

文章编号：1000-4750(2002)01-125-05

关于中央分隔带护栏立柱基础的探讨

丁 桦¹，吴梦喜¹，王剑文²，王 梅¹

(1. 中国科学院力学研究所，北京 100080；2. 中国公路工程咨询监理总公司，北京 100080)

摘 要：目前高速公路中央分隔带波形梁护栏立柱的实际设置中，普遍存在着由于分隔带地基强度低于压实路基，护栏立柱承载能力偏低，护栏的防护性能达不到设计要求的问题。本文对粘性土地基中立柱的受力情况进行了分析，并对地基为压实土与回填土两种情况进行了对比，给出了中央分隔带中立柱地基的加固方案。

关键词：护栏；立柱；地基

中图分类号：TU473 文献标识码：A

1 前言

随着高速公路建设的高速发展，交通事故呈逐年上升的趋势，其中相当一部分是可以由护栏等安全设施的合理设置避免或减轻的。正确有效地设置安全护栏，可减少交通事故及其损失。但是，在目前应用的国家行业标准中，对护栏设置的一些规定不明确，造成了设计上的一些问题。本文工作是针对设计实施中遇到的中央分隔带波形梁护栏设置中的一些具体问题而进行的。

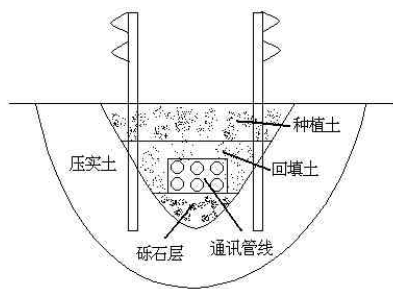


图 1 中央分隔带立柱基础示意

Fig.1 Schematic diagram of post-foundations for medium guardrails

标准中^[1]对中央分隔带波形梁护栏设置只提出了护栏梁、立柱、拼接螺栓等的几何、材料、镀层等的要求，而对立柱基础没有作明确的规定。它主

要体现在对立柱嵌入的地基土的压实度没有考虑，导致了目前大量使用的中央分隔带波形梁护栏立柱地基，由于地基回填土、种植土的存在(图 1)，相对于护栏实车足尺碰撞验证实验中的立柱地基普遍偏弱的问题，如：四川的成雅路、福建的福泉路等。

由于种植土和回填土的承载力要比标准的路基压实土小，这将导致护栏结构的整体刚度降低。从波形梁护栏结构的实车足尺碰撞验证实验的结果来看，结构位移较大，刚度偏低。因此，目前多数中央分隔带的波形梁护栏安全性能，达不到实车足尺碰撞验证实验时的指标。

2 波形梁护栏立柱的受力变形情况分析

对于波形梁护栏结构实车足尺碰撞验证实验中的立柱，它主要承受两方面的作用力：一是通过护栏梁、托架等传递的碰撞力，二是由立柱基础对立柱约束所产生的反作用力。前者可以简化为作用于立柱与托架连接出处的集中力，后者可以认为是地基作用于立柱的被动土压力(图 2)。

实车足尺护栏碰撞验证实验中^[2]，护栏立柱的变形主要是地表下 0.15 - 0.25 m 处的弯曲变形。在弯曲变形较大时会出现截面弱化和失稳。弯曲情况

收稿日期：2000-06-08；修改日期：2000-12-28

作者简介：丁 桦(1960)，男，天津人，博士，主要从事工程力学研究工作
吴梦喜(1967)，男，湖南涟源人，博士，主要从事土力学研究工作
王剑文(1962)，男，西安人，硕士，主要从事交通工程的设计和研究工作

