

重大建设工程基本自振周期 估算方法探讨¹

洪海春 彭小波 毕雪梅 李细兵

(江苏省地震局, 南京 210014)

摘要 在对规范和文献资料的研究和分析的基础上, 本文探讨了(超)高层建筑、巨型储油罐、大跨桥梁工程等重大建设工程基本自振周期的估算方法。在工程场地地震安全性评价工作中, 可采用本文提供的重大建设工程基本自振周期估算的公式。同时, 本文为长周期地震动对工程结构作用的相关参数的合理确定提供了依据。

关键词: 基本自振周期 (超) 高层建筑 巨型储油罐 大跨桥梁工程

引言

对于(超)高层建筑、巨型储油罐、大跨桥梁工程等主体结构自振周期较长的建设工程, 其对地震长周期成分响应比较强烈, 在进行工程场地地震安全性评价时, 应当特别仔细地考虑长周期的地震动参数, 提供能充分反映长周期地震动对工程结构作用的场地相关反应谱。同时, (超)高层建筑、长跨桥梁、大型储油罐等对反应谱长周期部分有特殊要求, 在地震动衰减关系确定的过程中, 需要专门研究长周期地震动反应谱衰减关系, 应分析所选用的长周期衰减关系是否能针对这些工程的结构特性, 进一步论述衰减关系的适用性, 另外还要论证所采用地震动观测资料的长周期可靠性。此外, 应根据此类大型结构的特点, 合理确定地震动持时等参数。这样才能确定科学合理的抗震设防要求, 按照抗震设防要求进行严格的抗震设计, 才能保证建筑物具备一定的抗震能力, 这也是重大建设工程抗震设防的关键环节(卢寿德, 2006)。

重大建设工程的地震安全性评价工作是在项目可行性研究阶段开展的, 所以, 工程项目的建设高度、容量大小、跨径规模等难以和实际情况完全相符, 可能存在着稍有偏差的情况, 但是, 在这种情况下基本自振周期的变化通常很小。总体而言, (超)高层建筑、巨型储油罐、大跨桥梁工程等重大建设工程的基本自振周期, 对于长周期地震动对工程结构作用的相关参数的合理确定起着重要作用。本文探讨了重大建设工程基本自振周期的估算方法, 为长周期

¹ 基金项目 中国地震局地震科技星火计划青年项目(XH12021Y)资助; 中国地震局震灾应急救援司项目(CEA_EDEM-201006)

[收稿日期] 2012-05-15

[作者简介] 洪海春, 男, 生于1977年。博士, 高级工程师。主要从事地震灾害预防和岩土工程方面的研究。E-mail: haichunhong@126.com

地震动对工程结构作用的相关参数的合理确定提供依据。

1 (超) 高层建筑基本自振周期估算方法

对(超)高层建筑结构进行抗震设计时,其地震荷载计算主要采用基于地震反应谱理论的底部剪力法和振型分解法,这些方法均要求先给出结构的基本自振周期。因此,基本自振周期是工程结构抗震设计中的重要参数,是衡量一个结构质量与刚度是否匹配、刚度是否合理的重要指标。然而,重大建设工程主体结构的实际自振周期与许多因素有关,采用各种复杂的理论计算求得的基本自振周期数值解与实际情况有时存在较大的出入,如何相对准确而又方便快速地估算出基本自振周期的真实值是值得探讨的问题。

近年来,国内外(超)高层建筑越来越多,然而破坏性地震常造成(超)高层建筑倒塌和造成巨大的损失,所以(超)高层的抗震设计受到了特别的关注。对于(超)高层建筑而言,其基本自振周期通常取值较大。虽然基本自振周期的经验公式很难反映抗震设计工程的实际情况,但是在地震安全性评价工作中可以用于作为其估算的方法。李海涛等(2003)建议,(超)高层建筑主体结构的基本自振周期(T_1)可以采用以下各式近似估算:

$$\text{框架结构: } T_1 = (0.12 \sim 0.15)n \quad (1)$$

$$\text{框架-剪力墙结构和框架-筒体结构: } T_1 = (0.06 \sim 0.12)n \quad (2)$$

$$\text{剪力墙结构和筒中筒结构: } T_1 = (0.04 \sim 0.06)n \quad (3)$$

式中, n 为建筑物的层数。

包世华(2001)建议,(超)高层建筑主体结构的基本自振周期可以采用以下各式近似估算:

