

水对公路工程的危害及公路建设对水环境的影响^{*}

张林洪¹, 王甦达¹, 唐正光¹, 吴华金², 段 翔², 彭绍勇²

(1. 昆明理工大学 电力工程学院, 云南 昆明 650224; 2. 云南省公路咨询公司, 云南 昆明 650093)

摘要: 水对公路的路基、路面、隧道等结构都会产生危害, 而公路建设也会对沿线的地下水环境产生影响。进行公路排水对提高使用道路的寿命和服务质量有积极的作用, 但也应考虑公路建设对地下水和地表水环境的影响。

关键词: 公路工程; 地下水; 环境; 水损害; 地质灾害

中图分类号: U461.1; X143 文献标识码: A 文章编号: 1000-811X(2008)01-0076-06

0 引言

在公路的建设和运营中, 存有许多的工程地质问题, 如: 滑坡、崩塌、地裂缝, 沉陷(含不均匀沉陷), 泥石流, 隧道片帮、冒顶、塌陷、突水突泥, 采空区塌(沉)陷, 水库坍岸, 地震液化等; 在黄土地区会存在有沉陷、滑坡, 原有道路冻胀与翻浆、边坡变形、边沟冲刷、路基沉陷等病害; 在冻土地区会有沉陷、滑动、开裂等冻土融化造成的病害问题; 在膨胀土地区会产生滑坡、地裂、流坍、冲沟等病害; 在盐渍土地区会由于产生盐胀、疏松、淋溶、溶沉等造成公路工程的沉陷、开裂等破坏以及盐渍土的化学腐蚀破坏作用; 在软土地区存在有沉陷、不均匀沉陷、以及承载力不足而产生的滑动破坏等^[1-3]。

公路工程存在的以上工程地质问题, 基本上都与水有关, 据有关研究, 由于地下水的存在产生的推力、浮力会造成边坡的安全系数降低0.5~0.8^[4]。沉陷是由于地基土体的孔隙率发生变化, 当地基产生的地下水位发生变化时, 由于有效应力的增加而导致地基产生沉陷, 同时由于地下水的存在, 会降低地基土体的弹性模量, 在上部结构或荷载发生变化时, 地基就会产生较大的沉降变形, 在上部结构的荷载或地基的地质条件不同、水文状况存在差异时就会产生不均匀沉降。在有足够的松散堆积物情况下, 如果在降雨和松散堆

积物充分被水浸泡时, 就可能发生泥石流。从岩石力学研究知道, 岩石含水量增加, 强度就会降低(即软化), 隧道围岩在被水软化后强度降低, 就会导致或进一步导致片帮、冒顶、塌陷的发生, 当隧道通过被水饱和、软化的软弱带、岩溶发育带的松散岩层时, 就会导致突泥, 地下水压力较大时就会产生突水。水库坍岸除与水库的蓄放水、岸坡岩土体强度等有关外, 还与地下水位密切相关, 地下水位高、岸坡也就容易坍滑, 地下水位低岸坡就不容易坍滑。地震液化只能发生在地下水位高的粉土、粉砂等地层中, 如果只是有粉土、粉砂, 地下水位低, 在地震作用下也是不会产生液化的。在黄土地区如果没有地下水的作用, 就不会产生溶蚀空洞, 即使有黄土的溶蚀空洞存在, 没有地下水的作用, 发生沉陷、滑坡、道路冻胀与翻浆、边坡变形、边沟冲刷、路基沉陷等病害也是很困难的。在冻土地区, 地下水会影响地下土体温度, 及冰冻的物质来源, 进一步影响冻土层的厚度, 进而影响沉陷、滑动、开裂等冻土冻融化产生的病害。在膨胀土地区, 如果没有地下水和含水量的变化, 膨胀土就不会产生收缩或膨胀, 也就不会产生膨胀或收缩裂缝, 雨水对边坡的楔胀软化等就不会起作用, 就很少存在滑坡、地裂、流坍、冲沟等病害; 在盐渍土地区没有地下水的渗流或地表水的流动, 就不会导致盐渍土的盐分物质溶解、流动和沉积, 也就不会产生盐胀、疏松、淋溶、溶沉等造成公路建构筑物的沉陷、开

* 收稿日期: 2007-06-05

基金项目: 云南省交通厅重点科技项目(TST(2005)52B104C)

