文章编号:1005-0523(2022)01-0067-09

基于概率分析的桥梁静载试验风险研究

梁茜雪

(广西交科集团有限公司,广西 南宁 530007)

摘要:为评估桥梁静载试验潜在风险,采用基于概率分析的可靠度理论推导成桥和单梁静载试验的失效风险计算公式,提出静载试验容许可靠指标,建立了可用于新桥、旧桥、提载桥梁和预制梁静载试验的风险评估方法,并以算例说明。利用该方法计算基本构件抗力衰减系数及提载系数的容许值,明确应进行试验评估的桥梁范围。分析各影响因素对试验可靠指标的作用规律,比较采用不同试验控制荷载取值方法时的结构可靠性。研究表明:新建桥梁试验可靠指标与活恒效应比和恒恒效应比成正比,前者为主要因素,后者仅在活恒效应比不大于0.5时有影响;抗力下降和汽车荷载效应增大使试验可靠指标减小,其中抗力下降30%时降幅平均值为1.4~2.3,汽车荷载效应增大50%时降幅平均值为0.7~1.1。

关键词:概率分析;桥梁;静载试验;风险评估

中图分类号:U446 **文献标志码:**A

本文引用格式:梁茜雪. 基于概率分析的桥梁静载试验风险研究[J]. 华东交通大学学报,2022,39(1):67-75.

Research on Risk of Bridge Static Load Test Based on Probability Analysis

Liang Qianxue

(Guangxi Transportation Science and Technology Group Co., Ltd.,Nanning 530007,China)

Abstract: In order to assess potential risks bridge static test, the equation which adopts the reliability theory that based on probability analysis was deduced to calculate the failure risk of the bridge and the static load test of single beam. The allowable reliability index of the static load test and the risk evaluation method which can be used for the static load test of new bridges, old bridges, elevated bridges and precast beams is proposed, as is illustrated with examples. This method is used to calculate the allowable values of the attenuation coefficient of resistance and the lifting coefficient of basic members, and to define the bridge range that should be evaluated by test. The effects of various influencing factors on the test reliability index were analyzed, and the structural reliability was compared when different test control load value methods were adopted. The results showed that the test reliability index of new bridge was directly proportional to the ratio of dead to live、dead (constructed) to dead (unconstructed). The former was the main factor, and the latter only affected when the ratio of dead to live was not more than 0.5. The decrease of resistance and the increase of vehicle load effect make the test reliability index decrease. When the resistance decreases by 30%, the average decrease of test reliability index is 1.4~2.3, and when the vehicle load effect increases by 50%, the average decrease of test reliability index is 0.7~1.1.

Key words: probability analysis; bridge; static load test; risk assessment

Citation format:LIANG Q X. Research on risk of bridge static load test based on probability analysis[J]. Journal of East China Jiaotong University,2022,39(1):67-75.

收稿日期:2021-05-27

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2015CB057705);南宁市创新人才资助项目(2018-01-04)

桥梁静载试验是新建及在役桥梁评估承载能力、制定通行方式、甄选维修加固方案等不可忽略的重要步骤之一，具有基于理论和经验分析方法无法替代的优势，是目前广泛应用的承载能力评定方法[1-3]。静载试验施加的试验荷载可通过计算确定大小和位置，但因桥梁的抗力和其它作用具有未知性和不确定性，结构在试验时存在失效可能，试验前应评估结构安全性。目前国内暂无标准或规定要求评估静载试验安全，JTG/T J21-01-2015《公路桥梁荷载试验规程》规定对试验过程进行监控，通过监测控制截面实测数据与计算值比较分析、关注薄弱部位力学指标的变化和既有病害的发展来判断继续加载的安全[4]，检测单位通常仅关注试验过程的安全控制[5-7]。单纯的过程监控不能保证在发现结构受力异常时造成的损伤最小，因加载分级不足甚至可能使承载能力下降严重桥梁有坍塌的风险。试验前对失效风险进行评估，采取必要的安全措施，有效降低对结构的伤害，是进行试验安全评估的主要目的。目前国内对桥梁静载试验安全性研究很少，杨春侠等基于可靠度理论推导静载试验时桥梁失效概率与验证荷载水准 K 的关系式，分析了作用效应比及超载情况对 K 的影响[8]。但其推导的失效概率公式忽略了恒载效应的随机性，认为试验时在结构上施加的荷载均为普通变量，由此得出的失效概率并不准确。

本文分别按成桥和单梁状态分析结构失效概率的基本变量，建立新建桥梁静载试验风险分析模型，并以此为基础推导既有和提载桥梁的失效概率公式，研究影响失效主要因素的规律并明确应进行评估的桥梁范围。

1 静载试验风险分析方法

桥梁静载试验包括成桥静载试验和单梁静载试验，试验对象分别为已完工桥梁和装配式桥梁的预制主梁。由于两类试验影响试验可靠度的随机变量不同，试验风险分析方法存在差异，以下针对两类试验分别推导试验失效风险的分析公式。

1.1 成桥静载试验

桥梁静载试验通过规定荷载效率 η 的取值范围保证试验效果，提出交(竣)工验收试验宜介于 0.85~1.05，其余情况宜介于 0.95~1.05。η 按下式计算[4]

$$\eta=\frac{S_{\mathrm{T}}}{S'(1+\mu)} \tag{1}$$

式中：S_{T} 为试验荷载作用下，某一加载试验项目对应的加载控制截面内力或位移的最大计算效应值；S' 为控制荷载产生的同一加载控制截面内力或位移的最不利效应计算值；μ 为冲击系数。

