

人工开挖边坡的长期稳定性分析与土的强度参数确定

The long term stability of cut slope and determination of effective strength index of soils

廖红建¹, 韩波¹, 殷建华², 赤石胜³

(1. 西安交通大学 土木工程系, 陕西 西安 710049; 2. 香港理工大学 土木及结构工程系, 香港; 3. 东海大学, 日本)

摘要: 对人工开挖边坡的长期稳定性问题进行了一系列的室内三轴剪切试验, 探讨了黏性土在浸水后的强度降低程度, 以及强度指标的变化情况, 模拟了降雨和地下水位变动时土中的应力状态变化过程, 得出了人工切土边坡由于水的浸入、长期地质风化、扰动等因素, 使有效黏聚力几乎降低为零, 有效内摩擦角和正常固结状态的接近, 并通过工程实例用有效应力法和总应力法对边坡稳定性进行了分析验证, 为人工切土边坡的长期稳定性计算和强度参数确定提供简便、实用和经济的方法。

关键词: 稳定性; 黏性土; 地下水; 三轴剪切试验

中图分类号: TU 413. 62

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2002)05-0560-05

作者简介: 廖红建(1962—), 女, 湖南华容人, 博士, 教授, 博士生导师, 现任西安交通大学建筑工程与力学学院副院长, 土木工程系主任, 中国力学学会岩土力学专业委员会委员, 陕西省岩石力学与工程学会常务理事。主要从事岩土工程材料的强度变形特性和数值分析研究、抗震与地质灾害防治研究等。

LIAO Hong-jian¹, HAN Bo¹, YIN Jian-hua², AKAISHI Masaru³

(1. Department of Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049 China; 2. The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China; 3. Tokai University, Kanagawa, Japan)

Abstract: This paper is concerned with the long term stability problem of cut slope. To investigate the decrease of strength and the change of strength index of submerged soils, a series of triaxial shear tests were carried out on both submerged and non-submerged cohesive soil specimens. Some laboratory simulation tests were also conducted to illustrate the change of stress path of soil in cut slope induced by rainfall and variation of groundwater level. From above tests, we can obtain that the effective cohesion parameter is almost equal to zero and the angle of shearing resistance is near to that of normally consolidated soils under submerging and the long-term geological weathering. The validity of the method of strength indexes determination was confirmed by a practical failure case with total stress method and effective stress method. Based on the experimental results, a simplified, practical and economic method of the determination of strength indexes is proposed.

Key word: stability; cohesive soil; groundwater; triaxial shear test

1 前言*

近年来, 随着高速公路、大型水利工程、深基坑开挖工程的越来越多, 人工边坡在工程中的运用越来越广泛, 其建造规模也越来越大。因此, 设计人工边坡时, 边坡内土的强度参数的合理确定, 边坡的长期稳定性, 以及滑坡的预防和预测等问题, 受到土木工程界的十分重视和关注。通常, 从已建人工边坡经长时间后发生突然破坏的工程实例来看, 在表面上荷载并没有明显的变化, 而往往在降雨、地下水位上升、长期地质演变、风化等因素下导致滑坡发生。

人工边坡的稳定分析中, 合理确定土的强度参数非常重要。通常填土边坡的填土材料其强度参数通过试验易于确定, 从而根据稳定性分析可以较合理地设计边坡。而对于人工切土边坡, 存在下述困难因素: ①开挖工程后, 边坡中的土受应力释放、扰动和地质风化影响, 使抗剪强度大大降低; ②地层构造复杂, 滑裂面位

置预测困难; ③滑裂面处的抗剪强度难以正确把握等。因此, 人工切土边坡的建造, 往往根据实际山体的土质情况, 由一般的边坡稳定计算和经验来设计, 这是不符合实际开挖边坡内应力状态的。可以说, 人工切土边坡在建造施工过程中, 仍存在许多未知的、变化的因素。

