

Experimental Analysis and Application of Physical and Mechanical Properties of Red Clay in a Certain Area of Guangxi, China

Ruiqi Zhang Zhongchun Huang

China Water Resources Pearl River Planning, Surveying & Desinging Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong, 510610, China

Abstract

Red clay is a kind of high plastic clay formed after the carbonates which is redlized in hot and humid environment. It has the characteristics of swelling and shrinkage, high liquid-plastic limit and high porosity ratio. It is widely distributed in Yunnan, Guizhou, Guangxi and Guangdong in the Pearl River Basin. The soil itself also has anisotropy and spatial variability. As a typical soil with regional particularity, the actual engineering properties and foundation bearing capacity of red clay vary greatly due to the differences in hydrogeological conditions, mineral composition and structure. The differences of physical and mechanical properties of red clay in horizontal and vertical spatial dimensions are summarized based on the experimental results of several geological topics and reservoir bank investigation projects of A Water Conservancy. And the influence of different factors on the bearing capacity of red clay foundation is analyzed through the study of clay content, hydrological conditions and engineering properties of swelling and shrinking red clay, especially the influence of the rise of reservoir water level on the bearing capacity of red clay foundation in reservoir area. It provides reference for the design and construction of red clay foundation in reservoir area.

Keywords

red clay; swell-shrink characteristics; foundation bearing capacity; plate load test; in-situ test

中国广西某地区红粘土物理力学特性试验分析及应用

张瑞旗 黄忠春

中水珠江规划勘测设计有限公司, 中国·广东 广州 510610

摘要

红粘土是碳酸盐岩石在湿热环境下经红土化作用后形成的高塑性粘土, 具有胀缩性、高液塑限、高孔隙比等特性, 广泛分布于珠江流域的云贵、两广等地, 土体本身也具有各向异性、空间变异性。作为一种典型的区域特殊性土, 由于水文地质条件、矿物组成和结构性等不同, 红粘土物理力学性状及地基承载力差异较大。基于广西某地水利枢纽工程库区若干地质专题及库岸勘察项目的红粘土试验成果, 总结归纳了该地区红粘土在空间维度水平方向和垂直方向上物理力学特性差异, 通过对粘粒含量、水文条件、胀缩性红粘土工程特性的研究, 分析不同因素对红粘土地基承载力的影响程度, 尤其是枢纽蓄水后, 库水位升高对库区红粘土地基承载力的影响; 也为区域红粘土地基工程的设计和施工提供技术参考。

关键词

红粘土; 胀缩性; 地基承载力; 平板载荷试验; 原位测试

1 引言

广西某地水利枢纽库区属强岩溶发育区^[1], 以河谷阶地地貌和岩溶孤峰、残丘平原地貌为主, 基岩为灰岩、白云岩碳酸盐岩, 上覆不同厚度的红粘土^[2]。红粘土是碳酸盐岩石经热带亚热带红土化作用的产物, 珠江流域的云贵、两广等地广泛分布此类区域典型特殊土^[3], 其物理力学性质与工程特性之间的关系不同于一般粘性土, 一般呈现出遇水软化、上硬下软的趋势。枢纽蓄水抬高库区地下水位后, 势必

会影响红粘土地基工程性状, 由于它们构成各类水工建筑物的地基持力层和基坑边坡地层, 其力学强度特性影响到地基和边坡稳定性^[4], 决定着合理的工程设计及地基处理措施。广泛分布于广西地区的红粘土, 往往对该地区的水利工程建设具有至关重要的影响, 目前国内外对于水利工程中红粘土的物理力学特性及地基承载力试验分析研究较少, 因而笔者以该水利枢纽项目红粘土试验资料为依托, 对其展开深入的分析和研究, 总结出该地区红粘土的物理力学参数在空间上的分布规律、分析不同因素对红粘土地基承载力影响规律以及红粘土土体自身物理力学特性分析。该研究成果对该地区水利枢纽工程建设乃至广西区域工程建设均具有理论和实践意义^[5]。

