

车辆荷载下饱和路基挡墙主动土压力计算

王俊杰^{1, 2}, 柴贺军²

(1. 重庆交通大学河海学院, 重庆 400074; 2. 重庆交通科研设计院道路工程所, 重庆 400067)

摘要: 山区公路沿河路基的地下水受河水影响处于动态变化中, 路基地下水的渗流条件、车辆荷载等必然影响作用于路基挡墙的主动土压力的大小。基于 Coulomb 土压力理论的基本假定, 在对沿河路基及挡土结构物结构进行合理简化的基础上, 结合我国现行有关规范, 针对沿河路基排水系统沿墙—土界面布置、沿路基填土底部布置和排水系统完全失效 3 种情况, 分别推导了作用于路基挡墙上的主动土压力的计算公式。讨论了路基填土的有效内摩擦角和饱和重度、墙—土界面摩擦角和车辆荷载等对主动土压力系数的影响。指出在确保路基排水系统有效性的前提下, 沿路基填土底部布置排水系统的方案优于沿墙—土界面布置的方案; 杜绝超载车辆运行对确保沿河路基稳定具有重要意义。

关键词: 主动土压力; 理论计算; 沿河路基; 排水系统; 车辆荷载

中图分类号: TU476.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2008)03-0372-07

作者简介: 王俊杰(1973-), 男, 甘肃陇西人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 现为重庆交通科研设计院和重庆大学联合培养博士后研究人员。主要从事山区高等级公路路基工程方面的研究工作。E-mail: wangjunjiehu@163.com。

Active earth pressure induced by saturated subgrade under vehicle load

WANG Jun-jie^{1,2}, CHAI He-jun²

(1. College of River & Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Institute of Highway Engineering, Chongqing Communication Research & Design Institute, Chongqing 400067, China)

Abstract: Ground water states in the subgrade of mountain highways in river environment are often affected by the hydrological conditions of the river, so that the magnitude of active earth pressure acting on the retaining structure of the subgrade should be affected by many factors such as the seepage condition of the ground water and vehicle loads. Based on the basic assumptions of Coulomb's theory, some simplifications on the structures of the subgrade and the retaining wall and related applicable codes of China, three solutions for computing the active earth pressures of three different cases, in which the retaining walls were provided with effective drainage systems along the soil-structure interface, effective drainage systems along the base of the backfill of the subgrade, and noneffective drainage systems, respectively, were suggested. Various influence factors on the coefficients of active earth pressures such as the effective internal friction angle and saturated unit weight of the backfill of the subgrade, the soil/wall friction angle and the vehicle loads were investigated. It was emphasized that in the design of the retaining structure of the subgrade, the effective drainage system placed along the base of the backfill of the subgrade was better than that placed along the soil-structure interface, and that in order to keep the stability of the retaining wall, the vehicles running on the mountain highways in river environment should be never allowed to be overloaded.

Key words: active resistance; theoretical analysis; subgrade in river environment; drainage system; vehicle load

0 引言

山区公路由于受地形、地貌、施工技术等条件的限制, 多沿江、河、库等水系布线。目前, 我国的沿河公路路线的高程普遍偏低, 不少路基长期遭受地表水和地下水的共同作用, 路基失稳破坏进而影响甚至截断交通的事故时有发生。从大量调查资料来看, 沿河路基的失稳破坏与许多因素有关, 沿河路基的失稳破坏现象不仅仅发生在河水冲刷强烈的凹岸。沿河路基失稳破坏的形式可概括为两类^[1], 一类是突发性的失稳破坏, 其原因

多是外力作用, 如洪水、泥石流等的冲刷作用。通常所说的路基水毁^[2]主要是指这类破坏, 相关的研究文献较多, 如文献[3, 4]; 另一类是渐进性的失稳破坏, 其原因是多方面的, 通常认为动态地下水的长期作用是主要

基金项目: 交通部交通应用基础研究项目(2005319740090); 中国博士后科学基金资助项目(20070410206); 重庆市教育委员会科学技术研究项目(KJ070416); 重庆市科委自然科学基金计划资助项目(CSTC 2007BB7422)

