

# 终南山公路隧道非机械式通风效果研究

郑 暉<sup>1,2</sup>, 郭佳奇<sup>1</sup>

(1. 北京交通大学隧道及地下工程教育部工程研究中心, 北京 100044; 2. 长安大学电子与控制工程学院, 西安 710054)

**[摘要]** 秦岭终南山特长公路隧道规模庞大,通风系统复杂,为了合理确定通风配置,节约通风费用,评估自然风和交通活塞风等非机械式通风方式的通风效果就显得非常重要。课题组现场监测了终南山特长公路隧道内的自然风速、交通量及自然风压和交通风压共同作用下的风速,收集了大量数据。通过对监测数据的处理、分析得出,较大自然风速出现在 10:00—14:00 这个时间段,最大自然风速达到 2.576 m/s;隧道东、西线交通量出现高峰期的时间段基本恒定;隧道东线内自然风压和交通风压共同作用下的风速较大的时间段基本上与交通量高峰期时间段相吻合,而西线这两个时间段吻合性较差,洞内风速变化相对平缓。考虑洞口外向频率、风向、洞口实测温度等参数的自然风速计算方法计算值与实测自然风速较接近。隧道内自然风压和交通风压联合作用下的风速计算值虽小于现场实测值,但较接近实测值。

**[关键词]** 隧道通风;现场监测;非机械式通风;自然风;交通活塞风

**[中图分类号]** U453.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2010)03-0039-06

## 1 前言

随着我国公路建设的快速发展,长度超过 3 000 m 的特长公路隧道大量出现<sup>[1]</sup>,其运营安全问题,日趋受到广泛的关注。由于稀释特长公路隧道内的有害气体相对较困难,所以特长公路隧道建设及运营中面临的首要问题便是隧道的通风问题<sup>[2]</sup>。目前,长大隧道通风研究多集中在机械式通风方式的选择、机械式通风效果的评价及火灾下通风模式与通风策略等方面,对自然风、交通活塞风等非机械式通风的研究较少,且大多是在一定假设下的理论分析<sup>[3,4]</sup>或者简化边界条件下的缩微模型试验<sup>[5]</sup>,且单纯的研究自然风或交通活塞风<sup>[6-9]</sup>,而实际运营中隧道内的非机械风风速受自然风压和交通风压的联合作用。文章通过现场实测和理论分析的方法对秦岭终南山公路隧道非机械式通风效果进行了分析、评价。

## 2 现场测试概况

秦岭终南山特长公路隧道北起长安县的青岔

口,南止柞水县的小峪口,位于秦岭山脉东段,是西北、华北通向重庆、四川、湖北等省的西部大通道纵(国道包头—北海)横(国道银川—武汉)汇合点。隧道双洞单向交通,设计洞内行车速度 80 km/h,单洞长度达到 18 020 m,隧道西安端洞口海拔高程 896 m,安康端洞口海拔高程标高 1 026 m,最大纵坡为 1.1%,最大埋深 1 640 m,隧道断面面积 70.007 m<sup>2</sup>。终南山公路隧道北洞口风向大致分布在 NNW—NNE 和 SW—SSE 之间,南洞口风向大致分布在 SW—SSE 以及 NNW—NNE 之间。南北洞口气压最高值出现在 12 月份,最低值出现在 7 月份,均呈非周期性变化<sup>[10]</sup>。

现场洞内监测在隧道通车前后各进行一次,通车前主要监测隧道洞的自然风速;通车后主要监测隧道内交通量、车速和自然风压和交通风压共同作用下的风速。

沿隧道全长分布 30 个测点(上下行线共计 60 个测点),相邻测点间距约 600 m,风速仪布置见图 1。图 1 中实心圆为风速仪位置,各个测点同时同步进行连续观测,记录隧道内测点处的风速和风

