

坡间路基挡土墙“双锚”建设方案评价及参数优化数值模拟

吴顺川, 高永涛, 王金安

(北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083)

摘 要: 坡间路基挡土墙是所有挡土墙结构形式中建设难度最大且最易失稳的结构形式。结合栖霞高速公路 K59+470~K59+630 半填半挖段路基建设问题, 提出坡间挡土墙“双锚”建造方案。通过数值模拟, 对“双锚”方案的工艺参数进行研究和优化, 并对典型剖面的“双锚”方案建造效果进行整体评价。结果表明: 该方案在路面静载和动载作用下均可保持稳定, 满足相关规范要求, 达到工程预期效果。方案实施后监测结果表明: 挡土墙处于稳定状态, 表明该技术对于坡间挡土墙建设具有广泛的推广和应用价值。

关键词: 坡间挡土墙; 锚杆; 锚定板; 稳定性评价; 数值模拟

中图分类号: X705

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2006)03-0332-05

作者简介: 吴顺川(1969-), 男, 安徽无为, 副教授, 主要从事岩土工程、工程力学等方面的研究和教学工作。

Assessment on double anchor construction project of subgrade retaining wall on slope and its parameters optimization with numerical simulation

WU Shun-chuan, GAO Yong-tao, WANG Jin-an

(Civil and Environmental Engineering School, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: Retaining wall on slope is a structure very difficult to construct and easy to failure. Combined with a filled and excavated subgrade construction of section K59+470~K59+630 of Qixia-Laixi Expressway in Shandong Province, a double anchor construction project was put forward. The parameters of the construction was studied and optimized by use of numerical simulation methods. At the same time, the behaviour of typical section of the project was assessed. It was shown that the subgrade remained stable under static and dynamic load, and the project could meet the requirement of the relative criteria and expected effect was obtained. The inspection results after the construction showed that the retaining wall was stable, and the technique of double anchor construction project could be used as a reference for similar projects.

Key words: retaining wall on slope; anchor; bolted plate; assessment of stability; numerical simulation

0 概 述

采用挡土墙作为高填路基的支挡结构是国内外公路和铁路建设中常用的一种结构形式^[1, 2]。在半填半挖地段大多采用坡间挡土墙, 其一般位于自然边坡的坡面上, 是所有挡土墙结构形式中难度最大、结构最复杂, 也是最易失稳的结构形式^[3]。

坡间挡土墙的建造方案根据所在边坡坡体的稳定情况分为两类: ①坡体稳定时, 可采用常规标准方案建造; ②坡体不稳定时, 应采用边坡加固与挡土墙建造相结合的方案。因此, 判定边坡坡体的稳定性是初步设计选择方案时必须考虑的首要问题^[3]。

同三线栖霞—莱西高速公路(简称栖霞高速)1B标段 K59+470~K59+630 半填半挖段路基建设问题, 根据现场地形地貌及工程地质条件, 经过大量的现场调查、理论计算和科学实验, 判定该路基所在边坡在道路荷载作用下为非稳定边坡, 因此决定采用以锚杆、锚定板技术为主的坡间挡土墙建设方案^[4]。

1.1 基本思路

通过分析普通坡间挡土墙的变形、破坏过程和特征发现, 挡土墙的稳定性的由墙体本身和原始坡体的几何、物理和强度性质所决定^[5]。因此, 成功的坡间挡土墙建设技术必须是在充分认识和掌握挡土墙变形破

1 工程实例及建设方案

收稿日期: 2005-07-06

坏机制的前提下, 有针对性地提出的整体解决方案:

①将边坡加固与挡土墙的建设融为一体。把挡土墙的建设作为边坡加固的组成部分, 在挡土墙施工的同时即实施对边坡的加固, 反过来又稳定了挡土墙本身;

②将锚定板、预应力锚杆等广泛应用的成熟技术及工艺进行科学组合, 针对研究对象所在边坡的工程地质情况和本身的结构特点, 探索出一种新的、有效的并且适用于坡间挡土墙建造的技术工艺组合。

