软土地基上的堤闸建设问题

杨光华

（广东省水利水电科学研究院，广东 广州 510610）

摘　要：珠江三角洲的软土分布广泛，水利建设中正在遇到大量在软土地基上的堤围加固，穿堤涵闸的建设问题，其中最主要的技术难题是软基处理的问题。本文主要是针对目前建设中遇到的若干技术问题进行探讨，以供参考。这几个问题是：软土地基承载力的合理确定问题及涵闸地基处理、软土地基的变形问题、填土速率的控制问题、旧堤加固及软土参数取值问题、侧向土压力问题、复合地基的应用问题、软土施工顺序的影响等，这些问题影响到工程的质量和安全，是目前工程建设中急需解决的问题。

关键词：软土地基处理；软土参数取值；堤闸建设

作者简介：杨光华(1962－　)，男，博士，总工程师，主要从事土的本构理论、基坑工程、软土工程及高层建筑基础工程等研究设计咨询工作。

1　珠江三角洲软土特性

珠江三角洲的软土可以说是全国最软的软土之一，存在软土厚，含水率高，压缩性高，承载力低的特点，其含水率一般为60%～100%，孔隙比一般为1.5～2.5，承载力一般为40～60 kPa，在这样的软土地基上筑堤建闸，软土地基的处理是很重要的。

2　软土地基工程中存在的问题

目前软土地基上的涵闸基础处理方式很多，每一种方式都有其合适的适用范围，这些方法中包括换填、木桩、混凝土桩。混凝土桩主要指混凝土端承或端承摩擦桩，包括钻孔灌注混凝土桩，预应力管桩等，还有水泥搅拌桩复合地基、刚性桩复合地基、碎石桩复合地基等。这些处理方法用得不恰当也会影响工程安全，有时也达不到效果，软土地基处理中，目前存在以下一些问题值得重视：①大面积填土涵管基础，采用换填不解决问题。换填是为了把应力扩散，但大面积荷载下应力扩散作用不大，因此，一般涵管基础换填处理作用不大；②木桩仅解决竖向荷载，对侧向荷载受力差。是水利常用的基础处理方法，如用于挡土墙基础处理，但若在木桩处理外有填土荷载产生侧压力，往往会产生较大水平位移，包括目前采用管桩基础的挡土墙，往往也会产生过大的侧向位移影响安全；③混凝土桩基一般沉降较少，易造成底板脱空产生渗流或管涌，在结构边缘处容易产生沉降差。这是目前涵闸基础采用混凝土等刚性基础处理而出现的较普通问题；④软土地基处理采用复合地基是较合适的，可以保证底板与土体的接触，调节沉降差。但复合地基检测方案目前还不够完善，要科学合理应用检测结果；⑤一些软土处理采用碎石桩方案，但碎石桩复合地基在珠三角高含水率软土地基中不是很适用，主要是这种超软土地基对碎石桩提供的侧向约束不够，因而存在较大沉降量。对深厚淤泥层一般不用；⑥目前涵闸地基承载力的确定未充分考虑基础的边界条件，地基承载力的确定不合理，以致很多基础处理过多采用了桩基；⑦一些旧堤的加固中，软土的参数未考虑已有的固结，强度参数取值保守，造成地基处理的浪费；⑧一些软土工程中未注意软土受力的不可逆性，施工顺序不合理，造成施工过程的不安全性。

3　软土地基承载力的合理确定问题及涵闸地基处理

地基承载力的概念包含两个，即地基的强度稳定和变形，要求地基强度有足够安全储备，不致失稳破坏，即：

$$P<P_u/k \quad , \tag{1}$$

式中，P 为基底应力，P_u 为基底土极限承载力，K 为安全系数。

同时结构的沉降量在容许范围，即：

$$S\leqslant[S] \quad , \tag{2}$$

式中，S 为基础沉降或沉降差，$[S]$为结构允许的基础沉降或沉降差。

3.1　影响地基强度的因素

土性和边界条件，包括基础埋深、宽度等，水是没有承载能力的，但水可载舟，主要是埋深的影响。

3.2　涵管软土地基问题

其实通常破堤建涵管是不存在所谓的地基强度问题的，因涵管埋在堤中，且开挖荷载大于回填荷载，假若涵管是采用顶管建造，则显然不存在地基承载力问题。破堤建涵管，涵管埋在旧堤中，不存在地基强度失稳问题，主要是解决回填后产生的地基不均匀沉降问题，较理想的方法是采用调整地基的刚度，针对可能的沉降形状，采用不同的地基刚度分布，使回填后沉降较均匀。涵管地基中采用换填浅层处理不能很好解决问题，因涵管地基主要是纵向沉降差问题，不是地基强度问题，换填主要是浅层处理，并不能解决涵管的纵向沉降差问题，由于堤身填土是梯形荷载，浅层换填后仍会产生锅形沉降。

