

文章编号: 1002-0268 (2009) 10-0048-05

石笼挡墙在振压下破坏机理的 颗粒流模拟研究

张波¹, 陶连金¹, 孟云伟², 孙国富¹

(1. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100022; 2. 重庆交通科研设计院, 重庆 400067)

摘要: 基于颗粒流离散元理论, 对北京某山区公路采用的石笼挡墙建立 PFC^{2D}模型, 研究墙背土压力的分布规律; 在路面施工压实过程中石笼墙体的位移分布、破坏机理; 模拟石笼挡墙的破坏过程和破坏方式, 以及墙背土应力释放过程。通过模拟分析得出以下结论: 颗粒流离散元程序可以用于模拟挡墙结构物, 并特别适用与模拟钢丝网等柔性结构; 路基加压前后土压力分布规律与理论值基本相符; 在路基的振动压实过程中, 左侧石笼网最先达到抗拉强度而破坏, 墙体丧失整体稳定性而逐步塌陷, 形成堆积体, 在靠近挡墙 2 m 范围内路面轻微塌陷, 路基土在第一层石笼体位置以上浅层内形成滑动面。

关键词: 道路工程; 破坏机理; 颗粒流离散元; 石笼挡墙; PFC^{2D}

中图分类号: U416.1

文献标识码: A

Study of Failure Mechanism of Gabion Retaining Wall under Vibrating Compaction Using PFC

ZHANG Bo¹, TAO Lianjin¹, MENG Yunwei², SUN Guofu¹

(1. School of Civil and Architecture Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China;

2. Chongqing Communications Research & Design Institute, Chongqing 400067, China)

Abstract: The PFC^{2D} model of the gabion retaining wall of one mountainous highway in Beijing was built based on particle flow discrete element theory to study the distribution of soil-pressure on back of the wall, the displacement distribution and the failure mechanism of gabion retaining wall during road pavement compaction. The failure process, the failure mode and the process of stress releasing were simulated by the model. It is concluded by simulation that (1) PFC^{2D} can be used to simulate the structure of retaining wall, especially the flexible structure such as steel wire mesh; (2) the distribution of soil-pressure of subgrade before and after compaction agrees well with the theoretical values; (3) in the process of vibrating compaction, the tensile strength of the left-side of the gabion reaches the limit first and the gabion destructs, the wall loses the whole stability and collapses gradually and forms a deposit body, the pavement collapses slightly in about 2 m near the retaining wall and the sliding face forms in the shallow of the road bed upon the first-layer of the gabion.

Key words: road engineering; failure mechanism; particle flow discrete element; gabion retaining wall; PFC^{2D}

0 前言

通常所用的石笼结构体为长方形构造, 中间有隔

板隔开, 外部及隔板由双绞六边形铁丝网构成, 石笼网内填以粒径搭配合理并大于网孔的石料。石笼挡墙通过格宾网连接钢丝将一个独立的石笼网连接起来

收稿日期: 2008-12-31

项目基金: 北京市自然科学基金资助项目 (8062007), 北京工业大学研究生科技基金 (YKJ20072039)

作者简介: 张波 (1982-), 男, 山东滕州人, 博士生, 从事岩土及地下工程研究. (haibo@emails.bjut.edu.cn)

共同抵抗土压力, 目前主要根据传统的重力式挡土墙结构进行尺寸布置设计, 但其本身承受土压力能力远小于重力式挡土墙。国外对石笼挡墙的研究, 主要来自于石笼制造商, 其发表的刊物和工程手册指导石笼结构广泛应用于挡土结构、河道护岸等, 在美国主要有 3 大制造商: 内华达的 Terra Aqua Conservation; 加利福尼亚的 RTY 和纽约的 Maccaferri Gabions。英国的 Sogge 1974 年首次阐述了平面应力分析在石笼挡墙的研究中的适应性^[1], 1975 年 Rechar and Abbote 推导了应用于石笼网的非线性应力-应变弹塑性表达式, 并进行了有限元分析。国内石笼挡墙的应用还处于起步阶段, 主要用于河道护岸工程, 在模拟研究中重庆交通科研设计院的柴贺军、孟云伟等应用颗粒流离散元理论和模型试验分析了墙后土压力变化规律和墙体位移规律^[2]。

