

深水桥梁桩基承台等效动水附加质量 数值模拟研究^{*}

方玉成, 邓育林, 乔玉博, 郭庆康

(武汉理工大学 交通学院, 湖北 武汉 430063)

摘要: 以某跨江大桥桩基承台为工程背景, 基于有限元软件 ADINA 建立该结构流固耦合数值模型, 借助 ADINA 将流固耦合效应影响转化成结构的附加质量, 从而建立无水模型, 同时按传统 Morison 方程等效建立另外一个无水模型, 对比 3 种数值模型的动力特性, 并对 3 种模型分别加载两个方向的 3 条地震波, 得到模型的地震动响应。结果表明, 文中方法得到的附加质量远小于基于 Morison 方程的附加质量; 文中等效模型的动力特性结果比 Morison 方程等效模型的结果更接近实际流固耦合数值模型的结果; 传统 Morison 方程等效模型的地震响应一般偏于保守, 但有时会小于实际情况; 文中采取的等效方法相对于传统 Morison 方程更接近实际情况下的响应结果, 计算效率也显著提高。

关键词: 桥梁; 桩基承台; 附加质量; 地震响应; 数值模拟

中图分类号: U445.7

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2017)04-0152-05

近些年来跨江、跨海大桥的建设引起了桥梁专家对深水桥梁基础抗震性能的研究, 流固耦合作用下基础的抗震就是其中一个重要方面。20 世纪 30 年代开始就有学者对流固耦合问题进行研究, 1931 年, Westergaard H. M. 提出“附加质量”的概念, 将水下结构的动水压力等效为附加质量的惯性力, 即将与结构耦合的流体转化成结构的附加质量。之后, Morison J. R. 等采用表面光滑、特征尺寸小于水流波长的刚性圆柱体模型推导出 Morison 方程, 该方法假定波浪对结构的作用主要是由未受扰动的波浪加速度场和速度场引起的惯性力和阻力。1939 年, Savage J. L. 基于地震波入射角度模型试验, 分析了基础截面形式对附加质量的影响。2013 年, 叶建借助 ANSYS 软件进行桥墩模态和地震响应计算分析, 结果表明考虑墩-水耦合作用时, 在单向地震激励下数值法的计算结果与 Morison 方程法的计算结果相近, Morison 方程方法相对保守。

1 有限元模型

1.1 势流体模型

1.1.1 势流体数值模型概述

以某深水桥梁桩基承台(深水群桩-承台基础)为研究背景, 利用 ADINA 软件建立图 1 所示流固

耦合模型(下称数值模型 I), 其中承台尺寸为 $18\text{ m} \times 12\text{ m} \times 6\text{ m}$, 下部连接 6 根自由桩长为 10 m 、桩径为 2.5 m 的桩基(见图 2)。为消除水域边界对结构的影响, 拟定边长为 130 m 的矩形水域。边界条件设置为: 自由桩长底部固结, 不考虑桩-土相互作用; 水域上表面设置自由液面边界, 四周为无限远边

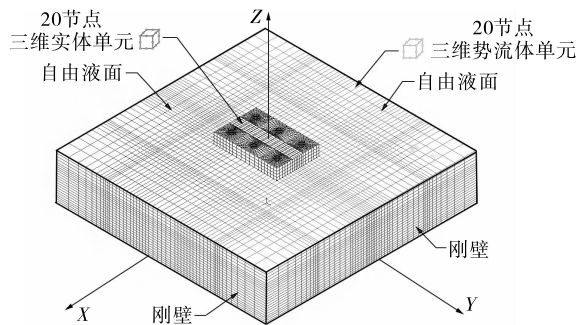


图 1 结构-流体耦合模型(数值模型 I)

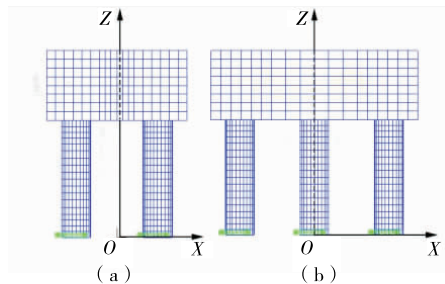


图 2 承台模型

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51378406)

界。为了提高计算精度,采取 20 节点三维实体单元模拟实体结构、20 节点三维流体单元模拟流体。其他材料参数设置见表 1。

表 1 材料的物理参数

材料	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量或 体积模量/GPa	泊松比
C40 砼	2 500	32.5	0.2
水	1 000	2.2	—

