

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.04.09

路堤荷载下含硬壳层软土地基破坏模式

赵四汉^{1,2},刘鑫^{1,3},洪宝宁^{1,2},徐奋强^{1,4},单浩^{1,2}

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室,江苏南京 210098;
2. 河海大学岩土工程科学研究所,江苏南京 210098; 3. 河海大学隧道与地下工程研究所,江苏南京 210098;
4. 南京工程学院建筑工程学院,江苏南京 211167)

摘要: 通过理论分析和数值计算,对比分析在路堤荷载作用下含有连续和不连续硬壳层的水平层状软基的破坏模式,针对路堤坡脚外硬壳层不连续的情况(如存在鱼塘等),提出以局部剪切破坏模式失稳的破坏模式判定参数,即临界距离 L_{cr} ;借助正交试验原理,对 L_{cr} 的影响因素进行分析,给出各因素的敏感性顺序;利用逐步回归迭代方法,分别给出上限临界距离 L_{crU} 和下限临界距离 L_{crD} 的数学表达公式,并根据工程实例的验算论证了其可靠性。结果表明:在路堤荷载作用下,硬壳层连续时软基为整体剪切破坏;硬壳层不连续时,当不连续断面与坡脚的距离小于 L_{crU} 或大于 L_{crD} 时软基为整体剪切破坏,当不连续断面与坡脚的距离大于 L_{crU} 且小于 L_{crD} 时软基为局部剪切破坏。硬壳层厚度为 L_{cr} 的主要影响因素,软土层厚度为次要因素,硬壳层内摩擦角和黏聚力对其影响较小。
关键词: 山区高速公路;硬壳层;路堤荷载;软土地基;破坏模式;临界距离;正交试验
中图分类号: TU447 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2018)04-0337-09

Study on failure mode of soft soil layered foundation with hard crust layer under the embankment load

ZHAO Sihan^{1,2}, LIU Xin^{1,3}, HONG Baoning^{1,2}, XU Fenqiang^{1,4}, SHAN Hao^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. Institute of Tunnel and Underground Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
4. College of Architecture and Civil Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: Aiming at the discontinuity of hard crust outside the toe of embankment (such as fishpond, etc.), through theoretical analysis and numerical simulation, the failure mode of a soft soil layered foundation with continuous and discontinuous hard crust has been compared and analyzed under the embankment load, and a judgment parameter of failure mode, namely the critical distance L_{cr} , is proposed to distinguish between the general shear failure mode and the local shear failure mode. With the principle of orthogonal test, factors that influence L_{cr} have been analyzed, and each factor is given in order of sensitivity. Then, using the iterative method with stepwise regression, mathematical formulas of upper (L_{crU}) and lower (L_{crD}) limits of the critical distance are given respectively, and their reliability are demonstrated by checking an engineering project. The results indicate that the failure mode of soft soil foundation with continuous hard crust is general shear failure. When the hard crust layer is

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51609071);中央高校基本科研业务费专项(2018B13714);广东省交通运输厅科技项目(科技-2015-02-015,科技-2015-02-013)
作者简介: 赵四汉(1987—),男,博士研究生,主要从事山区软土地基处理研究。E-mail:tracyzsh@foxmail.com
通信作者: 刘鑫,副教授。E-mail:liuxin100@hhu.edu.cn
引用本文: 赵四汉,刘鑫,洪宝宁,等.路堤荷载下含硬壳层软土地基破坏模式[J].河海大学学报(自然科学版),2018,46(4):337-345.
ZHAO Sihan, LIU Xin, HONG Baoning, et al. Study on failure mode of soft soil layered foundation with hard crust layer under the embankment load[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2018, 46(4): 337-345.

discontinuous, the failure mode is general shear failure if the distance between discontinuous section and embankment toe is less than L_{crU} or higher than L_{crD} , and local shear failure if the distance is between L_{crU} and L_{crD} . The thickness of hard crust layer is the main factor to L_{cr} and the secondary factor is the thickness of soft soil layer, while the influence caused by the internal friction angle and the cohesion of hard crust layer is smaller.

Key words: highway in mountain area; hard crust layer; embankment load; soft soil foundation; failure mode; critical distance; orthogonal test

近年来,随着珠三角地区高速公路建设向东西两翼山区发展,在山丘与平原过渡区域常遇到含有较厚硬壳层的水平层状软土地基,因地形或人为因素,又常出现路堤坡脚外硬壳层不连续的情况,如硬壳层在山脚或山间沟谷等处断层,以及路堤沿线存在鱼塘、沟谷、河床或取土场等。在这种软土地基上修建路堤,除施工难度大外,还具有失稳突然、破坏模式多变等特点。譬如:当路堤填筑到某高度时,地基软土开始从硬壳层薄弱处被挤出^[1],造成异常沉降,甚至失稳,而且失稳模式也有别于常见的整体剪切破坏模式等。这些特征给路堤的稳定性控制带来难度,因此对不同软基破坏模式进行针对性的分析,并给出各种破坏模式的判定标准,对这种地质条件下的路堤稳定性控制十分必要。

目前国内外文献中,对含硬壳层软土地基的承载及破坏特性^[2-6]、沉降变形规律^[7-8]、路基稳定性^[9]、土应力及孔隙水应力分布^[10-14]等均有研究。例如:蔚晓丹等^[2]指出软土硬壳层地基破坏模式分为局部剪切破坏、整体剪切破坏。然而目前对破坏模式转变条件的研究较少,且均未考虑路堤坡脚外硬壳层不连续的情况。本文基于工程破坏实例,通过理论分析和数值计算,在对比分析路堤荷载作用下含有连续和不连续较厚硬壳层的水平层状软基破坏模式的基础上,针对不连续的情况,提出以局部剪切破坏模式失稳的破坏模式判定参数,即临界距离 L_{cr} ;借助正交试验原理,对 L_{cr} 的影响因素进行分析,并给出各影响因素的敏感性顺序;然后利用逐步回归迭代方法,分别给出了上限临界距离 L_{crU} 和下限临界距离 L_{crD} 的数学表达式,并根据工程实例的验算论证了其可靠性。

