doi: 10.3969/j.issn.1002－0268.2013.12.011

在役桥梁构件承载能力安全性实用分级标准研究

石 云[1]，李松辉[2]，杨 柳[3]
（1. 鲁东大学 土木工程学院，山东 烟台 264025；2. 山东科技大学 土木建筑学院，山东 青岛 266510；
3. 荣乌高速公路烟台管理处，山东 烟台 264000）

摘要： 针对国内外已有混凝土构件承载能力评定方法的不足，结合现行相关规范，按“校准法”分析了各类构件不同可靠指标限值对应的抗力系数值，并由此提出了各结构安全等级下在役桥梁受弯构件承载能力评定的分级标准。采用《公路工程可靠度设计统一标准》中抗力与荷载效应的实际分布类型，对各类构件的在该分级标准下的可靠指标进行了校核，在控制不同安全等级4类构件下限可靠指标降低量均不超过一个数量级差的前提下，提出了钢筋混凝土构件承载能力等级评定标准。分析结果表明，所提出的承载能力分级标准减少了承载能力分级计算的工作量，完善了现有桥梁养护、检测评定体系，具有普遍的适用性，可用于在役桥梁构件承载能力的评定分级。

关键词： 桥梁工程；桥梁构件；分级标准；可靠指标；承载能力评估；安全性
中图分类号： U447；U448.331 **文献标识码：** A **文章编号：** 1002－0268（2013）12－0069－11

Study on Practical Grading Standard of Security of Bearing Capacity of Existing Bridge Members

SHI Yun[1], LI Song-hui[2], YANG Liu[3]
(1. School of Civil Engineering, Ludong University, Yantai Shandong 264025, China;
2. School of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao Shandong 266510, China;
3. Rongcheng-Wuhai Freeway Administration in Yantai, Yantai Shandong 264000, China)

Abstract: In view of the shortcomings of existing evaluation method of bearing capacity of concrete members at home and abroad and combining with *Code for Maintenance of Highway Bridges and Culverts*, etc., the resistance coefficient values, which correspond to the reliability index limits of different kinds of concrete members, are analyzed under the guidance of calibration method. Then, the grading standard to evaluate bearing capacities of flexural members of existing bridges under different structural safety levels is proposed. The reliability indexes of different kinds of bridge members under this grading standard are checked by using the actual distribution pattern of resistance and load effects in *Unified Standard for Reliability Design of Highway Engineering Structures*. The grading standard to evaluate bearing capacity of reinforced concrete members is proposed under the premise that the reductions of lower limit of reliability indexes of 4 kinds of members with different reliability levels cannot higher than one order of magnitude difference. The analytic result shows that the proposed grading standard of bearing capacity not only reduced the workload of grading calculation of bearing capacity, improved the maintenance, examination and evaluation system of existing bridges, but also has universal applicability, it can be used in evaluating the bearing capacity of members of existing bridges.

收稿日期： 2013－02－25
基金项目： 国家自然科学基金项目（51278237）；交通运输部科技攻关项目（2005353341190）；山东省交通科技项目（2005Y006）
作者简介： 石云（1973－），女，山东烟台人，副教授.（shiyunyt@163.com）

Key words: bridge engineering; bridge member; grading standard; reliability index; bearing capacity evaluation; security

0 引言

合理界定在役桥梁构件的承载能力等级是桥梁安全性评估的重要内容。为建立工程技术人员易于操作的分级计算方法，本文根据《公路工程结构可靠度设计统一标准》[1]的规定与统计数据，在计算分析各等级构件的可靠指标的基础上，建立了与现行桥梁设计规范和《公路桥梁承载能力检测评定规程》相衔接的桥梁构件承载能力分级评定标准，避免桥梁技术人员直接分析构件的可靠指标，大大减少了承载能力分级计算的工作量，完善了现有桥梁养护、检测评定体系[2-3]。

1 在役桥梁结构构件承载能力基于可靠性的分级原则

当计算在役桥梁结构构件的承载能力分级标准时，首先要确定在役桥梁构件的目标可靠指标。鉴于国内和国际上还没有比较统一的在役结构目标可靠指标的确定方法，而拟建结构的目标可靠指标是采用校准法系统考虑结构的重要性、失效后果、破坏性质、经济指标等因素，经综合分析和调整得来的。所以本文仍采用文献[1]规定值作为在役桥梁评估的目标可靠指标，如表1所示。

表1 在役公路桥梁结构目标可靠指标建议值

Tab. 1 Suggested reliability index values of existing highway bridge structures

构件破坏类型	一级	二级	三级
延性破坏	4.7	4.2	3.7
脆性破坏	5.2	4.7	4.2

注：构件破坏类型定义同《公路工程结构可靠度设计统一标准》。

2 基于可靠性的在役桥梁构件承载能力分级标准

根据桥梁系统安全性的分级原则，对于承载能力检算指标同样按5级分类。考虑到与现行《公路桥涵养护规范》[3]分类标准的衔接，本文对4类构件(差的状态)的可靠指标下限值控制在一个数量级差以内，而5类构件(危险状态)对应的可靠指标超过一个数量级差。同时，文献[4]认为，对于安全状况良好的结构，在对其进行安全性分级评估时，其计算精度的要求就相对较小，而当结构安全性等级越低，即结构越不安全，则等级划分得越细，以满足工程决策、管理的准确、有效，并与人们的心理状态相一致的。

基于以上分析，在确定与各等级对应的可靠指标限值时，采用放宽1、2类桥梁，细化3、4类桥梁，突出5类桥梁的方法。结合安全性分级的物理内涵，承载能力验算指标的分级原则，并结合现有文献的研究成果[5-6]，在役桥梁构件基于可靠指标的分级界限值如表2所示。

为建立与之对应的承载能力分级标准，可以借鉴校准法的基本原理。对于现行桥梁规范设计的桥梁(安全等级为二级)，其抗力标准值 R_k 的表达式为:

$$R_k = \gamma_R(\gamma_1 S_{Gk} + \gamma_2 S_{Qk}), \quad (1)$$

式中，γ_R 为综合抗力分项系数，其取值与受力状态有关；γ_1、γ_2 为恒载和活载的作用分项系数；S_{Gk}、S_{Qk}为恒载和汽车荷载标准值效应。

根据上述原理，按照承载能力不同等级对应的可靠指标限值，即可计算出与之相应的抗力分项系数，通过与目标可靠指标(分级起点)对应的抗力分项系数相比较，即可得到与表2相对应的抗力折减系数，并由此构建承载能力验算结果的等级划分标准，如表3所示。

表2 在役桥梁结构构件基于可靠性的承载能力分级标准(安全等级为二级)

Tab. 2 Grading standard of bearing capacity of existing bridge members based on reliability (security level II)

破坏类型	1类	2类	3类	4类	5类
延性破坏	$\beta \geqslant 4.20$	$3.95 \leqslant \beta < 4.20$	$3.70 \leqslant \beta < 3.95$	$3.20 \leqslant \beta < 3.70$	$\beta < 3.20$
脆性破坏	$\beta \geqslant 4.7$	$4.45 \leqslant \beta < 4.7$	$4.20 \leqslant \beta < 4.45$	$3.70 \leqslant \beta < 4.20$	$\beta < 3.70$

注：(1) 构件破坏类型同《公路工程结构可靠度设计统一标准》；(2) 各等级构件可靠指标最大可降低0.5，当降低幅度超过一个数量级差则认为承载能力显著降低，已达到随时有可能破坏的程度。

表3中，R 和 S 分别为结构构件的抗力标准值和作用效应的组合设计值，R 是按《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004)抗力表达式计算的构件抗力标准值，其中的材料强

