆起和环向裂缝,夯击次数越多,地面隆起量越大,说明侧向挤出严重,因此,达到最佳夯击次数时,应停止夯击。否则,增加夯击次数,消除湿陷性的土层厚度并不增大。

主夯点夯击完毕后,立即用推土机平整场地和夯坑,随后进行满夯,满夯一般采用中能量(3000~

4000kNm)进行夯击,主要对夯坑底面以上的填土和主夯点之间未夯击的土层进行夯实,以消除其上部土层的湿陷性,并促使夯坑周围地面裂缝闭合或消失,满夯点的间距一般为30~50cm,基本上一个夯点挨一个夯点布置,每个夯点连续夯击9~12次,平均总夯沉量为110~120cm。

表8 各地主夯点的总夯沉量

试夯地点	夯锤			夯击次数	总夯沉量/m	总夯沉量/cm
	质量/t	落距/m	底面积/m ²			
潞城化肥厂	25	25.0	7	18~22	5.0	377
蒲城电厂	44	18.3	8	18	6.4	357
三门峡电厂	30	26.6	5	17	5.1	558
	25	26.0	5	22	5.1	409

经满夯处理后的土层通常与基础底面直接接触,或离基础底面很近,有些是需处理的整个建(构)筑物的平面范围内进行夯击,夯点多,夯击工作量大,尤其雨季,基坑内积水,土的含水量增大,夯击时呈软塑状态容易出现“橡皮土”,因此,妥善解决好满夯这一环节,对高能量强夯处理地基的质量、速度和经济效益等都有一定的影响。

满夯结束后,再次用推土机平整场地和夯坑,最后采用低能量(1000~2000kNm)进行夯击,每个点夯击1~2次,将表层土夯实拍平。

(2) 高能量强夯处理大厚度湿陷性黄土地基的效果

从各地试夯结束后的原位测试和室内土工试验结果来看,大厚度的湿陷性黄土地基经高能量强夯处理后,在起夯面下9~12m深度内,土的干密度和湿陷系数等主要指标获得显著改善,强夯前后有关土性指标的比较见表9。

6 土(或灰土)挤密桩法

土(或灰土)挤密桩法适用于处理地下水位以上的湿陷性黄土地基,施工时,先按设计图在基础平面位置布置桩孔,通过成孔过程中的横向挤压作用,桩孔内的土被挤向周围,使桩间土得以挤密,随后将备好的素土(粉质粘土或粉土)或料土在最优含水量下分层填入桩孔内,并分层夯(捣)实,至设计标高止。用素土分层回填夯实的桩体,称为土挤密桩;用灰土分层回填夯实的桩体,称为灰土挤密桩,消石灰与土的体积配合比,宜为2:8或3:7。两者分别与挤密后的桩间土组成复合地基,共同承受基础的上部荷载。