Sevaldson 和 Henkel 早在 20 世纪 50 年代就指出^[1,2], 地下水位的上升以及周期性的水位变动会使土的有效黏聚力 c' 降低, 这是导致滑坡的主要原因。有关有效黏聚力 c' 降低的机理目前还在探讨中。Bishop & Bjernum 认为^[3], 由于人工切土边坡在开挖过程中土体出现裂缝, 遇水后吸水膨胀, 使得边坡中的超限应力区扩大, 同时由于长期地质演化和扰动, 使有效黏着力 c' 降低至零。特别对于易风化软岩材料构成的边坡, 遇水后对边坡的稳定性和沉降都有很大影响^[4,5]。

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50146019); 陕西省自然科学基金资助项目(2000C18)

收稿日期: 2002-01-02

根据上述考虑, 本文主要就人工切土边坡的稳定性问题作如下几方面研究: ①通过切土边坡的工程实例用有效应力法和总应力法计算安全系数, 提出现有稳定计算中存在的问题和合理确定坡体土强度参数的方法; ②通过一系列室内三轴剪切试验, 验证土在浸水后的强度降低程度, 以及强度指标的变化情况, 模拟了降雨和地下水位变动时土中的应力状态变化过程, 得出人工切土边坡的超固结状态, 在浸水、长期地质演化等因素影响后, 土的强度参数接近正常固结土的状态, 提供了切土边坡稳定分析中确定强度参数的简便方法, 这对于工程应用具有一定的参考价值。

2 破坏实例分析

2.1 切土边坡的应力状态

图 1 为施工前后人工开挖边坡内假定滑动面上一点土的应力状态变化示意图(在莫尔-库仑坐标上)。图中 c_u, φ_u 为开挖前现场采取正常固结土样的不固结不排水(UU)剪切强度指标, 可用于短期稳定性分析。切土前假设滑动面上一点的总应力 (σ_v, τ_f) 在不固结不排水抗剪强度线 UU 上 A 点; 开挖后由于应力解除, 边坡内土体处于超固结状态, 此时 A 点的法向有效应力 σ_v' 减少至 B 点, 对应于土中一点的应力状态, 从理论上说在超固结土的固结不排水有效抗剪强度线 CU 上的 D 点处。但本文的实际滑坡破坏结果和试验结果表明, 由于开挖后人工边坡受到各种不利于稳定的因素影响, 使土中抗剪强度降低很大, 破坏时 A 点的应力状态变到了图中虚线上的 E 点, 而图中虚线对应的 c', φ' 正好为开挖前正常固结土的固结不排水有效抗剪强度指标。若该结论成立, 对于人工切土边坡的稳定性分析和设计, 确定土的强度参数, 将带来很大的方便和实用性, 下面通过理论和试验分析之。