表 3　在役桥梁结构构件承载能力检算指标分级标准（安全等级为二级）

Tab. 3　Grading standard of checking calculation indexes of bearing capacity of existing bridge members (security level II)

构件破坏类型	1 类	2 类	3 类	4 类	5 类
延性破坏	$R/(\gamma_0\gamma_R S)\geqslant a_1$	$a_2\leqslant R/(\gamma_0\gamma_R S)<a_1$	$a_3\leqslant R/(\gamma_0\gamma_R S)<a_2$	$a_4\leqslant R/(\gamma_0\gamma_R S)<a_3$	$R/(\gamma_0\gamma_R S)<a_4$
脆性破坏	$R/(\gamma_0\gamma_R S)\geqslant a_1$	$a_2\leqslant R/(\gamma_0\gamma_R S)<a_1$	$a_3\leqslant R/(\gamma_0\gamma_R S)<a_2$	$a_4\leqslant R/(\gamma_0\gamma_R S)<a_3$	$R/(\gamma_0\gamma_R S)<a_4$

注：按原桥规设计桥梁，其所隐含的可靠指标与目标可靠指标或有不同[7-8]，因此分级的起点可能大于目标可靠指标，a_1 为相应的一类桥梁的分级限值，$a_1=1.0$。

度与几何参数均取标准值[7]，即 $R_k=R(f_k,a_k)$，f_k 为材料性能的标准值或实测值，a_k 为结构或构件几何参数的标准值或实测值。S 是按现行桥梁设计规范的荷载标准计算的作用基本组合的效应设计值[7-8]；γ_R 为结构或构件抗力机模式不定性系数或抗力系数。

上述处理方法也可以这样理解，假定某构件的抗力标准值产生衰减，而抗力标准值与均值和方差呈线性关系，意味着抗力统计分布模型的改变，以改变后的抗力分布计算可靠指标，即可得到与所划分等级相对应的可靠指标值。因此，表 2、表 3 的承载能力分级标准本质上是一致的，但采用承载能力检算指标的形式可以避免评估中的可靠指标计算，更适合于工程技术人员采用。

3　在役桥梁结构构件承载能力的验算表达式

在役桥梁构件承载能力极限状态检算表达式可按下列规定采用:

$$\gamma_0\Big(\sum_{i=1}^{m}\gamma_{Gi}S_{Gik}+\gamma_{Q1}\zeta_q S_{Q1k}+\psi_c\sum_{j=2}^{n}\gamma_{Qj}S_{Qjk}\Big)\leqslant R(\gamma_f,f'_k,a'_k),\qquad(2)$$

式中，γ_0 为结构重要性系数，对于安全等级为一级、二级、三级的公路桥梁，可分别取 1.1、1.0、0.9；γ_{Gi} 为第 i 个永久作用的分项系数，当恒荷载（结构及附加物自重）对结构的承载能力有利时，取 $\gamma_{Gi}=1.2$；S_{Gik} 为第 i 个永久作用效应的标准值；γ_{Q1} 为汽车荷载效应的分项系数，当恒荷载（结构及附加物自重）对结构的承载能力有利时，取 $\gamma_{Q1}=1.4$；S_{Q1k} 为汽车荷载效应（含汽车冲击力和离心力）的标准值；S_{Qjk} 为在作用效应组合中除汽车荷载效应外的其他第 j 个可变作用效应的标准值；ψ_c 为在作用效应组合中除汽车荷载效应外的其他可变作用效应的组合系数；γ_f 为结构材料分项系数；f_k、f_d 为材料强度的标准值和设计值；a_k、a_d 为结构构件几何参数的标准值和设计值；γ_f 为材料性能分项系数；$R(\cdot)$ 为结构或构件的抗力函数，按现行桥梁设计规范规定的方法计算；ζ_q 为活载影响修正系数；f'_k 为实测材料强度的标准值；a'_k 为构件实测几何参数的标准值。

4　桥梁结构基本变量的概率模型与基本统计参数

在承载能力分级标准分析计算中，主要采用恒荷载与汽车荷载的基本组合作为分析对象[9]。由此，桥梁结构构件承载能力功能函数为:

$$Z=g(R,S_G,S_Q)=R-S_G-S_Q,\qquad(3)$$

式中，R 为在役桥梁结构构件综合抗力随机变量；S_G、S_Q 分别为恒载效应和汽车荷载效应随机变量。

下面根据《公路工程可靠度设计统一标准》与《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》[8]，分别介绍抗力、恒荷载效应与汽车荷载效应的概率分布与统计参数。

4.1　恒荷载及恒载效应的分布函数与统计参数

桥梁结构恒载的分布类型为正态分布，其相应概率分布函数及统计参数如下[1,10]:

$$F_G(x)=\frac{1}{0.043\,7G_{Ik}\sqrt{2\pi}}\cdot\int_{-\infty}^{x}\exp\Big[-\frac{x-1.014\,8G_{Ik}}{0.003\,8G_{Ik}}\Big]\mathrm{d}x,\qquad(4)$$

式中，G_{Ik} 为恒载值，按设计图纸的标注尺寸与材料标准重力密度的乘积。

恒荷载的统计参数为：均值 $\mu_G=1.014\,8G_{Ik}$；方差 $\sigma_G=0.043\,7G_{Ik}$；变异系数 $\delta_G=0.043\,1$。

恒荷载效应的统计参数为:

$$\sigma_{SG}=\delta_{SG}\mu_{SG},\ \mu_{SG}=\kappa_{SG}S_{Gk},\qquad(5)$$

式中，μ_{SG}、σ_{SG}、S_{Gk}、δ_{SG} 分别为恒载效应 S_G 的均值、方差、标准值和变异系数；$\kappa_{SG}=S_G/S_{Gk}$，为恒载效应无量纲统计参数。

对于在役桥梁而言，恒荷载效应的统计参数可采用与设计相同的值，即：均值 $\kappa_{SG}=1.014\,8$；变异系数 $\delta_{SG}=0.0431$[1]。

4.2　汽车荷载效应的分布函数与统计参数

汽车荷载的分布规律按一般运行状态和密集运行状态进行统计，分别对应于原桥梁设计规范(JTJ021—85)的汽车－20 级和汽车－超 20 级荷载

标准。根据对汽车荷载分布规律的统计结果，经计算确定汽车荷载效应的分布类型与统计参数。

在桥梁设计基准期（100 a）内，汽车荷载效应最大值分布一般认为服从极值Ⅰ型分布，其概率分布函数的基本形式为[11]：

$$F(x) = \exp\left\{-\exp\left[-\frac{(x-u)}{\alpha}\right]\right\}, \quad (6)$$

式中，α 为分布的尺度函数，且 $\alpha = \frac{\sigma_{SQ}}{1.282\ 55}$；$\mu$ 为分布的位置参数或分布的众值，且 $u = \mu_{SQ} - 0.577\ 2\alpha = \mu_{SQ} - 0.45\sigma_{SQ}$。

汽车荷载效应的统计参数表达式为：

$$\sigma_{SQ} = \delta_{SQ}\mu_{SQ}, \mu_{SQ} = \kappa_{SQ}S_{Qk}, \quad (7)$$

式中，μ_{SQ}、σ_{SQ}、δ_{SQ}分别为汽车荷载效应 S_Q的均值、方差和变异系数；κ_{SQ}为汽车荷载效应无量纲统计参数，且 $\kappa_{SQ} = S_Q/S_{Qk}$，其中，S_Q为根据实测的汽车荷载计算的效应值，分为一般运行状态和密集运行状态，S_{Qk}为根据原桥梁设计规范（JTJ021—85）的汽车荷载标准图式计算的效应值。

