

文章编号: 1006-2106(2011)12-0035-05

多年冻土区斜坡路堤稳定性的探索^{*}

魏永幸¹ 薛新华^{2**}

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031; 2. 四川大学, 成都 610065)

摘要: 研究目的: 高原、冻土和环境问题是青藏铁路建设的三大难题, 其特殊性和复杂性在世界铁路史上独一无二。由于独特的环境和气候条件, 导致青藏铁路多年冻土区斜坡路堤的稳定性异常复杂并具有多变性。因此, 为保证青藏铁路路基长期稳定和运营安全, 应加强对多年冻土区斜坡路堤的系统研究。

研究结论: 多年冻土斜坡路堤的稳定性计算, 不仅要参考普通斜坡分析的方法, 也要考虑边坡失稳的时间因素; 除此以外, 还可以从填料的选取、铺设土工格栅、采用抗滑桩加固等方面提高多年冻土地区斜坡路堤的稳定性。通过本文研究希望能对今后的高原铁路建设及运营管理提供参考和借鉴。

关键词: 青藏铁路; 多年冻土; 斜坡路堤; 稳定性

中图分类号: U213.14 **文献标识码:** A

Exploration on the Stabilization of Embankment on Slope in Permafrost Regions

WEI Yong-xing¹, XUE Xin-hua²

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd, Chengdu, Sichuan 610031, China; 2. Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China)

Abstract: Research purposes: Plateau, permafrost and environmental problems are the three major problems in the construction of Qinghai-Tibet railway, and its particularity and complexity are unique in the world history of railway. The stability of embankment on slope in permafrost regions is extremely complexity and variability due to the unique environment and climate conditions. Therefore, it is necessary to study on the stability of embankment on slope to ensure the long term stability and operation safety of Qinghai-Tibet railway.

Research conclusions: The stability calculation of embankment slope in permafrost regions not only refers to ordinary slope analysis methods, but also considers the time factor. In addition, the stability reinforcement of embankment slope still can take the following methods, such as the selection of filter, the geogrid, the anti-slide piles, and so on. The results drawn in this paper can provide reference to the construction and management of plateau railway in the future.

Key words: Qinghai-Tibet railway; permafrost; slope embankment; stability

青藏高原是世界上面积最大、海拔最高的高原, 地理位置独特, 自然环境恶劣, 地质条件复杂, 素有“世界屋脊”和“地球第三极”之称。青藏铁路全长 1 965 km, 全线海拔高程大于 4 000 m 的地段约 965 km, 其中 550 km 为多年冻土地段, 216 km 为九度地震区。高原、冻土和环境问题是青藏铁路建设的三大难题, 其特

殊性和复杂性在世界铁路史上独一无二。与一般地区的铁路斜坡路堤相比, 特殊环境下土体正、负温度交替和波动所引起的土中固液相剧变, 使多年冻土区路基及地基土工程性质发生了系列特殊变化, 影响斜坡路堤的稳定性。相应的路基稳定性评价标准也需要与之相适应。因此, 为保证青藏铁路路基长期稳定和运营

* 收稿日期: 2011-07-02

** 作者简介: 魏永幸, 1964 年出生, 男, 教授级高级工程师, 现任中铁二院工程集团有限责任公司技术中心副主任; 薛新华, 1977 年出生, 男, 讲师。

安全,应加强对多年冻土区斜坡路堤的系统研究。本文首先介绍了笔者多年来对斜坡软弱地基路堤的研究以及工程经验,进而对多年冻土区斜坡路堤稳定性提出了自己的认识与思考,希望能对今后的高原铁路建设及运营管理提供参考和借鉴。

1 斜坡软弱地基路堤变形特性及工程对策

斜坡软弱地基是山区常见的一种特殊地基类型,具有两个基本特征:一是地基表面或基底具有向外的横向坡度;二是地基土具有相对较低的强度和较高的压缩性,在填土作用下将产生明显的压密沉降和变形。工程实践表明,在斜坡软弱地基上的填方工程如路堤等,其安全性主要受填方及斜坡地基过量侧向变形的控制,相对于水平软弱地基,其失稳的可能性更大。水平软弱地基与斜坡软弱地基路堤地质力学模型简图如图 1 所示。

