

砂卵石粗粒土颗粒外形特征测量与评定初探

郑 星, 敖大华, 李裕忠, 张 胜, 宋晓伟

(中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550081)

摘 要: 粗粒土颗粒的外形特征是影响其力学特性及渗流特性的重要因素之一。采用室内试验分析的手段对颗粒的外形特征进行了研究。选取粒径分别为 10~20、20~40、40~60 mm 的两种不同形状的砂卵石粗粒土颗粒, 在风干状态下通过排水法分别测定其体积, 通过蜡膜厚度估算法测定其表面积, 对颗粒体积及表面积关系进行数学拟合, 建立了一定粒径范围内两种不同外形砂卵石粗粒土颗粒体积与表面积之间的函数关系。通过类比, 发现试验所得出的两个拟合函数关系式和同体积标准球体的体积与表面积关系式具有十分相似的形式, 据此提出了类圆度的概念及类圆度系数的计算方法, 为颗粒外形特征的定量描述提供了一种方法与思路。

关 键 词: 砂卵石粗粒土颗粒; 外形特征; 表面积; 体积; 类圆度系数

中图分类号: TU 448

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018)05-1805-06

A preliminary study of measurement and evaluation of geometry characteristics of coarse gravel

ZHENG Xing, AO Da-hua, LI Yu-zhong, ZHANG Sheng, SONG Xiao-wei

(PowerChina Guiyang Engineering Corporation Limited, Guiyang, Guizhou 550081, China)

Abstract: The geometry is one of the key factors which can influence the mechanical and hydrological properties of coarse granular soil. In this article, the laboratory test and analysis method are adopted to study the particle appearance characteristic. Two types of coarse granular soil particles with different appearance characteristics are selected in the particle diameters of 10—20 mm, 20—40 mm, 40—60 mm separately. The wax-coated method is used to measure the volume, and the particle surface area is calculated by measuring the thickness of the wax coating. By building the mathematical fitting between the particle volume and the surface area, the correlations between volume and surface area of the two coarse granular soil particles are founded. With analogy, the two fitting equations proposed in this paper are found to be in excellent agreement with that of normative sphere, thus the concept of sphericity-similarity is raised and the coefficient of sphericity-similarity is calculated, which providing a method to describe the appearance characteristic of particle quantitatively.

Keywords: sandy gravel coarse granule; appearance character; surface area; volume; coefficient of sphericity-similarity

1 引 言

砂卵石粗粒土是一种特殊的散粒体结构。作为建筑材料, 其具有强度较高、变形模量大、渗透性能好等优点, 在大坝、路基、跑道等工程中得到广泛应用。砂卵石粗粒土颗粒的外形特征是影响其力学特性及渗流性能的重要因素之一^[1]。很多学者论证了颗粒的外形特征对粗粒土的变形和力学性质^[2-6]、渗透特性^[7-9]以及界面作用等的影响^[10]。

为了更好地探究砂卵石粗粒土颗粒外形特征对其工程性能的影响, 应对颗粒的外形特征加以定量描述及分析评价, 在此基础上将颗粒的外形特征

与其工程性质参数联系起来加以研究。目前, 对颗粒形状的研究方法主要是采用平面二维图像的分析方法, 实际上是将三维实体颗粒的二维平面图像数字化后再进行测量^[11]。如孔亮等^[2]提出颗粒的外轮廓特征可以用颗粒的圆形度、凹凸度来进行简化与描述; 张家发等^[11]在其成果中总结了目前学者所提出的颗粒形状描述的方法及参数, 包括颗粒形状尺度定义及定量评价的无量纲参数球度、圆度、光滑度等; 陆厚根等^[12]采用杉本益规^[13]的两个形状指数表示法; 蒋丽滢等^[14]则采用形状因子表达颗粒形貌; 李毅等^[15]提出适用于显微镜进行颗粒形貌特征提取与识别的方法。

对于颗粒外形特征的描述, 以上的成果中提出了较全面的方法, 但是不管是图像分析还是截面几何尺寸分析, 都属于二维分析, 没有反映颗粒体积、表面积等表现颗粒空间三维形态的参数。

本文通过开展试验, 获取了两种自然界中不同形状、不同粒径的砂卵石粗粒土颗粒的外形参数, 建立了其表面积与其体积之间的关系, 将自然界颗粒与标准球体颗粒进行比较, 提出了类圆度的概念及一种颗粒外形特征定量评定的思路与方法。

