

刚性挡土墙主动土压力的试验研究

周应英 任美龙*

(长沙交通学院水港与建筑工程系)

提 要

本文扼要地评述了这一课题国内外的研究情况,指出了关键问题在于至今还未弄清土压力的分布规律、大小及其影响因素。为此,对砂土填料在挡土墙平移情况下进行了土压力试验,以及对粘性土填料在挡土墙平移、绕墙底转动和绕墙顶转动情况下进行了土压力试验。通过试验,对土压力的非线性分布规律及其影响因素有了新的重要的认识,这将有助于发展新的挡土墙土压力理论。

一、前 言

刚性挡土墙土压力的研究是一个古典的课题。时至今日,依然继续研究这个问题,出于两个原因:其一是工程设计的需要。大量的挡土结构,要使用刚性挡土墙,即使新型挡土结构,例如加筋土挡墙设计中仍要部份借用古典土压力理论,因此,现实的需求是其根本原因之一。其二是,研究和发展的多年的土压力理论,至今还未能提供一个令人较为满意的理论^[1,2],因而这个课题的研究就未停止下来。国内诸多学者^[8-11]对此作了理论研究或试验研究;国外以美国 *Journal of the Geotechnical Engineering* 在80年代以来陆续刊载这个课题的研究成果为例而言^[12-15],都说明有必要继续研究这个问题。

土压力的研究,若以库仑(C.A. Coulomb)理论为起点,迄今已200多年,若仅以太沙基(K. Terzaghi)30年代大型模型试验为起点,至今也近60年之久。在这期间,国内外都作了大量的理论和试验研究,这里对此不拟作详细评述,仅扼要地指出以下几点:

1. 试验研究成果中存在的矛盾问题

影响土压力分布及大小的因素很多,不过一般都认为与墙的三种基本位移类型有关(即墙平移、绕墙底转动及绕墙顶转动),纵观各家试验成果就会发现,这些结果并不统一,例如颇具影响的Цагарели的试验报导^[16],由于墙三种基本位移在土体中所产生的破裂面几乎相同,所以其后只对墙平移时的破裂面及土压力进行测试。各种试验的代表性成果是,土压力为墙顶及墙底均为零的抛物线分布。而方(Y.S. Fang)的试验证实^[15],墙在三种位移时土压力分布形状及大小都不同,而平移时则是底部压力不为零的抛物线形分布。其实,在苏联国内对前者的评论也不一致^[17],类似的矛盾,就不一一列举。

2. 试验研究中的空白问题

到稿日期:1988年8月25日

* 作者现工作单位是广东省公路工程处

在刚性挡土墙土压力现场原型及室内模型试验中,所用的填料绝大多数是砂土。例如,英美刊物中经常引用的太沙基的试验结果就是以砂土作试验填料的,它的模型挡土墙高度超过2 m;Цагарели的试验也是用砂,墙板高达4 m,从高度来说,则已是足尺试验了。但是,对粘性土,国内外都有现场原型测试研究,唯独没有粘性土作填料的室内试验,特别是没有上面列举的大型室内试验。由于现场原型观测无法控制位移类型及位移量,因此测试结果只反映了该挡墙与填土、地基在特定条件下的土压力,因而至今还没有弄清粘性土做填料的刚性挡土墙在三种基本位移情况下土压力分布及大小的变化规律。

3. 理论与实际的差距问题

200多年以来,土压力理论很多,但是用试验研究资料来分析,问题则比较清晰而简单。例如,实际上土压力是非线性分布的,这样一来,不仅连库仑与W.J.M. Rankine这样两个线性分布的古典理论被否定了,而且对被称为“严密”理论的索科洛夫斯基(Соколовский)理论也不例外。若以土压力的分布与大小取决于墙位移的性质与大小来衡量,则目前建立在库仑理论假定的基础上,沿用Каган基本方法所发展的非线性分布理论^[5,6],都不能反映这个要求。至于Клейн的协调变形解^[17]和Clough用土的本构关系的非线性有限元分析法^[18],均未能达到设计的实用程度。像近期Handy这样颇有新见解的小主应力轨迹线土压力土拱理论^[19],也是建立在Цагарели试验所得的土压力抛物线型分布之上的,如果这个图式被推翻,他的理论也就随之倒了。

