

基于边载效应的平板载荷试验研究

阳 岢 杳

(中铁十八局集团第四工程有限公司, 天津 300350)

摘 要: 为解决风化砂岩相较于常规岩层承载能力较低, 成岩性较差且质地松软, 在水分长期渗入条件下易发生岩体崩解, 以及工程实践中采用常规试验方法确定风化砂岩地基承载性能时存在明显局限性的问题, 依托天津北大资源东丽湖(阅府)项目, 在考虑边载效应的基础上, 分别开展平板载荷试验和浅层平板载荷试验。试验结果表明: 风化砂岩地基承载力的极限值可达 6 000 ~ 6 400 kPa, 以比例界限为依据测试的承载力特征值为 2 400 ~ 2 800 kPa, 施加边载后风化砂岩地基承载力水平得到显著提升。

关键词: 边载效应; 平板载荷; 风化砂岩

中图分类号: TU473

文献标识码: A

Research on Plate Load Test Based on Edge Load Effect

YANG Keyi

(China Railway 18th Bureau Group Fourth Engineering Co., Ltd., Tianjin 300350, China)

Abstract: In order to solve the problems of low bearing capacity, poor diagenesis, and soft texture of weathered sandstone compared to conventional rock layers, which are prone to rock mass collapse under long-term water infiltration conditions, and to solve the obvious limitations of using conventional testing methods to determine the bearing performance of weathered sandstone foundation in engineering practice, based on the Dongli Lake (Yuefu) project of Tianjin Beida Resources, plate load tests and shallow plate load tests were carried out respectively considering the edge load effect. The test results show that the ultimate bearing capacity of weathered sandstone foundation can reach 6 000 ~ 6 400 kPa. Based on the proportional limit, the test value of bearing capacity is 2 400 ~ 2 800 kPa. After applying edge load, the bearing capacity level of weathered sandstone foundation is significantly improved.

Key words: edge load effect; plate load; weathered sandstone

风化砂岩属于极软质岩石, 成岩性较差且胶结性能弱, 而部分基础设施建设时必须使用风化砂岩作为持力层的情况, 在这种情况下开挖至风化岩层时很容易出现岩层坍塌、失稳之类的问题。如何采取有效措施保障处理风化砂岩地基以满足上部荷载承载能力, 已成为风化砂岩区域进行工程建设时务必妥善处理的重要问题。在建筑地基基础设计施工中, 风化砂岩地基承载力水平测定所用的主要方法为单轴抗压强度试验

等^[1], 这种传统方法的应用存在多方面限制, 例如当前工程规范中并未对折减系数等一系列测试参数做出明确规范, 实际试验时工作人员只能结合工程经验进行主观确定, 存在主观偏差, 难以保障精准度。同时传统试验方法中并未充分考虑到地基承载力的边载效应, 导致计算所得地基承载力特征值和实际水平之间存在较多余裕, 因此, 有必要进一步探究风化砂岩地基承载力的试验方法。

收稿日期: 2024-06-30

作者简介: 阳岢杳, 工程师, 本科, 研究方向为房建施工领域

基金项目: 天津房建科员基金(编号: TJFJ2021-45)

当前工程设计部门、施工部门以及勘探部门开展工作时对宽度修正、深度修正与风化砂岩地基承载力测试结果之间关系的研究相对不足。何礼彪^[2]针对风化砂岩平板载荷试验中各种特征值计算辨别能力较差的问题开展分析,具体探究了桩端阻力特征值、地基承载特征值的相关内容,并进行归纳和区分。常规平板载荷试验开展试验时对地形要求较高,需要严格按照试验规范布置测点位置,操作繁琐、定位复杂、局限性较大。李伟^[3]采取措施优化平板载荷试验,将试验点周围土体重力作为实验配重并考虑反力,提高了载荷试验开展效率,优化了结果准确度。本文依托北大资源东丽湖(阅府)项目基础工程,分析风化岩层持力层地基承载力的试验计算方法,探究宽度和深度修正方法,在考虑边载效应的基础上开展平板载荷试验和浅层平板载荷试验。

