

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2019.07.006

路基悬锚式挡土墙墙背土压力分布

夏全平^{1,2}, 高江平¹, 陈鲁川³, 王爱涛³

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 山东省交通运输厅公路局, 山东 济南 250002;
3. 齐鲁交通发展集团有限公司, 山东 济南 250000)

摘要: 路基悬锚式挡土墙是一种新型的挡土墙, 其墙背土压力分布与常规挡土墙墙背土压力分布规律不同, 不能套用现有的公式进行计算。根据其受力特点, 结合项目研究的需要和依托工程的实际情况, 确定了以墙高 8, 9, 10 m 这 3 种工况对路基悬锚式挡土墙的墙背受力情况及土压力分布情况进行现场试验和跟踪检测。通过实体工程的实测数据及其结构特点对悬锚式挡土墙的墙背土压力进行了分析, 并与墙后土压力设计值及修正后的公式计算值进行了对比。结果表明: 路基悬锚式挡土墙各测试点的墙背土压力随时间逐渐增大并趋于稳定, 沿墙高呈 3 段式非线性分布; 墙背土压力近似分布图形可以参照现有锚定板挡土墙的计算方法得出, 但需进行修正, 土压力系数宜取 1.2 ~ 1.4; 为提高挡土墙墙背的受力均匀性及挡墙的整体稳定性, 第 1 层锚杆高度与底板的距离宜为挡墙建筑高度的 1/3 且距底板不宜大于 2.5 m, 各锚杆层间高差宜为 2.5 ~ 3 m; 墙背最上层锚杆位置由于受土压力较小, 因此最上层锚杆布设高度宜为距墙顶 1/3 高处, 且适宜高度为 2 ~ 3 m; 悬锚式挡土墙的双层锚杆与锚定板型式建筑高度宜为 6 ~ 10 m, 3 层锚杆与锚定板型式建筑高度宜为 10 ~ 12 m。

关键词: 道路工程; 悬锚式挡土墙; 对比分析; 土压力; 实测数据

中图分类号: U417.1⁺1; U213.1⁺52.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2019) 07-0047-06

Distribution of Soil Pressure on Back of Suspension Anchor Retaining Wall

XIA Quan-ping^{1,2}, GAO Jiang-ping¹, CHEN Lu-chuan³, WANG Ai-tao³

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an Shaanxi 710064, China;
2. Highway Bureau of Shandong Transport Department, Jinan Shandong 250002, China;
3. Qilu Transportation Development Group Co., Ltd., Jinan Shandong 250000, China)

Abstract: Suspension anchor retaining wall is a new type of retaining wall. Due to the distribution of soil pressure on the back of the wall is different from that on the conventional retaining wall, the existing formula cannot be used to calculate it. According to its force characteristics, combining with the needs of the project research and the actual situation of the support project, determining the working conditions of the wall height as 8, 9, 10 m, the field test and the tracking test on the stress and the distribution of soil pressure on the back of suspended anchor retaining wall of subgrade are carried out. The soil pressure on the back of the suspended anchor retaining wall is analyzed by the measured data and the structural characteristics of practical project, which is compared with the design value and the value calculated by the improved formula. The result shows that (1) the soil pressure of the measuring points on the back of suspended anchor retaining wall of subgrade gradually increases with time and tends to stability, it shows 3-stage nonlinear distribution along the wall height; (2) the approximate distribution figure of the soil pressure on the wall back can be obtained referring to the calculation method of existing anchor plate retaining wall, but it must be modified,

收稿日期: 2018-02-07

基金项目: 山东省交通科技计划项目 (2016B20)

作者简介: 夏全平 (1988-), 男, 山东潍坊人, 博士研究生. (489522471@qq.com)

and the soil pressure coefficient should be 1.2 – 1.4; (3) to improve the force uniformity of the back of the retaining wall and the overall stability of the retaining wall, the distance between the height of the first layer anchor and the bottom slab should be 1/3 height of the retaining wall and should not be more than 2.5 m in the distance from the bottom slab, and the height difference between each anchor rod layer is 2.5 – 3 m; (4) because the soil pressure on the anchor rod at the top of wall back is small, so the height of the top anchor rod should be set as the 1/3H to the wall top, and the suitable height should be 2 – 3 m; (5) the heights of double-layer anchor rod and anchored plate type building of the retaining wall should be 6 – 10 m, and the height of 3-layer anchor rod and anchored plate type building should be 10 – 12 m.

