

文章编号:1006-2106(2001)01-0050-03

桥渡冲刷可靠度计算

张佰战^{*} 王群

(铁道科学研究院 铁道建筑研究所, 北京 100081)

提 要: 本文根据桥渡冲刷理论, 应用结构可靠度计算方法中的验算点法, 建立了桥渡冲刷可靠度计算的数学模型, 并给出了具体算例。

主题词: 桥渡冲刷; 可靠度; 验算点法

中图分类号: U442.3 **文献标识码:** A

1 引言

桥渡在运营过程中, 一般均面临水流冲刷问题, 而影响桥渡冲刷的因素很多, 不仅包括水力要素(如水深、流速、流向等)、河床组成参数(如河床泥沙类型、干容量、粒径及级配等), 还涉及桥墩的尺寸、形状、河滩路堤和桥墩对过水断面的束窄程度等。由于这些影响因素大多数是非确定性变量, 因而决定了桥渡冲刷也是不确定的。

以往用各种冲刷公式计算的冲刷深度, 即使计算结果合理, 也只是冲刷深度的数学期望值, 并不能反映桥渡冲刷的随机特征。与此不同, 在可靠度理论中, 考虑的是实际数值围绕某种平均值离散的概率条件。其可靠度的定义为: 在规定的时间内、规定的条件下, 结构物完成预定功能的概率。按照可靠度理论, 在已知各影响因素的均值、标准差等统计参数后, 即可计算出结构物的可靠度指标 β 和失效概率 P_f 。另外, 若给定目标可靠指标 β_T , 也可计算出结构满足该指标的设计参数。

2 可靠性理论中的验算点法简介^[1]

可靠度分析中往往涉及多个随机变量, 一般情况下, 极限状态方程可由多个相互独立的正态随机变量 X_1, X_2, \dots, X_n 组成, 即

$$Z = g(X_1, X_2, \dots, X_n) = 0 \quad (1)$$

方程(1)表示为坐标系 $OX_1X_2 \dots X_n$ 中的一个曲面, 该曲面把 n 维空间分成安全区和失效区两部分, 见

图 1。

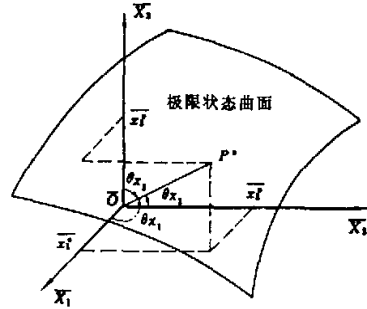


图 1 三个正态随机变量时的极限状态曲面与设计验算点

引入标准化正态变量 $\bar{X}_i = \frac{X_i - \mu_{X_i}}{\sigma_{X_i}} (i=1, 2, \dots, n)$ (2)

则极限状态方程(1)在 $\bar{O}\bar{X}_1\bar{X}_2 \dots \bar{X}_n$ 中表达为:
 $Z = g(\bar{X}_1\sigma_{X_1} + \mu_{X_1}, \bar{X}_2\sigma_{X_2} + \mu_{X_2}, \dots, \bar{X}_n\sigma_{X_n} + \mu_{X_n}) = 0$ (3)

对于方程(3), 可靠度指标 β 是标准正态空间坐标系 $\bar{O}\bar{X}_1\bar{X}_2 \dots \bar{X}_n$ 中原点 \bar{O} 到极限状态曲面的最短距离, 即 P^* 点沿其极限状态曲面的切平面的法线至原点 \bar{O} 的长度, 法线的垂足 P^* 为“设计验算点”。

极限状态曲面在 P^* 点的法线 $\bar{O}P^*$ 对坐标向量的方向余弦为:

$$\cos \theta_{X_i} = \cos \theta_{X_i} = \frac{-\frac{\partial g}{\partial \bar{X}_i} \Big|_{P^*} \sigma_{X_i}}{\left[\sum_{i=1}^n \left(-\frac{\partial g}{\partial \bar{X}_i} \Big|_{P^*} \sigma_{X_i} \right)^2 \right]^{1/2}} \quad (4)$$