$$\text{框架或框剪结构: } T_1 = (0.07 \sim 0.09)n \quad (4)$$

剪力墙结构的住宅和旅馆高度20—50m、剪力墙间距3—6m时,若横墙间距较密,则:

$$\text{横向: } T_1 = 0.054n \quad (5a)$$

$$\text{纵向: } T_1 = 0.04n \quad (5b)$$

若横墙间距较疏,则:

$$\text{横向: } T_1 = 0.06n \quad (6a)$$

$$\text{纵向: } T_1 = 0.05n \quad (6b)$$

采用这些简便的经验公式计算结构基本自振周期时,应注意经验公式的局限性和适用性,使用时对经验公式要加以选择与判断,因为经验公式一般是通过实测某类结构的自振周期,将测得的数据加以回归得出的。(超)高层建筑主体结构的基本自振周期取决于多个方面的因素,例如:建筑物的高宽比、结构型式、建筑物层数、地基特征等,在不同的荷载作用下结构的自振周期并不是一个常数,而是随着结构变形的改变而变化。同时,根据我国对高层建筑大量实测的结果,认为影响高层建筑结构自振周期的主要因素为:对框架体系或框架-剪力墙体系,主要是建筑物的高度和宽度;对剪力墙体系,则除了建筑物的高度和宽度之外,还和剪力墙布置间距的大小有关。鉴于此,本文参考李海涛等(2003)提供的采用建筑物的层数、高度和宽度等参数,作为确定自振基本周期的估算方法的辅助手段,以求达到相互验证和相互判断的作用。

常用和简化的与建筑物结构形式、层数及建筑物高度和宽度有关的经验公式有:

$$\text{钢筋混凝土框架结构: } T_1 = 0.33 + 0.00069H^2 / \sqrt[3]{B} \quad (7)$$

$$\text{框架-剪力墙或框架-筒体结构: } T_1 = 0.33 + 0.00069H^2 / \sqrt[3]{B} \quad (8)$$

$$\text{剪力墙或筒中筒结构: } T_1 = 0.04 + 0.038H / \sqrt[3]{B} \quad (9)$$

式中, H 为建筑物总高度 (m); B 为建筑物宽度 (m)。

用底部剪力法计算高层建筑结构的水平地震作用时, 建议按“假想顶点水平位移”(中华人民共和国建设部, 2002) 计算:

$$T_1 = 1.7\psi_T \sqrt{u_T} \quad (10)$$

式中, ψ_T 为考虑非承重填充墙刚度对结构自振周期影响的折减系数; u_T 为假想的结构顶点水平位移, 即假想把集中在各楼层处的重力荷载代表值 G_i 作为该楼层的水平荷载, 按有关规定计算出的结构顶点弹性水平位移 (单位: m)。

一般而言, 经验公式是通过实测某类重大建设工程的主体结构的自振周期, 将测得的数据加以统计回归得出的。对于不同的重大建筑工程主体结构型式, 采用以上公式的计算结果与实测值相比, 其精度并不相同。事实上, 即使采用十分精确复杂的理论, 用电算法求得的数值解仍然与实际情况有较大出入。因此, 为使得估算值基本接近实测值, 应采用综合分析判断的方法确定基本自振周期值。

2 巨型储油罐基本自振周期估算方法

巨型储油罐主体结构的地震反应是由地面振动特性和结构本身特性两个方面决定的, 准确地掌握储油罐的自振特性 (频率和振型) 是储油罐抗震设计的前提。抗震设计时应避免储油罐的自振周期接近地面运动的卓越周期, 以免产生共振。影响储油罐自振周期的因素主要包括: 罐体型式、储液高度、不同高径比、地基弹性刚度和罐壁弹性模量等。因此, 采用计算精度可满足工程需要、计算结果可靠的、适用的近似估算方法, 得出巨型储油罐主体结构的自振周期是值得需要深入探讨的问题。

