



基于单位力法的内河架空直立式码头 三维空间结构计算中作用效应组合分析*

刘明维^{1,2}, 舒丹^{1,2}, 吴林键^{1,2}, 度筱葭^{1,2}, 沈立龙^{1,2}, 李鹏飞^{1,2}

(1. 重庆交通大学国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074;

2. 重庆交通大学水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074)

摘要: 基于单位力法, 计算得到内河架空直立式码头三维结构模型在多种工况条件下各主要受力构件的内力结果, 并经 MATLAB 编程进行组合、搜索, 最终将内河架空直立式码头三维模型中原本可能出现的 90 177 536 种主要作用效应组合简化到 14 种, 大大减少了计算工作量, 研究成果可为内河架空直立式码头的结构计算与分析提供参考。

关键词: 单位力法; 内河架空直立式码头; 三维模型; 作用效应组合

中图分类号: U 656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)10-0047-06

Analysis of effect combinations in 3D structure of vertical-faced wharfs in inland rivers based on unit force method

LIU Ming-wei^{1,2}, SHU Dan^{1,2}, WU Lin-jian^{1,2}, TUO You-jia^{1,2}, SHEN Li-long^{1,2}, LI Peng-fei^{1,2}

(1. National Inland Waterway Regulation Engineering Research Center, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Key Laboratory of Hydraulic & Waterway Engineering of the Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Based on the unit force method, this paper gets the internal force results of each main force support component of one inland vertical-faced wharf under calculating the action of a variety of conditions of the wharf's three dimensional structure model, and by the combination and searching for the force results through MATLAB program, eventually 90 177 536 kinds of main effect combinations may appeared in 3D structure of vertical-faced wharfs in inland rivers are simplified to 14 kinds. This method and thinking greatly reduces the calculation workload. It can be applied for structure's calculating and analyzing in vertical-faced wharfs in inland rivers.

Keywords: unit force method; inland vertical-faced wharf; three dimensional model; effect combinations

内河架空直立式码头结构主要是由面板、纵横梁、纵横撑、立柱、靠船构件以及较大直径的桩基等主要构件共同组合而成的三维空间框架式结构。为适应内河大幅度变化的水位情况, 该结构通常采用分层系缆形式^[1-4]。由于这种框架结构内部构件繁多且各构件的受力形式十分复杂^[5-6], 因此, 寻求各主要受力构件在控制内力下的最不利作用效应组合情况是研究大水位差直立式结构所需解决的关键技术问题。

王多垠等^[7]以重庆寸滩架空直立式结构为例, 运用单位力法对架空直立式码头结构二维平面模型进行有限元分析、计算、统计, 最终将原本可能出现的 1 344 种作用效应组合情况简化到了最不利的 14 种, 大大减少了计算工作量, 值得借鉴, 但其在二维平面模型为基础获得的作用效应组合结果与实际的三维结构必然有差异, 尤其是对堆货荷载和门机荷载的简化模式将对计算结果造成影响。刘颖等^[8]以某新型架空直立式码头为例,

收稿日期: 2014-02-24

*基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目 (2012BAB05B00)

作者简介: 刘明维 (1972—), 男, 博士, 教授, 主要从事港口工程计算理论及岩土工程数值计算方面的科研及教学工作。

经类似方法计算得出该码头结构的最不利作用效应组合结果。在计算过程中，将作用于码头面上的堆货荷载简化为在横、纵梁两个方向的线性均布荷载，并未考虑到面荷载的实际传递特性。因此，要全面分析各种作用组合下内河架空直立式码头各主要构件的实际受力状况，研究三维空间结构基础上的作用效应组合十分必要。

本文在已有研究成果的基础上，运用单位力法对内河架空直立式结构三维空间模型进行有限元计算，并对各种可能出现的工况条件下结构中重要构件的作用效应组合进行统计分析，最终得到各构件控制内力对应的最不利作用效应组合情况，研究成果可为内河架空直立式码头的结构计算与分析提供参考。

