

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2021.02.071

# 波形梁护栏立柱承载能力研究

周翔海<sup>1</sup>, 陈卫霞<sup>2</sup>, 邓宝<sup>3</sup>, 闫书明<sup>3</sup>, 王新<sup>3</sup>, 刘思源<sup>3</sup>, 杨周妮<sup>3</sup>

(1. 湖北省交通投资集团有限公司, 湖北 武汉 430050; 2. 中交公路规划设计院有限公司; 3. 北京华路安交通科技有限公司)

**摘要:**立柱作为波形梁护栏的重要组成构件,其承载能力大小直接影响护栏的安全防护性能。为了更好地指导波形梁护栏结构设计与工程应用,基于规范推荐的波形梁护栏多种立柱结构形式和基础埋置方式,采用单元静载试验和单元仿真模拟的方法对立柱承载能力进行较为系统的研究。结果表明:立柱结构弯曲是其承载力得到充分发挥的主要体现形式,当立柱埋置于土基础时,立柱抗弯刚度越大,折弯点越靠下;对于相同立柱结构,埋置于土基础中的立柱折弯点更靠下,埋置于混凝土基础中的立柱折弯点更靠上。

**关键词:**波形梁护栏;立柱;承载能力;基础埋置方式;单元静载试验;单元仿真模拟;实车足尺碰撞试验

波形梁护栏属于连续的梁柱式结构,立柱作为重要组成构件,沿公路纵向呈点状设置(图1)。在事故车辆碰撞护栏的过程中,最先接触的波形梁板通过波纹的展开变形吸收部分碰撞能量,并将剩余的碰撞能量分散作用到多根立柱上,最后通过立柱弯曲变形和土基压缩变形吸收剩余碰撞能量,从而迫使事故车辆改变方向,回到正常行驶状态。由此可见,立柱对波形

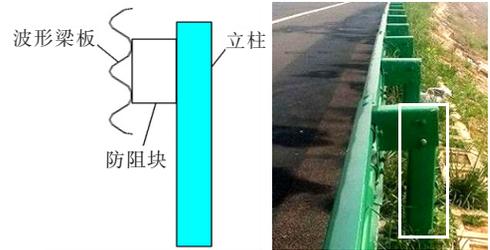


图1 波形梁护栏立柱

mm时,小型客车发生绊阻并横转,未能顺利导出,且缓冲性能指标接近限值,乘员安全受到一定威胁。

由上可知:SB级波形梁护栏梁板中心高度设置区间为617~777 mm。

## 5 结论

(1) 护栏有效高度在一定范围内越低,对小型车辆防护效果越有利,但对大型车辆阻挡性能越不利;护栏有效高度在一定范围内越高,对大型车辆防护效果越有利,但对小型车辆缓冲及导向性能越不利。

(2) 经实车足尺碰撞试验验证,规范推荐的SB级波形梁护栏结构安全防护性能可靠,达到JTG B05-01-2013《公路护栏安全性能评价标准》规定的SB级(280 kJ)防护能力,部分实车足尺碰撞试验补充了规范的内容,可为标准SB级波形梁护栏结构的应用提供设计依据与数据支撑。

(3) 当护栏梁板中心高度降低20 mm(即梁板中心有效高度为677 mm)和提升20 mm(即梁板中心有效高度为717 mm)时,护栏防护能力仍可达到四(SB)级,说明规范对波形梁护栏梁板中心高度允许偏差值±20 mm的规定是合理的。

(4) 经仿真碰撞分析,SB级波形梁护栏结构与设置条件满足规范要求时,梁板中心高度设置为617~777 mm,可为公路护栏应用提供一定的技术支撑。

## 参考文献:

- [1] JTG/T D81-2017 公路交通安全设施设计细则[S].
- [2] JTG B05-01-2013 公路护栏安全性能评价标准[S].
- [3] 刘明虎,张门哲,亢寒晶,等.桥梁嵌固式基础中央分隔带护栏安全性分析[J].中外公路,2019(3).
- [4] 崔洪军,崔姍,邢小高,等.护栏高度变化对防撞能力影响研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2015(1).
- [5] JTG F80/1-2017 公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程[S].