由于 JTG/T J21-01-2015《公路桥梁荷载试验规程》未明确规定 S' 如何取值，在计算时存在争议。目前普遍做法是以汽车荷载效应标准值为 S'，不考虑分项系数、组合系数和结构重要性系数[9-11]。取 $S_{\mathrm{Q_k}}$ 表示已包含冲击力影响的汽车荷载效应标准值，式(1)变为

$$\eta=\frac{S_{\mathrm{T}}}{S_{\mathrm{Q_k}}} \tag{2}$$

与成桥静载试验可靠度有关的随机变量包括抗力 R 和恒载效应 S_{G}，其概率密度函数分别为 $f_R(r)$ 和 $f_{S_{\mathrm{G}}}(S_{\mathrm{G}})$，标准值分别为 R_{k} 和 $S_{\mathrm{Q_k}}$。R 和 S_{G} 为相互独立的随机变量，为简化计算，取 $\eta=1$，此时的结构功能函数为

$$Z=R-S_{\mathrm{G}}-S_{\mathrm{T}}=R-S_{\mathrm{G}}-S_{\mathrm{Q_k}} \tag{3}$$

在式(3)中引入活恒效应比 $\rho=S_{\mathrm{Q_k}}/S_{\mathrm{G_k}}$ 后变为

$$Z=R-S_{\mathrm{G}}-\rho S_{\mathrm{G_k}} \tag{4}$$

由式(4)和文献[12]理论推出成桥静载试验的结构失效概率公式为

$$P=\int\int_{Z\leqslant 0} f_R(r)f_{S_{\mathrm{G}}}(S_{\mathrm{G}})\mathrm{d}r\mathrm{d}S_{\mathrm{G}}=\int_0^{\infty}\int_0^{S_{\mathrm{G}}+\rho S_{\mathrm{Q_k}}} f_R(r)f_{S_{\mathrm{G}}}(S_{\mathrm{G}})\mathrm{d}r\mathrm{d}S_{\mathrm{G}} \tag{5}$$

式(5)为静载试验风险计算的解析公式，求出该公式的精确解较困难，工程上均采用数值计算方法求得近似解。本文采用应用较成熟的 JC 法计算，该方法通过已知的基本变量统计参数即可计算出满足要求的结果。R 和 S_{G} 的统计参数按文献[13]、[14]方法由 R_{k} 和 $S_{\mathrm{G_k}}$ 计算，其中按 JTG 3362-2018《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》设计的桥梁，其抗力标准值和荷载效应的关系可表示为

$$R_{\mathrm{k}}=\gamma_0\gamma_R(\gamma_{\mathrm{G}}S_{\mathrm{G_k}}+\gamma_{\mathrm{Q}}S_{\mathrm{Q_k}}) \tag{6}$$

式中：γ_0 为桥梁结构的重要性系数；γ_R 为抗力分项系数；γ_{G} 和 γ_{Q} 分别为恒载和汽车荷载效应分项系数。

1.2 单梁静载试验

单梁静载试验前预制梁仅承受自身重量，控

制荷载除考虑汽车荷载外，还需计入未施工的恒载[16-17]。荷载效率 η 按下式计算

$$\eta=\frac{S_T}{S_{G_{2k}}+S_{Q_k}} \tag{7}$$

式中:$S_{G_{2k}}$ 为未施工的二期恒载及纵横湿接缝等恒载效应标准值。

成桥后主梁恒载效应标准值 S_{G_k} 为未施工恒载效应标准值 $S_{G_{2k}}$ 和预制梁自重效应标准值 $S_{G_{1k}}$ 之和，即 $S_{G_k}=S_{G_{1k}}+S_{G_{2k}}$；本文称两者之比为恒恒效应比 ρ_G，即 $\rho_G=S_{G_{2k}}/S_{G_{1k}}$。取 $\eta=1$，由式(7)得到 S_T 与 $S_{G_{1k}}$ 的关系式为

$$S_T=S_{G_{2k}}+S_{Q_k}=[(1+\rho)\rho_G+\rho]S_{G_{1k}} \tag{8}$$

与单梁静载试验可靠度有关的随机变量包括抗力 R、预制梁自重效应 S_{G1}。R 和 S_{G1} 为相互独立的随机变量，结构功能函数为

$$Z=R-S_{G1}-S_T=R-S_{G1}-[(1+\rho)\rho_G+\rho]S_{G_{1k}} \tag{9}$$

由式(9)和文献[6]理论推出单梁静载试验的结构失效概率公式为

$$P=\int\int_{Z\leqslant 0}f_R(r)f_{S_{G_1}}(S_{G_1})\mathrm{d}r\mathrm{d}S_{G_1}=\int_0^{\infty}\int_0^{S_{G_1}+[(1+\rho)\rho_G+\rho]S_{G_{1k}}}f_R(r)f_{S_{G_1}}(S_{G_1})\mathrm{d}r\mathrm{d}S_{G1} \tag{10}$$

