

## 基于DIC分析的含石量对碎石土边坡稳定性影响

陆 烨, 黄越川

### Influences of stone content on stability of gravel soil slope based on DIC analysis

LU Ye and HUANG Yuechuan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202203030>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 兰州地区黄土水平冻胀力分析

Experimental analysis of horizontal frost heaving force of loess in Lanzhou City of Gansu Province Area

张正, 马学宁, 朱启有 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(1): 102-107

#### 基于Mein-Larson入渗模型的凹形边坡稳定性分析

Stability analysis of concave slope based on Mein-Larson infiltration model

胡庆, 吴益平, 苗发盛, 张龙飞, 李麟玮 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 26-35

#### 基于指标变权重复合云模型的岩质边坡稳定性评价初探

A preliminary study on evaluation of rock slope stability based on index variable weight compound cloud model

陈忠源, 戴自航 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 9-17

#### 基于不同方法的江苏镇江地区下蜀土边坡稳定性分析与评价

Evaluation of Xiashu loess slope stability in Zhenjiang area using different methods

瞿婧晶, 陆燕, 吴曙亮, 刘健, 苟富刚 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(1): 35-42

#### 含石量和坡度对土石混合体崩塌运动规律的影响

#{suggestArticle.titleEn}

成浩, 韩培锋, 苏有文 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(4): 11-23

#### 水力滞回性对降雨入渗边坡稳定性的影响

Study on the Influence of Hydraulic Hysteresis on the Slope Stability under Rainfall Infiltration Condition

孟庆成, 王明, 齐欣, 魏鑫, 张梦宇 中国地质灾害与防治学报. 2018, 29(4): 23-29



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202203030

陆焯, 黄越川. 基于 DIC 分析的含石量对碎石土边坡稳定性影响 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(4): 49-57.

LU Ye, HUANG Yuechuan. Influences of stone content on stability of gravel soil slope based on DIC analysis[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(4): 49-57.

# 基于 DIC 分析的含石量对碎石土边坡稳定性影响

陆焯, 黄越川

(上海大学力学与工程科学学院土木工程系, 上海 200444)

**摘要:** 为了研究含石量对碎石土边坡稳定性的影响, 对不同含石量的边坡进行了模型试验。模型试验中结合数字图像关联技术 DIC, 分析了边坡全场和局部场的土体变形。研究发现含石量对碎石土边坡的承载力和变形特性具有显著的控制效果, 并且根据极限承载力发现含石量存在两个阈值, 分别为 20% 和 70%。对局部土体的变形规律和碎石的运动行为进行分析, 发现在剪切过程中, 局部土体出现剪胀效应, 剪切带内孔隙率会明显增加。通过对局部土体中碎石及其周边砂颗粒的追踪, 发现碎石会影响剪切带的发展, 从而总结出 5 种剪切带绕石模式: 单边绕石模式、分叉模式、穿石和分叉复合模式、分叉和单边绕石及穿石复合模式、单边绕石和穿石复合模式。研究成果可为进一步了解碎石土边坡失稳的内在机理提供相关参考。

**关键词:** 数字图像相关技术; 含石量; 模型试验; 碎石土; 孔隙率

**中图分类号:** P642.22

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1003-8035(2023)04-0049-09

## Influences of stone content on stability of gravel soil slope based on DIC analysis

LU Ye, HUANG Yuechuan

(Dept. of Civil Engineering, School of Mechanics and Engineering Sciences, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

**Abstract:** To study the influence of stone content on the stability of gravel soil slopes, static overload tests were carried out on slopes with different stone contents. By combining model tests combined with digital image correlation (DIC) technology, the deformation of the soil body in both the whole field and local field of the slope was analyzed. The findings indicated that the stone content had a significant controlling effect on the bearing capacity and deformation characteristics of gravel soil slope, and two threshold values of stone content, i.e. 20% and 70% were found based on the ultimate bearing capacity. Further analysis was conducted at the meso-scale to understand the deformation behaviour of local soil and the movement of gravel during the shearing process. The local soil was found to exhibit the shear dilatancy effect, resulting in a significant increase in porosity in the shear zone. By tracing the movement of gravel and its surrounding sand particles in the local soil, it was found that the gravel can affect the development of shear zone, and five modes of shear zone surrounding stone were summarized: unilateral rock bypass mode, bifurcation mode, crossing rock and bifurcation composite mode, bifurcation and unilateral rock bypass and crossing rock composite mode, and unilateral rock bypass and crossing rock composite mode. The research results provided a reference for further understanding the inherent mechanism of gravel soil slope instability.

**Keywords:** digital image correlation technology; stone content; model test; gravel soil; porosity

收稿日期: 2022-03-21; 修订日期: 2022-07-14

投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

第一作者: 陆焯 (1979-), 女, 副教授, 工学博士, 主要从事砂土室内试验及相关离散元模拟方面的研究工作。

E-mail: ye.lu@shu.edu.cn

## 0 引言

滑坡是一种频繁且严重的地质灾害,极大地威胁着人民的生命财产安全<sup>[1-2]</sup>。天然碎石土边坡分布广泛,尤其是在南方山地丘陵地区,在发生的各类滑坡中,碎石土滑坡占比接近 80%<sup>[3-6]</sup>。许多学者对砂质和岩质边坡的稳定性开展研究,并取得不少成果,然而针对碎石土边坡的成果十分有限。因此,有必要对碎石土边坡的失效机理进行研究,为评估其稳定性提供合理的参考。

众多研究人员对碎石土边坡开展了大量的研究并取得了显著的研究成果,主要集中在理论分析、数值分析、试验研究三个方面。极限平衡法是边坡稳定性分析最早也最常用的一种理论分析方法,其理论基础是莫尔-库伦强度准则和静力平衡原理分析边坡破坏模式下的受力状态,根据边坡潜在破坏面的滑移体上沿剪切方向的抗剪力和剪切力之间的关系来计算边坡的安全系数<sup>[7-9]</sup>。然而,极限平衡法在计算过程中进行了一些假设和简化。其中之一是假设所有滑移面上的材料同时达到极限平衡状态,而实际上材料的极限平衡往往是逐步实现的。极限平衡法的另一个假设与滑动面有关。边坡的滑动面在发生破坏前通常是未知的,而在计算边坡的稳定性时,需要预先假设边坡的形状和位置,找到最小安全系数来确定一个潜在的滑移面。