1 单位力法

单位力是从各种荷载当中所抽取出来的最简单、最基本的荷载元素。在实际问题当中，只要把单位力作用下结构的内力变化规律掌握清楚之后，根据叠加原理，就能够得到结构在不同类型、不同大小外荷载作用下的内力机制以及最不利荷载组合情况。正是由于单位力法拥有上述优势，因此其在土木、水利工程^[6,9-10]、机械工艺^[11]、力学^[12]、运动学^[13-14]等多方面得以广泛应用。

由于架空直立式码头结构构件及荷载类型繁多，针对不同构件进行不同荷载组合的工作量巨大，因此无法采用传统的逐个组合方式进行设计计算。

针对以上问题，可将单位力法的思路引入到为该结构寻求最不利作用效应组合的计算上来。本文假设将各种不同类型的荷载工况（包括结构自重、船舶撞击力和系缆力、堆货荷载、门机荷载等），以单位力的形式分别作用于码头三维模型相应的位置上，对该结构进行有限元分析，计算得到在单位力作用下，结构各构件的内力值，而后通过内河架空直立式码头三维空间结构构件最不利作用效应组合算法，将单位力作用下的内力值进行组合叠加，找出各构件的最不利作用效应组合情况。

2 实例分析

2.1 作用效应组合原则

根据 JTS 167-1—2010 《高桩码头设计与施工规范》^[15] 规定，高桩码头结构应按照承载能力极限状态中持久状况作用效应的持久组合，短暂状况作用效应的短暂组合；正常使用极限状态中持久状况作用效应的标准组合，频遇组合以及准永久组合等情况来对作用在结构上的各荷载工况进行组合。

2.2 工程概况

以重庆某架空直立式码头为例，运用单位力法对该码头三维空间结构的作用效应组合进行计算分析。码头结构形式断面见图 1。面板采用钢筋混凝土叠合板，其下横梁截面形式为倒 T 型，边梁、轨道梁和一般纵梁均采用矩形截面，横梁以下为立柱、纵横撑、桩基等。其中立柱为直径 1.4 m 的圆柱体，该码头结构共设 3 排纵、横撑，其下两排为钢撑，最上一排为钢筋混凝土撑，码头基桩采用大直径嵌岩灌注桩，其中前排桩直径为 2.2 m，后排桩直径为 2.0 m，其外设置钢护筒；前方桩台总宽 30 m，共设 6 层系缆，每层系缆上设置 450 kN 系船柱，码头前沿设置钢筋混凝土、钢组合靠船构件，其上安装 DA-A500H 型橡胶护舷。

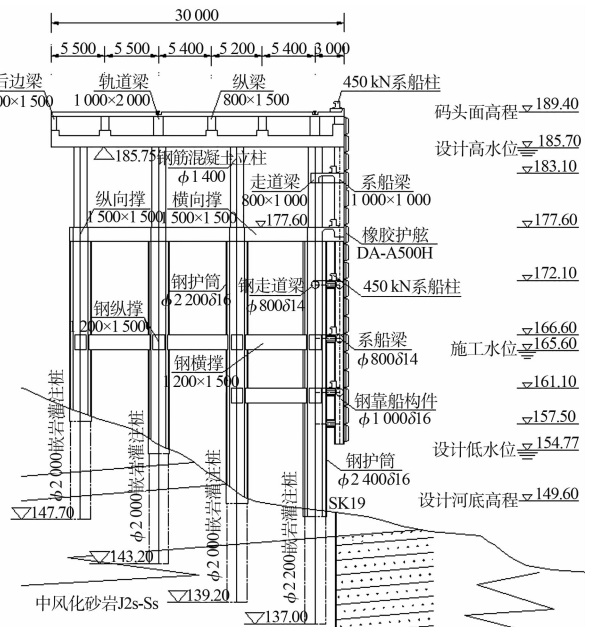


图 1 某内河架空直立式码头断面

2.3 三维有限元模型建立

根据码头的结构形式以及受力特征, 可将其简化为三维空间刚架模型进行计算。采用通用有限元分析软件 MIDAS, 建立码头结构的三维空间有限元模型, 计算得到各主要受力构件的内力值大小。在建模过程中, 轨道梁、纵梁、横梁、靠船梁、纵横撑、立柱、靠船构件、桩基等采用空间等截面弹性梁单元, 面板则采用薄板单元, 边界条件根据假想嵌固点的原理, 考虑将桩基底部进行固结处理。本文基于单位力法, 取该内河架空直立式码头的典型结构段进行有限元分析, 该结构段中总共包含四跨五榀排架。码头结构的三维有限元计算模型如图 2 所示。

