

【工程应用】

浅议软土地区路桥过渡段质量控制指标

何长明, 黎 军

(广州市市政工程设计研究总院有限公司, 广东 广州 510060)

摘要: 现行公路和城市道路规范对软土区路桥过渡段的质量要求主要基于道路等级确定路基的容许工后沉降, 在质量控制时未充分考虑公路与城市道路设计速度的影响, 未明确路桥过渡段长度及渐变率, 也未明确桥头处错台高度, 导致部分软土区路桥过渡段出现陡坡型、错台型等影响行车安全的病害形式。结合路桥过渡段安全性、舒适性及车路协同研究成果, 分析了公路和城市道路各等级道路与设计速度的关系, 并对设计速度进行定档分级, 提出基于设计速度的质量评价体系, 有效整合了公路和城市道路规范的相关要求。为保证路桥过渡段质量控制指标的延续性, 承继了现行规范中路桥过渡段容许工后沉降指标要求并进行优化; 将路线规范中的超高渐变率引入路桥过渡段, 以确定满足行车安全的渐变率; 通过容许工后沉降和渐变率计算出过渡段长度, 并引入最大错台高度控制“桥头跳车”。路桥过渡段采用基于设计速度的多指标质量控制, 可为科学、合理确定桥头段软基处理方案提供依据, 也有利于软土区路桥过渡段的整体质量控制。

关键词: 道路工程; 路桥过渡段; 桥头跳车; 设计速度; 工后沉降; 附加纵坡渐变率; 质量控制指标
中图分类号: TU47 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7195(2022)S-0078-08

Discussion on quality control index of abutment in soft soil areas

HE Chang-ming, LI Jun

(Guangzhou Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510060, Guangdong, China)

Abstract: The quality requirements of current highway and urban road specifications for the transition section of road and bridge in soft soil areas are mainly based on the road grade to determine the allowable post-construction settlement of the roadbed. However, the influence of the design speed of highways and urban roads is not fully considered. The length and gradient rate of the transition section of road and bridge is not specified. And the abutment staggering height at the abutment is not clear, resulting in steep slope, abutment staggering and other forms of diseases that affect the driving safety in the transition section of road and bridge in soft soil areas. Combined with the research results of safety, comfort and vehicle-road coordination in the transition section of road and bridge, the relationship between various grades of road and design speeds of highway and urban roads is analyzed, and a quality evaluation system based on design speed is proposed. The relevant requirements of highway and urban road codes are integrated. To ensure the continuity of the quality control index of the road-bridge transition section, the requirements of the allowable post-construction settlement index of the road-bridge transition section in the current specification are adopted and optimized. The superelevation gradient rate in the route specification is introduced into the road-bridge transition section to determine the gradient rate that meets the specific driving safety. The length of the transition section is calculated by allowing the post-construction settlement and gradient rate. The maximum abutment staggering height is introduced to control the “bump at bridge-head”. The multi-index quality control based on the design speed is adopted in the road-bridge transition section, which can provide a scientific and reasonable basis for determining the soft foundation treatment scheme of the bridge head section, and is also conducive to the overall quality control of the road-bridge transition section in the soft soil areas.

Key words: road engineering; road bridge transition section; bump at bridge head; design speed; post construction settlement; additional longitudinal gradient rate; quality control index

0 引言

路桥过渡段主要指路基与桥梁、涵洞等结构物衔接时需特殊处理的路段。桥台一般采用钢筋混凝土结构, 软土地区桥台基础一般采用桩基础, 工后沉降小; 路堤一般为线状柔性构筑物, 常采用填土或填石路基, 路基基础可采用天然地基、预压地基或复合地基, 在荷载长期作用下均可能产生较大的塑性变形, 造成路桥过渡段存在一定差异沉降, 严重时导致“桥头跳车”, 危及安全^[1-3]。

现行规范^[4-5]沿用 1996 年发布的《公路软土地基路堤设计与施工技术规范》的要求, 对路桥过渡段的工后沉降值进行控制。随着我国公路和城市道路的快速的发展, 对路桥过渡段的行车安全性、舒适性要求越来越高。刘吉福等^[6]认为路桥过渡段仅采用容许工后沉降指标过于单一, 即使满足规范容许工后沉降要求, 仍可能因纵坡差太大产生桥头跳车; 胡思涛等^[7]研究了不同行车速度下路桥过渡段的容许台阶高度; 敬伟^[8]从基于安全性的角度对路桥过渡段的错台高度进行研究; 崔梦璇^[9]从基于舒适性角度研究路桥过渡段的最大沉降量和最大纵坡变化值。如何在安全、经济合理的前提下, 提出全面、有效控制路桥过渡段的质量指标, 是软土地区路桥过渡段质量控制的重点和难点。