表9 各地强夯前后有关土性指标的比较

山西潞城化肥厂2号冷却塔场地				陕西蒲城电厂主厂房场地				河南三门峡电厂			
土样深度/m	干密度/ ρ_d	压缩模量/MPa	湿陷系数(δ_s)	土样深度/m	干密度/ ρ_d	压缩模量/MPa	湿陷系数(δ_s)	土样深度/m	干密度/ ρ_d	压缩模量/MPa	湿陷系数(δ_s)
2	1.563	8.9	0.00	12	1.80	18.3	0.00	5	—	—	—
	1.348	1.83	0.0568		1.48	22.6	0.0184		1.32	—	—
3	1.637	7.5	—	13	1.78	30.2	0.002	6	1.71	0.17	0.004
	1.323	2.1	—		1.69	31.8	0.001		1.35	0.14	0.037
4	1.577	9.3	0.001	14	1.79	29.8	0.00	7	1.86	0.10	0.005
	1.433	2.9	0.0322		1.46	30.7	0.0304		1.35	0.08	0.064
	1.650	16.2	0.001	15	1.80	37.1	0.00	8	1.83	0.13	0.00
5	1.373	3.5	0.0327	16	1.47	20.2	0.026	9	1.37	0.10	0.034
	1.653	14.7	0.001		1.68	5.2	0.0019		1.83	0.11	0.00
6	1.456	2.4	0.0256	17	1.36	7.0	0.0411	10	1.30	0.24	0.064
	1.609	39.1	0.001		1.77	37.5	0.00		1.76	0.13	0.004
7	1.535	5.2	0.0304	18	1.43	18.6	0.0402	11	1.361	0.18	0.044
	1.581	11.6	0.001		1.60	23.7	0.00		1.78	0.10	0.003
8	1.506	6.9	0.0144	19	1.41	6.7	0.0181	12	1.38	0.18	0.030
					1.46	6.5	0.0104		1.78	0.21	0.00
				20	1.47	13.0	0.0181	13	1.38	0.12	0.066
					1.49	20.7	0.0122		1.72	0.09	0.00
					1.46	30.4	0.022	14	1.37	0.14	0.059
									1.49	0.05	0.006
									1.32	0.08	0.038
									1.46	0.14	0.014
									1.49	0.10	0.014
									1.44	0.07	0.031
									1.41	0.08	0.018

注:分子为夯后指标,分母为夯前指标。

此法通常用于处理非饱和的湿陷性黄土地基、杂填土地基和欠压实的填土地基,其处理深度一般为5~10m,最大处理深度可达15m以上,处理后的地基承载力比地基处理前:土挤密桩可提高0.4~1.0倍;灰土挤密桩可提高2.0倍以上,其变形大大减小。

采用局部处理时,挤密地基的面积应大于基础的面积,超出基底边缘的宽度,以能防止基础侧的土不产生侧向挤出为宜。对自重湿陷性黄土地基,超出基础边缘的宽度每边不宜小于其短边长度的0.75倍,并不应小于1m;对非自重湿陷性黄土地基,超出基础底边的宽度,每边不宜小于其短边长度的0.25倍,并不应小于0.5m。也可分别按下式计算:

$$\text{自重湿陷性黄土地基 } A=2.5a(b+1.5a) \quad (6)$$

$$\text{非自重湿陷性黄土地基 } A=2.5a(b+0.5a) \quad (7)$$

式中A——挤密地基的面积, m^2

a, b ——分别为基础短边和长边的长度, m

采用整片处理时,挤密地基的宽度,超出建筑物外墙基础外缘的宽度,不应小于挤密桩长度的一半,并不应小于2.0m。

当采用上述方法处理湿陷性黄土地基时,不得用粗颗粒的砂、石或其它透水性材料填入桩孔内。

桩孔直径一般为40~50cm,并可根据所选用的成

孔设备或成孔方法确定。桩孔宜按正三角形布置,桩孔间的中心距离S宜为2.0~2.5倍桩孔直径,并可按下式确定。

$$S=0.95d\sqrt{\frac{\bar{\lambda}\rho_{dmax}}{\lambda\rho_{dmax}-\rho_d}} \quad (8)$$

式中S——桩孔间的中心距离, m;

d ——桩孔直径, m;

$\bar{\lambda}$ ——地基挤密后,桩间土的平均压实系数,宜取0.93;

ρ_{dmax} ——桩间土的最大干密度, g/cm^3 。

ρ_d ——地基挤密前土的平均干密度, g/cm^3 。

布置在基础短边桩孔,可根据计算确定,但在非自重湿陷性黄土地基,不应少于2排,在自重湿陷性黄土地基,不应少于3排。

桩孔深度应根据土性和工程要求确定。自重湿陷性黄土地基上的桩孔深度,宜为全部湿陷性土层的深度,或按剩余湿陷量不大于20cm控制,非自重湿陷性黄土地基和杂填土、欠压实的填土地基上的桩孔深度,应分别满足下式要求:

$$\text{非自重湿陷性黄土地基: } P_s + P_{cs} \leq P_{sk} \quad (9)$$

$$\text{杂填土或欠压实的填土地基: } P_s + P_{cs} \leq f \quad (10)$$

式中 P_s, P_{cs} ——分别为土(或灰土)挤密桩底部下卧

层顶面土的附加压力和自重压力, kPa;