**[收稿日期]** 2009-06-30

**[作者简介]** 郑 暉(1969-),男,陕西西安市人,高级工程师,研究方向为长大隧道交通控制与管理;E-mail: zhengxjtu@163.com

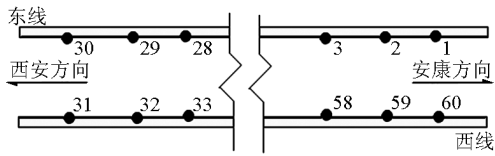


图1 隧道内风速测点布置图

Fig. 1 Arrangement plan of monitoring points

向。沿隧道全长分布 14 个摄像头用于监测隧道内的交通量及车速,布置方式类似于风速仪。

自然风速的监测从 2006 年 12 月 14 日开始,连续测试 3 天 24 小时不间断测试,每隔 40 min 左右读数一次。隧道内交通量和自然风压和交通风压共同作用下风速的监测于 2007 年 1 月 23 日开始,连续 3 天 24 小时不间断测试,每 15 min 记录一次读数。主要采用的测试仪器为:风速风向仪(热球式电风速计 QDF-2A);轻便三杯风向风速表(DEM6 型);摄像头(LS-9100ZP)。

### 3 监测结果处理与分析

#### 3.1 隧道内实测自然风速

从 2006 年 12 月 14 日始连续 3 天对隧道东线内自然风速进行不间断现场监测,每隔 40 min 左右读数一次。检测结果见图 2。

由图 2 可知,隧道东线中部、隧道内靠近南、北洞口处自然风速变化规律基本相同。最大自然风速出现的时间段大致为 10:00—14:00,隧道内北出口附近的平均自然风速为 0.992 m/s,隧道中部 0.921 m/s,隧道内南出口附近 0.845 m/s,自北向南依次递减。3#测点 14 日最大风速出现在 12:00,最大风速为 1.690 m/s,15 日(12:00,2.190 m/s),16 日(10:40,1.840 m/s);15#测点 14 日最大风速出现在 12:00,最大风速为 1.878 m/s,15 日(12:00,2.394 m/s),16 日(10:40,1.937 m/s);28#测点 14 日最大风速出现在 11:20,最大风速为 2.026 m/s,15 日(12:00,2.576 m/s),16 日(10:00,2.320 m/s)。

#### 3.2 隧道内实测交通量

从 2007 年 1 月 23 日开始,连续 3 天监测隧道内交通量,24 小时不间断监测,每 10 min 记录一次读数,换算成小时平均交通量见图 3。

从图 3 可知,无论是隧道东线或西线交通量出现高峰期时间段变化不大,隧道东线高峰期大致在 09:00—11:00,15:00—18:00 两个时间段;隧道西线高峰期交通量出现在 14:00—18:00。

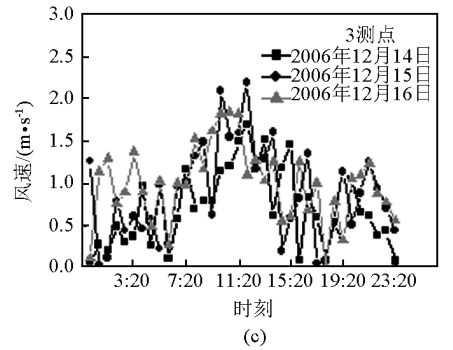
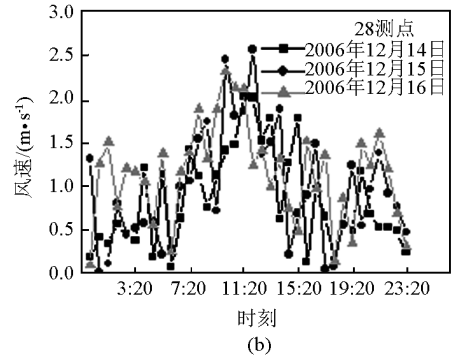
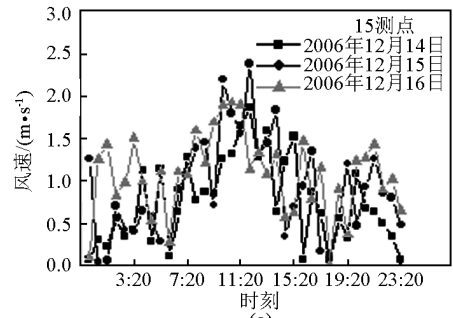


图2 隧道东线自然风速变化趋势

Fig. 2 The change trend of natural wind speed  
有代表性的摄像头监测情况见表 1。

表 1 交通量统计

Table 1 The statistics of traffic flux 辆

项目	监测设备	1月20日	1月21日	1月22日
隧道东线	2#摄像头	3 985	4 049	4 017
	4#摄像头	3 554	3 764	3 796
	6#摄像头	3 655	3 791	3 870
隧道西线	9#摄像头	4 624	4 764	4 765
	11#摄像头	4 563	4 682	4 762
	13#摄像头	4 609	4 612	4 804