1.1.2 网格划分与计算工况

水体和结构网格大小与流固耦合计算结果是否收敛直接相关。采用不断调整模型网格划分密度并试算的方法确定模型网格尺寸,以保证计算结果的收敛性。根据软件模拟计算的动特性结果,桩基部分流固耦合效应较弱而承台部分变化较明显,故势流体模型中水位设置 0、10、11.5、13、14.5、16、18、20、25、30 m 10 种工况。

1.2 振型参与质量和振型参与质量系数

在水平向地震作用下,多自由度体系(自由度为 n)结构的运动微分方程可表示为:

$$[M]\{\ddot{\delta}\} + [C]\{\dot{\delta}\} + [K]\{\delta\} = -[M]\{I\}\ddot{\delta}_g(t) \quad (1)$$

式中: $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ 分别为多自由度体系的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $\{\delta\}$ 为各自由度对地面的相对位移列向量,是关于时间 t 的函数; $\{I\}$ 为位移变化向量,表示施加单位支座静位移引起的每个结构自由度的位移,其中元素只有 0 或 1; $\ddot{\delta}_g(t)$ 为地面输入地震动加速度。

将位移列向量 $\{\delta(t)\}$ 分解为:

$$\{\delta(t)\} = \sum_{i=1}^n \{\varphi\}_i Y_i(t) = [\varphi]\{Y(t)\} \quad (2)$$

式中: $\{\varphi\}_i$ 为第 i 阶振型列向量; $Y_i(t)$ 为振型坐标,为广义坐标; $[\varphi]$ 为振型矩阵, $[\varphi] = [\{\varphi\}_1, \{\varphi\}_2, \dots, \{\varphi\}_n]$; $\{Y(t)\} = [Y_1(t), Y_2(t), \dots, Y_n(t)]$ 。

利用振型的正交性可将多自由度体系运动微分方程解耦成 n 个单自由度振动方程,其中第 i 阶振型的振动方程为:

$$\ddot{Y}_i(t) + 2\xi_i\omega_i\dot{Y}_i(t) + \omega_i^2 Y_i(t) = -\gamma_i\ddot{\delta}_g(t) \quad (3)$$

式中: γ_i 为第 i 阶振型的振型参与系数。

$$\gamma_i = \frac{\{\varphi\}_i^T [M] \{I\}}{\{\varphi\}_i^T [M] \{\varphi\}_i} \quad (4)$$

若将各阶振型矢量 $\{\varphi\}_i$ 正则化,使各阶振型的广义质量 $M_i = \{\varphi\}_i^T [M] \{\varphi\}_i$ 为 1,则第 i 阶振型参与系数可简化为:

$$\gamma_i = \{\varphi\}_i^T [M] \{I\} \quad (5)$$

相应地,第 i 阶振型参与质量为:

$$m_i = \gamma_i^2 M_i = (\{\varphi\}_i^T [M] \{I\})^2 \quad (6)$$

且结构所有振型的振型参与质量之和等于各质点的质量之和,即:

$$\sum_{i=1}^n m_i = \sum_{i=1}^n \gamma_i^2 M_i = M_{\text{total}} \quad (7)$$

前 j 阶振型的质量参与系数为:

$$\Gamma_j = (\sum_{i=1}^j \gamma_i^2 M_i) / M_{\text{total}} \quad (8)$$

为得到结构的最大地震响应,通过控制振型参与质量系数大小决定所取振型数是否足够,《公路桥梁抗震设计细则》规定有效质量系数不低于 90%。

1.3 无水数值模型等效过程

首先对数值模型 I 进行动力特性分析,计算不同水位条件下结构—水耦合系统沿水平两个方向振动的有效质量,得出该深水群桩—承台基础结构动力特性有效质量随水位的变化。为了减小软件计算误差,同时兼顾计算机的最大运算容量,经反复对比计算,拟提取数值模型 I 前 200 阶结果(在计算机条件允许的情况下,建议取更大阶数),得到零水位工况下结构—水耦合系统沿水平两个方向振型质量参与系数接近结构总质量的 99%,认为提取 200 阶结果可行。提取各工况下振型累计附加质量(见图 3),根据各工况下的累计附加质量,得到桩基的附加质量及各设水承台的附加质量(见图 4)。图 4 中还给出了基于 Morison 方程的附加质量,惯性质量系数取 1.0。

