

建筑废弃物再生材料在地基处理中的应用建议

袁静¹, 陈金友², 官达²

(1. 浙江省建筑设计研究院, 浙江 杭州 310012; 2. 杭州市西站枢纽开发有限公司, 浙江 杭州 311121)

摘要: 本文基于建筑废弃物巨量生成以及原生建筑材料短缺的现状, 通过五大类建筑废弃物物料来源和特点分析、建筑废弃物再生材料的性能研究, 探讨地基处理工程中应用建筑废弃物再生材料、工程渣土和废弃泥浆干化土的可行性和优势, 提出地基处理工程中再生材料应用建议; 通过分析地下空间开发形成的工程渣土特性, 给出了最大量工程渣土作为原生材料, 在地基处理工程的应用措施, 以期进一步扩大建筑废弃物再生材料的工程应用范围, 使其得到差别化、高效化和精细化再利用, 从而节约工程造价、保护环境、实现建筑业的可持续发展。

关键词: 地基处理; 建筑废弃物; 建筑废弃物再生材料

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2020)01-0014-11

作者简介: 袁静(1972-), 女, 江苏扬州人, 博士, 正高级工程师, 主要从事基坑围护设计、软土地基处理、地铁设施保护安全评估, 以及建筑废弃物资源化利用等方面的研究。E-mail: 2270442033@qq.com。

Suggestions on the application of recycled materials from construction waste for ground treatment

YUAN Jing¹, CHEN Jin-you², GONG Da²

(1. Zhejiang Province Architectural Design and Research Institute, Hangzhou 310012, China;

2. Hangzhou West Railway Station Hub Development Co., Ltd., Hangzhou 311121, China)

Abstract: Based on the situation of huge amount of construction waste and the shortage of original construction materials, this paper discusses the feasibility and advantages of applying the recycled materials from construction waste in the foundation treatment engineering by using both the engineering waste soil and dried soil from waste mud. Through the analysis of the sources and characteristics of five types of construction waste, and the performance of recycled materials, suggestions are given for ground treatment. Based on the analysis of characteristics of engineering waste soil produced by underground space development, the application measures of engineering waste soil in the foundation treatment project are given in order to further expand the application scope of the recycled material, so that it can be differentiated, efficient, refined and re-utilized to save the engineering costs, to protect the environment and to achieve the sustainable development goals of the construction industry.

Key words: ground treatment; construction waste; recycled materials from construction waste

0 前言

我国近四十年的经济高速发展、城镇化进程和大规模基础设施建设, 建筑业成为国民经济的主要支柱产业之一。工程建设、维修、拆除过程中产生了大量建筑废弃物。每年数亿吨的建筑废弃物, 不加以及时处理和利用, 采用露天堆放或填埋方式处置, 将占用大量土地资源, 增加后期建设的难度与成本; 和其他固体废弃物混合后, 还造成利用难度大、成本高及环境污染问题。

与此同时, 建筑业每年消耗大量的粘土、石灰石和砂石等资源, 用以生产水泥、砖和混凝土等建筑材料, 满足约 20 亿 m³/年新建建筑和其他工程建

设的需要, 使得石灰石等资源呈现日益短缺的严峻形势, 且巨量露天砂石资源的开采, 破坏了自然景观, 生态环境受损。“绿水青山就是金山银山”, 国家相关部委出台“严控新建砂石矿山, 全面加强砂石矿山开采规划”等政策, 在全国范围特别是沿海经济发达地区要求关停砂石矿山, 实施矿山复绿工程。受天然资源短缺以及环境保护政策的双重作用, 天然砂石等建筑原生材料供不应求, 价格逐步攀升, 导致建设行业面临一方面建筑原生材料短缺, 另一方面建筑废弃物巨量产生且利用低的困境。

基金项目: 浙江省建设科研项目(2018K117)

收稿日期: 2019-12-22

建筑废弃物不同于其他的工业废弃物和生活垃圾,其主要成分、性质以及用途未发生改变,均和建筑材料相同,其来源于建筑物,用之于建筑物,是较好的建筑材料。建筑废弃物再生材料已广泛应用于墙体材料、道路砖以及市政道路的路基、垫层、部分基层中。然而由于其生成量巨大,迫切需要进一步拓展其再生材料的应用范围,以替代部分原生材料,缓解建筑原生材料供不应求问题。

地基处理作为用于改善支承建筑物的地基(土或岩石)的承载能力或改善其变形性质或渗透性质而采取的工程技术措施,其常用的地基处理方法有换填垫层法、强夯法、砂石桩法、振冲法、碎石桩法、灰土挤密桩法和土挤密桩法等,一般在大面积或长线建设工程的软弱地基加固中采用。如沿海机场工程、电厂堆载工程、公路和市政道路工程。大面积或长线建设工程的地基处理过程需应用大量的碎石、砂石等原生材料。

建筑废弃物经处置后的再生材料,其成分、特性和砂石等原材料类似,可拓展其在地基处理工程中的资源化利用用途,部分或全部替代地基处理中的原生填料,从而节约原生材料,减少天然矿石资源的消耗。

1 建筑废弃物的物料来源和特点

建筑废弃物,俗称“建筑垃圾”。2005年由建设部制定的《城市建筑垃圾管理规定》中定义“建筑垃圾”为:建设单位、施工单位新建、改建、扩建和拆除各类建筑物、构筑物、管网等以及居民装饰装修房屋过程中所产生的弃土、弃料及其它废弃物。因此,广义建筑废弃物包含:工程废弃物、拆除废弃物、装修废弃物、工程渣土和废弃泥浆五类^[1]。其中工程废弃物、拆除废弃物、装修废弃物分别在建(构)筑物建设、拆除和装修过程中产生,属于定义中的弃料部分。工程渣土为弃土,废弃泥浆可归类于其他废弃物。废弃泥浆固化后形成的干化泥饼,性质和工程渣土类似,也可属于弃土部分。

工程废弃物、拆除废弃物、装修废弃物与工程渣土、废弃泥浆材料性质相差大,为狭义的建筑废弃物范畴,属于通常意义上理解的建筑废弃物。狭义建筑废弃物不包含工程渣土和废弃泥浆。