1 工程实例

广东省某在建山区高速公路 A 标 K4+400 ~ K5+900 段位于山丘与平原过渡区域,地基土层为水平层状分布,自上而下为硬壳层、淤泥层、粉质黏土层、中风化层,而且沿线鱼塘密布。原设计采用塑料排水板+砂垫层+边沟的超载预压方法,路堤填筑高度在 6.2 ~ 10.6 m 之间(不含 1.5 m 的超载高度土方)。由于存在较厚的硬壳层,塑料排水板插板前需进行引孔施工,引孔的最大深度在 6.0 m 以上,增大了施工和排水难度,加之周边施工环境恶劣,在路堤填筑施工中导致排水效果很不理想,约 80% 的路段无水排出。这与孙立强等^[15]在室内硬壳层软土地基模型试验中发现塑料排水板褶曲甚至折断,使其排水功能降低的现象相一致。

实例 1: K5+700 ~ K5+800 路段,土层自上而下为:① 3.5 m 粉质黏土层(硬壳层);② 11.0 m 淤泥层;③ 9.0 m 粉质黏土层④ 中风化灰岩。该路段路堤填筑至 6.5 m 时突然发生滑坡,见图 1。从滑坡前 1 天的现场数据上看,3 个点(1 个观测断面)的表面沉降速率均未超过 8 mm/d、水平位移速率最大值也在 5 mm/d 以内。在滑坡当天,路堤右幅靠近中心线处首先出现纵向裂缝而且发展很快,坡脚有明显隆起现象,表面沉降速率超过 20 mm/d、水平位移速率最大值超过 15 mm/d,随后路堤右幅整体向右滑塌,坡脚隆起约 1.0 m。从明显裂缝出现至剪切破坏,前后不足 3 h,从现象看,具有典型的整体剪切破坏特征^[16],即地基土剪切破坏区发展至地表硬壳层,塑性区连成一片具有延伸至地表硬壳层的连续滑动面,坡脚外明显隆起,路堤整体滑坡垮塌等。

实例 2: K4+800 ~ K4+900 路段,土层自上而下为:① 4.0 m 粉质黏土层(硬壳层);② 8.0 m 淤泥层;③ 12.0 m 粉质黏土层;④ 中风化灰岩。该路段路堤填筑至相同高度 6.5 m 时突然失稳破坏,见图 2。从破坏前 2 天的现场数据上看,6 个点(2 个观测断面)的表面沉降速率均未超过 5 mm/d,水平位移速率最大值在 4 mm/d 以内。在破坏当天:出现裂缝前只是表面沉降速率有所增加,但最

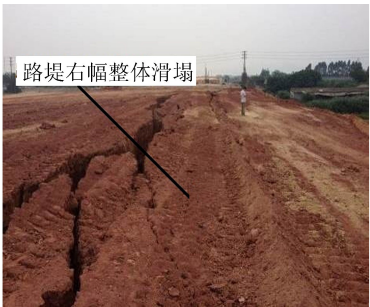


图1 K5+700 ~ K5+800 段右幅路堤滑坡现场

Fig.1 Slump site of the right embankment at K5+700 ~ K5+800

大值也在 8 mm/d 以内(靠近路中裂缝处剪切面),水平位移速率基本无增加,坡脚地表无隆起现象;随后路堤中心线处出现纵向裂缝且发展很快,同时路堤右幅整体下沉,中心线处明显错台(最大值达 1.5 m),但并无整体向右滑动现象,路堤表面依旧平整。坡脚地表硬壳层也平整无明显隆起现象,但坡脚外约 20 m 的地表下硬壳层缺失,该路段不连续处(鱼塘底)有明显隆起现象(见图 3)。从明显裂缝出现至剪切破坏,前后时间不足 2 h,从现象看,具有局部剪切破坏特征^[16],即剪切破坏区被限制在地基内部淤泥层局部范围内,未形成延伸至地表硬壳层的连续滑动面,坡脚外侧基本无隆起,路堤表现为局部的整体下沉。



图2 K4+800 ~ K4+900 段右幅路堤整体下沉,表面平整

Fig.2 Integral settlement of

the right embankment at K4+800 ~ K4+900



图3 K4+800 ~ K4+900 段地表无隆起,邻近鱼塘底部隆起

Fig.3 Uplift of the fishpond bottom at

K4+800 ~ K4+900

2 个剪切破坏路段前后相差不足 1 km,地质条件、处理方法、破坏前的填筑高度、现场观测数据等均相差不多,但破坏模式却相差很大:一段是整体剪切破坏,另一段是局部剪切破坏。2 个路段的不同点主要反映在以下几方面:(a)实例 1 硬壳层连续;实例 2 邻近鱼塘,鱼塘位于右幅坡脚外约 20 m,导致硬壳层不连续。(b)实例 1 剪切破坏后路堤整体向右滑动,坡脚地表明显隆起;实例 2 剪切破坏后路堤整体下沉,无向右滑动现象,路堤表面依旧平整,且坡脚地表硬壳层平整无明显隆起,只是坡脚外约 20 m 地表下的鱼塘底有明显隆起现象,见图 3。(c)实例 1 在整个路堤填筑期间未发现明显的横向裂缝;实例 2 在 K4+800 路段附近 2 种理方法交界处(预制管桩、塑料排水板)多次发现横向裂缝。(d)实例 1 每层填筑后水平位移最大值衰减很快;实例 2 淤泥层衰减很慢,收敛趋势不明显。