综上所述,刚性挡土墙土压力的研究,当务之急依然是彻底弄清楚土压力的变化规律。

二、试验概述

(一) 试验内容及设计

1. 砂土土压力试验

试验用土为砂土时,只作墙面为垂直而平移时的土压力测试,而不是简单地重复前人所作三种基本位移情况的试验。因为在众多的诸家试验成果中,对绕墙顶转动及绕墙底转动位移时土压力的结果比较接近,而对平移时的结果似乎争议较大,尤以对底部压力为零的抛物线分布图形怀疑者多。有的认为这是试验槽侧壁摩阻力所致,为此,设计了几组不同宽高比的挡板用以试验,如表1所示。

表1 砂土土压力试验分组表

试验分组	挡板宽度(m)	挡板高度(m)	宽高比	试验槽宽(m)	试验槽高(m)
1	0.5	1.0	0.5	0.5	1.0
	1.0	1.0	1.0	1.0	1.6
	1.5	1.0	1.5	1.5	1.0
	2.0	1.0	2.0	2.0	1.0
2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.6
	1.0	1.5	0.66	1.0	1.6

试验槽的规格见表1,其中相当于挡土墙的挡板为杂木制成,厚为5 cm,并用两肋加强,以满足刚度要求。

2. 粘性土土压力试验

试验用土为粘性土时试验分组如表2所示。

表2 粘性土土压力试验分组表

试验分组	墙位移型式	试验槽尺寸(m)	填土体尺寸(m)
1	绕墙顶转动	长×宽×高	长×宽×高
2	绕墙底转动	6×2×4.5	5.5×2×4.45
3	墙平移		

试槽为钢结构，挡土墙为钢筋混凝土结构，由面板和其后三个肋组成，板厚28cm，肋宽22cm，肋高44cm，保证了刚性要求。

(二) 测试元件及设置

用于量测土压力的测试元件是钢弦式压力盒与电阻应变式压力盒两种，其主要规格如表3、表4所示。

表3 钢弦式压力盒主要规格

型号	引振设计	外型尺寸(mm)	量程(kPa)
LXY-8	双膜双线圈	$\phi 80 \times 20$	0—49.05
LXY-8	双膜双线圈	$\phi 114 \times 35$	0—98.1

表4 电阻应变式压力盒主要规格

型号	应变片种类	接桥方式	外型尺寸(mm)	量程(kPa)
BW-0.3	箔式	全桥	$\phi 28 \times 5$	0—29.43
BY-4	箔式	全桥	$\phi 15 \times 3.5$	0—49.05

在量测砂土土压力的挡板中央安设两排压力盒，一排为钢弦式，另一排为电阻应变式，均为自上而下等距装设，各为10只。在量测粘性土土压力的挡土墙面上安设三排压力盒，每排中两种压力盒相间装设，在墙底部各压力盒相隔小，墙上部则间距增大。三排压力盒除了一排位于墙宽的中央外，其余两排置于墙侧，距边26cm，三排共装设钢弦式压力盒29只，电阻应变式压力盒30只。

(三) 试验用土

1. 砂土

参照国外同类试验，用砂多为材料试验标准砂。本试验采用洗净的长沙霞凝砂，同时考虑到为使重复试验的容重相同，试验时采用为松砂土，它的有关参数见表5。

表5 试验用砂的有关指标

指标	比重	容重 (kN/m^3)	内摩擦角	D_{10} (mm)	D_{30} (mm)	D_{60} (mm)
量值	2.69	12.56	34°	0.101	0.135	0.190

2. 粘性土

选用粘性土时有两点考虑：其一希望该土的粘聚力较低，因按Rankine理论，由于粘聚力大致使挡土墙背上部较大范围形成负压力区，实际上会形成较大范围内无压可测，这是本试验所不希望的；其二希望该土所含的粘土矿物蒙脱石成分低，以图降低试验过程中的蠕变影响。基于这两点，所采用的粘性土的有关指标见表6、表7。试验用土为松土，目的在于排除压实所致的残留应力影响以及便于重复试验。

表6 试验用的粘性土的有关指标

指 标	含水量 (%)	液 限 (%)	塑 性 (%)	容 重 (kN/m ³)	内摩擦角	粘 聚 力 (kPa)
量值	19.74	35.13(76克锥) 32.84(100克锥)	19.6	14.27	24°16'	1.472