1 工程和地质介绍

天津北大资源东丽湖(阅府)项目地基层主要包含砂岩、砂质泥灰岩、沙质石灰岩和砂土等,表面存在大量风化岩石颗粒。测试工程标段地质情况,结果显示风化砂岩顶层埋深为5.2~10.7 m,从地面至地下16 m深度之间为强风化层,地下16 m及以下主要为中风化层,周围岩体薄弱,须采用第三系中风化砂岩作为工程持力层。结合该工段周边地区地质勘测资料,取样并开展高压固结试验,设计抗剪断试验、单轴抗压强度试验、砂岩三轴压缩试验和旁压试验并综合评价该区域风化砂岩设计参数及工程性质。案例工程风化砂岩标段岩体主要为块状极软岩,地下较大一段深度内岩体软化系数基本不会出现变化。以《岩土工程勘察规范》(2009版)(GB 50021—2001)为依据,开展旁压试验,结果显示地下埋深19.0 m处风化砂岩压缩模量达到52.0 MPa,该处地基承载力特征值约为1 350 kPa。

2 确定试验参数

2.1 确定承载力特征值

(1) 浅层平板载荷试验承载力特征值。为有效判断地基承载力特征值,通常绘制承压板沉降量 S 和建筑结构荷载 P 的关系曲线^[4],分析不同比例界限状态下地基荷载水平,用所得结果评价各显著界限状态工况下结构沉降与荷载关联性。当荷载水平为地基荷载极限值一半及以下时,沉降荷载曲线上极限荷载界限用于评价这一条件下

地基荷载水平;当沉降荷载曲线整体变化平缓或者比例界限模糊,则可以根据压板直径 d 和沉降数值计算地基相对变形,所得结果用于计算承载力特征值,相对变形幅度为0.010~0.015时,地基承载力特征值可以直接作为此时地基载荷。

(2) 岩石地基载荷试验承载力特征值。设置比例界限作为沉降-荷载曲线(S - P 曲线)的终点,安全系数设定为3,将以安全系数为依据的极限荷载值和通过比例界限位置获取的荷载值进行对比,将取值较小者作为最终结果。为确保岩石地基载荷试验承载力特征值较为合理,现场载荷试验点选取6个,选择最小值^[5]。

(3) 承载力特征值。以岩基载荷试验、地基土浅层平板载荷试验所得结果为依据分析地基破坏形式,判断荷载沉降曲线的发展趋势并探究结果修正方法。

2.2 确定变形模量

以设计规范为基准评价地基泊松比、压板直径、变形量和承载水平等相关内容,并以所得结果为依据确定地基变形模量 E_0 。

$$E_0 = I_0(1 - \mu^2) \frac{Pd}{s} \quad (1)$$

式中, I_0 为形状系数,具体取值根据承压板形状确定,形状为方形和圆形时分别为0.886和0.785; μ 为土体泊松比,工程实践中通常取0.25; d 为圆形承压板的直径或方形承压板的边长。

将基坑开挖至指定深度后,清理表面松散砂层,到达风化岩层后(通常深度达-17.5 m左右),开展载荷试验。为确保坑内良好降水效果,通常采用轻型井点降水。但实验过程中风化岩层结构湿度较高,案例中将试验位置下部0.5~0.8 m的深度作为地下水位置。

3 浅层平板载荷试验

3.1 确定试验点承载力

根据岩基载荷试验方法、浅层平板载荷试验方法在同一状态对编号为A1、A2、A3和A4、A5、A6的6个编号测试点进行对比试验,承压板直径分别为60 cm与30 cm,沉降观测与稳定标准依据各自规范方法展开,试验标高都是-19.0 m,采取轻型井点降水方式确保地下水位不超过试验标高以下0.5 m位置。A1、A2、A3为距离中心点60 cm,深度依次为70 cm、60 cm、50 cm的3个测试点;A4、A5、A6为距离中心点

