



第五届全国公路科技创新高层论坛论文集

The 5th China National Forum On Innovative Highway Technology Compositions Collection

[上 卷]

[主办单位]



中国公路学会

[协办单位]



中交公路养护工程技术有限公司

ISBN 978-7-114-07796-8



9 787114 077968 >

人民交通出版社

China Communications Press

第五届全国公路科技创新高层论坛

The 5rd China National Forum on Innovative Highway Technology

论文集

Compositions Collection

(上册)

中国公路学会 主编

人民交通出版社

北京·2010

图书在版编目(CIP)数据

第五届全国公路科技创新高层论坛论文集. 上册/
中国公路学会主编. —北京:人民交通出版社, 2010. 4
ISBN 978-7-114-07796-8

I. ①第… II. ①中… III. ①道路工程—科学
技术—学术会议—文集 IV. ①U4-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 052775 号

书 名:第五届全国公路科技创新高层论坛论文集(上册)

著 作 者:中国公路学会

责任编辑:师 云

出版发行:人民交通出版社

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址:<http://www.ccpres.com.cn>

销售电话:(010)59757969, 59757973

总 经 销:人民交通出版社发行部

印 刷:北京高迪印刷有限公司

开 本:880×1230 1/16

印 张:56.875

字 数:1802 千

版 次:2010 年 4 月 第 1 版

印 次:2010 年 4 月 第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-07796-8

定 价:198.00 元(上、下册)

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

《第五届全国公路科技创新高层论坛论文集》

编 委 会

主 编：刘文杰

专家评审委员会

主 任：陈国靖

委 员：曾宪武 韩 敏 王廷伯
巨荣云 沈鸿雁 林 声

编辑工作委员会

主 任：唐发斌

主 编：韩立萍

编 辑：徐 伟 宫照卿 李 娜

前 言

在今年1月召开的全国交通运输工作会议上,中共中央政治局委员、国务院副总理张德江发表重要讲话,要求交通行业要以建设畅通高效、安全绿色的交通运输体系为目标,着力推进交通运输快速发展、高效发展、安全发展、绿色发展。李盛霖部长在工作报告中也强调指出,要坚持把自主创新作为调整结构和转变发展方式的中心环节,大力推进节能减排工作。创新作为引领交通行业科学发展的主导力量被赋予了更加重要的使命。

由中国公路学会举办的“全国公路科技创新高层论坛”是我国公路交通领域两年一度的科技盛会,对促进行业科技进步、加快科技成果转化发挥了独特作用,已成为具有广泛影响的重要交流平台。经交通运输部和科协批准,“第五届全国公路科技创新高层论坛”将于2010年4月8日在北京召开,主题为“公路交通科技创新与科学发展”。

为配合论坛的召开,提高学术交流质量,学会于去年12月发出关于征集论文的通知。论文征集活动受到广大公路科技工作者的热情关注和积极响应,截稿前共收到来自各方面的论文800余篇。经专家评审委员会评审,159篇水平较高、有一定建树的论文入选本届论文集。论文集分为“公路工程篇”、“桥梁工程篇”、“隧道工程篇”、“综合篇”四个部分,共100余万字,由人民交通出版社出版。

由于编辑出版时间较短、编者水平有限、未能与论文作者进行充分沟通和修改等原因,论文集难免出现不当之处,敬请作者和读者谅解并指正。论文集的出版得到了各省、自治区、直辖市公路学会以及人民交通出版社等单位的大力支持,同时也离不开论文作者和评审专家的辛勤工作。对此,一并表示诚挚的谢意。

第五届全国公路科技创新高层论坛论文集

编委会

2010年4月

目 录

上 册

一、公路工程篇

考虑材料特性的结构设计分析.....	张 捷	黄晓明(3)
顺层板岩边坡变形破坏特征及稳定性评价.....	段海澎 邹正明	赵建军(7)
典型天然盐渍土多次冻融循环盐胀试验研究	包卫星 杨晓华	谢永利(13)
天山地区公路泥石流危险度评价模型研究及应用	黄 勇 刘 涛 王治升 杨三强	刘江水(18)
昌九高速公路沥青路面温度场分布规律研究	孙 斌 胡宗林	姜小磊(22)
刚柔复合式路面层间界面结合抗剪稳定性分析	刘朝晖 华正良	郑健龙(28)
现代空间信息技术与公路数字化选线设计	陈 国	(34)
iaoSBR 胶乳改性乳化沥青的性能研究	孙玲利 梁海军 王建荣	王立江(39)
虚拟现实技术在公路智能选线系统中的应用研究	费 昀 许振辉 郭 力 秦 涛 李俊磊	刘亚岚(43)
“新全站仪法”在山区高速公路横断面测量中的应用	陈 雷	(46)
基于机载 LiDAR 的公路测量放线系统研究	许振辉 孙 伟 刘晓东	李俊磊(53)
基于设计数据的道路三维动态建模	秦 涛 许振辉 费 韵	李俊磊(56)
浅谈高速公路路线设计与安全	王辉标	唐 博(60)
青岛~红其拉甫高速公路山东段平面与高程控制网的建立	王德保 顾一中	李国梁(64)
潮汐落差区土质路基无堤堰填筑工艺	言丽平	(70)
软土地基高速公路项目设计和施工中应注意的几个问题	刘毅学 周俊书	杨德胜(74)
多桩型复合地基处理山区沟谷软基的技术探讨	许洪亮	熊震宙(79)
复合式展线路基稳定防护结构的研发与应用	吴红刚	马惠民(83)
国道 317 线汶川至马尔康段公路涎流冰成因机理与防治措施探讨	袁 丁	蹇 依(87)
高速公路拓宽形式及软基处理方案的比较研究	黄晓清 袁胜强	朱银乐(92)
法国规范体系下软基路堤沉降计算及判定方法	李 刚 韦 刚	(96)
辽宁东部山区降雨强度经验公式的推算.....	于忠涛	朱芳芳(104)
高速公路沥青路面病害成因的系统分析方法.....	郝明武	(109)