收稿日期: 2007-02-25

原因之一,而地表水流的冲刷作用却不一定是主要原因。前人对沿河路基在多种因素耦合作用下发生渐进性失稳破坏的研究很少,甚至对其发生的机理也尚未弄清,因此在沿河路基防护结构的选择、设计等方面仍具有一些值得深入研究的课题。

在沿河路基挡土结构物的设计计算中,作用在路基挡墙上的土压力的计算是重要且必须的内容。实际上,土压力的计算是土力学和土木工程中最基本且古老的问题,前人对其已进行了相当多的研究,如文献[5,6]。但在实际工程的设计计算中,经典的 Rankine 土压力理论和 Coulomb 土压力理论仍然被广泛采用。对于沿河路基挡墙而言,由于路基地下水和河水间存在水力联系,加上车辆荷载的作用,使得土压力的计算要复杂得多。

在对沿河路基及挡墙结构和车辆荷载等进行一定简化的基础上,文献[7]基于 Rankine 土压力理论研究作用在沿河路基挡墙上的主动土压力的计算问题,本文则基于 Coulomb 土压力理论研究同一问题,并讨论车辆荷载、路基排水条件等对主动土压力的影响。

1 基本假定

山区公路沿河路基的结构通常比较复杂,不同路段的路基结构、挡墙结构、排水系统等均可能随地形、施工条件等的变化有所不同,为了使问题简化,做如下几点假定:

- (1) 路基填土为均质各向同性,且渗透系数为常数的无黏性土。
- (2) 路基挡墙为墙背直立的刚性挡土墙。
- (3) 作用在挡墙上的主动土压力由填土、地下水渗流和车辆荷载三部分引起,路基上边坡地形等条件对主动土压力的影响忽略不计,车辆荷载引起的孔隙水应力及其对土压力的影响也忽略不计。
- (4) 路基排水系统布置方案为两种,即沿墙—土界面竖向布置和沿填土底面水平布置。
- (5) 路基地下水的渗流为稳定渗流。

2 主动土压力计算

沿河路基地下水的动态变化与河水的水文条件密切相关。当然,路基地下水的动态变化,除了与河水水位的变化有关外,还与所处区域的水文地质条件等相关,为使问题简化,这里仅分析前者。当河、库水位上升时,路基地下水位也随之上升,作用在路基挡墙墙背上的主动土压力将增大,同时作用于墙面的水压力也增大,总体来讲,挡墙的稳定不会明显下降。当河、库水位骤降时,作用于墙面的水压力急剧减小,

而作用在墙背的主动土压力并不一定也随之即时减小,这对挡墙的稳定是很不利的。这时,主动土压力的大小和分布与地下水的渗流场特征相关,而渗流场的特征决定于路基排水系统的布置。另外,在实际工程中,路基排水系统可能因多种原因而失效或排水不畅。为使问题简化,仅讨论路基排水系统沿墙—土界面竖向布置和沿填土底面水平布置,以及排水系统完全失效 3 种情况下的路基挡墙主动土压力计算问题。

2.1 车辆荷载的简化计算

根据我国现行《公路桥涵设计通用规范》^[8]对车辆荷载引起的土压力计算方法的规定,把车辆荷载用一个均布荷载(或换算成等代均布土层)来代替。均布荷载的计算式为

$$q = \frac{\sum G}{BL} \quad (1)$$

式中 q 为车辆荷载换算成的均布荷载; $\sum G$ 为布置在计算面积内的车辆轮重的总重; B 为挡土墙的计算长度(一般取挡土墙的分段长度,常取 10~15 m); L 为挡土墙后填土的破坏长度,即车辆荷载布置的路基有效宽度。挡土墙后填土的破坏长度 L 的计算如下:

$$L = H \cot \alpha \quad (2)$$

式中 H 为挡墙高度; α 为计算的滑动面倾角,依理论公式得到,即^[8]