根据《公路工程可靠度设计统一标准》，与不同汽车运行状态相对应的汽车荷载效应分布函数及统计参数取值如表 4 所示[1]。

表 4 设计基准期汽车荷载效应最大值概率分布函数及统计参数

Tab. 4 Probability distribution function and statistical parameters of vehicle load effect maximum value in design reference period

汽车运行状态	效应种类	κ_{SQ}	δ_{SQ}	概率分布函数
一般运行状态	弯矩	0.686 1	0.156 9	$F_M(x) = \exp\{-\exp[-\frac{(x-0.637\ 6S_{Qk})}{0.084S_{Qk}}]\}$
	剪力	0.608 3	0.158 1	$F_M(x) = \exp\{-\exp[-\frac{(x-0.565\ 0S_{Qk})}{0.075\ 0S_{Qk}}]\}$

根据表 4，荷载效应标准值 S_{Qk}取保证率为 95%（风险率 5%）的分位值，经计算，即可确定各运行状态对应的荷载效应标准值 S_{Qk}与原桥规汽车荷载效应标准值 S'_{Qk}的关系。不同运行状态的汽车荷载效应标准值见表 5[1]。

表 5 设计基准期不同汽车荷载效应标准值（极值Ⅰ型）

Tab. 5 Effect standard values of different vehicle loads in design reference period (extreme value Ⅰ)

汽车运行状态	效应种类	与原桥规荷载效应标准值的关系
一般运行状态	弯矩	$S_{Qk} = 0.887\ 1S'_{Qk}$
	剪力	$S_{Qk} = 0.787\ 8S'_{Qk}$
密集运行状态	弯矩	$S_{Qk} = 0.928\ 0S'_{Qk}$
	剪力	$S_{Qk} = 0.821\ 8S'_{Qk}$

尽管现行规范与 85 规范汽车荷载效应标准值效应计算值稍有差异，本文在建立承载能力分级标准时，暂不考虑这一差异对分析结果的影响[11-12]。

根据《公路桥梁承载能力检测评定规程》[2]，在计算汽车荷载在结构上产生的作用效应时，对重载交通桥梁，汽车荷载效应需计入活载影响修正系数 ζ_q，以充分反映超载对被鉴定桥梁承载能力的影响程度，适当提高汽车荷载效应标准值。ζ_q 计算公式如下：

$$\zeta_q = \sqrt[3]{\zeta_{q1}\zeta_{q2}\zeta_{q3}}, \quad (8)$$

式中，ζ_q 为活载影响修正系数；ζ_{q1}为对应于交通量的活载影响修正系数；ζ_{q2}为 对应于大吨位车辆混入率的活载影响修正系数；ζ_{q3}为对应于轴荷分布的活载影响修正系数。

通过以上分析，在桥梁构件受弯或受剪承载能力分级标准计算中，分别采用相应设计基准期汽车荷载效应的分布函数和统计参数计算相应的可靠指标。对于其他作用效应种类的构件，如大偏心受压和小偏心受压情况，汽车荷载效应设计基准期最大值分布函数和统计参数无资料可查，参照现有文献的处理方法[5,10]，在承载能力各分级构件可靠指标校准分析时，统一采用与弯矩相同的分布类型和统计参数，以策安全。

4.3 结构构件抗力的分布函数与统计参数

影响结构构件抗力的因素很多，在设计阶段，一般主要考虑材料性能的不定性 Ω_f、结构几何参数的不定性 Ω_a和计算模式的不定性 Ω_p等 3 个因素。

根据现有研究成果，在役桥梁构件抗力仍采用规范推荐的表达式[2]：

$$R = \Omega_P R_P = \Omega_P R(f_{c_i} \cdot a_i), i = 1,2,\cdots,n, \quad (9)$$

或

$$R = \Omega_P R_P = \Omega_P R[(\Omega_{f_i} \cdot f_{k_i}) \cdot (\Omega_{a_i} \cdot a_{k_i})], \quad i = 1,2,\cdots,n, \quad (10)$$

式中，R_P 是由计算公式按材料性能与几何尺寸实测值确定的结构构件的抗力，$R_P = R(\cdot)$，$R(\cdot)$为抗

力函数f_{k_i}为结构构件中第i种材料的性能标准值，可取用规范值、实测值或推算值；a_{k_i}为与第i种材料相应的几何参数，按设计值或实测值采用；f_{ci}为第i种材料的强度设计值；a_i为结构的几何尺寸。

根据已有研究资料[1,7]，基于现行桥梁设计规范的钢筋混凝土构件抗力计算模式Ω_P的统计参数见表6。

表6　钢筋混凝土构件计算模式Ω_P的统计参数

Tab. 6　Statistical parameters of calculation pattern Ω_P of reinforced concrete members

受力状态			μ_{Ω_P}	δ_{Ω_P}
轴心受压(短柱)			1.010 5	0.070 2
轴心受拉			1.000 0	0.040 0
正截面受弯			1.098 0	0.071 0
斜截面受剪	矩形截面		1.486 0	0.283 2
	T形截面*		1.901 1(2.015 2*)	0.088 4
偏心受压(短柱)	矩形截面	大偏心	1.065 0	0.088 0
		小偏心	1.0700	0.0950
	圆形截面		0.991 2(1.005 9)	0.258 8(0.249 4)

注：(1) 表中T形截面斜截面受剪统计参数μ_{Ω_P}括号内的数据，为基于85规范的统计计算结果；(2) 圆形截面偏心受压构件的统计参数取自现行桥梁设计规范的条文说明，括号内的数据为基于85桥梁设计规范的统计结果。

表6中，T形截面受剪构件与圆形受压构件的计算模式统计参数μ_{Ω_P}已按现行《公路工程可靠度设计统一标准》进行了修正。

抗力计算模式不定性随机变量可表示为[13]：

$$\Omega_P = R^0/R^C, \tag{11}$$

式中，R^0为结构构件的实际抗力值，一般取试验值；R^C为按规范公式计算的抗力值，计算时采用材料性能和几何尺寸的实测值。

根据式(11)和《公路工程可靠度设计统一标准》，基于现行规范T形截面梁抗剪承载力计算模式，则Ω_P统计参数为：

$$\mu'_{\Omega_P} = \mu_{\{R^0/1.06R^C\}} = 2.015\ 2/1.06 = 1.901\ 1。 \tag{12}$$

根据表6计算模式Ω_P的统计参数，即可得到抗力R的统计参数κ_R和变异系数δ_R：

$$\kappa_R = \mu_R/R_k = \mu_{\Omega_P}\cdot\mu_{R_P}/R_k, \tag{13}$$

$$\delta_R = \sqrt{\delta^2_{\Omega_P} + \delta^2_{R_P}}, \tag{14}$$

式中，μ_{Ω_P}与δ_{Ω_P}分别为计算模式Ω_P的均值和变异系数，均按表6取值；R_k为按规范规定的材料性能和几何参数标准值用抗力计算公式求得的构件抗力值，即$R_k = R(f_{k_i}\cdot a_{k_i})$。

根据已有研究成果[5]，除对T形截面斜截面受剪的抗力统计参数适当调整外，其他仍按《公路工程可靠度设计统一标准》取值。各种钢筋混凝土桥梁结构构件在不同受力状态下的抗力统计参数，见表7。

表7　在役钢筋混凝土构件抗力R的统计参数

Tab. 7　Statistical parameters of resistance R of existing reinforced concrete members

