

武(汉)广(州)客专武汉—韶关段红黏土工程特性研究*

方 薇 杨果林

(中南大学道路与铁道工程专业 长沙 410075)

摘 要 通过对武(汉)广(州)客运专线武汉—韶关段红黏土的工程特性研究,认为该地区红黏土液塑限高,饱和度和孔隙比较大;具有较好的力学性能,压实性较低;先期固结压力远大于上覆土层自重压力,具有超固结性,具有“固而不密”特征;红黏土呈现出特殊的“上硬下软”的工程特性,超固结比和先期固结压力随深度增加而减小。这些研究成果为客运专线实体工程的修建提供了重要的指导和依据。

关键词 红黏土 固结特性 胀缩变形 抗剪强度 “上硬下软”现象

中图分类号:TU411 文献标识码:A

ANALYSIS OF ENGINEERING CHARACTERISTICS OF RED CLAY AT WUHAN - SHAOGUAN SECTION OF WUHAN - GUANGZHOU PASSENGER DEDICATED RAILWAY LINE

FANG Wei YANG Guolin

(Road and Railway Engineering Institute of CSU, Changsha 410075)

Abstract This paper examines the engineering properties of red clay at the Wuhan - Guangzhou section of Wuhan - Guangzhou passenger dedicated railway line. The red clay in this area has high values in liquid and plastic limits, saturation, and porosity. It has good mechanical properties with low compactibility. The soil pre - consolidation pressure is far greater than its vertical overburden pressure. The soil is overconsolidated with high porosity. Besides, it was suggested that the red clay presents the peculiar engineering characteristics that the upper layers are rigid and the lower layers are weak. The overconsolidation ratio and pre - consolidation pressure reduce as the depth increases. The results provide important guidance and reference to the design and construction of passenger railway line.

Key words Red clay, Consolidation, Swell - shrinking properties, Shear strength, Wuhan - Guangzhou passenger dedicated railway line

1 引 言

红黏土作为一种特殊土,其物理力学性质与一般的粘性土不一样,天然含水量、液限、塑限都很高,

密度低,渗水性差,膨胀量也小,低压缩性,抗剪强度较同密度的一般粘土高。在实际工程中,红黏土因其裂隙性与胀缩性常常引起诸多工程病害,如边坡失稳破坏及路基不均匀沉降等。红黏土以其特殊的工程性质与工程问题正在引起人们越来越多的关

* 收稿日期:2008-07-02;收到修改稿日期:2008-09-27.

基金项目:国家自然科学基金项目(50778180),铁道部建设科技项目(2005K002-B-2-1).

第一作者简介:方薇,主要从事路基、边坡及支挡结构的研究. Email:fangwei5642366@163.com

注。

众所周知,高速客运专线对路基及边坡变形的控制非常严格,而武广客运专线武汉—韶关段分布有长达 100km 的红黏土,其分布之广可见一斑,同时,对于沿线红黏土物理性质和工程力学性质进行探索研究显得十分迫切和必要,对此,笔者进行了大量的试验和分析,并针对其危害性提出相应的防治措施,指导工程实践。

2 定义及其矿物成分

红黏土是碳酸盐系岩石经过更新世以来湿热的环境中的红土化作用,形成并覆盖于基岩上,其液限大于或等于 50%,呈棕红、褐黄等色的高塑性粘土^[1]。在垂直方向的湿度有上部小下部大的明显变化规律,失水后有较大的收缩性,土中裂隙发育。武(汉)广(州)客运专线武汉—韶关段红黏土中黏土矿物主要为高岭石、伊利石和绿泥石,部分含少量蒙脱石。非黏土矿物成分以石英和长石为主。

表 1 红黏土的物理性质(各量值均为平均值)

Table 1 Physical properties of red caly (average)

地点	天然含水量 $w / (\%)$	天然密度 $\rho / g \cdot cm^{-3}$	干密度 $\rho_d / g \cdot cm^{-3}$	比重 G	孔隙比 e	饱和度 $S_r / (\%)$	液限 $W_L / (\%)$	塑限 $W_P / (\%)$	液塑比	塑性指数 I_P
咸宁	25.83	1.97	1.66	2.87	0.81	97.57	43.52	19.87	2.30	23.82
泉口	29.62	1.93	1.51	2.74	0.93	96.88	54.03	29.82	2.15	30.64
耒阳	26.67	1.88	1.62	2.75	0.84	94.05	49.68	23.74	2.05	25.50
郴州	28.71	1.96	1.57	2.79	0.95	93.80	48.32	25.43	1.70	19.50

