# 有限元强度折减法在加筋格宾陡坡 支挡结构中的应用

黄向京<sup>1,2</sup>, 许桂林<sup>1,3</sup>, 陈润夏<sup>4</sup>

(1. 中南大学 土木建筑学院,湖南 长沙 410075; 2. 湖南省交通规划勘察设计院,湖南 长沙 410008;
3. 中铁工程设计咨询集团有限公司 郑州设计院,河南 郑州 450052; 4. 马克菲尔中国有限公司,湖南 长沙 410000)

**摘要:** 依托我国第一座高速公路加筋格宾陡坡支挡结构——湖北大广北高速公路兰溪互通 AK0+939.68~ AK1+079.71, BK0+296.55~366.18 陡坡加筋土工程,以岩土工程专业有限元程序 Phase<sup>2</sup> V6.0 为研究平台,采用 有限元强度折减法对该加筋格宾陡坡的稳定性进行评价。以经典极限平衡条分法的计算结果为基础,分析单元选 型对计算结果的影响,提出采用有限元强度折减法计算筋材拉力分布,从而确定加筋土结构内部破裂面的方法, 探讨填料黏聚力 *c*、内摩擦角*q*、网面拉力、地震力、填土重度、车辆荷载以及加筋间距等重要参数对安全系数的 影响。相关成果可指导具体工程设计。

**关键词:** 边坡工程;有限元;强度折减法;加筋格宾;陡坡;稳定分析;内部破裂面 **中图分类号:** P 642.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 - 6915(2010)增 2 - 3916 - 07

# APPLICATION OF STRENGTH REDUCTION FEM TO REINFORCED GABION RETAINING STRUCTURE IN STEEP SLOPE

HUANG Xiangjing<sup>1, 2</sup>, XU Guilin<sup>1, 3</sup>, CHEN Runxia<sup>4</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Central South University, Changsha, Hunan 410075, China;
 2. Hunan Provincial Communications Planning Survey and Design Institute, Changsha, Hunan 410008, China;
 3. Zhengzhou Design Institute, China Railway Engineering Consultants Group, Zhengzhou, Henan 450052, China;
 4. Maccaferri Enviro-Tech Co., Ltd., Changsha, Hunan 410000, China)

**Abstract:** According to the first expressway reinforced gabion retaining structure in China(reinforced earth engineering of Daqing—Guangzhou expressway section of Lanxi interchange AK0+939.38 - AK1+079.71, BK0+296.55 - 366.18 in Hubei Province), the stability of steep reinforced gabion slope is evaluated by using strength reduction finite element method(FEM) on the platform of the finite element software Phase<sup>2</sup> V6.0. Based on the results of limit equilibrium slice method, the effect of selected element on the results of strength reduction method to determine the internal failure surface of reinforced earth structure by using FEM to calculate tension distribution of reinforcements is proposed. The influences of cohesion, internal friction angle, tension, earthquake force, gravity density and vehicle load on factor of safety are discussed. Thus, it can be effectively used to guide the specific engineering designs.

**Key words:** slop engineering; finite elements; strength reduction method; reinforced gabion retaining wall; steep slope; stability analysis; internal failure surface

引 1 言

20世纪90年代,在马来西亚班吉一赛满义公

路建设中,将双绞合六边形钢丝网工程构件技术延 伸开发,与格宾结构结合形成了加筋格宾结构,应 用于路肩加筋土挡土墙中,取得了良好的效果。短 短数十年间,该技术迅速应用于全球数千项公路、

收稿日期: 2009 - 07 - 14; 修回日期: 2009 - 08 - 24

**基金项目:**湖南省交通科技项目(200612)

**作者简介:**黄向京(1971-),男,博士,1994年毕业于同济大学地下建筑与工程系地质工程专业,现为研究员级高级工程师,主要从事公路工程勘察设计方面的研究工作。E-mail: hncshxj@163.com

铁路、水利、房建等填方边坡的支挡工程。加筋格 宾是加筋土工程的新结构、新技术,目前国内尚无 相关规程指导设计、施工<sup>[1,2]</sup>。

在加筋土陡坡结构稳定性分析中,世界各国的 设计规范中大多采用考虑筋材拉力的极限平衡条分 法。除自身固有的局限性外<sup>[3]</sup>,该方法在考虑筋材 拉力时,假定各层筋材均处于极限状态,即位置相 同的筋材发挥同等的拉力。这显然与实际情况不符。