1.1 建筑废弃物物料来源

(1) 工程、拆除、装修建筑废弃物来源和生成量估算

工程、拆除、装修建筑废弃物为狭义建筑废弃物,三者虽然由不同类型建筑产生,成分与含量有

所不同,但基本组成一致,主要为砂浆、混凝土块、砖石碎块、金属、竹木材等。其来源主要为:

a) 工程废弃物:工程建设过程产生剩余但无法继续使用的混凝土、基坑中拆除的支撑、凿除的工程桩桩头或抹灰等产生的混凝土和砂浆等。

b) 拆除废弃物:房屋拆除中产生的建筑废弃物,包括砖、混凝土、石膏和灰浆、石材等。

c) 装修废弃物:建筑物维修、装修或改扩建。该过程产生大量的墙体、楼(屋)面表层废弃物,如抹面砂浆或灰浆、面层瓷砖、装饰石材等。

除此以外,市政道路修建过程产生的路面废弃混凝土碎块和沥青混凝土碎块、石材加工企业生产中遗留的石材碎料等均属于狭义建筑废弃物。

工程、拆除、装修建筑废弃物排放没有专门机构管理,其数量虽然无法精确统计,但可根据建筑废弃物来源对其总量进行估算。一般,工程建设过程按 500~600 T/万 m² 计算生成的工程废弃物,房屋装修过程按 0.1 T/m² 计算产生的装修废弃物,房产开发建设按土地出让面积 1.5 T/m² 计算生成的拆除废弃物。即可通过房屋占地面积或建筑面积估算房屋拆除、建设和使用过程中产生的建筑废弃物的量。

a) 工程废弃物

由于施工管理技术提高,工程废弃物逐年减少,但两类工程废弃物的产生仍不可避免。

1) 支撑混凝土废弃物

地下空间开发促使新建建筑地下室规模不断向深度、广度拓展,二、三层地下室普遍,四层、五层地下室逐步增多。软土地区或城市中心地带深层地下室施工一般采用围护墙和混凝土支撑相结合的围护体系,见图 1。混凝土支撑在地下室主体结构施工期间需由下至上逐层拆除,从而产生一定量的支撑拆除废弃物。



图 1 基坑工程钢筋混凝土支撑

Figure 1 Reinforced concrete support for foundation pit engineering

一般 1 万 m² 三层地下室,生成废弃混凝土支撑约 1 万吨,累计可估算得到杭州市拆除支撑产生的建筑废弃物约 100 万吨/年,浙江省拆除支撑产生

的建筑废弃物量约 1000 万吨/年^[2]。

2) 桩头混凝土废弃物

地下室钻孔灌注工程桩在桩头部位一般需超灌 2 m。该超灌部分在地下室底板施工之前需凿除, 见图 2。以占地尺寸 100 m×100 m 的工程为例, 柱网尺寸按 8.4 m, 三桩承台, 超灌 2 m 高度计算, 废弃的桩头混凝土量约 500 m³, 重量约 1275 T。累计可估算得到杭州市因凿除桩头产生的建筑废弃物量超过 50 万吨/年, 浙江省废弃桩头的量超过 500 万吨/年。



图 2 工程桩桩头

Figure 2 Construction pile head

b) 拆除废弃物

笔者曾以杭州市为例, 根据公开出让土地面积, 综合老旧建筑物的层数、未公开的出让土地等因素, 按 1.5 T/m² 计算出让土地上的拆除废弃物, 得到仅杭州一地 2011 年平均约产生 731 万吨/年。

2013 年起浙江省开展的旧住宅区、旧厂区、城中村改造和拆除违法建筑的“三改一拆”行动, 全国 2015 年开始的包括城市危房、城中村在内“棚户区改造”政策等, 使得各地拆除废弃物数量剧增。以浙江省为例, 2016 年、2017 年温州分别形成拆除废弃物约 1000 万吨、1200 万吨, 杭州 2017 年拆除废弃物约 1500 万吨。

c) 装修废弃物

笔者曾对杭州 2005~2014 年共 10 年的商品房销售面积数据进行分析, 以年均 920 万 m² 商品房计算, 杭州每年因房屋装修产生的建筑废弃物约百万吨级, 约占工程建筑废物、拆除废弃物的 10%。近年因大力推广新建商品房全装修, 建筑装修废弃物的量有所减少, 但由于二手商品房仍占据一定量且新建商品房再次装修不可避免, 建筑装修废弃物约占工程建筑废物、拆除废弃物的 10% 的比例, 仍具有一定的参考价值。

(2) 废弃泥浆来源和生成量估算

废弃泥浆指各类建(构)筑物桩基础、基坑围护桩以及泥水盾构、管网暗挖等施工产生的废置和剩余泥浆。施工用泥浆配合比按土层情况试配确

定, 其外加剂主要采用膨润土、增粘剂 CMC、纯碱等, 见表 1。遇松散土层、土颗粒粒径较大及含盐地下水时, 需要采取专门措施调整泥浆。一般施工中泥浆经沉淀或除砂等再生处理后可循环使用, 而当循环泥浆的比重 ≥ 1.3 t/m³、粘度 ≥ 50 s、含砂量 $\geq 10\%$ 、PH > 13 中任一项时, 即为废弃泥浆。

表 1 泥浆配合比 (单位: %)

Table 1 Mix proportion of slurry

土层类型	膨润土	增粘剂 CMC	纯碱 Na ₂ CO ₃
黏性土	5~10	0~0.02	0~0.5
砂性土	8~12	0~0.05	0~0.5

经调查, 2018 年宁波市、绍兴市、台州市分别产生废弃泥浆约 350、330、280 万 m³, 主要是大型建筑工程项目打桩以及地下连续墙施工产生。

(3) 工程渣土来源和生成量估算

工程渣土指各类建(构)筑物地下室、地下管网、道桥等在建设过程中开挖土石方产生的弃土。

目前, 地下空间的开发深度一般不大于 15 m。15 m 深度范围内的浅表土层基本属于新生代第四纪, 随地形地貌、河流等的演化而变化。因此, 工程渣土随土性基本可分为: 地表填土和耕植土、粉土和粉砂、粉质黏土、黏土、淤泥或淤泥质软土、圆砾或卵石等。丘陵地带岩层出露较浅时, 地下空间形成的渣土为较好的岩石原生材料。

参照拆除废弃物的估算原则, 根据公开出让土地面积, 综合考虑地下空间开发深度、浅表土层重度等因素, 按下式估算工程渣土生成量:

$$M = \alpha \gamma \cdot (S \times H) / g = \alpha \gamma \cdot V / g \quad (1)$$

式中: M —渣土量, 吨;

S —公开土地出让面积, m²;

H —地下室深度, m;

V —土方开挖体积, m³;

α —系数;

g —重力加速度, 取 9.8 m/s²;