式中:$f_{S_{G_1}}(S_{G_1})$ 为 S_{G_1} 的概率密度函数。S_{G_1} 的概率及统计参数的计算理论与 S_G 相同。

在成桥试验时，因无未施工恒载，随机变量 S_{G1} 即为 S_G，且 $\rho_G=0$，式(10)退化为式(5)。从静载试验风险评估角度来说，成桥试验是单梁试验的一种特殊情况。

2　新建桥梁静载试验风险分析

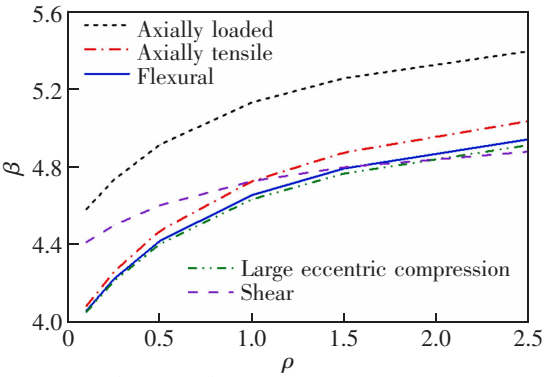
新建桥梁不考虑抗力衰减，抗力标准值 R_k 按式(6)计算。JTG D60-2015《公路桥涵设计通用规范》划分的公路桥涵设计安全等级中大部分桥梁属于一级，二级仅包括三、四级公路上的小桥，故本文仅研究安全等级为一级的桥梁试验风险，式(6)中结构重要性系数 γ_0 取 1.1。成桥和单梁静载试验分别按式(5)和(10)计算试验失效概率 P，分析时采用可靠指标 β 表示试验可靠度。β 按下式计算

$$\beta=\Phi^{-1}(1-P) \tag{11}$$

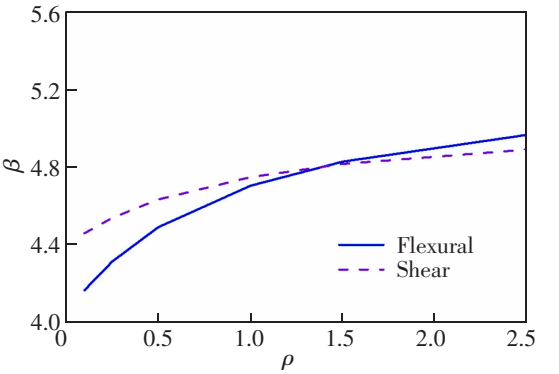
式中:$\Phi^{-1}(\cdot)$ 为标准正态函数的反函数。

本节按不同基本构件计算相应的试验可靠指标 β，研究新建桥梁成桥和单梁在不同活恒效应比 ρ 和恒恒效应比 ρ_G 时的试验失效风险规律。其中成桥静载试验包括轴心受压、轴心受拉、受弯、偏心受压和受剪 5 类基本构件，单梁静载试验仅包括受弯和受剪 2 类基本构件。

由于单梁试验时的趋势相近，仅在图 1(a)和图 1(b)分别列出 $\rho_G=0$ 和 $\rho_G=0.5$ 时活恒效应比 ρ 与试验可靠指标 β 的关系曲线。图 1 表明无论是成桥试验还是单梁试验，各类构件的试验可靠度均随活恒效应比增加而增大，$\rho=2.5$ 较 $\rho=0.1$ 时约增加 0.4~1.0，说明 ρ 对 β 影响明显。一般情况下桥梁活恒效应比与跨径成反比，由此可知中大跨径桥梁试验失效风险较小跨径桥梁高。5 类基本构件中的延性破坏构件试验可靠指标很接近，轴心受拉、受弯、大偏压构件间相同恒恒效应比时 β 最大差值约为 0.1。脆性破坏构件的 β 较延性破坏构件大，轴心受压构件明显大于其它构件，与延性破坏构件相比约高 0.5。这是因为脆性破坏构件的设计目标可靠指标大于延性破坏构件[19]，相应的试验可靠指标 β 也较大。



(a) $\rho_G=0$ (Bridge static load test)



(b) $\rho_G=0.5$ (Single-beam static load test)

图 1　活恒效应比与试验可靠指标关系曲线

Fig.1　Relation curve between the load effect ratio of dead to live and the test reliability index

单梁静载试验的加载对象是预制梁，其主要内力为弯矩和剪力，图 2 仅列出了单梁静载试验时受弯和受剪构件的恒恒效应比 ρ_G 与试验可靠指标 β 关系曲线。图 2 表明试验可靠指标随恒恒效应比的增大而增大，但在 $\rho_G \leqslant 1$ 时增幅较明显，之后逐渐平缓，且 β 的增幅与 ρ 成反比。