2.1 球形储罐基本自振周期估算方法

球形储罐常用于储存石油气、煤气和氨气等液化气体。根据 Housner 理论, 液体在地震中可分为两个部分: 一部分是固定在罐壁上与罐体作一致运动 (称为固定液体); 另一部分是独立作长周期自由晃动 (称为自由液体)。地震时, 主要是固定的罐壁上的这部分液体参与结构的整体振动。因此, 引入了有效质量这一概念。同时, 把球壳视为刚体, 地基视为刚性, 则水平刚度是由支撑构架抵抗弯曲变形的刚度和拉杆与支柱形成的构架剪切刚度合成的。

在石油化工钢制设备 (国家石油和化学工业局, 1999) 和石油化工构筑物 (国家发展和改革委员会, 2004) 的抗震设计规范中均有相关的规定, 表达式的实质是一致的。对于球形储罐基本自振周期可按下式进行计算:

$$T_1 = 2\pi \sqrt{m_{eq} / K} \quad (11)$$

式中, m_{eq} 为球形储罐在操作状态下的等效质量 (kg); K 为球形储罐构架的水平刚度 (N/m)。

研究表明, 式 (11) 的计算结果与实测值很接近。因此, 式 (11) 的估算方法是合理的、可靠的。

2.2 立式圆筒形储罐基本自振周期估算方法

立式圆筒形储罐的抗震设计准则, 首先是不允许油罐在设防烈度的地震作用下罐壁进入非弹性状态。对于浮顶罐, 因为其浮顶是处于漂浮状态的薄膜圆盘, 且浮顶下面仍保持有部

分油气空间, 浮顶对液面几乎不起约束作用, 故可把浮顶罐近似地当作自由液面储罐看待。但是, 对于固定顶盖储罐, 当储液上表面与顶盖之间空间小于储罐容积 4% 时, 则所有储液几乎全被储罐周边约束住。根据反应谱理论, 储罐地震影响系数是储罐自振周期的函数。因此在计算储罐的地震作用时, 应先计算储罐的自振周期。相关规范中均有规定, 各个表达式基本一致, 但是, 在实际近似计算过程中, 《立式圆筒形钢制焊接油罐设计规范 (GB 50341—2003)》(中华人民共和国建设部, 2003) 的估算方法相对简单, 此规范仅针对罐壁高度与直径比不大于 1.6, 且容积大于或等于 100m^3 的常压 (包括通过呼吸阀与大气相通的) 圆筒形钢制平底储罐适用, 其立式圆筒形储罐的罐液耦连振动基本自振周期, 应按下式计算:

$$T_c = K_c H_w \sqrt{\frac{R}{\delta_3}} \quad (12)$$

式中, T_c 为储罐与储液耦连振动基本自振周期 (s); R 为油罐内半径 (m); H_w 为油罐设计最高液位 (m); δ_3 为罐壁距底板 1/3 高度处的有效厚度 (m), 即该处罐壁的名义厚度减去腐蚀裕量及钢板负偏差; K_c 为耦连振动周期系数, 根据 D/H_w 值由表 1 查取, 中间值采用插入法计算; D 为油罐的内径 (m)。

表 1 耦连振动周期系数

Table 1 Coefficients of coupled vibration period

D/H_w	0.6	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
K_c	0.514×10^{-3}	0.440×10^{-3}	0.425×10^{-3}	0.435×10^{-3}	0.461×10^{-3}	0.502×10^{-3}
D/H_w	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
K_c	0.537×10^{-3}	0.580×10^{-3}	0.620×10^{-3}	0.681×10^{-3}	0.736×10^{-3}	0.791×10^{-3}

储液晃动基本自振周期, 应按下式计算:

$$T_w = K_s \sqrt{D} \quad (13)$$

式中, T_w 为储液晃动基本自振周期 (s); K_s 为晃动周期系数, 根据 D/H_w 值由表 2 查取, 中间值采用插入法计算。

表 2 晃动周期系数

Table 2 Coefficients of sloshing period

D/H_w	0.6	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
K_s	1.047	1.047	1.054	1.074	1.105	1.141
D/H_w	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
K_s	1.184	1.230	1.277	1.324	1.371	1.418

当计算罐壁底部水平地震剪力及弯矩时, 采用罐液耦联振动基本自振周期 T_c , 其值在 0.1—0.5s 的范围内; 当计算罐内液面晃动液高时, 采用储液晃动基本自振周期 T_w , 其值在 3—14s 的范围内。通常情况下, T_w 的值大于 T_c 的值。因此, 在工程场地地震安全性评价工作中, 根据保守性原则, 宜采用储液晃动基本自振周期 T_w 的值进行分析, 相对而言是比较合理、可靠和准确的。

