

饱和软黄土的力学与工程性质分析

高虎艳, 邓国华

(西安市地下铁道有限责任公司, 陕西 西安 710048)

摘要: 饱和软黄土是西安地铁建设中遇到的一个难点问题。由于特殊的物理力学性质, 致使其工程处理措施较为复杂。结合西安地铁勘察成果和其他工程试验与监测结果, 从饱和软黄土的定义、成因、分布范围、力学特性、工程性质以及处理措施等方面对西安地区饱和软黄土进行较为全面的认识。

关键词: 地铁工程; 饱和软黄土; 力学特性; 工程性质

中图分类号: TU444

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2012)03-0038-05

Analyses for Mechanical and Engineering Characteristics of Saturated Soft Loess

GAO Hu-yan, DENG Guo-hua

(Xi'an Metro Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: The saturated soft loess is a difficult problem for Xi'an metro project. The treatment measures are complicated because of its special physical and mechanical properties. Based on the survey, testing and monitoring results, it has been researched here comprehensively from its definition, causes, distribution, mechanical properties, engineering properties and the treatment measures for it in Xi'an region.

Keywords: metro project; saturated soft loess; mechanical characteristic; engineering character

饱和黄土是指饱和度大于 80%, 湿陷性已退化了的黄土。《工程地质手册》明确指出^[1], 饱和黄土可分为两类: 一类是湿陷性黄土受水浸湿后, 未经过较长时间大的上覆压力的压密作用, 土的湿陷性虽已退化, 但土的大孔隙仍基本保存完整, 土的结构也未因浸水而彻底破坏, 在今后新增加的荷载作用下, 会产生较大的压缩变形。这种土往往属于欠压密状态, 其固结比一般在 1 左右。土的工程性能很差, 含水率高, 经常处于软塑到流塑状态, 承载力很低。地基压缩变形大。此类土多位于湿陷性土层的地下水位变化带和毛细带范围内, 或局部受水浸湿过的地段。土的一个明显状态是, 当其含水率再度降低到饱和度小于 70% 时, 由于其大孔隙仍保存完整, 土的湿陷性还会有所恢复。另一类是早期受水浸湿或湿陷过的黄土, 经受了长期较大上覆土自重压力或外来附加应力的充分压密作用, 土的孔隙比已经明显降低, 湿陷性黄土的大孔隙已被改变到接近一般粘性土, 这类土已成为超压密状态, 土的压缩性已大大降低, 密度明显增大, 承载能力提高。不但目前不

具湿陷性, 即使将来再度失水, 其湿陷性也不会恢复。

在工程建设中, 由于这两类饱和黄土的力学性质差异较大, 且工程处理措施各不相同, 故将第一类饱和黄土称之为饱和软黄土。目前, 这一概念在工程界已得到了普遍的认可, 而在学术研究中, 饱和软黄土的概念还很少提及。本文主要的研究对象正是第一类饱和黄土, 即饱和软黄土。

1 饱和软黄土的定义

对饱和软黄土的理解, 作者认为“饱和”是土力学中的一个基本术语, 主要是指土中的孔隙充满了水, 但在这里内含着一个条件, 那就是近期浸水饱和(当饱和度达到 85% 就认为饱和), 换句话说, 不是较早形成的, 它还没有来得及经受较大或较长时期的上覆压力而充分密实(包括湿陷和固结), 这也正是饱和黄土和饱和软黄土的差异所在。“黄土”则由于湿陷性而“臭名远扬”, 这里主要指 Q_3 马兰黄土和 Q_4 黄土状土, 但也有条件, 即它的湿陷性由于近期

增湿或饱和而部分发生,但并不是全部发生,而是转化成了高压缩性。这个名称中最具想象力的当属“软”字,它至少反映了三层含义,一是强度低,二是抵抗变形能力弱,三是承载能力差。应该指出,这三层含义是相对饱和黄土或同干密度非饱和黄土而言的,因此,对比认识这三者性质的差异是认识饱和软黄土力学和工程性质的最佳途径。

