

Seismic Analysis of Low Pylon Cable-Stayed Bridge Based on Traveling Wave Effect

Yecheng Chen¹, Qimeng Li², Xiaobiao Jiang²

¹Kunming Construction Quality and Safety Supervision and Management Center, Kunming Yunnan

²Civil Engineering and Architecture Faculty, Kunming University of Science and Technology, Kunming Yunnan

Email: 302819445@qq.com

Received: Sep. 5th, 2018; accepted: Sep. 19th, 2018; published: Sep. 26th, 2018

Abstract

The low tower cable-stayed bridge, also known as the partial cable-stayed bridge, is a combined bridge between the continuous rigid frame bridge and the conventional cable-stayed bridge. As a major highway bridge, the large-span low-rise cable-stayed bridge has a large investment and will cause huge economic losses once it is destroyed in the earthquake. Therefore, the seismic performance of long-span low-rise cable-stayed bridges should be fully studied. Taking a bridge as an engineering example, considering the geological conditions and topographic conditions of its location, the finite element model is established to analyze the elasto-plastic dynamics of the structure. Considering the traveling wave effect factors, the influence of the seismic response on the structure is discussed, and the corresponding laws are summed up.

Keywords

Low Tower Cable-Stayed Bridge, Seismic Response, Structural Internal Force Analysis, Traveling Wave Effect

基于行波效应的矮塔斜拉桥抗震分析

陈业成¹, 李启萌², 江小颺²

¹昆明市建设工程质量安全监督管理总站, 云南 昆明

²昆明理工大学, 建筑工程学院, 云南 昆明

Email: 302819445@qq.com

收稿日期: 2018年9月5日; 录用日期: 2018年9月19日; 发布日期: 2018年9月26日

摘要

矮塔斜拉桥又称部分斜拉桥, 是一种介于连续刚构桥和常规斜拉桥之间的组合桥型。大跨矮塔斜拉桥作

文章引用: 陈业成, 李启萌, 江小颺. 基于行波效应的矮塔斜拉桥抗震分析[J]. 土木工程, 2018, 7(5): 739-745.

DOI: 10.12677/hjce.2018.75088

为重要公路桥梁,投资较大,一旦在地震中遭到破坏,将会造成巨大的经济损失。所以大跨矮塔斜拉桥的抗震性能应该得到充分的研究。本文以某大桥为工程实例,考虑其所处位置的地质条件及地形条件,建立有限元模型对结构进行弹塑性动力分析,考虑行波效应因素,讨论其对结构地震反应性能的影响,总结出相应的规律。

关键词

矮塔斜拉桥,地震反应,结构内力分析,行波效应

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 工程概况

矮塔斜拉桥又称部分斜拉桥,是近 30 多年发展起来的一种新型的桥梁结构,实际上是介于连续刚构桥和常规斜拉桥之间的组合桥型[1]。由于其跨越能力大、造型美观、施工方便,非常具有发展前景。我国属于地震多发国,自从唐山地震以来,桥梁的抗震防灾工作日益受到重视。大跨矮塔斜拉桥作为重要公路桥梁,投资较大,一旦在地震中遭到破坏,将会造成巨大的经济损失。所以大跨矮塔斜拉桥的抗震性能应该得到充分的研究[2] [3]。

本桥位于某国道温州西过境公路,连接鹿城区与永嘉县瓯北两区县,是浙江省的重要节点工程。桥跨布置为 140 m + 2 × 225 m + 120 m,采用三塔四跨单索面形式,主梁采用预应力混凝土箱梁。桥墩采用双肢薄壁墩,采用塔墩梁固结体系(图 1)。

采用有限元分析软件 Midas Civil 2015 建立该斜拉桥的空间有限元模型,如图 2 所示。主梁采用脊梁模式进行主梁模拟,Π 形模式,双主梁模式。脊梁模式的优点在于对刚度系统和质量系统的模拟较为准确,该模式适用于模拟自由扭转刚度较大的闭口箱梁,脊梁模式相对其他模式来说也较为简便,使用较少的节点数与单元数,计算精度就能够满足工程需求。在 Midas/civil 中用 PSC 变截面梁单元来模拟主梁。斜拉索采用桁架单元对本大桥的斜拉索进行模拟,只考虑初拉力,不对斜拉索进行弹性模量折减。