隧道东线 2#摄像头监测到的交通量大于 4#和 6#摄像头监测到的交通量,4#摄像头与 6#摄像头监测到的交通量较接近。隧道西线 3 个摄像头监测到的交通量较接近。进行交通风活塞风计算时东线取 4#摄像头和 6#摄像头监测交通量的平均值,西线取

3 个摄像头监交通量的平均值。

### 3.3 隧道内自然风压和交通风压作用下的风速

隧道内测点布置见图 1, 于 2007 年 1 月 23 日始

连续 3 天进行不间断监测, 每隔 15 min 读数一次。隧道东、西线中部的 3 个监测点监测到的自然风压和交通风压作用下的风速变化趋势见图 4。

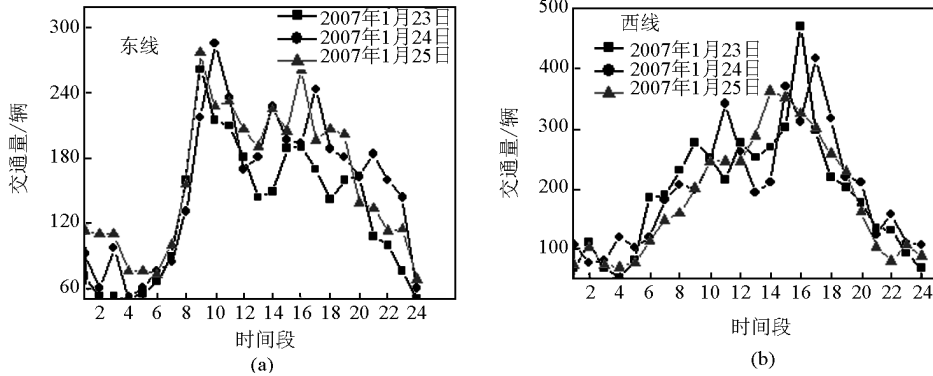


图 3 隧道内小时平均交通量变化趋势

Fig. 3 The change trend of mean traffic flux

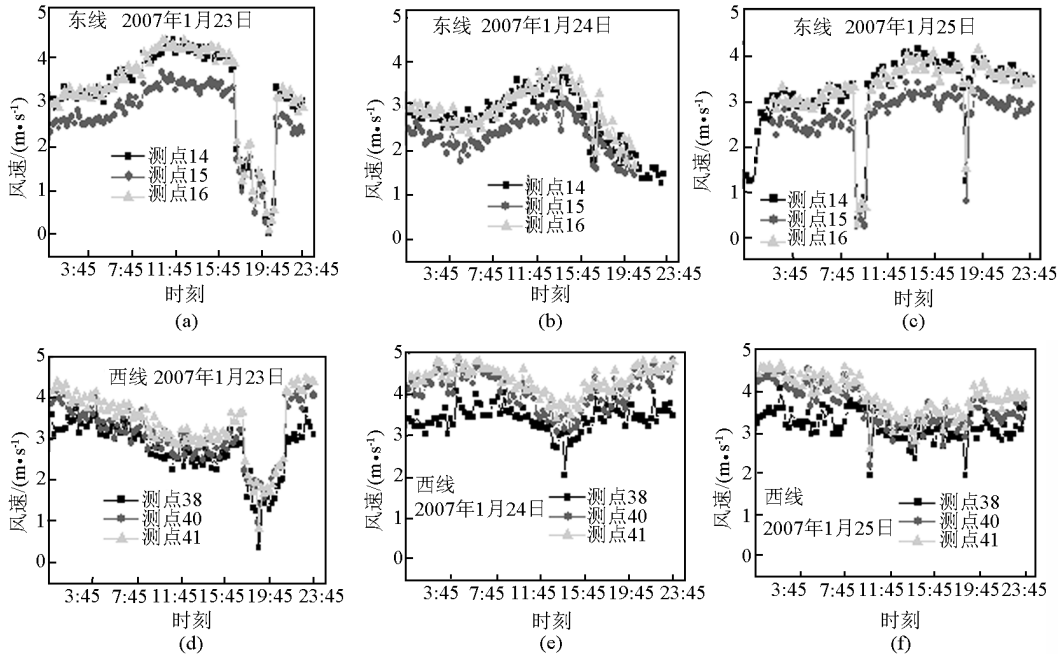


图 4 隧道内风速变化趋势

Fig. 4 The change trend of wind speed

比较图 3 和图 4 可知, 隧道东线内风速较大的时间段基本上与交通量出现高峰期时间段相吻合。并且测点 14 与测点 16 监测到的风速较接近; 隧道西线内风速变化相对平缓, 风速相对较大的时间段与交通量高峰值时间段吻合性较差, 3 个测点监测风速较接近。