1 PFC^{2D}理论背景及在模拟石笼挡墙中的应用

PFC(Particle Flow Code) 程序, 是基于离散元理论, 研究圆形颗粒介质的运动及相互作用, 是专门用于模拟固体力学大变形问题和颗粒流动问题的计算方法。计算假设颗粒为圆形刚性体, 定义颗粒之间的接触性质(包括接触力、接触刚度等), 交替应用牛顿第二定律和力-位移定律, 在定义摩擦系数条件下, 通过能量耗散使整体达到新的平衡。在岩土工程应用中, 尤其是在研究非线性问题时, PFC 相对于 FLAC 和 UDEC 有独特的优势: 阻尼系数是无因次的且不随频率变化, 匀速运动体力接近于零时, 只有加速运动才存在阻尼; 颗粒与颗粒之间相互连接构成块体, 这些块体可以破坏分离, 因此可以有效模拟大变形问题^[3]。

通过定义颗粒大小和分布, 可以有效模拟土颗粒级配和填石料粒径, 并可以测量出达到平衡状态下的应力分布^[4]; 格宾网通过赋予颗粒间的连接刚度、接触刚度和抗压、剪切强度、定义其形状和柔性, 可研究渐进性破坏过程^[5-6]。在整个模拟过程中应用到 PFC 内嵌 fish 语言, 以达到应力测量和位移追踪效果^[7-8]。

2 石笼挡墙的 PFC^{2D}模拟研究

2.1 工程概况

北京某山区公路, 根据公路的环保要求, 在部分沿溪段布设不同层数的石笼挡墙, 如图 1 所示。挡墙每隔 6 m 为单程施工段, 施工顺序由坡脚到坡顶。填筑挡墙的片卵石的块径大于 15 cm, 施工中保证墙后回填碎石密实。石笼网的材料采用镀锌的热轧钢丝,

含锌量 220~270 kg/m², 延伸率 ≤10%, 抗拉强度 >400 Pa/m²。

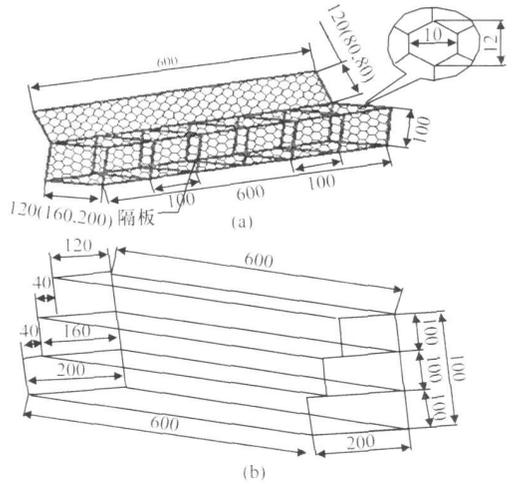


图 1 石笼的结构形式 (单位: cm)

Fig 1 The structure of gabion (unit: cm)

2.2 PFC^{2D}模型建立

根据工程实际情况, 选取宽度 13 m, 高度 9 m 为模拟断面, 其中高度 0~5 m 和宽度 10~13 m 范围内为基础土体, 整体模型如图 2 所示。四边由 wall 单元构成的墙体组成, 为减少边界效应, 墙的摩擦系数与颗粒间的摩擦系数相同, 且刚度的选取与颗粒间自身接触刚度相适应。在整个模型建立前, 建立如图 3 (a) 所示的地基土模型 (未建立石笼挡墙和路基填方土) 并计算达到应力平衡。分别在 $x = 11.5$ 、 10.5 m 处, 高度每隔 0.5 m 布设一应力圆, 测量 x 和 y 方向上的正应力, 如图 3 (b) 所示。经计算得出土压力值与土自重作用下的压力值吻合, 且 y 方向平均应力始终大于 x 方向平均应力, 侧向系数 0.42~0.94, 如表 1 所示。

