

DOI: 10.11779/CJGE2015S1012

黏土-石膏胶结材料的强度试验

周承京, 王红鑫, 陈 群*, 何昌荣

(四川大学水利水电学院水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065)

摘 要: 为研究黏土-石膏胶结材料的强度特性, 在 12~336 h 的养护时间内, 对 4 种不同配比的黏土-石膏胶结材料进行了单轴无侧限抗压强度试验, 测得不同配比胶结材料的初凝时间以及无侧限抗压强度随养护时间的变化规律。同时, 在黏土石膏混合料中掺入 2~5 mm 的砾石进行单轴无侧限抗压强度试验以探讨黏土-石膏胶结材料与砾石的联合作用。试验结果表明, 黏土-石膏胶结试样的初凝时间较短, 不超过 15 min。试样的单轴无侧限抗压强度随时间的变化过程可分为前、中、后 3 个时期, 分别对应强度略微减小、显著增长和趋于稳定 3 个阶段。掺砾后试样的前期强度未出现减小现象, 中、后期强度随时间的变化规律与未掺砾试样相同, 但强度显著增长较早且中期持续时间较长。掺砾试样的后期稳定强度远大于未掺砾试样的强度。

关键词: 黏土-石膏胶结材料; 单轴无侧限抗压强度试验; 无侧限抗压强度; 养护时间; 配合比

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)S1-0056-05

作者简介: 周承京(1991-), 男, 硕士研究生, 主要从事岩土工程研究。E-mail: nmgzcj1991@163.com。

Strength tests on clay-gypsum cementation materials

ZHOU Cheng-jing, WANG Hong-xin, CHEN Qun, HE Chang-rong

(State Key Lab of Hydraulics and Mountain River Engineering, School of Hydraulic and Hydropower Engineering, Sichuan University,

Chengdu 610065, China)

Abstract: The uniaxial unconfined compressive strength tests are performed to investigate the strength properties of clay-gypsum cementation materials after curing of 12 to 336 hours. The initial setting time and change processes of uniaxial unconfined compressive strength with curing time are obtained. Meanwhile, the uniaxial unconfined compressive strength tests on clay-gypsum cementation materials mixed with gravels with diameter of 2 to 5 mm are conducted to study the effect of gravel combination. The test results show that the initial setting time is short and less than 15 minutes. The change in the uniaxial unconfined compressive strength of the samples with curing time can be divided into three stages: early, medium and late stages, that is, strength change, obvious increase and stabilization stages. The early strength of the sample with gravels does not decrease and the change process of the medium and late strength is similar to that of the sample without gravels. However, its strength obviously increases earlier and medium stage is longer. The late stable strength of the sample with gravels is much larger than that of the sample without gravels.

Key words: clay-gypsum cementation material; uniaxial unconfined compressive strength test; unconfined compressive strength; curing time; mix proportion

0 引 言

随着科学技术的快速发展以及胶结技术的广泛应用, 胶结材料也得到了较大的发展, 其主要作用是提高松散土层的强度及整体性、减小渗透性以及降低地基土的压缩性^[1-2], 广泛应用于采矿工程^[3]、水利水电工程^[4]以及地基处理^[5-6]等各个领域。

目前, 主要的胶结原材料可以大致分为 3 大类: 黏土、水泥以及化学材料。针对于以上材料, 不少学者已经进行了研究。例如, 张晋霞等^[7]以矿渣、铁尾矿、NaOH 以及水玻璃为原材料进行了矿山胶结充填

材料的研究, 蒋明镜等^[8]以环氧树脂和水泥为原材料对微观粒间胶结强度进行了研究, 高洁等^[9]对 1:1:6 的黏土-水泥-磷石膏胶结充填材料进行了强度试验研究。以上研究大部分都涉及到了水泥和化学材料, 虽然均可以满足各自工程的实际要求, 但是对于一些需要超前支护的临时工程, 后期要进行施工, 而水泥和化学胶结材料的强度较高, 临时支护后不便于开挖。使用黏土进行胶结, 可以很好地解决这一问题, 此外,