低立式方格沙障规范化设置技术在赤通鲁高等级公路中的运用研究.....	王 骁	(112)
岩土体弹性波速与开挖等级的相关性理论研究.....	李汉江 陈斌文 刘 勇	(115)
高速公路拓宽工程中路面拼接台阶尺寸的探讨.....	李立寒	(120)
中法美沥青路面技术比较研究.....	李 豪 贾 渝 华东一 刘海涛 原 军	(125)
温拌阻燃沥青混凝土在隧道路面中的应用技术研究.....	廖文华 罗 敏	(133)
阻燃温拌沥青混合料性能及其应用.....	俞文生 林 涛	(138)
高模量沥青混合料添加剂性能评价.....	吴春颖 李 强	(145)
复合固结土路面基层在长松高速公路辅道的应用研究.....	栾 海 王玉娟	(150)
现代改性沥青混合料技术之进展.....	延西利 易守春	(165)
改良 AC-13C 沥青混合料与 SMA-13 的对比试验研究	游 宏 陆 阳 左贵宁 黄晚清 苗春泽 吴志勇	(160)
高寒地区沥青路面铺筑质量控制研究.....	傅 珂 万 宇	(167)
聚酯纤维在沥青混合料中的应用及施工控制要点.....	孙雪伟 陈李峰	(171)
剑麻纤维沥青混凝土的高温稳定性试验研究.....	吕金永 何晓鸣	(174)
沥青路面柔性基层与半刚性基层的优化组合在江延高速公路中的应用.....	栾 海	(177)
斜张法双向预应力混凝土试验路的施工.....	张东省 韩 森 李 娜	(182)
外加剂对沥青混合料水稳定性能的影响研究.....	靳红娟 林 涛	(185)
热压式沥青混合料在我国川藏高原高寒地区应用的试验研究	黄晚清 游 宏 陆 阳 崔世斌 左贵宁 刘 勇	(190)
温拌 OGFC 在隧道工程中的应用实践	孙雪伟 陈李峰 蔡聪明 陶卓辉 黄文元	(196)
SAK 温拌沥青混合料性能评价	高晓飞 刘黎萍 陈国强 王 刚	(203)
橡胶沥青软化点、黏度与车辙试验关系研究	陈际江	(208)
法国高模量沥青混凝土目标配合比设计实例.....	李 刚 韦 刚	(212)
沥青路面旧料再生利用过程中的级配改良措施研究.....	李达辉 李 俊 孙 勇	(219)
温拌沥青混合料压实性能研究.....	张守城	(223)
母体沥青混合料结构(TX)在顺沙路昌平段大修的应用	杨素青 南 威	(227)
环保膨胀剂在沥青路面基层中抗裂缝性能研究探讨.....	郑兴波 周长春 胡兆德	(236)
复合式路面反射裂缝机理研究.....	潘 欣 宋 挺 张 伟 李 江 徐 峰	(239)
刍议公路水泥混凝土路面疲劳性能研究.....	彭 明 杨 哲	(244)
沥青路面纵坡段车辙分析.....	俞文生 李 昶 彭蓉蓉	(250)
沪宁高速公路(上海段)夹层材料防止反射裂缝的处治措施.....	贺 磊 方 鹤	(255)
热再生沥青混合料性能试验研究.....	陈志伟 翁 辉	(263)
浅谈微表处预防性养护技术的应用与造价确定.....	王田生	(268)
泡沫沥青就地冷再生技术的试验性应用.....	张 俊	(273)
基于视频的乳化沥青颗粒粒度分布参数分析.....	英 红 凌宏杰 高 燕	(278)
公路工程粗粒盐渍土易溶盐试验方法研究.....	包卫星 李志农 罗炳芳	(284)
电热法用于路面融雪化冰的试验路施工.....	张东省 徐希娟 岳卫民	(290)
新型高度可调节护栏研发.....	刘孔杰 崔洪军	(293)
钢化玻璃道钉在公路上的应用.....	陈庆雄	(297)
高速公路生态护坡效果分析之模糊物元分析法.....	许明举 赖丙娣	(302)
浅谈彩色沥青混凝土配合比设计与施工质量控制.....	汪秋云 王 霞 武建琬	(307)
基于 Patran 的多锤头碎石化技术有限元分析	李自光 李学俊 王喜山 游小平 刘望球	(311)
不同温度下 HMA 劈裂强度的影响因素	陆学元	(315)

