

# 大件车通行弯桥抗倾覆稳定安全系数评估方法

郭雪莲<sup>1</sup>, 韩万水<sup>1</sup>, 王涛<sup>1</sup>, 周恺<sup>1</sup>, 张修石<sup>2</sup>, 张书颖<sup>1</sup>

(1. 长安大学公路学院, 西安 710064; 2. 浙江数智交院科技股份有限公司, 杭州 310030)

**摘要:** 为保证大件运输车辆通行弯桥的安全性, 提出了一种基于正、逆可靠度分析的抗倾覆稳定安全评估方法。首先, 构建安全冗余、破坏两临界状态功能函数, 提出相应目标可靠指标分析方法; 其次, 建立基于逆可靠度分析的抗倾覆稳定安全系数计算模型; 最后, 评估典型三跨连续弯桥的抗倾覆稳定安全性。结果表明: 本文计算模型合理有效。当典型三跨连续弯桥设置一个单支承时满足抗倾覆安全要求但安全储备较低, 建议优化支承形式或采取抗倾覆措施。

**关键词:** 桥梁工程; 弯桥; 抗倾覆稳定安全评估; 大件运输车辆; 正、逆可靠度分析

**中图分类号:** U447 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2024)08-2229-09

**DOI:** 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20231316

## Assessment method of resistant overturning stability safety factors of curved bridge under customized transport vehicles

GUO Xue-lian<sup>1</sup>, HAN Wan-shui<sup>1</sup>, WANG Tao<sup>1</sup>, ZHOU Kai<sup>1</sup>, ZHANG Xiu-shi<sup>2</sup>, ZHANG Shu-ying<sup>1</sup>

(1. Highway School, Chang'an University, Xi'an, 710064, China; 2. Zhejiang Institute of Communications Co., Ltd., Hangzhou 310030, China)

**Abstract:** To ensure the safety of curved bridges when the customized transport vehicles (CTVs) pass, a safety assessment method for resistant overturning stability was proposed based on forward and inverse reliability analysis. Firstly, considering two limit states which corresponding to conditions that the bridge cannot satisfy the safety redundancy and overturning abrupt, two levels of safety assessment functions were constructed, and the corresponding target reliability index analysis methods of two levels were proposed. Secondly, based on the inverse reliability theory, a two-level resistant overturning stability safety factor calculation model was established. Finally, the stability and safety of the typical three-span continuous curved bridge against overturning was evaluated. The results indicate that the proposed calculation model is reasonable and effective. When a typical three-span continuous curved bridge is equipped with a single support, it meets the safety requirements for anti-overturning, but has low safety reserves. It is recommended to optimize the design of the support form or take anti overturning measures.

**收稿日期:** 2023-11-29.

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2021YFB1600300); 国家自然科学基金项目(518708058); 山东省交通运输厅科技计划项目(2021B51); 中央高校基本科研业务费专项资金—长安大学优秀博士学位论文培育项目(300102213707).

**作者简介:** 郭雪莲(1995-), 女, 博士研究生. 研究方向: 桥梁工程仿真与服役性能评估.

E-mail: guoxuelian@chd.edu.cn

**通信作者:** 王涛(1978-), 男, 副教授, 博士. 研究方向: 桥梁健康监测. E-mail: wtbridge@chd.edu.cn

**Key words:** bridge engineering; curved bridge; resistant overturning stability safety assessment; customized transport vehicles; reliability and inverse reliability analysis

## 0 引言

大件运输车辆质量大、体积大,其过桥不仅会导致铺装损伤、梁体开裂等病害,还可能引发弯桥倾覆破坏,严重影响交通运输与经济发展<sup>[1]</sup>。为了研究大件运输车载下弯桥的安全评估问题,国内外学者主要从桥梁监测<sup>[2]</sup>、荷载效应对比<sup>[3]</sup>与可靠度分析<sup>[4]</sup>3种手段切入。然而基于监测方法需要较大的人力、物力,且一般为事后评估,无法预先评估大件车通行结构的安全风险;荷载效应对比尚未考虑荷载与结构参数的不确定性,评估结果有一定的局限性。借助可靠度理论建立荷载及抗力系数评估方法使分析结果可信度更高,然而此方法多基于车辆通行直桥安全评估研究,在大件车通行弯桥抗倾覆稳定安全评估领域中的研究较少。

在结构可靠度分析的诸多方法中,逆可靠度分析可以在给定目标可靠指标的基础上,推算桥梁结构的安全系数,直观反映大件车过桥时的结构安全状态。现有逆可靠度计算方法多为梯度投影法、增广拉格朗日法、顺序二次规划法与HL-RF法等,文献[5]比较了这些方法的鲁棒性、效率和容量等,并提出基于价值函数确定步长的HL-RF法;Armen<sup>[6]</sup>基于HL-RF法提出了搜索空间扩大的迭代算法;在此算法基础上,刘杰等<sup>[7]</sup>采用泰勒展开方式更新参数迭代方程,验证了算法在悬臂施工评估中的合理性。在桥梁结构安全评估领域,逆可靠度研究多集中于主缆安全系数、拱肋安全系数、悬臂施工抗倾覆稳定安全系数、疲劳可靠度寿命等方向<sup>[8]</sup>。研究的方法多侧重于算法迭代方向的研究,迭代步长与初值取值恒定,可能导致结果在全局最小值附近跳动或无法收敛的情况。因此,本文在对逆可靠度算法初值和步长取值优化的基础上,建立一种弯桥抗倾覆稳定安全系数评估方法。

本文主要研究内容:首先,考虑大件车通行弯桥受力状态,基于目标可靠指标分析与逆可靠度理论,建立两层次抗倾覆稳定安全评估方法;其次利用课题组自主研发的大件车-弯桥耦合动力分