【作者简介】张瑞旗(1990-), 男, 中国河南巩义人, 硕士, 工程师, 从事水利水电工程地质、岩土工程勘察研究。

2 红粘土的物理力学参数在空间上的分布规律

由于红粘土本身具有各向异性、空间变异性，不同地区的红粘土，其物理力学性质也存在较大差异。本次研究取武宣库区空间分布不同的场区具代表性的红粘土试样，研究

其在横向和垂向空间中分布的工程特性。

2.1 横向差异特性

统计 9 个工点地表 2m 以内的红粘土试样的物理力学试验指标详见表 1。

表 1 原生、次生红粘土物理力学性质指标

| 取样点 | 粒组含量 (%) | | 含水率 | 比重 | 密度 | 孔隙比 | 饱和度 | 自由膨胀率 | 线缩率 | 体缩率 |
|-----|-------------|---------|----------|------|-------------------|-------|-----|---------------|------------|------------|
| | 粉粒 (mm) | 粘粒 (mm) | ω | Gs | ρ_0 | e_0 | Sr | δ_{ef} | δ_s | δ_v |
| | 0.075~0.005 | < 0.005 | % | — | g/cm ³ | — | % | % | % | % |
| 金鸡镇 | 23.3 | 71.9 | 35.6 | 2.78 | 1.87 | 1.016 | 97 | 32 | 8.4 | 20.2 |
| 石龙镇 | 25.1 | 73.2 | 29.6 | 2.78 | 1.93 | 0.867 | 95 | 31 | 9.5 | 23.7 |
| 黄泥岭 | 24.7 | 71.1 | 35.0 | 2.75 | 1.85 | 1.007 | 96 | 31 | 7.9 | 18.5 |
| 铜岭镇 | 23.0 | 73.2 | 33.7 | 2.76 | 1.86 | 0.963 | 97 | 33 | 9.7 | 23.9 |
| 书房山 | 23.7 | 71.6 | 34.8 | 2.79 | 1.88 | 1.022 | 95 | 32 | 7.3 | 17.9 |
| 长寿沟 | 22.8 | 75.8 | 34.6 | 2.8 | 1.9 | 0.984 | 98 | 36 | 10.6 | 26.4 |
| 马王沟 | 24.1 | 70.6 | 27.6 | 2.78 | 1.93 | 0.838 | 92 | 31 | 5.8 | 16.8 |
| 龙头沟 | 23.6 | 71.3 | 38.9 | 2.78 | 1.79 | 1.157 | 93 | 32 | 6.6 | 17.2 |
| 七星河 | 29 | 66 | 36.2 | 2.76 | 1.85 | 1.032 | 97 | 29 | 4.7 | 16.4 |

| 取样点 | 液限 | 塑限 | 塑性指数 | 液性指数 | 含水比 | 压缩系数 | 压缩模量 | 黏聚力 | 内摩擦角 |
|-----|------------|------------|-------|-------|-------|-------------------|-------------------|------|--------|
| | ω_L | ω_p | I_p | I_L | a_w | a_v | E_s | c | ϕ |
| | % | % | — | — | — | Mpa ⁻¹ | Mpa ⁻¹ | kPa | ° |
| 金鸡镇 | 56.4 | 26.8 | 29.6 | 0.30 | 0.63 | 0.29 | 6.95 | 43.9 | 19.5 |
| 石龙镇 | 57.6 | 27.6 | 30 | 0.07 | 0.51 | 0.19 | 9.83 | 42.8 | 22.7 |
| 黄泥岭 | 59.3 | 32.6 | 26.7 | 0.09 | 0.59 | 0.17 | 11.8 | 53.1 | 20.1 |
| 铜岭镇 | 68.8 | 41.1 | 27.7 | -0.27 | 0.49 | 0.23 | 8.53 | 37.6 | 19.4 |
| 书房山 | 71.1 | 43.5 | 27.6 | -0.32 | 0.49 | 0.31 | 6.52 | 39.6 | 18.4 |
| 长寿沟 | 82.3 | 36.5 | 45.8 | -0.04 | 0.42 | 0.30 | 6.61 | 41.8 | 21.8 |
| 马王沟 | 52.1 | 22.3 | 29.8 | 0.18 | 0.53 | 0.18 | 10.21 | 31.6 | 18.4 |
| 龙头沟 | 85.4 | 38.0 | 47.4 | 0.02 | 0.46 | 0.35 | 6.16 | 38.9 | 22.3 |
| 七星河 | 73.8 | 32.3 | 41.5 | 0.09 | 0.49 | 0.27 | 7.53 | 33.5 | 18.8 |

