

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201803112

颗粒特性对第三系弱胶结砾岩抗剪强度的影响

朱 举¹, 乔春生¹, 宋 仪², 韩智铭¹, 涂洪亮¹

(1. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 中铁第六勘察设计院集团有限公司, 天津 300308)

摘 要: 第三系弱胶结砾岩是一种介于土与岩石之间的特殊岩土材料, 成岩程度低, 自稳能力差, 颗粒级配特征和胶结程度对岩石工程特性的影响显著. 以蒙华铁路中条山隧道出口侧第三系弱胶结砾岩为对象, 通过对天然原状试样和重塑试样的筛分试验、颗粒粒径分形特征分析以及大型直剪试验, 对砾岩的分形特征和胶结程度与抗剪强度之间的关系进行了分析. 结果表明: 第三系弱胶结砾岩一般以粒径值 1.0 mm 为界具有二重分维特性, 且细粒分维值普遍小于粗粒分维值, 表明砾岩在组成上呈现出细粒质量分数相对较多的特征, 而具有一重分维的砾岩具有最优级配和最高抗剪强度; 根据胶结程度不同, 第三系弱胶结砾岩可分为弱胶结与极弱胶结, 极弱胶结砾岩粘聚力极小可以忽略, 其强度特征与无黏性土类似; 在相同胶结程度情况下, 分维数与第三系弱胶结砾岩内摩擦角正切值存在负指数关系; 胶结程度是影响第三系弱胶结砾岩抗剪强度的重要因素, 颗粒级配相同情况下极弱胶结砾岩的抗剪强度和内摩擦角仅为弱胶结砾岩的 33.46% ~ 40.85% 和 58.64%.

关键词: 弱胶结砾岩; 第三系地层; 分形特征; 颗粒级配; 分维数; 胶结程度; 抗剪强度

中图分类号: TU458.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2019)05-0100-10

Effect of particle characteristics on shear strength of weakly cemented conglomerate in tertiary

ZHU Ju¹, QIAO Chunsheng¹, SONG Yi², HAN Zhiming¹, TU Hongliang¹

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
2. China Railway Liuyuan Group Co., Ltd., Tianjin 300308, China)

Abstract: Weakly cemented conglomerate of Tertiary system is a kind of special geotechnical material between soil and rock. It has low diagenesis degree and poor self-stability, and its characteristics of particle gradation and cementation degree have significant impact on engineering characteristics of the rock. The relationship among fractal characteristics, cementation degree, and shear strength of conglomerate was analyzed by screening test, particle size fractal characteristics study, and large-scale direct shear test on undisturbed and remolded samples taken from the weakly cemented conglomerate of Tertiary system in the tunnel exit of Menghua Railway of Zhongtiao Mountain. Research results show that weakly cemented conglomerate generally had binary fractal features in the boundary of particle size 1.0 mm, and the fractal dimension of fine particles was mostly less than that of coarse particles, which indicates that there are relatively more fine particles in weakly cemented conglomerate of Tertiary system, and the conglomerate with 1D fractal has optimal gradation and maximum shear strength. According to the degree of cementation, weakly cemented conglomerate can be divided into weak cementation and extremely weak cementation. The cohesion of extremely weak cemented conglomerate was negligible and its strength characteristics were similar to those of non-cohesive soil. Under the condition of similar cementation degree, the relationship between fractal dimension and tangent of internal friction angle of the conglomerate could be described by negative exponent function. The shear strength and internal friction angle of extremely weakly cemented conglomerate were only 33.46%~40.85% and 58.64% compared with weakly cemented conglomerate without considering the difference in particle gradation, which shows that the cementation degree is an important factor affecting the shear strength of weakly cemented conglomerate of Tertiary system.

Keywords: weakly cemented conglomerate; Tertiary system; fractal characteristics; particle gradation; fractal dimension; cementation degree; shear strength

收稿日期: 2018-03-22
基金项目: 国家自然科学基金(51478031)
作者简介: 朱 举(1992—),男,博士研究生;
乔春生(1958—),男,教授,博士生导师
通信作者: 乔春生, qiaocs@163.com

随着工程建设规模、区域和开挖深度的扩大,如今国内外遇到了很多介于土和岩石之间的过渡性岩土体,给工程施工及运营造成很多难题.兰渝铁路桃树坪隧道、胡麻岭隧道^[1-2]等穿越第三系地层时遇到的难题引起了对第三系半成岩特殊工程性质的广

泛关注.第三系弱胶结砾岩广泛分布于中国中西部地区^[3-6],属于典型的第三系半成岩,是由砾石、细粒土、胶结物、水和孔隙共同组成的一种特殊工程地质体,其胶结性弱,成岩程度低且遇水易软化,因而物理力学特性十分复杂,施工时易产生大变形、掌子面坍塌、超前加固失效等风险,因此研究弱胶结砾岩的颗粒组成和胶结程度对研究砾岩的强度特性及预防施工中的风险具有重要意义.

自 Mandelbrot^[7] 创立分形理论以来,岩土领域专家也开始尝试用分形几何方法描述颗粒类材料的物理力学性质.刘晓明^[8]根据水流对岩土颗粒的搬运方式不同,认为沉积岩土可以分为2种颗粒分维数不同的混合物;舒志乐^[9]研究发现土石混合体分维值与含石量及强度之间均呈抛物线性关系,其中只有一重分维的土石混合体的密实度及抗剪强度最大;陈松^[10]分析了堰塞湖溃坝堆积物分选系数和分维值的关系,分选系数大则分维值大,反之,分维值则小.

近年来,对第三系地层工程性质方面的研究较多^[11-13],但是,主要集中在砂岩和泥岩,对第三系砾岩的研究较少,对第三系砾岩强度特征的系统研究更为匮乏.第三系弱胶结砾岩构成成分多样,颗粒粒径组成过于悬殊,最大与最小粒径相差百倍,导致结构极端不均匀,常规物理力学试验方法无法避免尺寸效应对试验结果的影响.此外,胶结程度不仅导致现场难以取到完整的无扰动试样,同时会大大影响其物理力学特性,因而很难找到合适的理论与试验方法分析砾岩的强度特征.

