



## 喀麦隆西海岸硬土的水理特性研究

廖先斌, 王 强, 马秋柱, 翁 奕, 蔡泽明  
(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510230)

**摘要:** 为了加强对非洲西海岸硬土水理特性的规律性认识, 提高硬土勘察设计准确性, 以喀麦隆西海岸的地质调查、钻探、现场测试和室内试验成果为基础, 重点研究硬土的胀缩性、崩解性和软化性等水理性质。结果表明, 研究区硬土呈现无胀缩性、弱崩解-无崩解性, 多面卸荷及临水状态下软化程度高, 顶面卸荷及临水状态下无软化, 可直接作为重力式码头基础持力层。经过研究, 初步确立了非洲西海岸硬土的水理性质指标特征, 提供了硬土工程设计的参考性基础资料。

**关键词:** 喀麦隆; 硬土; 水理性质; 胀缩性; 崩解性; 软化性

中图分类号: TU 195<sup>+.2</sup>

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)02-0015-05

### On water-physical property of hard clay at coast of Cameroon

LIAO Xian-bin, WANG Qiang, MA Qiu-zhu, WENG Yi, CAI Ze-ming  
(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

**Abstract:** In order to fully find out water-physical characteristics of hard clay and improve the accuracy of geotechnical design in the west coast of Africa, water-physical properties of hard clay in the west coast of Cameroon are analyzed according to the results of surface geological survey, drilling, in-situ test and laboratory test, focusing specially on properties of swelling and shrinkage, collapse and softening. In hard clay, the analysis demonstrates that there is no swelling and shrinkage, slightly to non collapse, strong softening based on the status of unloading and facing water under multiple directions and unsoftening based on the status of surface unloading and facing water. The hard clay can be the bearing stratum of shallow foundation directly. According to the research, primarily water-physical characteristics of hard clay are established in the west coast of Africa, reference data on the geotechnical design of hard clay are formed.

**Key words:** Cameroon; hard clay; water-physical property; swelling and shrinkage; collapse; soften

中交第四航务工程勘察设计院有限公司在非洲喀麦隆西海岸进行地质勘察时, 遇到了一种介于土与岩之间、强度大、压缩性低、标准贯入击数大于50击的硬土。硬土一般以黏土矿物为主, 在天然状态下为不饱和土, 其崩解性、软化性和胀缩性等水理性质是影响土体物理力学性质的重要因素。如果硬土在与水体接触后发生崩解、软化和膨胀, 会造成硬土的强度降低, 压缩性增大。因此, 为了准确提供反映实际海水浸泡状态下硬土的物理力学特征, 查明硬土的水理性质就

显得相当重要了。

由于喀麦隆没有当地硬土的研究成果, 通过2011—2012年在喀麦隆克里比沿海一带的地质勘察, 从勘察的基本手段出发, 利用现场地质调查与测绘、钻探进行硬土岩性、结构和构造的判断, 现场采取硬土原状样品进行室内不同浸水状态的物理力学试验, 并进行不同浸水状态的硬土原位测试。通过以上各种方法分析其水理性质, 并评估其水理性质对实际设计方案及施工的影响。

收稿日期: 2013-11-12

作者简介: 廖先斌(1971—), 男, 高级工程师, 主要从事工程地质方面的研究工作。

## 1 喀麦隆西海岸硬土基本物理及水理性质

喀麦隆西海岸硬土主要由黏土矿物组成, 含少量石英和铁质物等。黏土矿物主要为水云母类矿物, 化合物结构式为 $\text{KMg}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ 。和蒙脱石相比, 水云母类黏土矿物相邻晶胞之间距离小, 连接较强, 水分子不易渗入, 形成较粗的黏粒, 因此比表面积相对较小, 亲水性较弱, 膨胀性相对不显著, 压缩性相对较低, 抗剪强度相对较大。

天然含水量平均在19.8%, 塑限平均值在24.8%, 含水量靠近塑限, 但低于塑限, 呈超固结状态。液限平均值在40.5%, 代表着非高液限土。

塑性指数平均值在15.7(范围值是10~23.4), 为中塑性土, 接近水云母的范畴(塑性指数范围一般在8~15)。硬土液性指数绝大部分小于0, 显示坚硬土的特性。

饱和度平均值为76.9%, 大部分原状样品饱和度小于80%, 为明显的不饱和土。这种土的不饱和性, 提供了硬土吸水饱和后强度变弱的先决条件, 在有良好水力通道的情况下, 达到饱和后能软化, 改变地层强度性质。