3 大跨桥梁工程基本自振周期估算方法

桥梁自振周期在很大程度上反映出桥梁刚度的大小, 也就反映出桥梁的动力特性。因此,

研究桥梁动力特性的首要问题便是准确地计算桥梁的自振周期及各阶周期对应的振型特点。一般情况下, 大跨桥梁主体结构的基本自振周期, 对于长周期地震动对工程结构作用的相关参数起控制作用, 所以在工程场地地震安全性评价工作中, 只需计算主体结构基本自振周期的具体数值。然而, 桥梁主体结构的几何形状、荷载条件、边界条件、材料性质等十分复杂, 在对大跨桥梁进行动力分析时, 通常不能得出基本自振周期的精确理论结果。因此, 寻找简洁方便、适用性广、精度较高的估算方法显得比较重要。

随着现代桥梁技术的日趋成熟, 大跨桥梁日益增多, 主要的结构型式有悬索桥、斜拉桥等, 然而, 桥梁结构的几何形状、荷载条件、边界条件、材料性质等是很复杂的, 其基本自振周期通常借助通用商业软件, 采用相对复杂的数值模拟计算分析得到。桥梁的自振频率和相应的振型应采用有限元方法计算, 也可按《公路桥梁抗风设计规范的公式 (JTG/T D60-01-2004)》(中华人民共和国交通部, 2004) 估算桥梁的基本自振周期。大型有限元模型得到的结果固然精度较高, 但是建模工作量大。对于从事工程场地地震安全性评价工作的工程师而言, 在可行性研究阶段能收集到的基础资料比较有限, 自身的专业知识特点和知识结构也不尽相同, 更难以通过实验室或者现场的振动台试验获得。为此, 本文根据规范内容修改后给出了悬索桥和斜拉桥的竖向扭转基本自振周期, 同时, 根据国内外相关计算成果和测试结果, 经过统计分析研究出了近似估算方法的公式, 可达到满足开展地震安全性评价工作需要的条件。

3.1 悬索桥基本自振周期估算方法

《公路桥梁抗风设计规范的公式 (JTG/T D60-01-2004)》(中华人民共和国交通部, 2004) 仅提供了悬索桥基频的估算表达式, 其实质是基本自振周期的倒数。而本文直接提供了桥梁的基本自振周期的估算方法。

单跨简支悬索桥的反对称竖向弯曲基本自振周期可按下式估算:

$$T_b = L \sqrt{\frac{m}{EI \left(\frac{2\pi}{L} \right)^2 + 2H_g}} \quad (14)$$

式中, T_b 为反对称竖向弯曲基本自振周期 (s); L 为悬索桥主跨跨径 (m); EI 为加劲梁竖向刚度 ($\text{N} \cdot \text{m}^2$); H_g 为恒荷载作用下单根主缆的水平拉力 (N); m 为桥面系和主缆的单位长度质量 (kg/m), $m = m_d + 2m_c$, 其中, m_d 为桥面系单位长度质量 (kg/m); m_c 为单根主缆单位长度质量 (kg/m)。

主跨跨径 500m 以上的悬索桥的反对称竖向弯曲基本自振周期可按下式估算:

$$T_b = \frac{\sqrt{f}}{1.16} \quad (15)$$

式中, T_b 为反对称竖向弯曲基本自振周期 (s); f 为主缆矢高 (m)。

中跨简支悬索桥的对称竖向弯曲基本自振周期可按下式估算:

$$T_b = 10L \sqrt{\frac{m}{E_c A_c}} \quad (16)$$

式中, E_c 为主缆的弹性模量 (N/m^2); A_c 为单根主缆的截面积 (m^2)。

中跨简支悬索桥的反对称扭转基本自振周期可按下式估算:

$$T_t = L \sqrt{\frac{m_d r^2 + \frac{1}{2} m_c B_c^2}{EI_\omega \left(\frac{2\pi}{L}\right)^2 + GI_d + \frac{H_g B_c^2}{2}}} \quad (17)$$