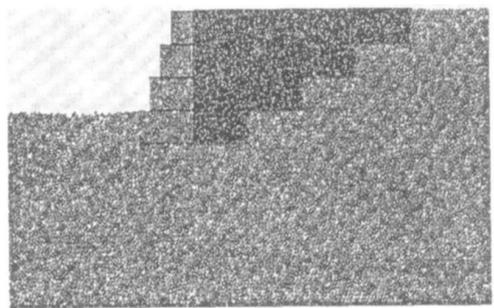


图 2 石笼挡墙的结构模型

Fig 2 The structural model of gabion retaining wall

石笼模型每层高度 1 m, 两层之间设 0.4 m 的错台, 各层石笼模型建好后, 对墙背土体反复加压, 在模拟路面振动荷载时, 用 162 个即赋予点连接刚度又

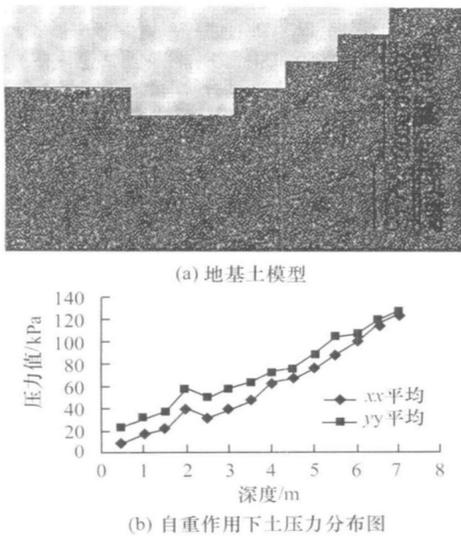


图 3 应力圆的位置和应力分布图

Fig. 3 The position of stress circle and stress pattern

表 1 侧压力系数随深度变化值

Tab 1 The values of lateral pressure coefficients in different depths

测量深度/m	1	2	3	4	5	6	7
侧压力系数	0.42	0.43	0.4	0.84	0.87	0.91	0.94

赋予平行连接刚度的颗粒模拟加压机器，通过 PFC 中的内嵌 fish 语言，循环对加压机器定义向下的速度，循环加压 20 次，模拟现场路面的振动荷载。

颗粒体细观参数的选取：结合填土物理特性试验得到的数据和其他文献关于类似工程的分析^[9-11]，以工程现场测取的位移为基准，不断试算得到相应的颗粒参数^[12-14]。具体的取值见表 2。

2.3 模拟结果分析

(1) 加压之前

在石笼修筑过程中，由于背后密实填土和石笼填料的重力作用，底部石笼网最先产生变形，最大变形

表 2 计算模型参数汇总表

Tab 2 Numerical parameters for calculation model

参数名称	颗粒数	半径/m	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	摩擦 系数	法向(切向) 刚度/($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	接触连接法向 (切向)强度/N	平行连接法向 (切向)刚度/($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)
基础土层	8 100	0.05~0.075	2 000	0.4	5×10^8	1×10^5	0
压实土层	25 000	0.005~0.015	2 300	0.2	1×10^6	1×10^4	0
石笼网	3 840	0.002 5	20	0.25	3×10^8	3×10^4	6×10^4
石笼填料	362	0.01~0.05	2 600	0.25	3×10^7	1×10^4	0
压实颗粒	162	0.025	2 000	0.4	1×10^6	1×10^{12}	1×10^{15}

在 4.4 cm，但变形在钢丝的柔度范围内，不会造成断裂破坏。整个模型建成后，各层石笼体颗粒的平均位移如图 4 所示。可以看出，第 1、3、4 层石笼体在挡土墙背后土压力作用下，位移为负值，且第 1 层受到最大土压力作用因而位移最大，约 4.2 mm。由于石笼的重力作用，石笼的第 2 层沿 x 方向的位移均值为正。