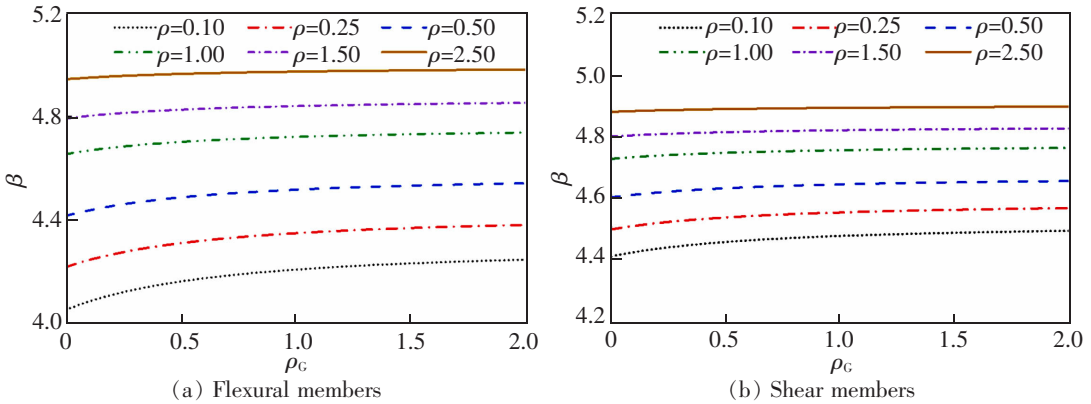


图 2 恒恒效应比与试验可靠指标关系曲线

Fig.2 Relation curve between the load effect ratio of dead(constructed) to dead(unconstructed) and the test reliability index

由于实际桥梁结构中预制梁的未施工恒载效应普遍小于预制梁自重效应，仅分析 ρ_G 从 0 增大至 1 时对 β 的影响程度。设 $\rho_G=0$ 和 $\rho_G=1$ 时对应的试验可靠指标分别为 β_0 和 β_1，β_1 与 β_0 的差值为 $\Delta\beta$。在表 1 列出受弯和受剪构件在 ρ=0.10，0.25，0.50，1.00，1.50，2.50 时的 β_0、β_1 和 $\Delta\beta$，分析发现：受剪构件 $\Delta\beta$ 的最大值仅为 0.07，说明 ρ_G 变化对受剪构件 β 影响很小，可不考虑；受弯构件的最大值为 0.16，但在 $\rho>0.50$ 时 $\Delta\beta<0.10$，说明 $\rho>0.50$ 时 ρ_G 变化对受弯构件 β 的影响可忽略。综上可知，仅需在 $\rho\leqslant 0.50$ 桥梁的单梁静载试验弯曲工况时考虑 ρ_G 对试验可靠度的影响，且 ρ_G 增大对 β 提高作用较小。

3 既有桥梁静载试验风险分析

已建成结构在服役过程中，由于结构初始的材料、设计、构造及施工的缺陷，荷载作用产生的累积损伤，环境中的腐蚀介质的影响，材料性能随时间下降等因素，在经历一段使用期后抗力在综合因素作用下总体表现为衰减趋势[20-21]。既有桥梁在评估试验风险时应考虑抗力的变化，通过引入抗力衰减系数 φ_R 研究抗力降低对静载试验可靠性的影响。引入 φ_R 后，现有抗力 R' 与拟建时的设计抗力 R 的关系如下

$$R'=\varphi_R R \tag{12}$$

认为既有桥梁与拟建桥梁抗力服从相同的概率分布类型，统计参数变异性相同，从而推知现有抗力均值 $\mu_{R'}$ 和变异系数 $\delta_{R'}$ 分别为

$$\mu_{R'}=\varphi_R \mu_R \tag{13}$$

$$\delta_{R'}=\delta_R \tag{14}$$

式中：μ_R 和 δ_R 分别为拟建桥梁的抗力均值和变异系数。

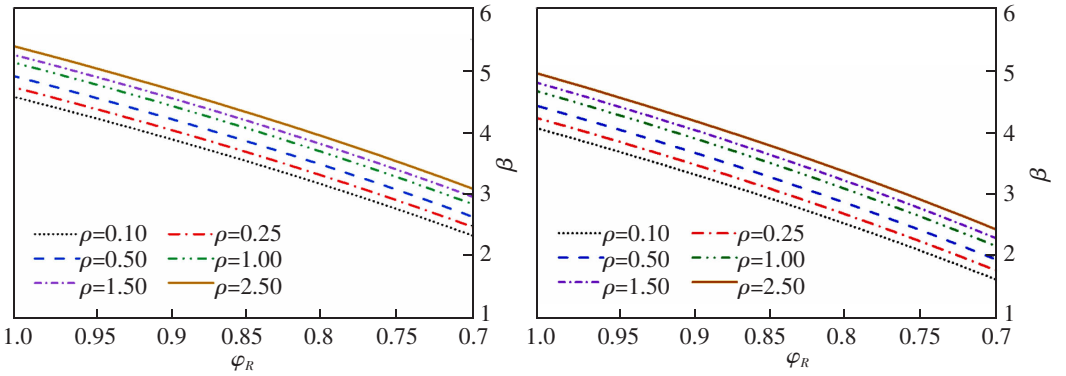
用抗力变量 R' 代替式(5)中的设计抗力变量 R，重新计算成桥静载试验的可靠指标。图 3(a)和图 3(b)

表 1 不同活恒效应比时构件的可靠指标变化

Tab.1 Changes in the reliability index of components with different load effect ratio of dead to live

Force-bearing type		ρ					
		0.10	0.25	0.50	1.00	1.50	2.50
Flexural	β_0	4.06	4.22	4.42	4.65	4.79	4.94
	β_1	4.21	4.35	4.52	4.72	4.84	4.97
	$\Delta\beta$	0.16	0.13	0.10	0.07	0.05	0.03
Shear	β_0	4.41	4.50	4.60	4.73	4.80	4.88
	β_1	4.48	4.55	4.64	4.75	4.82	4.89
	$\Delta\beta$	0.07	0.05	0.04	0.03	0.02	0.01