收稿日期: 2015-03-26

*通讯作者

黏土还具有价格低廉的特点。石膏凝结硬化极快, 在黏土中掺加石膏, 可以为实际工程节约时间。目前许多文献^[10-11]涉及到了黏土和石膏掺混的研究, 但是正如前文所述, 已有的混合料中还加入了水泥和化学材料, 就黏土和石膏单独掺混的试验研究很少有文献报道。因此, 本文针对黏土-石膏胶结材料的单轴无侧限抗压强度及初凝时间开展试验研究。

1 试验材料与试验方法

1.1 试验材料

研究采用材料主要为两种, 一种是黏土-石膏混合料, 另一种是掺砾石的黏土-石膏混合料。黏土是广泛存在的自然资源, 主要由高岭石、蒙脱石及伊利石 3 种矿物组成, 具有来源广、价格低廉的特点^[12], 经常被用做黏结剂和护壁材料等。石膏是广泛使用的建筑材料, 其主要成分为 $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$, 遇水后反应生成二水石膏, 并迅速凝结硬化^[13]。将石膏作为胶结填充材料的一部分, 可以充分利用其初凝时间短的特点。

1.2 试验方法及方案

试验在常温条件下, 将石膏、黏土、水分别按照 1:1:2, 1:1:1.5, 1.5:1:2 以及 1:1.5:1.5 的质量比制成浆体, 为保证其均匀性, 边搅拌边注入金属模具, 用刮刀把超出模具顶部的浆体刮平, 凝固成型后脱模。制样过程中记录试样的初凝时间, 即自浆体注入模具起至完全失去可塑性并产生强度的时间。为减小试验结果的离散性, 对同一配比的试样进行 3 组重复试验。根据《土工试验规程 SL237—1999》^[14], 试样直径为 3.5~4.0 cm, 试样高度应为直径的 2~2.5 倍, 每分钟轴向应变控制在 1%~3%。试验研究采用的试样直径为 3.91 cm, 高度为 8 cm (如图 1 所示)。试样制备完成后在常温下进行养护, 到规定龄期, 利用 CBR-1 型承载比试验仪进行单轴无侧限抗压强度测试, 采用轴心受压形式, 通过测定量力环的变形量换算求得试样的单轴无侧限抗压强度, 仪器底座上升速率为 1 mm/min。



图 1 黏土-石膏胶结试样
Fig. 1 Cementation sample of clay-gypsum cementation

最后, 为研究浆体与砾石胶结试样特性, 将 2~5 mm 的砾石与 1:1:2 的浆体均匀拌和, 制成掺浆体 40% 的砾石与黏土-石膏浆液混合料试样。相比于未掺砾试样, 掺砾试样离散性更大。为得到较为准确的结果, 重复进行 5 组试验, 其试验方法与未掺砾试样一致。

2 试验结果与分析

2.1 胶结材料重复试验结果

本次研究对每一配比的浆体试样进行了 3 组重复试验。选取石膏、黏土及水的配比为 1:1:1.5 的试样组进行分析, 表 1 是无侧限抗压强度 3 组重复试验结果, 图 2 是 3 组重复试验所得单轴无侧限抗压强度随养护时间的变化曲线。

表 1 无侧限抗压强度的重复试验结果

Table 1 Repetition test results of unconfined compressive strength

编号	不同养护时间的无侧限抗压强度/kPa					
	0.5 d	1 d	2 d	3 d	7 d	14 d
#1	351.2	301.5	326.4	386.7	1731.1	1578.6
#2	372.5	283.8	283.8	376.0	1528.9	1610.5
#3	361.8	276.7	290.9	351.2	1674.4	1699.2
平均值	361.8	287.3	300.4	371.3	1644.8	1629.5
最大偏差	2.9%	4.9%	8.7%	5.4%	7.0%	4.3%