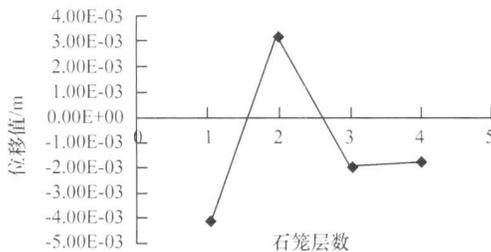


图 4 石笼平均位移图

Fig. 4 The average displacement of gabion

相吻合，在深度 2 m 以下，由于挡墙与土的相互作用，使得水平压应力分量增加，而远大于竖向压应力，整个范围内侧向压力系数平均大于 1，且随深度增加而线性减少，且在深度 2.5 m 处，在第 2 层石笼的压力作用下产生增大的趋势。

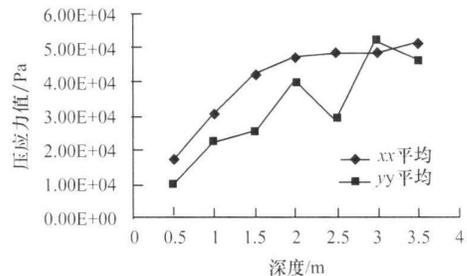


图 5 墙背土压力分布图

Fig. 5 The distribution of wall back soil pressure

(2) 加压之后

墙背土处于高应力状态，石笼网由于填料的挤压而产生拉应力。墙体 x 负方向位移持续增大，在计算 1 000 步时，石笼网在填料挤压作用下随着颗粒形状弯曲变形，在计算 5 000 步时左侧石笼网达到强度极限值而最先破坏，造成石笼挡墙的整体性丧失，石

加压之前，在墙背填土 0.5~1.5 m 范围内铺设应力圆，测取墙背土压力。图 5 结果显示，在深度 2 m 范围内，土压力值基本与在自重作用下的压应力值

笼填料颗粒开始分离掉落。墙背土开始应力释放, 图 6、7 分别描述了应力释放后的土压力分布和侧向压力系数分布情况, 可知侧向压力系数 0.85~ 1.00。随着应力释放在路基内逐渐形成滑动面, 靠近石笼挡墙一侧约 2 m 范围内的路面产生塌陷区, 如图 8 所示。由于基础台阶的自稳作用, 滑动面分布在第 1 层石笼以上, 靠近地面, 减少了对整个路基的破坏。破坏后填料颗粒在坡脚形成范围约 4.2 m² 的形状不规则的堆积体。在墙体破坏的整个过程中, 墙背土压应力一直处于释放状态, 图 9 展示了破坏的全过程。

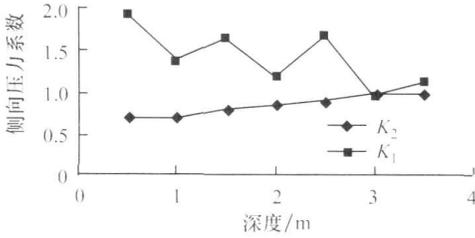


图 6 应力释放前后侧向压力系数变化图
Fig 6 Lateral soil-press coefficients before and after stress releasing

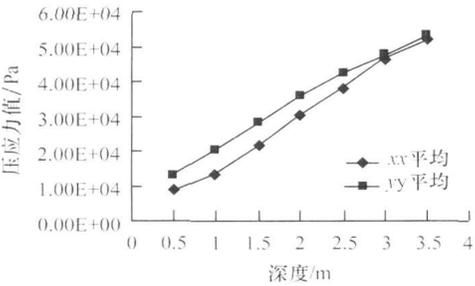


图 7 应力释放后土压力分布图

Fig 7 Distribution of soil-pressure after stress releasing

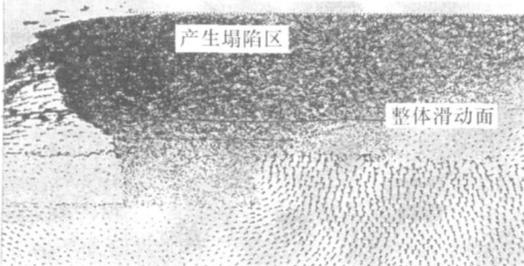


图 8 位移分布图

Fig 8 Distribution of displacement

(3) 不同振压荷载下力学效应比较分析

通过一次性定义模拟压路机器的颗粒向下的速度模拟静力荷载, 结果显示: 平衡时石笼墙体的左侧石笼网由于土的侧向压力作用而最先受拉破坏, 但破坏程度要小于图 9 所示的同步计算的结果。同时也通过赋予模拟压路机器的颗粒不同的速度来模拟不同的振

