

铁路岩石边坡的稳定性研究

谢 强* 蒋爵光

(西南交通大学)

提 要 本文分析了不同边坡断面形式下岩体中应力状态的变化及其与边坡变形破坏的关系;建立了以岩体质量为基础的铁路岩石边坡坡度确定的定量分析方法;通过实例,对250m高的河谷岸坡在铁路桥基荷载作用下的稳定性进行了分析,并确定出桥基的合理设置位置。

主题词 铁路 边坡 稳定

中国的山区多,地质条件复杂,在众多的山区铁路建设中经常遇到的一个重要问题,就是如何正确、合理地确定岩石边坡的坡高度和评价其稳定性。铁路岩石边坡包括路堑边坡、隧道进出口仰坡等人工开挖边坡和其上的天然山坡,以及设置桥梁墩台的天然河谷岸坡等。人工开挖边坡的高度一般很少超过三、四十米,但这类边坡往往数量大、延伸长;而路基上的天然山坡和桥基河谷岸坡,特别是在深山峡谷地区,其坡高可达百米或数百米,且坡度陡峻。这些铁路岩石边坡的稳定性不仅密切关系着铁路运输的安全,并且决定着边坡工程建设经济合理性。正确合理地确定岩石边坡的坡度和高度以及评价其稳定性,有重要的现实意义。

在本文中,根据作者对铁路岩石边坡的研究,对边坡岩体变形破坏特征,以岩体质量为基础的铁路岩石边坡坡度确定的定量分析方法,^[1]设置桥梁墩台的河谷岸坡稳定性分析几方面的研究成果作一介绍。

1 铁路边坡变形破坏特征的研究

1.1 开挖边坡的应力特征

铁路中常遇到的路堑边坡,绝大多数情况下都是对天然山坡作部分开挖,作者采用有限元法,分析了在天然山坡中开挖成一定坡度和高度的边坡应力特征。分析表明^[1],随着开挖坡度的增加,虽然边坡的高度在减小,但变坡点附近及坡脚附近的应力增加明显,在变坡点附近出现最大张应力区,坡脚出现最大剪应力区,这可导致边坡出现拉张和剪切破坏。

在同一坡度下的边坡,随着坡高的增加所引起的边坡中应力的变化与上述坡度变化引起的应力变化有相似之处,即变坡点和坡脚处的应力有较明显的变化,变坡点的张应力增加明显,而坡脚处的垂直、水平的剪应力均随坡高的增加而上升。陡坡开挖时,高度变化引起的应力变化幅度均大于缓坡开挖的情况,因而设计边坡较缓时,变更坡高引起坡内应力的变化小,而设计边坡较陡时,变更坡高将导致坡内应力有较大的变化。

分析天然山坡高度对开挖边坡应力特征的影响表明,随天然山坡坡高的增加,除坡顶处垂

* 本文收稿日期 1996-01-10 谢 强 副教授 西南交通大学工程地质系 成都 邮码:610031

直应力增大外,其余各应力值变化均不明显。

综上所述可知,在岩体比较均一或统计均一的情况下,开挖边坡时,重点是考虑新开挖的边坡顶部(变坡点)处的张应力值和该处岩体的抗拉强度,及坡脚处的剪应力值和该处岩体的抗剪强度。尤其要考虑与这些应力作用方向相应的那些结构面的力学性质,注意分析其是否满足稳定性要求,以便采取相应的工程措施。边坡坡度及坡高的改变引起的边坡中应力特征的变化,主要是变坡点处的拉张应力和坡脚处各应力值明显变化,因而边坡的设计、变更设计和开挖均应着重考虑这一变化对边坡稳定性的影响。对于坡度与坡高这两个基本参数而言,计算表明坡度的变化对坡内应力的影响高于坡高变化对坡内应力的影响,因此,边坡设计时,重要的是选择坡度而不必过多地考虑坡高,在坡度较缓时尤为如此。天然山坡的坡高对开挖边坡应力特征的影响不大,在一般的边坡设计中,可以忽略天然坡高这一因素。

1.2 边坡的变形破坏特征

渐近破坏分析^[2]及有限元分析揭示,开挖边坡在坡顶易产生由拉应力引起的拉张破坏。坡顶如产生拉张裂缝,则裂缝将随开挖边坡的深度加大而向坡后发展,即随开挖边坡的深度加大,边坡可能破坏的范围也随之加大,边坡的稳定性变差。

渐近破坏分析和模型试验^[3]表明,双滑面交线倾角增大或两结构面的夹角增大,边坡的不稳定性也随之增加。当反坡向层面(或贯通性好的密集结构面)的倾角大于 60° 时,对节理发育的层状岩层边坡易发生落石、掉块,而对一些薄层状或板状岩体边坡则易发生碎落破坏。