表7 试验用的粘性土的有关指标

指标	全铁 (%)	游离铁 占全铁 (%)	蒙脱石 (%)	游离氧化物 (%)			液限 (%)	塑限 (%)	颗 粒 组 成 (%)				
				SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃			>0.1 (mm)	0.1—0.05 (mm)	0.05—0.005 (mm)	<0.005 (mm)	<0.002 (mm)
量值	17.16	36.71	6.72	0.57	1.20	6.30	39.2	20.9	30.19	25.7	15.2	28.9	25.7

表6为笔者的试验结果，其中抗剪强度指标系用直剪仪，控制含水量及容重，在低压下快剪试验所得。表7为委托给地质研究所试验的结果。该土与挡土墙背表面的外摩擦角为21°24'。它与墙面的粘结力为0.98kPa。

三、试验成果与分析讨论

(一) 填土体的表现现象

对于上述两类填土，当试验墙板位移之后，在填土表面出现一条平行墙板的裂缝，自裂缝至墙板，以原填土面的水平面为基准，以靠墙板处下沉最多，下陷了一形似三角形的楔形土块。对粘性填土，在裂缝处未观察到直立壁。从试槽侧壁看，对松砂土，自填土面裂缝处至墙板底显见一条规则曲线；对粘性土，则不如砂土破裂面那么分明。由于所得结果与前人的相近^[18]，故不赘述，不同之处，在下面涉及土压力时叙述。

(二) 砂土的土压力

墙平移不同的位移量时实测的水平压力如图1, 2所示。墙板高为1.0m，即填土深度为1.0m，在不同的墙板宽度时实测的水平压力如图3所示。上述土压力值均采用稳定后的量值。

由图1—3知，除了墙板宽高比为1时的压力分布曲线之外，与库仑土压力理论相比，一般在墙板上部大于库仑理论计算值，在下部却相反，而在底部压力更小，但不为零。

由图3可见，墙宽高比为2及1.5时的压力分布线是比较接近的，但与宽高比为0.5的差

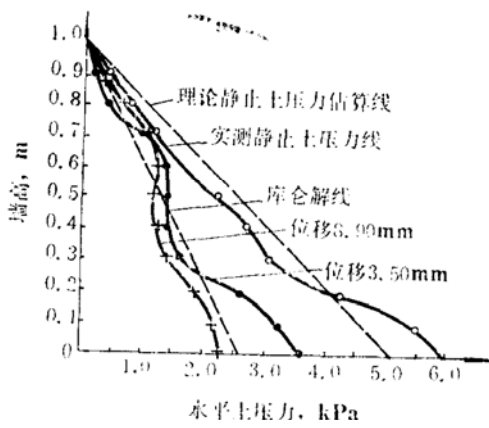


图1 实测水平土压力分布曲线 (墙高1m、墙宽1.0m)

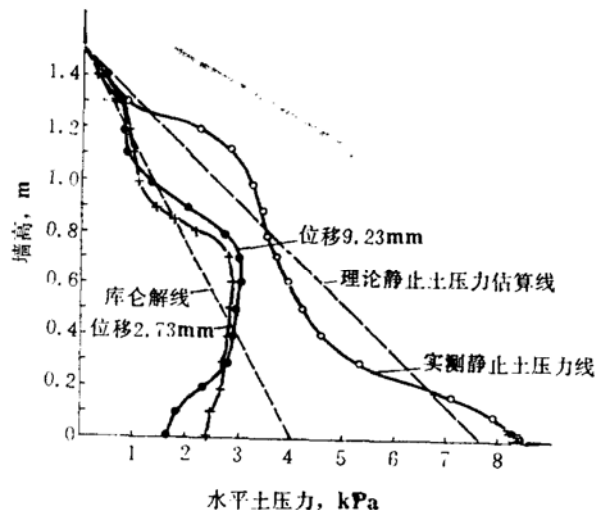


图2 实测水平土压力分布曲线 (墙高1.5m、墙宽1.0m)