根据附加质量相异的等效形式,将势流体模型(数值模型 I)等效为文中所建立的无水数值模型(数值模型 II)及按 Morison 方程等效的无水数值模型(数值模型 III)。从图 4 可看出:文中方法得到的附加质量远小于基于 Morison 方程的附加质量,其

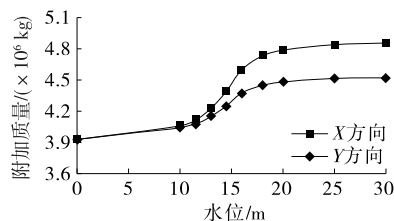


图 3 不同水位工况下振型累计附加质量

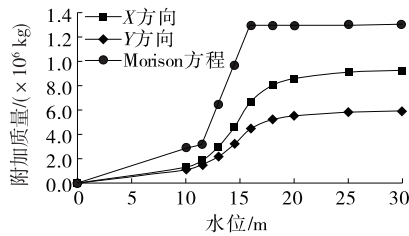


图4 不同水位工况下附加质量

中横桥向(Y方向)附加质量小于纵桥向(X方向)附加质量,且承台部分附加质量变化较明显。

2 地震动响应分析

2.1 动力特性对比

10种水位工况下3种数值模型两个方向的动力特性计算结果见表3。

表2 3种数值模型动力特性计算结果比较

水位/m	没水部分	模型Ⅰ自振频率/Hz		模型Ⅱ自振频率/Hz		模型Ⅲ自振频率/Hz		模型Ⅱ与模型Ⅰ的相对误差/%		模型Ⅲ与模型Ⅰ的相对误差/%	
		X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
0.0	桩基	4.37	4.57	4.37	4.57	4.37	4.57	0.0	0.0	0.0	0.0
10.0		4.32	4.52	4.34	4.54	4.31	4.51	0.5	0.5	-0.2	-0.3
11.5		4.29	4.50	4.31	4.52	4.14	4.32	0.4	0.5	-3.5	-3.9
13.0	承台	4.24	4.47	4.25	4.48	3.99	4.16	0.2	0.4	-6.0	-6.8
14.5		4.17	4.42	4.16	4.43	3.84	4.01	-0.1	0.2	-7.8	-9.2
16.0		4.05	4.34	4.05	4.35	3.70	3.87	-0.1	0.3	-8.8	-10.8
18.0	承台	3.99	4.30	3.98	4.31	3.70	3.87	-0.2	0.2	-7.4	-10.0
20.0		3.97	4.29	3.96	4.30	3.70	3.87	-0.3	0.2	-6.9	-9.7
25.0		3.95	4.27	3.93	4.28	3.70	3.87	-0.4	0.1	-6.4	-9.4
30.0	上部	3.94	4.27	3.93	4.27	3.70	3.87	-0.4	0.1	-6.2	-9.3

由表2可知:在X方向,模型Ⅱ与模型Ⅰ的动力特性结果最大相对误差为0.5%,模型Ⅲ与模型Ⅰ的最大相对误差为-8.8%;在Y方向,模型Ⅱ与模型Ⅰ的最大相对误差为0.5%,模型Ⅲ与模型Ⅰ的最大相对误差为-10.8%。模型Ⅱ的动力特性结果相对于模型Ⅲ更接近模型Ⅰ。从动力特性结果来看,文中所采取的等效原则比Morison方程更可靠。

2.2 地震动输入

为进一步验证文中等效方法的可靠性,对3种数值模型的地震动响应情况进行对比分析。为尽量减小数值模拟过程中的偶然误差,选取El Centro、Kobe及Northridge 3条地震波对3种数值模型进行两个方向加载,所选地震波加速度峰值PGA调整为0.2g。3条地震波的加速度时程曲线见图5。

