

文章编号: 1000-7598 (2009) 12-3771-05

山区挡土墙土压力的现场试验研究

肖衡林^{1,2}, 余天庆²

(1.中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071; 2.湖北工业大学 土木工程与建筑学院, 武汉 430068)

摘 要: 结合某山区高速公路多个挡土墙背水平土压力的监测数据, 对挡土墙背的水平土压力时空分布规律进行了详细地研究。研究表明: 施工期间, 不同深度的土压力随着上部填土高度增加而增长的速度不同, 愈是接近墙顶, 其增加越快; 施工期间实测水平土压力介于静止土压力和被动土压力之间, 在墙身的 3/4 以下与静止土压力接近, 在墙身的 1/2 以上与垂直土压力接近。刚施工完的挡土墙土压力为非线性分布, 近似成双直线, 实际土压力合力介于静止土压合力和垂直土压合力之间, 更接近静止土压合力, 其大小约为库伦主动土压力的 2.5 倍, 为库伦被动土压力的 0.3 倍。土压力合力作用点在 0.38 倍墙高处。土压力随着时间而变化, 在测量期间土压力变化规律为先减少后增加, 总的趋势是不断增加, 且随时间的变化量较大。

关键词: 山区; 挡土墙; 土压力; 分布规律; 试验研究

中图分类号: TU 476.14

文献标识码: A

Field experiment on earth pressure behind retaining wall in mountainous area

XIAO Heng-lin^{1,2}, YU Tian-qing²

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstracts: Based on the monitoring data of earth pressure of several retaining walls in mountainous area, the distributing rules of earth pressure of retaining wall were studied in detail. The tests results show that: ①The increase speed of earth pressure in different depth was different. ②The value of earth pressure is intervenient between the still earth pressure and vertical earth pressure. It is closer to the still earth pressure below the depth of three-quarter retaining wall, and is closer to the vertical earth pressure above the depth of one-half retaining wall. ③The earth pressure behind retaining wall is nonlinearly following the depth of retaining wall. The curves can be considered as double line. The resultant earth pressure is about 2.5 times of resultant Coulomb active earth pressure and 0.3 times of resultant Coulomb passive earth pressure. The height of action point of resultant earth pressure is 0.38 times of the retaining wall. The earth pressure changes with time, and its rule is: the earth pressure increases first, and then decreases with time; furthermore, the change range is rather large.

Key words: mountainous area; retaining wall; earth pressure; distributing rules; field experiment

1 引 言

土压力是岩土工程界的古老课题, 早在 1776 年和 1857 年, 库仑、朗肯就推导了经典的土压力理论^[1], 并因其计算简单和力学概念明确, 一直为工程设计所采用。然而, 随着工程规模的扩大与要求的提高, 经典土压力理论已经不能满足工程实际需要, 首先是 Terzaghi 提出了质疑并通过试验进行验

证^[2-4], 之后, 很多学者进行了模型试验, 研究不同情况下土压力的实际分布^[5]。同时, 随着计算机的发展, 有限元数值计算为土压力的研究开辟了新的途径^[6]。从土压力问题产生至今, 研究一直没有间断, 这说明了土压力问题研究的重要性, 也说明了土压力问题的复杂性。正因为影响土压力的因素繁多、情况复杂多变, 很难采用一种方法或者公式来进行计算, 因此, 在进行不同状况下土压力分析

收稿日期: 2009-05-27

基金项目: 湖北省交通厅科技项目资助 (鄂交科教[2006]392)。

第一作者简介: 肖衡林, 男, 1977 年生, 博士, 副教授, 主要从事环境岩土工程、光纤传感技术在岩土工程中的应用及地下工程等方面的教学和科研工作。E-mail: xiao-henglin@163.com