随着计算机技术的发展,许多学者采用数值分析方法来研究碎石土边坡的稳定性。有限元法(finite element method, FEM)可以模拟计算处边坡的滑移面和安全系数,被广泛应用于边坡稳定性分析<sup>[10]</sup>。Napoli 等<sup>[11]</sup>分别有限元法和极限平衡法对不同含石量的边坡进行了稳定性分析。庄锦亮等<sup>[12]</sup>基于 FLAC3D 和 Janbu 法计算不同内摩擦角和黏聚力边坡的安全系数,结果表明内摩擦角对边坡稳定性的影响更明显。然而,有限元法在建模时把所有介质视为连续体,当边坡由岩土或砂土组成时这一假设是合理的。然而碎石土由碎石和细粒土组成,其同时表现出连续介质和离散介质的特征,造成有限元法的这一假设变得不再合适。因此,一些研究者采用离散元法(discrete element method, DEM)来研究碎石土边坡的稳定性。离散元法假设材料是由大量的单独粒子组成的,它们可以相互独立地运动,只在接触点相互作用。李存柱等<sup>[13]</sup>基于离散单元法发现碎石的形状会影响材料宏观力学性能,并且建立了碎石形状与其宏观力学性能之间的关系。陆焯等<sup>[14]</sup>用离散单元法对碎石土边坡的稳定性进行了分析,发现碎石的含量、形状和大小会影响边坡的安全系数。但是由于需要考虑所有颗粒的相互作用,离散元法的计算效率较低。

目前关于碎石土边坡模型试验的研究较少,多数研究集中于碎石土的单元体试验。彭东黎等<sup>[15]</sup>基于大型的室内直剪试验,对含石量及含水量与碎石土黏聚力和内摩擦角的关系进行了深入研究。Wang<sup>[16]</sup>采用高能 X 射线计算机断层成像(CT)方法研究了三轴试验中碎石含量对碎石土细观结构变化和相应应变局部化行为的影响。王腾等人<sup>[17]</sup>用铝棒模拟砾石,对碎石土进行了平面应变试验,发现碎石主要通过转动阻力影响剪切带的发展。但是单元体试验无法重现碎石土边坡复杂的地质情况,不能准确地描述其破坏过程。

碎石土具有天然的多尺度结构,其变形和强度特性很大程度上受其细观结构的影响。但目前相关研究很少从宏细观尺度深入地分析碎石土边坡的失效机制。本文基于数字图像技术,对不同含石量的碎石土边坡进行模型试验,从宏细观尺度研究碎石土边坡的失稳机制。试验结果表明,含石量对碎石土边坡的承载力和位移具有显著的控制效果,并且碎石会影响剪切带的发展。

## 1 试验概况

### 1.1 试验装置

试验所用模型箱尺寸为 600 mm×290 mm×350 mm(长×宽×高),四个面均为透明面,便于使用数码相机记录试验过程中砂土边坡侧面土体连续变形过程。加载装置为万能材料试验机,通过对边坡坡顶尺寸为 100 mm×290 mm×50 mm 的加载板施加荷载,如图 1 所示。

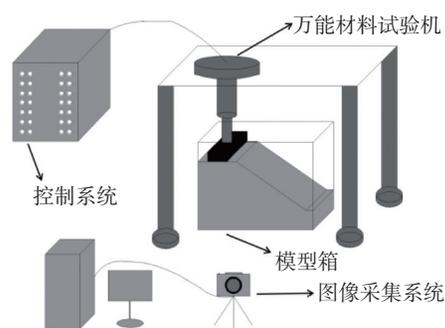


图 1 试验装置

Fig. 1 Schematic view of the testing set-up

### 1.2 试样制备

本试验中试样是粒径 2~10 mm 的砾石与  $d_{50}$  为 0.29 mm 的福建标准砂混合配制而成的碎石土,各试样的级配曲线如图 2 所示。为保证局部场拍摄效果,对局部的碎石土进行染色处理。

制备试样时,首先将所需碎石砂土烘干。然后按 3% 的含水率加水搅拌直至均匀,为保证密度控制在

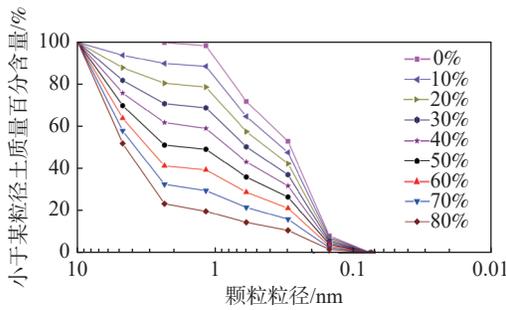


图 2 颗粒级配曲线

Fig. 2 Soil particle size distribution curve

1.74 g/cm<sup>3</sup>, 每次称量后分层填筑进模型箱填筑, 完成的模型如图 3 所示, 坡高 250 mm, 坡角为 50°。

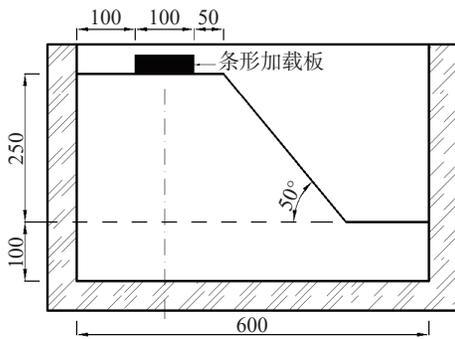


图 3 模型示意图(单位: mm)

Fig. 3 Schematic view of the testing model (unit: mm)