2 饱和软黄土的物理力学性质

以西安地铁为依托^[2],对西安市城区的饱和软黄土进行了详细的勘探,并结合民建和铁路工程的一些资料,对饱和软黄土物理力学性质进行了综合分析。

2.1 孔隙比

饱和软黄土在近期水位变化后,在自重作用下只是发生了部分湿陷,因此,其孔隙比仍然较大。统计分析兴庆湖周边 10 km² 区域(饱和软黄土的主分布区)饱和软黄土的孔隙比,结合其它地区的测试参数,可以发现,其孔隙比介于 0.8~1.2 之间,与同地区饱和黄土的孔隙比相比,有 0.1~0.4 的增幅。相应地,饱和软黄土的干密度较小,在 1.30~1.45 之间。孔隙比较大是饱和软黄土的一个重要特征,也是工程建设过程中,降水和扰动后发生较大沉降的主要原因。

2.2 含水率和饱和度

统计分析表明,饱和软黄土的含水率相对较大,多在 30%~36% 之间,比饱和黄土的含水率大 2%~8%,主要原因是其没有来得及压实变密,孔隙比相对较大,提供了赋水的条件。但其饱和度要比饱和黄土小,大多在 90% 左右。但必须要指出,由于饱和软黄土常处于地下水水位变化带和毛细作用范围内^[1],因此,其含水率和饱和度的变化幅度还是较大的,且不稳定。

2.3 液塑限

一般情况下,饱和软黄土多处于软塑和流塑状态。液限约在 30%~33% 左右,塑限约在 18%~21% 之间,其液性指数常大于 1。

2.4 强度

与饱和黄土或非饱和黄土相比,饱和软黄土的强度参数显著降低,这是其力学性质较差的主要原因。段真富等^[3]根据直剪试验结果得出其粘聚力在 2 kPa~23 kPa 之间,内摩擦角在 10°~26° 之间;根据固结快剪,粘聚力在 12 kPa~37 kPa 之间,内摩擦角在 11°~27° 之间。于国新等^[4]得出,其三轴不排水

不固结剪切强度与地貌有一定的关系,梁洼区(西安地铁涉及区域)粘聚力平均值为 20.08 kPa,内摩擦角平均值为 10.4°。根据西安地铁 6 个工点的勘察结果,快剪试验粘聚力平均值为 21.4 kPa,内摩擦角平均值为 16.4°;固结快剪粘聚力平均值为 25 kPa,内摩擦角为 17.5°;三轴固结不排水剪有效粘聚力平均值为 26 kPa,有效内摩擦角为 22.5°。综合分析各类强度指标可以发现,饱和软黄土由于其浸水后结构性散失,联结作用变弱,且干密度较小,强度明显低于同干密度的非饱和黄土和较密实的饱和黄土。

2.5 变形参数

对于地铁工程,强度破坏一般不会发生,经过处理较易满足要求,但其对变形的要求非常高。尤其对于西安地铁,它不仅涉及高楼大厦、各类管线,而且还有许多文物古迹。饱和软黄土抵抗变形能力较弱,且孔隙比较大,可变形的空间较为充足。工程上一旦降水、扰动或改变其受力边界,都会引起较大的地面变形和侧向变形。而且,水位往复变化,变形会持续发生,但变形的机理不同。水位下降,主要是固结变形,变形速率相对较慢,这一阶段湿陷性可能恢复;水位上升,主要是湿陷变形,变形速率相对较快。综合分析西安地铁和其他民建工程的资料^[5],发现,饱和软黄土的变形模量 E_0 在 2 MPa~5 MPa 之间变化,这一数值约为饱和黄土或同密度非饱和黄土的 1/3~1/2。对于基床系数,它与压缩模量有一定的相关性,其数值在 25~35 之间变化。