收稿日期:2020-11-25(修改稿)

作者简介:周翔海,男,硕士,高级工程师. E-mail:xianghaizhou@126.com

梁护栏具有重要的支撑、吸能作用。

立柱承载能力大小直接影响波形梁护栏的安全防护性能,其主要与立柱自身的强度、刚度和基础埋置方式有关。该文将综合采用单元静载试验、单元仿真模拟及实车足尺碰撞试验技术,对立柱承载能力进行系统分析与可靠验证。

## 1 立柱结构形式与埋置方式

根据 JTG/T D81—2017《公路交通安全设施设计细则》规定及实际工程应用情况,中国公路波形梁护栏立柱主要采用  $\phi 114\text{ mm} \times 4.5\text{ mm}$ 、 $\phi 140\text{ mm} \times 4.5\text{ mm}$ 、 $\square 130\text{ mm} \times 130\text{ mm} \times 6\text{ mm}$  3 种结构类型,钢管立柱主要应用在一(C)级~三(A)级波形梁护栏结构中,方管立柱则主要应用在四(SB)级及以上波形梁护栏结构中。同时,波形梁护栏立柱埋置方式主要有打桩埋入式、混凝土加强式、钢套筒嵌入式和预埋法兰盘栓接共 4 种,如图 2 所示,其中,由于波形梁护栏主要应用在土路基上,打桩埋入式基础在中国波形梁护栏设置应用中最为广泛,属于土基础;针对在石方、挡土墙路段没有打桩条件时,可采用混凝土块加强式基础,钢套筒嵌入式和预埋法兰盘栓接式基础则主要应用在小桥、通道、明涵路段,亦属于混凝土基础。



图 2 波形梁护栏立柱埋置方式

## 2 立柱承载能力单元试验初步分析

针对规范推荐的 4 种立柱埋置方式,开展单元静载试验,对立柱承载时的基础状态和变形状态进行分析,初步了解立柱充分发挥其承载力的特征。

### (1) 打桩埋入式立柱单元试验

采用顶推法进行打桩埋入式立柱静力荷载单元试验,所用仪器设备为液压千斤顶推力系统和反力支撑结构。试验样品为  $\phi 140\text{ mm} \times 4.5\text{ mm}$  钢管立柱,按照规范规定的设置条件,土基压实度达到 90%,边坡采用 1:1.5,立柱外侧土路肩保护层厚度为 370 mm,打入土基深度为 1 400 mm。在试验荷载下,立柱发生了倾斜变形,土基础为抵抗立柱变形发生了局部破坏,为更好地观测土基础里的立柱变形情况,将立柱挖出后发现立柱发生了折弯变形,如图 3 所示。



图 3 打桩埋入式立柱单元试验样品与结果

### (2) 混凝土加强式立柱单元试验

采用顶推法进行混凝土加强式立柱静力荷载单元试验,试验样品为  $\phi 140\text{ mm} \times 4.5\text{ mm}$  钢管立柱,土基压实度达到 90%,埋入土基中的混凝土基础大小为 60 cm(长) $\times$ 60 cm(宽) $\times$ 50 cm(高),立柱处于混凝土基础中心位置,埋置深度为 40 cm。在试验荷载下,立柱与基础作为一个整体倾斜变形,土基础为抵抗这种变形发生了局部破坏,立柱发生了折弯变形,如图 4 所示。



图 4 混凝土加强式立柱单元试验样品与结果

### (3) 钢套筒嵌入式立柱单元试验

采用钢丝绳牵引法进行钢套筒嵌入式立柱静力荷载单元试验,试验样品为  $\phi 114\text{ mm} \times 4.5\text{ mm}$  钢管立柱,置于模拟的条形混凝土基础中,混凝土基础内预埋套筒。在试验荷载下,混凝土基础没有损伤,立柱在路面位置发生了折弯,如图 5(a)所示。同时,为了更直观考察立柱加强后混凝土基础的破坏情况,在  $\phi 114\text{ mm} \times 4.5\text{ mm}$  钢管立柱外套设  $\phi 127\text{ mm} \times 4.5\text{ mm}$  的钢管,大幅度提高钢管的刚度,且将混凝土基础设置于路面以上。在试验荷载下,加强后立柱没有发生明