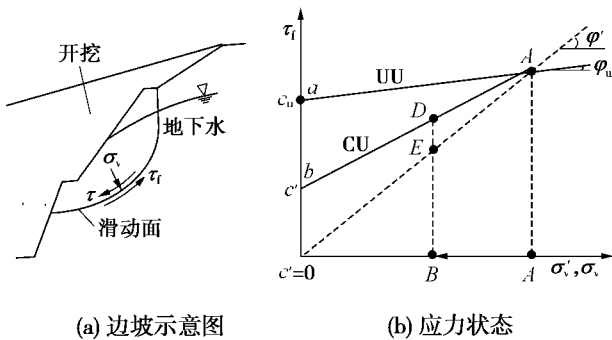


图 1 切土边坡破坏与莫尔-库仑准则

Fig. 1 Failure of a cut slope and Mohr-Coulomb Criteria

2.2 稳定分析计算

图 2 为两个实际人工切土边坡的破坏断面示意图。开挖边坡前由现场取土进行土工试验测得边坡

各土层土的物理力学指标见表 1, 表中还列出了分析用土样的物理力学指标。将图 2 中所示的各参数进行总应力法和有效应力的边坡稳定分析, 得出的结果见表 2。可见采用分析短期稳定性的总应力法, 使用正常固结土的不固结不排水抗剪强度指标 (c_u, φ_u) 计算所得的安全系数很大; 再采用超固结强度参数进行有效应力法计算, 得到的安全系数仍然较大。分析其原因主要有如下 3 方面: ①强度指标选择不合适; ②地下水的影响; ③滑动面的位置和形状设定不合理。根据该现场的破坏分析来看, 地下水位的的变化以及破坏面的位置推定与实际很接近, 因此, 认为强度参数的采用是否合理是出现较大安全系数的问题所在。

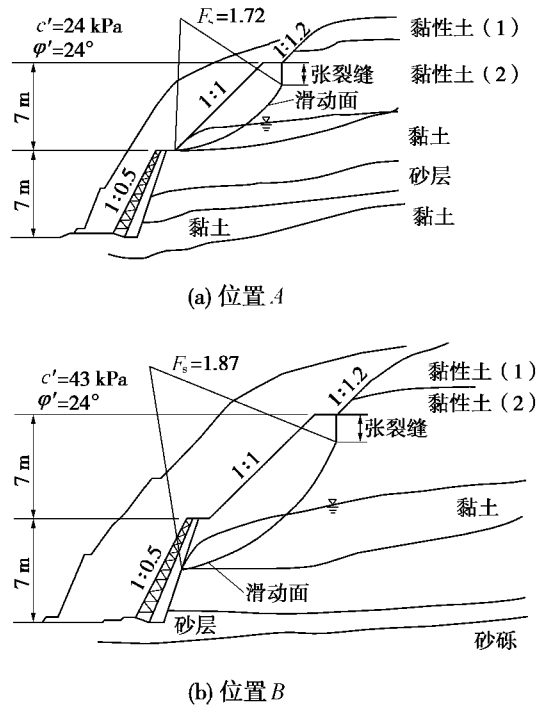


图 2 人工切坡破坏实例

Fig. 2 Example of cut slope failure

计算时, 将正常固结土的固结不排水有效抗剪强度指标 $c' = 0, \varphi' = 38^\circ$ 代入, 用有效应力法进行稳定性分析, 得出了安全系数为 1.17 和 1.15 (见表 2)。计算结果表明, 将超固结状态下土的 CU 试验强度参数代入计算所得安全系数, 较正常固结状态下土的 CU 试验强度参数代入所得安全系数大, 即验证了前面提到的在正常固结土的固结不排水有效抗剪强度线 E 点上的说法。因此, 对于人工切土边坡的长期稳定问题, 如果由于边坡中水的浸入、扰动和长期地质风化影响, 使有效黏聚力几乎降低为零, 有效内摩擦角和正常固结状态下接近, 这将对于人工切土边坡稳定计算的强度参数确定, 提供简便、实用、经济的手段和依据。以下通过室内试验进行验证探讨。

表1 土样的物理力学性质

Table 1 Physical and mechanical properties of samples

| 土样 | 颗粒组成/% | | | | 比重 G_s | w /% | w_L /% | w_p /% | c_u /kPa | φ_u /° | |
|-------|--------|------|----|------|-------------|-----------|-------------|-------------|---------------|-------------------|-----|
| | 砾石 | 砂粒 | 粉粒 | 黏粒 | | | | | | | |
| 现场土样 | 黏性土(1) | — | 12 | 32 | 52 | 2.65 | 125 | 121 | 85 | 37 | 6.0 |
| | 黏性土(2) | 12 | 38 | 31 | 19 | 2.64 | 81 | 65 | 29 | 83 | 9.5 |
| | 黏土 | — | 31 | 24 | 45 | 2.69 | 46 | 39 | 20 | 70 | 2.4 |
| 试验用土样 | — | 59.3 | 17 | 23.7 | 2.84 | 120 | 123.2 | 81.3 | 121 | 15.2 | |