2 破坏模式分析

从 2 个工程破坏实例可知,在路堤荷载作用下,含硬壳层的软土地基,硬壳层连续与不连续对地基的剪切破坏模式有很大影响。目前在地基破坏模式的室内模型试验中,荷载的施加大多通过刚性板实现^[4,17],无法体现路堤荷载柔性的特点。离心机试验能较真实地反映柔性特点,但在离心机的高速旋转下无法控制硬壳层不连续处的边界条件,更无法模拟鱼塘的性状,且离心机试验耗资较高。为克服以上困难,借助 Plaxis 大型岩土工程有限元软件,针对实例中 2 种破坏现象的特点,对其破坏模式的机理进行数值模拟分析。

2.1 数值模型的建立

数值模拟以 K4+800 ~ K4+900 段为背景,即地质条件、填筑高度等按 K4+800 ~ K4+900 段实际情况处理,只是在硬壳层处理上分别考虑 3 种工况:无硬壳层、硬壳层连续、硬壳层不连续。

2.1.1 计算模型几何尺寸的确定

由于路堤长度远大于其高度和宽度,采用二维平面应变数值模型。路堤取发生剪切破坏的右幅,几何尺寸按设计施工图纸确定,即路堤最高填筑高度为 8.0 m、半幅路堤顶宽 17.0 m,坡比 1 : 1.5。为减小计算模型尺寸的影响,模型宽度取 100.0 m(12.5 倍填高),地基计算深度取 34.0 m(基岩再向下取 10.0 m)。各土层厚度按地质勘察报告确定,即自上而下为 4.0 m 粉质黏土层 1(硬壳层)、8.0 m 淤泥层、12.0 m 粉质黏土层 2、中风化灰岩。

2.1.2 计算参数的选择

土体采用莫尔-库伦模型;水位线取位于地表的最不利位置,计算中考虑渗流影响;土体计算参数取 K4+800 ~ K4+900段剪切破坏后现场 9 处钻孔的土工试验数据,各土层计算参数如表 1 所示。

表1 土层有限元计算参数
Table 1 FEM parameters of soil

土层	天然密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	变形模量 E/kPa	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	泊松比 μ	渗透系数 $k/(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$
粉质黏土 1	1 870	4 700	17.11	12.60	0.32	0.030 0
淤泥	1 580	2 030	7.76	4.89	0.35	0.004 3
粉质黏土 2	1 970	4 950	20.28	13.22	0.32	0.043 0
路堤填土	2 000	30 000	25.00	28.00	0.30	0.100 0

2.1.3 模型边界条件及网格划分

计算模型左、右边界水平方向位移为零,竖直方向允许发生变形,并阻止水的渗流;下边界水平方向、竖直方向位移均为零。

网格的基本单元类型取更为精确的 15 节点三角形单元,设定网格疏密度为中等水平,由程序本身完全自动生成有限元网格。

2.1.4 计算工况的模拟

路堤填筑按 16 层考虑(每层 0.5 m),为反映规范要求的分层填筑的实际施工状态,在每层填筑中分别模拟填筑期和固结期 2 个过程,其中填筑期 5 d 完成,固结期通过控制超静孔隙水压力的消散来实现(超静孔隙水压力消散至低于 1 kPa)。由于在施工阶段排水情况不好,故不考虑塑排板排水、加筋和插板施工扰动影响,则工况 1 无硬壳层;工况 2 硬壳层连续;工况 3 硬壳层不连续,坡脚外 20 m 存在一深度同硬壳层厚度的鱼塘,塘埂坡比与路堤相同,塘宽取半无限,鱼塘水压力按线性分布荷载施加于鱼塘边界土体上(计算结果表明这部分荷载影响很小)。

由上述 4 个方面的处理可得最终数值计算模型及其网格划分如图 4 所示(以工况 3 为例)。

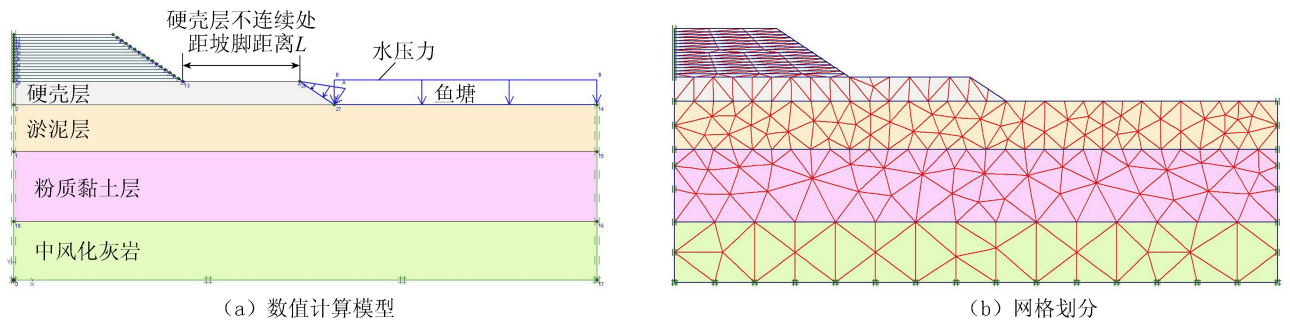


图4 工况3数值计算模型及网格划分示意图
Fig.4 Numerical model and meshing diagram of case 3

2.2 破坏模式分析

基于数值计算模型,对 3 种工况在各级路堤荷载作用下的塑性区、剪切破坏面以及路堤坡脚位移等变化情况进行计算,所得结果分析如下。

2.2.1 塑性区变化情况

工况 1:塑性区变化情况与工况 2 类似,当路堤填高为 4.0 m 时,淤泥层内的塑性区已蔓延至路堤坡脚外,并贯穿至地表。经理论计算该工况的极限填高为 4.3 m。由塑性区的变化情况看,工况 1 具有整体剪切破坏的特征。

