

# 失稳加筋土挡土墙加固方案及技术评价

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:** 加筋土挡土墙是国内外广泛采用的挡土墙建设技术。由于交通荷载的急剧增加和该类挡土墙的固有缺陷, 国内有多处加筋土挡土墙产生变形甚至倒塌。以山东省菏泽市人民路立交桥加筋土挡土墙失稳为例, 对其失稳的内在根源和力学机制进行分析。通过多种加固方案对比, 确定以压力注浆、双向斜拉预应力锚固、挂网喷射混凝土等技术为主的综合加固治理方案; 运用数值模拟层次分析方法, 分别对实施不同技术措施所产生的加固效果进行分析。研究表明, 斜拉预应力锚杆抑制失稳加筋土挡土墙上部的纵向开裂和墙趾剪切破坏带的塑性滑移, 并提供较高的抗拉强度、刚度和较快的增阻速度; 混凝土喷层使墙面弧形外鼓得到约束。经现场实施综合加固方案, 监测结果显示加固工程取得预期效果, 表明该技术方案对类似问题具有推广应用价值。

**关键词:** 土力学; 加筋土挡土墙; 失稳; 压力注浆; 预应力锚固; 喷射混凝土; 数值模拟

**中图分类号:** TU 47

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2007)增 1 - 3086 - 06

## REINFORCEMENT SCHEME OF FAILURE REINFORCED EARTH RETAINING WALL AND ITS TECHNICAL ASSESSMENT

WU Shunchuan, GAO Yongtao, WANG Jin'an

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

**Abstract:** Reinforced earth retaining wall is a widely used construction technique of retaining walls. Because of the rapid increase in traffic loads and the inherent defects associated with such a kind of reinforced earth retaining wall, many of them fail after operation for a period of time in China. A case study is carried out based on a failed reinforced earth retaining wall in overpass along Renmin road, Heze City of Shandong Province. The reasons of failure and its mechanical mechanism have been analyzed through numerical simulation. By comparison of a few reinforcement means, a comprehensive reinforcement scheme is determined, which frames the pressure grouting, the double directions and inclined applied prestressed anchorage, and the shotcrete with the wire mesh reinforcement. The reinforcement effects given by different techniques have been analyzed by using numerical step analysis method. The results indicate that the inclined applied prestressed anchorage restrains the vertical fractures developed in the upper part of the wall and shear band in the foot corners, providing a higher tensile strength, stiffness and a faster increase in resistance velocity as well. Meanwhile, the convex deformation in the side wall has been controlled by the shotcrete. The application of the reinforcement in site achieves the expectation regarding to the monitored results. It proves that the comprehensive reinforcement scheme has an extent value to the similar engineering.

**Key words:** soil mechanics; reinforced earth retaining wall; failure; pressure grouting; prestressed anchorage; shotcrete; numerical simulation

**收稿日期:** 2005 - 07 - 01; **修回日期:** 2005 - 09 - 14

**作者简介:** 吴顺川(1969 -), 男, 博士, 1993 年毕业于北京科技大学土木与环境工程学院工程力学专业, 现任研究员, 主要从事岩土工程、工程力学等方面的研究工作。E-mail: wushunchuan@vip.sina.com

## 1 引言

加筋土挡土墙是我国近 20 a 来广泛采用的挡土墙建设技术。随着土工合成材料的发展, 加筋土挡土结构应用日益广泛<sup>[1]</sup>, 20 世纪 80 年代我国兴建各类加筋土挡土墙 300 多座, 到目前为止已修建近千座。由于种种原因, 特别是随着交通量的增大, 在投入使用 5~10 a 以后, 许多加筋土挡土墙相继出现不同程度的变形和破坏。

建于 20 世纪 80 年代初期的山东滨州黄河大桥南北接线加筋土挡土墙, 自 1991 年开始逐渐发生变形, 到 1997 年变形加剧, 并发生了局部坍塌事故, 严重威胁到整座大桥的交通安全; 三峡移民区巫山县新县城主干道加筋土挡土墙于 1997 年建成, 1998 年发生了局部跨塌<sup>[2]</sup>。

