

文章编号: 1674—8247(2022)06—0101—05

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2022.06.019

都四山地轨道交通项目滑坡稳定性分析及防治对策

邓睿 崔建宏 梅万波 唐伟华

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘要:都江堰至四姑娘山山地轨道交通项目位于汶川地震强烈影响带内,区内震后次生重力不良地质极其发育,线路方案受其功能定位等众多因素影响难以完全绕避。本文以菜园子滑坡为例,在野外调查掌握滑坡基本地质条件的基础上,结合钻探成果对滑坡体工程地质特征及成因进行了综合分析,并通过极限平衡法对滑坡稳定性进行检算。结果表明:(1)菜园子滑坡为大型中深层牵引式滑坡,地形、岩性及堆积层物质结构特征是滑坡形成的内部因素,降雨是主要诱发因素;(2)滑坡整体处于基本稳定状态,表层局部可能发生变形失稳,结合稳定性检算成果,应先对滑坡进行加固防护处理后再施工;(3)拟采用“排水廊道+抗滑桩+监测桩”的方案对滑坡进行加固防治,以确保工程安全。

关键词:滑坡; 极限平衡法; 稳定性; 抗滑桩; 防治对策

中图分类号: U212.22 文献标识码: A

Stability Analysis and Countermeasures of the Landslide on the Dujiangyan-Siguniangshan Mountain Rail Transit

DENG Rui CUI Jianhong MEI Wanbo TANG Weihua

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: The Dujiangyan-Siguniangshan Mountain Rail Transit Project is located in the strong impact zone of the Wenchuan Earthquake. The unfavorable geology of secondary gravity is extremely developed after the earthquake in the area, and the alignment scheme is difficult to completely avoid due to many factors such as its functional orientation. With a case study of the landslide in Caiyuanzi, this paper comprehensively analyzes the engineering geological characteristics and causes of the landslide mass based on the basic geological conditions of the landslide and the drilling results and checks the stability of the landslide by the limit equilibrium method. The results show that: (1) Caiyuanzi landslide is a large-scale medium-deep traction landslide. The topography, lithology, and material structure characteristics of the accumulation layer are the internal factors of landslide formation, and rainfall is the main inducing factor. (2) The landslide is basically stable as a whole, and deformation and instability may occur locally on the surface layer. Combined with the stability calculation results, the landslide shall be reinforced and protected before construction. (3) It is proposed to adopt the scheme of "drainage gallery + anti-slide pile + monitoring pile" to reinforce and prevent landslides to ensure the safety of the project.

Key words: landslide; limit equilibrium method; stability; anti-slide pile; prevention and control countermeasures

收稿日期: 2021-09-17

作者简介: 邓睿(1983-),男,高级工程师。

引文格式: 邓睿,崔建宏,梅万波,等. 都四山地轨道交通项目滑坡稳定性分析及防治对策[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(6): 101-105.

DENG Rui, CUI Jianhong, MEI Wanbo, et al. Stability Analysis and Countermeasures of the Landslide on the Dujiangyan-Siguniangshan Mountain Rail Transit[J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(6): 101-105.

新建都江堰至四姑娘山山地轨道交通项目位于汶川地震强烈影响区范围内,线路起于都江堰市,向西北方向途经映秀镇、耿达镇、卧龙镇,终于四姑娘山镇。沿线面临强烈的新构造运动、高地震烈度、极其发育的震后次生重力地质灾害等问题,工程地质条件极为复杂^[1-4]。受特殊的地形、地质环境以及经济社会效益等因素影响,线路DK 46+079~DK 46+215段不可避免于菜园子滑坡坡脚通过,工程受滑坡影响较大。

本文拟根据现场调查、地质钻探等方法对滑坡的特征及成因进行分析,通过极限平衡法对滑坡稳定性进行检算,结合滑坡对工程的影响情况给出建议采取的相应防治措施,确保工程安全。

1 滑坡基本地质条件

1.1 自然地理概况

菜园子滑坡位于耿达电站附近渔子溪河边,距离耿达镇约2 km。属龙门山低中山地貌,沟谷密度大,多呈“U”型,风化剥蚀强烈。为典型的亚热带内陆山地气候,冬半年(11月至次年4月)天气多晴朗干燥,也常形成降雪或雨;夏半年温暖湿润,降雨量大。年平均气温14.1℃,年平均降雨量900 mm。