分别为轴心受压和受弯构件在 φ_R=0.7~1.0 时与 β 的关系曲线，其余 3 类基本构件的变化趋势相近。图 3 表明随抗力减小 β 明显下降，趋势接近线性，且同类构件在不同活恒效应比时下降的速度接近。当抗力下降 30%时，轴心受压、轴心受拉、受弯、偏心受压和受剪构件的 β 降幅平均值分别为 2.3、2.7、2.5、2.4、1.4。



(a) Axially loaded members　　(b) Flexural members

图 3　抗力衰减系数与试验可靠指标关系曲线

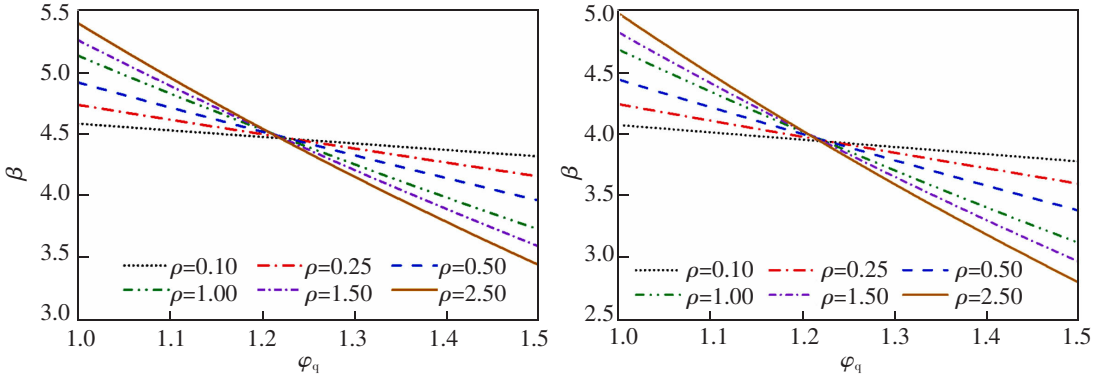
Fig.3　Relation curve between the load effect ratio of resistance attenuation and the test reliability index

4　提载桥梁静载试验风险分析

随着国民经济的高速发展，公路运输车辆载重增加，流量增大，越来越多旧桥的承载能力不能满足实际运营要求。拆除重建不仅耗费大量资金还会对现有交通产生不利影响，提载加固往往是更为经济合理的方案[22]。鉴定提载桥梁承载潜力的静载试验控制荷载较原设计荷载大，试验风险更高[23]。本文引入提载系数 φ_q 以研究试验控制荷载提高对试验可靠性的影响。引入 φ_q 后，提载桥梁静载试验的荷载效率 η 为

$$\eta=\frac{S_T}{\varphi_q S_{Q_k}} \tag{15}$$

仍取 η=1，按 1.1 节中方法计算成桥静载试验的可靠指标 β，不考虑抗力衰减，仅分析控制荷载与 β 的关系。图 4(a)和图 4(b)分别为轴心受压和受弯构件在 φ_q=1.0~1.5 时与的 β 关系曲线，其余 3 类基本构件的变化趋势相近。图 4 中试验可靠指标 β 均随提载系数 φ_q 增大而线性减小，减小速率与活恒效应比 ρ 成正比。如受弯构件，对应 ρ=0.1、2.5，φ_q 从 1.0 增大至 1.5 时，β 分别降低 0.29 和 2.14。说明活载效应在总效应中占比越大，活载变化引起的试验可靠度波动越大。分析具体数据还发现，除受剪构件外，其余 4 类基本构件在原有荷载效应提高 50%时 β 的平均降幅接近，对应轴心受压、轴心受拉、受弯、偏心受压和受剪构件降幅平均值分别为 1.1，1.3，1.2，1.2，0.7。



(a) Axially loaded members　　(b) Flexural members

图 4　提载系数与试验可靠指标关系曲线

Fig.4　Relation curve between the load effect ratio of load lifting and the test reliability index

5 桥梁静载试验风险评估

在静载试验前进行风险评估,应规定容许可靠指标[β],当计算出的试验可靠指标$\beta \leqslant [\beta]$时,表示试验的失效概率是在可接受范围, 可开展试验,否则应暂停试验并采取其它措施降低风险。JTG 2120-2020《公路工程结构可靠性设计统一标准》中规定结构安全等级为一级时,延性破坏和脆性破坏结构的设计目标可靠指标分别为 4.7 和 5.2。静载试验施加的是短期静荷载,且为分级加载,通过监测过程中结构响应可降低失效风险,所以建议在确定[β]时,按设计目标可靠指标的标准适当降低,分别为延性破坏 3.7,脆性破坏 4.2,对应的失效概率分别为 1.078×10^{-4} 和 1.335×10^{-5}。