* 收稿日期 2000-11-12 张佰战 研究员 男 1970年10月出生

由方向余弦的定义可知, $\bar{x}_i^* = \bar{O}P^* \cos\theta_{xi} = \beta \cos\theta_{xi}$, 又由于 $\bar{x}_i^* = \frac{x_i^* - \mu_{xi}}{\sigma_{xi}}$, 则得到设计验算点 P^* 在原坐标系 $OX_1X_2 \cdots X_n$ 的坐标:

$$x_i^* = \mu_{xi} + \beta \sigma_{xi} \cos\theta_{xi} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

式中 μ_{xi}, σ_{xi} 为基本随机变量 X_i 的均值和标准差。

因 P^* 是极限状态曲面上的点, 自然满足方程 (1), 即

$$g(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) = 0 \quad (6)$$

由公式 (4)~(6), 可联立求解可靠度指标 β 和验算点坐标 x_i^* , 从而可确定相应的失效概率 $P_f = \phi(-\beta)$ 。

3 桥渡冲刷可靠计算

3.1 计算模型

根据可靠度理论, 极限状态方程包含荷载效应和抗力作用两部分。在桥渡冲刷可靠度计算中, 以冲刷作用代表荷载效应 S , 以桥墩埋设深度 (h_R) 代表抗冲刷能力 R 。桥渡冲刷分为一般冲刷 (h_p) 和桥墩局部冲刷 (h_b), 它与水流因素和河床组成参数等有关, 是一个随机变量, 其概率密度具有正态分布特征。抗冲刷能力也是一个随机变量, 受冲刷作用和有效工作时间等因素的影响。参照结构工程的经验, 抗力常按对数正态分布处理, 因此, 桥渡抗冲刷能力也按对数正态分布处理^[2]。为了叙写方便, 用 R 表示抗冲刷能力, S_p 表示一般冲刷能力, S_b 表示局部冲刷能力, 其极限状态方程为:

$$Z = R - S_p - S_b = 0 \quad (7)$$

由于 R 为对数正态分布, 则 $r = \ln R$ 服从正态分布, 因此可直接用 r 的平均值代替 R 的平均值, 但是, 极限正态方程中的 R 应改为 $\exp(r)$, 此时 r 的平均值和标准差为:

$$\mu_{\ln R} = \ln \left(\frac{\mu_R}{\sqrt{1 + \delta_R^2}} \right) \quad (8)$$

$$\sigma_{\ln R} = \sqrt{\ln(1 + \delta_R^2)} \quad (9)$$

式中 δ 为变异系数。

由方程 (8) (9) 可得 R 当量正态分布的均值和标准差为:

$$\mu_R = R^* (1 - \ln R^* + \mu_{\ln R}) \quad (10)$$

$$\sigma_R = R^* \sigma_{\ln R} \quad (11)$$

由式 (4) 可得:

$$-\frac{\partial g}{\partial R^*} \Big|_{P^*} \sigma_R = \sigma_R, \quad -\frac{\partial g}{\partial S_p^*} \Big|_{P^*} \sigma_{S_p} = \sigma_{S_p},$$

$$-\frac{\partial g}{\partial S_b^*} \Big|_{P^*} \sigma_{S_b} = \sigma_{S_b}$$

则验算点 P^* 的方向余弦为:

$$\cos\theta_R = \frac{-\sigma_R}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_{S_p}^2 + \sigma_{S_b}^2}} \quad (12)$$

$$\cos\theta_{S_p} = \frac{\sigma_{S_p}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_{S_p}^2 + \sigma_{S_b}^2}} \quad (13)$$

$$\cos\theta_{S_b} = \frac{\sigma_{S_b}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_{S_p}^2 + \sigma_{S_b}^2}} \quad (14)$$