有限元强度折减法通过不断降低岩土体强度使 边坡达到极限平衡状态,从而可直接计算得到边 坡滑动面和强度的储备系数,非常符合工程设计<sup>[4]</sup>。 该方法不需要假定滑动面的形状和位置以及筋材的 拉力,可由程序计算得到所有潜在滑动面,开创了 边坡稳定分析的一个新领域。本文介绍了有限元强 度折减法在加筋土陡坡工程中的实际应用,以供相 关工程技术人员参考。

# 2 加筋土工程设计

#### 2.1 工程概况

湖北大广北高速公路兰溪互通 AK0+939.68~ AK1+079.71, BK0+296.55~366.18 为高填方路基, 最大高度达 16 m。地基持力层为砂土,容许承载力 [ $\sigma_0$ ]= 240 kPa,路基紧挨农田,取土以及征地困难, 为尽量少破坏良田,经多方技术、经济比较,确定 采用加筋格宾陡坡方案(见图 1)。



图 1 加筋陡坡设计断面图(单位: m)



### 2.2 加筋格宾单元

加筋格宾单元为镀锌或镀高尔凡并覆塑的低碳 钢丝经机器编织而成的双绞合六边形金属网面。其 面墙为格宾网箱,拉筋为钢丝网面,拉筋与面墙网 面为同一网面的无节点连接。在现场直接充填块石 料构成面墙,在加筋网面上分层填土、压实。格宾 网箱、网面与压实填土共同作用的受拉体系一起组 成加筋格宾结构。加筋格宾单元的一般规格为幅宽 2 m,高 0.5 或 1.0 m(见图 2),加筋网面长度根据设 计确定。单元间通过绞合钢丝连接,其挡墙墙面型 式可以是直立式和阶梯式,并可设置分级平台。



(a) 加筋格宾单元



(b) 加筋格宾陡坡图 2 加筋格宾单元及应用简图Fig.2 Sketches of steep reinforced gabion and application

# 3 有限元模型的建立

### 3.1 有限元软件介绍

计算采用的软件为加拿大 Rocscience 公司开发 的有限元软件 Phase<sup>2</sup> V6.0 版本。该程序的早期版本 已在国际岩土工程界广泛应用,在运用剪切强度折 减法分析边坡稳定性时,本构模型可选用 Mohr-Coulomb, Hoek-Brown, 广义 Hoek-Brown 及 Drucker-Prager 准则,并可设定剪切强度折减区域<sup>[5]</sup>。同时该 软件具有专业的加筋土筋材 Line 土工合成材料单 元,可计算筋材上的拉力,可非常方便地模拟筋材 对加筋边坡稳定的影响。在复杂结构的稳定分析时, Phase<sup>2</sup> 非常实用,可供设计人员参考。

## 3.2 有限元模型

按照平面应变问题建立模型,土体单元采用 Mohr-Coulomb本构模型。采用Line单元模拟双绞 合六边形金属网筋材。Line单元本质是一维杆单元, 只能发挥纵向抗拉强度,不能承受弯矩。双绞合六 边形金属网筋材属于格栅类筋材,由于其表面积很 小,抗拔能力绝大部分通过筋材与土体之间的相互 咬合来提供。故筋材与土的相对位移很小。通过反 复试算发现,界面接触单元设置与否对计算结果影 响不大。因此可不考虑筋材和土之间的相对位移, 即认为筋材和土位移完全协调<sup>[6]</sup>。

边界条件为:上部自由边界,左右两侧水平约 束,底部固定,顶部路面作用 20 kN/m 的均布交通 荷载。建立的有限元模型的网格划分如图 3 所示。



图 3 有限元模型的网格划分 Fig.3 Meshes generation of finite element model

### 3.3 计算采用的物理力学参数

加筋格宾筋材采用 Line 单元模拟,选择土工合成材料单元类型,在 Line 单元特性中设置筋材的抗拉强度和拉伸模量。参照英国国家独立试验室出具的关于双绞合六边形金属网的 British Board of Agrement(BBA)报告,考虑施工损伤、制造误差以及生物腐蚀对筋材长期抗拉性能的影响,取长期设计抗拉强度为 36 kN/m,相应的拉伸模量为 360 kN/m。根据相关的地质资料,各区域土体物理力学参数取值如表1所示。