P_{Δ} —土(或灰土)挤密桩底部下卧层顶面土的湿陷起始压力, kPa;

f —土(或灰土)挤密桩底部下卧层顶面修正后土的承载力设计值 kPa。

用土挤密桩处理湿陷性黄土地基是前苏联 IO. M 阿别列夫教授于本世纪 30 年代提出来的, 在工程中推广应用达 60 多年之久, 桩孔可用打管、沉管、爆破或冲击等方法取得, 施工工艺日臻完善, 至今它仍是独联体和东欧各国广泛应用于处理深层湿陷性黄土地基的主要方法。

我国自 50 年代开始, 结合工程通过试验研究, 应用土挤密桩法对兰州西站车辆厂某车间的湿陷性黄土地基进行了处理, 技术效果良好, 60 年代以来已将此法扩大到民用建筑的地基处理中使用。

用灰土挤密桩法处理杂填土地基和湿陷性黄土地基, 是我国于 60 年代中期在土挤密桩法的基础上发展起来的, 两者的作用和工艺、设备基本上相同。

土(或灰土)挤密桩地基的承载力, 可按静载荷试验结果绘制的 $Q-S$ 曲线确定, $Q-S$ 曲线上的拐点不明显时, 分别按其相对沉降 $S/b=0.01\sim 0.015$ 和 $S/b=0.006\sim 0.008$ 所对应的荷载确定。其结果见表 10。

表 10 土(或灰土)挤密桩地基的承载力标准值 /kPa

孔内 填料	湿陷性黄土		杂填土	
	f_s	E_s/MPa	f_s	E_s/MPa
素土	范围值 170~250	12~18	120~180	8~12
土	平均值 210	15	150	10
灰土	范围值 240~280	25~35	180~240	20~28
土	平均值 260	30	210	24

土(或灰土)挤密桩地基在 200kPa 压力下浸水后引起的附加下沉量见表 11。

表 11 土(或灰土)挤密桩地基浸水后引起的附加下沉量

地 点	天然		土挤密桩		灰土挤密桩		基底压 力/kPa
	S/cm	S/b	S/cm	S/b	S/cm	S/b	
山西闻喜	14.40	0.204	0.80	0.011	1.05	0.015	200
陕西西安	13.24	0.176	1.03	0.010	0.57	0.004	200
甘肃天水	60.60	0.466	0.60	0.005	0.50	0.004	200

上述表 10、表 11 中的试验结果说明, 采用土挤密

桩和灰土挤密桩处理湿陷性黄土地基及杂填土地基的效果都很明显, 浸水后引起的附加下沉量很小, 达到了提高地基承载力和消除地基湿陷性的目的。

7 化学加固法

湿陷性黄土地区较常用的化学加固法, 有硅化加固法和碱液加固法。

硅化加固法一般通过打入的金属灌注管网, 在一定的压力下将硅酸钠(俗称水玻璃)溶液注入土中或将硅酸钠和氯化钙两种溶液先后轮番注入土中。前者称为单液硅化法, 后者称为双液硅化法。

(1) 单液硅化法

单液硅化法适用于加固渗透系数为 0.1~2.0m/d 湿陷性黄土和渗透系数为 0.3~5m/d 的粉砂。

加固湿陷性黄土时, 系由浓度 10~15% 的硅酸钠溶液加入 2.5% 氯化钠组成, 溶液入土后, 由于溶液中的钠离子与土中水溶性盐类中的钙离子产生互换的化学反应, 即在土颗粒间及其表面形成硅酸凝胶, 使土具有水稳性和不湿陷性, 土的无侧限极限抗压强度可达 300kPa 以上。

