

文章编号: 1000-7598-(2007) 01-0179-06

土石混合料的工程综合分类法研究

董云^{1,2}, 柴贺军³

(1. 淮阴工学院 建筑工程系, 江苏 淮安 223001; 2. 河海大学 岩土工程研究所, 南京 210097 3. 重庆交通科研设计院, 重庆 400067)

摘要: 随着土石混合料越来越广泛地被道路、堤坝、基础等工程采用, 快速、准确地预测其抗剪强度指标不仅有利于设计、计算, 也有利于施工方案的制定和压实方法的选择。土石混合料的物理力学性质本质上是由颗粒的性质和其内部结构决定的, 而现有的土石混合料的分类多从颗粒粒径和含量进行分类, 无法从分类上判断其物理力学性质指标。通过室内击实试验、颗粒分析试验、剪切试验, 结合非线性的分形几何学原理, 对土石混合料进行以工程应用为目的的分类研究, 提出了以岩性、含石量和混合料的颗粒组成成分为分类指标的土石混合料工程综合分类法, 将土石混合料按3个层次划分为24类, 并由试验指出不同类别土石混合料物理力学性质的差异。该综合分类法分类指标简单, 指标确定方便, 易于实际应用, 并可根据分类预测混合料的物理力学性质。

关键词: 土石混合料; 工程分类; 含石量; 粒度分布; 分形维

中图分类号: TU 47

文献标识码: A

Study on engineering synthetical classification of rock-soil aggregate mixture

DONG Yun^{1,2}, CHAI He-jun³

(1. Department of Civil Engineering, Huaiyin Institute of Technology, Huaian 223001, China;

2. Research Institute of Geotechnical, Hohai University, Nanjing 210097, China;

3. Chongqing Communication Research and Design Institute, Chongqing 400067, China)

Abstract: Preestimate the intensity of rock-soil aggregate mixture quickly and accurately is not only helpful to design and calculate, but also to establish the construction scheme and choose properly compaction method, while the rock-soil aggregate mixture are broadly used in roadbeds, dykes and dams, and foundation engineering. The physico-mechanical character of the mixture are essentially determined by the granule property of the mixture and the interior frame of the mixture, but the classification existed are always set about from the grain composition, it is hardly to predict the character of the mixture from the classification. Aimed at the engineering application, studied the classification method of the mixture supported by the results of lab shear test and compaction test, and utilized the nonlinear theory of fractal geometry, this article assorted the mixture into 3 levels and 24 kinds according to the property of rock and soil, the ratio of rock to soil and the granularity distribution fraction dimension of the mixture, to present the diversity on characters of different kinds of mixtures meanwhile. This synthetical classification method is prone to apply in practice for the criterion of this method is simple and it can be determined conveniently; and the representative strength of different kinds of mixtures could be quickly predict through this classification method.

Key words: rock-soil aggregate mixture; engineering classification; ratio of rock to soil; granularity distribution; fractal dimension

1 前言

分类是一切自然科学研究的基本内容之一, 反映人类在一定研究阶段, 运用当时的研究手段, 对其研究对象的认识水平。土质分类亦然, 它是土质学、土力学的基础理论之一, 其任务是将各种自然土, 根据本学科的认识水平, 按其在实际应用中的

共性划分为类或组, 达到“土以类聚”。

土石混合料现有的分类方法中, 由于研究者的角度和要求不同, 分类和命名的方法也不同, 如地质工作者多从地质年代分类; 工程地质工作者多从成因分类; 工程建筑工作者多从材料工程性质分类; 道路工作者多从承载力分类等。使得土石混合料的分类方法繁多, 种类繁杂, 不利于各研究领

收稿日期: 2005-03-09

基金项目: 交通部西部建设科技项目 (No. 200231800034), 河海大学学生科技基金项目 (No. 2006-57)。

作者简介: 董云, 男, 1974年生, 博士生, 讲师, 主要从事道路工程、岩土工程的教学和科研工作。E-mail: dyunhyit@163.com

域共同研究土石混合料的工程性质。

土石混合料的物理力学性质在本质上是由颗粒的性质和内部结构决定的,土体结构的复杂性、非线性使土体的力学行为表现出不确定性和不规则性。分形几何学(fractal geometry)理论^[1,2]主要描述自然界的不规则性,为研究非线性科学提供了有力的工具。