时，要区分对待。

一般而言，山区挡土墙依山而建（全填方路基挡土墙除外，这种形式挡土墙在山区不多见），具有其自身的特点，除了填土、施工、变形和尺寸对挡土墙受力产生影响之外，山体对挡土墙的作用也非常明显，因此，在山区交通飞速发展的今天，加强山区挡土墙土压力的研究非常必要。本文依托西部某山区高速公路挡土墙工程，在挡土墙墙背布置土压力计，对墙背土压力进行了长期监测，在分析监测数据的基础上，研究了墙背水平土压力随填土高度与时间的变化规律，以及山区挡土墙土压力分布形式及大小，并与相关理论与研究结果进行了比较。研究结果可以为山区挡土墙的设计与施工提供依据和参考。

2 试验概况

2.1 工程背景

位于西部某高速公路 k32+570~690 段的填方路基上的挡土墙是紧靠山体建造起来的高 67 m 的填方路基，由于放坡限制，在山体外侧设计了 6 级挡土墙防护结构，其中，挡土墙基础挖至河床底的岩基上，最底层为高 10 m 的片石混凝土挡土墙，其上 5 级为浆砌块石重力式挡土墙（每级高 6.8 m，其中基础深 1.8 m），多级挡土墙总高 35m。在墙顶以上是 4 级放坡（每级高 8 m），如图 1 所示。该挡土墙于 2006 年 9 月上旬开始施工，2007 年 1 月中旬完成墙体的砌筑，2007 年 5 月底完成整个路基填方施工，共历时 9 个月。由于填方量巨大，所以料源有所变化，且填料中始终夹有一定含量的石块，为了研究需要，选取主要填料，剔除其中的石块，测得其基本参数（表 1）。

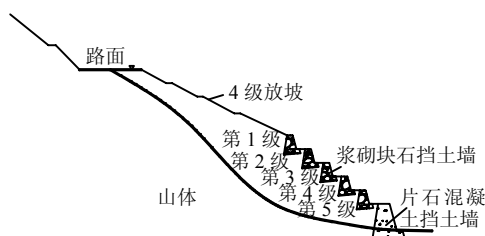


图 1 挡土墙剖面示意图

Fig.1 Section of retaining wall

表 1 填料物理力学性质指标
Table 1 Mechanical indexes of filling

土的类型	黏聚力 / kPa	内摩擦角 / (°)	最大干密度 / (g/cm ³)	最优含水率 / %
粉质黏土	47	31.5	2.00	9.3

2.2 试验与测量设计

以第 1~第 4 级挡土墙作为研究对象，分别在这 4 级挡土墙的墙背埋设了 4 层土压力计，每层 2 个，2 个土压力计相距 2 m。土压力计由下往上分别为第 1 层、第 2 层、第 3 层和第 4 层，第 1 层布置在挡土墙的最底下，即 6.8 m 的位置；第 2 层布置在墙体 5.0 m 的位置；第 3 层布置在墙体 3.5 m 的位置；第 4 层布置在墙体 2.5 m 的位置。土压力计布置及挡土墙尺寸如图 2 所示，其中，第 1 级挡土墙的第 1 层土压力计记为 L1-1 和 R1-1（L 表示左断面，R 表示右断面，1-1 中的前面 1 个数字表示挡土墙级数，后面表示土压力层数），第 2 层土压力计为 L1-2 和 R1-2，以此类推；第 2 级与第 3 级挡土墙以此类推。共计埋设土压力计 32 个。

本试验采用钢弦式土压力计，其精度为 0.1 kPa，最大量程为 1.5 MPa。墙背土压力测量的频率为：挡土墙施工期间为每天 1 次；挡土墙墙顶填方施工期间为每 5 d 1 次；整个路基施工完毕后，频率降至每半个月 1 次，半年后，减少至半年 1 次。试验从 2006 年 11 月开始到 2008 年 9 月结束，历时 25 个月。试验过程中得到为现场实测值是介于库伦主动土压力与库伦被动土压力之间的一种土压力值。

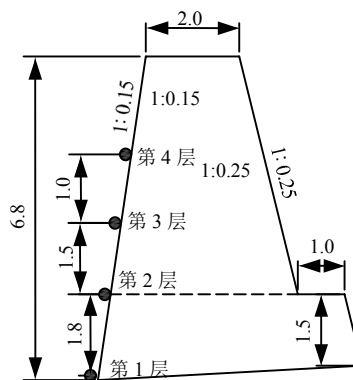


图 2 挡土墙墙背土压力计布置示意图 (单位: m)

