

预制承插式桥墩受力性能研究

傅晨曦, 苏强

(华设设计集团股份有限公司, 南京 江苏 210000)

摘 要: 预制承插式桥墩具有施工便捷、容许误差大、节点可靠等优势, 为推广该装配式桥墩在我国工程应用, 依托某高速改扩建项目, 基于 ABAQUS 有限元计算平台, 对工程中采用的承插式连接的预制装配式桥梁进行足尺实体建模。同时, 建立相同尺寸的现浇式桥墩有限元模型, 对二者进行单调位移加载。数值模拟结果表明, 承插式连接与现浇连接受力性能基本相似, 具有较好的受力性能, 实际工程中可认为其等同现浇连接, 具有较大的推广价值。

关键词: 预制承插式桥墩; 数值模拟; 受力性能

中图分类号: U416

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)08-0270-05

0 引言

目前, 我国已进入城市化快速发展的阶段, 据住建部统计, 2020 年我国常住人口城镇化率达到 63.9%。为解决城市交通问题, 满足快速、绿色的桥梁建设需求, 预制桥梁拼装技术应运而生。国内外的研究人员主要依据桥型拼装特点与工程环境等因素, 对预制装配式桥墩连接节点处的构造进行了分类, 主要可分为灌浆套筒连接、灌浆波纹管连接、后张预应力连接、承插式连接等几种连接方式^[1]。灌浆套筒连接是通过预埋在墩柱或者承台的灌浆套筒将预制构件的钢筋进行连接, 研究表明其具有明确的传力机制, 抗震性能与现浇式桥墩相似^[2,3]。然而, 灌浆套筒连接对施工精度要求较高, 且套筒灌浆饱满度检测较为困难^[4]。与灌浆套筒连接类似, 灌浆波纹管连接是将墩身的钢筋与承台钢筋通过灌浆料锚固在金属波纹管中^[2], 抗震性能类似于现浇结构, 拼装时可允许较大的施工误差, 但对接头处钢筋约束效应相对较弱, 耐久性相对一般。后张预应力连接常用于预制节段拼装桥墩^[5], 通过竖向预应力筋将盖梁、墩柱以及承台拼装成整体。根据文献调研, 采用后张预应力连接的装配式桥墩最大优点是具有自复位能力, 但缺点是桥墩安全性能过于依赖预应力筋^[6], 且预应力筋防腐、检查与更换较为困难, 易发生应力松弛, 并且相对于其他连接方式耗能较差。

预制承插式桥墩是通过将预制墩柱插入承台预留的承插孔中, 并在接缝周围注入高性能灌浆料的

一种新型装配式桥墩连接方式。承插式连接的施工方式主要分为先浇法与后浇法, 其中, 先浇法是先完成承台的浇筑, 之后在接缝处填入高强灌浆料如图 1(a)所示。后浇法是将墩柱插入承台钢筋笼预留的孔槽中, 之后直接与承台一起浇筑, 如图 1(b)所示。相比于传统的灌浆套筒连接、波纹管连接等方式, 承插式连接具有施工精度要求较低、施工便捷且现场作业量少的优势, 为预制桥梁下部结构提供了一种较好的选择。近年来, 国内外一些桥梁工程采用了承插式连接构造, 如美国华盛顿州 SR520 公路的 interstate 5 号公路桥就采用了该种连接方式^[7], 并在预制墩柱嵌入段表面设置环形凹槽以增大承台与基础之间的粘结力。



(a) 先浇法

(b) 后浇法

图1 承插式连接的施工方式

2014 年, 坎贝雷大学 M.Mashal 等通过拟静力试验研究了承插式连接的双柱式预制拼装体系的抗震性能, 试验结果证明承插式连接桥墩具有较好的整体受力效果^[8]。2019 年, 王志强等依托于上海嘉闵高架承插式连接的预制桥墩工程项目, 对 2 个灌浆套筒与承插式连接的缩尺预制桥墩模型进行拟静力试验研究, 同时设置了两个现浇式桥墩进行对比。结果显示, 承插式桥墩的抗震性能与现浇桥墩基本一致, 当承

收稿日期: 2022-10-10

作者简介: 傅晨曦(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事预制装配式桥梁和钢结构桥梁设计与研发工作。