作者简介: 张林洪(1962-), 男, 贵州安顺人, 教授, 主要从事岩土工程、道路工程、水利水电工程研究。

E-mail: Z621112@126.com

裂等破坏以及盐渍土的化学腐蚀破坏作用。在软土地区, 地下水的变化或存在, 是造成软土固结、沉陷和不均匀沉陷的主要因素, 如果地下水位很低, 软土固结就很快和很早完成, 在工程建设期间或建成后沉降就小, 强度也就大, 承载力也随之增大, 也就不会导致或很少导致过大的沉陷或不均匀沉陷, 以及承载力不足的问题。由此可以看出, 地下水或降雨的影响是发生地质灾害起决定性或重要性作用的因素。

据云南省公路局 2001 年 8 月的统计, 云南省省管公路在 2001 年的前几年水毁直接经济损失平均每年达 1 亿多元人民币, 就 2001 年 7 月底前的 7 个月经济损失就达 1.27 亿元人民币, 云南省县乡公路近几年水毁直接经济损失平均每年达 2 亿多元人民币。

由于公路工程的建设, 要进行路堑、洞室的开挖, 桥梁基础的开挖填筑、路堤的填筑, 特别是在山区公路建设中, 要大量开挖和填筑。这就会导致有些路段地下水位大幅度降低, 有些路段地下水位升高; 有些路段地下水水质发生改变。严重影响公路沿线的生产和生活用水, 生态环境产生破坏。

造成水对公路危害, 公路建设、运营对地下水环境产生影响的原因是多方面的, 主要原因有如下几方面:

- (1) 对水对公路的危害认识不足, 不能在设计、施工中认真对待公路工程的防排水问题。
- (2) 对水在路基路面中的渗流规律认识不足, 难以研究科学合理的布设排水设施。导致相关的公路防排水设计规范、准则不是非常科学合理, 也有脱离实际的情况。
- (3) 对公路的修建、运营对地下水的影响和破坏认识不足, 理论研究少。
- (4) 其他还有施工管理、施工中的传统习惯等的影响, 使得公路防排水措施的实施及其质量大受影响, 因而达不到合理进行公路防排水和保护地下水环境的要求。

2 公路路基路面内部渗水来源及途径

降雨、冰雪融化等是路基路面内部水的主要来源, 除了雨雪等以外, 人为作用(如水库、水田、灌溉、绿化、城镇区生产、生活用水等)也会使路面在大部分时间充满水; 在山区或切方路段的地下水、冰雪融化、地下渗水等都会向路基路

面供水; 地形地貌也会影响或限制水的渗入或渗出^[5]; 此外, 地质构造、岩性等也会影响或限制水的流入或流出。

降落在路面表面的水, 会通过路面裂缝、接缝或面层空隙下渗到路面结构内部; 地下水位高时, 地下水会通过毛细管上升进入路面结构下部; 此外, 道路两侧有临空面时, 水分也有可能进入路面结构内部^[6]。曹光论等^[7]调查发现有些中央分隔带封闭的高速公路, 由于没有设置内部排水系统, 可以发现路面产生唧泥的现象; 路面的缩缝和纵缝也是雨水下渗的通道。杨铁轮等^[8]调查发现在沥青混凝土硬路肩与现浇混凝土拦水带相接处出现断裂, 产生裂缝, 这是由于路堤边缘压实不足, 而且又处于路面浅三角形集中过水断面范围内。这些裂缝会渗水进入路面结构之中。

Harry R. Cedergren 研究了路面结构中地下水水分来源主要有^[9]: ①路表水由路面边缘、接缝和裂缝以及沥青混凝土路面本身的渗透进入路面结构; ②冬、春季节地下水位的升高以及毛细管或相互连通水膜中水的垂直运动进入路基路面。

1989 年 Hagen 等在对水泥混凝土路面横向接缝填封情况对表面水渗入的影响进行了试验观测, 测量结果表明, 横缝填封的初期, 渗水量急剧减少, 但两周以后, 即使表面看上去填封料完好如新, 渗水量也会恢复到填封前的水平, 因而接缝的填封仅在短期内起到阻止表面水入渗的作用^[9]。进入路面结构内的自由水可以通过向路基下部渗流而逐渐排走。当路基为低透水性土(渗透系数 $\leq 10^{-5}$ cm/s), 两侧路肩也由低透水性土填筑时, 路面结构便类似于被安置在封闭的槽式“浴盆”内, 进入路面结构内的水分, 无法向下或两侧迅速渗漏^[6]。