Fig.2 Layout of earth pressure cells (unit: m)

3 试验分析

3.1 土压力随填土高度变化规律

挡土墙施工期间，对埋设于挡土墙墙背不同高度处的土压力计进行测量，得到施工期间不同高度处的土压力值。选择一些典型值，以填土高度为横坐标，墙背水平土压力值为纵坐标，建立不同高度处土压力与填土高度的关系曲线，如图 3 所示。

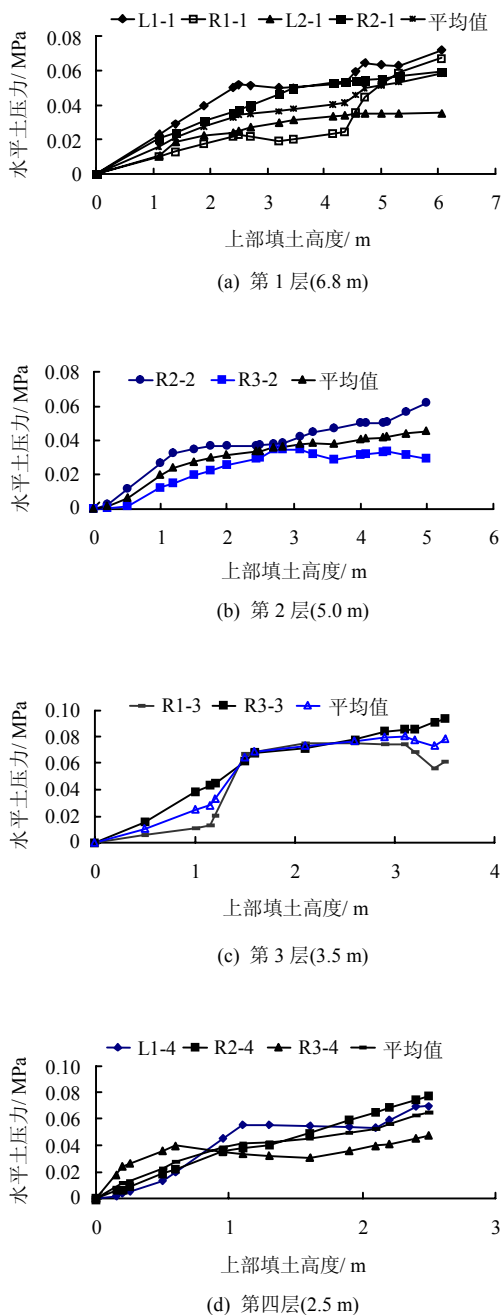


图 3 土压力值随上部填土高度的变化曲线
Fig.3 The change of horizontal earth pressure with depth of fill

从图 3 来看，填土高度对水平土压力有明显的影 响，土压力随填土高度变化的基本规律为：当填 料从土压力计位置开始往上填筑时，土压力迅速 增加，当填土达到一定高度后，土压力增长速度 放慢，甚至减少。

图 3(a)中虽然都是 6.8 m 处的水平土压力增长 曲线，但不同挡土墙不同断面的土压力并不相同， 有的相差还比较大，最大差值达到 36 kPa。从增长 曲线来看，不同高度段，土压力增长快慢不一样。 在 0~2.5 m 填土高度时，土压力呈线性快速增加；

在填土高度为 2.5~4.5 m 时，土压力增加速度明显 减缓；当填土高度超过 4.5 m 时，土压力增加速度 加快。这从土压力平均曲线可以更明显看到。分别 采用过原点的直线和抛物线（2 次多项式）对平均 曲线进行曲线拟合，可以得到相应的拟合公式：

$$\left. \begin{aligned} p &= 0.010 5h \quad (\text{相关系数 } R = 0.946 4) \\ p &= -0.000 9h^2 + 0.014 8h \quad (R = 0.983 9) \end{aligned} \right\} (1)$$