表 1 土体的物理力学参数 Table 1 Physico-mechanical parameters of soil

	-		-		
介质名称	重度 /(kN•m <sup>-3)</sup>	弹性模量 /MPa	泊松比	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)
原状土	20	100	0.3	10	30
路基填料	20	100	0.3	0	35

### 3.4 计算方案

有限元强度折减法的本质是对组成结构的各重 材料进行强度折减,因此,加筋土结构强度折减法 应对加筋土填料和筋材的强度均进行折减。目前仅 能对填料的相关参数进行折减,对筋材这样的杆件 单元还没有合适的折减方法。因此,现有的有限元 强度折减法是将加筋土填料进行强度折减,而将筋 材对结构稳定性的贡献看作外荷载。

加拿大著名边坡稳定分析软件 Slope/w,正是将 筋材的贡献看作水平作用的点荷载。从理论分析可 知,仅对填料进行强度折减的加筋土结构有限元分 析方法,其所得安全系数应该和 Slope/w 的结果非 常接近。另外,与传统的极限平衡条分法相比,有 限元方法较复杂。对于广大工程设计人员,迫切需 要了解所进行的数值分析结果是否可靠,即需要一 个参考对象,以评估有限元计算结果的可靠性。鉴 于理论和实践的考虑,本文采用考虑筋材作用的极 限平衡条分法的计算结果作为有限元强度折减法数 值模拟计算结果的参照。

# 4 数值模拟结果及分析

### 4.1 极限平衡条分法计算结果

为对有限元强度折减法的结果进行合理评价, 本文采用加拿大 GeoStudio 公司的 Slope/w 软件计算 该加筋边坡的内部和外部安全系数,计算结果如 图 4 所示。内部安全系数为 1.354;外部安全系数为 1.318。





### 4.2 单元选型对计算结果的影响

为研究单元类型对计算结果的影响,将几何模型分别生成了4种不同的网格单元:三节点三角形单元(T3),六节点三角形单元(T6),4节点四边形单元(Q4),八节点四边形单元(Q8)。各单元类型的网格总数为800,最大迭代步为500,允许误差为0.001。不同类型网格单元的计算结果如表2和图5 所示。

表 2 不同单元类型的安全系数 Table 2 Factors of safety of different element types

类别	Slope/w (简化 Bishop 法)	有限元强度折减法				
		T3	T6	Q4	Q8	
内部	1.354	1.54	1.36	1.75	1.31	
外部	1.318	1.44	1.34	1.50	1.29	



由表 2 可知,采用 T3 和 Q4 单元所得的安全系数与简化 Bishop 法的误差均超过 5%;而 T6 和 Q8 的计算结果均非常接近简化 Bishop 法的计算结果。因此,建议在应用该方法计算边坡稳定分析时,应选用 6 节点以上的单元类型。

#### 4.3 筋材拉力分布和筋材拉断情况

在经典的极限平衡理论中,均假定各处筋材所 发挥的拉力相等。即当没有发生拔出破坏时,所有 筋材的拉力相等,均等于筋材的长期设计抗拉强度。 而实际上,各层筋材的拉力并不相等。采用有限元 强度折减法,得到的筋材上拉力的分布情况如图 6 所示。同时采用软件的后处理技术,得到筋材上屈 服单元的分布如图 7 所示。



图 6 筋材轴向力的分布情况(单位: kN) Fig.6 Tension distributions of reinforcements(unit: kN)



图 7 筋材屈服单元分布 Fig.7 Distribution of yield elements of reinforcements

该加筋土结构埋深 1.5 m 左右,筋材的内部破 坏必然从坡顶某个点开始,到坡脚处为止。分析中 为了节省计算费用和时间,设定了内部破裂面的搜 索范围,因此图 6 中下部 3 根筋材没有拉力显示。 在极限平衡状态下,筋材在破裂面上的点均处于屈 服状态,因此破裂面上的拉力基本相等。