用 x 光镜和显微镜观察表明, 硅酸钠的生成是十分迅速的。最初, 凝胶薄膜的厚度很小, 只有几微米, 因而它不妨碍溶液注入土中, 但相隔几小时后, 由于凝胶薄膜的增厚和硬化, 土的毛细管网逐渐被堵塞, 其渗透性随即减小, 土的强度是在溶液入土的最初 15 昼夜内增长最快, 将硅化加固后的黄土长期浸泡在水中无不良变化。

自 1959 年以来, 我国在湿陷性黄土地区, 针对某些建筑物的柱基和设备基础, 在使用期间地基浸水湿陷, 沉降不均, 导致建筑物倾斜和裂缝等问题进行了硅化加固试验和地基加固, 制止了湿陷的发展, 保证了建筑物的安全与正常使用, 新建和扩建工程中的某些设备基础, 采用硅化加固预防地基湿陷, 也取得了良好效果。

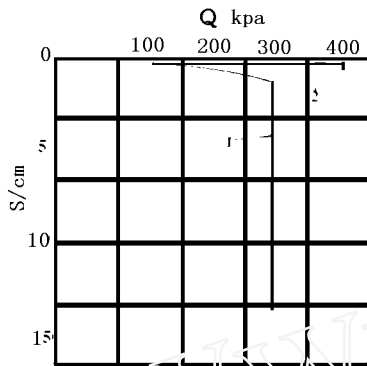
单液硅化加固后土的立方体无侧限抗压强度, 可由加固前 100kPa 提高至 1000kPa 以上, 其具体数值见表 12。

在非自重湿陷性黄土地基上, 硅化加固地基前、后的载荷试验结果见图 4。

从图可见, 湿陷性黄土地基经单液硅化加固, 在 300~400kPa 压力下 $Q-S$ 曲线仍接近直线变化, 其压缩变形量很小, 与未加固的天然地基载荷试验相比, 变形模量和承载力都大大提高, 地基浸水后的附加下沉量也很小, 湿陷性已完全消除。

表 12 单液硅化加固黄土的
无侧限抗压强度

试件尺寸 /cm	极限抗压 强度/kPa
15.06×15.08×15.42	17.6
15.26×15.15×15.36	13.4
15.10×15.20×15.02	14.3
9.83×9.88×10.25	14.5
10.20×10.11×10.32	19.3
10.64×10.26×10.14	11.9
10.10×10.05×10.20	16.7

图 4 硅化加固地基载荷试验的 Q—S 曲线
1—天然地基; 2—单液硅化加固地基

(2) 双液硅化法

双液硅化法一般用于加固渗透系数为 2~80m/d 的砂性土或用于防渗止水, 作成不透水的帷幕。硅酸钠溶液的比重一般为 1.35~1.44, 氯化钙溶液的比重一般为 1.26~1.28。两种溶液入土后, 除一般化学反应外, 主要为胶质化学反应, 生成硅胶和氢氧化钙。

硅化(单液或双液)加固法可达到的加固半径与土的渗透系数、灌注压力、灌注时间和溶液的粘滞度等因素有关, 一般为 0.4~0.7m, 并可结合工程通过单孔灌注溶液试验求得, 各灌注孔在平面上宜按等边三角形的顶点布置, 其距离可采用加固土半径 1.73 倍, 各排灌注孔之间的距离可采用加固土半径的 1.5 倍。加固深度可根据土质情况和建筑物的要求确定。

采用硅化法加固地基, 一般使用液体水玻璃, 其颜色多为透明或稍许混浊, 不溶于水的杂质含量不应超过 2%, 水玻璃的模数 M 值, 可按下式计算:

$$M = \frac{\text{SiO}_2(\%) }{\text{Na}_2\text{O}(\%) } \times 1.03 \quad (11)$$

