

文章编号: 100226819(2001)0320028204

HEC 和 AAM 添加剂对提高黄土集流效率的试验研究

冯浩¹, 吴普特¹, 彭红涛², 雷廷武^{1,2}

(1. 西北农林科技大学, 中国科学院水利部水土保持研究所 国家节水灌溉杨凌工程技术研究中心, 杨凌 712100; 2 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

摘要: 基于西北地区黄土资源丰富、地形复杂、外源材料运输困难的实际状况, 提出将 HEC (High Strength and Water Stability Earth Consolidator) 和 AAM (Active Aluminate Mixture) 材料添加剂与黄土混掺, 以期提高其集流效率。通过室内人工降雨模拟试验, 探讨了典型黄土与 HEC 和 AAM 材料添加剂分别混掺后集流效率和性能的变化过程。同时, 对照其它几种集雨材料, 对不同雨强、雨量及坡度下的起流历时、集流效率和材料性能进行了比较。结果表明: 黄土与 HEC 和 AAM 添加剂混掺后形成的黄土复合集流材料具有较强的抗拉、抗压能力, 不同雨强和雨量等级范围均具有较高的集流效率 (> 78%), 已达到混凝土的集流效果, 其成本仅为混凝土的 1/3~1/2。

关键词: 集雨材料; 添加剂; HEC; AAM; 模拟试验

中图分类号: S277; S282 **文献标识码:** A

近年来, 西北地区集雨工程发展迅速, 集雨水窖已由 1985 年的 150 万眼发展到目前的 250 万眼, 水窖蓄水容量由 5 866 万 m³ 增加到 9 777 万 m³, 解决了近 300 万群众的生活用水问题, 同时为发展当地庭院经济、解决群众脱贫致富发挥了重要作用。

在集雨工程建设中, 集流材料的效率和性能是工程的关键技术。目前, 在西北地区集雨工程中集雨面处理通常使用混凝土、水泥石、三七灰土和原土夯实、塑料薄膜、玻璃丝油毡等方法。在这些集流材料中混凝土的集流效果最好, 在 70% 以上。三七灰土和原土夯实集流效果较差, 低于 30%。但在该地区由于缺乏石子、砂子等骨料, 再加上交通不便, 运输困难, 建造混凝土集雨面在经济上并不可行。水泥石是目前应用比较普遍的集流面处理材料, 但水泥石由于强度低, 特别是抗拉、抗裂强度低, 难以适应西北地区恶劣的气候条件, 在集雨工程中的应用范围也受到限制。

本文提出通过添加剂与黄土混掺以提高集流性能和效率的构思。通过筛选, 已初步确定出 HEC 和 AAM 两种成本较低、性能优良的集雨材料添加剂。

1 材料添加剂 HEC 和 AAM

HEC (High Strength and Water Stability Earth

Consolidator, 土壤固化剂) 是一种提高土壤强度和抗渗能力的固化剂。它是以工业废渣为主要原料, 与核心原料和其他组分复合磨细混匀而成的无熟料胶结材料。HEC 作为土壤固化剂, 加入土中后自身水化会复合产生超叠加效应, 使土颗粒表面紧密接触, 又能激发土粒中硅铝酸盐矿物的潜在活性, 使土颗粒表面形成牢固的多晶粘粒聚集体, 从而提高了土体的强度。由于它较强烈的固化作用, 致使固化后的土体抗渗强度相应提高。HEC 的特点是高强、耐水、适应性强, 可应用于各种骨料或填充料。

HEC 在我国公路建设上已经开始应用, 三峡和小浪底工程都有用 HEC 修建的路面, 用 HEC 固化粉煤灰为电厂修筑灰坝也已经成功。由于 HEC 是在常温条件下直接胶结其他材料主体的, 对工程材料和工程环境没有严格要求。所以在 HEC 施工技术要求中对骨料或其他掺合料选择性不严, 对拌合用水的水质也基本没有要求, 就地拌合后又有较大的强度和抗渗能力。

