

考虑转动的双曲面球型减隔震支座竖向位移分析

史先飞¹, 周彦锋¹, 郑纪研¹, 彭天波²

(1.华设设计集团股份有限公司, 江苏 南京 210000; 2.同济大学, 上海市 200092)

摘要: 双曲面球型减隔震支座的转动会造成支座竖向高度的变化, 对连续梁桥内力造成影响。为了研究双曲面球型减隔震支座转动中的竖向位移, 在分析了纯转和伴随水平位移的转动两种转动情况的转动过程基础上, 建立了双曲面球型减隔震支座转动简化模型, 通过理论推导得到了支座转动竖向位移公式。同时分析了双曲面球型减隔震支座转动中竖向位移的影响因素, 为双曲面球型减隔震支座设计和连续梁桥内力计算提供理论依据。

关键词: 双曲面球型减隔震支座; 转动; 竖向位移; 连续梁桥

中图分类号: U443.36

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2022)12-0130-03

0 引言

经工程实践证明, 桥梁抗震设计方法中减隔震设计是最经济、最有效的方法^[1,2]。该方法依靠减隔震支座来完成减震和隔震目标, 从而降低桥梁的震害。而双曲面球型减隔震支座因为具有构造简单、承载力大、耐久性好等优点, 在众多减隔震支座中有着非常明显的减震效果^[3-6], 在连续梁桥中已得到了广泛的应用。

双曲面球型减隔震支座是利用大半径球面摩擦副代替球形支座的平面摩擦副形成的一种减隔震支座, 其构造见图1。

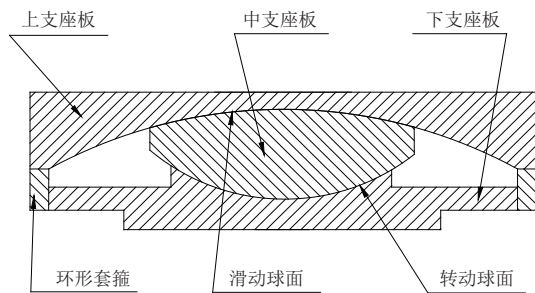


图1 双曲面球型减隔震支座的构造示意图

该支座在使用过程中, 会通过自身的水平位移和转动, 以适应连续梁桥梁体自由伸缩和墩梁间转动的需要。而支座在发生水平位移和转动时, 均伴随着支座竖向高度的变化。支座的竖向位移会对连续梁桥的内力尤其是曲线梁桥的内力产生很大影响^[7], 而对于高速列车桥梁, 支座的竖向位移还会影响列

车的行车安全^[8]。因此有必要结合双曲面球型减隔震支座实际工作中的状态, 对支座同时发生水平位移和转动时的竖向位移进行分析。

彭天波、李建中等^[9]通过理论推导和试验验证, 研究了水平位移下的双曲面球型减隔震支座的竖向位移, 并分析了地震时该支座产生竖向位移的机理和影响因素, 该文得到了只有水平位移的双曲面球型减隔震支座的竖向位移理论公式, 见式(1)。

$$\Delta H = H - \sqrt{H^2 - D^2} \quad (1)$$

式中: ΔH 为支座竖向位移; H 为中支座板球心距, 即两个曲面球心的距离; D 为上下支座板间的水平位移。

然而只考虑水平位移下的支座竖向位移是不精确, 因为该支座在工作时, 不仅有水平位移, 还有转动, 但是目前由双曲面球型减隔震支座转动造成的竖向位移还没有相关的理论研究, 也没有对该支座实际工作中同时发生水平位移和转动的支座竖向位移的相关研究。故本文旨在通过研究考虑转动的双曲面球型减隔震支座工作状态, 用理论推导的方法得到支座的竖向位移, 并分析其影响因素, 为该支座设计和连续梁桥内力计算提供更精确和更合理的理论依据。

1 考虑转动的双曲面球型减隔震支座工作状态

为了研究考虑转动的双曲面球型减隔震支座竖向位移, 首先应研究该支座考虑转动的实际工作状态。该支座的转动受墩梁转角约束, 但其水平位移则可随着墩梁间水平位移的改变而改变, 因此支座板间水平相对位移和支座转角是相互独立的变量。

收稿日期: 2022-08-26

作者简介: 史先飞(1991—), 男, 硕士, 工程师, 从事桥梁设计工作。

双曲面球型减隔震支座初始状态和支座参数见图2,此时支座两个上下支座板之间没有转动,也没有相对水平位移。

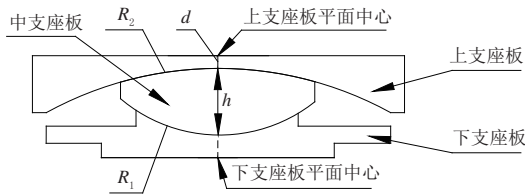


图2 双曲面球型减隔震支座初始状态

图2中:上支座板的中心厚度为 d ,中支座板中心厚度为 h ,中支座板的转动球面半径为 R_1 ,滑动球面半径为 R_2 。定义中支座板两个球面球心距为 H ,则 $H=R_1+R_2-h$ 。