受力状态			破坏类型	κ_R	δ_R
轴心受压(短柱)			脆性破坏	1.3743	0.1546
轴心受拉			延性破坏	1.0821	0.1322
正截面受弯			延性破坏	1.2262	0.1414
斜截面受剪	矩形截面		脆性破坏	1.671 7	0.288 3
	T形截面			2.056 4	0.223 0
偏心受压(短柱)	矩形截面	大偏心	延性破坏	1.204 2	0.144 7
		小偏心	脆性破坏	1.436 2	0.151 7
	圆形截面		脆性破坏	0.991 2	0.258 8

注：(1) T形截面斜截面受剪构件抗力统计参数κ_R系按式(14)计算得到，抗力变异系数按文献[4]取用；(2) 对于大偏心受压构件，从破坏形态上属于延性破坏，分级标准验算取相应的目标可靠指标值。

表7中，T形截面斜截面受剪构件抗力统计参数κ_R按式(13)计算。

基于现行桥梁设计规范的抗力统计参数κ_R可推算如下：

$$\kappa'_R = \mu'_{\Omega_P}\cdot\mu'_{R_P}/R'_k = \frac{\mu'_{\Omega_P}}{\mu_{\Omega_P}}\cdot 2.179\ 8 = 2.056\ 4, \tag{15}$$

其中，μ'_{Ω_P}、μ'_{R_P}为基于现行桥梁设计规范推得的统计参数，且根据误差传递原理知，$\mu_{R_P}/R_k \approx \mu'_{R_P}/R'_k$，且$R'_k = 1.06R_k$；$R'_k$为按现行桥梁设计规范斜截面抗剪承载力计算公式求得的构件抗力值，其中，材料性能和几何参数均采用标准值。

在拟建结构和在役结构构件的可靠性分析中，均认为抗力仍近似服从对数正态分布，其概率密度函数与概率分布函数可表示为：

$$f_R(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\ln R}r}\exp\left[-\frac{1}{2}\frac{(\ln r - \mu_{\ln R})}{\sigma^2_{\ln R}}\right], \tag{16}$$

$$F_R(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\ln R}}\int_0^{\ln r}\exp\left[-\frac{1}{2}\frac{(\ln t - \mu_{\ln R})}{\sigma^2_{\ln R}}\right]\mathrm{d}(\ln t) = \Phi\left(\frac{\ln r - \mu_{\ln R}}{\sigma_{\ln R}}\right), \tag{17}$$

式中，$\mu_{\ln R} = \ln\left(\frac{\mu_R}{\sqrt{1+\delta^2_R}}\right)$； (18)

$$\sigma_{\ln R} = \sqrt{\ln(1+\delta_R^2)}; \quad (19)$$

μ_R、δ_R 分别为抗力均值和变异系数，可根据表 7 确定。

5 基于可靠性的桥梁构件承载能力分级标准研究

结合前面的分析结果，下面计算各类构件与不同等级对应的可靠指标值，目的在于建立统一的混凝土构件承载能力分级准则。根据极限状态方程中各基本随机变量的概率分布类型和统计参数，采用结构可靠度分析的一次二阶矩方法之映射变换法进行可靠指标校准，以方便编程计算。计算内容包括基本作用效应组合不同汽车运行状态对应的桥梁构件可靠指标 β。

5.1 映射变换法的基本公式

桥梁结构构件承载能力功能函数主要涉及到 3 个变量，即构件综合抗力随机变量 R、恒载效应随机变量 S_G 以及汽车荷载效应随机变量 S_Q，其中 R 服从对数正态分布，S_G 服从正态分布，S_Q 服从极值Ⅰ型分布。下面结合功能函数，分别给出由标准正态随机变量 Y_i 表示的 X_i 和功能函数的偏导数 $\partial G/\partial Y_i$ 的具体公式[14]：

(1) 抗力 R

$$R = \exp(\mu_{\ln R} + Y_R\sigma_{\ln R}),$$

$$\frac{\partial G}{\partial Y_R} = R\cdot\sigma_{\ln R} = \exp(\mu_{\ln R} + Y_R\sigma_{\ln R})\cdot\sigma_{\ln R}, \quad (20)$$

式中 $\sigma_{\ln R}$、$\mu_{\ln R}$ 可按式 (20)、(21) 计算。

(2) 恒载效应 S_G

$$S_G = \mu_{SG} + Y_{SG}\sigma_{SG},$$

$$\frac{\partial G}{\partial Y_{SG}} = \sigma_{SG}。 \quad (21)$$

(3) 汽车荷载效应 S_Q

$$S_Q = \mu - \frac{\ln\{-\ln[\Phi(Y_{SQ})]\}}{\alpha},$$

$$\frac{\partial G}{\partial Y_{SG}} = \frac{-\varphi(Y_i)}{\alpha\Phi(Y_i)\ln[\Phi(Y_{SQ})]}, \quad (22)$$

式中 $\mu = \mu_{SQ} - 0.45\sigma_{SQ}$，$\alpha = \frac{\pi}{\sqrt{6}}\cdot\frac{1}{\sigma_{SQ}} = \frac{1.2826}{\sigma_{SQ}}$。

5.2 基本作用效应组合下的抗力分项系数与承载能力分级计算

根据恒载效应、汽车荷载效应以及结构抗力统计参数，分别计算不同受力状态桥梁结构构件对应的可靠指标，以便建立具有普遍适用性的等级划分标准。下面主要按恒荷载与汽车荷载的基本组合且极限状态方程为线性情况进行分析。其中，以荷载标准值效应和分项系数表示的设计表达式可写为：

$$\gamma_0(\gamma_G S_{Gk} + \gamma_Q S_{Qk}) = R_k/\gamma_R, \quad (23)$$

按公式 (25)，即可按设计表达式求出抗力标准值：

$$R_k = \gamma_R\gamma_0(\gamma_G S_{Gk} + \gamma_Q S_{Qk}) = \gamma_R\gamma_0 S, \quad (24)$$

式中，γ_R 为与不同构件目标可靠指标对应的抗力分项系数；S_{Qk} 的取值应根据不同的情况选择。

当基于现行规范分析构件的可靠性时，S_{Qk} 应按表 5 的相应公式进行换算。

计算不同构件与某一界限可靠指标对应的抗力分项系数时，考虑的因素包括汽车的运行状态、基本组合中汽车荷载标准值效应与恒载标准值效应的比值 ρ ($\rho = S_{Qk}/S_{Gk}$) 等。其中，S_{Qk} 为相应不同汽车运行状态的汽车荷载效应标准值。

根据式 (23)，由可靠度校准的基本原理可知，改变抗力分项系数，则意味着改变了抗力与荷载效应的对应关系，也就改变了构件的可靠指标。因此，在保持式 (23) 中 3 个基本变量概率分布形式不变的前提下，通过修改抗力分项系数的方式可达到改变构件可靠指标的目的，从而将抗力的降低转化为变更分项系数的计算。通过反算与不同等级构件可靠指标限值对应的抗力分项系数，并与目标可靠指标对应的抗力分项系数相比较，即可得到与各承载能力分级可靠指标对应的承载能力分级限制[15]。

采用部分系数为定值的分项系数准则，即恒载效应、汽车荷载效应分项系数与现行桥梁规范一致，即：$\gamma_G = 1.2$；$\gamma_Q = 1.4$。这样确定抗力分项系数的过程属一维优化问题，可采用一维优化的 0.618 法或按一元方程进行求解。下面以结构安全等级二级为例，计算各类构件的抗力分项系数及各等级构件承载能力分级标准，见表 8 ~ 表 10。