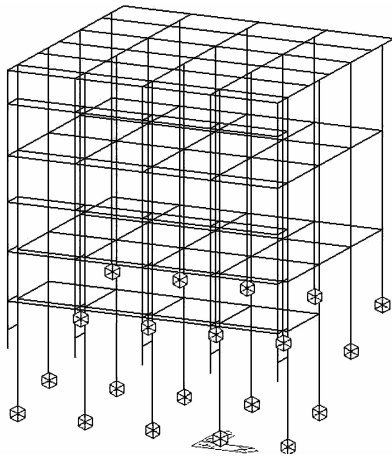


图 2 某码头结构段三维有限元模型

2.4 作用荷载

2.4.1 永久荷载

结构物的永久荷载应包括各个构件的自重, 取钢筋混凝土密度 2.5 t/m^3 , 混凝土密度 2.4 t/m^3 , 钢材密度 7.8 t/m^3 , 通过在 MIDAS 中定义各构件的材料、截面参数来确定结构永久荷载的大小。

2.4.2 可变荷载

1) 船舶荷载。船舶荷载主要考虑撞击力和系缆力两部分。其中, 撞击力为 $1\ 000 \text{ kN}$, 相应的撞击力矩为 $845 \text{ kN}\cdot\text{m}$; 系缆力大小为 436 kN 。

2) 门机荷载。考虑 2 台门机并机作业 (相距 1.5 m)。每台门机的轨距为 16 m , 轮距 0.9 m , 支腿间距 17.8 m , 共 4 个支腿, 每条支腿下 8 个轮,

共 32 个轮, 其中最大轮压力为 250 kN 。

3) 堆货荷载。堆货荷载为 30 kPa 的均布面荷载。

2.5 计算工况

2.5.1 永久作用

按结构物自重考虑为 1 种工况。

2.5.2 可变作用

1) 船舶荷载。如图 3、4 所示, 该结构共设 6 层系缆, 单排架中考虑 8 个典型位置承受撞击力, 将船舶荷载以单位集中力形式施加到各个力的作用节点上。根据内河架空直立式码头的三维模型可知, 系缆力共 18 种工况, 如图 3 中 XLL 所示; 撞击力共 24 种工况, 如图 4 中 ZJL 所示; 无撞击力、系缆力时为 1 种工况, 故共计 43 种计算工况。

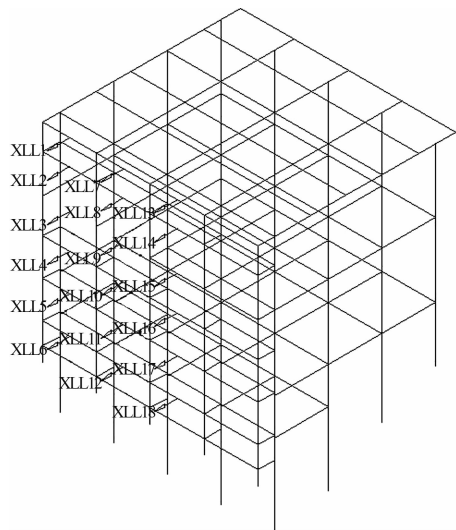


图 3 系缆力计算工况

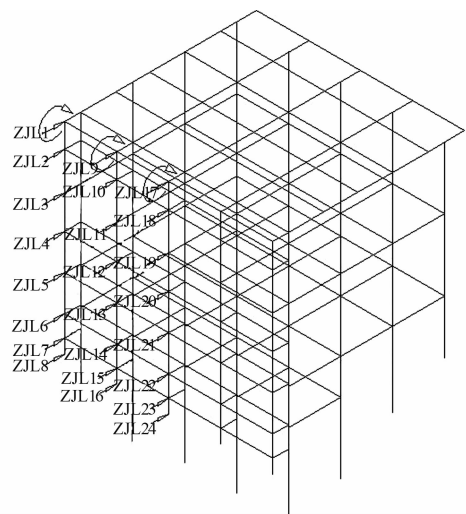


图 4 撞击力计算工况

2) 门机荷载。考虑门机荷载工况时,将2台门机并行作业的情况看做1种工况,在有限元分析软件中通过定义移动荷载的方式来模拟门机荷载的作用情况。此外,当无门机作用时,也应算作1种工况。因此,内河架空直立式码头三维模型中的门机荷载计算工况共2种。