桥隧之间柔性短路基段变整体刚性路面段的设计与施工·····	刘建勋	王龙飞(322)
节能减排背景下路面基层用水泥的选择与应用·····	尚云飞 曹 泓 陈亮亮	张 平(327)
秦皇岛地区农村公路路面典型结构问题研究·····		冯 博(331)
应用集料比表面积进行水稳砂砾质量控制·····	刘贵君 陈亮亮	陈 剑(337)
合肥市透水砖路面应用研究·····	张 辉 毛洪强	张玉斌(342)
高速公路路面使用性能预测方法探讨·····	何晓鸣 关 鹏	周 林(346)

一、公路工程篇

考虑材料特性的结构设计分析

张捷 黄晓明

(东南大学交通学院 江苏南京 210096)

摘要: 沥青材料具有粘弹性特征,而碎石材料具有非线性弹性特征。在现有的结构设计中,一般均将其当作线性弹性层状体系考虑,而忽略材料所固有的粘弹性、非线性等特征。在本文的研究中,用 KENLAYER 结构分析软件,对考虑材料的粘弹性,非线性的设计作了分析,比较其考虑材料粘弹性以及非线性特征的结构的应力应变状况以及冷再生设计路面寿命。

关键词: 非线性 粘弹性 KENLAYER 应力 应变

0 引言

在一般的结构分析设计中,无论何种材料,结构分析均以弹性层状体系理论为基础,以弹性模量和泊松比反映其弹性特征。而对不同的材料,其材料固有的特点,如粘弹性、非线性等等没有加以考虑。这也就导致了结构在设计中没有充分的反映其真实的状况。因此有必要对同一种结构进行不同分析方法的比较,以此反应结构设计的合理性。在本文的分析中,分别考虑了沥青材料的非线性、粘弹性等,将其各种情况进行组合,分别分析了结构线性弹性体,非线性弹性体,线性粘弹性体,非线性弹性与线性粘弹性体组合体这四种情况下的应力应变状态,以及不同分析下的材料的不同疲劳寿命。

1 分析程序

KENLAYER 计算程序适用于无缝的柔性路面。程序的主框架是圆形荷载作用下的多层体系。其适用于单轮、多轮荷载作用下的层状体系,各层的性质可以不同,其可以设置为线弹性、非线性弹性、粘弹性。

1.1 非线性分析

粒状材料以及土基土在材料的考虑中为非线性的,其弹性模量会随着加载应力的变化而变化。层状体系所用的弹性模量是由重复作用的无侧限或三轴压缩实验所得的回弹模量。而粒状材料的回弹模量随着应力强度的增加而增加,而细粒土的回弹模量则会随着应力强度的增加而减小。故而,在进一步研究路面弹性变化的过程中,需要进一步考虑模量的非线性变化。在 KENLAYER 程序中,采用逐步逼近的近似法,分析材料的非线性的性质。

在 KENLAYER 程序中为确定非线性材料的模量,首先假设该层的弹性模量,并用层状理论求得应力。根据非线性模型,确定新的模量值,并计算新的一组应力。重复这个过程,直至两次相邻迭代的模量接近于某个规定的精度为止。

1.2 粘弹性分析

粘弹性材料既具有固体的弹性特性,又具有液体的粘性特性。因为粘弹性材料具有粘性成分,它的性质与时间有关,时间越长,流变就越多。由于沥青混凝土是粘弹性材料,其变形与加载及时间有关,故而用粘弹性层状体系理论分析,较为合理。常用的方法是根据弹性-粘弹性相似原理,应用拉普拉斯(Laplace)变换,消除时间变量 t ,采用转换变量 p 。将粘弹性问题转换为相关的弹性问题。解得弹性结果后,再将相关的弹性问题做拉普拉斯反演,变量 p 又换成时间变量 t ,最终得到结构的粘弹性解。

2 分析结构

在 KENLAYER 设计程序中,有四种不同的分析方式,将每种分析方式以 ABCD 四个字母代表,见表 1。四种分析方式分别是针对沥青的粘弹性以及基层的非线性的几种组合,对比分析常见的线弹性分析。分