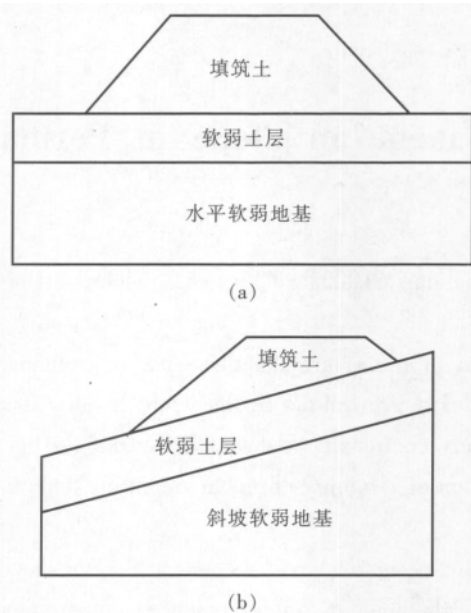


图 1 水平软弱地基与斜坡软弱地基路堤地质力学模型

1.1 斜坡软弱地基路堤变形特性

在路堤荷载作用下,斜坡软弱地基路堤的变形不同于水平软弱地基,其差异主要表现在以下几个方面^[1]:

(1) 水平软弱地基的变形对称于路堤中心线,而斜坡软弱地基的变形表现为明显的不对称性,变形主要集中在路堤下坡一侧。

(2) 在地层有坡度的情况下,路堤下坡一侧坡脚处的水平滑移和竖向隆起现象都较地层为水平情况时显著。

(3) 以地基软弱土层厚度 6 m、路堤高度 8 m、地层坡度为 1:10 为例,经过研究发现,斜坡地基最大水

平位移、最大竖向沉降以及最大剪应变分别为水平地基相应值的 3.9 倍、1.4 倍和 3 倍左右。

(4) 随着地层坡度、路堤高度、地基软弱土层厚度的增加,斜坡软弱地基的最大水平位移值和最大竖向沉降值相应增大,最大值发生位置向下坡一侧移动。其中,地层坡度和路堤高度的影响相对较大,地基软弱土层厚度的影响相对较小。

(5) 斜坡软弱地基路堤在无任何工程措施时,软弱地基在路堤荷载作用下产生压密沉降的同时,将产生较大的横向变形,并主要集中在下坡一侧,且在下坡一侧坡脚处出现显著的隆起现象;地基软弱土层的变形模量对斜坡软弱地基的变形影响较大,随着地基软弱土层的变形模量的减小,地基的最大位移、水平位移、竖向位移值等均有大幅度的增加。

(6) 随着路堤高度、地基坡度、地基软弱土层厚度的增加及软弱土层强度的降低,斜坡软弱地基在路堤荷载作用下的最危险滑动面圆弧半径逐渐增大,滑动面切入地基软弱土层的深度逐渐增加,直至滑动面与地基软弱土层底部的稳定基岩面相交,由圆弧滑面转变为复式滑面。

1.2 斜坡软弱地基路堤工程对策

斜坡软弱地基在路堤荷载作用下,路堤下坡一侧坡脚附近地基的剪应变、水平变形均较水平软弱地基大,这是斜坡软弱地基较水平软弱地基更容易引起地基失稳的根本原因。因此,对于斜坡软弱地基路堤,应采取限制或减小地基剪应变、水平变形的工程措施。具体而言,主要分为清除地基软弱土层、提高地基抵抗变形能力以及限制地基侧向变形发展等三个方面。

限制地基侧向变形发展,可有效保证斜坡软弱地基路堤的稳定,具体措施依据技术途径又可分为主动限制和被动限制两类。所谓被动限制,就是在路堤坡脚设置钢筋混凝土侧向约束桩,抵抗地基侧向变形。对于水平软弱地基,可采用放缓路堤坡率或增设反压护道、采用齿墙以及钢筋混凝土侧向约束桩等。对于斜坡软弱地基,由于地面具有一定横坡,采用放缓路堤坡率或增设反压护道对改善路堤稳定性的效果较差,尤其对于横坡陡于 1:10 的斜坡软弱地基路堤更不适合。因此,对于地面横坡较陡的斜坡软弱地基路堤,一般多采用钢筋混凝土侧向约束桩来限制地基水平变形。所谓主动限制,就是采用高强度的钢筋混凝土桩基础(如桩网结构),由桩基础承担路堤及上部荷载,减小斜坡软弱地基承担的荷载和沉降变形。