插式连接界面处采用高强砂浆填充并在接缝处并设置剪力键可有效提高其抗震性能^[2,9]。2020 年,钱辉等^[10-11]基于承插式桥墩与多阶段桥墩的技术优点,提出一种新型自复位承插式多阶段预制桥墩(RSSPP),使用耐久性较好的 BFRP 筋和 2304 不锈钢钢筋,通过理论分析、数值模拟与参数分析,验证了新型 RSSPP 桥墩体系具有良好的抗震力学性能与自复位能力,并进一步提出了 RSSPP 桥墩耗能钢筋和预应力配筋计算公式。

为推广承插式连接桥墩的工程应用,本文依托于某高速公路预制装配式桥梁工程,基于 ABAQUS 有限元模拟平台对采用承插式连接的墩柱-承台接头处进行了单调推覆加载。同时,建立尺寸与实际完全相同的现浇式桥墩足尺有限元模型,将二者的数值模拟结果进行对比,从而对承插式桥墩的力学性能进行初步分析。

1 有限元模型建立

本文将采用有限元软件 ABAQUS 的实体单元模型建立承插式桥墩和现浇桥墩模型,并通过单调加载进行有限元模拟分析,为进一步研究承插式桥墩力学性能提供基础。

1.1 模型概况

某高速公路预制装配式桥梁的墩身与基础均为圆型截面,直径分别为 1 000 mm 与 2 200 mm。墩柱高为 4 500 mm,承台高为 1 500 mm,墩身埋置深度为 1.0 倍的直径(即 1 000 mm)。螺旋箍筋为直径是 10 mm 的光圆钢筋,分别在墩身的上底与下底的 200 mm 范围内进行加密。墩身主筋为 16 根直径是 36 mm 的钢筋,配筋率为 2.07%。纵筋内部每隔 200 mm 设置一道直径为 28 mm 的加劲筋,其中纵筋与加劲筋强度等级均为 HRB400 级,主体混凝土强度等级为 C40(见图 2、图 3)。

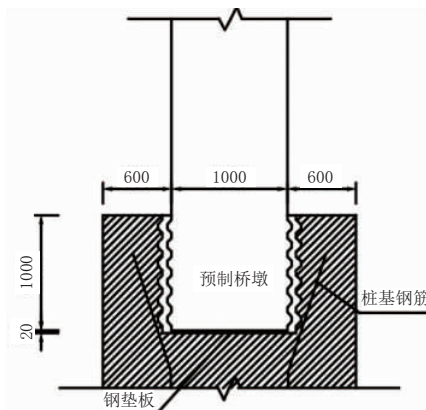


图 2 节点大样(单位:mm)

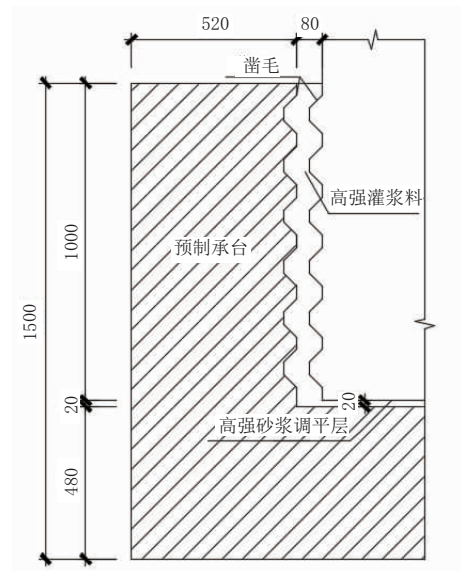


图 3 剪力键大样(单位:mm)

1.2 本构模型

本文选用 ABAQUS 针对混凝土材料提供的塑性损伤模型(Concrete Damaged Plasticity Model),该模型可定义混凝土的单轴受压和受拉应力-应变关系,同时引入损伤因子模拟混凝土在加载时的退化性能^[12]。CDP 模型假定混凝土材料主要有拉伸开裂和压缩破碎两个失效机制,使用损伤弹性结合各项同向拉伸和压缩塑性的模式来表示混凝土的非弹性行为,同时能够考虑到材料损伤、裂缝开展与闭合以及刚度变化等行为,具有较好的收敛性^[13]。

混凝土本构关系根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[14]给出的混凝土单轴拉伸与压缩应力-应变关系式,如式 1、式 2 所示:

单向受拉:

$$\sigma = \begin{cases} f_{t,r} \left[1.2 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{t,r}} - 0.2 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{t,r}} \right)^6 \right] & \varepsilon \leq \varepsilon_{t,r} \\ f_{t,r} \frac{\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{t,r}}}{\alpha_t \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{t,r}} - 1 \right)^{1.7} + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{t,r}} \right)} & \varepsilon \geq \varepsilon_{t,r} \end{cases} \quad (1)$$

单向受压:

$$\sigma = \begin{cases} f_{c,r} \frac{n \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c,r}} \right)}{n-1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c,r}} \right)^n} & \varepsilon \leq \varepsilon_{c,r} \\ f_{c,r} \frac{\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c,r}}}{\alpha_c \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c,r}} - 1 \right)^2 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c,r}} \right)} & \varepsilon \geq \varepsilon_{c,r} \end{cases} \quad (2)$$

$$n = \frac{E_c \varepsilon_{c,r}}{E_c \varepsilon_{c,r} - f_{c,r}} \quad (3)$$

式中: α_t, α_c 为混凝土单轴受拉、压应力-应变曲线

下降段参数值; $f_{t,r}, f_{c,r}$ 为混凝土单轴抗拉、抗压强度代表值; $\varepsilon_{t,r}, \varepsilon_{c,r}$ 为混凝土单轴抗拉、抗压强度代表值所对应的峰值应变。

混凝土单轴受压、受拉塑性损伤本构应力-应变关系分别如图4、图5所示,其中混凝土材料的轴心抗压和抗拉强度分别参照公式(1)、公式(2)。

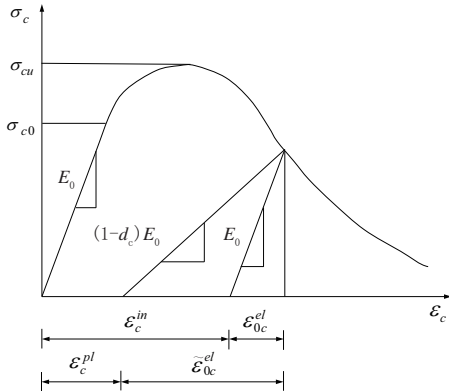


图4 混凝土单轴受压塑性损伤本构应力-应变关系

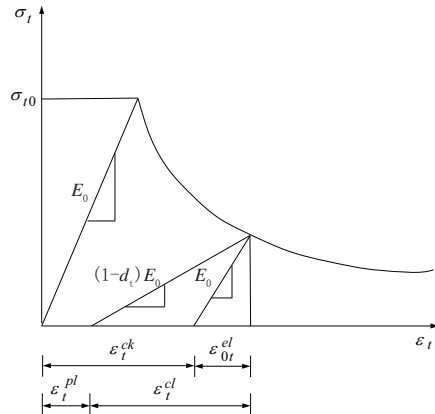


图5 混凝土单轴受拉塑性损伤本构应力-应变关系

钢筋本构关系采取常用的弹塑性双折线模型,假定钢筋在进入塑性阶段后其应力-应变曲线的斜率保持不变。为简化计算,取钢筋弹性模量 E_s 为 2.0×10^5 MPa,泊松比取 0.3,钢筋屈服之后的切线模量 $E_t=0.01 E_s$,关系式见式 4,钢筋双折线本构应力-应变关系如图 6。

$$\sigma_s = \begin{cases} \varepsilon_s E_s & \varepsilon_s \leq \varepsilon_y \\ f_y + E_t(\varepsilon_s - \varepsilon_y) & \varepsilon_s > \varepsilon_y \end{cases} \quad (4)$$

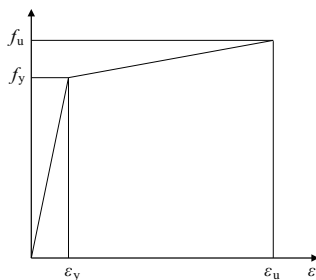


图6 钢筋双折线本构应力-应变关系

1.3 模型建立及求解

在 ABAQUS 软件中,根据该桥的原型进行实体建模,采用分离式建模方式,通过实体单元分别建立墩柱、灌浆料、承台的有限元分析模型,在软件的装配模块将三者进行组装,其中装配后的主体混凝土结构与钢筋笼如图7所示。将承台底部完全固定,在墩柱顶部中心处设置加载点,并将加载点与墩柱顶面进行耦合。由于实际工程的设计轴压比为 0.2,故在加载点处施加 4 500 kN 的竖向力,同时水平方向选用位移加载,总位移设置为 300 mm。