析结构采用再生混合料的基本结构,见表 2。在结构分析中采用双圆垂直标准轴载加载作用进行分析。

四种分析方式 表 1

分析方式代码	分 析 方 式	分析方式代码	分 析 方 式
A	线弹性分析	C	线性粘弹性分析
B	非线性弹性分析	D	非线性弹性与线性粘弹性组合分析

分 析 结 构 表 2

材 料	厚度 (cm)	20℃抗压回弹模量 (MPa)	15℃抗压回弹模量 (MPa)	15℃劈裂强度 (MPa)	分 析 方 式
热拌沥青混凝土	8	1 600	1 400	1.3	粘弹性
再生基层	40	1 100	1 000	0.6	
原基层	20	1 200	1 100	0.8	
土基		45	45		非线性弹性

3 不同分析方式分析结果

对于同一种结构,在实际的工程应用中有唯一的应力、应变以及疲劳寿命。但在计算软件模拟时,由于路面的结构的复杂性,无法真实的模拟实际路面情况。通常采用模拟的参数来对实际路面进行拟合。故而对于同一种路面结构,其采用不同的分析方式,其内力以及应变,疲劳寿命均有不同。

3.1 不同分析方法内力分析

采取上述相同的结构,对其分别进行 ABCD 四种分析方法进行分析,分析了面层层底,以及再生基层层底的应力,见表 3。

不同分析方法应力分析 表 3

分 析 方 法	面层层底(MPa)	再生层层底(MPa)	分 析 方 法	面层层底(MPa)	再生层层底(MPa)
A	2.62×10^{-1}	3.20×10^{-2}	C	4.70×10^{-1}	2.72×10^{-2}
B	2.80×10^{-1}	1.64×10^{-2}	D	4.82×10^{-1}	1.34×10^{-2}

从图 1 中可以看出,不同分析方式的层底应力均不相同。对于面层层底,不同的分析方式,其层底的拉应力有所不同。对于 AB 两种分析方式(即线弹性和非线性弹性,以下略),其面层的层底应力影响不大,主要是因为面层是粘弹性材料,并没有对其进行非线性分析。对于 CD 两种分析方式(即线性粘弹性以及非线性弹性和线性粘弹性的组合,以下略),面层层底的拉应力相差无几。其几乎为 A 和 B 两种分析方式的两倍。总体来说,因为面层是热拌沥青混合料,其主要是粘弹性材料,故而粘弹性分析对材料的影响较大。

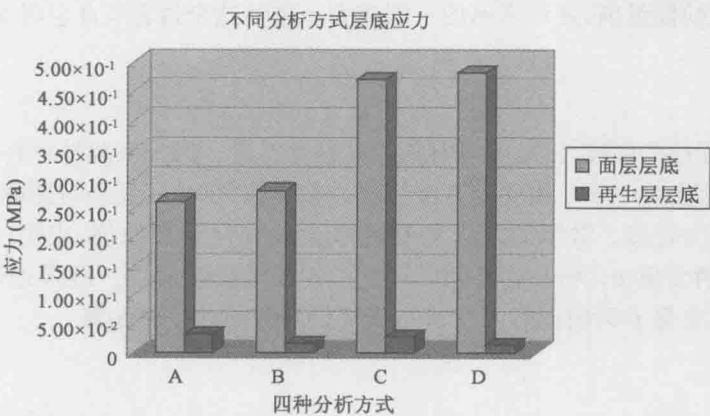


图 1 不同分析方式面层、再生层层底应力

对与再生层层底的分析,其应力值普遍的小于面层层底。两者相差一个数量级。由图可以看出,AC 两种分析方式,其对再生层的拉应力较大,BD 分析方法对再生层层底的拉应力影响较小。再生层接近设置的非线性分析层,而 AC 分析是线弹性分析,而 BD 分析是非线性分析。故而其分析结果相近。

3.2 不同分析方法应变分析

与应力的分析方法相同,采取相同的结构,对其分别进行 ABCD 四种分析方法进行分析,分析了面层层底,以及再生基层层底的应变,见表 4。

不同分析方法应变分析				表 4	
分析方法	面层层底	再生层层底	分析方法	面层层底	再生层层底
A	1.51×10^{-4}	4.29×10^{-5}	C	8.64×10^{-5}	3.95×10^{-5}
B	1.61×10^{-4}	1.84×10^{-4}	D	8.79×10^{-5}	1.59×10^{-4}