2 影响多年冻土区斜坡路堤稳定的因素分析

2.1 影响多年冻土路堤稳定的主要因素

修建于多年冻土地区的铁路路堤,其变形主要包

括融沉变形、冻胀变形、压密变形及固结变形^[2],即路堤和地基土在荷载作用下的压缩、固结变形以及由于地温变化而引起的含水或含冰土体体积变化产生的冻胀、融沉变形。影响多年冻土区路堤变形的主要因素有以下几个方面^[3]。

2.1.1 冻土类型

《冻土地区建筑地基基础设计规范》(JGJ 118—1998)^[4]规定:多年冻土季节融化层土根据冻胀率的大小可分为不冻胀、弱冻胀、冻胀、强冻胀和特强冻胀共 5 类;根据融化下沉系数的大小,多年冻土可分为不融沉、弱融沉、融沉、强融沉和融陷土五类。多年冻土冻胀性或融沉性越高,在冻融循环过程中,引起的路堤变形量也就越大。

2.1.2 路堤形式

路堤工程的修建改变了地表的热交换条件,造成对地基稳定状况的扰动^[5]。温度场的变化将导致天然上限位置和形状的改变,进而影响路堤的变形特征。多年冻土地区路基与一般地区路基的一个重要不同之处在于其稳定性具有坡向性的特点。路基阳坡受太阳辐射的时间长、强度大,因而阳坡面吸热大于阴坡面。线路的走向影响了两侧边坡对太阳辐射的吸收,使两侧边坡的温度具有一定的差异。路基越高,边坡坡面越大,阴、阳坡面热效应差距越大。由于冻土的强度、应力和应变等特性与温度有着密切的关系,故两侧边坡温度的差异易引起不均匀沉降、纵向裂缝等各种路基病害。南北走向路基无明显的阴、阳坡效应,其余走向的路基均存在不同程度的阴、阳坡效应。

2.1.3 地表水、地下水

多年冻土地区路堤的修建,改变了地表水和地下水原来的流动条件,当排水措施不完善时,冰雪融水、大气降水等就会聚集在路堤侧面,并和冻结土层中的未冻水在重力作用下向路基及地层深处渗透,使水流与土层间产生对流换热作用,冷季延缓冻土路基冻结面的推进,暖季加深融化深度,其结果往往是造成地下冰融化,路堤下沉甚至塌陷^[6]。冻土中地下水对斜坡体作用主要表现在两个方面:一是地下水对斜坡体的力学作用,包括斜坡体裂隙静水压力,其大小与作用在边坡上的静水压力有关,方向与岩土体重力方向相反。斜坡内的地下水形成较大的静水压力,削弱了软弱面上滑体重量产生的法向应力,使有效应力、摩擦系数减小,从而降低了抗滑力。地下水渗流过程中产生的动水压力也起到促进滑动的作用;二是地下水对斜坡体产生的物理和化学作用,极大地改变着斜坡体的力学性质,使斜坡体的力学性状逐渐恶化^[7]。

2.1.4 地温

青藏铁路所经过的高原冻土区是中、低纬度地带,

海拔较高、多年冻土分布面积最广、厚度最大、温度较低的地区。高原多年冻土是青藏高原自然地质历史的产物,而其中起决定性作用的因素是全球性气候变化所造成的不同周期的气候波动,它制约着高原多年冻土发生的地域差别及其冻土演变程度的空间分布规律。气候变化的影响主要是通过冻土地温场的变化表现出来,地温场的变化会使高原多年冻土的工程地质条件发生着越来越明显的变化,因而对以多年冻土为工程介质的铁路路基建筑物的稳定性产生至关重要的影响^[8]。