试验研究表明, M 值为 2.5~3.3 范围内的硅酸钠溶液, 加固土的强度可达最大值。

加固 1m³ 土需要的硅酸钠(单液)或硅酸钠和氯化钙(双液)的溶液量, 通常按下式计算:

$$Q = v \cdot n \cdot K \quad (12)$$

式中 v—欲加固的土体积, m³; n—溶液注入前, 土的孔隙体积, %; K—溶液填充孔隙的系数, 一般为 0.6~0.8。

当硅酸钠溶液的浓度大于欲加固的地基所要求的浓度时, 应将其加水稀释, 其加水量可按下式计算:

$$q = \frac{d - d_1}{d_1 - 1} \times N \quad (13)$$

式中 d—硅酸钠溶液稀释前的比重, 一般为 1.45~1.53; d₁—硅酸钠溶液稀释后的比重, 一般为 1.13~1.15; N—硅酸钠溶液稀释前的数量, L。

配溶液时, 先将欲稀释的硅酸钠溶液送入金属或木制的容器内, 随后加入计算的加水量, 如采用单液硅化, 并加入额定数量的掺料, 搅拌均匀, 用比重计测其浓度, 符合要求时, 即可将配好的溶液注入欲加固的土层中。灌注溶液与将灌注管送入土中的程序相同, 土质较均匀时, 一般自上向下分层灌注。

灌注溶液的压力, 由小逐渐增大, 一般为 100~200kPa; 灌注溶液的速度, 由慢逐渐加快, 一般为 5~10L/min。整个灌注孔的计算溶液量灌注完毕后, 应及时拔出灌注管, 并用水清洗干净, 晾干再用。

硅化加固法需耗用水玻璃和氯化钙等工业原料, 成本较高, 其优点是能很快地制止地基的变形, 土的强度也有很大提高, 对已有建筑物地基的加固特别适用。

但对于已渗入石油产品、树胶和油类以及地下水 pH 值大于 9 的地基土, 不宜采用硅化法加固。

(3) 碱液加固法

采用 NaOH 溶液(俗称碱液)对粘性土地基进行加固的方法, 称为碱液加固法。此法目前主要用于加固已有建筑物中的湿陷性黄土地基。

NaOH 溶液对土的加固作用不同于其它的化学加固法, 它不是从溶液本身析出胶凝物质, 而是碱液与土发生化学反应后, 能使土颗粒表面活化, 彼此自行胶结, 从而增强土的力学强度及水稳性。

8 桩基础

(1) 采用端承型桩的作用

随着高层建筑与大型工业建筑的发展, 有些浅埋基础与地基的承载力往往不能满足设计要求, 因而近

些年来,在湿陷性黄土地区采用桩基础的工程日益增多。

众所周知,桩基础既不是天然地基,也不是人工地基,它与土垫层地基、强夯地基、土(或灰土)挤密桩复合地基完全不同。桩基础是将上部荷载传递给桩侧和桩底端以下的土(或岩)层,采用挖、钻孔等非挤土方法而成的桩,是在成孔过程中将土排除孔外,桩孔周围土的性质并无改善。试验研究资料表明,设置在湿陷性黄土场地上的桩基础,桩周土受水浸湿后,桩侧阻力大幅度减小,甚至消失,当桩周土产生自重湿陷时,桩侧的正摩阻力迅速转化为负摩阻力。因此,在湿陷性黄土场地上,不允许采用摩擦型桩,设计桩基础除桩身强度必须满足要求外,还应根据场地工程地质条件,采用穿透湿陷性黄土层的端承型桩(包括端承桩和摩擦端承桩),其桩底端以下的受力层,在非自重湿陷性黄土场地,必须是压缩性较低的非湿陷性土(岩)层;在自重湿陷性黄土场地,必须是低压缩性的非湿陷性土(岩)层。这样,当桩周的土受水浸湿,桩侧的正摩阻力一旦转化为负摩阻力时,便可由端承型桩的下部非湿陷土(岩)层所承受,并可满足设计要求,同时桩基地基也不致因浸水引起湿陷,以保证建筑物的安全与正常使用。