3) 堆货荷载。在内河架空直立式码头结构纵、横梁相互交错所形成的梁格体系中,将堆货荷载以单位均布面荷载的形式施加到每个梁格上(图5)。

由图5可知,每个梁格上所受单位均布面荷载即为1种工况,无堆货也算作1种工况,故在码

头三维模型中,根据排列组合原则,堆货的工况数量如表1所示。

岸侧			
堆货16	堆货11	堆货6	堆货1
堆货17	堆货12	堆货7	堆货2
堆货18	堆货13	堆货8	堆货3
堆货19	堆货14	堆货9	堆货4
堆货20	堆货15	堆货10	堆货5
江侧			

图5 堆货计算工况

表1 堆货计算工况

无堆货	堆1格	堆2格	堆3格	堆4格	堆5格	堆6格	堆7格	堆8格	堆9格	堆10格
1	20	190	1 140	4 845	15 504	38 760	77 520	125 970	167 960	184 756
堆11格	堆12格	堆13格	堆14格	堆15格	堆16格	堆17格	堆18格	堆19格	堆20格	总计
167 960	125 970	77 520	38 760	15 504	4 845	1 140	190	20	1	1 048 576

2.6 作用效应组合

按照内河架空直立式码头整体结构中各主要受力构件进行分类,分析各构件可能出现的不同作用效应组合,从中找出最不利工况。永久荷载将参与到每一种作用效应组合当中,可变荷载则应该按照结构物的实际受力情况进行组合分析。各构件作用效应组合方法如图6所示。

将上述组合结果进行统计整理,得到内河架空直立式码头三维模型的作用效应组合情况,结果如表2所示。

表2 作用效应组合总数

自重	船舶	门机	堆货	组合情况
1	43	2	1 048 576	90 177 536

可以看出,内河架空直立式码头三维模型中最终可能将出现的组合数量为90 177 536种。

2.7 组合结果

根据内河架空直立式码头三维空间结构构件最不利作用效应组合的计算原理,运用MATLAB编程,将单位力法计算所得到的各主要构件的内力值导入其中,对各不同工况作用下的构件内力值进行组合,总共计算内河架空直立式码头三维模型中原本可能分别出现的90 177 536种作用效应组合情况,从中搜索得出各个重要构件(包括轨道梁、横梁、立柱、前排桩以及后排桩)的最不利内力(即构件的控制内力)大小,并记录其对应的作用效应组合情况。

如表3所示,为内河架空直立式码头三维模

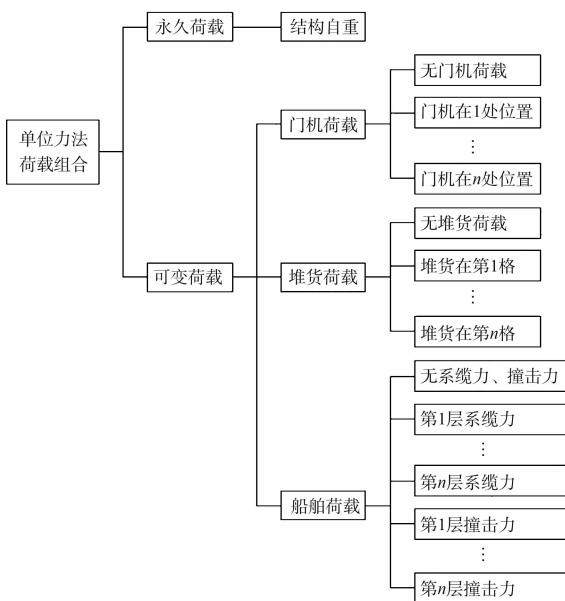


图6 作用效应组合方法

型中各主要受力构件控制内力的 14 种作用效应组合情况 (总共有 15 种情况, 其中后排桩基和立柱的最大轴力处所对应的结果一致, 故只有 14 种情况相互独立)。

