

膨胀土边坡及其防护对策

长江科学院
水利部岩土力学与工程重点实验室
张家发 刘晓明

第四届全球华人岩土工程学术论坛
2009.8

问题背景

- 即使采用很低的强度指标进行设计，膨胀土边坡仍然会失稳。
- 南水北调中线工程极其重要，膨胀土地区渠线累计长度约**340km**，边坡防护工程必须有足够的可靠性和经济合理性。

主要内容

- 一. 膨胀土的特殊性和裂隙的危害
- 二. 膨胀土坡防护思路
- 三. 防护材料选择
- 四. 理论分析和研究成果支持
- 五. 建议方案

一. 膨胀土的特殊性和裂隙的危害

膨胀土的特殊性

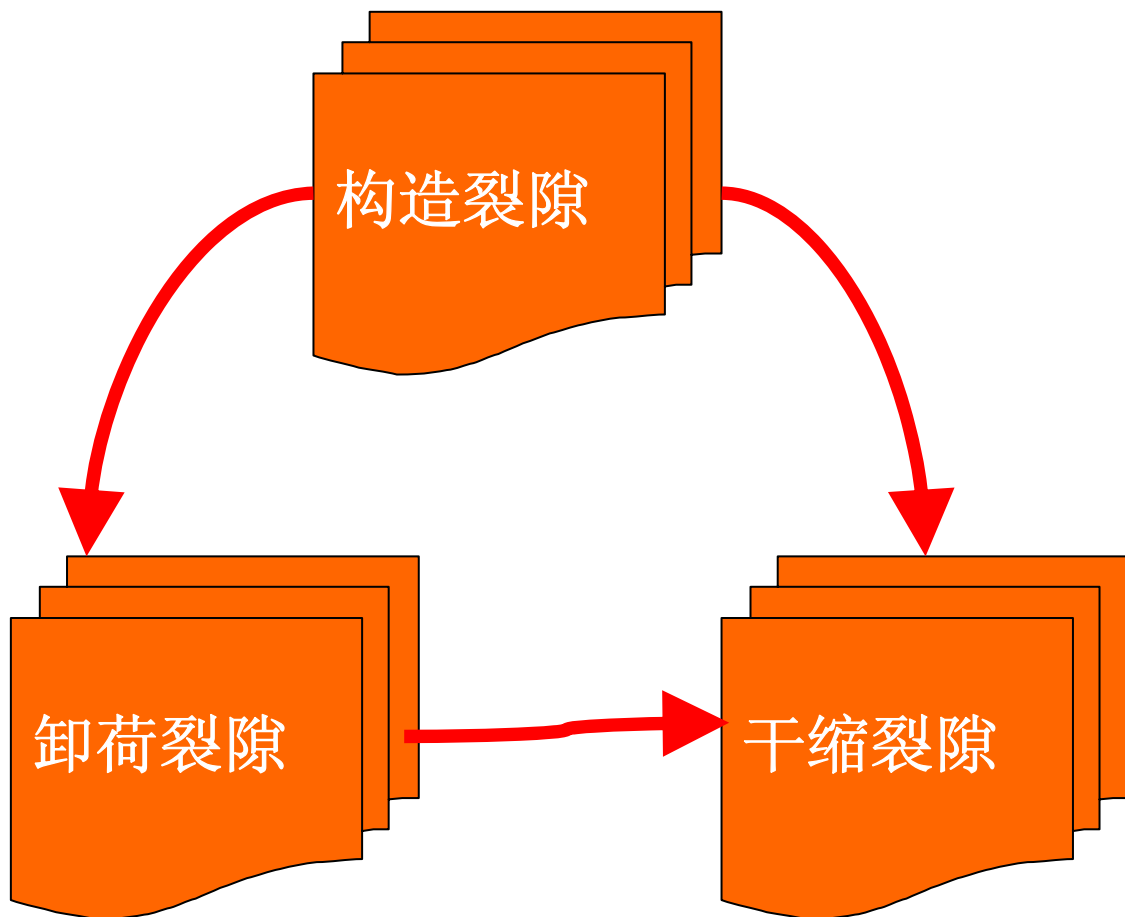
- ◆ 胀缩性：物质成分决定的固有特性
- ◆ 超固结性：膨胀土接受地质作用造成的附加特性，与膨胀岩相应的就是成岩作用
- ◆ 裂隙性：在地质、卸荷和气候作用下产生的附加特性

