

# 超限运输车辆通过 T 梁桥的合理横向位置分析

闫君媛<sup>1</sup>, 邓露<sup>1,2†</sup>

(1.湖南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410082;

2.湖南大学 工程结构损伤诊断湖南省重点实验室,湖南 长沙 410082)

**摘要:**对超限运输车辆通过多梁式简支 T 梁桥时的合理横向位置进行了分析.以我国公路桥梁中常见的中小跨径 T 梁桥为例,通过有限元分析提取了车辆在不同横向位置加载时梁底跨中截面处的最大弯曲应力,并对计算结果进行了对比,从优化结构受力的角度确定了超限运输车辆过桥时的最佳横向行驶位置.分析了桥梁跨径、主梁根数、主梁连接方式等因素对超限运输车辆过桥时的合理横向位置的影响.结果表明:超限运输车辆的横向加载位置对多主梁桥的结构响应有较大的影响;当主梁根数为奇数时,车辆的最佳横向行驶位置位于中心梁与其相邻梁的中间位置处;当主梁根数为偶数时,超限运输车辆的最佳横向行驶位置与桥面中心线重合;主梁之间的连接方式对车辆荷载作用下桥梁的结构响应影响显著.

**关键词:**合理横向位置;超限运输车辆;有限元分析;T 梁桥

**中图分类号:**U447

**文献标志码:**A

## Analysis on Optimal Transverse Position for Overweight Trucks to cross T-beam Bridges

YAN Junyuan<sup>1</sup>, DENG Lu<sup>1,2†</sup>

(1.College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2.Key Laboratory for Damage Diagnosis for Engineering Structures of Hunan Province, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:**This paper aims to investigate the optimal transverse position for overweight trucks to cross the simply-supported multi-girder bridges. Finite element analysis is performed for a group of prefabricated concrete T-beam bridges commonly used in China under the action of overweight trucks with varying transverse positions. The maximum bending stresses at the mid-span of the girders are extracted from finite element analysis and compared with each other. The optimal transverse position is determined from the point of optimizing the structural response. The effects of a few important parameters, including the length of bridge spans, number of girders and type of girder connections on the optimal transverse truck position are investigated. It is found that the transverse loading position of overweight trucks has a significant impact on the responses of multi-girder bridges. For the T-beam bridges with odd number of girders, the optimal transverse position for overweight trucks is in the middle between the center girder and the adjacent girder; for the T-beam bridges with even number of girders, the optimal transverse truck position is the centerline of the bridge. The influence of the girder connection condition on the bridge responses is significant.

**Keywords:**optimal transverse position; overweight truck; finite element analysis; T-beam bridges

\* 收稿日期:2017-12-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51478176), National Natural Science Foundation of China(51478176)

作者简介:闫君媛(1987—),女,山东潍坊人,湖南大学博士研究生

† 通讯联系人, E-mail: denglu@hnu.edu.cn

在中国和美国,超载已经成为导致桥梁破坏的主要因素之一.吉伯海等<sup>[1]</sup>统计了 2000 年以来国内发生的 85 起典型桥梁倒塌事故,其中超载引起的有 11 起,占 13%,是除设计施工和撞桥以外的最主要倒塌原因.Wardhana 等<sup>[2]</sup>对美国 500 多座桥梁的倒塌原因进行了调查,其中超载引起的有 44 起,占 9%,是继自然灾害和撞桥之后引发桥梁倒塌的第三大主要因素.

超载车辆运营导致的桥梁损伤和破坏,已经引起了社会大众和有关部门的高度重视.Fu 等<sup>[3]</sup>以荷载和抗力系数的形式提出了用于判断超载车辆能否过桥的判定方法.Ghosn<sup>[4]</sup>在同时考虑荷载静力和动力效应的基础上,基于可靠度理论提出了确定公路桥梁容许过桥荷载的方法.Adams 等<sup>[5]</sup>考虑了公路网中时间和空间限制因素的影响,为超限/超载车辆设计了确定可行路径的计算程序.Vigh and Kollár<sup>[6-7]</sup>开发了能够快速、稳定地确定超载车辆行驶路线的判定程序.邓露等<sup>[8-9]</sup>考虑了桥梁限重标志对驾驶员的行为约束并用于车辆荷载效应分析.但是已有大量研究主要集中在超载车辆的整体路线选择和车重管理方面,很少有研究考虑超载车辆过桥时的合理横向行驶位置.