Key words: road engineering; suspended anchor retaining wall; comparative analysis; soil pressure; measured data

0 引言

路基悬锚式挡土墙是一种新型的支挡结构（见图 1），该挡土墙可以视为是利用锚定板式挡土墙与悬臂式挡组合成的一种新型支挡结构，由立壁、底板、拉杆和锚定板组成^[1]，其结构轻薄、圬工量少，对地基承载力要求低，具有广阔的应用前景。

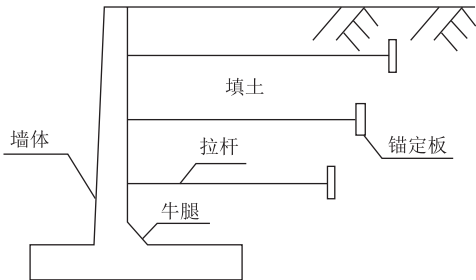


图 1 路基悬锚式挡土墙示意图

Fig. 1 Schematic diagram of suspended anchor retaining wall

长安大学的陈忠达、高江平对路基悬锚式挡土墙的结构进行了设计与分析，并进行了有限元的模拟分析^[2]。杜松^[3]、许振涛、刘洋分别对路基悬锚式挡土墙的稳定性和优化设计以及施工技术进行了研究。

本研究从实践出发，根据某高速公路路基填方段路基悬锚式挡土墙实体工程的现场实测数据，通过对墙背实测土压力进行分析，研究该新型挡土墙的墙背土压力分布规律^[4]，对其墙背土压应力的分布图形及计算公式进行修正。

1 工程简介

延志吴（延安经志丹到吴起）高速公路的 K17 + 715 ~ K17 + 880 路段沿道路上行线右侧，沿河谷分布，长度为 165 m。本测试段根据依托工程的实际情况和项目研究的需要，选取墙高 8，10，9 m 的挡土墙共 3 个工况（依次对应的代号为 I，II，III）

布设相应的土压力传感器，对悬锚式挡土墙的受力情况进行测试。

本次测试采用的土压力传感器分别位于 K17 + 755 ~ K17 + 765，K17 + 835 ~ K17 + 845，K17 + 835 ~ K17 + 845，分别按照墙高和间距在墙身和锚定板上共布设 42 个土压力计来检测其墙背土压力值，其中墙身布设土压力计 24 个。

2 实测数据分析

悬锚式挡土墙的墙背填筑施工于 2013 年 4 月底施工结束，8 月初开始进行路面施工，并于 12 月 20 日正式通车，在施工完成后开始进行持续监测。

工况 I 墙高 8 m，土压力传感器分别布设于距基底 1.25，2，3，4，5，6，7 m 处；工况 II 墙高 10 m，土压力传感器分别布设于距基底 1.2，2，3，4，5，6，7，9 m；工况 III 墙高 9 m，土压力传感器分别布设于距基底 1.25，2，3，4，5，6，7，8 m 处（表 1）。施工完成后定期进行数据采集，以观察其土压力变化。

各工况在填筑完成后开始进行检测，不同布设高度的压力盒测得的土压应力值均随时间的增长而增大，在前 5 个月增长速度较快，而后增速放缓直至趋于稳定。土压应力沿墙高呈非线性分布。

表 1 各工况锚杆高度（单位：m）
Tab. 1 Height of anchor rod in each working condition (unit: m)