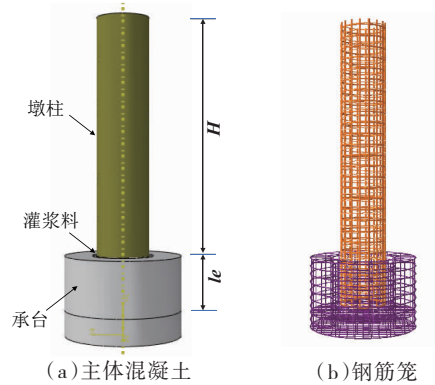


图7 有限元模型

分别对承插式与现浇式桥墩进行网格划分,如图8所示。其中,混凝土单元采用 C3D8R 模拟,钢筋单元选用 T3D2 模拟。由于模型几何形状较为复杂,对承台承插孔以上的部分采用几何适应性较好的四面体自由网格进行划分,墩柱与灌浆料的单元形状采用六面体网格划分。

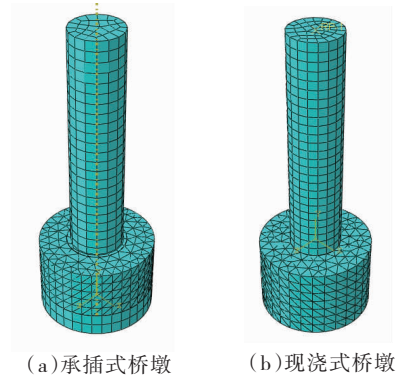


图8 网格划分

2 结果对比分析

2.1 破坏状态分析

两种有限元模型的应力云图如图9、图10所示。由于仿真采用单调加载,因此混凝土损伤主要出现在受压侧墩柱的塑性铰区以及承台的底部部分区域,钢筋在塑性铰区出现较大受力变形,模拟情况与实际受力一致。

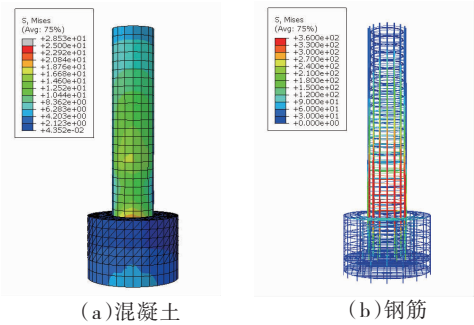


图 9 承插式桥墩应力云图

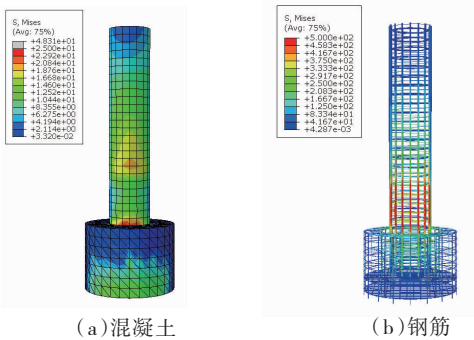


图 10 现浇式桥墩应力云图

等效塑性应变图可反映部件在加载完成时的塑性累积状态,其中塑性应变 PEEQ 大于零表示钢筋发生屈服^[15]。两个试件的混凝土和钢筋等效塑性应变如图 11、图 12 所示,承插式桥墩与现浇桥墩的受压侧混凝土受拉侧钢筋等效塑性应变较大,表明塑性铰区的混凝土在发生受拉开裂后,墩柱拉应力由钢筋进行承担,可体现出承插式连接桥墩中钢筋与混凝土较好的粘结机理。