膨胀土的裂隙性

- 原生裂隙

- 次生裂隙

与胀缩性和超固结性有关，在很大程度上不是独立特性，是可控制的。



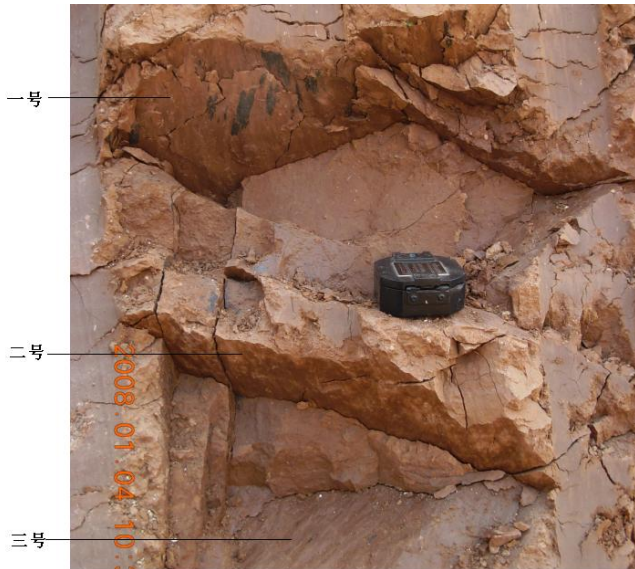
促进和引导作用

气候作用下膨胀土的裂隙性

对水文气候条件敏感



裂隙性



原生构造裂隙暴露于大气后张开扩展



干缩裂隙（次生裂隙）

膨胀土裂隙的危害（1）

破坏土体完整性



```
graph TD; A[破坏土体完整性] --> B["◆降低边坡的稳定性<br/>◆降低土体抗侵蚀能力"]
```

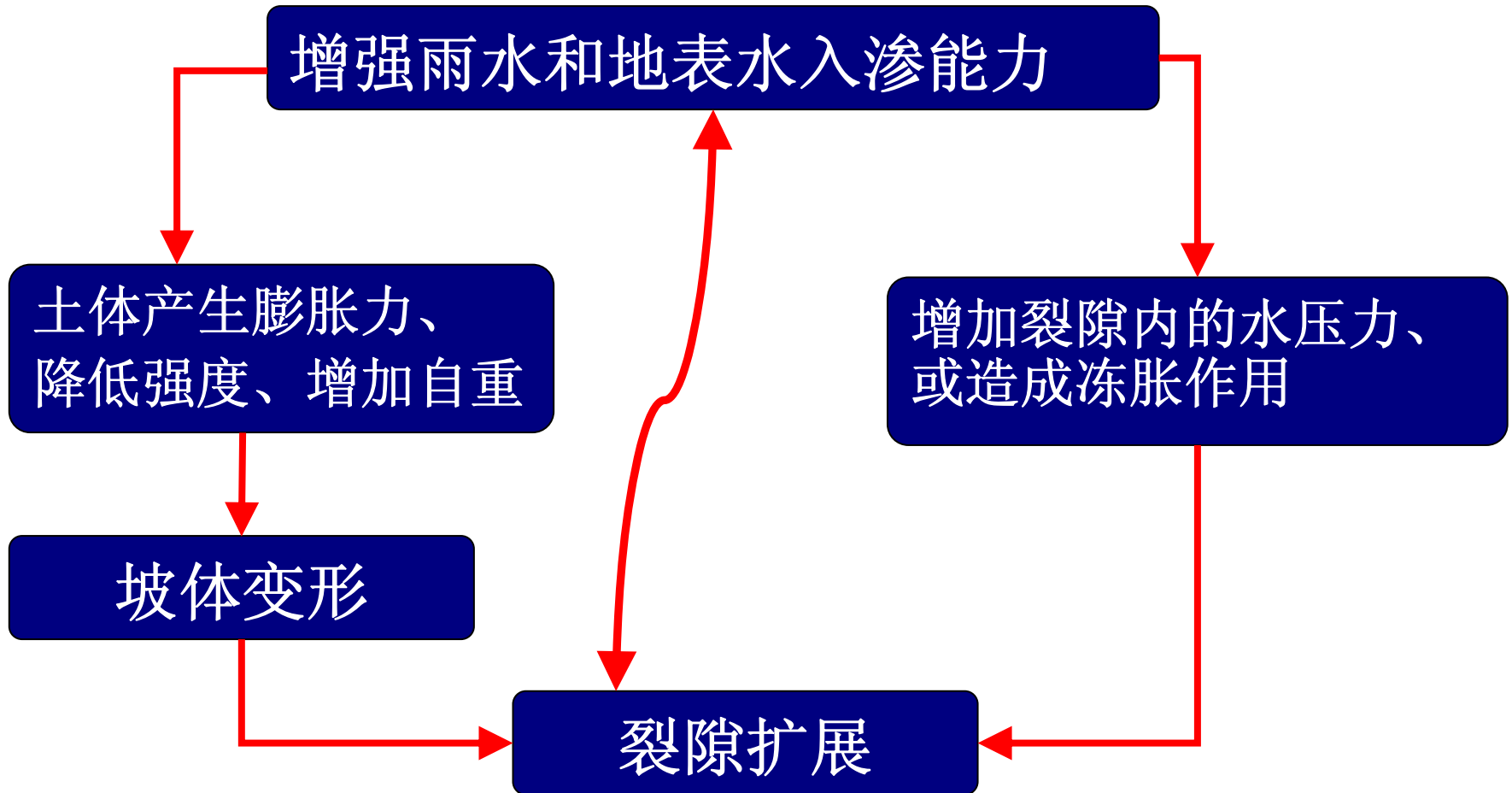
- ◆降低边坡的稳定性
- ◆降低土体抗侵蚀能力

膨胀土裂隙的危害（2）

增加与大气接触面积，促进蒸发

裂隙进一步增加、扩展

膨胀土裂隙的危害（3）



二. 膨胀土坡防护思路

目前列入南水北调膨胀土渠坡 防护措施研究的方案

- (1)** 一级马道以下：防渗封闭或缓冲保护层措施，防渗材料包括催化沥青、土工膜等，缓冲保护层为非膨胀土或改性土，表面均采用混凝土衬砌；
- (2)** 一级马道以上：护坡+地面排水措施，护坡措施包括干砌石护坡、砌石联拱、混凝土六方块护坡、土工格栅等；
- (3)** 马道及坡顶：隔水防渗措施。

总体倾向：防渗为主！

防护目的与途径

控制土体含水量的变化

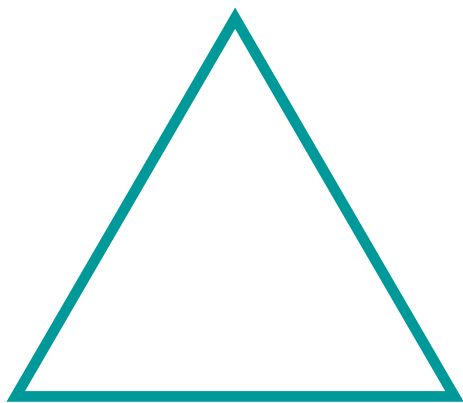
防止膨胀土展现裂隙特性！

途径包括：

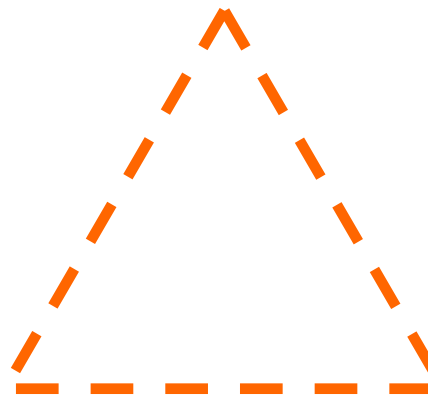
- 防渗（要注意长期有效性和双向水流）
- 排水（要注意淤堵可能影响长期有效性）
- 隔温（要注意长期有效性）

防护设计思路

防护设计方案：材料、结构



防护层（若干特性）

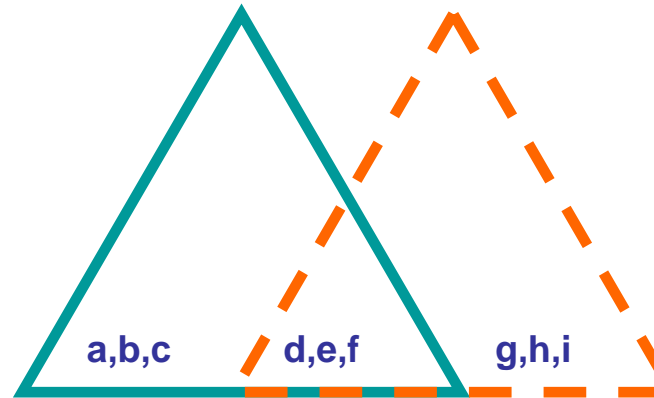


被防护层（若干特性）

防护效果 (1)

防护层

特性:a, b, c, d, e, f



被防护层

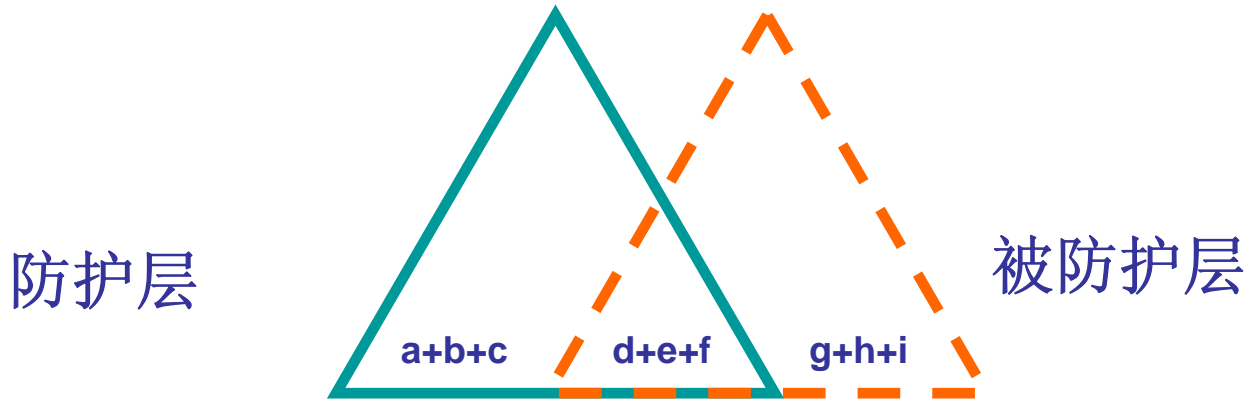
特性:d, e, f, g, h, i

如果d, e, f是造成边坡失稳的特性

无效防护



防护效果 (2)



如果 d,e,f 不是,而 g,h,i 是造成边坡失稳的特性,

◆ a,b,c 不能有效制约 g,h,i 的作用: 无效防护!



