

# 小箱梁桥参数对大件车载效应的影响及快速评估

段卫党<sup>1</sup>, 邓泽城<sup>1</sup>, 上官煜<sup>2</sup>, 陈鹏涛<sup>2</sup>

(1. 江西省交通投资集团有限责任公司, 江西 南昌 330025; 2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

**摘要:**为支撑大件车通行评估工作,基于3个省份海量大件运输数据与9条高速公路的桥梁信息,筛选出4种大件运输车辆典型加载模型,建立不同结构形式的小箱梁桥有限元模型。通过与设计汽车荷载效应的对比,分析并总结4种典型加载模型下小箱梁桥的响应特征。研究表明:荷载效应比值与单跨跨径正相关,与单联跨数负相关,但当小箱梁桥同一联跨数超过3跨时,荷载效应比值维持稳定;主梁片数、主梁间距与荷载效应比值相关性水平低,最小主梁片数与最大主梁间距的小箱梁桥控制大件车通行评估结果。根据响应特征,结合荷载效应比较法,提出了控制性小箱梁桥遴选原则与一种路线级快速评估大件车通行安全性的方法,并在实际工程中应用。

**关键词:**桥梁工程; 大件运输; 小箱梁桥; 路线级快速评估方法; 荷载效应比较法

**中图分类号:** U446

**文献标志码:** A

随着经济技术的不断发展,大件运输的需求不断增加,超重荷载成为桥梁结构的隐患,并已引发事故,成为社会热点问题<sup>[1]</sup>。大件运输是指载运不可解体货物,且车货的总长度、总宽度、总高度、总质量至少有一项符合《超限运输车辆行驶公路管理规定》(中华人民共和国交通运输部令2021年第12号)中规定的超限运输<sup>[2]</sup>。大件运输具有一定的强制性、低频性、只能按指定时间和指定路线行驶、具有严格的速度限制、对沿线公路的结构影响严重等特点<sup>[3]</sup>。相关部门在评估大件车过桥时需谨慎对待,导致大件运输审批效率低下。

目前,已经有众多学者开展相关研究。周广利、张辉辉、姚明强、贾旭东、李浩恒等<sup>[4-8]</sup>对大件运输车辆选择、路线选择、桥梁状态等级、桥梁承载力和加固方法进行了分析;孙鹏旭、张劲泉等<sup>[9-10]</sup>对大件运输车载下的桥梁承载能力进行了分析;Han、孙玉、袁阳光、周广利、刘航等<sup>[11-16]</sup>对大件运输车载下的桥梁安全性进行了分析并提出了相应的评估方法;韩万水等<sup>[17]</sup>分析了不同车型作用下,车辆横向行驶位置与轴重限值的关系,给出相应的桥梁安全指数;徐昌、陈海威等<sup>[18-19]</sup>对实际某个大件运输工程进行了分析,评估工程的可行性。大件运输车载下单个桥梁评估方法已经较为成熟,但是路线级评估方法较为缺乏。为提高审批效率,迫切地需要提出一种路线级、针对特定桥型的大件车通行的安全性快速评估方法。

小箱梁作为装配式结构,具有梁高较小、适应变宽

能力强、暴露面少、耐久性好、主梁刚度大、施工稳定性好等优势,在全国各个省份中均有大量运用。根据所统计9条高速公路的1877座桥梁,小箱梁桥有472座,占比25.15%,其中最高占比为95.0%。

该文选择中国3个省份海量大件运输数据,针对4种大吨位双线式车轴大件运输车辆,对其单独行驶通过小箱梁桥进行安全性评估,结合小箱梁桥响应规律和荷载效应比较法,给出一种路线级快速评估大件车通行小箱梁桥的方法,并应用于实际工程。

## 1 高等级公路小箱梁桥体系参数分布特征及典型截面

对9条高速公路中所筛选的1877座桥梁进行统计分析,小箱梁桥472座,占比25.15%。其中,预应力简支小箱梁桥303座,占比64.19%;预应力连续小箱梁桥169座,占比35.81%。图1(a)为不同单跨跨径的小箱梁桥比例,图1(b)为不同主梁片数的小箱梁桥比例。小箱梁桥主梁间距为2.7~3.3 m,单联主梁跨数从1跨到8跨均有分布,典型截面如图2所示。

## 2 基于通行审批数据的大件运输车辆加载模型

基于某3个省份大件运输通行管理部门提供的超

收稿日期:2022-09-10(修改稿)