γ —土层重度, kN/m³。

一般, 地表下 15 m 深度内的土层重度 γ 范围为 17~19 kN/m³, 软土或含水量较大的淤泥, 重度偏小, 部分低于 17 kN/m³; 硬塑黏土以及卵砾石等重度偏小, 接近 19 kN/m³。同时公开出让土地不会满铺进行地下空间开发, 且实际地下室开挖深度不一, 达到 5~15 m 甚至更深深度。为此, 基于估算原则并兼顾误差, 按地下室满铺、开挖深度 5 m, 土平均重度 18 kN/m³ 计算主要城市渣土生成量, 见表 2~表 4。

由表 2 可知, 随着土地出让面积的增加以及地下空间开发的持续推进, 浙江省主要城市将产生巨量的渣土量。尽管按土地出让面积计算的渣土量和实际生成的渣土量有时间上的滞后性。根据宁波市相关科研单位统计的数据, 2018 年实际共产生渣土约 8009 万吨, 与估算量相差约 25%, 两者在数量级层面上具有一致性。估算的渣土量可为前期规划渣土的用途提供依据和佐证。

表 2 杭州市工程渣土估算生成量

年份	2015	2016	2017	2018	2019
出让面积/万 m ²	579	666	836	968	895
渣土/万吨	5314	6109	7671	8888	8219

表 3 宁波市工程渣土估算生成量

年份	2015	2016	2017	2018	2019
出让面积/万 m ²	525	914	993	1168	1140
渣土/万吨	4820	8391	9116	10722	12944

表 4 绍兴市工程渣土估算生成量

年份	2016	2017	2018	2019
出让面积/万 m ²	397	585	435	786
渣土/万吨	3646	5374	3995	7216

浙江省建筑废弃物的生成量估算, 可为我国沿海地区估算废弃物生成提供借鉴。

1.2 建筑废弃物物料特点

(1) 工程、拆除、装修建筑废弃物物料特点

工程废弃物、拆除废弃物和装修废弃物虽然基本组成一致, 但由于来源不同, 仍呈现出不同特点, 见图 3。

工程废弃物在工程建设过程中产生, 相对作用时间短, 材料劣化时限低, 加之产生过程混杂的杂物少, 因而物料性能在三者之中最优。近年来工程垃圾的减量化和资源化利用取得了长足发展, 基坑支撑以及工程桩桩头等工程废弃物已成为优质的再生原材料资源。

拆除废弃物受国家棚改政策以及省、市、县地方“城中村改造”等政策的影响, 2015 年以来生成量巨大, 在三者中的占比高, 其生成具有“集中性、突发性、巨量性”特点。基于该轮拆除对象基本为上世纪 70、80 年代建造的多层砌体结构房屋, 拆除废弃物主要以黏土砖为主, 为砖混建筑废弃物。相较于混凝土, 黏土砖本身强度低, 加之 70、80 年代的砌体房屋已经过数十年的使用年, 建筑材料本身产生一定的劣化, 部分性能指标减弱; 而且拆除过程中, 各类强度、成分的建筑材料(混凝土、

木材等) 混杂, 拆除废弃物相较于工程废弃物, 具有成分混杂、强度较低、以砖混材料为主特点。

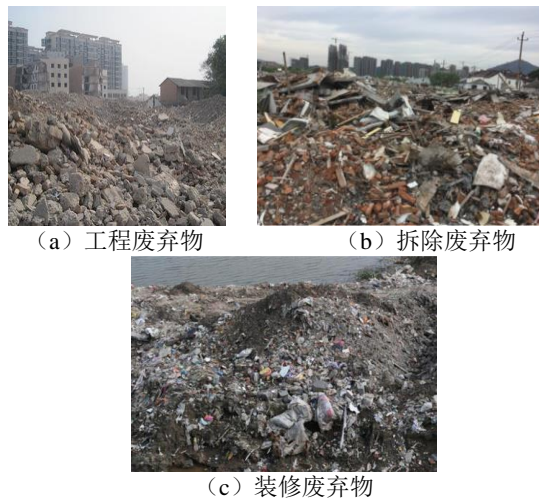


图 3 狭义建筑废弃物

Figure 3 Construction waste in a narrow sense

装修废弃物在三者之中成分最为复杂, 除了混凝土、砖瓦、砂浆外, 还夹杂陶瓷、石材以及轻质装修材料, 如石膏、加气混凝土砌块等。部分混杂金属、木材、玻璃、塑料等废弃物。源头分类管理缺乏的情况下, 部分装修废弃物混杂生活垃圾。因此, 装修废弃物也是介于建筑废弃物和生活垃圾之间的废弃物。

可见, 工程、拆除、装修建筑废弃物中工程废弃物性能最优, 目前资源化利用最充分。拆除废弃物性能介于工程和装修废弃物之间, 近年巨量拆除废弃物的产生促进了相关处置企业的兴起, 部分得到有效利用。

装修废弃物成分最为混杂, 利用难度大, 从事其处置和再利用的企业少, 但其和工程、拆除废弃物相比, 来源较为稳定。针对日常产生的装修垃圾特点, 进行装修垃圾处置和再利用的研究, 是建筑垃圾资源化利用长效化所必须要解决的问题。

(2) 废弃泥浆物料特点

钻孔灌注桩施工以及盾构掘进采用泥水平衡法时, 通过泥浆对槽壁、开挖面的静压力以及在槽壁上形成的泥皮以有效防止槽、孔壁坍塌。泥浆使用过程中由于土颗粒的进入, 比重、粘稠度、含砂量逐渐增高, 直至成为废浆。废弃泥浆的主要成分为水、膨润土、黏土、施工土层的土颗粒以及多种化学处理剂等。

废弃泥浆含水量高, 一般接近 100%, 呈液态特征, 有的废弃泥浆因来源土层性质不一, 含有不同含量的砾石、砂等。由于其含水量高, 废弃泥浆资源化利用前需采用脱水固化工艺, 使其成为泥浆