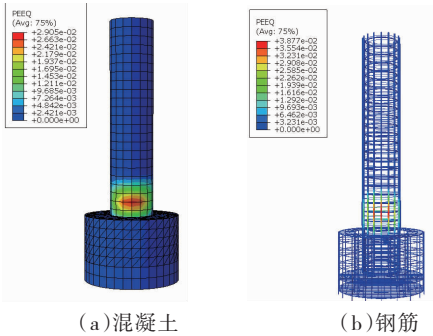


图 11 承插式桥墩等效塑性应变图

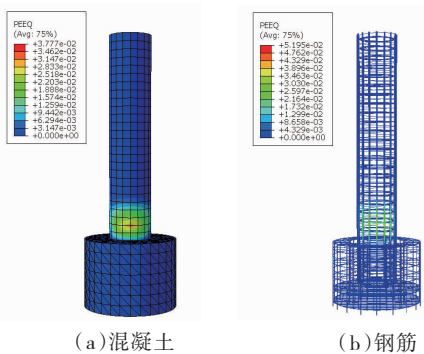


图 12 现浇式桥墩等效塑性应变图

2.2 参数对比

数值模拟得到的承插式构件 S1 与现浇构件 S2 的荷载 - 位移曲线与刚度退化曲线分别如图 13、图 14 所示。由图可以看出,承插式桥墩与现浇桥墩的骨架曲线趋势保持一致,同时刚度退化曲线二者基本重合,承插式桥墩的峰值荷载为 760.22 kN,现浇桥墩的峰值荷载为 768.23 kN,二者的承载力仅相差 1%。数值分析得到的相关参数如表 1 所示,包括屈服荷载、极限荷载、屈服位移等参数。其中,采用位移延性系数 μ_{Δ} 表示结构的延性,刚度折减系数 β_p 表示结构在加载过程中刚度的退化程度,其计算公式为:

$$\beta_p = K_0 / K_p \quad (5)$$

K_0 为初始刚度, K_p 为桥墩加载破坏点的割线刚度。从承载能力、刚度及延性等相关力学参数来看(见表 1),承插式桥墩均与现浇桥墩模型较为接近,由此可得出结论,在加载状况相同的情况下,预制承插式连接可认为在性能上等同于现浇式连接。

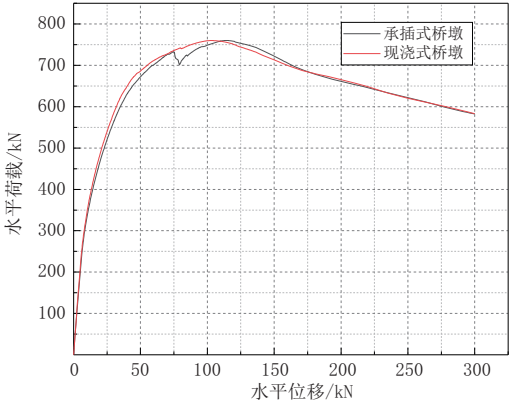


图 13 荷载 - 位移曲线

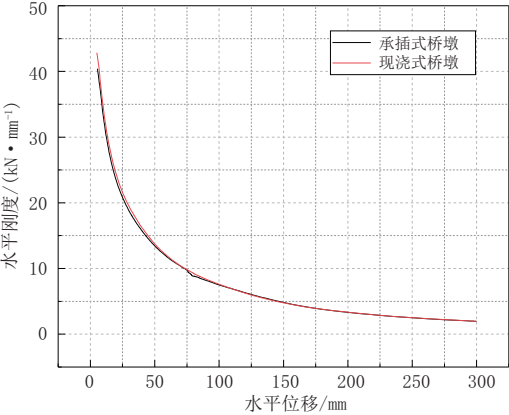


图 14 刚度退化曲线

3 结 论

本文以某高速公路工程为依托,基于 ABAQUS 计算平台对实际工程中采用预制承插式连接的预制装配式桥梁建立了足尺的有限元模型,采用单调加载方式,与尺寸完全相同的现浇式连接桥墩进行对

表1 模型参数分析结果

试件编号	屈服荷载 /kN	极限荷载 /kN	屈服位移 /kN	极限位移 /mm	初始刚度 /(kN·mm ⁻¹)	延性系数	刚度折减系数
S1	619.04	760.23	35.23	222.24	44.37	6.31	15.26
S2	617.22	768.23	38.37	219.56	42.20	5.72	14.19

比,结论如下:

(1)根据有限元软件后处理结果可知,承插式桥墩与现浇结构在受力、变形以及损伤状态等均与实际情况较为符合,表明所建立的有限元模型可靠。

(2)承插式桥墩与现浇桥墩在承载能力、刚度、延性均保持一致。因此,可认为其具有等同现浇的性能,在实际工程中可进行推广使用。

参考文献:

[1] 姜海西,卫张震.承插式预制拼装桥墩抗震性能研究综述[J].城市道桥与防洪,2017(12):56-59.