为了深入地研究、探讨各类型土石混合料的工程性质,更好地使用这种优质的天然材料,有必要对土石混合料进行统一的分类和命名。

2 土石混合料分类的意义

土石混合料的组成复杂,其物理力学性质受颗粒组成、生成地质年代、土石比等因素影响变化大,对其进行合理的分类具有许多实际用途,具体如下。

(1) 确定不同层次的分类指标和标准,确定分类的名称。

(2) 根据经验概略地鉴定各类混合料的工程性质,初步评价各类土石混合料作为填料的适用性。

(3) 综合反映各类土石混合料的强度、变形指标和施工经验,为施工和设计服务。

(4) 明确对各类土石混合料深入开展强度、变形研究的重点内容、试验项目,试验方法和手段。

3 现有的分类方法及不足

在土石混合料的工程分类中,很多分类方法没有将粗粒土和超粒径的土石混合料区分开来,而将土石混合料统称为粗、巨粒土。实际上,水电工程上的粗粒土是粗颗粒土石混合料,包括一般所称的砾石土、砂卵石、石渣和堆石等,与公路土石混合料的范畴是相同的,因此水电、铁路和机场等粗粒土的研究对象与公路行业土石混填路基的土石混合料的研究对象是相同的,二者的研究成果可以相互借用。

3.1 研究现状及现有的分类

由于研究者的角度和要求不同,分类方法也不同;从规范的角度来讲,不同国家、不同部门的规范也有不同的分类方法。

原水电部昆明勘测设计院科研所^[1]对砾质土进行过分类和命名。郭庆国^[2]对粗粒土进行过分类和命名。司洪洋^[3]对土石混合料进行过分类和命名。王龙、马松林^[4]等按含石量将土石混合料按结构分为多土类,多石类和中间类。武明^[5]以压实特性为标准对混合土进行了分类,提出以 10 mm 为界限粒径对土石混合料进行以含石量为标准的结构分类。

马松林^[6]等人在土石混合料室内振动压实研究中指出,P5 以上颗粒含量的变化对土石混合料的组成结构、压实特性及物理力学性质有着显著的影响,根据含石量变化所形成的不同组成结构及其压实特性进行分类研究,是符合客观规律的。

《土工试验规程》中对粗粒土进行了分类和命名。美国统一粗粒土分类法^[7],为美国陆军工程师兵团、垦务局、材料试验学会和其他部门所采用。美国公路工作者协会关于粗粒土的分类主要是按承载力划分的,其中粒状材料(粗粒土)部分分为 A1、A2、A3 三类^[7]。法国道路、堤坝压实规范中对粗粒土也进行了分类^[5]。我国《公路土工试验规程》中土分类依据包括:土颗粒组成特征、土的塑性指标及土中有机质的情况,应用筛分法,根据土颗粒粒径大小将土划分为不同的粒组,按混合料中各粒组含量的不同分为巨粒土、粗粒土、细粒土。

3.2 现有分类方法的不足

以上所列举的土石混合料国内外分类,各有其特点,在评价和应用土石混合料时都发挥了积极的作用,并为研究提供了有益的资料,但就目前的情况来看,还存在着以下一些不足之处:

(1) 从粗粒土的定义看,目前粗粒土的分类仅限于最大粒径 $d_{\max} < 76.2 \text{ mm}$ 的土石料,而在实际工程中 $d_{\max} > 76.2 \text{ mm}$ 土石料为数多、用量大,故对于 $d > 76.2 \text{ mm}$ 颗粒含量小于 50% 及 $d > 76.2 \text{ mm}$ 颗粒含量大于 50% 的粗粒土和超粒径料土也应有一个分类方法。

(2) 现有的分类方法多从颗粒粒径上,辅以液塑限进行分类,无法根据分类预测该类土石混合料的强度指标,不利于工程应用。

(3) 当前粗粒土的分类方法繁多,需要有一个形式简单、使用方便、反应工程特性的、统一的工程分类方法。

4 土石混合料的综合分类法

土石混合料的综合分类主要是针对土石混合料组成成分的复杂性、颗粒级配变化的特殊性(粒径相差悬殊)和工程性质的多变性等特征,考虑混合料固相组成中土和石的性质的差异,首先按固相成分中土和石的界限粒径、土和石的成因及风化程度等分类划分大类;其次考虑土石混合料的结构特征,由于混合料中含石量的多少直接影响混合料的内部结构形式,故按含石量的高低进行第 2 层次的分类;第 3 层次主要考虑影响混合料工程性质的粒径及级