1.2 地层岩性

研究区地表地层为第四系全新统滑坡堆积层(Q_4^{del})角砾土、碎石土夹块石土,冲洪积层(Q_4^{al+pl})粗圆砾土、卵石土夹漂石土,坡崩积层(Q_4^{dl+col})碎石土、块石土等;下伏基岩为志留系茂县群(S_{mx}^2)千枚岩夹板岩、大理岩,晋宁-澄江期第三期岩浆岩($\delta_2^{(3)}$)闪长岩。

1.3 地质构造及地震动参数

滑坡下伏岩层代表性产状为 $N24^\circ E/77^\circ NW$,岩体节理发育,主要发育两组延伸和贯通性好的节理裂隙,产状为 $N84^\circ W/90^\circ$ 和 $N34^\circ W/35^\circ SW$ 。滑坡范围内发育菜园子4号和5号逆断层,受构造影响岩体较破碎~破碎,局部产状较紊乱。区内地震动峰值加速度为0.20 g,地震动反应谱特征周期为0.40 s,地震烈度为Ⅷ度。

1.4 水文地质条件

滑坡区地表水主要为渔子溪河水,两岸发育季节性冲沟。河水四季长流,水量变化颇大,冬春少雨季,水量较为稳定,夏秋多雨时期,山洪暴发,往往造成洪水灾害。主河道河面高约1 497.8~1 499.18 m,百年洪水位标高为1 500.34 m。地下水主要为第四系松散岩类孔隙水、基岩裂隙水及构造裂隙水。滑坡堆积

层内孔隙水主要接受大气降水和地表水补给。

2 滑坡特征及成因分析

2.1 形态特征

菜园子滑坡平面地貌近似圈椅状,边界较清晰,中前缘坡面滑坡平台及负地形均较为明显,前缘挤压河床。滑坡主滑方向约 220° ,轴向长约270 m,前缘宽约275 m,地表自然坡面 $30^\circ\sim 60^\circ$,坡体植被较发育,未见裂隙发育,中后部新建有乡村道路。滑坡后方发育菜园子1号滑坡,主滑方向约 278° ,滑动后对菜园子滑坡后缘地貌造成破坏。

2.2 物质成分及结构特征

勘探揭示菜园子滑坡滑体物质以角砾土、碎石土为主,局部夹块石土,多呈褐灰,褐黄色,稍密~中密,石质成分主要为强~弱风化千枚岩、板岩、变质砂岩及闪长岩等,厚5~20 m,体积约 $50\times 10^4 m^3$,属大型中深层滑坡^[5]。滑动带特征不明显,第四系碎块石土直接覆盖于强风化岩层上,滑带为岩土界面。

滑床岩性为志留系茂县群(S_{mx}^2)千枚岩夹板岩、大理岩,岩层倾向坡外,视倾角 $50^\circ\sim 60^\circ$,滑床纵坡坡度 $25^\circ\sim 30^\circ$ 。

2.3 滑坡现状及变形特征调查

从现场调查和访问情况来看,菜园子滑坡地表多见变质砂岩、闪长岩质块石堆积,最大粒径可达3 m。滑坡中前缘坡体可见马刀树,坡脚修建有老公路。滑坡整体稳定性主要取决于滑坡前缘及陡峻坡体的稳定性,菜园子滑坡体内未见抗滑桩等防治措施,目前未见新增裂缝,地表无变形开裂迹象,滑坡整体应处于基本稳定状态。

受老公路开挖坡脚影响,该滑坡前缘坡体浅表曾局部发生变形失稳,调查中发现DK 46+100~DK 46+150段线路右侧斜坡建有挡墙。当地居民介绍挡墙一是对滑坡体表层起到一定加固作用,二是拦截高处落石,防止损毁民房及公路。汶川地震后滑坡体上居住村民均已搬离。汶川地震时老公路路面发生开裂,后在河水冲刷掏蚀坡脚的影响下,浅表坡体(DK 46+250~DK 46+350段右侧)发生变形失稳垮塌,导致老公路彻底中断。2020年8月雨季洪灾期间,临河段(DK 46+270~DK 46+350)坡脚表层再次发生小范围坍塌。