干化土,含水量宜小于30%。

(3) 工程渣土物料特点

工程渣土的特性随原生土层的特性而改变。一般浅表15 m深度范围内的土层特性主要为:

a) 粉土、粉砂

该类土一般分布于河道两岸,土层渗透系数大,属于建筑材料中的细骨料。

b) 黏性

黏性土是含粘土颗粒较多,透水性较小的土。其颗粒细,颗粒间联结性较好;孔隙小而多,透水性弱,具有可塑、膨胀、收缩特性。其力学性质随含水量大小而变化,压实后水稳性好,强度较高。其工程性质主要取决于由形成年代和成因所决定的结构强度、塑性和含水量。粘性土按塑性指数可分为粉质粘土和粘土。

c) 淤泥或淤泥质土

淤泥及淤泥质土是在静水或类静水环境中沉积,并伴有微生物作用的一种结构性土,属现代新近沉积物。按成因看可分为滨海沉积、湖泊沉积、河滩沉积及沼泽沉积四种。在中国渤海、东海、黄海等沿海地区的天津、上海、广州以及浙江省的杭州、宁波、台州、温州等城市,长江中下游、珠江下游、淮河平原、松辽平原,洞庭湖、洪泽湖、太湖和鄱阳湖四周,以及昆明滇池地区,都埋藏有厚度达数米至数十米的淤泥及淤泥质土。该类土含水量接近或超过液限,孔隙比大于1,强度低、压缩性高,具有触变性和流变性,渗透性小。

d) 圆砾或卵石

圆砾或卵石层是长期处于冲积和洪积作用历史条件下形成,主要位于山前地带或古河道位置。山前地带的圆砾或卵石层分布规律性不强,均匀性较差,常伴有粉质黏土等透镜体存在。

该类土具有较大渗透性,古河道位置上覆封闭的粘性土层时,该层往往为承压含水层。

e) 岩石

山区或丘陵地带修建地下室时,由于基岩出露位置高,往往需要在岩层中爆破开挖,生成的渣土为原生岩层的岩石碎料。

1.3 建筑废弃物物料特点比较

五大类建筑废弃物中,工程废弃物、拆除废弃物、装修废弃物、废弃泥浆和工程渣土之间形态、生成特性和生成量差别大。其中工程废弃物、装修废弃物、装修废弃物来源和特性类似,废弃泥浆经处置后形成的干化土,更接近于渣土。

根据1.1节建筑废弃物生成量估算可知,一般

地区级城市年平均生成工程、拆除、装修废弃物约1千万吨,废弃泥浆约300万 m^3 ,工程渣土约亿吨。工程渣土生成量在五大类建筑废弃物中约占80%~90%,成为近期建筑废弃物资源化利用的主要部分。

工程、拆除、装修废弃物需经处置后,形成再生骨料,才能加以资源化利用。废弃泥浆则首先需脱水固化成为干化土。工程渣土则不同,其实质是原生材料,利用价值随开挖土层的特性而改变。当其原生土层为石灰石、砂岩地层,则地下空间开发形成的渣土本身就是宝贵的砂石资源;原生土层为河道两岸的粉砂、粉土时,渣土是宝贵的建筑细骨料。

因此,建筑废弃物的资源化利用,开拓其在地基处理工程中的应用时,应分析其来源和物料特点,才能做到有的放矢,物尽其用。

2 建筑废弃物再生材料的特性

工程、拆除、装修废弃物需经处置后生成建筑废弃物再生材料,才能加以利用。其再生材料特性不仅与物料来源、种类相关,还受到处置工艺的影响。

废弃泥浆需要经过脱水固化工艺加以减量化。工程渣土虽然是原生材料,由于异地运输,其资源化利用需要对应原生材料特点和工程用途,采取针对性的分类管理和技术措施。

2.1 建筑废弃物物料处置工艺

(1) 工程、拆除、装修废弃物物料处置工艺

工程、拆除、装修废弃物中各种材质混杂,是混凝土、砖、陶瓷、石材等组成的混合物,既有高硬度也有低硬度的材料,而且粒度大小不一。砖、陶瓷的硬度较低;混凝土则强度较高,且间接取决于其中原生骨料的硬度。道路破除形成的混凝土块可超过1 m,房屋拆除形成的砂浆粒径甚至小于1 mm。不同物料的粒径、强度和材质,要求配备不同功率、不同种类的处置设备。工程、拆除、装修废弃物的核心处置工艺为:

a) 破碎:根据物料特性、尺寸以及使用用途,选择对应的破碎设备进行破碎或研磨。

b) 筛分:对破碎后的混合骨料颗粒进行筛分,得到按粒径分类的再生粗、细骨料。

除此以外,根据使用用途对再生材料分类、洁净程度的不同要求,处置工艺还可配备前端或全过程分选工艺、清洗工艺,从而得到不同杂物含量、不同含泥量、不同粒径、不同成分的建筑废弃物再

生材料:

- 1) 混凝土再生粗骨料;
- 2) 混凝土再生细骨料;
- 3) 黏土砖再生粗骨料;
- 4) 黏土砖再生细骨料;
- 5) 砂浆或黏土砖再生粉料;
- 6) 砖混再生粗骨料;
- 7) 砖混再生细骨料。

粗、细骨料以 4.75 mm 为划分界限, 大于 4.75 mm 的再生骨料为粗骨料, 小于 4.75 mm 的为细骨料。一般公称粒径小于 0.16 mm 的颗粒为粉料。

建筑废弃物破碎设备可分为移动式、半移动式和固定式。既有国外进口设备, 如德国的克磊镭、美国贝塞尔公司的破碎设备和产品生产线等, 也有国产设备, 如河南鼎盛、南方路机的破碎设备等。根据其破碎效率和筛分效果, 投资低、中、高不等。

即便是物料特性差的装修废弃物, 配备精细的处置工艺, 经高端分选、破碎、筛分和清洗工艺处置后, 也能得到较优的再生骨料, 但处置成本高。混凝土支撑废弃物, 尽管物料特性优, 但用于混凝土和砂浆的再生骨料制备时, 必须满足洁净度要求, 需配备清洗工艺, 投资成本也较高。处置设备简单、投资少的废弃物不能对源头混杂的建筑废弃物原料进行分类、拣选。

基于源头建筑废弃物成分的混杂程度和处置设备、处置工艺的特性, 不同地区、不同工程场地、不同处置工艺生成不同质量的建筑废弃物再生材料。为此, 应根据再生骨料的工程用途及对再生骨料的性能要求, 选择针对性的分选、破碎筛分技术和配套工艺流程。要求低的再生材料可配备简单的处置工艺, 要求高的再生材料则应配备复杂处置工艺。即应根据建筑废弃物再生材料的适用对象, 选择合适的破碎、分选设备和工艺流程, 以使效益最大化, 减少投资成本, 增大建筑废弃物再生材料的市场竞争性。