配, 利用混合料颗粒组成的分形特征值作为第 3 层次的分指标, 评价混合料的级配情况。

4.1 第 1 层次分类

由于土石混合料固相组成包括土和石两种性质悬殊的材料, 两种材料本身性质不同, 由其组成的混合料显然具有不同的工程性质, 比如同样级配的两种混合料, 其中一种由坚硬的不易软化的灰岩和砂性土组成; 另一种由遇水易软化崩解的泥岩、页岩和砂性土组成, 其工程性质迥然不同。故而第 1 个层次的分类, 首先考虑怎样区分混合料中的“石”和“土”, 针对石和土的不同类别, 考虑自然界可能的情况对土石混合料进行分类。

4.1.1 土石界限的确定

根据现有的研究成果及分类方法, 土和石的区分通常从颗粒粒径上体现。如《公路土工试验规程》的粒组划分中, 将粒径大于 2 mm 的颗粒视为石, 并根据粒径的大小分为漂石、卵石、砾石等。而在实际施工和研究中, 以 5 mm 作为土石的界限粒径已为广大工程和科研人员接受并采用。

本分类仍采用 5 mm 作为界限粒径对土石混合料中的“土”和“石”加以区别, 把粒径在 5 mm 以上的颗粒的含量称之为含石量。

4.1.2 土石混合料中岩石的分类

岩石的种类繁多, 性质复杂。由于岩石是由各种地质作用造成的, 经受的地质作用不同, 其类型和性质也各不相同。通常按照岩石的成因分为岩浆岩(火成岩)、沉积岩和变质岩三大类。而相对于土石混合料中的岩石, 有别于岩体, 多表现单个岩块的性质, 而且工程上主要关心其强度, 对于道路、堤坝、基础等工程, 主要关心其抗压及抗剪强度, 故仍采用工程中按照岩石的极限抗压强度分类的方法, 将岩石分为硬质岩石和软质岩石两大类, 见表 1^[8]。界限指标为饱和单轴极限抗压强度等于 30 MPa, 在实际应用中可参照表列相关岩石的鉴别方法, 确定岩石的类别。

4.1.3 土石混合料中土的分类

土石混合料中的“土”包括 5 mm 以下的所有颗粒, 对于此粒径土的分类多依据粒径和塑性指数等进行。现行《公路土工试验规程》的分类较复杂, 该粒径横跨 3 个粒组, 包括细砾、砂及细粒组, 按现行分类, 根据各粒径颗粒含量的不同及塑性指数和液限等可分为砂、含细粒土砂、细粒土质砂、高(低)液限黏(粉)土、含砂(砾)高(低)液限黏(粉)土等。

表 1 岩石按强度分类表

Table 1 Classification of rocks according to intensity

岩石类别		饱和单轴极限抗压强度/MPa	代表性岩石
硬质岩石	极硬岩	大于 60	花岗岩、闪长岩、玄武岩等岩浆岩, 硅质、钙质胶结的砾岩, 砂岩、石灰岩、白云岩等沉积岩、片麻岩、石英岩、大理岩、板岩、片岩等变质岩。
	硬质岩	30~60	
软质岩石	软质岩	5~30	凝灰岩、浮石等岩浆岩、泥砾岩、泥质页岩、泥质砂岩、泥灰岩、泥岩、黏土岩、煤等沉积岩、云母片岩或千枚岩等变质岩。
	极软岩	小于 5	

显然, 在天然土石混合料中, 由于细粒料多为岩石风化颗粒, 为天然岩体的上覆层, 其中 0.075 mm 以下颗粒较少, 故在混合料土的分类中简化分为黏性土和砂性土, 其中黏性土主要包括黏土类岩石的风化颗粒, 如泥岩颗粒和页岩颗粒等。其他则归结为砂性土。