由式 (5) 可得:

$$R^* = \mu_R + \beta \sigma_R \cos\theta_R \quad (15)$$

$$S_p^* = \mu_{S_p} + \beta \sigma_{S_p} \cos\theta_{S_p} \quad (16)$$

$$S_b^* = \mu_{S_b} + \beta \sigma_{S_b} \cos\theta_{S_b} \quad (17)$$

R^*, S_p^*, S_b^* 应满足

$$R^* - S_p^* - S_b^* = 0 \quad (18)$$

将式 (15)~(17) 代入 (3) 式得:

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_{S_p} - \mu_{S_b}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_{S_p}^2 + \sigma_{S_b}^2}} \quad (19)$$

根据式 (15)~(19), 先假定 R^* (要满足 $R^* > (\mu_{S_p} + \mu_{S_b})$), 进行迭代计算, 直到求出的 R^* 与假定的 R^* 相等且满足 $R^* - S_p^* - S_b^* = 0$ 迭代停止, 此时得到的可靠度指标 β 即为所求。

3.2 统计参数的确定

由上述计算模型可知, 要求解可靠度指标 β , 需知道冲刷能力和抗冲刷能力的均值和标准差。其中抗冲刷能力的均值可根据设计条件确定, 即桥墩埋设深度 h_R 。而冲刷能力中的一般冲刷深度 h_p 和局部冲刷深度 h_b 的均值很难通过天然实测资料的统计分析获得, 现阶段可根据规范公式^[3]计算。

3.2.1 一般冲刷 h_p 计算公式

$$h_p = \left[\left(\frac{AQ_p}{L} \right) \left(\frac{h_m}{h} \right)^{5/3} \sqrt{E \bar{d}^{1/6}} \right]^{3/5} \quad (20)$$

式中 Q_p 为设计流量; L 为桥孔净宽; $A = (\sqrt{B/h})^{0.15}$ 为单宽流量集中系数, B 和 h 分别为造床流量时河段的平均宽度和平均水深; h_m 为设计断面上桥孔处冲刷前的最大垂线水深; h 为设计断面上桥孔处冲刷前的平均水深; E 为与汛期含沙量有关的参数; \bar{d} 为河床质平均粒径。

3.2.2 局部冲刷 h_b 计算公式

(1) 非粘性土

$$\text{当 } V \leq V_0 \text{ 时, } h_b = k_s k_\eta B_1^{0.6} (V - V_0) \quad (21)$$

$$\text{当 } V > V_0 \text{ 时, } h_b = k_s k_\eta B_1^{0.6} (V_0 - V_0) \left(\frac{V - V_0}{V_0 - V_0} \right)^n \quad (22)$$

式中 K_t 为墩型系数, k_n 为泥沙颗粒的影响系数, $k_n = 0.8 \left(\frac{1}{d^{0.15}} + \frac{1}{d^{0.45}} \right)$, B_1 为桥墩计算宽度, V 为一般冲刷后的垂线平均流速, V_0 为床沙起动流速, 用下式计算:

$$V_0 = 0.246 \left(\frac{h}{d} \right)^{0.14} \sqrt{332 \bar{d} + \frac{10+h}{d^{0.72}}}$$

V_0 为墩前始冲流速, $V_0' = 0.46 \left(\frac{\bar{d}}{B_1} \right)^{0.06} V_0$, 指数 $n = \left(\frac{V_0}{V} \right)^{0.25 \cdot 2^{0.19}}$.

