

高速公路路堤稳定性与沉降变形规律研究*

刘涌江, 邓卫东, 杨 青, 严秋荣

(重庆交通科研设计院, 重庆市 400067)

摘 要: 以云南安楚高速公路第 9 合同段高填方路堤为依托工程, 根据高速公路路堤修筑过程中常见情况, 全面研究了高速公路路堤的稳定性与沉降变形规律, 为高填方路堤的建设提供了有效的技术支持。

关键词: 路堤; 稳定性; 沉降

文章编号: 1009-6477(2005)05-0016-05

中图分类号: U416.1+2

文献标识码: A

Study on Stability and Settlement Laws of Highway Embankment

LIU Yong-jiang; DENG Wei-dong; YANG Qing; YAN Qiu-rong

Abstract: Based on embankment construction of No 9 section of Anning - Chuxiong Expressway, Yunnan Province, this paper comprehensively studies the stability and settlement laws of highway embankment and provides efficient technological support for high embankment construction.

Key words: embankment; stability; settlement

在我国的高速公路建设中, 路堤工程在整个路线中占据极为重要的位置, 其中很大一部分为填高在 20 m 以上的高路堤。其稳定性及因沉降变形引起的路基病害问题一直是普遍和突出的问题。但是, 高速公路高填方路段因稳定性不足或沉降变形过大等病害时有发生, 从而严重影响了公路的正常使用及行车安全, 因此, 有必要对高路堤沉降变形规律及其长期稳定性等问题进行系统及全面的研究。

1 模型建立

本文以云南安楚高速公路第 9 合同段 K99+770 m 及 K99+790 m 为试验路段, 根据高速公路路堤修筑过程中的常见情况, 选择平坦地基路堤、斜坡地基路堤及折线型地基路堤 3 种典型路堤结构为原型(如图 1 所示), 并按照平面应变建立有限单元分析模型, 分别分析了不同地基条件下路堤的变形与破坏随填筑过程的发展规律。对平坦地基条件, 因其对称, 建立左半宽模型。

应用有限单元法计算边坡的稳定系数, 是基于强度折减法(Phi - C Reduce)来进行的。该方法在求解稳定系数时, 不需要假定滑动面的形状的位置, 也无需进行条分, 而是由程序自动求出滑动面, 滑动破坏“自然地”发生在岩土体抗剪强度不能承受其受到

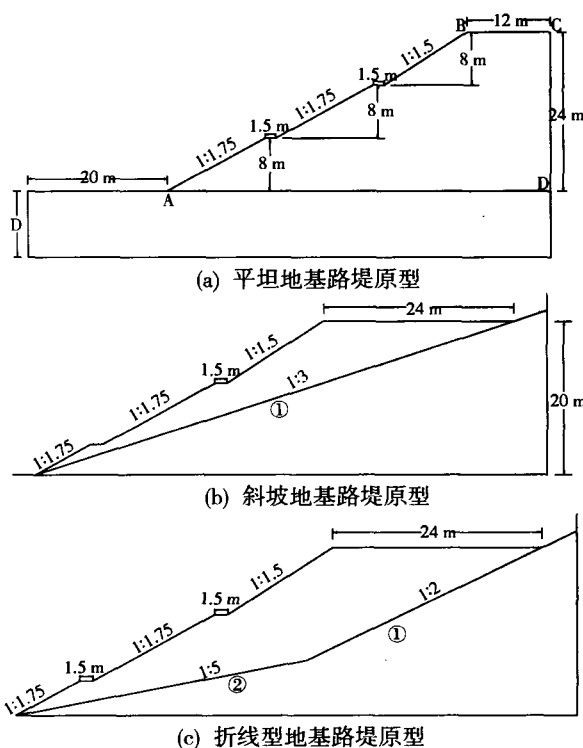


图 1 计算断面原型

的剪切应力的区域。所谓强度折减, 就是在弹塑性有限单元计算中将岩土体抗剪强度参数(C、Φ)逐渐折减降低, 直到使系统达到不稳定状态, 有限单元静

收稿日期: 2005-07-20

项目名称: 西部交通建设科技项目“高速公路路堤稳定性与沉降变形规律”(200231800049)