渗透系数在 $0.245 \times 10^{-7} \sim 0.834 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ , 为明显的不透水层, 减弱了水力传递, 加强了不饱和硬土, 即使发育裂隙有水力通道的情况下, 仍能保持天然状态的能力。

## 2 硬土胀缩性

胀缩土指的是具有较大的吸水后显著膨胀、失水后显著收缩特性的高液限黏土。土的胀缩性主要取决于矿物成份与水的相互作用。土体本身的性质, 尤其是亲水性黏土矿物的含量是决定其胀缩特性的基础。现有规范及文献<sup>[1-4]</sup>对胀缩土的特征均有明确的定义。

研究区硬土矿物成分主要为水云母类黏土矿物, 不是具有膨胀性的蒙脱石黏土矿物; 塑性指数为15.7左右, 远未达到膨胀性黏土塑性指数低限值25; 液限在40.5左右, 属于非膨胀性的非高液限土。

本次研究针对该硬土进行了自由膨胀率试验, 试验获得的自由膨胀率约为28%~33%, 属于

非膨胀性土。

硬土天然裂隙不发育, 即使岩芯放置若干个月, 水分减少, 仍未见裂隙明显发育, 显示出土不受胀缩性影响的特征。

以上分析显示, 研究区硬土为非膨胀土。

## 3 硬土耐崩解性

土体没入水中后, 水进入孔隙或裂隙中的情况不平衡, 引起粒间扩散层增厚的速度也不平衡, 以致粒间斥力超过吸力的情况也不平衡, 故产生了应力集中, 使土体沿着斥力超过吸力最大的面崩落下来, 这种特性称为崩解性<sup>[5]</sup>, 又称湿化性。

本次研究选取了典型天然硬土样品23个, 浸没在水中3 d后, 仔细观察并记录其崩解现象。各样品浸水后的崩解现象见表1。

表1 硬土样品浸水崩解结果

| 裂隙发育情况 | 浸水崩解情况 | 样品数量/个 |
|--------|--------|--------|
| 裂隙不发育  | 无碎屑脱落  | 13     |
| 裂隙略发育  | 少量碎屑脱落 | 5      |
| 裂隙发育   | 大量碎屑脱落 | 5      |

从表1分析, 23个样品进行浸水试验, 其中13个样品裂隙不发育, 无碎屑脱落, 占试验样品的57%; 5个样品裂隙略发育, 少量碎屑脱落, 占试验样品的21.5%; 5个样品裂隙发育, 大量碎屑脱落, 占试验样品的21.5%。

分析5个大量碎屑脱落的硬土样品, 判断发育的裂隙主要是制样造成的, 在天然状态下, 裂隙发育程度会小, 则碎屑脱落的情况会减弱。

综上分析可以得出, 本研究区硬土主要表现为弱崩解-无崩解性, 并以无崩解性为主。

## 4 硬土的软化特性

硬土浸水软化影响到硬土的物理力学性质, 这种影响主要取决于硬土的矿物成分、结构和构造。其过程一般表现为: 硬土遇水后, 水分子沿着硬土孔隙、裂隙渗透到矿物颗粒之间, 从而使硬土发生物理或化学方面的一系列变化<sup>[6]</sup>。

### 4.1 原状样品浸水前后的变形特征

硬土浸水前后不同压力下的压缩模量见图1, 原状不饱硬土压缩模量大, 浸水后硬土压缩模

量小,后者是前者的约0.43倍。显示样品较强的浸水软化性。初步分析得出:样品高度仅有2 cm,样品制作后,由于卸荷回弹产生微裂隙,加上样品顶面和底面放置透水石,形成良好的渗水通道,在浸水条件下,样品较易吸水软化。

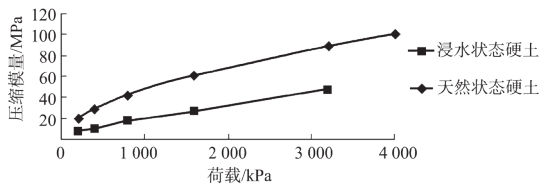


图1 硬土浸水前后压缩模量随不同荷载的变化曲线

另外,从浸水后与天然状态下的不同荷载压缩模量比值(可称为抗软化系数)来看(图2),随着荷载的增加,抗软化系数总体呈增加的趋势。主要是因为随着上覆荷载的增加,样品总应力增加。这种应力变化逐渐减弱并消除了样品卸荷回弹势,增大了有效应力,阻止了土样吸收水分,减少了软化效果,浸水下的压缩模量也相应增强,从而促使抗软化系数增加。