$$\cot \alpha = \sqrt{1 + \tan^2 \varphi'} - \tan \varphi' \quad (3)$$

式中 φ' 为墙后填土的有效内摩擦角。

2.2 墙背排水的主动土压力计算

(1) 孔压计算

假定路基地下水位与路面平齐,且保持不变;排水系统沿墙—土界面和墙底布置;河、库水位已降至墙底面以下。此时,可认为路基地下水的渗流为稳定渗流,如图 1 所示。

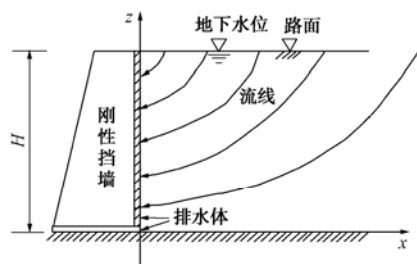


图 1 排水系统位于墙背时的稳定渗流场

Fig. 1 Steady water seepage for the case with drainage system along soil-structure interface

稳定渗流场的流函数 $h(x, z)$ 应满足 Laplace 方程^[9],即

$$\frac{\partial^2 h(x, z)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h(x, z)}{\partial z^2} = 0 \quad (4)$$

由图 1 可知, 流函数 $h(x, z)$ 在填土顶面、墙背和填土底不透水层面的边界条件为

$$\begin{cases} h(x, H) = H, \\ h(0, z) = z, \\ \left. \frac{\partial h(x, z)}{\partial z} \right|_{z=0} = 0. \end{cases} \quad (5)$$

依文献[10], 图 1 所示稳定渗流场的流函数可用级数形式表示为

$$h(x, z) = H \left(1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M^2} e^{-\frac{Mx}{H}} \cos \frac{Mz}{H} \right), \quad (6)$$

式中, $M = (2m+1)\pi/2$, $m = 0, 1, 2, 3, \dots$ 。

路基中任意点 (x, z) 处的孔隙水应力可由下式得到

$$u = \gamma_w [h(x, z) - z]. \quad (7)$$

(2) 主动土压力的计算

依 Coulomb 土压力理论, 当路基填土处于主动极限平衡状态时, 填土内将产生过墙踵的平面破坏面, 破坏面的倾角是使主动土压力取极大值的值。为简化起见, 破裂面倾角依《规范》^[7] (即式(3)) 计算。破裂面和墙背组成的滑动土楔按刚性体考虑, 刚性土楔及其受力分析如图 2 所示。

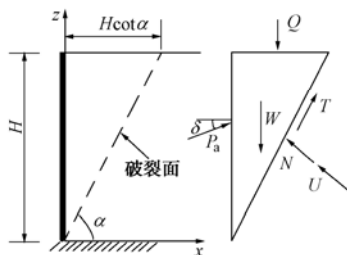


图 2 排水系统位于墙背时的主动土压力计算图

Fig. 2 Computation of active earth pressure for the case with drainage system along soil-structure interface

图中, 土楔的重力 W 为

$$W = \frac{1}{2} \gamma_{\text{sat}} H^2 \cot \alpha, \quad (8)$$

式中 γ_{sat} 为路基土饱和重度。

车辆荷载 Q 为

$$Q = qH \cot \alpha = \xi W, \quad (9)$$

式中 $\xi = \frac{2q}{\gamma_{\text{sat}} H}$, 这里称其为车辆荷载系数。

作用于破裂面上的总孔隙水压力 U 可由孔隙水应力沿破裂面积分得到。式(7)两端沿破裂面积分, 并考虑式(6), 可得

$$U = \int_0^H u(z \cot \alpha, z) \csc \alpha dz = g \frac{\csc \alpha}{\cot \alpha} U' W. \quad (10)$$

式中 $g = \gamma_w / \gamma_{\text{sat}} \approx 0.5$, 这里称其为路基填土重度系

数; U' 为破裂面倾角 α 的函数, 即

$$U' = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{4 \sin^2 \alpha e^{-\cot \alpha M}}{M^3} \cdot (\cot \alpha e^{\cot \alpha M} - \cot \alpha \cos M + \sin M). \quad (11)$$