作者简介: 刘涌江(1972-), 男, 陕西省西安市人, 工学博士, 副研究员。

力计算将不收敛,即边坡发生破坏为止,并自动根据其弹塑性计算结果得到破坏滑动面,此时的折减系数就是边坡的稳定系数。

根据从云南安楚高速公路第 9 合同段路堤填筑现场取回的填料所进行的基本特性试验结果,参照工程实际,在建立数值分析模型时将填方路堤按压实度 90%、93% 分 2 层,计算参数取表 1 所示。

表 1 计算参数

参 数	γ (kN/m^3)	γ_{sat} (kN/m^3)	C (KPa)	Φ	渗透系数 k_p (m/d)	泊松比 μ
地 基	21.23	23.22	40	35	0.0001	0.2
90 填 区	19.11	21.90	31.5	31.9	0.02	0.3
93 料 区	19.74	22.29	34.8	32.7	0.015	0.3

2 高速公路路堤变形及破坏的发生发展规律

数值模拟结果显示(分析图略),路堤从填筑开始即发生变形。不同的地基情况,其位移场及塑性区的发生发展规律不尽相同。对于如图 1(a)所示的平坦地基,随着路堤填筑高度的增加,塑性区逐渐由坡面向坡内发展,塑性区的面积逐渐扩大,同时,塑性区在地基内逐渐向下扩展。平坦地基上路堤的塑性区发源于坡面和坡脚部位,虽然最终的塑性区分布面积较大,但相对较为稀疏;对斜坡地基路堤,塑性区发源于路堤与地基的交界部位,随路堤的填筑,逐渐向上扩展,且塑性区面积在上部也逐渐增大,而在下部则主要分布于路堤与地基的接触面处;对折线型地基上的路堤,塑性区同样发源于路堤与地基的交界部位,并逐渐向上扩展,当路堤填筑完成后,在地基的变角度点附近存在明显的塑性区,说明在该处存在一定的应力集中现象。

从位移场的发展情况来看,随着路堤填筑高度的增加,平坦地基、斜坡地基及折线型地基上路堤,其顶部的沉降值及差异沉降值均逐渐增大,但其沉降发展特征是不同的:平坦地基上的路堤,表现为最大沉降的位置随路堤的填筑由坡面向坡内移动,施工完成后,堤顶沉降呈现出中部大而边缘小的特征;而对于斜坡地基和折线型地基上的路堤,最大沉降部位始终发生在坡顶边缘附近。

3 不同地基上路堤稳定性与沉降变形规律

3.1 平坦地基上路堤稳定性与沉降变形规律

通过对平坦地基上路堤不同条件下路堤沉降及稳定性的数值分析,可以得出以下结论:

(1) 地基土层厚度对路堤的沉降及稳定性均有较大影响,随着地基土层厚度的增加,最大可能滑动面向下延伸,路堤的稳定性降低,沉降变形增大,路堤顶面的差异沉降也略有增大,但当地基土层厚度增加到一定厚度时,滑动面将不再向下延伸,稳定性系数降低的幅度也逐渐减小,最终趋于恒定。

(2) 在填筑加载期,坡脚处由于路堤填筑的加载作用不降反升,某级填筑完成后,该处即发生沉降,一旦重新填筑,该处又上升,但其上升幅度随填筑过程的进行而逐级减小,在最后一级填筑完成后,该处的沉降依然保持先快后慢的特点,最终趋于恒定;在坡顶,其沉降曲线表现为先陡后缓,并最终趋于稳定;在路堤底部中心处,每一级填筑即会引起该处产生较大的瞬时沉降变形,之后的固结沉降也表现为先快后慢,最终恒定。