(3) 饱和度高,天然重度大。武广客运专线沿线红黏土的饱和度大部分在 90% 以上,最低也大于 87.60%。天然重度在 $1.77 \sim 2.11 g \cdot cm^{-3}$ 之间。

(4) 孔隙比较大,4 个工点的红黏土的孔隙比比一般的粘性土大,但是比我国典型红黏土地区的贵州、广西等地方要小。这是由于红黏土的母岩不同而造成的,武广客运专线红黏土属于石灰岩残积红黏土,所以它的孔隙比大部分在 0.8 ~ 1.0 之间。

(5) 液塑比大,沿线红黏土的液塑比为 1.5 ~ 2.5。

上述红黏土的这些特性对施工不利,如在气温高的季节,基槽或者边坡在开挖后,若不及时处理,则地基表层干缩加剧而迅速龟裂,再加上红黏土具有竖向裂隙,水分能从深层蒸发出来,使裂隙宽度加大,再遇雨水或者地表水入侵,地基反复湿胀、湿化,最后使土的结构遭到破坏,承载力降低而引起路

3 红黏土的物理指标

从武广客运专线有代表性的 4 个工点咸宁、泉口、耒阳、郴州取回红黏土试样进行室内土工试验(表 1)。

由表 1 可知,武广客运专线红黏土物理性质主要有如下特点:

(1) 高液限、高塑性和高分散性。武广客运专线红黏土液限大多在 45% 以上,个别在 40% 以下,塑限大部分在 25% 以上,个别小于 20%。颗粒细而均匀,粒径小于 0.002mm 的颗粒占到总质量的 43% 以上,特别是泉口工点红黏土的粘粒含量高达 52.8%,属于高塑性土。

(2) 从室内试验资料可知,红黏土的粒度分布沿深度变化不大,都是以细粒为主,颗粒均匀,粘粒含量高,剖面上见不到残留的半风化岩块,土体整个剖面都经历了强烈的风化作用。

基破坏。

4 红黏土的工程性质

4.1 红黏土的力学指标

红黏土的部分力学指标如表 2 所示:

(1) 红黏土 4 个工点的压缩系数都在 $0.12 \sim 0.35 MPa^{-1}$ 之间,属于低压缩性土。渗透系数均处于 $10^{-7} cm \cdot s^{-1}$ 及以下数量级,透水性很差。矿物间结构联结力强但本身的膨胀性不强,抗水性、抗机械力性能好。

(2) 红黏土的自由膨胀率、无荷膨胀率和收缩系数远小于膨胀土。武广客运专线红黏土的线缩率在 1.4% ~ 3.1% 之间,体缩率在 16.3% ~ 19.90%,缩限在 15.2% ~ 18.9%。可见武广客运专线红黏土有着较强的收缩性,但膨胀性较弱,故在施工和设

计中要注意红黏土失水后发生收缩而破坏土的结构,降低其力学强度。

表2 红黏土的胀缩性、压缩性和渗透性(各量值均为平均值)

Table 2 Swell - shrink characteristics, compressibility, permeability of red clay (average)

工点	自由膨胀率 $e_{Fs}/(\%)$	无荷膨胀率 $V_H/(\%)$	线缩率/ (%)	体缩率/ (%)	收缩 系数	缩限/ (%)	压缩系数 a_V/MPa^{-1}	渗透系数 $K_{20} \text{ } ^\circ\text{C}/$ $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$
咸宁	38.6	2.30	1.5	18.40	0.35	16.9	0.12	1.74×10^{-7}
泉口	33.2	2.50	2.3	18.74	0.28	17.0	0.25	1.69×10^{-7}
耒阳	30.4	0.99	1.4	19.90	0.28	15.2	0.35	4.55×10^{-8}
郴州	30.8	1.10	3.1	16.30	0.43	18.9	0.20	3.53×10^{-8}