结合滑坡两纵两横主轴、线路工程形式布置滑坡勘探钻孔。勘探采用双管单动钻探工艺,对取出岩芯进行分析,发现局部岩芯岩层倾角变化较大,岩土界面附近岩块见揉皱挤压现象。

2.4 滑坡成因分析

滑坡形成往往受较多因素影响,成因较为复杂^[6-7]。从滑坡形态、物质及其结构特征综合分析,总体地形较陡,滑体以碎石类土为主,整个斜坡均分布有厚度较大的强风化层,滑坡沿岩体风化层结构面产生滑移的可能性较小。滑坡发育于岩堆体内,原堆积体物质在斜坡具备临空条件时,沿岩土界面可能发生整体滑移破坏,发生牵引式滑动,形成菜园子滑坡。该滑坡的形成原因主要包括以下几个方面。

2.4.1 地形地貌

研究区总体地形坡度较陡,高差约160 m,为堆积体提供了较大的重力势能差。临河段凹岸长期受河水冲刷掏蚀,坡脚老公路的开挖修建,为菜园子滑坡形成以及后期浅表层局部变形失稳提供了临空面与滑移空间。

2.4.2 岩性及岩土体结构

堆积层碎石类土粒径差异较大,局部具架空结构,孔隙大,易于地表水下渗。堆积体及岩体内分布有遇水易软化的绢云绿泥千枚岩,地表水的渗透及软化作用易造成岩土界面或土体内部出现软弱带。同时,滑坡岩体节理裂隙发育,一方面降低岩体抗剪强度,另一方面也为地下水入渗提供通道,软化润滑岩体,为岩土界面形成滑动面(带)提供有利条件。

2.4.3 地震

滑坡区新构造运动活跃,地震频发,地震烈度Ⅷ度。2008年汶川地震对地质环境影响及破坏强烈,对菜园子滑坡的坡体结构及稳定性造成一定影响,加速了滑体的蠕变变形,是震后路面开裂、多处块石崩落以及坡体局部发生变形失稳的主要引发因素。

2.4.4 降雨

滑坡往往发生在降雨过程中或降雨结束后。降雨沿裂隙入渗后增加坡体自重,软化坡体物质,降低滑面(带)抗剪强度参数。地表水在岩土界面一带富集,受地形控制向渔子溪河谷排泄,易形成软弱面。

综上所述,菜园子滑坡的滑动机制应为:降雨沿着岩堆体较大的孔隙入渗,在岩土界面形成滞水,降低滑带土体力学性质。随着雨水不断充填软弱结构面,斜坡堆积体变形逐渐加剧,在坡脚具备临空条件时,导致堆积体发生滑移。较陡的地形地貌、河边临空面、复杂的岩性及岩土体结构等条件是菜园子滑坡发生的基础条件;降雨汇聚下渗加剧滑坡发生,是主要诱发因素。地震、降雨和人工边坡开挖是导致菜园子滑坡后期浅表层局部再次变形失稳的主要因素。

3 滑坡稳定性分析

3.1 稳定性分析坡面选取

从宏观上判断菜园子滑坡目前整体处于基本稳定状态,在外界因素的影响下表层局部可能发生变形失稳。结合菜园子滑坡形态特征、物质组成及成因,选择A-A'轴剖面 and B-B'轴剖面为代表,进行稳定性分析,如图1和图2所示。