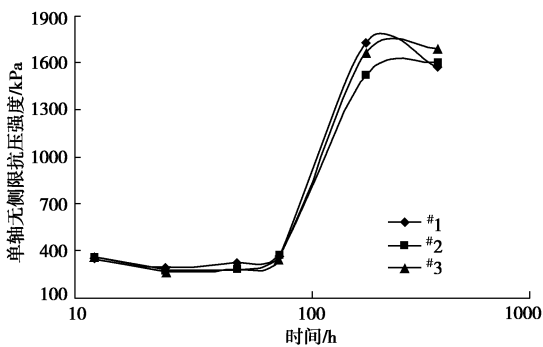


图 2 重复试验中单轴无侧限抗压强度随养护时间的变化
Fig. 2 Change in uniaxial unconfined compressive strength with curing time in repetition tests

由表 1 及图 2 可知, 3 组试验结果具有一定的离散性, 但是与平均值的最大偏差不超过 10%, 因此在规律分析过程中, 可以取平均值进行分析。与 1:1:1.5 的试样组类似, 其他各组试验的重复试验结果也相差不大。

2.2 不同配比胶结材料试验结果及分析

按照 2.2 中的方法测取黏土-石膏胶结试样无侧限抗压强度和初凝时间, 如表 2 所示。从表中可以看出, 本文研究的黏土-石膏胶结充填材料在 15 min 以内即可初凝。在 1:1:1.5 的浆液中加水至配比为 1:1:

2, 初凝时间会由 10.5 min 增加至 14 min; 在 1 : 1 : 2 的浆液中加入石膏, 使得混合比为 1.5 : 1 : 2, 初凝时间由 14 min 减小至 10 min; 在 1 : 1 : 1.5 的浆液中加入黏土至混合比为 1 : 1.5 : 1.5, 初凝时间由 10.5 min 减小至 9.5 min。通过以上分析可知, 水的含量增加后, 初凝时间会增大, 而石膏和黏土的加入会减小初凝时间。

表 2 试样初凝时间及无侧限抗压强度试验结果
Table 2 Test results of initial setting time and unconfined compressive strength of samples

石膏-黏土- 水混合比	初凝 时间 /min	不同养护时间的无侧限抗压强度/kPa					
		0.5 d	1 d	2 d	3 d	7 d	14 d
1 : 1 : 2	14.0	246.0	231.8	217.6	269.6	1092.6	1087.9
1 : 1 : 1.5	10.5	361.8	287.3	300.4	371.3	1644.8	1629.5
1.5 : 1 : 2	10.0	705.9	519.1	543.9	612.5	2427.6	2329.5
1 : 1.5 : 1.5	9.5	572.3	378.4	470.6	571.1	2166.3	2195.9

图 3 是不同配比材料的单轴无侧限抗压强度随养护时间变化的关系曲线。虽然 4 条曲线的配比不同, 但是其强度变化的规律都相同: 随着养护时间的增长, 单轴无侧限抗压强度先是小幅度减小, 约 60 h 后强度逐渐上升, 最后趋于稳定。依据强度随时间增长曲线的形状, 可将强度随时间的变化过程分为前、中、后 3 个时期, 即强度微小变化、显著增长和趋于稳定 3 个阶段。文献[15]中对 α 半水石膏的强度发展过程进行了研究, 其规律与黏土-石膏胶结充填材料的规律大致相同。主要原因是在试样制备完成初期, 随着水化反应的进行, 浆体中逐渐形成结晶结构网, 胶结材料具有了一定的强度; 当结晶结构网密实到一定程度后, 随着水化反应进一步进行, 晶体之间相互挤压, 产生内应力, 最终使得结构网破坏, 材料强度下降; 约 60 h 后随着材料中水分的蒸发, 晶体表面的水膜厚度变小, 黏土-石膏胶结材料结构逐渐密实, 强度随着养护时间快速发展; 最后, 虽然强度还有所变化, 但是已经基本趋于稳定。

对比图 3 中配比为 1 : 1 : 2 和 1 : 1 : 1.5 两条曲线, 虽然两者石膏和黏土的比例是相同的, 但是在 1 : 1 : 2 这一配比中, 水的比例相对较大, 因此其强度较小; 而 1 : 1 : 1.5 和 1 : 1.5 : 1.5 两种配比的石膏和水的比例是一样的, 但是 1 : 1.5 : 1.5 配比中黏土含量较多, 导致其强度在 1 : 1 : 1.5 配比试样强度之上; 在 1 : 1 : 2 和 1.5 : 1 : 2 两种配比中, 黏土和水的比例是一样的, 但是 1.5 : 1 : 2 配比的试样中石膏含量较多, 其强度也较大。由此可知, 水的含量增大, 材