参与工作的双曲面球型减隔震支座既有水平位移,又有转动。根据支座水平位移和转动之间的关系,可以把支座分为两种工作状态:(1)状态1为上支座板平面中心相对于下支座板平面中心朝着转角内部移动,见图3;(2)状态2为上支座板平面中心相对于下支座板平面中心朝着转角外部移动,见图4。

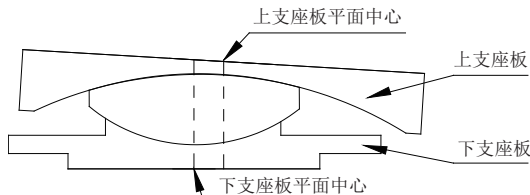


图3 双曲面球型减隔震支座工作状态1

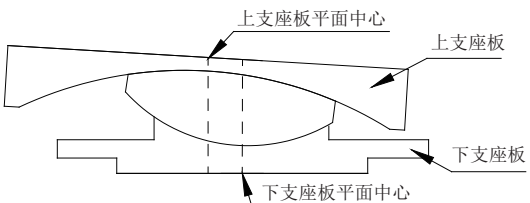


图4 双曲面球型减隔震支座工作状态2

这两种支座的工作状态的区别是上下支座板间运动方向是相反的,两个支座板平面中心的竖向距离变化即考虑转动的双曲面球型减隔震支座的竖向位移。

2 考虑转动的双曲面球型减隔震支座竖向位移理论推导

如图3和图4所示,双曲面球型减隔震支座的竖向位移即上下两个支座板平面中心的竖向距离变化。可以取上支座板和中支座板为研究对象,计算支座工作时和初始状态时中支座板转动球面最低点与上支座板平面中心的竖向距离变化即可得到支座的竖向位移。以工作状态1为例,计算模型见图5。

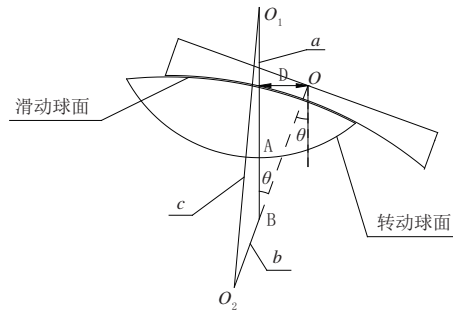


图5 竖向位移计算模型

图5中: O 为上支座板平面中心, O_1 为中支座板转动球面球心, O_2 为中支座板滑动球面球心, A 点为中支座板转动球面最低点, θ 为支座转动的角度, D 为上下支座板间水平相对位移,工作状态1时 D 取正值,工作状态2时 D 取负值。

计算 A 点到 O 点的竖向距离,只需用 B 点到 O 点的竖向距离减去 A 、 B 两点的竖向距离即可。如图5所示,设 O_1 与 A 之间的距离为 a , O_2 与 B 之间的距离为 b , O_1 与 O_2 之间的距离为 c ,设初始状态时 O 与 A 之间的距离为 H_{0A} ,工作时 O 与 A 之间的距离为 H_{0A}' 。根据几何条件得:

$$b = R_2 + d - \frac{D}{\sin \theta}; c = H; H_{0A}' = h + d$$

取 $\triangle O_1BO_2$,利用余弦定理,可得:

$$\cos(\pi - \theta) = (a^2 + b^2 - c^2) / (2ab) \quad (2)$$

解之得:

$$a = \sqrt{b^2 \cos^2 \theta - b^2 + c^2} - b \cos \theta \quad (3)$$

把 b 和 c 的值代入(3)式可得:

$$a = \sqrt{\left(R_2 + d - \frac{D}{\sin \theta}\right)^2 (\cos^2 \theta - 1) + H^2} - \left(R_2 + d - \frac{D}{\sin \theta}\right) \cos \theta \quad (4)$$

所以 A 点和 B 点之间的距离为:

$$L_{AB} = a - L_{AO_1} = \sqrt{\left(R_2 + d - \frac{D}{\sin \theta}\right)^2 (\cos^2 \theta - 1) + H^2} - \left(R_2 + d - \frac{D}{\sin \theta}\right) \cos \theta - R_1 \quad (5)$$