式中, T_t 为反对称扭转基本自振周期 (s); EI_ω 、 GI_d 分别为主梁截面的约束扭转刚度和自由扭转刚度 ($\text{N} \cdot \text{m}^4$ 和 $\text{N} \cdot \text{m}^2$), 对闭口箱梁可忽略约束扭转刚度; r 为加劲梁的截面惯性半径 (m); B_c 为主缆中心距 (m)。

悬索桥的对称扭转基本自振周期可按式估算:

$$T_t = 2L \sqrt{\frac{m_d r^2 + \frac{1}{2} m_c B_c^2}{GI_d + 0.05256 E_c A_c (B_c / 2)^2}} \quad (18)$$

通常情况下, T_b 的值大于 T_t 的值。因此, 在工程场地地震安全性评价工作中, 根据保守性原则, 宜采用两者之间的较大值进行计算分析, 这样是比较合理、可靠和准确的。

与规范公式相比, 肖汝诚 (1991) 的建议公式并未区分对称、反对称的具体情况 (近似计算有一定的误差), 此文献中得到悬索桥竖向弯曲基本自振周期的近似计算公式与本文的式 (15) 是一致的, 即:

$$T_b = \frac{\sqrt{f}}{1.16} \quad (19)$$

通常情况下, 当矢跨比 (主缆矢高与主跨跨径的比值) 从 1/8—1/12 发生变化时, 悬索桥的竖向、横向和扭转频率均有所下降。因此, 矢跨比影响着悬索桥的整体刚度, 在可行范围内, 悬索桥基本自振周期随矢跨比的增大而增加。悬索桥的一阶扭转频率与竖向弯曲频率的比值基本在 1.3—2.1 之间 (肖汝诚, 1991), 则悬索桥扭转基本自振周期的估算公式为:

$$\text{闭口断面:} \quad T_t = 0.4762 T_b \quad (20a)$$

$$\text{开口断面:} \quad T_t = 0.7692 T_b \quad (20b)$$

对于从事工程场地地震安全性评价工作的工程师而言, 由于部分规范公式相对比较繁琐, 因此, 本文根据我国部分特大型悬索桥自振特性 (孙胜江等, 2007), 假定矢跨比为 1/10 (则可求得主缆矢高的值), 并进行误差分析, 如表 3 所示。同时, 采用统计回归分析方法, 得到大跨悬索桥的竖向弯曲基本自振周期的估算公式。

表 3 部分大跨悬索桥基本自振周期对比分析

Table 3 Fundamental vibration period of several suspension bridges

悬索桥桥名	主跨/m	精确值/s	主缆矢高/m	规范/s	误差/%	本文/s	误差/%
江阴长江大桥	1385	19.2	139	10.1	47	17.0	11.5
香港青马大桥	1377	14.7	138	10.1	31	16.9	-14.9
四渡河大桥	900	11.0	90	8.2	26	11.3	-2.9
广东虎门大桥	888	10.9	89	8.1	25	11.2	-2.9
厦门海沧大桥	648	8.2	65	6.9	15	8.4	-2.1

续表

悬索桥桥名	主跨/m	精确值/s	主缆矢高/m	规范/s	误差/%	本文/s	误差/%
某吊桥（肖汝诚，1991）	604	6.7	60	6.7	0	7.9	-17.2
忠县长江大桥	560	10.1	56	6.5	36	7.3	27.5
汕头海湾大桥	452	6.3	45	5.8	8	6.1	4.0
吉林市松花江大桥	240	2.6	24	4.2	-62	3.6	-38.3
黄河大峡水库下游悬索桥	180	2.9	18	3.7	-26	2.9	0.2

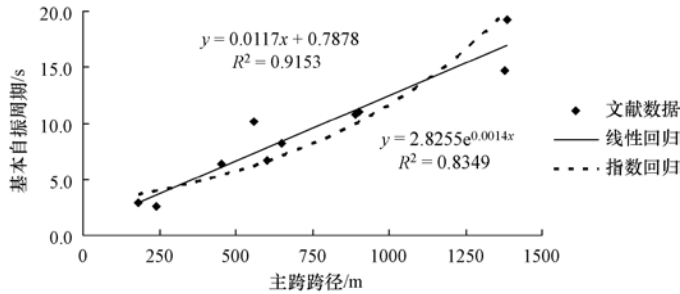


图1 悬索桥基本自振周期与主跨跨径的精确值和回归曲线图

Fig.1 Calculated values and regression curve of fundamental vibration period & main-span distance of suspension bridge