显然, 在实际应用中, 无穷级数形式的 U' 的计算并非易事。为便于应用, 表 1 给出了不同填土有效内摩擦角 φ' 对应的 U' 值。

表 1 不同 φ' 对应的 U' 值

$\varphi' / (^\circ)$	$\cot \alpha$	U'
10	0.8391	0.3038
12	0.8098	0.2949
14	0.7813	0.2861
16	0.7536	0.2774
18	0.7265	0.2688
20	0.7002	0.2604
22	0.6745	0.2520
24	0.6494	0.2437
26	0.6249	0.2354
28	0.6009	0.2273
30	0.5774	0.2192
32	0.5543	0.2113
34	0.5317	0.2034
36	0.5095	0.1955
38	0.4877	0.1877
40	0.4663	0.1800
42	0.4452	0.1724
44	0.4245	0.1648

依土楔的平衡条件, 作用于破裂面上的有效总正应力 N 和剪力 T 分别为

$$\begin{cases} N = P_a \sin(\alpha - \delta) + (W + Q) \cos \alpha - U, \\ T = -P_a \cos(\alpha - \delta) + (W + Q) \sin \alpha. \end{cases} \quad (12)$$

依据 Mohr-Coulomb 定律, 破裂面上的有效总正应力 N 和剪力 T 满足下式:

$$T = N \tan \varphi'. \quad (13)$$

式(12)代入式(13), 并考虑式(8)~(10), 可得总主动土压力 P_{a1} 的计算式为

$$P_{a1} = \frac{1}{2} \gamma_{\text{sat}} H^2 K_{a1}. \quad (14)$$

式中 主动土压力系数 K_{a1} 的计算式为

$$K_{a1} = \frac{1}{\cos(\alpha - \delta) + \sin(\alpha - \delta) \tan \varphi'} \cdot [\cot \alpha (\sin \alpha - \cos \alpha \tan \varphi') (1 + \xi) + g \csc \alpha \tan \varphi' U']. \quad (15)$$

2.3 路基底部排水的主动土压力计算

(1) 孔压计算

仍假定路基地下水位与路面平齐, 且保持不变,

河、库水位已降至墙底面以下, 但排水系统位于路基底部, 如图 3 所示。

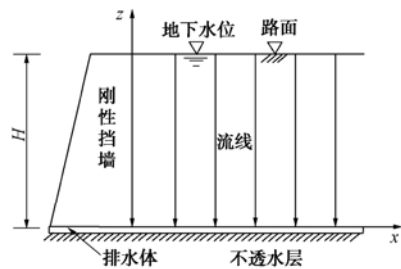


图 3 排水系统位于路基底部时的稳定渗流场

Fig. 3 Steady water seepage for the case with drainage system along base of backfill

此时, 路基中地下水的稳定渗流可简化为一维流, 即

$$h(z) = z \quad (16)$$

则路基中任意点 (x, z) 处的孔隙水应力为

$$u = \gamma_w [h(z) - z] = 0 \quad (17)$$

(2) 主动土压力的计算

当路基填土处于主动极限平衡状态时, 填土内将产生过墙踵的平面破坏面, 破坏面的倾角仍依式 (3) 计算。破裂面和墙背组成的刚性土楔及其受力分析如图 4 所示。

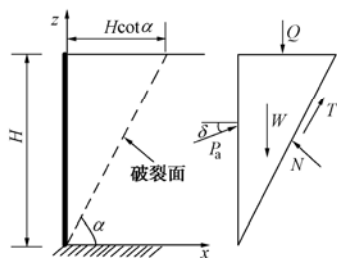


图 4 排水系统位于路基底部时的主动土压力计算图

Fig. 4 Computation of active earth pressure for the case with drainage system along base of backfill

利用与 2.2 中 (2) 节类似的方法, 可得作用于墙背的总主动土压力 P_{a2} 为

$$P_{a2} = \frac{1}{2} \gamma_{\text{sat}} H^2 K_{a2} \quad (18)$$

式中 主动土压力系数 K_{a2} 的计算式为

$$K_{a2} = \frac{1}{\cos(\alpha - \delta) + \sin(\alpha - \delta) \tan \varphi'}$$