垫层地基、强夯地基、挤密桩复合地基等均属于人工地基,它是通过夯(压)设备对土层竖向夯(压)实或通过成孔设备将土挤向桩孔周围,使处理范围内土的干密度增大,孔隙体积减小,压缩性降低,承载力提高,湿陷性消除,并利用处理范围内的土层作为建筑物地基的主要受力层,这是以土治土的地基处理,不需要钢筋、水泥等材料,且造价较低,其目的是改善土的性质。故桩基础和人工地基的作用、机理、设计方法等完全不同。

(2) 灌注桩和预制桩的应用

灌注桩和预制桩作为端承型桩,在湿陷性黄土地区都获得应用,但二者的成型工艺各有特点,选用时应根据场地工程地质条件确定。

灌注桩有扩底和不扩底的灌注桩两种。桩孔直径一般为60~80cm,底端扩大直径一般为90~120cm,最大直径达180cm,入土深度一般为10~25m,最大达30m。二者可采用人工挖孔,也可采用钻机或其它设备成孔。

为了提高桩基的承载力,充分发挥和利用桩底端下部土(岩)层的潜力,通常采用扩底灌注桩。1966~1968年在陕西、甘肃等省的建筑物中,广泛采用扩底灌注桩,此种桩型也属于扩大底灌注桩。桩孔直径为80~100cm的不扩底灌注桩,在工程实践中通常称为井桩。

60~70年代,兰州连城铝厂、兰州279厂等单位,建成投产后,有些车间地基受水浸湿发生严重湿陷事故,影响安全使用,采用井桩(直径为80cm,桩底端支承在卵石层,入土深度为28~32m)以原有基础进行托换后,使濒临报废的若干车间得以恢复生产,给国家挽回了巨大的经济损失。

采用桩基础成功的实例尽管很多,但也有由于设计、施工不周而出事故的工程。例如:兰州刘家峡化肥厂的造粒塔,建在Ⅲ级自重湿陷性黄土场地上,采用爆扩桩基础,基底下的湿陷性黄土层厚度为16m,爆扩桩底端设置在地面下12m,试产结束后,由于未将水引入排水系统,水直接浸入地基,导致该塔沉降不均,产生严重倾斜和破坏,后来采取措施重新加深爆扩桩基础,将其穿透湿陷性土层,支承在可靠的卵石层上,沉降的发展才得以制止,推迟正式投产近3年。又如,兰州连城铝厂的电解铝车间,也是建在Ⅲ级自重湿陷性黄土场地上,湿陷性黄土层厚度近30m,爆扩桩基础的埋深为12m,在使用期间,地基多次受水浸湿引起严重湿陷,并多次加固地基和上部结构,效果不佳,最后采用井桩对原有基础进行托换,使井桩底端支承在卵石层上,吊车梁的柱基沉降才得以稳定。

从上述工程事故实例不难看出,采用桩基础不穿透湿陷性黄土层,只要桩底端下部土层受水浸湿,湿陷事故是不可避免的。

预制桩是施工前在砼预制厂(或工地)按设计图将桩提前预制好,养护期满后将其运至施工现场,一般使用方桩,其边长多为35cm×35cm~45cm×45cm,入土深度为15~30cm,并可将其分为打入式预制桩和静力压入式预制桩两种。前者一般采用锤重为1.8~2.5t的打桩设备将桩送入土中设计深度,后者是采用160t~360t的全液压压桩设备将桩送入土中设计深度。桩在打或压过程中将土挤向周围,使其周围一定范围内土的性质获得挤密及改善。