因此可得 A 点到 O 点的竖向距离,为:

$$H_{0A} = H_{0B} - L_{AB} = \frac{D}{\tan \theta} + \left(R_2 + d - \frac{D}{\sin \theta}\right) \cos \theta + R_1 - \sqrt{\left(R_2 + d - \frac{D}{\sin \theta}\right)^2 (\cos^2 \theta - 1) + H^2} \quad (6)$$

所以考虑转动的支座竖向位移为:

$$\begin{aligned} \Delta H &= H_{0A} - H_{0A}' \\ &= \frac{D}{\tan \theta} + \left(R_2 + d - \frac{D}{\sin \theta}\right) \cos \theta + R_1 - h - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & d - \sqrt{\left(R_2 + d - \frac{D}{\sin \theta}\right)^2 (\cos^2 \theta - 1) + H^2} \\
 &= H + (R_2 + d)(\cos \theta - 1) \\
 & - \sqrt{\left(R_2 + d - \frac{D}{\sin \theta}\right)^2 (-\sin^2 \theta) + H^2} \\
 &= H + (R_2 + d)(\cos \theta - 1) - \\
 & \sqrt{H^2 - [D - (R_2 + d)\sin \theta]^2} \quad (7)
 \end{aligned}$$

设 $m = (R_2 + d)(\cos \theta - 1)$, $n = (R_2 + d)\sin \theta$, 则式(6)转变为:

$$\Delta H = H + m - \sqrt{H^2 - (D - n)^2} \quad (8)$$

式(7)即为考虑转动的支座竖向位移公式,对比发现,式(1)为式(8) θ 为0时的特例。

3 考虑转动的双曲面球型减隔震支座竖向位移的影响因素

根据式(8)可以发现,影响考虑转动的双曲面球型减隔震支座竖向位移的因素有 H 、 D 、 $R_2 + d$ 和转角 θ 。为了更好的研究它们对 ΔH 的关系,本文取四种参数不同的支座,得到 D 和 ΔH 的关系曲线见图6,支座主要参数见表1。

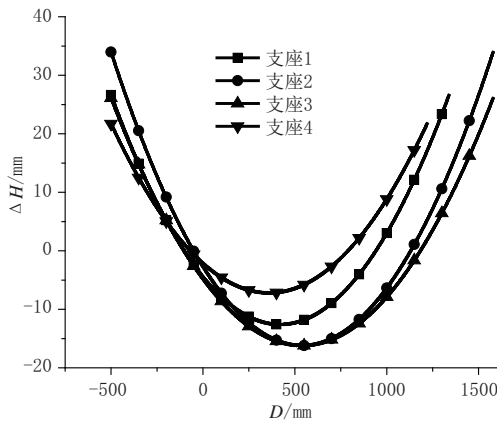


图6 D 与 ΔH 的关系

表1 三种不同支座的主要参数

	H/mm	$R^2 + d/\text{mm}$	θ/rad
支座1	10 800	7 000	0.06
支座2	10 800	9 000	0.06
支座3	12 800	9 000	0.06
支座4	12 800	9 000	0.05

由图6可知, D 与 ΔH 近似抛物线的关系:当 D 取正值,即当考虑转动的支座在状态1工作时,随着支座水平位移的增大,支座竖向高度先减小,然后增大;当 D 取负值,即当考虑转动的支座在状态2工作时,随着支座水平位移的增大,支座的竖向高度一直在增大。

根据考虑转动的双曲面球型减隔震支座竖向位

移式(8)可以发现,当 $D=n$ 时,支座高度减小量最大,减小量为 m 值。由于 m 、 n 只与 $R_2 + d$ 和转角 θ 有关,所以 $R_2 + d$ 和转角 θ 对考虑转动的支座竖向位移影响最大,由图6四种支座的位移曲线也可以发现。球心距 H 对支座竖向位移的影响不是很大,主要对抛物线的开口大小有一定的影响,对比支座2和支座3可以发现,球心距越小的支座, $D-\Delta H$ 抛物线开口越大,相同的 D 值对应的 ΔH 值越小。

4 结 语

本文建立了双曲面球型减隔震支座转动模型,能够很好的模拟该支座的两种情况的转动,即纯转和伴随水平位移的转动。接着通过理论推导得到了两种转动情况的支座转动竖向位移理论公式,并分析了影响支座转动竖向位移的因素,可以得到以下结论:

(1)双曲面球型减隔震支座的纯转会造成的支座竖向高度的减小,但减小量较小,随着 R_1 和 θ 的增大而增大;