1.2 坡间挡土墙“双锚”建设方案

所谓“双锚”即是指运用预应力锚固技术和锚定板技术对坡间挡土墙进行有效支撑的技术组合^[3-5]。

“双锚”建造方案基本思路是将边坡加固与挡土墙建设融为一体。其要点是: 在墙体的中下部, 运用墙体作为承载体, 施工下向预应力锚杆, 使之在稳定墙体的同时起到加固边坡的双重作用。墙体上部则根据墙体内侧离边坡坡面的距离不同, 采用不同规格的锚定板作为支撑手段以稳定墙体本身。

根据原始边坡坡角不同, 在普通的锚定板挡土墙基础上, 分为以下两种情况: ①当坡体倾角小于 20° 时, 在墙基础部位施作下倾预应力锚杆, 增加墙体肋柱并对墙后填土和路基进行注浆, 如图 1 所示; ②当坡体倾角大于 20° 时, 除在墙基础部位打下倾预应力锚杆, 在墙基部位施工下向抗滑预应力锚杆桩, 同时在墙体上段锚定板拉杆底端增加与之相接的下倾抗滑锚杆 (图 2), 并对墙后填土和路基进行注浆。

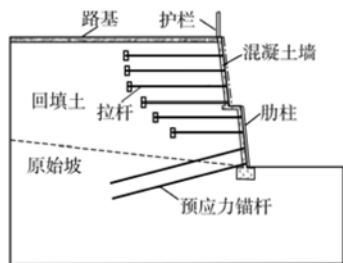


图 1 低坡角坡间挡土墙“双锚”支护结构示意图

Fig. 1 The double anchor structure for construction of retaining wall on slight slope

2 “双锚”建设方案技术参数优化

锚定板技术是应用于挡土墙建造的专门技术, 而预应力锚杆则是广泛应用于各类岩土工程加固的常规技术, 二者的作用机理、工艺特点各不相同, 欲将这两种技术同时应用于坡间挡土墙的建造, 必须要求其能达到某种“和谐”。如何通过技术参数的选取使之达到设计目的, 不仅是理论难题, 更是工程难题。

由于坡间挡土墙“双锚”建造技术没有规范可循, 因此必须对锚固工艺参数进行专项模拟研究^[5-7], 包括

锚定板拉杆预应力、墙体厚度、锚杆长度等。

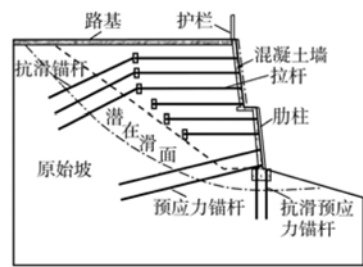


图 2 高坡角坡间挡土墙“双锚”支护结构示意图

Fig. 2 The double anchor structure for construction retaining wall on steep slope

采用有限差分软件 FLAC^[7], 分别对锚定板拉杆预应力、墙体厚度、锚杆长度与间距等设计参数进行数值模拟。除挡土墙材料为弹性体外, 其它岩土体均采用 Mohr-Coulomb 准则, 模型主要参数如表 1 所示。

表 1 模拟计算力学参数

Table 1 The mechanical parameters of numerical simulation

材料	γ /(kN·m ⁻³)	E / MPa	μ	c /MPa	ϕ (°)	σ_r /MPa
路面材料	25	28000	0.24	1.500	38	0.5
路基碎石	20	1400	0.30	0.150	32	0.05
填土层	18	40	0.35	0.050	24	0.01
表层风化岩	20	150	0.30	0.025	18	0.0025
花岗岩麻岩	26.5	9000	0.24	1.140	38	0.05
挡土墙材料	24	28000	0.21			

2.1 锚定板拉杆预应力

普通锚定板坡间挡土墙内的拉杆一般不施加预应力, 拉杆是通过填土侧向膨胀产生被动拉力, 以维持墙体的侧向稳定性。这种情况下, 拉杆是被动承载, 各排拉杆的受力也因所分配的变形压力的大小而不同, 造成挡土墙墙体受力不均。

对锚定板挡土墙拉杆施加预应力, 一方面可以形成主动承载, 向墙内填土施加侧向围压, 有利于提高填土的抗剪强度, 另一方面, 经过人工调整预应力的大小, 可使墙身受力更加均匀合理。