4.2 压缩及回弹变形

红黏土具有高孔隙性,但单个孔隙的体积很小,固态矿物为较稳定的结晶格架,颗粒间的氧化铁胶结物具有较强的黏结力,细分散颗粒呈稳定的团粒结构。因此,一般状态下,红黏土的压缩性不大。

从不同深度处红黏土土样的压缩曲线可以看出,各曲线基本光滑,没有突变点,说明红黏土在所施加压力作用下,没有产生明显的破坏;当荷载压力小时,孔隙比变化不大,土体的压缩性较小,当压力增大时,土体产生的压缩量增大,而且随深度的增加,曲线越陡,说明红黏土随深度的增加,压缩性增大;从原状土的回弹曲线分析,3~10m深的回滞环比16.3m深度处的回滞环略宽,说明上层红黏土的回弹性要好于深层红黏土。

4.3 红黏土的固结特性及应力历史

土体固结的快慢用固结系数来衡量,土体固结系数愈大,固结愈快。固结系数常采用试验方法测定,它是分析地基沉降-时间特性的关键参数,为了正确估算地基固结和建(构)筑物的沉降速率及其工后沉降等,必须先准确地测定地基的固结系数。由于现场试验成本较高,长期以来室内试验是确定固结系数的主要手段,本文采用室内固结试验测定固结系数,最后用现场沉降观测数据反算的固结系数进行验证。根据一维固结理论中固结度与时间关系曲线的各种特点,许多学者提出多种确定室内固结试验数据确定的方法,主要有时间对数法、时间平方根法、试算法、反弯点法和司脱克法等,文中采用 \sqrt{t} 法得到固结系数 C_v 。

图1是红黏土地基不同深度处土样分别在25、50、100、200、400、800kPa压力作用下的固结系数,由图1看出:土样随深度的变化,固结系数大致呈增

大的趋势,说明土层越深其固结的速度越快;固结系数与渗透系数、孔隙比和压缩系数有关,由室内试验结果可知,随着红黏土地基深度增加,孔隙比增大,压缩系数也增大。

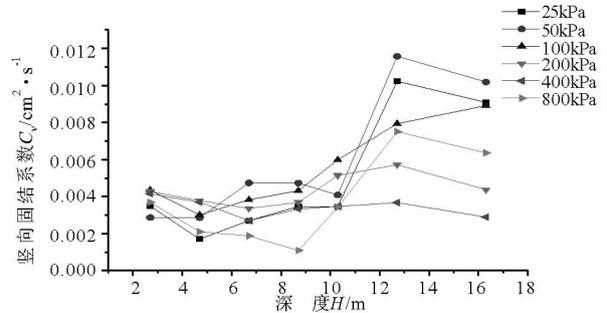


图1 各压力下不同深度处竖向固结系数

Fig. 1 Coefficient of vertical consolidation of different depths under various pressures

以咸宁和泉口工点红黏土的固结曲线为例(图2),还可看出:在压缩的初始阶段,即固结压力小于先期固结压力 p_c 的时候, $e - \lg p$ 压缩曲线并没有像一般粘性土那样出现直线段;而当固结压力超过先期固结压力 p_c 后,红黏土的压缩曲线($e - \lg p$ 压缩曲线)基本呈线性关系。

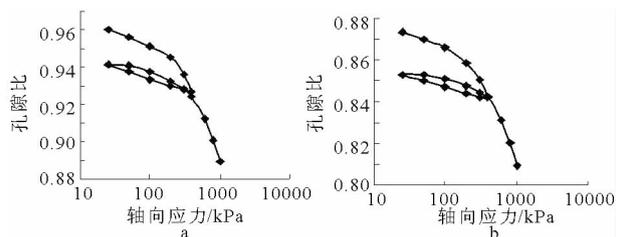


图2 红黏土试样固结压缩曲线

Fig. 2 Consolidation curves of red clay samples ($e - \lg p$)