类似于立柱三点弯曲实验中的形态，这种弯曲特征可以简化为一种理想的刚塑性失稳特征(图 3)。

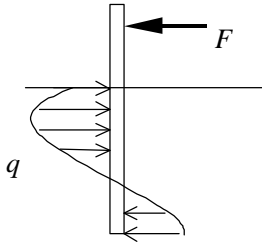


图 2 立柱受力示意

Fig.2 Schematic diagram of loads on a post

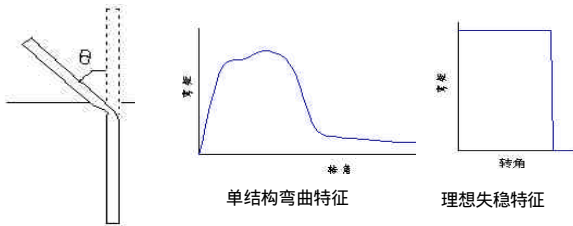


图 3 立柱变形示意、单结构弯曲特征与理想失稳特征
Fig.3 Schematic diagram of post's deformation, bending and idealized bending characteristics

在简化的理想失稳中，立柱的最大弯矩 M_{max} 介于立柱的最大弹性弯矩 M_e 和立柱的屈服弯矩 M_p 之间：

$$M_{max} = a \cdot M_e + (1 - a) \cdot M_p \quad (1)$$

其中 a 是一介于 1 和 0 之间的数(对于 $f14 \times 4$ 的立柱 $a \approx 4/13$)。 M_{max} 对加载条件不敏感，可认为是常数。对于波形梁护栏结构，立柱的最大弹性弯矩 M_e 和立柱的屈服弯矩 M_p 分别为

$$M_e = s_y \cdot Z_e \quad (2)$$

$$M_p = s_y \cdot Z_p \quad (3)$$

其中

$$Z_e = \frac{I_e}{R} = \frac{P}{4 \cdot R} (R^4 - r^4) \quad (4)$$

$$Z_p = \frac{4}{3} (R^3 - r^3) \quad (5)$$

对于 $f14 \times 4$ 的立柱， M_{max} 约为 $10 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。立柱所能承受的最大作用力为

$$F_{max} = \frac{M_{max}}{0.6 + 0.2} \approx 12.5 \quad (\text{kN}) \quad (6)$$

理想弯曲模式中的卸载临界转角(失效转角) q_{cr} 约为 20~30 度左右。理想弯曲的简化模型，可以较好地描述护栏立柱在汽车与护栏结构碰撞过程中的作用规律^[2]。若在目前的波形梁护栏结构中，护栏立柱现有位置上换上能够在护栏梁位移小于 $20/180 \times p \times 0.8 = 0.28 \text{ m}$ 范围内保持对护栏梁有

1.25t 左右的反作用力的“任何结构”，这样的新结构在与汽车碰撞过程中的作用效果将与原有结构基本一样。这就是说，若我们仍然用现有的立柱，必须保证在汽车与护栏结构的碰撞过程中，立柱的弯折点位置不低于路面下 0.2m 处，或与护栏中心点的距离不大于 0.8m。在这种情况下，无论基础采取什么样的方式，护栏结构的安全性能是能够得到保障的。当基础压实度减小时(回填土、种植土的情况)，立柱的弯折点将下移(甚至使整个立柱产生整体刚体转动)，这时立柱的最大水平抗力将减小，从而使护栏结构的整体刚度降低，护栏结构的安全性能也下降。

3 粘土地基中护栏立柱的稳定性分析

在失控车辆与护栏的碰撞过程中，护栏立柱的变形可以近似地用理想失稳模式来描述。在护栏立柱的稳定性分析中就可以采用刚塑性假定：即在立柱产生塑性较前立柱的变形可以忽略。另外，由于考虑的是护栏立柱基础的稳定性，可以假定基础失稳时参与作用的所有部位的土压力均达到相应位置土的极限强度(图 4)。

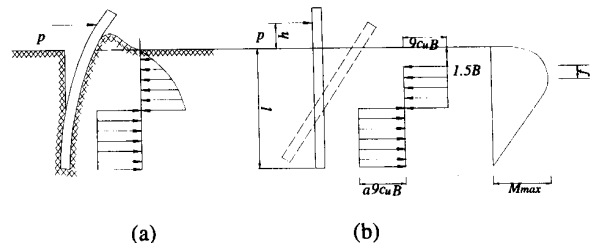


图 4 粘性土中立柱的极限受力状态和刚性桩模型的反力分布

Fig.4 The earth pressure distribution (a) a post in clay (b) the rigid post model