但由于灌注桩和预制桩的成型及施工工艺不同,它们的侧阻力和端阻力等都有差异,设计时应根据场地的性质和工程要求对桩型进行合理的选择。

(3) 端承型桩的侧阻力和端阻力

自70年代以来,我国在湿陷性黄土地区先后采用悬吊法和在桩体内埋设滑动测微计等方法,对端承型桩的侧阻力和端阻力进行了较系统的试验研究,试验结果表明,桩周的湿陷性黄土受水浸湿以前,桩顶上的荷载由桩侧的正摩阻力和桩底端土的反力共同所承受,桩周土受水浸湿以后,在非自重湿陷性黄土场地,桩侧的正摩阻力显著降低,甚至消失,桩顶上的大部或

全部荷载由桩身传给桩底端的受力层所承受。故单桩的侧阻力和端阻力均应按饱和状态下的土性指标确定,饱和状态下的液性指数可按下式计算:

$$I_L = \frac{S_r e}{d_s} - W_p / W_L - W_p \quad (14)$$

式中 I_L —土的液性指数;

S_r —土的饱和度,可取 0.85;

e —土的天然孔隙比;

d_s —土粒的相对密度;

W_L —土的液限含水量, %;

W_p —土的塑限含水量, %。

在自重湿陷性黄土场地,当桩周土层受水浸湿产生自重湿陷时,其相对位移远远大于桩的下沉量,因而沿桩身侧面产生向下作用的负摩阻力,此负摩阻力相当于给桩施加一个向下的附加荷载(简称下拉荷载),并与桩顶上的荷载全部由桩身传给桩底端的受力层所承受。确定单桩承载力时,除不计算湿陷性土层范围内桩侧的正摩阻力外,并应扣除桩侧的负摩阻力。

桩身钢筋砼的压缩变形很小,通常忽略不计,建(构)物在使用过程中,桩侧之所以产生负摩阻力,主要是由于防水措施失效,管道长期漏水或地面经常积水等原因,致使桩周土体由浅至深受水浸湿引起自重湿陷,此外,采用桩基的自重湿陷性黄土场地,大面积地下水水位上升亦能导致桩侧产生负摩阻力。

据测试结果,在湿陷性黄土层厚度、总湿陷量、自

重湿陷量均较大的自重湿陷性黄土场地,不论预制桩或挖、钻孔灌注桩,当桩周土层充分浸水时,桩侧平均负摩阻力可达 16~20kPa,甚至更大,具体数值见表 13。

表 13 桩侧平均负摩阻力/kPa

自重湿陷量/cm	挖、钻孔灌注桩	预制桩
7~20	10	15
<20	15	20

(4) 桩侧负摩阻力的计算深度

目前国内外,一般以桩身的中性点作为计算桩侧负摩阻力深度的下部界限,而桩身的中性点取决于桩和桩周土层的相对位移均相同的那个位置。

当桩的下沉量小于桩周土层的下沉量时,桩周土对桩侧往往产生向下作用的负摩阻力;反之,桩周土对桩侧产生向上的正摩阻力。一般认为,桩的承台底面以下,桩身的中性点以上,桩周土层的下沉量大于桩的下沉量,桩侧的摩阻力为负值,桩身的中性点以下,桩底端以上,桩周土层的下沉量小于桩的下沉量,桩侧的摩阻力为正值,在负摩阻力过流为正摩阻力的相交处,桩与桩周土层的下沉量相等,且摩阻力为零,在工程实践中通常称此点为中性点,见图 5。

