

文章编号: 1002-0268 (2004) 05-0043-04

# 填石路基稳定性设计方法研究

曾 革<sup>1,2</sup>, 郑俊杰<sup>2</sup>

(1. 湖南城市学院, 湖南 益阳 413000; 2. 华中科技大学道路与桥梁工程系, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 填石路基是山区高等级公路常见的路基形式, 其稳定性是一个值得重视的问题。本文在分析填石路基现行设计方法的基础上, 从填石路基边坡码砌层和内部填石的力学作用与力学特性出发, 导出了填石路基稳定性计算公式, 给出了计算参数的选取方法, 分析了码砌厚度、内部填石压实质量、地基承载力等因素对填石路基稳定性的影响, 从而建立了该类路基的稳定性设计方法。通过计算示例和工程实践分析, 阐明了本文方法的理论与实用价值, 可供山区填石路基稳定性设计参考。

**关键词:** 填石路基; 稳定性设计; 码砌厚度; 压实标准; 地基承载力

**中图分类号:** U416.1

**文献标识码:** A

## Study on Design Method of Stone-filled Subgrade Stability

ZENG Ge<sup>1,2</sup>, ZHENG Jun-jie<sup>2</sup>

(1. Hunan City University, Hunan Yiyang 413000, China;

2. Huazhong University of Science and Technology, Hubei Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The stone-filled subgrade is common in high grade highway in mountain areas, and its stability is very important. Based on the analysis of the current design method of the stone-filled subgrade, the calculation formula of the stability of stone-filled subgrade is presented according to the mechanical mechanism and characteristic of stone-built slope and internal stone filling. At the same time, the method of choosing calculation parameter is given. Considering the thickness of stone-built slope, the compaction quality of internal stone filling and the ground bearing capacity, the stability design method of such subgrade is put forward in this paper. With the analysis of typical examples and engineering practice, the theoretic and practical significance of this method is expounded, which can provide reference for the stability design of the stone-filled subgrade in mountain areas.

**Key words:** Stone-filled subgrade; Stability design; Thickness of stone slope of manual build; Compaction criterion; Ground bearing capacity

## 0 概述

随着我国西部大开发建设的深入和公路建设的发展, 填石路基已经成为西部高等级公路常见的路基形式。尽管我国很早就出现了采用石料修筑的公路, 但是总的来说, 采用石料修筑高等级公路建设的时间不长, 对填石路基设计的诸多问题认识不充分。相关规范不够完善: (1) 现行《公路路基设计规范》(JTJ013-95) 要求填石路基高度不宜超过 20m, 边坡坡面应选用大于 25cm 的石块进行码砌, 码砌厚度为 1~2m, 边坡

大小及断面形式采用典型标准断面进行设计, 未要求进行稳定性分析, 显然, 对于不同高度和不同填料的 路基均采用同一边坡大小和形式进行设计有失设计的科学性; (2) 未从力学角度将边坡码砌层作为填石路基的结构看待, 仅停留在边坡码砌的作用是保护填石路基边坡表面不被外界环境侵蚀的认识上; (3) 对不同高度填石路基码砌厚度的设计, 没有相应的设计方法<sup>[1-2]</sup>; (4) 对地基只有压实度要求, 没有承载力要求。近几年来, 不少采用填石路基的高等级公路在竣工后, 甚至在施工过程中就发生诸如沉陷、路面层次

裂缝、边坡鼓胀、坍塌,甚至路堤整体沿地表滑移或失稳等破坏现象,造成工期的延误和较大的经济损失。因此,深入认识填石路基的工程特性,完善填石路基的设计方法,提高填石路基的稳定性,已成为修筑山区高等级公路的迫切问题。