基金项目:江西省交通运输厅科技项目(编号:2022H0013)

作者简介:段卫党,男,硕士,高级工程师, E-mail:897572799@qq.com

过 20 万份的通行审批数据:包括车重、轴距等文本数据和图片资料,通过图片处理方法并结合人工方法<sup>[11]</sup>,考虑车辆在小箱梁桥上的加载形式以及各类荷载的占比情况,从 3 000 余组车辆信息中遴选出 4 种典型加载模型(图 3)。需要指出的是:所关注的均为大吨位的大件运输车辆,车辆轴型均为如图 3(e)所示的双线式车轴,单线式车轴在此不作考虑。根据《超限运输车辆行驶公路管理规定》(中华人民共和国交通运输部令 2021 年第 12 号)第十七条的规定,考虑最不利原则确定轴重为 18 t。

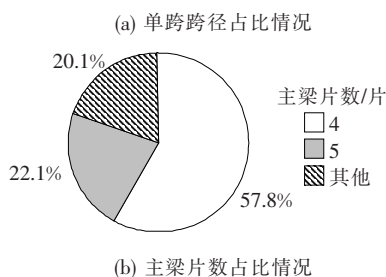
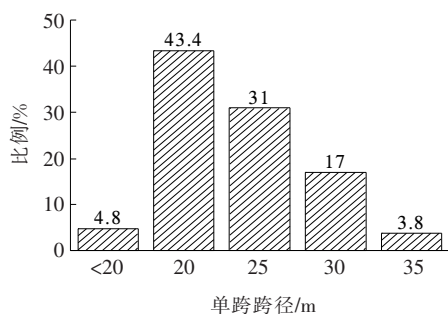


图 1 小箱梁桥体系参数统计分析

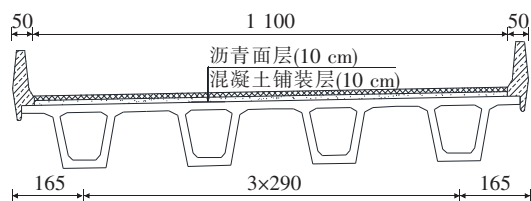


图 2 典型截面(单位:cm)

### 3 小箱梁桥体系参数对大件车载效应的影响规律

#### 3.1 加载分析方法

为提升建模效率,采用桥梁结构通用计算分析软件 Midas/Civil 进行分析计算,引入横向分布系数将空间受力问题简化为单梁计算问题,彭静等<sup>[20]</sup>已验证单梁模型的精度满足要求;刘旭政<sup>[21]</sup>等已指出桥面板现浇层刚度对弯矩的影响可忽略不计,故不作考虑。

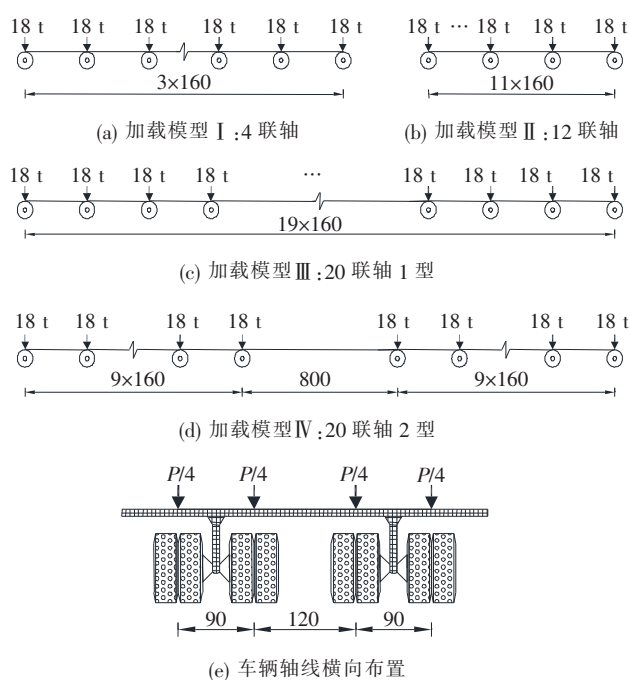


图 3 大件运输车辆加载模型(尺寸单位:cm)