新建蒙华铁路中条山隧道位于山西运城,下穿中条山,长18.4 km,出口段约有3.7 km下穿中条山南麓第三系上新统(N_2)洪积扇地层,区内又含高出隧道约170 m的承压水,该段第三系地层主要岩性为砂质泥岩与弱胶结砾岩,成岩程度低,弱胶结砾

岩按胶结程度又可划分为弱胶结与极弱胶结,其中极弱胶结砾岩类似散体材料,该区域第三系弱胶结砾岩岩体强度低,遇水易软化、崩解,导致围岩基本没有自承载能力.此类岩体的整体性较差,施工时无法采用锚杆、锚索等主动支护措施,极易发生坍塌和突涌等工程灾害,会对隧道的安全造成重大影响.该段隧道建设是工程的最大难点、重点,对中条山隧道工程建设起控制作用,因此,开展对第三系弱胶结砾岩强度影响因素的研究尤为重要.

本文拟在前人研究的基础上,以中条山隧道第三系弱胶结砾岩为研究对象,应用分形理论对砾岩的粒度分形特征进行研究,利用室内大型剪切试验平台,设计合理的制样及试验方法,分析弱胶结砾岩的抗剪强度特性及颗粒分维值对强度的影响.对不同胶结程度的砾岩强度进行对比,从微观角度分析砾岩胶结的机理及弱胶结与极弱胶结砾岩的差异,进而研究胶结程度对砾岩抗剪强度的影响,为弱胶结砾岩物理力学特性的研究进行补充,并对中条山隧道及类似工程的施工起指导作用.

1 第三系弱胶结砾岩的矿物成分

岩土体中矿物颗粒的大小、形状和矿物成分是决定其物理、力学性质的根本因素.研究固体颗粒就要分析粒径的大小及各组粒径所占的比例,同时研究其矿物成分、颗粒的形状及其排列与接触方式.在试验进行前对第三系弱胶结砾岩进行矿物成分分析,有助于更深入了解砾岩的基本特征.

本次砾岩矿物成分分析采用X射线衍射定量分析中的“K值法”,该方法可以定性并定量给出砾岩的矿物构成及相应质量分数,取样里程试样1为DK629+454,试样2为DK630+973,试验结果见表1、表2.

表1 矿物X-射线衍射分析结果

Tab.1 X-ray diffraction analysis of minerals								%
试样编号	矿物种类和质量分数							黏土矿物总量
	石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石	赤铁矿	角闪石	
1	22.2	4.8	10.1	39.7	6	1.4	2.3	13.5
2	33.4	4.3	7.5	32.1	6.1	1.2	—	15.4

表2 黏土矿物X-射线衍射分析结果

Tab.2 X-ray diffraction analysis of clay minerals								%
试样编号	黏土矿物相对质量分数					混层比S		
	蒙皂石类S	伊/蒙混层I/S	伊利石I	高岭石K	绿泥石C	绿/蒙混层C/S	伊/蒙混层I/S	绿/蒙混层C/S
1	43	—	46	3	8	—	—	—
2	—	38	42	7	13	—	65	—

从表1和表2可以看出,两个不同位置取出的砾岩试样矿物成分类型与含量基本一致,说明中条

山隧道第三系弱胶结砾岩矿物组成无明显变化,可以初步判断其不同位置处工程性质未存在较大差

异。砾岩主要矿物成分按照含量依次为方解石、石英与黏土矿物。其中,方解石为碳酸盐质胶结物,质量分数为 32.1% ~ 39.7%,其强度比泥质胶结物高;石英为碎屑类矿物,硬度大,稳定性好,质量分数为 22.2% ~ 33.4%,也对岩石的硬度和强度影响较大;黏土矿物质量分数为 13.5% ~ 15.4%,主要在胶结物中分布,其性质决定了砾岩的胶结强度,从而整体上影响砾岩的工程性质。

2 试 验

2.1 试验设备

筛分试验根据相关规程^[14]采用常规土的室内筛分试验装置,鉴于第三系弱胶结砾岩取样及试样加工困难,部分颗粒较大,无法进行常规剪切试验,采用岩土实验室自主设计研制的室内大型直接剪切试验平台,包括主体试验台、计算机控制系统、水平与法向位移采集系统以及温度控制系统。用该设备进行剪切试验可以有效避免砾岩中粒径较大的砾石由于尺寸效应而对试验结果造成影响。



图 1 大型剪切试验平台

Fig. 1 Large-scale shear test system

2.2 试样制备

2.2.1 弱胶结砾岩的分类

试验试样取自蒙华铁路中条山隧道。在该隧道第三系地层弱胶结砾岩段,除了少数的巨大砾石,弱胶结砾岩的颗粒直径绝大部分都在 60 mm 以内,隧道掌子面原状砾岩试样很难成型取出。对于弱胶结范围内的砾岩,其胶结程度对砾岩的物理力学性质会有较大影响。因此,结合钻孔取芯时岩样状态,将第三系弱胶结砾岩按胶结程度划分为弱胶结和极弱胶结两种类型。弱胶结砾岩为泥质弱胶结,含砂,胶结类型以填充式胶结为主,无水状态或不扰动情况下一般可以自稳,遇水易软化。钻孔所取岩芯一般呈碎块状,少量短柱状,柱状岩芯浸水后可掰开。极弱胶结砾岩砾石之间被砂质细粒充填,含泥量少,密实,胶结类型以接触式胶结为主,不扰动时有一定自稳能力,扰动后呈散体的碎石土状,类似散体材料,基本无法成型取出。

2.2.2 取样及制样

根据弱胶结砾岩的胶结程度不同试验取样分为两类,一类为具有一定胶结的饱和第三系弱胶结砾岩原状试样,原状试样分 3 个批次在隧道不同里程及掌子面上不同位置处取出,但由于其胶结性弱,易碎散,取出的原状砾岩试样极不规则,无法直接进行剪切试验,因此,试验前对其制模加工以适应剪切盒形状^[15]。制模时采用水泥和砂配合比为 1:2 的水泥砂浆,模具由可拆卸木板制成,制作试样尺寸为 300 mm × 300 mm × 200 mm,浇筑时在试样中间铺设约 2 cm 的粉土作为夹层,拆模后取出,以保证试样中部露出剪切面。浇筑完成后经过 1 周时间的养护,进行剪切试验,试样制作完成后见图 2。