从图1可以看出，拟合曲线的回归相关系数的平方值分别为0.9153和0.8349，很接近于1，表明回归结果有比较高的可靠性。相对于指数方程曲线而言，在样本数较少的情况下，直线方程拟合的比较好。因此，可按式(21)估算悬索桥的竖向弯曲基本自振周期：

$$T_b = 0.0117L + 0.7878 \quad (21a)$$

$$T_b = 2.8255e^{0.0014L} \quad (21b)$$

上述拟合估算公式并没有考虑对称、反对称以及不同跨径的具体不同情况。从表3中可以看出，本文的拟合结果和精确值基本接近，本文的拟合公式比肖汝诚(1991)的具有更高的精度，特别是对于超大跨度的悬索桥。但是，考虑到地震安全性评价工作的实际需要，本文建议悬索桥的扭转基本自振周期的估算公式仍然采用式(20)，即斜拉桥的扭转基本自振周期为竖向弯曲基本自振周期的0.4762—0.7693（其优势分布趋向于0.6，不区分开口和闭口断面的具体情况）。

随着悬索桥主跨长度的增加，其基本自振周期也相应的增加。影响大跨桥梁基本自振周期的因素很多，不可能用同一种模型就可以对所有的主跨跨径和基本自振周期都能很好的拟合，因此，通常选用多种模型进行拟合，从中择优，使得所得结果和实际情况更加吻合。从工程安全的角度出发，采用回归公式进行基本自振周期估算时，应选择较大值作为地震安全性评价工作中的使用值。

3.2 斜拉桥基本自振周期估算方法

《公路桥梁抗风设计规范的公式(JTG/T D60-01-2004)》(中华人民共和国交通部, 2004)仅提供了斜拉桥基频的估算表达式，其实质是基本自振周期的倒数。而本文直接提供了桥梁的基本自振周期的估算方法。

双塔斜拉桥竖向弯曲的基本自振周期可按下式估算:

$$\text{无辅助墩的斜拉桥: } T_b = L/110 \quad (22a)$$

$$\text{有辅助墩的斜拉桥: } T_b = L/150 \quad (22b)$$

式中, T_b 为竖向弯曲基本自振周期 (s); L 为斜拉桥主跨跨径 (m)。

双塔斜拉桥扭转的基本自振周期可按下式估算:

$$T_t = \sqrt{L}/C \quad (23)$$

式中, T_t 为扭转基本自振周期 (s); C 为斜拉桥扭转基频经验系数, 可按表 4 取用。

表 4 斜拉桥扭转基频经验系数

Table 4 Empirical coefficients of torsion fundamental frequency of cable-stayed bridge

索面	主梁断面形状	钢桥	混凝土桥	索面	主梁断面形状	钢桥	混凝土桥
平行索面	开口	10	9	斜索面	开口	12	11
	半开口	12	12		半开口	14	12
	闭口	17	14		闭口	21	17

通常情况下, T_b 的值大于 T_t 的值。因此, 在工程场地地震安全性评价工作中, 根据保守性原则, 宜采用两者之间的较大值进行计算分析, 这样是比较合理、可靠和准确的。

与规范公式相比, 张杨永等 (2009) 的建议公式未区分有、无辅助墩的具体情况, 但并没有对近似计算的误差产生较大影响, 此文献中得到斜拉桥竖向弯曲基本自振周期的近似计算公式为:

$$T_b = \sqrt{L/40} \quad (24)$$

斜拉桥的一阶扭转频率与竖向弯曲频率的比值基本在 2.0—3.0 之间, 其优势分布趋向于 2.5 附近, 则斜拉桥扭转基本自振周期的估算公式为:

$$T_t = (0.3 \sim 0.5)T_b \quad (25)$$

对于主跨跨径 800m 以上斜拉桥的扭转基频的近似计算, 采用规范公式计算结果偏大 (张杨永等, 2009), 而按此文献建议公式计算, 具有较高的精度。同时, 本文根据部分特大型斜拉桥的自振特性 (见表 5), 经过统计回归分析, 得到了大跨斜拉桥竖向弯曲和扭转基本自振周期的估算公式。