表2 边坡稳定性计算

Table 2 Calculation of slope stability

| 破坏地点 | 总应力分析法 | | | 总应力分析法 | | | | | |
|------|---------------------|---------------------------|---------------|-------------------|-------------------------|---------------|--------------------|--------------------------|---------------|
| | 正常固结 c_u / kPa | 正常固结 φ_u / (°) | 安全系数 F_s | 超固结 c' / kPa | 超固结 φ' / (°) | 安全系数 F_s | 正常固结 c' / kPa | 正常固结 φ' / (°) | 安全系数 F_s |
| A点 | 83 | 9.5 | 4.0 | 24 | 24 | 1.72 | 0 | 38 | 1.17 |
| B点 | 83 | 9.5 | 2.8 | 43 | 24 | 1.87 | 0 | 38 | 1.15 |

3 试验分析

3.1 浸水和不浸水试样的单轴和三轴剪切试验

由于不能从破坏现场再次取到与实例相同的土样, 试验时从位于神奈川县平冢市的东海大学校内的开挖现场, 采用与滑坡发生所在土层相同的火山灰黏性土, 其物理力学性质指标列于表1中。试验所用土样与破坏现场土样相比, 天然含水率和液、塑限都较大, 饱和度 S_r 为 98.6%, 初始孔隙率 n 为 77.57%, 干密度 ρ_d 为 0.64 g/cm³。试验时分别将直径为 15 cm、高为 30 cm 的土块在所定的固结压力下固结后, 再制作成直径 5 cm、高为 10 cm 的圆柱形试样。为了确认土的饱和状态, 剪切试验前测得试样的孔隙水压力系数 B 值均接近 1。为了调查由于降雨或地下水位变化对土的强度特性的影响, 特别是对土的抗剪强度指标的影响, 试验时分别准备了浸水和不浸水试样。进行了无侧限抗压强度试验, 不固结不排水、固结不排水和固结排水三轴剪切试验。

图3为无侧限抗压强度试验得到的应力—应变曲线。试样首先分别在有效固结压力 100, 200, 300 和 400 kPa 作用下固结, 然后分别对浸水和不浸水的试样进行单轴试验, 以每分钟轴向应变为 0.1% 等速加载。结果表明, 由于浸水使土的单轴抗剪强度明显降低, 几乎为不浸水时的 12.5% ~ 25%。将单轴剪切强度与固结压力的关系整理于图4中, 还得出浸水后试样的单轴剪切强度几乎相等, 即不受浸水前所受固结压力的影响。由此可以预测对于上覆土压力较小的土体或土层, 即使历史上曾受固结或人为被压实, 其所保持的抗剪强度在降雨或地下水的影响下约 3/4 以上丧失, 并且不受浸水前固结压力的影响。