## 1 填石路基填料工程与力学特点

《公路路基设计规范》(JTJ013-95)将填石路基定义为“用不易风化的开山石料填筑的路堤”<sup>[1]</sup>。澳大利亚道路研究局(ARRB)道路技术委员会把填石材料分为块石填方和不规则填方,其定义如下:(1)块石最大尺寸达到 1m,通过 0.075mm 筛的材料含量少于 10%的为块石填方;(2)粒料最大尺寸为 0.5m,通过 0.075mm 筛的材料含量在 10%~20%之间的为不规则填方<sup>[3]</sup>。填石路基对于填料选择的标准是比较低的,工程中一般不对填石材料的级配范围、岩块强度进行限制,其适用填筑材料的级配范围是很广的。填石路基主要填筑材料为开山石料,来源于公路路堑切方开挖、爆破出的石料,其级配、强度变化很大。另一方面填石路基填料来源广泛,经济运距内的挖方均可填筑在路堤段内。因此,用于路堤填方的填料工程力学性质变化很大,不但同一路段内填料变化大,即便在同一层次内,亦不能保证填料质地均匀、来源单一。

压实后的填石料的工程特性是工程技术人员最为关心的问题。填石材料是由各种不同粒径无粘性颗粒组成的半刚性体,压实后的填石层的力学强度来源于颗粒间的挤压、摩擦和嵌锁作用。工程中一般采用抗剪强度表征粒料的力学性能。填石料的抗剪强度受以下几个方面的影响:(1)填石料的级配越好,抗剪强度越大,级配越不均匀,抗剪强度越小;(2)压实越充分,抗剪强度越大。有资料表明,质地、级配良好的岩石内摩擦角可达到 50°以上;而页岩及软弱砂岩的填石料内摩擦角则会低于 30°。另有研究表明,压实后的填石层即便在上部 25m 填石的自重荷载作用下的压缩沉降量依然很小<sup>[4,5]</sup>。大坝方面的资料显示,碾压堆石坝坝顶的工后沉降量仅为坝高的 0.1%~0.2%,而普通填土路堤的工后沉降量达到 1%~5%<sup>[6]</sup>。在某高速公路上,对一段坐落在不可压缩的基岩上的 20m 高填石路基顶面进行的为期近 1 年的沉降观测,结果表明,填石路基本身沉降量很小( $\leq 1\text{cm}$ )。这说明,压实后的填石体有着很好的工程性能,可以认为是半刚性体。但是,仍有不少填石路基在工后和施工过程中发生诸如沉陷、路面层次裂缝、

边坡鼓胀、坍塌,甚至整体失稳等破坏现象。这与相关规范对工程实践的指导作用不强、设计人员对填石路基认识不足导致设计粗糙不无关系,工程技术人员必须对填石路基的稳定性问题进行重新认识和研究。

## 2 填石路基稳定性设计

填石路基稳定性设计的目的,是确定经济合理的边坡坡度与码砌厚度或分析已有边坡的稳定程度,并为拟定边坡加固措施提供依据。因此,对填石路基的稳定性设计必须研究填石路基稳定性的计算方法和提高稳定性的措施两个方面。

### 2.1 稳定性计算

#### 2.1.1 计算公式推导

现行《公路设计手册——路基》指出“填石边坡的外层,一般应选用坚硬而未风化的石料填筑,必要时应进行码砌”<sup>[2]</sup>。可见在现行路基设计理念中,边坡码砌的作用倾向于保护填石路基边坡表面不被外界环境侵蚀的作用上,并未认真从力学角度将边坡码砌层作为填石路基的结构看待。如前文所述,压实后的填石材料内摩擦角在 30°~50°之间,如果压实后填石的内摩擦角为 35°,当设计边坡坡度为 1:1.25 时(坡角 38.7°),坡角大于填石的自然安息角,路基边坡则是不稳定的。但可通过人工码砌层护住边坡,使之不至于垮塌,因此增加码砌对路基边坡的稳定性是有利的。但现行《公路路基设计规范》中,却没有提供对边坡码砌层进行稳定性分析的方法。如图 1 所示,增加码砌后的填石体,边坡破坏滑动面的斜倾角为  $\alpha$ ,因为码砌层选用的是形状较为方正的块石,在码砌层内滑动面为水平的  $AB$  方向。因此路基边坡滑动面为  $ABC$ ,三角形体  $ABF$  沿码砌层水平推动,而  $BDEF$  沿边坡  $BD$  下滑,  $BF$  出现贯通裂缝。

