

高速公路组合型护栏特性及其变形计算^{*}

李 华

(中国矿业大学北京研究生部 北京 100083)

摘要 介绍一种高速公路组合型护栏,根据其结构及其受力分析,提出护栏的简化计算模型。在此基础上,提出一种数值模拟护栏受冲击变形的办法。与试验结果比较表明,此方法具有简单,能较准确地模拟护栏变形等特点。

关键词 护栏 冲击 数值模拟 高速公路

Characteristics of Double beams Freeway Guardrail & its Displacement Calculation

Li Hua

(Beijing Graduate School, China Mining Industry University)

Abstract This paper presents a new double-beams highway guardrail and its impact model. With the structure analysis this paper proposes a mathematical method to calculate the guardrail's displacement. Compared with the test results, the mathematical method manifests a good precision for simulating the guardrail's displacement under the impact of vehicle.

Key words Guardrail Impact Mathematical model Freeway

0 前言

汽车的增加和车速的提高,对高速公路的安全可靠性提出了越来越高的要求。公路护栏的可靠性对降低事故严重程度,减轻人员伤亡有着重要影响。改进公路护栏安全性能和设计新型护栏已成为公路安全可靠性研究的重要内容之一。探讨新的数值计算方法,为研制新型护栏提供快速可靠的理论方法,也成为科研工作者的重要研究方向^[3]。本文介绍一种组合型护栏,并在结构分析的基础上,提出了一种数值模拟护栏受冲击变形的办法。

1 组合型护栏结构及力学模型

组合型护栏是由立柱、前后护栏板及横隔梁构成,护栏板横截面为 W 形,结构如图 1。传统的单护栏板护栏在冲击作用下,立柱旋转使护栏高度下降。随着护栏板高度的下降,

护栏板的阻挡作用也越来越小。当立柱转过一定角度后,护栏板高度不足以阻挡汽车而丧失护栏作用。组合型护栏则克服了单护栏板护栏的这种缺陷。它在受冲击后不仅有绕立柱的转动,而且在后护栏板接地后,继续绕后护栏板转动,并且前护栏板会抬高,使护栏在受冲击过程中始终起着阻挡汽车的作用。

组合型护栏受冲击变形特性如图 2

护栏的作用在于一是有效地阻止汽车冲入对向车道,尽可能将事故限制在公路的一侧;二是有效地保护车内乘员的安全。这就要求护栏尽可能多地吸收冲击动能 因此,护栏既应具有一定的强度,又应有较大的塑性变形能力。

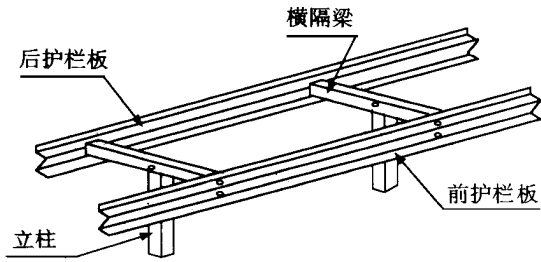


图 1 组合型护栏结构

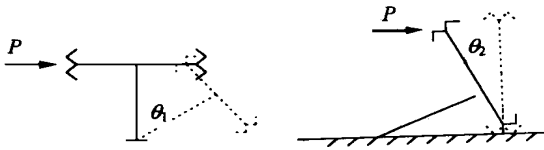


图 2 护栏受冲击变形特性

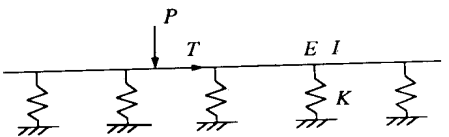


图 3 护栏受力分析

从护栏的冲击试验及以上护栏受冲击变形特性的分析,我们可以了解到,护栏吸收冲击动能主要靠立柱的塑性变形。所以,可将护栏简化为一受均匀间隔支承的连续梁。护栏板的变形认为是弹性变形,如图 3

图 3中, E 为护栏的杨氏模量; I 为护栏的动量矩; P 为横向冲击载荷; T 为纵向冲击载荷; K 为支承刚度。护栏支承的应力应变特性见图 4

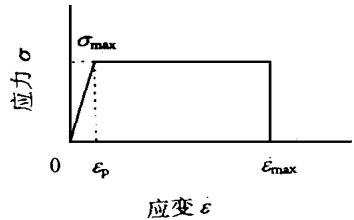


图 4 支承的应变特性

图 4中, 应变 $(0, X_p)$ 区为立柱弹性变形, (X_p, X_{max}) 区为立柱塑性变形。变形达到 X_{max} 时, 立柱断裂或与护栏横隔梁脱离。护栏的受力变形方程^[4]为