2.6 承载力

根据旁压试验和静力触探试验确定的结果,饱和软黄土承载力标准值一般在 80 kPa~100 kPa 之间变化,这一数值约为饱和黄土或同干密度非饱和黄土的 1/2~3/4。承载力低也是饱和软黄土的一个主要特征。

2.7 渗透特性

根据水文地质试验及地区经验,饱和软黄土的渗透系数约为 5 m/d~8 m/d 之间,比饱和黄土大 1 m/d~3 m/d。

3 饱和软黄土的分布范围

根据大量的勘察资料,西安城区饱和软黄土主要分布于黄土梁洼地貌单元上,尤其是洼地分布更为广泛,但在皂河、渭河阶地上也发现有饱和软黄土^[3-4]。这里地下水埋深浅,一般为 5 m~10 m,饱和软黄土埋深大部分为 2 m~9 m,局部地段略深一些,均为地下水毛细上升高度以下,分布厚度一般为

0.5 m~7 m,局部大于 8 m,有时呈透镜体分布。根据西安地铁勘察资料,兴庆湖周边一定区域内分布有饱和软黄土。二号线北大街、北钟区间、安北区间,一号线北大街、朝阳门、康复路、通化门、洒北区间、北朝区间、朝康区间、康通区间,三号线建工路、咸宁路、韩森寨、通化门、建咸区间、咸韩区间、韩通区间均分布有一定厚度、连续的饱和软黄土。结合西安市区域水文地质条件,地下水自东南流向西北,因此,可以推断,由于兴庆湖的存在,经过近 50 a 的水分迁移,以其为中心,已形成了一个偏西北方向的饱和软黄土区。值得注意,西安地铁三号线大雁塔站虽未在勘察阶段(2010 年)发现饱和软黄土,但其距曲江南湖和芙蓉湖仅有 1 km 多的距离,几年后,随着地下水位的上升,亦有可能形成大面积的饱和软黄土区,实际上,已有工程实际表明,该区域地下水位有明显的上升迹象。

4 饱和软黄土的形成原因

饱和软黄土的形成原因主要有三个:一是人工

形成的水体向周围蔓延。兴庆湖是一个最为典型的例子。由于兴庆湖是 1958 年在唐代兴庆宫遗址大面积挖湖堆山形成的水域面积达 10 hm² 的人工湖,当时对湖底防渗并没有做重点处理,1959 年开始蓄水后,以其为中心,至今已形成了约 10 km² 层厚不同的饱和软黄土地层。其地层水位线逐渐上升,含水率逐渐增大,湿陷性逐渐消失,压缩模量逐渐降低,如图 1 所示^[6]。另一个例子是以曲江某湖为中心的区域,虽然在修建时进行了防渗处理,但已经有工程资料表明,它已波及到了周边的建筑物,临近建筑物沉降已超过 10 cm,且其影响范围在逐步扩大。二是自来水和污水管道漏水、工业排水不畅和降雨入渗,但它必须要有古土壤层作为相对的隔水层。这种原因只会形成分散的、零星的饱和软黄土,这方面已有文献报道。三是河流、小溪常年不断地累计供水。西安北环铁路存在饱和软黄土的两个段落正是此原因^[4]。东部西河村与柳树村段有两条小溪,常年水流不断;西端的茂陵车站附近虽没有天然的河流,但灌溉渠和防洪渠较多,且经常有水。

