



地下建筑物的扬压力计算

沈建霞¹, 钱祖宾², 单海春²

(1. 江苏省交通科学研究院股份有限公司, 江苏 南京 210017;

2. 江苏省水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 扬州 225009)

摘要: 扬压力是影响建筑物特别是地下建筑物稳定的重要荷载。对于土基上的扬压力计算, 传统算法是把建筑物基底面看作是扬压力的作用面, 不考虑土体颗粒同基底面相接触而造成的扬压力的减小。对于黏性土地基, 可以引入平面有效空隙率的概念, 这样计算的基底扬压力值比常规算法的结果要小, 从而可以在安全的前提下有效地节约工程投资。

关键词: 地下建筑物; 扬压力; 非悬浮体; 黏性土地基; 平面有效空隙率; 空隙水压

中图分类号: TU 92

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)09-0159-04

Uplift pressure on underground hydraulic structures

SHEN Jian-xia¹, QIAN Zu-bin², SHAN Hai-chun²

(1. Jiangsu Transportation Research Institute, Nanjing 210017, China;

2. Jiangsu Water Investigation, Design and Research Institute, Yangzhou 225009, China)

Abstract: The uplift pressure is one of the main factors that influence the stability of underground structures. For the calculation of uplift pressure on clay foundation, traditional method considers that the uplift pressure works on the whole area of the base. It does not give considerations of pressure decreasing caused by the close contact between clay particles and the base. Through detailed analysis, the present article considers that: for clay foundation, the concept of effective sectional void ratio can be introduced. Hence, the value of uplift pressure is smaller than those calculated by traditional methods, which can save the investment of the projects under the circumstance of safety.

Keywords: underground hydraulic structures; uplift pressure; non-suspended objects; clay foundation; effective sectional void ratio; void water pressure

扬压力是影响地下建筑物安全的重要荷载, 对地下建筑物的稳定、结构内力及管理运行等均有着直接影响。正确分析扬压力的大小, 是保证涉水工程的设计质量, 确保涉水工程安全运行不可或缺的一个重要环节。

物体在液体中通常呈两种状态: 一种是悬浮状态, 如船舶、浮箱、排筏等, 悬浮物体的一个显著特点就是物体的全部重力均由浮力来承担。根据阿基米德定律, 悬浮物体所受浮力的大小就等于物体排开液体的重力。另一种是非悬浮状态,

如箱涵、水闸、船闸、泵站、重力式码头等等, 这类地下建筑的自重荷载较大, 因水体的浮力难以承担其全部重力而处于沉没状态。地下建筑物基本上属于这一类, 这也是本文研究的主要内容。

由于承载非悬浮物体重力的地基由固体颗粒、水和空气三相组成, 因此物体的重力通常也是由地基土、空气和水体扬压力共同承担。

土中的气体可分为与大气相通和与大气不通两种情况。前者的成份与空气相类似, 在外荷载作用下, 易被挤出土外, 后者是封闭气体, 成份

收稿日期: 2014-01-05

作者简介: 沈建霞 (1971—), 女, 博士, 高级工程师, 从事水工工程设计工作。

主要是空气和水汽。由于地基土通常浸没在水位线以下,且均经压实处理,因此土中气体含量很少,对地下建筑物承载力的影响可以忽略不计。物体的重力可看作由水体扬压力和地基土的支承力共同承担。或换一个角度说,物体自重应力由土体的有效应力和空隙水应力共同组成。