从图 2 可以看出, 拟合曲线的回归相关系数的平方值分别为 0.8487 和 0.8475, 很接近于 1, 表明回归结果有比较高的可靠性。相对于直线方程而言, 在样本数较少的情况下, 乘幂方程曲线拟合的略微好一些。采用这两个拟合方程均比张杨永等 (2009) 的要更接近于精确值。因此, 可按式 (26) 估算斜拉桥的竖向弯曲基本自振周期:

$$T_b = 0.0032L + 1.7863 \quad (26a)$$

$$T_b = 0.1428L^{0.5116} \quad (26b)$$

从表 5 中可以看出, 张杨永等 (2009) 和本文的误差基本接近, 这两者均比规范值具有更高的精度, 特别是对于超大跨度的斜拉桥。但是, 考虑到地震安全性评价工作的实际需要, 本文建议斜拉桥的扭转基本自振周期的估算公式仍然采用式 (25), 即斜拉桥的扭转基本自振周期为竖向弯曲基本自振周期的 0.3—0.5 (通常取 0.4)。

随着斜拉桥主跨长度的增加，其基本自振周期也相应的增加。影响大跨桥梁基本自振周期的因素很多，不可能用同一种模型就可以对所有的主跨跨径和基本自振周期都能很好的拟合，因此，通常选用多种模型进行拟合，从中择优，使得所得结果和实际情况更加吻合。采用回归公式进行基本自振周期估算时，应选择较大值作为地震安全性评价工作中的使用值。

表 5 部分大跨斜拉桥自振周期对比分析

Table 5 Fundamental vibration period of several cable-stayed bridges

斜拉桥桥名	跨径/m	周期/s	规范/s	误差/%	张杨永/s	误差/%	本文/s	误差/%
上海泖港桥	200	1.9	1.8	-3.5	2.2	18.7	2.1	14.0
天津永和桥	260	2.5	2.4	-3.8	2.5	3.8	2.5	0.0
美国 P—K 桥	299	2.9	2.7	-7.6	2.7	-7.0	2.6	-10.3
金江金沙江大桥	324	2.7	2.7	0.0	2.8	3.9	2.7	0.3
武汉长江二桥	400	3.7	3.6	-1.8	3.2	-14.6	3.1	-17.3
东海大桥主桥	420	2.9	3.8	33.6	3.2	13.4	3.1	9.9
铜陵长江大桥	432	3.6	2.9	-20.7	3.3	-9.6	3.2	-12.4
湛江海湾大桥	448	3.0	3.0	-2.1	3.3	9.8	3.2	6.4
鄂黄长江大桥	480	3.5	3.2	-9.9	3.5	-2.3	3.4	-5.2
荆沙长江公路大桥	500	3.5	4.5	28.2	3.5	-0.3	3.4	-3.2
汕头海湾二桥	518	3.4	3.4	2.1	3.6	6.5	3.5	3.4
海口世纪大桥	518	4.0	4.7	17.9	3.6	-10.0	3.5	-12.6
斯卡恩圣特桥	530	3.6	4.4	23.6	3.6	1.2	3.5	-1.7
桃夭门大桥	580	3.0	4.1	35.5	3.8	26.4	3.7	22.9
徐浦大桥	590	3.3	3.9	20.5	3.8	17.5	3.7	14.3
杨浦大桥	602	3.7	4.0	7.2	3.9	3.6	3.8	0.8
南京长江二桥	628	3.7	4.2	13.4	4.0	7.4	3.9	4.5
琼州海峡工程	800	4.0	5.3	31.9	4.5	10.9	4.4	8.2
Normandy 大桥	856	4.5	5.7	26.3	4.6	2.2	4.5	-0.1
Tatara 大桥	890	5.0	4.2	-16.7	4.7	-6.1	4.6	-8.3
伶仃洋西航道	950	5.0	6.3	25.9	4.9	-3.0	4.8	-5.2
Stonecutters 大桥	1018	4.8	6.8	40.8	5.0	4.4	4.9	2.2
苏通大桥	1088	5.1	7.2	41.3	5.2	1.7	5.1	-0.4