工况	第 1 层	第 2 层	第 3 层
I	2.95	5.15	7.15
II	3.65	6.55	9.15
III	3.25	5.75	8.15

2.1 工况 I 墙后土压力分布规律

如图 2(a) 所示，在工况 I 中，墙高 3，5.15，7.15 m 处一定范围墙后土压应力均比相邻高度处的土压应力大，说明墙背既受到了来自上方土体的侧

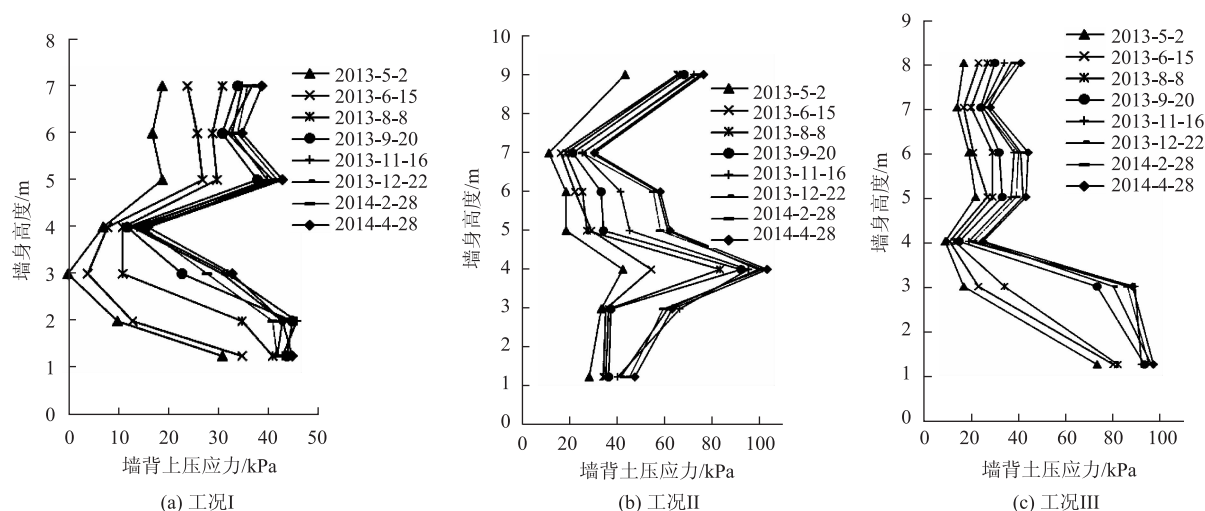


图2 各工况墙背实测土压应力分布图

Fig. 2 Distribution of measured soil pressure on back of wall in each condition

向压应力, 还受到了来自锚杆和锚定板的抗拔应力^[5]。墙高 3 m 处墙后土压应力低于其高度以下位置, 主要由于墙高 1.25 m 处与第 1 层锚杆高差为 1.7 m, 该范围受第 1 层锚杆和锚定板的抗拔应力影响较大, 且随着路基后期的沉降及墙后土体的侧向应力增加, 导致该处墙后土压应力较大^[6]。

2.2 工况 II 墙后土压力分布规律

如图 2 (b) 所示, 在工况 II 中, 墙高 3.65, 6.55, 9.15 m 为锚杆的布置位置。在墙高 3.65 m 区域, 压力盒的测试值较其他高度位置大, 说明该处的锚杆和锚定板已在该区域发挥较大作用。该处高度较低, 路基土体的沉降产生的侧向压力也发挥了一定作用。在墙高 5 ~ 8 m 区域实测土压应力值较小, 墙高 6.55 m 处的实测土压应力值也比其他两位置小, 说明该处的锚杆和锚定板的抗拔应力较小, 加上上层的路基土体在锚杆抗拔应力的作用下沉降减少, 使得该处侧向土压应力较小。在墙高 9.15 m 区域, 压力盒在后期的几次测试中数据趋于稳定且受力较大, 由于该处填土高度较小, 故其压应力主要来源于锚杆和锚定板的抗拔应力。墙身与底板连接范围内墙后土压应力迅速减小是由于下层锚杆和锚定板与墙身和底板连接处高差为 2.4 m, 锚杆和锚定板对墙背产生的抗拔力对该部位影响较小, 加上墙背与底座的连接为刚性连接, 限制了墙体对路基的压力, 导致墙身与底板连接范围墙背土压力迅速减小。

2.3 工况 III 墙后土压力分布规律

如图 2 (c) 所示, 在工况 III 中, 墙高 1.25 m 及 3 m 区域处实测土压应力值较工况 I 和工况 II 大, 主

要由于先对工况 I 和工况 II 墙背进行回填后, 导致工况 III 的墙背回填面积过小。为了保证压实度, 在第 1 层锚杆布置后的压实过程中, 对距墙背较远处路基也进行了碾压, 因此导致该处的压实效果比工况 I、工况 II 人工压实的效果好, 但后期墙高 1.25 m 土压力增长量较小并逐渐趋于稳定。另外, 墙高 1.25 m 处与第 1 层锚杆的距离为 2.0 m, 受锚杆和锚定板抗拔力影响较大。在墙高 3 m 区域实测土压应力值较大, 说明该处的锚杆和锚定板产生较大的抗拔力, 使墙背土体产生塑性变形。墙高 5.75 m 和 8.15 m 区域实测土压应力值大小相近且高于临近区域, 说明该处的锚杆和锚定板已在该区域发挥作用。