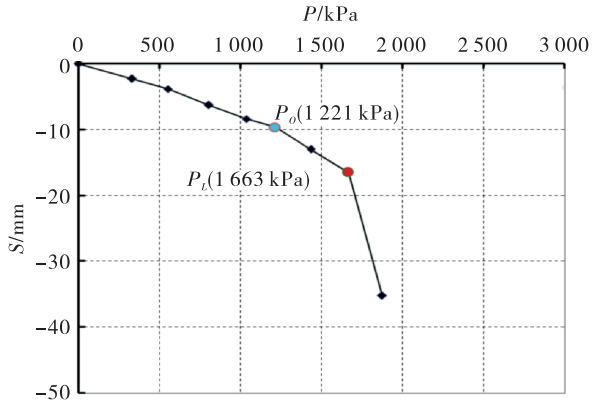
30 cm，深度依次为 70 cm、60 cm、50 cm 的 3 个测试点。

对编号为 A1、A2、A3 的 3 个测点采用直径为 60 cm 的圆形承压板开展试验，按相关规范标准要求测试数据并读数，浅层平板载荷下 A1、A2、A3 测点加载过程中荷载量最高值依次是 1 872 kPa、2 149k Pa 和 2 138 kPa，然后对沉降读数进行修正，所得结果分别为 35.829 mm、40.275 mm和 40.366 mm。接着采用直径为 30 cm 的圆形承压板对 A4、A5、A6 测试点开展岩基载荷试验，按相关规范标准要求测试数据并读数，A4、A5、A6 测点加载过程中荷载量最高值分别达到 2 000 kPa、2 000 kPa 和 2 180 kPa，对沉降读数进行修正，所得结果分别为 26.356 mm、26.006 mm 和 26.627 mm。

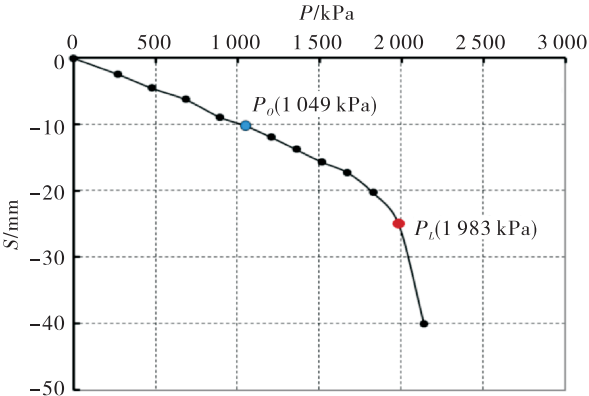
绘制沉降－荷载曲线见图 1，可见曲线呈现三折线特征，三阶段折线规律存在差异。其中第一阶段中沉降和荷载之间表现出近似线性相关关系，且曲线斜率较小，这一过程中地基岩层主要表现为弹性形变；第一阶段和第二阶段之间存在拐点，第二阶段中曲线依旧为近似线性相关，但斜率明显增加，这一过程中地基岩层处于弹塑性形变状态；第三阶段中曲线突然快速下降，地基荷载水平快速降低且沉降量快速增加，风化岩层地基基本被破坏，结构失稳，地基土会向周边挤出，表现为地基隆起。以极限荷载、比例界限为基准分析地基承载力特征值，通常取值为地基结构极限荷载的 50%。

3.2 相关试验情况分析

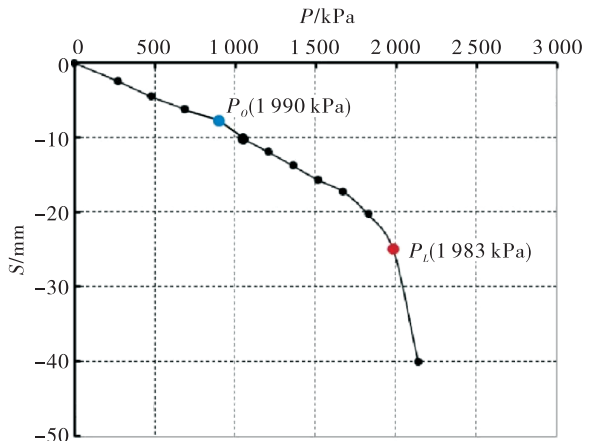
结合图 1 可知，采用地基土平板载荷试验、岩基载荷试验分析所得沉降－荷载曲线发展趋势基本一致，风化砂岩地基随荷载水平增加大致表现出三种不同的变化状态，第一线段为弹性压实阶段，第二线段为加载至一定程度后转而发生弹塑