3 水对公路工程的影响

3.1 水对路面的损坏

当沥青混合料的实际孔隙率在 8% 以下时, 沥青层中的水以薄膜水的状态存在, 荷载作用下不会产生动水压力, 不容易造成水损害; 而实际孔隙率大于 15% 的排水性大孔隙沥青混合料, 水能够在混合料内部孔隙中自由流动, 混合料很难留住水, 在加上这种混合料普遍采用改性沥青, 也不容易造成水损害; 而当空隙率介于两者之间(8% ~ 15%)时, 水容易进入混合料内部, 又不会自由流动, 以毛细水的状态存在, 在行车荷载作

用下，产生较大的毛细管压力，成为动力水，最容易造成沥青混合料的水损害^[10]。

龙锦松报道了金山路(国道 325 线阳江过境段的水泥混凝土路面)1994 年底建成通车，经过一段时间的运营，路面出现早期破坏，其特征是：纵、横缝出现冒水，接着冒出泥浆，冒浆现象的日益加重，导致面层与基层脱空，使面板边缘部分失去支承，很快混凝土面层出现裂缝，特别是 2000 年雨季出现了大面积早期破坏^[11]。曹光论报道了安徽主要采用水泥稳定碎石作为水泥混凝土基层，底基层大多采用石灰土，一般水泥用量 4% ~ 5%，7 d 浸水无侧限抗压强度不小于 3.0 MPa，从面板破坏的情况看，主要是唧泥引起的错台和板底脱空，断裂等病害，调查发现，唧泥不仅在基层表面产生，而且随着运营时间的延长唧泥也发展到石灰底基层表面。因此，水泥混凝土路面基层不仅要有坚强稳固的支撑，而且更要有抗冲刷的能力。除完善排水系统外，保证水泥稳定碎石基层的施工质量，提高抗冲刷的能力至关重要。水泥混凝土路面遭受“水”破坏的现象比较严重。有些路段在凿开面板时，可发现各结构层裂隙间渗水极为明显，路基湿软，甚至出现“涌水”现象^[7]。

魏云杰等报道了几个典型路段^[12]：①107 国道武胜至王家湾段的二级公路，1991 年建成热拌沥青碎石路面，设计使用年限 10 年，1994 年大面积出现龟裂、唧泥、坑槽等损害。1995 年改建成水泥混凝土路面，设计使用年限为 30 年，2003 年出现大面积唧泥、脱空、断板、错台和破碎病害。②316 国道伏水至随应桥段，1993 年建成热拌沥青碎石路面，1997 年改建成水泥混凝土路面，设计使用年限 30 年。2001 年开始就出现较严重的水损害，随即对 21% 的板块进行了翻修处治，2002 年对其中破损面积较大的 8 km 地段进行了 1~2 层水泥稳定粒料和沥青砼的加铺处治。③某市政部门 2002 年新建一条长 15 km 的外环公路，公路等级为二级，路面结构为 9 cm 沥青混凝土 + 34 cm 水泥稳定粒料基层 + 15 cm 12% 的石灰稳定底基层，通车后一个雨季就出现了开裂、唧泥、破碎和坑槽等损坏。通过试验和实地观察发现，沥青混凝土实际孔隙率达到 8% 以上，密水性较差，而半刚性基层透水性又差，导致雨水滞留在沥青混凝土面层与半刚性基层之间，在行车的反复作用下出现早期水损坏。