析系统;最后,以典型弯桥为例,计算分析结构参数与荷载概率特性对大件车通行弯桥抗倾覆稳定安全的影响。

## 1 基于正-逆可靠度分析的弯桥抗倾覆稳定安全评估方法

### 1.1 大件车通行弯桥评估方法框架

本文提出的大件运输车辆通行弯桥评估框架如图1所示。在弯桥抗倾覆稳定安全系数评估中,采用规范中“主梁与桥墩为刚体,梁体发生有限的小转动,支座为理想点支承”的假定。弯桥抗倾覆稳定安全系数评定时,明确弯桥倾覆安全冗余水平不满足规范要求以及倾覆两种极限状态,建立两种极限状态下桥梁结构功能函数。分析两层次安全评估目标可靠指标取值,结合功能函数中关键变量概率统计特征,构建基于逆可靠度理论的安全评估方法。据此,可得到大件车载下弯桥两层次评估安全系数。分别用 $\eta_1$ 、 $\eta_2$ 表示弯桥第一、第二层次评估安全系数:

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta_1 > 1, \text{ 满足抗倾覆冗余需求} \\ \eta_1 < 1, \eta_2 > 1, \\ \quad \text{满足抗倾覆需求, 不满足抗倾覆冗余需求} \\ \eta_1 < 1, \eta_2 < 1, \text{ 不满足抗倾覆需求} \end{array} \right. \quad (1)$$

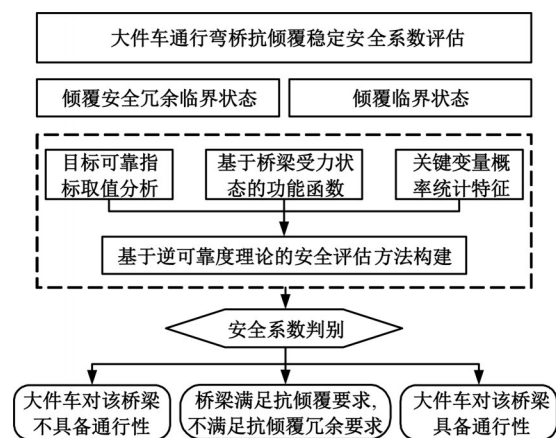


图1 大件运输车辆通行弯桥抗倾覆稳定安全系数评估框架

Fig. 1 Framework of assessment method of resistant overturning stability safety factors of curved bridge under customized transport vehicle

### 1.2 两层次安全评估功能函数

弯桥抗倾覆安全临界状态包括两层次内涵:①抗倾覆安全冗余水平不满足规范要求;②倾覆力矩大于抗倾覆力矩,弯桥发生倾覆。在上述两种安全临界状态内涵的基础上,采用工程结构可靠度理论建立两层次安全评估功能函数:

$$\begin{cases} Z_{\text{Level1}} = (\sum R_{Gi} l_i) / 2.5 - \sum R_{\text{QCTVi}} l_i \\ Z_{\text{Level2}} = \sum R_{Gi} l_i - \sum R_{\text{QCTVi}} l_i \end{cases} \quad (2)$$

式中: $Z_{\text{Level1}}$ 与 $Z_{\text{Level2}}$ 分别为弯桥倾覆安全冗余水平不满足规范要求以及弯桥倾覆两种极限状态; $R_{Gi}$ 与 $R_{\text{QCTVi}}$ 分别为在主梁自重与大件车载作用下,第*i*个桥墩处失效支座的支反力,按全部支座有效的支承体系确定,按标准组合取值; $l_i$ 为第*i*个桥墩处失效支座与有效支座的支座中心间距。

《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)规定,按作用标准值进行组合时,弯桥的横向抗倾覆稳定系数取值为 2.5。

在进行弯桥抗倾覆稳定安全系数评估之前,须明确各变量的概率分布特征。借鉴现有学者对变量特征的研究成果<sup>[9]</sup>,表 1 给出了随机变量的概率特性及分布参数信息。

表 1 变量概率分布特性及分布参数

Table 1 Probability distribution characteristics and distribution parameters of variables

变量类型	变量描述	分布类型	变量均值/标准值( $\kappa$ )	变异系数( $\delta$ )
几何尺寸参数	支座间距	正态分布	1.0013	0.0081
	恒载效应	正态分布	1.0148	0.0431
荷载效应	大件运输车辆荷载效应	正态分布	1.0000	0.0368

### 1.3 两层次安全评估目标可靠指标

构建基于可靠度理论的安全评估方法时,采用目标可靠指标实现对评估方法保守程度及“松紧”程度的总体控制。确定第二层次安全评估目标可靠指标,以 1 年为基准单位计算大件运输单次通行安全评估目标可靠指标<sup>[8]</sup>:

$$\beta_{T, \text{safety}, 2} = \Phi^{-1} \left\{ \left[ \Phi(\beta_{T, \text{year}}) / \Phi(\beta_{\text{year}}) \right]^{1/N} \right\} \quad (3)$$

式中: $\beta_{T, \text{safety}, 2}$ 为第二层次安全评估大件运输单次通行目标可靠指标; $\beta_{T, \text{year}}$ 和 $\beta_{\text{year}}$ 分别为桥梁运营阶段的年目标可靠指标及其他正常运营荷载下桥

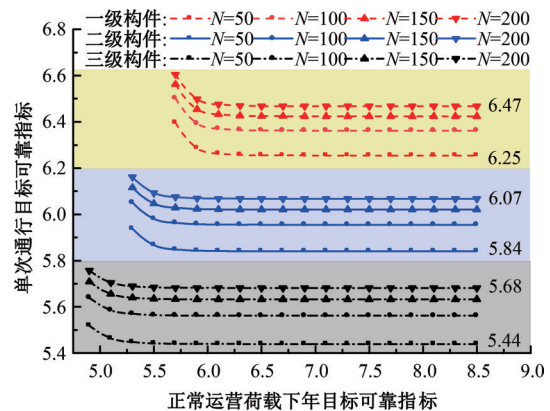
梁构件的年目标可靠指标; $N$ 为 1 年内大件运输车辆荷载的通行次数。

《公路工程结构可靠度设计统一标准》(JTG 2120—2020)规定,评估基准期为 100 年时,对安全等级一级、二级和三级的公路桥涵整体倾覆破坏构件,评估目标可靠指标应不小于 5.2、4.7 与 4.2。由不同时间尺度之间目标可靠指标的换算关系:

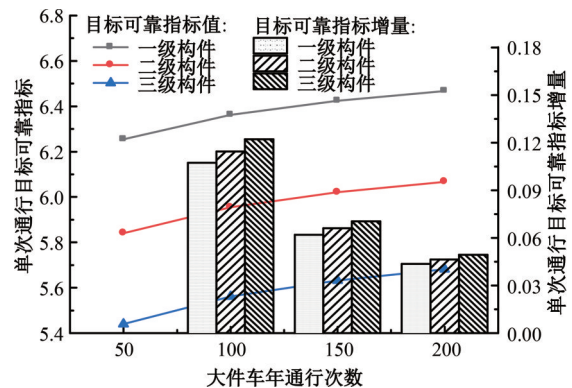
$$\beta_{T, \text{year}} = \Phi^{-1} \left\{ \left[ \Phi(\beta_{T, \text{tef}}) \right]^{1/\text{tef}} \right\} \quad (4)$$

式中: $\beta_{T, \text{tef}}$ 为任意基准期 *tef* 对应的评估目标可靠指标。

由此, $\beta_{T, \text{year}}$ 分别取为 6.00、5.57 与 5.15。我国在役混凝土桥梁可接受失效概率水平可在新建桥梁结构基础之上提高一个数量级<sup>[8]</sup>,因此 $\beta_{\text{year}}$ 分别取为 5.61、5.15 和 4.69。分别取  $N=50$ 、100、150 和 200 计算大件运输车辆单次通行 3 种等级桥梁结构的目标可靠指标,结果如图 2 所示。



(a) 单次通行目标可靠指标变化



(b) 单次通行目标可靠指标随大件车年通行次数的变化

图 2 第二层次安全评估单次通行目标可靠指标取值  
Fig. 2 Target reliability value of the CTV pass once of second-level safety assessment

可知,桥梁等级、大件运输车辆年均通行次数、正常运营荷载下年目标可靠指标均会影响大件运输车辆单次通行目标可靠指标的取值,桥梁安全等级的影响最大。当 $\beta_{\text{year}}$ 较小时,随着 $\beta_{\text{year}}$ 的增大, $\beta_{\text{T, safety, 2}}$ 减小并趋于稳定。不同的桥梁安全等级 $\beta_{\text{T, safety, 2}}$ 量值差异明显;对于同一安全等级的桥梁, $\beta_{\text{T, safety, 2}}$ 随着 $N$ 增大而增大,增长速率逐渐减慢。此外,桥梁安全等级越高,大件车通行次数对可靠指标的影响幅值越小。

第一层次安全评估要求桥梁结构满足安全冗余水平,根据ISO 2394中定义,当桥梁结构不满足安全水平时产生的经济损失大,失效概率可取0.001,此时桥梁结构的年目标可靠指标为 $\beta_{\text{T, annual}}=3.09$ 。由此计算第一层次安全评估大件运输车辆单次通行目标可靠指标:

$$\beta_{\text{T, safety, 1}} = \Phi^{-1} \left\{ \left[ \Phi(\beta_{\text{T, annual}}) \right]^{\frac{1}{N}} \right\} \quad (5)$$

式中: $\beta_{\text{T, safety, 1}}$ 为第一层次安全评估大件运输车辆单次通行目标可靠指标; $\beta_{\text{T, annual}}$ 为考虑桥梁结构安全冗余的年目标可靠指标; $N$ 为一年内大件运输车辆的通行次数。

由式(5)可得,当 $N$ 分别取50、100、150和200

$$d\theta^{(k)} = \frac{[\nabla_u G(\mathbf{u}^{(k)}, \theta^{(k)}), \mathbf{u}^{(k)}] - G(\mathbf{u}^{(k)}, \theta^{(k)}) + \beta_T \|\nabla_u G(\mathbf{u}^{(k)}, \theta^{(k)})\|}{\nabla_\theta G(\mathbf{u}^{(k)}, \theta^{(k)})} \quad (10)$$

式中:参数上标括号中的值为迭代的次数; $\nabla_u G$ 为极限状态方程 $G$ 对变量 $\mathbf{u}$ 的梯度向量; $\nabla_\theta G$ 为极限状态方程 $G$ 对参数 $\theta$ 的梯度向量; $\lambda$ 为步长,其取值关系到迭代过程是否收敛及收敛速度。

对于弯桥抗倾覆, $\mathbf{X}=[X_1, \dots, X_n]^T$ 为功能函数中的所有参数 $R_{Gi}$ 、 $R_{QCTVi}$ 、 $l_i$ ,通过Nataf变换得到满足独立标准正态分布的变量 $\mathbf{u}$ ,从而得到两层次安全评估功能函数 $G(\mathbf{u}, \theta)$ ,利用迭代方法令其可靠指标与对应目标可靠指标间误差满足允许误差,即可得到两层次弯桥抗倾覆稳定安全系数 $\theta$ 。

#### 1.4.2 迭代步长与初值优化

为了保证迭代算法的收敛性,提高算法的收敛速度,采用可靠指标正算初步估算随机变量的取值范围,并在此范围内取一个向量作为随机变量的初始值。迭代允许误差 $\epsilon=0.0001$ 。初设步长 $\lambda=1$ ,设置约束条件 $|G^{(k+1)} - G^{(k)}| < 1$ 确定步