### 1.3 图像采集

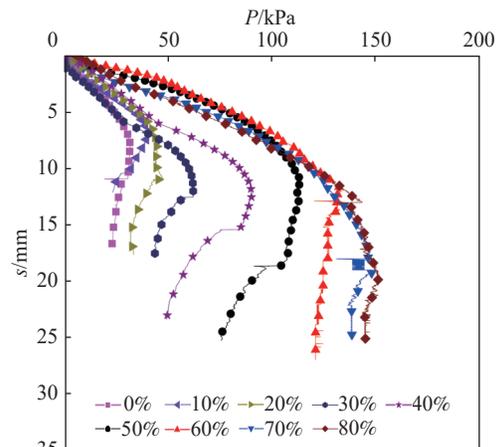
使用 4 240 万有效像素的数码相机在试验期间连续拍摄, 捕捉全场土体位移的图像, 同时使用微距摄像头拍摄局部场土体变形。为了减少自然光对图像质量的影响, 在试验过程中使用两个摄影灯提供照明。试验结束后, 将视频中的图像提取并导入自行编制的图像处理程序进行计算。

## 2 试验结果及分析

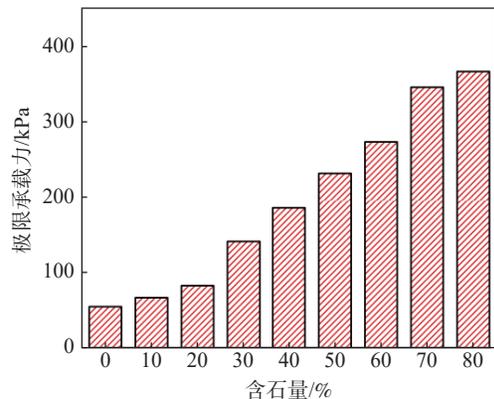
### 2.1 坡顶荷载-沉降曲线

为了减少壁面摩擦对边坡承载力的影响, 在模型箱的壁面涂抹凡士林作为润滑剂。图 4 为边坡的荷载与位移关系曲线和极限承载力。

从图 4(a)可以看出, 边坡的  $P-s$  曲线受碎石含量的影响。 $P-s$  曲线变化大致可以分为三个阶段。第一阶段, 随着荷载的增加, 坡顶沉降接近线性增大, 坡顶砂土处于整体压密阶段。随含石量增加, 曲线的斜率增加。第二阶段, 随着荷载逐渐接近峰值, 荷载的增长率逐渐降低。荷载达到峰值后为第三阶段, 在此阶段, 不同含石量的  $P-s$  曲线呈现不同的形式。当含石量小于



(a)  $P-s$  曲线



(b) 极限承载力

图 4 不同含石量边坡的  $P-s$  曲线和极限承载力

Fig. 4  $P-s$  curves and ultimate bearing capacity curves of the slopes with different stone contents

70% 时, 边坡的承载力有明显的软化阶段。而含石量大于 70% 时, 承载力在第三阶段没有明显的软化现象。并且, 含石量越大, 边坡达到承载力峰值的位移越大。边坡的极限承载力也就是试验中的峰值承载力, 本文中  $T$  为加载时刻至边坡的极限承载力总时间。表 1 列出不同含石量的碎石土边坡所需的总时间  $T$ , 从中可以看出随含石量增加, 荷载达到极限承载力所需的时间逐渐增加, 但是在低含石量和高含石量时, 增加幅度较小。

图 4(b) 比较了不同含石量边坡的极限承载力。从

表 1 不同含石量碎石土边坡总时间( $T$ )

Table 1 Time of gravel soil slope with different stone contents

含石量/%	$T/s$	含石量/%	$T/s$
0	150	50	535
10	189	60	624
20	224	70	700
30	295	80	715
40	426		

图中可以看出,边坡的极限承载力受碎石含量的影响。当含石量低于 20% 时,边坡受含石量的影响较小,这是由于此时碎石土的力学性质主要依赖于砂土,碎石悬浮在砂土之中,对边坡的极限承载力贡献较小。而当含石量高于 20% 且小于 70% 时,边坡的极限承载力随含石量增大而急剧增加,此时边坡内的碎石形成骨架结构,承载力受碎石的影响突显,承载力由碎石和砂土共同承担。而当含石量达到 70% 时,边坡内的碎石形成了架空结构,边坡中的砂土悬浮在碎石间,碎石土的力学性质更接近于岩体;在此基础上含石量增加,极限承载力

基本没有改变。因此含石量对边坡承载力的影响存在两个阈值,下阈值为 20%,上阈值为 70%。

### 2.2 不同含石量位移云图分析

根据含石量对边坡极限承载力影响的上、下阈值,本文选取了三个区间中各一含石量的碎石土边坡进行研究,即含石量为 10%、50% 和 80%。将试验过程中拍摄的视频每 5 s 截取一张图像用于 DIC 的相关计算,得到边坡的位移增量。图 5 为不同含石量边坡达到极限承载力时的位移矢量增量,图中箭头方向为土体发生位移的方向,箭头的长度代表土体位移的大小。

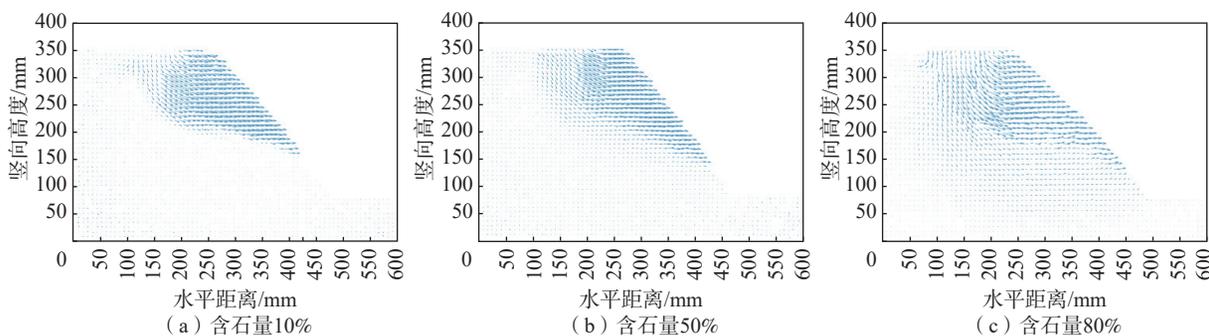


图 5 不同含石量边坡位移矢量增量

Fig. 5 Displacement vector increment of slope with different stone content

从图 5 可知,在边坡达到极限承载力时,不同含石量碎石土边坡的土体位移趋势是一样的。在加载板下方,位移矢量的方向靠近垂直方向,该区域的土体主要发生竖直位移。越靠近临坡面,位移矢量接近水平,土体位移以水平方向为主。根据土体的变形情况可以分为三个区域:稳定区、剪切区和滑移区。在稳定区,土体几乎没有发生位移,位移矢量呈现点状;在滑移区,土体发生较大的位移,并且以水平位移为主;剪切区介于稳定区和滑移区之间,剪切区的范围很窄,但位移梯度变化很大。比较不同含石量边坡的位移矢量长度可以发现,边坡的位移增量随着含石量的增加而减小,这是因为含石量增加,碎石之间的接触逐渐增加并形成碎石骨架,碎石土的内摩擦角增大,边坡抵抗变形的能力增强,因此其位移增量减小。