Harry R. Cedergren 认为：新的排水刚性路面寿命至少比不排水刚性路面长 50%，新的排水柔性

路面平均寿命至少比不排水刚性路面长 33%。Mathi D. M. 认为设置良好的排水系统后，沥青混凝土路面的使用寿命提高 30%^[9]。威斯康星州运输局的路面设计工程师认为，排水系统可使水泥混凝土路面的寿命约增加 25%^[5]。Mathi D. M. 认为引起路面破坏的最普通的起因是下面层的弱导水性，良好的路面排水能延长弱导水性路面的寿命 10 ~ 40 年。Cedergren (1998 年) 提出如果修建内部排水设施的路面工程可以延长 3 倍使用寿命；Forsyth 等的研究表明具有排水设施的水泥混凝土路面的裂纹比没有排水设施的水泥混凝土路面的裂纹减少 2.4 倍，具有排水设施的沥青混凝土路面和水泥混凝土的寿命可以延长 33% 和 50%；Ray 和 Christory 指出未排水路面的使用寿命与排水路面的使用寿命比较，其使用寿命降低近 70%。美国联邦公路局 1955 年和 1960 年研究表明，含水路面的破损速度比带有自由排水结构的路面快 10 ~ 40 倍，在降雪融化期间破损速度会升到 70 000 倍^[5]。国道 107 线许昌以北的水泥混凝土路面设置边缘排水后，路面唧泥明显减少，混凝土面板的断块率大大下降，由以前每年的 2.5 ~ 3.0 倍的增长系数下降到目前的 0.5 ~ 1.0 倍，有效地延长了路面使用寿命^[11]。据不完全统计，湖北省水泥混凝土路面的设计使用寿命一般为 20 ~ 30 年，而实际使用寿命只有 10 年左右，有一部分甚至更短；沥青混凝土路面(含热拌沥青碎石路面)设计使用寿命一般为 10 ~ 15 年，而实际使用寿命只有 5 ~ 10 年，还有极个别甚至在第 2 年就出现大面积损坏。

Jorge R. Parra and Awilda Blanco 对饱和垫层、基层材料进行试验表明，在剪切循环荷载作用下，应力控制试验时其剪切强度基本保持不变(由于较大的负孔隙水压力)；而应变控制时剪切强度迅速下降(由于很小的应变时正孔隙水压力使有效应力减小为零)；在几个循环荷载作用下，饱和垫层、基层失去大部分强度，这能解释路面早损的现象。在进行 20 个循环荷载后，主应力差只是第一个循环主应力差的 10%^[13]。

John J. Bowder and Awilda 对基层料进行渗透试验发现，在交通荷载作用下，基层料不可能允许水排除的足够快，从而导致超孔隙水压力的产生和基层料强度的损失。对 5#基层料的现场和室内试验表明：渗透性很低以至于可以认为不排水^[14]。

在东北的几条公路调查发现^[15]，春融期内在较长山坡的坡脚处都有不同程度的翻浆病害，一

些坡顶(填高)也发现了翻浆现象, 在城镇段由于填高受到限制, 致使路线纵断面凹点发生翻浆。分析原因是坡脚和路线纵断面凹点由于融化水流使路基受力区含水量超过液限含水量, 从而导致路基严重的翻浆。

综合上述文献看, 在路面结构设计时, 除了保证一定的结构尺寸和强度外, 还应保证路面结构具有足够的排水能力和抗冲刷能力。但是, 要保证路面不透水是很困难的, 主要是因为在行车荷载、气温变化、结冰压力等的作用下, 路面会产生裂缝, 随着水的作用和行车荷载的作用, 裂缝又会变大变宽, 渗入路面的水又会进一步增加, 水损坏会更加严重。因此, 在一定的路面结构尺寸和强度情况下, 加强路面结构内部的排水是减少路面损坏的重要措施。

设置边缘排水系统后, 使路基土湿度降低28%左右, 强度提高(模量提高18%~63%), 路面寿命也随之提高^[16]。路基的排水不但可以提高自身的强度和稳定性, 还可以提高其抗变形能力, 进一步提高路面的使用性能和延长路面的使用寿命。

许多由于行车冲击引起的含水路面损坏(泵吸、磨损、脉动孔隙水压力等)不会由于基层或底基层厚度的增加而减小, 试图在有自由水作用的情况下一起增加结构的厚度和宽度尺寸都是不经济的。美国的调查表明, 大多数的重载路面的弱透水是路面损坏的主要因数, 良好的排水比较差的排水路面更经济^[5]。

3.2 水对路基的破坏

岩土体饱水状态时的边坡稳定性一般比干燥状态时低。广义孔隙水压力作用于岩体结构面(或潜在破坏面)上, 表现在三个方面^[17]: ①降低该面的正应力, 减小摩阻力, 进而降低崩滑体的抗滑力; ②动水压力沿边坡临空面产生的分量增加了下滑力; ③孔隙水压力的“水楔作用”推动了裂隙的扩展进程, 进而破坏岩体, 使边坡发生渐进性破坏。此外, 水还会软化滑动面的岩土体, 降低边坡滑动面的力学强度; 增加坡体的重量, 导致下滑力增加。

