材料科学

# 水泥夯土材料抗压强度试验及耐久性研究*

**Experimental Study on Compressive Strength and Durability of Rammed Cement Soil Materials**

宋逸飞[1]，郭庆军[1]，刘 挺[2]，张 坤[3]，闫蕊鑫[1]，李蕊彤[1]

（1. 西安工业大学 建筑工程学院，陕西 西安 710021；2. 中联西北工程设计研究院有限公司，陕西 西安 744000；3. 西安石油大学 土木工程学院，陕西 西安 710065）

**摘 要：**为研究水泥改性夯土材料的力学性能，依据粒径和水泥含量不同制备了 8 种试件，在不同养护环境下养护 5 年后，对其进行抗压强度试验和表观耐久性评估，探究不同粒径和水泥含量对抗压强度和表观耐久性的影响。结果表明：水泥夯土材料强度与含水率、粒径分布、水泥掺量、养护方法和放置年限等因素相关；随时间积累试件抗压强度不断增加，但 28 d 室外养护试件强度显著下降；水泥掺量越大抗压强度就越大，室内养护试件强度大于室外养护试件强度；不添加砾石的试件表观耐久性优良，砾石掺量过高试件表观较差。

**关键词：**水泥夯土；耐久性；抗压强度；季节性条件；自然气候条件

**中图分类号：**TU521.3 **文献标志码：**A **文章编号：**1005-8249（2024）04-0001-05

**DOI：**10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.04.001

SONG Yifei[1], GUO Qingjun[1], LIU Ting[2], ZHANG Kun[3], YAN Ruixin[1], LI Ruitong[1]

(1. Xi'an Gongye University Institute of Civil Engineering College, Xi'an 710021, China;
2. Zhonglian Northwest Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Xi'an 744000, China;
3. Xi'an Shiyou University Civil Engineering College, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** In order to study the mechanical properties of cement-modified rammed earth materials, 8 specimens were prepared according to different particle size and cement content. After 5 years of curing under different curing environments, compressive strength test and apparent durability evaluation were carried out to explore the effects of different particle size and cement content on compressive strength and apparent durability. The results show that the strength of cement rammed earth is related to water content, particle size distribution, cement content, curing method and placement time. The compressive strength of the specimen increased with time accumulation, but the strength of the specimen under outdoor curing for 28 days decreased significantly. The greater the cement content, the greater the compressive strength, and the strength of indoor curing specimen is greater than that of outdoor curing specimen. The apparent durability of the specimen without gravel is good, but the appearance of the specimen with high grave content is poor.

**Keywords:** rammed soil mixed with cement; durability; compressive strength; seasonal conditions; natural climatic conditions

*基金项目：国家自然科学基金项目（42007257）；陕西省自然科学基础研究计划项目（2022JQ-562）；西安市科技计划项目（2022JH-RYFW-0125）；渭南市重点研发计划（2023ZDYFJH-490）。

作者简介：宋逸飞（1999—），男，硕士研究生，研究方向：砌体结构和生土建筑。

收稿日期：2023-05-09

材料科学

## 0 引言

生土是最古老、最基础、分布最广泛的自然材料，而生土建筑顾名思义就是指以生土作为主要材料建造的建筑，生土建筑的建设可以减少对生态环境的破坏，有利于社会的可持续发展，是助力“碳达峰、碳中和”的有效手段。生土建筑包括夯土建筑、土坯建筑、掩土建筑等多种形式。其中，夯土建筑是我国古代建筑技术史上的重要成就之一。