桩对土的相对刚度、入土长度不同，在水平力作用下桩的工作性状也不同，通常可分为刚性桩和弹性桩两种情况，这两种情况是与桩的刚度、桩的宽度和土的强度相关的特征长度

$$T = \sqrt[4]{\frac{4EI}{k_h B}} \quad (7)$$

来区分的^[4]，其中 E 、 I 分别为桩的弹性模量和截面惯性矩， $k_h (= 9c_u)$ 为水平方向地基反力系数(c_u 为土的不排水抗剪静强度)， B 为桩宽。当相对桩长系数 $l/T < 2.25$ (l 为桩的入土深度)时，桩满足刚性桩的条件。一般在压实度不大于 95% 的粘性土中，目

前国家标准中使用的立柱是满足刚性桩的条件。

粘性土中的立柱上,如果作用有水平力。则由于地面附近的地基受到破坏,地基土向上方隆起而使地基反力减小,其分布如图4所示。通常的处理方法是忽略地表面以下 $1.5B$ (B 为立柱直径)深度内土的作用,在 $1.5B$ 深度以下假定为塑性区域的地基反力分布,其值为 $9c_u B$,其中 c_u 为不排水抗剪强度。设土中产生最大弯矩的深度为 $1.5B+f$,因为在此深度处剪力为零,则由

$$S = -p + 9c_u B \cdot f = 0 \quad (8)$$

可得出

$$f = \frac{p}{9c_u B} \quad (9)$$

式中 p 是极限水平力。

假定在立柱的全长范围内地基均屈服,并令

$$l' = l - 1.5B, \quad h' = h + 1.5B \quad (10)$$

水平力的平衡方程为

$$p - 9c_u B(l' - x) + a \cdot 9c_u B \cdot x = 0 \quad (11)$$

由(11)可得

$$x = \frac{1}{1+a} \left(l' - \frac{p}{9c_u B} \right) \quad (12)$$

弯矩的平衡方程为

$$p(l' + h') - \frac{1}{2}(9c_u B) \cdot l'^2 + \frac{1+a}{2}(9c_u B)x^2 = 0 \quad (13)$$

将 x 代入可得

$$p^2 + 2(9c_u B)[al' + (1+a)h']p - a(9c_u B)^2 l'^2 = 0 \quad (14)$$

解上式得出:

$$p = 9c_u B^2 \left\{ \sqrt{[(1+a)h' + al']^2 + al'^2} - [(1+a)h' + al'] \right\} \quad (15)$$

最大弯矩是

$$M_{\max} = p(h' + f) - \frac{1}{2} \cdot 9c_u B \cdot f^2 = p \left(h' + \frac{p}{18c_u B^2} \right) = p(h' + 0.5f) \quad (16)$$

对于目前中央分隔带波形梁护栏立柱的设置要求 $l=1.2\text{ m}$, $h=0.6\text{ m}$, $B=0.114\text{ m}$,可由(9)、(14)、(15)得

$$p = 0.203c_u, \quad M_{\max} = 0.177c_u, \quad f = 0.20\text{ m} \quad (17)$$

土中产生最大弯矩的深度为 $1.5B+f=0.37\text{ m}$,当地基土的极限承载力大于立柱本身的承载力时,由于近地表的土变形较大而产生较大的反力,最大弯矩的深度将减小。如果考虑地表面以下 $1.5B$ 深度内土的作用,则弯折点在 0.2 m 左右,理论解与

