

亚健康桥梁运营车辆荷载限制的理论分析*

张俊平¹, 刘爱荣¹, 禹奇才¹, 吴刚²

(1. 广州大学土木工程学院, 广东 广州 510006;
2. 中铁四院集团广州设计院有限公司, 广东 广州 510080)

摘要: 从现役亚健康桥梁的实际情况出发, 提出了损伤极限状态的概念, 揭示了亚健康桥梁使用承载能力的内涵, 指出了其使用承载能力的评估途径, 分析了亚健康桥梁可靠度与新建桥梁可靠度的异同, 初步从理论上回答了亚健康桥梁运营车辆荷载科学合理限制的问题。

关键词: 亚健康桥梁; 损伤极限状态; 使用承载能力; 运营车辆荷载限值; 可靠度

中图分类号: U445.7; U448.34 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2010)01-0034-05

Theoretical Analysis of Carrying Vehicle Load Limit for Sub-Health Highway Beam Bridge

ZHANG Junping¹, LIU Airong¹, YU Qicai¹, WU Gang²

(1. School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

(2. Company of China Railway Ground Guangzhou Design Institute,
Guangzhou 510080, China)

Abstract: Depending on the actual service condition of sub-health bridge, the following investigation is developed: ①The concept of damage limit state is proposed, from which the subject of the serviceability carrying capacity is revealed, then the evaluation path of serviceability carrying capacity of sub-health beam is given. ②The difference between the reliability of sub-health bridge and new bridge is analyzed, consequently, the problem about reasonable limit vehicle load is solved preliminarily in theory.

Key words: sub-health beam bridge; damage limit state; serviceability carrying capacity; carrying vehicle load limit; reliability;

至2006年末,我国现役公路桥梁达53.36万座,由于设计荷载标准先后经过四次提高,大多数现役桥梁设计荷载标准相对于运营车辆荷载严重偏小,以应用最为广泛、设计荷载标准相对较高的汽车-20级设计荷载为例,其车辆荷载效应设计值仅为美国AASHTO LRFD (Load and Resistance Factor Design) 的68%、英国BS5400的BD37/88的60%,导致现役公路桥梁中,结构承载能力不能适应运营荷载要求、存在安全风险的亚健康桥梁约占总数的1/10^[1-2]。另一方面,由于超重车辆日益

增多、超载车辆屡禁不绝,导致我国亚健康桥梁超负荷使用这一问题更为严重,近几年来,先后有辽宁盘锦大桥、太原东柳林大桥、深汕高速龙岗桥等多座桥梁因超载而垮塌,造成了巨大的经济损失与严重的社会影响^[3]。

在欧洲、北美等发达国家和地区,由于桥梁服役时间相对较长,现役桥梁加固改造的紧迫性则更为突出。以美国为例,2007年8月,美国明尼阿波利斯的钢桁架桥垮塌后,美国土木工程师协会估计在全部58.6万座现役公路桥梁中,须限载通

* 收稿日期: 2009-03-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50878059); 广东省自然科学基金资助项目(7001897)

作者简介: 张俊平(1968年生),男,博士,教授; E-mail: ZHJP168@TOM.com

行的亚健康桥梁为 8.8 万座, 这些桥梁改造将至少需要 20 年的时间, 耗资将超过 1 880 亿美元, 而联邦公路局估计的改造费用则更高。

在亚健康桥梁数量巨大、短期内难以全面改造的情况下, 科学合理地确定其运营荷载限值已经成为亚健康桥梁管理养护的当务之急, 以便既安全、适度地发挥亚健康桥梁在交通路网中的作用, 又防止亚健康桥梁在继续使用过程中原有病害恶化或产生新的病害, 造成重大安全事故。为此, 本文提出亚健康桥梁损伤极限状态的概念, 揭示亚健康桥梁使用承载能力的内涵, 在此基础上, 以量大面广、最为普遍的亚健康梁桥为例, 模拟随机运营车辆产生的荷载效应, 分析车辆荷载限制状况下的结构可靠度, 力图从理论上回答如何科学确定亚健康桥梁运营荷载限制的问题。