(3) 路堤填筑完成后经过一定时间的密实固结,路堤边坡的最大可能滑动面会向上发生一定的转移,其稳定性大为增加,最大增幅接近 50% 左右,尤其在填筑完成后的开始密实阶段,其稳定性增加较快,之后,增加幅度变慢,并最终趋于恒定。由此说明工后密实时间对路堤的稳定性具有很大影响,因此建议在修筑公路时,在路堤填筑完成后应给予一定的时间让其固结稳定,之后再修筑路面,以增加路堤的稳定性,减少病害的发生。基于该研究成果,云南安楚高速公路指挥部及时将其应用于施工实际中,即路基施工完成一年后再铺设路面,从而在很大程度上杜绝或降低了路堤病害的发生。

(4) 对于沉降变形,随路堤边坡坡比的放缓,堤顶最大沉降值及差异沉降值均呈减小趋势,但差异沉降减小得更快。对同坡比路堤,厚土层地基上路堤和薄土层地基上路堤最大沉降值及差异沉降均较大。路堤边坡的比例构成对其稳定性也具有一定的影响,边坡越陡,其稳定性越差。因此,作为分析原型的第 9 标段的 K99+740 m ~ +850 m 段填方路堤,其边坡比例为 1:1.5 ~ 1:1.75 为宜。

3.2 斜坡地基上路堤稳定性与沉降变形规律

对斜坡地基上路堤,分岩质斜坡地基和土质斜坡地基及不设置台阶和设置不同宽度台阶等不同地基情况进行分析。分析结果表明,对岩质斜坡地基,无论设置台阶与否,其沉降值均较小,相比而言,设置台阶后其沉降略有增加,但其稳定性有较大增加,

如设置 3 m 台阶后,其稳定性系数增加 31.33%,说明设置台阶有利于边坡的稳定;对于土质斜坡地基,在斜坡地基上设置台阶,其堤顶最大沉降值及差异沉降值同样均略有增加,设置台阶会使路堤边坡的整体稳定性有所提高,但当台阶宽度过大时,其稳定性不再增加,反而可能略有降低,说明台阶宽度存在一个最优值,分析显示,当斜坡地基坡度为 1:3,路堤边坡坡比为 1:1.5 ~ 1:1.75 的红层软岩路堤,其最优台阶宽度值约为 2 m ~ 3 m 左右。

3.3 折线型地基上路堤稳定性与沉降变形规律

对折线型地基上路堤,同样分岩质地基和土质地基及设置台阶和不设置台阶等不同情况进行分析。分析结果显示,对于折线型岩质地基,设置台阶与否对路堤的沉降的影响较小,而设置台阶后其稳定性将有所增加。但无论设置台阶与否,折线型岩质地基上路堤的稳定性均小于岩质斜坡地基上的路堤,且其稳定性增加的幅度没有岩质斜坡地基上设置台阶时显著,这主要是由于分析模型中的折线型地基上部原始地基斜坡的坡度较缓,说明折线型岩质地基上部斜坡的坡度对其上路堤的稳定性影响较大。对折线型土质地基上路堤,设置台阶与否及台阶的宽度对路堤沉降的影响较小,但设置台阶后路堤边坡的稳定性有所增大,如设置 2 m 宽台阶时其稳定性增大 7.92%,设置 3 m 宽台阶时其稳定性增大 7.54%;同时其最大可能滑动面有外移的趋势,说明台阶设置对路堤边坡的稳定性有较大影响。

3.4 路堤沉降变形随时间的变化

路堤的沉降由 2 部分组成,即瞬时沉降与固结沉降。在实际施工中,路堤总是分层填筑完成的,各土层填筑完成后,除受到上面土层的荷重而产生变形外,下面土层随时间的变形也会引起该土层的沉降。所以,要弄清各填土层在路堤中实际发生的沉降量,就必须考虑填土层自身随时间的沉降变形问题,即土层的固结过程。

为了更好地分析路基的固结沉降,本文采用 Biot 固结理论,应用非线性有限单元法对路基的沉降进行数值模拟。由于 Biot 固结理论考虑了土体固结过程中孔隙水压力消散和土骨架变形之间的耦合作用,因而是较为合理、完整的固结理论,也是目前常用的固结理论。