目前国内外对夯土已有大量的研究，水碧纹等[1]利用矿物成分 XRD 分析、扫描电镜和元素分析等方法，对辽上京遗址城墙夯土进行了成分分析与力学性能分析；蒲天彪[2]以明长城中湟中、大通和门源段的夯土为例，从夯土的物理力学特性、水理特性等对青海境内的明长城开展了一系列研究；王毅红等[3]比较系统地分析了纯土、灰土、草土、砌体、土坯墙以及夯土墙的物化特性和力学性能，提出了改良生土材料力学性能与加强生土建筑抗震性能具体方法。目前，伴随着全球经济的不断发展，各种能源被大量消耗，人们开始注重对绿色夯土建筑的研究。Ciancio 等[4]研究了石灰固化夯土最佳石灰掺量与试件抗压强度、刚度之间关系，对比干湿两种养护条件对石灰固化夯土抗压强度的影响，并提出确定石灰最佳掺量的方法；Kariyawasam 等[5]建立了水泥固化夯土的材料强度、耐久性与实际应用之间联系，研究发现，6% 红壤土足以提供夯筑料所需的压、弯曲强度，进一步对湿润状态下夯土的强度、抵抗侵蚀能力及干缩性能进行研究，确定水泥固化对夯土耐久性的有利影响；Bui 等[6]将固化和未固化夯土墙置于潮湿自然环境 20 年，墙体没有发生明显严重破坏，添加 5% 石灰墙腐蚀厚度达到2 mm（墙厚的 0.5%），未固化墙腐蚀厚度达到6.4 mm（墙厚的1.6%），基于此，提出不添加固化剂夯土墙的安全使用时间可以达到 60 年。通过对国内外改性夯土试件的形状和养护条件研究的统计[7-10]，通常在材料经过 28 d 养护后进行破坏性试验。但是，掺水泥的改性夯土试件随时间推演抗压强度仍在变化中。此外，用现有标准养护试件似乎是不现实的，因为建筑工程不可能长时间处于标准养护环境中。

综上所述，为进一步提高夯土的力学性能而对其进行改性研究。通过在夯土中添加水泥对其进行改性，研究不同粒径和水泥含量的改性夯土力学性能，分析材料耐久性，探究材料强度在自然条件下随时间的性能变化，为夯土材料改性研究和工程应用提供参考。

## 1 试验材料及方法

### 1.1 试验材料

依据粒径和水泥的添加量不同，共制备 8 种试件。试验采用秦岭牌硅酸盐水泥（强度 42.5 MPa）作为改性材料；土样为西安市长安区的黄土，土壤混合物粒径级配曲线如图 1 所示。为保证试件耐久性和足够的强度，改性试验的设计见表 1。根据 GB/T 50123—2019《土工实验方法标准》，测得土样塑限含水率为 14%，液限含水率为 24%，采用击实法测定土样最优含水率 $\omega$ = 19.08%，最大干密度 $\rho_d$ = 2.03 g/cm$^3$ 制作试件。

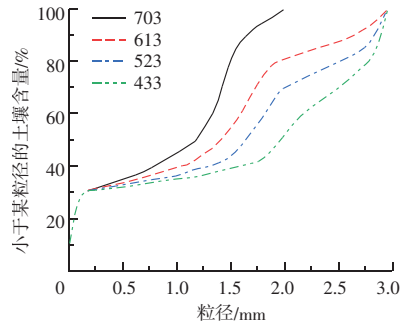



图 1 土壤混合物的粒径级配曲线

Fig. 1 Grain size gradation curve of the soil mixture

表 1 试件制作配合比

Table 1 Specimen making mix ratio /%

| 试件编号 | 土壤混合物 | | | 水泥掺量 | 含水量 |
|---|---|---|---|---|---|
| | 砂 | 砾石 | 黄土 | | |
| 703-6 | 70 | | 30 | 6 | 10 |
| 613-6 | 60 | 10 | 30 | 6 | 10 |
| 523-6 | 50 | 20 | 30 | 6 | 9 |
| 433-6 | 40 | 30 | 30 | 6 | 9 |
| 703-9 | 70 | | 30 | 9 | 10 |
| 613-9 | 60 | 10 | 30 | 9 | 10 |
| 523-9 | 50 | 20 | 30 | 9 | 9 |
| 433-9 | 40 | 30 | 30 | 9 | 9 |

注：613-6 表示由 60% 的砂、10% 的砾石、30% 的黄土组成，在混合料中加入 6% 的硅酸盐水泥。

### 1.2 试验步骤

#### 1.2.1 试件制备

试件制备与建筑现场从压实土上安装墙壁时使用的方法类似，用 6.5 kg 手动夯机压实承重夯土墙，夯

锤从 30 cm 的高度落下，将 200 mm×300 mm×250 mm 的大试件压缩成约 150 mm 的试件，然后从矩形试件上切割一个直径与高均为 100 mm 的圆柱形试件。制作完成后，将试件保持成型，用箔纸包裹 24 h，然后脱模。8 种试件每种各制备 10 个。

**1.2.2**　养护条件

在研究建筑材料力学性能和耐久性时，养护条件是一个重要影响因素。室外养护试件条件见表 2。试验地点位于陕西省西安市长安区，试件保存时间从 2014 年中至 2019 年中。陕西关中的气候为暖温带大陆性季风气候。