图 2 浇筑后的原状试样

Fig. 2 Poured undisturbed sample

另一类为极弱胶结砾岩,此类试样胶结性极弱,无法在现场成型取出,因此,在室内采用重塑的方法进行试验。重塑试样制备前,首先将筛分好的砾岩颗粒按比例配料,然后将重塑试样按原状试样所测密度进行装样压实,从而保证所有重塑试样密度和胶结程度近似相同。试样制备过程中,将按确定级配制成的试样通过质量等分 4 次装入剪切盒,每次装样后按照原状试样的密度进行压实,并加水饱和。为了保证剪切过程加载稳定,试样实际高度保证在 180 mm,重塑试样剪切前如图 3。



图 3 重塑试样

Fig. 3 Remolded sample

2.3 试验方案

设计剪切试验时,考虑到中条山隧道的埋深和室内试验设备的限制,剪切试验法向压力设定为 400、600、800、1 000 kPa,剪切速率为 0.3 mm/min. 为了分析颗粒配比和胶结程度对饱和第三系弱

胶结砾岩抗剪强度的影响,首先通过直剪试验测试了原状试样的抗剪强度,并将剪切后试样破碎并进行筛分试验,以获得原状砾岩的级配特性,测试结果见表 3.

表 3 原状试样不同粒径颗粒的质量分数
Tab. 3 Content of particles of different sizes in undisturbed samples %

试样编号	各组粒径/mm 颗粒的质量分数										
	60 ~ 40	40 ~ 20	20 ~ 10	10 ~ 5	5 ~ 2	2 ~ 1	1 ~ 0.5	0.5 ~ 0.25	0.25 ~ 0.1	0.1 ~ 0.075	<0.075
1	14.98	23.86	21.79	15.13	10.31	1.24	3.88	3.31	3.21	0.94	1.35
2	11.27	29.89	21.28	13.67	9.86	1.40	4.05	3.29	3.01	0.97	1.29
3	0.00	8.28	25.88	23.14	17.97	3.13	7.28	5.79	3.08	2.39	3.05
4	3.38	21.63	22.26	19.17	14.96	2.38	5.92	3.98	3.01	1.20	2.10
5	20.20	11.09	21.07	19.50	12.55	2.25	4.65	3.37	2.95	0.96	1.42
6	6.78	13.47	27.92	18.60	13.60	2.77	6.49	4.28	2.62	1.29	2.18
7	1.67	6.55	30.02	22.88	17.07	3.24	6.55	4.32	3.66	1.43	2.61

根据《土的分类标准》^[16] 中规定,粒径大于 2 mm 的颗粒质量分数超过全部质量 50% 的称为砾类土,因此,在级配分析中将粒径小于 2 mm 的颗粒作为细颗粒,大于 2 mm 的颗粒作为粗颗粒. 由表 3 可知,中条山第三系弱胶结砾岩原状试样的颗粒级配分布范围在一个较小的范围内,细粒质量分数均值为 18.33%. 现场取样时观察发现,弱胶结砾岩颗粒分布极不均匀,为了研究颗粒分布更大范围内弱胶结砾岩的性质,并消除胶结程度的影

响,采用了重塑试样进行对比试验. 设计重塑试验时,在上述规范认定的砾类土范围内,将细颗粒质量分数作为划分标准,以所测原状试样细颗粒质量分数均值为基准按比例增加和减少细颗粒质量分数,分为 9.16%、18.33%、27.49%、36.66%、45.82% 共 5 组,并保持细粒和粗粒两个粒组范围内不同粒径间比例不变,所得重塑砾岩颗粒组成见表 4,级配累计曲线见图 4,然后对每组重塑试样在 4 个法向压力下 进行剪切试验,试验参数如表 5 所示.

表 4 重塑试样不同粒径颗粒的质量分数
Tab. 4 Content of particles of different sizes in remolded samples %

细颗粒质 量分数/%	各组粒径/mm 颗粒的质量分数										
	60 ~ 40	40 ~ 20	20 ~ 10	10 ~ 5	5 ~ 2	2 ~ 1	1 ~ 0.5	0.5 ~ 0.25	0.25 ~ 0.1	0.1 ~ 0.075	<0.075
9.16	9.26	18.24	27.05	20.99	15.30	1.17	2.77	2.02	1.54	0.66	1.00
18.33	8.33	16.40	24.32	18.87	13.76	2.34	5.55	4.05	3.08	1.31	2.00
27.49	7.39	14.56	21.59	16.75	12.22	3.52	8.32	6.07	4.62	1.97	3.00
36.66	6.46	12.72	18.86	14.64	10.67	4.69	11.09	8.10	6.16	2.62	4.00
45.82	5.52	10.88	16.13	12.52	9.13	5.86	13.86	10.12	7.70	3.28	5.00

表 5 重塑试样剪切试验参数
Tab. 5 Direct shear test parameters of remolded samples

试样编号	细颗粒质量分数/%	饱和密度/(g · cm ⁻³)	剪切速率/(mm · min ⁻¹)	含水率/%
1	9.16	2.321	0.3	7.96
2	18.33	2.334	0.3	7.96
3	27.49	2.321	0.3	7.96
4	36.66	2.309	0.3	7.96
5	45.82	2.342	0.3	7.96

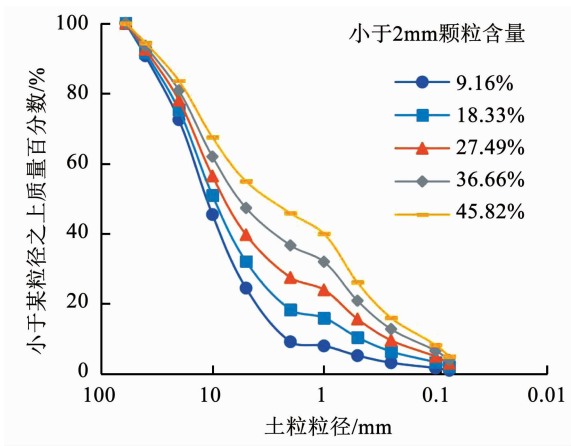


图 4 重塑试样颗粒级配累计曲线

Fig. 4 Accumulative curves of grain gradation of remolded samples

2.4 分维计算方法

依据分形理论, Tyler 和 Wheatcraft^[17]于 1992 年提出了质量-粒径关系的分形结构模型

$$\frac{M(r < R)}{M_T} = \left(\frac{R}{R_T}\right)^{3-D}$$

(1)