1 路桥过渡段的主要病害

桥台和路基由于结构型式、施工工艺、地基处理方式不同, 必然产生一定的差异沉降。图 1~3 中路桥过渡段设计线, 是理想状态下的路面行车线。图 1 为路桥过渡段的路基沉降大, 未采取有效措施控制过渡段沉降, 导致路基侧产生错台型沉降; 图 2 为路桥过渡段长度较短或路基段沉降较大, 导致路桥过渡段附加纵坡较大; 图 3 中路桥过渡段设置足够的长度, 满足沉降渐变的要求。

从图 1~3 可以看出, 为保证路桥过渡段的过渡平顺, 避免出现错台型、陡坡型路桥过渡段, 在满足工后沉降的前提下, 还需要控制过渡段长度、过渡段附加纵坡渐变率、错台高度等技术指标。

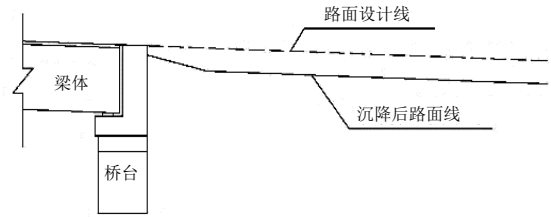


图 1 错台型路桥过渡段

Fig. 1 Staggered transition section

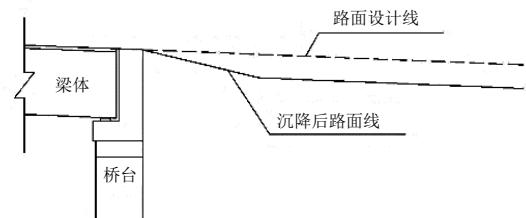


图 2 陡坡型路桥过渡段

Fig. 2 Steep slope transition section

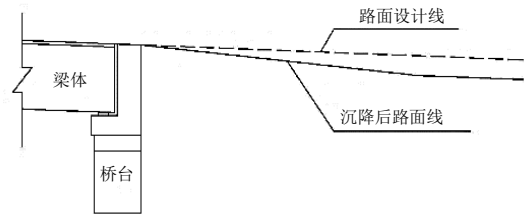


图 3 渐变型路桥过渡段

Fig. 3 Gradient transition section

2 既有控制标准存在的问题

现行《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)将容许工后沉降作为桥头路段的控制指标, 容许工后沉降的控制标准如表 1。

现行《城市道路路基设计规范》(CJJ194—2013)也将容许工后沉降作为桥头路段的控制指标, 容许工后沉降的控制标准如表 2。

从表 1、表 2 可以看出, 上述容许工后沉降要求均是基于道路等级来确定, 对软土地区高等级道路路桥过渡段沉降控制起了重要作用。工程实践表明, 上述规范对桥头路段的控制标准尚存在以下值得商榷之处。

(1) 对容许工后沉降的确定未充分考虑设计速度的影响

现行规范均采用基于道路等级确定路桥过渡段的容许工后沉降, 未充分考虑设计速度的影响, 从闫王晨^[10]、刘国杰等^[11]学者对路桥过渡段差异沉降的研究看, 运行速度是影响行车舒适性的主要因素。

表1 公路容许工后沉降

Table 1 Allowable post construction settlement of highway

公路等级	桥台与路堤相邻处/m	涵洞、通道处/m	一般路段/m
高速公路、一级公路	≤0.10	≤0.20	≤0.30
二级公路(干线)	≤0.20	≤0.30	≤0.50

表2 城市道路容许工后沉降

Table 2 Allowable post construction settlement of urban roads

道路等级	桥台与路堤相邻处/m	涵洞、通道处/m	一般路段/m
城市快速路、城市主干路	≤0.10	≤0.20	≤0.30
城市次干路	≤0.20	≤0.30	≤0.50