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} + \sum_i K w(x - x_i) = \sum_j P_j w(x - x_j) \quad (1)$$

$$ES \left[\frac{d^2 U}{dx^2} + \frac{d^2 w}{dx^2} \cdot \frac{dw}{dx} \right] + \sum_n T_n (x - x_n) = 0 \quad (2)$$

式中, w 为护栏沿横向的位移, m; U 为护栏沿纵向的位移, m; S 为护栏的横截面积, m^2 ; P_j 为横向载荷, N; T_n 为纵向载荷, N

汽车冲撞护栏时, 作用于护栏纵向的载荷为滑动摩擦力, 可以忽略。故本文只考虑护栏横向的位移, 略去方程 (2), 护栏只受横向载荷 P_j , 见图 5

根据以上假定, 我们可以利用连续梁的三弯矩方程^[4]对护栏变形进行分析。护栏的变形 v_i 与各立柱的反力 R_i 成正比

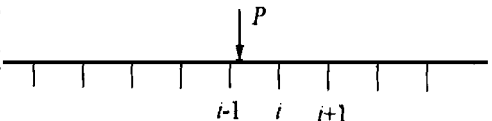


图 5 护栏简化模型

$$v_i = - k R_i \quad (3)$$

式中, k 为护栏的柔度

如以 R_i 表示立柱 A_i 的反力, 考虑护栏位于立柱右侧的情况, 有

$$R_i = R_i' + \frac{M_{i+1} - M_i}{L_{i+1}} + \frac{M_{i-1} - M_i}{L_i} \quad (4)$$

并且

$$v = -k_i \left[R_i' + \frac{M_{i+1}}{L_i} - \left(\frac{1}{L_i} + \frac{1}{L_{i+1}} \right) M_i + \frac{M_{i+1}}{L_{i+1}} \right] \quad (5)$$

式中, M 为各支点处的力矩, L 为各立柱间的间距

将 v 的表达式代入三矩方程^[4]中, 有

$$b_i M_{i-1} + (c_i + a_{i+1}) M_i + b_{i+1} M_{i+1} = h_e - h_w + \frac{v_{i+1} - v_i}{L_{i+1}} - \frac{v_i - v_{i-1}}{L_i} \quad (6)$$

式中, a b c 和 h 为系数

可以得到五矩关系

$$\begin{aligned} & \frac{k_{i-1}}{L_{i-1}L_i} M_{i-2} + \left[b_i - \frac{k_{i-1}}{L_i} \left(\frac{1}{L_{i-1}} + \frac{1}{L_i} \right) - \frac{k_i}{L_i} \left(\frac{1}{L_i} + \frac{1}{L_{i+1}} \right) \right] M_{i-1} \\ & + \left[c_i + a_{i+1} + \frac{k_{i-1}}{L_i} + k_i \left(\frac{1}{L_i} + \frac{1}{L_{i+1}} \right) + \frac{k_{i+1}}{L_{i+1}} \right] M_i \\ & + \left[b_{i+1} - \frac{k_i}{L_{i+1}} \left(\frac{1}{L_i} + \frac{1}{L_{i+1}} \right) - \frac{k_{i+1}}{L_{i+1}} \left(\frac{1}{L_{i+1}} + \frac{1}{L_{i+2}} \right) \right] M_{i+1} + \frac{k_{i+1}}{L_{i+1}L_{i+2}} M_{i+2} \\ & = h_e - h_w - \frac{k_{i-1}}{L_i} R_{i-1} + k_i \left(\frac{1}{L_i} + \frac{1}{L_{i+1}} \right) R_i - \frac{k_{i+1}}{L_{i+1}} R_{i+1} \end{aligned} \quad (7)$$

根据护栏特性, 有 $M_1 = 0$ $M_n = 0$ 即护栏两端为铰支。这样, 便得到了各立柱处的力矩, 然后还可写出护栏上任一点处 X 的力矩表达式:

如各立柱间无集中载荷, 表达式为

$$M(X) = \frac{M_i - M_{i-1}}{X_i - X_{i-1}} X - \frac{M_i - M_{i-1}}{X_i - X_{i-1}} X_{i-1} + M_{i-1} \quad (8)$$

如立柱间有集中载荷 P 作用于 X_f 处, 表达式为

$$M(X) = \frac{P(X_i - X_f)}{X_i} (X_f - X_{i-1}) + \frac{M_i - M_{i-1}}{X_i - X_{i-1}} X_f - \frac{M_i - M_{i-1}}{X_i - X_{i-1}} X_{i-1} + M_{i-1}$$