**表 2　自然养护条件下的天气记录**

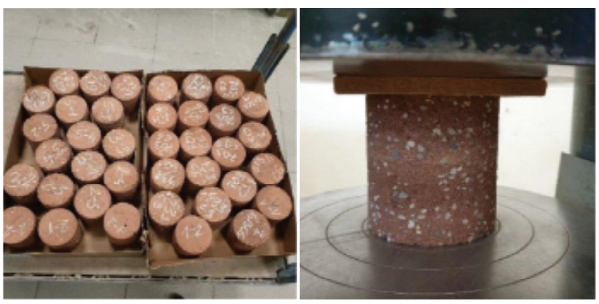
**Table 2　Weather records under natural conservation conditions**

| 年份 | 平均风速/（km/h） | 平均温度/℃ | 平均相对的湿度/% | 降水/mm | 平均温度低于 0 的天数/d |
|---|---|---|---|---|---|
| 2014 | 3.22 | 9.87 | 76.22 | 251.30 | 41 |
| 2015 | 3.51 | 10.39 | 71.79 | 172.00 | 30 |
| 2016 | 3.41 | 9.84 | 75.15 | 277.90 | 35 |
| 2017 | 3.53 | 9.45 | 77.51 | 339.80 | 42 |
| 2018 | 3.42 | 10.51 | 72.97 | 235.20 | 61 |
| 2019 | 3.58 | 10.93 | 72.07 | 390.20 | 28 |
| 平均 | 3.45 | 10.17 | 74.29 | 277.73 | 39.50 |

在试件养护期间，墙板被霜冻约 120 d，平均日变化温度为 10.16 ℃，极值为 39.3 和 −5.6 ℃。平均风速为 3.45 km/h，在自然光下加速试件表面的干燥。同时，将相同数量的墙板储存在室内恒温为 20 ℃、相对湿度为 50% 的条件下。试件排列在防水箔上，一面墙朝南，没有障碍物，试件之间的间隔约为 10 cm。

**1.3**　抗压强度试验

荷载以 0.5 MPa/s 的速率连续施加，破坏通常在 10 MPa 内。由于试件在切割后并不完全光滑，所以在试件和抗压强度试验机的表面之间使用软纤维板垫圈，如图 2 所示。



（a）成型试件　　（b）压缩试件

**图 2　抗压强度试验**

**Fig. 2　Compressive strength test**

## 2　试验结果分析

**2.1**　抗压强度试验的破坏现象

加载的初始阶段，试件表面并未立即产生裂缝；随着荷载增加至峰值荷载的 40%~60% 时，试件角部开裂并沿裂缝方向发展，试件并没有立即发生破坏；随着试验继续加载至峰值荷载，试件表面出现较多竖向贯穿裂缝，并且试件中部表面发生胀裂，部分表皮生土有脱落的现象。当荷载继续增大，裂缝继续发展，直至试件完全破坏，荷载急速下降，丧失承载力，破坏形态表现为典型“沙漏”型。

**2.2**　抗压强度试验结果

试件的抗压强度如图 3 所示。703 试件（由 70% 的砂和 30% 的黄土组成），当水泥掺量为 9% 时，室内、室外不同养护条件下的抗压强度分别为 9.56、9.03 MPa，水泥掺量为 6% 时的抗压强度分别为 8.14、6.74 MPa；在室内、室外不同养护条件下，水泥掺量高的试件抗压强度均增大，室内养护的增大了 1.42 MPa，室外养护的增大了 2.29 MPa。613 试件（由 60% 的砂、10% 的砾石、30% 的黄土组成），当水泥掺量为 9% 时，室内、室外不同养护条件下的抗压强度分别为 10.93、9.06 MPa，水泥掺量为 6% 时的抗压强度分别为 10.11、6.97 MPa；在室内、室外不同养护条件下，水泥掺量高的试件抗压强度均增大，室内养护的增大了 0.82 MPa，室外养护的增大了 2.09 MPa。523 试件（由 50% 的砂、20% 的砾石、30% 的黄土组成），当水泥掺量为 9% 时，室内、室外不同养护条件下的抗压强度分别为 11.13、9.45 MPa，水泥掺量为 6% 时的抗压强度分别为 8.50、7.18 MPa；在室内、室外不同养护条件下，水泥掺量高的试件抗压强度均增大，室内养护的增大了 2.63 MPa，室外养护的增大了 2.27 MPa。433 试件（由 40% 的砂、30% 的砾石、30% 的黄土组成），当水泥掺量为 9% 时，室内、室外不同养护条件下的抗压强度分别为 11.60、9.10 MPa，水泥掺量为 6% 时的抗压强度分别为 9.50、8.04 MPa，在室内、室外不同养护条件下，水泥掺量高的试件抗压强度均增大，室内养护的增大了 2.10 MPa，室外养护的增大了 1.06 MPa。