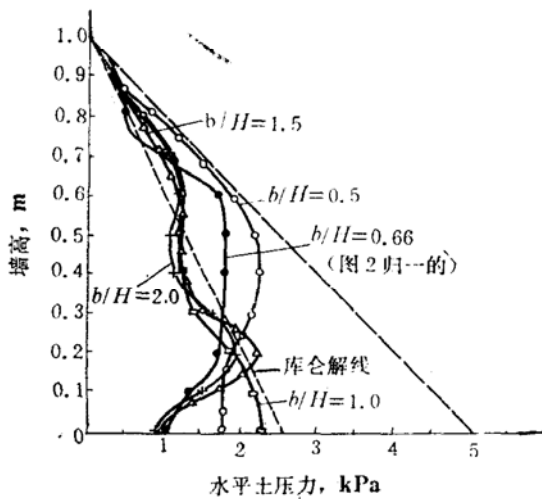


图3 不同墙板宽高比时实测水平土压力分布曲线

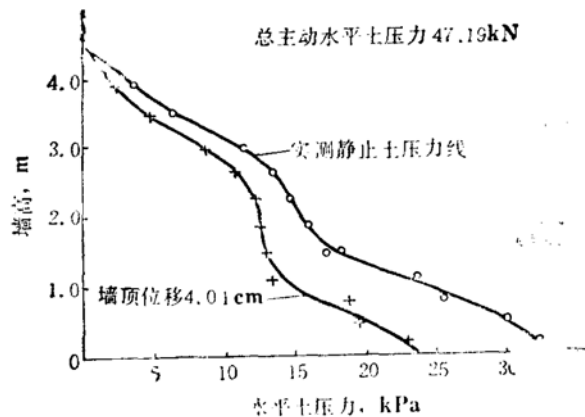


图4 绕墙底转动时实测水平土压力分布曲线

别则较为明显，这可以解释为因槽窄产生的侧壁摩擦影响，然而前者两根曲线也都表现了底部压力的减小，对本试验来说，很难相信这会是由于松砂传递的摩阻力所致。据此，Цагарели的试验压力图式还是基本可信的。然而我们的试验结果，总的来说，更接近Fang的试验结果^[15]。

根据试验发现，压力分布曲线的图形并非恒定的，在土进入主动状态之后，随着位移量的不同也还会有些变化。这点不仅是本试验结果如此，就是太沙基的几次平移试验，其总土压力作用点没有两次是相同的或很接近的(见文献[6]中表1)，足见土压力分布曲线图形是不同的。另外，由Fang试验结果的图11^[16]也可看出，在土进入主动状态之后，分布曲线图形随位移量而有变化。其实这种变化是必然的，因为任何一次新的墙板的位移，土的运动重复性是绝不可能做到绝对相同的。另外，土压力随时间也略有变化，本文采用稳定后的测值。

(三)粘性土的土压力

对粘性填土,使挡土墙绕底部转动之后实测的土压力结果如图4所示。使挡土墙绕顶转动之后实测的土压力,以及继而将墙顶平移使墙垂直之后实测的土压力如图5所示。使墙平移之后实测的土压力如图6所示。在一定的位移情况下,土压力随时间略有变化,图中资料采用稳定后的测值。挡土墙面上安设有三排压力盒,墙侧的两排,考虑受侧壁摩阻影响而不作为依据,采用中央一排的测值为成果,墙侧两排的资料作为辅助中央排测值分析校核之用。