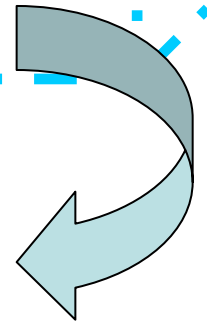
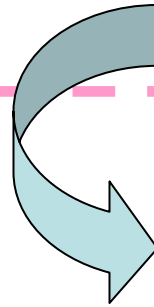
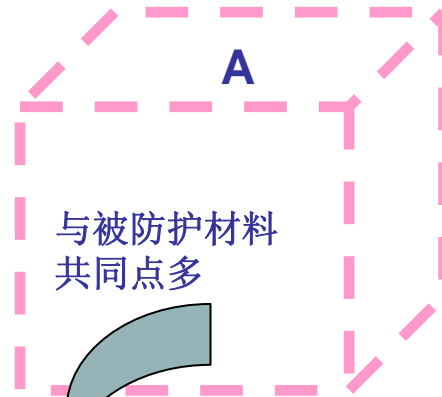
◆ a,b,c 可以有效制约 g,h,i 的作用: 有效防护!



三. 防护材料选择

防护材料方案选择

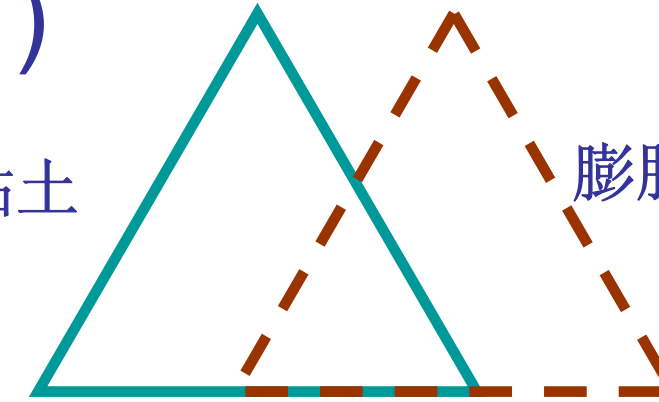
备选防护材料集



材料比较(1)

粘土

膨胀土



共同点:

- ◆ 隔热性能
- ◆ 排水性能(侧向渗透性)
- ◆ 土体完整性好时的入渗能力

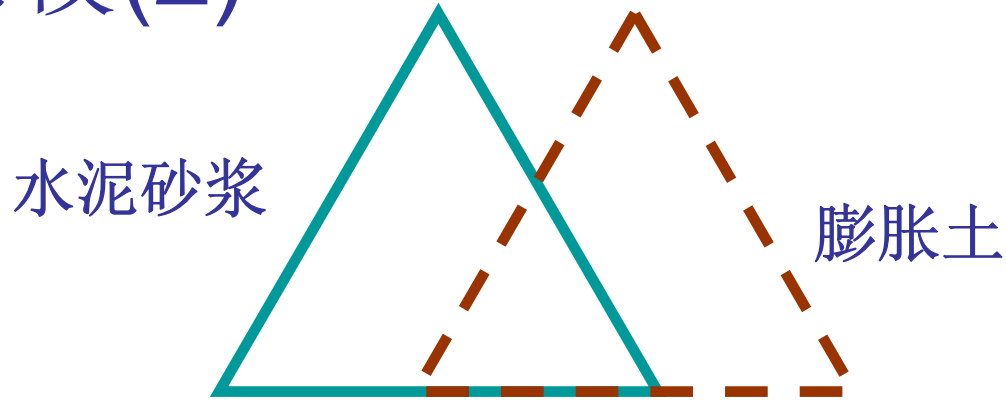
粘土:

- ✓ 膨胀性弱
- ✓ 动植物洞穴和裂隙
- ✓

膨胀土:

- ✓ 膨胀性明显
- ✓ 裂隙性
- ✓

材料比较(2)



共同点:

- ◆ 隔热性能
- ◆ 排水性能(侧向渗透性)
- ◆ 完整性好时的入渗能力
- ◆ 裂隙性(程度不同)

水泥砂浆:

✓ 膨胀性弱

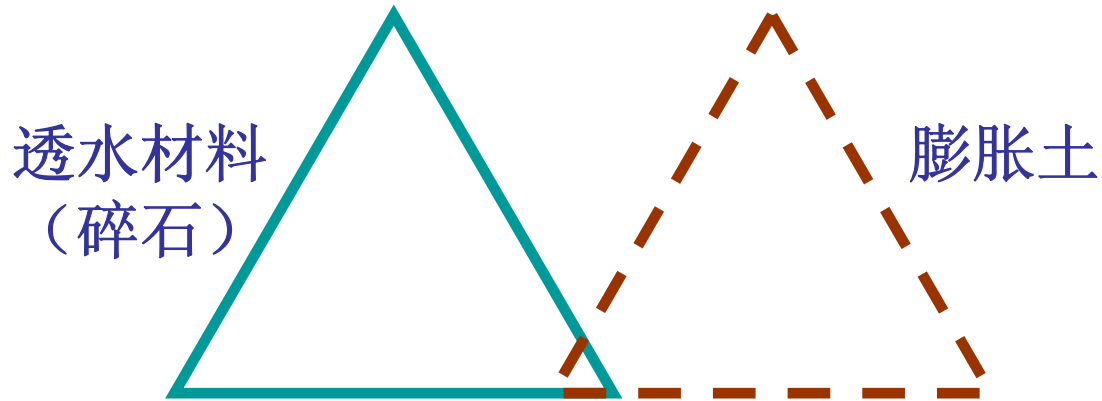
✓

膨胀土:

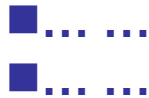
✓ 膨胀性明显

✓

材料比较(3)



共同点:



碎石:

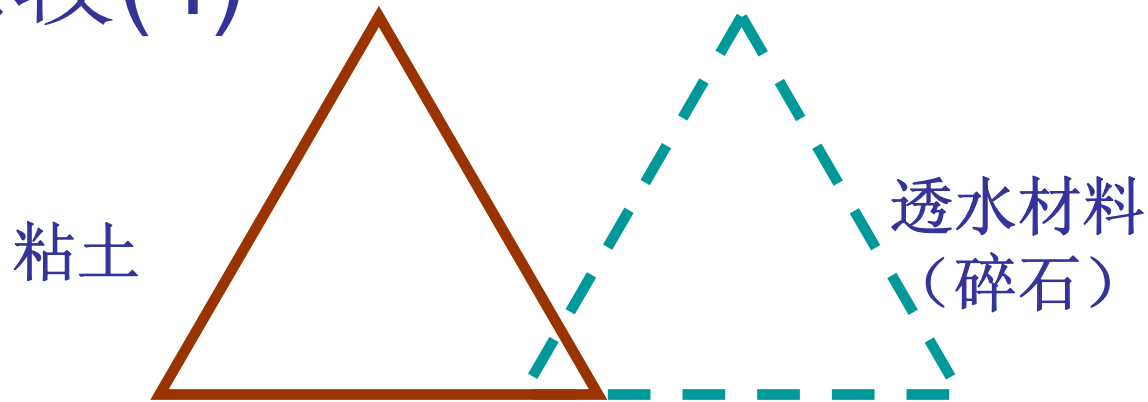
- ✓无膨胀性
- ✓饱和条件下入渗能力强
- ✓饱和条件下排水性强
- ✓隔热性好