1 损伤极限状态与使用承载能力

结构完成预定功能的标志可用“极限状态”来衡量, 极限状态实质上是结构可靠与不可靠的界限。大多数国家或地区的设计规范将结构的极限状态分为“承载能力极限状态 (Ultimate Limit States)”和“正常使用极限状态 (Service Limit State)”两种, 前者直接关系到结构的安全与否, 后者涉及结构的工作条件和耐久程度。但也有一些国家规范定义了更多类型的极限状态, 如加拿大桥梁设计规范 CAN/CSA-S6-00 定义了 3 种极限状态, 即: ①承载能力极限状态, ②疲劳极限状态 (Fatigue Limit State), ③正常使用极限状态; 而美国 AASHTO 桥梁设计规范则提出了 4 种极限状态, 即: ①使用极限状态, ②疲劳和断裂极限状态 (Fatigue and Fracture Limit State), ③强度极限状态 (Strength Limit State), ④极端事件极限状态 (Extreme Event Limit State)。

对于亚健康桥梁而言, 其性能往往不能满足正常使用极限状态, 但距离承载能力极限状态尚有较大的距离。那么, 在其待加固改造期间, 如何合理适度地利用正常使用极限状态与承载能力极限状态之间的、相对比较宽广的承载能力空间, 但又不产生更严重的、不可逆的损伤, 鉴于国内外桥梁规范均从理想状态来指导新建工程的设计, 基本不涉及到现役桥梁的运营管理与加固改造, 因此对于现役桥梁的此种状况尚未见有明确定义。另一方面, 影响现役桥梁承载能力的因素众多, 既有外部环境侵蚀、内部缺陷发展等不利因素, 导致其承载能力随时间不断衰减; 也有材料强度增长、附属构件

(构造) 联合作用等有利因素, 导致其实际承载能力远大于设计承载能力。因此, 对于现役亚健康桥梁而言, 迫切需要基于实际状况来定义其损伤极限状态指标, 确定其使用承载能力, 以便于为亚健康桥梁的安全运营与适度利用奠定理论基础。

所谓损伤极限状态, 是指结构的预期功能受到一定影响但可逆的状态, 部分结构响应指标如应力量值、裂缝宽度介于正常使用极限状态与承载能力极限状态之间, 结构行为短期内不会产生显著变异, 但长期性能遭受一定程度的损害、以至需要进行加固才能保证其耐久性和安全性。

所谓使用承载能力, 是指结构在损伤极限状态下对应的承载能力, 它既不是结构的极限承载能力, 也不是对应于正常使用状态的承载能力, 而是部分指标满足正常使用要求、有实际利用价值的桥梁承载力, 是亚健康桥梁在加固改造之前、对应于损伤极限状态的承载能力。以典型梁的抗弯承载能力为例 (图 1), 其设计极限承载能力为 M_u^d , 实际的极限承载能力为 M_u' , 正常使用状态对应的抗弯承载能力为 M_s , 而其使用承载能力则为 M_{ds} , 介于 M_u' 与 M_s 之间。使用承载能力 M_{ds} 主要由桥梁的先天设计参数所决定, 但也与桥梁后期使用历史、维护状况有关, 具有一定的波动性与变异性, 是亚健康桥梁具有实际利用价值的承载能力。

亚健康桥梁待加固改造期一般为 3~5 年, 在此期间, 其使用承载能力的变异性较小, 可将其视为不变量。亚健康桥梁的使用承载能力取决于其失效模式及其显著性水平。对于亚健康桥梁某种失效模式下如抗弯失效、抗剪失效的使用承载能力, 可采用静载试验方法来确定, 通过其主要承重构件在静载试验荷载作用下的响应指标来进行评价分析, 从而全面反映亚健康桥梁的各种有利因素与不利因素对其使用承载能力的影响。荷载响应指标主要包括构件的裂缝种类、裂缝宽度、活载应力幅值、活载结构变形、恒载及活载作用下的应力水准等参数, 这些宏观的、显性的指标大多均可以借助于桥梁静载试验这个实用工具加以反映和量测, 并由此来评估、确定某种失效模式下的亚健康桥梁使用承载能力。然后, 综合考虑亚健康桥梁各种可能的失效模式及其显著性水平, 根据静载试验结果进行加权评估就可确定其使用承载能力。关于桥梁使用承载能力确定的研究相对较多, 此处从略^[4-5]。确定了亚健康桥梁的使用承载能力, 就可根据使用承载能力以及运营车辆荷载效应的模拟结果, 考虑亚健康桥梁可靠度的特点, 确定运营车辆荷载限值。