收稿日期：2006－07－30

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

涵管地基采用端承为主的桩基础存在的问题：采用以端承为主的桩基后，涵管沉降小了，但涵管两侧填土会使涵两侧沉降大于涵管沉降，会产生涵底脱空和涵侧堤身裂缝问题。

3.3 水闸软土地基问题

软土地基上建闸有两种情况，一是新地基上建闸，闸两侧建引堤，二是破旧堤建闸。

对于新建水闸，一般软土含水率 w=60%～100%的淤泥上，地基承载力不易满足，要进行地基处理，处理方式通常有：木桩、浮运闸、浅层换砂、混凝土桩基、复合地基等，水闸软基处理不仅是闸基问题，要考虑全面性、整体性及沉降变形的协调性和过渡问题。目前的处理忽略闸两侧的地基处理和沉降，其实多数情况闸两侧的填土荷载和沉降都可能大于闸室，把闸基处理过刚，会在闸两侧边产生过大沉降，这是目前闸基处理存在的主要问题。

早期如浮运闸及混凝土桩基存在这种问题更严重一些。尤其是混凝土桩基，须注意底板及闸两侧脱空而产生的渗流问题，处理不好往往会产生事故，必须吸取教训。这种水闸软基处理建议采用复合地基处理较合适。复合地基可用深层搅拌桩，刚性桩复合地基，不适宜用碎石桩复合地基。同时应要注意闸两侧边过渡区的处理，使沉降变形不致产生过大的沉降差。

3.4 对破堤建闸问题

破堤处软土已经受了长期的固结，其承载力的地基强度方面不存在太大问题，地基强度主要是上、下淤进出水口边缘部分问题，而主要是沉降问题。在堤中部分，卸去的土重一般要大于闸底应力，闸基处理建议采用复合地基调节沉降和局部强度，做到经济、合理、安全。采用混凝土桩基同样存在闸两侧回填后可能存在的脱空渗流问题，必须谨慎处理。

4 软土地基的变形问题

软土地基变形最大的特点是时间性、非浅性。由于软土的渗透系数较小，一般 $K=1\times10^{-6}\sim10^{-8}$ cm/s，排水固结时间长，其沉降时间往往长达数年，很多水闸两侧的沉降差往往每年都有新的发展，就是由于软土变形的时间性所产生。当应力水平较高时，可能还会存在着儒变，变形时间长达数十年，著名的比萨斜塔的倾斜变形就是由于其基础下存在软土层，使其倾斜发展达几百年。

软土地基变形的另一个特点就是非线性，由于变形的非线性而致使沉降变形计算困难、精度较低，影响到合理设计，这要涉及到较为复杂的土的本构关系问题。土的变形非线性最典型的例子就是原位压板试验结果。随着荷载的增加，当土体进入弹塑性状态后，沉降与荷载的关系是非线性的。软土的地基强度低，在荷载作用下很易进入弹塑性非线性。

目前规范沉降计算中存在的问题：采用 $e-p$ 曲线加经验系数，误差大，不同规范经验数不同。国家标准《堤防工程设计规范》[1]的经验系数为 m=1.3～1.6，国家行业标准《建筑地基处理技术规范》[2]的经验系数 m=1.1～1.4，对无侧限有侧压的问题交通部标准《公路桥涵地基与基础设计规范》[3]m=1.1～1.8，国家行业标准《港口工程地基规范》[4]认为港口工程缺实测资料，未提出 m 值范围，只说按地区经验取值，软土的沉降变形受侧压影响大，很难合理计算，$e-p$ 曲线是有侧限的试验结果。珠海的软土沉降通常会达到填土厚度的 20%～30%，如 5～6 m 的填土，沉降可能会达 1.5～2 m。对无侧限有侧压的沉降计算问题要研究，要有合理的结果，必须建立能考虑侧压对变形影响的模型。