1 建筑物地基的扬压力分析

现以封闭的混凝土箱体为例来分析箱体所受扬压力的变化情况。箱体结构见图 1。

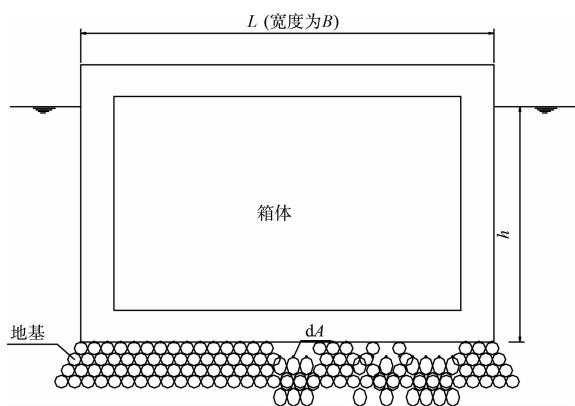


图 1 受力分析

对于土基,地基为由无数土粒构成的集合体,土粒与土粒之间既有空隙,也有若干接触面。土粒间的空隙便构成了水体渗透通道,而土粒间的接触面则构成了土体的整体骨架,地基的承载力实际上就是指土体骨架的承载能力。同理,混凝土箱体的底面与地基土粒间同样存在着若干的接触面,由这些微小接触面共同构成了对箱体重力的承载面,并承担混凝土箱体的全部重力。

如图 1 所示。箱体底面积 $A = LB$, 假设箱体与地基单个土粒接触面的面积为 dA , 箱体重力为 G , 则地基承载面的总面积 $\Delta A = \sum dA$ 。由于地基承载面与箱体底面呈紧密接触状态, 水体难以渗入, 因此箱体底面水压力的分布并不连续, 实际仅分布于箱体底板与地基没有接触的空隙面上。若用 η 表示箱体底面的平面有效空隙率(考虑部分空隙不贯通而对平面空隙率进行折减), 则当水深为 h 时, 箱体所承受的空隙扬压力为 $U = \eta A \rho_w g h$, 此时承载面上的地基应力为

$$P = \frac{G - U}{\Delta A} = \frac{G - \eta A \rho_w g h}{\sum dA} \quad (1)$$

当水深增加至某一特定水深 h_0 时, 箱体所受的空隙扬压力 $U = \eta A \rho_w g h_0$ 正好等于箱体的重力 G , 箱体即处于由非悬浮体向悬浮体转变的临界状态, h_0 称为该箱体的起浮水深。此时承载面上的地基应力为 0, 箱体的底面脱离了与地基的接触, 原先的承载面也受到水压力的作用, 作用于箱体的扬压力将突然增加, 其增量为 $\Delta U = \Delta A \rho_w g h_0$ 。扬压力的突增又将加速箱体的上浮速度, 使得箱体最终浮于水面, 成为悬浮体。

另外有一点须强调的是, 阿基米德定律只适用于悬浮体, 不适用于非悬浮体。对于非悬浮体来说, 物体所受浮力的大小不仅取决于物体排开液体的体积, 而且还与物体底面的平面有效空隙率 η 有关。

2 建筑物地基所受扬压力的影响因素

对于土基, 从空隙扬压力计算式 $U = \eta A \rho_w g h$ 可以看出, 箱体所受空隙扬压力与箱底平面有效空隙率、箱体的底面积、水的密度以及水深成正比。在箱体底面积和水深已知的情况下, 箱体底面的平面有效空隙率 η 便成了影响箱体空隙扬压力的主要因素, 而影响箱体底面的平面有效空隙率 η 的因素是多方面的, 土体的类型、形状、粒径、级配、密实度、渗透系数、箱底面接触应力, 甚至温度等均会影响到箱底平面有效空隙率 η 的大小。一般说来, 砂砾土比黏性土的平面有效空隙率大; 密实度低的土比密实度高的土的平面有效空隙率大; 级配差的土比级配好的土的平面有效空隙率大; 粒径大的土比粒径小的土平面有效空隙率大, 在实际运用时, 基底平面有效空隙率 η 的取值应通过试验加以测定。

对于基底扬压力的取值, 《注册岩土工程师执业资格考试基础考试复习教程》^[1] 一书中指出: “如果基础位于粉土、砂土、碎石土和节理裂隙发育的岩石地基上, 则按地下水位 100% 计算浮托力; 如果基础位于节理裂隙不发育的岩石地基上, 则按地下水位 50% 计算浮托力; 如果基础位于黏