工况 2:当路堤填高为 2.0 m 时,塑性点首先出现在路堤中央附近的淤泥层顶部;当路堤填高为 3.5 m 时塑性区仅在淤泥层内向下、向右开展,这与铁道部第四勘测设计院在广茂线大布工点测得的硬壳层厚度为 4.0 m 时软土层中应力大于硬壳层相一致^[18];当路堤填高为 4.0 m 时,淤泥层内的塑性区已蔓延至路堤坡脚处,路堤中央附近的硬壳层底部开始出现塑性区,并有逐渐向硬壳层顶部开展的趋势;当路堤填高为 5.0 m 时,硬壳层内的塑性区进一步扩展,在路堤中央附近已接近硬壳层顶部,横向仍在坡脚以内,淤泥层内的塑性区已蔓延至坡脚外约 12.0 m 处;当路堤填高为 6.5 m 时,坡脚内塑性区已从硬壳层底部开展至顶部,坡脚外塑性区已从淤泥层发展至硬壳层且贯穿至地表,但硬壳层中塑性区在坡脚内外并未贯通,地基进入破坏状态,如图 5 所示(红色为剪切破坏点(莫尔-库伦准则),黑色为拉应力区,下同)。经理论计算该工况的极限

填高为 6.4 m。从塑性区的变化情况看,工况 2 具有整体剪切破坏的特征,与工程实例 1 相符,也与梁永辉^[18]通过现场实测提出的地基在加载过程中具有以硬壳层刚度变化和应力集中程度为标志的弹性、弹塑性、极限状态 3 个承载阶段相符。

工况 3:当路堤填高为 2.0 m 时,塑性区首先出现在路堤中央附近的淤泥层顶部;当路堤填高为 3.0 m 时塑性区仅在淤泥层内向下、向右开展,但因硬壳层不连续导致扩散和封闭作用降低^[13],故相同路堤荷载下淤泥层应力较工况 2 大,塑性区也较大;当路堤填高为 3.5 m 时,路堤中央附近的硬壳层底部开始出现塑性区,并有逐渐向硬壳层顶部开展的趋势,同时鱼塘底部也出现少量塑性点;随着填土荷载的增加,由于鱼塘部分抗剪强度水平较低,塑性区蔓延至坡脚处后,并未在淤泥层内整体向右开展且发展至硬壳层,而是绕开硬壳层,沿着淤泥层中下部向鱼塘开展;当路堤填高为 5.0 m 时,淤泥层底部塑性区与鱼塘底部淤泥层内塑性区贯通,但淤泥层塑性区并未贯穿至地表,坡脚外地表硬壳层无剪切塑性区,地基进入破坏状态,如图 6 所示。经理论计算该工况的极限填高为 4.8 m。从塑性区的变化情况看,工况 3 具有局部剪切破坏的特征,与工程实例 2 相符。

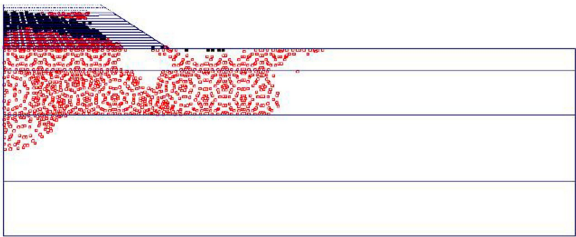


图 5 工况 2 路堤填高 6.5 m 时塑性区分布
Fig.5 Plastic zone of case 2 when the depth of backfill is 6.5 m

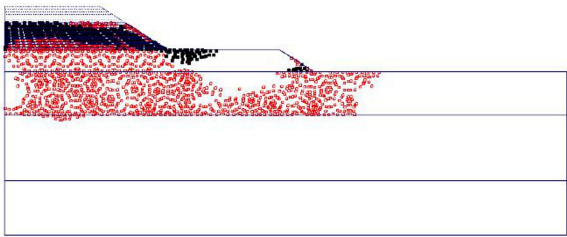
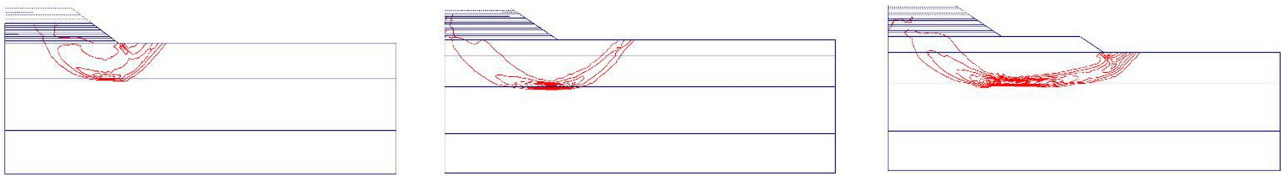


图 6 工况 3 路堤填高 5.0 m 时塑性区分布
Fig.6 Plastic zone of case 3 when the depth of backfill is 5.0 m