5.3 结构安全等级对承载能力等级标准的影响讨论

不同结构安全等级桥梁对应不同的目标可靠指标。《公路工程可靠度设计统一标准》通过对原《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTJ023—85) 的“校准”，确定了安全等级二级的目标可靠指标；安全等级一级和三级桥梁的目标可靠指标，可在安全等级二级的基础上提高或降低一个数量级差 (0.5)。对于以分项系数模式表达的极限状态设计表达式，不同安全等级结构的目标可靠指标是以表达式中的结构重要性系数 γ_0 来体现的。由于二级结构的目标可靠指标延续了原桥梁设计规范隐含的可靠度水平，其结构重要性系数可取为 γ_0 =

表 8　受弯、斜截面受剪（矩形截面）构件不同可靠指标下抗力的分项系数及分级限值计算

Tab. 8　Calculation of sub coefficients and grading limit values for resistance of flexural members and oblique section shear members (rectangular section) in different reliability indexes

汽车运行状态	ρ	受弯构件							斜截面受剪(矩形截面)构件						
		抗力分项系数 γ_R				分级限值			抗力分项系数 γ_R				分级限值		
		4.2	3.95	3.7	3.2	a_2	a_3	a_4	4.7	4.45	4.2	3.7	a_2	a_3	a_4
一般运行状态	0.1	1.229 7	1.1856	1.143 0	1.062 4	0.964	0.929	0.864	1.909 4	1.777 9	1.655 4	1.435 3	0.931	0.867	0.752
	0.25	1.164 4	1.122 3	1.081 8	1.005 1	0.964	0.929	0.863	1.788 4	1.665 1	1.550 3	1.344	0.931	0.867	0.752
	0.5	1.102 0	1.060 1	1.020 2	0.945 1	0.962	0.926	0.858	1.653 2	1.538 7	1.432 2	1.240 7	0.931	0.866	0.750
	1.0	1.065 0	1.017 4	0.972 8	0.891 4	0.955	0.913	0.837	1.510 0	1.403 0	1.303 8	1.126 3	0.929	0.863	0.746
	1.5	1.060 6	1.008 2	0.959 2	0.870 6	0.951	0.904	0.821	1.442 1	1.336 9	1.239 9	1.067 3	0.927	0.860	0.740
	2.5	1.064 6	1.006 4	0.952 0	0.854 4	0.945	0.894	0.803	1.384 1	1.278 3	1.181 1	1.009 9	0.924	0.853	0.730
密集运行状态	0.1	1.241 9	1.197 4	1.154 4	1.073 2	0.964	0.930	0.864	1.929 0	1.796 2	1.672 5	1.450 1	0.931	0.867	0.752
	0.25	1.187 5	1.145 0	1.104 1	1.026 6	0.964	0.930	0.865	1.828 5	1.702 7	1.585 6	1.375 0	0.931	0.867	0.752
	0.5	1.127 8	1.087 3	1.048 2	0.974 3	0.964	0.929	0.864	1.712 6	1.594 9	1.485 2	1.288 0	0.931	0.867	0.752
	1.0	1.067 5	1.027 5	0.989 3	0.917 5	0.963	0.927	0.859	1.579 0	1.470 2	1.368 9	1.186 7	0.931	0.867	0.752
	1.5	1.041 3	1.000 4	0.961 2	0.888 8	0.961	0.923	0.854	1.505 3	1.401 0	1.304 2	1.130 1	0.931	0.866	0.751
	2.5	1.021 2	0.977 5	0.936 6	0.861 3	0.957	0.917	0.843	1.427 4	1.327 8	1.235 3	1.069 3	0.930	0.865	0.749

注：(1) 表中数据均按结构安全等级二级计算，以下同；(2) ρ 为汽车荷载标准值效应与恒载标准值效应的比值，且 $\rho = S_{QK}/S_{GK}$，以下同。

表 9　轴心受拉、受压（短柱）构件不同可靠指标下抗力的分项系数及分级限值计算

Tab. 9　Calculation of sub coefficients and grading limit values for resistance of axial tension members and axial compression members (short columns) in different reliability indexes

汽车运行状态	ρ	轴心受拉构件							轴心受压构件(短柱)						
		抗力分项系数 γ_R				分级限值			抗力分项系数 γ_R				分级限值		
		4.2	3.95	3.7	3.2	a_2	a_3	a_4	4.7	4.45	4.2	3.7	a_2	a_3	a_4
一般运行状态	0.1	1.341 7	1.296 4	1.252 6	1.169 3	0.966	0.934	0.872	1.2545	1.205 6	1.1587	1.070 3	0.961	0.924	0.853
	0.25	1.270 8	1.227 5	1.185 8	1.106 5	0.966	0.933	0.871	1.188 0	1.1414	1.096 8	1.012 8	0.961	0.923	0.853
	0.5	1.205 2	1.161 6	1.119 8	1.041 5	0.964	0.929	0.864	1.125 7	1.079 6	1.035 6	0.953 5	0.959	0.92	0.847
	1.0	1.171 3	1.120 5	1.072 7	0.985 5	0.957	0.916	0.841	1.095 1	1.042 8	0.993 6	0.904 1	0.952	0.907	0.826
	1.5	1.170 0	1.113 4	1.060 5	0.964 8	0.952	0.906	0.825	1.096 9	1.039 3	0.985 6	0.888 1	0.947	0.899	0.810
	2.5	1.177 4	1.114 2	1.055 2	0.948 9	0.946	0.896	0.806	1.108 7	1.045 0	0.985 5	0.878 5	0.943	0.889	0.792
密集运行状态	0.1	1.354 9	1.309 2	1.265 1	1.181 2	0.966	0.934	0.872	1.266 8	1.2176	1.170 3	1.081 1	0.961	0.924	0.853
	0.25	1.295 4	1.251 8	1.209 8	1.129 8	0.966	0.934	0.872	1.211 2	1.164 3	1.1191	1.034 0	0.961	0.924	0.854
	0.5	1.230 7	1.189 0	1.148 7	1.072 3	0.966	0.933	0.871	1.150 6	1.105 7	1.062 7	0.981 5	0.961	0.924	0.853
	1.0	1.166 9	1.125 3	1.085 5	1.010 7	0.964	0.930	0.866	1.090 1	1.046 0	1.003 9	0.925 1	0.96	0.921	0.849
	1.5	1.140 8	1.097 5	1.056 4	0.980 1	0.962	0.926	0.859	1.065 2	1.0199	0.976 9	0.897 3	0.957	0.917	0.842
	2.5	1.121 6	1.075 1	1.031 3	0.951 3	0.959	0.919	0.848	1.047 8	0.999 7	0.9545	0.871 9	0.954	0.911	0.832

1.0。一级结构和三级结构的结构重要性系数可由极限状态设计表达式的可靠度分析确定。经采用安全等级二级的荷载分项系数与抗力分项系数进行分析，安全等级一级结构和三级结构的重要性系数 γ_0 取 1.1 和 0.9 时，可确保计算的可靠指标平均值满足增大或降低一个数量级差（0.5）的要求[1,10]。例如，对于延性破坏构件的目标可靠指标分别为 4.7 和 3.7。同时，按 γ_0 取 1.1 和 0.9，分别计算结构安全等级一级和三级公路桥梁构件的可靠指标，计算数据表明，对不同的构件，计算的可靠指标平均值，与目标可靠指标偏离不大。表 11 给出安全等级一、三级公路桥梁构件可靠指标分析结果。

表 10 大偏心受压、小偏心受压构件（短柱）不同可靠指标下抗力的分项系数及分级限值计算

Tab. 10 Calculation of sub coefficients and grading limit values for resistance of compression members with large eccentricity and small eccentricity (short columns) in different reliability indexes