众所周知,加筋土结构内部稳定分析的难点是 如何确定结构的内部破裂面。既有的研究成果表明, 加筋土结构的内部破裂面不仅与结构的布置有关, 还和筋材的力学特性有关。而通过试验模拟该破裂 面往往耗资不菲,而且试验结果的局限性很大。本 文采用有限元强度折减方法,得到令人满意的内部 破裂面。因此,可以尝试将该技术应用于复杂的加 筋土结构中,比如,高大的分台阶加筋土结构的内 部稳定分析。

#### 4.4 设计参数对加筋格宾组合结构全系数的影响

4.4.1 填料黏聚力和内摩擦角对安全系数的影响

为了定量地说明设计参数对安全系数的影响程 度<sup>[7]</sup>,分别取以下几种计算工况: 黏聚力 c = 0, 10, 20, 30, 40 kPa; 内摩擦角 $\varphi = 20^\circ$ , 24°, 28°, 32°, 36°, 40°, 44°, 48°。通过计算,分别得到黏聚力 和內摩擦角与安全系数的关系如图 8 所示,图中, 内部抗拉稳定是指筋材抗拉断稳定性,外部整体稳 定是指深层整体滑动稳定性,滑移稳定是指将加筋 土结构视为刚体,其沿着与地基接触面滑动的稳定 性。



Fig.8 Relationships between material parameter and factor of safety

由图 8(a)可知:当填料黏聚力由 0 增加到 40 kPa 时,其内部稳定安全系数由 1.264 增加到 1.866,且 具有良好的线性关系。由此可见,填料黏聚力对内 部稳定安全系数的影响很大,对外部整体稳定性的 安全系数和滑移稳定性的安全系数影响较小。黏聚 力越大,内部稳定性越好。

由图 8(b)可知: 当填土内摩擦角均值由 20°增加到 48°时,其内部稳定安全系数由 1.146 增加到 2.295,且具有良好的线性关系。其外部整体稳定安全系数由 1.263 增加到 1.726,先增大后保持不变,拐点为 28°。由此可见,内摩擦角对内部稳定性影响很大。

#### 4.4.2 其他因素对安全系数的影响

针对设计强度参数黏聚力 c = 0 和内摩擦角 $\varphi =$  35°时,分析了网面拉力、地震力、结构填土的重度、不同公路等级行车荷载、组合结构的加筋间距以及采 用不同的计算方法对安全系数的影响<sup>[8~10]</sup>。

从图 9 可以看出,当网面拉力由 10 kN/m 增加 到 80 kN/m 时,其内部稳定安全系数由 0.656 增加 到 1.638,且具有良好的幂函数关系。当网面拉力为



10~40 kN/m 时,其内部稳定安全系数和滑移稳定 安全系数均线性增长;当网面拉力为 50~70 kN/m 时,内部稳定安全系数增长趋势变缓,而滑移稳定 安全系数变化不大;当网面拉力大于 70 kN/m 时, 其内部稳定安全系数基本保持不变。由此可见,网 面拉力对内部稳定性和滑移稳定性影响很大,而对 外部整体稳定性影响很小。网面拉力越大,内部 稳定性越好,但网面拉力大于 70 kN/m 时,其内 部稳定安全系数基本保持不变。因此,设计网面 拉力为 50 kN/m 具有很好的科学性和合理性<sup>[8]</sup>。

从图 10 可以看出,当水平地震加速度峰值由 0.1g增加到 0.6g时,其内部稳定安全系数由 1.320 降低到 0.486,且具有良好的指数关系;外部整体稳 定安全系数由 1.564 降低到 0.688,且具有良好的指 数关系;滑移稳定安全系数由 2.592 降低到 0.247。 当水平地震加速度峰值为 0.15g时,其滑移稳定安 全系数小于 1.0,结构不安全。由此可见,地震力对 稳定安全系数影响很大,尤其是滑移稳定安全系数。 同时,也验证了该加筋格宾挡墙具有良好的抗震性 能,能够抵挡抗震设防烈度为 7度的地震。





Fig.10 Relation curves of horizontal seismic acceleration and factor of safety

从图 11 可以看出,当填土重度由 14 kN/m<sup>3</sup> 增 加到 24 kN/m<sup>3</sup> 时,其内部抗拉稳定安全系数由 1.448



图 11 填土重度与安全系数关系曲线 Fig.11 Relation curves of gravity density and factor of safety