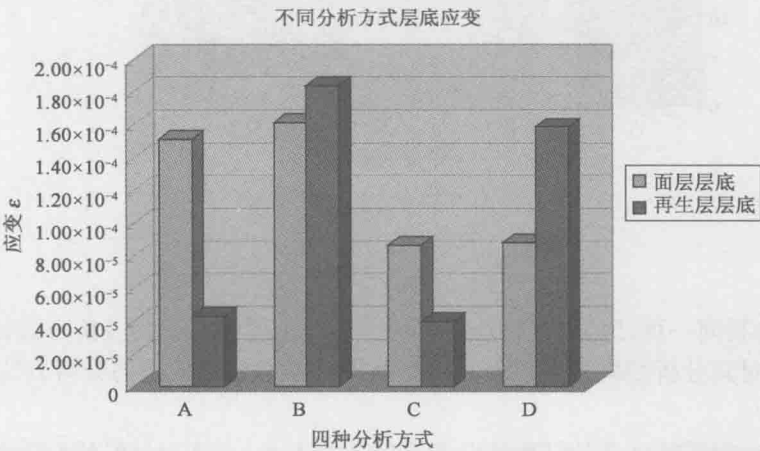


图 2 不同分析方式面层、再生层层底应变

从图 2 中可以看出,其不同分析方式对基层层底的应变影响与应力影响具有极其相似的规律。对于面层层底的应变,AB 两种不涉及粘弹性分析的应变,其应变大小接近,而 CD 两种涉及粘弹性的应变,其应变大小相当。对于同一路面结构,AB 两种分析方式应变是 CD 两种分析方式应变的两倍。对于热拌混合料的面层材料,其涉及到基层材料非线性对其影响不大。

对于再生层层底,其 AC 两种分析方式对结构的应变影响大致相当,而 BD 两种分析方式又是另一个数量级。两者之间也存在一个数量级的关系。因为 AC 两种分析方式仅仅涉及材料的线弹性,而不涉及材料的粘弹性,而对路面的粘弹性材料而言,线性非线性对其影响很小,影响其的主要是材料的粘弹性。所以 AC 两种分析结果的应变差别较小。对于 BD 两种分析方法,由于其主要是再生层层底,更接近非线性层的基层,故而其受非线性基层的影响较大。故而,其是否具有粘弹性分析对再生层的影响不大。

3.3 不同分析方法的疲劳寿命

四种分析方法具有不同的疲劳寿命,其材料的非线性弹性,粘弹性等对疲劳的寿命影响很大。以表中同一种结构,作用 4×10^7 次的标准轴载进行损伤分析。其是针对某一特定的层次而言的,通常为面层层底的水平拉应变,或者土基(最下面一层)顶部的竖向压应变。在程序运行时,无需要输入具体的 z 坐标,程序将确定所有欲求点的坐标并计算所需要的应变值。在损伤分析中,没年的最大时期可以划分为 24 个时期,各个时期可以具有不同的弹性模量、非线性系数以及蠕变柔量。对于每个时期每组荷载,给定预期的重复荷载的重复作用次数。为防止疲劳开裂允许的重复荷载重复作用次数,由式(1)计算,为防止永久变形允许的重复荷载次数由式(2)确定。

$$\text{疲劳开裂破坏极限次数: } N_f = f_1 (\epsilon_1)^{-f_2} (E_1)^{-f_3} \quad (1)$$

$$\text{永久变形破坏极限次数: } N_d = f_4 (\epsilon_c)^{-f_5} \quad (2)$$

从图 3 中可以看出不同分析方式的疲劳寿命不同。可以看出线弹性分析的方法对于路面结构的疲劳寿命是很大的。其疲劳寿命已经达到永久路面设计的标准。但在现实中,材料肯定不是理想的弹性体,故而粘

弹性、非线性设计更加接近实际路面的疲劳寿命。路面设计中,以线性粘弹性设计疲劳寿命以及非线性弹性和粘弹性组合体的疲劳寿命相差不大。故而,其设计可以大体符合实际情况。在实际路面的设计中,路面的粘弹性设计对于材料的影响较大,故在冷再生结构设计中需要充分的考虑。