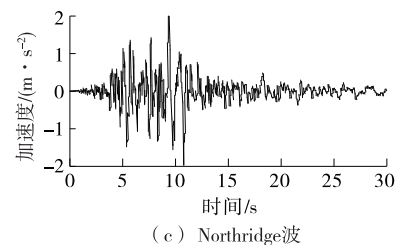
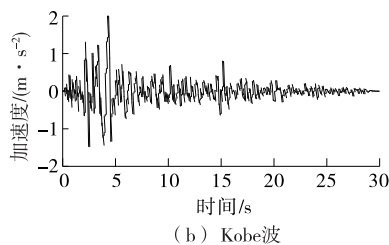
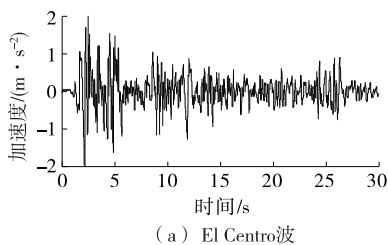


图5 3条地震波的加速度时程曲线

2.3 响应结果对比

图6、图7为不同水位条件时,3条地震波作用下3种数值模型两个方向承台顶位移及桩基底部弯

矩、剪力响应。从图6、图7可看出:文中方法等效的数值模型Ⅱ得到的地震响应与完全流固耦合数值模型Ⅰ的计算结果非常接近,而基于Morison方程

的附加质量法等效的数值模型Ⅲ的计算结果与之相差较大;基于 Morison 方程的附加质量法得到的计算结果并不都是保守的,有时其地震响应小于完全流固耦合数值法的计算结果。