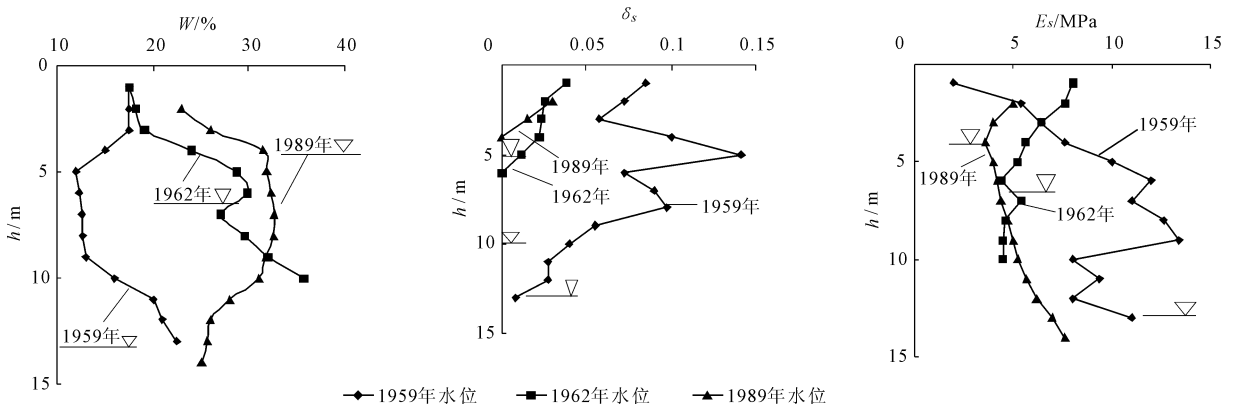


图 1 兴庆湖周边地基性质变化比较

5 饱和软黄土对工程的影响

饱和软黄土对工程的影响主要在于其压缩性高,承载力低,出现地基过分沉降和建筑物破坏等情况。以兴庆湖周边地区为例,1959 年开挖蓄水后,在 3 年的时间内,周边地区水位上升了 10 m 多,根据任澍华等人 2003 年的调查结果^[7],许多房屋都出现了不同程度的破坏,如表 1 所示。

5.1 剪切破坏

饱和软黄土的容许承载力一般小于 100 kPa,且抗剪强度低,当其埋深较浅时,一般不能满足建筑物对地基土强度的要求,一旦承受较重荷载,软黄土层就会出现较大的变形并发生剪切破坏。

5.2 变形过大

饱和软黄土的压缩性高,压缩模量、变形模量和基床系数均较小,且孔隙比较大,因此工程上往往会出现不可控的过大变形。无论水位上升还是下降,都会引起相对较大的变形。

5.3 不均匀沉降

饱和软黄土层厚不一,偶尔呈透镜体分布,容易造成构筑物不均匀沉降、倾斜或墙体开裂。

5.4 层厚的可变

饱和软黄土层厚度具有可变性,随着地下水位的抬升而增厚,水位下降则变薄。人为形成的地表水体,如果防渗措施不利,又会新增,对于已建工程可能会构成较大威胁。

表1 兴庆湖周边地区部分建筑物基础沉降及结构使用状况

建筑名称及建设年代	地下水埋深/m	建筑结构及使用状况	基础沉降量/mm
西安某大学教学楼 (1957年—1958年)	3.0~3.5	5层,砖混,开裂后采取加固措施	>700
西安某信号厂办公楼 (1961年—1962年)	3.8~4.0	4层,砖混,严重开裂,拆除	100~416
某勘察院住宅 (1985年—1987年)	5.0~5.5	框架,8层,筏基础减载建筑功能受损	100~472
西安某通信工厂住宅 (1987年—1989年)	3.5~3.6	框架,8层,筏基,建成后开裂,地基加固	211~544
西安某大学学术交流中心 (1999年—2000年)	3.5~4.0	框架,2~4层,十字交叉基础,施工曾中断	97~274

6 饱和软黄土工程处理措施

6.1 区间工法选择

对于地铁隧道工程,在有条件的情况下尽量采用盾构法施工,以有效降低由于降水引起饱和软黄土的失水压缩,从而造成地面过大的沉降,危及周边的建(构)筑物。

6.2 暗挖分级降水或止水

在采用浅埋暗挖法施工的地段,应采用分级降水,同时加强对周边环境的监测,若降水造成的沉降较大时,设置回灌措施。对于周边无条件实施降水的工点,应考虑注浆止水。确保暗挖工程在无水条件下实施。