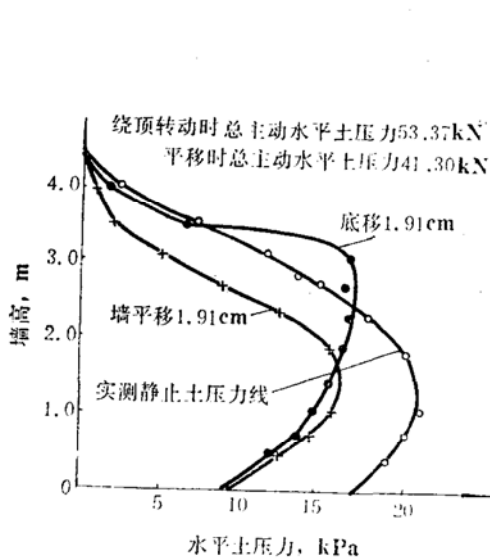


图5 绕墙顶转动及平移时实测水平土压力分布曲线

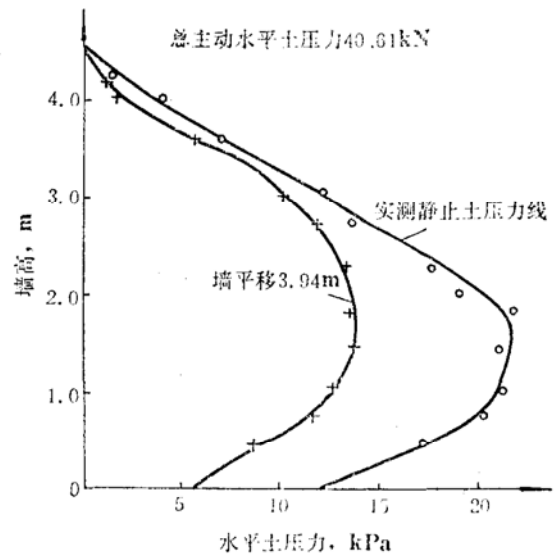


图6 墙平移时实测水平土压力分布曲线

从图5可见,当墙绕顶转动时,在墙上部所产生的土压力较大,它甚至大于实测静止土压力,在墙的下部则大大地降低。这与太沙基所述的基坑开挖支撑壁上的压力分布图很类似:当墙绕底转动时,土压力类似液体压力,大致接近三角形分布;当墙平移时,土压力类似前面用砂土所作的试验结果,与国内几个粘性填土刚性挡土墙原型测试的结果相近^[7-10]。不同之处在于本试验所得底部土压力不为零。因此,综合砂土和粘性土的室内试验与现场原型试验结果来看,侧壁摩阻力不是产生挡土墙底部土压力变小的原因。

对三种不同位移性质的总水平土压力大小的比较可知,墙平移时的总水平土压力最小,绕墙顶及绕墙底转动时较大,而以绕墙顶时为最大。由于试验次数少,因此这还不能说是最后结论。不过,第二组试验是将墙绕顶转动后测土压力,之后又将墙顶平移使墙竖直,这相当于平移情况,此时土压力已大大改变了,上部土压力由大变小,下部土压力由小变大,总水平土压力也降低了。由此说明前三者的比较是可信的。由于第二组中的“平移情况”与第三组直接平移情况所得结果相当接近,这也说明试验有效。

以墙平移的情况而言,实测总水平土压力为40.61kN,而按考虑了滑动面上粘聚力及与墙作用的粘结力的楔体试算法计算的总水平土压力为38.75kN,两者很接近,这点对发展土压力理论是有参考价值的。

本试验的三种不同性质位移所产生的土体破裂面位置很接近(破裂面与墙背面的夹角约为 33.5°)。但三种情况土压力的大小及分布的偏差较大,这与Цагарели的试验报导有相同之处也有不同之处。相同的是三种情况下的破裂面很接近;不同之处是,他认为因此只需作

平移情况试验即可代表三种情况，本试验结果表明这个结论是不对的。由于绕墙顶和绕墙底情况的总土压力都较大，因此可以相信滑动楔体的两个滑动面上没有发挥同样大的土的强度，而平移情况则沿滑动面上都发挥了同等的、较大的土的强度。据此可以认为，目前一些建立在库仑理论假设基础上的在滑裂体中取薄条微元体建立力的平衡微分方程以求土压力的非线性分布解，大致反映了墙平移时主动土压力的情况。

因本试验只对位移因素作了研究，其他因素，例如土的含水量、容重，强度参数，墙的位移速率，粘土矿物成分、含量与流变性，压实功能等等因素的变化对土压力的影响尚未涉及，特别是试验挡土墙高达4.5m，可谓足尺试验，但宽度仅2.0m，这不能完全代表长挡土墙受力的平面应变问题。因此，它与现场原型试验研究，只能是互为补充。

另外本试验两个粘性土的静止土压力不是随深度逐渐增加，而是至底部降低，这与土压力传统的概念相矛盾，但按Handy的意见，认为墙不动，而土的相对下沉也会导致进入主动状态，因此，本试验所得的结果可能已不是静止土压力了，这个问题尚待今后进一步研究。