2 铁路岩石边坡稳定坡角的确定^[4]。

根据我国铁路岩石边坡仍凭经验确定边坡坡度的现状,作者等对全国12条铁路干线具有代表性的183个岩石边坡工点进行了深入的调查研究,对调查的边坡进行了统计分析,对影响边坡稳定性的有关因素进行了相关分析,建立了边坡岩体的质量指标、边坡坡度确定的定量关系表达式以及边坡的稳定性分析方法,完成了岩石边坡分析系统和相应的计算机程序,并进行了多次应用验证。

2.1 边坡稳定性分类及影响因素分析

通过调查研究,将边坡按稳定情况分为稳定、基本稳定和不稳定三种类型。统计分析表明,多数边坡设计是合理的,但也有相当数量的边坡设计过分偏于安全,可考虑适当提高坡率;少数边坡设计过陡,边坡不稳。此外,岩层产状倾向线路的边坡,不论其边坡的坡度陡缓,只要坡角大于岩层倾角,几乎都发生地顺层滑塌等破坏现象,表明对这类边坡采取单纯降低坡度的办法来保证其稳定性在多数情况下并不可行。

影响边坡稳定性的因素归纳如下:用回弹值 R 综合反映岩石的岩性、风化程度和强度特征,用岩体完整性系数 I_c 综合反映岩体结构的特征。运用系统分析的灰色关联分析方法,研究了岩石回弹值 R 、岩体完整性系数 I_c 、坡高 H 、结构体视块度 D 、结构面延伸长度 L 、粗糙度 JRC 、综合结构面倾角 β_f 综合结构面与坡面倾向差 ΔW_f 、综合结构面交线倾角 β_w 、综合结构面交线与坡面倾向差 ΔW_w 与稳定边坡角 α 的相关关系,结果如表1:

表 1 各因素与边坡角 α 的关联度(>0.9 排序)

因 素	I_c	R	JRC	H	ΔW_f	β_f	D	β_w
关联度	0.9829	0.9794	0.9794	0.9630	0.9487	0.98443	0.9215	0.9200

岩石边坡坡度的确定,应按各因素关联度大小,依次考虑其影响程度。地下水的影响,则作为对岩体质量的折减,在边坡度的确定中加以考虑。

2.2 铁路岩石边坡坡度的确定

在边坡调查、稳定性分类、影响因素选择、指标评定以及对边坡破坏分析的基础上,建立了以岩体质量 RQ 为核心的确定边坡坡度 α 的定量关系:

$$\alpha = \arctg(\gamma_H \lg[-40 + 38 \lg(\gamma_w RQ)])$$
$$RQ = R \cdot I_c$$
$$I_c = \sum_{i=1}^n a_i g_i(x_i)$$

式中, a_i 为各因素对 I_c 贡献的权函数, x_i 为表述各因素之值, $g_i(x_i)$ 为各因素对 I_c 的贡献值。 γ_H 为坡高折减系数,见表 2。

表 2 坡高折减系数

$H(m)$	<20	20—25	25—35	>35
γ_H	1	0.85	0.70	0.6

γ_w 为地下水影响折减系数, $\gamma_w = (C1 + C2 + C3)/3$, C 见表 3。

表 3 地下水影响折减系数

C_1 风化	未风化 1.00	微风化 0.85	风化颇重 0.70	风化严重 0.55
C_2 含水	干 燥 1.00	湿 润 0.90	滴 水 0.75	线 流 0.60
C_3 充填	无充填 1.00	稍充填 0.85	有充填 0.70	充满充填 0.55

用该关系式对调查的 183 个边坡重新设计,结果是 70% 的边坡坡度可以提高,平均提高 8°,该结论与野外调查研究和统计分析得出的现有边坡坡度可适当提高的结论一致。

2.3 铁路岩石边坡的稳定性分析及验证

根据 RQ 设计出的坡度,还需进行稳定性分析。根据野外调查,按边坡的稳定程度建立分类矩阵 B ,以回弹值,完整性系数,稳定系数,相对贯通度和不稳定滑塌体类型数建立模糊矩阵 R ,由隶属函数值决定权函数矩阵 A ,按下式计算 B :

$$B = A \cdot R$$
$$B = (b_1 b_2 b_3)$$

式中, b_1 分别为该边坡分属稳定、基本稳定和不稳定的百分比, 以百分比排序作为边坡稳定性的评判结果。

上述边坡坡度确定及稳定性分析系统在图浑、本田、广大、水小、南昆新线及一些公路边坡进行了应用验证, 结果表明, 该系统不仅在优化设计, 节约工程量方面较好的效果, 而且在科学合理地评价边坡稳定, 保证边坡安全方面更为可靠。