a. 咸宁工点; b. 泉口工点

应力历史是指天然土层在历史上所经受过的固结压力,它对土的应力-应变-强度特性等有显著的影响,主要由前期固结压力 p_c 来描述。弄清土体的应力历史是准确计算沉降量的前提条件之一。如果外荷载在土体中的应力超过历史上最大应力,则土体的主固结和次固结沉降很显著,土体开挖后,坑底将会产生瞬时回弹。武广残积层红黏土的前期固结应力来源于两点:一是上覆土体的自重应力;二是由红黏土的特殊成因造成,引起红黏土的前期固结压力随深度发生变化。红黏土上部土层的 p_c 大于下部土层的 p_c ,说明红黏土前期固结压力主要由后者造成,而且引起红黏土前期固结压力的因素具有随深度增加而减弱的规律。此外,还由于其中游离氧化物,特别是游离氧化铁的胶结作用,致使红黏土具有超固结性,而且从上至下固结比逐渐减小,与氧化铁含量的减小趋势相似。总的看来,武广客运专线红黏土具有以下几个特征:

(1)红黏土的先期固结压力值 p_c 大,原状土的 p_c 值在 288 ~ 475kPa 之间,且远大于上覆土层的自重压力,其超固结比 OCR 远远大于 1,甚至达到 4.74,证实了红黏土是超固结性土。随着埋深的增加,红黏土的超固结比 OCR 反而减小。传统土力学认为土的超固结性是由于剥蚀形成的卸载作用、地下水位上升等原因引起的,而且随着埋深的增加,土体自重的作用下密度会增加、压缩性减小,固结程度也会越好。很显然,红黏土并非这样,随着埋深的增加固结性反而减弱。

(2)固而不密特征。一般理论认为,超固结土在其应力历史中被上覆压力压实,孔隙比应该很小。然而,红黏土虽是超固结性土,其孔隙比却又较大。

(3)固结度呈上大下小特征。咸宁和泉口两个工点试验的红黏土先期固结压力 p_c 及超固结比 OCR 都随深度向下有规律的递减,说明了红黏土“上硬下软”的工程特性。

4.4 红黏土抗剪强度

4.4.1 剪切试验结果分析

红黏土属于细粒土,其抗剪强度以粘聚力为主,内摩擦角为辅。粘聚力取决于土粒间的各种物理化学作用力,包括库仑静电力、胶结作用力等。而真正决定红黏土粘聚力强弱的因素是由胶结物质形成的胶结连结。红黏土中胶结物质主要有游离氧化铁、游离氧化铝、游离二氧化硅等,其中又以游离氧化铁的胶结最为重要。游离氧化铁与粘土矿物相互吸

附,主要是以包膜形式分布在粘土矿物粒团周围,对粒团起到牢固的胶结作用。

从武广客运专线红黏土三轴试验应力应变关系图可看出:围压越大,发生相同轴向应变所对应的主应力差就越大。土样在固结排水条件下硬化现象明显,而在不排水条件下硬化现象不明显甚至发生塑性流动。对应于相同的围压,固结排水试验的初始变形模量最大,而不固结不排水试验的初始模量最小。

4.4.2 试验结果影响因素分析^[2]

4.4.2.1 含水量的影响

由图 3 可知,含水量对红黏土试样的抗剪强度影响明显,含水量越大抗剪强度越小,这与基质吸力与含水量成反比的规律是一致的。含水量越小,达到相同的应变需要更大的轴向应力。尽管整体上红黏土的残余强度与峰值强度相差不大,但有的差值仍接近 100kPa,这种情况下,按照峰值强度进行设计计算将是偏于危险的,值得引起重视。

此外,含水量对粘聚力的影响比对内摩擦角的影响更为明显(图 4)。显见,红黏土的粘聚力在含水量变化时存在一个最大值,这个最大值所对应的含水量称为内聚力最佳含水量。小于这个最佳含水量时,内聚力随含水量的增加而增加,超过最佳含水量时则随含水量的增加而减小。红黏土内摩擦角随着含水量增大呈一直减小的趋势。

4.4.2.2 围压的影响

研究发现围压对红黏土的强度亦有较大影响。围压较小时,由于对土的约束较小,所测峰值强度和残余强度相对较低,峰值强度对应的剪切应变也较小;围压较大时,对土约束较大,红黏土体峰值强度和残余强度均有明显提高。此外,围压越大,测得的初始变形模量也越大。图 5 中 4 条曲线均有应变软化的趋向。