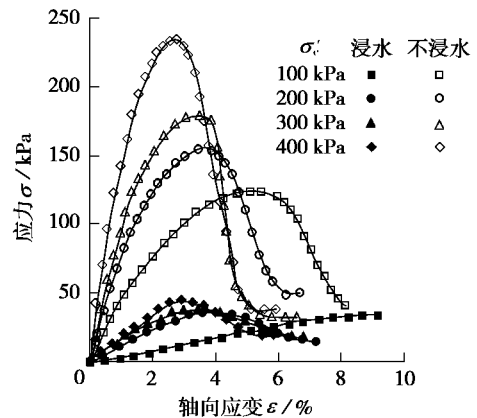


图3 无侧限抗压强度试验结果

Fig. 3 Results of unconfined compression tests

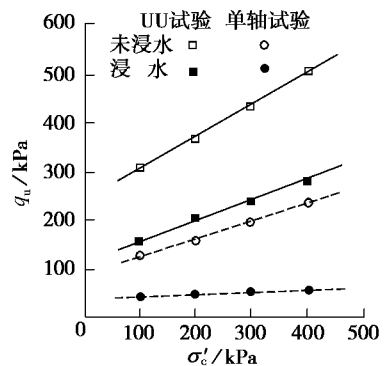


图4 抗剪强度与围压关系

Fig. 4 Relationship between shear strength and consolidation pressure

图5为不固结不排水剪切试验的应力—应变曲线。试验时先将试样在 400 kPa 压力下等向固结, 然后分别对浸水和不浸水的试样进行不固结不排水三轴剪切试验。试验时, 取反压力为 100 kPa, 超固结比为 8, 4, 2 和 1.33, 即围压分别为 50, 100, 200 和 300 kPa。由应力—应变曲线可见, 浸水使土的抗剪强度明显降

低,但由于围压的存在,使浸水后的抗剪强度降低幅度较无侧限抗压强度试验小,约为浸水前的 50%。为比较起见,把 UU 试验的最大抗剪强度与围压的关系也整理于图 4 中。

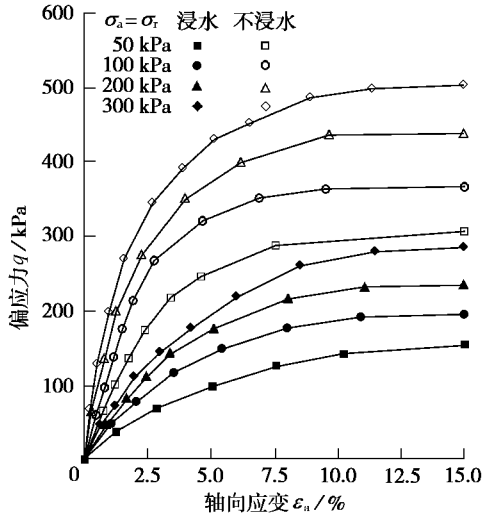


图 5 不固结不排水三轴试验应力-应变曲线

Fig. 5 Stress strain curves for unconsolidated undrained triaxial tests

进一步观察不固结不排水试验的强度指标变化情况。根据试验整理的莫尔-库仑圆和 c_u , φ_u 值如图 6 所示。结果表明,浸水使土的黏聚力明显降低 50% 以上,而内摩擦角的大小几乎不变,抗剪强度线呈平行移动型,这说明由于水的浸入主要使土颗粒间的负压力受到破坏。

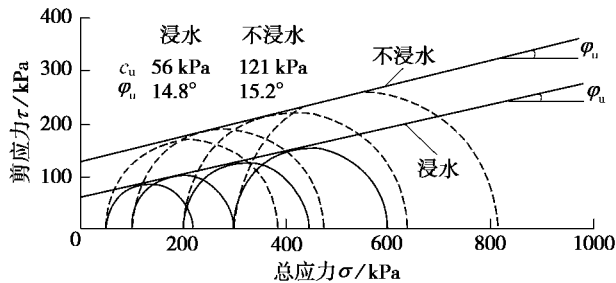


图 6 UU 试验结果

Fig. 6 Results of UU tests

图 7 为浸水试样的固结不排水 (CU) 三轴试验得出的有效应力路径。试验时先将试样在 400 kPa 的压力下等向固结,然后分别对浸水和不浸水的试样进行超固结比等于 8, 4, 2 和 1.33 的 CU 试验,反压力仍取 100 kPa,围压分别取 50, 100, 200 和 300 kPa。为便于比较,图中还给了对正常固结土样试验得出的临界状态线(CSL)和基于正常固结土样试验参数作出的修正剑桥模型屈服面(Y.S.)^[7]。试验结果表明,超固结土样遇水后的有效应力路径,并不象理论上认为的在超固结区域土的剪切强度越过正常固结土的临界状态线达

