

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2015.01.004

基于“投资 - 效益”准则的 RC 桥墩全寿命总费用

柳春光¹, 张士博¹, 柳英洲²

(1. 大连理工大学 建设工程学部, 辽宁 大连 116024;

2. 辽宁工程技术大学 建筑工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 基于性能的抗震设计于 20 世纪 90 年代兴起以来, 目前在土木建筑方面的文献较多, 但是关于桥梁的研究成果较少。采用五级钢筋混凝土桥墩结构性能水平, 以钢筋混凝土桥墩墩顶位移角为量化指标, 建立了钢筋混凝土桥墩性能水平与钢筋混凝土桥墩位移角限值之间一一对应的关系。将地震危险性分析与最优设防烈度结合起来, 建立基于投资 - 效益准则的 RC 桥墩全寿命总造价计算的通用框架。

关键词: “投资 - 效益”准则; 钢筋混凝土桥墩性能水平; 抗震性能目标; 最优设防烈度; 全寿命总费用

中图分类号: TU318.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2015)01-0016-04

Total Life-cycle Cost of RC Bridge Piers Based on the Cost-benefit Criterion

LIU Chun-guang¹, ZHANG Shi-bo¹, LIU Ying-zhou²

(1. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China)

Abstract: Since the proposal of performance based on seismic design theory advocated by American scholars in 1990s, great achievements in structural research area have been made. However, little attention has been paid to the research on bridges. With the value of the top displacement angle as the index, a corresponding relationship between the performance level of reinforced concrete(RC) bridge pier and its limited value of the top displacement angle was established in this paper adopting the five performance levels of RC bridge piers. This method combined the seismic hazard analysis and the optimized seismic fortification intensity, on which the universal calculation method for the total cost of a RC bridge's life span based on the investment-benefit criterion was established.

Keywords: investment-benefit criterion; reinforced concrete bridge pier performance levels; seismic performance objectives; the optimized fortification intensity; total cost of the life span

近 20 年来, 美国、日本等一些国家的地震工程专家提出三水准设防的抗震设计理念, 这种理念得到了土木抗震界的广泛认同。在 20 世纪发生的地震中, 在经济发达国家及人口密集的城市, 按 2008 版《公路桥梁抗震设计细则》设计的桥梁, 因桥梁震害及其导致的次生灾害造成生命和财产损失显著减少, 但是该抗震设计指导思想的主要设防目标侧重于“生命安全”, 仍然对结构采取基于强度的抗震设计, 尽管它能在大震发生时避免桥梁倒塌从而保障

人员的安全, 但是在中小地震下不能有效地控制桥梁正常使用功能。桥梁作为生命线工程中的关键部分, 在地震发生时震害及其带来的次生灾害所造成的损失总费用远远超过桥梁结构的初始总投资。

现代地震灾害造成巨大财产损失的新形式, 已经给国内外地震工程界专家以深刻的启示和新的思考, 并且意识到仅仅侧重于结构安全已经达不到业主和设计者对结构抗震性能设计的要求, 需要全面考虑结构安全、性能和社会等诸多方面的影响, 分类

收稿日期: 2014-10-15

修稿日期: 2014-11-29

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助“973 计划”项目(2011CB013605-4); 国家自然科学基金项目(51178079); 国家自然科学基金重大项目(90915011, 91315301); 辽宁省优秀人才基金资助项目(2014020012)

作者简介: 张士博(1978-), 男, 河北邢台人, 博士研究生, 研究方向为结构抗震理论与性能设计。E-mail: drzhang0102-@163.com

通信作者: 柳春光(1964-), 男, 黑龙江牡丹江人, 博士、教授、博导, 主要从事生命线地震工程及城市防灾减灾信息技术研究方面的教学与科研工作。E-mail: liueg@dlut.edu.cn

设防的抗震设计就是在这种背景下提出的。目前土木工程方面的文献较多^[1-3],而有关桥梁的研究成果依然较少^[4]。投资-效益准则是基于分类设防的抗震设计基本原则,根据投资-效益准则,结构设计应按照抗震设防目标的要求,寻求足够安全和合理的设计方案,使结构的初始设计造价与结构地震损失期望之间达到一种和谐的平衡,也就意味着结构全寿命总造价最低。