加筋土挡土墙的失稳问题不是个例, 而是带有普遍性, 仅山东省境内就有不少于 10 座加筋土挡土墙发生不同程度的失稳现象, 目前国内类似工程有上百处<sup>[3, 4]</sup>。

## 2 加筋土挡土墙失稳原因

加筋土挡土墙是国内外已广泛应用的成熟技术, 我国也制定了相应的设计与施工规范, 但依然有较多加筋土挡土墙在建成初期或运行一段时期后相继发生了较大变形甚至失稳, 主要原因包括以下几个方面<sup>[4~6]</sup>。

### 2.1 内在原因

(1) 墙体内部的填土强度低, 随着时间的积累和变形的叠加, 可能在挡土墙内部出现整体和永久性的破坏<sup>[7, 8]</sup>。

(2) 车辆荷载引起的侧压力沿垂直方向遵从布西涅斯克解, 而一般设计拉筋都没有相对应的设计匹配强度。

(3) 初期加筋材料主要为增阻迟缓的柔塑性体, 在动荷载作用下增阻速度滞后, 不能及时提供阻力, 土体因瞬间变形超限而破坏。

### 2.2 外在原因

(1) 交通流量激增, 特别是大型运输车辆增多, 超载严重, 直接导致路面车辆荷载剧增, 超过了原设计路基的承载能力<sup>[9, 10]</sup>。

(2) 施工质量不高, 尤其是初期填方不实, 拉筋松弛、拉筋材料选材不当等也是造成加筋土挡土

墙失稳的原因。

## 3 工程实例及加固方案选择

建成于 1995 年的山东省菏泽市人民路公铁立交桥加筋土挡土墙于 2000 年发生轻微墙体外倾, 至 2002 年始, 墙体外鼓变形逐渐加剧, 至 2003 年 6 月, 墙体最大位移量超过 250 mm, 路面局部发生纵向开裂, 两侧护栏内倾, 顶部面板局部脱落, 挡土墙变形有进一步加剧的明显趋势。

### 3.1 加固方案必须满足的前提条件

对于失稳加筋土挡土墙加固, 最简单的处理方法是在墙体外侧压土或附加一个重力挡墙作为外支撑, 但这将直接导致加筋土挡土墙的主要优越性的丧失, 不但工程量大, 且需要重新征地, 除非紧急抢险, 此方案不能采用。任何拟采用的加固方案必须满足以下条件:

(1) 不能破坏原工程的基本结构, 所实施的加固方案既能完全保留加筋土挡土墙的既有优越性, 又不影响其使用功能。

(2) 在不影响主路面安全运行的前提下能正常进行加固施工。

(3) 施工工艺要相对简单, 工程造价及施工工期不能高于其他加固方案。

### 3.2 可选工程方案

根据加筋土挡土墙失稳机制及变形特征分析, 经综合比较, 能同时满足上述条件的方案其实范围很小: 其一需是常规技术; 其二是能有效抑制或减小墙体变形; 其三是具有可靠的有效性和持久性。

因此主要技术方案有以下两种:

(1) 理想的方案是通过特殊的工艺, 将墙体对应面板凿穿, 穿上钢筋, 对拉锁定, 完全取代原有拉筋。

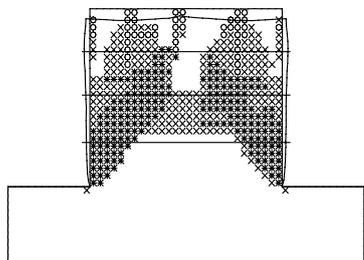
(2) 由于国内目前凿孔设备及技术所限, 对穿凿孔不易实现, 可改由两侧分别凿孔, 并安装预应力锚杆以代替对拉钢筋, 这样凿孔问题易解决, 同时又保持了前者的技术精髓。