表 2 本文方法与其他文献计算结果的比较

Table 2 Comparison among various calculated results

来源	H/m	$\gamma_{\text{sat}}/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	$\varphi'/(^{\circ})$	$\delta/(^{\circ})$	ζ	g	$P_a/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$
Barros ^[10]	7.32	19.6	38	15	—	—	159.2
Terzaghi ^[11]	7.32	19.6	38	15	—	—	156.9
本文式(14)	7.32	19.6	38	15	0	0.51	149.5

$$[\cot \alpha (\sin \alpha - \cos \alpha \tan \varphi') (1 + \xi)] \quad (19)$$

2.4 路基排水系统失效的主动土压力计算

(1) 孔压计算

当路基排水系统因某种或某些原因而失效, 极端情况是排水系统完全失效, 路基地下水为静态。仍假定路基地下水位与路面齐平, 且保持不变, 河、库水位已降至墙底面以下。此时路基填土内任意点的孔隙水应力为

$$u = \gamma_w (H - z) \quad (20)$$

(2) 主动土压力的计算

当路基填土处于主动极限平衡状态时, 填土内将产生过墙踵的平面破坏面, 破坏面的倾角仍依式 (3) 计算。刚性土楔及其受力分析同图 2 所示。

利用与 2.2 中 (2) 节相同的方法, 可得作用于墙背的总主动土压力 P_{a3} 为

$$P_{a3} = \frac{1}{2} \gamma_{\text{sat}} H^2 K_{a3} \quad (21)$$

式中, 主动土压力系数 K_{a3} 的计算式为

$$K_{a3} = \frac{1}{\cos(\alpha - \delta) + \sin(\alpha - \delta) \tan \varphi' + [\cot \alpha (\sin \alpha - \cos \alpha \tan \varphi') (1 + \xi) + g \csc \alpha \tan \varphi']} \quad (22)$$

3 讨 论

3.1 土压力计算公式的验证及分析

前文主动土压力计算方法的有效性和合理性可以通过比较前人对同类问题的计算结果进行验证。由于前文 3 种情况下土压力的计算方法是一致的, 因此这里仅对第一种情况 (即沿河路基排水系统沿墙—土界面布置) 的合理性进行验证。为了使问题和文献中的相同, 假定填土面没有车辆荷载作用, 或者说填土面无荷载作用。文献[10]和[11]对与此类似的同一问题进行了计算, 各自的计算结果列于表 2。依据本文公式 (14) 的计算结果也列于表 2。

由表 2 可知, 本文计算结果较文献[11]的约小 4.7%, 较文献[10]的约小 6.1%, 原因分析见下。

依据 Coulomb 土压力理论, 墙后土体达主动极限平衡状态时作用于挡背的土压力为主动土压力, 其土

压力的大小是假定一系列破坏面计算出的土压力中的最大值,表2中文献[10]和[11]的土压力值均是计算达到的。而本文在推导主动土压力计算式时,为了便于在路面布置车辆荷载和方便工程应用,墙后土体中破坏面的倾角是在不考虑地下水渗流和车辆荷载作用的条件下得到的,因此本文破坏面的倾角和文献[10, 11]破坏面的倾角是有区别的,这正是引起上述计算误差的原因。

3.2 影响土压力系数的主要因素

(1) 填土有效内摩擦角

图5给出了排水系统沿墙—土界面布置(图中 K_{a1})、沿路基填土底部布置(图中 K_{a2})和排水系统完全失效(图中 K_{a3})3种情况的主动土压力系数随填土有效内摩擦角的变化,其中参数 $g=0.5$, $\xi=1.0$, $\delta=\varphi'/3$ (图5(a))和 $\delta=2\varphi'/3$ (图5(b))。图中显示,随有效内摩擦角的增大,不同情况的主动土压力系数均呈非线性减小变化。

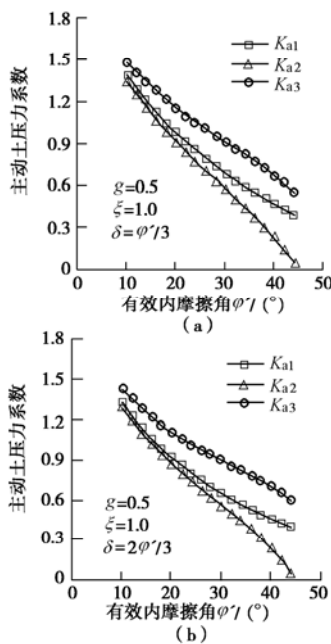


图5 填土有效内摩擦角对主动土压力系数的影响

Fig. 5 Influence of internal friction angle of backfill on active earth pressure coefficient