图 3、图 4 分别是肋柱式锚定板坡间挡土墙对拉杆施加不同预应力后, 路面的下沉曲线和墙面变形曲线。由图可知, 施加预应力后对减小路面下沉, 特别是墙体水平变形有明显的效果, 而且预应力值越高, 路面和墙面变形量越小。从施工难度和支护效率方面综合对比, 锚定板坡间挡土墙拉杆预应力在 140~200 kN 比较适中。

2.2 墙体厚度

坡间挡土墙墙体的作用是显而易见的: 它除了将填土维持在规定范围, 还承担由于填土侧向变形产生的水平压力和传递纵向荷载。不同厚度的墙体所产生

的水平抵抗力和纵向承载能力是不同的。

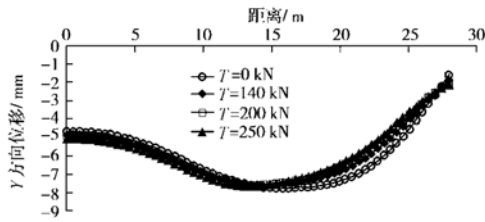


图3 拉杆施加不同预应力后路面下沉曲线

Fig. 3 The settlement curves of road with bolted pole under different pre-stresses

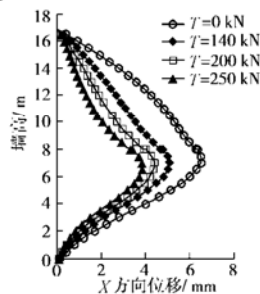


图4 拉杆施加不同预应力后墙面水平变形曲线

Fig. 4 The horizontal displacement curves of the wall surface with bolted pole under different pre-stresses

不同厚度墙体的墙体位移矢量场和塑性变形区分布显示, 墙体厚度的有限增加, 不会在本质上改变墙体变形趋势和塑性区分布。图 5、图 6 分别是肋柱式锚定板坡间挡土墙墙体不同厚度情况下, 路面的下沉曲线和墙面变形曲线。可见, 墙体厚度的增加, 有利于减小路面下沉和墙体水平变形。对于肋柱式锚定板坡间挡土墙, 由于有肋柱的增强支撑, 墙体厚度在 50 cm 左右即可保证其工程效果。这从另一个方面反映出, 采用肋柱式锚定板坡间挡土墙, 比独立地用增加锚定板挡土墙墙体厚度来提高墙体的强度和稳定性, 无论从经济上还是技术上都更加合理。

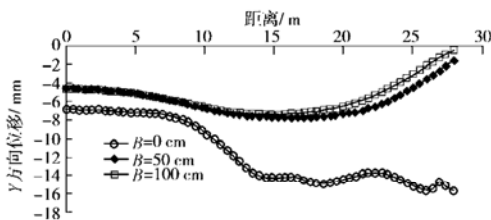


图5 不同墙体厚度的坡间挡土墙路面下沉曲线

Fig. 5 The settlement curves of road behind retaining wall on slope with metope in different thicknesses

2.3 锚杆长度与间距

“双锚”挡土墙建造方案中锚杆有三种情况: ①在墙体下段, 当墙体内侧与坡面距离小于 6 m 时, 采用下倾预应力锚杆对墙体与坡面岩土体进行锁定; ②当坡面倾角较大时, 在坡面上部采用下倾抗滑锚杆,

并将其与墙内锚定板拉杆连接, 防止边坡失稳滑动; ③当坡面倾角较大时, 在墙基础部位使用预应力底锚, 将墙基础与下覆边坡锁定, 防止墙基础滑移失稳。

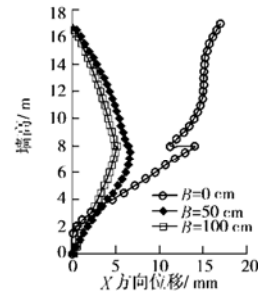


图6 不同墙体厚度的坡间挡土墙墙体水平变形曲线

Fig. 6 The horizontal displacement curves of retaining wall on slope with metope in different thicknesses

尽管上述各类型锚杆的作用不同, 但总体上是将挡土墙支撑结构通过锚杆稳固在坡体上, 或本身起锚固坡体的作用。预应力锚杆锚固段必须深入到未产生破坏的原始坡体内并有足够的长度满足承载力要求。

根据计算分析, 原始坡体在坡面处的破坏深度为 2~3 m, 从墙体到坡面的距离一般为 4~6 m。因此, 墙体下段预应力锚杆总长度应达到 12~16 m, 边坡上部抗滑锚杆长度应在 10 m 以上, 墙基预应力底锚长度应在 10~12 m。