在地震中,桥梁上部结构的设计主要受恒载、活载和温度等而不是地震作用控制。而地震产生的惯性力仅仅对柱、墩和基础下部结构施加巨大的应力。从过去的地震灾害调查结果分析发现,桥梁结构震害主要发生三种有代表性的破坏类型:地基破坏、支座破坏和桥墩柱破坏^[5]。支座破坏可以通过桥梁抗震规范中相应的能力保护设计条文来避免发生,地基破坏也可以依据桥梁抗震设计规范中相应的条文来加以避免,桥梁在未来的震害主要由桥墩的破坏引起且不可避免,所以桥墩是抗震设计的主要部位。

本文采用五级钢筋混凝土(Reinforced Concrete, RC)桥墩结构性能水平,以钢筋混凝土桥墩墩顶位移角为量化指标,建立了RC桥墩性能水平与RC桥墩位移角限值之间一一对应的关系。将地震危险性分析与最优设防烈度结合起来,建立基于投资-效益准则的RC桥墩全寿命总造价计算的通用框架。

1 RC桥墩性能水平及量化

要确定结构的目标性能水平,首先必须采用合适的参数对结构的性能水平进行描述。我国现行的《建筑抗震设计规范》^[6](GB50011-2010)采用层间位移来定义三水准设防下的破坏性能水平,并规定了多种类型结构弹性和弹塑性下层间位移角限值。本文也采用位移角对RC桥墩的抗震性能水平进行划分。文献^[7]对于127个以弯曲破坏为主的钢筋混凝土圆形截面桥墩试验数据进行统计分析,建立钢筋混凝土桥墩在地震作用下处于五级性能水平的变形位移角限值见表1。

表1 钢筋混凝土桥墩性能水平位移角限值

性能水准	性能水平	位移角限值
I	正常使用	1/500
II	暂时使用	1/400
III	修复后使用	1/175
IV	生命安全	1/100
V	防止倒塌	1/50

2 基于性能的桥墩抗震目标性能

结构抗震性能目标指当发生某一超越概率的地震时,期望结构的最大破坏状态应处于某一级破坏水平。基于性能的桥梁抗震设计理论是现在抗震设计的一种延续和发展。从某种意义上,现行规范的两水平设防就是一种性能要求,只不过这种要求已经不能适应目前人们对桥梁结构抗震的要求。“投资-效益”准则根据业主和社会的要求,确定合适的桥梁结构性能水平和抗震性能目标,使设计出的桥梁在满足规范要求的同时兼顾业主需求。

3 RC桥墩全寿命总费用模型

RC桥墩在整个寿命周期内总费用模型为:

$$W_{LCC} = C_I + C_M + C_L \quad (1)$$

式中: C_I 为RC桥墩设计方案的造价,一般包括钢筋、混凝土、人工及设备费用。 C_M 为检查维护费用。 C_L 为失效损失费用(直接和间接损失)。

传统的失效损失期望是工程的失效概率与工程失效带来的经济损失的乘积,是概率意义上的量。因此,桥梁全寿命总费用就是以可靠度为参数的优化设计模型,按照这个模型进行数值方法求解,其中一个非常严重的困难是桥梁结构可靠度的计算。最优设防荷载强调结构共性的最优目标性能水平,采用一个重要的假定:按照现有规范设计的桥梁可靠度将等于目标可靠度。利用这一假定,可以回避计算桥梁可靠度的困难,而认为所讨论的结构可靠度等于规定的目标可靠度。从理论和实际应用两方面出发,采用最优设防荷载比最优设防可靠度更加简单、合理。

抗震设防荷载选用设防烈度。根据三级设防水准,近似处理了结构在地震作用下的“不坏、可修、不倒”的可靠度,并与桥墩的五级性能水平联系起来,可以得到根据规范按设防烈度 I_d 设计出来的桥墩在遇到随机烈度地震时发生某一破坏等级的概率。本文将地震危险性分析与最优设防烈度结合起来,建立基于投资-效益准则的钢筋混凝土桥墩全寿命总造价计算的通用框架。

3.1 初始设计造价

在最优设防荷载(烈度)决策中,RC桥墩的初始设计方案的造价 C_I 为设防烈度 I_d 与结构截面向量 X 的函数($C[X(I_d)]$)。当设防烈度 I_d 已知时,可以设计出满足规范的多个不同方案 $X(I_d)$,这也就意味着有多个不同的初始造价。因为浪费的设计方

