文章编号:1009-6582(2019)06-0128-06 DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2019.06.019

基于客货分流的四洞十车道隧道设计研究

李玉文[1] 冷希乔[1] 白 帆[2]
(1四川交通职业技术学院,成都 611130;2四川省公路规划勘察设计研究院有限公司,成都 610041)

摘 要 大交通量或靠近城区的公路隧道车道数大多与道路一致,因隧道的管理运行速度往往小于路段运行速度,导致隧道通行能力下降,隧道入口段行车拥堵问题突出。文章以天府机场高速公路龙泉山隧道为例,从隧道的运行管理速度、隧道通行能力、建设造价隧道施工可行性、行车安全等方面进行多维度分析,提出了4洞10车道、按客货分流2(货车)+3(客车)+3(客车)+2(货车)的车道模式,该模式可实现隧道与道路相同的通行能力,有效保证隧道施工及运营安全。

关键词 高速公路 四洞十车道隧道 设计 轴线 客货分流
中图分类号:U452.2 **文献标识码:A**

1 引 言

对于大交通量或靠近城区的公路隧道,通常传统设计隧道车道数大多与道路相一致,但因隧道的管理运行速度往往小于路段运行速度,导致隧道通行能力下降,隧道入口段行车拥堵问题突出,难以实现高速公路设计中安全、快捷、舒适的基本功能。因此,进一步开展大交通量或靠近城区的公路隧道设计研究具有十分重要的意义。

目前,国内对大交通量多车道隧道的研究热点主要集中在隧道设计速度标准、隧道布置方案、环境协调性、选线方案、大断面隧道的结构设计参数和施工技术等方面。例如:李伟平等[1]对六车道钱江盾构隧道工程的通行能力与服务水平、隧道建设与运营养护成本进行了分析,确定了钱江隧道的设计速度标准;马志富[2]从地形地质条件、线路条件、施工方法、施工组织、运营与防灾救援工程等方面对隧道布置方案进行了分析;张威振等[3]依托松雅湖隧道工程,对隧道的断面布置、景观协调性等进行了详细的分析;余 晶等[4]以沪蓉高速公路象鼻山隧道为依托工程,从环保理念方面对公路隧道的设计方案、施工工序等进行了分析;杜博英等[5]从公路隧道运行速度协调性、隧道洞口线性一致性、隧道安全视距等方面对公路隧道线性设计进行了分析;武学仕[6]以兰州至张掖三四线穿越乌鞘岭隧道工程为研究对象,从工程地质、环保、经济、安全、工期等方面对复杂地质条件下隧道选线方案进行了研究;周丁恒等[7]对四车道特大断面隧道受力特征开展了研究;蒋 坤等[8]以福州国际机场高速公路魁岐2号双洞大断面小净距隧道为研究对象,分析了不同施工方法下围岩水平位移和围岩塑性区规律;朱朝佐等[9]结合胶州湾右线超大断面海底隧道施工,对浅埋、大断面暗挖隧道施工方法进行了探讨。

上述研究成果基于已确定隧道车道布置形式而开展研究,认为多车道隧道可有效缓解交通拥堵及行车安全等问题,然而目前各省大交通量高速隧道入口段行车堵车及运营安全问题仍然突出。本文以成都天府新机场高速龙泉山隧道工程为研究对象,探讨大交通量或靠近城区的大断面隧道总体设计原则,从大交通量或靠近城区的隧道交通量组成、运行管理速度、隧道通行能力、建设造价、隧道施工可行性、行车安全等多维度研究了4洞10车道客货分流

修改稿返回日期:2019-02-21
基金项目:四川省教育厅科研项目(18ZA0327).
作者简介:李玉文(1966-),男,硕士,教授级高级工程师,主要从事公路隧道的设计和研究工作,E-mail: 200639418@qq.com.