[2] 耿佳硕.采用UHPC现浇湿接缝连接的装配式桥墩抗震性能研究[D].郑州:郑州大学,2019.

[3] 王瑞龙,马磊,黄虹.灌浆套筒连接装配式桥墩建设思考及对策研究[J].中国市政工程,2021(4):63-65,110.

[4] 宋来健.装配式高速铁路桥墩抗震性能试验研究[D].南京:东南大学,2021.

[5] 刘阳.灌浆套筒连接装配式桥墩节点力学性能研究[D].广州:华南理工大学,2020.

[6] 禹智涛,潘浩,贺绍华.预应力轴压比对节段拼装桥墩力学性能影响分析[J].广东工业大学学报,2019,36(4):85-91.

[7] 徐艳,曾增,葛继平,等.承插式预制拼装桥墩的最小合理承插深度[J].同济大学学报(自然科学版),2019,47(12):1706-1711.

[8] 陈明珠.预制混凝土桥墩与承台承插式窄缝连接直剪性能研究[D].广州:广东工业大学,2021.

[9] Wang Z, Li T, Qu H, et al.Seismic Performance of Precast Bridge Columns with Socket and Pocet Connections Based on Quasi-Static Cyclic Tests: Experimental and Numerical Study[J]. Journal of Bridge Engineering, 2019, 24(11).

[10] 钱辉,叶晨阳,李宗翱,等.自复位承插式多节段预制桥墩抗震性能理论分析[J].地震工程与工程振动,2021,41(1):35-43.

[11] 钱辉,叶晨阳,李宗翱,等.自复位承插式多节段预制桥墩抗震性能数值模拟[J].土木工程学报,2020,53(S2):301-308.

[12] 马军卫.新型全装配式混凝土框架-剪力墙结构抗震性能研究[D].南京:东南大学,2018.

[13] 张劲,王庆扬,胡守营,等.ABAQUS混凝土损伤塑性模型参数验证[J].建筑结构,2008(8):127-130.

[14] GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S].

[15] 徐刚.新型装配式混凝土夹心剪力墙结构抗震性能试验研究[D].南京:东南大学,2020.

[16] 徐刚.新型装配式混凝土夹心剪力墙结构抗震性能试验研究[D].南京:东南大学,2020.

(上接第269页)

了汽车荷载分级加载方式。

(3)永久荷载及汽车重载在公路桥梁上概率分布模型的建立,为公路桥梁可靠度研究和求解极端荷载组合系数奠定了基础。

参考文献:

[1] 张喜刚.公路桥梁汽车荷载标准研究[M].北京:人民交通出版社,2014.

[2] HWANG H H M, USHIBA H, SHINOZUKA M. Reliability analysis of code-designed structures under natural hazards[R]. NY, SUNY Buf-falo: Report to MCEER,1982.

[3] HOLMES W T. The 1997 NEHRP recommended provisions for seis-mic regulations for new buildings and other structures[J]. Earthquake Spectra, 2000, 16(1):101-114.

[4] LUCO N, KARACA E.Extending the USGS national seismic hazard

maps and shake maps to probabilistic building damage and risk maps [C]//10th Int' Conf on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering.[S.l.]:[s.n.],2007:55-65.

[5] 中华人民共和国住房和城乡建设部.GB 50153—2008,工程结构可靠性设计统一标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2008.

[6] 邹天一.结构可靠度[M].北京:人民交通出版社,1998.

[7] 中华人民共和国交通运输部.JTG D60—2015,公路桥涵设计通用规范[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.

[8] 赵国藩,金伟良,贡金鑫.结构可靠度理论[M].北京:中国建筑工业出版社,2000.

[9] 党栋.公路桥梁设计荷载及其组合研究[D].西安:长安大学,2012.

[10] 李文杰,穆少华,赵君黎,等.中国公路桥梁汽车荷载标准适应性研究[C]//中国公路学会桥梁和结构工程分会2013年全国桥梁学术会议论文集.北京:人民交通出版社,2013:120-126.