新建桥梁以设计荷载作为试验控制荷载且控制荷载效应不考虑分项系数、组合系数和结构重要性系数时,单梁和成桥静载试验可靠指标β均满足容许可靠指标[β],可不进行试验风险评估。表 2 分别列出了控制荷载仅为汽车荷载标准值 S_{Q_k} 和计入汽车荷载效应分项系数 γ_Q 后的成桥静载试验可靠指标。当计入 γ_Q 后,仅当$\rho \leqslant 0.25$ 时满足$\beta \leqslant [\beta]$,多数桥梁不能满足要求,结构损伤的概率偏大。

表 3 根据容许可靠指标[β]计算桥梁的容许抗力衰减系数[φ_R]。由表 3 可知,[φ_R]随ρ增大而减小,对应不同活恒效应比ρ,各类构件的[φ_R]接近。由于β与ρ成正比,对相同的[β],ρ越大时抗力可下降的幅值越大,即[φ_R]越小。各类构件的容许抗力衰减系数[φ_R]在 0.83~0.94,说明当原设计的承载富余较小时承载能力可下降的空间很小,尤其是对活恒效应小的桥梁。在既有桥梁进行静载试验前,应检查桥梁外观状况、材质强度、锈蚀状况等,以评估抗力下降程度,正确计算试验可靠指标,预测试验风险。

表 2 新建桥梁静载试验计入和不计入γ_Q时可靠指标

Tab.2 The reliability index of included and not included γ_Q for new bridges static load test

Force-bearing type	Not included γ_Q,ρ						Included γ_Q,ρ					
	0.10	0.25	0.50	1.00	1.50	2.50	0.10	0.25	0.50	1.00	1.50	2.50
Axially loaded	4.58	4.73	4.92	5.13	5.26	5.40	4.37	4.26	4.14	3.98	3.88	3.78
Axial tensile	4.08	4.26	4.47	4.73	4.87	5.04	3.83	3.71	3.57	3.38	3.27	3.15
Flexural	4.06	4.22	4.42	4.65	4.79	4.94	3.82	3.71	3.57	3.39	3.29	3.17
Large eccentric compression	4.05	4.21	4.40	4.63	4.77	4.91	3.82	3.71	3.57	3.40	3.30	3.18
Shear	4.41	4.50	4.60	4.73	4.80	4.88	4.28	4.21	4.13	4.02	3.96	3.89

表 3 既有桥梁静载试验容许抗力衰减系数

Tab.3 Allowable value of coefficient of resistance attenuation of static load test for old bridges

Force-bearing type	ρ					
	0.10	0.25	0.50	1.00	1.50	2.50
Axially loaded	0.942	0.920	0.895	0.866	0.850	0.832
Axial tensile	0.950	0.928	0.902	0.873	0.856	0.839
Flexural	0.950	0.928	0.903	0.874	0.857	0.840
Large eccentric compression	0.950	0.928	0.903	0.874	0.858	0.840
Shear	0.948	0.927	0.903	0.875	0.859	0.842

表 4　提载桥梁静载试验容许提载系数

Tab.4　Allowable value of coefficient of load-lifting of elevated bridges static load test

Force-bearing type	ρ					
	0.10	0.25	0.50	1.00	1.50	2.50
Axially loaded	1.701	1.448	1.361	1.315	1.298	1.284
Axial tensile	1.601	1.402	1.333	1.296	1.283	1.271
Flexural	1.596	1.399	1.330	1.294	1.280	1.269
Large eccentric compression	1.597	1.398	1.330	1.293	1.280	1.268

表 4 根据容许可靠指标[β]计算桥梁的容许提载系数[φ_q]。由表 4 可知,[φ_q]随 ρ 增大而减小,对应不同活恒效应比 ρ,各类构件的[φ_q]接近。由于试验控制荷载效应未计入分项系数,试验时可采用较高的提载系数,各类构件的容许提载系数[φ_q]在 1.25~1.60。在试验风险评估时,可通过直接计算提载系数判断是否小于容许提载系数。当不满足或抗力已有下降时,再按实际抗力计算可靠指标,在不超过容许值的前提下进行加载,以保障桥梁安全。

6　算例

本节采用实例介绍本文静载试验风险评估方法在新桥、旧桥和提载桥梁中的应用,并对结果进行分析,验证与前述观点的一致性。

某六跨预应力混凝土简支箱梁桥,横向布置 3 片预制箱梁,每孔跨径均为 20 m,桥面总宽 8 m,净宽 7 m,防撞护栏宽 0.5 m,设计荷载等级为公路Ⅱ级。该桥已运营 12 年,根据近期检测结果按文献[25],计算得到抗力衰减系数 $\varphi_R=Z_1(1-\zeta_e)=0.92$($Z_1$ 和 ζ_e 分别为承载能力检算系数和承载能力恶化系数)。因所在路线升级,拟将该桥提载至公路Ⅰ级。为分析桥梁提载潜力,计划进行静载试验,控制荷载采用公路Ⅰ级。边梁跨中为控制截面,控制内力为最大弯矩。该截面的恒载效应标准值 S_{G_k}=1 988 kN·m;考虑冲击系数后,公路Ⅱ级和公路Ⅰ级时的汽车荷载效应标准值 S_{Q_k} 分别为 1 010 kN·m 和1 346 kN·m,活恒效应比 ρ 分别为 0.51 和 0.68,提载系数 φ_q=1.333;按截面和配筋计算所得的抗力标准值 R_k=4 527 kN·m。取荷载系数 η=1,试验时控制截面计算弯矩效应 $S_T=S_{Q_k}$=1 346 kN·m。随机变量抗力 R、恒载效应 S_G 和活载效应 S_Q 分别服从对数正态分布、正态分布和极值Ⅰ型分布[7]。