从相关程度而言，可以认为，两种拟合曲线均 能说明土压力随高度增加的变化规律。

图 3(b)为 5.0 m 处土压力曲线，其变化规律为： 开始阶段增加较快，之后逐渐减缓，曲线比较光滑。 同样采用直线和抛物线对平均曲线拟合，得到相应 的拟合公式：

$$\left. \begin{aligned} p &= 0.010 9h \quad (\text{相关系数 } R = 0.863 5) \\ p &= -0.002 1h^2 + 0.019 h \quad (R = 0.985 6) \end{aligned} \right\} (2)$$

从相关系数 (R) 看，拟合效果也比较好。

第 3 层土压力变化曲线和第 1 层的曲线基本相 似，开始时土压力增加较快，中间变慢，之后增加 加快（见图 3(c)），其平均曲线拟合公式分别为

$$\left. \begin{aligned} p &= 0.023 2h \quad (\text{相关系数 } R = 0.859 9) \\ p &= -0.008 9h^2 + 0.043 9h \quad (R = 0.978 5) \end{aligned} \right\} (3)$$

第 4 层中土压力变化与总体规律一致，开始增 加较为迅速，之后变为缓慢（见图 3(d)）。采用同 样的方法，可以得到拟合的直线和抛物线公式分别为

$$\left. \begin{aligned} p &= 0.026 0h \quad (\text{相关系数 } R = 0.894 7) \\ p &= -0.005 3h^2 + 0.042 1h \quad (R = 0.949 5) \end{aligned} \right\} (4)$$

从拟合的直线和抛物来看，不同高度处的水平 土压力随着填土高度增长而增加的快慢（曲线的斜 率绝对值）不一样：在挡土墙的底部（6.8 m 位置）， 增加的速率为 0.010 5h(直线)和 0.001 8h(抛物线)； 在墙高的 3/4 处（即 5.0 m 位置），增加的速率为 0.010 9h 和 0.004 2 h；在墙高的 1/2 处（即 3.5 m 位置）， 增加的速率为 0.026 0h 和 0.010 6h；在墙高的 1/3 处（2.5 m 位置），增加的速率为 0.023 2h 和 0.017 8h。由此可见，挡土墙墙后填土高度对不同深 度处的墙背水平土压力的影响并不一样，大体上具 有自上往下减小的趋势，即可以认为不同高度处水 平土压力系数不同，随着深度的增加，水平土压力 系数不断减小。将这些拟合的直线斜率分别折算成 土压力系数，第 1 层土压力系数为

$$K_1 = \frac{0.0105 \times 1000}{\gamma} = \frac{10.5}{\gamma_d(1 + \omega_{op})} = \frac{10.5}{20(1 + 0.093)} = 0.48 \quad (5)$$

同理，可以得到其他3层的土压力系数分别为 $K_2 = 0.50$ 、 $K_3 = 1.19$ 和 $K_4 = 1.06$ 。根据静止土压力理论静止土压力系数为 $0.5 \sim 0.7$ ；根据库仑土压力理论，计算得到主动土压力系数为 0.29 ，被动土压力系数为 2.64 （按照等效内摩擦角换算方法计算，黏聚力每增加 10 kPa ，内摩擦角提高 3° ）^[7]。于是可以得到：①施工期间挡土墙水平土压力实测值大于库仑主动土压力值，由墙底往上，实测值与库仑主动土压力差值愈来愈大，由墙底的 1.7 倍到墙身上部的 4.1 倍；②施工期间实测水平土压力介于静止土压力和被动土压力之间，在墙身的 $3/4$ 以下与静止土压力接近，在墙身的 $1/2$ 以上与垂直土压力接近。因此，在进行施工阶段挡土墙土压力计算时，可以采用如下计算方法：在 $3H/4$ 以下采用静止土压力计算，在 $H/2$ 以上采用垂直土压力计算，中间采用直线插值，写成数学表达式即为

$$\left. \begin{aligned} p &= \gamma h \dots 0 \leq x \leq \frac{H}{2} \\ p &= (3K_0 - 2)\gamma h + \frac{3(1 - K_0)}{2}\gamma H \\ \dots\dots\dots \frac{H}{2} < x < \frac{3H}{4} \\ p &= K_0\gamma h \dots \frac{3H}{4} \leq x \leq H \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中： h 为某点至墙顶的距离； H 为墙高； p 为水平土压力。