膨胀土:

- ✓有膨胀性
- ✓入渗能力差，裂隙会加大入渗能力
- ✓排水性差
- ✓隔热性差

非饱和条件下渗透和排水能力会降低

材料比较(4)



共同点:

-
-

粘土:

- ✓ 膨胀性弱
- ✓ 入渗能力差, 动植物作用和产生裂隙后会加大
- ✓ 排水性差
- ✓ 隔热性差
- ✓ 生态效果好

碎石:

- ✓ 无膨胀性
- ✓ 饱和条件下入渗能力强
- ✓ 饱和条件下排水性强
- ✓ 隔热性好
- ✓ 生态效果差

材料比较结论

- 透水材料与膨胀土材料特性共同点少，差异性大。

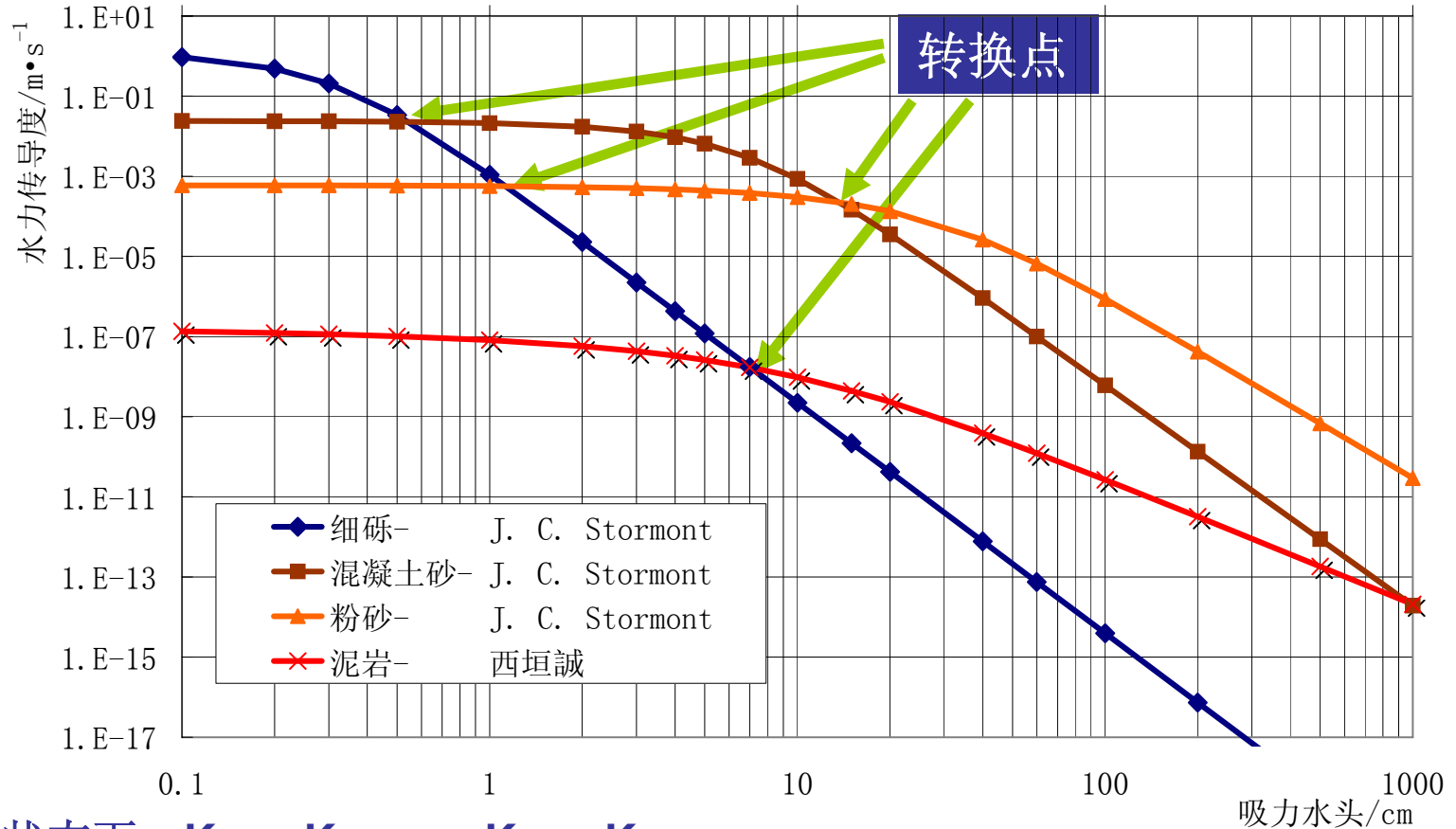
防护材料选择：

选用性能对比差异明显的材料

→ 成功的可能性大!

四. 理论分析和研究成果支持

多孔介质的非饱和水力特性



1. 饱和状态下, $K_{\text{细砾}} > K_{\text{混凝土砂}} > K_{\text{粉砂}} > K_{\text{泥岩}}$

2. 非饱和状态下, 上述关系会发生转换:

吸力水头 $> 7\text{cm}$ 时, 细砾的水力传导度最低, 而且吸力水头越高, 差别越大

非饱和水力特性的重要意义

较粗颗粒的材料

1. 在饱和状态下，渗透性强，可以起到排水作用
2. 在非饱和状态下，渗透性对比发生转换后，渗透性弱，可以起到防渗作用

粉砂/细砾土柱下部细砾层阻碍入渗水流-Stormont et al.