分别计算不同情况时的试验可靠指标 β 并与容许可靠指标[β]=3.7 比较,评估试验风险,计算结果如表 5 所示。由结果可知:① 试验控制荷载计入分项系数易使试验可靠度不满足要求;② 抗力下降对试验安全影响明显,应重视抗力衰减程度的准确评价;③ 中小跨径桥梁的汽车荷载效应在内力中占比较大,桥梁提载时试验风险较高,应进行分析评估。

表 5　静载试验风险评估结果

Tab.5　Risk assessment results of static load test

	Item	Grade Ⅱ vehicle load		Grade Ⅰ vehicle load	
		β	≥[β]	β	≥[β]
φ_R=1.0	Control load not included γ_Q	4.42	Yes	3.79	Yes
	Control load included γ_Q	3.67	No	2.89	No
φ_R=0.92	Control load not included γ_Q	3.86	Yes	3.23	No
	Control load included γ_Q	3.11	No	2.33	No

7 结论

采用基于概率分析的可靠度理论,对桥梁静载试验风险评估进行研究,得出以下结论:

1）对无影响承载能力缺陷的新建桥梁实施静载试验时,不需进行试验风险评估,但承载力下降的旧桥和提载桥梁应进行试验风险评估。建议延性和脆性材料的试验容许可靠指标分别为3.7和4.2。

2）新建桥梁静载试验可靠指标β与活恒效应ρ和恒恒效应比ρ_G有关,且均为正比关系。其中活恒效应比为主要影响因素, 大跨径桥梁试验风险较中小跨径桥梁大,ρ由0.10增大至2.50时各类构件β约增加0.4~1.0; 恒恒效应比影响较小,仅需在$\rho \leqslant 0.50$桥梁的单梁静载试验弯曲工况时考虑ρ_G对β的影响。

3）既有桥梁考虑抗力退化,试验可靠指标β随抗力减小而减小,关系接近线性,且影响明显。当抗力下降30%时,轴心受压,轴心受拉,受弯,偏心受压和受剪构件的β降幅平均值分别为2.3,2.7,2.5,2.4,1.4。

4）提载桥梁试验可靠指标β随汽车荷载效应增大而线性减小,同类构件降幅随活恒效应比增大而增大。当汽车荷载效应提高50%时,轴心受压,轴心受拉,受弯,偏心受压和受剪构件的β降幅平均值分别为1.1,1.3,1.2,1.2,0.7。

5）桥梁静载试验控制荷载取值不计入分项系数、组合系数和结构重要性系数的常规作法从试验风险角度看是合理的,能保证试验可靠度在可接受范围内。

参考文献:

[1] 陈铮,相斌辉,谢帮华. 基于静载试验的在役拱桥承载力评估[J]. 南昌工程学院学报,2020,39(6):37-42.
CHENG Z,XIANG B H,XIE B H. Evaluation of bearing capacity of in-service arch bridge based on static load test [J]. Journal of Nanchang Institute of Technology,2020,39(6):37-42.

[2] 粟进清. 基于有限元数值模拟的新下花桥静载试验分析[J]. 公路与汽运,2020(5):103-105.
SU J Q. Analysis of static load test of Xinxiahua Bridge based on finite element numerical simulation[J]. Highways & Automotive Applications,2020(5):103-105.

[3] 陈春红,钱振东. 旧桥结构承载力评定静载试验研究[J]. 交通科技,2007,4:10-12.
CHEN C H,QIAN Z D. Static-loading experimental evaluation of loading ability of old bridge structures[J]. Transportation Science & Technology,2007,4:10-12.

[4] 长安大学. 公路桥梁荷载试验规程:JTG/T J21-01-2015[S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.
CHANG AN UNIVERSITY. Load test methods for highway bridge:JTG/T J21-01-2015[S]. Beijing:China Communications Press Co.,Ltd.,2015.

[5] 李国平. 公跨铁立交桥荷载试验研究及安全控制[J]. 建筑监督检测与造价,2012,54:1-3.
LI G P. Research on load testing and its security control of the overpass of highway across railway[J]. Supervision Test and Cost of Construction,2012,54:1-3.

[6] 田俊,唐宝利,贺小军. 荷载试验加载方案设计的安全性分析[J]. 科技创新与应用,2019,15:79-81.
TIAN J,TANG B L HE X J. Safety analysis of the design of loading scheme for load test[J]. Technology Innovation and Application,2019,15:79-81.

[7] 石永燕,王云莉. 桥梁静载试验的安全加载算法[J]. 公路交通科技,2005,7:92-94.
SHI Y Y,WANG Y L. Safe loading algorithm for bridge static load test[J]. Journal of Highway and Transport,2005,7:92-94.

[8] 杨春侠,杨伟军,张建仁. 基于验证荷载法的桥梁荷载试验失效风险分析[J]. 长沙交通学院学报,2004,20(2):25-29.
YANG C X, YANG W J, ZHANG J R. An analysis of fail ure risk of the bridge load test based on proof load method[J]. Journal of Changsha Communications University,2004,20(2):25-29.