性土地基上,其浮托力较难确切地确定,应结合地区的实际经验考虑”。在以往的地下建筑物设计中,由于不能确定基底实际平面有效空隙率 η 的大小,对土基上的基底扬压力都是偏安全地取用最大值,即不考虑地基承载面积 ΔA 对浮力减小的影响,而把这部分浮力作为建筑物稳定的安全储备。对于完整岩基,底板混凝土浇筑后便与岩基形成一个整体,基底平面空隙率 $\eta=0$,因此承建于完整岩基上的地下建筑物可不考虑基底扬压力的影响。

3 试验方法

由于基底扬压力的取值对地下建筑物的稳定有直接影响,因此,选择合适的扬压力计算值在设计中尤为重要。现分别就实验室和原位2种测量手段分述如下:

1) 实验室测量:如图2,将土样置于一透明容器之内,取一物体置于土样上。不断向容器内加水,直至物体浮起,测出物体的起浮水深 h_0 。由公式 $G = \eta A \rho_w g h_0$ 可计算出土样的平面有效空隙率 η 。

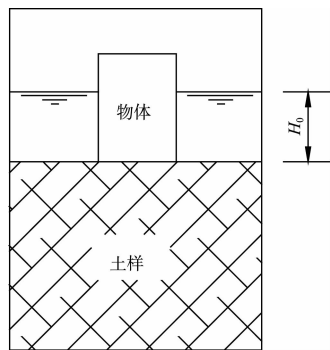


图2 平面空隙率测定方法

须指出的是:① 试验时应根据所选土样的渗透系数来控制注水速度。对黏性土样,由于土的渗透系数较小,注水速度不能太快;对沙性土样,注水速度可以快一点。② 为保证物体能够顺利起浮,所选物体密度应小于水体密度。③ 该试验对于沙性土较为适宜,对于黏性土尚应考虑土体黏滞阻力对起浮水深的影响。

2) 原位测量:由于目前的扬压力测管测量的

都是基底扬压力水位,因而并不能完全反映基底所受的原位总扬压力。但由于黏性土的渗透系数比较小,预计上述实验方法也可以应用于原状黏性土的平面有效空隙率的测量。至于建筑物的重力不同,对地基土的平面有效空隙率是否有影响,影响有多大,这些都还有待于今后结合数模试验进一步研究深化。

4 几点讨论

在李广信、吴剑敏《浮力计算与黏土中的有效应力原理》^[2]一文中,作者认为黏土地基浮力一般与空隙率无关,笔者认为是有失偏颇的。理由如下:在其示例的推导过程中有一点失误:作用于桶底的总土压力不是 $P_{\pm} = \gamma^l A h$ (公式5),因为土体处于非悬浮状态,不能用处于悬浮状态的土体浮容重 γ^l 来计算,必需加上多扣除的那部分水体浮托力,即 $(1-n) \rho_w g A h$,这样,就符合物质守恒原理了。

在黄志伦大师的《关于地下建筑物的地下水扬力问题分析》^[3]一文中,提出了贯通空隙率的概念。在笔者看来,实际应用于基底浮力计算的指标应该是平面有效空隙率,而不是贯通空隙率——两者是有区别的:前者是平面的概念,后者是空间的概念。但目前还不能给出两者之间的定量关系,由于平面孔隙率是几何尺寸的平方,而空间孔隙率是尺寸的三次方,因此估计很可能平面空隙率比空间空隙率的值要大一些。另外,引入平面空隙率概念时要考虑部分空隙不贯通的影响而对平面空隙率进行折减(即平面有效空隙率),但其折减系数的大小有待于今后研究的进一步深入。

对于黏性土地基,单个土体大多呈片状或针状结构,结合在一起呈片堆结构。由于其贯通空隙率比较小(渗透系数很小),因此考虑平面有效空隙率以后,地基的扬压力减小值比较大。而对于沙性土地基,土体基本上是单粒结构,渗透系数极大,即贯通空隙率比较大,土粒同建筑物底板间基本上以点接触,因此平面空隙率接近于1,