4.4.2.3 其他影响因素

除含水量和围压外,影响土的抗剪强度的主要因素还有结构与构造、固结程度、矿物成分及试验方法等。

由于红黏土具有胀缩性,土中网状裂隙往往十分发育。反复的干缩湿胀易使土的工程性质遭到严重削弱,造成诸如地基破坏和边坡失稳等灾害。研究表明:裂隙对内摩擦角几乎没有影响,但对粘聚力产生较大的影响;室内试验同样表明,随着深度增加,超固结比减小,呈现出粘聚力减小而摩擦角增大的趋势;另外,发现直剪试验的内摩擦角大于三轴试验的内摩擦角,内聚力因为直剪试验的离散性大而

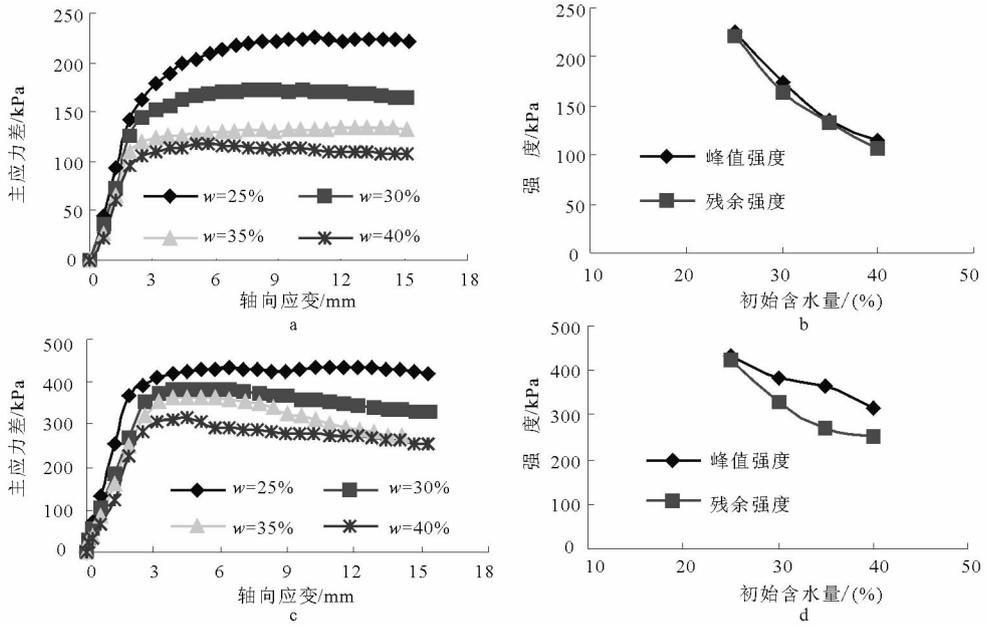


图3 不同含水量的应力-应变和强度变化曲线

Fig. 3 Stress-strain curve of different water contents

a. 100kPa 下的应力-应变; b. 100kPa 下的强度变化; c. 600kPa 下的应力-应变; d. 600kPa 下的强度变化

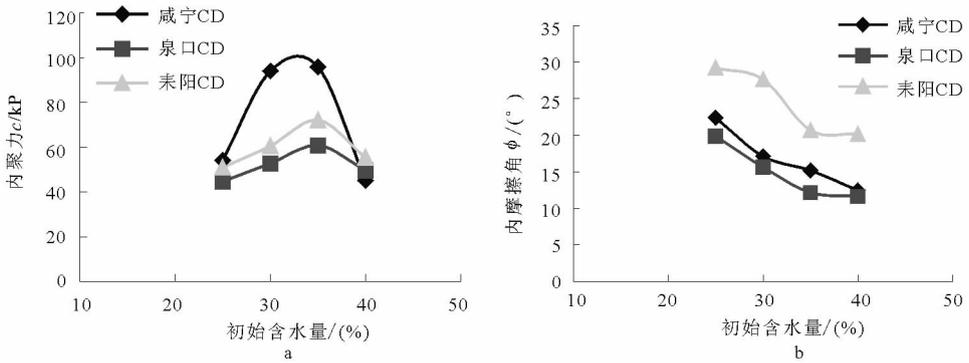


图4 含水量对内聚力和内摩擦角的影响曲线

Fig. 4 Water content-cohesion and friction angle curve

a. 含水量对内聚力; b. 含水量对内摩擦角

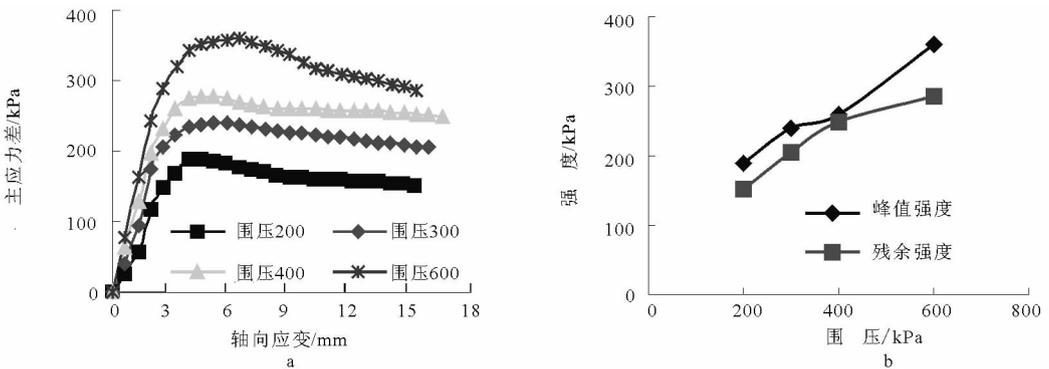


图5 不同围压下的应力-应变和强度变化曲线