(2) 未规定过渡段附加纵坡渐变率

过渡段差异沉降导致路面局部纵坡及竖曲线斜率改变,影响行车平顺性和安全性^[12]。刘吉福等^[6]对广东省68座桥台和涵洞进行了桥头跳车试验,在一定的设计速度下,附加纵坡较小时,不会产生跳车,随着附加纵坡的增加,依次会出现轻微跳车、跳车和严重跳车,以致影响行车安全性。在一定的附加纵坡下,汽车行驶速度越高,越容易产生跳车。因此,有必要对路桥过渡段的附加纵坡渐变率进行控制。

(3) 未明确过渡段的长度

现行规范未对过渡段长度提出明确要求,不利于指导软土区路桥过渡段的设计与施工,难以保证路桥过渡段的行车舒适性。

(4) 未明确错台高度的要求

错台高度直接影响行车舒适性和行车安全^[13-14],现行规范并未对错台高度提出明确要求。陈景星等^[15]引入动荷载作为行车评价指标,对路桥过渡段的台阶高度进行测试,提出基于安全性的路桥过渡段沉降控制指标。

(5) 对低等级的道路缺乏控制标准

现行公路规范未对三级、四级公路路桥过渡段的容许工后沉降提出明确要求,城市道路规范也未对支路提出相关要求。上述道路虽等级较低,但若不对路桥过渡段的质量进行控制,仍会出现桥头跳车。

综上所述,现行规范采用单一指标(容许工后沉降)控制路桥过渡段的质量,难以有效控制和全面评价过渡段的质量,有必要对现行规范的路桥过渡段相关指标进行补充和完善。

3 评价依据的选择

3.1 现行规范基于道路等级控制容许工后沉降

1996年发布的《公路软土地基路堤设计与施工技术规范》(JTJ 017—96)首次以规范形式明确了桥头路段的容许工后沉降值,根据道路等级的不同,确定相应的容许工后沉降。

2004年《公路路基设计规范》(JTG D30—2004)纳入上述标准,2015年发布的《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)表7.7.1继续沿用上述标准,并在条文说明中明确了工后沉降的计算时间,即路面设计使用年限(沥青路面15年,水泥混凝土路面为30年)内的残余沉降。

2013年,住建部发布《城市道路路基设计规范》(CJJ 194—2013),6.2.8条明确了城市道路路基容许工后沉降变形的标准。控制依据和工后沉降标准和公路行业规范基本一致,其中快速路、主干路参考高速公路、一级公路的工后沉降标准,城市次干路参考干线二级公路的工后沉降标准。

3.2 基于道路等级确定容许工后沉降存在的问题

道路等级由其功能定位决定,和设计速度具有一定的相关性。根据《公路工程技术标准》(JTG B01—2014)和《城市道路工程技术规范》(CJJ 37—2012),各等级道路的设计速度见表3。

结合表1、表2、表3,可以看出:

(1) 高速公路、一级公路、城市快速路、城市主干路采用相同的工后沉降标准,而其设计速度范围为40~120 km/h,跨度明显偏大。

(2) 既有规范对部分设计速度较高道路沉降控制标准偏低,如二级公路设计速度60~80 km/h,大于城市主干路设计速度(40~60 km/h),但沉降控制标准却低于城市主干路。

表3 各级道路设计速度一览表
Table 3 List of design speed of roads at all levels

道路等级	设计速度/(km/h)							
高速公路	120	100	80	—	—	—	—	—
一级公路	—	100	80	60	—	—	—	—
城市快速路	—	100	80	60	—	—	—	—
城市主干路	—	—	—	60	50	40	—	—
二级公路	—	—	80	60	—	—	—	—
城市次干路	—	—	—	—	50	40	30	—
三级公路	—	—	—	—	—	40	30	—
四级公路	—	—	—	—	—	—	30	20
城市支路	—	—	—	—	—	40	30	20

3.3 基于设计速度确定路桥过渡段评价体系

通过上述分析, 基于道路等级确定工后沉降存在一定的局限性。闫王晨^[10]建立了车-路-桥系统模型, 研究路桥过渡段的差异沉降对车-路-桥系统振动的影响, 研究显示同一车型通过路桥过渡段的台阶时, 运行速度越高, 整车舒适度水平越低。