在室内养护条件下，水泥掺量为 9% 的试件，

材料科学

433 试件抗压强度最大，为 11.60 MPa；水泥掺量为 6% 的试件，613 试件抗压强度最大，为 10.11 MPa。在室外养护条件下，水泥掺量为 9% 的试件，523 试件抗压强度最大，为 9.45 MPa；水泥掺量为 6% 的试件，433 试件抗压强度最大，为 8.04 MPa。

综上所述，水泥掺量越高，试件抗压强度就越大，在室内养护的试件比在室外养护的试件抗压强度大。分析其原因是因为水泥掺量高，使得胶凝材料间的黏结性好，水化反应强，进而导致试件的抗压强度变大；而处于不同养护条件下的试件，由于室内的温度、湿度较为稳定，对试件的影响较小，故在室内养护的试件抗压强度高于室外养护的试件。

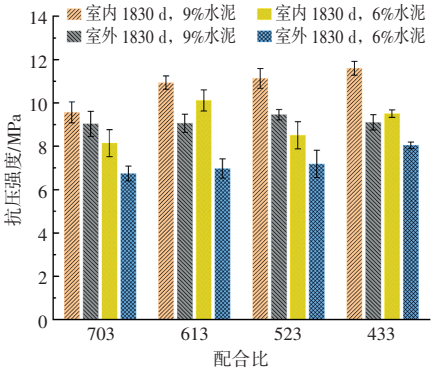



**图 3 不同配合比试件抗压强度**

**Fig. 3 Compressive strength of specimens with different mix ratios**

### 2.3 表观耐久性量化分析

表观评分室外养护试件分为五个等级。根据 10 位专家对表观可见的缺陷试件外层的均匀性、松散颗粒程度、裂纹和颜色差异及材料的均匀性量化评定加权平均，得到掺水泥改性夯土试件的表观量化评估结果，见表 3。

在混合物中不添加砾石的试件得分最高。水泥掺量分别为 6% 和 9% 的墙板均为光滑、单色、均匀。试件 703-6 的裂纹数量最小。砾石掺量最高的试件表观特性最差，这些试件的外层不均匀，有可见的层和变色。由 613 和 523 试件在视觉方面差异很小，这些混合物没有光滑纹理、没有色差。703 试件外观优良，骨料和水泥掺量与表观参数之间存在相关性。水泥掺量较高试件通常具有较好的表观性能。5 年后，这些试件与养护在室内的试件没有显著差异。

**表 3 表观评分结果**

**Table 3 Apparent score**

| 试件编号 | 表观描述 | 核心内部描述 | 表观评分 |
|---|---|---|---|
| 703-9 | 光滑，无色差，无可见颗粒，均匀 | 均质的 | 5 |
| 613-9 | 光滑，有色差，可见的水印，可见的图层，见少量细骨料 | 可见颗粒少，边缘稍不均匀，可见层 | 4 |
| 523-9 | 可见层，色差小，水印少，强度大 | 有可见颗粒，边缘不均匀，可见层 | 4 |
| 433-9 | 强度大，色差小，可见层，不均匀，有可见颗粒 | 有可见颗粒，表面松散，边缘不均匀 | 3 |
| 703-6 | 光滑，无色差，无可见颗粒，均匀，边缘无裂缝 | 均质的 | 5 |
| 613-6 | 可见层，色差小，水印少，有可见颗粒，边缘有多处裂缝 | 可见颗粒少，边缘稍不均匀，可见层 | 4 |
| 523-6 | 可见层，色差小，水印少，有可见颗粒，边缘有多处裂缝，见少量细骨料 | 有可见颗粒，边缘不均匀，可见层 | 4 |
| 433-6 | 强度大，色差小，可见多层数，不均匀，有可见的侵蚀，多重边缘有裂缝，见少量细骨料 | 有可见颗粒，表面松散，边缘不均匀 | 2 |

根据混合物类型和水泥掺量的不同，室外养护试件抗压强度平均值在 6.74～9.45 MPa 之间。掺入 6% 和 9% 的水泥混合物抗压强度差异是很明显的，约为 1.0～2.5 MPa。掺入 9% 水泥室内养护的试件平均抗压强度较高，达到 11.6 MPa，明显低于已有类似研究，是因为不同气候条件（特别是少量降雨）、试件形状和试件制作方法导致的。结果表明，不同固化和成熟条件会引起夯土力学性能的巨大变化。