汽车运行状态	ρ	大偏心受压构件							小偏心受压构件(短柱)						
		抗力分项系数 γ_R				分级限值			抗力分项系数 γ_R				分级限值		
		4.2	3.95	3.7	3.2	a_2	a_3	a_4	4.7	4.45	4.2	3.7	a_2	a_3	a_4
一般运行状态	0.1	1.269 3	1.222 8	1.178 0	1.093 2	0.963	0.928	0.861	1.184 4	1.139 1	1.095 5	1.013 3	0.962	0.925	0.856
	0.25	1.2018	1.157 5	1.114 8	1.034 2	0.963	0.928	0.861	1.121 7	1.078 6	1.037 1	0.958 9	0.962	0.925	0.855
	0.5	1.136 7	1.092 8	1.050 9	0.972 2	0.961	0.925	0.855	1.063 6	1.020 6	0.979 7	0.903 0	0.960	0.921	0.849
	1.0	1.096 4	1.047 0	1.000 5	0.915 9	0.955	0.913	0.835	1.036 5	0.987 4	0.941 3	0.857 3	0.953	0.908	0.827
	1.5	1.090 8	1.036 4	0.985 6	0.893 8	0.950	0.904	0.819	1.039 3	0.985 1	0.934 4	0.842 8	0.948	0.899	0.811
	2.5	1.093 9	1.033 6	0.977 4	0.876 5	0.945	0.894	0.801	1.051 3	0.991 4	0.935 3	0.834 2	0.943	0.89	0.793
密集运行状态	0.1	1.281 9	1.235 0	1.189 8	1.104 4	0.963	0.9280	0.862	1.196 0	1.150 4	1.106 5	1.023 6	0.962	0.925	0.856
	0.25	1.225 8	1.181 0	1.137 9	1.056 3	0.963	0.928	0.862	1.143 6	1.099 9	1.058 1	0.948 9	0.962	0.925	0.830
	0.5	1.164 1	1.121 4	1.080 3	1.002 5	0.963	0.928	0.861	1.086 3	1.044 7	1.004 7	0.929 2	0.962	0.925	0.855
	1.0	1.101 3	1.059 4	1.019 2	0.943 9	0.962	0.925	0.857	1.029 7	0.988 8	0.949 5	0.876 1	0.960	0.922	0.851
	1.5	1.073 6	1.030 6	0.989 8	0.914 1	0.960	0.922	0.851	1.007 0	0.964 6	0.924 4	0.850 1	0.958	0.918	0.844
	2.5	1.051 8	1.006 4	0.963 7	0.885 3	0.957	0.916	0.842	0.991 4	0.946 4	0.904 0	0.826 5	0.955	0.912	0.834

表 11 安全等级一、三级桥梁构件可靠指标验算结果（基本组合）

Tab. 11 Checking calculation result of reliability indexes of bridge members in safety levels I and III (basic combination)

结构安全等级	汽车运行状态	延性构件可靠指标平均值	脆性构件可靠指标平均值
一级 $\gamma_0 = 1.1$	一般运行状态	4.774 9	5.124 4
	密集运行状态	4.880 9	5.158 7
	目标可靠指标	4.7	5.2
二级 $\gamma_0 = 1.0$	目标可靠指标	4.2	4.7
三级 $\gamma_0 = 0.9$	一般运行状态	3.592 1	4.209 5
	密集运行状态	3.558 6	4.168 3
	目标可靠指标	3.7	4.2

由于结构重要性系数 γ_0 是在抗力分项系数为常量的前提下，根据安全等级一级和三级构件的目标可靠指标，由极限状态设计表达式的可靠度分析经优化反演得出的。因此，本文采用确定的目标可靠指标反算与各承载能力等级对应的抗力系数时，抗力分项系数会因结构安全等级的不同而不同。但经计算表明，不同的结构安全等级对承载能力分级限值影响甚微。

通过以上分析，按安全等级为二级构件建立的承载能力分级标准，同样适用于安全等级为一级和三级的承载能力等级划分。因此，考虑不同安全等级、抗力分项系数的承载能力评定指标应采用 $R/\gamma_0\gamma_R S$。

5.4 基本组合下在役桥梁结构构件承载能力分级标准

为了工程应用的方便，并考虑到汽车荷载标准值效应与恒载标准值效应不同比值 ρ 的影响，根据构件的破坏形态（延性破坏或脆性破坏），取构件承载能力分级限值的平均值建立分级标准。根据上述分析，取表 8 ~ 表 10 受弯构件、轴心受拉构件、大偏心受压构件的均值作为延性破坏构件承载能力分级限值的代表值，经计算，$a_2 = 0.96$，$a_3 = 0.94$，$a_4 = 0.92$；取表 8 ~ 表 10 斜截面受剪（矩形截面）构件、轴心受压构件、小偏心受压构件计算结果的均值作为脆性破坏构件承载能力分级限值的代表值，经计算 $a_2 = 0.94$，$a_3 = 0.91$，$a_4 = 0.89$。不同破坏状态构件承载能力分级标准见表 12。

表 12 中，抗力 R 按规范公式计算，其中的材料性能直接取用标准值，不计材料分项系数，构件几何尺寸取用标准值。作用效应 S 按《公路桥涵设计通用规范》（JTG D60—2004）规定的作用分项系数与组合系数计算，即 $S = S_G S_{Gk} + \gamma_Q \zeta_q S_{Qk}$，其中，$\zeta_q$ 为活载影响修正系数。同时，现行桥梁设计规范将表 8 ~ 表 10 中的 γ_R 转化为材料性能分项系数予以反映[5]。例如，现行规范中，构件用混凝土的轴心抗压强度设计值 f_{cd}，由轴心抗压强度标准值除以混凝土材料分项系数 $\gamma_{fc} = 1.45$ 求得，材料分项系数的这一取值，接近于按二级安全等级脆性破坏构件分析

表 12　在役桥梁结构构件承载能力检算指标分级界限系数建议值

Tab. 12　Suggested values of checking calculation index grading limit coefficients of bearing capacity of existing bridge members

破坏类型	受力状态	界限系数 a_i		
		a_2	a_3	a_4
延性破坏	正截面受弯	0.960	0.921	0.850
	轴心受拉	0.961	0.924	0.856
	大偏心受压（短柱）	0.959	0.920	0.847
脆性破坏	轴心受压（短柱）	0.956	0.915	0.839
	斜截面受剪　矩形截面	0.930	0.865	0.748
	偏心受压　小偏心矩形截面	0.957	0.916	0.838

注：（1）考虑现设计规范因素；（2）表中系数 a_1、a_2、a_3 为不同受力状态构件各等级的界限系数或下限值。

计算的目标可靠指标。普通钢筋抗拉强度设计值由普通钢筋抗拉强度标准值除以钢筋材料分项系数 $\gamma_{fs}=1.2$ 而得，据此按轴心受拉构件分析的可靠指标超过了安全等级二级结构对应的延性破坏构件的目标可靠指标。

本文在分析抗力分项系数时，采用公路桥梁结构的目标可靠指标进行计算，该抗力分项系数基本反映了以上材料分项系数，因此，计算在役桥梁结构构件的承载能力时，可只计及抗力分项系数，而不应再考虑材料分项系数，直接采用材料性能标准值代入规范建议的抗力表达式即可。抗力分项系数 γ_R 可按取用表 13 的规定值。同时，由于按不同的汽车运行状态计算的抗力系数差异不大，因此表 13 给出了统一的抗力系数，以方便工程技术人员使用。