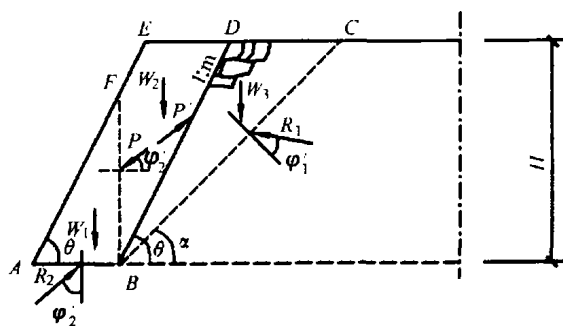


图 1 码砌边坡稳定性计算图式

设填料与码砌层的实际内摩擦角分别为  $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$ ,路基要求的稳定系数为  $k$ 。令填料与码砌层的计算内摩擦角分别为  $\varphi_1'$  和  $\varphi_2'$ ,有

$$\tan \varphi_1' = \tan \varphi_1 / k \quad (1)$$

$$\tan \varphi_2' = \tan \varphi_2 / k \quad (2)$$

假定一个破坏面倾角  $\alpha$  ( $\alpha < \theta$ ), 计算出  $BCEF$  对  $ABF$  的作用力  $P$  ( $P$  与  $BF$  面法线的夹角为  $\varphi_2'$ ),  $ABF$  对  $BCEF$  的作用力  $P'$ , 在图 1 中,  $BCEF$  受到重力  $W = W_2 + W_3$ 、 $R_1$ 、 $P'$  三个力的作用, 此三个力为平面力系, 当  $BCEF$  处于稳定系数为  $k$  的平衡状态时,  $W$ 、 $R_1$ 、 $P'$  组成封闭三角形, 如图 2 所示。则

$$\frac{P'}{\sin(\alpha - \varphi_1')} = \frac{W_2 + W_3}{\sin(90^\circ - \alpha + \varphi_1' + \varphi_2')} \quad (3)$$

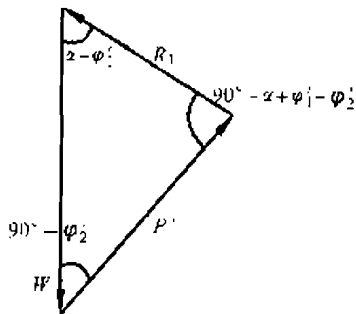


图 2  $BCEF$  受力多边形

那么

$$P' = \frac{(W_2 + W_3) \sin(\alpha - \varphi_1')}{\cos(\varphi_1' + \varphi_2' - \alpha)} \quad (4)$$

$ABF$  受重力  $W_1$ 、 $R_2$ 、 $P$  三个力作用, 当处于稳定系数为  $k$  平衡状态时,  $W_1$ 、 $R_2$ 、 $P$  也必组成封闭三角形, 如图 3。同理有

$$\frac{P}{\sin \varphi_2'} = \frac{W_1}{\sin(90^\circ - 2\varphi_2')} = \frac{W_1}{\cos(2\varphi_2')}$$