运行模式，以期达到安全、快捷、舒适机场高速的功能，为大交通量或靠近城区的公路隧道设计提供参考。

2 龙泉山隧道概况

天府机场高速公路连接成都中心城区和新建的天府机场，具有专用机场高速功能和成渝地区第四通道的功能，是省内第一条双向8车道高速公路，设计标准为时速120 km/h。

龙泉山隧道是天府机场高速的控制性工程，穿越龙泉山脉，隧址区属侵蚀剥蚀构造低山地貌，区内沟谷纵横，山峦起伏，地形切割较强烈。地层主要有第四系全新统坡残积层(Q_4^{dl+el})、崩坡积层(Q_4^{c+dl})、冲洪积层(Q_4^{al+pl})、滑坡堆积层(Q_4^{del})，中生界中统遂宁组(J_2sn)、中统沙溪庙组(J_2s)。隧址区穿越龙泉山背斜，有断裂通过，具有沟通深部气源的运移通道条件，有利于与油气聚集，属高瓦斯隧道。

隧道进出口东西两侧受马鞍山断裂和龙泉驿断裂夹持，在背斜翼部发育有走向次级逆断层。进口所处斜坡平均坡度约为20°～35°，呈下陡上缓的台阶状，前缘为一冲沟，斜坡处基岩大部裸露，覆盖层厚度小，主要由遂宁组粉砂质泥岩夹砂岩组成，岩层强烈揉皱，产状变化大，岩体极破碎，围岩级别为Ⅴ级。洞身主要穿越沙溪庙、遂宁组地层，岩性为粉砂质泥岩夹砂岩。岩体中发育2～3组节理，倾角＞60°，其中岩层平缓地段，泥岩夹砂岩，呈薄—中层状结构，且砂岩层面富集云母，层间结合差，洞顶易产生离层状垮塌，洞身段岩体较完整—破碎，主要为Ⅳ级围岩；在龙泉山背斜转折部位及过沟浅埋段和断层带，因岩体破碎，围岩自稳性差，该部分为Ⅴ级围岩。

3 龙泉山隧道轴线设计方案

隧道轴线的高标准设计指标是保证天府机场高速公路线形连续和流畅的前提。针对龙泉山特殊的地质构造特征，综合考虑隧址区地形、地质、隧道洞口条件、环保、施工风险及进出口接线长度等因素，隧道轴线设计K线(龙泉山1号、2号隧道)、Y线(龙泉山隧道)两套方案，K线与Y线设计方案见图1，K线与Y线方案对比分析见表1。

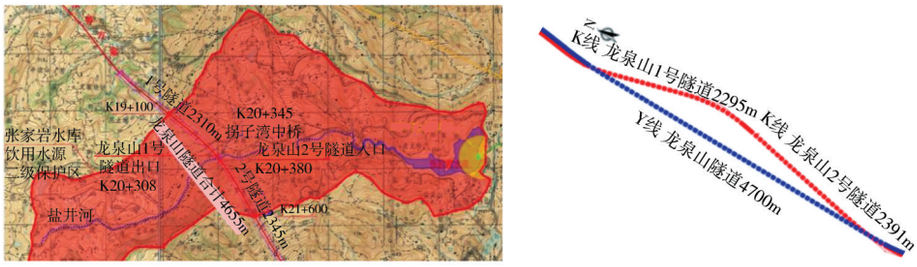


图1 K线与Y线方案示意

Fig.1 Schematic diagram of the K-line and Y-line schemes

由表1可知：

(1) 在施工技术方面，K线、Y线方案在地质条件、施工工期、隧道安全风险等方面优缺点相当；Y线方案场地开阔，施工便利；但Y线隧道进口严重偏压，洞口约184 m偏压严重且位于冲沟段，Y线方案施工安全风险高；K线方案由于多洞口施工，K线方案施工组织难度略大。

(2) 在环保和运维方面，Y线方案洞身浅埋段(最小净埋深20 m，长约140 m)下穿简阳水源保护区上游，存在疏干地表水及地下水的风险；而K线方案对水源保护区地下水及地表水影响较小，可最大限度地降低工程施工对水源保护区上游水源的影响，因此K线方案对环境影响小。K线方案所需运营通风功率较Y线方案略低，K线方案运营成本低。

(3) 综上所述，K线、Y线均存在一定的优缺点，考虑设计应以降低环境影响、减小运维成本和控制施工安全风险为首要原则，因此轴线设计采用K线方案。

4 客货分流通行能力及服务水平分析

按传统隧道设计理念，往往隧道入口段成为制约高速公路快速通行的瓶颈，同时交通拥堵也会对客货车的行车安全带来一定的安全隐患。如果当龙泉山隧道采用与道路相同车道数的布置型式时，根