表 13　在役桥梁结构构件抗力分项系数建议值

Tab. 13　Suggested values of sub coefficients for resistance of existing bridge members

破坏类型	受力状态	抗力分项系数 γ_R
延性破坏	正截面受弯	1.114（1.125 4）
	轴心受拉	1.221（1.233 4）
	大偏心受压（短柱）	1.149（1.160 0）
脆性破坏	轴心受压（短柱）	1.142（1.1506）
	斜截面受剪　矩形截面	1.639（1.2521）
	小偏心受压　矩形截面	1.079

注：表中（）内的数据为文献［7］以可靠指标最小二乘法确定的分项系数。

值得注意的是，以上承载能力分级标准是基于基本组合按现行规范的设计表达式分析得出的。与 85 设计规范相比，现行桥梁设计规范在度量结构可靠性上，由传统经验方法转变为数理统计的方法，在分析基于新老桥梁设计规范建造桥梁的承载能力分级标准时，必须考虑这一因素的影响。

6　活恒载标准值效应比值对承载能力分级标准的影响分析

活恒载标准值效应比值 ρ 分别取 0.1、0.25、0.5、1.0、1.5、2.5，并通过求各相应界限值的均值作为承载能力分级标准。然而，这一处理方法要求，随着 ρ 值的增大，相应的界限值不发生过大的波动，否则，所得分级标准将失去一般性。下面仍基于新桥梁设计规范，以受弯构件的抗力分项系数与分级限值为例，分析 ρ 值增大对分级限值的影响规律，计算结果见表 14。

表 14 的计算结果表明，对于汽车一般运行状态，活恒载标准值效应比值 ρ 的取值范围为 0.1～2.5 和 0.1～7.5 时，对抗力分项系数均值以及抗力折减系数界限值均值的计算结果影响甚微；而对于汽车密集运行状态，活恒载标准值效应比值 ρ 的取值对计算结果影响稍大，但按 0.1～2.5 的计算结果是偏于安全的，因此，本文按 0.1～2.5 确定承载能力分级标准不失一般性。

同时，根据表 14，可绘制受弯构件抗力分项系数及抗力折减系数（或分级界限值）随活恒载标准值效应比值 ρ 的变化规律，分别见图 1 和图 2 所示。

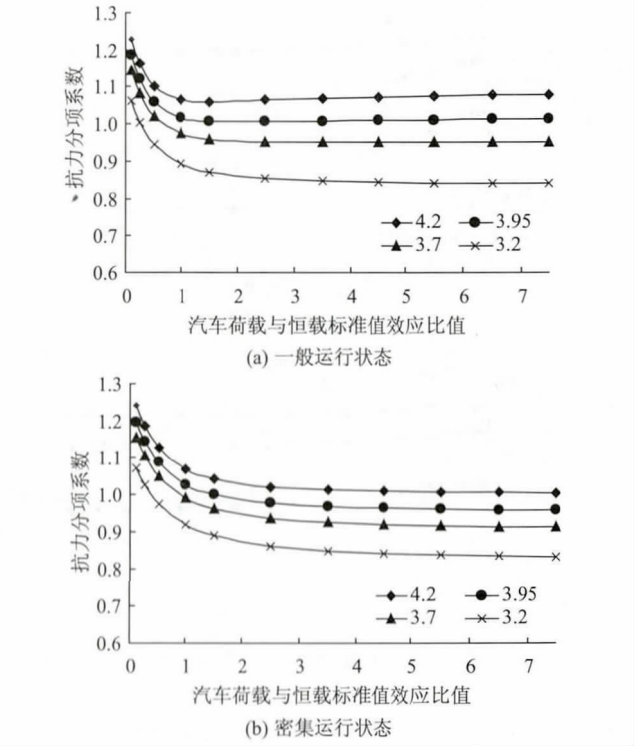


图 1　抗力分项系数随活恒载标准值效应比值 ρ 的变化规律

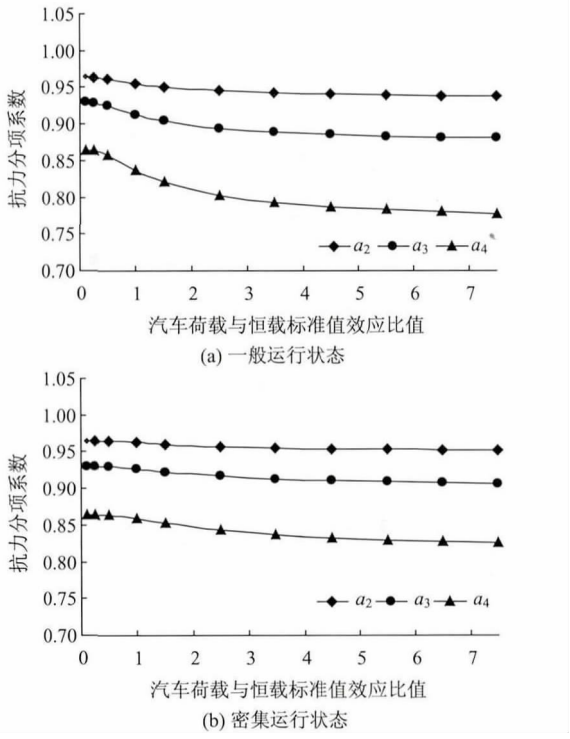
Fig. 1　Sub coefficient for resistance varying with ratio ρ between live and dead load standard value effects

表 14 活恒载比值 ρ 对受弯构件抗力分项系数与分级限值的影响规律

Tab. 14 Influencing regularity of ratio ρ between live and dead loads on sub coefficients and grading limit values for resistance of flexural members

ρ	一般运行状态							密集运行状态						
	抗力分项系数 γ_R				分级限值			抗力分项系数 γ_R				分级限值		
	4.2	3.95	3.7	3.2	a_2	a_3	a_4	4.2	3.95	3.7	3.2	a_2	a_3	a_4
0.1	1.229 7	1.185 6	1.143 0	1.062 4	0.964 0	0.929	0.864	1.241 9	1.197 4	1.154 4	1.073 2	0.964	0.930	0.864
0.25	1.164 4	1.122 3	1.081 8	1.005 1	0.964	0.929	0.863	1.187 5	1.145 0	1.104 1	1.026 6	0.964	0.930	0.865
0.5	1.102 0	1.060 1	1.020 2	0.945 1	0.962	0.926	0.858	1.127 8	1.087 3	1.048 2	0.974 3	0.964	0.929	0.864
1.0	1.065 0	1.017 4	0.972 8	0.891 4	0.955	0.913	0.837	1.067 5	1.027 5	0.989 3	0.917 5	0.963	0.927	0.859
1.5	1.060 6	1.008 2	0.959 2	0.870 6	0.951	0.904	0.821	1.041 3	1.000 4	0.961 2	0.888 8	0.961	0.923	0.854
2.5	1.064 6	1.006 4	0.952 0	0.854 4	0.945	0.894	0.803	1.021 2	0.977 5	0.936 6	0.861 3	0.957	0.917	0.843
3.5	1.069 5	1.008 0	0.950 7	0.848 0	0.942	0.889	0.793	1.013 6	0.968 3	0.925 8	0.848 5	0.955	0.913	0.837
4.5	1.073 0	1.009 6	0.950 5	0.844 4	0.941	0.886	0.787	1.009 8	0.963 5	0.92	0.841 1	0.954	0.911	0.833
5.5	1.075 9	1.011 1	0.950 6	0.842 3	0.940	0.884	0.783	1.007 7	0.960 5	0.916 3	0.836 3	0.953	0.909	0.830
6.5	1.078 2	1.012 1	0.950 8	0.840 9	0.939	0.882	0.780	1.006 3	0.958 5	0.913 9	0.832 9	0.952	0.908	0.828
7.5	1.079 8	1.013 1	0.951 2	0.839 8	0.938	0.881	0.778	1.005 2	0.957 2	0.91 2	0.830 4	0.952	0.907	0.826
从 0.1 ~ 2.5 计算均值	1.114 4	1.066 7	1.021 5	0.938	0.957	0.916	0.841	1.114 5	1.0725	1.032 3	0.957	0.962	0.926	0.858
从 0.1 ~ 7.5 计算均值	1.096 6	1.041 3	0.989 3	0.894 9	0.949	0.902	0.815	1.066 3	1.022 1	0.980 2	0.902 8	0.958	0.919	0.846
相对误差/%	-1.60	-2.38	-3.15	-4.61	-0.80	-1.58	-3.07	-4.32	-4.70	-5.05	-5.66	-0.41	-0.79	-1.45