2.2.2 剪切面形状

工况 1 与工况 2 破坏模式相似,圆弧形的剪切破坏面均贯穿至坡脚外地表硬壳层,且工况 2 滑弧的曲率半径明显增大,工况 1 滑弧与地表最右侧交点的 X 坐标约为 41.2 m,工况 2 滑弧与地表最右侧交点的 X 坐标约为 48.5 m,说明硬壳层提高了地基承载能力。而工况 3 剪切破坏面并未贯穿至地表硬壳层,剪切破坏面被限制在地基内部淤泥层内,路堤中央附近的硬壳层剪切破坏面近似沿竖直方向,而淤泥层有明显的水平状剪切破坏面,即路堤中央附近的硬壳层沿竖直方向被剪断后,剪切破坏面并未按类似圆弧形发展至地表处,而是绕开硬壳层,在淤泥层内向右水平发展至鱼塘底部。图 7 为各工况破坏时剪切面(等效剪应变等值线)形状分布。



(a) 工况1 (b) 工况2 (c) 工况3 (鱼塘距坡脚20m)

图 7 各工况失稳破坏时剪切面形状分布

Fig.7 Shear plane shape distribution of various cases in case of instability

2.2.3 坡脚外地基位移

对比并分析工况 2 路堤填筑高度 6.0 m、工况 3 路堤填筑高度 4.5 m 时,即均在破坏前一级填土荷载下,路堤坡脚外地表的竖向位移和沿深度的水平位移。

2.2.3.1 竖向位移变化情况

坡脚外地表竖向位移变化情况如图 8 所示。工况 2:坡脚外地表竖向位移沿横轴呈抛物线状变化,即具有明显的隆起现象,与实例 1 现场相符,在坡脚外约 10 m 处达到隆起峰值 0.34 m,在坡脚外约 20 m 处降低到 0.08 m。工况 3:在坡脚外侧约 1 m 范围内表现为下沉,这与实例 2 路堤整体下沉现象相符,1 m 外至鱼塘边缘有较平均的整体向上位移,但位移量较小,最大值(0.09 m)仅为工况 2 的 26.5%,这与实例 2 坡脚外地表

硬壳层并无明显隆起的现象相符。

2.2.3.2 沿深度的水平位移变化情况

工况 2、3 坡脚外地基沿深度的水平位移变化情况如图 9 所示。从图 9 可知:距坡脚距离越远,同一深度水平位移均越小,但工况 3 衰减的幅度比工况 2 小,这与工程实例 2 中现场情况很吻合,即:实例 2 水平位移衰减很慢,收敛趋势不明显;与坡脚距离相同时,2 种工况硬壳层内的水平位移均明显小于淤泥层,但沿深度(纵轴)的变化却有显著区别:硬壳层内工况 2 水平位移大于工况 3,而淤泥层内工况 2 水平位移却远小于工况 3,这与工程实例 2 中现场情况很吻合,即局部剪切破坏时坡脚外地表硬壳层侧向位移很小,但淤泥层内位移很大,鱼塘底部明显隆起。具体数据如下:

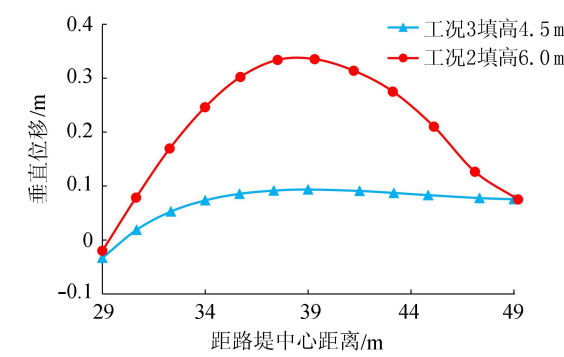


图 8 坡脚外地表竖向位移

Fig. 8 Vertical displacement of the surface outside embankment toe

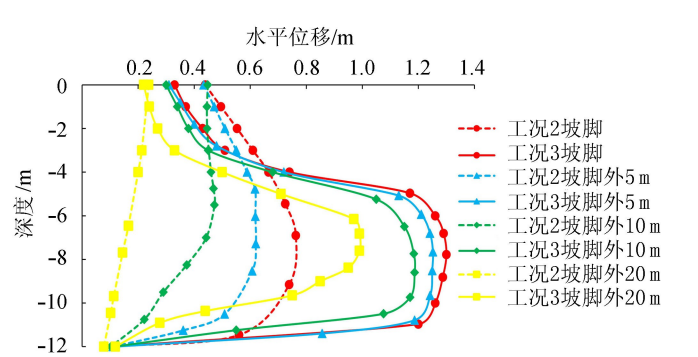


图 9 坡脚外地基深层水平位移

Fig. 9 Deep horizontal displacement outside the embankment toe

坡脚处,硬壳层中工况 3 最大水平位移为 0.51 m,小于工况 2 的 0.61 m;淤泥层中工况 3 最大水平位移为 1.30 m,明显大于工况 2 的 0.76 m。即工况 2 沿深度的水平位移曲线平滑,具有连续性;而工况 3 在硬壳层和淤泥层的分界面处有明显的突变。

距坡脚 20 m 处,2 种工况同一深度处水平位移量均较坡脚处减小。不同点在工况 3 沿纵轴的变化趋势仍与坡脚处类似,淤泥层位移量仍较大,最大值达到 0.99 m;而工况 2 淤泥层的水平位移已明显小于硬壳层,这是因为此处淤泥层与坡脚的距离已大于整体剪切破坏潜在滑弧与坡脚的距离,该处位于潜在滑弧之外导致的。

