

桩土相互作用对大跨度刚构桥抗震影响分析

尹成, 余钱华

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 为研究桩土相互作用对大跨度连续刚构桥地震响应的影响, 采用 MIDAS/Civil 建立嵌固模型与 m 法模型, 对施加嵌固作用与考虑桩土相互作用时桥梁结构的地震响应进行对比分析。结果表明, 考虑桩土相互作用时, 桥梁结构整体刚度偏小, 同时土层能减缓地震对桩基的作用, 桥梁上部结构内力变小, 相比直接固结桥墩底部, 这种模拟方法与实际工程更吻合。

关键词: 桥梁; 桩土相互作用; 大跨度连续刚构桥; 地震响应

中图分类号: U448.23

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2020)02-0119-03

地震荷载下大跨度连续刚构桥的响应比其他普通桥梁更复杂。在地震作用下, 桥梁结构的桩土相互作用主要体现在两方面: 一方面, 考虑桩土相互作用后地基的柔性改变桥梁结构的动力特性; 另一方面, 考虑桩土相互作用, 桥梁上部结构内力受到影响, 同时这种影响效益值通过反馈作用改变地基运动频谱。建模分析时, 如果忽略桩土相互作用, 会导致模型与现实工程相差甚远, 分析结果对桥梁设计与施工没有任何实际指导意义。该文通过工程实例建立嵌固模型与 m 法模型, 对比分析桩土相互作用与直接固结桥墩底部两种模型下桥梁结构的地震响应。

1 工程概况

湖南湘西自治州某大跨度连续刚构桥跨径组合为 110 m+235 m+110 m, 上部结构采用单箱单室箱形变截面, 箱梁根部梁高 14.59 m, 跨中截面梁高 5.59 m。箱梁顶板全宽 9 m, 双向横坡, 坡度为 2% (见图 1)。桥墩采用双肢薄壁墩, 内部空心, 壁厚 0.75 m, 截面呈矩形, 长 6.8 m、宽 3.2 m。墩身底部为变截面, 上窄下宽, 长 9.8 m、宽 3.2 m; 承台高度为 4.0 m, 截面尺寸为 16.6 m×13.8 m。基础采用 4 根挖孔灌注桩, 直径为 360 cm, 桩基嵌入完整中风化岩层 21.6 m 以上。

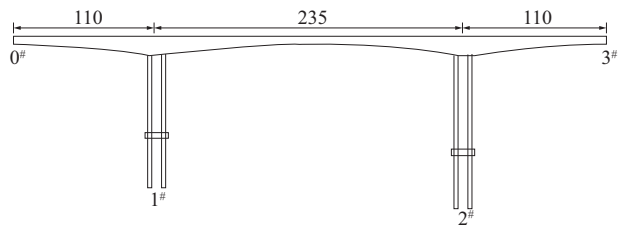
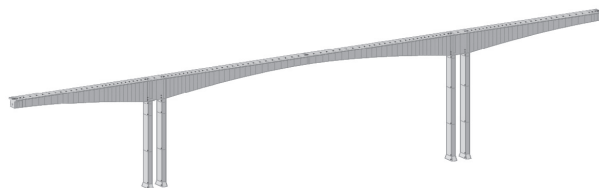


图 1 某大跨度连续刚构桥立面图 (单位: m)

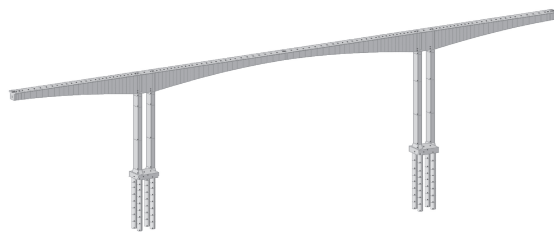
2 模型建立

2.1 嵌固模型

根据该桥相关资料, 不考虑桩土相互作用, 采用 MIDAS/Civil 2015 建立全桥模型。全桥采用空间梁单元模拟, 墩顶与主梁的边界条件采用刚性连接, 墩底直接固结, 不考虑行波效应 [见图 2(a)]。



(a) 不考虑桩土相互作用



(b) 考虑桩土相互作用

图 2 桥梁有限元模型

2.2 m 法模型

通过建立承台和桩基考虑桩土相互作用。整个桥梁由空间梁单元模拟, 墩顶与主梁的边界条件使用刚性连接, 在承台下部建立桩基础单元, 使用节点弹性支撑约束桩基础, 模拟土体的作用。由于该桥桩基础底部嵌入岩层, 桩基底部直接采取固结。节点弹性支撑的刚度涉及等代土弹簧刚度计算, 运用