显变形,而混凝土基础发生了结构性破坏,如图 5(b)所示。



(a) 标准钢管

(b) 加强钢管

图 5 钢套筒嵌入式立柱单元试验样品与结果

#### (4) 预埋法兰盘栓接式立柱单元试验

预埋法兰盘栓接立柱是桥梁护栏最为常用的基础处理方式,由于桥梁结构刚度相对于护栏结构大得多,在单元试验中不再考察基础破坏形态,重点了解预埋法兰盘栓接式立柱变形状态。在专用试验场地中,将护栏立柱采用栓接方式进行固定后横置,采用吊车将重锤吊起一定高度后,脱钩坠落冲击护栏立柱,在重锤冲击荷载的作用下,立柱在螺栓连接上部发生了折弯,如图 6 所示。



图 6 预埋法兰盘栓接式立柱单元试验样品与结果

根据以上试验结果可以看出:无论采用何种基础形式,护栏立柱的承载力若想得到充分发挥,在荷载作用下,立柱结构弯曲是一个主要体现形式。

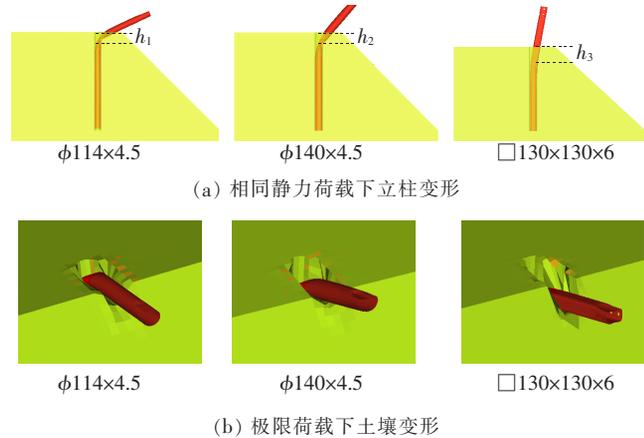
### 3 立柱承载能力单元仿真模拟分析

采用基于有限元方法的计算机仿真模拟技术,对不同埋置方式的不同型号立柱承载能力做进一步分析。

#### (1) 打桩埋入式立柱单元仿真

建立打桩埋入式立柱静力荷载单元仿真模型,土

基压实度设定为 90%,立柱外侧土路肩保护层厚度均为 370 mm,边坡为 1:1.5,土基中分别设置规格为  $\phi 114 \text{ mm} \times 4.5 \text{ mm}$ 、 $\phi 140 \text{ mm} \times 4.5 \text{ mm}$ 、 $\square 130 \text{ mm} \times 130 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$  的 3 种立柱结构,埋置深度均为 1 650 mm。图 7 为水平推力荷载作用后的仿真结果,由图 7(a)可见:在相同推力荷载作用下, $\phi 114 \text{ mm} \times 4.5 \text{ mm}$  钢管立柱折弯程度最大,折弯点距离路面最近, $\square 130 \text{ mm} \times 130 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$  方管立柱折弯程度最小,折弯点距离路面最远,说明立柱抗弯刚度越大,折弯点距离路面越靠下。由图 7(b)可见:在极限荷载作用下,设置  $\phi 114 \text{ mm} \times 4.5 \text{ mm}$  钢管立柱的土壤损坏较小,设置  $\square 130 \text{ mm} \times 130 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$  方管立柱的土壤损坏最为严重,说明立柱抗弯刚度越大,对基础土壤的力学性能要求越高。



(a) 相同静力荷载下立柱变形

(b) 极限荷载下土壤变形

图 7 打桩埋入式立柱静力荷载单元仿真结果(单位:mm)