综上分析, 工况 I, II, III 墙背压力盒的测试数据呈现一定的规律性: 各工况的墙后土压应力对应锚杆位置呈 3 段式分布, 锚定板对墙背位移起着限制作用, 实测土压应力值随时间逐渐增大并趋于稳定, 但各布设点的增大情况却不一样, 这是墙身、锚杆与锚定板综合作用的结果。各工况在进行最上层锚杆的路基回填时, 由于最上层锚杆和锚定板接近路基顶部, 为保证压实度, 故决定采用水泥碎石混合料进行锚杆部位的回填, 导致最上层路基在锚杆拉拔应力作用下塑性变形较小, 从而导致最上层墙背压力盒在填筑高度较小的情况下测试数据较大。

工况 I、工况 III 的墙身与底座连接处与第 1 层锚杆高差较小 (表 2), 加上悬锚式挡土墙的墙背与底座的连接为刚性连接, 使挡墙墙面位移受到较大的约束^[7-10], 因而底座区域墙背土压力偏大。

表2 各层锚杆高差 (单位: m)

Tab. 2 Height difference of anchor in each layer (unit: m)

高差	工况 I	工况 II	工况 III
牛腿与第1层锚杆	1.7	2.4	2
第1层与第2层锚杆	2.2	2.9	2.5
第2层与第3层锚杆	2	2.6	2.4

通过对表2的分析,结合陈伟的有限元分析及锚板挡土墙的布设经验,为提高挡土墙墙背的受力均匀性及挡墙的整体稳定性,第1层锚杆高度与底板的距离宜为挡墙建筑高度的1/3且距离底板不宜大于2.5 m,各锚杆层间高差宜为2.5~3 m。墙背最上层锚杆位置由于受土压力较小,因此最上层锚杆布设高度宜为距墙顶3 m。

3 实测墙背土压力与设计土压力对比分析

本研究中的路基悬锚式挡土墙的墙后填土为粉质黏土,黏聚力不为0^[11],而库伦理论把填土视为无黏性土,黏聚力为0^[12],这与工程实际不相符。为保证墙体安全可靠,在结构设计和内部稳定性分析时^[13],墙背土压力近似按朗金主动土压力理论计算^[14]。另外,在目前的工程实践中,当墙背填料为黏性土时,通常采用等效内摩擦角法来计算挡土墙土压力^[15]。

本研究采用的黏性土等效内摩擦角 φ_D 的确定方法根据土的抗剪强度相等的原理计算^[16]:

$$\varphi_D = \tan^{-1}[\tan \varphi + C/\gamma H]^{[3]}, \quad (1)$$

式中, γ 为填土的重度; H 为挡土墙计算高度; φ 为内摩擦角; C 为黏聚力。

在本工程的施工中,墙背路基填土为当地黄土掺加3%剂量的石灰,对填土的各项参数进行现场实测,如表3所示。

表3 基本参数

Tab. 3 Basic parameters

最佳含水率/%	最大干重度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	内摩擦角/($^\circ$)	黏聚力/kPa
13.59	18.081	30.5	60

通过计算得出工况I, II, III的综合内摩擦角、朗金主动土压应力系数 K_a ,如表4所示。

表4 计算参数

Tab. 4 Calculation parameters

参数	工况 I	工况 II	工况 III
综合内摩擦角/($^\circ$)	45.12	42.65	43.76
K_a	0.171	0.192	0.182

长安大学陈忠达对路基悬锚式挡土墙的土压力计算进行了深入研究,并对计算公式进行了修正,修正后的墙背土压力 E_a 的计算公式为:

$$E_a = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_a \eta, \quad (2)$$

式中, γ 为填土的重度; H 为挡土墙计算高度; η 为土压力扩大系数,其值为1.05~1.4。

计算点土压应力 p 的计算公式为:

$$p = \gamma h K_a \eta, \quad (3)$$

式中 h 为挡土墙计算截面的高度。

当墙顶填土表面水平时,朗金主动土压力系数 K_a 为:

$$K_a = \tan^2(45^\circ - \varphi/2)^{[17]}, \quad (4)$$

式中 φ 为填土的内摩擦角。

路基填料对墙背的土压力分布图形为抛物线图形^[18],《公路挡土墙设计与施工技术细则》认为作用于锚板挡土墙挡土板或墙面板上的土压力分布图形在墙高上部0.5H范围内为三角形分布,下部0.5H范围为矩形分布(图3)^[18],其土压应力为:

$$\sigma_H = 1.33 E_a m / H^{[4]}, \quad (5)$$

式中, E_a 为墙背土压力; H 为挡土墙计算高度; m 为土压力增大系数, $m=1.20 \sim 1.40$ 。

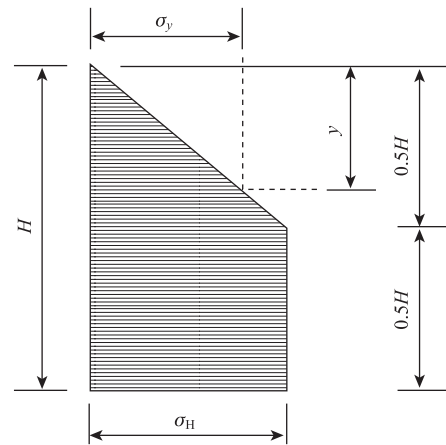


图3 墙背土压力分布

Fig. 3 Distribution of soil pressure on back of wall

选取代表性月份的墙背实测土压应力值、设计计算土压力值、修正前公式计算值、修正后计算值进行对比,如图4所示。

各工况的计算土压应力值明显小于对应的实测土压应力值,故该计算公式虽能反映墙背土压应力的受力形态,但不能反映悬锚式挡土墙的实际受力大小,为保证挡墙结构的整体安全性,应对该公式加以调整后计算。