(2) 废弃泥浆处置工艺

废弃泥浆处置前需获得泥浆成分、重度、含水率、黏度、含砂率、胶体率、失水率、酸碱度等指标。不同土层形成的废弃泥浆, 宜分类处置, 其处置工艺选择如下:

a) 废弃泥浆含渣量较大时, 如粉土、粉砂等土层形成的废弃泥浆, 可预先分离出其中的土渣。

b) 根据泥浆的浓度、成分, 可添加适量的絮凝剂等化学药剂, 达到泥浆固化的目的。

c) 根据场地条件、泥浆种类等选择带式、板框式或离心式等压滤设备, 得到干化泥饼 (图 4)。

废弃泥浆经固化、脱水处理后, 泥饼含水量可低于 30%, 初步达到泥浆减量化的目的。

(3) 建筑渣土处置工艺

建筑渣土是工程建设中地表浅层产生的原土, 不同于狭义的建筑废弃物和废弃泥浆, 其本身是天然材料, 部分自身就是宝贵的资源。基于不同土层的分层特性, 土方开挖前如确定其工程建设用途, 分层开挖后, 应避免运输时不同土层混合, 后端储存时分类存放, 将有助于后续原土的资源化利用。

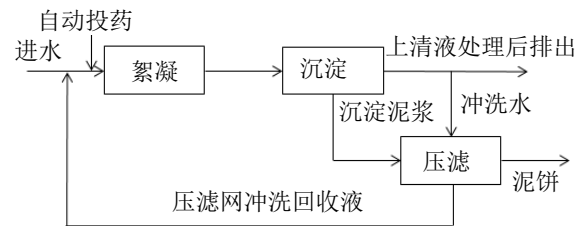


图 4 废弃泥浆脱水流程图

Figure 4 Flow chart of waste slurry dehydration

2.2 建筑废弃物再生材料特性分析

建筑废弃物再生材料特性和其物料来源、处置工艺密切相关。

(1) 工程、拆除、装修废弃物再生材料

工程、拆除、装修废弃物生成过程, 尤其是拆除和装修废弃物中往往混凝土和黏土砖混杂, 形成砖混再生粗骨料、砖混再生细骨料以及砖混再生粉。装修废弃物再生材料中还含有瓷砖、玻璃以及少量轻质材料, 如蒸压砂加气砌块、石膏板等。其再生材料的特性如下:

a) 颗粒混合特性

废弃混凝土再生骨料经破碎设备处置后, 其表面仍包裹一定量的硬化水泥砂浆。和原生骨料相比, 水泥砂浆和骨料的包裹面以及水泥砂浆面成为天然界面, 改变后续使用中材料的性能。其次, 水泥砂浆将改变骨料的吸水性能, 吸水量加大。

b) 骨料弱化特性

再生骨料由物料经挤压、冲击、研磨而成, 在外力作用下, 骨料内部产生大量的细微裂纹, 较原生骨料强度降低。

c) 骨料粒型特性

再生骨料的粒型特性与处置设备有关。简单破碎后的再生骨料表面粗糙、棱角较多, 表面含有较多的水泥砂浆。经过颗粒整形后的再生骨料表面干净、光滑, 棱角较少, 水泥砂浆块含量减少。

d) 成分混杂特性

当建筑废弃物前端分类严格或破碎、筛分处置工艺细致到位时,上述五类再生材料成分相对单一。通常情况下,建筑废弃物再生骨料为不同粒径、不通成分再生骨料、细料和粉料的混合物。

e) 性能差异性

基于废弃物来源的多样性、混杂性,处置工艺的差异性,不同来源的废弃物、不同处置工艺和处置成本,形成的再生材料质量差异大。

国外关于再生材料的生成、再利用相对完备,其基于细化的再生原料资源,再生产品生产精细化,原料配比丰富。同一种再生产品具有多达百余种的配比,且不同配比的产品性能数据测试和分析应用完备,并与用途相适应。

因此,我国关于建筑废弃物再生材料的再利用,应以应用用途为目标,向产业化源头追溯,选择合适的建筑废弃物物料、合适的处置工艺,才能使其再利用的经济和社会效益最大化。

(2) 废弃泥浆干化土

泥浆干化土因含有膨润土,经 XRD 测试后得到其矿物组成成分主要为: α -石英、蒙脱石、高岭石、钠长石和伊利石,其主要元素为硅、铝、铁、钙、钾等,元素种类和矿物组成基本吻合。

废弃泥浆经过板框式压滤机处置后含水量一般低于 30%。板框式压滤机刚压滤后的泥浆干化土液限约 45%,塑限 25%,塑性指数约 20,含有少量的水溶性盐类,其性能与黏性土接近。

(3) 工程渣土

建筑渣土主要是土方开挖形成,其形态的变化主要是物理作用,而组分、特性和原生土层一致。因此,工程渣土应用应结合原生土层特性,开展针对性的再利用研究。如果其产生、运输、堆放过程中,不同种类土层的渣土混合堆放,将大大影响高价值土方的利用特性,甚至无法再利用。

3 建筑废弃物资源化利用的困境及地基处理工程中应用的优势

建筑废弃物种类多,数量大。虽然建筑废弃物资源化利用得到长足发展,但其总量占主要部分的渣土,分类管理缺乏,应用量少。大量杂质含量高,以砖混再生骨料为主的拆除废弃物再生骨料,和我国再生产品应用标准的高层次要求脱节。由于建筑废弃物生成和工程应用存在一定的滞后性、再生产品应用标准缺乏系统性、再生骨料性能和应用标准的不匹配性,加之工程应用单位关于再生材料质量

的疑虑,大规模建筑废弃物资源化利用还存在较大的管理和技术困境。

3.1 建筑废弃物资源化利用的困境

(1) 前端未分类或分类不充分,原料成分混杂,再生原料“良莠不齐”

我国工程、拆迁和房屋装修现场分类管理缺乏,废弃物生成源头往往未予以分类,掺杂较多的木块、泡沫、塑料等杂质,导致建筑废弃物物料成分混杂。装修废弃物更甚,有时混有生活垃圾,掺杂破布、包装袋等。

目前常规处置设备仅能分拣出金属、木块等,不能对源头混杂的建筑废弃物物料进行精细的分类、拣选。基于物料的混杂程度和处置设备的分选特性,不同地区、不同工程场地、不同处置设备生成的建筑废弃物再生原料“良莠不齐”,性能不稳定。

(2) 大量砖混拆除废弃物再利用问题

“棚户区改造”、“三改一拆”政策施行,形成了大量以砖混材料为主的拆除废弃物再生原料。由于其骨料粒径较细、强度较低、成分混杂性较高,基本应用于新型墙体材料中的低层次产品,如临时围墙、基础垫层的砖胎模等,可消耗的再生原料数量有限^[3]。

其次,建设工程的开发进度往往与拆除废弃物的生成不同步,以墙体材料消耗为主的市场需求量有限,无法与拆除废弃物集中生成时间保持同步,以致砖混建筑废弃物再生原料积压、滞销,不利于建筑废弃物资源化利用的发展和产业化。