降低到 1.241,外部整体稳定安全系数由 1.615 降低 到 1.522,滑移稳定安全系数由 1.429 增加到 1.526。 填土重度对稳定性安全系数的影响较小。重度越 大,内部抗拉稳定性和外部整体稳定性越差。

从图 12 可以看出,当汽车荷载由 0 增加到 25 kN/m<sup>2</sup> 时,其内部稳定安全系数由 1.395 降低到 1.299,外部整体稳定安全系数由 1.668 降低到 1.541,滑移稳定安全系数由 1.715 降低到 1.456。由此可见,汽车荷载对稳定性安全系数的影响也较小。汽车荷载越大,内部抗拉稳定性、外部整体稳定性 和滑移稳定性越差。



Fig.12 Relation curves of vehicle load and factor of safety

另外,上部绿色加筋的间距为 0.76 m,下部格 宾结构的加筋间距为 1.0 m 时,采用 Bishop 法计算 的内部抗拉稳定安全系数为 1.332,外部整体稳定安 全系数为 1.564,滑移稳定安全系数为 1.500;采用 Janbu 法计算的内部抗拉稳定安全系数为 1.240,外 部整体稳定安全系数为 1.363,滑移稳定安全系数为 1.500。由此可见,这 2 种计算方法得出的结果相差 不大,比较接近。若改变其间距,上部绿色加筋的 间距为 0.61 m,下部格宾结构的加筋间距为 0.5 m 时,内部稳定安全系数为 1.643,外部整体稳定安全 系数为 1.316,滑移稳定安全系数为 1.445。因此, 改变加筋间距,对内部稳定性的影响较大。

### 4.5 设计参数对墙体稳定性安全系数的影响

加筋格宾挡土墙墙体稳定性包括滑移、倾覆等 方面。结构填土的黏聚力 c、内摩擦角 φ、网面拉力 对墙体稳定性安全系数影响很小。而针对设计强度 参数黏聚力 c = 0 和内摩擦角 φ = 35°的情况,地震 力、结构填土的重度、不同公路等级行车荷载都会 对墙体稳定性可靠指标有一定的影响。

从图 13 可以看出,当水平地震加速度峰值由 0.1 g 增加到 0.6 g 时,其墙体滑移稳定安全系数由 4.838 降低到 0.712;墙体倾覆稳定安全系数由 9.206 降低到 1.236。当水平地震加速度峰值为 0.4 g 时, 墙体滑移稳定安全系数小于 1.0,结构不安全。由此 可见,地震力对墙体稳定安全系数影响很大<sup>[11]</sup>。





Fig.13 Relation curves of horizontal seismic acceleration and factor of safety of wall stability

从图 14,15 可以看出,当填土重度由 14 kN/m<sup>3</sup> 增加到 24 kN/m<sup>3</sup>时,墙体滑移稳定安全系数由 3.569 增加到 5.398,倾覆稳定安全系数由 6.570 增加到 10.373。可见填土重度对墙体倾覆稳定性影响较大, 重度越大,墙体稳定性就越好。当汽车荷载由 0 增 加到 25 kN/m<sup>2</sup>时,墙体滑移稳定安全系数由 5.480 降低到 4.706,墙体倾覆稳定安全系数由 11.277 降低 到 8.894。由此可见,汽车荷载对墙体倾覆稳定性影 响较大,汽车荷载越大,墙体稳定性就越差。



图 14 填土重度与墙体稳定安全系数关系曲线

Fig.14 Relation curves of gravity density and factor of safety of wall stability





# 5 结 论

采用有限元强度折减法对湖北大广北高速公路 兰溪互通一段加筋格宾陡坡的稳定性进行了评价, 通过分析不同的计算模型,得到的结论如下:

(1) 单元选型与有限元强度折减法的计算结果 有很大的关系。在实际工程中,应选用六节点以上 的单元类型。

(2) 采用有限元强度折减法得到的安全系数及 破裂面的位置与极限平衡条分法的结果非常吻合, 证明该技术可作为极限平衡条分法的有益补充,可 应用于加筋土边坡的稳定分析中。

(3) 对于设计规范中没有涉及到的加筋土结构 类型和规模(比如高度大于 12 m)等,可尝试采用该 技术确定加筋土结构的内部破裂面。

(4) 填料黏聚力对内部稳定安全系数的影响很 大,对外部整体稳定性和滑移稳定性安全系数影响 较小。填料内摩擦角均值由 20°增加到 48°时,结构 内部稳定安全系数由 1.146 增加到 2.295,且具有良 好的线性关系;外部整体稳定安全系数由 1.263 增 加到 1.726,先增大后保持不变,拐点为 28°。内摩 擦角对内部稳定性的影响很大。