2 试验方案

2.1 试验材料

本文所用的粗粒土试验材料来自两个不同水电站工程的砂卵石堆石料。两种料的岩性硬度相当, 都属于硬岩。其中编号为 A 的粗粒料, 其颗粒外形磨圆度更好; 编号为 B 的粗粒料, 其外形更扁一些。为使试验结果涵盖大小不同的粒径, 选取不同粒径范围的 A、B 两种粗粒料, 粒径范围分别为 10~20、20~40、40~60 mm。A、B 试样的照片见图 1。



图 1 两种不同外形特征的砂卵石粗颗粒
Fig.1 Two types of coarse granules with different appearance characteristics

2.2 排水法测定粗粒料颗粒体积

对两种不同形状的粗粒料, 在 3 种不同粒径范围内随机选取一定数量的颗粒进行试验, 分别用蜡封排水法测定每个颗粒的体积。每个粒径范围内选取 20 个颗粒, 每个形状的粗粒料分别得到 60 组测量数据。蜡封法测量颗粒体积的方法如下: 将蜡融化, 融化后的液态蜡深度应能将最粗的颗粒浸没。将选取的大小不等的粗粒料用细线系牢, 手提细线一端快速的将试样颗粒浸没到液态蜡中, 再快速的将颗粒提出, 使整个颗粒表面被一层均匀的蜡膜所包裹。待蜡膜冷却至常温后, 将整个颗粒浸没在装满纯水的烧杯中使水溢出, 用溢出水的体积减去包裹蜡膜的体积后即为颗粒本身的体积。两种粗颗粒部分颗粒蜡封后的照片见图 2~4。

2.3 蜡封法测定粗粒料颗粒表面积

上述测定颗粒体积过程中, 在将风干颗粒浸入



图 2 粒径为 10~20 mm 的部分粗粒料蜡封后照片
Fig.2 Coarse granules between 10~20 mm after wax-coated



图 3 粒径为 20~40 mm 的部分粗粒料蜡封后照片
Fig.3 Coarse granules between 20~40 mm after wax-coated



图 4 粒径为 40~60 mm 的部分粗粒料蜡封后照片
Fig.4 Coarse granules between 40~60 mm after wax-coated

液态蜡之前先称其重量, 再将颗粒浸入液态蜡中, 将颗粒从液态蜡中提出, 待其表面蜡膜冷却至常温后, 称取颗粒及蜡膜重量, 由前后的质量差即得到包裹在颗粒表面的蜡膜质量。蜡膜厚度可用千分尺测出, 即先测出一个包裹蜡膜的颗粒两指定点之间的距离, 将两点的蜡膜刮掉后再次测距, 前后距离差的一半即为蜡膜厚度。多次进行测量即可统计出蜡膜的平均厚度, 测量结果见表 1。由于颗粒表面均较光滑, 假定每个颗粒表面蜡膜的厚度均相同, 则可计算得到包裹在颗粒表面的蜡膜的面积, 也即颗粒的表面积。

表 1 蜡膜厚度测量统计数据
Table 1 Measurement data statistic of cere thickness

参数	粒径		
	10~20 mm	20~40 mm	40~60 mm
蜡膜平均厚度/mm	0.012	0.015	0.017

3 试验成果及分析

3.1 粗粒料体积及表面积测量结果

对上述两种不同形状的颗粒在 10~20、20~

40、40~60 mm 的粒径范围内分别取 20 个颗粒进行试验, 测量数据如表 2~4。

表 2 试样表面积及体积测量结果 (粒径为 10~20 mm)

Table 2 Results of surface and volume measurements (particle diameter is 10~20 mm)