式中: $M(r < R)$ 为小于某一粒径 R 的颗粒的质量, M_T 为进行颗粒级配分析的颗粒总质量, R_T 为最大筛孔半径, D 为粒度分维数. 对于弱胶结砾岩的室内筛分试验, R_T 和 M_T 均已知, 对式(1)两侧取对数

$$\lg \frac{M(r < R)}{M_T} = (3 - D)(\lg R - \lg R_T),$$

(2)

即

$$\lg \frac{M(r < R)}{M_T} \propto \lg R.$$

(3)

根据弱胶结砾岩颗粒级配累计曲线, 对粒径值和小于该粒径颗粒质量分数取对数后进行线性拟

合, 得到直线斜率 K_i , 根据式(2), 即可得出第三系弱胶结砾岩的分维数, 即

$$D_i = 3 - K_i.$$

(4)

3 结果及分析

3.1 第三系弱胶结砾岩的抗剪强度及参数分析

由于原状试样剪切试验后已破坏无法重复试验, 需要制作 4 个试样在不同法向压力下 进行剪切, 从而得到原状试样直剪试验结果.

对于原状砾岩试样的颗粒级配, 根据《铁路工程土工试验规程》^[14], 小于 60 mm 的土体筛分试验取样质量需大于 5 kg, 而剪切试验破坏后的试样由于水泥砂浆与试样已浇筑为一体, 对其破碎筛分时无法取到 5 kg 以上不掺杂碎水泥颗粒的砾岩试样, 导致剪切试验原状砾岩不能直接测出颗粒级配, 而筛分试验需要对试样破碎处理, 因此进行筛分试验后的原状试样无法进行剪切试验, 从而使原状砾岩剪切试验结果无法与颗粒组成形成直接对应的关系.

经过筛分试验可知, 中条山隧道弱胶结砾岩段不同位置处的原状砾岩颗粒级配非常接近, 可以判断进行剪切试验的原状试样与进行筛分试验的原状试样在颗粒级配上不会有明显的变化, 因此, 采用筛分试验测得砾岩颗粒级配的平均值, 作为剪切试验原状砾岩试样的颗粒级配, 也作为中条山隧道弱胶结砾岩段原状弱胶结砾岩的颗粒级配, 以进行下一步的研究.

重塑试样是模拟胶结性极弱的第三系弱胶结砾岩, 此类砾岩无法成型, 且基本都由无黏性颗粒构成, 因此, 对重塑试样直剪试验结果分析时, 假设重塑砾岩的黏聚力为零, 试验结果见表 6.

表 6 第三系弱胶结砾岩剪切试验结果

Tab. 6 Direct shear test results of weakly cemented conglomerate of Tertiary system

试样编号	细颗粒质量分数/%	各法向压力下抗剪强度/kPa				摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	相关系数 R^2
		400 kPa	600 kPa	800 kPa	1 000 kPa			
原状试样	18.33	922.3	1102.3	1448.5	1926.7	59.23	174.2	0.962 0
重塑试样 1	9.16	323.7	431.7	605.4	735.4	36.67	0	0.989 3
重塑试样 2	18.33	308.6	450.3	553.6	661.1	34.73	0	0.952 9
重塑试样 3	27.49	287.0	340.9	489.0	685.4	32.87	0	0.944 2
重塑试样 4	36.66	280.0	396.0	457.8	646.7	32.24	0	0.950 0
重塑试样 5	45.82	272.6	365.7	470.6	632.4	31.76	0	0.979 8

3.2 弱胶结砾岩级配分析

从图 4 中细粒质量分数为 18.33 % 的曲线可以看出, 弱胶结砾岩级配曲线呈现下凹的形态特征, 前半段陡峭, 后半段趋于平缓, 反映到颗粒组成上为粗粒质量分数显著高于细粒质量分数, 弱胶结砾岩主要由粗颗粒组成.

对于胶结性较弱的岩土类材料, 一般采用级配曲线的相关参数不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 来表

征颗粒级配特性, C_u 用来描述颗粒的均匀性, C_u 越大, 颗粒粒径分布越不均匀, 岩土材料更容易形成良好的密实度; C_c 用来描述颗粒级配曲线的曲率情况, 越大或越小都会导致岩土工程性质不良. 因此, 一般认为同时满足 $C_u > 5$ 及 $C_c = 1 \sim 3$ 两个条件的岩土体属于级配良好, 具有较高的强度, 工程性质优良, 反之则属于级配不良^[18]. 第三系砾岩试样的颗粒分析相关参数见表 7.

表 7 第三系弱胶结砾岩剪切试验结果						
Tab. 7 Direct shear test results of weakly cemented conglomerate of Tertiary system						
试样编号	细颗粒质量分数/%	有效粒径 d_{10} /mm	连续粒径 d_{30} /mm	限定粒径 d_{60} /mm	不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c
原状试样	18.33	0.47	4.40	14.0	29.79	2.94
重塑试样 1	9.16	2.20	6.30	16.0	7.27	1.13
重塑试样 2	18.33	0.47	4.40	14.0	29.79	2.94
重塑试样 3	27.49	0.27	2.60	12.0	44.44	2.09
重塑试样 4	36.66	0.17	0.86	9.2	54.12	0.47
重塑试样 5	45.82	0.13	0.61	6.9	53.08	0.41

由表 6,7 可以看出,细粒质量分数在 9.16%, 18.33% 和 27.49% 的弱胶结砾岩均为级配良好,对应的强度较高;细粒质量分数为 36.66% 和 45.82% 的弱胶结砾岩级配不良,对应的强度较低。 C_u 和 C_c 可以用来反映弱胶结砾岩级配的优良,从而简单判断砾岩强度的大小,但级配参数与强度的具体关系很难得出,因此,考虑采用分形特征描述弱胶结砾岩