从工程实例破坏现象和数值计算结果看,导致 3 种工况在路堤荷载作用下,塑性区、剪切破坏面以及路堤坡脚外位移等有明显区别的原因主要是有无硬壳层存在和硬壳层是否连续,即含较厚硬壳层的水平层状软土路基在路堤荷载作用下的最终破坏模式,当硬壳层连续时为整体剪切破坏模式,当坡脚外硬壳层不连续时有可能发生局部剪切破坏。

3 破坏模式判定参数-临界距离 L_{cr}

对含硬壳层的水平层状软土地基,当其硬壳层不连续时,有可能发生局部剪切破坏。不少学者均指出不同条件下破坏模式大致分为整体和局部 2 种剪切破坏模式^[1-6],但 2 种破坏模式转变的条件目前尚无一致被认可的结论。本节针对硬壳层不连续的情况,探讨发生局部剪切破坏的条件。

考虑如下 3 种工况:工况 1、工况 2 不变,将工况 3 硬壳层不连续处与路堤坡脚的距离 L 在 5 ~ 50 m 之间变化,其余不变。将各工况破坏时的极限填土高度绘于图 10,图中 A、B 点分别为工况 3 与工况 1、2 极限填土高度曲线的交点。由图 10 可知:(a)地基土层连续时(工况 1 与工况 2)的极限填土高度为一定值(图 10 中的 2 条水平线),且硬壳层的存在增大了极限填高,如工况 2 比工况 1 增加了 2.08 m,说明硬壳层提高了地基承载

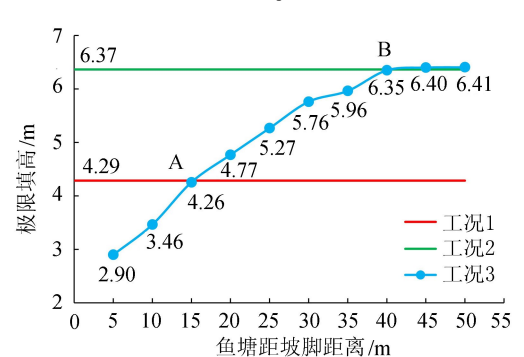


图 10 各工况极限填高

Fig. 10 Limit height of each case

能力,增加了路堤边坡的稳定性。(b)硬壳层不连续的软土地基(工况 3),当 $L < L_A$ (15.12 m) 时,极限填土高度甚至小于无硬壳层的情况(工况 1);当 $L_A < L < L_B$ 时,大致呈线性增长;当 $L > L_B$ (约 40.27 m) 时,极限填土高度达到硬壳层连续情况下(工况 2)的极限填土高度,并趋于稳定,可认为不再增加。可见,即使有硬壳层的存在,当硬壳层不连续时,地基承载能力(路堤边坡稳定性)可能出现比无硬壳层工况下还小的情况,其整体变化趋势为随不连续断面与坡脚距离 L 的增加而增加,当 L 增大到某一值时,硬壳层不连续对其的影响小到可以忽略,即最终趋于并稳定在硬壳层连续工况下的状态。

图 11 为工况 3 当 $L=5\text{ m}$ 、 $L=45\text{ m}$ 时破坏时的剪切面(等效剪应变等值线)形状分布图。可见当 $L=5\text{ m} < L_A$ 和 $L=45\text{ m} > L_B$ 时,均依然具有类似圆弧形的剪切面且均贯穿至地表,未限制在地基内部淤泥层内;滑弧与路堤底面、与坡脚外地表的交点均分别与工况 1、工况 2 相同(图 7(a)(b)),即滑弧曲率半径分别与工况 1、工况 2 相同;与 $L_A < L < L_B$ 时局部剪切破坏的剪切面(图 7(c))对比,可知此时为整体剪切破坏模式。则图 10 中的 A、B 点为破坏模式发生转变的临界点,当 $L < L_A$ 时为整体剪切破坏, $L_A < L < L_B$ 时为局部剪切破坏, $L > L_B$ 时为整体剪切破坏。

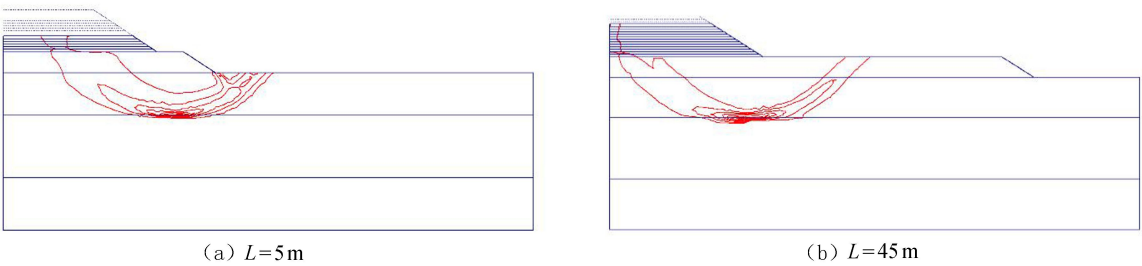


图 11 工况 3 失稳破坏时剪切面形状分布

Fig. 11 Shear plane of case 3

本文将图 10 中破坏模式发生变化的点称作临界点,临界点对应的硬壳层不连续断面与坡脚的距离称作临界距离 L_{cr} 。其中临界点又分为上限临界点和下限临界点,分别对应着上限临界距离和下限临界距离,记作 L_{crU} 、 L_{crD} ,上限临界距离对应着破坏模式由整体剪切破坏转变为局部剪切破坏,下限临界距离对应着破坏模式由局部剪切破坏转变为整体剪切破坏。