到 Hvorslev 屈服面上,而是在正常固结土的临界状态线附近,并沿着临界状态线达到一个较大值。根据正常固结土和超固结土的 CU 试验结果,在莫尔-库仑坐标下计算最大剪切强度指标 c' 和 φ' 值分别为正常固结土 $c' = 0$, $\varphi' = 42.1^\circ$; 浸水的超固结土 $c' = 0.1$, $\varphi' = 41.4^\circ$, 两者的强度指标几乎相等。这个结论说明了超固结土样浸水后的强度指标和该土在正常固结状态下的接近,这和第 2 节中的数值计算结果一致。对以上结果曾多次进行 CU 三轴试验验证,对于浸水后的超固结土样来说都得到相同结果。

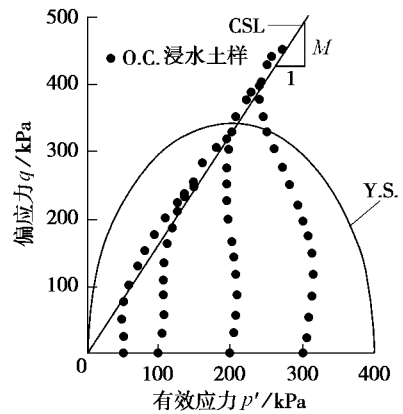
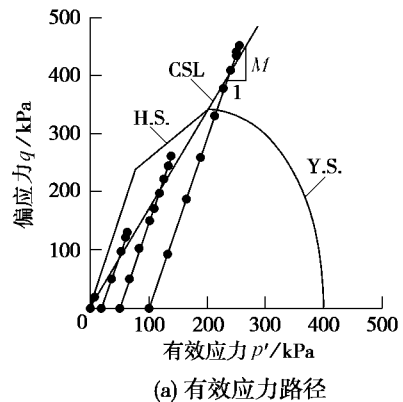
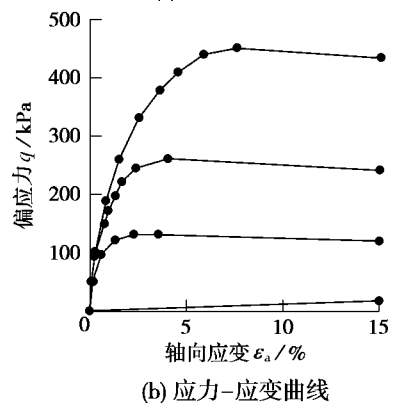


图 7 固结不排水三轴试验有效应力路径

Fig. 7 Effective stress path of CU tests



(a) 有效应力路径



(b) 应力-应变曲线

图 8 排水三轴试验有效应力路径和应力-应变曲线

Fig. 8 Effective stress path and stress-strain curves of CD tests

又进一步对超固结土样浸水后进行固结排水(CD)三轴试验。试验时先将试样在 400 kPa 的压力下等向固结,然后分别对浸水和不浸水的试样进行超固结比等于 ∞ , 16, 8 和 4 的 CD 试验,围压分别取 0, 25, 50 和 100 kPa。试验得出的有效应力路径和应力—应变曲线如图 8 所示,图中还给了对正常固结土样试验得出的临界状态线(CSL)、基于正常固结土样试验参数作出的修正剑桥模型屈服面(Y.S.)和 Hvorslev 屈服面(H.S.)。结果表明超固结土样浸水后的有效应力路径仍然在稍跨越正常固结土的临界状态线附近发生破坏,而未达到 Hvorslev 屈服面上。可见,超固结土样浸水后的强度特性和该土在正常固结状态下的接近,进一步证实了前面所述结果。

3.2 模拟试验

为了进一步证实上述结论,笔者又进行了如下模拟地下水位上升以及变动时,坡体内土的应力状态变化直至破坏的过程。

假设边坡开挖前土中某一点土的正常固结应力状态在图 9 上的 A 点处,由于边坡开挖使该点应力得到释放成为超固结应力状态移到 B 点,然后模拟由于降雨或地下水位上升使 B 点遇水,偏应力不变,有效主应力减少。通常对于超固结土来说,应该到达 Hvorslev 屈服面上,即图中的 C 点。