边界条件为:桥塔节点与主梁节点之间采用刚性连接,主梁与桥墩之间采用弹性连接中的刚接进行连接,斜拉索与主梁之间的连接采用弹性连接中的刚接。桩基础用三维梁单元进行模拟,土对桩基的约束作用通过节点弹性支承进行模拟。为方便表述,从左到右依次定义为 1#、2#、3#桥塔,双肢薄壁墩从左到右依次称为 1#左墩、1#右墩、2#左墩、2#右墩、3#左墩、3#右墩。

采用多点激励分析模拟地震波行波效应,具体方法采用的是大质量法(LMM)。大质量法是对结构模型进行动力等效的一种分析方法,该方法可以用于非线性分析,其实质是通过对质量矩阵主对角元充大数的方法来实现,具有数学表达简单,结果精确的特点。该方法具体在 Midas/civil 2015 中的实现方式是在地基节点上施加相当于结构总质量 10^6 倍的质量,并释放该节点与地震力输入方向自由度,然后施加地震波响应的地震力到该节点,以此来带动结构的响应,附加大质量是为了使结构的总质量相对于大质量来说可以忽略不计,则施加于基础上的加速度近似相等于施加到整个结构上的加速度[4]。

进行行波效应模拟的计算方法假定如下: 1) 假定震源位于与桥梁支承点在同一水平位置,这样跨径除以波速就可以得到地震波到达各支承点的时间差,而不需要考虑地震波传播方向与支承连接方向的夹角,可以简化计算; 2) 只考虑支承处地震波相位变化的影响,而忽略了地震波传播过程中的频散、衰减、

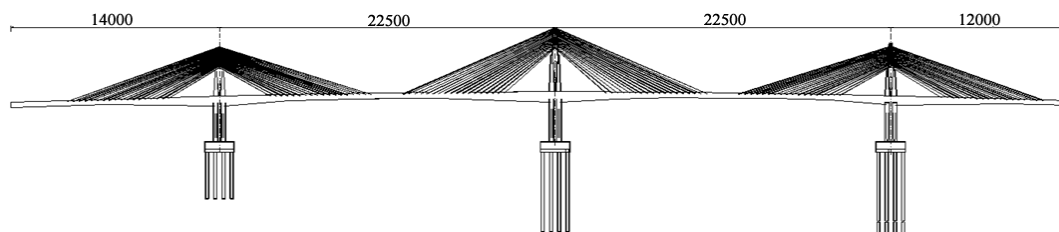


Figure 1. Layout of bridge facade

图 1. 桥梁立面布置图

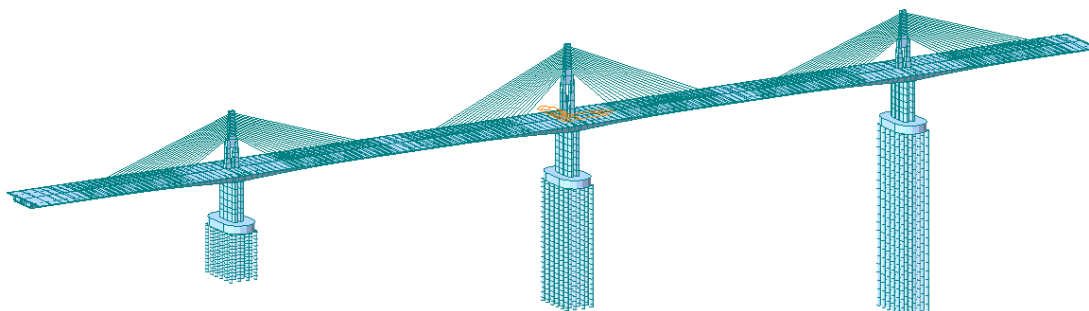


Figure 2. Bridge finite element model

图 2. 桥梁有限元模型

波形改变等因素；3) 假定行波效应只对顺桥向产生影响，忽略横桥向和竖桥向影响。地震波采用 TH4TG045 (1984, nrg_90_nor) 波，地震波在基岩中传播速度为 2000 m/s~2500 m/s，在软土层中为 50~250 m/s [5]。