3 河谷岸坡稳定性及桥基设置位置分析的研究

设置桥梁墩台的河谷岸坡的稳定性不仅如开挖边坡那样受着岩体地质特征和坡度高度的影响, 且与桥梁墩台基础的位置、类型和荷载大小等有关。因而, 研究在一定荷载作用下, 岸坡的稳定性和桥基设置位置的合理性, 是不同于一般边坡的稳定性分析, 且密切关系到桥梁工程安全性的另一重要问题。

3.1 桥基河谷岸坡的应力分析

对作用有桥基荷载的河谷岸坡岩体, 用有限元对其应力状态和变形破坏特征的分析表明, 在一定基础荷载作用下, 随着基础距岸坡前缘的距离不同, 桥基岩体的应力场和变形场随之改变。当桥基位置距岸坡边缘的距离增大到一定程度后, 岩体中的应力及变形有一较大的变化, 桥墩荷载对岸坡岩体的应力和变形的影响有明显的改善。

桥基的结构形式和埋置深度对岸坡岩体中的应力有明显影响, 加深基础或合理改变基础的结构类型都有可能较好地改善岸坡的稳定性。因而在分析桥基河谷岸坡岩体的稳定性时, 可以根据上述桥基设置位置等对岩体应力状态及稳定性的影响来考虑设置桥基的最佳位置和设计基础类型。

3.2 岸坡稳定性及桥基设置位置的综合分析方法

当在峡谷岸坡上建桥时, 既应保证桥梁基础和岸坡的稳定性, 又要尽可能注意到符合工程上的要求, 使桥基设置的位置合理可行。因而, 这是一项与一般边坡稳定性分析不同的、考虑地质与工程的综合析工作。通过对水小线北盘江大桥和南昆线清水河大桥岸坡稳定性的分析研究, 形成了岸坡稳定性及桥基设置位置的综合分析方法, 并取得了良好的应用效果。这一方法包括如下几方面的研究内容:

(1) 野外实地调查, 工程地质分析, 岸坡岩体地质模型抽象。

(2) 运用数值分析、物理模型试验、理论计算等定量定性分析评价方法和技术, 对岸坡岩体地质模型在桥基荷载作用下的应力、变形和破坏特征进行分析研究, 并计算研究确定岸坡的总体稳定性和岸坡的稳定坡度。

(3) 根据桥基岸坡岩体的变形破坏和稳定分析结果, 结合桥梁墩台基础的结构形式, 计算不同桥基位置及相应的安全系数。

(4) 综合确定桥基在岸坡的合理位置, 需要时, 提出岸坡及桥基基础的加固方案。

3.3 北盘江大桥峡谷岸坡稳定性分析实例

3.3.1 北盘江大桥桥位方案及地质概况

北盘江大桥桥址处河谷为近南北向,河谷强烈下切,岸壁直立。峡谷宽度仅 130m,壁高达 250 余米。桥渡方案拟采用单跨拱桥,跨度 180m,桥高 305m,是控制线路方案成立的关键工程。

桥址区域出露岩层单一,主要是下二叠中厚层至巨厚层灰岩。岩层产状微向坡外倾斜(视倾角约 6°)。岸壁顶部见到三条卸荷裂隙,距岸坡边缘 2~10m,可见深度达 40m,将岸坡坡顶突出部分的岩体切割,但尚未贯通。卸荷裂隙切割的岩体顶部曾有过局部小型崩塌。在岸壁上发育有按约 30m 间距排列的斜切岸坡的长大贯通节理。这组节理与卸荷裂隙组合,将西岸岸坡岩体切割成块体。桥墩静载为水平 5500t(指向坡内),垂直 12000t。