软土的非线性沉降计算简化方法：用邓肯模型定义的切线模量 E_t 代替 $e-p$ 曲线的 E_s，E_t 可用 $e-p$ 曲线近似获得。考虑了应力状态的影响[5]：

$$E_t=\frac{(1-R_fS)^2}{(1-R_fS_0)^2}\cdot E_s, \tag{3}$$

式中　S 为实际应力状态下的应力水平，S_0 为有侧限条件下的应力水平。

5 填土速率的控制问题

软土的强度与固结度有关：

$$\tau=c'+(\sigma-u)\tan\varphi',$$

式中　σ 为总应力，u 为土中的孔隙水压力，当软土完全固结后，u=0，则强度达到最大值。一般软土的强度指标有快剪 c_u、φ_u，固结快剪 c_c、φ_c，固结有效强度 c'、φ'，他们的关系为：有效强度＞固结快剪强度＞快剪强度。

软土要达到固结要有一定的时间，当快剪强度也即软土饱和强度不能满足稳定要求时，可以通过控制慢速填筑，使软土有一定的固结度，软土强度增长后，再填高，这样，可以通过科学的分级填筑，使软土上的堤围能填筑起来，这种方法最省钱，但需要时间，同时要控制填土速率，且其最大可能的强度是有效强度。若软土地基的有效强度都不能满足稳定要求时，则软土地基必须要进行竖向加强处理，以分担软土所不能分担的荷载。因此，控制填土速率仅是在软土有效强度范围内适用的一种方法。

填土速率控制的理论是通过分级填筑使软土强度增长适应所加荷载，从而达到保持地基稳定的填筑方法，要做好这一工作，要有一套合适的计算理论，同时还要有系统的监测方案，以监测地基的沉降过程、沉降速率，达到信息化施工，以指导施工填筑。

6 旧堤加固及软土参数的取值问题

目前的堤围加固工程中，很多情况下是对旧堤的加高培厚，这一工作中存在的主要问题是堤下软土地基强度参

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

数的取值问题，此时由于堤基软土在旧堤荷载的长期作用下早已固结，因此，此时软土的强度参数应采用考虑一定固结的强度参数，设 c_u、φ_u 为饱和快剪强度指标，c_c、φ_c 为固结快剪强度指标，若旧堤已经多年充分固结，则软土的强度参数可取为[6]

$$c = c_u + \frac{P'}{p' + \Delta P}(c_c - c_u) \quad , \tag{4}$$

$$\tan\varphi = \tan\varphi_u + \frac{P'}{P' + \Delta P} \cdot (\tan\varphi_c - \tan\varphi_u) \quad , \tag{5}$$

式中 P' 为旧堤自重荷载，ΔP 为加固新增的自重荷载，显然，当 $\Delta P \to 0$ 时，则相当于取软土的强度参数为 c_c、φ_c，因此当 ΔP 较小时则 c、φ 较接近固结快剪强度指标，这样既符合实际，也可取得较好效益。另一方法是通过目前未加固前堤是稳定的事实进行反算软土的强度指标。一些待加固的堤围，根据地质报告提供的快剪指标，对旧堤未加固之前的稳定性进行复核，发现其安全系数只有 $k=0.6\sim0.7$，显然，要在此基础上，将堤加固后提高至一般的二级堤防 $k=1.25$，则势必要增加很大的投入，也不切合实际，其实完全可以假设未加固时旧堤的稳定安全系数 $k=1.0$，在此基础上反算软土参数，这已是偏保守了，再以此参数设计加固后堤的稳定安全系数 $k=1.25$ 则要经济合理得多了，这是目前很多堤围加固中遇到的一个问题。

加固的方式也是目前经常遇到的问题，有些加固认为抗滑稳定不够，要用到旋喷桩提高抗滑能力，这是很不经济的，这正好应用了旋喷桩的缺点，因旋喷桩是素混凝土，抗压好而抗弯剪能力差，因此不是一个很好的方案，应采用反压或处理成地基垂直承载较好。

7 软土的侧向土压力问题

软土的侧压力由于规范没有明确的设计和计算要求，往往不太为人所重视而容易发生事故，主要有以下几种情况：①涵闸桩基在两侧填土时，填土下软土会对涵闸桩基产生较大的侧压力，可能会使桩基受弯断，处理方法是在填土下可采用复合地基，减少软土侧压力，或采用格构式搅拌桩对工程桩进行保护；②软土中基坑开挖由于开挖面高差太大，使软土产生侧移而致使基坑中的工程桩发生过大的侧向变形，处理方法是控制开挖临空面的高差不能过大，或采用格构式深层搅拌桩进行保护；③挡土墙基础采用木桩或预应边管桩，这类桩竖向承载力强而抗水平能力差，墙后填土时会在其下的软土层产生侧向压力，从而致使挡土墙产生侧向水平位移。处理方法是采用具有较强抗水平能力的桩基，如混凝土桩或格构式搅拌桩复合地基，或在墙后填土区也采用复合地基处理填土，以减少填土下软土的侧压力。