采用杠杆法和刚接板法分别计算支点位置和跨中位置的横向分布系数,支点至 1/4 桥梁计算跨径处的横向分布系数采用线性插值。由于大件车在实际通行过程中低速行驶,故不考虑冲击系数;而对于设计车辆,考虑冲击系数。加载 4 种车辆模型并根据 JTG D62—2004《公路桥涵通用设计规范》布置公路—I 级设计车辆荷载,按式(1)计算 4 种加载模型与设计车辆作用下小箱梁桥荷载效应比值。考虑到中国桥梁结构设计重点及小箱梁桥的结构受力特点,在建立评估方法时重点关注小箱梁桥的抗弯性能。

$$\alpha = \frac{m_d S_D}{(1+\mu) m_c S_Q} \quad (1)$$

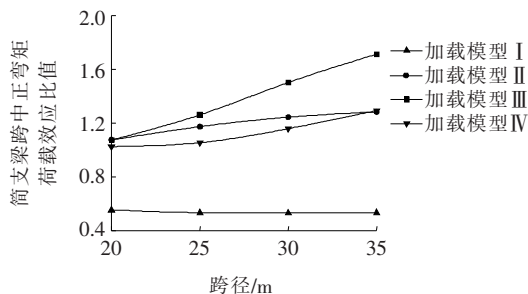
式中: $S_D$ 、 $S_Q$ 、 $m_d$ 、 $m_c$ 、 $\mu$  分别为加载模型荷载效应值、设计汽车荷载效应值、加载模型与设计汽车荷载的横向分布系数、设计冲击系数;跨中处  $m_d/m_c$  计算得其取值范围为 $[0.457, 0.513]$ ,支点处  $m_d/m_c$  取值为 0.660;冲击系数按 JTG D62—2004《公路桥涵通用设计规范》取用。

#### 3.2 跨径布置的影响

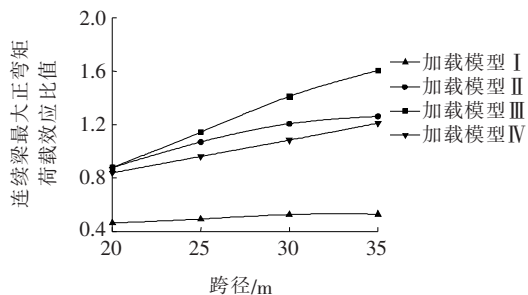
根据实际小箱梁桥立面布置图,建立单跨跨径为 20 m、25 m、30 m、35 m,主梁间距为 2.9 m,5 片主梁的预应力混凝土简支小箱梁桥模型与 5 跨连续小箱梁桥模型,计算荷载效应比值,计算结果如图 4 所示。

由图 4 可得:

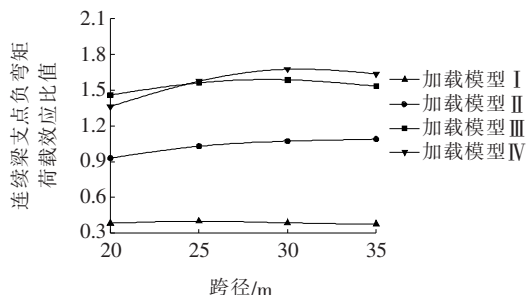
(1) 加载模型 I 作用下,荷载效应比值与单跨跨



(a) 简支梁跨中正弯矩荷载效应比值



(b) 连续梁跨中正弯矩荷载效应比值



(c) 连续梁支点负弯矩荷载效应比值

图 4 小箱梁桥单跨跨径影响分析

径相关性较小,不作为主要考虑因素,对最小单跨跨径简支小箱梁桥与最大单跨跨径连续小箱梁桥进行评估即可。

(2) 加载模型Ⅱ作用下,正弯矩及负弯矩比与单跨跨径正相关,仅对最大单跨跨径小箱梁桥进行评估即可。

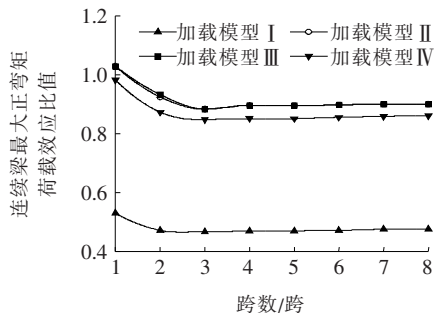
(3) 加载模型Ⅲ作用下,正弯矩比值与单跨跨径正相关,负弯矩比值在单跨跨径为 30 m 时达到峰值,即需要对单跨跨径为 30 m 与最大跨径进行评估。