实车足尺护栏碰撞验证实验结果相符。

实测成雅路路基压实粘土的不排水抗剪静强度一般为 $60\sim 150\text{ kPa}$,则地基土的极限水平静承载力为 $p=12\sim 30\text{ kN}$,考虑碰撞时荷载为冲击动荷载,此时的压实土的被动土压力系数应是静载时的 1.36 倍^[3],这时地基土的动态极限水平承载力应为 $p=17\sim 41\text{ kN}$,极限弯矩为 $M_{\max}=14\sim 36\text{ kN}\cdot\text{m}$,其值远大于立柱本身的承载力。因此,压实粘土立柱地基的承载能力是能满足要求的。

而隔离带种植土的实测的不排水抗剪静强度一般为 $20\sim 40\text{ kPa}$,则种植土地基的极限水平静承载力为 $p=4\sim 8\text{ kN}$,极限弯矩为 $M_{\max}=3.5\sim 7.1\text{ kN}\cdot\text{m}$,考虑碰撞时荷载为冲击动荷载,1.36倍的动强度系数,这时地基土的极限水平静承载力为 $p=5\sim 10\text{ kN}$,极限弯矩为 $M_{\max}=4.8\sim 9.6\text{ kN}\cdot\text{m}$,降雨后因含水量增加其强度进一步降低,地基的极限承载力会减小,低于 $f114\times 4$ 的立柱本身所能承受的最大弯矩 $M_{\max} 10\text{ kN}\cdot\text{m}$,因此,种植土立柱基础的承载能力是不能满足要求的。

4 中央分隔带护栏基础的加固

目前大量使用的中央分隔带波形梁护栏立柱的基础,由于回填土、种植土的存在,相对于实车足尺护栏碰撞验证实验中的护栏立柱基础普遍偏弱,这就导致了立柱在汽车碰撞时地基的失稳,使立柱的水平抗力减小,使护栏结构的整体刚度降低。国家行业标准中的波形梁护栏结构的整体刚度原就偏低,这样一来将降低护栏结构的安全性能。采取单一加粗立柱的办法,显然是不经济的,而应着重于提高地基的承载能力,以下提出一些在采用相同立柱的情况下的原则方案,用于确保加固后的护栏基础能满足护栏立柱承载力的要求。

加固护栏基础,就是要加强地基对立柱的作用。由于立柱下部是与路侧一方的压实基础相作用,因而立柱基础的路侧一方将无需加固。加固的重点是回填土和种植土部分。

加固方式可以通过对向立柱相互支承或增加立柱与周围土的作用范围(图5、6)。下面我们就后一种情况作一简单的力学分析。

设加固方案为在地表下 20 厘米处,立柱侧面绿化带方向加一增加立柱与种植土接触面积的厚度为 e 、宽度为 b 的混凝土块(图6)。参照图4的计算简图,忽略地表 0.2 m 内反力,设

$$l' = l - 0.2, \quad h' = h + 0.2, \quad b = b \div B - 1 \quad (18)$$

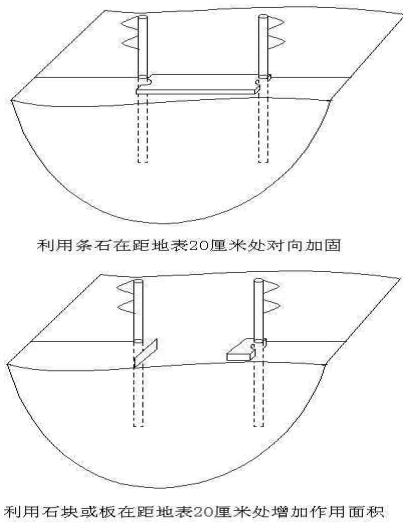


图 5 利用混凝土预制件加固

Fig.5 Post's foundation reinforced by prefabricated concrete

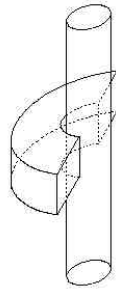


图 6 加固方案

Fig.6 Reinforcing plan

当 $l' - x \geq e \geq f$ 时

$$f = \frac{p}{9c_u b} \quad (19)$$

水平力的平衡方程为

$$p - 9c_u b b e - 9c_u B l' + (1 + a) \cdot 9c_u B x = 0 \quad (20)$$

可得

$$x = \frac{1}{1 + a} \left(l' + b e - \frac{p}{9c_u B} \right) \quad (21)$$

弯矩的平衡方程为

$$p(l' + h') - 9c_u B b e \cdot (l' - 0.5e) - \frac{9}{2} c_u B l'^2 + \frac{1 + a}{2} \cdot 9c_u B x^2 = 0 \quad (22)$$