序号	A种试样							B种试样						
	颗粒 质量 / g	颗粒+蜡膜 质量 / g	蜡膜 质量 / g	蜡膜 厚度 / cm	颗粒 体积 / cm ³	颗粒 表面积 / cm ²	同体积 标准球体 表面积 / cm ²	颗粒 质量 / g	颗粒+蜡膜 质量 / g	蜡膜 质量 / g	蜡膜 厚度 / cm	颗粒 体积 / cm ³	颗粒 表面积 / cm ²	同体积 标准球体 表面积 / cm ²
1	8.396	8.599	0.203	0.015	3.28	15.04	10.67	3.686	3.779	0.093	0.015	1.50	6.89	6.33
2	6.386	6.610	0.224	0.015	2.46	16.59	8.80	7.188	7.403	0.215	0.015	2.67	15.93	9.30
3	13.002	13.302	0.300	0.015	4.97	22.22	14.09	4.590	4.711	0.121	0.015	1.67	8.96	6.80
4	9.294	9.505	0.211	0.015	3.77	15.63	11.72	4.735	4.782	0.047	0.015	1.75	3.48	7.02
5	6.101	6.268	0.167	0.015	2.22	12.37	8.23	4.318	4.511	0.193	0.015	1.79	14.30	7.13
6	8.800	9.038	0.238	0.015	3.44	17.63	11.02	7.286	7.496	0.210	0.015	2.87	15.56	9.77
7	5.789	6.015	0.226	0.015	2.35	16.74	8.56	5.779	6.001	0.222	0.015	2.36	16.44	8.57
8	6.201	6.441	0.240	0.015	2.34	17.78	8.52	4.586	4.694	0.108	0.015	1.78	8.00	7.11
9	7.011	7.201	0.190	0.015	2.79	14.07	9.59	2.888	3.010	0.122	0.015	1.07	9.04	5.05
10	6.502	6.715	0.213	0.015	2.47	15.78	8.83	3.224	3.301	0.077	0.015	1.32	5.70	5.81
11	9.093	9.197	0.200	0.015	3.36	14.82	10.85	7.051	7.344	0.293	0.015	1.98	21.70	7.63
12	8.658	8.760	0.155	0.015	2.67	11.48	9.30	8.217	8.574	0.357	0.015	2.63	26.44	9.22
13	7.859	7.953	0.194	0.015	2.91	14.37	9.86	6.150	6.461	0.311	0.015	2.39	23.04	8.65
14	8.958	9.054	0.196	0.015	3.55	14.52	11.26	6.968	7.223	0.255	0.015	2.16	18.89	8.07
15	7.169	7.245	0.176	0.015	2.96	13.04	9.96	6.243	6.552	0.309	0.015	2.40	22.89	8.66
16	9.606	9.702	0.215	0.015	3.83	15.93	11.85	5.676	5.922	0.246	0.015	2.29	18.22	8.40
17	7.222	7.300	0.228	0.015	5.75	16.89	15.52	6.834	7.109	0.275	0.015	1.93	20.37	7.51
18	6.872	6.953	0.211	0.015	3.11	15.63	10.30	6.731	7.115	0.384	0.015	2.15	28.44	8.05
19	8.386	8.465	0.211	0.015	3.08	15.63	10.23	6.793	7.053	0.260	0.015	2.65	19.26	9.27
20	10.877	10.998	0.321	0.015	7.64	23.78	18.77	7.760	8.064	0.304	0.015	2.98	22.52	10.02

表 3 试样表面积及体积测量结果 (粒径为 20~40 mm)

Table 3 Results of surface and volume measurements (particle diameter is 20~40 mm)