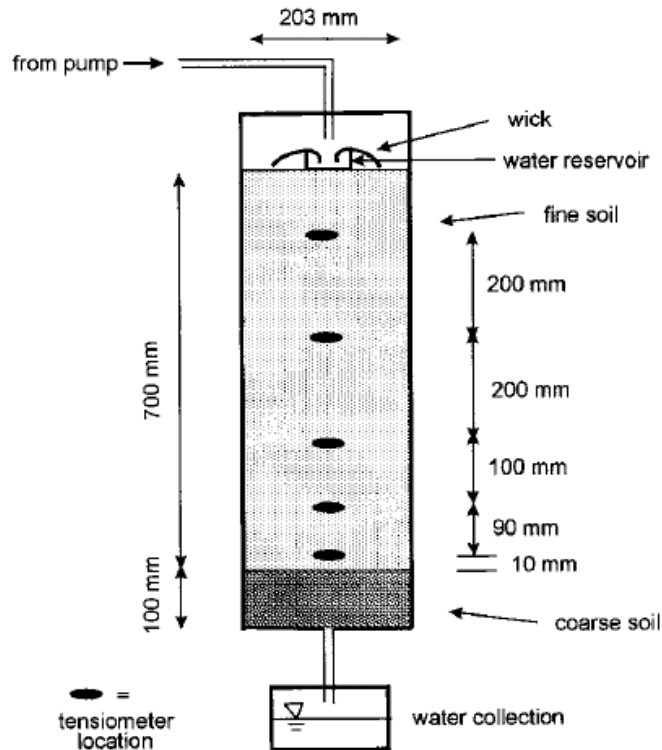


FIG. 3. Experimental Configuration of Infiltration Tests

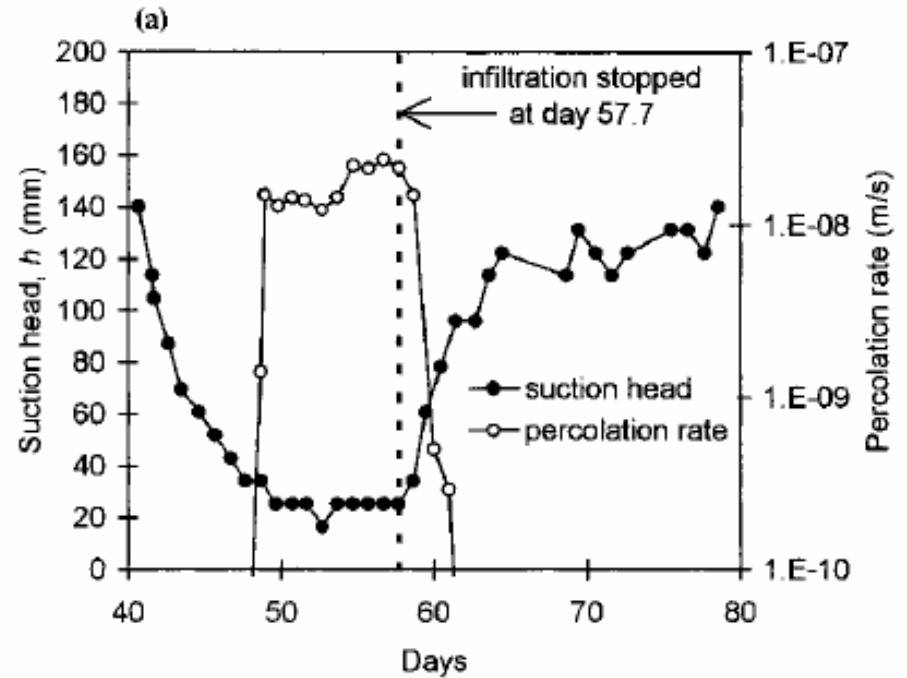
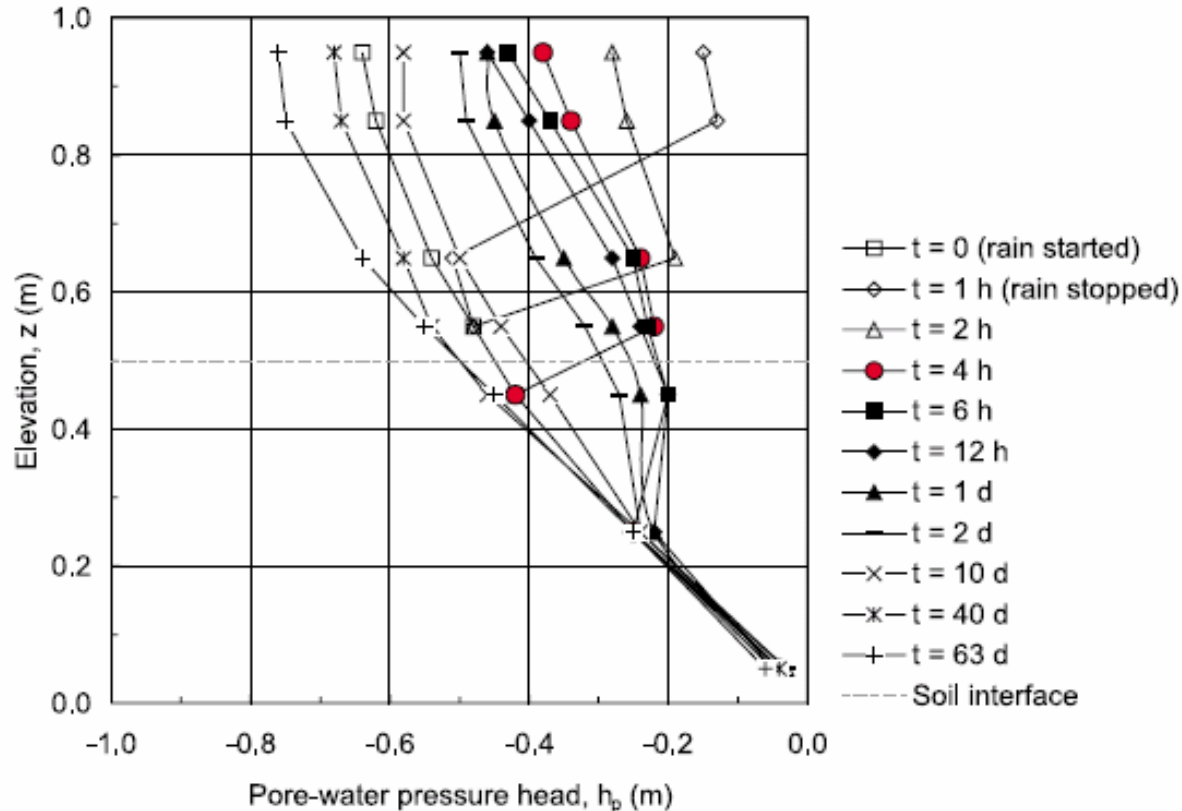


FIG. 5. Suction Heads at Bottom Tensiometer Location (10 mm above Interface) and Percolation Rates before, during, and after Breakthrough for Initial Infiltration into: (a) Silty Sand over Pea Gravel Column; (b) Concrete Sand over Pea Gravel Column

Stormont, J.C., and Anderson, C.E. 1999. Capillary barrier effect from underlying coarse soil layer. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, **125**(8): 641–648.

细砂/中砂土柱下部中砂层阻碍入渗水流-Yang et al.

Fig. 7. Pore-water pressure head profiles in a rainfall test in the soil column of fine sand over medium sand (test FM-R2).