## 4 理论计算值与实测值的比较

### 4.1 隧道内自然风理论分析

当隧道内自然风稳定时, 可以充分利用它作为

隧道通风动力; 相反, 当隧道内风流变化无常或者变化较大时, 会给隧道机械通风带来较大干扰。因此认真研究隧道内自然风的变化规律对降低营运隧道通风电力成本或采取针对性措施保障通风系统的稳定性均有重要意义。

#### 4.1.1 隧道内自然风计算方法

自然风引起山岭隧道内空气流动的原因主要有两个方面: 一是两洞口大气压的超静压差(包括平常所说的风压); 二是隧洞内外温差引起的热压<sup>[10]</sup>。无竖井(或竖井还在施工中)的隧道由于热

表 2 隧道东线自然风速比较

Table 2 Comparison of natural wind speed

	14 日	15 日	16 日
计算值/(m·s <sup>-1</sup> )	-1.119 (式 1), -1.072 (式 2)		
实测平均值/(m·s <sup>-1</sup> )	-0.769	-0.878	-1.073
规范推荐值/(m·s <sup>-1</sup> )	-2 ~ -3		

从表 2 可知,当  $v_a$  取值考虑洞口外风向频率、风向等参数时自然风速计算值与自然风速实测值较接近。目前《公路隧道通风照明设计规范》(JTJ 026.1-1999)推荐的自然风速为  $-2 \sim -3$  m/s。以本次现场测试为例,如果在通风设计中计算自然风压时自然风速采用  $-2 \sim -3$  m/s,夸大了 12 月份隧道东线内自然风的不利作用,又严重忽略了隧道西线内自然风的有利作用。实时监测隧道洞口及隧道内的自然风速、风向,大气温度及密度,以及交通量建立动态的隧道需风量,在此基础上控制隧道内风机的开启与关闭对减轻通风费用具有重要意义,在交通量较小的隧道运营初期也可以减少通风设备的数量。

#### 4.2 自然风压和交通风压作用下的风速分析

在隧道中运行的车辆,由于其具有一定的运动速度和相应的车体断面积,将能量传递给隧道的空气,造成了隧道内部的空气流动。这种由车辆运动所引起的隧道气流运动俗称为“活塞风”。由于自然风压和交通风压作用下的非机械风速在某种程度上决定着隧道通风设备的规模,合理评估非机械风速对隧道通风节能具有重要意义。

##### 4.2.1 计算方法

初始状态时,  $v = v_n$ 。交通风压  $p_t$  为最大值,终了状态时,  $v_t > v$ , 且  $v = v_{max}$ , 隧道内空气流速在联合风压作用下达到最大值。此时通风网络中风压处于平衡状态,即:

$$p_t \pm p_n - p_m - p_z = 0 \quad (3)$$

式中,  $p_t$  为交通风压, Pa;  $p_n$  为自然风压, Pa;  $p_m$  为隧道沿程摩擦阻力, Pa;  $p_z$  为局部阻力, Pa。  $p_t$ ,  $p_z$ ,  $p_m$  的计算公式见文献[9],  $p_n$  的计算见 3.1 节。

$p_n$  与  $p_t$  一致时,取“+”;反之,取“-”。在获知相关参数的前提下,求解式(3)可得到隧道内自然风压和交通风压联合作用下的风速。

##### 4.2.2 计算结果比较

1 月份隧道内热压作用同外界自然风压方向一致,采用公式(1)计算  $p_n$ , 东线内自然风压与交通风压相反,隧道西线二者方向一致。1 月份隧道北洞

压引起的浮生、沉降效应使得隧道内的空气流动,当外界有自然风时,就出现两种情况:洞口外自然风的风向与热压作用引起隧道内空气流动的方向相同,此时隧道内的自然风速较大;当外界风向与热压作用引起的隧道内空气流动方向相反时,此时隧道内的自然风速就较小<sup>[11]</sup>,以冬季为例,见图 5。