(2) 粘性土壤

$$\text{当 } \frac{h_p}{B_1} < 2.5 \quad h_b = 0.55 k_t B_1^{0.6} h_p^{0.1} I_1 V \quad (23)$$

$$\text{当 } \frac{h_p}{B_1} \geq 2.5 \quad h_b = 0.83 k_t B_1^{0.6} I_1^{2.5} V \quad (24)$$

式中 I_1 为粘土液性指标, 范围在 0.16~1.48 之间。

4 算例

4.1 由统计参数计算可靠度指标

算例 1: 某桥的一般冲刷深度 $h_p = \mu_{S_p} = 4.8$ m, 局部冲刷深度 $h_b = \mu_{S_B} = 6.2$ m, 桥墩埋设深度 $h_R = \mu_R = 15$ m, 变异系数 $\delta_{S_p} = 0.15$, $\delta_{S_B} = 0.14$, $\delta_R = 0.07$, 计算该桥可靠度指标 β 以及风险概率 P_f 。

计算如下:

$$\sigma_{S_p} = \mu_{S_p} \delta_{S_p} = 4.8 \times 0.15 = 0.72$$

$$\sigma_{S_B} = \mu_{S_B} \delta_{S_B} = 6.2 \times 0.14 = 0.868$$

$$\mu_{\ln R} = \ln \left[\frac{\mu_R}{\sqrt{1 + \delta_R^2}} \right] = 2.706,$$

$$\sigma_{\ln R} = \sqrt{\ln(1 + \delta_R^2)} = 0.0699$$

由式(10)(11)得:

$$\mu_R = R^* (1 - \ln R^* + \mu_{\ln R}) = R^* (3.706 - \ln R^*)$$

$$\mu_R = R^* \sigma_{\ln R} = 0.0699 R^*$$

由式(19)得:

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_{S_p} - \mu_{S_B}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_{S_p}^2 + \sigma_{S_B}^2}}$$

由式(12)~式(14)得:

$$\cos \theta_R = \frac{-\sigma_R}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_{S_p}^2 + \sigma_{S_B}^2}}, \cos \theta_{S_p} = \frac{\sigma_{S_p}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_{S_p}^2 + \sigma_{S_B}^2}}$$

$$\cos \theta_{S_B} = \frac{\sigma_{S_B}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_{S_p}^2 + \sigma_{S_B}^2}}$$

由式(15)~(17)得:

$$R^* = \mu_R + \beta \sigma_R \cos \theta_R, S_p^* = \mu_{S_p} + \beta \sigma_{S_p} \cos \theta_{S_p},$$

$$S_B^* = \mu_{S_B} + \beta \sigma_{S_B} \cos \theta_{S_B}$$

按式(18), 较核 $R^* - S_p^* - S_B^* = 0$ 。

需用迭代法进行计算(见表 1)。

由计算结果看, 当第三次迭代后, R^* 的计算值与初值仅相差 0.002, 第三次计算的 β 与第二次的相等, 且基本满足 $R^* - S_p^* - S_B^* = 0$, 故不再迭代, 此时可靠度指标 $\beta = 2.650$, 相应的该桥冲刷风险概率 $P_f = 4 \times 10^{-3}$ 。

表 1 某桥冲刷风险计算

迭代次数	R^*	σ_R	μ_R	$\cos \theta_R$	$\cos \theta_{S_p}$	$\cos \theta_{S_B}$
1	12.000	0.839	14.653	-0.597	0.512	0.617
2	13.352	0.933	14.879	-0.637	0.492	0.593
3	13.304	0.930	14.873	-0.636	0.493	0.594
迭代次数	β	R^*	S_p^*	S_B^*	$S_p^* + S_B^*$	
1	2.598	13.352	5.758	7.591	13.349	
2	2.650	13.304	5.739	7.564	13.303	
3	2.650	13.306	5.741	7.566	13.307	

4.2 由目标可靠度指标计算设计参数

算例 2: 某桥的一般冲刷深度 $h_p = \mu_{S_p} = 4.5$ m, 局部冲刷深度 $h_b = \mu_{S_B} = 3.4$ m, 变异系数 $\delta_{S_p} = 0.13$, $\delta_{S_B} = 0.11$, $\delta_R = 0.08$, 计算该桥在目标可靠度指标 $\beta_T = 3.2$ 时的桥墩设计埋设深度 $h_R = \mu_R$ 。