图 8 为极限荷载作用下立柱的应力分布,深色为应力大的不可忽略区域,浅色为应力小的可忽略区域,由图 8 可以看出:3 种型号立柱底部均存在小应力区域,说明该位置与土壤之间的作用力不大,其中  $\phi 114 \text{ mm} \times 4.5 \text{ mm}$  钢管立柱小应力区域长度约为 600 mm(立柱埋入部分应力不可忽略部分长度约为 1 050 mm)、 $\phi 140 \text{ mm} \times 4.5 \text{ mm}$  钢管立柱小应力区域长度约为 500 mm(立柱埋入部分应力不可忽略部分长度约为 1 150 mm)、 $\square 130 \text{ mm} \times 130 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$  方管立柱小应力区域长度约为 250 mm(立柱埋入部分应力不可忽略部分长度约为 1 400 mm)。通过应力分析,若在仿真立柱埋置深度的基础上,将这些立柱埋置深度缩短至小应力区域长度,理论上不会出现由于缩短立柱埋置长度而影响护栏防护能力。

#### (2) 混凝土加强式立柱单元仿真

建立混凝土加强式立柱静力荷载单元仿真模型,土基压实度设定为 90%,边坡为 1:1.5,在距边坡顶

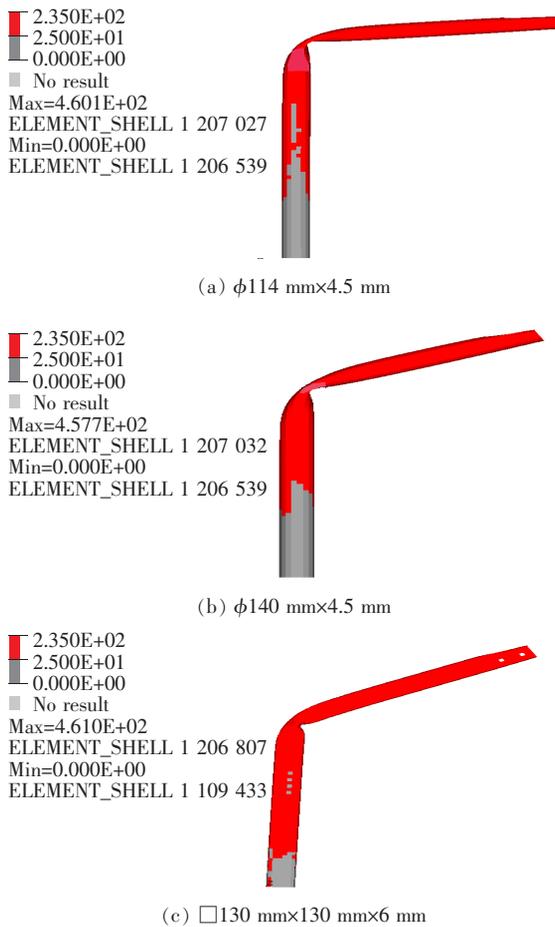


图8 极限荷载下立柱应力分布图(单位:MPa)

部边缘线 370 mm 的位置分别设置规格为  $\phi 114$  mm  $\times$  4.5 mm、 $\phi 140$  mm  $\times$  4.5 mm、 $\square 130$  mm  $\times$  130 mm  $\times$  6 mm 的 3 种立柱结构,立柱埋置深度均为 400 mm,立柱周边设置 60 cm(长) $\times$ 60 cm(宽) $\times$ 50 cm(高)的混凝土结构以对基础进行加强,混凝土标号设定为 C30。图 9 为水平推力极限荷载作用下的仿真结果。

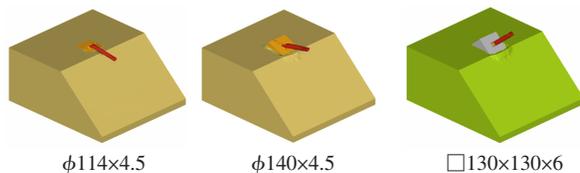


图9 混凝土加强式立柱静力荷载单元仿真结果(单位:mm)