2.4 结果分析

根据图 5 所示加速度时程曲线得到 3 条地震波的拟加速度反应谱(见图 8),其阻尼比为 0.05。该群桩—承台基础结构的地震响应主要由基本振型贡

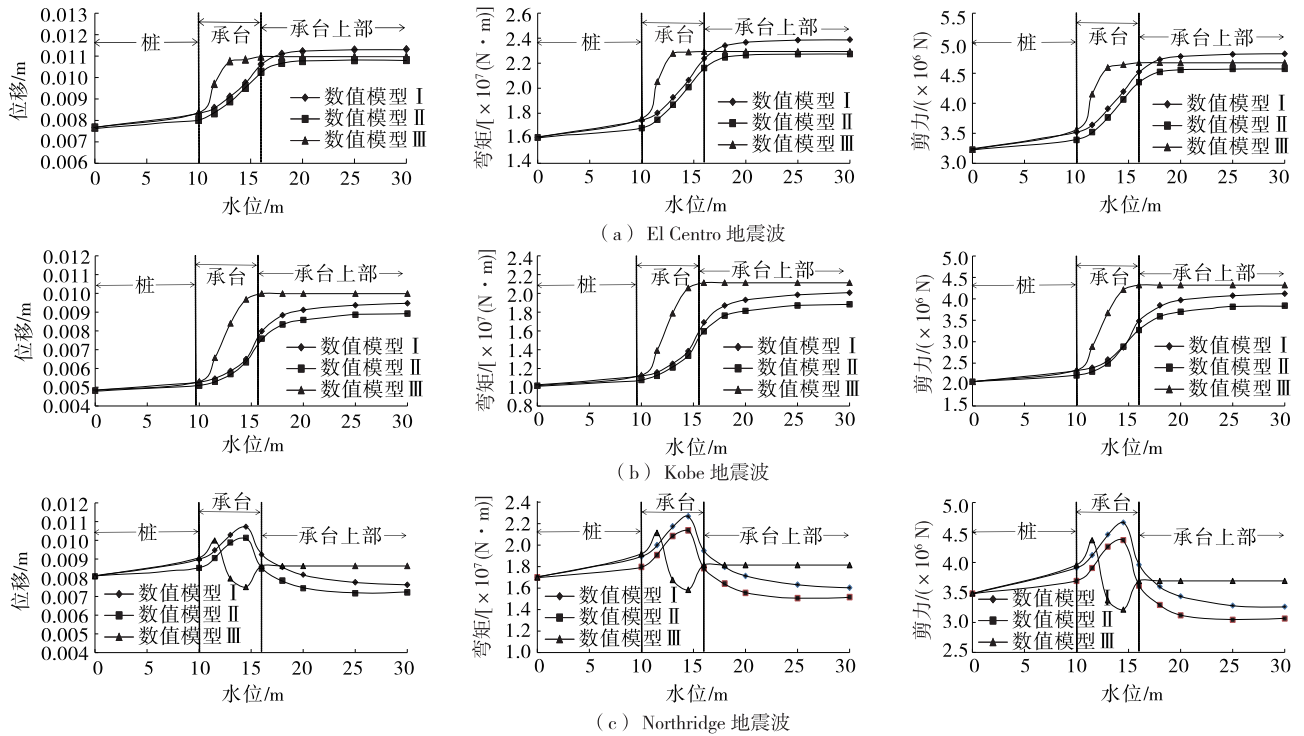


图 6 结构 X 方向响应最大值变化曲线

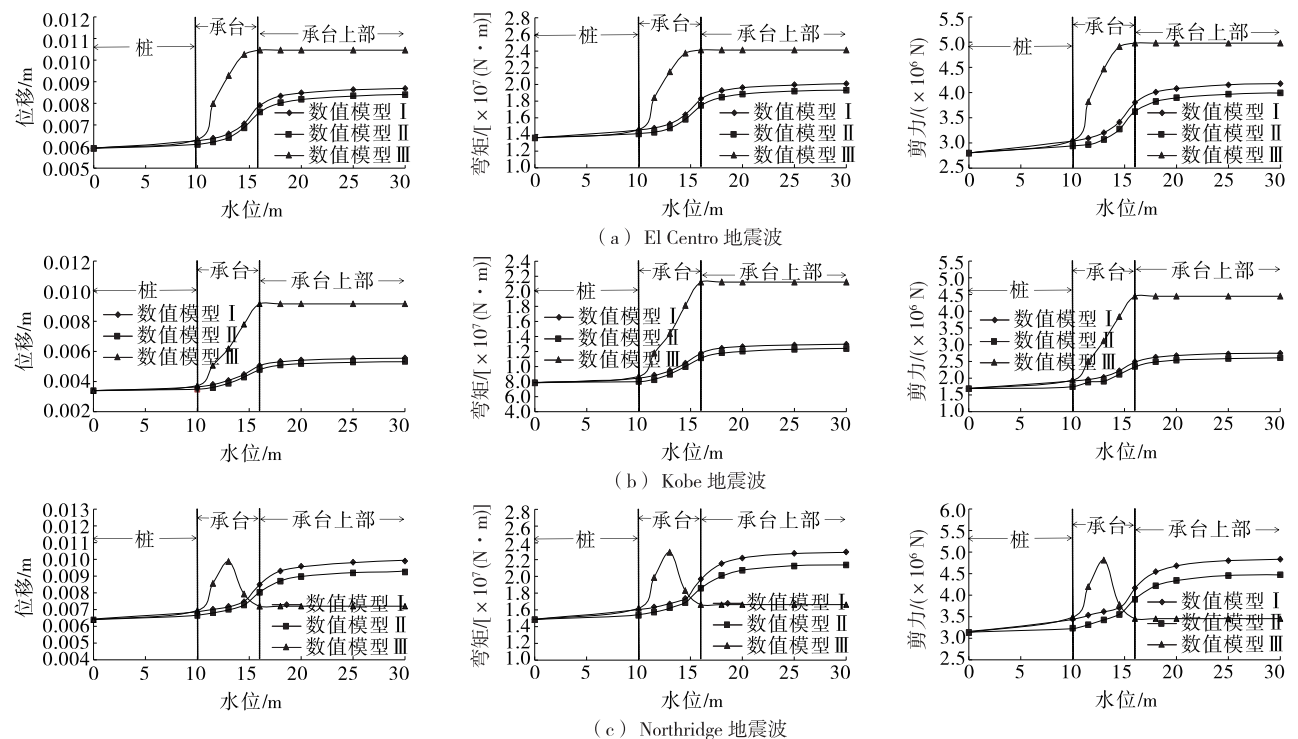


图 7 结构 Y 方向响应最大值变化曲线

献,随着水位的增大,其基本振型的频率不断下降。根据内插的原则可得到不同水位下结构—水耦合系统的一阶频率所对应3条地震波的反应谱值,图9和图10分别为不同水位条件下结构两个方向基本振型的振动频率对应的反应谱值随水位的变化。通过前面的计算发现模型I与模型II的动力特性非常相近,其不同水位下一阶频率所对应的地震波的反应谱值也几乎相同,故图9、图10中仅绘制了模型I与模型III基本振型频率对应的反应谱值随水位的变化。

从图6与图9、图7与图10具有相似的变化规律可得出深水群桩—承台基础结构的基本振型频率对其地震响应是主要贡献者。从图6(c)与图9(c)、图7(c)与图10(c)中曲线的变化情况得到虽然结构的附加质量较大,但由于其基本振型频率对应的反