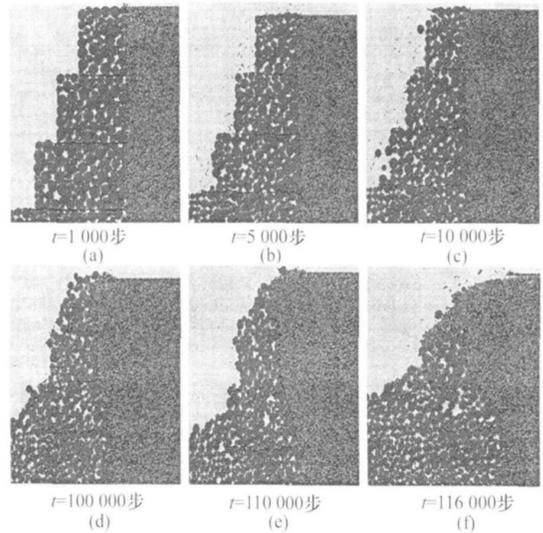


图 9 石笼挡墙的破坏全过程

Fig 9 Failure process of gabion retaining wall

动荷载。结果显示, 当振动荷载较大时, 石笼墙体的破坏时间提前, 破坏程度加大, 墙后土压力的释放率增加, 但对不同的振动压实荷载下, 墙背土体在计算平衡后的侧向压力系数保持在比较稳定的状态。

3 结论

基于颗粒离散元理论, 本文对石笼挡墙的施工过程以及在振动压力作用下石笼挡墙的破坏机理进行了数值模拟分析。在石笼挡墙修筑中, 墙体在土压力作用下产生负方向位移, 仅第 2 层石笼的位移由于上部石笼的压力作用表现为正值; 墙背土压力的分布规律是土体自重和石笼挡墙挤压共同作用下的结果, 土压力的分布与侧向压力系数的变化与石笼墙体的位移相互吻合。振压作用下, 墙背土体达到较高的应力水平, 石笼墙体负方向产生较大位移, 左侧格宾网最先达到抗拉强度而破坏, 石笼失去整体性, 颗粒逐步塌落。墙背土开始应力释放, 形成明显滑动面。

颗粒离散元法可以较好的再现石笼挡墙变形破坏过程和土应力释放过程, 对从微观角度认识岩土体的应力和变形破坏机制有重要作用。但目前对材料细观和宏观性质的关系还处于研究中, 所以在采用颗粒离散元法的系数选取中, 经验判断和试验计算还是主要的方法和依据, 对定量研究真实岩土体的应力位移等性质还处于发展阶段, 但对于应力变化规律和破坏机制的分析还是可取的。

参考文献:

References:

[1] SOGGE R L Finite Element Analysis of Anchored Bulkhead

- Behavior [D]. USA: University of Arizona, 1974.
- [2] 柴贺军, 孟云伟, 贾学明. 柔性石笼挡墙土压力的 PFC^{2D}数值模拟 [J]. 公路交通科技, 2007, 24 (5): 48-51.
CHAI Hejun, MENG Yunwei, JIA Xueming. PFC^{2D}Numerical Simulation on Earth Stress of Flexible Gabion Retaining Wall [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24 (5): 48-51.
- [3] 曾庆有, 周健. 不同墙体位移方式下被动土压力的颗粒流模拟 [J]. 岩土力学, 2005, 26 (增刊): 43-46.
ZENG Qingyou, ZHOU Jian. Analysis of Passive Earth Pressure Due to Various Wall Movement by Particle Flow Code (2D) [J]. Rock Mechanics, 2005, 26 (sup): 43-46.
- [4] 童韬, 孟云伟, 贾学明, 等. 石笼挡土墙在山区公路工程中的应用 [J]. 公路交通技术, 2007, 24 (2): 19-21.
TONG Tao, MENG Yunwei, JIA Xueming, et al. Application of Gabion Retaining Wall in Highway Project in Mountainous Areas [J]. Technology of Highway and Transportation, 2007, 24 (2): 19-21.
- [5] HAZARD J F, YOUNG R P. Simulating Acoustic Emissions in Bonded-particles Models of Rock [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37 (5): 867-872.
- [6] 柴贺军, 胡元鑫, 黄德长, 等. 石笼支挡结构在巫十路的工程应用 [J]. 公路交通科技, 2007, 24 (9): 19-24.
CHAI Hejun, HU Yuanxin, HUANG Dechang, et al. Application of Gabion Retaining Wall in Wuxi-Shiyan Highway [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24 (9): 19-24.
- [7] 周健, 池永. 土的工程力学性质的颗粒流模拟 [J]. 固体力学学报, 2004, 25 (4): 377-382.
ZHOU Jian, CHI Yong. Simulating Soil Properties by Particle Flow Code [J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2004, 25 (4): 377-382.
- [8] 徐泳, 孙其诚, 张凌, 等. 颗粒离散元研究进展 [J]. 力学进展, 2003, 33 (2): 251-261.
XU Yong, SUN Qicheng, ZHANG Ling, et al. Advances in Particle Discrete Element Methods [J]. Advances in Mechanics, 2003, 33 (2): 251-261.
- [9] 黄世武, 刘明维. 以土固土路堑边坡柔性支护技术有限元极限分析研究 [J]. 公路交通科技, 2009, 26 (3): 54-58.
HUANG Shiwu, LIU Mingwei. Study on the Cutting Slope Flexible Support Technology of Fixing Soil with Soil with Finite Element Limit Analysis [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26 (3): 54-58.
- [10] 汪成兵. 软弱破碎隧道围岩渐进性破坏机理研究 [D]. 上海: 同济大学, 2007.
WANG Chengbing. Study on the Progressive Failure Mechanism of the Surrounding Rock of Tunnel Constructed in Soft Rock [D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [11] Itasca Consulting Group. PFC^{2D}Theory and Background [M]. Minneapolis, Minnesota: Itasca Consulting Group, 1999.
- [12] CUNDALL P A. Distinct Element Methods of Rock and Soil Structure [C]. // Analytical & Computational Methods in Engineering Rock Mechanics London: George Allen and Unwin, 1987: 129-163.
- [13] CUNDALL P A, STRACK O D L. A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies [J]. Geotechnique, 1979, 29 (1): 47-65.
- [14] 周健, 贾敏才. 土工细观模型试验与数值模拟 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
ZHOU Jian, JIA Mincai. Geotechnical Microscopic Model Test and Numerical Simulation [M]. Beijing: Science Press, 2008.

(上接第 47 页)

- Research Institute of Highway of Ministry of Communications. Highway Manual of Impact Compaction Technology [M]. Beijing: China Communications Press, 2006.
- [7] 中华人民共和国交通部. JTJ073.1-2001 公路水泥混凝土路面养护技术规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
P. R. China Ministry of Communications. JTJ073.1-2001 Technical Specifications of Cement Concrete Pavement Maintenance for Highway [S]. Beijing: China Communications Press, 2001.
- [8] HALL K T, CORREA C E, CARPENTER S H, et al. Rehabilitation Strategies for Highway pavement [R]. Washington, D. C.: TRB's National Cooperative Highway Research Program, 2001.
- [9] KUO C M. Effective Temperature Differential in Concrete Pavements [J]. Journal of Transportation Engineering, 1998, 124 (2): 112-116.
- [10] 黄仰贤. 路面分析与设计 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1998.
HUANG Yangxian. Pavement Analysis and Design [M]. Beijing: China Communications Press, 1998.