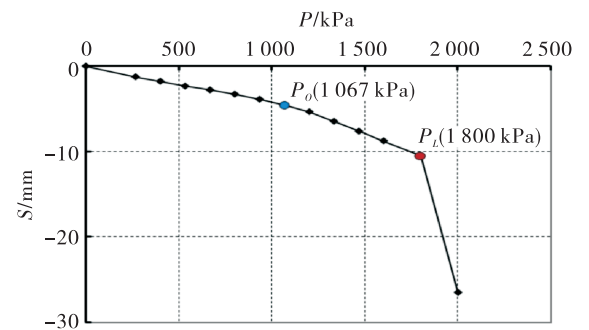
(a) A1 测点沉降－荷载曲线



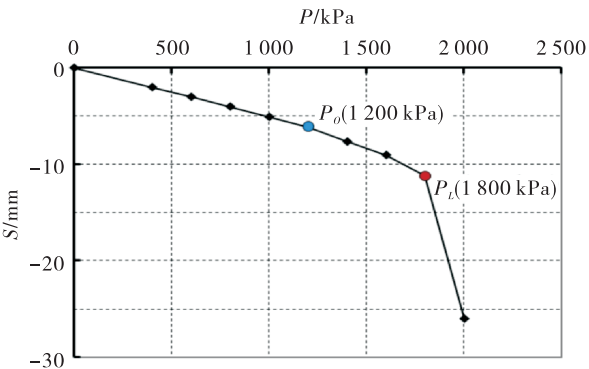
(b) A2 测点沉降－荷载曲线



(c) A3 测点沉降－荷载曲线

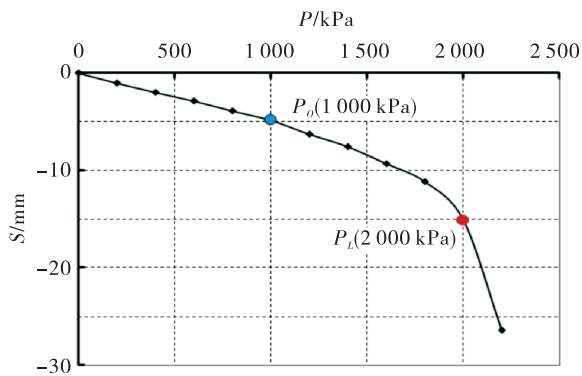


(d) A4 测点沉降－荷载曲线



(e) A5 测点沉降－荷载曲线

图 1 各测点沉降－荷载曲线图



(f) A6 测点沉降-荷载曲线

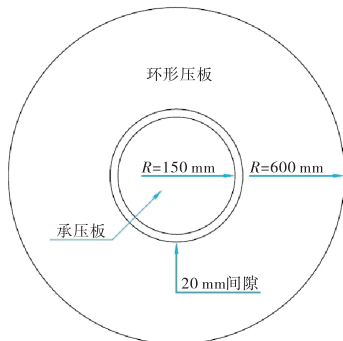
图1 (续)

性形变阶段,第三线段为最终发生破坏阶段。

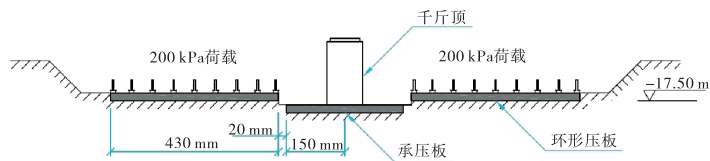
第一线段弹性形变阶段也是地基压实的阶段,地基沉降荷载曲线为近似线性变化状态,且过程中地基比上层砂土更易发生弹性变形,原因在于土体内部各点剪应力水平低于砂土抗剪强度,因此土体受压并不断变得密实,阶段终点的荷载水平可以基本认定为比例界限或者临界压力。