应谱值降低太多,其地震响应反而有所下降。以上分析表明,基于 Morison 方程的附加质量法有时会低估深水群桩—承台基础结构的地震响应,而文中方法与完全流固耦合数值法计算结果非常接近,且计算效率明显提高。

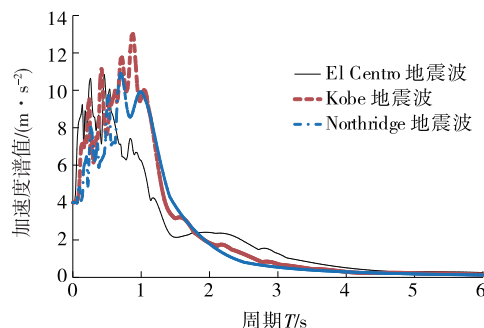


图8 地震波加速度反应谱

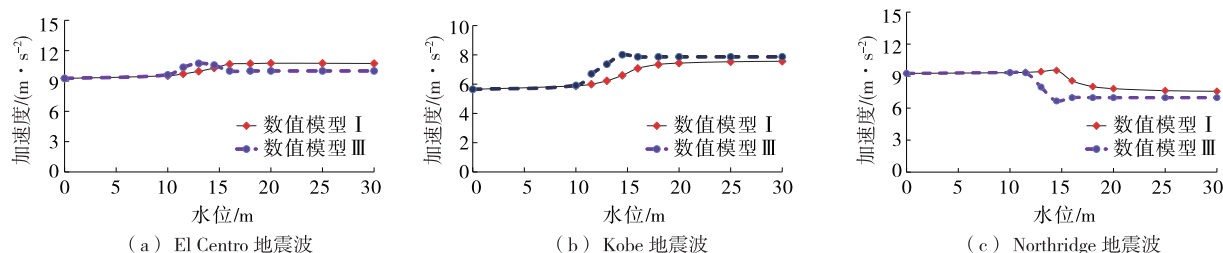


图9 不同水位下结构X方向基本振型频率对应的反应谱值

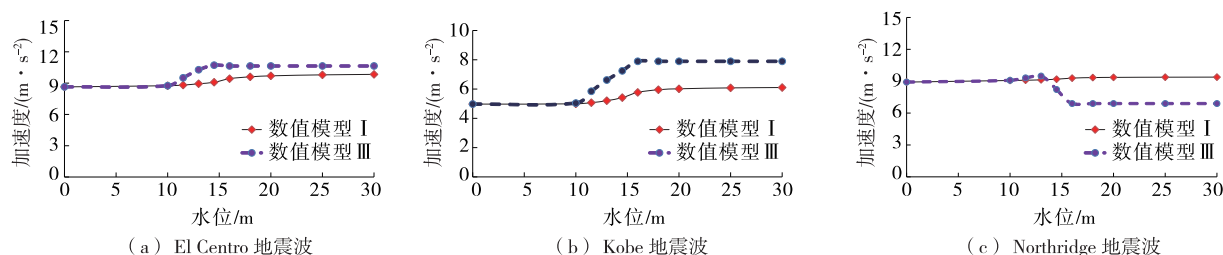


图10 不同水位下结构Y方向基本振型频率对应的反应谱值

3 结论

(1) 基于文中方法得到的动水附加质量小于基于 Morison 方程的附加质量,并且承台Y方向附加质量小于X方向附加质量。

(2) 与 Morison 方程等效模型相比,文中等效模型的动力特性结果更接近实际流固耦合数值模型的结果。

(3) 基于 Morison 方程的附加质量法有时会低估深水群桩—承台基础结构的地震响应,而文中方法与完全流固耦合数值法计算结果非常接近,且计算效率明显提高。

参考文献:

- [1] Westergaard H M. Water pressures on dams during earthquake[J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1933(98).
- [2] Morison J R, O'Brien M P, Johnson J W. The force exerted by surface wave on piles[J]. Petroleum Transactions, AIME, 1950, 18(9).
- [3] Savage J L. Earthquake studies for pit river bridge[J]. Civil Engineering, 1939, 9(8).
- [4] 叶建. 考虑墩—水耦合作用的桥梁地震反应分析[D]. 北京: 中国地震局工程力学研究所, 2013.