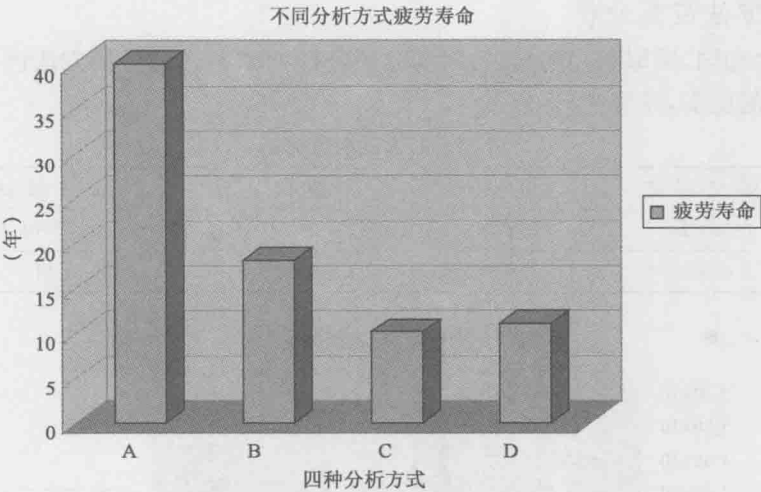


图3 不同分析方式疲劳寿命

4 结论

本文通过再生混合料同一种结构层进行非线性弹性以及粘弹性等不同分析方式得出以下结论。

- (1)不同分析方式对其分析结果差异很大。故而现行的弹性层状体系的分析方法在冷再生情况下值得进一步的细加分析。
- (2)非线性分析方法对层状体系的结构疲劳寿命的影响不大,而路面材料的粘弹性对路面疲劳结构的影响比较大,故而在冷再生结构设计时应当对材料的粘弹性特征加以分析,而忽略其材料的非线性特征。材料的粘弹性影响大于非线性影响。
- (3)材料的应变性能能够吸收应力,结构层具有较大的应变则结构层材料具有较小的应力。
- (4)材料性能的变化对接近此变化的层位影响最大,对其他层位的应力应变影响很小。

参 考 文 献

[1] 黄仰贤(美). 路面分析与设计[M]. 北京:人民交通出版社. 1998.

[2] 中华人民共和国行业标准,公路沥青路面再生技术规范(JTG F41—2008). 北京:人民交通出版社, 2008.

[3] 邓学钧,黄晓明. 路面设计原理与方法[M],第二版. 北京:人民交通出版社,2007.

顺层板岩边坡变形破坏特征及稳定性评价

段海澎^{1,2} 邹正明¹ 赵建军²

(1. 安徽省交通投资集团有限责任公司 安徽合肥 230011;

2. 成都理工大学地质灾害防治国家重点实验室 四川成都 610059)

摘 要:近年来,随着山区高等级公路建设的迅速发展,路线等级高、路面宽、开挖量大,出现了大量高边坡,也发生了众多高边坡变形和破坏。其中,以软硬相间、顺倾层状坡体结构边坡最容易产生变形破坏。本文以结构面、层间错动带和软弱夹层发育的板岩顺层公路高边坡为例,通过岩体结构和边坡一定范围内已有变形破坏现象的调查研究,采用工程地质定性分析和数值模拟综合分析边坡变形破坏模式、评价边坡稳定性状况,并针对变形破坏模式特点和稳定性现状和趋势,提出有针对性的支护治理措施。研究结果表明,该边坡的变形破坏模式为浅表层岩土体滑塌破坏(主要是三、四坡)和受软弱带控制的整体滑移变形(一级坡大桩号侧),边坡整体稳定性较好,局部块体仍然存在失稳的可能性。因此,提出基于变形破坏模式分析和稳定性评价的边坡支护方案,保证边坡施工和运营过程中的安全。

关键词:板岩 顺层高边坡 软弱带 变形机理 稳定性 支护措施

1 前言

高边坡病害与坡体的地质条件密切相关,不同的坡体结构会出现不同的坡体病害,其中以软硬相间、顺倾层状坡体结构边坡最容易产生变形破坏^[1]。在构造发育地区,由于受到构造作用,板岩顺层高边坡结构面、层间错动带和软弱夹层发育。软弱结构面对边坡的变形破坏及边坡稳定起着明显地控制作用^[2]。边坡开挖切断岩层后,易产生沿软弱结构面的平面型滑动。当边坡由上陡下缓、软硬相间的顺倾岩层组成时,边坡开挖后可能产生挤出型或旋转型滑动^[1]。尤其是在降雨丰富地区,地表降水沿着坡体节理、裂隙渗入到相对隔水的软弱夹层,促使坡体沿着软弱夹层及泥化夹层产生蠕动下滑。

本文以皖南山区黄山至塔岭(皖赣界)和小贺至桃林(皖浙界)高速公路 K10+680~K10+783 段板岩顺层高边坡为例,通过边坡基本地质条件和已有变形破坏现象的调查,在准确建立边坡地质结构模型的基础上,采用工程地质定性分析法结合数值模拟方法,研究板岩顺层高边坡的变形破坏模式和稳定性状况,提出有针对性的支护治理措施。

2 工程地质条件

研究边坡地处构造剥蚀高丘陵—低山区,场地自然斜坡次级冲沟发育,沿山顶呈放射状分布,植被发育。边坡处于山丘向 SW 方向凸出的山脊部位,自然坡度较缓,约 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 。边坡设计开挖四级,坡高约 35m,第一级边坡坡比 1:0.75,第二至第四级坡比 1:1,最大退坡深度约 55m,路面高程为 183.72~183.58m。

该边坡坡体表层为第四系残坡积层,下部基岩为青白口—蓟县纪昌前组(Pt2-3ch)粉砂质板岩:①坡残积覆盖层,主要分布于边坡顶部及两侧部位,顶部稍薄,厚度为 1~1.5m;两侧稍厚,厚度为 2~3m。主要由块石夹土组成,颗粒之间无明显架空现象,密实度较差。②全风化粉砂质板岩,红褐色,主要呈槽状分布于边坡中部及两侧局部位置,具有明显的槽状风化特征,是边坡区内分布范围最广的一类岩土体。岩体风化程度极高,几乎呈土状。③强风化粉砂质板岩,灰色,主要分布于边坡中下部,是区内岩体质量相对较好的一类岩土体。