由表 1 数据总结某库区红粘土物理力学性质指标水平空间方向上差异不大，具备如下特点：①物性指标：粘粒含量高、天然含水率高、密度大、孔隙比大、饱和度高、高液限、高塑限、塑性较好、呈坚硬~硬塑状；②力学指标：强度较高、压缩性低、粘聚力较高、内摩擦角较低、地基承载力较高；③胀缩性指标：自由膨胀率普遍小于 37%，膨胀性微弱，体缩率一般 16%~27%，收缩性显著。

2.2 垂向分布特性

利用武宣库区管理营地项目的红粘土为研究对象，钻孔按每两米深度连续取样至基岩开展室内土工试验，研究红粘土沿垂向的物理力学特性差异，相应指标如表 2、表 3 所示。

由表 2 中的参数可见，红粘土的粘粒含量、天然含水率、孔隙比和饱和度物性指标均随深度加深呈现递增的趋势；红粘土的稠度状态一般通过含水比判断，含水比随着深度递增逐渐变大，结合现场实际情况，红粘土的稠度状态自上而下

逐渐从硬塑到可塑过渡为软塑状，即近地表 5.0m 范围内，一般处于硬塑状，大气影响层深度下呈可塑状，在岩土交界处、溶槽和溶沟中，由于受地下水的补给或毛细作用，红粘土呈软塑状，可见遇水极敏感是红粘土的特殊之一。此外，液限和塑限指标随着深度增加先增大后呈微小浮动变化。

一般粘性土在自重应力作用下排水固结，随埋藏深度增加表现出压缩性递增、土体强度增大的趋势，然而由表 3 中红粘土的力学指标可见随着埋藏深度增加压缩系数从小变大，黏聚力和内摩擦角力学指标趋于不利，垂直方向的变化是不均匀的，表现出红粘土另一特殊的工程特性。

3 不同因素对红粘土地基承载力影响分析

影响红粘土地基承载力的因素主要包括：粘粒含量、结构性、水文条件及胀缩性等。结合工程实践需要，分别分析上述各要素对地基承载力的影响。

表2 红粘土直向物理性质指标

| 试样名称 | 取样深度 | 粘粒含量 | 天然含水率 | 孔隙比 | 饱和度 | 液限 | 塑限 | 含水比 |
|------|-----------|---------|----------|-------|-----|------------|------------|-------|
| | — | < 0.005 | ω | e_0 | Sr | ω_L | ω_p | a_w |
| | m | % | % | — | % | % | % | — |
| 红粘土 | 1.8~2.0 | 65.1 | 34.5 | 1.032 | 92 | 63.0 | 34.4 | 0.55 |
| | 3.8~4.0 | 69.6 | 40.7 | 1.197 | 94 | 73.3 | 39.7 | 0.56 |
| | 5.8~6.0 | 73.6 | 47.0 | 1.360 | 97 | 80.9 | 43.3 | 0.58 |
| | 7.8~8.0 | 69.6 | 49.4 | 1.419 | 97 | 82.9 | 44.7 | 0.60 |
| | 9.8~10.0 | 76.2 | 49.3 | 1.429 | 96 | 81.5 | 43.4 | 0.60 |
| | 11.8~12.0 | 81.1 | 48.9 | 1.403 | 97 | 78.5 | 42.2 | 0.62 |
| | 13.8~14.0 | 80.6 | 50.3 | 1.433 | 98 | 79.8 | 42.8 | 0.63 |
| | 15.8~16.0 | 86.1 | 53.9 | 1.514 | 99 | 80.7 | 41.3 | 0.70 |