序号	A种试样							B种试样						
	颗粒 质量 / g	颗粒+蜡膜 质量 / g	蜡膜 质量 / g	蜡膜 厚度 / cm	颗粒 体积 / cm ³	颗粒 表面积 / cm ²	同体积 标准球体 表面积 / cm ²	颗粒 质量 / g	颗粒+蜡膜 质量 / g	蜡膜 质量 / g	蜡膜 厚度 / cm	颗粒 体积 / cm ³	颗粒 表面积 / cm ²	同体积 标准球体 表面积 / cm ²
1	43.008	43.786	0.778	0.015	13.65	57.63	27.63	28.696	29.331	0.635	0.015	6.81	47.04	17.37
2	66.697	66.883	0.186	0.015	17.80	13.78	32.97	60.486	61.402	0.916	0.015	15.80	67.85	30.46
3	40.410	41.105	0.695	0.015	12.25	51.48	25.69	38.204	39.112	0.908	0.015	8.21	67.26	19.69
4	77.269	78.221	0.952	0.015	25.97	70.52	42.41	48.515	49.442	0.927	0.015	11.99	68.67	25.34
5	28.288	28.816	0.528	0.015	8.23	39.11	19.71	51.401	52.301	0.900	0.015	16.22	66.67	30.99
6	70.186	71.200	1.014	0.015	17.90	75.11	33.09	66.688	68.000	1.312	0.015	21.37	97.19	37.25
7	45.278	46.005	0.727	0.015	8.41	53.85	20.00	34.303	35.100	0.797	0.015	10.03	59.04	22.50
8	40.701	41.403	0.702	0.015	10.04	52.00	22.50	51.012	52.021	1.009	0.015	12.40	74.74	25.91
9	67.025	67.810	0.785	0.015	22.15	58.15	38.14	58.211	59.396	1.185	0.015	17.61	87.78	32.74
10	39.125	39.686	0.561	0.015	9.39	41.56	21.53	30.786	31.402	0.616	0.015	5.83	45.63	15.67
11	81.760	82.360	0.800	0.015	27.86	59.26	44.44	46.769	47.018	0.868	0.015	15.44	64.30	29.99
12	58.432	58.799	0.567	0.015	18.89	42.00	34.30	60.891	60.964	1.173	0.015	30.78	86.89	47.49
13	68.774	69.334	0.760	0.015	27.07	56.30	43.60	41.575	42.003	1.128	0.015	24.50	83.56	40.79
14	81.844	82.439	0.995	0.015	26.87	73.70	43.38	59.195	59.593	1.089	0.015	28.30	80.67	44.91
15	53.746	54.208	0.562	0.015	17.26	41.63	32.30	39.164	39.386	0.765	0.015	13.48	56.67	27.39
16	63.156	63.986	0.830	0.015	21.39	61.48	37.27	48.459	48.713	0.867	0.015	17.03	64.22	32.01
17	98.212	98.880	0.968	0.015	36.34	71.70	53.06	40.149	40.206	0.957	0.015	12.98	70.89	26.71
18	55.581	56.122	0.741	0.015	21.26	54.89	37.11	47.310	47.591	1.181	0.015	15.56	87.48	30.15
19	108.645	109.382	0.937	0.015	34.76	69.41	51.51	45.192	45.511	0.774	0.015	15.80	57.33	30.44
20	94.617	95.425	1.080	0.015	34.74	80.00	51.49	31.127	31.344	0.617	0.015	10.73	45.70	23.53

表 4 试样表面积及体积测量结果 (粒径为 40~60 mm)

Table 4 Results of surface and volume measurements (particle diameter is 40–60 mm)

序号	A种试样								B种试样						
	颗粒 质量 /g	颗粒+蜡膜 质量 /g	蜡膜 质量 /g	蜡膜 厚度 /cm	颗粒 体积 /cm³	颗粒 表面积 /cm²	同体积 标准球体 表面积 /cm²	颗粒 质量 /g	颗粒+蜡膜 质量 /g	蜡膜 质量 /g	蜡膜 厚度 /cm	颗粒 体积 /cm³	颗粒 表面积 /cm²	同体积 标准球体 表面积 /cm²	
1	200.586	202.369	1.783	0.015	73.06	132.07	84.52	129.611	131.191	1.580	0.015	47.48	117.04	63.41	
2	164.898	166.417	1.519	0.015	61.15	112.52	75.06	248.778	251.689	2.911	0.015	90.84	215.63	97.72	
3	179.310	181.000	1.690	0.015	69.96	125.19	82.11	112.405	114.601	2.196	0.015	39.41	162.67	56.01	
4	171.012	172.692	1.680	0.015	65.07	124.44	78.24	179.000	181.413	2.413	0.015	64.38	178.74	77.68	
5	228.005	229.889	1.884	0.015	85.95	139.56	94.19	125.311	127.200	1.889	0.015	43.75	139.93	60.04	
6	152.403	153.801	1.398	0.015	57.08	103.56	71.69	91.599	93.394	1.795	0.015	33.45	132.96	50.20	
7	126.397	127.468	1.071	0.015	47.64	79.33	63.55	95.301	97.000	1.699	0.015	33.85	125.85	50.61	
8	113.689	114.778	1.089	0.015	42.32	80.67	58.73	144.000	146.194	2.194	0.015	52.62	162.52	67.90	
9	153.501	154.896	1.395	0.015	58.68	103.33	73.03	99.421	100.901	1.480	0.015	37.39	109.63	54.08	
10	174.118	175.567	1.449	0.015	67.43	107.33	80.11	106.317	108.205	1.888	0.015	37.95	139.85	54.61	
11	173.500	174.912	1.412	0.015	67.42	104.59	80.11	157.936	161.177	2.102	0.015	37.80	155.70	54.47	
12	149.400	150.857	1.457	0.015	50.84	107.93	66.36	81.358	83.364	1.824	0.015	37.97	135.11	54.64	
13	195.100	197.256	1.856	0.015	66.09	137.48	79.05	145.722	148.130	2.408	0.015	48.06	178.37	63.92	
14	196.315	198.507	1.972	0.015	62.89	146.07	76.48	173.165	174.425	1.860	0.015	55.53	137.78	70.39	
15	221.400	223.500	1.902	0.015	81.82	140.89	91.14	110.016	111.490	1.474	0.015	34.95	109.19	51.69	
16	281.300	284.500	2.366	0.015	103.59	175.26	106.67	102.722	104.024	1.302	0.015	30.61	96.44	47.32	
17	176.134	177.741	1.607	0.015	64.48	119.04	77.76	96.351	97.993	1.642	0.015	29.51	121.63	46.18	
18	153.372	155.209	1.737	0.015	52.73	128.67	68.00	96.591	98.370	1.779	0.015	36.02	131.78	52.75	
19	301.100	303.900	2.510	0.015	100.08	185.93	104.24	164.967	167.333	2.366	0.015	53.75	175.26	68.88	
20	294.600	297.500	2.278	0.015	93.59	168.74	99.69	129.330	131.705	2.100	0.015	41.10	155.56	57.59	

