

DOI: 10.11779/CJGE2019S2058

土石混合料剪切机理及抗剪强度分量特性研究

吴帅峰, 蔡红*, 魏迎奇, 肖建章, 严俊

(中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要: 为研究土石混合料剪切机理和抗剪强度分量特性, 制备了7种级配类型土石料, 涵盖了良好级配、均匀粒径、缺失中间粒径3种典型情况, 代表了含石量在10%~75%的形态, 在此条件下对剪切强度与级配-含石量关系、剪切机理及剪切强度分量的构建模型进行了研究。得到土石料中粗颗粒含量的多少是决定强度的关键因素; 土石混合料的抗剪强度由咬合分量、摩擦分量和破碎分量共同构成, 通过分析得出摩擦分量占总抗剪强度约10%, 从颗粒细观运动的角度的剪切运移力学过程推导出咬合分量与摩擦分量的理论模型公式, 该模型公式涵盖了含石量、初始接触水平角、内摩擦角、粒径等参数信息; 由该模型计算得出咬合与摩擦分量占比与含石量呈指数正相关趋势, 并给定该边界条件下的函数表达式。从理论上揭示了土石混合料剪切机理和抗剪强度的构成分量模型。

关键词: 土石混合料; 抗剪强度; 强度分量; 分量模型; 含石量

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)S2-0230-05

作者简介: 吴帅峰(1988—), 男, 博士(后), 工程师, 主要从事岩土动力学与大坝岩土工程等方面的科研工作。E-mail: wusf@iwhr.com。

Shear mechanism and shear strength component characteristics of soil-stone mixtures

WU Shuai-feng, CAI Hong, WEI Ying-qi, XIAO Jian-zhang, YAN Jun

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: In order to study the shear mechanism and shear strength component characteristics of soil-rock mixtures, seven groups of graded soil-stone materials are prepared, covering three typical cases of good gradation, uniform particle size and missing intermediate particle size, representing the forms of stone content in the range of 10% to 75%. Under this condition, the construction models for shear strength and gradation-stone content, shear mechanism and shear strength component are studied. It is concluded that the content of coarse particles in soil-stone mixtures is the key factor to determine the strength. The shear strength of soil-rock mixtures is composed of the occlusal component, friction component and fracture component. Through analysis, the friction component accounts for about 10% of the total shear strength, and the theoretical model formula for the occlusion component and friction component is deduced from the shear transport mechanics process from the angle of the micro-motion of particles. The model formula covers the parameters such as stone content, initial contact horizontal angle, internal friction angle and particle size. From the calculation of the model, it is found that the proportion of occlusion and friction components is exponentially positively correlated with the stone content, and the functional expression under the boundary condition is given.

Key words: soil-rock mixture; shear strength; strength component; component model; stone content

0 引言

土石混合料作为主要的填筑材料, 其剪切强度是工程特性指标和高填方工程稳定分析的基本依据, 剪切特性与土石本身力学性质、土石相对比例、碎石形态等材料自身性质和颗粒组成等内在因素密切相关。土石料强度特性传统研究方法是通过室内试验来探讨, XU^[1]等指出块石强度及其所占比例、级配组成以及细粒物质组成等因素在很大程度上影响着土石混合

料的抗剪强度特征。丁秀丽等^[2]提出尽管单个块石颗粒本身强度较高, 但土石混合料的抗剪强度不单取决于颗粒自身强度, 还与颗粒之间的摩擦力有关。文献[3~8]等通过大量的室内大型直剪试验, 给出了含石量、块石岩性对强度参数影响效应, 同时从细观尺度

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0804607)

收稿日期: 2019-04-28

*通讯作者(E-mail: caihong@iwhr.com)

上开展了研究, 揭示了剪切面随着剪切位移的增大, 伴随裂隙的产生、发展和贯通而不断演化形成, 且呈起伏不平的形状。刘新荣^[9]在此基础上研究了土石料内摩擦角和黏聚力与含石量、含水率、块石岩性、初始孔隙比、法向压力 5 个影响因素间的相关效应, 解释了强度产生机制。Dai^[10]从细观力学角度提出土石料剪切时微观两颗粒间相互滑动的摩擦分量计算模型。