2.2 青藏高原多年冻土区斜坡失稳的主要特征及类型

由于所处的特殊地域和地质环境条件的差异,青藏高原多年冻土区斜坡失稳特征与一般的非冻土区及季节性冻土区相比,具有独特性,表现在以下三个方面^[9],即:(1)滑坡体具有整体低角度的特征:在冻融循环过程中,坡度大于 3°的斜坡上,就有可能形成热融滑塌或融冻泥流;(2)具有确定的滑动面:活动层沿厚层地下冰面或冻融界面滑动是多年冻土区滑坡的另一主要特征;(3)滑体物质组成及滑动规模:组合物多为饱和状态的草皮苔藓、泥炭和粉土、细砂类混合物。在高含冰量条件下,滑动土体为坚硬的岩土块体和液状泥浆物质组成的混合物,滑动规模和速度远比一般滑坡小。

根据青藏公路沿线不同时期野外冻土工程地质调查资料,多年冻土区斜坡失稳类型可以归结为冻土滑坡和融土滑坡两类。其中,冻土滑坡包括蠕变型滑坡和崩塌型滑坡两种类型;融土滑坡包括融冻泥流和热融滑塌两种类型,其与季节交替在土体中形成的冻融作用有关。由于冻融作用出现在活动层中,因此,融土滑坡属于一种浅层滑坡。融冻泥流包括泥流阶地、泥流舌、鱼鳞状草皮等多种类型,风火山泥流阶地最具代表性。

2.3 多年冻土区斜坡路堤破坏机理分析

在普通土斜坡稳定性计算中,抗剪强度指标主要是内聚力和内摩擦角。而在冻土中,计算的强度组成部分与普通土相同,但冻土的黏聚力和内摩擦角是温度的函数。同时,两者的值受到时间的影响,摩擦角变化不大,但内聚力却随时间而慢慢松弛。强度损失的主要原因在于其中水分的积聚,包括来自冰晶体的融化和土体在冻结过程中发生的结构变化等。因此,多年冻土区斜坡路堤破坏的机理主要归结于以下几个方面:

(1)冻土上限范围内,融土的强度降低很多,在上限附近出现了剪切薄弱带,从而影响斜坡路堤的稳定性;

(2) 融化时产生大量的水,产生了渗透力,同时由于自由水的存在,对斜坡起到了润滑的作用,从而降低了斜坡的抗剪强度;

(3) 冻融周期改变了路基内人为上限形状,使得薄弱面的倾角增大,从而影响铁路路基稳定;

(4) 全球气温的升高,使得路基上限下降,增大了可能滑体的重量,使得下滑力增加量大于抗滑力的增加量,从而影响斜坡的稳定。

3 对多年冻土区斜坡路堤设计的思考

3.1 稳定性计算

对于斜坡软弱地基路堤,采用目前常用的瑞典法、毕肖普法等进行稳定计算时,其稳定安全系数即使与水平软弱地基路堤一致,但因其地基水平变形较水平软弱地基大,仍然存在一定安全隐患。这是进行斜坡软弱地基路堤设计时需要注意的。

此外,在对冻土斜坡进行稳定性分析时,虽然可以参考普通斜坡的分析方法,但同时也要考虑边坡失稳的时间因素,如夏秋季和冬初,根据活动层随季节的变化,将冻土边坡破坏机理分为夏季融化、冬季冻结以及春冬季整体型等,在各个时间段上采用不同的剪切面,结合各种可能滑面,进行稳定性计算分析等。

3.2 工程对策

3.2.1 填料

对于路堤工程,路基的变形主要由两部分组成,一是路堤本体部分的变形;二是地基部分的变形。在多年冻土地区填筑路基,关键是保持多年冻土上限不下降,这主要与多年冻土的年平均地温和填料的类别有关。因此,选择优质的填料至关重要。

路基填料宜采用粗粒透水性好的材料,如砂砾、碎石渣等,以降低毛细水的影响,避免在路基内出现二次结冰冻胀。在石料比较丰富的段落,可在路基基地清表后填筑 50~80 cm 厚的块石,由于块石间存在空隙,可以防止路基内的热量传入地基中去,加上空气的流动加强了地基的蒸发作用,使基底的表面处于降温状态,同时相对空隙较大的块石基底又能抵御地基的冻胀变形,使冻胀应力能够得到释放,在冻土层发生融化时,块石的强度又能给予路基强有力的支撑,从而减少路基变形,而且它还是很好的毛细水隔断层,它的存在极大地改变了路基内冻土核的形态,减少了路基边坡产生裂缝的可能。此外,还要注意填料温度的控制。因填料温度高,填筑后热和力的作用会影响多年冻土的状态,引起路基冻害的发生,所以应选择在适宜的季节和工作时段进行施工。