路基过多的地下水会使路基泡软、坍塌, 严重影响路面结构的安全^[18]。湘耒高速公路路面结构横断面由下至上分别由15 cm4%水泥稳定底基层+17 cm6%水泥稳定基层+沥青封层+27 cmC40砼面层构成。K56+000~K72+4 000路基于1999年2月建成, 因春季雨水连绵不断和行车影响, 路

基上路床严重软化。对该路段进行深层钻孔取样分析, 降雨后路基含水量路床达到20.4%~24.7%, 比填筑时含水量14.8%~16.7%高5~6个百分点, 比平均最佳含水量高5.8个百分点, 路基压实度降低3~4个百分点; 湘耒高速公路底基层采用4%水泥稳定砂砾, 基层采用6%的水泥稳定砂砾, 某合同段施工结束并经交工验收合格后, 由于重车和雨水的双重作用, 基层开裂比较严重, 局部路段基层松散, 雨水沿裂缝和松散处下渗, 加速了路基与基层承载力下降, 对某段基层弯沉进行测试, 由于雨水沿裂缝和松散处下渗, 路基软化, 导致交工验收合格的基层弯沉值严重超标(超标50%以上)^[19]。

水在岩土体中产生的动水压力会推动岩体或土体产生滑动或渗流破坏(如流土、管涌等), 起动水压力J的大小与水的容重 γ_w 和水力坡降i有关($J = \gamma_w i$)。水对岩土体抗剪强度($\tau f = c' + \sigma' \tan \varphi' = c' + (\sigma - u) \tan \varphi'$)的降低主要体现在降低有效正应力(正应力从 σ 降低到 $\sigma - u$, u 为孔隙水压力); 同时由于岩土体含水量增加, 岩土体之间的吸力(即凝聚力c)以及摩擦角(φ)会大幅度降低, 从而导致岩土体的强度降低。

综上所述, 水对路基的危害主要是降低边坡的稳定性, 引起边坡的滑动、坍塌; 软化路基, 导致路基变形增大, 进一步引起路面的破坏。

4 公路建设对地下水环境的影响

公路建设会阻断路线两侧地下水和地表水的流动交换, 造成在一侧或两侧产生积水, 由于积水时间长会导致水中的盐分的析出沉淀, 而使其公路沿线土地盐碱化, 如华北某条公路就出现这种现象。由于道路的开挖修建, 特别是隧道和深路堑的开挖, 会产生地下水被排走, 导致地下水位降低, 使地表泉水干枯, 如云南昆石高速公路的某隧道就造成上部三个村的村民没有生活用水, 部分农田丧失灌溉用水; 甚至导致地表河道断流或改道, 如云南元磨高速公路的大风垭口隧道, 由于隧道塌陷就造成地表河道断流, 而隧道排出的水从另一方向的河道流走, 造成地表水的改道。有时由于地表开挖, 使其下覆强透水层接受地表雨水, 造成强透水层地下水位升高, 而使其原来地表没有泉水的地方出现泉眼, 如云南元磨高速公路的18标一段路, 由于原居民民房上侧修建公路, 居民房中出现地下水渗出而不能居住。有时

由于公路隧道或路堑的修建，使其地表蓄水、输水建筑与隧道或路堑产生水力联系，从而导致地表蓄水、输水建筑不能发挥正常作用，或者使公路不能正常运行，如云南元磨高速公路 17 标，由于隧道的修建使上部电站引水渠发生漏水，不能正常运行，而下部公路隧道透水现象严重，不得不进行处理。

地下水埋深在路基设计中具有举足轻重的地位。地下水埋深大小决定着路基设计的高度，如果路线布设在盐碱土地区，甚至要考虑是否需要在路基中设置隔断层等处理方法^[20]，避免含有大量盐碱的水对公路产生危害。在设计中应注意不同勘探时期、地形、生产活动、地下水来源、地下水与地表水的关系对地下水位变化的影响。