由以上分析可知,对含较厚不连续硬壳层的水平层状软土地基,在路堤荷载作用下,当填筑条件、边界条件、地层土质条件相同时,硬壳层不连续断面与坡脚的距离 L 不同,其极限填土高度、地基承载能力、路堤边坡稳定性等均不同,但其最终的破坏模式均分为 2 种,且破坏模式的转变条件如下:当 $L_{crU} < L \leq L_{crD}$ 时为局部剪切破坏,当 $L \leq L_{crU}$ 或 $L > L_{crD}$ 时为整体剪切破坏。

4 破坏模式影响因素及范围

含硬壳层的水平层状软土地基,硬壳层不连续处与路堤坡脚的相对位置(即临界距离 L_{cr})是判定其破坏模式的重要参数。本节将借助正交试验原理,针对不同的硬壳层和软土层厚度及物理力学性质参数,分析其对 L_{cr} 的影响,并给出其敏感性顺序;后利用逐步回归迭代的方法,分别给出 L_{crU} 、 L_{crD} 的数学表达式,并根据工程实例的验算论证其可靠性。

淤泥层的 φ 、 c 远小于硬壳层且淤泥本身的 φ 、 c 变化范围也较小,故不作为影响因素考虑。取硬壳层厚度 h 、软土层厚度 H 以及硬壳层的 φ 和 c 共 4 个因素进行分析,每个因素设定 4 个水平,见表 2。采用 $L_{16}(4^4)$ 正交表安排一个四因素四水平试验,用与第 4 节相同的方法分别计算出 16 组试验对应的 L_{crU} 、 L_{crD} ,以此研究各因素对 L_{cr} 的影响,计算结果见表 3。

由极差分析可知, h 、 H 均分别为主、次要影响因素;各因素敏感性顺序为:上限临界距离 L_{crU} : $h > H > \varphi > c$; 下限临界距离 L_{crD} : $h > H > c > \varphi$ 。

利用逐步回归迭代的方法,并借助 matlab 商业数学软

表 2 正交试验因素水平设置

Table 2 Factor level setting of the orthogonal experiment

水平	因素			
	h/m	H/m	$\varphi/(^{\circ})$	c/kPa
1	2	5	10	25
2	4	10	15	20
3	6	15	20	15
4	8	20	25	10

件,对表2、表3 中的数据进行逐步回归迭代,得到 L_{crU} 、 L_{crD} 的数学表达公式如下:

$$L_{crU} = 0.18h^2 + 0.33hH - 2.86h - 0.66H + 17.08$$

(1)

$$L_{crD} = 0.47h^2 - 0.26hH + 8.24h + 2.47H - 9.66$$

(2)

表3 正交试验方案及结果

Table 3 Scheme and result of the orthogonal experiment

试验 组号	各因素水平				L_{crU}/m	L_{crD}/m	试验 组号	各因素水平				L_{crU}/m	L_{crD}/m
	h	H	φ	c				h	H	φ	c		
1	1	1	1	1	12.61	14.86	9	3	1	3	4	9.57	69.33
2	1	2	2	2	12.48	28.56	10	3	2	4	3	16.42	73.54
3	1	3	3	3	12.29	40.11	11	3	3	1	2	32.31	63.43
4	1	4	4	4	11.09	50.47	12	3	4	2	1	33.95	70.54
5	2	1	2	3	10.82	36.90	13	4	1	4	2	15.75	84.44
6	2	2	1	4	16.61	46.30	14	4	2	3	1	30.08	81.50
7	2	3	4	1	19.12	50.93	15	4	3	2	4	31.98	102.50
8	2	4	3	2	19.16	58.28	16	4	4	1	3	43.20	96.81

将工程实例2 各参数和表1 中数据分别代入式(1)、式(2)可得 $L_{crU}=13.76\text{ m}$ 、 $L_{crD}=42.4\text{ m}$,实例2 中实际鱼塘位置约为20 m,大于 L_{crU} 且小于 L_{crD} ,则其破坏模式为局部剪切破坏,计算结果与现场情况一致。且 L_{crU} 计算值13.76 m、 L_{crD} 计算值42.4 m 与图10 中A、B 点实际值15.12 m、40.26 m 误差分别为8.99% 和5.05%,均偏于保守,说明式(1)、式(2)所得计算结果与实际较为相符,且误差偏于保守。值得说明的是,本文 L_{crU} 、 L_{crD} 的表达式为仅对上述4 个主要参数进行研究所得结果,距离推广应用尚有欠缺,但可供相关工程设计参考。

5 结 论

- a. 在路堤荷载作用下,含较厚连续硬壳层的水平层状软土地基破坏模式与水平层状软土地基破坏模式相同,两者均为整体剪切破坏,前者滑弧曲率半径、极限填土高度较后者大。
- b. 含较厚不连续硬壳层的水平层状软土地基,当填筑条件、边界条件、地层土质条件相同时,其极限填土高度随不连续断面与坡脚距离 L 的增加而大致呈线性增长,最终达到并稳定在硬壳层连续情况下的极限填土高度。
- c. 含较厚不连续硬壳层的水平层状软土地基,在路堤荷载作用下,当填筑条件、边界条件、地层土质条件等相同时,在达到极限填高的临界状态下,其最终的破坏模式有整体剪切破坏和局部剪切破坏2 种情况,且破坏模式的转变条件如下:当不连续断面与坡脚的距离小于上限临界距离 L_{crU} 或大于下限临界距离 L_{crD} 时软基为整体剪切破坏;当不连续断面与坡脚的距离大于 L_{crU} 且小于 L_{crD} 时软基为局部剪切破坏,表现为路堤中央附近硬壳层沿竖向被剪断,路堤失稳部分整体下沉,路堤表面较平整,坡脚外地表无明显隆起,硬壳层不连续处有明显隆起。
- d. 临界距离 L_{cr} 受硬壳层厚度 h 、软土层厚度 H 、硬壳层内摩擦角 φ 、硬壳层黏聚力 c 等因素影响,其中前两者分别为主、次要影响因素。上限临界距离 L_{crU} 的各因素敏感性顺序为: $h>H>\varphi>c$,下限临界距离 L_{crD} 的各因素敏感性顺序为: $h>H>c>\varphi$ 。工程上可用式(1)、式(2)分别计算 L_{crU} 和 L_{crD} ,然后根据结论c 可判定其破坏模式,误差较小且偏于保守。