相比之下,排水系统完全失效的主动土压力系数(K_{a3})最大,且随填土有效内摩擦角增大的减小变化幅度最小;排水系统沿路基填土底部布置的主动土压力系数(K_{a2})最小,且随填土有效内摩擦角增大的减小变化幅度最大;排水系统沿墙—土界面布置的主动土压力系数(K_{a1})居中。例如,对 $\varphi'=20^\circ$, 30° 和 40° 三种情况,当 $\delta=\varphi'/3$, K_{a1} 为 K_{a3} 的84.3%, 75.0%和69.6%, K_{a2} 为 K_{a3} 的78.8%, 63.1%和34.3%;同样,当 $\delta=2\varphi'/3$ 时, K_{a1} 为 K_{a3} 的83.1%, 72.5%和64.6%,

K_{a2} 为 K_{a3} 的78.8%, 63.1%和34.3%。

由此可见,在沿路基挡土结构物的设计和施工中,确保排水系统的有效性对减小作用于路基挡墙的主动土压力的大小很重要,另外,有效的排水系统沿路基填土底部布置比沿墙—土界面布置更有利于减小主动土压力的值。

(2) 填土饱和重度

比较前文3种情况的主动土压力系数计算式(15)、(19)和(22)可知,排水系统沿路基填土底部布置的主动土压力系数与填土重度无关,而其它两种情况的主动土压力系数计算式中均包含与填土饱和重度相关的参数 g 。

图6给出了排水系统沿墙—土界面布置(图6(a))和排水系统完全失效(图6(b))2种情况的主动土压力系数随填土重度的变化,其中参数 $\xi=1.0$, $\delta=\varphi'/3$ 。图中显示,当 g 从0.4增大到0.6时,排水系统沿墙—土界面布置情况的主动土压力系数略有增大,而排水系统完全失效情况的主动土压力系数却明显增大。例如,对 $\varphi'=20^\circ$, 30° 和 40° 三种情况:当 g 从0.4增大到0.5时, K_{a1} 分别增大1.3%, 2.0%和2.9%(见图6(a)), K_{a3} 分别增大4.4%, 8.0%和15.1%(见图6(b));当 g 从0.5增大到0.6时, K_{a1} 分别增大1.3%, 2.0%和2.8%(见图6(a)), K_{a3} 分别增大4.2%, 7.4%和13.1%(见图6(b))。

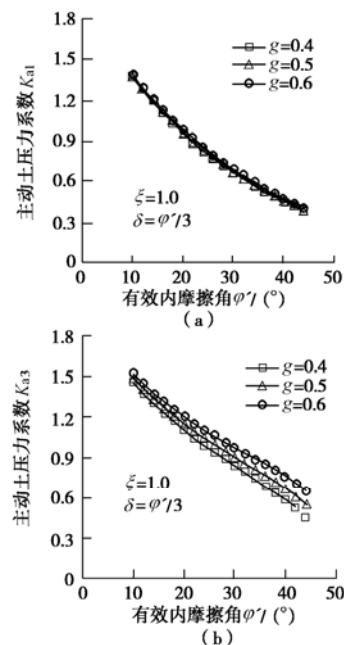


图6 填土饱和重度对主动土压力系数的影响

Fig. 6 Influence of unit weight of saturated backfill on active earth pressure coefficient