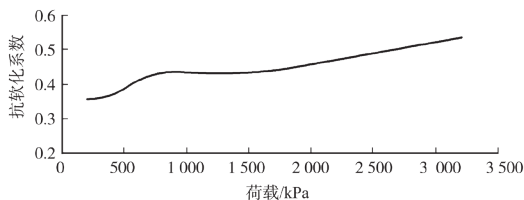


图2 硬土抗软化系数随荷载的变化

## 4.2 原状样品浸水前后的强度指标变化特征

### 4.2.1 快剪指标

分析直剪试验的快剪指标(即不固结不排水剪切指标),天然状态和浸水状态下的代表性快剪强度见图3,天然状态下的抗剪强度大于浸水状态下的抗剪强度。天然状态下,快剪试验获得的强度指标凝聚力为 $c=58$  kPa,内摩擦角 $\varphi=24.8^\circ$ ;浸水状态下,快剪试验获得的强度指标凝聚力为 $c=24$  kPa,内摩擦角 $\varphi=22.7^\circ$ 。两者主要表现在凝聚力差别较大,内摩擦角差别极小。初步分析这种现象,得出:不饱和的天然硬土在浸水后立即剪切,虽然上覆有竖向压力,但竖向压力未来得及对样品进行固结,土样吸水造成颗粒之间水分子膜增大,连接力减弱,造成了颗粒间凝聚力的

减少。浸水饱和后的硬土凝聚力仅是天然状态下的0.41倍。

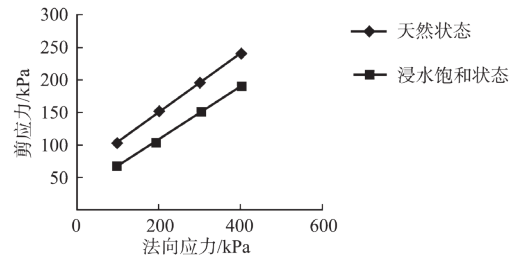


图3 硬土浸水前后快剪强度变化

### 4.2.2 固快指标

分析直剪试验的固快指标(即固结不排水剪切指标),天然状态和浸水状态下的代表性抗剪强度见图4,两种状态的抗剪强度基本一致。天然状态下,固快试验获得的强度指标凝聚力为 $c=52$  kPa,内摩擦角 $\varphi=23^\circ$ ;浸水状态下,固快试验获得的强度指标凝聚力为 $c=55$  kPa,内摩擦角 $\varphi=24.6^\circ$ ,两者差别很小。初步分析这种现象,认为:当土样制好后,增加竖向荷载进行固结并同时浸水,逐渐减弱并消除样品卸荷回弹势,样品有效应力呈增加趋势,孔隙水压力呈减小趋势,样品处于排水状态,无法吸收土体外的水份。这样就造成了两者试验的值是基本一致的。这也给设计及施工提供了一个方案,在现场基槽开挖后,应减少闲置时间,尽快施加覆荷载。

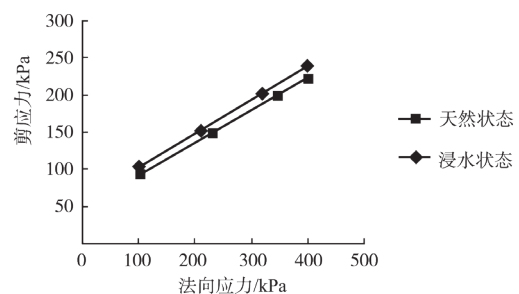


图4 硬土浸水前后固快强度变化

## 4.3 硬土现场状态的软化性

由于室内硬土经过制样,样品的侧面及上、下均能与水体接触,但现场硬土仅顶部表面与水体接触,因此两者所处环境是不同的,上述硬土样品室内试验的结论并不能代表硬土在现场经过基槽开挖后的软化特征。下面从现场硬土仅顶面

与水体接触时不同浸水时期的原位测试结果分析硬土现场软化特征。

在现场码头基槽位置设置了一个试验区，这个试验区的长宽均为20 m，开挖到设计基槽底高程-15 m的硬土层，使硬土层的顶面与海水面接触。未开挖时，在-15 m高程的硬土层标贯击数  $N > 50$  击。在开挖完成后的第5 d和第49 d，分别进行了原位测试，包括标准贯入试验（简称SPT）和重型动探（简称DPT）。