4.1.4 土石混合料第 1 层次分类

综上所述, 土石混合料第 1 层次的分类指标采用岩石和土的性质, 按 5 mm 为控制粒径, 作为土与石的分界, 对于混合料中的石, 通过肉眼鉴别为凝灰岩、浮石等岩浆岩或泥砾岩、泥质页岩、泥质砂岩、泥灰岩、泥岩、黏土岩等沉积岩或云母片岩或千枚岩等变质岩时(无法肉眼鉴别时以饱和单轴抗压强度 30 MPa 为分界), 则确定其为软岩土石混合料; 如为花岗岩、闪长岩、玄武岩等岩浆岩或硅质、钙质胶结的砾岩, 砂岩、石灰岩、白云岩等沉积岩或片麻岩、石英岩、大理岩、板岩、片岩等变质岩时, 则确定其为硬岩土石混合料。

在软岩土石混合料中, 根据细粒料的情况, 如细粒料多为黏土类岩石的细粒, 则命名为软岩黏土土石混合料, 记为 RN, 如细粒料多为其他岩石的细粒和砂, 则命名为软岩砂土土石混合料, 记为 RS。同理, 对于硬岩土石混合料, 根据细粒料情况分别分为硬岩黏土土石混合料和硬岩砂土土石混合料, 分别记为 YN 和 YS。

4.1.5 第 1 层次分类的可行性

为了验证第 1 层次分类的可行性, 对不同类别的土石混合料按同样的级配组成, 不同的含石量进行了室内剪切试验, 由比较同样级配组成的不同类别的土石混合料的试验结果可知:

(1) 当粗粒为软岩时, 其最大内摩擦角为 28°, 把混合料中的粗粒换为硬岩后, 其最大内摩擦角增长到 32°, 可见岩性对混合料强度指标的影响。

响是非常大的。

(2) 粗细颗粒均为强风化泥岩颗粒, 各含石量的强度都较低, 粗颗粒换成新鲜灰岩后, 当含石量小于 30 % 时, 强度基本没有变化; 当含石量超过 30 % 后, 强度开始增加, 且随含石量的增加而增加, 强度增加的幅度也较大, 含石量为 40 % 时, 内摩擦角增加约 2° , 到含石量为 70 % 时, 内摩擦角增加了约 4° 。

(3) 把混合料中的细料也换为相应粒径的砂、石粉等时, 混合料的强度普遍又有所提高, 即便含石量低于 30 % 时, 强度也较细料为强风化泥岩时高约 1° , 随含石量增加, 内摩擦角与细料为泥岩风化颗粒时相比仍可提高大约 $2 \sim 4^{\circ}$ 。

分析认为, 岩(土)性作为土石混合料第 1 层次的分指标对于预测混合料的强度指标是可行的。

4.2 第二层次分类

4.2.1 土石混合料的结构特征

土石混合料是由于土和石 2 种工程性质相差悬殊的材料组成的分散颗粒系, 其中土和石含量的不同, 土石混合料的结构形式将发生变化, 随含石量的增加, 土石混合料的结构形式由密实-悬浮结构转化为骨架-密实结构, 最终进入骨架-空隙结构状态, 不同的结构形式表现出不同的强度和变形性能, 故含石量的不同将显著影响土石混合料的工程性质。因此, 土石混合料分类的第 2 个层次按含石量进行。

4.2.2 室内试验及结果分析

对不同类别的土石混合料按不同的含石量进行室内的击实试验和剪切试验, 得到了 RN 类和 YS 类土石混合料不同含石量的击实试验最大干密度随含石量的变化曲线及内摩擦角随含石量的变化曲线如图 1~4。

从图 1, 图 2 可以看出, 随含石量的增加, 混合料的最大干密度都有一个先增加后下降的趋势, 对于 RN 类土石混合料, 当含石量小于 30 % 时, 含石量的增加对混合料的最大干密度影响较小, 当含石量超过 30 % 后, 最大干密度有较大地提高, 但当超过 70 % 后, 最大干密度的降幅也很大。对于 YS 类土石混合料, 随含石量从 10 % 增加到 30 %, 混合料的干密度有一定的提高, 但含石量为 20 % 和 30 % 时的最大干密度相差并不大, 随着含石量的进一步增加, 最大干密度仍在不断的增大, 从回归曲线的趋势看, 当含石量超过 70 % 后, 最大干密度有下降的趋势。