本文以图 1(a)所示的原型设置边界条件,即路堤边坡坡面及顶面设置为自由排水界面,地基土层厚度设为 $D = 10$ m,以此为条件,对逐级填筑路堤不

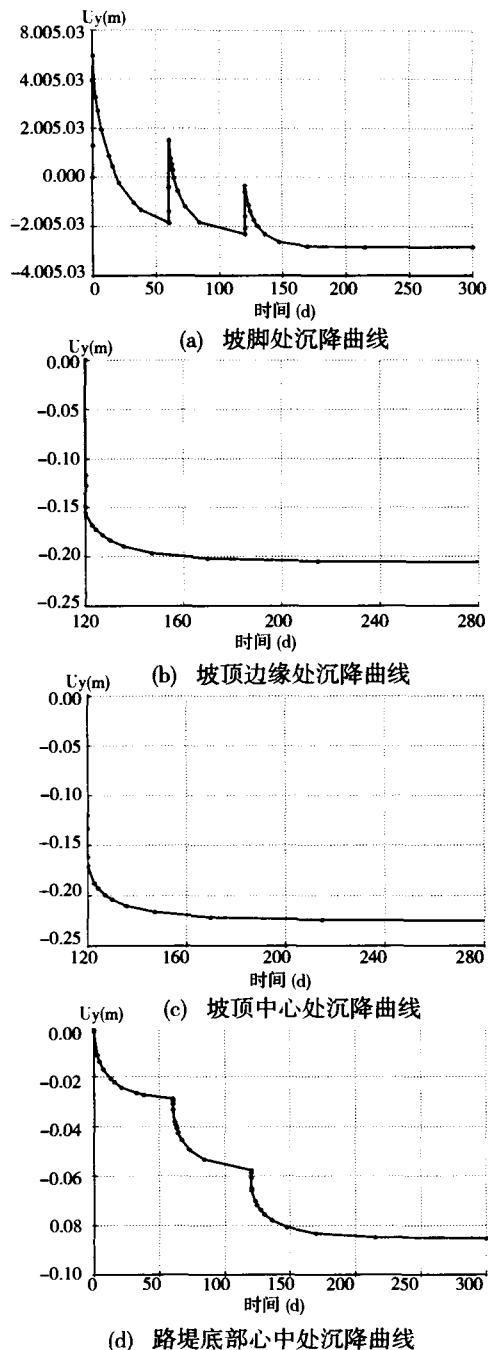


图 2 平坦地基路堤不同部位沉降历时曲线
同点位沉降随时间的变化情况进行数值模拟,分析结果如图 2 所示。

4 不同条件下路堤的侧向变形

路堤的沉降和稳定与其侧向变形密切相关。为了解其影响规律,本文分别建立路堤下地基有侧向变形和无侧向变形 2 种模型分析地基的侧向变形对路堤沉降的影响。

4.1 路堤侧向变形规律

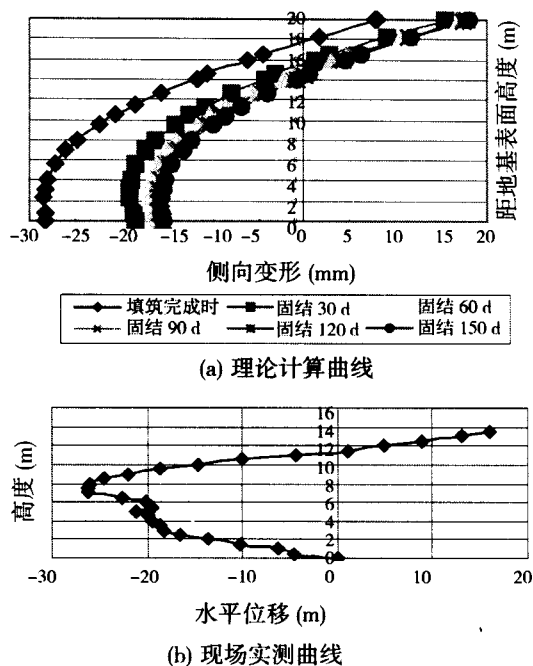


图 3 不同时期路堤内侧向变形规律

本文根据 Biot 固结理论建立有限单元模型,分析了平坦无侧限地基上填筑路堤时地基的侧向变形规律,同时,为验证理论分析的正确性,还在安楚公路第 9 标段埋设了用于监测路堤侧向变形的测斜管,并对其进行了长期跟踪观测,如图 3 所示。

对比此两图可知,理论分析与现场实测所得的路堤侧向变形规律基本一致,尤其在上部,但在下部有所不同。如图中(b),现场实测结果显示,最上部水平位移为正值,即方向朝向路堤内,随深度的增加,其水平位移逐渐变化负值,即方向朝向路堤外,并在中部深度处其水平位移绝对值达到最大值(负值,朝向路堤外),约为 -26.4 mm ,这一点与数值分析结果一致;但在此深度以下,其水平位移值迅速减小,与数值分析结果中减小缓慢的形态不同,这主要是由于在施工现场,因各种原因将路堤外的低洼处作为挖方地段的弃土场,从而使路堤低部的侧向变形受到一定限制,同时,由于该填土对路堤所产生附加压力的作用,使得原路堤底部向路堤外水平位移的倾向大为降低,甚至会使路堤低部的水平位移倾向路堤内,从而使现场监测的水平位移在路堤下部急剧减小。

根据分析结果发现,对于无侧限地基上路堤,随着路堤填筑的进行,地基的侧向变形逐渐增大,但在路堤填筑完成后的固结期,随着固结时间的增长,路堤内的最大水平位移逐渐减小。另外,地基中的最大