表3 红粘土垂向力学性质指标

| 试样名称 | 取样深度 | 压缩系数 | 黏聚力 | 内摩擦角 |
|------|-----------|-------------------|------|--------|
| | — | E_s | c | ϕ |
| | m | Mpa ⁻¹ | kPa | ° |
| 红粘土 | 1.8~2.0 | 0.19 | 52.1 | 20.2 |
| | 3.8~4.0 | 0.18 | 65.0 | 19.5 |
| | 5.8~6.0 | 0.20 | 46.2 | 16.9 |
| | 7.8~8.0 | 0.26 | 47.0 | 15.6 |
| | 9.8~10.0 | 0.30 | 38.0 | 14.8 |
| | 11.8~12.0 | 0.38 | 23.7 | 13.9 |
| | 13.8~14.0 | 0.35 | 26.9 | 13.7 |
| | 15.8~16.0 | 0.60 | 15.7 | 9.0 |

3.1 粘粒含量对红粘土地基承载力的影响

红粘土的粘粒含量和液限较高，粘粒含量大于 70%，液限大于 50%，而一般粘性土，粘粒含量约 40%~60%，液限约 20%，粘粒含量不同，亲水性差异明显。统计两广地区粘粒含量 40%~53%、含水率指标接近的不同粘土地基平板载荷试验成果（见图 1），对比一般粘土与红粘土地基承载力 P—S 曲线的差异。

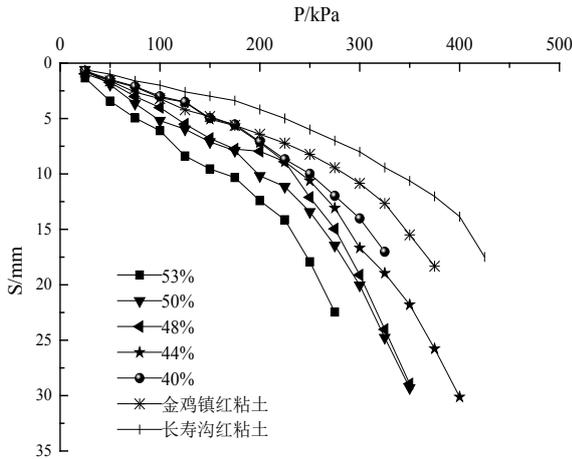


图 1 不同粘粒含量红粘土地基承载力 P—S 曲线

由图 1 可知，与一般粘土相比，金鸡镇、长寿沟红粘土的线弹性变形阶段更长，比例界限荷载相对较大，相同荷

载作用产生的形变相对较小，反映了红粘土具有较高的地基承载力和较强的结构性。相比而言，一般粘性土经搬运、沉积等过程后，颗粒结构受到破坏，导致 P—S 曲线呈抛物线状，加载起始段也未能体现显著的直线段。

3.2 物理性质对红粘土地基承载力的影响

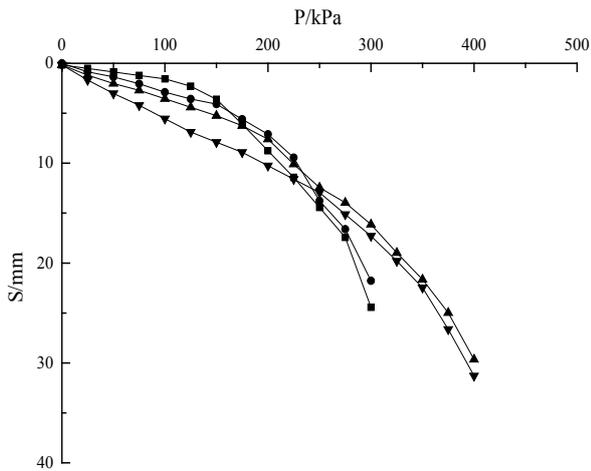
为探究红粘土地基承载力与其物理性质之间的关系，收集两广地区有关红粘土地基平板载荷试验及其地基土的物理指标成果资料，统计分析物理指标对地基土载荷试验 P—S 曲线的影响。不同地区红粘土物理性质指标见表 4。