3.2 粗颗粒类圆度描述——类圆度系数

本文所研究的两类砂卵石粗粒土颗粒为自然界中天然形成的物质。由于同体积的物体中以球体的表面积为最小,则在自然界中存在的颗粒,除外形比较异常的以外(如存在内部凹腔等),一般其表面积大于同体积的球体。从直观视觉感受可知,同体积、外形较扁的颗粒,其表面积较外形较圆的颗粒大,则可用颗粒表面积与体积的比值来表征颗粒的外形与标准球体的相似程度。

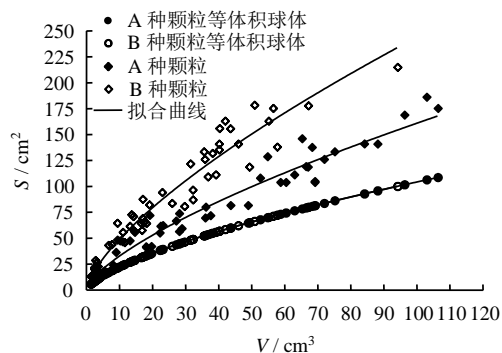
已知标准球体的表面积 S 与体积 V 之间的关系为

$$S = (3V)^{2/3} (4\pi)^{1/3} \quad (1)$$

标准球体表面积与体积的比值与体积的关系式为

$$\frac{S}{V} = 3^{2/3} (4\pi)^{1/3} V^{-1/3} \quad (2)$$

表 2~4 给出了两种不同形状粗粒土颗粒各粒组同体积标准球体所对应的表面积。对于式 (1), 分别以两种颗粒不同粒组下的颗粒体积为横坐标, 以表面积为纵坐标, 绘制散点图; 以颗粒同体积的球体体积与表面积绘制散点图, 如图 5 中所示。图中的曲线为采用幂函数拟合的 S - V 关系曲线。

图 5 粗粒土颗粒 S 与 V 关系曲线Fig.5 S - V of coarse granules relationships

对于式 (2), 以两种颗粒不同粒组下的颗粒体积为横坐标, 以颗粒表面积与体积的比值为纵坐标, 绘制两种颗粒的 S/V - V 散点图; 以颗粒同体积的球体体积及表面积与体积的比值绘制散点图, 如图 6 所示。图中曲线为采用幂指数拟合的 S/V - V 关系曲线。

从图 5 与图 6 中可以看出, 尽管 A、B 两种砂卵石粗粒土颗粒的外形特征不同, 但对于不同粒径大小的颗粒, 反映其空间形状的表面积与体积之间的关系与同体积标准球体的表面积与体积之间的关系相同。A 种粗粒土颗粒的 S - V 拟合曲线或 S/V - V 拟合曲线更接近于标准球体的关系曲线, 而从外观上 A 种颗粒相对于 B 种颗粒, 其外形更接近于球体,