刘国杰等^[11]应用 MATLAB 软件编制基于人-车-路相互作用的行驶舒适性评价程序, 得出行驶方向对行车舒适性基本没影响, 但运行速度对行驶舒适性影响很大, 且路桥过渡段的差异沉降引起的路面不平整是影响行车舒适性的主要因素。

因此, 结合闫王晨、刘国杰等学者的研究成果, 有必要调整路桥过渡段的评价依据, 将现行规范基于道路等级调整为基于设计速度确定路桥过渡段的评价体系。

3.4 设计速度的定档

从表3可以看出: 设计速度 60~100 km/h 为高等级道路的分布范围, 设计速度 20~30 km/h 为低等级道路的分布范围。故将设计速度分为四档:

- 第一档: 设计速度 120 km/h;
- 第二档: 设计速度 60~100 km/h;
- 第三档: 设计速度 40~50 km/h;
- 第四档: 设计速度 20~30 km/h。

4 主要评价指标

4.1 容许工后沉降

考虑到现行规范中容许工后沉降指标已使用 20 多年, 工程技术人员广泛接受, 新的评价指标在表 1, 表 2 的基础上, 结合 3.4 节设计速度的定档, 拟根据以下原则完善工后沉降标准:

- (1) 为保证规范的延续性, 将设计速度位于

60~100 km/h 区间的高速公路、一级公路、城市快速路、城市主干路, 仍维持现行的技术标准。

(2) 为确保行车舒适性, 适当提高设计速度 120 km/h 的高速公路路桥过渡段工后沉降指标, 由 0.10 m 提高到 0.075 m。

(3) 为保障行车安全和行车舒适性, 提高设计速度 60~80 km/h 的二级公路路桥过渡段工后沉降指标, 由 0.20 m 提高到 0.10 m。

(4) 为保障行车舒适性, 适当提高设计速度 40~50 km/h 的城市次干路路桥过渡段工后沉降指标, 由 0.20 m 提高到 0.15 m。

(5) 适当降低设计速度 40~50 km/h 的城市主干路路桥过渡段工后沉降指标, 由 0.10 m 放宽到 0.15 m, 同时为确保行车舒适性, 拟增加其他控制指标。

(6) 明确设计速度 20~30 km/h 的三级公路、四级公路、城市支路工后沉降指标, 路桥过渡段工后沉降明确为 0.20 m, 但对低等级道路一般路段工后沉降不作要求。

调整后依据设计速度确定工后沉降标准, 详见表 4。

表4 容许工后沉降表
Table 4 Allowable post construction settlement table

设计速度/ (km/h)	桥台与路堤 相邻处/m	涵洞、 通道处/m	一般路段/m
120	≤0.075	≤0.15	≤0.20
60~100	≤0.10	≤0.20	≤0.30
40~50	≤0.15	≤0.25	≤0.50
20~30	≤0.20	≤0.30	不作要求

4.2 过渡段附加纵坡渐变率

路桥过渡段自身存在一定纵坡度, 在自重荷载

长期作用下,会产生一定沉降,形成一个附加纵坡度,该坡度较大、坡长(过渡段长度)较短时容易造成行车颠簸。《广东省公路软土地基设计与施工技术规定》(GDJTG/T E01—2011)表 4.3.2-2 对结构物附近工后差异沉降率提出要求,详见表 5。

《公路路线设计规范》(JTG D20—2017) 7.5.4 条对道路的超高渐变率作出了规定,如表 6 所示。

表 5 结构物附近容许工后差异沉降率建议值

Table 5 Recommended value of allowable post construction differential settlement rate near structures

设计速度/(km/h)	工后差异沉降率/%
110	0.5
80	0.6
60	0.8

表 6 超高渐变率一览表

Table 6 Superelevation gradient rate

设计速度/(km/h)	绕边线	旋转/%
120	1/200	0.50
100	1/175	0.57
80	1/150	0.67
60	1/125	0.80
40	1/100	1.00
30	1/75	1.33
20	1/50	2.00

超高渐变率 P 也是一种附加纵坡,其取值在 0.5%~2.0%,说明该范围的附加纵坡变化能够较好满足行车舒适度和排水要求。

桥头路基过渡段的附加纵坡渐变率可以参考超高渐变率形成的附加纵坡率,同时考虑到部分桥头路段自身可能已存在超高渐变,为避免两附加纵坡叠加造成行车不顺,故将一般路段工后沉降引起的附加纵坡控制在 $0.5P$,路桥过渡段未设置超高