表1 K线与Y线方案对比分析

Table 1 Comparison analysis of K-line and Y-line plan

项目	K线方案(龙泉山1号、2号隧道)	Y线方案(龙泉山隧道)	比选
隧道长度	龙泉山1号、2号隧道总长4 686 m	龙泉山隧道长4 700 m	K线优
地质概况	以Ⅳ级围岩为主,穿越马鞍山断层、龙泉山背斜,浅埋段长度510 m,穿越2处顺层	以Ⅳ级围岩为主,穿越马鞍山断层、龙泉山背斜,浅埋段长度380 m,穿越1处顺层,部分段落穿越巨厚层堆积体	相当
施工月进度/总工期	隧道露头段局部施工,60 m/39个月	60 m/41个月	相当
隧道施工安全风险	轴线位置临近,均存在瓦斯、塌方、洞口失稳、结构失效等风险		相当
洞口偏压情况	龙泉山1号隧道进口轻微偏压	隧道进口洞口偏压严重,洞口约184 m偏压严重且位于冲沟段	K线优
洞身露头段遮光棚	需设置约140 m遮光棚	不需设置	Y线优
施工场地布置	龙泉山1号隧道出口、2号隧道进口施工组织难度大,环保要求高,其他洞口场地开阔,施工条件便利	洞口场地开阔,施工条件便利	Y线优
环保要求(水源保护地)	对水源保护区影响较小,设计高程约597 m	洞身浅埋段(最小埋深20 m,长约140 m),下穿简阳水源保护区上游,存在疏干地表水及地下水的风险,设计高程约577 m	K线优
运维通风	营运工况:444 kW/12台	营运工况:592 kW/16台	K线优

据设计资料[10],洞外道路段及洞内快、慢车道远期(2038年)预测交通量及车型比例组成如表2所示。

表2 洞内外交通量及车型比例

Table 2 Traffic volume and vehicle type ratios

类别	小客	大客	中小货	大货	特大货及拖挂
路交通量/(pcu/d)	59 451	27 328	8 917	12 466	21 479
总比例/(%)	45.8	21.1	6.9	9.6	16.6
隧交通量/(veh/d)	59 451	18 219	7 863	4 986	5 370
总比例/(%)	62.0	19.0	8.2	5.2	5.6

由表2可知:

(1)在交通量组成方面,道路段小客车、大客车换算交通量分别占45.8%和21.1%,客车交通量共占66.9%;各类货车换算交通量共占33.1%,其中特大货和拖挂车比重较大。说明该高速公路不仅作为天府国际机场的直达交通通道,而且也是重要的货运通道。因此,对大货车尤其是重载货车的交通组织尤为重要,否则极易造成交通安全事故。

(2)隧道段小客、大客车交通量分别占62%和19%,客车交通量共占81%;各类货车交通量共占19%,其中大货及特大货在货车中比例为56.8%。由于隧道特殊的环境条件,如进出隧道的视觉效应、速度控制标准等因素,在客货相同条件通行下,由于隧道内客货车不同的管理运行速度,载重量大、行进缓慢的大货车易导致隧道入口段出现拥堵,大交通量客车通行会受到较大影响,因此,难以实现天府机场高速公路隧道高效通行的基本要求。

(3)综上所述,传统的设计理念不能满足天府机场高速公路快速、便捷、舒适的功能要求,同时也难以保证大交通量客货车的运营安全。

因此,需要对传统隧道设计理念改进,基于天府机场高速龙泉山隧道设计常规八车道和客货分流十车道两种模式,以交通量组成、客货车的交通流特性、行车安全、高速公路功能设计指标等因素为基础,依据规范[11,12]对客、货车不同限速和不同车道型式条件下的隧道远期(2038年)通行能力及服务水平进行分析,龙泉山隧道常规四车道和客货分流五车道远期单向通行能力分析参见表3,其服务水平分析参见表4。

表3 龙泉山隧道远期通行能力(单向)

Table 3 Long-term capacity of Longquanshan Tunnel (One-way)

实际限速	车道型式	通行能力/(veh/h)	比选
$v_{客}$=110 km/h $v_{货}$=90 km/h	洞外4车道	6 452	与洞外相比通行能力降低30%
	常规4车道	4 506	
	分流5车道	6 112	通行能力降低5%
$v_{客}$=100 km/h $v_{货}$=80 km/h	洞外4车道	6 452	与洞外相比通行能力降低32%
	常规4车道	4 400	
	分流5车道	5 968	通行能力降低8%

由表3可知：

（1）若龙泉山隧道采用常规4车道设计型式，当客货限速分别为$v_{客}$=110 km/h，$v_{货}$=90 km/h时，隧道通行能力值为4 506 veh/h，相对高速道路段远期通行能力降低30%；当客货限速分别为$v_{客}$=100 km/h，$v_{货}$=80 km/h时，通行能力值为4 400 veh/h，相对高速道路段远期通行能力降低32%；因此，隧道采用4车道型式其通行能力显著下降。