可以不考虑平面空隙率对扬压力减小的影响。

JTG D63—2007《公路桥涵地基与基础设计规范》^[4]第5.3.3条指出:“桩端以上各土层的加权平均重度,若持力层在水位以下且不透水时,不论桩端以上土层的透水性如何,一律取饱和重度。”这说明对于不透水地基上的桩基础,验算时可以不考虑浮托力的作用。由于土与岩石之间并没有严格的界限,特别是对于老黏性土,土体的渗透系数很小,它的特征同岩基相类似,这也证明了建筑物的实际基底扬压力要小于常规计算值。

需要指出的是,本文对地基所受的水的作用力通称为扬压力,它包含浮力和渗压力两部分,两者算法是相同的,即都应该乘以土体的平面有效空隙率 η ,而其他作者提到的浮力,实际只是地基所受到的水的作用力的一部分。对于挡水建筑物的底板,往往在受到浮力作用的同时,也受到渗压力的作用。

5 工程实例

选择合适的基底扬压力计算值,在实际工程中有很重大意义,现结合工程中的实际问题阐述如下:

1) 示例1。沉管是一种类似于箱涵的结构形式,通常运用于通航河道的跨河水下输水构造物的建设,其设计思路是:在河道边的干坞内完成结构浇筑,然后充水上浮,并浮运至现场下沉就位。采用上述施工方法可以大大减小工程施工对河道通航的影响。但在核算沉管上浮系数($K = U/G$)时,若不考虑地基承载面积 ΔA 对沉管浮力的影响(U 为水的浮力与负孔压之和),其实际需要的上浮力往往会超出设计人员理论计算的上浮力,势必影响到沉管能否顺利起浮。

2) 示例2。在已建工程的加固设计过程中,扬压力值的确定往往会直接影响到该工程安全复核计算的结果和具体加固方案的确定。1959年始建的嶂山闸,位于江苏省宿迁市的嶂山集西

1.1 km处,地震烈度为8.5度。该闸是骆马湖的重要排洪控制工程,共36孔,每孔净宽10 m,闸身总长428.97 m。由于受地基以下13 m处承压水层的影响,以及水闸上游防渗铺盖的破坏,地基的实测扬压力值很大,如用传统的扬压力计算方法进行计算,闸身不能满足抗滑稳定要求。

该闸地基为黏土,其空间空隙率大致为0.375~0.67。在无实验条件的情况下,本次核算的平面有效空隙率偏安全地取用0.9(根据黄志伦大师的分析,空间空隙率包含空隙水、结合水体积,贯通空隙与不贯通空隙,因此,贯通空隙率应该小于其空间空隙率,平面有效空隙率取用0.9是偏于安全的。),并依此对该闸闸身进行稳定核算。两种方法的稳定计算结果比较见表1。

表1 嶂山闸考虑基底扬压力折减时抗滑稳定计算与传统算法比较

工况	水位/m		抗滑安全系数 K_c		抗滑安全系数允许值 $[K_c]$
	上游侧	下游侧	0.9的平面有效空隙率	传统算法	
正常蓄水	23.5	14.5	1.85	1.76	1.35
设计洪水	25.1	14.5	1.32	1.24	1.35
校核洪水	26.0	14.5	1.23	1.15	1.20
向上地震	23.5	14.5	1.14	1.08	1.10

由表1可以看出:在平面空隙率减小10%的情况下,闸身的抗滑稳定安全系数可以提高5%~6%。而这种提高对于稳定核算处于临界状态的建筑物,是至关重要的。对于本闸,由于引用了扬压力与平面空隙率有关的概念,闸身从不稳定转为基本稳定,从而极大地减小了该闸的加固费用。

另外,对于重力式码头结构,其抗滑稳定计算也是影响结构断面尺寸的关键因素,对于内河重力式码头,其底板很有可能位于黏性土地基上,如果考虑扬压力减小的因素,其结构宽度可以减小,从而减小工程投资。

(下转第166页)