从图 3, 图 4 可以看出, 其变化规律与最大干

密度的变化规律相似, 在含石量低于 30 % 时, 内摩擦角随含石量的增加并不大, 对于硬岩类土石混合料表现尤为明显, 而当含石量超过 30 % 后, 强度增加较快, 对于 YS 类土石混合料强度当含石量达 70 % 时约比 30 % 时增加 8° , 随着含石量的进一步增大, 强度指标有略微下降的趋势。而软岩类土石混合料的强度指标增幅较小, 但也有同样的变化趋势。

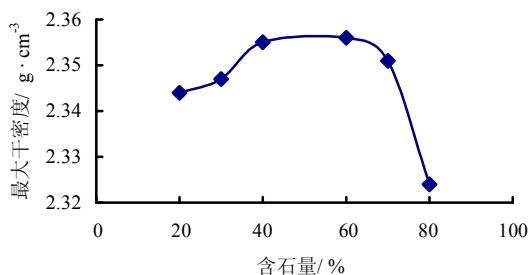


图 1 RN 最大干密度与含石量关系曲线

Fig.1 Relationship between $\rho_{\max}$ and rock-soil ratio of RN

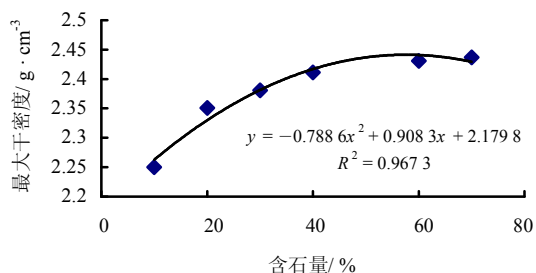


图 2 YS 类最大干密度与含石量关系曲线

Fig.2 Relationship between $\rho_{\max}$ and rock-soil ratio of YS

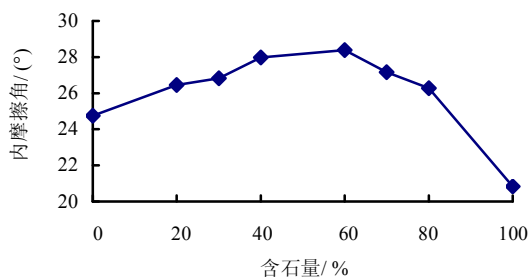


图 3 RN 类最大内摩擦角与含石量关系曲线

Fig.3 Relationship between $\phi_{\max}$ and rock-soil ratio of RN

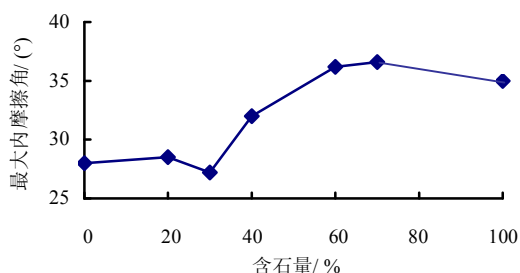


图 4 YS 类最大内摩擦角与含石量关系曲线

Fig.4 Relationship between $\phi_{\max}$ and rock-soil ratio of YS

4.2.3 土石混合料第2层次分类

综上所述, 依据含石量的多少将土石混合料分为多土类, 多石类和中间类, 界限含石量为 30 % 和 70 %, 相对来讲, 含石量低于 30 % 的多土类和含石量高于 70 % 的多石类的强度指标较低。

4.3 第3层次分类

传统的粗粒土的分类没有采用多层次的分类体系, 一般多按照粒度成分(辅以液限、塑性指数等), 虽然这种方法具有简单和易操作性, 但单个粒度成分参数无法与其相对应的力学特性建立联系, 且用不均匀系数 C_u 、曲率系数 C_c 反映级配关系时, 确定 C_u 、 C_c 需要人工估读有效粒径、限制粒径等, 容易造成较大的误差。