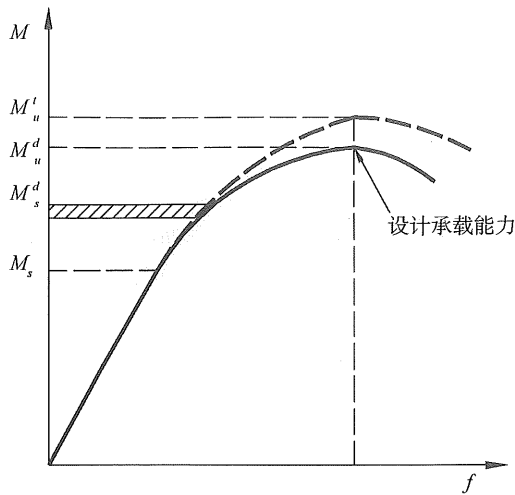


图 1 典型梁的抗弯承载能力

Fig. 1 The curve of resisting moment carrying capacity of typical beam

2 亚健康桥梁运营车辆荷载效应模拟

车辆荷载是高度随机变化的, 随着经济发展而不断变化, 具有较强的时间、空间变异性, 一般均采用随机过程模型进行近似描述。车辆荷载模型的建立需要对长期的、大量的调查观测资料进行统计抽象, 是一项十分庞大而复杂的工作。目前, 比较符合我国公路交通荷载状况的模型是交通部“公路桥梁车辆荷载”课题组的车辆荷载模型。但另一方面, 由于实际交通流具有开放性、随机性等特征, 无法用线性的、明确的函数来描述, 因此, 仅有车辆荷载概率模型还难以进行随机荷载产生的桥梁结构效应(内力、变形)的模拟分析。文 [5] 基于“公路桥梁车辆荷载”课题组的车辆荷载模型, 利用 Monte-Carlo 法, 考虑随机车辆荷载空间分布与时间变化的内在关系, 将车重、车长和车间距三个因素看作相互独立、不相关联的随机变量进行了模拟再现。

在亚健康桥梁中, 梁桥占据了桥梁总数的 80% 以上, 梁桥具有量大面广、结构赘余度少、承载潜力相对较小、失效模式较为单一等特点^[6-7], 是现役亚健康桥梁安全隐患最为突出的桥型, 近年来国内外发生的桥梁垮塌事故也表明了这一点。本文以典型的亚健康简支梁桥为例, 以跨中弯矩为控制因素, 在文 [6] 的基础上, 根据车辆类型、车长、车间距的分布特征, 将随机车辆荷载等效为作用长度、荷载集度、分布间距均随机变化的均布荷载序列(图 2), 并据此对简支梁桥进行加载, 采用结构分析方法计算随机车辆荷载产生的弯矩效