胡文儿等系统总结了沪芦高速公路工程沿线的地下水位变化规律，研究了地下水位对路基湿度的影响以及与土张力之间的关系，提出了路基相对高度最小值以及纵坡设计中路基及路面最小设计标高的原则和方法^[21]。程星等以贵州公路为例，研究了岩溶地区公路建设的地下水环境破坏形式，主要破坏形式有以下几类^[22]：①改变水流方向；②阻断地下水补给源；③截断地下水的流通路径；④封堵地下水的排泄口；⑤工程扰动造成水环境破坏；⑥复合型的水环境破坏，并按补给区、过渡区、排泄区分别提出了水环境破坏的保护策略。赵吉元根据深圳盐坝高速公路下洞跨海大桥海水、地下水腐蚀情况，提出了混凝土防腐蚀设计和施工方法，并通过实际应用实践^[23]。石冠萍分析了府-店公路煤炭开采对地下水位的影响，以及公路运输对周边环境的影响^[20]。朱志铎等对沪杭高速公路的地基处理对运营后的路基质量影响分析后认为：路基中的水位一般比较稳定，在正常天气情况下，水位一般保持常态。若路基顶部处于饱水状态，则车辆荷载的往复作用逐渐削弱路基的强度，产生路面的开裂及翻浆现象^[24]。

地下水会使土体和岩体的强度和稳定性降低而造成危害，产生各种不良的自然地质现象和工程地质现象，如滑坡、岩溶、潜蚀、地基沉陷、道路冻涨和翻浆等。轻者中断交通，重者危及人民群众的生命安全。而在现实工作中，人们往往忽略地下水对公路的危害，为维护交通，一般采用应急性措施，即“头痛医头、脚痛医脚”的处治方法，出现的问题难以得到根治，来年雨季一到，便又复发。目前的处治方法有以下几种：①增高

路基；②加强路基排水；③铺砂垫层；④换土；⑤设置隔离层。

地下水对隧道工程的不良影响一般可以分为如下三个方面^[24]：①对隧道围岩的不良影响，体现在可能引起隧道围岩发生溶解、溶蚀、冲刷、软化，或产生静水压力，或引起膨胀压力，改变围岩的物理、化学性质，降低围岩的强度，进而引发一系列的问题；②侵蚀性地下水及其对隧道结构的影响，由于混凝土是多孔的固液气三相共存的非均质材料，其所处环境的某些侵蚀性物质很容易进入混凝土内部，与混凝土、钢筋发生各种物理化学反应，从而引发混凝土的破坏、影响混凝土的耐久性；③地下水对隧道运营环境的影响，主要体现在造成隧道内潮湿、恶化行车环境、及对隧道内电器设施造成不良影响。

5 结论

大量的公路运行实践证明，路基含水量过多，其填筑体力学强度降低，孔隙水压力和动水压力的存在，造成路堤边坡坍滑失稳；如填筑体中水流流速过大或集中渗流，会产生管涌带走路基填筑料，造成路基的破坏；在寒冷地区，路基填筑体会产生冻胀破坏；在多地震地区，粉细砂、粘砂土等容易在地震时产生液化、喷砂、冒水现象，造成沉陷；膨胀性土会在吸水和失水时，分别产生膨胀和收缩，造成路基的破坏。公路地基含水量过多，承载力下降、沉降量大，使公路沉降过大或产生不均匀沉降，产生桥头跳车等。

水对路面的影响：沥青混凝土路面及水泥混凝土路面的过早损坏，造成沥青混凝土路面出现翻浆冒泥、松散、鼓包、坑塘等破损；在水泥混凝土中，当水渗入路面结构后在汽车运行的动静荷载作用下，会加速裂隙的扩展，使路面产生翻浆冒泥、基层产生掏刷，面板产生错台、断裂等；路基、地基、边坡在水或其他因素的作用下的失稳、沉降反过来也会对路面产生损坏，改变路面水流状态，加速路面的破坏，从而使整个路面结构的使用性能迅速变坏，使用寿命大大缩短。

根据国内外的研究及工程实例，进行路基路面的排水能使其强度、刚度提高，寿命延长，维修费用降低。但在公路建设和运营中应注意对地下水和地表水环境的保护。

参考文献:

- [1] 程尊兰, 耿学勇, 党超, 等. 川藏公路 G317 线路基水毁危害度分段研究[J]. 灾害学, 2006, 21(4): 18–23.
- [2] 张敏静. 公路路基病害类型及处治对策[J]. 灾害学, 2001, 16(1): 88–91.
- [3] 黄建榕. 陕西户 – 洋高速公路地质灾害危险性评估[J]. 灾害学, 2003, 18(3): 39–45.
- [4] E. Hoek, J. Bray. 岩石边坡工程[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1983.
- [5] Cedergren H. R. Drainage of highway and airfield pavements[M]. New York: John Wiley & Sons, 1974.
- [6] 姚祖康, 沈惠生. 路面结构的内部排水设施[J]. 公路, 1997(5): 17–23.
- [7] 曹光论, 资恩怀. 高速公路水泥混凝土路面有关问题的探讨[J]. 安徽建筑, 2001, 8(4): 112–115.
- [8] 杨铁轮. 高速公路排水设计的改进[J]. 兰州铁道学院学报, 2002, 21(3): 107–110.
- [9] Harry R. Cedergren. Drainage of Highway and Airfield Pavement [M]. John Wiley & Sons Inc. New York, Ougust 1974.
- [10] 张书建. 利用空隙水泥混凝土排除水泥混凝土路面结构内部积水的实践[J]. 中南公路工程, 1998, 23(3): 22–23.
- [11] 龙锦松. 多雨地区混凝土路面渗水病害探讨[J]. 中南公路工程, 2000, 25(4): 21–22.
- [12] 任加国, 杨艳娜, 卢书强, 等. 西部公路路基内部排水效果模拟研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2003, 14(1): 21–24.
- [13] Jorge R. Parra and Awilda Blanco. Hydraulic and Strength Performance of Missouri's Type-5 Base Material. Midwest Transportation Consortium Fall Student Conference[R]. University of Missouri-Columbia. 2002.
- [14] John J. Bowder and Awilda M. Blanco. Charaterization of Permeability of pavement Bases in Missouri Department of Transportation's System [R]. University of Missouri – Columbia. 2002.
- [15] 李梦真, 赵振国, 王银波. I 区公路翻浆病害治理的一点研究[J]. 东北公路, 1997, 20(4): 56–59.
- [16] Mathi D. M. Permeable base design and construction proceeding [R]. 4th Inter-national Conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation. Purdue University, 1989.
- [17] 陈洪凯, 翁其能. 边坡岩体中地下水优化排水机理研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2000, 11(2): 59–62.
- [18] 周强. 深汕高速公路路基、路面排水处理[J]. 中南公路工程, 1999, 24(4): 77–81.
- [19] 龙健康, 李健, 侯运秋. 湘耒高速公路内部排水分析与优化设计[J]. 中南公路工程, 2002, 27(1): 1–4.
- [20] 石冠萍. 浅谈府 – 府公路沿线环境综合治理[J]. 榆林科技, 2005, (3): 47–48, 35.
- [21] 胡文儿, 杨戈. 软土地区低路堤路基相对高度与纵坡设计[J]. 上海公路, 2005, (1): 11–13.
- [22] 程星, 郭明, 石方红. 岩溶地区公路建设对地下水环境的破坏形式及其保护对策研究——以贵州高原为例[J]. 中国岩溶, 2005, 24(2): 125–128.
- [23] 赵吉元, 郑振声. 深圳下洞大桥钢筋混凝土防腐设计和应用[J]. 公路交通技术, 2004, (5): 35–39.
- [24] 朱志铎, 郝建新, 王四根. 京福高速公路徐州东绕城强夯地基试验研究[J]. 土工基础, 2004, 18(2): 9–12.
- [25] 吕康成, 崔凌秋. 隧道排水设计指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [26] 谢家全, 唐蓓华. 广靖、锡澄高速公路路面排水的设计与探索[J]. 江苏交通工程, 1999, (S0): 128–131.
- [27] 资建民. 路面结构内部排水系统[J]. 武汉城市建设学院学报, 1999, 16(4): 42–45.

The Harm of Water to Highway and Influence of Highway on Water Environment

Zhang Linhong¹, Wang Suda¹, Tang Zhengguang¹, Wu Huajin², Duan Xiang² and Peng Shaoyong²

(1. Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China;

2. Yunnan Corporation of Consulting, Kunming 650093, China)

Abstract: Water is harmful to roadbed, road surface and tunnel. Construction of highway may influence the groundwater environment along the highway. The drainage of highway has some positive effect to improving the service quality and prolonging service life of the highway. But the influence of drainage to ground water and surface water environment should be consider in highway construction.

Key words: highway engineering; ground water; environment; water damage; geological hazard