表明当颗粒的 S - V 曲线或 S/V - V 曲线越接近标准球体曲线时, 其在外形上也越接近球体。

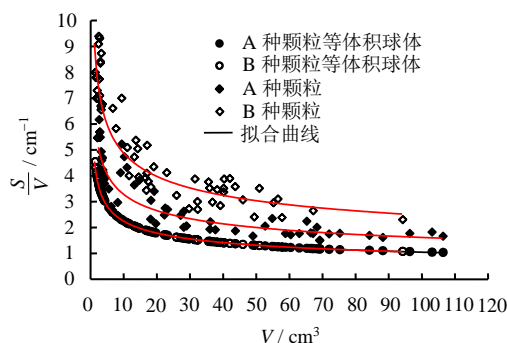


图6 粗粒土颗粒 S/V 与 V 关系曲线

Fig.6 S/V - V relationships of coarse granules

根据以上试验及分析结果, 本文提出了类圆度系数的概念, 用以描述颗粒外形跟标准球体的接近程度, 即类圆度, 用 L 表示。如图6所示, 粗粒土颗粒与标准球体的 S/V - V 曲线函数关系均为幂函数关系, 对于标准球体而言, 该幂函数如式(2)所示。对于某种粗粒土颗粒而言, 该幂函数拟合关系可表达为

$$\frac{S}{V} = aV^{-b} \quad (3)$$

式中: a 为该幂函数的常系数; b 为体积变量的常指数。从图6中可见, 式(2)、(3)曲线的相似度很高, 其主要区别为在图中的高低位置关系, 这主要决定于式中的常系数。从图6中可以归纳得到, 球体的 S/V - V 曲线位置最低, 其他形状颗粒的 S/V - V 曲线均在球体曲线之上。将某一种颗粒的 S/V - V 曲线的拟合幂函数关系式(3)中常数 a 与标准球体 S/V - V 曲线关系(2)中常数的比值作为该种颗粒的类圆度, 记为 L , 即

$$L = \frac{a}{3^{2/3}(4\pi)^{1/3}} \quad (4)$$

图6中A种颗粒的 S/V - V 关系曲线的拟合幂函数表达式为

$$\frac{S_A}{V_A} = 6.506V_A^{-0.304} \quad (5)$$

B种颗粒的 S/V - V 关系曲线的拟合幂函数表达式为

$$\frac{S_B}{V_B} = 9.408V_B^{-0.294} \quad (6)$$

则A、B种颗粒的类圆度分别为

$$L_A = \frac{6.506}{3^{2/3}(4\pi)^{1/3}} = 1.345 \quad (7)$$

$$L_B = \frac{9.408}{3^{2/3}(4\pi)^{1/3}} = 1.945 \quad (8)$$

可知, 类圆度系数 L 是一大于1的数, L 越大, 表明颗粒的外形越不接近于球形。 L 越接近于1, 表明颗粒外形越接近于球形。在本文中, $L_A < L_B$, 即A种颗粒外形更接近于球形。

以上的讨论中对类圆度系数 L 的定义只考虑了式(3)中的常系数, 而没有考虑常指数 b 的影响。事实上, 若试验颗粒外形为很薄的片状, 则同体积下 S/V 的值会很大, 所拟合的式(3)中 b 值会急剧减小, 而常系数 a 则不一定会急剧增大, 此时 b 值的影响会比 a 大。本文所得出的结论可能只适用于外形近似于文中材料的颗粒, 而对于外形为薄片状的颗粒, 其类圆度系数或称形状系数还有待于进一步研究。

4 结 论

(1) 本文通过试验方法研究了两种砂卵石粗粒土颗粒的表面积与体积参数, 建立了不规则颗粒体积及表面积之间的函数关系, 发现部分自然界粗颗粒的表面积与体积关系与标准球体相一致。通过分析试验结果, 本文提出了类圆度的概念, 并用类圆度系数对其加以量化, 用以描述粗粒土颗粒外形与球体的接近程度, 提供了一种粗粒土颗粒形状特征描述的思路与方法。

(2) 本文选取的研究对象为两种形状不同的砂卵石颗粒, 由于粗颗粒的形状极具复杂性, 其外形特征的量测与描述等值得更进一步的研究。

参 考 文 献

- [1] 刘清秉, 项伟, 崔德山. 砂土颗粒形状量化及其对力学指标的影响分析[J]. 岩土力学, 2011, (增刊1): 190—197.
LIU Qing-bing, XIANG Wei, CUI De-shan. Study of particle shape quantification and effect on mechanical property of sand[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(Supp.1): 190—197.
- [2] 孔亮, 彭仁. 颗粒形状对类砂土力学性质影响的颗粒流模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(10): 2112—2119.
KONG Liang, PENG Ren. Particle flow simulation of influence of particle shape on mechanical properties of quasi-sands[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(10): 2112—2119.
- [3] 常晓林, 马刚, 周伟, 等. 颗粒形状及粒间摩擦角对堆石体宏观力学行为的影响[J]. 岩土工程学报, 2012,