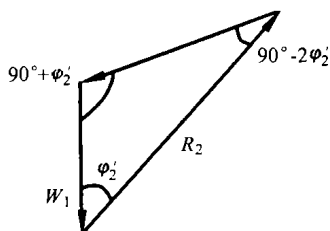


图 3  $ABF$  受力多边形

那么

$$P = \frac{W_1 \sin \varphi_2'}{\cos(2\varphi_2')} \quad (6)$$

式 (6) 表明,  $ABF$  要维持稳定系数不小于  $k$  的平衡状态时, 其承受  $BCEF$  作用力  $P$  的最大值为  $W_1 \sin \varphi_2' / \cos(2\varphi_2')$ ,  $P'$  和  $P$  是作用力与反作用力,  $P' = P$ 。显然, 当路基要维持稳定系数不小于  $k$  的平衡状态时, 有  $P = P' \leq \frac{W_1 \sin \varphi_2'}{\cos(2\varphi_2')}$ , 即

$$\frac{(W_2 + W_3) \sin(\alpha - \varphi_1')}{\cos(\varphi_1' + \varphi_2' - \alpha)} \leq \frac{W_1 \sin \varphi_2'}{\cos(2\varphi_2')} \quad (7)$$

讨论:

(1) 当  $\alpha < \varphi_1'$  时, 由式 (4) 可知  $P' < 0$ , 表明  $BCEF$  维持稳定系数为  $k$  的平衡状态还可受  $ABF$  的拉力作用, 但实际上  $ABF$  不可能对  $BCEF$  有拉力作用。这说明  $\alpha < \varphi_1'$  时, 假想破坏面上的稳定系数均大于  $k$ , 满足稳定性要求。

(2) 当  $\theta \geq \alpha \geq \varphi_1'$  时, 若式 (7) 恒成立, 则路基稳定系数不小于  $k$ , 路基满足稳定性要求; 若式 (7) 不成立, 则路基稳定系数小于  $k$ , 路基不满足稳定性要求。

### 2.1.2 计算参数的选取

对于路基稳定系数  $k$  的取值, 应按结构物的重要性 (破坏带来的危害程度)、荷载作用的经常性 (对各种荷载的考虑程度)、分析方法的近似性 (对实际情况的把握程度)、强度指标的可靠性 (对有关资料的了解程度) 以及工程经济的合理性来确定。根据实践经验, 路基稳定系数  $k$  值一般在 1.00 ~ 1.50 范围内变动。荷载情况为主要组合时,  $k$  取 1.25; 荷载情况为附加组合时,  $k$  取 1.15; 地震组合时,  $k$  取 1.10 (但路基边坡高度大于 20m 时,  $k$  需取 1.15; 而 3、4 级公路,  $k$  均取 1.05)。

内部填石与码砌层的重度和抗剪强度指标  $\varphi$  的取值对计算结果均有影响。测定码砌层与内部填石的物理力学性质指标时, 试验条件和方法应尽可能同路基的实际工作情况一致, 要按规定的砌筑与压实要求制备试样测试。内部填石和码砌层重度可通过试验或根据经验确定, 其值变化范围较小, 即使有所出入对稳定性设计计算结果影响也不大, 但抗剪强度指标的离散性较大时, 不同试验方法测得结果差别也较大, 而选取不适当所引起的误差也较大。因此, 抗剪强度指标值, 应根据试验、经验数据及已有稳定填石路基反算结果, 考虑实际可能发生的最不利情况, 进行综合分析确定。

### 2.1.3 计算实例

某高速公路路基设计宽度 28m, 某段采用填石路基, 最大填筑高度为 12.0m, 填料重度  $22 \text{ kN/m}^3$ , 内摩擦角  $\varphi = 42^\circ$ , 试设计边坡并进行稳定性分析。