参考文献:

[1] 问延煦. 双层地基承载与变形特性研究[D]. 上海:同济大学,2007.

[2] 蔚晓丹,郑甲佳,吴立坚. 软土硬壳层地基的破坏模式[J]. 公路交通科技,2012,29(8): 31-35, 43. (WEI Xiaodan, ZHENG Jiajia, WU Lijian. Failure mode of soft clay hard shell layer foundation[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29(8): 31-35, 43. (in Chinese))

[3] 王晓谋. 考虑硬壳层作用的软土地基临塑荷载计算[J]. 岩土工程学报,2002,24(6): 720-723. (WANG Xiaomou. Calculation of proportional limit load for soft clay foundation involving the effect of dry crust[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(6): 720-723. (in Chinese))

- [4] 刘青松,张春雷,汪顺才. 淤泥堆场人工硬壳层地基极限承载力室内模拟研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(增刊1): 671-674. (LIU Qingsong, ZHANG Chunlei, WANG Shunca. Laboratory simulation study of the ultimate bearing capacity of the man-made crust over dredged wastes dump sites[J]. Rock and Soil Mechanics 2008, 29(Sup1): 671-674. (in Chinese))
- [5] MEYERHOF G G. Ultimate bearing capacity of footings on sand layer overlying clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1974, 11(2): 223-229.
- [6] HANNA A M. Bearing capacity of foundations on a weak sand layer overlying a strong deposit[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1982, 19(19): 392-396.
- [7] 经绯,刘松玉,邵光辉. 软土地基上路堤沉降变形特征分析[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(6): 728-730. (JING Fei, LIU Songyu, SHAO Guanghui. The settlement of embankment on soft ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(6): 728-730. (in Chinese))
- [8] 冯兴,姚仰平,李春亮. UH模型在双层地基受力变形分析中的应用[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(5): 805-811. (FENG Xing, YAO Yangping, LI Chunliang. Application of UH model to analysis of deformation of double-layer subgrade[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(5): 805-811. (in Chinese))
- [9] 武崇福,曹海莹. 上覆硬壳层软土夹层路基稳定性控制与评判[J]. 应用基础与工程科学学报, 2014, 22(2): 305-313. (WU Chongfu, CAO Haiying. Control and judgment on the stability of subgrade with soft substratum covering dry crust[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2014, 22(2): 305-313. (in Chinese))
- [10] 王晓谋,尉学勇,魏进. 硬壳层软土地基竖向附加应力扩散的数值分析[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2007, 27(3): 37-41. (WANG Xiaomou, WEI Xueyong, WEI Jin. Numerical analysis of vertical additional stress spreading on soft clay foundation with dry crust[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition), 2007, 27(3): 37-41. (in Chinese))
- [11] 吴跃东,石晓燕,刘坚. 真空预压加固区硬壳层的水分运移解析解[J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊2): 110-114. (WU Yuedong, SHI Xiaoyan, LIU Jian. Analytical solution of moisture migration in crust layer of vacuum preloading zone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(Sup2): 110-114. (in Chinese))
- [12] 贺伟,王芳洪,付宏渊. 浸湿条件下湖区地表硬壳层黏土侧压力系数 K_0 变化规律的试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(1): 351-355. (HE Wei, WANG Fanghong, FU Hongyuan. Experimental study on behavior of coefficient K_0 of Dongting Lake clay in wetting process[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(1): 351-355. (in Chinese))
- [13] 王桦,卢正,姚海林. 交通荷载作用下低路堤软土地基硬壳层应力扩散作用研究[Z]. 重庆: 2015164-170, 177.
- [14] 俞建霖,张甲林,李坚卿. 地表硬壳层对柔性基础下复合地基受力特性的影响分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(4): 1504-1510. (YU Jianlin, ZHANG Jialin, LI Jianqing. Impacting analysis of dry crust on composite ground under flexible foundation[J]. Journal of Central South University (Science and Technology) 2015, 46(4): 1504-1510. (in Chinese))
- [15] 孙立强,闫澍旺,李伟. 超软土真空预压室内模型试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(4): 984-990. (SUN Liqiang, YAN Shuwang, LI Wei. Study of super-soft soil vacuum preloading model test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(4): 984-990. (in Chinese))
- [16] 卢廷浩. 土力学[M]. 北京:高等教育出版社, 2010.
- [17] 闫澍旺,郭炳川,孙立强. 硬壳层在吹填土真空预压中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(7): 1497-1503. (YAN Shuwang, GUO Bingchuan, SUN Liqiang. Application of crust layer to vacuum preloading dredge fill[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(7): 1497-1503. (in Chinese))
- [18] 梁永辉. 上覆硬壳层软土地基的工程特性试验研究及数值分析[D]. 上海:同济大学, 2007.

(收稿日期:2017-06-25 编辑:高建群)