案不能被设计者和业主接受,因此不需要包含在 RC 桥墩整个寿命周期内总费用模型内,所以需要在多个不同方案中找到初始造价最小的设计方案

$C_{\min}[X(I_d)]$,用 $C_{\min}[X(I_d)]$ 代替 $C[X(I_d)]$ 。

3.2 检查维护费用

在整个寿命周期内,结构在动、静荷载的组合作用下累积损伤逐渐增加,刚度和强度会随之减小;与此同时,受恶劣的外部环境(如潮湿、高温、盐碱腐蚀、侵蚀等)作用会引起的碳化、腐蚀等^[8],因此在结构寿命周期内需要定期对结构性能进行检查维护。结构检查、维护费用指因结构承载力下降导致的补强引起的损失,与桥梁的类型和重要性、破坏程度、维护方法等因素有关。

3.3 RC 桥墩失效损失期望

我们采用符号 B_i 代表桥墩的第 i 级破坏,即 $[B_1, B_2, B_3, B_4, B_5] = [\text{基本完好}, \text{轻微破坏}, \text{中等破坏}, \text{严重破坏}, \text{基本倒塌}]$

设防烈度为 I_d 时,RC 桥墩遭遇第 i 级破坏的概率为:

$$P_{fi}[B_i, X(I_d)] \quad (i = 1, 2, \dots, 5) \quad (3)$$

采用下列符号:

$X(I_d)$ 为按烈度 I_d 设防(满足抗震规范的一切要求)设计的方案; $P_{fi}[B_i, X(I_d)]$ 为 $X(I_d)$ 发生 B_i 级破坏的概率; $P_{fi}[B_i^*, X(I_d)]$ 为 $X(I_d)$ 发生大于 B_i 级破坏的概率; $P_{fi}[B_i^*, X(I_d) | S]$ 为 $X(I_d)$ 在遇到烈度为 S 的地震时发生大于 B_i 级破坏的概率。

依据抗震设计规范,小震 I^L 小于设防烈度 1.55 度,大震 I^U 大于设防烈度约 1 度。中震和设防烈度相当。抗震规范还规定了三级有效准则,其中“不坏”和 B_1 相当,“可修”和 B_3 相当,“不倒”和 B_4 相当。由此可得到图 1。图 1(a) 为“小震不坏”,即遭遇小震及以下烈度时 $X(I_d)$ 不会发生 B_1 级以上的破坏,遇到中震及以上烈度时一定发生 B_1 级破坏,中震与大震直线连接。图 1(c) 和图 1(d) 有相似解释,图 1(b) 按介于图 1(a)、图 1(c) 之间近似的拟定。

有了图 1 的曲线之后,再利用地震危险性分析结果,可以得到在设计基准期 T 年内所处场地可能遭遇的最大地震烈度 S 的概率密度分布函数 $f_s(S)$,可求出失效概率:

$$P_{fi}[B_i^*, X(I_d)] = \int_0^{12} f_s(S) P_{fi}[B_i^*, X(I_d) | S] dS \quad (4)$$

然后即可根据式(5)~式(7)求得遭受 B_i 级破

坏的概率:

$$P_{f1}[B_1, X(I_d)] = 1 - P_{f1}[B_1^*, X(I_d)] \quad (5)$$

$$P_{fi}[B_i, X(I_d)] = P_{f(i-1)}[B_{i-1}^*, X(I_d)] - P_{fi}[B_i^*, X(I_d)] \quad (i = 2, 3, 4) \quad (6)$$