得不规则且曲折。主要原因是碎石的强度和刚度都较大,土体变形的滑移面往往会沿着强度和刚度相对更低的碎石与碎石、碎石与砂土的接触面发展,从而导致其位移包络线变得曲折。

以位移增量 0.02 mm 作为土体发生变形的范围,画出位移包络线,如图 6 所示。从图中可以看出含石量增加,土体发生变形的范围越大。这是由于碎石之间互相嵌固,机械咬合力增大,边坡碎石发生位移和旋转时会带动更大范围内碎石土受力变形,因此随着含石量的增加,土体发生位移的范围也更大。对比不同含石量的边坡位移包络线形状可以发现含石量增大,包络线形状变

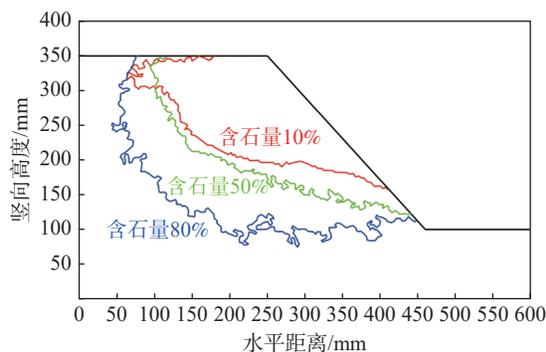


图 6 不同含石量边坡土体包络线

Fig. 6 Displacement envelope of slope with different stone content

### 2.3 剪应变云图分析

当荷载达到峰值后边坡发生失稳破坏,部分土体会沿着某一滑动面突然出现明显的运动,这个滑动面称之为剪切带,而这个滑移面的附近发生显著的应变局部化现象。图 7 为不同含石量碎石土边坡达到极限承载力时剪应变增量云图,以逆时针为正。

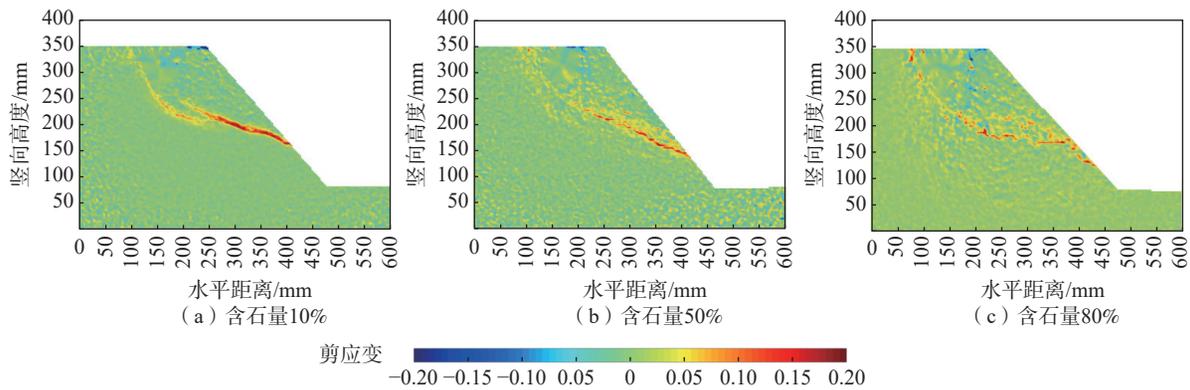


图 7 不同含石量边坡剪应变增量云图

Fig. 7 Cloud diagram of shear strain increment of slope with different stone content

由图 7 可以看出, 碎石会影响边坡中剪切带的发展。当含石量为 10% 时, 边坡内只有一条主剪切带, 在滑移体内只有少量的剪应变较大的部位, 剪切带也较为平顺光滑。而当含石量较高时, 滑移体内的次剪切带随着含石量的增加而逐渐增多, 并且剪切带形状变得曲折不规则。这是由于碎石的本身的强度和刚度较高, 导致剪切带在发展路径经过碎石骨架时, 会沿着碎石与碎石、碎石与砂土的接触面发展, 因此剪切带可能发生绕石或分叉, 从而在滑移体内产生多条次剪切带。

### 3 局部场结果及分析

#### 3.1 局部场剪应变云图分析

当含石量较低时, 碎石悬浮在砂土之中, 而含石量较高时碎石形成了架空结构, 边坡中的砂土悬浮在碎石间。因此本节选择了含石量 50% 碎石土边坡的局部场作为研究对象, 在该含石量时碎石与砂土共同承担上部荷载, 两种材料间的相互作用更加复杂, 更能揭示碎石和周围砂颗粒的细观行为对剪切带发展的影响。图 8 分别拍摄了含石量 50% 碎石土边坡的上部和下部局部场图像, 上部局部场在后文中称为局部场一, 其计算区域尺寸为 84 mm×48 mm; 下部局部场为局部场二, 其计

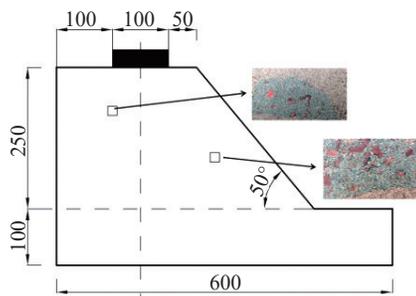


图 8 局部场一和局部场二位置示意图(单位: mm)