### 2.4 结果分析

不同混合物含水泥量的微小变化会导致抗压强度的显著差异，不同配合比和养护方法对掺水泥的改性夯土材料影响显著。夯土的普遍应用需要对现场材料的各种物理力学性能进行深入研究，并受到各种气候条件的影响。以往的研究通常局限于没有严冬的地方，抗冻性不影响材料的适用性，或仅限于在极端情况下。在试验条件下测试水泥改性夯土的基本力学性能和表观耐久性，在暴露于自然天气条件下 5 年后，掺水泥的改性夯土试件保持了良好的表观耐久性和力学特征。

研究中试件抗压强度结果因混合类型、水泥掺量和养护条件不同而有些许差异。通过比较 5 年的室

内和室外养护 703、613、523、433 不同水泥掺量的改性夯土材料，试件在室内养护 28 d 后抗压强度持续增加，室外养护的抗压强度显著降低，抗压强度值低于室内 28 d 后试件的相应结果。

室外养护的试件没有使用任何保护覆盖面，表观耐久性良好。所有试件能肉眼可见的缺陷较小，很少有裂缝、颗粒松散和不均匀的情况，保持了与室内养护试件相似的表观特性。只有抗压强度水平低于在室内养护的相应试件。室外养护的条件基本与室内养护的条件相同，表明试件的使用寿命缩短是由于材料的干燥和收缩等内部因素造成的。可能是由于水泥的水化作用导致，试件的裂纹、孔隙不显著。

## 3　结论

分别研究室内和室外养护条件下保存了 5 年的试件，通过抗压强度试验和耐久性量化评定，分析表观耐久性和力学特性，得到以下结论：

（1）掺入水泥的改性夯土材料抗压强度取决于混合物含水率、粒径分布、水泥掺量、养护方法和放置年限等因素。其中水泥掺量越大，抗压强度就越大，室内养护的试件比室外养护的抗压强度大。

（2）对室外养护条件下试件进行表观耐久性分析，发现不添加砾石的试件外观优良，具有较好的表观性能，而砾石掺量大于 20% 的试件外层不均匀，表面松散，裂缝多，表观性能最差。

（3）改性夯土试件在暖温带大陆性季风气候的养护条件下，试件的表观特性没有明显的变化，但抗压强度显著下降，养护条件、混合物配比以及水泥掺量对试件抗压强度影响显著。

## 参　考　文　献


[1] 水碧纹，张韵，殷志媛. 辽上京遗址城墙夯土成分及性能研究[J]. 内蒙古农业大学学报（自然 科学版），2016，37（2）：40-46.

[2] 蒲天彪. 青海明长城夯土特性研究[J]. 青海民族大学学报（社会科学版），2011，37（4）：92-94.

[3] 王毅红，苏东君. 生土结构房屋的承重夯土墙体抗震性能实验研究[J]. 西安建筑科技大学学 报，2007，39（4）：451-456.

[4] CIANCIO D，BECKETT C T S，CARRARO J A H. Optimum lime content identification for lime - stabilised rammed earth [J]. Construction and Building Materials，2014，53：59-65.

[5] KARIYAWASAM K K G K D，JAYASINGHE C. Cement stabilized rammed earth as a sustainable construction material [J]. Construction and Building Materials，2016，105：519-527.

[6] BUI Q B，MOREL J C，VENKATARAMA Reddy B V. Durability of rammed earth walls exposed for 20 years to natural weathering [J]. Building and Environment，2009，44：912-919.

[7] ARRIGONI A，BECKETT C，CIANCIO D，DOTELLI G. Life cycle analysis of environmental impact vs. durability of stabilised rammed earth [J]. Constr Build Mater，2017，142：128-136.

[8] AZEVEDO A R G，AMIN M. HADZIMA - NYARKO M，et al. Possibilities for the application of agro - industrial wastes in cementitious materials：A brief review of the Brazilian perspective [J]. Clean Mater，2022，3：100040.

[9] KHAN A，GUPTA R，GARG M. Determining material characteristics of " Rammed Earth" using non - destructive test methods for structural design [J]. Structures，2019，20：399-410.

[10] 李子奇，李蒙恩. 水泥聚丙烯纤维改性夯土墙体抗震性能研究[J]. 新型建筑材料，2022，49（7）：82-87.