坡区有明显的褶皱构造迹象,研究高边坡整体位于一倾伏向斜(倾向 SW)的 NW 翼。边坡岩体层面产状为 $N75^{\circ}W/SW\angle 55^{\circ}$,大桩号侧沟底岩层产状近水平,而距边坡大桩号侧 150m 处岩体层面产状为 $N10^{\circ}\sim 50^{\circ}/NW\angle 40^{\circ}$ 。

受构造影响,岩体中挤压带(面)及节理发育。主要发育 4 组节理:① $N75^{\circ}W/SW\angle 55^{\circ}$ (层面),延伸 1~

3m,间距 0.3~0.5m,平直粗糙;②N25°E/SE/79°,延伸 1~3m,间距 0.2~0.4m,平直稍粗;③N40°W/NE/87°,延伸 2~3m,间距 0.2~0.3m,起伏粗糙;④N50°W/NE/55°,延伸 0.5~1m,间距 1~2m,平直粗糙。

研究区属湿润的亚热带季风气候带,全年平均降水量 1500~1700mm,每年 5~6 月份为梅雨季节,6 月份雨量最大。边坡位于山脊前缘,自然斜坡坡度较缓,坡面植被覆盖率较高,当大气降水时,雨水迅速形成地表径流向场地范围沟谷排泄。同时,由于坡体表层覆盖层较厚及岩体风化严重,雨水能够形成一定量的下渗。

由于边坡所在部位是一三面临空、被河流包围的低矮山丘,组成边坡的岩性为相对较软弱的粉砂质板岩,边坡岩体结构极为破碎(图 1),风化程度高,基本上顶部两级均为全风化—强风化岩体,呈散体—碎裂结构;同时,受差异风化以及发育边坡内部的构造挤压带的影响,边坡岩体结构在边坡不同部位的差异性极为明显。总体上来看,边坡岩体结构大致可分为三大类,八个区,如图 2 所示。



图 1 边坡破碎岩体



图 2 边坡岩体结构分区图

从边坡整体结构来看,下部风化程度弱于上部,岩体结构较上部好,下部主要表现为碎裂结构,上部为散体结构;小桩号侧风化程度弱于大桩号侧,小桩号侧岩体结构以碎裂结构为主,大桩号侧主要为散体结构。

1 边坡变形破坏机制分析

1.1 已有变形破坏现象

研究边坡的岩体结构较差,节理裂隙发育。特别在坡体的表层,由于表生改造作用的影响,多数结构面呈张开状态且局部夹泥,工程性状较差。岩层倾角较大,且贯通性较好,受构造的影响,工程性状较差,有明显的挤压错动特征,普遍夹泥、岩屑等雨水易软化物质,对块体滑移的控制作用较弱。层面与边坡开挖面有一定的夹角,对边坡的稳定性有利。但是,沿结构面倾向方向岩体受风化影响的程度逐渐变得强烈,岩体结构由碎裂结构变为散体结构,这为坡体沿层面产生滑移提供了变形空间。

边坡顶部两级开挖后,未见明显的整体变形迹象,边坡顶部及两侧也未见明显的拉裂缝。但在顶部一级边坡坡脚部位,灰色强风化岩体有较明显的卸荷松弛迹象。

2007 年 3 月中旬,边坡第三级开挖完毕、第二级坡未进行开挖的情况下,连日降雨后,坡体局部产生了滑塌现象。2007 年 5 月底对浅表部变形坡体进行清除,清除后揭露岩体呈强风化—弱风化上段状态,结构面性状也逐渐变好,小桩号侧控制性边界由夹泥、岩屑等雨水易软弱物质逐渐变为呈弱风化上段的片岩、碎块岩。

2007 年 9 月底,边坡开挖完毕后,在一级坡大桩号侧距河谷 2.5~4m 发现一条左斜向上的裂缝,裂缝整体倾角约 80°,坡底宽 30~40cm,向上为发散状。

2007 年 9 月初,一级边坡开挖完毕,从边坡的岩体结构特征来看,二级坡中下部除两侧坡体外,开挖面揭露岩体以露微风化—微新为主,上部以强风化—弱风化上段岩体为主,不存在控制边坡变形不利的、统一的控制性结构面,边坡整体稳定性较好。由于该区域地质条件复杂,构造运动强烈,褶皱、揉皱等地质现象较为发育,局部岩体仍然较为破碎。