然而, 对土石料剪切机理及抗剪强度分量的内部力学描述和解释并不充分, 对土石混合体抗剪强度的机制进行分析, 应解决两方面问题: ①土石料剪切强度的构成分量及各分量的理论计算模型; ②利用分量模型解释粒组特征与强度间的相关效应。针对上述问题, 本文以土石料为研究对象, 宏观上通过室内大型剪切试验, 揭示剪切强度的形成机理及构成分量; 再通过微观颗粒力学分析, 建立分量计算模型; 最后结合计算模型的参数分析, 阐述粒组特征与强度间的相关效应。

1 土石料抗剪强度机理的试验研究

1.1 试验方案设计

室内大型直剪试验采用直剪盒的边长 30.5 cm, 高度 20 cm, 试验最大粒径满足规范要求。将土料按 d_{60} , d_{30} , d_{10} , C_u 和 C_c 重新混合配制成 7 种试验土样级配, 如图 1 所示。具体为 1 条 A 型级配良好曲线, 以考察普通状态下的土石料剪切强度指标; 3 条 B 型均匀颗粒曲线, 但粒径逐渐减小, 以考察较小粒径对抗剪强度的影响; 3 条 C 型缺失中间粒径不连续曲线, 以考察较大粒径对抗剪强度的影响。试验中控制各剪切试样的相对密度和磨圆度一致。

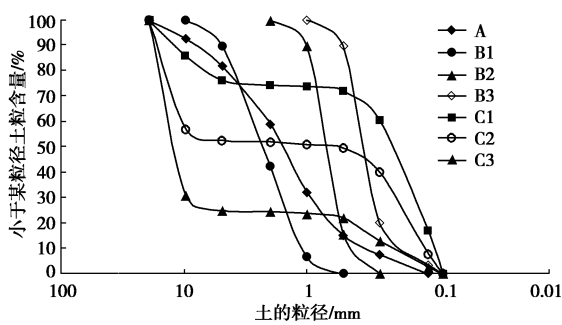


图 1 设计试样颗分曲线

Fig. 1 Grain-size distribution curves of designed samples

1.2 试验结果与分析

试验剪切速率 0.8 mm/min, 法向压力分别取 100, 200, 300, 400 kPa, 所得 7 组级配曲线的抗剪强度与法向应力关系如图 2 所示。

从图 2 统计的强度包络线可以看出, 良好级配的

A 土石混合料强度最高, 其抗剪强度包络线在 7 个设计级配中最靠上。从表 1 中可以看出, 粒径较为均一的 B 系列土石料的抗剪强度随着粒径的减小而依次降低; C 系列缺失中间粒径土石混合料由于密度大, 压缩性较小, 抗剪强度随着 P_3 含量增大而增大, 抗剪强度在这 7 条设计级配曲线直剪试验结果中仅次于良好级配 A 型土石料。由此可得, 土石料中粗颗粒含量的多少是决定强度的关键因素。

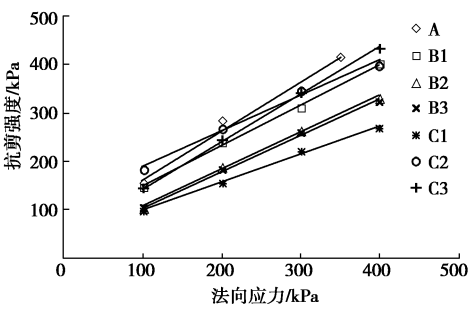


图 2 直剪试验抗剪强度 - 法向应力关系曲线

Fig. 2 Shear strength-normal stress curves of direct shear tests

表 1 抗剪强度试验结果统计

Table 1 Statistics of shear strength test results

抗剪强度指标	设计试样						
	A	B1	B2	B3	C1	C2	C3
c/kPa	66.5	67.4	36.2	31.2	44.8	118.9	66.5
$\varphi/(\text{^\circ})$	44.8	39.9	37.1	36.8	29.8	36.0	39.1

1.3 土石料剪切机理

土石混合料的抗剪强度不单取决于颗粒自身强度, 更多的与颗粒之间的摩擦、咬合有关。真实的剪切破坏过程中并不是剪破剪切面上所有的颗粒, 而是颗粒间发生滑动、滚动和剪断。剪切过程中, 土石颗粒的实际剪切带如图 3 中 $A'-A'$ 所示。