(2)随着支座板间水平相对位移的增大,伴随水平位移的支座转动会使得支座竖向高度先减小、后增大, R_2 和 θ 决定支座竖向高度减小时的支座板间水平相对位移的取值范围, R_1 、 R_2 和 θ 决定支座竖向高度减小的最大值。

因此,在进行双曲面球型减隔震支座设计时,为了减小由于支座转动造成的竖向位移,应尽量选择中支座板转动球面半径较大、滑动球面半径较小、中心厚度较大的中支座板设计。对于墩梁间转角较大的连续梁桥,尤其在发生有支座板间水平相对位移的转动时,支座的竖向位移变化较大,在进行桥梁内力计算时,应把由于支座转动造成的竖向高度变化考虑进来,以提高计算的可靠性。

参考文献:

- [1] Kelly T E. Base isolation of structure—design guidelines[R]. Wellington: Holmes Consulting Group Ltd, 2001.
- [2] Stewart J P, Conte J P, Aiken I D. Observed behavior of seismically isolated buildings[J]. Journal of Structural Engineering, 1999, 125(9): 955.
- [3] 彭天波, 李建中, 范立础. 双曲面球型减隔震支座的开发和应用[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2007, 35(2): 176-180.
- [4] 陈志江, 黄利顺, 俞奇效. 双曲面球型铸钢支座设计与应用[J]. 施工技术, 2010, 39(6): 124-126.
- [5] 顾正伟, 钟铁毅, 张贞阁. 双曲面球型减隔震支座曲线连续梁桥的减隔震[J]. 中国铁道科学, 2011, 32(3): 47-51.
- [6] 刘俊, 王合希. 双曲面球型减隔震支座在刚构连续梁桥中的应用[J].

3 000 kg 左右,且养护成本相对低。

4.3 引入智能交通系统降低碳排放

引入多种智能交通,如热感应自动化人行过街系统、数字化信号灯雷达和信号灯联网控制系统等,大幅提高通行效率,减少交通工具等待时间,进而减少交通交叉口汽车尾气排放,提升空气质量。

(1)热感应自动化人行过街系统。安装该系统后,热感应到有行人在路边等待过街后,红灯自动转变为绿灯,方便行人通行,同时提高了国道车辆通行的效率。

(2)数字化信号灯雷达。在信号灯上新增传感器,检测排队长度、车辆存在性、路口排队溢出、交通拥堵与交通事件,达到信号灯自适应控制、交通事件的雷达视频检测与联动目的,使提高路口通行能力提高 15% 以上。

(3)信号灯联网控制系统。该系统对路口信号灯进行联网控制,可有效联动信号灯对公路通行的引导作用,路口平均延误减少约 5% 左右。

5 结 论

综上所述,在 G320 公路工程建设过程中,通过从规划设计到建设施工全过程集中应用多种措施和

技术,总体上达到了以下效果:

(1)在规划与设计阶段,采取调整红线、优化设计等措施,减少了该项目建设占用土地 6 万 m^2 ,并最大限度利用了现状河道挡墙、保留超树龄超 40 a 的行道树约 1 200 棵;

(2)在施工阶段,对现状道路旧料、周围建筑拆除料等原本废弃材料或资源进行加工,不仅避免大量资源浪费,而且减少天然矿料开采。如采用浅层固化工艺就地利用浜塘淤泥 9 万 m^3 。将建筑拆除料加工成再生碎石混合料回填路基,可以节约 10% 路基填筑费用;

(3)在施工阶段,采用预制拼装技术、技术节能和智能交通系等技术,可以取得较为直观的降碳减排效果,避免粉尘、烟气产生,同时也能间接减少机动车尾气排放。

参考文献:

- [1] 范钟伟,范超文,朱林.双碳战略下公路工程绿色低碳发展思考[J].西南公路,2022(1):63-65.
- [2] 王明洁.公路绿色施工如何做?[J].中国公路,2020(6):74-77.
- [3] 余咏兴.新技术及新工艺在绿色公路建设中的应用[J].中华建设,2021(15):102-104.
- [4] 李乾成.研究新形势下公路桥梁施工技术相关问题[J].建筑工程与管理,2020(11):42-43.

(上接第 132 页)

- 铁道科学与工程学报,2012,9(3):117-123.
- [7] 蒋志刚,刘滋银.平面曲线梁桥支座位移对内力的影响[J].湖南交通科技,1998,24(4):34-38.
 - [8] 夏禾,阎贵平,张鸿儒.支座位移对桥上高速列车运行安全的影响

- [J].工程力学(1997 增刊):301-307.
- [9] 彭天波,李建中,范立础.双曲面球型减隔震支座的竖向位移分析[J].同济大学学报(自然科学版),2007,35(9):1181-1185.
- [10] GB/T 17955—2009,桥梁球型支座[S].