Fig. 8 Location map of the local field I and local field II (unit: mm)

算区域尺寸为 44 mm×28 mm。

局部场土体发生剪切破坏时, 会出现明显的应变局部化。图 9 为不同时刻局部场剪应变增量云图。由图 9 可以发现, 在  $1/4T$  时刻, 局部场一土体没有变形, 此处剪切应变增量值几乎为零。而加载到  $1/2T$  时, 在滑移面出现了应变局部化现象, 并且剪应变连接并贯通局部场一, 说明此时局部场一已经发生了剪切破坏。在剪切带外的滑移区内, 分布着剪应变较大的单元。随着荷载变大, 滑移区内剪应变较大的单元变多, 部分形成次剪切带。这是由于碎石影响了剪切带的发展路。与局部场一相比, 局部场二的剪切带形成时间更晚, 在  $3/4T$  时刻时, 才能看到明显的应变局部化现象。

对比全场的剪应变增量云图, 可以发现在高含石量的边坡内, 剪切带往往从开始的只有一条或两条主剪切带逐渐发展成“一主多次”的剪切带形式。这说明碎石对剪切带的发展有明显的影响作用。

#### 3.2 碎石对剪切带发展的影响

为了明确碎石对剪切带的影响, 选取了局部场一中有代表性的区域进行放大, 如图 10 所示。图中虚线红框中为选定区域, 并进行编号 S1 ~ S6。

在放大的区域, 用黑色虚线描出碎石边界, 用红色虚线会出剪切带位置, 如图 11 所示。从图中可以看出, 当剪切带经过碎石时, 剪切带会出现几种不同的绕石模式。S2 和 S3 处图中可以看到当剪切带经过碎石时, 发生了单边绕石, 碎石左右两侧都可能是剪切带的绕石方向。S1、S5 和 S6 中剪切带的绕石方式是分叉, 由一条剪切带分叉成两条甚至多条剪切带。对比这两种模式可以发现, 当剪切带发展的方向与碎石的长轴方向成锐角时, 剪切带大概率会以分叉的模式继续发展, 当剪切带发展的方向与碎石的长轴方向成钝角时, 剪切带会以单边绕石的模式继续发展, 发展方向取决于碎石和剪切