确定锚杆间距的主要因素是锚固强度需求和预应力锚杆的相互作用。通过对锚杆簇锚杆的相互作用和锚固强度的研究, 锚杆间距为 2~2.5 m 时, 预应力锚杆的锚固效果最佳。

3 “双锚”坡间挡土墙稳定性评价

根据具体的挡土墙建设方案, 选取其中四个剖面, 对“双锚”挡土墙建设效果进行稳定性评价。

3.1 路面静荷载下稳定性分析

选取的四个剖面挡土墙高度分别为 17、14、11 和 9 m, 剖面特征尺寸见表 2, 各剖面锚定板拉杆、预应力锚杆布置及长度见表 3。挡墙 C25 混凝土, 厚度 60 cm, 配筋 $\phi 8 @ 15 \times 15$ cm; 肋柱采用 C25 混凝土, 断面尺寸为 50×50 cm, 肋柱主筋 4× $\phi 18$, 箍筋 $\phi 6.5 \times 20$ 。下段墙角用双排下向预应力锚杆锁定, 锚杆长度 16 m, 间距 2 m, 预应力 175 kN。路面上静荷载集度 20 kN/m。

在路面静荷载作用下, 各计算剖面的变形和塑性区发展情况表明: ①墙体上部变形主要以下沉为主, 在墙体附近产生水平变形。在墙体下部填土与原始坡体交界处, 也有水平运动的趋势。可见, 肋柱式锚定板“双锚”支护正是根据半填半挖坡间挡土墙的变形特征, 有针对性地采取的有效支护手段; ②墙体内局

部仍残余有塑性变形区, 主要分布在路基与填土交界、墙体与填土交界和锚定板与填土交界处。由于填土与路基、墙体和锚定板在力学性质上的差异, 在挡土墙建设过程中, 两种介质接触部位形成局部应力集中, 强度低者则进入塑性变形。从变形状态看, 曾经进入塑性状态的填土已恢复到稳定的应力状态, 对整体稳定性不构成影响; ③采用肋柱式锚定板“双锚”方案, 不同高度坡间挡土墙路面的垂直变形和墙体的水平变形如图 7 和图 8 所示, 墙体高度最大 ($H=17\text{ m}$) 的坡间挡土墙路面最大垂直变形为 7.7 mm , 最大相对下沉量 5.4 mm 。墙体最大水平变形为 6.6 mm ; ④随着墙体高度的减小, 坡间挡土墙在路面和墙体处的变形量明显减小。整个路面和墙体变形轮廓光滑, 说明不同支护手段在控制墙体变形和保证其稳定性方面具有良好的一直性和协调性。

表 2 挡土墙高度和边坡坡角参数表

Table 2 The height and slope angle of the retaining wall				
	剖面1	剖面2	剖面3	剖面4
上级墙体高度/m	9	9	9	9
下级墙体高度/m	8	5	2	0
原边坡角/(°)	15	17	26.6	29.4

表 3 不同剖面采用的锚杆、拉杆长度

Table 3 The length of anchor and bolted pole in different sections									
(单位: m)									
剖面	杆体排序	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
剖面1	杆体长度	16	16	9	11	11	13	13	13
剖面2	杆体长度	16	16	9	11	11	13	11	
剖面3	杆体长度	16	16	9	11	13			
剖面4	杆体长度	16	16	8	10				

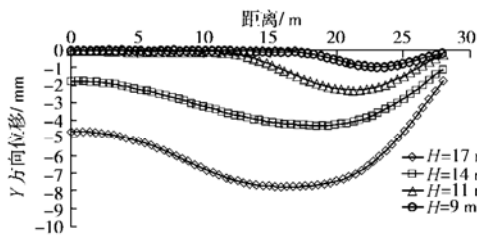


图 7 静荷载下不同高度坡间挡土墙路面下沉曲线
Fig. 7 The settlement curve of road with retaining walls of different heights on the slope under static load