作为土壤固化剂 HEC 的固化或胶凝作用主要是针对土体颗粒的, 所以 HEC 固化粘性土体时采用土工方法, 将土粉碎, 按一定比例将 HEC 固化剂加入土料并混合均匀, 掺配一定水分后, 可击实或压实到一定容重。其加水量和击实容重, 均可按土工击实试验方法求取, 原西北水利科学研究所和清华大学水电工程系对 HEC 和不同掺料混合后的性能测试结果列于表 1。

收稿日期: 2001 03 25

冯浩, 助理研究员, 博士生, 陕西杨凌西农路 26 号 西北农林科技大学, 中国科学院水利部水土保持研究所, 712100

表 1 HEC 混掺黄土的试验结果

Table 1 Experiment results of loess mixed with HEC

材料	质量比例	击实最优含水率 ö%	击实最大干容重 öt · m ⁻³	含水率 ö%	干容重 öt · m ⁻³	元侧限抗压强度 öM Pa	渗透系数 öcm · s ⁻¹
HEC 黄土	1 6	19.0	1.67	18.8	1.67	3.50	2.38 × 10 ⁻⁹
HEC 黄土	1 8	19.2	1.65	18.6	1.65	2.56	2.07 × 10 ⁻⁹

AAM (Active Aluminates Mixture, 活性铝酸盐混合物) 是由活性铝酸盐和其它化学辅助原料组成的高性能水泥添加剂, AAM 可与玻璃纤维、水泥、土、水混组成性能优良的集流材料, 其作用原理是: 在水泥中掺入添加剂和一定量的玻璃纤维后, 随着水泥强度的增大, 水泥与纤维之间的粘结力也逐渐增大。这种粘结力主要由 2 部分组成: 因水泥土固结硬化收缩, 将纤维丝紧紧握固而产生界面间的磨擦力。纤维丝在配制成纤维水泥土过程中是随机分布的, 大部分纤维丝在土体中不呈直线状态, 与水泥土产生一定的机械咬合作用。当水泥土受到拉力, 在土体薄弱处出现裂缝, 在开裂瞬间, 裂缝截面处的水泥土不再承受拉力, 纤维丝受到的拉力突然增大, 由于水泥土与纤维丝间存在粘结力, 使得水泥土体裂缝的继续扩展受到约束, 从而增加了水泥土体的抗拉强度和韧性。

AAM 与水泥及土的混合比例为 1 : 10 : 20, 玻璃纤维的添加量为总量的 0.1%。AAM 抗拉强度试验表明, 一般水泥土抗拉强度为 0.115 MPa, 而添加 AAM 的水泥土抗拉强度为 0.159 MPa, 比水泥土提高了 38%。同时玻璃纤维对抵抗水泥土开裂有明显效果, 提高了水泥土的韧性。

2 试验设计

为了解 HEC 和 AAM 与武功黄土及陕北黄土混合后的性能和集流效果, 在中国科学院水土保持研究所国家重点实验室人工降雨大厅内布置了不同集流材料的人工模拟降雨试验。试验采用的集流槽小区面积有 3 m × 1 m、5 m × 1 m 二种, 设计了 2°、5°、10° 三个坡度。供试土样为研究区内两种典型黄土: 武功黄土和陕北黄土。雨强控制在 0.1、0.2、0.6、1.2 mm/min 共 4 个等级, 降雨历时控制为 30 ~ 60 min, 雨量控制在 5 ~ 80 mm。观测项目包括降雨量、起流时间、含沙量、集流量。

根据 HEC 与黄土混掺的土工试验结果, 考虑成本因素, 确定 HEC 与武功黄土、陕北黄土的质量混掺比例均为 1 : 8, 两种土样的颗粒组成见表 2,

HEC 由原西北水科所材料室提供。预先测定土样含水率, 然后按照武功黄土的最优含水率 20.8%, 陕北黄土的最优含水率 19.6%, 计算所需加入的水量。土样过 1 cm 筛, 混合拌匀后, 装入集流槽小区内, 分层夯实并用 HEC 抹面, 厚度 3 mm。保养 3 d 后, 即可开始试验。