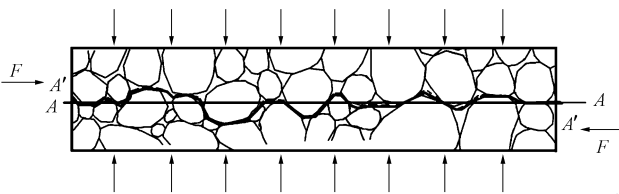


图 3 剪切过程中颗粒旋转滑移及实际剪切面

Fig. 3 Particle rotation slips and actual shear plane in shear process

土石料在剪切过程中颗粒之间的点接触在局部较高压力作用下会发生一定的剪切破碎现象, 同等情况下, 形状越不规则, 破碎就越厉害; 颗粒破碎率越高, 强度降低就越明显。这里颗粒破碎指的是棱角破碎, 不是颗粒剪断。本试验完成后, 剪切面上的破碎现象并不明显。换言之, 由颗粒破碎产生的剪切阻力分量所占材料抗剪强度的比例很小。由此可知, 土石混合料中的剪切阻力主要由咬合力、摩擦力及破碎力 3 个分量形成。与之相对应, 土石混合料抗剪强度也

由上述 3 个抗剪强度分量共同构成,

$$\tau = \tau_{\text{咬合}} + \tau_{\text{摩擦}} + \tau_{\text{破碎}} \quad (1)$$

2 抗剪强度分量的模型构建分析

2.1 咬合抗剪强度分量模型

土石混合料剪切过程中, 颗粒大小对临界状态摩擦角的影响主要体现在剪切带上的颗粒相互滑动、滚动和转动, 即一个颗粒跨越另外一个颗粒时需要克服抗力的做功, 颗粒大小不同将导致做功路径和摩擦耗能不同, 为进一步分析直剪试样中颗粒粒径大小对其抗剪强度的影响机制, 提出更具有普适性的椭圆颗粒在剪切过程中的运移力学过程, 以此分析式 (1) 中咬合力理论和摩擦力的理论解, 如图 4 所示。

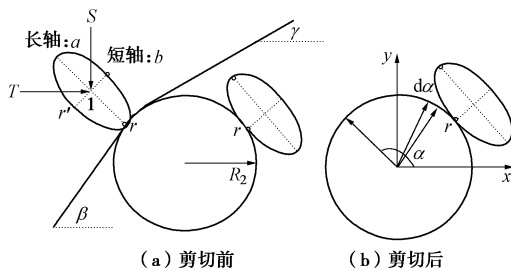


图 4 直剪试验宏观颗粒咬合功能模型

Fig. 4 Macroscopic particle occlusal model for direct shear tests

图 4 中 S 为一恒定的法向荷载; T 为剪切推力; 颗粒 1 椭圆长轴为 a , 短轴为 b , 颗粒 2 的半径为 R_2 ; 剪切时颗粒 1 从颗粒 2 的左边滑动到颗粒 2 的右边, 滑动路径关于颗粒 2 的中轴线 (y 轴) 对称; β 为颗粒 1 与颗粒 2 在初始状态时接触面的水平倾角; 在颗粒 1 滑动路径 r_0 范围内, 颗粒 1 滑动至任意角度时接触面的水平倾角为 γ ; α 为在图 4 (b) 坐标系下, 颗粒 1 沿滑动路径 r_0 滑动到任意位置时与 x 轴夹角。

在水平位移增量内, 剪切推力 T 对颗粒 1 做的功包含两部分, 一部分为角转动做功, 另一部分为重心位移做功, 同时以大于 5 mm 作为含石的临界标准, 引入含石量 ω 的影响因素。

(1) 角转动做功

$$W_\omega = \int \Delta l \cdot \frac{a}{2} \sin \omega d\alpha \quad (2)$$

式中, $d\alpha$ 为颗粒 1 在图 1 (b) 中与转动的微小角度增量, Δl 为剪切力对转动的分量。

转动的分量力可表示为

$$\Delta l = S \cdot \tan \varphi_\mu \sin \omega \sin \gamma \quad (3)$$

式中, φ_μ 为颗粒间滑动摩擦角, α 与 γ 关系可表示为

$$\gamma = \alpha - \frac{\pi}{2} \quad \left(\alpha > \frac{\pi}{2} \right) \quad (4)$$

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - \alpha \quad \left(\alpha \leq \frac{\pi}{2} \right) \quad (5)$$

由式 (2) 的积分范围为 $\pi/2 - \beta$ 到 $\pi/2 + \beta$, 进而求得剪切推力 T 在整个剪切转动过程中所作的功为

$$W_T = a \cdot S \cdot \sin \omega \cdot \tan \varphi_\mu (1 - \cos \beta) \quad (6)$$