(3) 巨量工程渣土再利用问题

工程渣土是目前建筑废弃物生成的主要部分,除粉土粉砂、卵砾石、岩石等本身是建筑原材料,可直接加以利用外,沿海地区生成的大量的淤泥、淤泥质土以及其他软弱土,无法直接利用于工程项目。其巨量性、软弱性和生成的集中性,使得即使是简单的填埋处置,也存在土地选择困难、邻避效应严重、后期资源化利用难度大等诸多问题。

(4) 再生应用标准缺乏系统性

制定建筑废弃物再生原料和再生产品的技术标准和应用规范,是建筑废弃物再利用的前提条件。近十年的发展,我国初步形成了规范建筑垃圾资源化利用的标准架构,出台了建筑垃圾处置、建筑废弃物再生原料、再生产品及应用的系列国家、行业标准:

a) 建筑垃圾处置:《建筑垃圾处理技术规范》CJJ 134-2009。

b) 建筑垃圾再生原料:《混凝土和砂浆用再生

细骨料》GB/T 25176-2010、《混凝土用再生粗骨料》GB/T 25177-2010、《废混凝土再生技术规范》SB/T 11177-2016。

c) 再生产品:《再生沥青混凝土》GB/T 25033-2010、《道路用建筑垃圾再生骨料无机混合料》JC/T 2281-2014、《建筑垃圾再生骨料实心砖》JG/T 505-2016。

d) 再生应用:《再生骨料应用技术规程》JGJ/T 240-2011、《再生骨料混凝土耐久性控制技术规程》CECS 385-2014、《工程施工废弃物再生利用技术规范》GB/T 50743-2012、《再生混凝土结构设计规程》DB11/T 803-2011 等。

上述再生原料、再生产品及应用技术标准涵盖建筑和道路工程, 主要针对建筑废弃物再生原料在混凝土、砂浆、道路无机混合料中的应用制定, 属于建筑废弃物利用的高层次阶段, 对再生原料各个组分的含量规定较为严格。初步系列标准对应的再生产品面窄, 缺乏对中低端再生产品指标、性能的规定。《再生骨料应用技术规程》JGJ/T 240、《建筑垃圾再生骨料实心砖》JG/T 505 虽然涉及中等应用, 如对砖和砌块用再生骨料的微粉含量要求作了适当提高, 但未能形成系列针对不同层次再生原料和再生产品的指标规定。

为此, 选取两家建筑废弃物处理企业生产的再生骨料性能实测数据, 与《混凝土和砂浆用再生细骨料》GB/T 25176-2010、《混凝土用再生粗骨料》GB/T 25177-2010 规定的指标进行对比分析, 见表 5、表 6。

数据显示就表观密度而言, 再生粗骨料实测表观密度满足 I 类骨料要求。吸水率则差异较大, 部分达到 II 类标准, 部分低于 III 类; 压碎指标则 I 类、II 类、III 类均有。由于处置工艺的不同, 实测数据 1 的再生骨料经过清洗工艺处置, 泥块含量为 0, 远超标准要求, 而未经过水洗的再生粗骨料泥块含量波动大。可见, 由于处置工艺不同, 两组实测数据存在着较大的波动。即使是同种处置工艺, 骨料性能指标由于来源不同也存在一定的波动。再生细骨料显示出同样特征。

采用普通处置工艺生产的再生骨料, 其各项性能指标低于高层次应用标准的要求, 而中低层次应用的再生原料标准缺乏, 按高层次产品指标规定低层次产品的原料, 某种程度是一种浪费, 不利于充分利用建筑废弃物价值, 一定程度限制了再生骨料的应用范围, 也限制了建筑废弃物再生应用市场的生成。

表 5 再生粗骨料性能指标对比分析

Table 5 Comparative analysis of performance indexes of recycled coarse aggregate

项目	I 类	II 类	III 类	实测 1	实测 2
表观密度/(kg/m ³)	>2450	>2350	>2250	2510	2680~2790
吸率/%	<3.0	<5.0	<8.0	6.5~18	4.3~6.4
压碎指标/%	<12	<20	<30	16.9~25.6	7.3~13.9
泥块含量/%	<0.5	<0.7	<1.0	0	0.4~0.9
空率/%	<47	<50	<53	50~55	/
微粉含量/%	<1.0	<2.0	<3.0	1.5~3.5	/
杂物/%	<1.0	<1.0	<1.0	0~0.96	/

表 6 再生细骨料性能指标对比分析

Table 6 Comparative analysis of performance indexes of recycled fine aggregate

项目	I 类	II 类	III 类	实测 1	实测 2
表观密度/(kg/m ³)	>2450	>2350	>2250	2390~2620	2440~2620
压碎指标/%	<20	<25	<30	27~46	5~7
含泥量/%	<1.0	<2.0	<3.0	0	2~4.8
空隙率/%	<46	<48	<52	46~55	/
微粉含量	<5.0	<6.0	<9.0	7.2~12.3	/
MB<1.4 (合格)					
微粉含量					
MB≥1.4 或 (不合格)	<1.0	<3.0	<5.0	/	/

3.2 地基处理工程应用建筑废弃物的优势

和目前建筑废弃物资源化利用关注于地上结构相比, 地基作为建筑物下面支承基础的土体或岩体, 天然具有与建筑废弃物中最大量的工程渣土特性较大一致性的优势。地基处理过程中对填料的需求, 将为建筑废弃物的利用开辟新的途径。

(1) 和最大量的工程渣土性能、用途的一致性。地基处理对象为建筑物基础下的土体和岩体, 而工程渣土本身为基础土体的一部分。因此, 在五大类建筑废弃物中, 地基处理的作用对象和最大量工程渣土的性能最接近, 一致性、符合性较高。和建筑渣土用于生产陶粒、黏土砖相比, 地基处理工程是解决大量工程渣土再利用的低成本、有效、快捷的途径。

(2) 处置方法和工程渣土的相似性。工程渣土和原有土层性能一致, 原生土层强度高、压缩性低时, 其渣土原料是地基处理中很好的填料。若原有土层为淤泥等软弱土层时, 异地堆置和填埋时, 可采用同样的软弱地基处理方法, 解决软弱工程渣土填埋的稳定性问题。

(3) 量大面广, 需求量大。广义的地基处理包括场地平整、挖填方平衡等, 山区、丘陵、洼地、

滩涂围垦等需要大量的土石方，需求量大。工程渣土本身即是土石方的一种，可作为填方所需的土石方原料，从而一方面解决工程渣土的出处问题，另一方面也可减少常规开采矿山形成的宕渣填料需求，保护矿山资源。