殷武<sup>[10]</sup>和宗雪梅<sup>[11]</sup>在重载道路的安全评定和管理研究中指出超载车辆过桥时应该沿桥面中心线行驶,然而,有关超限运输车辆沿桥面中心线行驶的合理性方面的研究却很少.本文选取了中小跨径公路桥梁中常见的装配式简支 T 梁桥为研究对象,建立了几种不同跨径桥梁的实体模型,研究了超限运输车辆过桥时的合理横向位置.分析了桥梁跨径、主梁根数、主梁连接方式等因素对超限运输车辆过桥时的合理横向位置的影响,为超限运输车辆过桥的横向位置选择提供了建议.

### 1 桥梁模型

选取的 T 梁桥的跨径为 20 m、25 m、30 m、35 m、40 m,对应的梁高分别为 1.5 m、1.7 m、2.0 m、2.3 m、2.5 m,T 梁顶板的宽度均为 1.7 m,湿接缝的宽度为 0.7 m,五梁式混凝土 T 梁桥的典型横断面如图 1 所示.

主梁之间通过在接缝处伸出钢筋扣环进而浇筑混凝土形成整体湿接缝的形式连接起来,这种连接方式可以近似视为刚性连接,在有限元模型中通过共节点来实现.由于早期建造的 T 梁桥翼板间通常采用焊接钢板或伸出的交叉钢筋连接,结构的受力状态接近于数根并列而相互间横向铰接的狭长梁,所以,本文对 T 梁翼板间铰接的情况也进行了

分析,并与翼板刚结的情况进行了对比,翼板的铰接在有限元模型中通过耦合节点自由度来实现<sup>[12]</sup>.

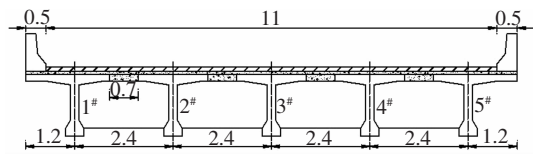


图 1 桥梁典型横断面(单位:m)  
Fig.1 Typical cross sections of bridges(Unit:m)

### 2 超限运输车辆模型

《超限运输车辆行驶公路管理规定》<sup>[13]</sup>中关于超限运输车辆总重的认定标准为六轴及六轴以上汽车列车,其车货总重超过 49 t.参照《公路桥梁汽车荷载标准研究》<sup>[14]</sup>中对中国境内多个测点的交通荷载调查,全国货运车辆车型比例的分布如图 2 所示.从图 2 中可以看出,我国绝大多数测点的货运车辆以六轴车为主,约占 50%以上.因此,本文选择六轴车作为代表性车辆模型进行加载计算,车辆简图如图 3 所示.车辆总重依据全国各测点车重的 0.95 分位值的平均值确定,取为 63.1 t.

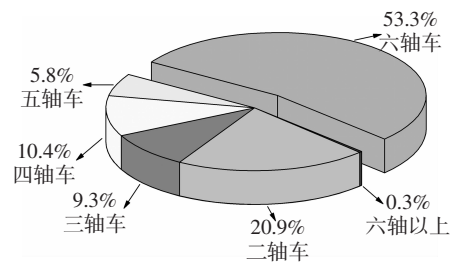
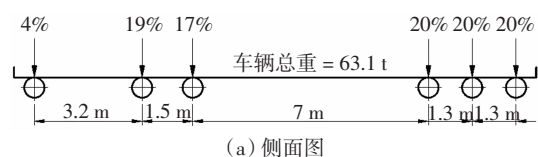
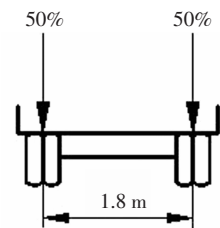


图 2 车型比例分布图  
Fig.2 Composition of freight vehicles



(a) 侧面图



(b) 立面图

图 3 加载车辆简图

Fig.3 Characteristics of the representative overweight truck

### 3 有限元分析

本文采用有限元分析的方法确定超限运输车辆通过多主梁桥时的合理横向位置,桥梁模型的建立利用有限元软件 ANSYS 14.5.混凝土部件,包括

主梁、桥面板和横隔板采用三维实体单元 SOLID 45 进行模拟,每个单元具有 8 个节点,每个节点具有 3 个自由度,单元尺寸约为 0.2 m(长)×0.1 m(宽)×0.1 m(高).桥梁的有限元模型如图 4 所示.建模方法的计算精度在文献[15]中已经校验过,基准模型采用的是已有研究中用到的一座简支梁桥,本文的有限元分析结果与已有研究中的实测结果具有较高的一致性,说明本文采用的有限元模拟方法可以准确地反映桥梁的实际受力情况.