颗粒级配对强度的影响。

3.3 弱胶结砾岩颗粒的分形特征

依据分维计算方法,做出重塑试样粒径与小于该粒径颗粒质量分数在双对数坐标下的关系图(见图 5),对其线性拟合得到第三系弱胶结砾岩的分维数,并分析其分形特征。

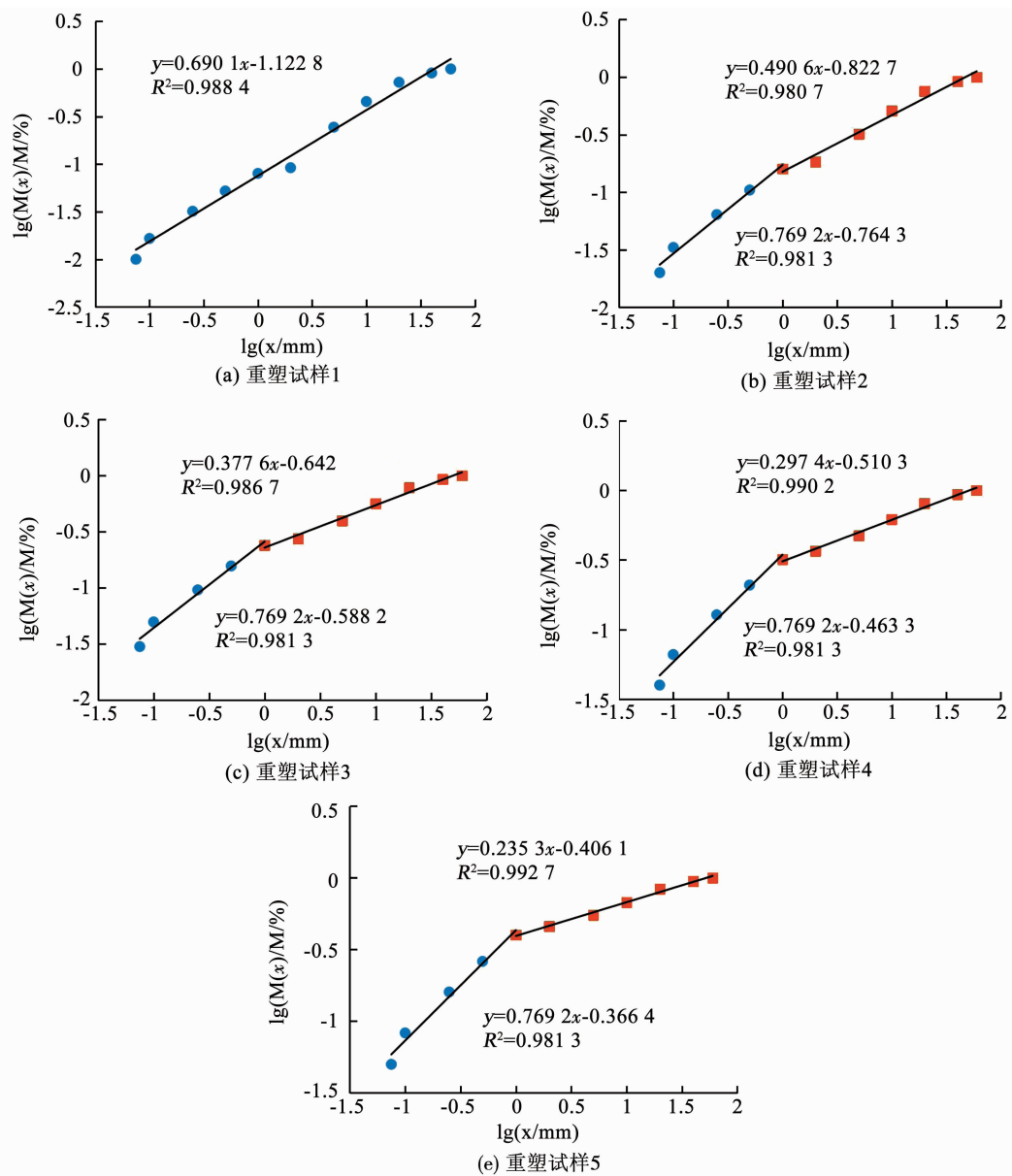


图 5 弱胶结砾岩不同级配粒度分形分布曲线

Fig. 5 Fractal curves of different grain gradations of weakly cemented conglomerate

从弱胶结砾岩分形分布曲线可以看出,以颗粒粒径值 1.0 mm 为界,曲线分为 2 个无标度区间,即粗粒与细粒,主要构成成分分别对应砾石和砂粒、土粒等细颗粒. 需要指出的是,在分形特征研究中,细粒和粗粒是自然条件下对弱胶结砾岩颗粒进行的分选,与常规试验及工程中对颗粒粗细大小的人为划分不同. 在每个区间内分形分布曲线均具有良好的线性相关性,表明颗粒具有明显的统计规律,反映出弱胶结砾岩分别在 2 个无标度区间内颗粒粒径分布连续、均一性较好,弱胶结砾岩粒度分形分析结果见表 8.

表 8 弱胶结砾岩粒度分形分析结果

Tab. 8 Fractal analysis results of the granularity of weakly cemented conglomerate

重塑试样 编号	小于 2 mm 颗粒 质量分数/%	细粒分维值 ($r < 1.0$ mm)	粗粒分维值 ($r \geq 1.0$ mm)	分维数 均值
1	9.16	2.310	2.310	2.310
2	18.33	2.231	2.509	2.370
3	27.49	2.231	2.622	2.427
4	36.66	2.231	2.703	2.467
5	45.82	2.231	2.765	2.498

进一步观察弱胶结砾岩分形分布曲线,可以发现弱胶结砾岩颗粒大都具有二重分维特性,而具有一重分维的弱胶结砾岩颗粒级配最优,体现为砾岩整体颗粒分布均匀且连续,如重塑试样 1. 对于具有二重分维特征的砾岩,其在粒度分形分布曲线中大都具有上凸的特点,细粒分维值普遍小于粗粒分维值,上凸越明显,表明以砂粒、土粒等成分为主的细粒质量分数越高,分维数均值越大. 由此可以推测弱胶结砾岩的粒度分维空间,如图 6 所示.