3.2 路面动载荷下稳定性分析

公路坡间挡土墙受路面动载荷作用, 设定路面动载荷集度 20 kN/m , 动载系数 1.5, 按正弦波加载, 频率 30 Hz , 动载荷在计算剖面上作用持续时间 0.13 s 。通过对墙体位移场、破坏场、路面的垂直变形速度和变形量、边墙的水平变形速度和变形量的分析计算, 得出如下主要结论:

(1) 图 9 显示动载作用下“双锚”坡间挡土墙墙体不同位置的变形情况, 墙体中上部水平变形大于其它部位的变形, 因此必须提高路基的设计强度,

减轻因路基强度不足给挡土墙墙体造成的附加变形。

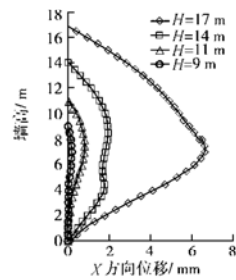


图 8 静荷载下不同高度坡间挡土墙墙体水平变形曲线
Fig. 8 The horizontal displacement curves for retaining wall of different heights under static load

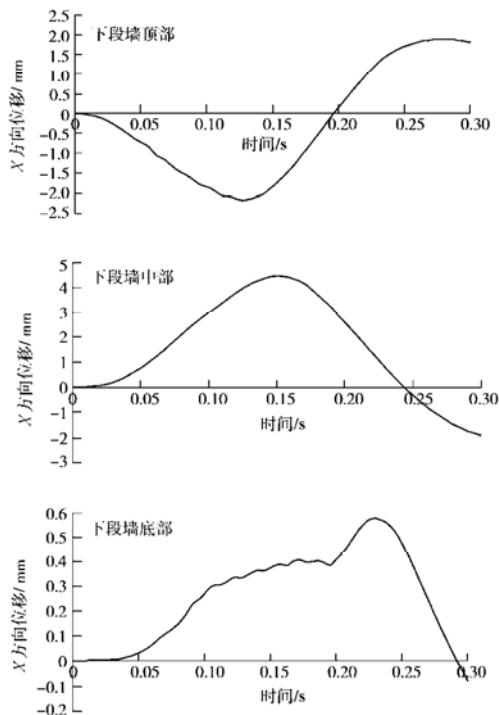


图 9 动载作用下边墙不同位置水平变形曲线
Fig. 9 The horizontal displacement curves of wall on different positions under dynamic load

(2) 动载荷作用期间 ($T<0.13\text{ s}$), 路面下沉速度变化与载荷作用频率和周期基本同步, 垂直变形速度方向主要向下, 动载荷结束后, 路面垂直变形速度向反方向变化 (反弹), 并逐渐恢复到零。

(3) 动载荷作用结束后, 路面不同位置最大下沉量为 2.65 mm 。

(4) 动载作用下墙体内出现少量塑性变形区及护栏边缘路面上存在零星拉破坏, 主要分布在路基与填土接触部位、墙体和填土接触部位以及墙基与原始坡体接触部位, 塑性区的产生是由于两种介质力学性质差异较大, 导致局部应力集中。在动载荷作用结束后, 曾经发生塑性变形的区域恢复到弹性状态, 对墙身稳定性并不构成影响。