表 4 不同地区红粘土物理性质指标

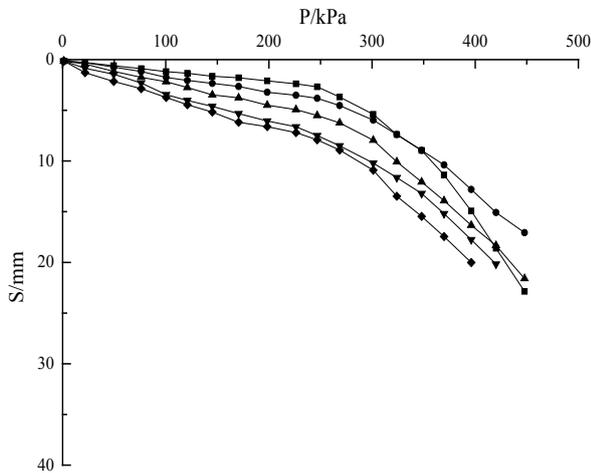
| 编号 | 含水率 | 孔隙比 | 液限 | 液性指数 | 含水比 |
|----|----------|-------------|------------|------------|-----------|
| | ω | e_0 | ω_L | I_L | a_w |
| | % | — | % | — | — |
| 1# | 42~65 | 1.097~1.876 | 54~83 | 0.33~0.85 | 0.57~0.98 |
| 2# | 25~53 | 0.799~1.524 | 39~78 | 0.14~0.55 | 0.47~0.77 |
| 3# | 31~44 | 0.956~1.119 | 51~68 | -0.23~0.15 | 0.54~0.63 |

由图 2 可知，1# 红粘土地基 P—S 曲线的线弹性阶段最短，对应的比例界限值 100~200kPa，塑性变形区间较短，地基土快速达到极限破坏状态；2# 红粘土地基 P—S 曲线的线弹性区间较长，对应比例界限为 200~250kPa，经历一定的塑性变形后才达到破坏状态，相同荷载下地基土产生的变形大于 1# 红粘土地基；3# 红粘土地基 P—S 曲线的线弹性

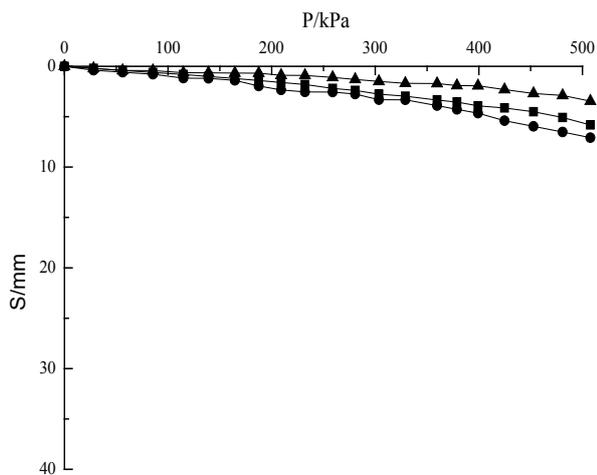
阶段最长,荷载达400kPa时地基土仍处于线弹性阶段,相同荷载作用下地基土变形也最小。



(a) 1# 红粘土



(b) 2# 红粘土



(c) 3# 红粘土

图2 不同物理性质红粘土的地基载荷试验 P—S 曲线

根据红粘土物理指标及地基土载荷试验的 P—S 曲线,

总结如下:

①液性指数对红粘土地基承载力影响最显著。由于液性指数反映了粘性土所处的状态及软硬程度,随着液性指数由大到小的变化,红粘土由可塑状态变为硬塑~坚硬状,对应的 P-S 曲线由局部剪切破坏向整体破坏过渡。

②含水率对红粘土地基影响明显。总体来看,随着含水率的减小,地基承载力逐渐增大。但是由 2#、3# 个别地基土载荷试验数据表明低含水率对应的地基承载力不一定更大,含水率低时若液塑限同样较低,则对应的红粘土仍很软,承载力较低,说明红粘土的地基承载力还受到其他特性指标的影响。

③红粘土的孔隙率、液限和含水比等指标也与地基承载力有密切关系,承载力总体上随孔隙率和含水比的减小而增大。

3.3 胀缩性对红粘土地基承载力的影响

某库区红粘土的膨胀性微弱,但收缩性较强。由于红粘土反复干湿循环胀缩作用在土体内形成网状裂隙,破坏土体完整性,降低了红粘土地基的力学强度。对比裂隙发育程度对红粘土地基承载力的影响。