侧向位移点也在不断发生着变化,在填筑期,最大侧向位移点位于地基表面堤址内,在之后的固结期,最大侧向变形点开始向下转移,并最终趋于固定。同时还可看出,地基的侧向位移在路堤填筑(加载)过程中增长很迅速,其最大侧向位移在填筑完成时达到最大,在随后的固结过程中逐渐减小,即在填筑期及其之后的固结全过程中,地基土在水平方向具有“侧向膨胀→收缩”的变形特性。随固结过程的进行,其减小的速率越来越慢,并最终趋于恒定,达到恒定的时间因地基土物理力学性质及地下水条件而异。

路堤在填筑及其后的固结过程中,除地基发生侧向变形外,路堤本身也发生侧向变形,但其侧向变形规律不同于地基的侧向变形规律。主要表现为,路堤内存在一定区域,其无论在填筑期还是在固结期其侧向变形始终为正,即其在水平向一直为压缩变形,随固结时间的增长,其水平压缩变形速率逐渐趋缓并最终稳定,如路堤顶面以下一定深度范围内即是如此;而其余区域则在填筑期侧向膨胀,并在填筑完成时达到最大,在填筑完成后的固结期则收缩,即具有“侧向膨胀→收缩”的变形特性,随固结过程的进行,其减小的速率越来越慢,并最终趋于恒定。

4.2 侧向变形对路堤沉降的影响

当地基不发生侧向变形(侧限)时,由于路堤本身存在自由临空面,故在路堤内将发生侧向变形。由于地基的侧限,其上路堤在填筑完成时的最大侧向变形仅为无侧限地基上路堤最大侧向变形的 $1/4 \sim 1/3$,其对路堤沉降的影响也是明显的,在填筑完成时,侧限地基上路堤的最大沉降比无侧限地基上路堤的最大沉降小 40 mm 多,由此可见,在路堤填筑期,地基土层的侧向变形对路堤沉降的影响是显著的。通过前面的分析可知,在固结期,由于地基土层的侧向变形逐渐减小而呈收缩趋势,因此,随固结时间的延长,地基土层侧向变形对路堤沉降的影响逐渐减小,如算例中,在固结 120 d 之后,2 种地基上路堤的最大沉降之差由填筑完成时的 42.91 mm 减小为 18.66 mm 。