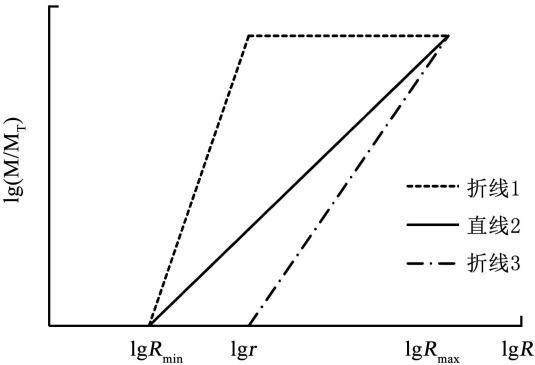


图 6 第三系弱胶结砾岩粒度分维空间

Fig. 6 Fractal dimension space of weakly cemented conglomerate

在弱胶结砾岩粒度分形分布曲线拟合图中,折线 1 代表全部由细颗粒构成的弱胶结砾岩;折线 3 代表全部由粗颗粒构成的弱胶结砾岩;直线 2 代表

具有一重分维的弱胶结砾岩,此时砾岩颗粒级配组成最合理,具有最大的密实度. 对于所有弱胶结砾岩,其颗粒分形分布曲线总应在折线 1 与折线 3 组成的分维空间内^[15]. 在这个分维空间中随着细粒质量分数的增多,砾岩粒度分形曲线随之由下凹转变为上凸,实际上由于第三系弱胶结砾岩组成颗粒的形成条件及半土半岩的性质,其颗粒分形分布曲线绝大部分存在于粒度分维空间的上半区域,表明砾岩在颗粒组成上具有细粒质量分数相对较多的特点,反映了弱胶结砾岩具有典型第三系地层半土半岩的特征.

3.4 弱胶结砾岩抗剪强度与分形特征关系分析

影响弱胶结砾岩抗剪强度的因素很复杂,其中颗粒级配是决定砾岩抗剪强度的一个重要因素^[19]. 通过颗粒级配曲线可以简单判断级配良好和级配不良的弱胶结砾岩强度大小,但对于同属于级配良好或不良范围内岩土体性质的优劣,仅依靠级配曲线难以进行区分. 为了进一步分析弱胶结砾岩颗粒组成与强度的关系,并考虑到单一细粒或粗粒分维数仅能反映各粒组范围内颗粒的组成,无法描述砾岩整体颗粒的分布情况,将各组重塑试样分维数均值与抗剪强度内摩擦角正切值进行拟合,如表 9、图 7 所示.

表 9 重塑试样内摩擦角与分维数

Tab. 9 Internal friction angle and fractal dimension of remolded samples

重塑试样 编号	小于 2 mm 颗粒 质量分数/%	$\tan \varphi$	内摩擦角/(°)	分维数
1	9.16	0.745	36.671	2.310
2	18.33	0.693	34.734	2.370
3	27.49	0.646	32.875	2.427
4	36.66	0.631	32.244	2.467
5	45.82	0.619	31.762	2.498

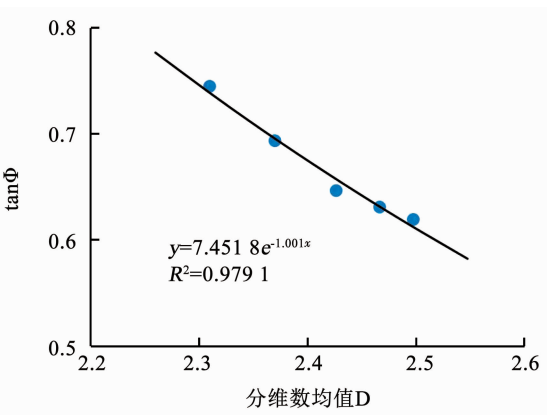


图 7 分维数和内摩擦角正切值关系曲线

Fig. 7 Relationship curve of fractal dimension and the tangent value of internal friction angle

由图 7 可知,对于极弱胶结的砾岩,内摩擦角正切值 $\tan \varphi$ 与分维数 D 呈负指数函数关系,回归方程为

$$\tan \varphi = 7.4518e^{-1.001D} \quad (5)$$

相关系数 $R^2 = 0.9791$,表明相关性很好,可见分维值可以很好地描述弱胶结砾岩抗剪强度内摩擦角和颗粒组成之间的关系。

从式(5)可知,在相同胶结程度情况下,弱胶结砾岩内摩擦角随分维数的增大而减小,即随细粒质量分数的增多内摩擦角在减小;对于极弱胶结砾岩的黏聚力 c ,从表 6 可以看出,重塑试验在 c 值为零的情况下进行拟合,相关系数 R^2 均大于 0.9,线性拟合相关性良好,这表明在极弱胶结情况下,弱胶结砾岩黏聚力大小可以忽略不计,其强度特征与无黏性土的抗剪强度特征^[18]相似。

综上,在相同或近似胶结程度情况下,分维数 D 可以有效表征弱胶结砾岩内摩擦角,在极弱胶结情况下其黏聚力为零。在实际工程中,往往出现弱胶结与极弱胶结砾岩互有夹层的情况,施工时若要对每一小段施工段围岩进行详细鉴别,不仅浪费时间也会增加不必要的开支,因此,对于复杂地层条件下围岩开挖施工时出于安全方便的角度考虑,习惯采用最软弱部分围岩相关参数对隧道开挖支护进行设计。对于中条山隧道及类似第三系弱胶结砾岩段,通过颗粒级配并分析分形特征,即可计算得出该区域极弱胶结砾岩的内摩擦角 φ 值,从而对预测第三系弱胶结砾岩强度提供方便、实用的方法。

3.5 弱胶结砾岩抗剪强度与胶结程度的关系

对比原状和重塑试验,可以发现弱胶结砾岩抗剪强度参数很大程度上与胶结程度有关。胶结是指矿物质在碎屑沉积物孔隙中沉淀,形成自生矿物并使砂质、砾质等沉积物固结为岩石的作用。根据颗粒与胶结物之间的关系,一般胶结分为 3 种类型:1)基质式胶结,颗粒相互不接触并完全被包裹在胶结物中,岩体强度主要取决于胶结物性质;2)填充式胶结,组成岩体颗粒间孔隙中充满或部分充满了胶结物,胶结物的性质及孔隙充填程度决定了岩体强度;3)接触式胶结,胶结物只存在于颗粒间接触点处,一般胶结性较弱,导致岩体强度较低^[20]。