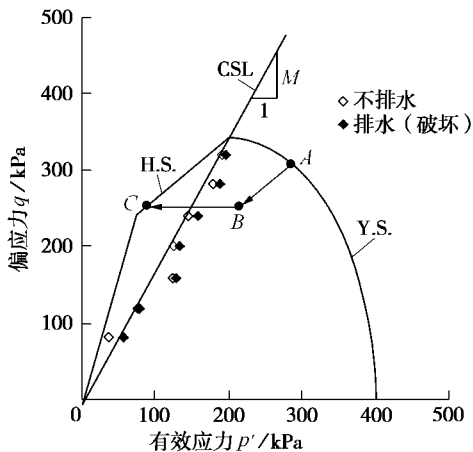


图 9 三轴试验结果

Fig. 9 Results of triaxial tests

先将试样在 400 kPa 的等向固结压力下固结,然后按设定的超固结比降低围压来模拟由于开挖处于超固结应力状态,然后保持三轴压力室内土样的偏应力 q 不变,在不排水状态下逐渐减少平均有效应力 p' 。在不排水状态下每减少一次荷载,都在排水状态下观察至变形稳定为止,然后再减至下级荷载^[8]。如此针对 7 个不同超固结比的试样进行试验,所得的有效应

力路径的最终屈服点如图 9 所示。由于接近破坏时,黏性土的剪胀性使土中产生超负孔隙水压力,故接近破坏时排水状态下的剪切强度点在不排水状态下剪切强度点的左边。结果表明破坏皆发生在正常固结土的临界状态线附近,文献[8]中阐述了详细试验操作过程。

4 结 论

(1)对于上覆土压力较小的土体或土层,即使历史上曾受固结或人为被压实,其所保持的抗剪强度在降雨或地下水的影响下约 3/4 以上丧失,并且不受浸水前固结压力的影响。

(2)浸水使不固结不排水试验的强度指标黏聚力 c_u 明显降低 50% 以上,而内摩擦角 φ_u 的大小几乎不变,抗剪强度线呈平行移动型,因此水的浸入主要使土颗粒间的负压力受到破坏。

(3)人工开挖边坡的超固结状态,在浸水、长期地质演化和扰动等因素影响下,坡体内土的强度参数接近正常固结土的状态。用正常固结状态下土的强度参数进行边坡稳定分析得出了 1.0 ~ 1.2 的安全系数。如果这个结论进一步通过对其他不同的土样进行试验验证归类的话,将对于人工开挖边坡工程运用时土的强度参数确定,提供简便的方法。

参考文献:

- [1] Sevaldson R A. The slide in Lodalen, Oct 6th, 1954 [J]. Geotechnique, 1956, 6(4): 1-16.
- [2] Henkel D J. Investigation of long term failures in London clay slopes at wood green and northholt [A]. International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering Proceedings [C]. 1957. 315-320.
- [3] Bishop A W, Bjerrum L. The relevance of the triaxial test to the solution of stability problems [A]. Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils [C]. 1960. 437-501.
- [4] 福田护,中泽重一. 盛土地盤の浸水に伴うとその解析について—マサ土のような風化砂質土を対象として— [J]. 土质工学会論文報告集, 1999, 17(2): 65-73.
- [5] 岛博保,今川史郎. スレーキング材料(ぜい弱岩)の圧縮沉下と対応策 [J]. 土と基礎, 1980, 28(7): 45-52.
- [6] 廖红建. 软岩及ひ黏性土の強度变形特性に関する基礎的研究 [D]. 日本: 东海大学, 1996.
- [7] 廖红建, 俞茂宏, 等. 黏性土の弾粘塑性本构方程及其应用 [J]. 岩土工程学报, 1998, 20(2): 41-44.
- [8] 廖红建, 俞茂宏, 等. 地下水位变化影响切坡稳定的试验研究 [J]. 工程勘察, 1998, (1): 33-37.