由图 9 可见: $\phi 114$  mm  $\times$  4.5 mm 钢管立柱发生了折弯,且混凝土加强式基础没有发生倾覆破坏,说明混凝土加强式基础对于  $\phi 114$  mm  $\times$  4.5 mm 钢管立柱安全可靠; $\phi 140$  mm  $\times$  4.5 mm 钢管立柱发生了折弯,但混凝土加强式基础开始具有倾覆破坏趋势,说明混凝土加强式基础对于  $\phi 140$  mm  $\times$  4.5 mm 钢管立柱的有效锚固作用处于临界状态; $\square 130$  mm  $\times$  130 mm  $\times$  6

mm 方管立柱没有发生折弯,但混凝土加强式基础发生了倾覆破坏,说明混凝土加强式基础对于  $\square 130$  mm  $\times$  130 mm  $\times$  6 mm 方管立柱加强程度不足,使得该立柱应有的抗弯能力没有得以充分发挥。

### (3) 钢套筒嵌入式立柱单元仿真

钢套筒嵌入式立柱基础多用于桥梁混凝土翼缘板上。建立桥梁翼缘板结构及规范规定的钢套筒嵌入式立柱仿真模型,即在翼缘板内设置  $\phi 245$  mm  $\times$  7 mm  $\times$  305 mm 的钢套筒,钢套筒中间分别设置规格为  $\phi 114$  mm  $\times$  4.5 mm、 $\phi 140$  mm  $\times$  4.5 mm、 $\square 130$  mm  $\times$  130 mm  $\times$  6 mm 3 种立柱结构,立柱埋置深度均为 310 mm,钢套筒和立柱之间设置水泥砂浆填料。图 10 为水平推力极限荷载作用下的仿真结果,由图 10 可见:3 种立柱均在基础表面位置发生了折弯,相对于土基础立柱折弯点发生了上移,混凝土基础未发生大面积损坏,说明钢套筒嵌入式立柱基础力学性能稳定可靠。

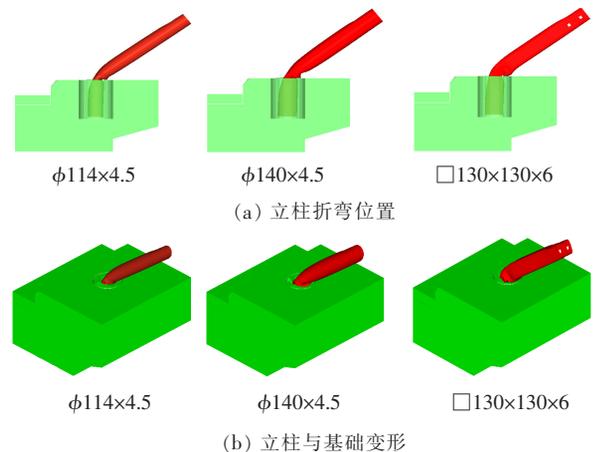


图10 钢套筒嵌入式立柱静力荷载单元仿真结果(单位:mm)

### (4) 预埋法兰盘栓接式立柱单元仿真

预埋法兰盘栓接式立柱亦多用于桥梁翼缘板上。建立桥梁翼缘板结构及规范规定的预埋法兰盘栓接式立柱仿真模型,即在设置  $\phi 114$  mm  $\times$  4.5 mm 钢管立柱的桥梁翼缘板中埋置 4 根 M20 地脚螺栓,立柱底部四周焊接 4 个均布的 20 mm(顶宽) $\times$ 50 mm(底宽) $\times$ 150 mm(高) $\times$ 10 mm(厚)规格的直角梯形加强肋板,立柱底部钢板规格为 250 mm  $\times$  250 mm  $\times$  15 mm;在设置  $\phi 140$  mm  $\times$  4.5 mm 钢管立柱的桥梁翼缘板中埋置 4 根 M22 地脚螺栓,在立柱底部四周焊接 4 个均布的 30 mm(顶宽) $\times$ 70 mm(底宽) $\times$ 150 mm(高) $\times$ 10 mm(厚)规格的直角梯形加强肋板,立柱底部钢板规格为 300 mm  $\times$  300 mm  $\times$  16 mm;在设置

□130 mm×130 mm×6 mm 方管立柱的桥梁翼缘板中埋置 4 根 M24 地脚螺栓,在立柱底部四周焊接 4 个均布的 30 mm(顶宽)×70 mm(底宽)×150 mm(高)×10 mm(厚)规格的直角梯形加强肋板,立柱底部钢板规格为 300 mm×300 mm×16 mm。