如图 4, 取边坡坡度为 1:1.3, 码砌层厚度  $d$  为 2.0m, 填料与码砌层的实际内摩擦角分别  $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$ ,  $\varphi_1 = \varphi_2 = 42^\circ$ , 假定破坏面倾角为  $\alpha$ , 取设计稳定系数  $k = 1.25$ 。由  $\tan \varphi_1' = \tan \varphi_1 / k$ ,  $\tan \varphi_2' = \tan \varphi_2 / k$  得填料与码砌层的计算内摩擦角

$$\varphi_1' = \varphi_2' = 35.76^\circ$$

$$\theta = \arctan \frac{1}{1.3} = 37.57^\circ$$

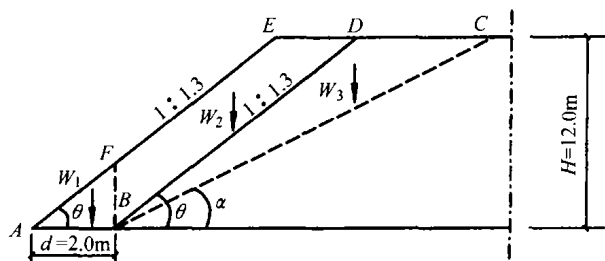


图 4 填石路基示意图

$$W_3 = \frac{1}{2} \times \overline{DB} \times \overline{BC} \times \sin(\theta - \alpha) \times \gamma =$$

$$\frac{1}{2} \sqrt{H^2 + (1.3H)^2} \times \frac{H}{\sin \alpha} \times \sin(37.5^\circ - \alpha) \times \gamma =$$

$$\frac{2597.95 \sin(37.5^\circ - \alpha)}{\sin \alpha}$$

$$W_2 = \frac{(\overline{FE} + \overline{BD}) \times d \times \gamma}{2 \sin \theta} =$$

$$\frac{(2\sqrt{H^2 + (1.3H)^2} - \sqrt{d^2 + (1.3d)^2}) \times d \times \gamma}{2 \sin \theta} =$$

$$\frac{(3.28H - 1.64d) \times d \times \gamma}{2 \times 0.610} =$$

$$\frac{(3.28 \times 12 - 1.64 \times 2) \times 2 \times 22}{2 \times 0.610} = 1301.25$$

$$W_1 = \frac{1}{2} \overline{AB} \times \overline{BF} \times \gamma = \frac{1}{2} \times 2 \times \frac{2}{1.3} \times 22 = 33.85$$

代入式(7)得

$$\left[ 1301.25 + \frac{2597.95 \sin(37.5^\circ - \alpha)}{\sin \alpha} \right] \frac{\sin(\alpha - 35.76)}{\cos(71.53 - \alpha)} \leq$$

62.44

$\alpha$  在其取值范围内 ( $\alpha \leq 37.5^\circ$ ), 以上不等式恒成立。当  $\alpha = 37.5^\circ$  时, 左边取得最大值 49.55。这表明所设计路基的稳定性  $k > 1.25$ , 满足稳定性要求。

## 2.2 提高稳定性的措施

### 2.2.1 提高码砌厚度与码砌质量

鼓胀是码砌常见的病害之一, 一般发生在路堤中上部, 其发生的原因一般是由于内部填石不稳定、码砌厚度不够或砌体本身稳定性不够造成的。应用上述方法, 可以对码砌较薄的上部路堤进行稳定性分析。例如, 对某段填石路堤取设计边坡  $1:m = 1:1.25$  的直线边坡, 进行上部边坡稳定性分析。填料内摩擦角为  $\varphi_1$ , 码砌层内摩擦角为  $\varphi_2$ , 码砌层厚度为  $d$ , 路堤计算高度  $h$ , 根据  $h$  的值计算其稳定系数如表 1 所示。从计算结果可知: (1) 当边坡坡度大于填料内摩擦角时, 没有设计码砌层的边坡是不稳定的, 增加 0.64m 厚的码砌层后, 边坡就可达到极限平衡, 此时  $k_{\min} = 1.000$ 。这说明较薄的码砌层也能对路堤边坡的稳定起到较大的作用 (即使码砌层的内摩擦角与内部