[9] 张守军. 预应力混凝土连续梁桥静载分析与试验研究[J]. 交通世界,2020(34):99-101.
ZHANG S J. Static load analysis and experimental research of prestressed concrete continuous girder bridge[J]. Transport World,2020(34):99-101.

[10] 虢曙安. 特大跨径钢桁梁悬索桥静载试验[J]. 长安大学学报(自然科学版),2020,40(6):67-76.
GUO S A. Static loading test for supper long-span suspension bridge with steel truss girders[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition),2020,40(6):67-76.

[11] 崔春霞,孙建刚,付小娜. 基于静载试验的公路旧桥的检测及评估[J]. 北方交通,2011(9):39-42.
CUI C X,SUN J G,FU X N. The detection and evaluation of old road bridge based on static load test[J]. Beifang Jiaotong,2011(9):39-42.

[12] 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 G P,JIN W L,GONG J X. Structural Reliability Theory[M]. Beijing:China Architecture & Building Press,2000.

[13] 李扬海,鲍卫刚,郭修武,等. 公路桥梁结构可靠度与概率极限状态设计[M]. 北京:人民交通出版社,1997.
LI Y H,BAO W G,GUO X W,et al. Reliability and Probabilistic Limit State Design of Highway Bridge Structures[M]. Beijing:China Communications Press,1997.

[14] 鲁乃唯,刘扬. 桥梁可靠度分析方法与应用[M]. 南京:东南大学出版社,2017.
LU N W,LIU Y. Methods and Applications Reliability Analysis of Bridges[M]. Nanjing:Southeast University Press,2017.

[15] 中交公路规划设计研究院有限公司. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范:JTG 3362-2018[S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.
CCCC HIGHWAY CONSULTANTS CO.,LTD. Specifications for design of highway reinforced concrete and prestressed concrete bridges and culverts:JTG 3362-2018[S]. Beijing:China Communications Press Co.,Ltd.,2018.

[16] 曾勇,杨长春,吴秀平. 大跨预制 T 梁裸梁静载试验研究[J]. 河南城建学院学报,2020,29(6):1-7.
ZENG Y,YANG C C,WU X P. Research on static load test of large span precast T-shaped girders[J]. Journal of Henan University of Urban Construction,2020,29(6):1-7.

[17] 周叶飞,曾明杰. 预制小箱梁单梁静载试验及承载能力评定分析[J]. 中外公路,2015,35(2):142-146.
ZHOU Y F,ZENG M J. Static load test and load-bearing capacity evaluation analysis of single beam of prefabricated small box girder[J]. Journal of China & Foreign Highway,2015,35(2):142-146.

[18] 中交公路规划设计院有限公司. 公路桥涵设计通用规范:JTG D60-2015[S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.
CCCC HIGHWAY CONSULTANTS CO.,LTD. General specifications for design of highway bridges and culverts:JTG D60-2015[S]. Beijing:China Communications Press Co.,Ltd.,2015.

[19] 中交公路规划设计院有限公司. 公路工程结构可靠度设计统一标准:JTG 2120-2020[S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司,2020.
CCCC HIGHWAY CONSULTANTS CO.,LTD. Unified standard for reliability design of highway engineering structures:JTG 2120-2020[S]. Beijing:China Communications Press Co.,Ltd.,2020.

[20] 张俊芝, 高延红. 考虑抗力退化的在役结构可靠度验证荷载法[C]//昆明:第八届全国结构工程学术会议论文集(第Ⅱ卷),1999.
ZHANG J Z,GAO Y H. Load method for reliability verification of in-service structures considering resistance degradation[C]//Kunming: Proceedings of the 8th National Academic Conference on Structural Engineering (Volume II),1999.

[21] 侯天宇,李文杰,赵君黎,等. 在役混凝土桥梁安全性评估目标可靠指标研究[J]. 公路,2017,3(3):66-72.
HOU T Y,LI W J,ZHAO J L,et al. Research on target reliability indexes for safety evaluation of existing concrete bridges[J]. Highway,2017,3(3):66-72.

[22] 李睿,陈志强,郭峰,等. 桥梁提载加固设计-理论与实践[M]. 北京:科学出版社,2017.
LI R,CHEN Z Q,GUO F,et al. Bridge Load Lifting and Reinforcement Design-Theory and Practice[M]. Beijing:Science Press,2017.

[23] 谢瑛. 提载旧桥承载能力的评估[J]. 江西建材,2020,3:46-50.
XIE Y. Evaluation of bearing capacity of old bridge with raising load[J]. Jiangxi Building Materials,2020,3:46-50.

[24] 交通运输部公路科学研究院. 公路桥梁承载能力检测评定规程:JTG/T J21-2011[S]. 北京:人民交通出版社,2011.
RESEARCH INSTITUTE of HIGHWAY MINISTRY of-TRANSPORT. Specification for inspection and evaluation of load-bearing capacity of highway bridges:JTG/T J21-2011[S]. Beijing:China Communications Press Co.,Ltd.,2011.

第一作者:梁茜雪(1975—),女,高级工程师,硕士。研究方向为桥梁检测评估, 健康监测和加固设计文献。E-mail: 3068100194@qq.com。

(责任编辑:吴海燕　刘棉玲)