时,可取极限值。详见表 7。

表 7 附加纵坡渐变率一览表

Table 7 Gradient rate of additional longitudinal slope

设计速度/(km/h)	附加纵坡渐变率	一般值/%	附加纵坡渐变率	极限值/%
120	1/400	0.25	1/250	0.40
60~100	1/250	0.40	1/166	0.60
40~50	1/200	0.50	1/133	0.75
20~30	1/150	0.67	1/100	1.00

4.3 过渡段长度

过渡段按结构类型可分为刚性过渡段和柔性过渡段,刚性过渡段主要指桥头搭板部分,柔性过渡段也称软基处理过渡段,是指桥台与一般软基处理路段之间范围。按照表 7 附加纵坡渐变率要求,结合表 4 容许工后沉降,可求得过渡段长度,详见表 8。

从表 8 可以看出,软基过渡段长度在 15~60 m 之间,随着设计速度的降低、工后沉降容许值变大,附加纵坡渐变率也变大,过渡段长度主要集中在 30~50 m。

同时,软土路段工后沉降较难控制,为确保桥梁与路基刚柔结合部过渡顺畅,有必要同时控制桥台搭板长度和软基处理过渡段长度。

为避免桥头跳车,软土区桥台均应设置搭板。根据《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015) 3.4.3 条:桥头锥体及桥台台后 5~10 m 长度范围内的引道,可用砂性土等材料填筑。3.3.4 条要求:高速公路、一级公路和二级公路的桥头宜设置搭板。搭板厚度不宜小于 0.25 m,长度不宜小于 5 m。

综合分析,形成路桥过渡段段长度一览表,详见表 9。

表 8 过渡段长度计算表

Table 8 Calculation of transition section length

设计速度/(km/h)	附加纵坡渐变率/%	工后沉降	工后沉降	工后沉降	工后沉降	工后沉降	工后沉降
		7.5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	25 cm	30 cm
120	0.25	30	40	60	—	—	—
60~100	0.40	—	25	40	50	—	—
40~50	0.50	—	20	30	40	50	—
20~30	0.67	—	15	22	30	40	45

表9 过渡段长度一览表
Table 9 Transition section length

设计速度/(km/h)	过渡段长度/m	搭板长度/m
120	30~60	≥6
60~100	25~50	≥6
40~50	20~50	≥5
20~30	15~45	≥5

4.4 最大错台高度

桥台处错台直接影响行车的舒适性,错台高度较大时严重影响行车安全^[16-17]。

冯忠居等^[18]经过行驶实测表明,运行速度在60~140 km/h 范围内,台阶高度在1.5 cm 以下时,对车辆行驶无明显影响。贾瑞雨^[19]研究认为错台高度宜控制在1 cm 以内;王秉纲等^[20]经过行车调查发现,当运行速度为100 km/h 时,2~3 cm 高的台阶对行车有显著影响;陈景星等^[15]引入动荷载系数作为行车安全性评价指标,研究路桥过渡段差异沉降量化指标,对错台型路桥过渡段建立计算模型。当台阶高度为5 cm 时,前后轮受力的最小值已接近零。当台阶高度为7 cm 时,前后轮的受力出现负值。这种情况车辆运行相当危险,特别是雨雪天气,路面潮湿打滑,前轮脱空的情况下,车辆的操纵性降低,极易出现交通事故。

为确保行车安全,有必要控制错台高度,特别是软土区路桥过渡段的错台高度。

《公路工程质量检验评定标准》(JTGF80—1—2017)表7.2.2可知,新建水泥混凝土面层实测项目中相邻板高差:高速公路、一级公路不大于2 mm,其他公路不大于3 mm。

《公路水泥混凝土路面养护技术规范》(JTJ073.1—2001)4.3.5条将错台病害分为3个轻重程度等级:

- (1) 轻微-错台量小于5 mm。
- (2) 中等-错台量5~10 mm。
- (3) 严重-错台量大于10 mm。

综上所述:桥台搭板的错台高度可以参考《公路水泥混凝土路面养护技术规范》的要求,但设计速度速度较高时,宜采用更严格的控制标准。

即新建项目设置搭板时桥台搭板的错台高度应小于5 mm,设计速度高的高速公路、一级公路、城市快速路错台高度宜小于3 mm。桥头过渡段最大错台高度详见表10。

表10 最大错台高度一览表
Table 10 Maximum staggering height

设计速度/(km/h)	最大错台高度	
	一般值/mm	极限值/mm
120	3	5
60~100	5	10
40~50	8	15
20~30	10	20

4.5 小结

综合4.1~4.4节对容许工后沉降、附加纵坡渐变率、过渡段长度、最大错台高度的分析,路桥过渡段质量控制指标详见表11。表11中的容许工后沉降、附加纵坡渐变率、过渡段长度、错台高度等四项质量控制指标需同时满足,才能确保软土区路桥过渡段平缓过渡,有效保障行车的安全性和舒适性。

目前该多质量控制指标已应用于南沙、珠海等深厚软土区市政道路工程。具体控制时建议在设计阶段根据设计速度、道路等级及地质情况选择合适的软基处理方式以控制过渡段工后沉降;再根据设计速度选择必要的过渡段长度以控制附加纵坡变化率,错台高度主要在施工阶段进行控制。

表11 质量控制指标一览表
Table 11 Quality control index

设计速度/ (km/h)	容许工后沉降/m			附加纵坡渐变率/%			过渡段长度/m		错台高度/mm		
	桥台与路堤 相邻处	涵洞、 通道处	一般路段	一般值	极限值	搭板	过渡段	一般值	极限值		
120	≤0.075	≤0.15	≤0.20	1/400	0.25%	1/250	0.40%	≥6	30~60	3	5
60~100	≤0.10	≤0.20	≤0.30	1/250	0.40%	1/166	0.60%	≥6	25~50	5	10
40~50	≤0.15	≤0.25	≤0.40	1/200	0.50%	1/133	0.75%	≥5	20~50	8	15
20~30	≤0.20	≤0.30	不作要求	1/150	0.67%	1/100	1.00%	≥5	15~45	10	20

5 结 论

(1) 软土地区路桥过渡段的质量控制指标由基于道路等级调整为基于设计速度后,可较好整合公路和城市道路规范的相关要求,有利于路桥过渡段的质量控制。

(2) 路桥过渡段采用容许工后沉降、附加纵坡变化率、过渡段长度、错台高度等多指标控制后,可有效保障软土区路桥过渡段的过渡质量。即使设计速度 40、50 km/h 城市主干路的容许工后沉降标准放宽,在附加纵坡变化率、过渡段长度、错台高度等多指标控制下,也能保证主干路行车的安全性和舒适性。

