

冲刷条件下桥梁结构动力性能仿真分析

李一博¹, 彭斌¹, 顾蓉柳¹, 郑伟², 王超¹

(1. 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093;

2. Jackson State University, Department of Civil and Environmental Engineering, Jackson, MS 39217 - 0168, USA)

摘要: 水流冲刷造成的桥梁损毁会给人类带来重大的经济损失和人员伤亡。冲刷对桥梁安全性的影响,可以通过分析冲刷条件下桥梁动力性能的变化来进行评价。本文将从冲刷深度和冲刷所造成的桥梁基础截面损失两个方面,分析水流冲刷对桥梁动力性能的影响。在总结已有的模型分析方法的基础之上,提出本文的有限元建模思路。并以密西西比河上被冲毁的33号公路桥为例,通过SAP2000软件建立有限元模型并进行模态分析,得到冲刷条件与桥梁动力性能之间的关系。

关键词: 冲刷; 结构动力性能; 仿真; 桥梁

中图分类号: TV312

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2013)01-0084-05

Simulation analysis of dynamic properties of bridge structure in the condition of scour

LI Yibo¹, PENG Bin¹, GU Rongliu¹, ZHENG Wei², WANG Chao¹

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Department of Civil and Environmental Engineering, Jackson State University, Jackson, MS 39217 - 0168, USA)

Abstract: Scour has caused huge economic loss and casualties in human history by making bridges failed. The influence of scour on security of bridges may be assessed by analysing the variance of dynamic properties of bridges. This article analyzes the influence of scour on dynamic properties of bridges from two aspects of scour depth and area loss. Based on reviewing existing analytical methods of model, a finite element model is used to analyze the relationship between scour and dynamic properties of an existing failed bridge called MS HWY 33 bridge.

Key words: scour; dynamic properties of bridge structure; simulation; bridge

1 概述

冲刷是桥梁破坏的主要因素之一。因为流水可以带走桥基处的泥沙,使桥基变浅,进而造成桥基位移破坏或者桥梁的倾斜。流水中携带的泥沙、石块等,还会对桥梁的水下结构造成削蚀作用。使桥梁上部结构与下部结构的连接减弱。流水还可以造成的桥梁基础埋深减小,和桥梁水下结构截面的削蚀,又会对桥梁的质量、刚度造成影响,进而改变桥梁的动力性能。而改变了动力性能的桥梁在合适的条件下,又有可能因外激力,如风、水流、地震波、爆破等等,而引发共振破坏。

据 Shirhole 和 Holt 的调查统计,美国 20 世纪 60 年代到 80 年代,近 30 年的时间里,发生的 1000 项

桥梁倒塌事故中,有 60% 是由于流水冲刷对桥梁基础的破坏造成的^[1]。而 Chang. F. M. 的研究显示,在调查的 383 项由洪水引发的桥梁事故当中,有 25% 是由于桥墩破坏造成的,有 72% 是由桥台破坏造成的^[2]。由此可见研究水流冲刷对桥梁动力性能的影响是十分有意义的。本文将以前美国密西西比州已被冲毁的 33 号公路桥(图 1)为例,通过仿真分析,探讨水流冲刷对桥梁动力性能的影响。图 2 为密西西比河 33 号公路桥示意图。

Foti 和 Sabia 曾经对意大利都灵的一座五跨简支桥的修复前后分别进行过动力性能测试^[3]。该桥由于年久失修加上 2000 年的一场洪水,使得桥梁的基础埋深大大减小。2004 年对该桥的修复使得该桥的基础埋深得到恢复。其对桥梁在基础埋深修

收稿日期:2012-09-03; 修回日期:2012-10-08

基金项目:上海理工大学创新基金支持项目(JWCXSL1102);上海理工大学国家级项目培育计划项目(12XGQ06);美国交通研究委员会(Transportation Research Board, TRB)资助项目(DTRT06-G-0049)

作者简介:李一博(1984-),男,黑龙江人,在读硕士研究生,主要研究方向为结构振动仿真。

通讯作者:彭斌(1977-),男,广东人,副研究员,从事结构工程仿真和历史建筑检测与保护的研究。

复前后的对比,从一个侧面证明了水流冲刷对桥梁动力性能的影响。

在此之前,有许多的研究人员对桥梁基础在水流冲刷下的动力反应做过计算机仿真模拟。2001年开发出的一款 COSMOS/M 的有限元分析软件就做过这方面的模拟^[4]。然而,当时由于桥梁和桥梁基础的许多相关数据不足,该软件并没能进行比较精确的模拟。但却为计算机应用有限元方法对桥梁动力性能进行仿真指出了新的方向。