应, 从而较为简便可靠的模拟计算随机交通流产生的简支梁桥弯矩效应。对于其它桥型如拱桥由随机交通流产生的内力效应模拟将另文介绍。

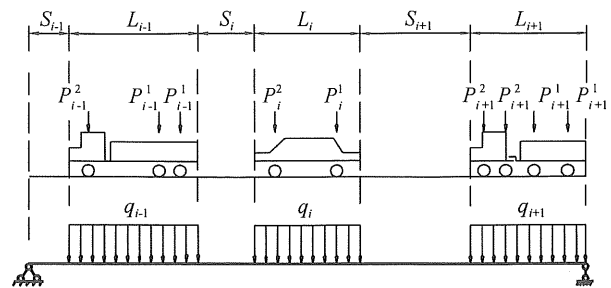


图 2 模拟随机车辆荷载的动态加载过程

Fig. 2 Dynamic loading process of random vehicle load simulated

亚健康梁桥的运营车辆荷载随机弯矩效应模拟得出后, 就可根据梁桥的使用承载能力来计算在一定可靠度保障下的运营车辆荷载上限, 综合安全性、可靠性两方面, 得出运营车辆荷载限值。鉴于影响桥梁使用承载能力的主要因素是车辆的总重, 根据 Ghosn. M、Attila Vigh 等人对超重车辆内力效应的研究成果, 以及美国、南非、英国、葡萄牙、丹麦等国对超重车辆的管理经验^[8-9], 本文采用限制车辆总重的方法, 不考虑车型和轴重的影响。

3 亚健康桥梁的可靠度

可靠度是指结构在规定的时间内、规定的条件下, 完成预定功能的概率。结构可靠度与时间关系密切, 一般而言, 结构的材料强度、几何因素等在服役期间变异较小, 可视为常量, 但随着时间的延伸, 荷载或荷载效应的变异则不容忽视。通常, 桥梁结构设计基准期取 100 年, 其可靠度指标 β 取 3.5, 对应的失效概率 P_f 为 2.33×10^{-4} 。对于亚健康桥梁而言, 考虑到其检测评估、资金落实、加固施工所需时间, 其“待加固改造基准期”一般假定为 5 年, 此时间段相对于桥梁的设计基准期来说较短, 因此其可靠度指标与新建工程存在一定差异, 不宜直接套用新建桥梁的可靠度指标, Yao T H、Natke 等^[10-11]分析了服役期限、加固改造基准期对现役结构可靠度的影响。但另一方面, 亚健康桥梁在待加固改造期间, 结构可靠性处于其使用寿命的波谷, 失效概率处于服役全过程的波峰, 因此, 此阶段可靠度指标可能会控制设计基准期, 需要对其这一特殊时间段可靠度的合理取值进行综合分析研究。

对于亚健康桥梁，要求其在加固改造基准期内，在限制运营车辆荷载总重的情况下，尚应具有一定的通行能力，综合其技术状况现状与和运营车辆荷载，其功能函数、失效概率可表示为

$$Z(t) = R(t) - S(t) \quad (1)$$

$$P_f(t) = P(Z(t) \leq 0) = \int_{-\infty}^{t+5} f(Z) dZ \quad (2)$$

上式中， $R(t)$ 为 t 时刻亚健康桥梁使用承载能力，取决于结构的应力水准、裂缝宽度、刚度变形等响应指标； $S(t)$ 为 t 时刻亚健康桥梁所承受的随机荷载效应，包括恒载、通行车辆荷载效应等， $P_f(t)$ 为 t 时刻至其后 5 年内的亚健康桥梁失效概率，而对应的可靠度指标 β 可表示为

$$\beta = \Phi^{-1}(1 - P_f) \quad (3)$$

可靠度指标 β 与失效概率 P_f 的数值关系见表 1。

表 1 β 与 P_f 的对应关系

Table 1 Corresponding relationship between β and P_f

| β | P_f | β | P_f | β | P_f |
|---------|-----------------------|---------|-----------------------|---------|-----------------------|
| 1.0 | 1.59×10^{-1} | 2.5 | 6.21×10^{-2} | 4.0 | 3.17×10^{-5} |
| 1.5 | 6.68×10^{-2} | 3.0 | 1.35×10^{-3} | 4.5 | 3.40×10^{-6} |
| 2.0 | 2.28×10^{-2} | 3.5 | 2.33×10^{-4} | 5.0 | 2.90×10^{-7} |