参考文献

- [1] 吴毅翔. 公路桥头过渡段路基病害特征及处理方法[J]. 公路交通科技, 2012(5): 5-14.
WU Yi-xiang. Disease features of roadbed of transition section on bridgehead of highway and treatment methods[J]. Technology of Highway and Transport, 2012(5): 5-14.
- [2] 何长明, 彭功勋. 深厚软土区路桥过渡段差异沉降控制[J]. 岩土工程技术, 2021, 35(5): 294-298.
HE Chang-ming, PENG Gong-xun. Differential settlement control of road bridge transition section in deep soft soil area[J]. Geotechnical Engineering Technique Technology of Highway and Transport, 2021, 35(5): 294-298.
- [3] 段冰, 任超. 浙江软土地基上营运高速公路沉降现状调查与分析[J]. 地基处理, 2020, 2(5): 414-418.
DUAN Bing, REN Chao. Investigation and analysis of expressway settlement on soft ground in Zhejiang[J]. Journal of Ground Improvement, 2020, 2(5): 414-418.
- [4] 中华人民共和国交通运输部. 公路路基设计规范: JTG D30—2015[S]. 北京: 北京人民交通出版社, 2015.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Code for Design of Highway Subgrade: JTG D30—2015[S]. Beijing: People's Communications Press, 2015.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市道路路基设计规范: CJJ 194—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
Ministry of Housing and Urban-rural Development of the People's Republic of China. Code for Design of Road Subgrade: CJJ 194—2013[S]. Beijing: People's Communications Press, 2015.
- [6] 刘吉福, 莫海鸿. 对公路容许工后沉降的建议[J]. 路基工程, 2007, 133(4): 127-128.
LIU Ji-fu, MO Hai-hong. Suggestions on allowable post construction settlement of highway[J]. Subgrade Engineering, 2007, 133(4): 127-128.
- [7] 胡思涛, 项乔君. 公路路桥过渡段容许台阶高度的确定方法[J]. 公路, 2014(2): 89-92.
HU Si-tao, XIANG Qiao-jun. A method to determine allowable differential settlement between bridge and approach embankment[J]. Highway, 2014(2): 89-92.
- [8] 敬伟. 基于安全性的路桥过渡段车辆-路面动力响应研究[D]. 西安: 长安大学, 2010.
JING Wei. Research on dynamic response of vehicle-pavement in the bridge-subgrade transition section base on safety[D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.
- [9] 崔梦璇. 基于舒适性的路桥过渡段差异沉降控制标准研究[D]. 西安: 长安大学, 2010.
CUI Meng-xuan. Control standard for differential settlement in bridge-subgrade transition section based on comfort property[D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.
- [10] 闫王晨. 桥头路桥不平顺引起的车桥振动研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
YAN Wang-chen. Study of vehicle-road-bridge vibration caused by the road and bridge unevenness at the end of the bridge[D]. Changsha: Hunan University, 2015.
- [11] 刘国杰, 陶向华, 黄晓明. 基于人车路相互作用的路桥结合处差异沉降控制标准[J]. 公路交通科技, 2008, 25(6): 44-48.
LIU Guo-jie, TAO Xiang-hua, HUANG Xiao-ming. Differential settlement control criteria of bridge-approach junction based on people-vehicle-road interaction[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(6): 44-48.
- [12] 高志伟. 基于行驶平顺性的公路软基过渡段均衡沉降控制研究[D]. 西安: 长安大学, 2013.
GAO Zhi-wei. Balanced settlement control of transition section on highway soft ground based on ride comfort[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.
- [13] 李伟, 闫科伟. 基于行车舒适性评价的路面错台养护措施研究[J]. 公路, 2019(12): 266-270.
LI Wei, YAN Ke-wei. Research on the maintenance strategy for pavement fault based on evaluation of driving comfort[J]. Highway, 2019(12): 266-270.

- [14] 陈仁朋, 贾瑞雨, 姜正晖, 等. 不均匀沉降条件下车-路相互作用及道路纵面设计分析[J]. 中国公路学报, 2017, 30(4): 1-8.
CHEN Ren-peng, JIA Rui-yu, JIANG Zheng-hui, et al. Analyses of vehicle-road interaction under the condition of uneven settlement and road profile alignment design[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(4): 1-8.
- [15] 陈景星, 冯忠居, 郑木莲, 等. 基于安全性的路桥过渡段差异沉降控制标准[J]. 公路交通科技, 2013, 30(2): 26-31.
CHEN Jing-xing, FENG Zhong-ju, ZHENG Mu-lian, et al. Control criterion of differential settlement of bridge approach based on safety[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Developmen, 2013, 30(2): 26-31.
- [16] 沈宇鹏, 张尧禹, 柴树山, 等. 公路路桥过渡段搭板设计参数优化[J]. 北京交通大学学报, 2017, 41(3): 55-60.
SHEN Yu-peng, ZHANG Yao-yu, CHAI Shu-shan, et al. Optimization for design parameters of highway bridge approach slab[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2017, 41(3): 55-60.
- [17] YAN W C, DENG L, YIN X F. Allowable slope change of approach slabs based on the interacted vibration with passing vehicles[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2016, 20(6): 2469-2482.
- [18] 冯忠居, 方贻立, 龚坚城, 等. 高等级公路桥头跳车的危害及其机理的分析[J]. 西安公路交通大学学报, 1999, 19(4): 33-35.
FENG Zhong-ju, FANG Yi-li, GONG Jian-cheng, et al. Analysis of the harmful effect of vehicle bump at bridge head of the highway and its mechanism[J]. Journal of Xi'an Highway University, 1999, 19(4): 33-35.
- [19] 贾瑞雨. 基于行车舒适性的高速公路沉降评价和扩建纵面设计研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
JIA Rui-yu. Study on expressway settlement evaluation and profile design of extension project based on driving comfort[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [20] 王秉纲, 胡长顺. 跨构造物路面结构修筑技术研究综述[J]. 西安公路交通大学学报, 1998, 18(3B): 143-147.
WANG Bing-gang, HU Chang-shun. Research progress of construction technology of over structure pavement[J]. Journal of Xi'an Highway University, 1998, 18(3B): 143-147.