3.2.2 土工格栅

根据现有研究成果和实际工程的观测结果,对于高度大于 6 m 的高路堤,向阳坡与背阴坡受热情况大不相同,两侧边坡融化深度也不相同,造成人为上限不对称,这是引起路基面纵向裂缝的重要因素之一。高路堤成型后多年冻土的上限可能发生上移,在路堤内部形成冻土核。因此,对于高度大于 6 m 的路堤,为防止路基面出现纵向裂缝,加强路堤的强度,在路堤上部一定范围内间隔铺设土工格栅或土工网对路堤进行加固是一项有效的工程措施,其主要作用是增强路堤土体的整体性,减少或减弱由于地基土冻胀、融沉而产生的变形,如图 2 所示。

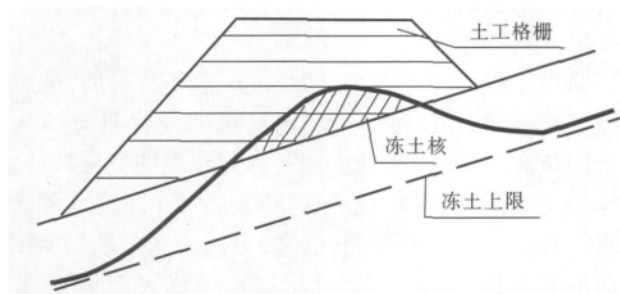


图 2 多年冻土区斜坡路堤土工格栅加固示意图

3.2.3 侧向约束桩(抗滑桩)

在冻土地区填筑路基,要合理确定边坡坡率,防止边坡塌滑或出现路肩纵裂。对多年冻土区的斜坡地段,为避免放缓边坡带来边坡增高等不利影响,采取一些工程措施进行边坡支挡加固(如坡脚抗滑桩等)是非常必要的,这也是防止路堤边坡失稳的一种稳妥而有效的方法,如图 3 所示。

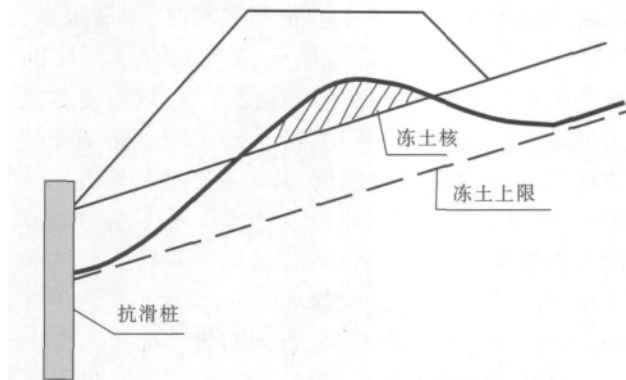


图 3 多年冻土区斜坡路堤坡脚侧向约束桩加固示意图

3.2.4 桩板结构

桩板结构路基^[10]是一种新的高速铁路无砟轨道路基结构形式,它由下部钢筋混凝土桩基、路基本体与上部钢筋混凝土承载板组成,承载板直接与轨道结构连接。桩板结构路基利用桩—板—土三者之间的共同