填料的内摩擦角大小相同), 这是因为增加码砌层后, 边坡滑动破坏面在码砌层中成为了水平状, 变成了形如  $ABC$  的折线形,  $ABF$  块对边坡的稳定起了很大作用。因此, 在施工中对于码砌的石料不但要求粒径大, 强度高、不易风化, 还应该对形状有所要求, 用于码砌的石料要求形状方正, 至少有两个面较为平行, 保证块石安放稳定, 滑动面  $AB$  段的走向水平。(2) 如果采用了质量较差的材料填筑路堤或码砌边坡, 数据 3 与 4 的对比表明: 增加码砌厚度可以提高边坡的稳定性, 因此在高填石路基填料来源复杂的情况下可以考虑适当增加边坡码砌的厚度, 以保证其稳定性。

边坡稳定系数计算结果

表 1

编号	填料内摩擦角 $\varphi_1$ ( $^\circ$ )	码砌层内摩擦角 $\varphi_2$ ( $^\circ$ )	码砌层厚度 $d$ (m)	计算高度 $h$ (m)	稳定系数 $k$
1	35	/	0	6.0	0.875
2	35	35	0.64	6.0	1.000
3	30	30	1.0	6.0	0.870
4	30	30	2.0	6.0	1.00
5	30	35	1.0	6.0	0.947

### 2.2.2 科学控制内部填石压实质量

填石路基的内部填石压实越充分, 填石体内摩擦角与抗剪强度就越大, 路基相应的稳定性就越高。内部填石的压实质量主要由施工工序配合质量检测进行控制。在施工工序中, 特别是对填料强度、级配、最大粒径、压实厚度、压实遍数、压实功能、压实沉降差等都应科学控制, 以提高内部填石的内部摩擦角。我国现行《公路路基施工技术规范》7.1.4 条规定: 填石路基的压实质量, 以通过 12t 以上振动压路机进行压实试验, 当压实层顶面稳定, 无明显轮迹, 可判为密实状态。这种轮迹检查法受主观因素影响太大, 不能通过数据说明填石体压实质量, 可操作性不强, 应采用力学或变形指标对填石体的压实质量进行控制。在施工实践中可采用钢球法测定填石路基的压实质量, 具体作法如下: (1) 每 20~40m 选择一个断面, 每个断面设 6 个点; (2) 平地机粗平后, 在选中的 6 个点上布置钢球, 钢球露出松铺面 2~3cm; (3) 压实机每压一次后测出钢球的沉降值, 当钢球的沉降值不大于 2mm 时, 可认为路基已被压实。此方法中钢球的刚度足够大, 压路机的碾轮与钢球始终保持是点接触, 钢球的变形量可忽略不计, 因此钢球的沉降值较为真实的反映了路基的沉降值, 可以作为填石路基判定压实质量的依据。

### 2.2.3 严格控制地基沉降及不均匀沉降

填石材料的工程性能与土质填料 (下转第 52 页)

位用素水泥注浆,在沥青路面部位用 SP 弹性密封膏先行灌缝处理,然后再进行罩面。当挖开面层发现裂缝较大时,由于 SP 弹性密封膏灌注后会自动流沉,难以封死裂缝,可先用 70 # 沥青灌注,然后再用 SP 弹性密封膏封口效果较好。

挖补罩面工程上面层选用 4cm 中粒式密级配 SBS 改性沥青混凝土 (AC-16 I);中面层选用 5cm 中粒式 SBS 改性沥青混凝土 (AC-20 I);下面层选用 6cm 粗粒式 70 # 重交通道路石油沥青混凝土 (AC-25 I)。上面两层面料选用改性沥青,沥青改性后其针入度、延度、软化点的技术指标,有很大的改善,可以减少车辙,防止拉裂克服路面网裂等病害。

### 2.3 路基补强

对于高含水的 3~6m 软弱土层地段,路基沉降比较严重,路面发生错台、车辙网裂、翻浆。在治理中必须进行路基补强处理。这些路段行车很不安全,严重处有如水上行舟,左右晃动,应立即进行路基补强。具体办法为:将 15cm 沥青面层,18cm 水泥碎石层,18cm 二灰碎石层,20cm 灰土共计 71cm 全部挖除。然后在