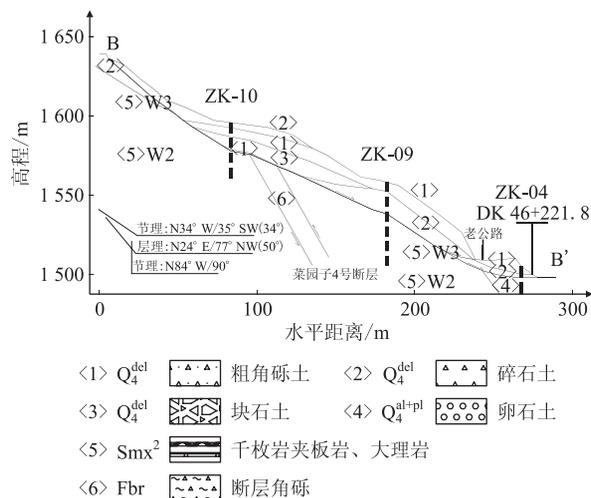


图1 菜园子滑坡A-A'轴断面示意图

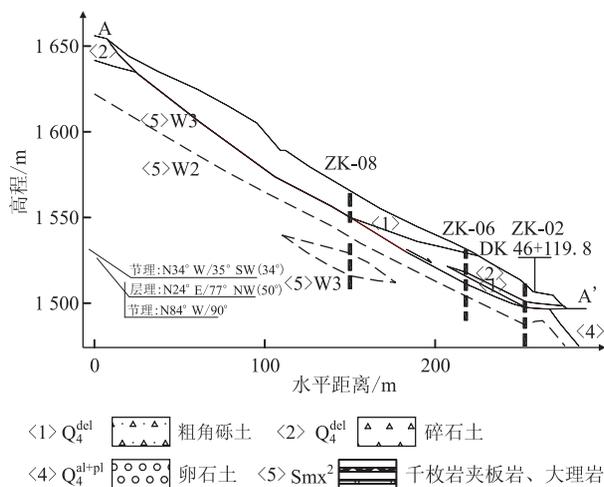


图2 菜园子滑坡B-B'轴断面示意图

3.2 计算参数选取

本滑坡滑面近似为折线型,故采用极限平衡法对滑坡强度参数进行反算。一般情况下,抗剪强度参数取值时,假定砂性土C值来反求φ值。滑面(带)抗剪强度指标主要依据土体直剪试验、室内试验、反算及经验进行适当修正后综合确定。根据多次试算,结

合工程经验,计算参数取值如表 1 所示,暴雨工况对参数进行适当折减。

表 1 菜园子滑坡岩土体参数(天然状态)取值表

层号	岩土名称	γ 值/(kN/m ³)	C 值/(kPa)	ϕ 值/(°)
1	粗角砾土	2.05	-	-
2	碎石土	2.10	-	-
3	块石土	2.20	-	-
4	卵石土	2.10	-	-
5	滑带土	-	-	33.5

3.3 滑坡现状稳定性检算及分析

由于老公路开挖临空处对 B - B' 轴剖面稳定性影响较大,因此增加检算该处的稳定性。采用传递系数法、Morgenstem price 和 Spencer 方法进行计算分析及对比验证,结果如表 2 ~ 表 4 所示。

表 2 A - A' 轴稳定性检算表

工况条件	传递系数法	Morgenstem price 法	Spencer 法
天然	1.21	1.21	1.20
暴雨	1.06	1.06	1.05
地震	1.10	1.09	1.07

表 3 B - B' 轴稳定性检算表

工况条件	传递系数法	Morgenstem price 法	Spencer 法
天然	1.35	1.43	1.42
暴雨	1.18	1.25	1.25
地震	1.22	1.29	1.28

表 4 B - B' 轴(老公路开挖处)稳定性检算表

工况条件	传递系数法	Morgenstem price 法	Spencer 法
天然	1.23	1.47	-
暴雨	1.08	-	-
地震	1.12	-	-

由检算结果可知,现阶段自然工况下滑坡整体安全系数均大于 1.15,处于稳定状态。地震工况 A - A' 剖面稳定系数 1.07,处于基本稳定状态;B - B' 剖面稳定系数 1.12 ~ 1.22,处于基本稳定 ~ 稳定状态。暴雨工况下 A - A' 剖面稳定系数 1.05, B - B' 剖面稳定系数 1.08 ~ 1.18,滑坡整体处于基本稳定 ~ 稳定状态。检算结果与调查结果基本相符。

3.4 施工开挖段稳定性检算及分析

根据工程设置需求,DK 46 + 084 ~ DK 46 + 107.7 段桥隧衔接处以挖方为主,长约 24 m,线路中心最大挖深约 7.7 m。施工开挖坡脚必然对滑坡造成扰动,新增坡脚临空面,降低其稳定性。结合地形地貌及开挖情况,对典型开挖 D - D' 轴剖面稳定性进行检算。该处线路里程 DK 46 + 095,中心开挖高度 3.85 m,开挖宽度约 40 m,开挖坡面及防护设置如图 3 所示,稳