2. 行波效应对弹塑性动力分析的影响

2.1. 行波效应对位移的影响

进行行波效应模拟的计算方法假定如下：1) 假定震源位于与桥梁支承点在同一水平位置，这样跨径除以波速就可以得到地震波到达各支承点的时间差，而不需要考虑地震波传播方向与支承连接方向的夹角，可以简化计算；2) 只考虑支承处地震波相位变化的影响，而忽略了地震波传播过程中的频散、衰减、波形改变等因素；3) 假定行波效应只对顺桥向产生影响，忽略横桥向和竖桥向影响。地震波采用 TH4TG045 (1984, nrg_90_nor) 波，地震波在基岩中传播速度为 2000 m/s~2500 m/s，在软土层中为 50~250 m/s [5]。根据本桥的场地特点，在 1000 m/s 及以下从 100 m/s 开始每隔 100 m/s 取一个波速，1000 m/s 以上到 2500 m/s 每隔 500 m/s 取一个波速，共取波速 14 个，只进行顺桥向输入[6]。

表 1 列出各墩左肢墩顶及左下塔柱塔底截面在不同波速下的最大顺桥向位移。通过表 1 和位移峰值对比图 3、图 4、图 5 可以看出：

1) 同一位置不同波速下，波速越低相位差也就越大，行波效应会造成位移的增大或者减小，折线图具有一定的波动性，波速越低折线图的波动就会越大，当波速小于 500 m/s 时波动最大；

2) 同一位置不同波速下，波速越高相位差也就越小，行波效应对位移影响也就越小，波速越高位移越趋近于一致激励。

2.2. 行波效应对内力的影响

表 2 列出各墩左肢墩顶、墩底及左下塔柱塔底截面在不同波速下的顺桥向最大转动弯矩值 MY。

由表 2 和最大 MY 对比图 6、图 7、图 8 可以看出：

1) 1#桥墩左肢墩墩顶在 100 m/s 波速下相对于一致激励时内力 MY 减小达到 24.9%；2#桥墩左肢墩墩顶在 200 m/s 波速下相对于一致激励时内力 MY 增大达到 17.1%；

2) 同一位置不同波速下，波速越低相位差会越大，行波效应会导致其弯矩 MY 增大或者减小。大多数波速下是减小的，折线图具有一定的波动性，波速越低折线图的波动会越大。随着波速增大曲线的趋于平缓，行波效应下内力与一致激励下内力的最大差值基本上在 250 m/s 波速下出现的；

Table 1. Peak displacement along the bridge under traveling wave effect

表 1. 行波效应下顺桥向位移峰值(单位：mm)

截面 波速(m/s)	左下塔柱塔底	左肢墩墩顶	左下塔柱塔底	左肢墩墩顶	左下塔柱塔底	左肢墩墩顶
一致激励	3.38E+02	2.91E+02	1.30E+02	1.19E+02	3.18E+02	2.74E+02
2500	3.35E+02	2.89E+02	1.29E+02	1.19E+02	3.20E+02	2.76E+02
2000	3.35E+02	2.88E+02	1.29E+02	1.19E+02	3.20E+02	2.76E+02
1500	3.33E+02	2.87E+02	1.28E+02	1.19E+02	3.20E+02	2.76E+02
1000	3.31E+02	2.84E+02	1.26E+02	1.17E+02	3.17E+02	2.72E+02
900	3.29E+02	2.82E+02	1.24E+02	1.16E+02	3.16E+02	2.70E+02
800	3.26E+02	2.79E+02	1.22E+02	1.14E+02	3.14E+02	2.68E+02
700	3.22E+02	2.76E+02	1.20E+02	1.11E+02	3.13E+02	2.67E+02
600	3.19E+02	2.75E+02	1.18E+02	1.09E+02	3.13E+02	2.67E+02
500	3.19E+02	2.74E+02	1.18E+02	1.09E+02	3.10E+02	2.66E+02
400	3.21E+02	2.77E+02	1.21E+02	1.11E+02	3.14E+02	2.70E+02
300	3.17E+02	2.72E+02	1.23E+02	1.11E+02	3.16E+02	2.71E+02
200	3.08E+02	2.66E+02	1.21E+02	1.10E+02	3.20E+02	2.71E+02
100	2.96E+02	2.54E+02	1.25E+02	1.16E+02	3.27E+02	2.79E+02

Table 2. MY peak value of bending moment under traveling wave effect

表 2. 行波效应下弯矩 MY 峰值表(单位：kN·m)