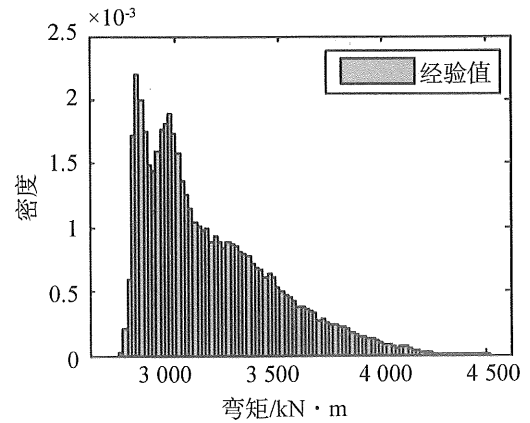
对于一些结构比较简单的亚健康桥梁如简支梁桥，主要构件如纵梁的可靠度基本可等同为结构的可靠度，对于相对复杂的亚健康桥梁如连续梁桥、拱桥，则首先要求出各主要构件的可靠度，然后采取模糊加权方法计算结构的可靠度。最后，综合考虑安全、经济、改造周期等因素来确定亚健康桥梁的可靠度。

4 算 例

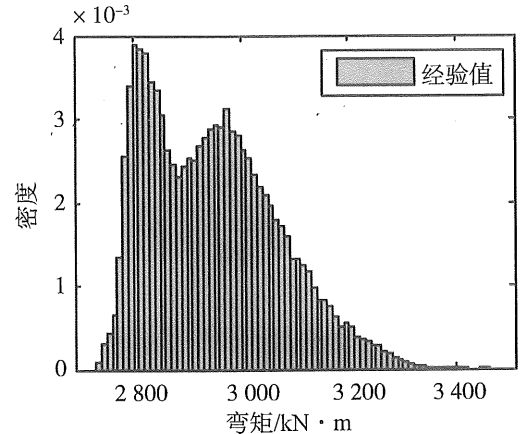
某亚健康装配式简支梁桥原设计荷载等级为汽车 - 15 级、挂车 - 80，桥面布置为双向双车道，跨径划分为 5×20 m，计算跨径为 19.96 m，梁体设计抗弯强度 M_u^I 为 4 675 kN·m，对应于正常使用状态对应的抗弯承载能力 M_s 为 3 624 kN·m，其中设计活载弯矩为 1 973 kN·m。该桥运营已逾 40 年，桥梁状况总体较差，由于桥面连续作用的差异，不同桥跨梁体的抗弯承载能力差别较大。根据静载试验测试结果，①~③轴梁体因桥面连续状况良好，其使用承载能力 M_{ds}^I 在 4 425 ~ 4 459 kN·m 之间；而③~⑤轴桥跨因桥面连续性丧失、结构整体性差，其梁体的使用承载能力 M_{ds}^2 为 3 443 kN·m。由于该桥位于国道上，交通较为繁忙，实际

通行车辆荷载大于设计荷载等级，为保证其安全运营，现根据前述理论与模拟方法，基于不同的可靠度水平，分别模拟计算各桥跨的运营车辆荷载限值，然后综合得出该桥在待加固改造期间的运营车辆荷载限值结果。

图 3 模拟了可靠度指标 $\beta \geq 3.5$ 的情况下，各跨梁体在密集运行状态下车辆荷载弯矩效应的随机分布规律，对于①~③轴梁体，满足可靠度指标的运营车辆荷载限值为 16 t，对于③~⑤轴梁体，满足可靠度指标的运营车辆荷载限值为 6 t。此外，



(a) $M_{ds}^1 = 4 425$ kN·m



(b) $M_{ds}^2 = 3 443$ kN·m

图 3 $\beta \geq 3.5$ 时不同使用承载能力下最大弯矩效应分布

Fig. 3 The maximum moment effect under different serviceability carrying capacity when $\beta \geq 3.5$

表 2、图 4 列出了不同可靠度指标下的车辆荷载限值模拟分析结果，对于该桥，考虑到其“待加固改造基准期”相对较短，如可接受的可靠度指标 $\beta \geq 1.5$ (对应的失效概率 P_f 为 6.68×10^{-2})，则①~③轴梁体运营荷载限值可达 31 t，③~⑤轴梁体运营荷载限值可达 10 t。综合上述模拟计算结果，