$$P_{f5}[B_5, X(I_d)] = P_{f4}[B_4^*, X(I_d)] \quad (7)$$

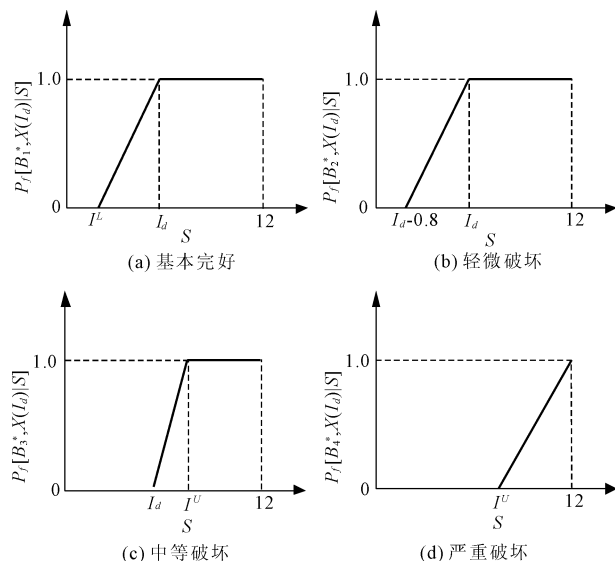


图 1 基于性能水平 i 的失效概率曲线

桥梁的破坏损失费用 D 一般可分为直接损失费用 D_{cl} 和间接损失费用 D_{dl} 。直接损失费用指因 RC 桥墩破坏所需要的检查维护费用,间接损失费用指由 RC 桥墩损坏所引起的落梁破坏、交通运输改道增加的费用等。

根据实际结构震害分类的习惯,将 RC 桥墩地震破坏情况分为基本完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏和基本倒塌,参考建筑结构文献^[9]关于地震损失值的估计和铁路 RC 桥墩文献^[10]关于地震损失值的估计,对 RC 桥墩地震损失值的估计见表 2。

表 2 RC 桥梁在不同破坏状态下的直接损失值和间接损失值系数

破坏水平	破坏状态	直接损失系数	间接损失系数
I	基本完好	0.0	0.0
II	轻微破坏	0.2	0.0
III	中等破坏	0.4	10.0
IV	严重破坏	0.8	40.0
V	基本倒塌	1.0	100.0

在考虑初始造价和损失期望的情况下,RC 桥墩全寿命总费用的目标函数应为:

$$W_{LCC}[X(I_d)] = C_{I\min}[X(I_d)] + C_M + \theta \sum_{i=1}^5 P_{fi}[B_i, X(I_d)] D_{Li} \quad (8)$$

$$s.t. P_{fi}(X) \leq [P_{fi}]$$

$$g_j(X) \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n$$

式中: $W_{LCC}[X(I_d)]$ 设防烈度 I_d 时 RC 桥墩全寿命总费用目标函数; $[P_{fi}]$ 为 RC 桥墩失效的目标值; $g_j(X) \leq 0$ 为与设计方法有关的确定性约束条件。 θ 为调整系数,此系数可以考虑初始造价和长远效益之间利息的影响。

4 算例

某高架桥^[11]的设计使用年限 50 a, 中等规则 C 类桥梁, 场地类别为 II 类, 特征周期 T_g 为 0.40, 抗震设防烈度为 7 度, 对应于性能水平 i 的失效概率曲线见图 2。假设桥梁在遭遇罕遇地震作用时达到“中等破坏”性能水平, 则桥梁位移角的限值为 1/100。

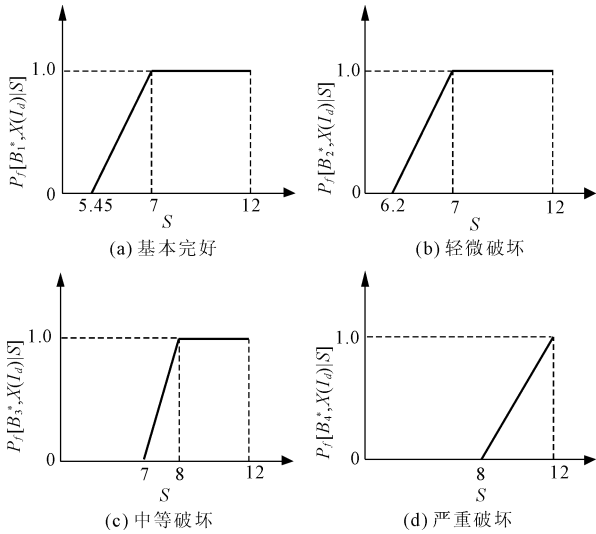


图 2 设防烈度为 7 度时基于性能水平 i 的失效概率曲线

(1) 初始设计造价

假定混凝土、纵向钢筋和箍筋的价格分别取 $P_1 = 295$ 元/ m^3 、 $P_2 = 27\ 690$ 元/ m^3 和 $P_3 = 26\ 676$ 元/ m^3 。

$$C_{Imin}[X(I_d)] = H\pi r^2 P_1 + H\pi r^2 \rho_{ls} P_1 + [L_p \rho_{hs} + (H - L_p) \rho_{vs}] \pi r^2 P_3 = 18324(\text{元})$$