(2) 重心位移做功

重心位移从剪切发生时开始, 与颗粒 2 的重心距离为 $R_2 + a/2$, 剪切发生时开始, 与颗粒 2 的重心距离为 $R_2 + a/2$, 重心位移轨迹如图 5 所示, 为一椭圆弧长。因此, 在重心位移轨迹上, 剪切力 T 做功为

$$W_g = \int F \cdot dg \quad (7)$$

式中, dg 为颗粒 1 在图 5 中位移的微小增量, F 为剪切力对位移的分量。位移的分量力可表示为

$$F = S \cdot \tan \varphi_\mu \cdot \sin \omega \cdot \sin \beta \quad (8)$$

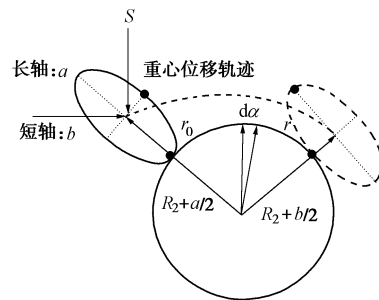


图 5 直剪试验微观椭圆颗粒位移模型

Fig. 5 Microscopic elliptical particle displacement model for direct shear tests

根据重心位移轨迹的椭圆公式, 其轨迹长度为

$$dg = \sqrt{(R_2 + a/2)^2 \sin^2 \alpha + (R_2 + b/2)^2 \sin^2 \alpha} d\alpha \quad (9)$$

由式 (7) 的积分范围为 $\pi/2 - \beta$ 到 $\pi/2 + \beta$, 进而计算得剪切推力 T 在整个重心位移过程中所作的功为

$$\frac{A^2 \cdot B^2 \sin h \left(\frac{A}{B} \cdot \cos \beta \right) + A \cos \beta \sqrt{A^2 \cos^2 \beta + B^2}}{\sqrt{A^2 - B^2}} \quad (10)$$

式中, $A = a/2 + R_2$, $B = b/2 + R_2$ 。

则咬合力的总功耗为

$$W_b = S \cdot \tan \varphi_\mu \cdot \sin \omega \left[a \cdot (1 - \cos \beta) + \frac{A^2 \cdot B^2 \sin h \left(\frac{A}{B} \cdot \cos \beta \right) + A \cos \beta \sqrt{A^2 \cos^2 \beta + B^2}}{\sqrt{A^2 - B^2}} \right] \quad (11)$$

式中, 各字母含义如前所述。

2.2 摩擦力分量模型

在水平位移增量内, 剪切推力 T 做的功与内摩擦力 Δf 做的功相等, 可表示为

$$W_f = \int \Delta f ds \quad (12)$$

式中, ds 为颗粒 1 在图 6 中与滑动了微小角度增量 $d\alpha$ 对应的相对位移增量, 可表示为

$$ds = ds_1 + ds_2 = \left(\frac{a+b}{2} + R_2 \right) d\alpha \quad (13)$$

内摩擦力 Δf 可表示为

$$\Delta f_1 = \frac{\tan \varphi_\mu S}{\cos \gamma - \tan \varphi_\mu \sin \gamma} \quad \left(\alpha > \frac{\pi}{2} \right) \quad (14)$$

$$\Delta f_2 = \frac{\tan \varphi_\mu S}{\cos \gamma + \tan \varphi_\mu \sin \gamma} \quad \left(\alpha \leq \frac{\pi}{2} \right) \quad (15)$$

由式 (12) 的积分范围为 $\pi/2-\beta$ 到 $\pi/2+\beta$ ，进而求得剪切推力 T 在整个剪切滑动摩擦过程中所作的功为

$$W_t = S \left(\frac{a+b}{2} + R_2 \right) \sin \varphi_\mu \ln \left[\frac{\tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\beta}{2} + \frac{\varphi_\mu}{2} \right)}{\tan \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\beta}{2} + \frac{\varphi_\mu}{2} \right)} \right] \quad (16)$$

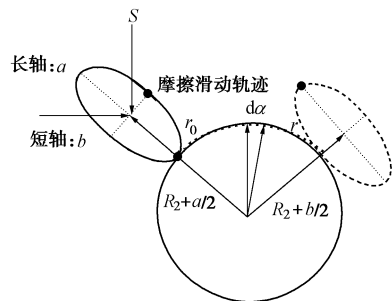


图 6 直剪试验细观椭圆颗粒摩擦滑动模型

Fig. 6 Friction sliding model for microscopic elliptic particles in direct shear tests