软土由于侧移而产生侧压力，使桩产生侧移，这种受力桩称为被动桩，这是由于原本使桩用于抵抗侧压力的土体产生侧移带动桩侧移，有别于通常土体不动，桩顶受水平力的主动桩。被动桩的受力分析更复杂，要用迭代法考虑桩的位移协调而求得。

8 软土施工顺序对工程的影响

软土的变形中很大的一个特点是不可逆性，即发生变形后是不可逆的。工程实践中，很多情况下对施工过程对结构的受力的影响认识不足，设计通常是分析完工后或某一特定工况时结构或地基的受力，但很多未能考虑到施工过程的影响。

8.1 挡墙填土顺序的影响

某一挡墙墙后和墙前均有填土，墙后土高于墙前填土，墙前填土具有反压作用，但施工时，墙前土未填而墙后填土已快速填至设计标高，造成挡墙前移，后再填筑墙前填土，墙已不可能恢复了。

8.2 堤坡填土和反压的施工顺序

一些有反压或较缓的边坡，施工时不注意反压的重要性，施工为方便先填土后往下推，有些坡度由填土自然形成，陡于设计的缓坡，从而造成塌方，也有些未做反压就填高，也易造成塌方，这都是施工过程未注意顺序所造成。

有一个河堤，要进行碎石桩地基处理，这样为进行地基处理先筑临时堤便于机械施工，地基处理完成后开挖临时堤的土方以便进行基础施工，但开挖的过程中就造成滑坡，显然也是由于施工过程的工况更危险所致。

8.3 软土桥台的填土顺序

某地有几座小桥，桥台处于深厚软土地基中，桥台处桥内侧要做成堆坡形成对桥台后路面填土的反压，但未注意施工顺序，施工从方便角度，在桥台做起后未做堆坡反压，在桥台后快速填土，桥台顶部被桥面顶住，而桥台桩基由于没有堆坡的反压，在软土侧压力下产生过大弯矩，致使桩基产生较多的水平裂缝，危及桥台的安全。

因此，软土地基的处理设计，应要实行仿真设计，模似施工的全过程，确定出合理的施工顺序，才可保证安全，因此，工程设计应逐步发展仿真设计，要认识其重要性。

9 复合地基的应用问题

复合地基较适宜于处理涵闸的软土地基，无论是地基强度和变形都是合适的方案。目前在我省应用较成功的主要是搅拌桩复合地基，尤其在珠海目前已广泛采用，在潮汕地区也已在多个水闸应用。对于我省，珠海的软土应是比较差的，珠海都可以应用，相信我省其他地区也可应用。一些大型水闸工程，如潮州水利枢纽，四会马房水利枢纽都已成功应用搅拌桩复合地基处理软基。复合地基处理涵闸软基的重要优点是不会使闸底板产生脱离，可以克服一般混凝土桩基易产生底板脱空渗流的问题，同时造价也较经济。因此，应大力推广复合地基在涵闸软土地基处理中的应用，除用搅拌桩这种柔性桩复合地基外，中山也采用

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

预制混凝土小方桩来构成刚性桩复合地基的方案也是可行的，目前应用复合地基中应要注意以下几个问题。

9.1 检测方法问题

处理后怎样检测才能确定是合格的，目前规范方法仍不够完善，应要注意。例如对搅拌桩复合地基，目前规范主要依据的是复合地基载荷试验和轻型触探，轻型触探只能检查桩顶内 4 m 的桩身，4 m 以下不能检测。载荷试验由于尺寸效应，主要是检测和反映浅部的承载力，但深部没办法检测，所以有时会变成检测合格的地基在实际结构荷载下仍会产生过大的沉降量，形成载荷试验合格，而结构荷载下不合格的地基问题[7]，因此，对这种较大面积的结构荷载下的地基，检测应重视桩身的均匀性和完整性，要多采用抽芯检测方法较合适，以便了解整个桩身的质量。

9.2 检测时间问题

像深层搅拌桩，按规范其抗压强度以 90 d 龄期的试验结果为准，但水利工程一般不可能等到 90 d 检测，一般多采用 28 d，但此时的强度可能只有设计值的 1/3～1/2，因此，检测的强度指标要考虑其龄期强度。

9.3 布置方式问题

对于主要用于解决竖直荷载问题，应采用散体布置较符合复合地基的原理，对于解决水平受荷为主，则可采用格构式。若采用格构式布置解决竖向受荷，既无法检测，造价也高，似乎是浪费。