### 4.3.1 SPT试验结果

在开挖完成后的第5 d和第49 d，在试验区分别布置了3个和6个SPT试验孔，连续进行SPT试验，按每5 cm记录下标贯的击数  $N_5$ （击），然后在该点换算成30 cm的标贯击数  $N_{30}$ （击），两者之间的换算公式为：

$$N_{30} = 30 \text{ cm} \times (N_5 / 5 \text{ cm}) \quad (1)$$

换算为  $N_{30}$  就能比较SPT试验孔自上而下随着深度变化的力学强度了。

图5是试验区在开挖完成后的第5 d进行标贯试验所得的标贯击数  $N_{30}$  随着深度的变化曲线。图5显示，试验区泡水5 d后，仅表面至10~15 cm深度范围内标贯击数  $N_{30} < 50$  击，比原状硬土的  $N_{30}$  要小。

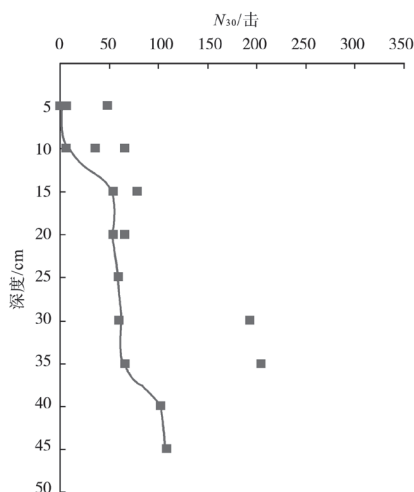


图5 泡水5 d后  $N_{30}$  随着深度的变化

图6是试验区在开挖完成后的第49 d进行标贯试验所得的标贯击数  $N_{30}$  随着深度的变化曲线。图6显示，试验区泡水49 d后，仅表面至15~35 cm深度范围内标贯击数  $N_{30} < 50$  击，比原状硬土的  $N_{30}$  要小。

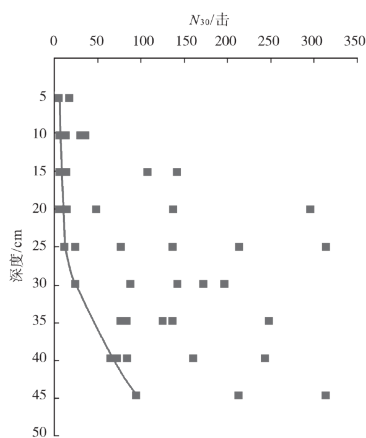


图6 泡水49 d后  $N_{30}$  随着深度的变化

### 4.3.2 DPT试验结果

在开挖完成后的第5 d和第49 d，在试验区均分别布置了6个DPT试验孔，连续进行DPT试验，按每5 cm记录重型动探的击数  $N_{D5}$ （击），然后在该点换算成10 cm的重型动探  $N_{63.5}$ （击），两者之间的换算公式为：

$$N_{63.5} = 10 \text{ cm} \times (N_{D5} / 5 \text{ cm}) \quad (2)$$

换算为  $N_{63.5}$  就能比较DPT试验孔自上而下随着深度变化的力学强度的变化特征了。

图7是试验区在开挖完成后的第5 d进行重型动探试验所得的  $N_{63.5}$  随着深度的变化曲线。图7显示，试验区泡水5 d后，仅表面至14~35 cm深度范围内  $N_{63.5} < 50$  击。

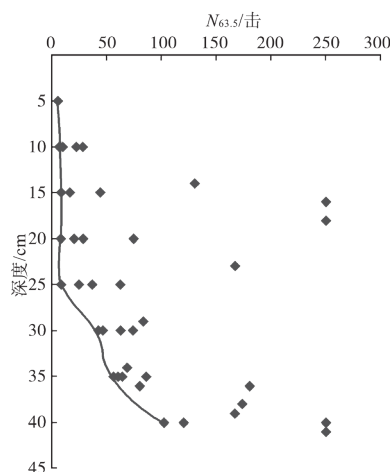


图7 泡水5 d后  $N_{63.5}$  随着深度的变化

图8是试验区在开挖完成后的第49 d进行重型动探试验所得的  $N_{63.5}$  随着深度的变化曲线。图8显示，试验区泡水49 d后，仅表面至18~45 cm深度范围内  $N_{63.5} < 50$  击。