第二段弹塑性变形阶段也是地基土剪切阶段,荷载水平增加则曲线沉降曲率逐渐增加,比例界限接近极限荷载,土体发生剪切作用且形成局部塑性区域,局部塑性区域占比随荷载增加而逐渐提升。弹塑性变形阶段结束时,塑性区域形成连续性良好的滑动曲面,载荷板两侧开始逐渐挤出少部分砂土,弹塑性阶段重点荷载水平可认定为地基极限荷载水平。

第三线段沉降荷载曲线发展至一定水平后曲线曲率快速降低,曲线表现出陡降发展趋势,这一结果表明荷载水平已经加载至极限荷载以上。这一阶段试验压力下降且载荷板快速下沉,试验压力难以维持,塑性区和连续滑动面在这一过程中依旧不断发展,地基达到失稳破坏状态后载荷板周边砂土快速挤出。



(a) 俯视图



(b) 侧视图

图2 考虑边载效应的平板载荷试验示意图

4 纳入边载效应因素的平板载荷试验

由《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)可知,对承载力特征值的宽度或深度修正只适用于强风化岩层或全风化岩层的岩体结构,而对于中风化岩层承载力特征值,无论是基于宽度还是基于深度,都不允许展开修正。同时《岩土工程勘察规范》(2009版)中并未对第三系砂岩风化程度的划分进行明确规定。案例工程中岩层难以通过这两个国标中的量化指标对其风化程度进行评估。因此,仅以砂岩的风化程度为依据判断是否能够进行深度修正、宽度修正会存在操作性不足的问题。为模拟基层上覆土体的压力水平,在浅层平板载荷试验的基础上,进一步增加在承压板周边施加荷载的3个试验组并开展试验。

4.1 实施步骤

开挖基坑至指定深度后,清理风化砂岩岩体表面的松散砂,模拟上覆土体压力并开展载荷试验,试验中所取标高为-17.5 m。在结构主体基础范围内设置各试验点,采用刚性板制作直径0.3 m、厚度0.06 m的圆形承压板,承压板外圈放置内外径分别为0.34 m和1.20 m的环形钢板,施加荷载模拟上覆土体压力。设计采用如图2所示的试验装置来模拟有超载作用与无超载作用这两种情况下的风化砂岩地基载荷。

以《岩土工程勘察报告》为依据,获取底层参数并修正浮力影响,数据处理后显示地面以下17.5 m处结构上覆土体压力约为240 kPa。使用千斤顶模拟上覆土体压力,对半径为150 mm、厚度为60 mm环形钢板(内外径依次为34 mm和1 200 mm)施加200 kPa恒定荷载,而后根据平板载荷试验要求开展试验,数据读取以静载试验位移测读为基准^[9-10]。

4.2 结果分析

获取试验数据后分别处理数据并绘制沉降 - 荷载曲线，依次分析数值突变、比例界限、极限荷载处数据特点，得到结果如表 1 所示。

表 1 试验结果分析

编号	环境	比例 界限/kPa	变形模 量/MPa	地基承载力 均值/kPa	极限 荷载/kPa	建议 值/kPa
A4		1 067			1 800	900
A5	无边载	1 200	47.9	933	1 800	900
A6		1 000			2 000	1 000
A7		2 400			6 000	2 400
A8	有边载	2 800	62.6	2 660	6 000	2 400
A9		2 800			6 400	2 800