- 34(4): 646—653.
- CHANG Xiao-lin, MA Gang, ZHOU Wei, et al. Influences of particle shape and inter-particle friction angle on macroscopic response of rockfill[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2012, 34(4): 646—653.
- [4] 朱长歧, 周斌, 刘海峰. 天然胶结钙质土强度及微观结构研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(6): 1655—1663.
- ZHU Chang-qi, ZHOU Bin, LIU Hai-feng. Investigation on strength and microstructure of naturally cemented calcareous soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(6): 1655—1663.
- [5] CHO G C, DODDS J, SANTAMARINA J C. Particle shape effects on packing density, stiffness, and strength: natural and crushed sands[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2006, 132(5): 591—602.
- [6] 刘清秉, 项伟, LEHANE B M, 等. 颗粒形状对砂土抗剪强度及桩端阻力影响机制试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(2): 400—410.
- LIU Qing-bing, XIANG Wei, LEHANE B M, et al. Experimental study of effect of particle shapes on shear strength of sand and tip resistance of driven piles[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(2): 400—410.
- [7] 刘杰. 混凝土面板坝碎石垫层料最佳级配试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2001, (4): 1—7.
- LIU Jie. Experimental study of optimum gradation of crushed stone cushion for concrete-face rockfill dam[J]. **Hydro-Science and Engineering**, 2001, (4): 1—7.
- [8] 王俊杰, 卢孝志, 邱珍锋, 等. 粗粒土渗透系数影响因素试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2013(6): 16—20.
- WANG Jun-jie, LU Xiao-zhi, QIU Zhen-feng, et al. Experimental studies on influence factors of permeability coefficients of coarse-grained soil[J]. **Hydro-Science and Engineering**, 2013, (6): 16—19.
- [9] 张家发, 焦赳赳. 颗粒形状对多孔介质孔隙特征和渗流规律影响研究的探讨[J]. 长江科学院院报, 2011, 28(3): 39—44.
- ZHANG Jia-fa, JIAO Jiu-jiu. Influence of grain shape on characteristics of pores and seepage in porous media[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2011, 28(3): 39—44.
- [10] CHEN Z H, FANG H W. Analysis of the complex morphology of sediment particle surface based on electron microscope images[J]. **Science China (Technological Sciences)**, 2013, 56(2): 280—285.
- [11] 张家发, 叶加兵, 陈劲松, 等. 碎石颗粒形状测量与评定的初步研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(2): 343—349.
- ZHANG Jia-fa, YE Jia-bing, CHEN Jin-song, et al. A preliminary study of measurement and evaluation of breakstone grain shape[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(2): 343—348.
- [12] 陆厚根, 马魁. 用两个形状指数表征粉煤灰颗粒形貌的研究[J]. 硅酸盐学报, 1992, 20(4): 293—301.
- LU Hou-gen, MA Kui. Characterization of configuration of fly-ash particles by use of a pair of shape indexes[J]. **Journal of the Chinese Ceramic Society**, 1992, 20(4): 293—301.
- [13] 杉本益規, 横田尚子, et al. 2つの形状指数に基づく粒子形状の評価[J]. 粉体工学会志, 1989, 26(9): 624.
- MASUNORI SUGIPOTO, NAKOYO YOKOTA, et al. Assessment of particles shape by use of two shape indexes[J]. **Journal of the Society of Powder Technology Japan**, 1989, 26(9): 624.
- [14] 蒋丽滢, 韩继红, 张雄, 等. 颗粒群特征的定量体视学分析方法[J]. 建筑材料学报, 1998, 1(4): 325—329.
- JIANG Li-ying, HAN Ji-hong, ZHANG Xiong, et al. Quantitative stereology research in characteristics of particle group[J]. **Journal of Building Materials**, 1998, 1(4): 325—329.
- [15] 李毅, 谢利利, 王名福, 等. 粉体颗粒形貌特征的提取与识别技术[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2000, 23(5): 67—69.
- LI Yi, XIE Li-li, WANG Ming-fu, et al. Study of drawing and recognizing particle appearance[J]. **Journal of Chongqing University(Natural Science Edition)**, 2000, 23(5): 67—69.