(4) 总轴重与荷载效应比值正相关,仅对最大总轴重大件车进行评估即可。

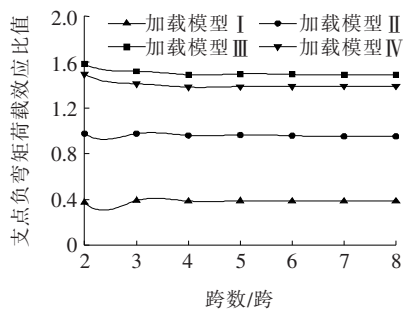
(5) 轴距与荷载效应比值负相关,相同轴重下,对最小轴距大件车进行分析即可。

### 3.3 跨数布置的影响

根据跨径分析与小箱梁桥单跨跨径分布情况,建立 20 m 跨径简支梁及 2~8 跨预应力混凝土连续小箱梁模型,计算荷载效应比值,计算结果见图 5。



(a) 连续梁跨中正弯矩荷载效应比值



(b) 连续梁支点负弯矩荷载效应比值

图 5 小箱梁桥跨数布置影响分析

由图 5 可得:正弯矩及负弯矩比值与单跨跨数负相关,但在 3 跨之后相关性不明显,即 3 跨及以下跨数小箱梁桥控制大件车通行评估结果。

### 3.4 主梁片数的影响

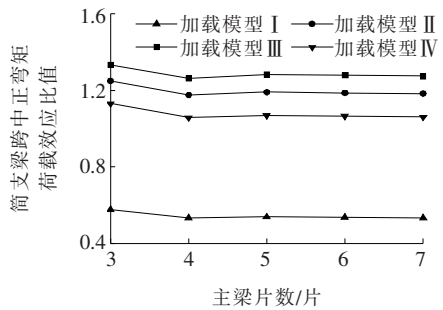
根据分析结果,选取单跨跨径为 25 m、主梁间距为 2.9 m、主梁片数为 3~7 片的简支小箱梁桥与 5 跨连续小箱梁桥进行建模分析,计算结果见图 6。图 6 表明:主梁片数与荷载效应比值相关性水平低,主梁片数为 3 片时,荷载效应比值达到峰值。故其余结构形式相同时,最低主梁片数的小箱梁桥控制大件车通行评估结果。

### 3.5 主梁间距的影响

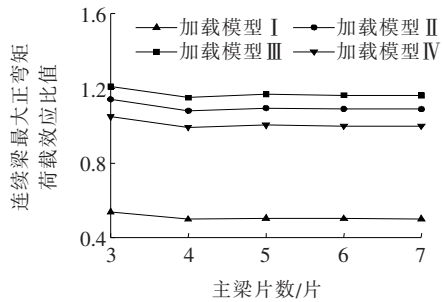
综合考虑统计结果及对单跨跨径、跨数、主梁片数的分析结果,采用单跨跨径为 25 m、3 片主梁、主梁间距为 2.7~3.3 m 的简支小箱梁桥和 3 跨连续小箱梁桥进行分析,计算结果见图 7。图 7 表明:主梁间距与荷载效应比值相关性水平低,仅作为次要考虑因素,在其他参数相同情况下,最大主梁间距的小箱梁桥控制大件车通行评估。