表 2 武功黄土和陕北黄土颗粒组成

Table 2 Particle size distribution of Wugong loess and Shanbei loess

粒径 ömm	细砂粒	粗粉粒	中粉粒	细粉粒	粘粒	物理性粘粒	苏制土壤质地
	0.25~0.05	0.05~0.01	0.01~0.005	0.005~0.001	< 0.001	< 0.01	
武功黄土	3	45	11	12	29	53	重壤土
陕北黄土	24	51	5	6	14	25	轻壤土

AAM 由中国农业大学水利与土木工程学院提供。与 AAM 混合所用水泥为陕西扶风水泥厂生产的 425 号普通硅酸盐水泥, AAM 与水泥、土按照 1 : 10 : 20 的比例混合, 纤维的添加量为总量的 0.1%。本次试验设计的集流面厚度为 5 cm, 各种材料的实际用量分别为: AAM : 3 kg, 水泥: 30 kg, 土: 60 kg, 水: 20 kg。充分混合均匀后, 转入集流槽中, 收面, 盖塑料薄膜保养 14 d 后, 即可开始试验。

采用混凝土、塑料薄膜、玻璃丝油毡、武功黄土夯实集流面材料作为对照。混凝土按照 C14 标准配料拌合。塑料薄膜壁厚 0.06 mm, 油毡采用兰州生产的玻璃丝油毡。武功黄土夯实控制干容重为 1.6 t/m³。

3 试验结果分析

集流效率是指从一定面积的集雨面上所收集的雨量占降雨量的百分数。HEC 和 AAM 与黄土混掺的集流材料及黄土夯实下的人工降雨模拟实验结果见表 3。可以看到, 当控制雨强在 0.1 ~ 1.2 mm/min, 降雨历时在 30 ~ 60 min, 降雨量在 80 mm 以内的范围时, AAM 和 HEC 分别与武功黄土和陕北黄土混掺的集流材料显示出较高的集流效率, 均在 78% 以上, 且大多数 (占 77%) 在 80% 以上。雨强

和降雨量的变化对两种材料的集流效率并没有显著影响,在小雨强(0.2 mm/min)、小雨量(10 mm 以下)条件下与大雨强(0.6~1.2 mm/min)和大雨量(20~40 mm)条件下相比,两种混合材料的集流效率并没有明显的差别。

表 3 不同集流材料人工模拟降雨试验结果

Table 3 Experiment results of different rainwater catchments materials under the condition of rain simulated

集流材料	雨强 $\dot{q}_{mm} \cdot m \cdot in^{-1}$	降雨历时 \dot{q}_{in}	降雨量 \dot{q}_{mm}	起流历时 \dot{q}_s	集流量 \dot{q}_{mm}	集流效率 $\dot{q}_\%$
AAM+ 武功黄土	0.083	60	5.03	125	4.17	83.00
	0.164	60	9.84	67	8.49	86.25
	0.74	60	44.4	30	34.94	78.70
	1.225	30	36.75	20	30.86	83.96
AAM+ 陕北黄土	0.093	60	5.58	150	5.15	92.29
	0.201	60	11.28	110	9.73	86.25
	0.61	60	36.6	40	31.17	85.16
	1.29	60	77.4	30	60.44	78.09
HEC+ 武功黄土	0.179	60	10.95	81	9.90	90.42
	0.443	60	25.44	39	22.92	90.11
	0.641	60	38.46	33	37.00	96.21
	1.272	60	76.32	23	65.07	85.26
HEC+ 陕北黄土	0.188	60	11.33	100	9.70	85.63
	0.421	60	25.26	35	22.59	89.43
	0.68	60	40.8	33	35.80	87.75
	1.283	30	38.49	23	34.81	90.45
武功黄土 夯实 (对照)	0.211	43	8.92	927	2.60	29.13
	0.376	36	13.54	293	5.16	38.11
	0.644	30	19.28	87	15.32	79.45
	1.255	30	38.37	52	31.40	81.84