Fig. 5 Stress-strain and strength curve under different confining pressures

互有大小,固结排水剪和固结不排水剪(慢剪)的凝聚力和内摩擦角都大于不固结不排水剪(快剪)试验的参数值。

4.5 工程性质随深度的变化规律

红黏土天然剖面上,表层呈坚硬、硬塑状态,向下逐渐变软,土的含水量、孔隙比等随深度递增,强度逐渐降低,压缩性增大,这与一般粘性土在自重作用下排水固结,密度增大的规律相反。近年来,许多学者对红黏土的这一特殊性状进行了研究,廖义玲通过对贵州典型红黏土的室内试验发现^[3],红黏土的先期固结压力随深度递减,这与一般粘土在自重作用下固结压力逐渐增大的规律相反,并且从土的成因、结构和成分的角度对该一反剖面特征进行了分析。余培厚等认为,红黏土的超固结性很大程度上归因于游离氧化物的胶结结构^[4]。毕庆涛从红黏土的矿物及化学成分方面对剖面特征进行了分析。

对于武广沿线的碳酸盐类岩石残积红黏土,其剖面特性表现为:

(1)随着深度的加大,红黏土由坚硬、硬塑变为可塑、软塑,强度大幅度降低。

(2)强烈的失水收缩,使红黏土表层的裂隙很发育,破坏了土体的整体性,降低了土体强度,增强了透水性,这对于浅埋基础或边坡的稳定性都有影响。

(3)红黏土的压缩性也具有随深度增加而增大的规律。随深度增加,土的压缩模量逐渐减小,压缩系数相应增大,与土的超固结比、先期固结压力、密实程度随深度增加相应地减小的规律对应。不同区域的红黏土均表现出这样的规律性。