四、结 论

1. 刚性挡土墙主动土压力的分布形式，无论是砂土还是粘性土作为填料，都具有共同的规律：墙绕顶转动时是上部土压力大而下部小的抛物线性；墙绕底转动时是近似为三角形分布；墙平移时是一重心偏下的抛物线形，但底部土压力不为零。

2. 由墙三种基本位移类型所产生的土压力，不仅分布形式有差别，而且在总土压力的量值上也不等，其中以墙平移时总土压力相对最小。

3. 墙平移时产生底部压力变小，这不是由于侧壁摩阻力所致，这可用土拱理论加以解释。

参 考 文 献

- [1] 周应英，刚性挡土墙土压力的研究，长沙交通学院学报，1988年第1期，pp. 48—56。
- [2] 周应英，桥用刚性挡土墙的土压力模型试验研究，国外公路，1987年第3期，pp. 14—18。
- [3] 茅以升，挡土墙土压力的两个经典理论中的基本问题，土木工程学报，1954年第3期，pp. 249—282。
- [4] 黄文熙，挡土墙土压力之研究，《水工建设中的结构力学与岩土力学问题》，水利电力出版社，1984年，pp. 219—237。
- [5] 范宝华，挡土墙土压力非线性分布解题的讨论，中国土木工程学会第三届土力学及基础工程学术会议论文选集，中国建筑工业出版社，1981年，pp. 399—405。
- [6] 蒋蕊秋，挡土墙土压力非线性分布解，土木工程学报，1964年第1期，pp. 56—65。
- [7] 赵恒惠，挡土墙后粘性填土的土压力计算，岩土工程学报，1983年第1期，p. 134。
- [8] 冯德章，粘性回填土挡土墙土压力测试成果讨论，中国土木工程学会第三届土力学及基础工程学术会议论文选集，中国建筑工业出版社，1981年，pp. 413—417。
- [9] 姚代禄，挡土墙土压力非线性分布的研究，重庆交通学院学报，1984年第3期，pp. 40—47。
- [10] 王谓章，粘性土对挡墙侧压力的非线性分布，中南公路工程，1986年第2期，pp. 28—45。
- [11] 顾慰慈等，挡土墙背填土中滑裂体形状的试验研究，岩土工程学报，1988年第2期，pp. 49—56。
- [12] Sherif, M. A., et al, Earth Pressure Against Rigid Retaining Wall, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 108, No. GT5, 1982, pp. 679—695.

- [13] Sherif, M. A., et al, K_A and K_0 behind Rotating and Non-yield Wall, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 110, No. 1, 1984, pp. 41—56.
- [14] Bang, S., Active Earth Pressure behind Retaining Walls, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 111, No. 3, 1985, pp. 407—412.
- [15] Fang, Y. S., et al, Static Earth Pressure with Wall Movements, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 112, No. 3, 1986, pp.317—333.
- [16] Царепели, З. В., Экспериментальное исследование давления сыпучей на подпорные стены с вертикальной заднем, Основания фундаменты и механика грунтов, 1965, No. 4, pp. 1—3.
- [17] Г. К. 克列因, 散粒体结构力学, 陈万佳译, 第二版, 中国铁道出版社, 1983年, pp. 225—234, pp. 235—248.
- [18] Clough. G. W., Duncan, J. M., Finit Element Analyses of Retaining Wall Behavior, Journal of the Soil Mechanics and Foundation, ASCE, Vol. 97, No. SM12, 1971, pp. 1657—1673.
- [19] Handy, R. L., The Arch in Soil Arching, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 111, No. 3, 1985, pp. 302—318.
- [20] Bransby, P. L., Smith, A. A., Side Friction in Model Retaining Wall, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 101, GT. 7, 1975, pp. 616—631.

An Experimental Study on Active Earth Pressure behind Rigid Retaining Wall

Zhou Yingying Ren Meilong

(Changsha Communications Institute)

Abstract

In this paper some of the existing theories and experimental investigation at home and abroad are briefly reviewed. It is pointed out that the knowledge of magnitude and distribution of earth pressure against retaining wall is not yet complete. Therefore, some experiment are made on the sand backfilled behind a translating rigid wall, and on cohesive soil for three different wall movement modes: (1) rotation about base; (2) rotation about top; (3) translation. Important results are obtained for the distribution and magnitude of the active earth pressures.