### 3.3 加固技术方案选择的力学依据

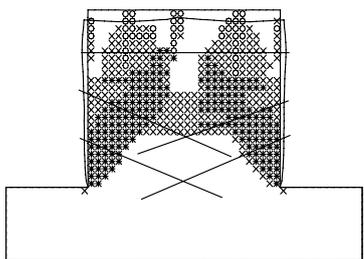
加筋土挡土墙失稳破坏的内在机制<sup>[5]</sup>有两个: 一是挡土墙上部的劈裂张开, 二是挡土墙中下部的共轭剪切破坏带沿剪切带推移并带动周围土体在水平方向的挤出。因此, 加固方案在力学上应具备控制整体支离性破坏和局部化变形两个方面的功能。

直观上, 可采用钢筋从两侧对拉, 约束墙体内部

部因开裂引起的水平变形和墙面鼓胀(图 1(a))。这种做法除施工技术方面存在问题外,还存在以下两方面问题。



(a) 对拉方案



(b) 斜拉方案

图 1 失稳加筋土挡土墙加固的理想模式

Fig.1 Perfect reinforcement modes of failure reinforced earth retaining wall

首先,对拉方法不是控制剪切转移带的最有力手段。理想的做法是对失稳墙体上部实施对拉,控制开裂的继续发展;为实现对墙体中下部剪切楔形体进行锁定,锚杆应尽量沿垂直于剪切破坏带的方向布置,如图 1(b)所示。

其次,理论上可以证明,由平行对拉方案形成的体系在结构力学上属于“非自稳”结构,这种框架式的结构体系在偏心荷载(非对称荷载)的作用下,整体结构容易在水平方向失去稳定性(见图 2)。而采用整体双向斜拉方案则可以在一定程度上弥补该类挡土墙在侧向稳定性方面存在的固有缺陷。

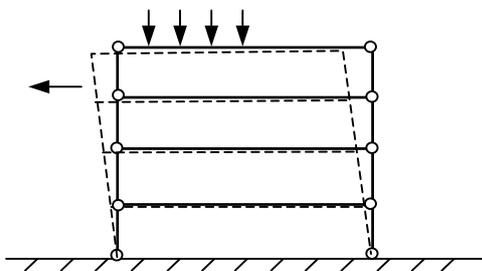


图 2 失稳加筋土挡土墙对拉加固方案结构侧向失稳示意图

Fig.2 Sketch of side failure when using face-to-face pull scheme to reinforce retaining wall

此外,从加筋土挡土墙失稳原因的分析可知,欲使挡土墙具有足够的强度和刚性,要求加固构件本身具有快速增阻的力学性能,能够及时提供阻力以对抗路面动荷载作用。

综合考虑上述力学原则及施工工艺等因素,确定以预应力锚杆斜拉方案为主体的加固方案,配合高压注浆改善土体力学性能,同时采取表面喷混凝土(包括钢筋网)加强墙面整体性和控制局部变形,是一套力学上较为合理和完整的综合技术方案。

### 3.4 选定方案

基于施工工艺条件的限制及前述加固方案选择的力学依据,选定如下具体方案:

(1) 由于加筋土挡土墙墙面是由多块面板构成,面板预制块之间没有相应的结构联系,相对孤立存在,单块面板不仅难以承载施加的预应力,而且会造成墙面的不均匀变形。因此,可考虑在墙表面喷射一层混凝土,使分散的面板预制块由单体变为整体,从而可保证在墙体表面施加的“点”力均是作用在“一片”而不是“一块”上,整个喷层相当于一个大承力垫板,整个外墙成为整体,可提高其抗弯、抗剪和整体承载能力。

(2) 在墙体两侧墙面对打 1~3 排下倾预应力锚杆,以此来有效抑制墙体的变形。

(3) 锚杆安装过程中,采用“分层多次高压注浆预应力锚固技术”,实施分层多次注浆,既能通过对土体的改性加固墙体本身,又可提高预应力锚杆的承载力。

## 4 加固方案技术评价

针对工程实例所确定的综合技术方案,各种措施既具有各自独特的作用,又需要彼此结合、相互依托,共同形成承载体系。为评价不同措施在失稳加筋土挡土墙加固中发挥的作用,运用有限差分程序 FLAC<sup>[11]</sup>,采用数值模拟层次分析方法,分别对实施不同工程措施所产生的加固效果进行分析。