由图 3 可知,地基土发育裂隙,当上覆荷载较小时,地基土不会因裂隙发育导致正常工作状态遭到破坏,但当荷载增加到一定程度后,土体的应力状态将达到一定限度,局部裂隙密集的部位有可能率先发生塑性变形,继而由于土体内裂隙的增加、延伸和贯通,从而加剧导致地基整体性破坏的可能性,地基承载力的可靠性降低,对应的红粘土地基表现出裂隙剪切型的破坏模式。当裂隙不发育~稍发育时,红粘土地基则表现为正常压密型的破坏模式。

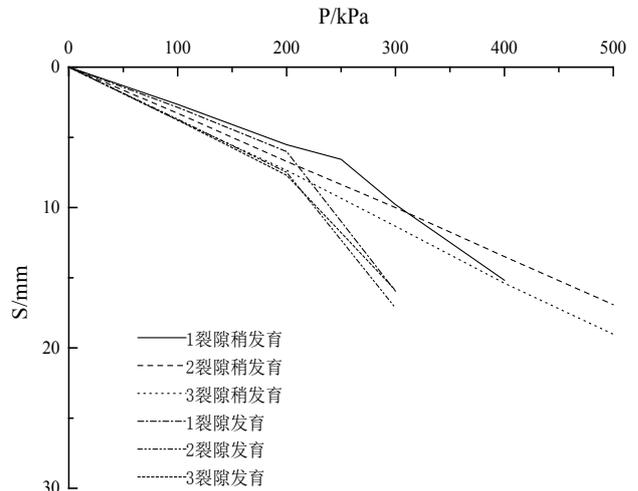


图3 不同裂隙发育程度地基载荷试验 P—S 曲线

4 与其他细粒土的对比分析

为对比分析红粘土与其他细粒土的差异,选取红粘土、膨胀土、低液限粉土、低液限粘土等细粒土地基的平板载荷试验数据,相关 P—S 曲线如图 4~ 图 7 所示。

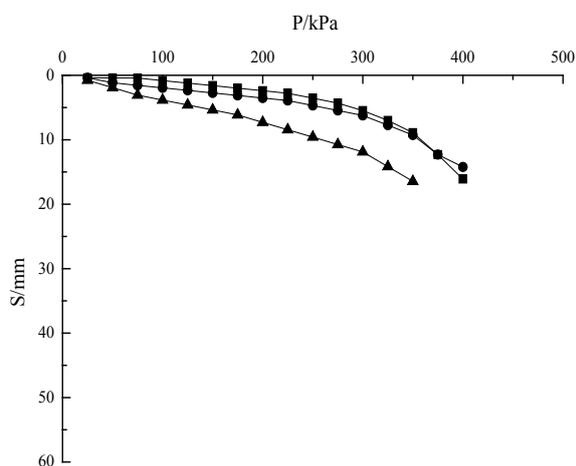


图4 武宣红粘土平板载荷试验 P—S 曲线

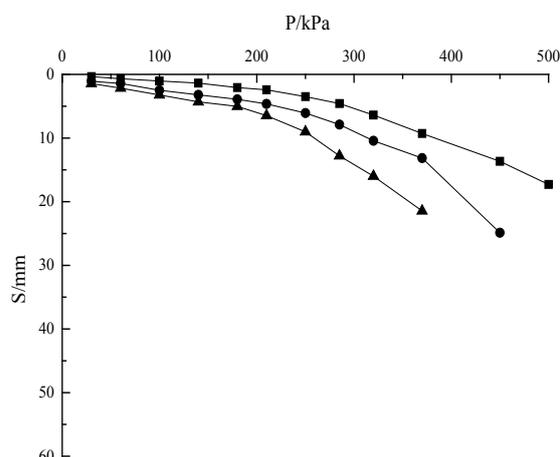


图5 膨胀土平板载荷试验 P—S 曲线

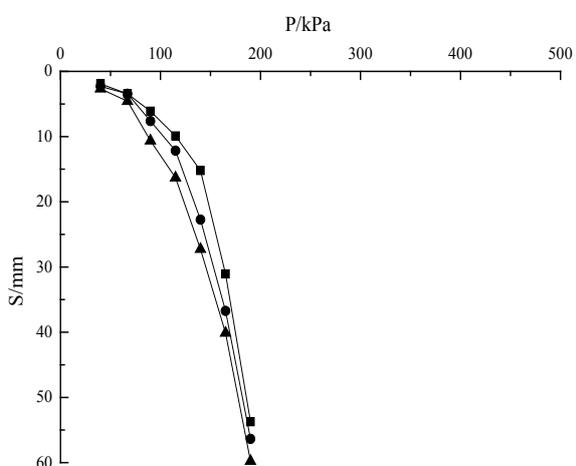


图6 低液限粉土平板载荷试验 P—S 曲线

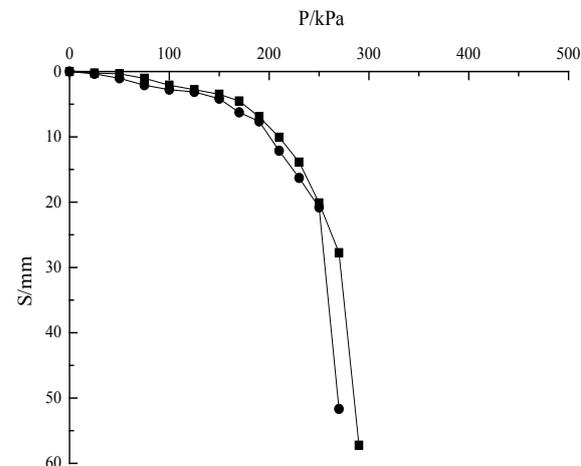


图7 低液限粘土平板载荷试验 P—S 曲线

由图4~图7可知,红粘土与膨胀土、低液限粉土、低液限粘土地基的载荷试验 P—S 曲线形状和地基承载力大小均有一定的差异。相比低液限粉土和低液限粘土,红粘土和膨胀土的线弹性变形阶段更长,比例界限荷载相对较大,对应的地基土承载力更高,而低液限粉土和低液限粘土快速达到极限破坏状态。分析各种细粒土的矿物组成不难发现,细粒土的颗粒组成成分、自身结构性是影响其地基承载力大小的主要因素。