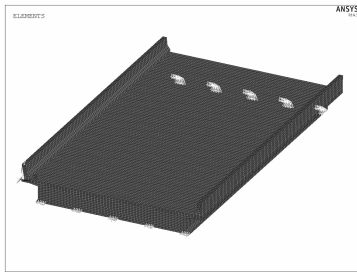


图 4 桥梁有限元模型

Fig.4 The bridge finite element model

### 3.1 车辆加载位置的确定

首先考虑 T 梁翼板之间是刚性连接的情况.车辆的纵向加载位置按照影响线的加载原则确定,以使桥梁跨中截面产生的弯曲应力最大.车辆的横向位置加载范围如图 5 所示,由于桥梁结构的对称性,只对一半的桥面进行加载计算.超限运输车辆过桥时往往是缓慢匀速行驶的,因此,计算中没有考虑车辆荷载的动力效应.

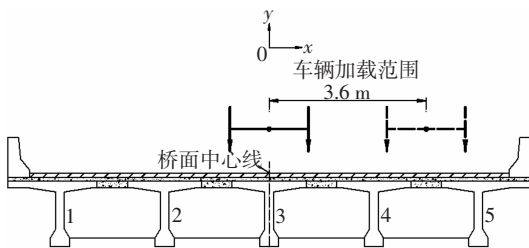


图 5 车辆的横向加载范围

Fig.5 The allowable range for transverse truck position

车辆从桥面中心线开始加载,每 0.2 m 为一个荷载步.车辆荷载每移动一步进行一次有限元分析并提取梁底跨中截面的最大弯曲应力作为确定车辆合理横向行驶位置的标准.假设车辆在加载位置  $i$  处获得的梁底最大弯曲应力为  $E_i$ .为了更好地对比车辆在各个加载位置的响应,定义了一个弯曲应力的相对值,如式(1)所示:

$$E_{\text{relative}} = E_i / E_{\text{min}} \quad (1)$$

式中: $E_{\text{relative}}$  代表弯曲应力的相对值; $E_i$  代表车辆在横向加载位置  $i$  处加载时受力最不利主梁的梁底最大弯曲应力; $E_{\text{min}}$  代表车辆在不同加载位置处获得

的所有  $E_i$  值的最小值.根据弯曲应力相对值的定义可知  $E_{\text{relative}}$  的值应该大于等于 1、当  $E_{\text{relative}}$  等于 1 时,代表车辆在这个位置加载时梁底的弯曲应力最小,加载位置最合理.确定超限运输车辆过桥的合理横向位置实际上就是确定车辆在哪个位置加载时,荷载的横向分布最均匀,受力最不利主梁的荷载横向分布系数最小.

图 6 给出了桥梁跨径为 20 m 的五梁式 T 梁桥的弯曲应力相对值随车辆横向加载位置的变化曲线.从图 6 可以看出,当车辆加载到两根主梁的中间位置时,弯曲应力的相对值会出现一个极小值(a、b 两点).当车辆加载到 3 号主梁和 4 号主梁中间的位置时,弯曲应力的相对值最小.随着车辆继续往桥梁的边缘移动,弯曲应力的相对值迅速增长,表示车辆在靠近桥梁的边缘加载时对结构的受力非常不利.对其它跨径的 T 梁桥进行分析时也发现了相似的规律.