计算如下:

$$\sigma_{S_p} = \mu_{S_p} \delta_{S_p} = 4.5 \times 0.13 = 0.585$$

$$\sigma_{S_B} = \mu_{S_B} \delta_{S_B} = 3.4 \times 0.11 = 0.374$$

$$\mu_R = R^* (1 - \ln R^* + \mu_{\ln R})$$

$$= R^* (0.9968 + \ln R^* + \ln \mu_R)$$

$$\sigma_R = R^* \sigma_{\ln R} = 0.0799 R^*$$

$$\beta_T = \frac{\mu_R - \mu_{S_p} - \mu_{S_B}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_{S_p}^2 + \sigma_{S_B}^2}} = \frac{R^* (0.9968 - \ln R^* + \ln \mu_R) - 7.9}{\sqrt{0.00638 R^{*2} + 0.4821}} = 3.2 \quad (25)$$

$$R^* = \mu_R + \beta \sigma_R \cos \theta_R$$

$$= R^* (0.9968 - \ln R^* + \ln \mu_R) -$$

$$\frac{0.02043 R^{*2}}{\sqrt{0.00638 R^{*2} + 0.4821}} \quad (26)$$

方程(25)和(26)中未知量只有 R^* 和 μ_R , 故可求解。最后求得 $R^* = 9.407$, $\mu_R = 11.39$, 则满足目标可靠度指标 $\beta_T = 3.2$ 时的桥墩设计埋设深度 $h_R = \mu_R = 11.39$ m。

5 结束语

桥渡冲刷的随机影响因素很多、很复杂, 给桥渡冲刷风险计算造成很大难度。但在获得各随机量的统计参数后, 桥渡冲刷风险采用可靠度理论进行分析和计

(下转第 49 页)

制架时间仅 40 min)。最快一天能完成一跨箱梁的制架,一般为 1.5 d 完成一个制、运、架的循环。

5 体会

(1)先张法预应力混凝土箱梁同后张法预应力箱梁比较具有制造工期短、占地少、模具少等许多优点。可减少制梁台座,取消存梁台座,不需提梁机等,梁场建设和施工费用较省。

(2)箱梁腹板内预留后期张拉用的管道,以备今后有补强或提速要求时施加预应力,增加箱梁的强度。

(3)预制箱梁在支座相应的位置预留支座凹型套孔,方便架梁的施工操作,并减少底模的加工量和便于箱梁脱离底模。

(4)箱梁中心线位置设备排水孔,然后通过管道将

桥面积水从空心墩腹内排出的设计方案,避免桥面积水污染桥梁外侧,并增加了桥的美观,改善了环境。

(5)箱梁桥台、桥墩的设计,使工作人员方便地从桥台进入箱梁,从箱梁中通往桥墩顶,便于检查维修,桥墩设有围栏、吊栏,便于墩顶施工。

(6)梁的设计中,电力接触网基础设置在上翼缘的中部,减少受力,不影响箱梁的外形,箱梁外侧不变截面,使梁的外型美观。

(7)采用一套固定式侧模,保证了所有制出梁的外型尺寸一致,从而也便于架梁质量的控制,为下一步桥面系施工提供有利条件。

(8)运用这一套生产形式使用工作人员少,生产效率高。

INTRODUCTION ON MANUFACTURE AND ERECTION OF BOX BEAMS FOR BRIDGES ON HIGH SPEED RAILWAY IN KOREA

WANG Jian-gang, LIU Jian-ting, ZHANG Yong-qiang

China Railway Engineering General Corporation

Abstract: The general situation of the design of box beams for bridges on high speed railway in Korea are introduced, as well as the precasting of the box beam, its transportation and erection. The personal understandings concerned with the design and construction of the box beams are also described by the authors.