(3) 墙—土界面摩擦角

图7给出了前文3种情况的主动土压力系数随墙

- 土界面摩擦角的变化, 其中参数 $g = 0.5$, $\xi = 1.0$ 。图中显示, 3 种情况的主动土压力系数均因墙—土界面摩擦角 δ 的变化而变化。当填土有效内摩擦角较小时, 主动土压力系数随 δ 的增大呈减小变化, 但当填土有效内摩擦角增大到某一值后, 土压力系数不一定继续随 δ 的增大呈减小变化。例如, 对 $\varphi' = 20^\circ$, 30° 和 40° 三种情况: 当 δ 从 0° 增大到等于 $\varphi'/2$ 时, K_{a1} 分别减小 9.6%, 10.3% 和 9.0% (见图 7 (a)), K_{a2} 和 K_{a3} 均分别减小 7.4%, 5.2% 和 -1.8% (见图 7 (b) 和 7 (c)); 当 δ 从等于 $\varphi'/2$ 增大到等于 φ' 时, K_{a1} 分别减小 6.2%, 3.4% 和 -3.2% (见图 7 (a)), K_{a2} 和 K_{a3} 均分别减小 4.2%, -1.6% 和 -16.1% (见图 7 (b) 和 7 (c))。

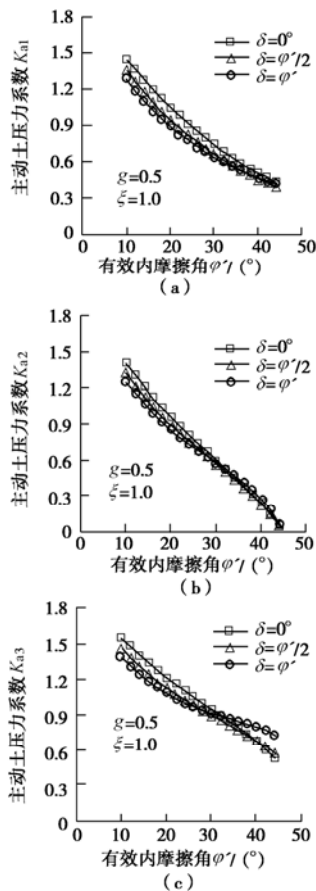


图 7 墙—土界面摩擦角对主动土压力系数的影响

Fig. 7 Influence of soil/wall friction angle on active earth pressure coefficient

(4) 车辆荷载

图 8 给出了前文 3 种情况的主动土压力系数随路面车辆荷载的变化, 其中参数 $g = 0.5$, $\delta = \varphi'/3$ 。图中显示, 3 种情况的主动土压力系数均随车辆荷载系数 ξ 的增大呈增大变化。例如, 对 $\varphi' = 20^\circ$, 30° 和 40° 三种情况: 当车辆荷载系数 ξ 从 0.0 增大到 0.5 时, K_{a1} 分别增大 44.0%, 41.0% 和 37.8% (见图 8 (a)), K_{a2} 均增大 50.0% (见图 8 (b)), K_{a3} 分别增大 32.5%, 23.0%

和 10.3% (见图 8 (c)); 当 ξ 从 0.5 增大到 1.0 时, K_{a1} 分别增大 30.6%, 29.1% 和 27.4% (见图 8 (a)); K_{a2} 均增大 33.3% (见图 8 (b)), K_{a3} 分别增大 24.5%, 18.7% 和 9.4% (见图 8 (c))。

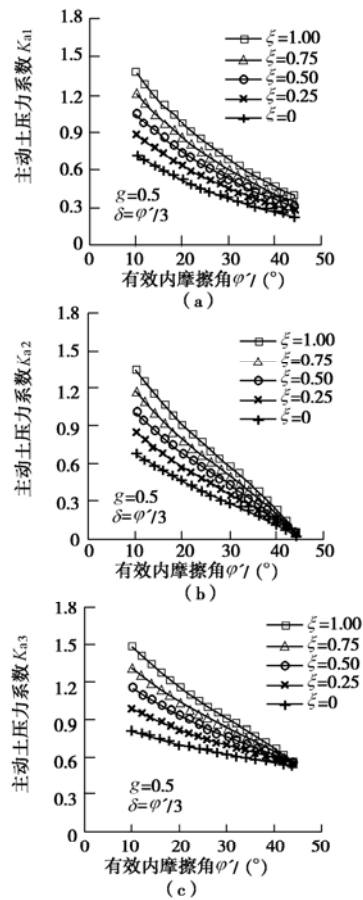


图 8 车辆荷载对主动土压力系数的影响

Fig. 8 Influence of vehicle load on active earth pressure coefficient

由此可见, 车辆荷载的增大将显著增大作用于路基挡墙的主动土压力, 因而, 限制超载车辆在沿河公路的运行对确保路基挡墙的稳定乃至沿河公路的安全畅通均是具有重要意义的。