为解决上述问题, 引入土石混合料颗粒分形特征, 以颗粒分形特征值——分维值 D 作为判断级配优良与否的指标。

首先, 根据分形理论和相关文献^[9-16], 只要颗粒分析试验中 $\lg M$ (其中 M 为对应筛孔的累计通过百分率)和 $\lg R$ 存在线性关系, 就说明其粒度组成具有分形特性。室内随机进行了 87 组筛分试验, 点绘 $\lg M$ - $\lg R$ 曲线, 不难发现二者基本呈线性关系, 从而验证了土石混合料的颗粒组成具有分形特征, 并且在同样的粒径范围下, 细粒含量越高, 分维值越大。可经过相关换算得到: 如线性回归直线的斜率为 b , 则 $D = 3 - b$ 。

粗粒土粒度分布曲线如图 5 所示, 斜率为 b ($b > 0$), 则有:

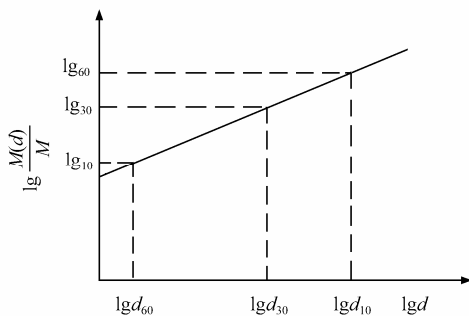


图 5 混合料的粒度分布曲线

Fig.5 Fractal line of mixture granularity distribution

$$\text{由: } b = \frac{\lg 60 - \lg 10}{\lg d_{60} - \lg d_{10}}, \quad \frac{d_{60}}{d_{10}} = 6^{\frac{1}{b}} \quad (1)$$

$$\text{即: } C_u = 6^{\frac{1}{b}} = 6^{\frac{1}{3-D}} \quad (2)$$

$$\text{同理: } \frac{d_{30}}{d_{10}} = 3^{\frac{1}{b}}, \quad \frac{d_{30}}{d_{60}} = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{1}{b}} \quad (3)$$

$$\text{得: } C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10} \times d_{60}} = \left(\frac{3}{2}\right)^{\frac{1}{b}} = 1.5^{\frac{1}{3-D}} \quad (4)$$

土工试验规程中规定:当粗粒土的级配同时满足: $C_u \geq 5$, $C_c = 1 \sim 3$ 时, 称为良好级配, 当 $C_u \geq 5$ 时, 由式(2)可得: $D \geq 1.887$; 当 $C_c = 1 \sim 3$ 时, 由式(4)可得: $D \leq 2.631$ 。所以, 当粗粒土的粒度分布的分维数满足 $D = 1.887 \sim 2.631$ 时, 其级配称为良好级配, 故只需计算出分维值, 就可判定级配良好与否。分维 D 同样可反映粒度分布曲线的坡度, 表明土粒大小的不均匀程度。 D 值愈大, 表明粒度分布曲线的坡度愈缓, 土粒大小愈不均匀; 反之, D 值愈小, 表明曲线愈陡, 土粒大小均匀。可按工程经验把 $D \leq 1.887$ ($C_u \leq 5$) 的土称为匀粒土, 而把 $D > 1.887$ ($C_u > 5$) 的土则称为非匀粒土。分维 D 越大 ($D < 3$), 不均匀系数越大, 曲率系数越大。

室内试验结果表明, 级配良好的土石混合料较级配不良的土石混合料强度要高。前述试验中, 当含石量为 100 % 时, 其颗粒级配为不良, 其内摩擦角较含石量为 70 % 时低了约 2° 。

4.4 综合分类法的优点

综合分类具有突出的特点, 主要表现在以下几方面:

(1) 实际工程中容易应用, 一般通过野外的肉眼识别, 即可判定第 1 层次分类, 是软岩类还是硬岩类;

(2) 基本不须试验, 即可初步判断第 2 层次的类别, 是多石类还是多土类。

由于不同类别混合料的结构形式不同, 其中控制混合料工程性质的组成成分也不同, 多土类显然是土的性质决定了混合料的工程性质, 多石类是石料的性质控制着混合料的工程性质, 可作为填石处理, 而中间类则要依据含石量的多少, 由土石的共同作用控制着土石混合料的工程性质。据此又可进一步预测混合料的工程性质。