Deger 等人用 300 个单元建立了一个单跨混凝土拱桥的有限元模型,并通过线性分析采用受迫振动的方式,模拟了该模型振动,并求出前七阶振型和频率^[5]。

Charles 和 Tomas 建立过一个三跨简支梁桥的有限元模型,并用于分析桥的动力特性^[6]。但该模型中没有设计加劲肋,也没有考虑到土体对于桥梁



图 1 冲毁的密西西比州 33 号公路桥

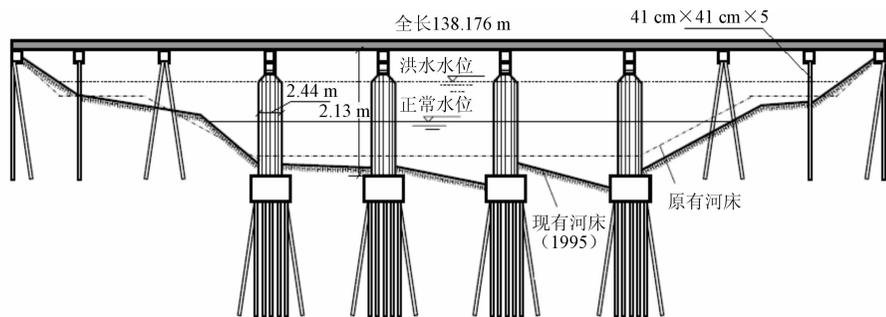


图 2 密西西比河 33 号公路桥示意图

2 冲刷对桥梁结构动力性能的影响

由周期公式 $\omega_0^2 = k/m$ 可知,当振动物体的质量越大的时候,它的自振频率就会越小;而当质量物体所连接的弹性体刚度越大的时候,它的自振频率就会越大。水流的冲刷一方面可以水流的携带能力和对桥梁基础的刨蚀作用,将桥梁基础的泥沙带走,使得桥梁基础埋深减少。另一方面,又可由于水流中夹带的泥沙、石块在接近桥梁基础时与其发生碰撞,进而产生对桥梁基础的削蚀作用,从而使桥梁基础截面发生损失。这些都会给桥梁的动力性能带来影响。

2.1 冲刷深度与桥梁结构动力性能的关系

水流带走桥梁基础处的泥沙,使得桥梁埋深减少。以桩基础桥梁为例,在不考虑土体变形的情况下,可以将基础埋置面以上的桥梁简化为振动质点。那么,新裸露出来的部分基础,包括承台和桩的质量,将加入到质点振动当中。从而增大了振动时的质量 m ,进而使得桥梁的自振频率有所减小。

结构的影响。

叶爱君、张喜刚通过两质点模型模拟桥墩和桥台的振动规律,肯定了墩台质量对桥梁的动力性能影响不可忽略^[7]。并通过有限元模拟了苏通大桥。其中,主梁、塔、边墩用梁单元模拟,考虑恒载轴力引起的几何刚度的影响,主梁节点和斜拉索吊点主从相连;斜拉索用桁架单元模拟,但考虑垂度效应和恒载引起的几何刚度的影响;主梁与主塔纵向相对自由,横向主从;主梁与边墩纵向相对自由,横向主从。模拟结果肯定了冲刷深度对桥梁的动力性能是有影响的。

这些工作都为本文的摸索提供了借鉴和指导。此外还有许多学者曾经在有限元桥梁动力性能模拟方面,做过各种尝试。本文将在这些研究的基础之上,通过对桥梁自身损伤及外部环境的变化对桥梁的影响进行分析,揭示车载、水流冲刷、截面变化等条件下桥梁动力性能的变化特点。

另一方面,考虑土体变形的情况,那么基础埋置面处结点不再固结,而是在土体与基础相互作用下,存在位移。那么当基础埋深减小时,土体对基础的维持作用减小,即可认为,与质点连接的弹性杆的刚度 k 减小了。从而使得桥梁的自振频率减小,自振周期增大。可见不论从质量、还是从刚度上考虑。冲刷深度的增加都会使桥梁的自振周期增大。这就会使得桥梁的自振周期向风振、水流冲击、车振等外激力的周期靠近。在条件合适的情况下,有可能引起桥梁的共振,进而造成破坏。而冲刷有可能会达到数米,这就在很大程度上会影响桥梁的动力特性^[8]。