表 3 作用效应组合结果

构架名称	计算项目	计算值大小	可变荷载最不利组合
轨道梁	最大弯矩绝对值	1 909.17 kN·m	堆货 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,15,16,18,19,20 格 + 撞击力 1 + 门机荷载
	最大剪力绝对值	1 502.52 kN	堆货 2,3,4,6,7,8,11,15,16,17,18,19,20 格 + 撞击力 1 + 门机荷载
	最大轴力绝对值	431.27 kN	堆货 1,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15 格 + 撞击力 17 + 门机荷载
横梁	最大弯矩绝对值	4 347.95 kN·m	堆货 2,3,7,8,12,13,19,20 格 + 系缆力 1 + 门机荷载
	最大剪力绝对值	2 078.04 kN	堆货 1,2,3,6,7,8,11,12,13,16,17,18 格 + 撞击力 17 + 门机荷载
	最大轴力绝对值	890.67 kN	堆货 2,3,4,5,8,15,19,20 格 + 撞击力 1 + 门机荷载
立柱	最大弯矩绝对值	915.59 kN·m	堆货 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,13,14,15 格 + 撞击力 2 + 门机荷载
	最大剪力绝对值	353.56 kN	堆货 3,4,7,8,9,10,12,13,14,15,18,19 格 + 撞击力 18 + 门机荷载
	最大轴力绝对值	4 738.604 kN	堆货 1,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20 格 + 撞击力 1 + 门机荷载
前排桩	最大弯矩绝对值	2 806.64 kN·m	堆货 1,5,6,10,11,16,17 格 + 撞击力 8 + 门机荷载
	最大剪力绝对值	960.15 kN	堆货 2,3,4,5,7,8,9,10,12,13,14,15,16,17,19,20 格 + 撞击力 24 + 门机荷载
	最大轴力绝对值	8 644.84 kN	堆货 3,4,5,8,9,10,15 格 + 撞击力 8 + 门机荷载
后排桩	最大弯矩绝对值	939.13 kN·m	堆货 2,3,4,6,7,8,11,12,13,16,17 格 + 撞击力 5 + 门机荷载
	最大剪力绝对值	223.613 kN	堆货 1,2,3,10,15,19,20 格 + 撞击力 8 + 门机荷载
	最大轴力绝对值	6 909.37 kN	堆货 1,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20 格 + 撞击力 1 + 门机荷载

3 结论

1) 内河架空直立式码头的的作用效应组合分析过程较一般形式的高桩码头结构更为复杂。

2) 对于船舶荷载, 前排桩在低水位船舶荷载作用下, 出现最不利内力情况 (撞击力 8、24), 而其余构件从总体上看, 在高水位船舶荷载作用下, 构件出现最不利的情况较低水位多。此外, 尽管系缆力在数值上要小于撞击力, 但其在该结构的某些构件计算中仍然起着主导可变的作用, 如高水位系缆力对横梁的弯矩值起着重要作用, 这一规律在设计计算过程中不应忽略。

3) 对于堆货荷载, 在各构件各控制内力对应的的作用效应组合当中都起着重要作用, 在设计过程中不可忽略。

4) 算例中, 立柱与后排桩基的最大轴力对应的的作用效应组合相同。

5) 从各个主要受力构件的最大内力值中可以看出, 轨道梁和横梁以承受弯矩为主, 立柱、前后排桩基以承受轴力为主, 所述计算结果与理论分析具有良好的一致性。

参考文献:

- [1] 虞杨波, 王多垠, 刘作飞, 等. 大水位差架空直立式码头平面框架结构水平承载力分析[J]. 水运工程, 2011(1): 150-157.
- [2] 王多垠. 重庆港寸滩集装箱码头建设关键技术研究分析报告[R]. 重庆: 重庆交通大学, 2005.
- [3] 张华平, 王多垠, 虞杨波. 大水位差架空直立式全直桩框架码头在水平撞击力作用下的破坏模式研究[J]. 水运工程, 2009(8): 62-67.
- [4] 谭伦, 王多垠, 温焰清. 大水位差架空直立式码头连续排架结构的水流作用研究[J]. 港工技术, 2011(6): 32-34.
- [5] 刘作飞, 王多垠, 吴玉林. 内河大水位差框架码头结构施

工过程三维仿真分析[J]. 水运工程, 2009(2): 106-109.