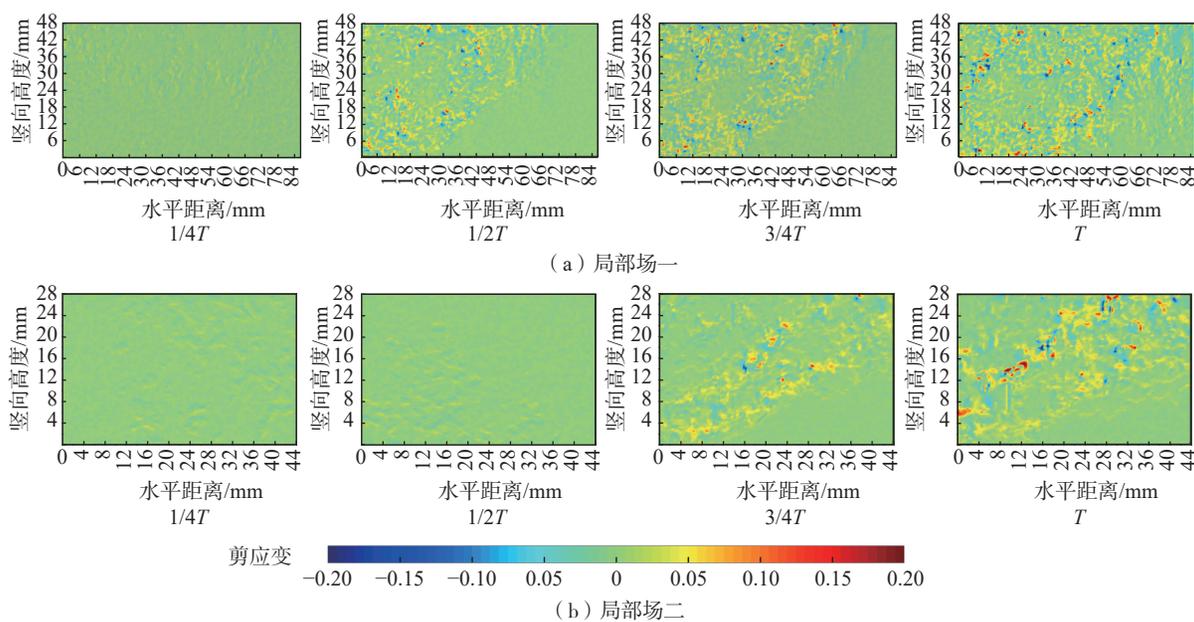


图 9 局部场剪应变增量

Fig. 9 Distribution diagram of shear strain increment in local field

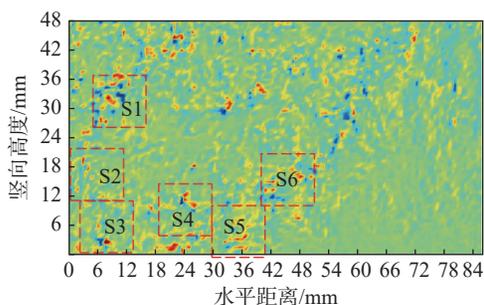


图 10 局部场一中代表区域

Fig. 10 Location map of the representative area in local field I

带之间的位置关系。S1、S3、S4 和 S6 可以看到当发生这两种绕石模式时，剪切带会穿越碎石与碎石接触面。

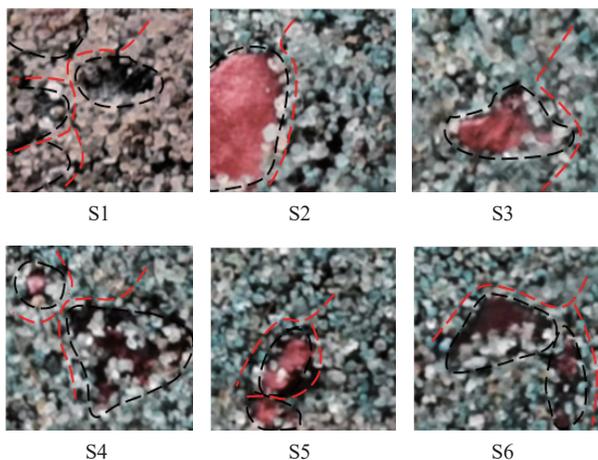


图 11 代表区域剪切带示意图

Fig. 11 Schematic diagram of shear zone in the representative area

选取 S6 区域中 2 个碎石和其周边 20 个砂土颗粒描绘出其在不同时刻的质心坐标和长轴角度，进一步验证碎石对剪切带的影响，如图 12 所示。X 和 Y 轴均为图像的像素坐标，颗粒边上数字为编号，碎石 1~2，砂颗粒 1~20。两个碎石在 1/4T 时相互接触形成骨架，砂颗粒 1~17 分布在碎石骨架外，砂颗粒 18~20 位于碎石骨架内。当加载到 1/2T 时刻时，碎石和砂颗粒发生的位移和旋转角度都较小，两个碎石逐渐分开，砂颗粒与碎石的相对位置没有明显改变。继续加载，位于上方的碎石和砂颗粒出现了比较明显的位移和旋转角度，而下方的碎石基本没有运动。此时砂颗粒和碎石之间的相对位置发生改变，有部分砂颗粒沿着碎石左侧运动，在碎石之间有砂颗粒挤入碎石骨架，剩余的砂颗粒沿着下方碎石的右侧运动。碎石影响了土体变形，滑移面由一个分叉成多个滑移面。

通过对像素标定，即一个像素值等于 0.05 mm，计算得到各颗粒实际位移值，位移以向下为正和向右为正，旋转角度以逆时针为正，如表 2 所示。从表中可以看出，砂颗粒的位移和旋转角度大于碎石。碎石和周边的砂颗粒的运动行为存在差异，主要原因是一方面是当含石量为 50% 时，尽管碎石形成骨架结构与砂颗粒一起承受荷载，但是砂颗粒仍是主要的承力介质，导致砂颗粒发生更剧烈的运动，另一方面是碎石的摩擦角比砂颗粒更大，碎石的运动明显弱于砂颗粒。碎石与周边砂土运动行为不协调，使得砂颗粒会沿着碎石边缘或者

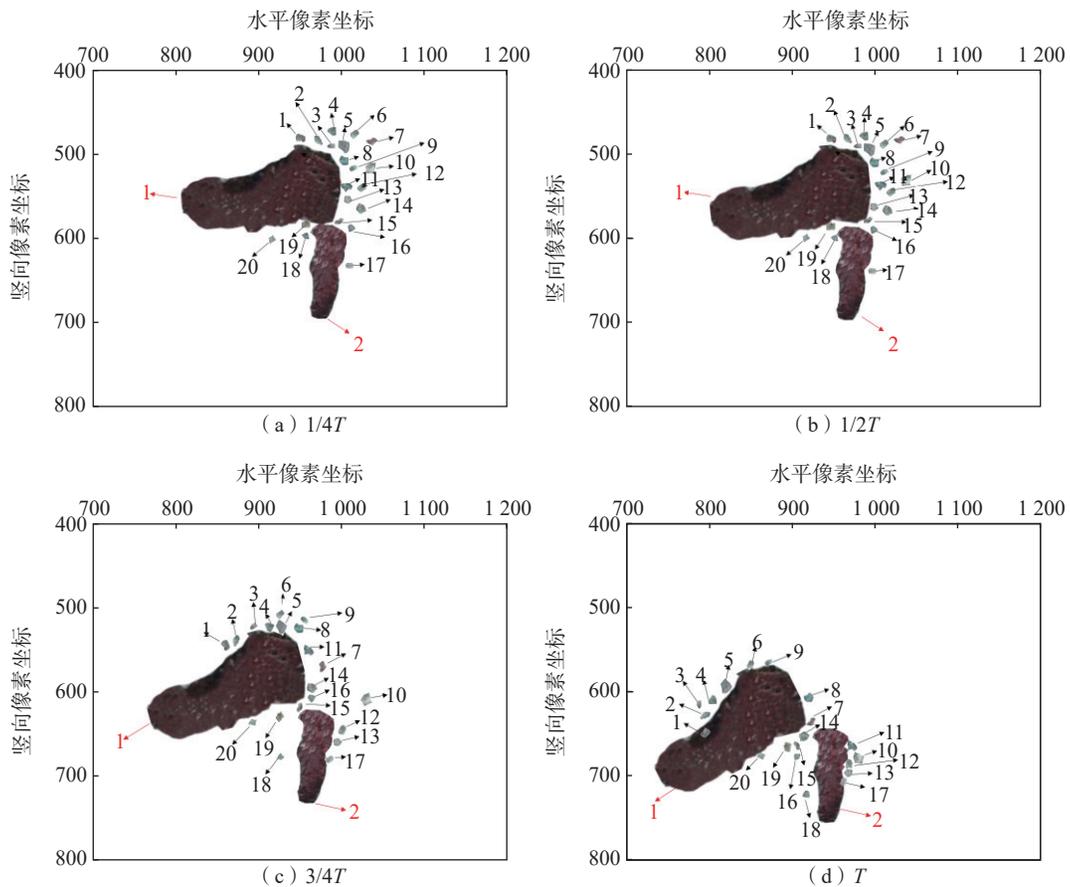


图 12 不同时刻颗粒的位移和旋转

Fig. 12 Displacement and rotation of particles at different moments

表 2 颗粒位移和旋转角度

Table 2 Summary table of the particle displacement and rotation angle

颗粒	水平位移/mm	竖直位移/mm	旋转角度/(°)	颗粒	水平位移/mm	竖直位移/mm	旋转角度/(°)
碎石1	3.87	5.17	16	砂颗粒10	2.75	8.25	-36
碎石2	1.75	3.01	1	砂颗粒11	1.78	5.93	-20
砂颗粒1	7.88	8.54	122	砂颗粒12	2.84	7.40	-25
砂颗粒2	8.90	7.30	110	砂颗粒13	2.04	7.20	-94
砂颗粒3	10.19	5.68	90	砂颗粒14	5.55	4.69	-80
砂颗粒4	9.41	6.94	114	砂颗粒15	4.69	4.28	117
砂颗粒5	9.25	5.98	50	砂颗粒16	5.41	4.62	56
砂颗粒6	8.39	4.31	52	砂颗粒17	2.41	3.91	77
砂颗粒7	5.74	7.67	22	砂颗粒18	2.14	6.35	-22
砂颗粒8	4.26	4.5	160	砂颗粒19	3.31	4.24	30
砂颗粒9	7.23	1.71	10	砂颗粒20	2.70	3.92	-45