料的强度会减小, 而石膏或者黏土的含量增大时, 材料的强度会增大。

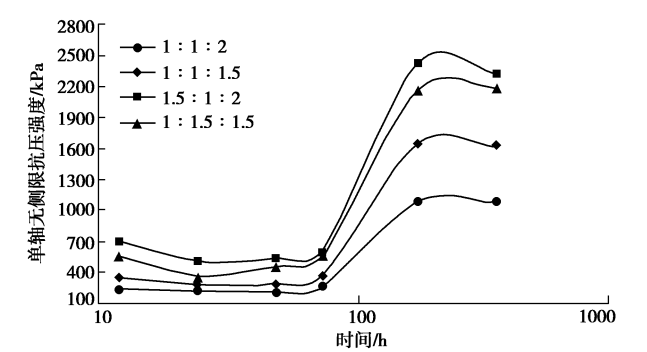


图 3 不同配比试样的无侧限抗压强度与养护时间的关系
Fig. 3 Relationship between unconfined compressive strength and curing time for samples with different proportions

2.3 掺砾试样的试验结果及分析

为了进一步了解黏土-石膏胶结材料与砾石的胶结效果, 而且考虑到此次试验为手工拌合, 含水率较大的浆体在拌合过程中容易搅动, 可以更好地与砾石混合, 因此选取 1 : 1 : 2 的浆体与粒径为 2~5 mm 的砾石以 4 : 6 的质量比进行拌合, 制成掺砾胶结试样。对其进行 5 组重复试验, 所得单轴无侧限抗压强度随养护时间的变化如图 4 所示。

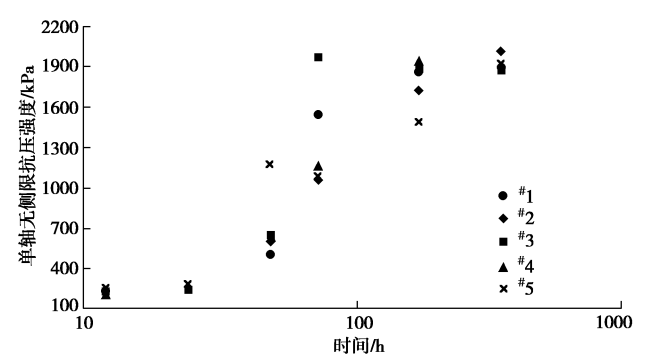


图 4 重复试验中掺砾试样单轴无侧限抗压强度随养护时间的变化
Fig. 4 Change in uniaxial unconfined compressive strength with curing time in repetition tests for cemented gravel samples

Fig. 4 Change in uniaxial unconfined compressive strength with curing time in repetition tests for cemented gravel samples

从图 4 可以看出, 5 组重复试验中有的试验结果偏差较大, 为了不影响最终结果的准确性, 将个别试验点剔除, 保证未被剔除各点与剩余点平均值的偏差不超过 10%, 剔除后剩余点的平均值如表 3 中所示。

表 3 掺砾试样的无侧限抗压强度

Table 3 Values of unconfined compressive strength of cemented gravel samples						
养护时间/d	0.5	1	2	3	7	14
单轴无侧限抗压强度/kPa	234.8	260.4	642.1	1104.4	1858.0	1941.2

为了直观表现胶结材料掺入砾石后的效果, 将表 2 中 1:1:2 配比的强度试验结果和表 3 中的试验结果绘制于图 5 中。由图 5 可知, 掺入砾石后试样的强度随时间的变化过程与未掺砾石的试样相同, 也可分为前、中、后 3 个阶段。但掺入砾石后, 强度随养护时间的增长呈单调增大的变化趋势, 前期未出现强度减小的现象, 这与未掺砾试样不同。其主要原因是掺入砾石后, 砾石起到骨架作用, 虽然内部的结晶结构网仍然可能破坏, 但是对材料的强度影响不大, 因此在前期不会出现强度降低的现象。掺砾试样的强度显著增长的开始时间早于未掺砾试样, 其强度增长中期较长, 但两者强度最终趋近稳定的时间差异不大。掺砾试样的后期强度接近未掺砾试样强度的 2 倍。可见, 掺砾试样的后期强度大幅度提高。