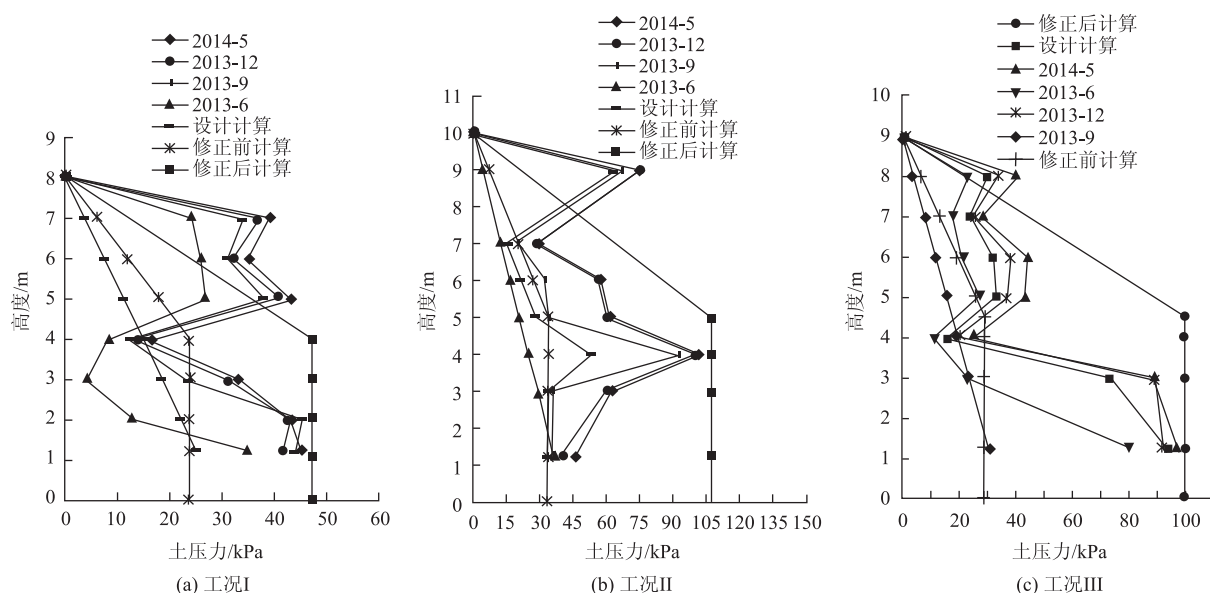


图4 墙背土压力对比

Fig. 4 Contrast of soil pressure on back of wall

陈忠达对悬锚式挡土墙的墙后土压应力进行了有限元分析,陈伟对本实体工程进行了全面的有限元分析,其墙后土压应力分析结果与实测结果接近。差异之处如前文所述,最上层采用水泥碎石混合料进行锚杆部位的回填,导致最上层路基在锚杆拉拔应力作用下塑性变形较小,从而导致最上层墙背压力盒在填筑高度较小的情况下测试数据较大。而正常情况下最上层锚杆区域挡土墙所受侧向应力较小,其锚杆和锚锭板的抗拔力较第1层、第2层要小。

根据各工况的现场状况,结合各工况实测数据以及陈忠达、陈伟等人的有限元分析得出,下层锚杆和锚锭板所处位置墙后土压应力最大,下层锚杆靠近底部时,拉杆的拉力明显增加。根据锚锭板的抗拔力和拉杆拉力及立壁弯矩,结合锚锭板挡土墙的布置经验,可将下层拉杆布置在挡墙的 $1/3H$ 处。

利用式(5)计算出的土压应力值小于实测压应力值,因此需对其计算公式进行修正,修正后的公式为:

$$\sigma_H = \frac{1.33\eta E_a}{H/3} \quad (6)$$

4 结论

(1) 路基悬锚式挡土墙各测试点的墙背土压力随时间逐渐增大并趋于稳定,沿墙高呈3段式非线性增长的趋势。

(2) 工况II的墙背土压力实测结果符合前述科研人员的理论分析。工况I、工况III的墙背土压力

则由于3层锚杆分布相对密集,各层锚杆的抗拔力对墙背作用互相影响,未能完全体现相应的分布规律。

(3) 为提高挡土墙墙背的受力均匀性及挡墙的整体稳定性,第1层锚杆高度与底板的距离宜为挡墙建筑高度的 $1/3$ 且距离底板不宜大于 2.5 m ,各锚杆层间高差宜为 $2.5 \sim 3\text{ m}$;墙背最上层锚杆位置由于受土压力较小,因此最上层锚杆布置高度宜距墙顶 $1/3H$,且宜为 $2 \sim 3\text{ m}$ 。

(4) 墙后水平土压力近似分布图形可以参照现有锚锭板挡土墙的计算方法,土压力系数宜取 $1.2 \sim 1.4$,公式需修正。

(5) 悬锚式挡土墙的最大建筑高度较悬臂式挡土墙大,而且其整体受力分布更加合理。建议双层锚杆与锚锭板建筑高度为 $6 \sim 10\text{ m}$;3层锚杆与锚锭板建筑高度为 $10 \sim 12\text{ m}$ 。

参考文献:

References:

- [1] 陈忠达,王东升,高江平,等.悬锚式挡土墙结构设计与分析[J].长安大学学报:自然科学版,2005,25(6):1-5.
CHEN Zhong-da, WANG Dong-sheng, GAO Jiang-ping, et al. Structural Design and Calculation of Suspended-anchor Earth Retaining Wall [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005, 25(6): 1-5.
- [2] 陈忠达,王东升.悬锚式挡土墙有限元分析[J].公