时,大件车单次通行目标可靠指标 $\beta_{\text{T, safety, 1}}$ 分别取4.11、4.26、4.35和4.42。

### 1.4 弯桥抗倾覆稳定安全系数计算方法

#### 1.4.1 逆可靠度分析基本方法

逆可靠度方法定义为:设 $\mathbf{X}=[X_1, \dots, X_n]^T$ 为影响结构可靠性的 $n$ 维随机向量, $g(\mathbf{X}, \theta)$ 为结构的极限状态函数。为了便于可靠指标迭代计算,利用Nataf变换将随机变量 $\mathbf{X}$ 转换为独立标准正态变量 $\mathbf{u}$ ,即可得 $G(\mathbf{u}, \theta)=g(\mathbf{X}, \theta)$ 。此方法的目的是找到一个参数 $\theta$ 使得极限状态方程 $G(\mathbf{u}, \theta)$ 的可靠指标 $\beta$ 等于预先给定的目标可靠指标 $\beta_T$ ,从而达到在一定保证率下结构抗力大于荷载效应的目的。上述方法可表达如下:

寻找参数 $\theta$ ,使其满足:

$$\begin{aligned} \min \beta_T &= \min \|\mathbf{u}\| \\ \text{s.t. } G(\mathbf{u}, \theta) &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

逆可靠度迭代算法涉及以下迭代方程:

$$\mathbf{u}^{(k+1)} = \mathbf{u}^{(k)} + \lambda^{(k)} d\mathbf{u}^{(k)} \quad (7)$$

$$\theta^{(k+1)} = \theta^{(k)} + \lambda^{(k)} d\theta^{(k)} \quad (8)$$

$$d\mathbf{u}^{(k)} = -\beta_T \frac{\nabla_u G(\mathbf{u}^{(k)}, \theta^{(k)})}{\|\nabla_u G(\mathbf{u}^{(k)}, \theta^{(k)})\|} - \mathbf{u}^{(k)} \quad (9)$$

长搜索范围。算法计算流程如图3所示。

### 1.5 方法验证

采用文献[6]中算例1验证本文提出弯桥抗倾覆稳定安全系数计算模型的准确性和效率,极限状态方程为:

$$G = \exp[-\theta(u_1 + 2u_2 + 3u_3)] - u_4 + 1.5 \quad (11)$$

式中: $\mathbf{u}=(u_1, u_2, u_3, u_4)^T$ 为独立标准正态空间。

算例1中确定目标可靠指标 $\beta_T=2.0$ 。取 $\theta_0=0.1^{[6]}$ 。在此分别取 $\mathbf{u}=(1, 2, 3, 2)^T$ 、 $\mathbf{u}=(0.2, 0.2, 0.2, 0.2)^T$ 、 $\mathbf{u}=(0.5, 0.5, 0.5, 0.5)^T$ 计算,得到可靠指标值分别为2.3353、0.2908、0.6960。由此可假设 $\mathbf{u}_0=(1, 2, 3, 2)^T$ 。

图4给出了使用本文算法迭代过程中可靠指标的取值。经过6次迭代后 $\beta$ 取值已经趋近于 $\beta_T$ ,经过12次迭代后达到迭代允许误差要求。此时 $\theta=0.3662$ ,接近文献[6]中结果 $\theta=0.3670$ 。这表明本文提出的弯桥抗倾覆稳定安全系数计算

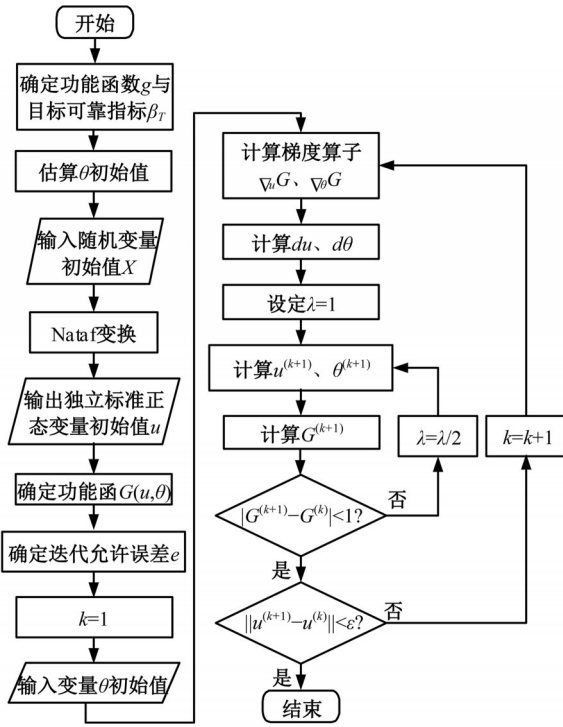


图 3 逆可靠度分析的计算流程图

Fig. 3 Calculating flow chart of inverse reliability analysis

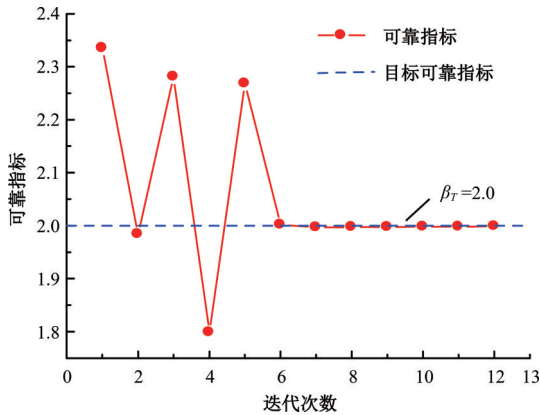


图 4 可靠指标迭代过程

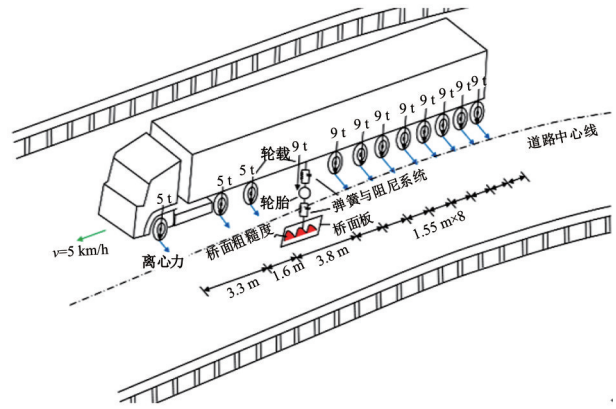
Fig. 4 Iterative process of reliability values