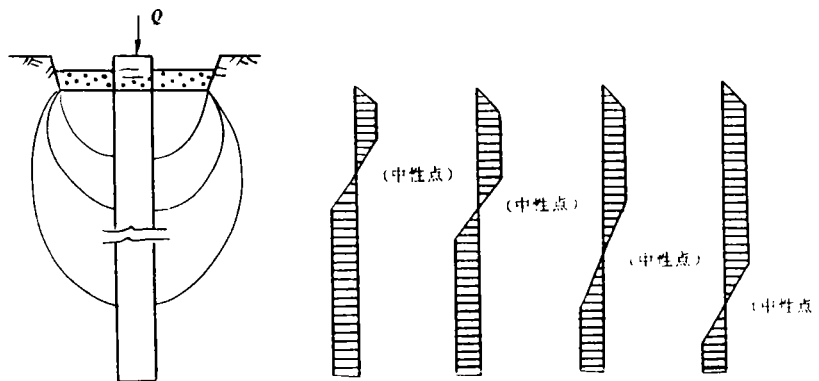


图 5 桩周正、负摩阻力和中性点随土层浸水深度的变化

由上述可见,桩身的中性点位置取决于桩和桩周土层的相对位移,并与土的湿陷性质、浸水时间、浸入土层中的水量和浸湿范围等因素有关,只有当桩周的湿陷性土层充分浸水引起的下沉量完全稳定后,桩身的中性点位置方可固定不动。

当桩底端支承在岩石或砂卵石层上时,桩基的下沉量一般很小,主要是桩周土层自重湿陷引起的下沉量,桩身侧面几乎都是负摩阻力,在此种情况下,可将岩石或砂卵石层顶面作为桩身的中性点,而桩侧的负摩阻力可按入土深度的全部长度计算。在其它情况下,

为简便起见。可按桩的入土深度的0.8~0.9倍长度作为桩侧负摩阻力的计算深度。

端承型单桩承载力,宜直接按现场浸水载荷试验结果确定,且桩侧的正、负摩阻力均包含在承载力内。当无条件进行现场浸水载荷试验时,可按国家有关现行规范规定确定。

参考文献

- 1 国家标准《湿陷性黄土地区建筑规范》(GBJ25—90)
- 2 国家行业标准《建筑地基处理技术规范》(JGJ79—91)
- 3 国家标准《建筑地基基础设计规范》(GBJ7—89)
- 4 国家行业标准《建筑桩基技术规范》(JGJ94—94)
- 5 钱鸿缙等编.湿陷性黄土地基,中国建筑工业出版社

上接第17页

为主,蒙脱石等次之) $<20\%$,盐类物质以碎屑形式填粒间或以胶结形式与土颗粒相连。

湿陷的外部因素有:能使可溶盐溶解的水的侵入作用;能使颗粒移动的压力作用。

湿陷性黄土之所以能产生湿陷,首先是它含有60%粉粒,孔隙度大,为产生湿陷提供了充足的空间条件。其次是湿陷性黄土都含有可溶盐,在颗粒间起胶结作用,它遇水后降低或消失,为湿陷时颗粒的滑移创造了条件。

被溶解颗粒接触点起胶结作用的可溶盐之体积、厚度变小,并在粘土粒膨胀作用上,至一定程度残留的胶结强度抵抗不了使颗粒移动的外力时,由可溶盐胶结的那部分接触点(或称胶结点)发生断裂,结构体系的强度降低,结果发生湿陷。

综上所述,湿陷性黄土的孔隙结构状态是湿陷的主要内部因素,也是产生湿陷的空间条件,含可溶盐及其分布状态、粘粒的膨胀等是产生湿陷的一般内部因

素;压力和水是直接引起湿陷的外部因素。

4 结语

(1) 太原地区湿陷性黄土以粉土颗粒为主,具大孔隙结构,可溶盐含量较高;

(2) 太原地区湿陷性黄土层厚一般为2~12m,多为非自重湿陷,局部为自重湿陷,从低阶地至高阶地,湿陷级别升高;

(3) 太原地区湿陷性黄土的湿陷性,随着天然含水量和天然密度的增加,湿陷系数有减小的规律,随着天然孔隙比的增大,湿陷系数呈正比的规律增大;

(4) 太原地区湿陷性黄土的孔隙结构状态是湿陷的主要基因,压力和水浸入作用是湿陷的主要诱因,二者是相辅相成的;

(5) 太原地区湿陷性黄土的湿陷程度不大,但表现黄土湿陷敏感程度的湿陷起始压力较小,这就需要在今后评价建筑场地工程特性,特别是建设高层建筑时,须作全面考虑。