综合分析坡体的岩体结构、坡体已有的变形破坏现象可知,影响坡体稳定的主要因素为顺层挤压错动面(带)和开挖坡面以及降雨等诱发因素^{[3][4]}。

1.2 三、四级边坡浅表层坡体变形破坏机理分析

随着边坡侧向支撑的解除,使得岩体中应力重分布,为坡体沿软弱部位(顺层挤压面(带))滑动提供了变形空间,这是边坡产生变形的主导因素。由于2007年3月中旬连续降雨,边坡没有任何的排水措施,水极易渗入坡体中,而导致边坡土体含水量增加,容重增大而使土体的强度下降,即经过“地表水→水向坡体内渗透→边坡土体容重增大、强度降低→边坡产生变形破坏”这样一个过程,降雨是边坡产生变形破坏的诱导因素。

滑动坡体首先沿挤压面(带)产生向临空面的旋转滑动,变形过程中受到下部未开挖岩体的阻挡,但是由于边坡高陡且破碎,上部变形坡体并未处于力学平衡状态,在重力作用下继续变形。由于边坡岩体非常破碎,泥质物质含量非常高,极易形成软弱带。上部变形坡体沿着软弱部位形成的拉裂缝逐渐贯通,而产生向临空面的位移滑动。在四级坡,产生了受层面控制的次级滑动。

1.3 一级边坡大桩号侧裂缝变形机理分析

由于本区域历史上经历过多期构造运动,形成了较为复杂的构造表现,褶皱、揉皱、挤压等地质现象发育。大桩号侧坡体右临河谷,边坡基本呈垂直状态,底部由于受到河流侵蚀的作用,形成了“凹岸”现象。从其岩性特征来看,本段岩体呈软硬互层状发育状态,岩体中发育薄层状炭质板岩,倾角 $5^{\circ}\sim 10^{\circ}$,岩性较软,在地下水的作用下易产生软化现象;从地质构造来看,岩体中发育一组与坡面近于垂直、与河谷大致平行的陡倾角节理,产状为 $N75^{\circ}W/SW\angle 80^{\circ}$ 。水流长期侵蚀作用下,使得岸坡底部形成“凹岸”,而坡体底部发育的软弱层—薄层状炭质板岩—不断受到水的软化作用,其力学性能不断降低,在重力作用下,坡体沿其向坡前临空方向产生缓慢的蠕变性滑移。滑移面的锁固点或错列点附近,因拉应力集中沿 $N75^{\circ}W/SW\angle 80^{\circ}$ 组节理生成与滑移面近于垂直的拉张裂隙,且逐渐向上发展并伴有局部滑移,见变形机理示意图3。在边坡开挖过程中,由于受到爆破振动荷载及雨水等诱导因素,处于蠕滑—拉裂^[5]阶段的变形坡体沿软弱层向临空面剪出加速而形成下宽上窄至发散状态的拉裂缝。

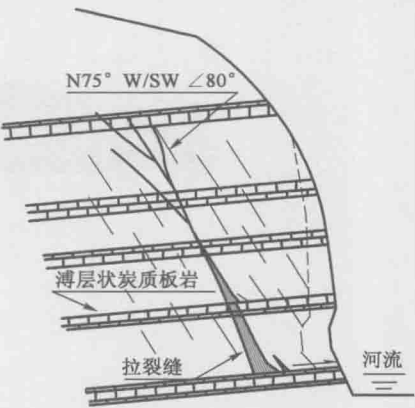


图3 大桩号侧裂缝变形机理示意图

1.4 边坡变形破坏机理有限元数值模拟

为从力学机理分析边坡变形产生的原因,在岩体结构调查的基础上,建立二维有限元模型分析边坡开挖后应力及变形特征。

模拟结果的准确性,取决于岩体物理力学参数的合理性。本次计算采用的物理力学参数是在考虑到顺层边坡形破坏主要决定于层面的物理力学性质的基础上,运用工程地质类比分析岩土体参数,结合结构面参数进行综合取值。岩体物理力学参数综合取值见表1。计算采用莫尔—库仑屈服条件的弹塑性模型,建立图4所示的二维有限元模型分析边坡开挖后应力及变形特征。

岩体物理力学参数取值表

表1

岩土体名称	弹性模量(MPa)	泊松比	容重(kN/m³)	内聚力(kPa)	内摩擦角(°)
坡残积覆盖层	250	0.36	20.6	20	25
全风化板岩	500	0.34	24.0	40	28
强风化板岩	1000	0.29	25.5	260	32
弱风化板岩	2300	0.26	27.0	470	43

从模拟结果可以看出,(1)边坡开挖后,出现以边坡坡脚为最小主应力集中部位,集中的最小主应力值为一350kPa。(2)在边坡坡脚部位产生剪应力集中,集中的剪应力值为80kPa;(3)在二、三、四级坡坡脚部位产生局部、小范围的塑性区;在边坡坡体内部全、强风化界面处产生塑性区,产生的塑性区呈条带状分布。