由图6可看出(以泉口为例),红黏土地基随深度增加,含水量、孔隙比、液限、液性指数、塑性指数增大,但塑限、压缩模量、密度和黏聚力都随深度增加而减小。

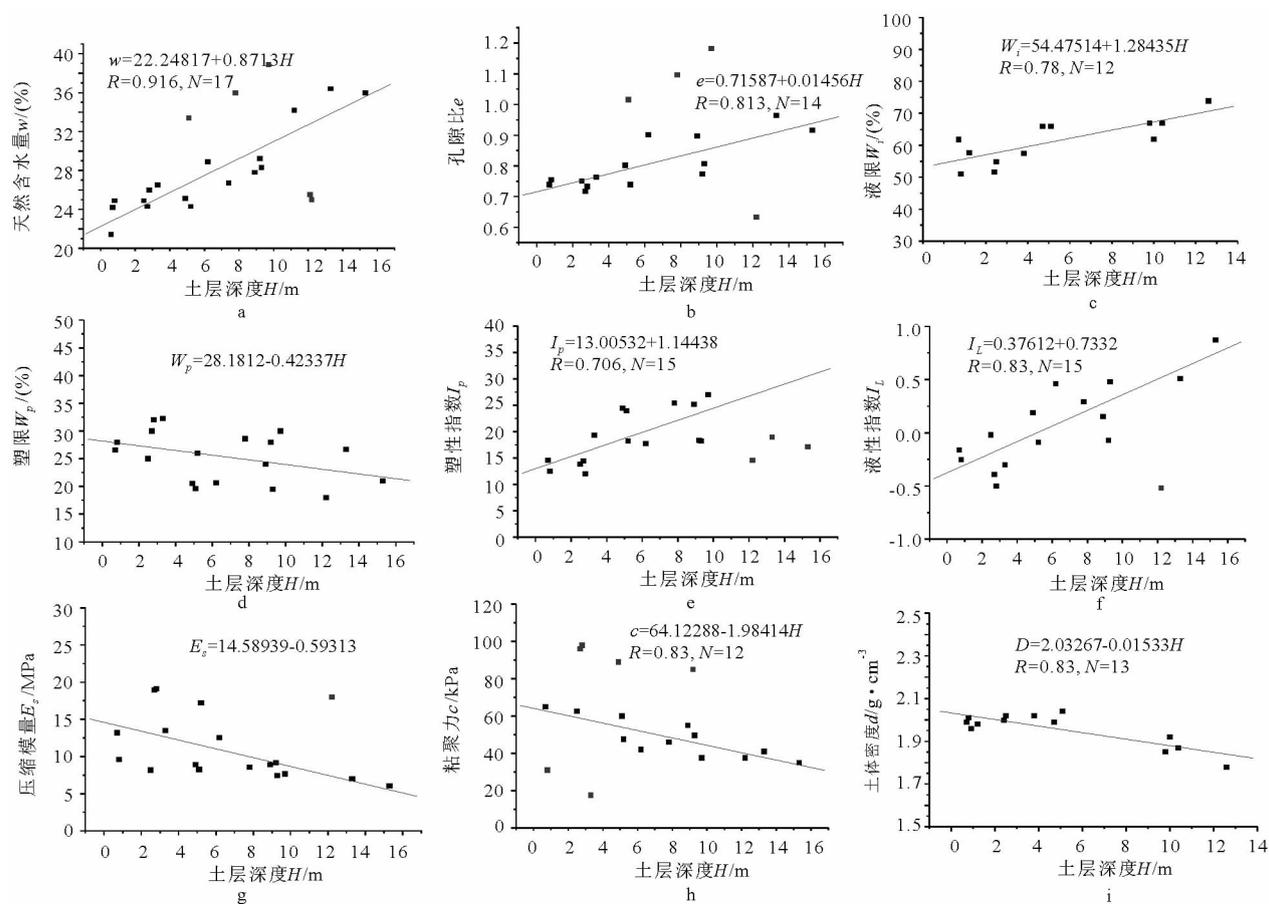


图6 土层深度与各物理指标间的关系(泉口)

Fig. 6 Relation between soil depth and soil physical indices at Quankou site

a. 土深 H 与含水量 w 关系; b. 土深 H 与孔隙比 e 关系; c. 土深 H 与液限 W_L 的关系; d. 土深 H 与塑限 W_p 关系; e. 土深 H 与塑性指数 I_p 的关系; f. 土深 H 与液性指数 I_L 的关系; g. 土深 H 与压缩模量 E_s 的关系; h. 土深 H 与黏聚力 c 的关系; i. 土深 H 与土体密度 d 的关系