截面 波速(m/s)	左下塔柱塔底	左肢墩墩顶	左肢墩墩底	左下塔柱塔底	左肢墩墩顶	左肢墩墩底	左下塔柱塔底	左肢墩墩顶	左肢墩墩底
一致激励	116,140	530,854	512,346	96,588	332,017	273,381	117,571	329,154	799,778
2500	115,618	388,972	527,355	97,963	271,562	201,062	131,047	348,878	603,773
2000	118,721	473,154	438,881	105,873	379,020	307,481	124,600	290,262	740,036
1500	116,164	462,482	416,124	105,510	373,824	272,908	122,318	286,529	748,283
1000	114,774	518,735	503,914	97,463	321,682	260,223	117,016	322,842	791,437
900	114,365	485,603	505,728	97,570	323,292	261,918	117,855	323,638	793,803
800	114,181	522,759	506,744	97,213	325,229	263,843	117,709	325,034	794,295
700	114,423	464,692	439,324	95,860	286,659	204,663	115,073	278,708	766,766
600	114,362	461,438	425,485	96,120	278,117	203,188	115,960	278,871	762,785
500	115,046	460,765	424,115	97,374	278,134	206,601	118,908	282,007	750,742
400	116,576	465,770	430,688	98,918	292,809	205,616	119,178	288,998	750,794
300	115,682	457,154	414,432	101,126	333,669	236,458	117,922	276,901	744,598
200	119,410	498,770	439,456	108,777	388,594	271,973	124,511	280,241	733,179
100	108,599	398,882	357,118	98,027	298,925	232,464	126,872	246,989	692,434

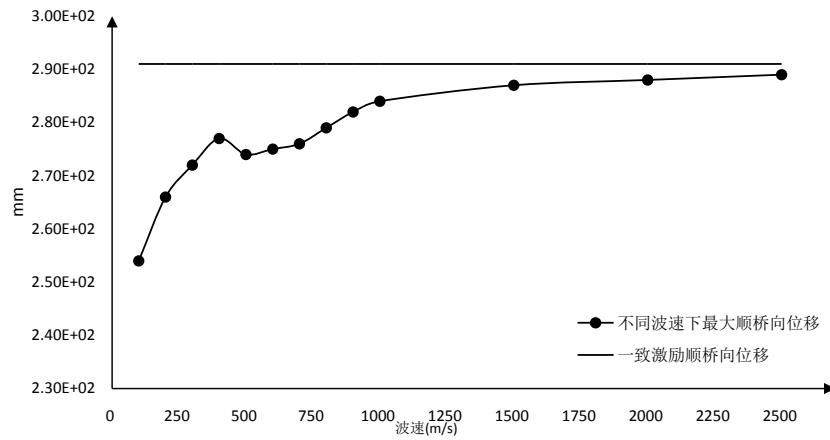


Figure 3. Comparison of 1# bridge pier left pier pier top uniform excitation and traveling wave effect of peak displacement along bridge

图 3. 1#桥墩左肢墩墩顶一致激励与行波效应下顺桥向位移峰值对比图

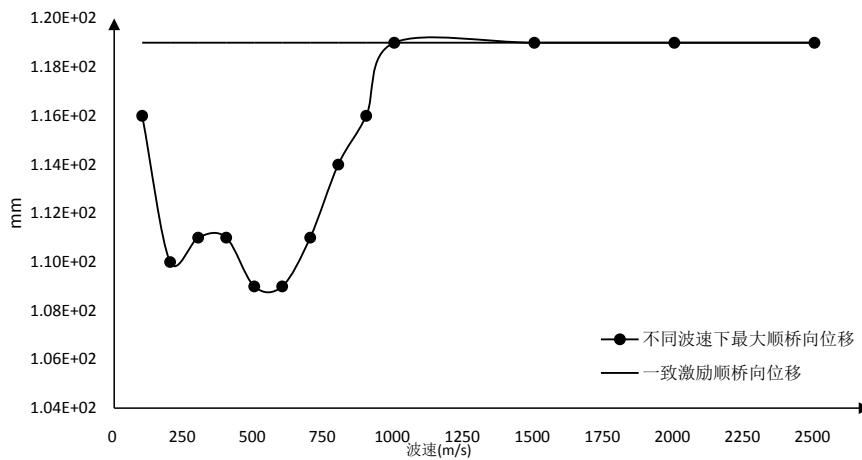


Figure 4. Comparison of 2# bridge pier left pier pier top uniform excitation and traveling wave effect of peak displacement along bridge