方法是合理有效的。

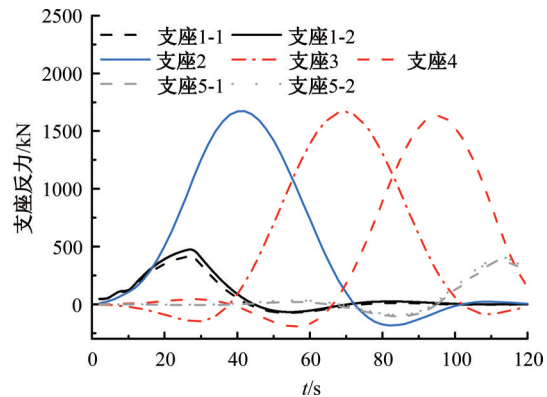
## 2 大件车载下典型公路弯桥抗倾覆稳定安全评估

### 2.1 大件车-弯桥耦合动力分析系统

图 5(a)给出了大件车-弯桥耦合动力分析系统的要素组成<sup>[10]</sup>,将车轮与悬挂系统简化为集弹簧、黏滞阻尼、质量为一体的动力分析系统,建立大件运输车辆动力分析模型<sup>[11]</sup>。本文中采用梁格法建立桥梁有限元模型,单元内任一点的响应通过单元两端节点的响应插值得到。图 5(b)给



(a)车桥耦合动力分析系统



(b)支座反力结果分析

图 5 大件车-桥耦合动力分析

Fig. 5 CTV-bridge coupling dynamic analysis

出了大件车居中行驶通行某四跨连续弯桥时的支座反力时程,其中“支座 1-1”与“支座 5-1”表示弯桥平曲线内侧支座,“支座 1-2”与“支座 5-2”表示弯桥平曲线外侧支座。

由于管养部门对高速公路的定期维护,我国高速公路路面粗糙度状况一般评定为“好”或“一般”<sup>[12]</sup>,而且大件运输车辆通行优先选择技术状况较好的路段,因此在本文的分析中将路面粗糙度设为“好”。根据大件运输车辆低速行驶的规定,假设车辆行驶速度为 5 km/h,从最不利受力角度考虑,研究大件运输车辆沿最外侧车道行驶为荷载加载状态,分析大件车通行弯桥时的抗倾覆稳定安全性。

### 2.2 典型桥梁信息

近年来发生倾覆事故的弯桥均为连续整体箱梁<sup>[13]</sup>,跨数多为 3~4 跨,桥长范围 80~130 m,主梁宽度多为 8~10 m,倾覆侧车辆总质量 300~500 t。基于某省高速公路桥梁大件运输车辆通行能力快速评估项目,对大广高速等 9 条高速共

约 500 km 沿线匝道桥梁信息统计,得知 3~4 跨的连续整体箱梁共有 42 座,且大多数桥梁几何特征与倾覆桥梁接近,故选择两种典型桥梁评估抗倾覆稳定安全:1 号桥,跨径组合(35+40+35) m,桥宽 8.5 m,支座间距 4 m,曲率半径 400 m;2 号桥,跨径组合(3×25) m,桥宽 10.5 m,支座间距 4.4 m,曲率半径 100 m。两桥均为安全等级一级的钢筋混凝土整体箱梁,主梁混凝土等级为 C50,采用 φ15.2、抗拉强度标准值为 1860 MPa 的高强低松弛钢绞线。三跨桥梁常见的支撑形式如图 6 所示,“2”、“1”分别表示双、单支座支承。图 7 为典型桥梁横断面图。选取 523 t 大件运输车辆作为车载计算<sup>[3]</sup>,假设年均通行次数为 200 次。

### 2.3 安全系数影响因素分析

#### 2.3.1 曲率半径的影响

在弯桥设计施工时,一般不设置连续的单支座支承,研究边界条件为“2+1+2+2”的 3 跨桥梁的抗倾覆安全评估更有意义。图 8 给出了不同弯桥曲率半径下,边界条件为“2+1+2+2”的典型弯桥抗倾覆稳定安全系数计算结果。可以发

现,桥梁的曲率半径对结构的安全系数影响呈现先增大后减小的规律。

第二层次评估安全系数介于 1.4~2.0,大于安全系数临界值;第一层次评估安全系数介于 0.6~0.9,小于安全系数临界值。这表明典型弯桥满足抗倾覆要求但不满足抗倾覆冗余度要求,存在一定的安全风险。规范计算安全系数大于第二层次评估安全系数且大于 2.5 倍第一层次评估安全系数,说明大件车辆通行时弯桥安全储备低于 2.5 倍荷载冗余要求,应提高规范中安全系数取值。

#### 2.3.2 边界条件的影响

为了研究边界条件对弯桥两层次安全评估抗倾覆稳定安全系数的影响,取  $R=200$  m,计算分析典型桥梁在不同边界条件下的安全系数。图 9 为典型桥梁在 3 种不同边界条件下的安全系数变化图,可以发现,随着双支承数量增加,1 号桥与 2 号桥两层次评估安全系数均显著增加,第二层次安全系数为第一层次安全系数的 2.1~2.3 倍。