2.3 破碎力分量的描述

从土石混合料室内大直剪试验对比剪切前后的颗粒组成，表明土石混合料剪切过程中不易破碎，对比刘斯宏等^[7]的直剪试验结果可以看出，颗粒形状规则、表面光滑的玻璃球，内摩擦角仅 18°，而颗粒形状存在明显差异、表面粗糙的粗颗粒材料其摩擦角可达 46°，说明材料颗粒形状约不规则、颗粒表面越粗糙，咬合力和摩擦力提供的剪切阻力就越大，这也表明了剪切过程中提供抗剪阻力的主要是颗粒之间的咬合力和摩擦力。郭熙灵等^[8]对三峡风化石碴的剪切试验结果表明，破碎强度分量会随竖向压力增大而增加，但整体均未超过 10%，综合分析可得，破碎分量占硬岩剪切强度的 10% 以内。由此可得，土石混合料的抗剪强度主要由咬合抗剪强度分量和摩擦抗剪强度分量构成，两者提供了抗剪强度的主要部分。

3 抗剪强度中各分量的占比分析

为分析不同含石量下咬合分量与剪切分量间的占比关系，在破碎分量占比为 10% 的假定前提下，拟定典型性的边界条件，含石量从 10%~90%，初始接触

面的水平倾角 β 为 30°，颗粒间滑动摩擦角 φ_μ 为 35°，计算结果如表 2 所示。

不同含石量下的咬合与摩擦分量占比如图 7 所示。咬合分量随含石量增大呈非线性的正相关趋势。块石含量的增加，造成颗粒间比表面积减小，进而摩擦接触面减小，摩擦做功减小，摩擦占比也相应减小；块石含量增多后，其棱角的直接咬合接触几率增大，其相对移动的功耗增大，咬合分量占比相应增加。

表 2 各分量的占比计算

Table 2 Calculated results of proportion of each component

含石量 /%	W_b	W_t	比值	W_b 分量 /%	W_t 分量 /%
10	1.52	10.61	0.14	11.29	78.71
20	5.90	10.61	0.56	32.17	57.83
30	12.61	10.61	1.19	48.88	41.12
40	20.84	10.61	1.96	59.65	30.35
50	29.60	10.61	2.79	66.26	23.74
60	37.83	10.61	3.57	70.29	19.71
70	44.54	10.61	4.20	72.69	17.31
80	48.91	10.61	4.61	73.96	16.04
90	50.44	10.61	4.76	74.36	15.64

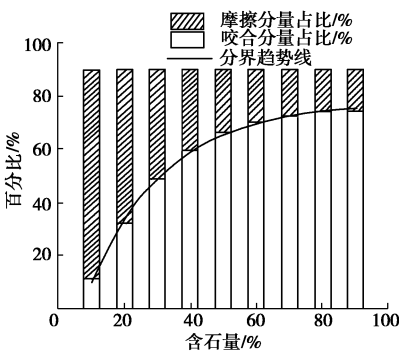


图 7 不同含石量下强度分量占比

Fig. 7 Proportions of strength component under different stone contents

由咬合与摩擦分量占比分界趋势线可知，咬合分量呈指数函数上升趋势，具体可表示为

$$W_b = 77.57 - 102.91 \cdot \exp(-\omega/23.36) \quad (17)$$

式中， W_b 为咬合分量占比， ω 为含石百分量。

式(17)所描述的咬合分量占比相关系数为 0.996，能很好地表示咬合与摩擦分量间的分布关系。

4 结 论

(1) 良好级配的土石混合料抗剪强度最高，均匀级配的抗剪强度随着粒径的减小而依次降低，缺失中间粒径级配混合料抗剪强度随 P_3 含量增大而增大。土石料中粗颗粒含量的多少是决定强度的关键因素。

(2) 土石混合料抗剪强度主要由咬合分量、摩擦分量及破碎分量 3 个分量共同构成。

(3) 从颗粒细观剪切运移力学过程推导出咬合分量与摩擦分量的理论模型公式，该模型公式涵盖了含石量、初始接触水平角、内摩擦角、粒径等参数影响；

提出破碎分量占总抗剪强度约10%;计算出咬合分量、摩擦分量与含石量的互馈关系,即咬合分量占比与含石量呈指数正相关趋势。

参考文献:

- [1] XU Wen-jie, XU Qiang, HU Rui-lin. Study on the shear strength of soil-rock mixture by large scale direct shear test[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2011, **48**: 1235 - 1247.
- [2] 丁秀丽, 张宏明, 黄书岭, 等. 基于细观数值试验的非饱和土石混合体力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(8): 1553 - 1566. (DING Xiu-li, ZHANG Hong-ming, HUANG Shu-ling, et al. Research on mechanical characteristics of unsaturated soil-rock mixture based on numerical experiments of mesostructure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(8): 1553 - 1566. (in Chinese))
- [3] 李维树, 丁秀丽, 邬爱清, 等. 蓄水对三峡库区土石混合体直剪强度参数的弱化程度研究[J]. 岩土力学, 2007, **28**(7): 1338 - 1342. (LI Wei-shu, DING Xiu-li, WU Ai-qing, et al. Shear strength degeneration of soil and rock mixture in Three Gorges Reservoir bank slopes under influence of impounding[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(7): 1338 - 1342. (in Chinese))
- [4] 李维树, 邬爱清, 丁秀丽. 三峡库区滑带土抗剪强度参数的影响因素研究[J]. 岩土力学, 2006, **27**(1): 56 - 60. (LI Wei-shu, WU Ai-qing, DING Xiu-li. Study on influencing factors of shear strength parameters of slide zone clay in Three Gorges Reservoir Area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, **27**(1): 56 - 60. (in Chinese))
- [5] 舒志乐, 刘新荣, 刘保县. 基于分形理论的土石混合体强度特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(增刊 1): 2652 - 2656. (SHU Zhi-le, LIU Xin-rong, LIU Bao-xian. Study of strength properties of earth-rock aggregate based on fractals[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(S1): 2652 - 2656. (in Chinese))
- [6] DAI Beibing. Micromechanical investigation of the behavior of granular materials[D]. Hong Kong: University of Hong Kong, 2010.
- [7] 刘斯宏, 黄明坤, 王子健, 等. 破碎性堆石料单剪试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(8): 1503 - 1508. (LIU Si-hong, HUANG Ming-kun, WANG Zi-jian, et al. Simple shear tests on breakable rockfill materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(8): 1503 - 1508. (in Chinese))
- [8] 郭熙灵, 胡辉, 包承纲. 堆石料颗粒破碎对剪胀性及抗剪强度的影响[J]. 岩土工程学报, 1997, **29**(3): 86 - 91. (GUO Xi-ling, HU Hui, BAO Cheng-gang. Experimental studies of the effects of grain breakage on the dilatancy and shear strength of rock fill[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, **29**(3): 86 - 91. (in Chinese))
- [9] 刘新荣, 涂义亮, 王林枫, 等. 土石混合体的剪切面分形特征及强度产生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, **36**(9): 2260 - 2274. (LIU Xin-rong, TU Yi-liang, WANG Lin-feng, et al. Fractal characteristics of shear failure surface and mechanism of strength generation of soil-rock aggregate[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, **36**(9): 2260 - 2274. (in Chinese))
- [10] DAI Bei-bing. Micromechanical investigation of the behavior of granular materials[D]. Hong Kong: University of Hong Kong, 2010.

(本文责编 胡海霞)

(上接第229页)

- [6] 路莹, 杜新强, 迟宝明, 等. 地下水人工回灌过程中多孔介质悬浮物堵塞实验[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011(2): 448 - 454. (LU Ying, DU Xin-qiang, CHI Bao-ming, et al. The porous media clogging due to suspended solid during the artificial recharge of groundwater[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2011(2): 448 - 454. (in Chinese))
- [7] THEIS C V. The relation between the lowering of the Piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground - water storage[J]. Eos Transactions American Geophysical Union, 1935, **16**(2): 519 - 524.
- [8] 闫峭, 马聪, 周维博. 地下水回灌过程中水文地质参数的反演[J]. 灌溉排水学报, 2015(7): 88 - 92. (YAN Qiao, MA Cong, ZHOU Wei-bo, Hydrogeology parameters inversion during the process of groundwater recharge[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015(7): 88 - 92. (in Chinese))
- [9] 刘国庆, 吴时强, 范子武, 等. 回灌与回扬物理过程的解析推导及灌压变化规律[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2016(6): 1799 - 1807. (LIU Guo-qing, WU Shi-qiang, FAN Zi-wu, et al. Analytical derivation on recharge and periodic backwashing process and the variation of recharge pressure[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2016(6): 1799 - 1807. (in Chinese))

(责编: 胡海霞)