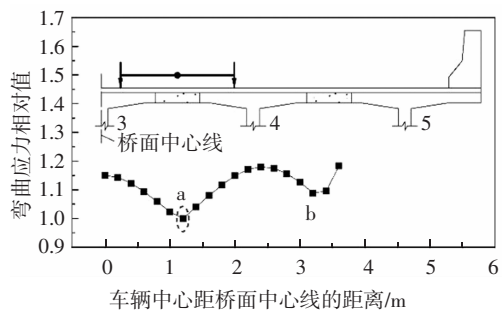


图 6 弯曲应力相对值随车辆横向加载位置的变化曲线 (五梁式 T 梁桥-主梁之间刚接)

Fig.6 Variation of relative bending stress with change of truck transverse position (the rigidly connected T-beam bridges with five girders)

### 3.2 典型加载工况的响应对比

通过前面对五梁式 T 梁桥的分析发现,两根内主梁的中间位置是超限运输车辆过桥时的最佳横向行驶位置.而已有研究中建议超限运输车辆过桥时应该沿桥面中心线缓慢行驶.因此,本文定义了超限运输车辆的两种加载工况,如图 7 所示.工况 1 表示车辆沿桥面中心线行驶,即已有研究中建议的合理横向位置;工况 2 表示车辆沿两内主梁的中线行驶,即有限元分析确定的最佳横向位置.

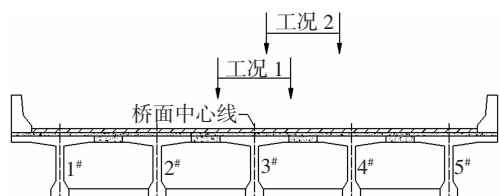


图 7 两种典型加载工况

Fig.7 Two typical loading cases



分别计算了超限运输车辆在这两种加载工况下的响应并进行了对比. 假设工况 1 和工况 2 作用下桥梁的响应分别为  $R_1$  和  $R_2$ , 那么两种工况作用下桥梁响应的相对差可以用式(2)表示:

$$RD = \frac{R_1 - R_2}{R_2} \times 100\% \quad (2)$$

根据式(2)的定义,若相对差为正,说明工况 1 作用下的桥梁响应大于工况 2,此时,车辆沿桥面中心线行驶并不是超载车辆过桥时的最佳横向位置.

表 1 为两种加载工况下不同跨径桥梁的响应相对差值.由表 1 可以看出,车辆沿桥面中心线行驶时产生的梁底响应始终大于车辆在两内主梁之间行驶的情况.当桥梁跨径为 20 m 时,车辆沿桥面中心线行驶比车辆沿两内主梁的中心线行驶的弯曲应力要大 15.1%,随着桥梁跨径的增大,这种响应差异逐渐减小.

表 1 两种加载工况之间的相对差值

Tab.1 Relative difference in bridge response between the two loading cases

跨径/m	20	25	30	35	40
相对差/%	15.1	13.1	12.4	11.9	11.7

## 4 上部结构影响因素分析

### 4.1 主梁根数的影响

以上分析的是五梁式 T 梁桥,主梁根数为奇数,桥面中心线正好与主梁的中心线重合.为了对比,对主梁根数为偶数的 T 梁桥也进行了分析,以四梁式 T 梁桥为例,桥梁横断面形式和车辆的横向加载范围如图 8 所示,当主梁根数为偶数时,桥面中心线正好位于两根内主梁中间的位置.

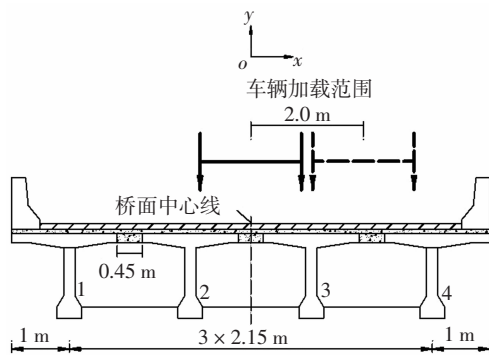


图 8 四梁式 T 梁桥的横断面和车辆加载范围

Fig.8 The cross section of T-beam bridges with 4 girders and the allowable range for transverse truck position

图 9 为梁底弯曲应力的相对值随车辆横向加载位置的变化曲线.可以看出当车辆沿桥面中心线行驶时,梁底的弯曲应力最小,横向加载位置最有利.通过以上分析可以得出:当主梁根数为奇数时,车辆的最佳横向加载位置位于中心梁与其相邻梁

的中线处;当主梁根数为偶数时,桥面中心线正好与两内主梁的中线重合,车辆的最佳横向加载位置为桥面中心线.通过图 9 还可以看出,当车辆移向桥梁的边缘时,弯曲应力的相对值急剧增大,再一次说明车辆在靠近桥梁的边缘位置加载对结构的受力非常不利.因此,实际工程中应该避免车辆过桥时严重偏载的情况.