定性检算结果如表 5 所示。

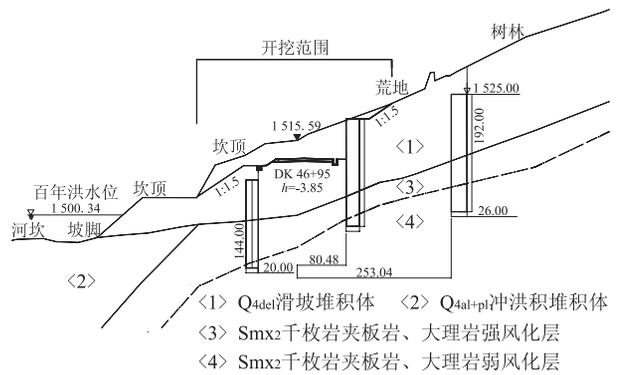


图 3 DK 46 + 095 开挖坡面及防护示意图

表 5 D - D' 轴稳定性检算表

工况条件	天然	暴雨	地震
现状	1.21	1.08	1.08
开挖工况	1.06	0.96	0.95

由检算结果可知, D - D' 轴剖面现阶段处于基本稳定 ~ 稳定状态;施工开挖后在天然状态下处于基本稳定状态,但在暴雨和地震工况下,稳定系数均小于 1,滑坡处于不稳定状态。

4 滑坡防治对策

新建线路于菜园子滑坡坡脚通过,虽然滑坡目前整体处于基本稳定状态,但结合坡脚老公路损毁情况、汛期临河段浅表局部坍塌及考虑施工过程中的扰动影响,特别是施工开挖段处于不稳定状态,有必要对滑坡先进行加固防治后再施工,确保工程安全。根据滑坡地形地貌特点、成因、检算成果及与工程的关系,拟采用“排水廊道 + 抗滑桩 + 监测桩”的方案对滑坡进行防治和监测预警,截水骨架和锚杆框架梁内采用灌草护坡。

4.1 排水廊道

雨水沿坡面入渗是滑坡发生的诱发因素,菜园子滑坡防治中应首先考虑水的影响。地表排水廊道按“一环 + 两横一纵”的方式设置,用于截流地表水和降低地下水:滑坡边界外设置环形截水沟,长 621 m;中部设置 2 道横向截水沟(第 1 道长 217 m,第 2 道长 243 m)及 1 道纵向截水沟(长 347 m)。横向截水沟两端顺接入环形截水沟,截水沟尺寸宽 0.4 m,深 0.6 m,采用 0.3 m 厚 M7.5 浆砌片石砌筑,环形截水沟及纵向截水沟沟水引入渔子溪。

4.2 抗滑桩

抗滑桩设置于线路右侧,桩平面布置以垂直主

轴为主,根据滑坡与工程位置关系,设置“两短一长”3排共计29根抗滑桩。同时在DK 46+100处线路两侧共设置3处桩板墙,进一步加强桥隧接头处工程的安全防护。抗滑桩设置情况及作用包括:

(1)从高往低第1排设置6根抗滑桩,为正线挖方段埋式抗滑桩,主要作用为加固滑坡体。桩间距为6 m,桩截面采用2.0 m×3.0 m~2.25 m×3.25 m,桩长20~24 m,桩身采用C35混凝土灌注。

(2)第2排设置3根抗滑桩,主要作用为加固滑坡体,保证桥梁0号桩基承台不受滑坡下滑推力作用。桩间距为6 m,桩截面采用2.5 m×3.5 m,桩长26 m,桩身采用C35混凝土灌注。

(3)第3排抗滑桩设置为折线型,由小里程向大里程设置4+16根抗滑桩,前7根抗滑桩主要作用是保证桥梁1号、2号桩基承台不受滑坡下滑推力作用,后13根抗滑桩作用为加固滑坡坡脚。桩间距均为6 m,桩截面分别采用2 m×3 m和1.5 m×2.5 m~2 m×3 m,桩长分别为23 m和15~26 m,桩身采用C35混凝土灌注。