式中: H 为桥墩高; π 为圆周率; ρ_{ls} 为纵筋配筋率; ρ_{hs} 为配箍率; L_p 为等效塑性铰长度。

(2) 检查维护费用

为了计算简便,我们假设 RC 桥墩检查维护费用 C_M 与设计方案的初始造价 $C_{Imin}[X(I_d)]$ 有关,一般在初始造价的基础上乘以一个系数 2%。

$$C_M = C_{Imin}[X(I_d)] \times 2\% = 366.48(\text{元})$$

(3) 地震损失期望

我国地震烈度的概率分布为极值 III 型分布,查阅规范^[12] 给出的 50 a 内地震烈度(7 度)的概率分布,再根据规范^[12] 可以得到此高架桥在 50 a 内可能遇到的最大地震烈度 S 的概率密度曲线:

$$f_s(S) = \int_0^{12} \frac{k}{\omega - \epsilon} \cdot \left(\frac{\omega - S}{\omega - \epsilon} \right)^{k-1} \cdot \exp \left[- \left(\frac{\omega - S}{\omega - \epsilon} \right)^k \right]$$

式中: ω 为烈度上限值($\omega = 12$); ϵ 为烈度众值(取基本烈度以下 1.55 度); k 为分布形状参数($k = 8.3339$)。

代入式(6),可以得到遭受 B_i 级破坏的概率

$$P_{fi}[B_i^*, X(I_d)] = \int_0^{12} \frac{8.3339}{12 - 5.45} \cdot \left(\frac{12 - S}{12 - 5.45} \right)^{k-1} \cdot \exp \left[- \left(\frac{12 - S}{12 - 5.45} \right)^k \right] P_{fi}[B_i^*, X(I_d) | S] dS$$

于是得到: $P_{f1}[B_1, X(I_d)] = 0.68$; $P_{f2}[B_2, X(I_d)] = 0.13$; $P_{f3}[B_3, X(I_d)] = 0.14$; $P_{f4}[B_4, X(I_d)] = 0.05$; $P_{f5}[B_5, X(I_d)] = 0$

根据表 2 可得 RC 桥墩发生 B_i 级破坏时的损失值 D_{Li} 为: $D_{L1} = 0.02 C_I$; $D_{L2} = 0.2 C_I$; $D_{L3} = 10.4 C_I$; $D_{L4} = 40.8 C_I$; $D_{L5} = 101 C_I$

$$W_{LCC}[X(I_d)] = C_{Imin}[X(I_d)] + C_M + \theta \sum_{i=1}^5 P_{fi}[B_i, X(I_d)] D_{Li} = 18324 + 366.48 + (0.68 \times 0 + 0.13 \times 0.2 + 0.14 \times 10.4 + 0.05 \times 40.8 + 0 \times 101) \times 18324 = 83227.61(\text{元})$$

5 结论

投资-效益准则是基于性能的抗震设计基本原则。这一准则从以往仅仅只注重结构安全向全面注重结构的安全、性能、社会和经济等诸多方面的影响发展。根据投资-效益准则,结构设计应按照抗震设防目标的要求,寻求足够安全和合理的设计方案,使结构的初始设计造价与结构地震损失期望之间达到一种和谐的平衡,也就意味着结构全寿命总造价最低。本文做了以下内容:

(1) 对 RC 桥墩五种不同的地震破坏“基本完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏和基本倒塌”的损失值进行了量化。

(2) 将地震危险性分析与最优设防烈度结合起来,建立基于投资-效益准则的钢筋混凝土桥墩全寿命总造价计算的通用框架。该模型既考虑了 RC 桥墩的初始造价,还充分考虑了 RC 桥墩地震损失,即全面考虑了 RC 桥墩性能、安全、经济和社会等诸多方面。
(下转第 59 页)