A study of infiltration on three sand capillary barriers

Hong Yang, H. Rahardjo, E.C. Leong, and D.G. Fredlund

Can. Geotech. J. Vol. 41, 2004

壤土/砂土/壤土土柱中的夹砂层在高饱和度时加速上覆土层排水，低饱和度时阻碍上覆土层排水

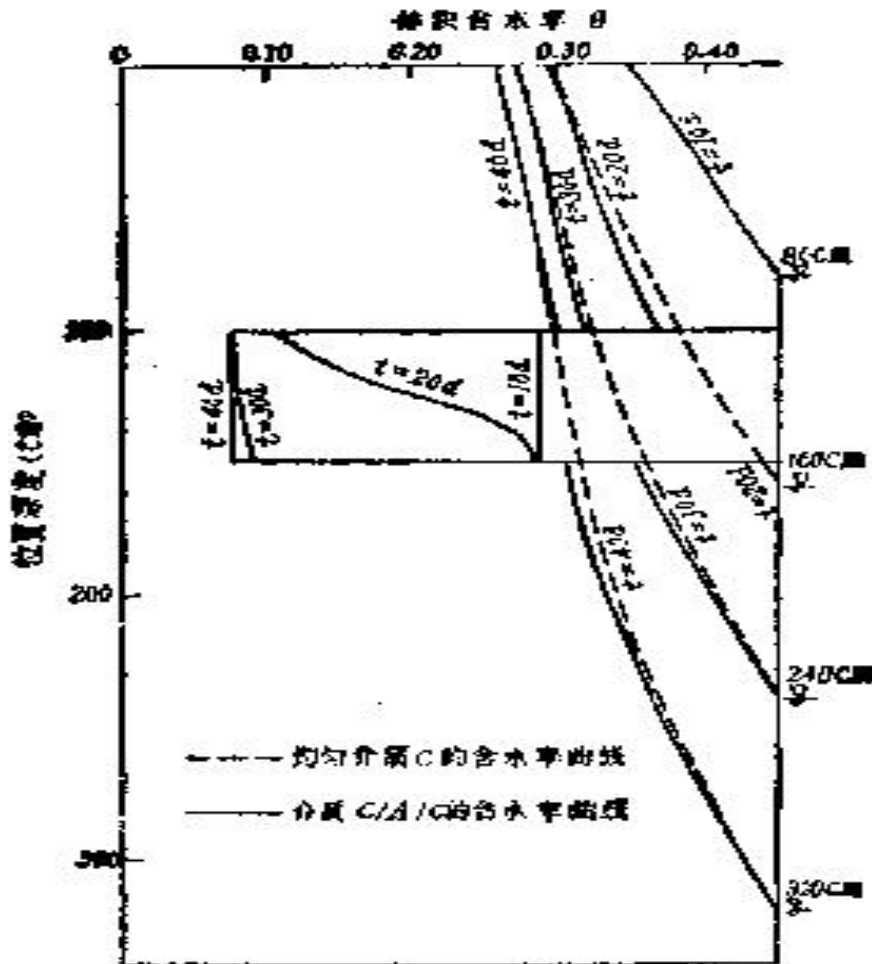


图 10 介质C/A/C含水量剖面图

张家发. 地下水位匀速下降条件下层状非均质多孔介质给水度的初步研究(J). 水利学报, 1988 (8) : 9-17.

水位降速: 8cm/d

夹砂层土影响土柱的毛管水上升的高度和速度，明显降低地下水的蒸发量。

表1 试验方案及基本数据

土柱编号	土体构型	容重 (g/cm ³)	砂层粒径范围 (mm)	地下水埋深(cm)	层位(距水位 的距离)(cm)	砂层厚度(cm)
1	均质土	1.45		50		
2	夹砂层	1.7	自然砂(0.1~3.0)	50	10	5
3	夹砂层	1.7	0.1~3.0	50	35	5
4	夹砂层	1.7	0.1~3.0	50	10	10
5	夹砂层	1.6	筛分砂(0.25~0.5)	50	10	5
6	夹砂层	1.6	筛分砂(0.5~1.0)	50	35	5
7	表砂层	1.7	0.1~3.0	50	45	5
8	表砂层	1.7	0.1~3.0	50	40	10

史文娟等.夹砂层土体构型毛管水上升的实验研究(J). 水土保持学报, 2004 (6) .

砂层级配对于水分的阻滞作用最大!

表2 不同土柱毛管水上升到土表以及在砂层中滞留的时间

土柱编号	1	2	3	4	5	6	7	8
到达土表的时间(d)	6.5	12.2	7.8	8.1	32.0	—	17.5	20.0
砂层中滞留时间(d)	—	2.40	0.30	0.63	3.20	120	8.88	15.95

碎石层的热屏蔽作用

孙志忠等.块石层对其下部路基土体温度的影响 (J).铁道工程学报, 2003 (4) .

- 块石调温路堤是多年冻土区铁路采取的保护冻土的措施。
- 块石材料孔隙性大，起热量屏蔽的作用。

五. 建议方案

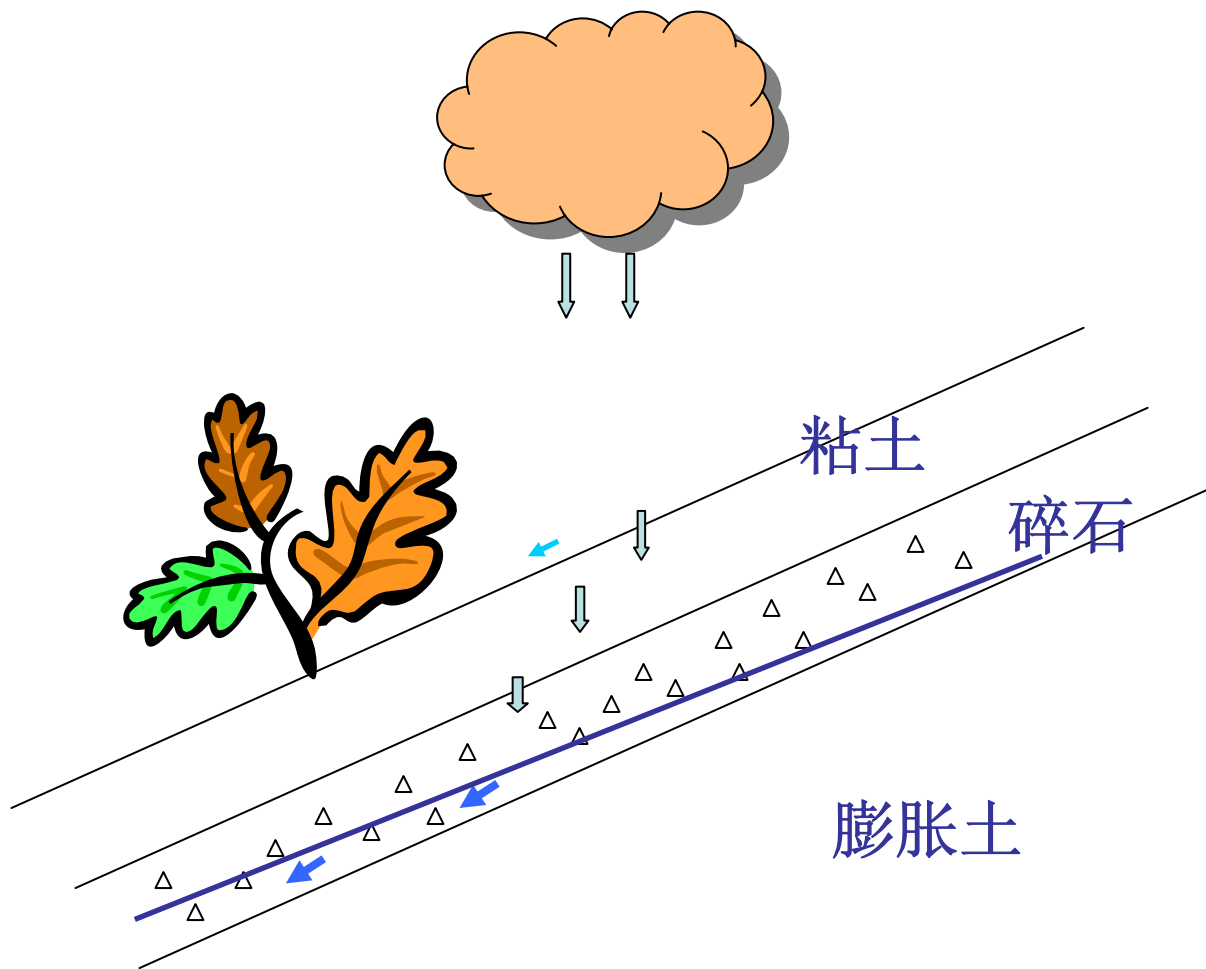
建议：兼具防渗、排水功能的双层结构防护方案

根据粗粒土作为夹层时的优良特性，膨胀土渠坡宜采用双层结构的防护方案，表层为混凝土护坡，也可以采用粘性土或回填土料，下部为粗粒土层，简称为（具有防渗、排水功能的）双层结构防护方案。