(4) 组分多，可充分利用建筑废弃物再生原料。地基处理中的置换法、振密和挤密法等需要换填软弱地基或在地基中填入性能好、易挤密填料。排水固结法联合预压堆载，需在地基表面覆盖大量土石方堆载；其中的水平和竖向排水系统需要渗透性较好的材料填充。因此，地基处理所需要的材料几乎包含了建筑废弃物所有的再生原料—再生粗骨料、再生细骨料、微细粉以及工程渣土等。和水泥、混凝土、砂浆的单一组分以及新型墙体材料应用相比，地基处理对建筑废弃物再生原料的应用更为充分、全面、多元和综合。

(5) 再利用附加值高。和道路、基础垫层、回填材料采用矿山开采的宕渣相比，地基处理采用建筑废弃物再生材料具有更大的经济和社会效益。和简单填埋、占用大量土地资源相比，利用建筑废弃物作为地基处理填充材料具有更高的附加值和利用价值。

可见，针对建筑废弃物资源化利用的困境，建筑废弃物，尤其是工程渣土应用于地基处理工程，具有处置工艺的简单性、处置方法的一致性等优势。地基处理将成为建筑废弃物资源化利用的成本低，具有更高附加值的又一有效途径。

4 建筑废弃物在地基处理工程中的应用分析

4.1 地基处理工程的原生填料性能需求

地基处理方法按照是否改变原有地基的物理力学和化学特性，可分为物理的地基处理方法、化学的地基处理方法和生物的地基处理方法三大类^[4-5]。根据地基处理加固原理，常用的地基处理方法可归纳分为十类：置换法、排水固结法、灌入固化物、振密和挤密、加筋法、冻结法、微生物加固法、热处理法、托换法、纠倾和迁移等。

冻结法和热处理法为两种加固机制相反的处理方法，前者通过冻结地基土体，后者通过加热地基土体或焙烧，达到改变土体物理力学性质的目的。微生物法为在地基土体中培养特定微生物，通过生物作用改变土体物理力学性质。托换法是指自身或受邻近工程建设影响的既有建筑物地基和基

础加固技术，分为桩式托换、灌浆法以及基础加固法。纠倾和迁移是对建筑物进行矫正或整体移动位置的方法。

地基处理过程中，冻结法和热处理法、微生物法、托换法、纠倾和迁移均不需要加入大量建筑材料。而需要在地基中加入建筑材料，改善地基物理力学性能的方法主要为前五种，即置换法、排水固结法、灌入固化物、振密和挤密、加筋法，这五种地基处理方法均为物理的地基处理方法。其中置换法、排水固结法、振密和挤密需要在地基中换填或填充填料，是建筑废弃物再生材料主要的应用部分，具体如下：

(1) 置换法

置换法是指用物理力学性质好的岩土材料置换天然地基中部分或全部软弱土、不良土，形成双层地基、复合地基，达到提高地基承载能力、减少沉降的目的。置换法是应用岩土材料较多的一种方法，具体有：换土垫层法、抛石挤淤法、褥垫法、砂石桩置换法、强夯置换法、柱锤冲扩孔法、石灰桩法、地固件法。均是采用完全置换或部分置换原状软弱土体，回填或填入抗剪强度较高、压缩性较小的碎石、砂石、砾、石渣等，通过压实、强夯、柱锤夯实或掺加少量外加剂等，提高地基的强度和抗变形能力。地固件法甚至可以使用较好的原状土体，将岩土体材料装入地固件中，利用地固件的约束作用达到增强地基力学性能的作用，其地固件相当于国内的砂包，其密闭性、整体性强于砂袋。

可见，置换法主要是将软弱土、不良土置换成密实、强度高的填料，满足承载力和变形两项指标。《建筑地基处理技术规范》JGJ 79^[6]中换填垫层原生材料性能要求如下：

a) 砂石填料。宜选用碎石、卵石、角砾、圆砾、砾砂、粗砂、中砂或石屑，应级配良好，不含植物残体、垃圾等杂质。当使用粉细砂或石粉时，应掺入不少于总重30%的碎石或卵石。砂石的最大粒径不宜大于50 mm。对湿陷性黄土地基，不得选用砂石等透水材料。

b) 粉质粘土填料。土料中有机质含量不得超过5%，亦不得含有冻土或膨胀土。当含有碎石时，其粒径不宜大于50 mm。用于湿陷性黄土或膨胀土地基的粉质粘土垫层，土料中不得夹有砖、瓦和石块。

c) 灰土填料。灰土土料宜采用粉质粘土，不宜使用块状粘土和砂质粉土，不得含有松软杂质，并应过筛，其颗粒不得大于15 mm。

扩散角、压实系数 λ_c 或压陷差是衡量换土垫层性能的重要指标, 压实系数对于灰土需不小于0.95, 对于粉煤灰宜为0.90~0.95, 对于碎石、卵石、砂夹石、土夹石等宜为0.94~0.97。

(2) 排水固结法

排水固结法为在淤泥土、淤泥、冲填土等饱和粘性土地基中设置竖向和水平向排水系统, 同时在其上设置加载系统预压, 使土体中孔隙水排出, 逐渐固结, 地基沉降, 同时强度逐步提高的方法。

排水固结法涉及的材料分为两类:

a) 排水系统材料

普通砂井、袋装砂井等竖向排水体以及砂垫层水平向排水体。《建筑地基处理技术规范》JGJ 79中对排水系统原生材料要求为:

砂垫层: 其干密度应大于 1.5 g/cm^3 , 渗透系数宜大于 $1 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ 。填料宜采用中粗砂, 粘粒含量不宜大于3%, 砾石宜少量, 粒径需小于50 mm。

b) 上部堆载体材料

上部堆载体仅需满足堆载的需要, 完成后可以卸除, 也可作为永久地基使用。作为堆载使用时填料性能要求低, 需满足堆载使用要求; 兼作永久地基填料使用时, 满足地基密实度、承载力和均匀性要求。

(3) 振密挤密法

振动和挤密方法, 是使地基中土体进一步密实, 达到提高地基承载力和减少沉降的目的, 适用于砂土地基、非饱和粘性土地基等。必要时可在地基中设置填充材料, 如挤密砂石桩法、土桩、灰桩法、孔内夯扩法, 均为在地基中填入灰土、矿渣土、碎石等填料并加以夯实或压实, 从而挤密桩间土, 由挤密的桩间土和夯实的填料桩形成复合地基, 达到提高地基承载力和减少沉降的目的。