图 4. 2#桥墩左肢墩墩顶一致激励与行波效应下顺桥向位移峰值对比图

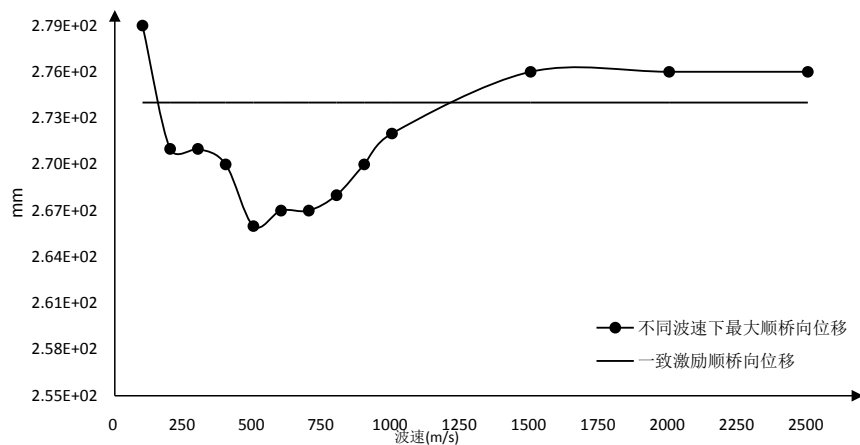


Figure 5. Comparison of 3# bridge pier left pier pier top uniform excitation and traveling wave effect of peak displacement along bridge

图 5. 3#桥墩左肢墩墩顶一致激励与行波效应下顺桥向位移峰值对比图

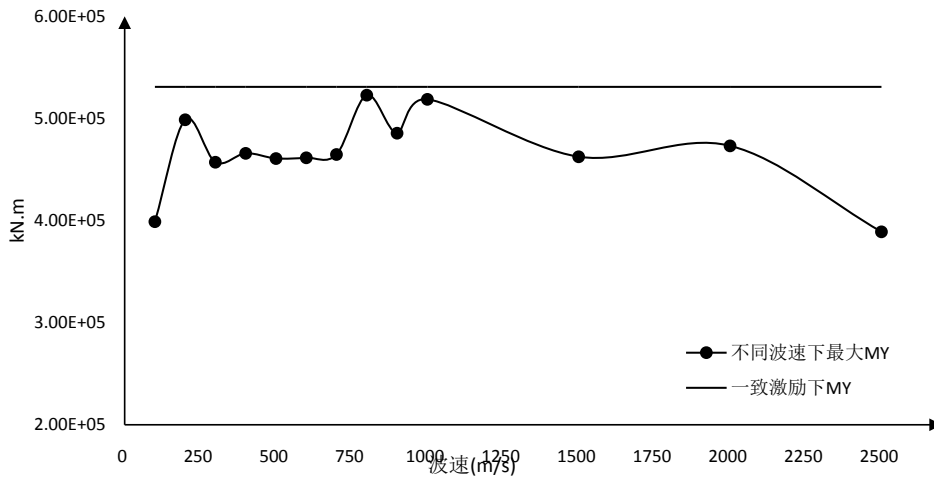


Figure 6. Maximum MY comparison of 1# pier's left pier pier top under uniform excitation and traveling wave effect
图 6. 1#桥墩左肢墩墩顶一致激励与行波效应下最大 MY 对比图

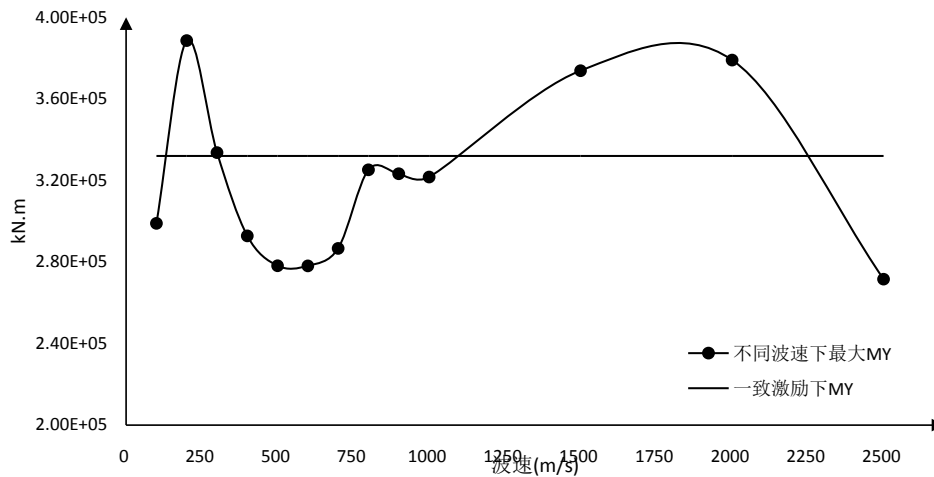


Figure 7. Maximum MY comparison of 2# pier's left pier pier top under uniform excitation and traveling wave effect
图 7. 2#桥墩左肢墩墩顶一致激励与行波效应下最大 MY 对比图