表层采用粘性土或回填土的作用

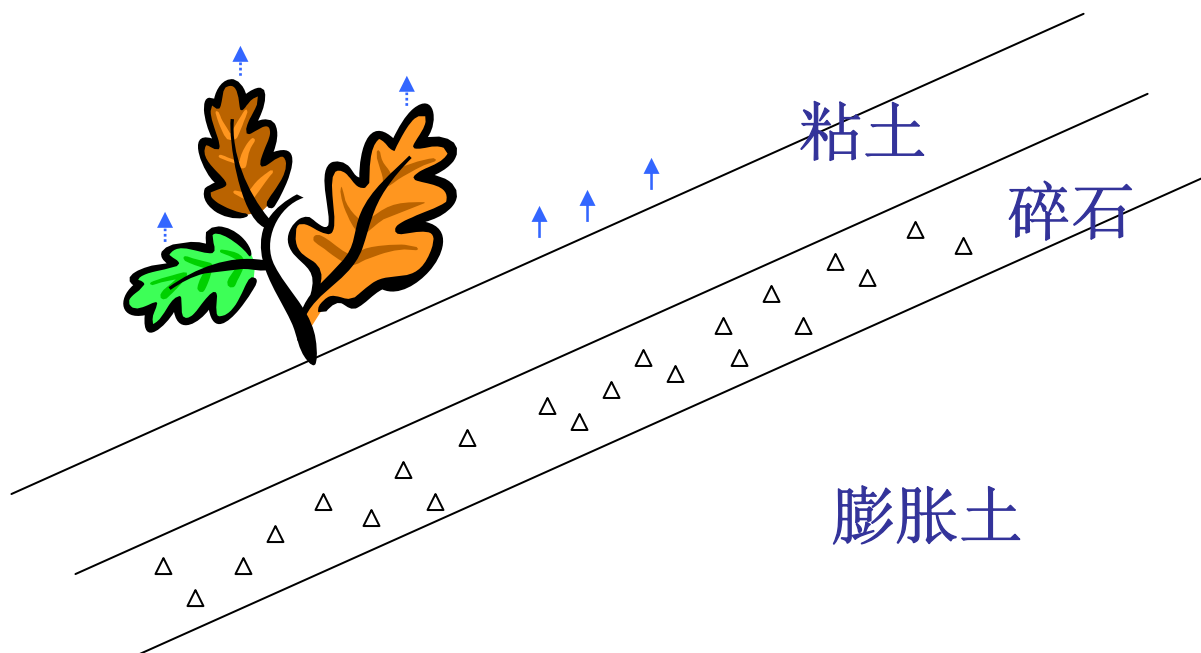
可以起到一定的防渗作用，还可以绿化，也可以防止粗粒土的流失，既有工程作用，又有生态环境效果。

粗粒土层的作用



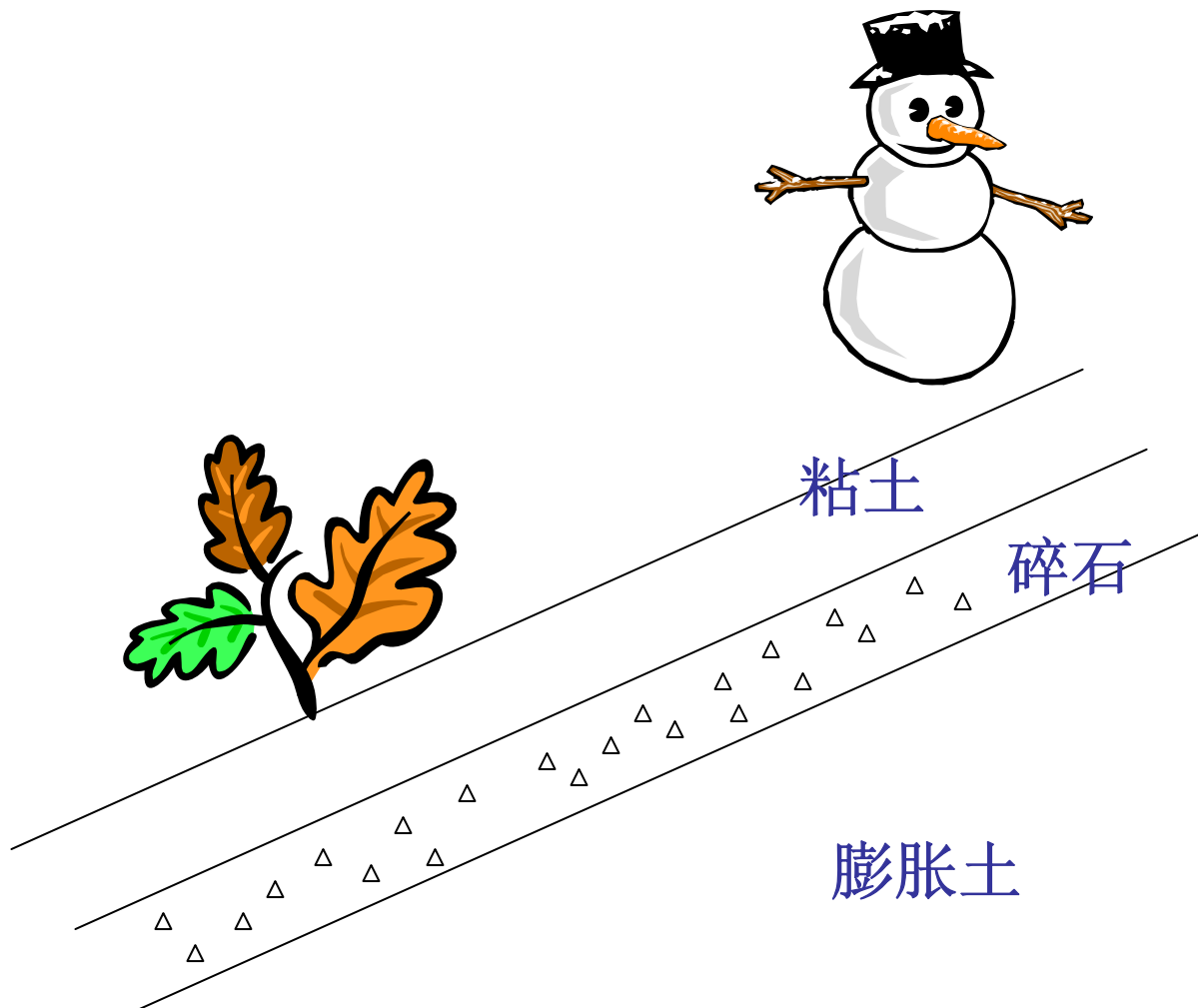
1. 在高吸力条件下，阻碍入渗水流通过，制约降雨入渗对膨胀土层含水量的影响；
2. 在低吸力条件下，加速排水，防止水份在膨胀土坡面的滞留和入渗