(3) 利用分维值确定分类的突出有点在于, 一方面避免了计算 C_u , C_c 过程中估计 d_{10} , d_{30} , d_{60} 的经验误差, 仅依据单指标即可确定土石混合料是否属优良级配; 另一方面, 利用分形理论, 通过更进一步的研究, 可确定分形与混合料工程性质的预测模型, 为深入研究提供了新的思路和方法。

5 讨 论

通过室内试验对以岩性、含石量和分维值为分类指标的土石混合料进行了强度和击实试验,得到了土石混合料按上述指标分类的界限值,并相应将土石混合料分为软岩、硬岩,多石、多土,级配良好与级配不良等不同的类别。该分类简单易行,并可根据试验成果快速预测各类型土石混合料的强度指标,非常适合工程应用。

文中提出用混合料的颗粒分形进行混合料第 3 层次的分类,但由于土石混合料的强度指标还受最大粒径等其他因素的影响,还必须通过大量的试验以确定颗粒分形与强度指标之间的关系。

参 考 文 献

- [1] 砾质土的试验研究[R]. 昆明: 水电部昆明勘测设计院科研所, 1971.
- [2] 郭庆国. 粗粒土的工程特性及应用[M]. 郑州: 黄河出版社, 1999.
- [3] 司洪洋. 粗颗粒土石料的命名和粗度系数[J]. 水利水运科学研究, 1981, (1): 21—25.
- [4] 王龙, 马松林, 徐德兴, 等. 土石混合料的结构分类[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2000, 33(6): 129—132.
WANG Long, MA Song-lin, XU De-xin, et al. The constructive classification of the soil aggregate mixtures[J]. *Journal of Harbin University of Civil Engineering & Architecture*, 2000, 33(6): 129—132.
- [5] 武明. 混合土以压实特性为标准的分类方法[J]. 云南公路科技, 1996, (2): 36—39.
- [6] 马松林, 王龙, 王哲人. 土石混合料室内振动压实研究[J]. 中国公路学报, 2001, 14(1): 5—8.
MA Song-lin, WANG Long, WANG Zhe-ren. Study of compacting properties of soil-aggregate mixture[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2001, 14(1): 5—8.
- [7] L·福斯布拉德. 土石填方的振动压实[M]. 甘杰贤等译, 北京: 人民交通出版社, 1986.
- [8] 黄凤才. 地质及路基[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1986.
- [9] 田堪良, 张会礼. 论天然沉积砂卵石粒度分布的分形结构[J]. 西北水资源与水工程, 1996, 12: 26—31.
TIAN Kan-liang, ZHANG Hui-li. Fractal structural of granularity distribution of natural sedimentary sandy gravel[J]. *Northwest Water Resources & Water Engineering*, 1996, 12: 26—31.
- [10] 吴志锋. 花岗岩风化土体粒度成分的分形特征[J]. 中国水土保持, 1997, 5: 17—19.
- [11] Xu Y F. Fractal structure of soils——a case study[A]. *Proc. 2nd Int.Conf. on Soft Soil Engrg*[C]. Nanjing: [s. n.], 1996, 75—78.
- [12] Turcotte. D. L. J. *Geophys. Res.*, 1986, 91: 1 921—1 926.
- [13] 胡卸文. 金沙江溪洛渡水电站坝区软弱层带的工程地质系统研究[博士学位论文 D]. 成都: 成都理工学院, 1995.
- [14] 谢学斌, 潘长良. 排土场散体岩石粒度分布与剪切强度的分形特征[J]. 岩土力学, 2004, 25(2): 287—291.
XIE Xue-bin, PANG Chang-liang. Fractal characteristics of size distribution and shear strength of bulky rock material in waste pile of mines[J]. *Rock and soil Mechanics*, 2004, 25(2): 287—291.
- [15] 刘松玉, 方磊, 陈浩东, 等. 论我国特殊土粒度分布的分形结构[J]. 岩土工程学报, 1993, 15(1): 23—30.
LIU Song-yu, FANG Lei, CHEN Hao-dong. Fractal structure of granularity distribution of regional soils in China[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1993, 15(1): 23—30.
- [16] Mandelbrot B B: *The Fraction Geometry of Nature*[M]. Freeman: San Fransisco, 1982.
- [17] 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [18] 公路土工试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 1993.