9.4 碎石桩问题

碎石桩处理珠三角软土并不很成功，目前应用已越来越少，主要原因在于珠三角的软土太软，无法对碎石桩提供足够的侧压力，沉降变形也大，也不好控制，按国家地基处理规范，一般对于不排水抗剪强度小于 20 kPa 饱和软土不宜采用。广东省建筑地基处理规范则规定不排水抗剪强度小于 15 kPa 的饱和粘土地基宜慎用，而不排水抗剪强度小于 10 kPa 的饱和粘土不得采用。

而珠三角软土含水率一般 $w>60\%$，对于深厚饱和软土层一般不适用，对浅层处理则可起到置换作用。而对其处理后的承载力则是有限的，根据复合地基承载力公式：

$$f_{sp}=mf_p+(1-m)f_s, \tag{6}$$

式中，m 为置换率，f_p 为桩体承载力，f_s 为桩间土承载力。

对于桩径 1 m，正方形布置，间距 1.8 m，则 $m=24.2\%$，一般桩土应力比 $n=f_p/f_s=2\sim4$，则显然，当 $f_s=80$ kPa 时，即使取 $n=4$，则最大可能 $f_{sp}=[1+(n-1)m]f_s=138$ kPa。若 $f_s=100$ kPa，则最大可能 $f_{sp}=173$ kPa，因此，碎石桩处理后地基承载力是有限的。处理后复合地基承载力一般为原地基承载力的 2 倍左右。某工地采用碎石桩处理，浅层有淤泥质土，要求处理后承载力特征值达 450 kPa，显然是很困难和不切实际的。

碎石桩用于处理珠三角饱和软土地基是不太适用的，应谨慎使用。

9.5 深层搅拌桩复合地基的应用

深层搅拌桩复合地基在我省水利工程的涵闸地基处理中已逐步被应用，尤其是珠海市，在 98 年将搅拌桩用于广昌水闸 40 m 厚、含水率达 80%的水闸深厚软土地基处理后[8]，已在珠海广泛应用。在潮州水利枢纽大型水闸、肇庆四会的马房水利枢纽大型水闸相继采用了深层搅拌桩复合地基，一般桩间距为 1 m，直径 50 mm，均取得良好效果，沉降量不大。即使在珠海这样软土较差的地区，软土厚达 20 m，若搅拌桩穿透软土层，其沉降量一般也在 5 cm 左右，一般不超过 10 cm。深层搅拌桩采用的工艺主要是湿喷和干喷，一般干喷桩体强度增长较快，但要有好的设备，控制搅拌的均匀性。对于高含水率的软土地基，在目前设备不断改进的条件下，已多采用干喷法施工。

10 结　　语

对于我省水利工程建设中涵闸和堤的软土地基处理是建设中的很关键的技术问题，涵闸软土地基处理应尽量采用复合地基处理较合适，要注意从总体上控制各部位的沉降协调，复合地基的设计要有一个合适的计算模型，对检测结果要注意科学分析。旧堤加固中软土的参数应考虑已有的固结度，参数也可采用对旧堤的反分析进行合理确定。要注意软土沉降的非线性。软土施工过程应要有安全监测方案，以便实行信息化施工，指导填土速率，以确保施工过程的安全。软土工程建设要考虑施工顺序的影响，必要时应进行仿真分析，以确定安全合理的施工方案。

参考文献：

[1] GB50286—98 堤防工程设计规范[S]. 北京：中国计划出版社，1998.

[2] JGJ79—2002 建筑地基处理技术规范[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2002.

[3] JTJ024—85 公路桥涵地基与基础设计规范[S]. 北京：人民交通出版社，1985.

[4] JTJ250—98 港口工程地基规范[S]. 北京：人民交通出版社，1998.

[5] 杨光华，李德吉，等. 计算软土地基非线性沉降的一个简化法[C]// 第九届全国土力学会议论文集. 北京：清华大学出版社，2003.

[6] 杨光华. 软土地基中几个问题的分析[C]// 86-93 广东省岩土工程与基础工程会议论文集，广州：1993.

[7] 杨光华，李思平. 关于复合地基的承载力问题[C]// 第七届全国岩石力学与工程学术大会论文集. 北京：科学出版社，2002.

[8] YANG Guang-hua, LI Si-ping, DU Xu-zhong, ZHANG Jun-lu, et al. Deep marine soil improvement by deep mixing columns and preloading under a water gate[C]// Proceeding of 3rd Conference on Ground Improvement Technique, Singpore, 2000.

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