粗粒土层的作用



3. 防护层隔温和阻碍毛细运动，制约蒸发作用

粗粒土层的作用



4. 隔热保温，抑制膨胀土层对气温变化的响应，控制冻胀变形

粗粒土层的作用

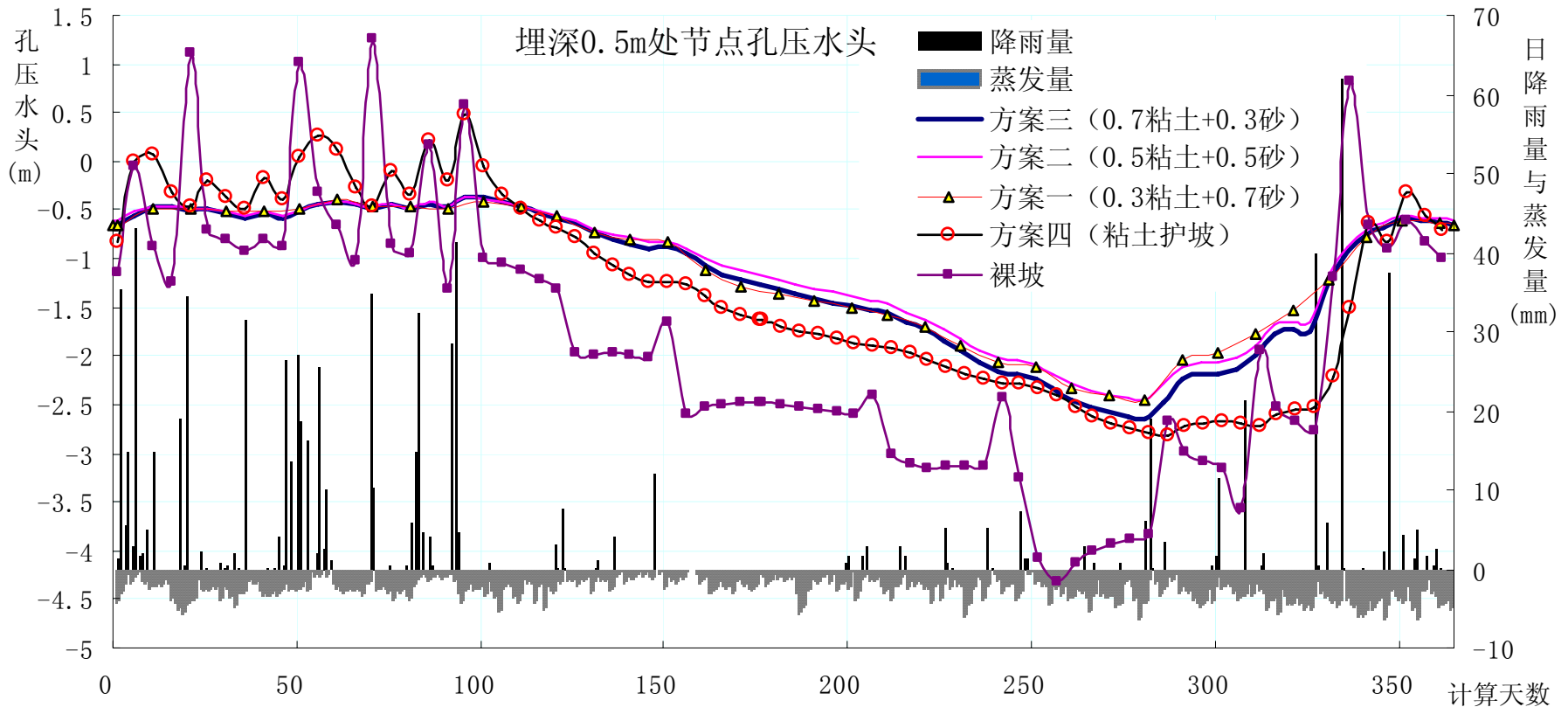
5. 阻碍上覆土层的排水，有利于保持水份和植被生长；
6. 粗粒土不像粘性土等防渗材料一样由于气候作用而产生裂隙，比防渗材料具有性能稳定、长期有效的优势，不仅自身不会产生裂隙，还会切断相邻土层的裂隙扩展路径。

方案的效果研究

选取新乡潞王坟膨胀岩渠坡处理试验段的典型剖面，利用当地的实际气象资料，对渠坡的饱和非饱和非稳定渗流过程进行了数值模拟。

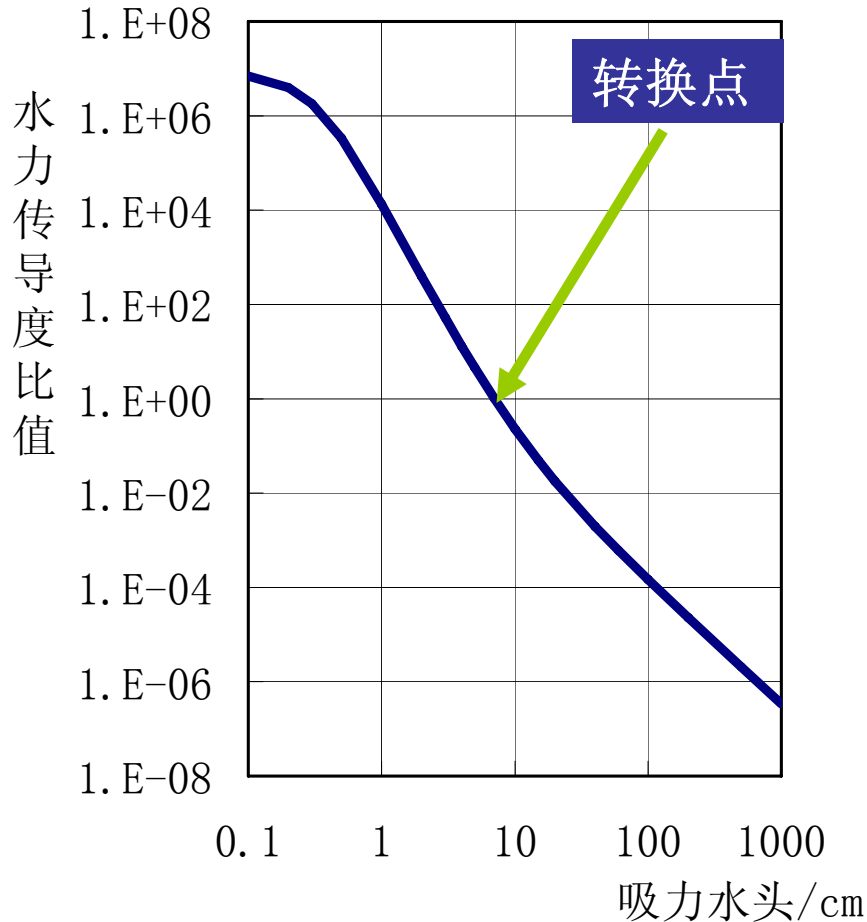
刘晓明. 气候作用下膨胀岩渠坡的响应特征及防护方案研究 [硕士学位论文D]. 武汉：长江科学院，2009.

裸坡/粘土防护/双层结构防护模拟计算结果对比



初步结论：气候条件对于裸坡作用最显著；粘土防护条件下气候作用降低；双层结构防护条件下气候影响更小

粗粒土选用的原则性要求



细砾和泥岩水力传导度比值

随吸力水头变化曲线

- (1) 粗粒土与膨胀土之间饱和渗透系数有显著差别；
- (2) 粗粒土与表层土之间的转换点吸力水头较低；
- (3) 与上下土层之间的水力传导度比值随吸力水头变化呈高度非线性关系。
- (4) 粗粒土尽可能用窄级配料，良好的大孔隙性将使得保温隔热效果更好。

方案应用需要满足的条件

1. 通过温度和含水量控制防止边坡土体开裂
2. 防护层自身满足结构稳定要求
3. 防护层满足生态和水土保持要求
4. 料源充足，对环境无恶劣和不可补偿的影响
5. 施工方便，进度易于控制
6. 造价可以接受

重要启示

- 1.** 防护材料的选择应该优先指向水力特性差异性大的材料，这一原则至少可以沿用于大多数条件下的渗流控制设计。
- 2.** 粗、细粒土之间渗透性对比关系可以互相转换的规律，可以更广泛地指导渗流控制方案的设计创新。例如，垃圾填埋场覆盖层的设计就可以参考。
- 3.** 粗粒土作为夹层，可以如此“聪明”地发挥多种作用，我们要“聪明”地领会和利用它的优良特性，使其为工程的变形控制和稳定性做出贡献。

致谢

该方案的有关内容在水利部岩土力学与工程重点实验室内进行过讨论，程展林教授级高工等提出过有益的建议。

谢谢大家！