## 4 大件运输车载下路线级小箱梁桥快速评估方法

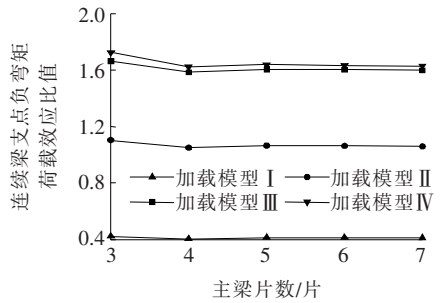
根据分析结果,建立大件运输车载下路线级小箱



(a) 简支梁跨中正弯矩荷载效应比值

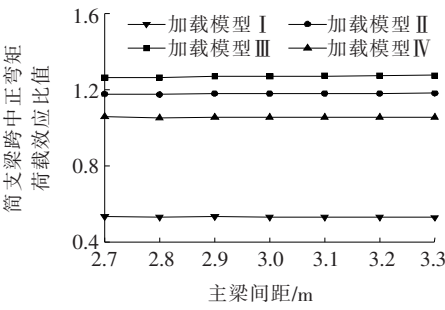


(b) 连续梁最大正弯矩荷载效应比值

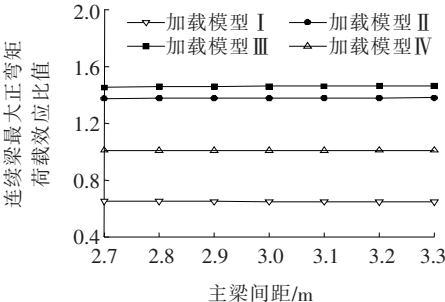


(c) 连续梁支点负弯矩荷载效应比值

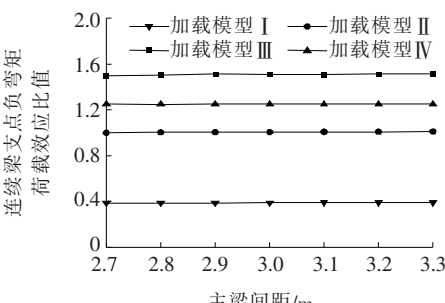
图6 主梁片数影响分析



(a) 简支梁跨中正弯矩荷载效应比值



(b) 连续梁跨中正弯矩荷载效应比值



(c) 连续梁支点负弯矩荷载效应比值

图7 主梁间距影响分析

梁桥快速评估方法,包括:① 根据加载车辆选择控制性小箱梁桥建模分析;② 评估大件车通行可行性。

4.1 控制性小箱梁桥遴选准则

基于上节分析结果,建立如图8所示控制性小箱梁桥遴选准则与评估流程。首先根据待评估大件车的荷载特性选择对应的加载模型,展开控制性小箱梁桥遴选;其次,对简支小箱梁桥和连续小箱梁桥分别根据分析结果对单跨跨径和跨数两大主要影响因素进行选择;最后,进一步选择最大主梁间距、最小主梁片数的小箱梁桥作为控制性桥梁进行大件车通行评估。

4.2 荷载效应评估

采用参考文献[8]中荷载效应比较法判别公式(2)评估大件车通行安全性。根据现有研究及规范,修改系数取值<sup>[4]</sup>如式(2)所示:

$$\rho = \frac{\xi_d \alpha}{\xi_c \xi} \leq \rho_c \quad (2)$$

式中: $\alpha$ 、 $\xi_d$ 、 $\xi_c$ 、 $\xi$ 分别为式(1)中计入横向分布系数和冲击系数的荷载效应比值、加载模型和设计汽车荷载效应系数、承载能力折减系数。大件车荷载为偶然荷载,故 $\xi_d$ 取值为1.0; $\xi_c$ 根据JTG D62—2004《公路桥涵通用设计规范》取值为1.4; $\xi$ 为小箱梁桥承载能力折减系数,根据JTG/T J21—2011《公路桥梁承载能力检测评定规程》,考虑地区和桥梁整体情况取值。

袁阳光等<sup>[13]</sup>考虑不同大件运输车辆通行目标可靠指标、现役桥梁的结构配筋信息以及安全耐久性要求,分析确定了大件运输车辆过桥评估时其安全系数 $\rho$ 取值范围为[1.115, 1.131]。考虑实际小箱梁桥结构形式的差异性,取 $\rho$ 为1.123。