选取部分砾岩试样进行偏光显微镜下的薄片鉴定,见图 8,经鉴定其中填隙物均由方解石胶结的砂级碎屑组成,砂级碎屑组分有少量石英、石英岩、粉砂岩、灰岩、喷发岩屑等,表明弱胶结砾岩胶结物的成分基本相同,胶结类型从根本上决定了其胶结程度,从而影响弱胶结砾岩整体的强度。

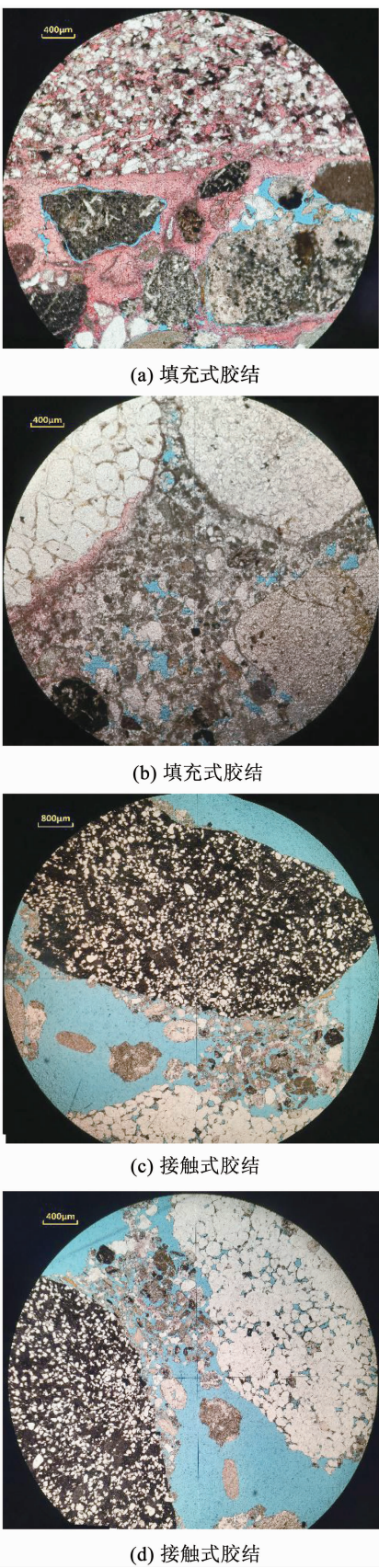


图 8 弱胶结砾岩的薄片鉴定

Fig. 8 Thin section identification of weakly cemented conglomerate

从薄片鉴定及现场观测与取样可知,中条山隧道第三系弱胶结砾岩颗粒胶结方式大部分属于接触

式胶结(图 8(c)、(d)),少量存在填充式胶结(图 8(a)、(b)).胶结程度较好的原状砾岩试样中即存在填充式胶结,相对于极弱胶结砾岩颗粒间互相胶结更加紧密,在剪切试验中可测出相应的黏聚力,且由于颗粒间更加紧密,受到剪切作用时需要更多的能量来克服,因而具有更高的内摩擦角.极弱胶结砾岩试样中颗粒间大部分为接触式胶结,并有部分颗粒间无胶结,其介于散体颗粒与弱胶结岩体之间,颗粒间孔隙极度发育,在剪切时主要克服颗粒间摩擦力,颗粒间不存在黏结力或黏结力相对摩擦力很小可忽略不计,同时剪切试验结果按无黏聚力拟合时线性相关性良好,因此,可以认为极弱胶结砾岩的黏聚力为零.

对比颗粒级配完全相同的原状试样和重塑试样 2 摩擦角变化,见图 9,重塑弱胶结砾岩抗剪强度仅为原状砾岩的 33.46%~40.85%,内摩擦角为原状砾岩的 58.64%,胶结程度的强弱对弱胶结砾岩强度的影响非常明显,主要可能有以下原因:在弱胶结范围内,胶结程度的变化主要体现为砾岩颗粒间孔隙的填充程度,孔隙填充较好的砾岩受剪时,在法向压力作用下更为密实,砾岩颗粒间接触面较大,受力传导均匀,受剪过程中可以保持较完整的剪切面,从而具有更高的抗剪强度;孔隙填充不充实的砾岩细颗粒与胶结物大多存在于粗颗粒间接触点处,颗粒间接触面小,法向压力大多通过粗颗粒与粗颗粒传递,在受剪时难以形成完整的剪切面,造成只有部分剪切面上的颗粒受剪力作用,从而导致抗剪强度较低.综上,在胶结程度为弱胶结及以下范围内,胶结程度仍为影响弱胶结砾岩强度的一个重要因素.

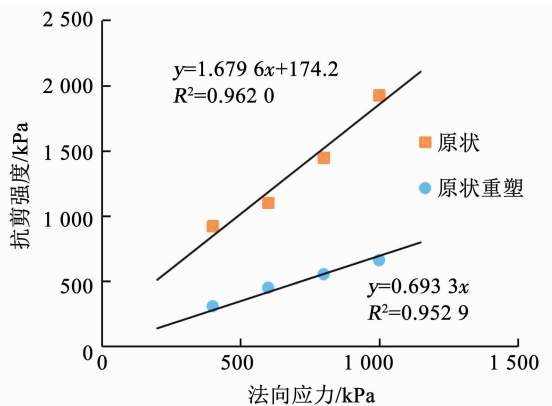


图 9 原状与重塑砾岩抗剪强度与法向应力关系

Fig. 9 Relationship between shear strength and normal stress of undisturbed and remolded conglomerate

4 结 论

1)第三系弱胶结砾岩具有良好的分形特征,大

都具有二重分维特性,自然分选条件下以粒径值 1.0 mm 为界分为细粒和粗粒 2 个无标度区间,细粒分维值普遍小于粗粒分维值,表明弱胶结砾岩在组成上呈现出细粒质量分数相对较多的特征;对于具有一重分维的弱胶结砾岩具有最优级配和最高抗剪强度,对应分维数即为相应区域弱胶结砾岩的“最优维数”.

2)在相同胶结程度情况下,分维数 D 与弱胶结砾岩内摩擦角正切值 $\tan \varphi$ 存在负指数关系,可用公式 $\tan \varphi = me^{-nD}$ (m 为常数, n 为大于 0 的常数)表示,极弱胶结砾岩的黏聚力为零,对预测弱胶结砾岩强度提供了一种方便实用的方法.