（2）若采用客货分流5车道设计型式，当客货限速分别为$v_{客}$=110 km/h，$v_{货}$=90 km/h时，通行能力值为6 112 veh/h，相对高速道路段远期通行能力仅降低5%；当客货限速分别为$v_{客}$=100 km/h，$v_{货}$=80 km/h时，通行能力值为5 968 veh/h，相对高速道路段远期通行能力仅降低7.5%。因此，隧道采用客货分流5车道型式的远期通行能力相对高速道路段略有降低，但总体上客货分流的远期通行能力仍较好，可基本达到隧道与高速道路疏导相同交通量的能力。

表4　龙泉山隧道远期服务水平（单向）

Table 4　Long-term service level of Longquanshan Tunnel (One-way)

实际限速	车道型式	v/C	服务水平
$v_{客}$=110 km/h $v_{货}$=90 km/h	洞外4车道	0.68	三级
	常规客2车道	1.08	六级
	分流客3车道	0.73	三级
	分流货2车道	0.70	三级
$v_{客}$=100 km/h $v_{货}$=80 km/h	洞外4车道	0.68	三级
	常规客2车道	1.10	六级
	分流客3车道	0.74	三级
	分流货2车道	0.72	三级

注：v/C为客、货车的最大服务交通量与基准通行量比值.

由表4可知：

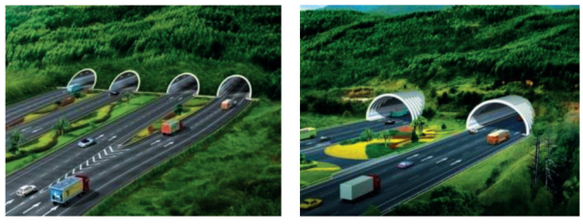
（1）若龙泉山隧道采用常规4车道设计型式，客货限速分别为$v_{客}$=110 km/h，$v_{货}$=90 km/h时，客车的最大服务交通量与基准通行量v/C值为1.08，货车的v/C值为0.70；当客货限速分别为$v_{客}$=110 km/h，$v_{货}$=90 km/h时，客货车的v/C值分别为1.10和0.72；不同限速时客车的隧道远期服务水平均为六级；显然不能满足规范中高速路段服务水平的相关规定。

（2）若采用客货分流5车道设计型式，当客货限速分别为$v_{客}$=110 km/h，$v_{货}$=90 km/h时，客货车的v/C值分别为0.73和0.70；当客货限速分别为$v_{客}$=100 km/h，$v_{货}$=80 km/h时，客货车的v/C值分别为0.74和0.72；这说明不同客货限速降低时隧道远期服务水平略有降低，但客货车的隧道远期服务水平均达到三级，满足规范及运营管理中高速路段服务水平的相关规定。

（3）综上所述，通过增加隧道的车道数，可在隧道限速情况下，实现天府机场高速公路隧道良好的通行能力和服务水平。

5　龙泉山隧道布置方案综合比选

龙泉山隧道断面布置关乎天府机场高速公路能否实现快捷、舒适、方便的基本功能，从隧道交通量组成、运行管理速度、隧道通行能力、建设造价、隧道施工可行性、行车安全等多维度分析龙泉山隧道设计方案：方案1为4洞8车道方案，单洞2车道，4洞平行布置；方案2为4洞10车道方案，单向2洞，单洞2车道+单洞3车道，共4洞平行布置，隧道相比道路增加2个车道，达10车道；方案3为双洞8车道方案，大跨扁平单洞4车道，分离式左右洞平行布置。隧道布置方案见图2，3种设计方案布置对比分析见表5。



（a）方案1和2（四隧道方案）　（b）方案3（双隧道大跨方案）

图2　隧道布置方案

Fig.2　Layout plan of tunnel

由表5可知：

（1）从工期、建设造价和施工技术难易程度方面看，由于方案1开挖断面为单洞2车道，因此，方案1最优；方案2相对方案1开挖面增加2车道，方案2次之；方案3为4车道扁平大跨长隧道，因此，方案3最差。