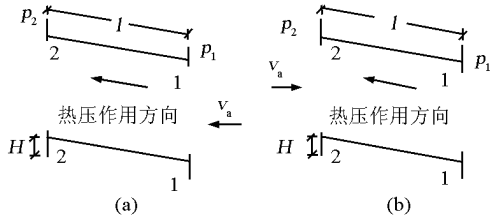


图 5 无竖井隧道冬季自然通风示意图

Fig. 5 The sketch of summer natural wind

图 5(a)为外界风向和热压作用方向一致时的情形,由气流能量方程及超静压差公式可推得自然风压同隧道内自然风速的关系式<sup>[12]</sup>:

$$p_n = \Delta p + \frac{\rho_n v_a^2}{2} + g \cdot H \cdot (\rho_a - \rho_n) \\ = (\lambda \cdot \frac{l}{d} + \zeta_{en} + \zeta_{ex} + 1) \cdot \frac{\rho_n v_n^2}{2} \quad (1)$$

式中:  $v_a$  为洞口外吹向隧道中线方向的风速, m/s;  $v_n$  为隧道洞内的风速, m/s;  $H$  为两洞口的高程差, m;  $\lambda$  为隧道沿程阻力系数, 0.026;  $l$  为隧道全长, m;  $d$  为隧道水力直径, m;  $\zeta_{en}$  为隧道入口局部阻力系数, 0.5;  $\zeta_{ex}$  为隧道出口局部阻力系数, 1;  $\Delta p$  为两洞口间的超静压差;  $\rho_a$ ,  $\rho_n$  为隧道外空气的密度, 隧道内空气的密度。

同理,可得图 5(b)所示情形下自然风压同隧道内自然风速的关系式:

$$p_n = \Delta p - \frac{\rho_n v_a^2}{2} + g \cdot H \cdot (\rho_a - \rho_n) \\ = (\lambda \cdot \frac{l}{d} + \zeta_{en} + \zeta_{ex} + 1) \cdot \frac{\rho_n v_n^2}{2} \quad (2)$$

##### 4.1.2 计算结果比较

隧道外空气密度  $1.16$  kg/m<sup>3</sup>, 隧道内密度为  $1.13$  kg/m<sup>3</sup>; 在计算中北洞口自然风速  $v_a$  取为  $1.146$  m/s, 南洞口自然风速  $v_a$  取为  $1.057$  m/s; 超静压差  $\Delta p$  见参考文献[10]。以隧道东线为例, 计算结果见表 2。

口自然风速为 1.2 m/s, 南洞口自然风速为 1.17 m/s; 1 月份隧道北洞口平均压强为 92.33 kPa, 南洞口平均压强为 90.97 kPa; 隧道外空气密度 1.17 kg/m<sup>3</sup>, 隧道内密度为 1.15 kg/m<sup>3</sup>。车辆在隧道中的运动速度  $v_1 = 60$  km/h; 车辆平均迎风面积 3.528 m<sup>2</sup>; 隧道内自然风压和交通风压联合作用下的风速计算结果见表 3。

表 3 隧道自然风速比较

Table 3 Comparison of wind speed value m/s

	23 日	24 日	25 日
东线实测值	3.04	2.66	3.02
东线计算值		2.73	
西线实测值	3.07	3.96	3.55
西线计算值		3.21	

由表 3 可知, 虽联合风压作用下风速计算值小于实测平均值, 但均较接近实测平均值, 说明公式 (3) 的计算结果有一定的参考价值, 是可以接受的。

## 5 结语

1) 实测数据表明隧道内自然风速在一定时间段还是比较大的, 在隧道通风设计中必须给予重视。隧道东线中部、隧道内靠近南、北洞口处自然风速变化规律基本相同。最大自然风速出现的时间段大致为 10:00—14:00, 隧道内北出口附近的平均自然风速为 0.992 m/s, 隧道中部 0.921 m/s, 隧道内南出口附近 0.845 m/s, 自北向南依次递减。