在适度发挥该桥使用承载能力的情况下, 车辆荷载限值可取 10 t。

表 2 不同使用承载能力下限载计算结果
Table 2 Load limit under different serviceability carrying capacity

| $M_{ds}^1 = 4\,425 \text{ kN} \cdot \text{m}$ | | $M_{ds}^2 = 3\,443 \text{ kN} \cdot \text{m}$ | |
|---|--------------|---|--------------|
| 限载值/t | 可靠指标 β | 限载值/t | 可靠指标 β |
| 60 | 1.24 | 60 | 0.15 |
| 31 | 1.51 | 10 | 1.54 |
| 20 | 2.54 | 8 | 2.29 |
| 18 | 3.10 | 7 | 3.06 |
| 16 | 3.63 | 6 | 3.95 |

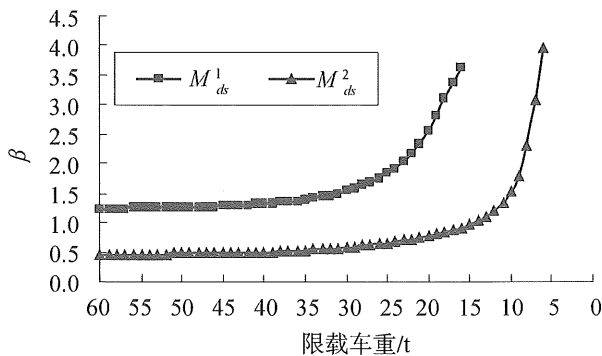


图 4 车辆限载量值与可靠指标关系曲线

Fig. 4 The relationship between vehicle load limit and reliability quota

5 结 论

(1) 本文从现役亚健康桥梁的实际情况出发, 提出了损伤极限状态的概念, 揭示了亚健康桥梁使用承载能力的内涵, 指出了亚健康桥梁使用承载能力的评估途径。

(2) 以量大面广的亚健康简支梁桥为例, 模拟

了随机运营车辆产生的弯矩效应, 分析了现役亚健康桥梁可靠度与新建桥梁可靠度的异同, 通过算例说明了多跨梁桥运营荷载限值确定的方式, 初步从理论上回答了亚健康桥梁运营车辆荷载科学合理限制的问题。

参考文献:

- [1] 吕志涛. 新世纪的土木工程与可持续发展[J]. 交通运输工程学报, 2002(1): 1-5.
- [2] 郑皆连. 我国公路桥梁安全状况及对策[J]. 桥梁, 2007(5): 20-23.
- [3] 张俊平, 刘爱荣. 如何拯救亚健康桥梁[J]. 桥梁, 2008, 26(6): 80-83.
- [4] CÉSER Crespo-Minguillón, JUAN R Casas. A comprehensive traffic load for bridge safety checking[J]. Structural Safety, 1997, 19(4): 339-359.
- [5] 张俊平, 刘爱荣, 吴刚. 亚健康梁桥运营荷载限制的可靠度分析[J]. 广州大学学报, 2009(4): 70-74.
- [6] 张树仁, 王宗林. 桥梁病害诊断与改造加固设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
- [7] 刘爱荣, 张俊平, 吴刚. 亚健康公路混凝土梁式桥的限载方法研究[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2009, 48(5): 42-46.
- [8] GHOSN M. Development of truck weight regulations using bridge reliability method [J]. Journal of Bridge Engineering, ASCE, 2000(4): 293-303.
- [9] ATTILA Vigh, LÁSZIÓ P. Approximate analysis of bridges for the routing and permitting procedures of overweight vehicles[J]. Journal of Bridge Engineering, ASCE, 2006(11): 282-292.
- [10] YAO T H J, WEN Y K. Response surface method for time-variant reliability analysis[J]. Journal of Engineering Structures, 1996, 122(2): 193-201.
- [11] DROSOPOULS G A. Limit analysis of a single span masonry bridge with unilateral frictional contact interfaces [J]. Engineering Structures, 2006, 28: 1864-1873.