4.3 路线级小箱梁桥快速评估方法应用

以某高速公路(总桥梁数155座,小箱梁桥数111座,占比71.61%)为研究对象,开展典型案例应用分析,对加载模型通行该高速公路进行评估,所统计桥梁

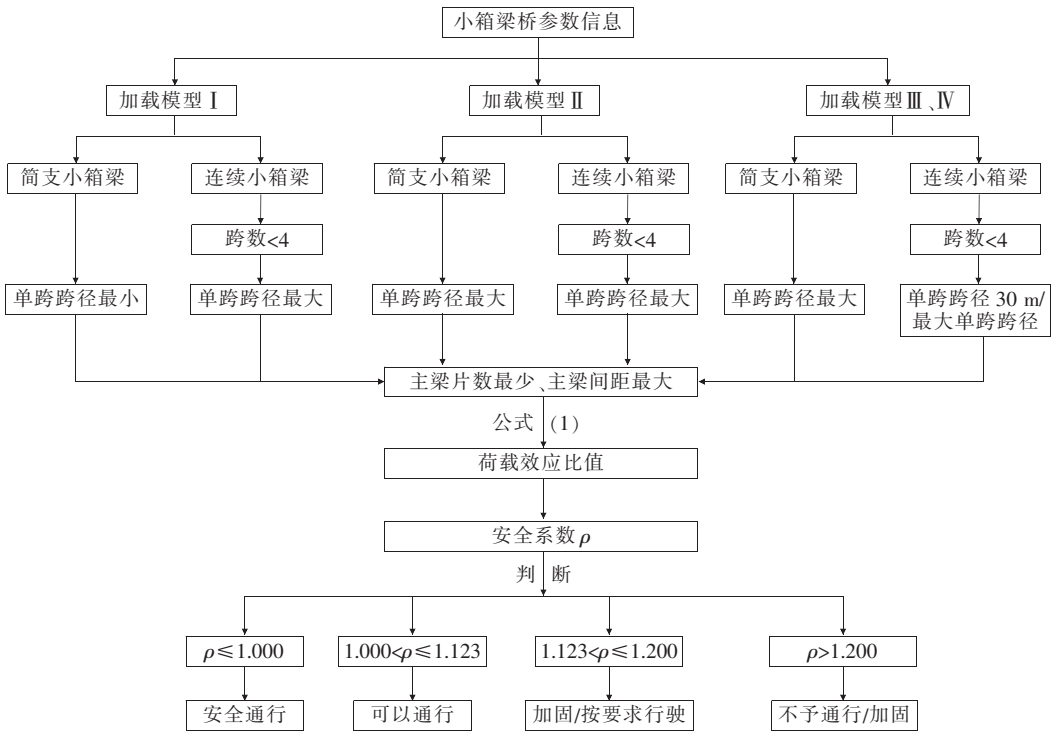


图 8 评估流程

信息如表 1 所示。

表 1 桥梁跨径信息

编号	桥梁数量/座	结构类型	跨径组合/ (跨×m)	主梁间 距/m	主梁片 数/片
1	11	预应力简支	1×20	3.275	5
2	8	预应力简支	1×20	3.130	7
3	30	预应力简支	1×25	2.900	5
4	5	预应力简支	1×25	3.275	4
5	2	预应力简支	1×30	3.275	4
6	15	预应力连续	3×20	3.275	4
7	7	预应力连续	3×25	3.275	4
8	3	预应力连续	3×30	3.275	4
9	26	预应力连续	4×25	3.275	4
10	3	预应力连续	5×25	2.900	4
11	1	预应力连续	5×25	3.275	5

根据遴选原则,选择一座编号为 5 的简支小箱梁桥和一座编号为 8 的连续小箱梁桥为控制桥梁进行建模分析。根据式(2)与有限元分析结果,计算加载模型 II 作用下的桥梁安全系数  $\rho$ ,结果如图 9 所示,图 9 说明加载模型 II 能够安全通行该高速公路所有桥梁,且筛选方法准确有效。

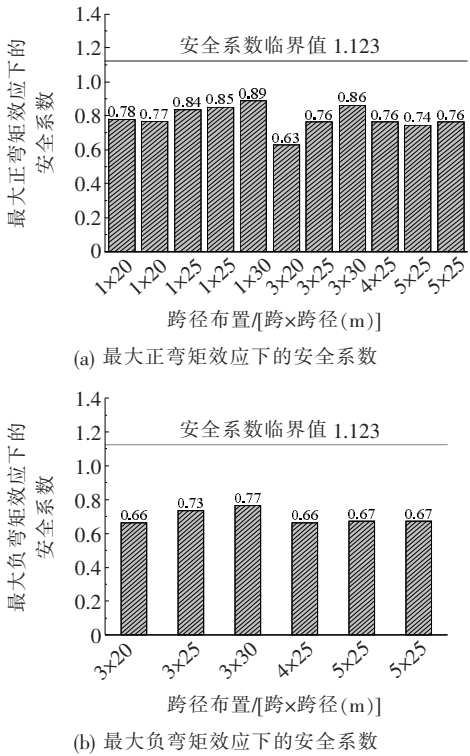


图 9 桥梁安全系数

## 5 结论

基于某 3 个省份大件车辆审批数据及 9 条高速公



路的桥梁信息,总结4种典型加载模型,遴选控制性小箱梁桥,分析对比不同参数形式下的小箱梁桥响应规律,建立了路线级大件车通行安全性评估方法,得到以下结论:

(1) 加载模型Ⅰ作用下,荷载效应比值呈现较低水平;加载模型Ⅱ作用下,荷载效应比值与单跨跨径正相关;加载模型Ⅲ作用下跨中正弯矩比值与单跨跨径正相关,负弯矩比值在单跨跨径为30 m时达到峰值,即30 m跨径与最大单跨跨径的小箱梁桥控制通行评估结果。

(2) 荷载效应比值与单联跨数负相关,但在3跨之后变化不明显,即最小单联跨数的小箱梁桥控制大件车通行评估结果。

(3) 主梁片数、主梁间距与荷载效应比值的相关性较小,3片主梁时荷载效应比值达到峰值,即较小主梁跨数、主梁间距最大的小箱梁桥控制大件车通行评估结果。

根据小箱梁桥响应规律,遴选控制性桥梁,可大幅减少建模工作量。结合有限元分析计算,通过式(2)计算安全系数,可快速判断大件车通行安全性,提升审批速率。但当前研究仅针对小箱梁桥弯矩效应进行分析和评估,未对小箱梁桥剪力效应与正常使用极限状态进行分析,未来可在此方面开展进一步研究。

## 参考文献:

- [1] 隋秀勇. 鄂东大桥倾覆事故引发大件运输安全思考[J]. 中国物流与采购, 2022(1): 41—42.
- [2] 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(2021)[M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2021.
- [3] 李智斌. 中小跨径PC简支梁桥大件运输荷载控制标准研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2012.
- [4] 周广利. 大件运输车辆过桥能力的快速评定[J]. 公路交通技术, 2018, 34(5): 73—77.
- [5] 张辉辉. 公路桥梁大件运输关键问题研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.
- [6] 姚明强. 基于大件运输的公路桥梁通过性及通行方法研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014.
- [7] 贾旭东. 大件运输车辆过桥安全评估研究[D]. 西安: 长安大学, 2017.
- [8] 李浩恒. 梁式桥大件运输过桥安全性评估及控制轴载研

究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.

- [9] 孙鹏旭. 基于超载运输的在役中小跨径桥梁承载力研究[D]. 西安: 长安大学, 2015.
- [10] 张劲泉, 李万恒, 程寿山, 等. 基于检测结果的既有桥梁承载能力评定方法研究[J]. 公路交通科技, 2006(S1): 30—32.
- [11] HAN W S, YUAN Y G, CHEN X, et al. Safety Assessment of Continuous Beam Bridges under Overloaded Customized Transport Vehicle Load[J]. Journal of Bridge Engineering, 2018, 23(6): 04018030. 1—04018030. 13.
- [12] 孙玉, 吴薇. 大件运输中桥梁通行能力评估的思路和方法[J]. 山东交通科技, 2020(4): 134—137.
- [13] 袁阳光, 周广利, 高文博, 等. 考虑安全性与正常使用性能的大件车辆过桥评估方法[J]. 工程力学, 2021, 38(7): 147—158.
- [14] 周广利. 大件运输车辆过桥能力的快速评定[J]. 公路交通技术, 2018, 34(5): 73—77, 86.
- [15] YUAN Yangguang, HAN Wanshui, XU Xin, et al. Permit Checking of Overloaded Customized Transport Vehicle Based on Serviceability Limit State Reliability of Concrete Bridges[J]. Advances in Structural Engineering, 2021, 24(5): 884—896.
- [16] 刘航, 侯玉兰, 莫迪, 等. 16 m空心板桥超重车混合行驶过桥安全评估[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2020, 16(6): 304—306.
- [17] HAN W S, YUAN Y G, XIE Q, et al. Load Effect, Safety Assessment, and Traffic Strategy of Multigirder Bridges under Lateral Eccentric Customized Transport Vehicle[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2019, 33(2): 04018110.
- [18] 徐昌. 大件运输车辆在普通设计荷载桥梁上的通过性研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2017, 13(2): 285—287.
- [19] 陈海威, 师爱瑛. 大件运输条件下的空心板桥承载能力评定[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2017, 13(8): 228—230, 250.
- [20] 彭静, 谢涛, 钱由胜. 连续箱梁桥荷载试验中梁格模型与单梁模型计算对比研究[J]. 施工技术, 2018, 47(14): 52—54, 76.
- [21] 刘旭政, 桂奇琦, 张翼飞, 等. 考虑桥面板现浇层刚度对连续梁桥静动力性能的影响[J]. 中外公路, 2019, 39(1): 64—67.