当边界条件为“2+1+1+2”时,两层次评估

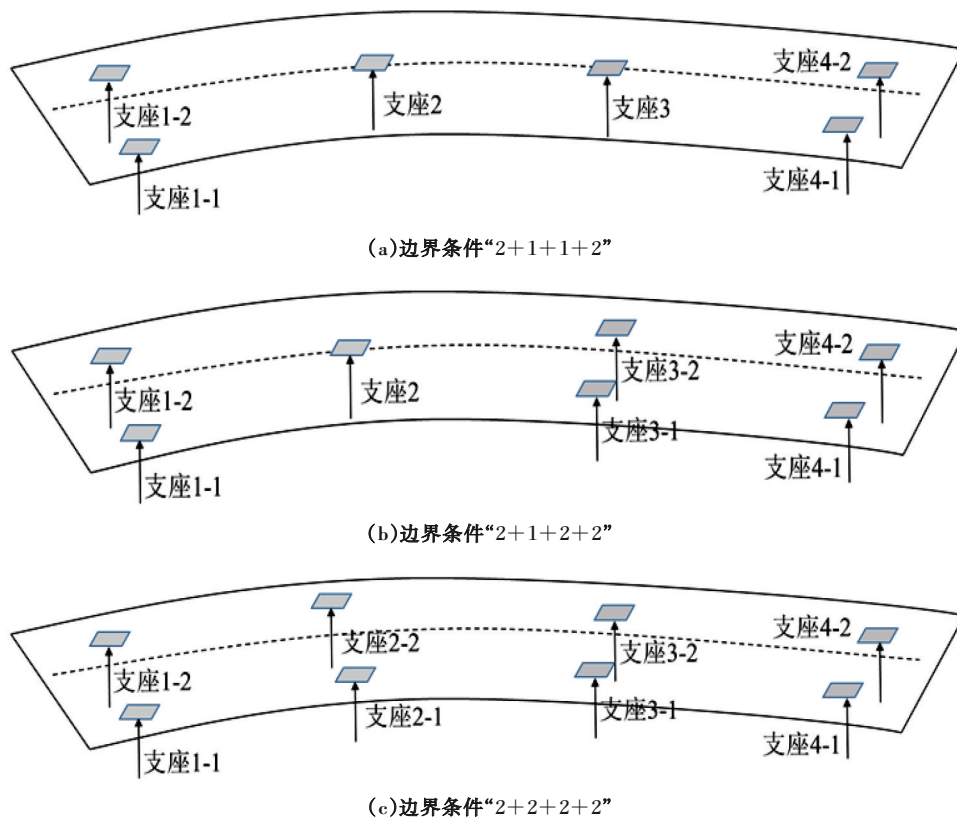


图 6 典型桥梁 3 种边界条件示意图

Fig. 6 Three boundary conditions of typical bridges

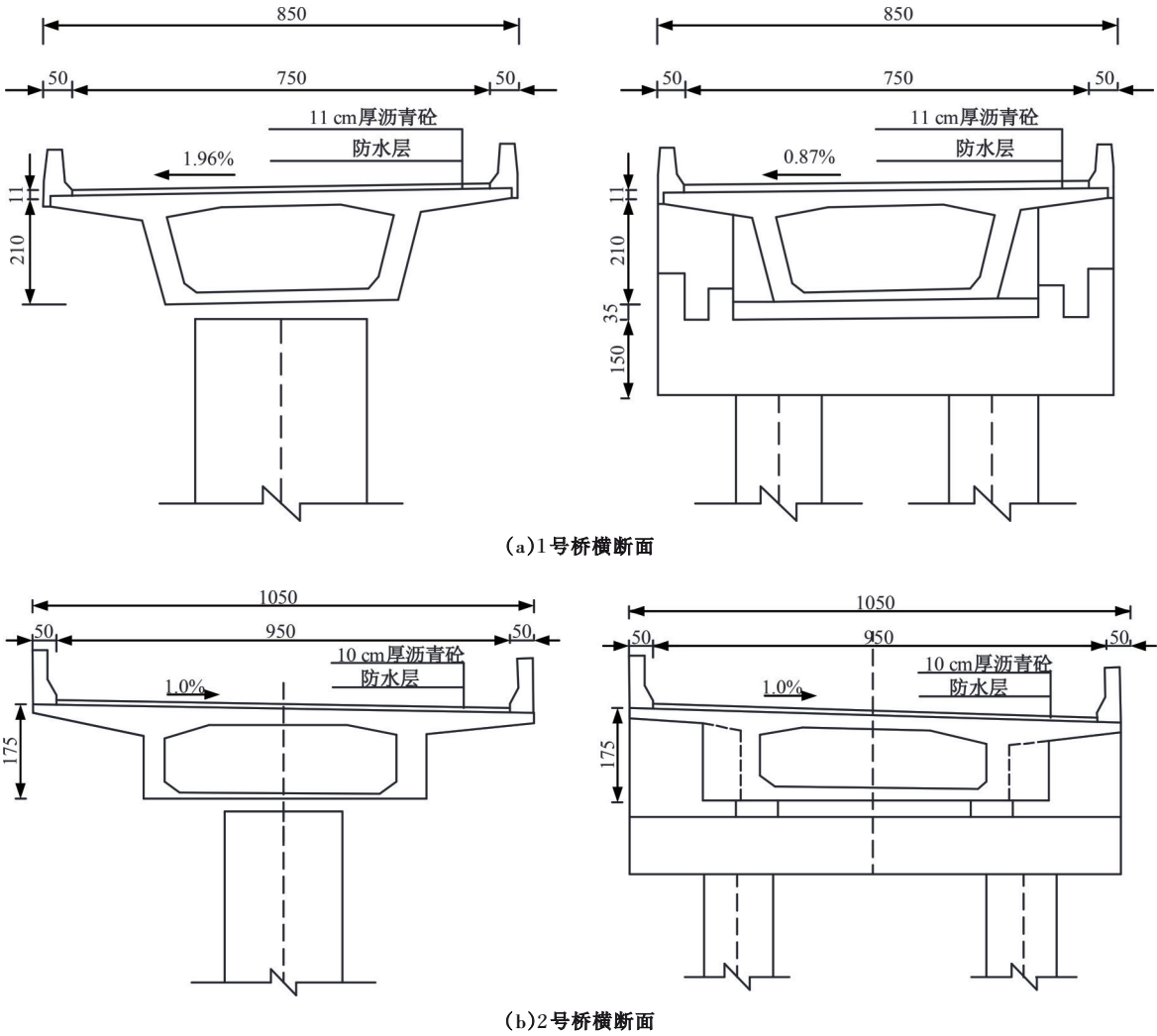


图 7 典型桥梁横断面(单位:cm)