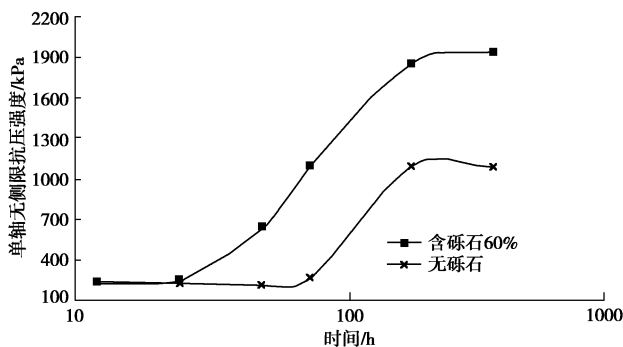


图 5 掺砾前后单轴无侧限抗压强度与养护时间关系

Fig. 5 Relationship between uniaxial unconfined compressive strength and curing time under different gravel contents

3 结 论

(1) 通过研究 4 种不同配比的黏土-石膏胶结材料的单轴无侧限抗压强度, 得知其随养护时间的增长呈现先略微减小、然后增大、最后趋于稳定的规律, 因此可将强度随时间的变化过程分为前、中、后 3 个时期, 即强度微小变化、显著增长和趋于稳定 3 个阶段。由于材料配比的不同, 导致胶结材料的单轴无侧限抗压强度和初凝时间有所差异。石膏和黏土含量增加, 胶结材料的强度增大, 初凝时间减短, 而水的比例增加时, 强度会减小, 初凝时间增长。

(2) 在胶结材料中加入 60% 的砾石后, 其单轴无侧限抗压强度随养护时间的增长先缓慢增长, 然后显著增长, 最后趋于稳定, 也可划分为前、中、后 3 个时期。在前期, 掺砾试样的强度缓慢增长, 不出现强度小幅度减小的现象; 掺砾试样的强度显著增长的开始时间早于未掺砾试样, 其强度增长中期较长; 掺砾试样的后期强度大幅度提高, 接近于未掺砾试样后期强度的 2 倍。

(3) 黏土-石膏胶结材料可以应用于地下工程、水利水电工程以及地基处理等领域, 特别是对于需要后续开挖的超前临时支护工程。文中虽然对掺砾石的情况进行了介绍, 但是仅针对一种粒径砾石和胶结剂添加量的情况进行了研究, 在以后的研究中应考虑不同粒径砾石和不同胶结剂添加量对强度的影响。

参考文献:

- [1] 王 杰, 杜嘉鸿. 注浆技术的发展与展望[J]. 沈阳建筑工程学院学报, 1997, 13(1): 59 - 64. (WANG Jie, DU Jia-hong. Developing and prospects of the grouting technology[J]. Journal of Shenyang Architectural and Civil Engineering Institute, 1997, 13(1): 59 - 64. (in Chinese))
- [2] 杜嘉鸿, 王 杰. 注浆技术的发展与展望[J]. 化工矿山技术, 1996, 25(4): 41 - 43, 47. (DU Jia-hong, WANG Jie. Developing and prospects of the grouting technology[J]. Chemical Mining Technology, 1996, 25(4): 41 - 43, 47. (in Chinese))
- [3] 祝丽萍, 倪 文, 张旭芳, 等. 赤泥-矿渣-水泥基全尾胶结充填料的性能与微观结构[J]. 北京科技大学学报, 2010, 32(7): 838 - 842. (ZHU Li-ping, NI Wen, ZHANG Xu-fang, et al. Performance and microstructure of cemented whole-tailings backfilling materials based on red mud, slag and cement[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2010, 32(7): 838 - 842. (in Chinese))
- [4] 张镜剑, 孙明权. 一种新坝型—超贫胶结材料坝[J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(3): 32 - 34. (ZHANG Jing-jian, SUN Ming-quan. Review of study on over lean cemented material dam[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007, 27(3): 32 - 34. (in Chinese))
- [5] 许朝阳, 张 莉. 微生物改良饱和粉土的探讨[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(1): 192 - 195. (XU Zhao-yang, ZHANG Li. Discussion of improving silt with microbes[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(1): 192 - 195. (in Chinese))
- [6] 邓 津, 王兰民, 吴志坚, 等. 黄土抗震陷变形的酸改性方法及其微观结构分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(12): 3624 - 3631. (DENG Jin, WANG Lan-min, WU Zhi-jian, et al. Acid-modified method for loess aseismic subsidence and its microstructure analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(12): 3624 - 3631. (in Chinese))
- [7] 张晋霞, 刘淑贤, 牛福生, 等. 矿渣尾矿制备矿山充填胶结材料工艺条件的研究[J]. 中国矿业, 2012, 21(8): 110 - 112. (ZHANG Jin-xia, LIU Shu-xian, NIU Fu-sheng, et al. Study on manufacture process and properties of tailings and

- slag based mine filling cementitious materials[J]. China Mining Magazine, 2012, **21**(8): 110 - 112. (in Chinese))
- [8] 蒋明镜, 周雅萍, 陈 贺. 不同胶结厚度下粒间胶结力学特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(5): 1264 - 1273. (JIANG Ming-jing, ZHOU Ya-ping, CHEN He. Experimental study of mechanical behaviors of bonded granules under different bond thicknesses[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(5): 1264 - 1273. (in Chinese))
- [9] 高 洁, 赵国彦. 粘土-水泥-磷石膏胶结充填技术试验研究[J]. 煤炭技术, 2012, **31**(3): 110 - 112. (GAO Jie, ZHAO Guo-yan. Testing research of clay-cement-phosphogypsum cementation filling technology[J]. Coal Technology, 2012, **31**(3): 110 - 112. (in Chinese))
- [10] 杨 松, 张慧乐, 孙颖霞, 等. 岩溶区基岩模拟材料的研制及应用[J]. 地下空间与工程学报, 2012, **8**(6): 1159 - 1167. (YANG Song, ZHANG Hui-le, SUN Ying-xia, et al. Research and development of bedrock similar material in karst area[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, **8**(6): 1159 - 1167. (in Chinese))
- [11] 陈乐求, 彭振斌, 徐力生, 等. 石膏矿采区充填加固技术的试验研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2009, **20**(4): 72 - 77. (CHEN Le-qiu, PENG Zhen-bin, XU Li-sheng, et al. Experimental study on the filling reinforcement techniques in gypsum mined-out area[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2009, **20**(4): 72 - 77. (in Chinese))
- [12] 李 俊, 黄 韵, 马晓燕. 粘土及改性黏土的应用进展[J]. 矿业研究与开发, 2003, **23**(5): 36 - 37, 54. (LI Jun, HUANG Yun, MA Xiao-yan. The advances on applications of clay and modified clay[J]. Mining Research and Development, 2003, **23**(5): 36 - 37, 54. (in Chinese))
- [13] 张光碧. 建筑材料[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006. (ZHANG Guang-bi. Construction material[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2006. (in Chinese))
- [14] SL237—1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999. (SL237—1999 Specification of soil test[S]. Beijing: China Water & Power Press, 1999. (in Chinese))
- [15] 张佳莉, 叶青青, 吴忠标, 等. 三聚氰胺减水剂对 α 半水石膏水硬化过程的影响[J]. 浙江大学学报(理学版), 2009, **36**(3): 318 - 322. (ZHANG Jia-li, YE Qing-qing, WU Zhong-biao, et al. Effects of sulfonated melamine formaldehyde on the setting of α -calcium sulfate hemihydrates[J]. Journal of Zhejiang University (Science Edition), 2009, **36**(3): 318 - 322. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)