碎石之间的接触面运动。这也是碎石影响剪切带发展的原因之一。

对各个区域颗粒的运动分析, 总结出碎石对剪切带发展路径影响的五种绕石模式, 如图 13 所示, 箭头为剪切带的发展方向。对比这五种剪切带的绕石模式, 可以发现碎石会导致剪切带影响的范围变广, 长度变长, 从而提高了边坡的抗滑能力, 提高了边坡的稳定性, 增加

了边坡的极限承载力。

### 3.3 局部场孔隙率分析

当碎石土发生剪切破坏时, 碎石骨架发生破坏和重构导致孔隙率改变。研究土体破坏过程中孔隙率的变化, 有利于了解碎石土的破坏机制。

图 14 给出了局部场一和局部场二不同区域孔隙率的时程曲线。从图 14(a)可以发现, 局部场一的碎石土

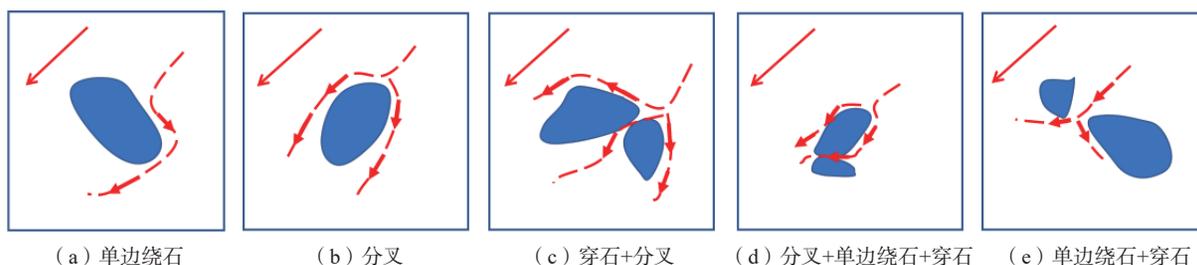
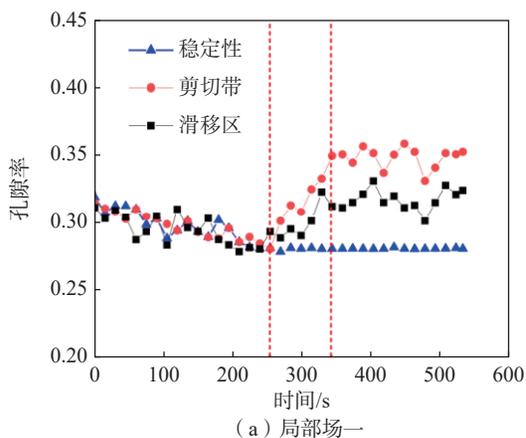
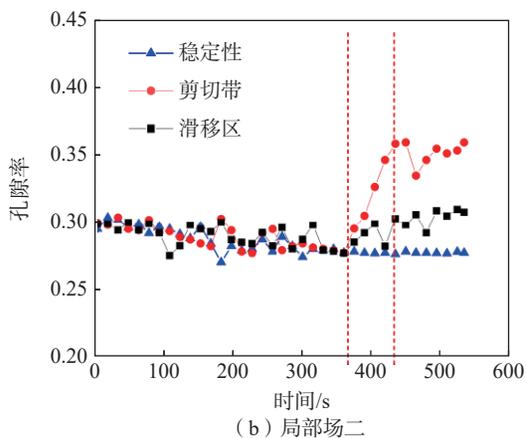


图 13 局部位置剪切带绕石示意图

Fig. 13 Schematic diagram of shear zone around stone in local field position



(a) 局部场一



(b) 局部场二

图 14 局部场不同区域孔隙率时程曲线

Fig. 14 Time history curves of porosity in different regions of the local field

在未加载时,孔隙率为 0.31 左右。随着荷载增加,局部场一整体的孔隙率开始缓慢减小。这是因为一开始边坡处于整体压密的阶段,使得孔隙率降低。当加载到 0.46T 左右时,此时孔隙率最小,为 0.28 左右。稳定区的孔隙率在此之后开始保持稳定,说明局部场一已经完成压密。而剪切带的孔隙率开始突然增加,增长趋势维持 0.18T 左右,在图中用虚线标出,此时孔隙率达到 0.35 左右,然后在这一值上下波动。剪切带的形成过程中,碎石颗粒会发生位移、旋转等运动导致土体的孔隙

率产生变化,因此剪切内孔隙率时程曲线的拐点可以认定为剪切带的初始化时间,孔隙率变化的这段时间可以看作剪切带的形成过程。滑移区的孔隙率在 0.46T 后和剪切带一样,开始突然增加,不过达到稳定时的值小于剪切带,为 0.32 左右。这是因为滑移区内也出现次剪切带,从而导致了孔隙率上升。局部场二的孔隙率的变化趋势与局部场一相似,不过局部场二剪切带的孔隙率在大约 0.65T 时才突然增大,并且剪切带发展的时间为 0.11T 比局部场一更短。这说明边坡剪切带发展是一个逐渐加速过程。

### 4 结论

本文基于数字图像技术,通过静力超载法对碎石土边坡进行模型试验,从宏微观角度研究了碎石土边坡的失稳机制,得到以下几点结论:

(1)含石量会影响碎石土边坡的承载力和变形特性且存在两个阈值,下阈值为 20%,上阈值为 70%。当含石量小于 20% 时,极限承载力随着含石量增大而缓慢提高,边坡受含石量的影响较小;当含石量高于 20% 且小于 70% 时,边坡的极限承载力随含石量增大而急剧增加;当含石量大于 70% 时,含石量增加,极限承载力增加较小。