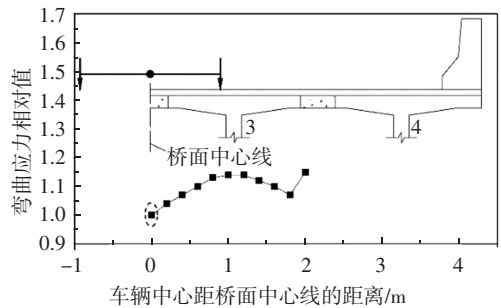


图 9 弯曲应力相对值随车辆横向加载位置的变化曲线 (四梁式 T 梁桥-主梁之间刚接)

Fig.9 Variation of relative bending stress with change of truck transverse position(the rigidly connected T-beam bridges with four girders)

### 4.2 主梁连接方式的影响

以上分析针对的是主梁翼板之间采用刚性连接的情况,由于早期建造的 T 梁桥翼板间通常采用焊接钢板或伸出的交叉钢筋连接,结构的受力状态接近于数根并列而相互间横向铰接的狭长梁,所以,本文对 T 梁翼板间铰接的情况也进行了分析,并与翼板刚结的情况进行了对比.实际工程中,T 梁翼板之间的连接方式往往介于刚接和铰接之间.

以跨径为 20 m 的五梁式 T 梁桥为例,分析了主梁翼板之间铰接时,梁底的最大弯曲应力随车辆横向加载位置的变化关系,如图 10 所示.由图 10 可以看出,主梁铰接时,梁底弯曲应力的相对值随车辆横向位置的变化幅度要大于主梁刚接的时候.当车辆加载到两根内主梁的中心位置时,弯曲应力的相对值达到最小,与主梁之间刚接的情况类似.

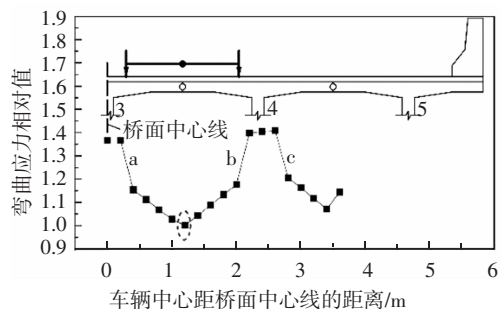


图 10 弯曲应力相对值随车辆横向位置的变化曲线 (五梁式 T 梁桥-主梁之间铰接)

Fig.10 Variation of relative bending stress with change of truck transverse position(the hinge-connected T-beam bridges with five girders)

此外,由图 10 还可以看出,当车轮跨过主梁之间的连接位置时,弯曲应力的相对值会发生突变,如图 10 中的 a、b、c 3 点所示.当车辆中心与 4 号梁的中心线重合时,车轮向左侧或右侧移动,跨过图中所示的铰接点 a 或 b 时,4 号梁承担的车轮荷载会突然减小,导致梁底弯曲应力的相对值突然减小,如图 10 中的 b、c 点所示.

## 5 结 论

已有大量研究主要集中在车辆行驶的整体路线优化和超载车辆的限载管理,很少有研究考虑超载车辆过桥时的合理横向位置.本文研究了超限运输车辆通过多梁式简支 T 梁桥时的合理横向位置,以跨中截面的最大弯曲应力作为判断标准确定了车辆过桥时的最佳横向位置.此外,还分析了桥梁跨径、主梁根数、主梁连接形式等因素对车辆过桥时最佳横向位置的影响.基于本文的分析结果,可以得出以下结论:

1) 超载车辆的横向加载位置对多主梁桥的结构响应有较大的影响.以跨径为 20 m 的五梁式简支 T 梁桥为例,当车辆沿桥面中心线行驶时,梁底跨中截面的最大弯曲应力比车辆沿最佳横向位置行驶时要大 15.1%.