注: 表中数据为按现行规范结构安全等级二级的分级标准分析。



(a) 一般运行状态

(b) 密集运行状态

图 2 抗力分级限值随活恒载标准值效应比值 ρ 的变化规律

Fig. 2 Grading limit values for resistance varying with ratio ρ between live and dead load standard value effects

图 1 的变化规律表明，随着活恒载标准值效应比值 ρ 的增加，与各可靠指标对应的抗力分项系数值关系曲线趋于平缓，这也正是表 14 一般运行状态下取平均值确定抗力分项系数的原因。图 2 抗力折减系数限值关系曲线与图 1 相似。尽管活恒载标准值效应比值 ρ 较小时，如 $\rho < 0.5$，各抗力折减系数界限值普遍偏大，但考虑到实际桥梁活恒载标准值效应比值一般大于 1.0，并且，由图 2 可知，当 $\rho \geqslant 1.0$ 时，各抗力折减系数界限值的变化已不明显，因此，表 14 仍按平均值拟定承载能力分级标准，这样既偏于安全，又方便工程技术人员使用。

7 结论

根据《公路工程可靠度设计统一标准》的规定及汽车荷载效应、抗力的相关统计参数，并参照现行其他结构鉴定技术规范，充分考虑不同设计建造阶段桥梁构件抗力及荷载效应等统计参数的取值特点，建立了基于新桥梁设计规范的构件承载能力等级评定分级标准，并详细分析了与不同构件各分类等级对应的界限值，可得出如下结论与建议:

(1) 对于按现行桥梁规范设计的桥梁构件，可采用 $R_k/(\gamma_R S)$ 作为构件承载能力分级评定指标。此时，R_k 可按现行桥梁设计规范的相应构件抗力表达式计算，S 按现行规范的荷载标准计算。

(2) 研究结果表明，随着活恒载标准值效应比

值ρ的增大，承载能力分级界限系数a_1、a_2、a_3、a_4的均值趋于稳定，且不同的汽车运行状态对分级均值相差甚小，为了工程应用方便，取各界限系数的均值为相应构件承载能力分级标准的代表值。

(3) 鉴于国内桥梁超载现象比较突出，根据《公路桥梁承载能力检测评定规程》，在作用效应设计值计算中引入汽车荷载影响系数ζ_q，并把超载等效为抗力的衰减，并按统一的在役桥梁承载能力分级标准进行鉴定分级；

(4) 对于低汽车荷载标准设计的在役桥梁，当按高的荷载标准进行承载能力分级鉴定时，不便建立统一的承载能力分级标准。为避免复杂的可靠指标计算，可借鉴超载桥梁的处理方法进行分析，并利用已有分级标准进行鉴定分级。

参考文献:

References:

[1] GB/T 50283—1999，公路工程结构可靠度设计统一标准 [S].
GB/T 50283—1999，Unified Standard for Reliability Design of Highway Engineering Structures [S].

[2] JTG/T J21—2011，公路桥梁承载能力检测评定规程 [S].
JTG/T J21—2011，Specification for Inspection and Evaluation of Load-bearing Capacity of Highway Bridges [S].

[3] JTG H11—2004，公路桥涵养护规范 [S].
JTG H11—2004，Code for Maintenance of Highway Bridges and Culvers [S].

[4] 刘闯，刘西拉. 基于结构体系可靠性的现有结构安全性等级划分 [J]. 四川建筑科学研究，1994 (2)：29－34.
LIU Chuang，LIU Xi-la. Security Classification of Existing Structure Based on Reliability of Structural System [J]. Sichuan Building Science，1994 (2)：29－34.

[5] 吕颖钊. 在役混凝土桥梁可靠性评估与寿命预测研究 [D]. 西安：长安大学，2006.
LÜ Ying-zhao. Research on Reliability Evaluation and Remaining Service Life Forecast of Existing Concrete Bridge [D]. Xi'an：Chang'an University，2006.

[6] 任春峰，杨福波，王万钊. 结构构件安全性鉴定的分级问题 [J]. 工程质量，2005，(2)：12－15.
REN Chun-feng，YANG Fu-bo，WANG Wan-zhao. Safety Grading for Building Structural Members [J]. Quality of Civil Engineering and Construction，2005，(2)：12－15.

[7] JTG D62—2004，公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范 [S].
JTG D62—2004，Code for Design of Highway Reinforced Concrete and Prestressed Concrete Bridges and Culverts [S].

[8] JTG D60—2004，公路桥涵设计通用规范 [S].
JTG D60—2004，General Code for Design of Highway Bridges and Culverts [S].

[9] 石云，李松辉，丛英爱. 恒载性超载对在役桥梁受弯构件可靠性的影响规律 [J]. 公路交通科技，2009，26 (11)：77－81.
SHI Yun，LI Song-hui，CONG Ying-ai. Influence of Dead-load Based Overload on Reliability of Flexural Members of In-service Bridges [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development，2009，26 (11)：77－81.

[10] 王钧利. 在役桥梁检测、可靠性分析与寿命预测 [M]. 北京：中国水利水电出版社，2006.
WANG Jun-li. In-service Bridge Detection，Reliability Analysis and Life Forecast [M]. Beijing：China Waterpower Press，2006.

[11] 鄢余文，杨云蓉. 公路桥梁新旧规范计算简支空心板梁比较分析 [J]. 结构工程师，2006，22 (3)：20－22.
YAN Yu-wen，YANG Yun-rong. Comparison and Analysis of Calculation on Simply Supported Hollow Slab Beam with New and Old Code for Design of Highway Bridges [J]. Structural Engineers，2006，22 (3)：20－22.

[12] 吴腾，葛耀君，熊洁，等. 我国公路桥梁汽车荷载演变与比较 [J]. 上海公路，2007 (1)：37－41.
WU Teng，GE Yao-jun，XIONG Jie，et al. Development and Comparison of Vehicular Live Loads on Highway Bridge in Our Country [J]. Shanghai Highways，2007 (1)：37－41.

[13] SCHIFF S D. Loading Testing for Assessment and Rating of Highway Bridges [R]. Clemson：Clemson University，2006.

[14] 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.
ZHAO Guo-fan，JIN Wei-liang，GONG Jin-xin. Reliability Theory of Engineering Structure [M]. Beijing：China Building Industry Press，2000.

[15] 刘扬，杨永红. 验证荷载条件下既有梁桥可靠度分析 [J]. 公路交通科技，2011，28 (3) 90－94.
LIU Yang，YANG Yong-hong. Analysis on Reliability of Existing Bridge Considering Proof Load [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development，2011，28 (3) 90－94.