Fig. 7 Cross section of the typical bridge(unit:cm)

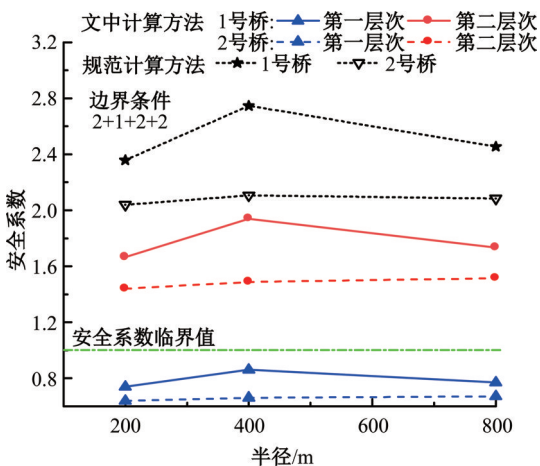


图 8 曲率半径对弯桥两层次评估安全系数的影响

Fig. 8 Influence of radius on two levels safety factors of curved bridges

安全系数均小于安全系数临界值,表明典型桥梁不满足抗倾覆要求;当边界条件为“2+1+2+2”

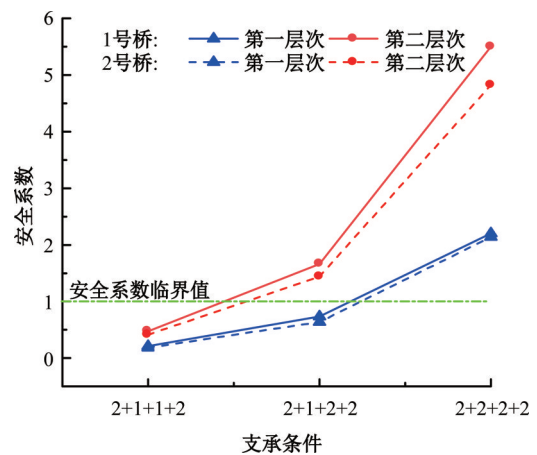


图 9 边界条件对安全系数的影响结果

Fig. 9 Influence of boundary condition on safety factors

时,第二层次评估安全系数大于安全系数临界值,第一层次反之,典型桥梁均满足抗倾覆要求但不满足抗倾覆冗余度要求;当边界条件为“2+2+

2+2”时,两层次评估安全系数均大于安全系数临界值,典型桥梁均满足两层次安全评估要求。大件车沿典型弯桥最外侧车道通行时,弯桥的单支承个数对结构的抗倾覆稳定安全有着至关重要的作用,单支承较多的弯桥面临较大的倾覆风险,在桥梁设计施工时应尽量减少弯桥单支承的布设。

### 2.3.3 参数概率分布特征的影响

以 2 号桥为对象研究参数的概率分布特征对弯桥抗倾覆稳定安全系数的影响。由表 1 可知,当荷载类型一致时概率分布特征、分布参数均相同,因此令  $R_{Gi}$  或  $R_{QCTVi}$  同时取放大倍数。 $R_{Gi}$ 、 $R_{QCTVi}$  的变异系数放大倍数取值为 0.5~1.5,  $R_{Gi}$ 、 $R_{QCTVi}$  的均值放大倍数取值为 0.8~1.2,得到两层次安全评估弯桥抗倾覆稳定安全系数如图 10

所示。两层次安全系数均随着  $R_{Gi}$ 、 $R_{QCTVi}$  变异系数、均值的增大而减小。

由图 10(a)可知,安全系数与  $R_{Gi}$  间关系斜率略大于安全系数与  $R_{QCTVi}$  间关系斜率,表明安全系数对恒载效应变异系数的取值更敏感。在  $R_{Gi}$ 、 $R_{QCTVi}$  变异系数取值范围内,第一层次评估安全系数变化范围为 0.64~0.71,第二层次评估安全系数变化范围为 1.42~1.65。

由图 10(b)可知,当  $R_{Gi}$ 、 $R_{QCTVi}$  的均值放大倍数相同,两层次评估安全系数分别几乎相等,荷载均值变化对两层次评估安全系数影响规律基本类似。在  $R_{Gi}$ 、 $R_{QCTVi}$  均值取值范围内,第一层次评估安全系数变化范围为 0.56~0.85,第二层次评估安全系数变化范围为 1.27~1.91。