JTG D63—2007 中的 m 法进行计算[见式(1)], 计算结果见表 2。有限元模型见图 2(b)。

$$k_s = ab_p m z \quad (1)$$

式中: k_s 为等代土弹簧的刚度; a 为土层厚度; b_p 为计算桩宽; m 为地基土比例系数,其值见表 1, $m_{\text{动}} = 3m_{\text{静}}$; z 为各层土中心到地面的距离。

表 1 非岩石土壤的比例因子

土的类型	比例因子/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-4}$)
流塑黏性土,淤泥	3 000~5 000
软塑黏性土,粉砂	5 000~10 000
硬塑黏性土,细砂,中砂	10 000~20 000
硬质、半硬质黏性土,粗砂	20 000~30 000
砾石砂,角砂,圆砾,碎石,卵石	30 000~80 000
紧凑的卵石状粗砂,密集浮动的卵石	80 000~120 000

表 2 桥墩桩基础土弹簧刚度计算结果

土层 编号	1 [#] 墩计算结果			2 [#] 墩计算结果		
	土层厚度/m	$K_x/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	$K_y/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	土层厚度/m	$K_x/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	$K_y/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$
1	8	3 974 400	3 974 400	12.5	9 703 125	9 703 125
2	10	17 388 000	17 388 000	10	20 182 500	20 182 500
3	10	29 808 000	29 808 000	10	32 602 500	32 602 500
4	10	42 228 000	42 228 000	10	45 022 500	45 022 500

3 桥梁地震响应分析

3.1 结构自振特性计算原理

当结构处于自由振动状态时,其基本振动方程为:

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = 0 \quad (2)$$

式中: $[M]$ 为结构质量矩阵; $[K]$ 为结构刚度矩阵。

当结构处于简谐振动状态时,可用下式求解:

$$\{x(t)\} = \{X\} \sin(\omega t + \varphi) \quad (3)$$

$$\{\ddot{x}(t)\} = -\omega^2 \{X\} \sin(\omega t + \varphi) = -\omega^2 \{x(t)\} \quad (4)$$

式中: $\{X\}$ 为结构振动的幅值向量; φ 为初相角。

将式(3)、式(4)代入式(2),得:

$$([K] - \omega^2 [M])\{X\} = 0 \quad (5)$$

当式(5)有非零解时,可转化为:

$$([K] - \omega^2 [M]) = 0 \quad (6)$$

式(6)即为结构无阻尼自由振动的频率方程,该方程的解 $\omega_1^2, \omega_2^2, \dots, \omega_n^2$ 为结构的 n 个自振频率。将 ω_i^2 代入式(5)可求解各质点的相对幅值 $\{X\}_i$,根据各质点相对幅值描绘的各质点侧移曲线即为结构对应于 ω_i^2 频率的振型。

3.2 自振特性

运用多重 Ritz 向量法计算该桥两种模型的前 120 阶振型,其中嵌固模型、 m 法模型的前 10 阶周期与振型计算结果分别见表 3、表 4。

3.3 反应谱

地震作用下,两种模型的墩顶位移见表 5,墩底

内力见表 6。

表 3 嵌固模型前 10 阶周期与振型

阶次	频率/Hz	周期/s	振型参与质量/%		
			x 向	y 向	z 向
1	0.218 425	4.578 232	87.45	0.00	0.00
2	0.244 155	4.095 753	87.45	63.37	0.00
3	0.402 111	2.486 875	87.45	64.05	0.00
4	0.603 387	1.657 310	87.45	80.71	0.00
5	0.759 125	1.317 306	87.45	80.71	10.52
6	1.011 792	0.988 345	87.45	80.71	10.52
7	1.492 816	0.669 875	87.93	80.71	10.55
8	1.523 770	0.656 267	87.93	81.25	10.55
9	1.857 021	0.538 497	87.93	81.25	10.60
10	1.881 771	0.531 414	89.76	81.25	11.73

表 4 m 法模型前 10 阶周期与振型

阶次	频率/Hz	周期/s	振型参与质量/%		
			x 向	y 向	z 向
1	0.209 662	4.769 587	64.83	0.00	0.00
2	0.215 197	4.646 915	64.83	50.52	0.00
3	0.359 760	2.779 635	64.83	51.13	0.00
4	0.586 359	1.705 439	64.83	61.71	0.00
5	0.741 874	1.347 938	64.84	61.71	7.83
6	1.010 508	0.989 601	64.84	61.71	7.83
7	1.468 441	0.680 994	65.02	61.71	7.84
8	1.511 612	0.661 546	65.02	61.92	7.84
9	1.788 758	0.559 047	67.06	61.92	7.87
10	1.857 021	0.538 497	67.06	61.92	7.89