纵观不同位置墙面的水平变形发展过程和变形趋

势,动载作用下挡土墙墙体完全处于稳定状态,表明挡土墙“双锚”结构设计是合理有效的。

3.3 “双锚”建造方案综合评价

通过对栖霞高速公路 K59+470~K59+630 半填半挖段坡间挡土墙“双锚”建设方案在动、静荷载作用下的稳定性及参数优化分析,认为:坡间挡土墙“双锚”方案是建立在对填土变形破坏力学行为和不同坡面角对墙体稳定性影响认识的基础上,有针对性地进行巧妙构思和有机组合而形成一套力学机理明确、协调完整、固坡与建墙一体的挡土墙建造方案。研究表明:①采用肋柱增加挡土墙边墙支护刚度,与孤立地用增加边墙厚度方法相比,在施工技术、经济指标和支护效果上都具有明显的优越性;②坡间挡土墙建设不仅对填土密实度有要求,对填土强度也应有严格的规定,因此对填土进行注浆处理,对改善路基自身抗变形性质、提高路基强度有积极作用和良好效果。③虽然锚定板安装经简单锁定后,随着挡墙的变形,其侧向变形力与锚定板拉杆的有效承载力能够达到平衡状态,拉杆的应力可以逐渐趋于稳定,但对锚定板结构施加预应力,对减小路面下沉,特别是边墙水平变形有明显的效果,而且预应力值越高,路面和墙面变形量越小;④边墙和肋柱既是支挡结构,也是承载结构。当坡面角小于 20° ,在墙底角实施下倾预应力锚杆增强支护,既控制了坡面的破坏发展,又增强了边墙基础的强度和稳定性;⑤当坡面角大于 20° 时,在坡顶采用抗滑锚杆与锚定板联合支护、边墙下部实施下倾预应力锚杆、墙基施加预应力底锚,对改善坡体、墙体和路面的力学与变形状态,有效地控制墙身沿坡面滑动、边坡坡体滑移推动墙体和墙基整体移动起到积极作用;⑥采用坡间挡土墙“双锚”支护是有条件的。当坡面倾角大于 40° 时,坡顶处锚固区将出现破坏区和岩土体错位,造成路面不连续变形,这种条件下,可将固坡和建墙分离,对坡体采取更高强度的加固,如采用高压注浆预应力锚固技术,控制边坡滑塌。

4 结 语

栖霞高速公路 K59+470~K59+630 段坡间挡土墙按照前述确定的“双锚”建设方案进行施工,工程结束后连续 4 a 的监测结果表明建成后的坡间挡土墙处于完全稳定状态,说明坡间挡土墙“双锚”建设方案是成功的。

但当坡面角较高或边坡稳定性很差时,如何将固坡和建墙统一设计、规划和施工,有必要在更广泛的工程地质背景下,进行深入研究和界定。

虽然本文所述的坡间挡土墙“双锚”建设方案是基于栖霞高速公路 K59+470~K59+630 半填半挖段路

基建设而言的,但该建设方案的技术组成、参数优化、稳定性评价思路及方法,对于坡间挡土墙建设具有广泛的推广和应用价值。

参考文献:

- [1] 王松根,高永涛,马 飞,张玉宏.公路路基支挡结构物加固技术研究[J].岩土力学,2004,25(s1): 111 - 114. (WANG Song-gen, GAO Yong-tao, MA Fei, ZHANG Yu-hong. Studies on reinforcement technique of bracing structures of roadbed[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004,25(s1): 111 - 114.)
- [2] 张续萱,魏殿兴.锚定板挡土结构的实测土压力及其分析研究[J].岩土工程学报,1994,16(2):73 - 79. (ZHANG Xu-xuan, WEI Dian-xing. Measurement and analysis of earth pressure in anchor slab retaining structures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994,16(2): 73 - 79.)
- [3] 高永涛,成子桥,吴顺川,金爱兵,孙金海.非稳定边坡坡间挡土墙双锚建造技术研究[J].公路交通科技,2005,22(4):27 - 34. (GAO Yong-tao, CHENG Zi-qiao, WU Shun-chuan, JIN Ai-bing, SUN Jin-hai. Study of double anchor constructing technique and its application in unstable slope retaining wall[J]. J of Highway and Transportation Research and Development, 2005,22(4): 27 - 34.)
- [4] 张友葩.动载下坡间挡土墙失稳机理及加固技术应用研究[D].北京:北京科技大学,2003. (ZHANG You-pa. Study on instable mechanisms of retaining wall set on soil-masses slope under double dynamics loading condition and application of reinforcement techniques [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2003.)
- [5] 吴顺川,金爱兵,王金安.坡间路基挡土墙稳定性评价数值模拟及建设方案确定[J].岩石力学与工程学报,2005,24(52):5382 - 5388. (WU Shun-chuan, JIN Ai-bing, WANG Jin-an. Numerical simulation of stability assessment and design-making of a subgrade retaining wall on slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005,24(52):5382 - 5388.)
- [6] 王松根,高永涛,边国强.关于失稳加筋土挡土墙加固问题的探讨[J].公路交通科技,2001,18(3):6 - 9. (WANG Song-gen, GAO Yong-tao, BIAN Guo-qiang. Study on reinforcements of failure retaining wall with reinforcement soil[J]. J of Highway and Transportation Research and Development, 2001,18(3):6 - 9.)
- [7] Itasca Consulting Group, Inc. FLAC^{2D} user's guide[M]. Minneapolis, MN USA, 2001.