图 11 为水平推力极限荷载作用下的仿真结果,由图 11 可见:3 种立柱均在加强肋板的上部位置发生了折弯,相对于钢套筒嵌入式立柱基础,立柱折弯点又发生了上移,立柱底板发生不同程度的翘曲变形,混凝土基础未发生损坏,螺栓强度均满足要求,说明预埋法兰盘栓接式立柱基础力学性能亦较为稳定可靠。

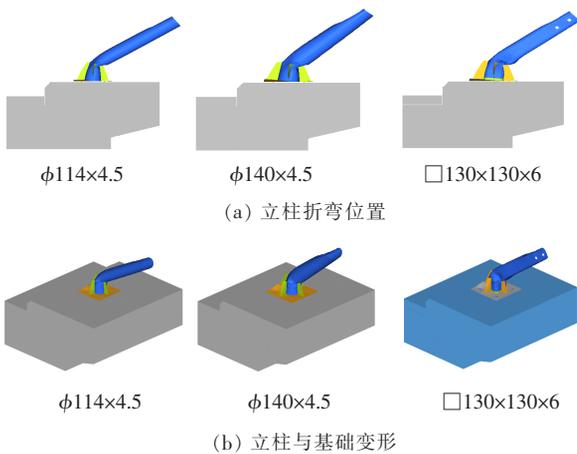


图 11 预埋法兰盘栓接式立柱静力荷载单元仿真结果(单位:mm)

根据以上单元仿真分析结果,可以看出设于土基础中的立柱抗弯刚度越大,折弯点越靠下;方管立柱(□130 mm×130 mm×6 mm)采用混凝土加强式基础时,将各个立柱混凝土加强基础连成一体是个有效的方式,可充分发挥立柱抗弯能力;不同埋置方式的立柱折弯点有所区别,即打桩埋入式立柱折弯点在土基中,混凝土加强式和钢套筒嵌入式折弯点在混凝土表面,预埋法兰盘栓接式折弯点在加强肋板上部,折弯点位置由低至高排序为打桩埋入式<混凝土加强式和钢套筒嵌入式<预埋法兰盘栓接式。

#### 4 研究分析结论验证

为了验证前面针对立柱承载能力的研究结论,通过实车足尺碰撞试验和实际工程应用中的事故案例做进一步验证。

图 12 为相同碰撞条件下钢管立柱和方管立柱的变形及基础损坏情况。



(a) 钢管立柱

(b) 方管立柱

图 12 同等碰撞条件下的不同规格立柱变形及基础损坏情况

由图 12 可以看出:碰撞荷载作用后立柱均发生了折弯现象,且钢管立柱的土壤损坏较轻,方管立柱的土壤损坏较严重,验证了立柱抗弯刚度越大,对基础土壤的力学性能要求越高的结论。同时,结合实际工程应用中不同基础埋置方式的护栏立柱折弯位置(图 13),亦验证了打桩埋入式立柱折弯点在土基中,混凝土加强式和钢套筒嵌入式立柱折弯点在混凝土表面,预埋法兰盘栓接式立柱折弯点在加强肋板上部。



(a) 打桩埋入式立柱 (b) 混凝土加强式立柱 (c) 钢套筒嵌入式立柱

图 13 同等碰撞条件下的不同埋置方式立柱变形及基础损坏情况

#### 5 结论

(1) 立柱结构弯曲是其承载力得到充分发挥的主要体现形式。

(2) 当立柱埋置于土基础中时,立柱抗弯刚度越大,折弯点越靠下。

(3) 对于相同立柱结构,折弯点位置由低至高排序为打桩埋入式<混凝土加强式和钢套筒嵌入式<预埋法兰盘栓接式。

#### 参考文献:

- [1] JTG/T D81-2017 公路交通安全设施设计细则[S].
- [2] 闫书明.有限元仿真方法评价护栏安全性能的可行性[J].振动与冲击,2011(1).
- [3] 张维刚,胡高贤.土基中波形梁护栏立柱的有限元模型研究[J].公路交通科技,2007(7).
- [4] 胡高贤.土基对波形梁护栏安全性能影响的仿真研究[D].湖南大学硕士学位论文,2007.