6.3 明挖分级降水或止水,减缓建设速度

对于地铁车站和竖井,应加强基坑止水措施,可采用止水帷幕,减少降水对帷幕外地下水的扰动,采用坑内降水。必要时进行回灌。降水宜分阶段进行,确定周边建筑物沉降稳定后方可开始下一阶段降水。工程建设速度不宜过快。

6.4 桩基处理

由于饱和软黄土呈软塑,局部流塑状,因此,桩基处理时,则尽量采用静压桩,不宜采用灌注桩。一般地,饱和软黄土和下部饱和黄土同时存在,且厚度较大,孔隙水压力较大,可能会引起桩的上浮问题,打桩应尽量从中间向四周依次实施,为孔隙水压力消散提供条件,如果从四周向中心打桩,则最后的中心桩必然上浮。在工程中,如果发生上浮,可以通过再次静压的方式解决,承载力仍可达到预期的设计值。

6.5 避免扰动

饱和软黄土属于中灵敏性土体,具有触变性大的特点。因此,切忌土体扰动,防止形成“橡皮土”。一般情况下,应尽量避免基底与软黄土层直

接接触,在软黄土层之上应保留0.5m以上的垫层。

6.6 结构措施

不均匀沉降是对结构最大的威胁,建议应增大结构的整体刚度,并根据饱和软黄土分布范围和分布厚度优化建筑平面布置。

7 结论与建议

饱和软黄土具有孔隙比大、含水率高、强度低、压缩性强、承载力差、呈软塑或流塑状态的物理力学特性。工程上处理这层土必须要小心谨慎。西安地铁在一、二号线的建设过程中已积累了许多经验,但三号线将会遇到层厚更大的饱和软黄土,必须要引起设计和施工人员的高度重视。需要特别强调的是,由于曲江南湖和芙蓉湖的存在,大雁塔站附近很有可能形成大面积的饱和软黄土,建议目前开始对其周边地下水位进行观测,及时反馈信息,设计上也应该要有所考虑。不仅如此,从环境地质条件看,大面积长期蓄水必然会造成渗漏,因此,黄土地区地铁建设前期,就应对线路附近地表水体进行详细的调查,并分析预测其影响半径,及早设置水位观测点,提前做好应对措施。

致谢:在本文的写作过程中,得到了中国有色金属工业西安勘察设计研究院林颂恩教授级高工、陕西三秦工程咨询有限公司任澍华教授级高工和中铁一院相旭工程师的指导,在此表示衷心的感谢!

参考文献:

- [1] 常士骠,张苏民.工程地质手册(第三版)[M].北京:中国建筑工业出版社,1992.
- [2] 西安市地下铁道有限责任公司.西安地铁一、二、三号线勘察报告[R].西安:西安地下铁道有限责任公司,2009.
- [3] 段真富,徐洪安,张玲.西安地区软黄土工程地质特

- 征和分布规律综述[J]. 西安地质学院院报, 1992, 14(1): 64-70.
- [4] 于国新, 白明洲, 许兆义. 西安地区饱和软黄土工程地质特征研究[J]. 工程地质学报, 2006, 14(2): 196-199.
- [5] 吴燕开, 陈红伟, 张志征. 饱和黄土的性质与非饱和黄土流变模型[J]. 岩土力学, 2004, 25(7): 1143-1146.
- [6] 任澍华, 李忠明. 湿陷性黄土地区人工湖渗漏引发的环境工程地质问题[J]. 西北建筑与建材, 2003, 94(4): 26-29.
- [7] 任澍华, 李忠明, 林杜军. 西安城市建设中的几个工程地质和环境地质问题[J]. 工程地质学报, 2004, 12(Z1): 40-43.
- 