- 路交通科技, 2005, 22 (1): 38-41.
- CHEN Zhong-da, WANG Dong-sheng. The Finite Element Analysis of Suspended-anchor Earth Retaining Wall [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22 (1): 38-41.
- [3] 杜松. 路基悬锚式挡土墙设计与稳定性分析 [D]. 西安: 长安大学, 2011.
- DU Song. Design and Stability Analysis of Subgrade Cantilever-anchor Retaining Wall [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.
- [4] 陈忠达. 公路挡土墙设计 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1999.
- CHEN Zhong-da. Design of Highway Earth Retaining Wall [M]. Beijing: China Communications Press, 1999.
- [5] 杨广庆, 蔡英. 多级台阶式加筋土挡土墙试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2000, 22 (2): 254-257.
- YANG Guang-qing, CAI Ying. Study on the Multi-steps Reinforced Earth Retaining Wall [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22 (2): 254-257.
- [6] 张文涛. 肖家岗高边坡预应力锚索桩基托梁挡土墙设计 [J]. 山西建筑, 2011, 37 (35): 66-67.
- ZHANG Wen-tao. Design of the Supporting Structure of Pre-stressed Anchoring Cables Pile Foundation-trimmer Beam-retaining Wall for Xiaojiagang High Slope [J]. Shanxi Architecture, 2011, 37 (35): 66-67.
- [7] 吴明, 彭建兵, 徐平, 等. 考虑土拱效应的挡墙后土压力研究 [J]. 工程力学, 2011, 28 (11): 89-95.
- WU Ming, PENG Jian-bing, XU Ping, et al. Study on Earth Pressure against Rigid Retaining Walls Considering Soil Arching Effects [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28 (11): 89-95.
- [8] 张永兴, 陈琳. 挡土墙非极限状态主动土压力分布 [J]. 土木工程学报, 2011, 44 (4): 112-118.
- ZHANG Yong-xing, CHEN Lin. Active Earth Pressure on Retaining Walls in Non-limit State [J]. China Civil engineering Journal, 2011, 44 (4): 112-118.
- [9] 邓子胜, 邹银生, 王贻荪. 考虑位移非线性影响的挡土墙土压力计算模型研究 [J]. 中国公路学报, 2004, 17 (2): 24-27.
- DENG Zi-sheng, ZOU Yin-sheng, WANG Yi-sun. Study of Calculation Model of the Earth Pressure for Retaining Wall Considering the Nonlinear Influence of the Displacement [J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17 (2): 24-27.
- [10] QIU Y J, JIANG X, LUO Q, et al. Differential Deformation of Subgrade and Its Influence on Pavement Structures in Highway Widening Projects [C] // Proceedings of the Sixteenth Southeast Asian Geotechnical Conference (16 SEAGC). [S.l.]: Southeast Asian Geotechnical Society, 2007: 361-366.
- [11] BILGINÖ. Numerical Studies of Anchored Sheet Pile Wall Behavior Constructed in Cut and Fill Conditions [J]. Computers and Geotechnics, 2010, 37 (3): 399-407.
- [12] EL SAWWAF M, NAZIR A. The Effect of Soil Reinforcement on Pullout Resistance of an Existing Vertical Anchor Plate in Sand [J]. Computers and Geotechnics, 2006, 33 (3): 167-176.
- [13] 梁波, 王家东, 葛建军. 青藏铁路 L 型挡土墙土压力的试验与分析 [J]. 冰川冻土, 2004, 26 (增 1): 241-247.
- LIANG Bo, WANG Jia-dong, GE Jian-jun, et al. Testing and Analysis of Earth pressure about L-type Retaining Wall in Qinghai-Tibet Railway [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26 (S1): 241-247.
- [14] NADUKURU S S, MICHALOWSKI R L. Arching in Distribution of Active Load on Retaining Walls [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, 138 (5): 575-584.
- [15] 李永刚, 白鸿莉. 垂直墙背挡土墙土压力分布研究 [J]. 水利学报, 2003, 34 (2): 102-106.
- LI Yong-gang, BAI Hong-li. Study of Earth Pressure Distribution on the Retaining Wall with Vertical Back [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34 (2): 102-106.
- [16] 薛志超, 宋修广, 陈宝强, 等. 压力分散型挡土墙支护高填土路基施工过程的受力特征 [J]. 公路交通科技, 2013, 30 (4): 11-16.
- XUE Zhi-chao, SONG Xiu-guang, CHEN Bao-qiang, et al. Stress Characteristics of Pressure Dispersive Retaining Wall for Supporting High-filling Embankment during Construction [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013, 30 (4): 11-16.
- [17] 高江平, 俞茂宏, 胡长顺, 等. 加筋土挡墙土压力及土压力系数分布规律研究 [J]. 岩土工程学报, 2003, 25 (5): 582-584.
- GAO Jiang-ping, YU Mao-hong, HU Chang-shun, et al. Study on the Distributive Rule of the Earth Pressure and Its Coefficient of the Reinforced Earth Wall [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25 (5): 582-584.
- [18] 王仕传, 程桦. 绕墙趾转动挡土墙主动土压力的确定 [J]. 岩土力学, 2011, 32 (7): 2139-2145.
- WANG Shi-chuan, CHENG Hua. Determination of Active Earth Pressure behind Retaining Wall Rotating about Wall Toe [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32 (7): 2139-2145.