红粘土自身结构性强、粘粒含量高、可塑性好,地基承载力一般 160~240kPa;膨胀土和低液限粘土具有一定结构性,颗粒组成中粘粒和粉粒均占一定比例,对应地基承载力一般 100~180kPa;相比之下,低液限粉土自身土体结构性差、粉粒含量高、水稳定性差,地基承载力一般 70~120kPa。

5 结论

①某库区红粘土的物理性质和力学性质在水平方向上差异不大,具有高液限、高塑限、塑性较好、饱和度高、收缩性显著等特性。②垂直方向自上而下,含水率、孔隙比、饱和度、含水比等指标逐渐增大,稠度性状逐渐变软,工程特性逐渐变差。③相比两广地区其他一般性粘土,某库区红

粘土膨胀性微弱、结构性强、可塑性好及地基承载力相对较高等工程特性。④总体上红粘土的地基承载力随孔隙率、液限及含水比的增大而减小,各物理指标中液性指数对地基承载力影响最明显。⑤红粘土地基承载力及其破坏形式受其裂隙发育程度的影响,随着裂隙发育程度的增加地基承载力表现出逐渐下降的趋势,地基的破坏形式则由正常压密型向裂隙剪切型过渡。⑥相比其他细粒土,红粘土土体自身结构性强,粘粒含量高,可塑性较好,具有更高的强度特性。

参考文献

- [1] 王毓华.中国红土及红粘土分布特征[A].中国工程地质新进展论文集[C].成都:成都科技大学出版社,1989.
- [2] 左权,王清,唐大雄.华南湘赣粤地区红层残积红土的工程地质研究[J].长春地质学院学报,1994,24(1):70-76.
- [3] 韦贞景.桂中治旱乐滩水库引水灌区工程主要工程地质问题及处理建议[J].广西水利水电,2007(5):5-7.
- [4] 赵颖文,孔令伟,郭爱国,等.广西红粘土击实样强度特性与胀缩性能[J].岩土力学,2004,25(3):369-372.
- [5] 王焕新.广西红粘土填筑性能及土质学特征[D].南宁:广西大学,2012.