起流历时是指降雨开始后,集流槽出口处出现线状水流所需的时间(s)。试验结果显示,两种集流材料起流历时变化受雨强的影响较大,当雨强小于0.1 mm/min时,起流历时一般在120 s以上,随雨强增大,起流历时变小,当雨强增大到1.2 mm/min时,起流历时稳定在20 s左右。从图1产流过程观测结果来看,这两种集流材料在产流开始后集流量随降雨量呈线性增加趋势。

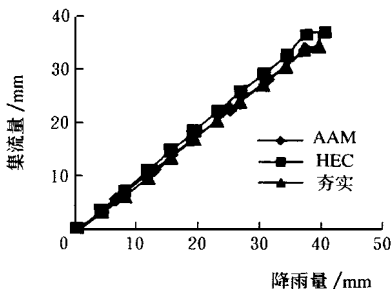


图 1 不同集流材料的集流过程

Fig 1 The process of runoff catchments with different runoff catchments materials

坡度试验结果表明:坡度的变化对两种混合材料集流效率和起流历时也没有显著的影响。9场降雨共设定了2°、5°、10°三个坡度,HEC和武功黄土混掺的集流材料在坡度为2°时集流效率为91.91%,5°时集流效率为89.61%,10°时集流效率为92.65%,不同坡度间集流效率之差仅为3%左右。HEC和武功黄土混掺的集流材料在2°时起流历时为115 s,10°时起流历时为111 s,因此,不同坡度间的起流历时差异并不显著。

室内试验条件下,集流面采用黄土夯实处理的集流效率最低,仅为55.64%,而且集流效率随雨强和雨量变化很大。小雨强(0.2 mm/min)、小雨量(10 mm 以下)时集流效率仅为30.62%,中雨强(0.4~0.6 mm/min)和中雨量(10~20 mm)时集流效率为79.45%,大雨强(0.6~1.2 mm/min)和大雨量(20~40 mm)时集流效率为81.84%。另外,对于黄土夯实处理的集流面,随雨强和雨量的增大,产沙量的变化十分显著,浑水含沙量可由7.32 g/L上升到199.03 g/L,增加了26倍。同时黄土夯实下的集流面也被径流冲刷出多条细沟,遭到严重损坏。而HEC和AAM与黄土的混合集流材料在试验过程中没有出现侵蚀和破坏现象。

HEC和AAM与黄土混掺的集流材料及其它几种集雨材料的集流效率和性能对比见表4。由表4可以看出,在室内人工模拟降雨条件下,雨强在0.1~1.2 mm/min范围内,HEC和AAM与黄土混掺制成的集雨面由于表面坚实、平整、光洁,入渗率和水流阻力小,均具有较高的集流效率,均在80%以上,超过混凝土、塑膜覆沙和夯实黄土的集流效率,HEC集流面的集流效率略高于AAM集流面。室内试验条件下,黄土夯实处理的集流效率最低,仅为55.64%。

同时,从表4的硬度和强度测试结果可知,HEC和AAM与黄土混合集流面的干容重分别达到了1.65和1.77 t/m³,AAM的硬度超过HEC。而且在抗压强度和抗拉强度方面AAM亦优于HEC。AAM性能优于HEC的一个很重要的原因是AAM的水泥用量是HEC的4倍,因此AAM集流面的价格比HEC贵近一倍。集流试验结束后,将几种材料的集流面在干燥环境中放置30 d,结果表明,HEC和AAM与黄土混掺集流面表层均没有出现裂口,而原土夯实处理的集流面出现了较大的裂缝。