加筋土挡土墙数值模型简图如图 3 所示。加筋土挡土墙填土的强度特征采用 Mohr-Coulomb 屈服准则描述;加筋土挡土墙内填土主要由亚黏土和砂土组成,试验确定失稳挡土墙中各种材料的力学参数如表 1 所示(面板假设为刚性)。

由于挡土墙长度大,按平面应变问题进行分析。模型两侧限制水平方向移动,底面限制垂直方向移动。加筋土挡土墙除自重外,主要承受的外力为行

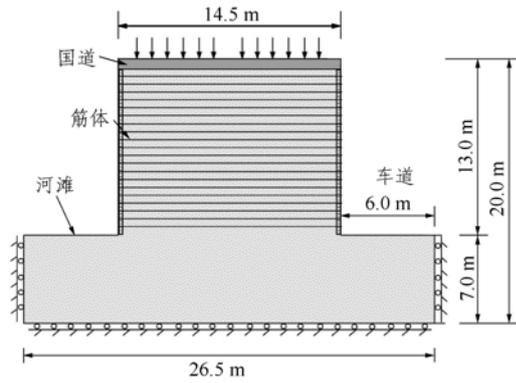


图 3 加筋土挡土墙数值模型简图

Fig.3 Sketch of numerical model of reinforced earth retaining wall

表 1 材料数值模拟力学参数

Table 1 Mechanical parameters of materials for numerical simulation

材料	容重 ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模 量/MPa	泊松 比	黏聚 力/MPa	内摩擦 角/ $^\circ$	抗拉 强度/MPa	极限抗 拉力/kN	加筋间距 /m
路基填土	19.0	40	0.36	0.07	25	0.01		
路面材料	25.0	28 000	0.24			0.50		
土体加筋		100					100	0.5

车形成的移动荷载, 模拟动荷载频率为 30 Hz, 动荷载系数为 1.5, 动荷载在单位剖面作用时间为 0.13 s。

### 4.1 注浆效果分析

高压注浆对土体改性的作用机制和效果, 在许多工程实践中已得到证实。通过土体注浆前后挡土墙在汽车对称荷载和非对称荷载条件下的数值计算, 其结果表明:

(1) 注浆后, 由于挡土墙墙体自身强度的提高, 墙体在外荷载作用下, 内部受力状态明显改善。与注浆前比较, 墙体上部的破坏区基本消失, 但在 10 m 高以上墙体的中下部依然存在剪切破坏带, 但范围已明显减小。

(2) 注浆后挡土墙墙体包括路面的变形减小, 特别是墙面的水平变形量比注浆前明显减小。

### 4.2 预应力锚固注浆效果分析

如图 4 所示, 从墙面位移模式上看, 在对称荷载作用下, 墙面变形主要发生在距地面 2 m 以上高度处, 这与墙体内部的局部剪切破坏带滑移有关。在非对称荷载作用下, 墙体十分明显地发生自上而下、由大到小的向外倾斜, 这正是前述分析中所说的“非自稳结构”的变形特征。由此可见, 仅仅通过注浆

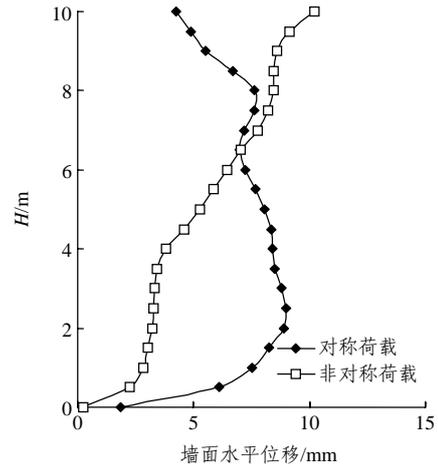


图 4 加筋土挡土墙注浆后墙面水平位移

Fig.4 Surface horizontal displacement of failure reinforced earth retaining wall after grouting