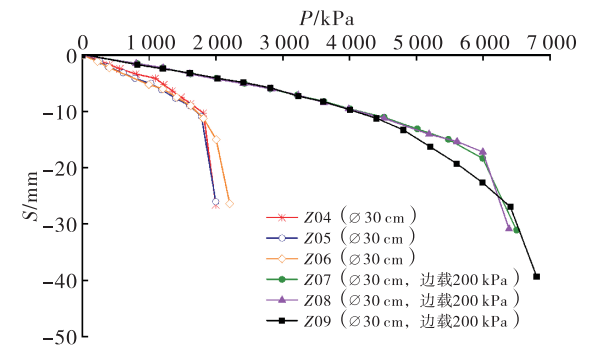


图 3 考虑边载效应和无边载效应下的沉降 - 荷载曲线图

图 3 为考虑边载效应和无边载效应下的沉降 - 荷载曲线图。无边载条件下的静载荷试验中沉降 - 荷载曲线依次为 Z04、Z05、Z06，承压板周边维持 200 kPa 边载条件下进行的静载荷试验中沉降 - 荷载曲线依次为 Z07、Z08、Z09。结合表 1、图 3 可知，对承压板周边施加荷载为 200 kPa 条件下，3 组平板载荷试验的沉降 - 荷载曲线表现出和前文试验结果相近的三折线特征，沉降与荷载关系可大致划分为三个阶段。其中荷载水平在 0 ~ 2 800 kPa 过程中承压板主要为弹性形变，此时沉降 - 荷载曲线斜率较小；提高荷载水平从 2 800 至 6 000 kPa 过程中，沉降 - 荷载曲线斜率明显提升，承压板主要处于塑性形变状态；依据比例界限确定的承力特征值最小为 2 400 kPa，最大为 2 800 kPa，对应的修正沉降值最小为 5.015，最大值为 5.937，荷载水平达到 6 000 kPa 以上时地基土沉降荷载曲线骤降，斜率较大，发生塑性破坏且环形板和承压板之间存在砂土挤出问题。基于极限荷载和沉降荷载曲线比例界限分析，结果显示承载力特征值应为 2 659 kPa，极差 400 kPa，不足平均值 30%，因此结果可用，试验过程中承压板周边施加荷载近

似于上覆土体荷载水平，不需要修正承载力特征值。由此可见，模拟上覆土体浮重的边载效应条件下计算 17.5 m 深度风化砂岩地基平板承载力水平相较于无边载条件提升幅度接近 1 倍。载荷试验结果显示极限承载力水平显著提升，说明塑性区滑裂面阻力有所提升，因此可认为地基土向外挤出过程会受到边载限制，案例工程承载力特征值采用深度修正具有良好可行性。

5 结论

设计浅层平板载荷试验，并设计考虑边载效应后的平板载荷试验，共同分析风化砂岩作为持力层时地基承载力的分析方法，并判断深度修正、宽度修正的可操作性，获得结论如下：

案例工程变形模量范围在 42.88 ~ 54.66 MPa，风化砂岩承载力特征值取值范围在 829 ~ 1 076 kPa 之间，风化砂岩受到荷载作用时发生破坏形式与密实砂土的剪切破坏方式相同，采取基于地基土平板载荷试验方法，对风化砂岩承载力的特征值展开测试，并以密实细砂为基准对结果进行宽度修正。

在承压板周边设置圆环状钢板，施加 200 kPa 模拟上覆土体压力并开展基于边载效应的平板载荷试验，结果证明，依据比例界限确定的承力特征值最小值为 2 400 kPa，最大值为 2 800 kPa，其承载力极限值最小值为 6 000 kPa，最大值为 6 400 kPa，提示地基土极限承载力经施加边载荷载后出现显著增强。这一结果也证明基于浅层平板载荷试验所得到的承载力特征值进行宽度修正和深度修正具有可行性。

参考文献：

[1] 宋鉴学. 平板载荷试验推算单层均质土地基沉降方法探讨[J]. 江西建材, 2024(4): 73-74, 77.
[2] 何礼彪. 工程质量检测中常用地基平板载荷试验应用分析[J]. 科学技术创新, 2018(25): 105-106.
[3] 李伟. 浅析一种新型平板载荷试验方法及装置[J]. 智能城市, 2018, 4(24): 154-155.
[4] 汪智慧. 地基土的超固结特性对浅层平板载荷试验的影响[J]. 沈阳工业大学学报, 2017, 39(2): 225-229.
[5] 高文华, 朱建群, 张志敏, 等. 软质岩石地基承载力试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(5): 953-959.
[9] 唐译, 关云飞, 李永江, 等. 干湿变化下非饱和含黏粒砂土平板载荷试验研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(S2): 27-31.
[10] 刘洪涛. 嵊州硅藻土旁压试验与载荷试验承载力对比研究[J]. 工程勘察, 2021, 49(9): 14-18.