作用原理来满足上部建筑对基础的强度与沉降变形要求。在多年冻土地区,斜坡路堤的结构形式也可借鉴采用这种结构形式,如图 4 所示。

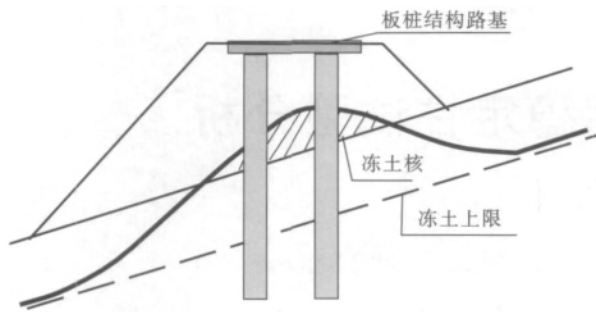


图 4 多年冻土区斜坡路堤桩板结构加固示意图

4 结论

青藏高原多年冻土地处中、低纬度、高海拔地区,其工程地质性质受到时间、空间以及温度等各方面因素的影响与制约,导致青藏铁路斜坡路堤的稳定性异常复杂和具有多变性。随着全球气候变暖,以及人类活动影响的不断升级,青藏铁路路基下面的冻土环境条件受到强烈扰动和产生新的变化,这将会引起路基病害的发展和病害的产生。本文通过对多年常规斜坡软弱地基路堤的研究以及工程经验,进而对多年冻土地区斜坡路堤稳定性提出了自己的认识与思考,如稳定性计算方面,在参考普通斜坡分析方法的同时,也要考虑边坡失稳的时间因素。另外,还可以从填料的选取、铺设土工格栅、采用抗滑桩加固等方面提高多年冻土地区斜坡路堤的稳定性,希望能对今后的高原铁路建设及运营管理提供参考和借鉴。

参考文献:

- [1] 魏永幸,罗强,邱延峻. 斜坡软弱地基填方工程技术与实践[M]. 北京:人民交通出版社,2011.
Wei Yongxing, Luo Qiang, Qiu Yanjun. Research and Practice of Fill Engineering Technology on Slope Weak Foundation [M]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [2] 李祝龙,章金钊. 青藏公路冻土路基沉降的模糊综合评判[J]. 公路,2000(2):21-24.
Li Zhulong, Zhang Jinzhao. Fuzzy Comprehensive Evaluation on Frost Subgrade Settlement of Qingzang Highway[J]. Highway, 2000(2):21-24.
- [3] 孙增奎,王连俊,白明洲,等. 青藏高原多年冻土区铁路路堤变形特征研究[J]. 中国安全科学学报,2003(8):25-28.
Sun Zengkui, Wang Lianjun, Bai Mingzhou, etc. Study on Deformation Feature of Railway Embankment in Permafrost Regions on Tibet Plateau [J]. China Safety Science Journal, 2003(8):25-28.
- [4] JGJ 118—1998 冻土地区建筑地基基础设计规范[S].
JGJ 118—98, Code for Design of Soil and Foundation of Building in Frozen Soil Region [S].
- [5] 原喜忠. 大兴安岭北部多年冻土地区路基沉陷研究[J]. 冰川冻土,1999(2):155-158.
Yuan Xizhong. Study on Thaw Settlement of Subgrade in Permafrost Regions in the Northern Part of Da Hinggan Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1999(2):155-158.
- [6] 令锋,吴紫汪. 渗流对多年冻土区路基温度场影响的数值模拟[J]. 冰川冻土,1999(2):115-119.
Ling Feng, Wu Ziwan. Numerical Simulation of the Influence of Seepage on Temperature Field of Roadbed in Permafrost Regions [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1999(2):115-119.
- [7] 靳德武,牛富俊,陈志新,等. 不同渗流条件下无限斜坡稳定性分析方法探讨[J]. 地质灾害与环境保护,2003(4):63-67.
Jin Dewu, Niu Fujun, Chen Zhixin, etc. Discussion on Method of Stability Analysis of Infinite Slope for Different Seepage Conditions [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2003(4):63-67.
- [8] 汪海年,窦明健. 青藏高原多年冻土地区路基热稳定性影响因素分析[J]. 公路,2005(5):51-54.
Wang Hainian, Dou Mingjian. A Study on Factors Influencing Thermal Stability of Permafrost Embankments in Qinghai-Tibet Plateau [J]. Highway, 2005(5):51-54.
- [9] 靳德武,牛富俊,李宁. 青藏高原多年冻土区斜坡稳定性研究进展[J]. 水文地质工程地质,2006(4):98-102.
Jin Dewu, Niu Fujun, Li Ning. Advances in Slope Stability Study on Permafrost Area of Qinghai-Tibet Plateau [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2006(4):98-102.
- [10] 魏永幸,蒋关鲁. 客运专线无砟轨道路基关键技术探讨——以遂渝线无砟轨道综合试验段为例[J]. 铁道工程学报,2006(5):39-44.
Wei Yongxing, Jiang Guanlu. Exploration on Key Technology of Ballastless Track Subgrade - A Case Study of Comprehensive Experimental Section of Ballastless Track on Suining - Chongqing Line [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2006(5):39-44.

(编辑 赵立兰)