措施, 单靠改善和提高挡土墙自身力学性质和强度还不能保证挡土墙的稳定性, 还必须有增加整体稳定性的加固措施——双向斜拉锚固。

应当指出, 预应力锚杆的作用, 并不是起被动支撑母体的作用, 它是通过预应力张拉锁定后, 使锚固范围内的土体更加紧密地结合, 形成有机的承载整体, 同时通过斜拉产生的阻力, 抵御结构侧向失稳。

注浆与锚固后数值模拟表明:

(1) 采用注浆和锚固措施后, 墙体内部的共轭剪切破坏现象彻底消失。只有当挡土墙高度较大时, 在墙趾表层浅部 1.5 m 范围内出现局部塑性变形破坏, 如图 5 所示。通过局部补充锚固, 完全可以控制该处的塑性破坏影响。

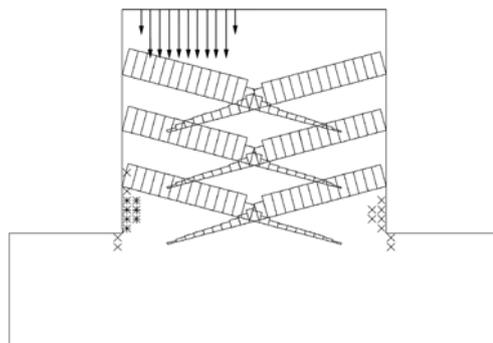


图 5 锚固注浆后非对称荷载下的破坏场与锚固力分布  
Fig.5 Failure field and anchor stress distribution of reinforced earth wall after anchor grouting under unsymmetrical load

(2) 预应力锚杆的轴向力分布情况。在对称荷

载作用下, 墙体上部锚杆轴向拉力大于下部锚杆轴向力, 说明预应力锚杆在抑制墙体纵向开裂和水平鼓胀变形中发挥着重要作用。在非对称荷载作用下, 非受载侧的预应力锚杆轴向力明显增加, 表明斜拉锚固措施在抵御“非自稳”结构的加筋土挡土墙侧向失稳方面也发挥积极作用。

(3) 采用锚固和注浆措施后, 在对称荷载作用下, 挡土墙墙面水平方向变形——墙面凸出得到较好控制。在预应力锚杆约束下, 对于 10 m 高挡土墙, 墙面的最大水平位移由仅注浆的 9 mm(见图 4)减小到 3.6 mm(见图 6)。

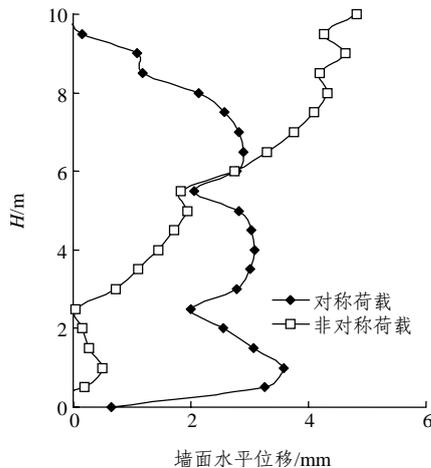


图 6 失稳加筋土挡土墙锚固注浆后墙面水平位移

Fig.6 Surface horizontal displacement of failure reinforced earth retaining wall after anchor grouting

在非对称荷载作用下, 墙体向受载侧倾斜的局面并没有彻底消除。例如, 尽管 10 m 高墙体上部最大水平移动量由仅注浆状态的 10.5 mm(见图 4)下降到锚固注浆后的 4.8 mm(见图 6), 但是整个墙面依然存在微倾斜, 平均倾斜度为 0.48 mm/m。