3.2 挡土墙土压力分布规律

记录第1~第3级挡土墙施工完毕后水平土压力值，得到挡土墙刚施工完毕时的土压力分布如图4所示。

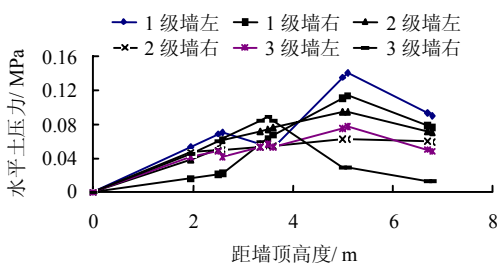


图4 刚施工完毕时挡土墙水平土压力分布曲线
Fig.4 Horizontal earth pressure curves of the retaining wall

由图4可知，不同挡土墙墙背水平土压力分布曲线基本相似，虽然图中2级墙右断面和3级墙右断面土压力分布曲线有些异常，但大体变化规律仍然是先增后减，这说明测量的数据具有较高的可信度。由于3个挡土墙土压力分布曲线形式基本相似，因此，在很大程度上平均曲线能代表所有曲线特点，平均曲线的土压力为非线性分布，近似为双直线，随着深度增加，土压力先增加后减少，如图5所示。

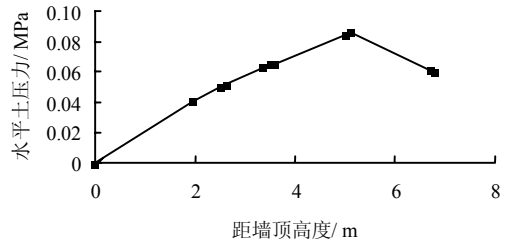


图5 平均水平土压力与深度的关系曲线
Fig.5 Average horizontal earth pressure curve

经过计算得知，平均曲线的土压力合力为 366 kPa ，合力作用点在距离墙顶 4.2 m 处，即 $0.38H$ 处。通过计算，有静止土压力大小为

$$P_0 = \frac{1}{2} K_0 \gamma H^2 = \frac{21.86}{2} \times (0.5 \sim 0.7) \times 6.8^2 = (253 \sim 354) \text{ kPa}$$

库仑主动土压力为

$$P_a = \frac{21.86}{2} \times 0.29 \times 6.8^2 = 147 \text{ kPa}$$

库仑被动土压力为

$$P_p = \frac{21.86}{2} \times 2.64 \times 6.8^2 = 1334 \text{ kPa}$$

垂直土压力为

$$P_v = \frac{21.86}{2} \times 6.8^2 = 505 \text{ kPa}$$

由此可见，实际土压力合力介于静止土压力合力和垂直土压力合力之间，更接近静止土压力合力，其大小约为库仑主动土压力的 2.5 倍，为库仑被动土压力的 0.3 倍。土压力合力的实际作用点在距离墙底约 $0.38H$ 处，这与其他的研究结果都较吻合^[8]。

3.3 土压力随时间的变化规律

图6为在整个填方路基施工完成后（多级挡土墙施工在2007年1月中旬完成，2007年5月底完成整个路基填方施工），4个挡土墙中几个代表性点的水平土压力随时间的变化曲线。

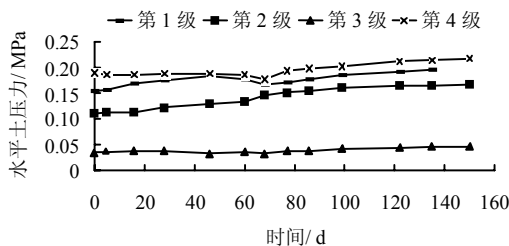


图 6 不同挡土墙土压力随时间的变化曲线

Fig.6 The curves of horizontal earth pressure of different retaining walls vs time