铁路工程滑坡地段一般工况设计安全系数不应小于1.10,暴雨或地震工况下设计安全系数不应小于1.05。采用上述抗滑桩加固方案后,滑坡稳定系数满足规范要求。

4.3 位移检测桩

研究区雨季降雨量大且集中,汛期河水冲刷掏蚀破坏力极强,地震频发,并且施工中不可避免对滑坡产生扰动,这些都是不利于滑坡稳定的因素,因此有必要在施工及运营期间对其进行监测预警。位移监测桩按滑坡A、B主轴进行布置,间距约50 m,共计10根。

5 结论

本文以都四山地轨道交通项目菜园子滑坡为例,对滑坡体工程地质特征及成因进行综合分析,得出主要结论如下:

(1)菜园子滑坡发育于汶川地震强烈影响区内,为堆积土类大型中深层牵引式滑坡。

(2)菜园子滑坡的主要成因为:滑坡区地形较陡,堆积碎石类土物质结构相对较松散、强度低。降雨沿着裂隙入渗,在土体与基岩接触面上形成滞水,绢云绿泥千枚岩受地下水浸泡极易软化,强度大幅降低,在坡脚具备临空条件时,促使坡体发生滑动。地震、降雨和人工边坡开挖是导致菜园子滑坡后期浅表层局部再次变形失稳的主要因素。

(3)宏观判断滑坡现状整体处于基本稳定状态,

在外界因素的影响下表层局部可能发生变形失稳。稳定性检算分析结果与实际情况基本相符。

(4)桥隧衔接处(DK 46+084~DK 46+107.7段)施工开挖坡脚后,在暴雨和地震工况下滑坡处于不稳定状态。综合考虑滑坡稳定状态及施工扰动,应先对滑坡进行加固防护处理后再施工,确保工程安全。

(5)设置“一环+两横一纵”排水廊道减排地表水;结合桥梁墩台布置,针对性设置“两短一长”共计3排29根抗滑桩对滑坡进行加固防护,保护桥梁墩台。

(6)沿滑坡主轴设置共10根位移检测桩,加强施工及运营阶段对滑坡体的变形监测及预警。

参考文献:

- [1] 甘建军,黄润秋,李前银,等. 都江堰-汶川公路汶川地震次生地质灾害主要特征和形成机理[J]. 地质力学学报, 2010, 16(2): 146-158.
GAN Jianjun, HUANG Runqiu, LI Qianyin, et al. Formation Mechanism of Geo-Hazards Triggered By Wenchuan Earthquake Along Dujiangyan-Wenchuan Highway [J]. Journal of Geomechanics, 2010, 16(2): 146-158.
- [2] 施斌,王宝军,张巍,等. 汶川地震次生地质灾害分析与灾后调查[J]. 高校地质学报, 2008, 14(3): 387-394.
SHI Bin, WANG Baojun, ZHANG Wei, et al. Survey and Analysis of Secondary Geological Hazards after Wenchuan Earthquake [J]. Geological Journal of China Universities, 2008, 14(3): 387-394.
- [3] 乔彦肖,马中社,吕凤军. 汶川地震地质灾害发育特点及成因机制分析[J]. 中国地质, 2009, 36(3): 736-741.
QIAO Yanxiao, MA Zhongshe, LYU Fengjun. Characteristics and Dynamic Cause Mechanism of the Wenchuan Earthquake Geological Hazards [J]. Geology in China, 2009, 36(3): 736-741.
- [4] 黄润秋. 汶川地震地质灾害后效应分析[J]. 工程地质学报, 2011, 19(2): 145-151.
HUANG Runqiu. After Effect of Geohazards Induced by the Wenchuan Earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(2): 145-151.
- [5] TB 10027-2012 铁路工程不良地质勘查规程[S].
TB 10027-2012 The Railway Engineering Geological Survey and Discipline [S].
- [6] 徐邦栋. 滑坡分析与防治[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2006.
XU Bangdong. Landslide Analysis and Prevention and Control [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2006.
- [7] 邓睿,王朋,张莹,等. 玉磨铁路秀柏双线大桥滑坡工程特性及稳定性分析[J]. 高速铁路技术, 2016, 7(5): 66-70.
DENG Rui, WANG Peng, ZHANG Ying, et al. Characteristics and Stability Analysis of Landslides near Xiubo Double-Line Bridge on Yuxi-Mohan Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2016, 7(5): 66-70.