（2）从隧道外分线、交通组织方面看，方案1和方案2隧道外均需设置1 km长度的分线，方案3隧道断面与车道数一致，无需设置分线。因此，方案3优于方案1和方案2。而在防灾救援方面，方案3由于客货共用隧道，因此，方案3救援难度最大，方案1和方案2较好。

（3）从交通组成对行车安全影响、通行能力、行车舒适性方面看，方案1在大交通量客车通行时，隧

表5 龙泉山隧道3套设计方案对比分析

Table 5 Comparison analysis of three design schemes for Longquanshan tunnel

项目	方案1(4洞,8车道)	方案2(4洞,2+3+3+2共10车道)	方案3(2洞,8车道)
施工月进度/工期	90 m/19个月	60 m/25个月	25 m/52个月
每延米造价指标	4洞8车道,造价低	相对方案1增加2车道,共10车道,造价提高37.3%	相对方案1为超大断面隧道,造价提高77.3%
设计、施工技术成熟程度、建设风险	常规2车道断面,设计施工技术成熟,施工难度低,建设风险低	2车道及3车道隧道,技术成熟,施工难度较易,小净距隧道建设风险中等	4车道扁平大跨长隧道设计和施工技术要求高,施工工序及临时支护复杂,施工难度大、建设风险高
隧道外分线长度	隧道外分线长约为1 km	隧道外分线长约为1 km	无需隧道外分线
交通组织	设置交通标志标线及加强行车诱导,组织较复杂	设置交通标志标线及诱导隧道附近分合流,4车道过渡5车道车流组织较复杂	与隧道外车道同宽,车流顺畅,无需特别诱导
防灾救援难度	各隧道相对独立,相互干扰小,当一个洞进行封洞时,可利用同向另一洞通行,当中间隧洞需进行救援时,可通过并行隧洞进入救援,易于实现封洞救援和养护,救援难度适中		封道救援时相邻车道车流受影响较大,通行能力极大降低;封洞养护难度极大,易造成交通中断,洞内交通组织困难,救援难度大
通行能力	过渡段车辆变道集中,易导致车速变慢,客车通行能力急剧下降	增设车道较大改善方案1通行能力,在客、货通行比例及通行能力方面较好	客、货车通行能力均较好
行车舒适性	客车受影响较大,驾乘人员体验感差,道路服务水平偏低	实现了客货分流,客、货车通行能力好,驾乘人员体验感好,道路服务水平高	在隧道内实现换道,自由度较大,驾乘人员体验感好,道路服务水平高
交通组成对行车安全影响	客货分流运行,但由于客车交通量大,受堵车影响隧道内客车行车安全风险较高	客货分流运行,虽然客车交通量大,但增设车道,极大减少隧道内客车堵车发生事故概率,行车安全风险小	客货共用隧道,由于货车交通流量大,因此行车安全风险高

道段容易发生拥堵且行车舒适性差,行车安全风险较高,因此,方案1不能实现高速公路基本功能;而方案2、方案3能实现高速公路基本功能,但是行车安全性方面方案2优于方案3。

(4)综上所述,方案3在建设造价、行车安全,救援难度等方面均较差;方案1虽然造价及施工难易程度低,但不能满足天府机场高速公路快捷、舒适、方便的基本功能;因此,综合比选推荐方案2,一是施工技术成熟且造价合理,二是天府机场高速客货交通量占比大,采用客货分离式隧道,实现隧道与道路相同的通行能力,且可有效保证运营安全。龙泉山隧道依据设计方案2已顺利贯通,龙泉山隧道洞口见图3。



图3 龙泉山隧道洞口

Fig.3 Longquanshan tunnel portal

6 结论和建议

(1)大交通量或靠近城区的公路隧道轴线设计方案应综合考虑隧址区地形地质、隧道洞口条件、环保、施工风险及运维成本等因素,而且必须以降低环境影响和控制施工安全风险为首要原则,最大限度降低施工对环境的不利影响。

(2)按传统隧道设计理念,隧道段大交通量客货车行车时,其运营安全风险高,也难以实现高速公路的基本功能;研究客货隧道分流并增设车道的模式,可有效解决上述问题,其客货通行能力和服务水平均满足规范相关指标要求。

(3)隧道入口段的堵车问题通常存在于大交通量或靠近城区高速公路,从龙泉山隧道交通量组成、

运行管理速度、隧道通行能力、建设造价、隧道施工可行性、行车安全等多维度设计了4洞10车道客货分流模式，该模式可实现隧道与道路相同的通行能力，达到安全、快捷、舒适机场高速功能。

参考文献

References

[1] 李伟平, 吴德兴, 郭 敏, 等. 钱江盾构隧道设计速度标准及交通安全分析[J]. 现代隧道技术, 2011, 48 (3): 94-100.
LI Weiping, WU Dexing, GUO Min, et al. Analysis on Design Speed Standard and Traffic Safety for Qianjiang Shield Tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2011, 48 (3): 94-100.