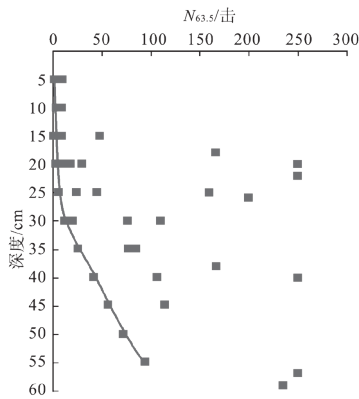


图8 泡水49 d后 $N_{63.5}$ 随着深度的变化

#### 4.3.3 SPT和DPT试验结果分析

SPT和DPT试验说明, 由于硬土成分以黏土矿物水云母类矿物为主, 渗透性小, 结合强度较好, 节理、裂隙不发育, 即使在表面临水的情况下, 总体仍显示出非软化性。至于泡水5 d表层10~35 cm的硬土软化及泡水49 d表层15~45 cm的硬土软化, 初步分析是因为施工开挖的卸荷回弹产生负压力, 裂隙张开, 但延伸性不强, 硬土由于海水流入裂隙而饱水并进一步扩大体积, 促使表层硬土软化。

#### 4.4 硬土软化性小结

勘察区硬土为沉积环境所形成, 地质构造不发育, 主要发育水平层理, 垂直及倾斜延伸到地面的裂隙少, 在硬土中没有水分子沿着硬土孔隙、裂隙渗透到矿物颗粒之间通道, 能确保在未扰动状态下硬土不软化。

如果硬土区域为多面卸荷及临水, 硬土易回弹产生裂隙、闭合裂隙易张开, 提供了水分子沿着硬土孔隙、裂隙渗透到矿物颗粒之间的通道, 硬土作为不饱和土吸收水分, 增加了颗粒间水分子膜厚度, 从而使硬土的强度及抗变形能力降低, 软化性是较高的。

如果硬土区域仅顶面临水, 如本勘察区作为码头基槽区, 裂隙发育少、往深处延伸短, 没有可供水分子渗透到硬土层的通道, 总体上硬土的强度及抗变形能力不会降低, 呈现无软化性特点。同时, 在保证硬土层上覆有足够的荷载时, 硬土的有效应力增加, 孔隙水压力减小, 孔隙水往土体外排出, 阻止了硬土吸收土体外水分, 也阻止了硬土的软化。

## 5 硬土重力式码头地基基础施工经验及建议

喀麦隆西海岸面临大西洋, 与研究区具有类似硬土的安哥拉罗安达湾、洛比托湾, 均把重力式码头基础直接放在了硬土层上, 码头建成后, 均未发现不利于稳定的沉降问题。

本区硬土在现场总体上不软化、不崩解、不膨胀, 可以不经处理直接作为重力式码头基础持力层。但考虑到基槽开挖可能造成硬土顶部约45 cm软化的趋势, 建议注意以下问题:

1) 尽量避免硬土区基槽开挖后闲置的时间, 同时预留约45 cm厚度的硬土在抛填基床前开挖。这样可以避免基床放置在可能软化的硬土上。

2) 基床抛填后尽快放置重力式码头, 较大的上覆压力可以消除开挖卸荷可能形成裂隙的趋势, 同时, 较大的上覆压力可以促进硬土有效应力的增加、孔隙水压力的排出, 也使硬土失去吸水的能力、加强硬土强度。

## 6 结论

1) 硬土裂隙略发育-不发育为非膨胀硬土、弱崩解-无崩解性硬土。

2) 硬土在多面卸荷及临水状态下, 易产生卸荷回弹, 引发裂隙, 成为具软化性硬土。硬土作为重力式码头基础持力层, 在顶面卸荷及临水状态下, 总体上表现为非软化性硬土。

3) 研究成果可以作为非洲西海岸类似硬土水理性质的参照, 并为非洲西海岸硬土区码头基础方案设计提供参考性基础资料。

### 参考文献:

- [1] GB 50112—2013 膨胀土地区建筑技术规范[S].
- [2] TB 10038—2012 铁路工程特殊岩土勘察规程[S].
- [3] 唐大雄, 孙榛文. 工程岩土学[M]. 北京: 地质出版社, 1990: 4-88.
- [4] 关文章. 胀缩土的特性因素及胀缩性判别指标[J]. 桂林冶金地质学院学报, 1991(4): 430-436.
- [5] 何满潮, 景海河, 孙晓明. 软岩工程力学[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [6] 刘特洪, 林天健. 软岩工程设计理论与施工实践[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.