(5) 网面拉力、地震力、结构填土的重度、不 同公路等级行车荷载都会对安全系数有一定的影 响,应结合实际工程进行合理地选取。

### 参考文献(References):

- 中华人民共和国行业标准编写组. JTG D30 2004 公路路基设计规 范[S]. 北京:人民交通出版社, 2004.(The Professional Standard Compilation Group of People's Republic of China. JTG D30 - 2004 Specifications for design of highway subgrades[S]. Beijing: China Communications Press, 2004.(in Chinese))
- [2] 中华人民共和国行业标准编写组. JTJ/T 019-98 公路土工合成材 料应用技术规范[S]. 北京:人民交通出版社, 1999.(The Professional

Standard Compilation Group of People's Republic of China. JTJ/T 019 – 98 Technical specifications for application of geosynthetics in highway[S]. Beijing: China Communications Press, 1999.(in Chinese))

- [3] DUNCAN J M, WRIGHT S G. Soil strength and slope stability[M]. New Jersey: John Wiley and Sons, Inc., 2005.
- [4] 郑颖人,张玉芳,赵尚毅,等. 有限元强度折减法在元磨高速公路 高边坡工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(21): 3 812 - 3 817.(ZHENG Yingren, ZHANG Yufang, ZHAO Shangyi, et al. Application of strength reduction FEM to Yuanjiang—Mohei expressway cut slope stability analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(21): 3 812 - 3 817.(in Chinese))
- [5] 蒋 鑫,凌建明,邱延峻.加筋土路基稳定性分析[J].重庆交通大 学学报(自然科学版),2007,26(5):80-83.(JIANG Xin,LING Jianming,QIU Yanjun. Stability analysis of embankment reinforced with geosynthetics[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science),2007,26(5):80-83.(in Chinese))
- [6] 李志勇. 陡坡路堤土工格栅加筋机制与合理铺设参数研究[J]. 岩 土力学, 2008, 29(4): 925 - 930.(LI Zhiyong. Study on reinforced mechanism and laid parameters of steep slope of highway embankment reinforced with geogrids[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(4): 925 - 930.(in Chinese))
- [7] 王 钊, 陆士强. 强度和变形参数的变化对土工有限元计算的影响[J]. 岩土力学, 2005, 26(12): 1 892 1 894.(WANG Zhao, LU Shiqiang. Effects of variation of strength and deformation parameters on calculation results of FEM for soil engineering[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(12): 1 892 1 894.(in Chinese))
- [8] 刘华北, LING H I. 土工格栅加筋挡土墙设计参数的弹塑性有限元 研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(5): 668 - 673.(LIU Huabei, LING H I. Elastoplastic finite element study for parameters of geogrid reinforced soil retaining wall[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(5): 668 - 673.(in Chinese))
- [9] 张鲁渝,郑颖人,赵尚毅,等. 有限元强度折减系数法计算土坡稳 定安全系数的精度研究[J]. 水利学报,2003,(1):21-27.(ZHANG Luyu, ZHENG Yingren, ZHAO Shangyi, et al. The feasibility study of swength reduction method with FEM for calculating safety factors of soil slope stability[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, (1): 21-27.(in Chinese))
- [10] 赵尚毅,郑颖人,时卫民,等.用有限元强度折减法求边坡稳定安 全系数[J]. 岩土工程学报,2002,24(3):343 - 346.(ZHAO Shangyi, ZHENG Yingren, SHI Weimin, et al. Analysis of safety factor of slope by strength reduction FEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(3): 343 - 346.(in Chinese))
- [11] 黄向京,王 维,刘 泽,等. 双绞合钢丝网加筋格宾挡土墙设计 方法研究[J]. 公路工程, 2009, 34(2): 10 - 15.(HUANG Xiangjing, WANG Wei, LIU Ze, et al. Design method and application of reinforced earth retaining wall with double twisted steel wire mesh and gabion[J]. Highway Engineering, 2009, 34(2): 10 - 15.(in Chinese))