(2)碎石会影响边坡的土体变形和剪切带的发展。碎石与周边砂颗粒的运动行为存在差异,使得剪切带在经过碎石骨架时,其发展路径存在五种不同的绕石模式。

(3)在剪切前,碎石土的孔隙率会因为边坡被压密而逐渐减小。在剪切后,由于强烈的剪切应变和碎石土骨架的破坏重构,剪切带内的孔隙率在剪切过程中突然增大,并在剪切带形成后稳定。可以通过孔隙率的变化研究剪切带的初始化和发展。

### 参考文献(References):

[1] 彭成,邓沛宇,范子坚,等.含石率对石英砂岩类碎石土

- 力学特性的影响研究 [J]. *铁道科学与工程学报*, 2021, 18(2): 375–382. [ PENG Cheng, DENG Peiyu, FAN Zijian, et al. Study on the influence of gravel content on the mechanical properties of crushed aggregates containing quartz and sandstone [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2021, 18(2): 375–382. (in Chinese) ]
- [ 2 ] 汪美华, 李勇, 裴叶青. 甘肃临夏盆地韩集北山滑坡群致灾特征与稳定性评价 [J]. *地质通报*, 2023, 42(2/3): 460–468. [ WANG Meihua, LI Yong, PEI Yeqing. Disaster characteristics and stability evaluation of the Hanjin Beishan landslide group in Linxia Basin, Gansu Province [J]. *Geological Bulletin of China*, 2023, 42(2/3): 460–468. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 3 ] 梁雄, 阳军生, 谢亦朋, 等. 土石堆积体精细化模型构建及力学特性数值试验 [J]. *铁道科学与工程学报*, 2021, 18(3): 710–719. [ LIANG Xiong, YANG Junsheng, XIE Yipeng, et al. Refined model construction and experimental simulation on mechanical characteristics of accumulation body [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2021, 18(3): 710–719. (in Chinese) ]
- [ 4 ] 孟佳佳, 吴益平, 柯超, 等. 滑坡多发区第四系堆积层厚度智能预测与影响因素分析——以重庆万州铁峰乡为例 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2023, 34(1): 1–10. [ MENG Jiajia, WU Yiping, KE Chao, et al. Intelligent prediction and analysis of influencing factors of Quaternary accumulation layer thickness in landslide-prone areas: A case study in the Tiefeng area of Wanzhou District, Chongqing City [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2023, 34(1): 1–10. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 5 ] WENJIE, XU. Discrete element modelling of a soil-rock mixture used in an embankment dam [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2016, 86: 141–156.
- [ 6 ] COLI N, BERRY P, BOLDINI D. In situ non-conventional shear tests for the mechanical characterisation of a bimrock [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2011, 48(1): 95–102.
- [ 7 ] 许旭堂, 鲜振兴, 杨枫, 等. 水-力耦合及干湿循环效应对浅层残积土斜坡稳定性的影响 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2022, 33(4): 28–36. [ XU Xutang, XIAN Zhenxing, YANG Feng, et al. Influence of hydraulic-mechanical coupling and dry-wet cycle effect on surficial layer stability of residual soil slopes [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(4): 28–36. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 8 ] 陈文胜, 蒋茂林, 周伟, 等. 反坡对边坡稳定性分析的影响探讨 [J]. *铁道科学与工程学报*, 2021, 18(7): 1756–1763. [ CHEN Wensheng, JIANG Maolin, ZHOU Wei, et al. Discussion on the influence of reverse slope on slope stability analysis [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2021, 18(7): 1756–1763. (in Chinese) ]
- [ 9 ] 宋宜祥, 尹子航, 黄达. 基于 Green-Ampt 模型的多层结构边坡降雨入渗改进计算方法及稳定性影响研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2022, 49(6): 162–170. [ SONG Yixiang, YIN Zihang, HUANG Da. Rainfall infiltration process of multi-layer slope based on improved Green-Ampt model stability analysis [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(6): 162–170. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 10 ] SRIKRISHNAN, SUBRAMANIAN S. Stability assessment approach for soil slopes in seasonal cold regions [J]. *Engineering Geology*, 2017, 221: 154–169.
- [ 11 ] NAPOLI M L, BARBERO M, RAVERA E, et al. A stochastic approach to slope stability analysis in bimrocks [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, 101: 41–49.
- [ 12 ] 庄锦亮, 孔思丽, 宋鑫华. 基于 FLAC3D 和极限平衡法土质边坡稳定性分析与影响因素的探讨 [J]. *人民珠江*, 2016, 37(3): 42–45. [ ZHUANG Jinliang, KONG Sili, SONG Xinhua. Analysis of soil slope stability and influential factors with FLAC3D and limit equilibrium method [J]. *Pearl River*, 2016, 37(3): 42–45. (in Chinese) ]
- [ 13 ] 李存柱, 盛俭, 周正华, 等. 粗粒料颗粒形状对材料宏观力学性能的影响 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2020, 40(2): 222–228. [ LI Cunzhu, SHENG Jian, ZHOU Zhenghua, et al. Influence of particle shape on the macroscopic mechanical properties of coarse aggregate [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2020, 40(2): 222–228. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 14 ] YE LU. Stability analyses on slopes of clay-rock mixtures using discrete element method [J]. *Engineering Geology*, 2018, 244: 116–124.
- [ 15 ] 彭东黎, 李志勇. 堆积体边坡碎石土抗剪强度试验研究 [J]. *公路工程*, 2014, 39(2): 254–257. [ PENG Dongli, LI Zhiyong. Experimental study on shear strength of rock-soil aggregates in accumulation slope [J]. *Highway Engineering*, 2014, 39(2): 254–257. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 16 ] Y WANG. Use of X-ray computed tomography to investigate the effect of rock blocks on meso-structural changes in soil-rock mixture under triaxial deformation [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 164: 386–399.
- [ 17 ] 王腾, 胡岱松, 张嘎. 土石混合料力学特性的试验研究 [J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2018, 58(5): 456–460. [ WANG Teng, HU Daisong, ZHANG Ga. Experimental study of the behavior of soil-gravel mixtures [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2018, 58(5): 456–460. (in Chinese with English abstract) ]