2.2 基础截面损失与桥梁结构动力性能的关系

由于长时间浸泡在水中,水中的化学成分本身就会对桥梁下部结构形成一定的腐蚀。再加上水流中常夹带有石块、砂砾等杂物,伴随着水流的冲击,作用在桥墩以及因冲刷而裸露出的桥梁基础上,造成桥梁下部结构截面损失。这种截面损失,一方面可以使桥梁下部结构作用于振动的质量减少,从而使振动频率略有上升;但另一方面,由于水流局部冲

刷的作用,这种对桥梁下部结构的冲刷作用更多地作用在桥梁基础埋置面位置附近。此处的截面损失,就会使得桥梁所埋置的基础与桥梁之间的连接减弱,即连接的刚度降低,从而使桥梁的振动频率上升。而这种变化造成的桥梁的动力特性上的改变,对桥梁是有害的。

3 仿真分析

3.1 有限元模型

密西西比河 33 号公路桥主桥部分为一座九跨简支箱梁桥。中间三跨由四个主墩支撑,主墩为直径 2.44 m 圆形截面混凝土墩。两边各三跨共由四排辅助墩支撑,每排辅助由五根 0.41m 乘以 0.41m 的方形截面混凝土墩组成。该桥全长 138.176 m,主墩高 2.13 m。通过 SAP2000 软件,对密西西比河 33 号公路桥进行有限元建模。考虑到实体单元(solid)在模拟三维结构和实体中的优势,故在本模型中,桥面板、桥面板下混凝土箱梁及混凝土承台均采用八节点实体单元。其中每个承台单元长 1.3 m,桥面板和桥箱梁单元每个单元长 2.459 m。将桥横梁、桥墩进行线性简化后,便可以用杆单元(frame)对横梁、桥墩以及

桩基进行模拟了。桥下支撑采用弹簧单元(link)。另外,在桩基上每隔 0.254 m 设一节点,在节点处布置弹簧单元来模拟土体对桥梁的作用,每根桩设置 40 个节点。这样便可以利用地基的反力系数乘以相应节点的有效面积作为地基的线弹性支撑刚度。桩基末端采用固定支座。各材料属性均按实际材料属性设定。该模型有 45870 个自由度。建立模型如图 3 所示。其中,所有的混凝土构件统一设定为 $2.486 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ 的弹性模量,泊松比取为 0.2;而钢材的弹性模量取 $2.0 \times 10^8 \text{ N/m}^2$,泊松比取为 0.3。