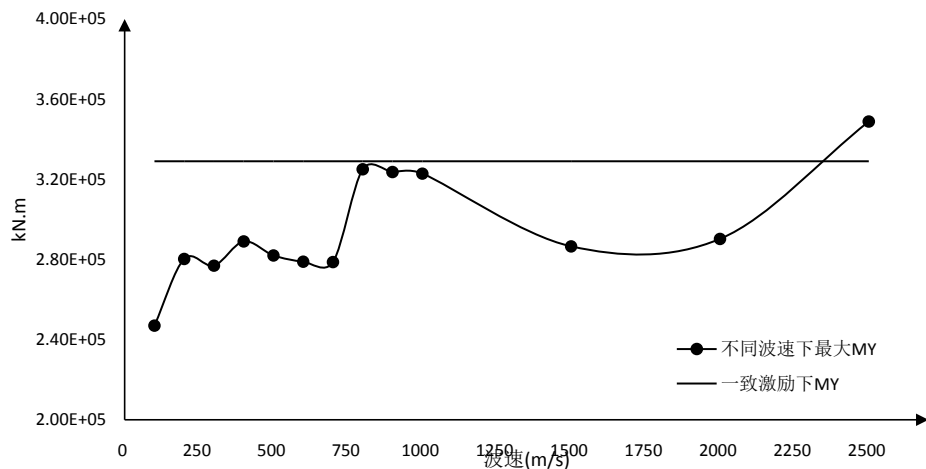


Figure 8. Maximum MY comparison of 3# pier's left pier pier top under uniform excitation and traveling wave effect
图 8. 3#桥墩左肢墩墩顶一致激励与行波效应下最大 MY 对比图

3) 同一位置不同波速下, 波速越高相位差会越小。行波效应对内力弯矩 MY 的影响也越小, 波速越高 MY 峰值越趋近于一致激励。当波速大于 1500 m/s 时, 行波效应对内力影响趋于较小。

3. 结论

通过对本桥进行弹塑性动力分析, 得到如下结论。

1) 在行波效应的影响下, 当波速较低时, 行波效应会导致特征截面的位移值相对于一致激励时产生一定的波动, 尤其是在 500 m/s 的波速内波动最大, 可见当在软土地基中时, 低波速行波效应对弹塑性动力时程分析法的位移结果会产生较大影响, 在类似场地条件及类似大跨度矮塔斜拉桥的抗震设计中应注意对行波效应的考虑。

2) 在行波效应的影响下, 当波速较高, 相位差较小时, 随着波速的增大, 位移结果值是不断趋近于一致激励的, 当波速大于 1000 m/s 以上时, 位移结果值几乎是单调增长并不断趋近于一致激励结果; 可见在基岩地基中, 高波速时行波效应对弹塑性动力时程分析法的位移结果影响较小。

3) 在行波效应的影响下, 弹塑性动力时程分析的内力结果与位移结果变化规律类似。在 500 m/s 以内波速时, 内力结果的波动较大, 相对于一致激励时, 增大或减小的最大值在 20% 以上。当大跨矮塔斜拉桥位于软土地基上时, 行波效应的考虑是非常必要的。当波速大于 1000 m/s 以上时, 内力结果值是不断趋近于一致激励结果。因此当大跨矮塔斜拉桥位于基岩地基中时, 高波速行波效应对弹塑性动力时程分析的内力结果影响较小。

参考文献

- [1] 邵旭东. 桥梁工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [2] 韩金豹. 高烈度地震区斜拉桥抗震设计与分析[J]. 工程与建设, 2017(6): 788-791.
- [3] 刘陆东. 混凝土独塔斜拉桥地震反应及易损性分析[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- [4] 范立础, 胡世德, 叶爱君. 大跨度桥梁抗震设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [5] 饶建雄. 高墩大跨连续刚构桥抗震设计研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [6] 孙强. 金东大桥抗震分析与研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2014.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3458, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: hjce@hanspub.org