表 4 模拟降雨条件下不同集雨材料的集流效率及性能试验结果

Table 3 Experiment results of the capacity and efficiency of different rainwater catchments materials under the condition of rain simulated

集流材料	集流效率 %	干容重 $\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$	抗压强度 MPa	抗拉强度 MPa	单位面积成本 $\text{元} \cdot \text{m}^{-2}$
武功黄土夯实	55.64	1.60	—	—	1.0
AAM + 武功黄土	80.76	1.77	3.22	0.161	7.0
AAM + 陕北黄土	86.35	1.77	3.20	0.159	7.0
HEC + 武功黄土	90.66	1.65	2.56	0.120	4.0
HEC + 陕北黄土	87.58	1.65	2.56	0.120	4.0
混凝土	69.95	2.40	4.00	0.300	15.0
塑膜覆沙	78.34	—	—	—	1.0
玻璃丝油毡	83.67	—	—	—	4.0

4 结 论

1) HEC 和 AAM 与黄土混掺的黄土复合集流材料在不同降雨强度和降雨量等级上均具有较高的集流效率, 平均集流效率达 78% 以上, 最大

92.29%。坡度对集流效率没有显著影响。

2) 采用黄土夯实处理的集流面, 集流效率随雨强、雨量的增大而提高, 但同时表面出现多条侵蚀细沟, 集流面严重受损, 一般不宜直接采用黄土夯实的处理方法。

3) 与其它几种集流材料相比, HEC 和 AAM 与黄土混掺后的集流面具有较高的抗压和抗拉强度, 干燥 30 d 后表面均没有裂口, 材料性能优良, 而成本仅为混凝土的 1/3~1/2。建议在西北地区集雨工程建设中广泛推广使用 HEC 和 AAM 与黄土混掺后形成的复合集流材料, 以期提高工程效益, 降低工程造价。

[参 考 文 献]

- [1] 蒋定生. 黄土高原水土流失与治理模式[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997, 218~221.
- [2] 莫永京, 彭红涛, 雷廷武等. 纤维水泥土抗拉强度的试验研究[J]. 中国农业大学学报, 1999, 4(6): 106~109.
- [3] 崔云鹏, 蒋定生. 水土保持工程学[M]. 西安: 陕西人民出版社, 1998, 262~277.
- [4] 水利部农村水利司. 雨水集蓄工程技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999, 95~110.

Effect of the Additives HEC and AAM on the Efficiency and Capability of Rainwater Catchment Materials

Feng Hao¹, Wu Pute¹, Peng Hongtao², Lei Tingwu^{1,2}

(1. Northwest Science and Technology University of Agriculture and Forestry, Institute of Soil and Water Conservation Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, National Engineering Research Center for Water Saving Irrigation at Yangling, Yangling 712100, China;

2. College of Water Conservancy and Civil Engineering, CAU, Beijing 100083, China)

Abstract: The design of mixing new additives with loess to promote the efficiency of rainwater catchment materials was put forward. By the rain simulated experiment, the effect of additive HEC (High Strength and Water Stability Earth Consolidator) and AAM (Active Aluminate Mixture) on the capability, efficiency of mixed loess catchment materials was discussed. Comparing with the other rainwater catchment materials, the time of runoff yield, and the capability, efficiency of rainwater catchments were studied under the condition of different rainfall intensities, rainfalls and slopes. The results of experiment showed that, comparison by the other materials, the mixed rainwater catchment materials with the additive of HEC and AAM have the rather strong tensile and press strength and the satisfying rainwater catchment efficiency of above 78% but only 1/3 to 1/2 cost of the concrete. This new type of mixed rainwater catchment materials could be used in the engineering of rainwater catchments in Northwest region for promoting the benefit and reducing the cost of engineering.

Key words: rainwater catchment materials; additive; HEC (High Strength and Water Stability Earth Consolidator); AAM (Active Aluminate Mixture); simulated experiment