4 结论

(1) 计算结构自振基本周期的简便估算方法和经验公式，在可行性研究阶段，需要快速估算结构周期，使用这种公式将十分方便，精确度也符合地震安全性评价工作的要求。但是应注意，经验公式有其局限性、都有其特定的适用范围，使用时对估算方法要加以选择与判断。

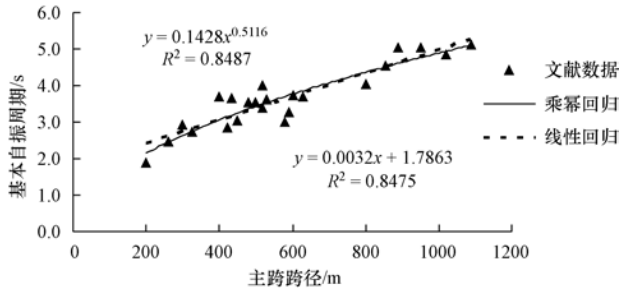


图2 斜拉桥基本自振周期与主跨跨径的精确值和回归曲线图

Fig. 2 Calculated values and regression curve of fundamental vibration period & main-span distance of cable-stayed bridge

(2) 对(超)高层建筑物的自振周期,可以通过理论计算、现场实测和试验研究等不同途径来确定,但是就目前的科学水平来看,无论数值模拟计算或工程现场实测求取的自振周期,都还不能概括建筑结构的各种复杂的情况及细节。因此,允许通过估算方法等多种途径,甚至包括工程技术人员的经验来判断。

(3) 对于巨型储油罐主体结构而言, T_w 的值通常大于 T_c 的值。因此,在工程场地地震安全性评价工作中,为安全起见,宜采用储液晃动基本自振周期 T_w 的值进行分析,相对来说是比较合理、可靠和准确的。

(4) 对于大跨桥梁主体结构而言(无论是悬索桥还是斜拉桥), T_b 的值通常大于 T_l 的值。因此,在工程场地地震安全性评价工作中,为安全起见,宜采用大跨桥梁竖向弯曲基本自振周期 T_b 的值进行分析,相对来说是比较合理、可靠和准确的。

参考文献

- 包世华, 2001. 新编高层建筑结构. 北京: 中国水利水电出版社.
- 国家发展和改革委员会, 2004. 石油化工构筑物抗震设计规范(SHT 3147-2004). 北京: 中国石化出版社.
- 国家石油和化学工业局, 1999. 石油化工钢制设备抗震设计规范(SH 3048-1999). 北京: 中国石化出版社.
- 李海涛, 张富强, 2003. 高层建筑结构自振周期的计算方法探讨. 河北建筑工程学院学报, **21**(1): 67—68, 72.
- 卢寿德主编, 2006. 《工程场地地震安全性评价(GB 17741-2005)》宣贯教材. 北京: 中国标准出版社.
- 孙胜江, 刘书伟, 2007. 特大跨悬索桥动力特性及参数分析. 公路, **32**(11): 41—45.
- 肖汝诚, 1991. 吊桥结构自振频率的计算方法. 华东公路, (1): 54—58.
- 张杨永, 肖汝诚, 2009. 双塔斜拉桥自振频率的近似计算. 公路工程, **34**(1): 72—76.
- 中华人民共和国建设部, 2002. 高层钢筋混凝土结构技术规程(JGJ 32-2002). 北京: 中国建筑工业出版社.
- 中华人民共和国建设部, 2003. 立式圆筒形钢制焊接油罐设计规范(GB 50341-2003). 北京: 中国计划出版社.
- 中华人民共和国交通部, 2004. 公路桥梁抗风设计规范的公式(JTG/T D60-01-2004). 北京: 人民交通出版社.

Discussion on Estimation Measures of Fundamental Vibration Period of Major Construction Projects

Hong Haichun, Peng Xiaobo, Bi Xuemei and Li Xibin

(Earthquake Administration of Jiangsu Province, Nanjing 210014, China)

Abstract Based on the research and analysis on the codes and data, estimation measures of fundamental vibration period of major construction projects, such as super high-rise building, jumbo oil tanks and large-span bridges, are discussed. Our results will help to provide the estimation measures for determination of important parameters of the action on engineering structures applied by the long-period earthquake motion in the evaluation of seismic safety for engineering sites.

Key words: Fundamental vibration period; Super high-rise building; Jumbo oil tanks; Large-span bridges