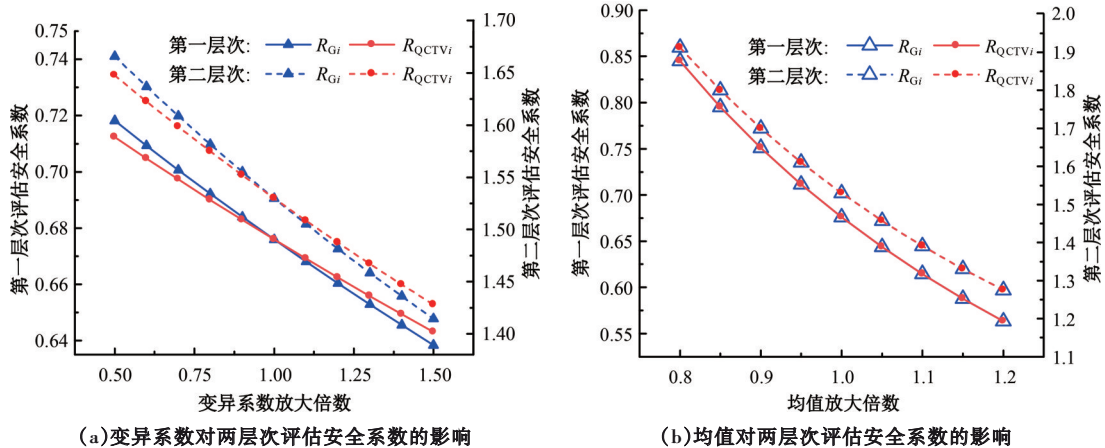


图 10 安全系数随参数概率分布特征变化图

Fig. 10 Variation of safety factor with parameter probability distribution characteristics

## 3 结 论

(1) 桥梁安全等级越高,大件运输车辆单次通行目标可靠指标越大。当大件车年均通行次数为 50~200 时,抗倾覆冗余状态下大件车单次通行目标可靠指标为 4.11~4.42;当弯桥的安全等级为一级、二级、三级时,对应抗倾覆破坏大件车单次通行目标可靠指标分别为 6.25~6.47、5.84~6.07 和 5.44~5.68。

(2) 基于正-逆可靠度的弯桥抗倾覆稳定安全系数计算方法具有较高的准确性,克服了迭代过程中可能会出现无法收敛及收敛值不正确的

问题。

增大,弯桥的两层次抗倾覆稳定安全系数均先增大后减小,抗倾覆稳定安全系数随着单点支承个数增加而显著降低。

(4) 第二层次抗倾覆稳定安全系数为第一层次安全系数的 2.1~2.3 倍。大件车辆通行时弯桥安全储备低于 2.5 倍荷载冗余要求,应提高规范中的安全系数取值。

(5) 两层次评估抗倾覆稳定安全系数随着恒载与大件车荷载的变异性增加而显著降低,表明在大件车辆运输过程中,不仅需要严格检查车辆装载报备吨位,还需要及时养护桥梁结构,保证桥梁结构良好的技术状况。

(6) 本文大件运输车辆按照低速行驶规定确定车辆行驶速度,在实际运营过程中,应考虑车辆

超速行驶引起的动力响应放大。

#### 参考文献:

- [1] 朱利明,钱思沁,陈沁宇,等. 在役桥梁垮塌风险评估及预防策略[J]. 南京工业大学学报:自然科学版, 2020, 42(3): 284-290.  
Zhu Li-ming, Qian Si-qin, Chen Qin-yu, et al. Risk assessment and prevention strategy of bridge collapse in service[J]. Journal of Nanjing Tech University(Natural Science Edition), 2020, 42(3): 284-290.
- [2] 夏云飞. 基于长期监测数据的曲线梁桥结构状态预警与评估方法研究[D]. 郑州: 郑州大学土木工程学院, 2020.  
Xia Yun-fei. Research on early warning and evaluation method, curved beam bridge structure based on long-term monitoring date[D]. Zhengzhou: School of Civil Engineering, Zhengzhou University, 2020.
- [3] 郭东升. 大件运输车辆通行桥梁安全评估与监测[J]. 北方交通, 2021(1): 10-13.  
Guo Dong-sheng. Safety assessment and monitoring of large transport vehicles passing bridges[J]. Northern Transportation, 2021(1): 10-13.
- [4] 宫亚峰,何钰龙,谭国金,等. 三跨独柱连续曲线梁桥抗倾覆稳定性分析[J]. 吉林大学学报:工学版, 2018, 48(1): 113-120.  
Gong Ya-feng, He Yu-long, Tan Guo-jin, et al. Anti-overturning stability analysis for three-span continuous curved girder bridge with single column pier [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2018, 48(1): 113-120.
- [5] Liu P L, Armen D K. Optimization algorithms for structural reliability[J]. Structural Safety, 1991, 9(3): 161-177.
- [6] Armen D K. Inverse reliability problem[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1994, 120: 1154-1159.
- [7] 刘杰,杨吉新,董峰辉. 大跨度连续梁桥悬臂施工整体抗倾覆稳定安全系数评估[J]. 中国公路学报, 2018, 31(3): 89-95.  
Liu Jie, Yang Ji-xin, Dong Feng-hui. Safety factors assessment of resistant overturning stability of long-span continuous girder bridges in cantilever construction[J]. Journal of China Highway Engineering, 2018, 31(3): 89-95.
- [8] 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.  
Yuan Yang-guang, Zhou Guang-li, Gao Wen-bo, et al. Assessment method for bridges under customized trucks by incorporating safety and serviceability[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(7): 147-158.
- [9] 张立业,郭学东,董丽娟. 载荷共享过程的桥梁系统首次失效平均时间[J]. 吉林大学学报:工学版, 2013, 43(5): 1247-1252.  
Zhang Li-ye, Guo Xue-dong, Dong Li-juan. Bridge system mean time to failure with load sharing process [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2013, 43(5): 1247-1252.
- [10] 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): 0001257.
- [11] Liu X D, Han W S, Yuan Y G, et al. Corrosion fatigue assessment and reliability analysis of short suspender of suspension bridge depending on refined traffic and wind load condition[J]. Engineering Structures, 2021, 234: 111950.
- [12] Liu X D, Han W S, Yuan Y G, et al. Fatigue lifespan assessment of stay cables by a refined joint probability density model of wind speed and direction[J]. Engineering Structures, 2021, 252(5): 113608.
- [13] Dan D H, Yu X W, Yan X F, et al. Monitoring and evaluation of overturning resistance of box girder bridges based on time-varying reliability analysis[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2020, 34(1): 04019101.