[6] 黄建勇, 王多垠. 内河架空直立式集装箱码头结构计算模型探讨[J]. 水道港口, 2008, 29(1): 59-62.

[7] 王多垠, 石兴勇, 丁德斌, 等. 内河架空直立式集装箱码头结构计算中的作用效应组合探讨[J]. 中国港湾建设, 2005(4): 33-35.

[8] 刘颖, 沈正连, 王多银, 等. 三峡成库后直立式码头结构作用效应组合研究[J]. 水运工程, 2012(11): 73-78.

[9] 李爱群, 程文灏. 高层建筑双肢剪力墙的简化计算[J]. 1991(5): 52-57.

[10] 楼继民, 刘礼华, 魏晓斌, 等. 单位力法计算弧形闸门的

的扭转问题[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2003(5): 35-37.

[11] 虎跃生, 刘光宇. 管材压扁的回弹分析研究[J]. 2000(4): 17-19.

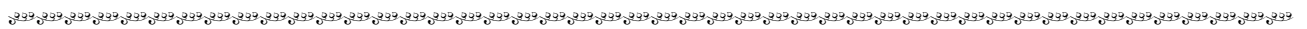
[12] 陈祖平, 陈式慧. 锥面的冰荷载[J]. 1999(6): 82-92.

[13] 李力夫. 单位力法在运动学中的应用[J]. 长沙大学学报, 1997(2): 31-35.

[14] 杜玉成. 剪力对梁挠度影响的定量分析[J]. 济源职业技术学院学报, 2005, 4(1): 11-12.

[15] JTS 167-1—2010 高桩码头设计与施工规范[S].

(本文编辑 郭雪珍)



(上接第 38 页)

始快速膨胀阶段耗时 6 d; 细颗粒含量 35% ~ 45% 的土体模型, 初始最大膨胀速率最大为 2 mm/d, 该阶段耗时约 9 d, 且到第 21 d 后才基本徘徊在 0 mm/d 附近。

3) 由港池开挖出来的弃料, 其最终膨胀量较小, 且其膨胀性能对细颗粒含量不敏感, 对于不同细颗粒含量的土体模型, 其最终膨胀量均为 9 mm, 满足回填料细颗粒含量小于 20% 其膨胀量不应大于 10 mm 和细颗粒含量为 35% ~ 45% 其膨胀量不应大于 15 mm 的工程要求。

参考文献:

[1] Seco A, Ramirez F, Miqueleiz I, et al. Stabilization of expansive soils for use in construction [J]. Applied Clay Science, 2011(3): 348-352.

[2] 孔令伟, 郭爱国, 赵颖文, 等. 荆门膨胀土的水稳定性及其力学效应[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(6): 727-732.

[3] 郭爱国, 刘观仕, 孔令伟, 等. 高速公路建设中膨胀土特

性的试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(3): 397-406.

[4] 袁俊平, 陈剑. 膨胀土单向浸水膨胀时程特性试验与应用研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2003, 31(5): 547-551.

[5] 王年香, 章为民, 顾行文, 等. 膨胀土地基浸水膨胀变形模型试验研究[J]. 公路交通科技, 2008, 25(5): 51-55.

[6] 黄华县, 张春顺. 膨胀土膨胀变形时程特性研究[J]. 湖南工业大学学报, 2009, 23(4): 6-10.

[7] 周建普, 李献民, 王永和. 湖南某高速公路膨胀土变形特征相关性试验研究[J]. 公路, 2003(4): 114-118.

[8] 王亮亮, 杨果林, 秦朝晖. 膨胀土大面积浸水现场试验[J]. 工程勘察, 2013(3): 37-42.

[9] BS 1377: Part 2: 1990, Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purpose-Classification Tests[S].

[10] ASTM D5030-2004, Standard Test Method for Density of Soil and Rock in Place by the Water Replacement Method in a Test Pit[S]. USA: America Society for Testing and Materials, 2004.

(本文编辑 武亚庆)