压实地基可选用粉质粘土, 灰土以及级配良好的砂土或碎石土等, 填料性能需求如下:

a) 砾石、卵石或块石填料, 分层压实的最大粒径不宜大于200 mm, 分层夯实的最大粒径不宜大于400 mm;

b) 粉质粘土、粉土填料, 其含水量宜为最优含水量, 可采用击实试验确定;

c) 不得使用淤泥、耕土、冻土、膨胀性土以及有机质含量大于5%的土。

土桩、灰土桩挤密地基桩孔内的原生填料要求为:

a) 应根据地基处理的目的和工程要求, 采用素

土、灰土、二灰(粉煤灰与石灰)或水泥土等;

b) 灰土中消石灰与土的体积配合比宜为2:8或3:7;

c) 水泥土中水泥与土的体积配合比宜为1:9或2:8;

d) 孔内填料均应分层回填夯实, 填料的平均压实系数值不应小于0.97, 其中压实系数最小值不应低于0.94。

振冲挤密地基中桩体原生材料性能要求如下:

a) 可用含泥量不大于5%的碎石、卵石、矿渣或其他性能稳定的硬质材料;

b) 不宜使用风化易碎的石料;

c) 对应振冲器功率的填料粒径为20~80 mm (30 kW)、30~100 mm (55 kW)、40~150 mm (75 kW)。

除此以外, 振动沉管法桩体材料的最大粒径不宜大于50 mm。

4.2 再生材料在地基处理中的应用建议

由4.1节分析可知, 地基处理中采用填充材料的主要作用为换土作用、填充和挤密作用、堆载和填方作用等。针对狭义建筑废弃物再生材料以及工程渣土、废弃泥浆干化土特性, 其在地基处理中中的应用建议如下:

(1) 工程渣土的再应用

工程渣土与原生土层性能一致。对应地基处理中置换法、排水固结法、振密和挤密法对填料性能的需求, 选择适合的原生中砂、粗砂、细砂、卵石、砾石、粉质黏土等渣土类别, 可不用处理, 直接作为填料, 从而最大化发挥工程渣土的效能。

(2) 废弃泥浆干化土的再应用

废弃泥浆干化土粘粒含量高, 其经脱水干化后含水量接近30%。其与水泥固化剂混合后, 粘聚力和抗剪强度较高, 可作为道路路基或再生灰土填料使用。

(3) 工程、拆除、装修废弃物的再应用

工程、拆除、装修废弃物经处置后形成不同粒径、不同组分的混凝土再生粗、细骨料以及砖混再生粗、细骨料和粉料等。虽然该类再生材料具有颗粒混合、骨料弱化、成分混杂等特性, 但填料使用的性能要求远远低于混凝土和砂浆用再生材料, 可以通过低成本的处置工艺, 满足各类地基处理填料要求。如再生粗骨料可部分替代碎(卵石)、再生细骨料可部分替代中、粗砂等, 从而节约大量碎石、和中、粗砂等原生材料资源。

除此以外, 广义地基处理中可消纳大量回填

材料的工程有：山地土石方平整工程、滩涂围垦工程、软弱地基处理的堆载工程等。该类工程的填料均可采用五大类建筑废弃物物料。鉴于废弃物物料粒径大小不一，部分混凝土大块和构件不加以处理，不仅影响地基密实度，而且成为后续工程开发的障碍物，同时软弱土将影响回填地基性能等问题，应根据不同回填工程地块开发的用途和需求，改进传统粗放的回填方式，细化回填工程填料要求，对巨量回填工程使用建筑废弃物填料进行质量管理，具体如下：

a) 回填料的种类要求

建筑废弃物中的混凝土，是较好的再生原料，应尽可能用于高等级利用。在满足高效处置的前提下，尽量采用建筑废弃物中再生利用价值较低的碎砖、碎瓦等作为回填工程的填料。

b) 回填料的粒径要求

房屋建筑拆除后产生的建筑垃圾，粒径大小不一，既有长则数米的钢筋混凝土楼板和柱，也有粒径相对较小的碎砖、碎块。

为防止建筑垃圾直接回填后，成为后期工程建设的障碍物，增加工程建设的成本，应对用于工程建设的建筑垃圾的最大粒径提出具体要求。根据施工机械特点，大量填埋的建筑废弃物再生料的最大粒径不宜超过 300 mm。

c) 回填料的级配要求

回填工程较难解决的工程问题即为后期地面沉降。回填料具有一定级配后，可大大降低填料颗粒间的空隙，一定程度上减少后期沉降。

经简单处置工艺处置后的建筑废弃物再生材料具有以下特点：

1) 杂质含量少，土质的二次污染可能性小。

2) 颗粒级配适当，较为均一，不会给后续的开发利用增加难度。

因此，即使用于回填工程，建筑废弃物也应经简单破碎和分选处理，控制最大粒径和颗粒级

配等指标要求，切忌将其直接用于回填工程，以达到初期以较少的处理成本，避免后期开发建设的二次处置成本增加的弊端。

5 结 论

建筑废弃物是放错地方的资源，其再利用不仅可缓解末端废弃物排放问题，还可部分解决源头的原材料缺乏问题。为充分发挥建筑废弃物再生材料性能，减少处置成本，物尽其用，应因地制宜，优化建筑废弃物再利用的用途，规划最优的使用路径。

地基处理工程作为和工程渣土性能最接近的应用对象，以及对建筑废弃物再生材料性能的特定需求，将为建筑废弃物再利用开辟新的途径，成为建筑废弃物低成本技术应用的典型示范，

地基处理中应用建筑废弃物再生材料，将有效消纳工程渣土，减少再利用成本，从而为进一步推进建筑废弃物再利用的产业化，实现建筑业持续发展做出贡献。

参考文献：

- [1] 袁静, 等. 浙江省建筑垃圾资源化利用技术导则[R]. 杭州: 浙江省建筑设计研究院, 2017.
- [2] 袁静, 于献青, 秦仲伏, 束小前. 浙江省建筑废弃物及其利用现状调查[J]. 浙江建筑, 2015, 32(1): 58-63.
- [3] 袁静, 于献青, 等. 新型墙体材料综合利用建筑废弃物的优势与对策分析[J]. 新型建筑材料, 2014, 41(11): 64-69.
- [4] 龚晓南, 杨仲轩. 地基处理新技术、新进展[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [5] 龚晓南. 复合地基理论和技术应用体系形成和发展[J]. 地基处理, 2019, 1(1): 7-16.
- [6] 中华人民共和国行业标准. JGJ 79-2012. 建筑地基处理技术规范[S].