表 5 地震作用下墩顶位移

模型类型	纵向位移/mm	横向位移/mm
嵌固模型	91.7	36.4
m 法模型	96.1	47.9

由表 5、表 6 可知:嵌固式模型的墩顶纵横向位

移比 m 法模型小,底部嵌固模型的整体刚度比 m 法模型大;嵌固式模型的墩底轴力、剪力和弯矩均大于 m 法模型,这是因为通过 m 法计算的结构刚度小,且地震效应小,而嵌固模型具有较大的整体刚度和地震效应。

表 6 地震作用下墩底内力

模型类型	轴力/kN	剪力-y/kN	剪力-z/kN	弯矩-y/(kN·m)	弯矩-z/(kN·m)
嵌固模型	78 434.30	1 832.67	1 766.68	73 315.20	74 761.15
m 法模型	75 560.83	1 697.03	1 696.11	61 850.21	69 076.62

4 结论

(1) 桩土相互作用对大跨度连续刚构桥的动力特性有一定影响,考虑这种作用时,结构整体刚度变小,同时桩基周围土体能减缓地震荷载对桩基的作用,桥梁桥墩结构内力变得更小。

(2) 相对于底部嵌固分析方法,考虑桩土相互作用与实际工程更吻合,分析结果更为合理。

(3) 采用 m 法分析桩土相互作用时,等代土弹簧刚度需根据现场地质条件模拟准确。如果工程地质条件较复杂,地质分层较多,需依据不同地质土层计算相应土弹簧刚度,并施加在相应位置。

参考文献:

[1] 叶爱君,管仲国.桥梁抗震[M].北京:人民交通出版社,2017.
[2] 贾毅.高墩大跨曲线连续刚构桥地震响应分析[D].昆

明:云南大学,2014.
[3] 贾毅,王永宝,李福海,等.高墩大跨曲线连续刚构桥地震响应研究[J].沈阳建筑大学学报:自然科学版,2019,35(1).
[4] 陈清军,姜文辉,李哲明.桩-土接触效应及对桥梁结构地震反应的影响[J].力学季刊,2005,26(4).
[5] 戴公连,李德建.桥梁结构空间分析设计方法与应用[M].北京:人民交通出版社,2001.
[6] 刘少天.大跨径钢管混凝土拱桥动力特性与地震响应分析[D].西安:长安大学,2017.
[7] 季少波.桩土相互作用对桥梁抗震的影响研究[J].公路与汽运,2018(2).
[8] 代攀,杨涛,胡大琳.高墩大跨曲线连续刚构桥地震响应分析[J].世界地震工程,2009,25(4).
[9] 揭志羽,卫星,李亚东,等.大跨高墩小半径刚构-连续组合梁桥地震响应分析[J].桥梁建设,2013,43(1).

收稿日期:2019-03-09

(上接第 118 页)

于理论值。

(3)梁拱上立柱、立墙渗水、锈胀露筋、开裂等病害较多,建议进行加固处理;桥面铺装病害较严重,桥面系技术状况评定为 D 级,建议更换桥面系。

参考文献:

[1] 吴中鑫,陈进,龙安.南京长江大桥双曲拱桥拱肋增大截面加固材料及施工关键技术[J].世界桥梁,2019,47(2).
[2] 吴中鑫,吴俊明,龙安.泡沫混凝土在双曲拱桥加固维修工程中的应用研究[J].公路,2019(3).
[3] 白光亮,蒲黔辉,薛爱.某双曲拱桥静动载试验与加固

方法[J].铁道建筑,2008(9).
[4] 王大为.双曲拱桥加固及静动载检测数值模拟研究[J].工程建设与设计,2016(6).
[5] 胡红波,彭鑫,罗震宇.双曲拱桥加固维修综合措施[J].中外公路,2018,38(4).
[6] 罗刚.双曲拱桥加固设计与施工应用研究[J].公路与汽运,2018(2).
[7] 黄春亮,骆俊杰,李蓉.填芯加固法在双曲拱桥加固中的应用[J].中外公路,2018,38(1).
[8] 刘丽芳.多跨双曲拱桥技术状况检测与评定[D].石家庄:石家庄铁道大学,2018.

收稿日期:2019-04-28