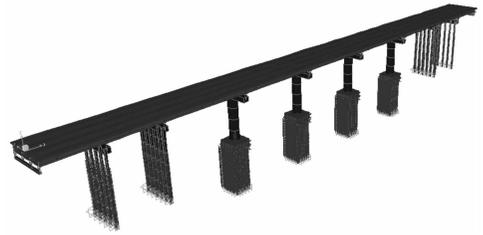


图3 密西西比河 33 号公路桥有限元模型图

3.2 分析结果

对该桥模型进行模态分析,并比较在不同冲刷条件下该模型的动力特性反应情况,图 4 是该桥在无冲刷条件下的前四阶振型。

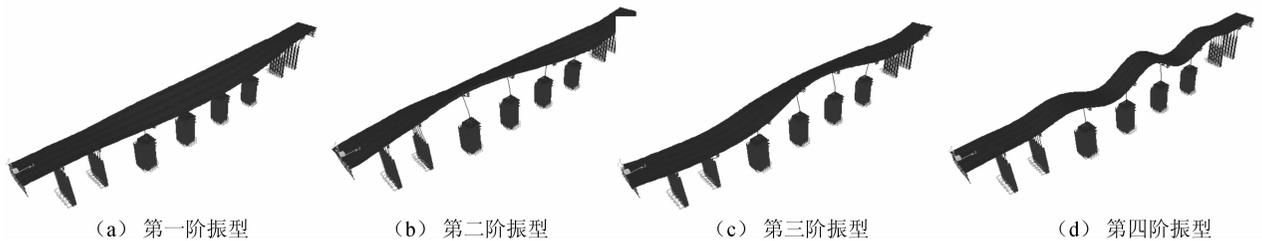


图4 无冲刷条件下前四阶振型

3.2.1 不同的冲刷条件对桥梁动力性能的影响

通过去掉各桩节点处的弹簧单元,来模拟桥梁被冲刷的效果。去掉从各承台底部向下各桩的 10 个节点处的弹簧单元来模拟 1/4 桩被冲刷至裸露的效果;去掉从各承台底部向下各桩的 20 个节点处的弹簧单元来模拟 1/2 桩被冲刷至裸露的效果。并分别做模态分析。分析结果显示,在冲刷发生的情况下,前四阶振型与未冲刷时的振型非常相似。说明冲刷的发生对桥梁振型影响不大,即冲刷的发生对该桥整体的刚度分布情况影响不大。比较未冲刷、冲刷至 1/4 桩裸露和冲刷至 1/2 桩裸露时三种的状态的自振频率和自振周期。冲刷发生初期,对于桥梁动力特性影响比较大。由于土体被冲走,桩土混合作用效果减弱,桩土联合刚度减小,以致从冲刷发生到冲刷至 1/4 桩裸露时,自振频率下降较快,从 2.5 Hz 下降到 1.4 Hz,相应的自振周期从 0.4 s 上升至 0.7

s。冲刷继续进行,自振频率下降就没有初期那么明显了,从冲刷至 1/4 桩裸露到冲刷至 1/2 桩裸露,自振频率从 1.4 Hz 下降到 1.3 Hz,同时,自振周期上升到 0.8 s。图 5 所示的是三种情况下桥梁一阶自振频率的变化曲线。图 6 所示的是三种情况下桥梁各阶自振频率的变化曲线。从图 6 还可以看出,冲刷初期影响比较大的是第一阶和第二阶的自振周期,继续冲刷影响到的是后面几阶的自振周期。可见实验结果与理论预期非常吻合。

3.2.2 不同的基础形式对桥梁动力性能的影响

通过在桥梁桩基的底部、二分之一桩长处和承台基础底部加入固端约束来分别模拟长桩、半长桩和浅基础的基础形式。并去掉新加固端约束以下部分,表示桩基的弹簧单元。对各模型进行模态分析。得到结果如图 7 所示。从图中可以看出全桩未冲刷情况、半长桩未冲刷情况、浅基础未冲刷情况的自振频率曲线几乎

重合。再将半长桩未冲刷情况与 1/2 桩长裸露的全桩情况进行对比。发现,1/2 桩长裸露的全桩的自振

频率远小于半长桩未冲刷情况的自振频率。

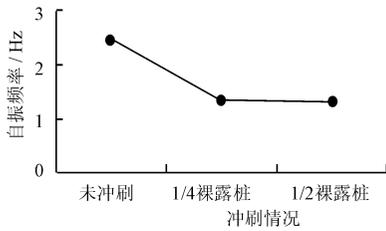


图 5 各冲刷条件下桥梁一阶自振频率变化曲线

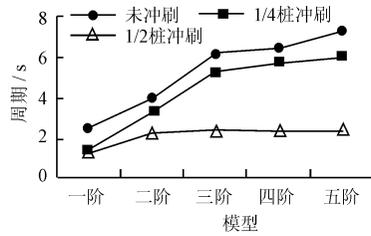
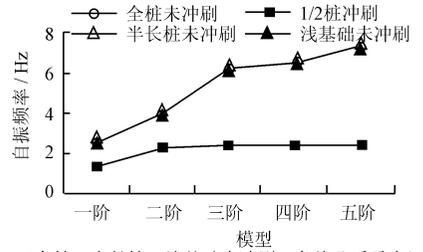


图 6 不同冲刷条件下桥梁各阶自振周期变化曲线



(全桩、半长桩、浅基础未冲刷三条线几乎重合)

图 7 不同基础形式下桥梁自振频率变化曲线

以上结果说明,桩基础的形式对于桥梁的动力特性的影响不明显。虽然这也会影响到桥梁与周围环境接触的刚度以及桥梁振动的质量。但产生变化的桩长所包含的质量与整桥相比,它对桥梁动力性能的影响可以忽略。这就说明对桥梁动力性能产生较大影响的是桥梁上部结构。而将 1/2 桩长裸露的全桩基础与半长桩未裸露的桩基础进行比较的过程中,可以发现,后者的刚度要大于前者。这个结果,一方面是将桩基末端假设成为纯固端所致;另一方面是由于桩长变短,导致桩端水平侧移刚度增大所致。

3.2.3 不同的地基土条件对桥梁动力性能的影响

本实验中通过对桥梁基础的节点施加弹簧约束来模拟土体对桥基础的约束作用。弹簧单元的刚度依据实测各种土在各深度处所表现出的土体刚度进行简化模拟。本实验中共选取三种土体:粘土、石灰岩和砂土。各种土又依其埋深的不同,分别选取浅层、中层和深层三个有代表性的土体刚度,见表 1。