(下转第164页)

表5 应变值分析

测点	实测应变值/ $\mu\epsilon$	弹性应变值/ $\mu\epsilon$	理论计算值/ $\mu\epsilon$	校验系数	残余值/ $\mu\epsilon$	相对残余/%
B1	30	33	40	0.75	-3	-10
B2	55	55	61	0.90	0	0
B3	66	64	82	0.80	2	3
B4	64	62	92	0.70	2	3
B5	68	65	102	0.67	3	4
B6	63	66	112	0.56	-3	-5
B7	46	48	83	0.55	-2	-4
B8	44	44	54	0.81	0	0

由表5可知:试验加载工况下,控制截面各测点相对残余均小于10%,校验系数均小于《大跨径混凝土桥梁的试验方法》的上限1.0,说明结构弹性性能较好,满足设计要求。

5 结论

(1) 梁格法的计算精度比单梁法高,更符合曲线梁桥的受力特性,是曲线梁桥结构分析的一种有效方法。合理地使用梁格法进行建模分析,可较准确地计算桥梁结构控制截面的各项内力值。

(2) 荷载试验的实测值和理论计算值较吻合,该桥满足设计要求。

参考文献:

- [1] 赵站伟,刘锋民.曲线梁桥设计计算分析[J].山东交通科技,2013(1).
- [2] 李春旗,邱波,唐明亮.梁格法在曲线梁桥结构设计计算分析中的运用[J].西部交通科技,2014(5).
- [3] 刘美兰.midas Civil在桥梁结构分析中的应用[M].北京:人民交通出版社,2012.
- [4] 叶见曙,李国平.结构设计原理[M].北京:人民交通出版社,2014.
- [5] 王海丰.预应力曲线梁桥受力特点及设计中应注意的问题[J].北方交通,2009(3).
- [6] 傅伟,刘超群,常柱刚,等.双反弯“S”形曲线钢箱梁桥空间计算分析[J].中外公路,2012,32(3).
- [7] 曾彦.基于静载试验的桥梁结构性能评价[J].华北水利水电学院学报,2013,34(4).
- [8] CJJ/T 233-2015,城市桥梁检测与评定技术规范[S].
- [9] JTG/T J21-01-2015,公路桥梁荷载试验规程[S].

收稿日期:2017-03-04

(上接第156页)

- [5] 杨万理.深水桥梁动水压力分析方法研究[D].成都:西南交通大学,2011.
- [6] 魏凯,伍勇吉,徐灿,等.桥梁群桩基础-水耦合系统动力特性数值模拟[J].工程力学,2011,28(1).
- [7] Wei Kai, Yuan Wan-cheng. Experimental and numerical assessment of the three-dimensional modal dynamic re-

sponse of bridge pile foundations submerged in water [J]. Journal of Bridge Engineering, 2013, 18(10).

- [8] 王晓伟,叶爱君.大跨度斜拉桥地震反应谱分析中计算振型数研究[J].结构工程师,2011,27(4).

收稿日期:2017-03-08

(上接第160页)

5 结论

该文针对30 m简支箱梁桥面维修,对桥面分别加铺4、10 cm沥青层,通过计算得到梁斜截面抗裂能力及正截面抗弯能力,分析加铺沥青层后结构的安全性。主要结论如下:桥面维修加铺4、10 cm厚沥青层后,截面最大主拉应力明显增高,分别增加11%、28%,加铺沥青面层会显著影响桥梁斜截面抗裂能力;各截面最大弯矩值明显增高,增幅分别为3.7%、9.4%左右,加铺沥青面层会显著影响桥梁抗弯能力。

实际施工中可能会遇到各类桥梁,结构存在差

异,且桥面加铺沥青层厚度也会不同,在加铺前需进行全面验算,明确安全性。

参考文献:

- [1] 丁勇,黄奇,黄剑源.连续桥面简支梁桥静动力特性的理论分析方法研究[J].工程力学,2015,32(9).
- [2] 王岗,谢旭,申永刚.简支梁桥拱型桥面连续构造的受力性能[J].浙江大学学报:工学版,2014,42(6).
- [3] 温晓强.桥梁桥面连续构造设计与施工技术[J].公路交通科技:应用技术版,2013(1).
- [4] 杨芳.水泥桥面加铺沥青混凝土面层施工技术探讨[J].山西建筑,2013,39(31).

收稿日期:2017-02-26