土压力计算时应考虑时间因素，但时间并不是影响土压力变化的根本原因，根本原因在于墙体变形、土体流变、固结、沉降等因素，这些因素和时间有关，因此，为了计算简便将这些因素统统归结为时间因素。不同施工过程、不同挡土墙形式、不同填料、不同挡土墙基础条件等对这些因素的影响并不相同，很难用一个公式来很好地表示时间对土压力的影响，对于不同的挡土墙种类，应区别对待和分析。

本次试验对象为山区多级挡土墙，其墙体变形、基础形式等具有自身的特点。从图 5 来看，挡土墙墙背水平土压力随着时间，总的变化趋势是不断增加，在 150 d 内，土压力增加了 15%~50% 不等，平均增加了约 30%。由此可见，土压力随时间的变化量不可小视。

从图 5 中所有曲线来看，土压力均经过一个减少到增加的过程（除第 2 级挡土墙变化不明显以外）。从路基施工完开始，土压力出现减小趋势，70 d 内减少了约 8%。70 d 后，土压力一直增加。土压力随时间波动的主要原因有两个：一是挡土墙的基础是修建在下级挡土墙墙顶，并非刚性约束，那么，在侧压力作用下发生整体向外移动，使得土压力不断减小；二是当位移达到一定值后，依靠自重，挡土墙足以抵抗侧压力，这时挡土墙保持不动，对填土向外位移产生限制，使得土压力增加。

显然，本试验研究的土压力为主动状态的土压力，得到的土压力随时间而增加的结论与文献[9]基本吻合，但是不完全一致，这就是山区多级挡土墙土压力变化的特点所在。那么文献[9]中给出的时间土压力计算公式，显然不能完全适合本文所研究的挡土墙土压力的变化。虽然本文对一段时间内土压力的变化做了研究，但由于监测时间有限，对其整个变化过程还并不了解。对于山区挡土墙，其土压力随时间变化的中间过程如何？是一直增加，还是先增后减到达静止土压力状态，即时间函数的表达

式如何？这还有赖于更长的观测工作。

4 结 论

(1) 不同深度的土压力随着上部填土高度增加而增长的速度不同，愈是接近墙顶，其增加越快。

(2) 施工期间实测水平土压力介于静止土压力和被动土压力之间，在墙身的 3/4 以下与静止土压力接近，在墙身的 1/2 以上与垂直土压力接近。

(3) 刚施工完后的挡土墙实际土压力为非线性分布，近似为双直线。随着深度增加，土压力先增加后减少。土压力合力介于静止土压合力和垂直土压合力之间，更接近静止土压合力，其大小约为库伦主动土压力的 2.5 倍，为库伦被动土压力的 0.3 倍。土压力合力的实际作用点在距离墙底约 0.38H 处。

(4) 土压力随着时间而变化，具有先减少后增加的规律。土压力随时间的变化量较大，平均可达到 30%，设计中应注意。

(5) 本文所研究的土压力是不同工况下挡土墙墙背土压力的实测值，它是主动状态下的土压力，并不是主动土压力，应用时应注意。

参 考 文 献

- [1] 朱合华. 地下建筑结构[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [2] TERZAGHI K. Record earth Pressure testing machine[J]. *Engineering News Record*, 1932, 109(29): 365—369.
- [3] TERZAGHI K. Large retaining wall tests. I -pressure of dry sand[J]. *Engineering News Record*, 1934, 112(1): 136—140.
- [4] TERZAGHI K. Large retaining wall tests. II -pressure of saturated sand[J]. *Engineering News Record*, 1934, 112(22): 259—262.
- [5] 陈页开. 挡土墙上土压力的试验研究与数值分析[博士学位论文 D]. 杭州: 浙江大学, 2001.
- [6] 顾慰慈. 挡土墙土压力计算[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2000.
- [7] 刘成宇. 土力学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2000.
- [8] 王元战, 王海龙, 张文忠, 等. 挡土墙土压力分布[J]. *中国港湾建设*, 2000, (4): 1—6.
- [9] 徐日庆. 考虑位移和时间的土压力计算方法[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2000, 34(4): 370—375.