表 1 各种土在不同深度处的刚度 MPa

| | 深层 | 中层 | 浅层 |
|-----|---------|--------|--------|
| 粘土 | 48.0 | 36.5 | 8.0 |
| 石灰岩 | 2274.8 | 3045.9 | 3448.0 |
| 砂土 | 11414.9 | 6849.0 | 2019.8 |

表 2 各种土体形式下桥梁的自振频率 Hz

| 振型 | 一阶 | 二阶 | 三阶 | 四阶 | 五阶 |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|
| 粘土 | 2.4733 | 3.9499 | 6.1462 | 6.4034 | 7.2495 |
| 石灰岩 | 2.4781 | 3.9560 | 6.1494 | 6.4132 | 7.2838 |
| 砂土 | 2.4783 | 3.9562 | 6.1495 | 6.4135 | 7.2849 |

对各模型做模态分析,得到结果如表 2 所示。从表中可以清楚看到,三种土体形式下桥梁的一阶自振频率均约为 2.5 Hz。而各阶不同土体的自振频率也是相当接近。由此可以看出土体对桥梁动力性能影响不大。

3.2.4 不同的水位对桥梁动力性能的影响 水在桥梁墩台处的流动以力的形式作用在桥梁下部结构上。故而本论文中,将水对桥梁的作用力简化模拟成为集中力作用。并分别模拟不同水位作用在桥梁上时,对桥梁动力性能的影响。分别以不同大小和不同作用位置的集中外力来模拟不同的水位作用。其中,水的作用力:

$$F_w = KA(\gamma v^2/2g) \tag{1}$$

式中: F_w 为流水压力,kN; v 为河水的平均流速,m/s; K 为桥墩的形状系数,圆形桥墩取 0.8; A 为桥墩的阻水面积, m^2 ; γ 为水的重力密度, kN/m^3)^[9]。

假设河流的 3 种不同的水位分别为高水位(水深 11.3 m)、中水位(水深 6 m)和低水位(水深 2 m)。合力作用点取在水面以下 0.3 倍水深的位置。

$$\text{河流流速计算公式: } v = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} \sqrt{i} \tag{2}$$

式中: i 为河底坡度; n 为河道的粗糙系数; R 为水力半径,m。又有 $R = A/\chi$,其中, A 为过水断面, m^2 ; χ 为湿周,m。

河流的常年平均流速按 3 m/s 计算,得到 3 个水位的集中作用力分别为:3243.3 kN(高水位)、1179.8 kN(中水位)和 103.2 kN(低水位)。并在 SAP2000 的模型中以集中外力的方式体现。

通过 SAP2000 软件,对模型进行模态分析,得到 3 种水位模型的桥梁一阶自振频率均约为 2.5 Hz,详见表 3。从表中可以清楚地发现,不同水位下桥梁的自振频率相差不大。这说明水位的变化对桥梁动力性能影响不大。

表 3 各水位下桥梁的自振频率 Hz

| 振型 | 一阶 | 二阶 | 三阶 | 四阶 | 五阶 |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| 高水位 | 2.473 | 3.950 | 6.146 | 6.403 | 7.250 |
| 中水位 | 2.479 | 3.948 | 6.146 | 6.414 | 7.287 |
| 低水位 | 2.479 | 3.943 | 6.143 | 6.468 | 7.256 |

3.2.5 不同的流速对桥梁动力性能的影响 按前文所述的方法,模拟不同流速下,水流对桥梁墩台的外力作用。均选用中水位模型分别模拟低流速(1 m/s)、中流速(3 m/s)和高流速(5 m/s)的情况。最终通过计算得到的水流外力作用分别为393.3 kN(低流速)、1179.8 kN(中流速)、1966.3 kN(高流速)。对3种模型分别进行模态分析,得到结果如表4所示。可见,各流速下桥梁的自振周期完全相等。说明水流流速对桥梁动力性能没有影响。

表4 各流速下桥梁的自振周期 s

| 振型 | 一阶 | 二阶 | 三阶 | 四阶 | 五阶 |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| 低流速 | 0.404 | 0.253 | 0.163 | 0.156 | 0.137 |
| 中流速 | 0.404 | 0.253 | 0.163 | 0.156 | 0.137 |
| 高流速 | 0.404 | 0.253 | 0.163 | 0.156 | 0.137 |