因此可以认为: 锚固注浆的作用体现在对失稳结构体的整体强度和稳定性的提高, 经过加固的加筋土挡土墙, 在假设的非对称极端动荷载(40 kN/m, 动载系数 1.5)作用下, 能够满足挡土墙在强度和稳定性方面的要求。

### 4.3 锚固注浆与表面喷混凝土效果分析

在经过锚固注浆措施加固后, 失稳加筋土挡土墙墙面在锚端之间有弧形外鼓的现象(见图 6), 墙趾浅表面处依然有零星的塑性区。为此, 有必要再采取提高墙体表面整体性的措施, 防止预制面板脱落。采取的措施: 在墙面喷射一层混凝土, 喷混凝土厚度为 80~150 mm, 并配以锚网+锚钉。

在锚固注浆和喷混凝土综合加固下, 失稳加筋土挡土墙在对称与非对称荷载作用下, 墙体破坏区分布、锚杆锚固力分布、喷混凝土内的轴向力和弯矩计算结果表明:

(1) 墙面喷混凝土后, 10 m 以上高度的失稳加筋土挡土墙墙趾处的塑性区被控制在墙体表面浅层 1 m 范围内, 10 m 以下高度的挡土墙墙趾处的塑性区被控制在 0.5 m 范围内。由此可见, 喷混凝土后锚杆间的墙体表面自由变形得到有效抑制。

(2) 墙面喷混凝土后, 预应力锚杆的轴向力普遍提高, 表明混凝土喷层将墙体表面连为整体, 锚杆对周围墙面变形的约束范围扩大, 约束力进一步增强。

(3) 沿墙体从上至下, 混凝土喷层内的弯矩呈增大趋势, 表明喷混凝土层影响了墙趾及锚端之间墙面变形。

(4) 失稳加筋土挡土墙表面喷混凝土后, 沿墙面的水平变形更加均匀, 变形量进一步减小。

综上所述, 失稳加筋土挡土墙表面混凝土喷层对于缩小墙体固有的塑性区范围, 提高预应力锚杆锚固力和墙体浅层变形约束范围, 抑制墙面的不均匀变形等方面均可发挥良好作用。

### 4.4 综合加固措施效果分析

通过前述模拟计算分析, 对不同加固措施发挥的作用有了较为深入的认识:

(1) 锚固注浆后, 墙趾处的水平位移大大降低, 说明斜拉预应力锚杆完全抑制了失稳加筋土挡土墙上部的纵向开裂和墙趾处剪切破坏带的塑性滑移, 工程效果明显。

(2) 由于采取了高压注浆预应力锚固技术, 锚杆有足够的抗拉强度、刚度和较快的增阻速度, 使失稳加筋土挡土墙墙面水平变形量得到有效控制, 同时整个墙面的变形趋于均匀。

(3) 混凝土喷层的效果主要体现在锚杆端部施压范围扩大, 同时喷混凝土在锚端之间形成抗弯效应, 使墙面弧形外鼓得到约束, 可有效防止原有加筋面板因墙体变形而脱落。

(4) 经过锚固注浆和表面喷混凝土加固后, 挡土墙路基和路面的变形状况得到明显改善。

## 5 方案实施及效果

经过近 4 个月的现场调查和试验段试验, 按照前述的综合加固方案, 工程实例失稳加筋土挡土墙

加固工程于 2004 年 6 月正式开始施工, 为确保加固工程的科学性和经济性, 现场试验作为施工的组成部分, 伴随着施工过程始终。至 2004 年 11 月初, 加固工程结束, 现场试验工作转为现场监测至今。监测结果表明: 锚杆预应力值稳定, 墙面变形值基本为 0, 且没有对工程原设计的使用功能造成任何不利影响, 表明工程加固效果显著。