2) 超限运输车辆通过多梁式简支 T 梁桥时的最佳横向行驶位置往往取决于主梁的根数.当主梁根数为奇数时,车辆的最佳横向行驶位置位于中心梁与其相邻梁的中心线位置处;当主梁根数为偶数时,超限运输车辆的最佳横向行驶位置与桥面中心线重合.

3) 主梁之间的连接方式对桥梁结构的受力影响较大.以跨径为 20 m 的 5 梁式简支 T 梁桥为例,当主梁翼板之间采用刚接时,车辆沿桥面中心线行驶时跨中截面的最大弯曲应力比车辆沿最佳横向位置行驶时大 15.1%,而当主梁翼板之间采用铰接时,这个差值可以达到 37.2%.

## 参考文献

[1] 吉伯海,傅中秋.近年国内桥梁倒塌事故原因分析[J].土木工程学报,2010,43(S1):495—498.  
JI B H, FU Z Q. Analysis of Chinese bridge collapse accident causes in recent years[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(S1): 495—498. (In Chinese)

[2] WARDHANA K, HADIPRIONO F. Analysis of recent bridge failures in the United States [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2003, 17(3):144—150.

[3] FU G, HAG -ELSAFI O. Vehicular overloads: load model, bridge

safety, and permit checking [J]. Journal of Bridge Engineering, 2000, 5(1):49—57.

[4] GHOSN M. Development of truck weight regulations using bridge reliability model [J]. Journal of Bridge Engineering, 2000, 5(4): 293—303.

[5] ADAMS T M, MALAIKRISANACHALEE S, BLAZQUEZ C, et al. Enterprise-wide data integration and analysis for oversize/overweight permitting [J]. *Anglais*, 2002, 16(1):11—22.

[6] VIGH A, KOLLÁR L. Approximate analysis of bridges for the routing and permitting procedures of overweight vehicles [J]. Journal of Bridge Engineering, 2006, 11(3):282—292.

[7] VIGH A, KOLLÁR L. Routing and permitting techniques of overweight vehicles [J]. Journal of Bridge Engineering, 2007, 12(6):774—784.

[8] 邓露,毕涛,何维.考虑桥梁限重标志对驾驶员行为约束的车辆荷载效应研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2015,42(11): 49—55.  
DENG L, BI T, HE W. Study of vehicle load effect considering the effect of weight limit signs on restricting drivers' behavior [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2015, 42(11): 49—55. (In Chinese)

[9] 殷新锋,邓露.随机车流作用下桥梁冲击系数分析[J].湖南大学学报(自然科学版),2015,42(9):68—75.  
YIN X F, DENG L. Impact factor analysis of bridges under random traffic loads [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2015, 42(9):68—75. (In Chinese)

[10] 殷武.基于可靠度的特重车过桥荷载限值确定方法研究[D].广州:广东工业大学土木与交通工程学院,2012:91—92.  
YIN W. The method research of determining limited load value for overweight vehicles cross bridges based on reliability theory [D]. Guangzhou: School of Civil and Transportation Engineering, Guangdong University of Technology, 2012:91—92. (In Chinese)

[11] 宗雪梅.重载道路桥梁安全性评定与管理研究[D].西安:长安大学公路学院,2003:74—75.  
ZONG X M. Evaluation and management of bridges subjected to overweight vehicles [D]. Xi'an: School of Highway, Chang'an University, 2003:74—75. (In Chinese)

[12] 徐建炜.T形梁桥整体刚度研究[D].西安:长安大学公路学院,2009:29—30.  
XU J W. Study on the whole rigidity of T-beam bridges [D]. Xi'an: School of Highway, Chang'an University, 2009: 29—30. (In Chinese)

[13] 中华人民共和国交通运输部.超限运输车辆行驶公路管理规定[M].北京:人民交通出版社,2016:1—2.  
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Management regulation of overloaded vehicle transportation on highway [M]. Beijing: China Communications Press, 2016:1—2. (In Chinese)

[14] 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,2014:94—95.  
ZHANG X G. Study of highway bridge vehicle loads [M]. Beijing: China Communications Press, 2014:94—95. (In Chinese)

[15] YAN J, DENG L, HE W. Evaluation of existing prestressed concrete bridges considering the randomness of live load distribution factor due to random vehicle loading position [J]. Advances in Structural Engineering, 2017, 20(5):737—746.