3.3.2 岸坡岩体应力特征和变形破坏模式

根据调查,岸坡岩体的结构特征是巨块状硬岩结构,岸坡的总体变形,主要是节理和卸荷裂隙切割出的块体的移动而引起的岩体结构的破坏。对设墩在 30m 和 40m 这两种主要条件下岸坡岩体变形特征进行离散元数值模拟和底摩擦模型试验,结果表明^[5],当桥墩修建后,桥墩产生的垂直荷载所引起的侧向压力,将直接导致坡顶眉峰处岩块移动的加剧。当墩位设在 30m 处时,眉峰岩块的破坏一直发展;而墩位设在 40m 时,眉峰岩块的移动逐渐平缓,岸坡的额外变形得到明显改善,其水平应力和垂直压应力增加量也远小于 30m 处。根据 30m 桥基和 40m 桥基状态下计算所得的应力数据,采用莫尔强度理论、格里菲斯强度理论和最大应变强度理论对整个岸坡岩体进行了破坏强度分析。分析表明:桥基桥基从 30m 向 40m 移动时,边坡坡脚处的剪应力区的面积随之缩小;坡顶处的张应力区随着荷载作用点向坡内移动,张应力区面积也随之缩小。当桥基设在 40m 处时,对岩体的应力场和变形场的影响程度有突变性的改善。这有力地表明墩位设在坡面后 40m 处更利于岸坡的稳定,岸坡坡顶的破坏范围大致在 12m~20m 左右。作为不利条件考虑,假定岸坡眉峰处崩塌破坏,计算结果表明,当岸坡眉峰破坏后,坡顶岸块和墩基岩块的变形移动都较快趋向稳定。而且,修筑桥墩与否,均极少改变岸坡的变形模式及规模。

3.3.3 岸坡岩体的稳定性计算和稳定坡度的确定

根据实地考察、数值分析和模型试验分析表明,岸坡的稳定性,可按沿卸荷裂隙形成的板状岩体发生倾倒破坏或溃屈破坏模式进行分析。按板裂岩体的裂缝极限深度和岸坡岩体的临界荷载两方面计算表明,自然岸坡和在桥梁荷载作用下,岸坡岩体都是稳定的。

利用本文第二节的方法,对北盘江大桥桥位岸坡的稳定坡角进行计算。通过野外测定,各计算参数确定为: $\gamma_H=0.6$, $I_c=52.5$, $RQ=2000$ 。将上述参数代入坡角定量关系式,计算得稳定坡度为 82.4° 。根据初测峡谷岸坡桥位纵断面图,岸坡眉峰最大变形破坏宽度为 21.2m,按此破坏宽度计算桥位的安全系数,当桥位位于谷壁后 30m 时,其安全系数仅 1.42;而当桥位位于谷壁后 40m 时,其安全系数为 1.86。

4 结 论

从上述研究中,可以得出以下结论:

(1)开挖路堑边坡,将引起坡顶(变坡点)张应力和坡角剪应力的明显集中,设计和施工中要注意分析该处与这些应力作用方向相应的结构面特征和岩体力学特征,以保证边坡的稳定性。因此,在坡顶采用锚固、灌浆、嵌补,坡脚采用支挡等措施来加固边坡,常可收到良好的效果。

(2)以岩体质量为基础的铁路岩石边坡坡度的确定及稳定性分析方法具有良好的应用效果,该方法为铁路岩石边坡坡度的确定从经验判断到定量评价发展提供了一条新途径。

(3)岸坡稳定性及桥基位置的综合分析方法不仅可有效地综合分析桥基荷载与岸坡岩体的相互作用及岸坡的稳定性,并且为桥梁墩台在河谷坡上设置的安全距离和埋置深度的分析提供了可行的评价方法。

参考文献

- 1 J. G. JIANG & Q. XIE: Finite Element Analysis for Stress in Slope, Proceeding of 6th Int. Conf. Numerical Method in Geomechanics, INNSBRUCK, Austria, 1988
- 2 蒋爵光. 岩石边坡楔形体破坏分析. 河北地质学院学报, Vol. 12, No. 2
- 3 钱惠国. 倾斜破坏的模型试验研究. 西南交通大学工程地质专业成立 35 周年学术论文集. 西南交通大学出版社. 1993
- 4 蒋爵光等. 铁路岩石边坡稳定坡角的定量分析. 岩土工程中的数值方法的工程应用. 同济大学出版社. 1990
- 5 谢强等. 北盘江大桥岸坡岩体破坏特征的模型模拟研究. 四川省岩石力学学会第二次学术会议文集. 西南交通大学出版社. 1995

RESEARCHES INTO STABILITY OF RAILWAY ROCK SLOPE

Xie Qiang Jiang Jueguang

Southwest Jiaotong University

Abstract In this paper, the stress feature and the interrelation between stress and failure in railway rock slope, which is excavated in different section, are analysed with numerical method. Based on a field investigation into 183 railway rock slopes, a system in which slope angle is calculated quantitatively and slope stability is evaluated according to rockmass quality is built. The engineering practices shown that the system is successful and effective. Finally, an engineering practice of the analysis of slope stability and the location of bridge foundation is provided as an example, in which the slope on river bank is 250m in height and bears 12000t load of bridge pier.

Keywords railway; slope; stability