分析还表明,在填筑加载期,侧向变形对地基沉降的影响最大,即在加载过程中由于地基土体还来不及固结,地基沉降主要是由侧向变形引起。在固结过程中土体侧向变形逐渐减小,即土体在水平向发生收缩,使地基沉降量减小。在固结后期土体的侧向变形达到一稳定值,此后地基的侧向变形不再影响地基沉降。

为了验证上述理论分析的正确性,本文还根据安楚高速公路第9标段实际断面及理论分析模型进行了多个模型的离心模型试验,试验结果与前面的理论分析结果吻合很好,从而说明了理论分析结果是正确、可靠的。

5 小结

本文以云南安楚高速公路为依托工程,分析了不同地基条件下红层软岩公路路堤的稳定与沉降变形规律,并通过离心模型试验对数值分析结果进行了试验验证,结果与数值分析结果吻合很好。通过

以上分析,理清了高速公路不同地基条件下路堤的稳定性与沉降变形规律,从而为路堤病害的防治提供了有效的技术支撑。

参 考 文 献

- [1] 邓卫东.山区高路堤的破坏与变形形态[A].全国山区地基基础学术会议论文集[C].重庆:重庆大学出版社,1997.
- [2] 罗嘉运.岩土工程及路基[M].北京:中国铁道出版社,1997.
- [3] 严宗雪.软土地基固结沉降特性研究[D].长安大学硕士学位论文,2003.

(上接第15页)

表3 减少高路堤工后沉降的措施对比

处 治 措 施	减少工后 沉降效果	实 施 难 度	综 合 评 比
执行新压实标准	* *	不 大	推荐,但应结合其它措施
提高压实度至95%以上	* * *	大,施工成本上升,工期延长	不推荐
选择合适填料	* * * *	不大,但一些情况下选择填料较困难	推荐
延长预压期	* * * * *	较大,特别是对部分工期要求严格的项目有难度	推荐
改变压实方式	* * *	较大,受场地和机具限制	在一定情况下推荐
严格控制施工质量	* * * *	较大,需建立良好的质量控制措施	推荐

注:*表示效果,*越多,效果越好。

但是,从试验发现,冲击压实技术也有其不足的地方,冲击压实需要压实机具保持足够的速度(一般10 km/h以上),公路是带状结构物,没有足够的长度和宽度,无法保证碾压效果,这样,限制了冲击压实技术在结构物附近、长度不够的填方段落的使用,在压路机转弯部位也容易形成漏压。在路基施工前期,由于无法形成足够的工作面,冲击压实也无法正常开展。由于以上原因,造成冲击压实公路上的主要应用场合是在路基基本形成以后。同时由于冲击压实影响深度有限,其处治工后沉降的效果有待进一步检验。

4.3 高填方路堤的压实要求

课题研究表明,按93标准进行压实的高填方路堤,在路堤较高的情况下,填料自身压缩量仍然较大。课题对减少高填方路堤沉降变形的措施进行了研究,提出处治措施如表3所示。

5 主要成果和创新点

课题较系统地对山区高填方路堤沉降变形规律及压实技术进行了研究,取得了以下主要成果:

(1) 项目对路堤的沉降变形规律及压实技术进行了系统深入研究,取得了不同工况条件下填料沉降变形规律、路堤沉降变形与差异沉降基本规律、西部地区高速公路高填方路堤沉降病害的发生原因与工后沉降发展特点、减少工后沉降与差异沉降的综合技术措施以及高填方路堤的压实分区与综合质量控制措施等多项研究成果。

(2) 创新性研究成果如下:

① 提出了实用的路堤自身压缩沉降计算方法——改进的分层总和法;

② 提出了改进的S曲线预测沉降模型;

③ 提出了西部地区高路堤工后沉降控制标准建议值,可为今后相关规范的修订提供依据。