3)胶结程度是影响弱胶结砾岩抗剪强度的重要因素.第三系弱胶结砾岩颗粒胶结方式大部分为接触式胶结或无胶结,少量存在填充式胶结.在中条山隧道弱胶结砾岩段,与弱胶结砾岩级配组成相同的极弱胶结砾岩内摩擦角仅为弱胶结砾岩的 58.64%.

参考文献

- [1] 毕焕军. 胡麻岭隧道水敏性砂岩地下水渗流场模拟研究[J]. 铁道工程学报, 2013, 30(12): 64
BI Huanjun. Research on the seepage field simulation of water-sensitive sandstone in Humaling Tunnel [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2013, 30(12): 64
- [2] 曹峰. 兰州第三系砂岩水稳性特征隧道施工研究[J]. 铁道工程学报, 2012, 29(12): 21
CAO Feng. Special research on water-stability characteristics of tertiary system sandstone in Lanzhou area during tunnel construction [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2012, 29(12): 21
- [3] 秦正贵, 陈勇. 蒙华铁路中条山隧道第三系地层工程地质特征研究[J]. 隧道建设, 2014, 34(12): 1163
QIN Zhengui, CHEN Yong. Study on engineering geological characteristics of tertiary strata of Zhongtiaoshan tunnel on Menghua Railway [J]. Tunnel Construction, 2014, 34(12): 1163
- [4] 李振嵩, 陈杰. 云南红河某水电站上第三系砾岩胶结性状对岩体强度特征影响研究[J]. 资源环境与工程, 2016, 30(3): 389
LI Zhensong, CHEN Jie. Study on the effect of cementation properties of tertiary conglomerate on strength characteristics of rock mass in a hydropower station, Yunnan Province [J]. Resources Environment & Engineering, 2016, 30(3): 389. DOI:10.16536/j.cnki.issn.1671-1211.2016.03.033
- [5] 辜明清, 纪洪华. 第三系砾岩建筑拱坝的工程地质问题分析与评价[J]. 四川水力发电, 2001(4): 33
GU Mingqing, JI Honghua. Engineering geology analysis and assessment on arch dam founded on conglomerate of tertiary period [J]. Sichuan Water Power, 2001(4): 33
- [6] 吕天启, 刘光廷. 砂砾软岩的极限承载力分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(11): 1942
LV Tianqi, LIU Guangting. Study on ultimate bearing capacity of soft sandy gravel rock foundation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005(11): 1942

[7]Mandelbort B B. The fractal geometry of nature[M]. New York: W. H. Freeman, 1983. DOI:10.1119/1.13295

[8]刘晓明, 赵明华, 苏永华. 沉积岩土粒度分布分形模型改进及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2006(8): 1691
LIU Xiaoming, ZHAO Minghua, SU Yonghua. Improvement and application of fractal model to size distribution of sedimentary rock and soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006(8): 1691

[9]舒志乐, 刘新荣, 刘保县, 等. 土石混合体粒度分形特性及其与含石量和强度的关系[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010, 41(3): 1096
SHU Zhile, LIU Xinrong, LIU Baoxian, et al. Granule fractal properties of earth-rock aggregate and relationship between its gravel content and strength [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2010, 41(3): 1096

[10]陈松, 陈剑, 刘超. 金沙江上游雪隆囊古滑坡堰塞湖溃坝堆积物粒度分维特征分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2016, 27(2): 78
CHEN Song, CHEN Jian, LIU Chao. Analysis of grain size fractal feature of outburst deposits induced by the Xuelongnang Paleolandslide-Dammed lake in the upper Jinsha River[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2016, 27(2): 78. DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2016.02.12

[11]张晓宇. 西宁地区第三系地层岩土工程特性及影响[J]. 铁道工程学报, 2012, 29(8): 20
ZHANG Xiaoyu. Geotechnical engineering properties and impact of tertiary strata in Xining [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2012, 29(8): 20

[12]张波. 兰州盆地第三系砂岩工程地质特性评价研究[J]. 工程地质学报, 2014, 22(1): 166
ZHANG Bo. Evaluation of the engineering geological condition of n-sandstone in Lanzhou Basin[J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(1): 166. DOI:10.13544/j.cnki.jeg.2014.01.013

[13]常福庆, 张一, 李林民. 西霞院工程上第三系地层工程地质分类初步探讨[J]. 资源环境与工程, 2009, 23(5): 649
CHANG Fuqing, ZHANG Yi, LI Linmin. Preliminary discussion on engineering geological classification of upper tertiary strata in Xixiyuan Engineering[J]. Resources Environment & Engineering, 2009, 23(5): 649. DOI:10.16536/j.cnki.issn.1671-1211.2009.05.010

[14]中华人民共和国铁道部. 铁路工程土工试验规程: TB10102—2010[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2011
Ministry of Railways. Code for soil test of railway engineering (TB10102—2010)[S]. Beijing: China Railway Press, 2011

[15]樊海柱. 西域砾岩结构特性及力学特性的试验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016
FAN Haizhu. Test research on structure characteristics and mechanical characteristics of Xiyu conglomerate [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016

[16]中华人民共和国水利部. 土的分类标准: GBJ 145—90 [S]. 北京: 中国计划出版社, 1991
Ministry of Water Resources. Classification standard of soil (GBJ 145—90)[S]. Beijing: China Planning Press, 1991

[17]TYLER S W, WHEATCRAFT S W. Fractal scaling of soil particle-size distributions: Analysis and limitations[J]. Soil Science Society of America, 1992, 56(1): 362. DOI: 10.2136/sssaj1992.03615995005600020005x

[18]赵成刚, 白冰. 土力学原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 北京交通大学出版社, 2009
ZHAO Chenggang, BAI Bing. Principle of soil mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, Beijing Jiaotong University Press, 2009

[19]JAROSLAV F. Notes on the effect of grain crushing on the granular soil behaviour[J]. Engineering Geology, 2002, 63(1/2): 93

[20]蔡臣. 复杂含水弱胶结砂岩隧道围岩稳定性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012
CAI Chen. Study on tunnel surrounding rock stability of complex poorly cemented sandstone aquifer [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012

(编辑 苗秀芝)