Keywords: high speed railway in Korea; box beam; bridge manufacture; bridge erection

(上接第 52 页)

算是可行的。而且如果统计参数(均值和标准差)准确的话,计算结果也会达到较高的精度,对桥渡设计将具有重要的参考价值。此外,通过实例证明,验算点法计算桥渡冲刷风险,虽然计算过程需要迭代,但由于验算点法收敛快,一般迭代 2~3 次即可达到精度要求,因此实际计算量并不很大,如通过简单的计算程序采用计算机运算,则更加方便。

参考文献

- [1] 赵国藩. 工程结构可靠性理论与应用[M]. 大连理工大学出版社, 1996-10. 33-55.
- [2] 张佰战, 等. 平原铁路洪水灾势的分析方法[A]. 城市与工程减灾基础研究论文集[C]. 中国科学技术出版社, 1996. 237-245.
- [3] 中华人民共和国铁道部. 铁路桥渡勘测设计规范[S]. 中国铁道出版社, 1993-08. 40-44.

RELIABILITY CALCULATION OF BRIDGE-CROSSING SCOUR WITH CHECKING POINT METHOD

ZHANG Bai-zhan, WANG Qun

Railway Architectural Engineering Research Institute of CARS

Abstract: Based on the theory of bridge-crossing scour, the reliability calculation model is established with checking point method, and the model is tested by the sample bridge-crossing.

Keywords: bridge-crossing scour; reliability; checking point method

桥渡冲刷可靠度计算

作者: [张佰战](#), [王群](#)
作者单位: [铁道科学研究院铁道建筑研究所](#)
刊名: [铁道工程学报](#) 
英文刊名: [JOURNAL OF RAILWAY ENGINEERING SOCIETY](#)
年, 卷(期): 2001(1)
被引用次数: 1次

参考文献(3条)

1. [赵国藩](#) [工程结构可靠性理论与应用](#) 1996
2. [张佰战](#) [平原铁路洪水灾势的分析方法](#)[会议论文] 1996
3. [中华人民共和国铁道部](#) [铁路桥渡勘测设计规范](#) 1993

本文读者也读过(10条)

1. [吴晨霞](#) [山区高速公路桥位选择的原则和方法](#)[期刊论文]-[交通世界\(建养机械\)](#) 2009(2)
2. [任颖](#). [REN Ying](#) [浅谈山区高速公路桥位选择](#)[期刊论文]-[科技情报开发与经济](#)2007, 17(16)
3. [冯晖](#). [杨成斌](#). [王章虎](#). [FENG Hui](#). [YANG Cheng-bin](#). [WANG Zhang-hu](#) [模糊综合评判法选择桥位](#)[期刊论文]-[工程与建设](#)2006, 20(3)
4. [李青善](#) [浅析桥位选择](#)[期刊论文]-[青海交通科技](#)2010(1)
5. [骆超杰](#) [浅析桥梁设计中桥位及安全耐久性的问题](#)[期刊论文]-[科技资讯](#)2009(13)
6. [梁绍江](#) [浅探合理进行河流桥位设计](#)[期刊论文]-[科技创新导报](#)2008(25)
7. [胡守增](#) [桥渡冲刷的现状 & 简评](#)[期刊论文]-[四川建筑](#)2008, 28(4)
8. [包晓梅](#) [大、中桥桥位设计的合理化](#)[期刊论文]-[交通世界\(建养机械\)](#) 2009(2)
9. [贾宏伟](#). [JIA Hong-wei](#) [山区高速公路桥型选择与设计](#)[期刊论文]-[山西建筑](#)2009, 35(34)
10. [周悦波](#). [Zhou Yuebo](#) [辽宁省滨海公路辽河特大桥桥位及路线方案的选择](#)[期刊论文]-[辽宁省交通高等专科学校学报](#)2008, 10(6)

引证文献(1条)

1. [程永舟](#). [胡旭跃](#). [沈小雄](#) [建筑物基础冲刷深度的可靠性分析](#)[期刊论文]-[长沙交通学院学报](#) 2004(3)

引用本文格式: [张佰战](#). [王群](#) [桥渡冲刷可靠度计算](#)[期刊论文]-[铁道工程学报](#) 2001(1)