[2] 马志富. 新建铁路特长隧道单洞、双洞方案研究[J]. 铁道工程学报, 2019, 247 (4): 60-64.
MA Zhifu. Research on the Schemes of Single-tube and Double-tube Tunnel for New Railway of Extra-long Tunnel[J]. Journal of railway Engineering Society, 2019, 247 (4): 60-64.

[3] 张威振, 刘维萍. 高低湖区下的观光隧道设计方案探讨[J]. 隧道建设, 2016, 36 (6): 728-734.
ZHANG Weizhen, LIU Weiping. Discussion on Design Scheme of Songyahu Sight-seeing Tunnel[J]. Tunnel Construction, 2016, 36 (6): 728-734.

[4] 余 晶, 李东升, 程 勇. 沪蓉西高速公路象鼻山隧道环保设计理念与措施[J]. 公路, 2012 (4): 228-232.
YU Jing, LI Dongsheng, CHENG Yong. Hulongxi Highway Trunk Mountain Tunnel Environmental Protection Design Idea and Measure[J]. Highway, 2012 (4): 228-232.

[5] 杜博英, 孙 鹏, 刘凯丰. 基于运行安全的公路隧道线形设计[J]. 公路, 2018 (3): 278-282.
DU Boying, SUN Peng, LIU Kaifeng. Highway Tunnel Alignment Design Based on Operation Safety[J]. Highway, 2018 (3): 278-282.

[6] 武学仕. 高速铁路兰州至张掖三四线越岭隧道选线研究[J]. 铁道标准设计, 2017, 61 (9): 16-20.
WU Xueshi. Research on Summit Tunnel Route Selection of the Third and Fourth Lines on Lanzhou-Zhangye High Speed Railway [J]. Railway Standard Design, 2017, 61 (9): 16-20.

[7] 周丁恒, 曹力桥, 房师涛, 等. 特大断面隧道支护结构现场试验与三维效应分析[J]. 土木工程学报, 2011, 44 (2): 136-142.
ZHOU Dingheng, CAO Liqiao, FANG Shitao, et al. In-situ Test and 3D Effect Analysis of a Tunnelling Structure of Large Cross Section[J]. China Civil Engineering Journal, 2011,44 (2): 136-142.

[8] 蒋 坤, 夏才初, 卞跃威. 节理岩体中双向八车道小净距隧道施工方案优化分析[J]. 岩土力学, 2012, 33 (3): 841-847.
JIANG Kun, XIA Caichu, BIAN Yuewei. Optimal Analysis of Construction Schemes of Small Space Tunnel with Bidirectional Eight Traffic Lanes in Jointed Rock Mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33 (3): 841-847.

[9] 朱朝佐, 谢文清. 硬质岩浅埋大断面隧道施工技术[J]. 现代隧道技术, 2017 (3): 190-194 .
ZHU Xhaozuo, XIE Wenqing. Construction Techniques for a Shallow-buried Tunnel with a Large Section in Hard Rock[J]. Modern Tunnelling Technology, 2017, (3): 190-194 .

[10] 四川交通运输厅交通勘察设计研究院. 成都新机场高速公路隧道土建初步设计文件[R]. 成都：四川交通运输厅交通勘察设计研究院，2015.
Sichuan Provincial Transport Department Highway Planning, Survey, Design and Research Institute. Preliminary Design Document of Civil Engineering for Expressway Tunnel of Chengdu New Airport[R].Chengdu: Sichuan Provincial Transport Department Highway Planning, Survey, Design and Research Institute，2015.

[11] 中华人民共和国行业标准. 公路路线设计规范: JTG D20-2017[S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
Industrial Standard of the People′s Republic of China. Design Specification for Highway Alignment: JTG D20-2017[S]. Beijing: China Communications Press, 2018.

[12] 中华人民共和国行业标准. 公路工程技术标准: JTG B01-2014[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
Industrial Standard of the People′s Republic of China. Technical Standard of Highway Engineering: JTG B01-2014[S]. Beijing: China Communications Press, 2014.

（下转第156页）