4 结 论

本文基于 Coulomb 土压力理论的基本假定, 在对沿河路基及挡土结构物结构进行合理简化的基础上, 结合我国现行有关规范, 就沿河路基排水系统分别沿墙—土界面和填土底部两种布置方案, 以及排水系统完全失效共三种情况, 分别推求了作用于路基挡墙上的主动土压力计算公式, 讨论了影响主动土压力系数的各主要因素, 得出如下几点有益结论:

(1) 作用于饱和填土路基挡墙上的主动土压力值, 可根据路基排水条件分别依式 (14)、(18) 和 (21) 计算得到。

(2) 路基排水系统的有效性和布置方式均对作用

于路基挡墙上的主动土压力有较大影响,在沿河路基的设计施工中应给予足够重视。

(3)车辆荷载的增大将明显增大作用于路基挡墙上的主动土压力值,因此,杜绝超载车辆对确保沿河公路的安全畅通和延长其使用寿命均具有重要意义。

参考文献:

- [1] WANG Jun-jie, CHAI He-jun, HU Yuan-xin, ZHANG Li-juan. Mechanism of dynamic instability for riverside subgrad [C]// Proceeding of the First International Conference on Transportation Engineering. Chengdu: American Society of Civil Engineerings, 2007: 1933 - 1939.
- [2] 高冬光. 公路与桥梁水毁防治[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002. (GAO Dong-guang. Water-destruction and protection for highways and bridges[M]. Beijing: China Communications Press, 2002. (in Chinese))
- [3] 田伟平, 李惠萍, 高冬光. 沿河路基冲刷机理与冲刷深度[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2002, 22(4): 39 - 42. (TIAN Wei-ping, LI Hui-ping, GAO Dong-guang. Scour depth and mechanism of highway subgrade along river[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2002, 22(4): 39 - 42. (in Chinese))
- [4] 梁光模, 程尊兰, 吴积善, 等. 沿河公路路基防治技术及水力计算[M]. 成都: 四川科技出版社, 2004. (LIANG Guang-mo, CHENG Zun-lan, WU Ji-shan, et al. Protecting technique for riverside subgrade of highway and computing for water power[M]. Chengdu: Sichuan Publishing House of Science & Technology, 2004. (in Chinese))
- [5] SOUBRA A H. Static and seismic passive earth pressure coefficients on rigid retaining structures[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, 37: 463 - 478.
- [6] BENMEBAREK N, BENMEBAREK S, KASTNER R, SOUBRA A H. Passive and active earth pressure in the presence of groundwater flow[J]. Géotechnique, 2006, 56(3): 149 - 158.
- [7] 王俊杰, 张丽娟, 柴贺军, 李海平. 车辆荷载对沿河路肩挡墙主动土压力的影响. 交通部西部交通建设科技项目管理中心(此为编者). 交通资源节约和环境保护新技术研讨会论文集[M]. 人民交通出版社, 2007: 92 - 99. (WANG Jun-jie, ZHANG Li-juan, CHAI He-jun, LI Hai-ping. Influence of vehicle load on active earth pressure acting on retaining wall of subgrade in river environment[C]. In: Management Center on Western Traffic Projects of Ministry of Communications of China. Jiaotong Ziyuan Jieyue he Huanjing Baohu Xinjishu Yantaohui Lunwenji[M]. Beijing: China Communications Press, 2007: 92 - 99. (in Chinese))
- [8] JTGD60—2004 公路桥涵设计通用规范[S]. 2004. (JTGD60—2004 General code for design of highway bridges and culverts[S]. Beijing: The Ministry of Communications of P R China, 2004. (in Chinese))
- [9] HARR M E. Groundwater and seepage[M]. New York: McGraw-Hill, 1962.
- [10] BARROS P L A. A Coulomb-type solution for active earth thrust with seepage[J]. Géotechnique, 2006, 56(3): 159 - 164.
- [11] TERZAGHI K. Theoretical soil mechanics[M]. New York: John Wiley & Sons, 1943.