从土深与塑限的关系来看,关系比较离散,但是大致的趋势是随着深度的增加,塑限值逐渐减小。土深 10m 范围内,塑性指数 I_p 随深度增加呈明显增大的趋势,而且均大于 10,说明在该区间内,随着土深度增加,红黏土的黏性增大;而 10m 以下塑性指数偏小;从地表到 6m 之内的土的液性指数小于 0,表示该区段的红黏土为坚硬状态;6m 以下部分液性指数大于 0 但小于 1,而且继续呈增大趋势,说明该区段红黏土从上至下分别为硬塑、可塑和软塑状态。红黏土的压缩模量与土层深度基本呈负的线性关系,随着土层深度的增大,红黏土的压缩模量有逐渐减小的趋势,说明红黏土在垂直剖面上从上至下的压缩性逐渐增大。随着土层深度的增加,土体的密度逐渐减小。由此看出,红黏土的密度,不仅受自重应力的影响,更主要来源于土体内部的胶结作用。

红黏土上部硬塑层相当于硬壳层,因结构致密,具有较高的承载力,荷载产生的基底附加应力将随深度衰减,硬壳层厚度达到一定厚度时,若附加应力的衰减程度大于红黏土因湿度增加而引起的承载力的降低程度,则应充分利用该硬壳层作持力层。反之如果红黏土的软弱下卧层较厚,或者硬壳层的裂隙发育,在压缩层范围内,存在竖向排水条件,外部荷载产生的附加应力将引起软弱下卧层的排水固结变形,使地基不再满足沉降变形要求,这点对于沉降变形要求非常严格的客运专线路基显得尤为关键,此时必须对该地基进行 CFG 桩加固或是化学改性等处理^[5]。可见,研究红黏土地基的反剖面特性对于合理利用硬壳层及是否对地基进行处理都有重要的意义。

5 结 论

(1)武广客运专线红黏土具有高液限、高塑限,饱和度高,天然重度大,孔隙比较大。颗粒均匀,粘粒含量高。

(2)红黏土固结比大,属于超固结土,但是其孔隙比却又很大,出现“固而不密”现象。红黏土具有很特殊的固结变形特征:红黏土的固结主要是在密

度变化极小的情况下,颗粒间强度增加的结果,不属于机械力作用下压密而相伴产生的固结。

(3)红黏土地基随深度增加,含水量、孔隙比、液限、液性指数、塑性指数增大;而塑限、压缩模量、密度和黏聚力减小。剖面上部先期固结压力较大,超固结比较大,固结程度好;下部超固结比小,固结程度差,从而形成上硬下软的工程特点。

(4)红黏土特有的工程性质将会影响到该地区的地基稳定性和边坡稳定性,建议地基采用 CFG 桩加固处理,边坡采用桩板墙和锚杆进行加固处理,并通过现场监测数据判定加固的效果。

参 考 文 献

- [1] 姜洪涛. 红黏土的成因及其对工程性质的影响[J]. 水文地质工程地质, 2000, (3): 33 ~ 37.
Jiang Hongtao. Red caly's formation and its effect to the engineering characteristics. Hydrogeology & Engineering Geology, 2000, (3): 33 ~ 37.
- [2] 杨果林. 客运专线非饱和红黏土的快剪与慢剪对比试验研究[J]. 湖南工业大学学报, 2007, (2): 15 ~ 20.
Yang Guolin. The contrast study between quick shear test and slow shear test of unsaturated red clay in the passenger transportation line. Journal of Hunan University of Technology, 2007, (2): 15 ~ 20.
- [3] 廖义玲, 毕庆涛. 关于红黏土先期固结压力的探讨[J]. 岩土力学, 2006, (11): 1931 ~ 1934.
Liao Yiling, Bi Qingtao. Discuss on preconsolidation pressure of red clay. Rock and Soil Mechanics, 2006, (11): 1931 ~ 1934.
- [4] 廖义玲. 红黏土的微结构及其概化模型[J]. 工程地质学报, 1994, (1): 27 ~ 37.
Liao Yiling. The Microstructure and generalized model of RED clay. Journal of Engineering Geology, 1994, (1): 27 ~ 37.
- [5] 黄俊, 陈国垣, 聂复生. 高等级公路红黏土路基处理技术研究[A]. 第一届全国公路科技创新高层论坛论文集[C]. 南昌: 江西科技出版社, 2002, 112 ~ 119. Huang Jun, Cheng Guoheng, Nie Fusheng. Research on red clay roadbed treatment technology of high-grade highway. 1ST National road science&technology innovation forum treatise. Nanchang: Jiangxi Science&Technology Press, 2002, 112 ~ 119.