即

$$M(X) = \frac{M_f - M_{i-1}}{X_f - X_{i-1}} X - \frac{M_f - M_{i-1}}{X_f - X_{i-1}} X_{i-1} + M_{i-1} \quad (9)$$

当 $X_f < X < X_i$, 有

$$M(X) = \frac{M - M_f}{X_i - X_f} X - \frac{M_i - M_f}{X_i X_f} X_f + M_f \quad (10)$$

根据弹性梁挠度方程^[4]

$$EI \frac{d^2 Y}{dx^2} = M(X) \quad (11)$$

可知护栏位移 Y 的表达式

$$Y = aX^3 + bX^2 + cX + d \quad (12)$$

其中 a b c d 由边界条件确定

$$X = 0 \quad Y = 0 \quad Y' = R_1 / L_1 k_1$$

$$X = X_n; \quad Y = 0; \quad Y' = R_1 / L_n k_n$$

根据立柱的应力应变 ϵ - X 关系, 我们可以分 3 部分来讨论护栏的位移。

- 1. 如立柱的应力小于 $\epsilon_{\max}$, 整个护栏变形为弹性变形, 位移方程如上所示, 没有变化。
- 2. 如立柱的应力大于 $\epsilon_{\max}$, 则支承为塑性支承, 用 $\epsilon_{\max}$ 这样一个反力来替代立柱, 并且将立柱重新排序。

$$L_i = (m+1) L_0$$

式中, L_0 为两立柱间初始间距, m ; m 为变形位移大于 $D_{\max}$ 的立柱数

以新的立柱间距代入方程计算即可。

- 3. 如载荷很大, 护栏下多立柱处的应变都大于 $X_{\max}$ 。在这种情况下, 根据立柱的应力应变 ϵ - X 关系, 大于 $X_{\max}$ 的部分立柱失去支承作用并且不再有反力。在计算中, 认为这些立柱不复存在。计算步骤如上相同。

2 组合型护栏试验结果与计算分析

试验^[1]用护栏的几何及物理参数为: 护栏中心高度 60cm, 护栏前后护栏板间距 70cm, 立柱间距 200cm。护栏的刚度 $K = 18\,889\text{N/m}$, 杨氏模量 $E = 21 \times 10^{10}\text{Pa}$, 动量矩 $I = 1 \times 10^{-6}\text{m}^4$ 。试验用汽车为 12t 大客车, 碰撞车速 70km/h, 碰撞角度 20° 。试验设置了长度为 40m 的护栏。护栏两端采用铰支固定, 以保证试验接近无限长护栏的变形条件。试验结果为: 护栏在冲击后横向位移 125cm, 见图 6

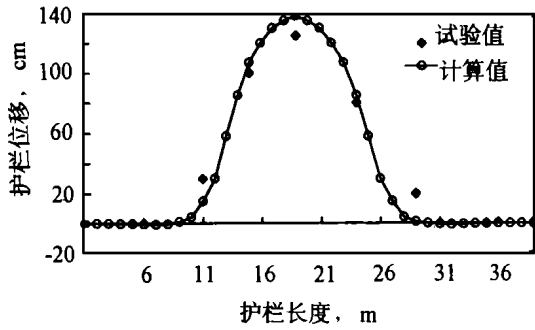


图 6 试验与计算对比

计算结果为: 护栏在冲击后横向位移 138cm, 与试验结果接近, 见图 6

3 结论

汽车冲击试验表明, 组合型护栏的强度满足设计要求 (设计为护栏在冲击后横向位移不大于 150cm)。根据对新型组合型护栏的结构及受力分析所导出的计算方法, 通过与实测值比较, 能较准确地反映护栏的变形, 为设计、改进新的护栏提供了可靠的计算模拟工具, 大大加快了设计周期并减少了试验成本。

参考文献

- 1 Hua L L. Modélisation d'une glissière de sécurité soumise à un choc de véhicule. Mémoire de D.E.A de mécanique de l'Ecole Centrale de Lyon, 1989-10
- 2 L JEZEQUEL. Response of Periodic Systems to a Moving Load. Journal of Applied Mechanics. 1981, 48 (9): 613
- 3 Dean L Sicking, Hayes E Ross Jr. Optimization of Designs for W-Beam Guardrail-Prepared for Consideration for Publication & Presentation. Annual Meeting of TRB, 1987
- 4 [美] E P 波波夫. 王士耕, 韩二丽译. 固体力学引论.