槽底铺一层防水土工布,基层铺筑 48cm 水泥稳定碎石。为抵抗路基的变形,铺筑 8cm 灌入式沥青碎石,然后铺一层 6cm 重交通道路石油沥青混合料;4、5 两层 9cm SBS 改性沥青面层。为加强内部排水,在路肩每隔 50m 设置排水盲沟,将水排出路基边坡。

灌入式沥青碎石对这一严重纵缝损坏路段,是至关重要的一个结构层,一旦路基还有不均匀下沉,由路基传上的纵向裂缝,在这一层内即可分解消散,防止路基纵缝反射到路面。

### 2.4 地基灌浆

经长期观测,路基还处于沉降活动的纵向裂缝路段,只处理路面和路基不能彻底解决纵向裂缝,必须补强地基,只有补强地基才能达到阻止路基的不均匀沉降后出现道路纵向裂缝或阻止裂缝的发展。比较经济和简单的方案是地基灌浆,在中央分隔带、护坡道(或边沟内),按路的断面纵向 5m,横向 5m 布孔灌浆,钻孔穿透路基填土直至钻到地基软弱层进行灌浆。将软弱的地层进行补强处理。灌浆选用 425 # 普通硅酸盐水泥为好,工艺选用袖阀管法。

(上接第 46 页)

有较大差异:土质路基本身抗剪强度低,颗粒之间具有粘聚力,土体具有较强塑性,如果地基发生较大沉降及不均匀沉降,路基的沉降可以随着地基沉降性状共同沉降。但是,填石路基依靠嵌锁和摩擦作用形成强度,填石颗粒之间没有粘聚力,颗粒之间的嵌锁结构遭到破坏后不能像土质路基一样逐步恢复。当路基内部产生的剪应力超过路基极限抗剪强度时,即产生剪切破坏,其剪胀效应将导致边坡鼓胀使路基失稳。可见填石路基对地基沉降的敏感性较土质路基高,地基的沉降及不均匀沉降易引起填石路基坍塌和失稳,因此,对于填石路基现行《公路路基设计规范》只规定地基压实度不小于 85% 是不够的。笔者建议在填石路基特别是高填石路基的设计中,应加强地基勘察,增加地基承载力这一指标,并按桥梁基础的要求进行地基勘察和设计,以控制地基产生过大沉降及过大不均匀沉降而导致路基失稳破坏。

### 3 结语

在山区高等级公路工程中,填石路基稳定性的重要性是不言而喻的,无论是在施工阶段还是公路竣工通车后,填石路基出现失稳现象都是很难处理的。本

文在进一步认识填石路基材料工程特性和边坡码砌层力学作用的基础上,为填石路基的稳定性设计提供了一个力学计算与分析的方法,并完善了填石路基稳定性的设计控制指标,克服了此类路基现行设计方法的粗糙性与不科学性。笔者建议,对于填石路基的设计,工程技术人员应采用本文所述方法进行复核,必要时进行某些修改调整,以便设计能够既满足合法(原则不违背现行规范)又满足合理的要求,从而提高设计的精确性和科学性,以保证工程的安全和经济。

### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国交通部.公路路基设计规范(JTJ013-95)[S].北京:人民交通出版社,1995.
- [2] 交通部第二公路设计院.公路设计手册——路基[M].北京:人民交通出版社,1995.
- [3] 陈明明,译.粗粒料填方的压实[J].国外公路,1989,(4).
- [4] 交通部公路科学研究所.公路填石路堤压实标准与检测方法研究总结报告[R].1999.
- [5] 黎莉,赵明华,等.高填石路堤沉降数据分析方法探讨[J].中南公路工程,2000(1).
- [6] 陈明致,等.堆石坝设计[M].北京:水利水电出版社,1982.