2) 隧道东、西线交通量出现高峰期的时间段比较固定, 隧道东线内风速较大的时间段基本上与交通量出现高峰期时间段相吻合, 西线内风速变化相

对平缓, 风速相对较大的时间段与交通量峰值时间段吻合性较差。

3) 通过计算值与实测值的比较, 说明文章所述的计算方法具有较大的参考价值。

## 参考文献

- [1] 风懋润. 中国公路与隧道建设 [A]. 国际隧道研讨会暨公路建设技术交流大会论文集 [C]. 北京: 人民交通出版社, 2002
- [2] 邓顺熙. 公路与长隧道空气污染影响分析方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2004
- [3] 曾艳华, 何川, 关宝树. 有竖井隧道自然风压的研究 [J]. 地下空间, 2003, 23(1): 69-71
- [4] Hyo-gyu Kim. A Fundamental Study on the Guideline of Ventilation Design in Longer tunnels [D]. The Society of Air Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, 2001
- [5] Kim J Y, Kim K Y. Experimental and numerical analyses of train-induced unsteady tunnel flow in subway [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2007, 22: 166-172
- [6] 仇玉良, 李宁军, 杨忠. 秦岭特长多竖井深埋隧道气温测试研究 [J]. 现代隧道技术, 2004, 41(3): 35-39
- [7] 王光辉, 周谔义, 李治国. 长大隧道贯通后自然风的利用 [J]. 公路隧道, 2005, (1): 48-52
- [8] 吕康成, 伍毅敏. 公路隧道通风设计若干问题探讨 [J]. 公路, 2006, (5): 223-227
- [9] 钟星灿, 高慧翔, 龚波. 交通风力自然通风作用原理探析 [J]. 铁道工程学报, 2006, 95(5): 82-87
- [10] 金文良. 秦岭终南山特长公路隧道洞口气象观测与分析 [J]. 公路交通科技, 2006, (6): 115-119
- [11] 于燕玲. 污水隧道纵向通风 CFD 仿真模拟与试验研究 [D]. 天津: 天津大学, 2006
- [12] 金学易, 陈文英. 隧道通风及隧道空气动力学 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1983

# Research on non-mechanical ventilation effect in Zhongnanshan road tunnel

Zheng Xuan<sup>1,2</sup>, Guo Jiaqi<sup>1</sup>

(1. Tunnel and Underground Engineering Research Center of Education Ministry, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. School of Electronic & Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

[Abstract] Zhongnanshan extra-long road tunnel in Qingling is large-scale and has a complex ventilation

system. In order to guarantee the ventilation scheme properly and save the ventilation expenditure, the evaluation of non-mechanical ventilation effect is of importance. The research team monitored the natural wind initially, traffic flux and the wind induced by natural ventilation pressure and traffic wind force subsequently, and obtained lots of data. Through analysis of the monitoring data, we draw some conclusions: firstly, bigger speed of the natural wind occurs in the period from 10:00 am to 14:00 pm, and the greatest value reaches 2.576 m / s; secondly, the period of peak traffic flux in tunnel (east or west line) is mostly constant; at last, the period of bigger wind speed, which induced by natural ventilation pressure and traffic wind force, basically matches the period of peak traffic flux in the east line, while the two periods match badly in west line, meantime, the change of wind speed is relatively smooth in west line. The calculating value of the natural wind speed by method which takes account of some parameters such as wind orientation, frequency of wind orientation, the temperature of portal et al, approximates the monitoring value. The calculating value of the wind speed induced by natural ventilation pressure and traffic wind force is a little smaller than the monitoring, but approximate it.

[**Key words**] tunnel ventilation; field monitoring; non-mechanical ventilation; natural wind; traffic piston wind

---

(上接 14 页)

## Study on anti-sliding stability of hydraulic structures on subbed soils

Zhou Junliang

(Water Resources Bureau of Jiangsu Province, Nanjing 210029, China)

[**Abstract**] To make a study on the anti-sliding stability of foundation of hydraulic structures on subbed soils, and based on the result by anti-sliding tests of dragged concreting clip plates in foundation pits, the anti-sliding stability of foundation on subbed soils was determined. There are 3 different forms of largest displacement with 8 different forms of sliding move of subbed soils caused by the different maximum compressive stresses of eccentric loads on them. It is worked out a design method to determine the sliding frictional resistances and the forms of sliding moves of foundation subbed soils; a formula for the integral friction resistance to sliding for the structure; a formula for the anti-sliding move of subbed soils and a rule to distinguish the plane sliding move of foundation subsoils with others. To analyze 3 structures which have been established provides a confirmation with the reality for the design method.

[**Key words**] anti-sliding test of dragged concreting clip plates; the forms of the largest displacement and sliding move; anti-sliding friction coefficient; design and calculation method