式(21)代入式(22), 可解得

$$p = 9c_u B \sqrt{F(a, h', l', b, e) - [(1 + a)h' + al' - be]} \quad (23)$$

其中

$$F(a, h', l', b, e) = [(1 + a)h' + al' - be]^2 - [b^2 e^2 + 2be l' - 2(1 + a)be(l' - 0.5e) - al'^2] \quad (24)$$

最大弯矩

$$M_{\max} = p(h' + 0.5f) \quad (25)$$

对于目前中央分隔带波形梁护栏立柱的设置要求 $l = 1.2 \text{ m}$, $h = 0.6 \text{ m}$, $B = 0.114 \text{ m}$, 设预制混凝土块的直径取 0.5 m , 厚度取 0.25 m , $a = 3$, 则可得

$$p = 0.592c_u, \quad M_{\max} = 0.513c_u$$

当种植土的冲击不排水抗剪强度取 27 kPa , 则地基的极限水平承载力为 $p = 16 \text{ kN}$, 极限弯矩为 $M_{\max} = 14 \text{ kN}\cdot\text{m}$, 大于立柱本身的承载能力, 这说明隔离带粘土地基加固后能达到立柱受力时的稳定性要求。

5 结论

通过以上分析, 可以得出以下结论:

- 1) 目前规范推荐的护栏立柱设置, 其地基为压实粘土时, 其冲击稳定性基本能满足要求。
- 2) 存在种植土和未压实回填土的隔离带护栏地基, 一般不能满足稳定性要求。
- 3) 可以采用在地表下埋设预制混凝土块的加固方案, 来加固隔离带护栏基础。

参考文献:

[1] 中华人民共和国行业标准. 高速公路交通安全设施设计及施工技术规范[S]. 人民交通出版社, 北京: 1994.
Standard of Chinese traffic trade, Specification for design and construction of expressway safety appurtenances. People's communications publishing house, 1994, Beijing.

[2] 丁桦, 贾日学, 储劲草, 庞日成, 周春明. 汽车与护栏碰撞特性的研究[J]. 中国公路学报, 1996, 9(3): 85-90.
Ding, H., Jia, R.X., Chu, J.C., Pang, Y.C., Zhou, CH.M., Analysis of the collision of vehicles against guardrails, 1996, China Journal of Highway and Transport, vol.9, No.3, 85-90. (in Chinese)

[3] 市原熏, 枝村俊郎, 编, 王惠普, 等翻译. 道路设施工程学[M]. 人民交通出版社, 1976.
Ichihara, S., Kimura, Y., (translated by Wang, H.P.), Road appurtenances engineering[M]. People's communications publishing house, 1976.

[4] 横山幸满. 桩结构物的计算方法和计算实例[M]. 中国铁道出版社, 1976.
Yokoyama, S., Calculation methods and examples for piling structures[M]. People's communications publishing house, 1976.

STUDY ON POST FOUNDATION OF HIGHWAY MEDIUM GUARDRAIL

DING Hua¹, WU Meng-xi¹, WANG Jian-wen², WANG Mei¹

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science; 2. Chinese Highway Consult Corp.)

Abstract: From the accident data, the main safety problem associated with highway medium guardrail in China now is the lack of the strength of the post's base soil. The effort in this paper is concentrated on the study of stability of the guardrail post during collision process of uncontrolled cars with the guardrail structure. An analysis of fencepost in clay base is given. The situation in backfilled clay base is compared with that of the compacted, and a reasonable reinforce scheme is given.

Key words: guardrail; post; foundation