## 6 结 论

加筋土挡土墙变形及失稳是近年来交通系统普遍存在的问题, 已经给公路、铁路等相关行业形成潜在威胁或造成巨大危害。

在详尽分析加筋土挡土墙失稳的内在根源和力学机制的基础上, 通过方案对比, 选定结合压力注浆、双向斜拉预应力锚固、挂网喷射混凝土为一体的综合加固方案。运用有限差分程序, 采用数值模拟的层次分析方法, 分别分析实施压力注浆、双向斜拉锚固、喷射混凝土等不同工程措施所产生的加固效果, 并经现场实施, 监测结果表明, 该方案取得预期工程效果。

虽然本文所述的工程加固方案是基于工程实例所述的失稳加筋土挡土墙而言, 但该加固方案的技术组成、工作机制分析思路和分析方法, 对于类似问题具有可借鉴性。

### 参考文献(References):

- [1] 欧阳仲春. 现代土工加筋技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 1991. (OUYANG Zhongchun. Modern technology of reinforced soil[M]. Beijing: China Communications Press, 1991.(in Chinese))
- [2] 唐辉明, 林 彤. 三峡工程库区巫山县加筋土挡墙离心模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(17): 2 893 - 2 901.(TANG Huiming, LIN Tong. Centrifuge modeling test on reinforced earth wall at Wushan County in reservoir area of the Three Gorges Project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(17): 2 893 - 2 901.(in Chinese))
- [3] 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 Songgen, GAO Yongtao, BIAN Guoqiang. Study on reinforcements of failure retaining wall with reinforcement soil[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2001, 18(3): 6 - 9.(in Chinese))
- [4] 王松根, 高永涛, 马 飞, 等. 公路路基支挡结构物加固技术研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(增 1): 110 - 114.(WANG Songgen, GAO Yongtao, MA Fei, et al. Studies on reinforcement technique of bracing structures of roadbed[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(Supp.1): 110 - 114.(in Chinese))
- [5] 金爱兵, 高永涛, 吴顺川, 等. G104 界河立交桥加筋土挡土墙失稳机制分析及加固方案[J]. 有色金属, 2003, 55(2): 113 - 118.(JIN Aibing, GAO Yongtao, WU Shunchuan, et al. Instability mechanism and reinforcement scheme of G104 crossroad reinforced retaining wall[J]. Nonferrous Metals, 2003, 55(2): 113 - 118.(in Chinese))
- [6] 中华人民共和国行业标准编写组. JTJ015 - 91 公路加筋土工程设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 1991.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. JGJ 015 - 91 Code for design of highway reinforced soil[S]. Beijing: China Communications Press, 1991.(in Chinese))
- [7] 杨广庆, 蔡 英, 苏 谦. 高路堤加筋土挡土墙变形和受力分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(2): 321 - 326.(YANG Guangqing, CAI Ying, SU Qian. Testing study on deformation and stress of reinforced earth retaining wall for high embankment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(2): 321 - 326.(in Chinese))
- [8] 杨广庆, 周敏娟, 张保俭. 加筋土挡土墙水平位移研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(7): 1 248 - 1 252.(YANG Guangqing, ZHOU Minjuan, ZHANG Baojian. Study on the horizontal deformation of reinforced retaining walls of soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(7): 1 248 - 1 252.(in Chinese))
- [9] 杨果林, 李海深, 王永和. 加筋土挡墙动力特性模型试验与动力分析[J]. 土木工程学报, 2003, 36(6): 105 - 110.(YANG Guolin, LI Haishen, WANG Yonghe. Model test on reinforced earth retaining wall under repeated load[J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(6): 105 - 110.(in Chinese))
- [10] 张兴强, 闫澍旺, 陈文金. 土工格栅与土动力相互作用的有限元分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程版), 2001, 34(4): 525 - 528.(ZHANG Xingqiang, YAN Shuwang, CHEN Wenjin. Finite element analysis of dynamic soil-geogrid interaction[J]. Journal of Tianjin University(Science and Technology), 2001, 34(4): 525 - 528.(in Chinese))
- [11] Itasca Consulting Group, Inc.. FLAC<sup>2D</sup> user's manual[R]. Minneapolis, USA: Itasca Consulting Group, Inc., 2001.