3.2.6 不同的车载情况对桥梁动力性能的影响 在原模型基础上,在桥面的实体单元节点的位置施加恒荷载来模拟桥面上的车量荷载。并根据所施加的车量荷载的密度来区分满荷载、半荷载和少荷载的情况。其中每个实体单元延桥长方向的长度为3 m,而每个施加的模拟车量的集中荷载为550 kN。满荷载时,每个实体单元节点都施加荷载;半荷载时,延桥长方向每隔一个实体单元节点设置一处荷载;少荷载时,每隔3个实体单元节点设置一处荷载。并对3个模型分别进行模态分析。得到的结果如表5所示。从表5中可以看出3种情况下,桥梁的自振周期其基本相同。虽然在自振分析的时候,车量的质量会被纳入到进桥梁的动力性能的计算。但是车量荷载所代表的质量与整桥质量相比,差距太大,所占比例很小,很难对计算结果产生明显的影响。因而可以认为车量荷载对桥梁动力性能的影响忽略不计。

表5 车辆荷载的作用情况下桥梁的自振周期 s

| 振型 | 一阶 | 二阶 | 三阶 | 四阶 | 五阶 |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|
| 满载 | 0.407 | 0.254 | 0.163 | 0.156 | 0.137 |
| 半载 | 0.406 | 0.254 | 0.163 | 0.156 | 0.137 |
| 少载 | 0.405 | 0.253 | 0.163 | 0.156 | 0.137 |

4 结 语

本文首先在理论上讨论了冲刷对桥梁动力性能的影响。并在回顾已有有限元分析方法的基础上,以密西西比河上的33号公路桥为例,应用SAP2000软件,建立整桥的有限元模型。通过对不同冲刷条件下的桥梁动力性能的模态仿真分析,获

得了该桥在冲刷条件下的动力特性变化曲线。所得结果证明了前面所做的理论分析。

本文共得到以下几点结论:

(1)冲刷造成桥梁基础埋深减小使得桥梁自振周期上升,自振频率下降。这对于桥梁基础稳定不会造成影响,但是在其它荷载振动形式作用下,比如风振、车载振动等是不利的。

(2)冲刷发生初期桥梁动力特性变化比较明显,变化值较大。且影响较大的是桥梁前两阶的自振周期,冲刷继续进展影响比较大的是后面几阶的自振周期。

(3)桥梁的动力性能只与其自身的质量和刚度有关,与流经水流的速度、水位,地基土形式等这些周围环境因素无关。环境变化对桥梁动力性能变化影响不大;桥梁基础形式和车载耦合作用,因其质量在整桥中所占比例较小,对桥梁动力性能影响不大。

参考文献:

- [1] Deng Lu, Cai C S. Bridge scour: predictin, modeling, monitoring, and countermeasure - review[J]. Pract. Period. Struct. Des. Constr,2010,15(2):125-134.
- [2] Peng B, Zheng W. An alternative approach to detecting scour at bridge foundation[R]. Transportation Research Record No. 111-3012, Transportation Researc Board, National Research Council, Washington, D C,2011.
- [3] Foti S, Sabia D. Influence of foundation scour on the dynamic response of an existing bridge[J]. Journal of Bridge Engineering, ASCE, 2011,16(2):295-304.
- [4] COSMOS/M 2.7 users guide[M]. Structural Research and Analysis Corporation, Santa Monica, California, 2001.
- [5] Deger Y, Cantieni R, Pietrzko S. Modal analysis of an arch bridge: Experiment analysis and link[C]//. 12th International Modal Analysis conference, Honolulu, Hawaii: The Society for Experimental Mechanics, 1994:425-432.
- [6] Charles R Farrar, Thomas A Duffey. Bridge modal properties using simplified finite element analysis[J]. Journal of Bridge Engineering, 1998,3(1):38-46.
- [7] 叶爱君,张喜刚. 河床冲刷深度变化对大型桩基桥梁地震反应的影响[J]. 土木工程学报,2007,40(3):58-62.
- [8] Conaway J S. Modeling and monitoring scour during bridge replacement with multidimensional modeling and repeated multi-beam surveys at the Tanana River near Tok, Alaska[C]//. International Conference on Scour and Erosion, San Francisco, California, U S,2010.
- [9] 中华人民共和国交通部. 公路桥涵设计通用规范(JTG-D60-2004)[S]. 北京:人民交通出版社. 2004.