

反滤机制下土工布孔隙结构变化研究

Study on variation of pore structure of geotextiles effected by filtration with soils

张达德¹, 丁元皓¹, 程家玲²

(1. 中原大学土木工程学系, 台湾 中坜; 2. 中华大学科技管理研究所, 台湾 新竹)

摘要: 阐述在过滤/排水行为中, 土壤颗粒受水流冲刷对土工布孔径造成的影响。说明在不同土壤级配的条件下, 过滤/排水行为中, 土体内部的颗粒行为与机制。同时提供试验方法的应用与限制条件。

关键词: 伸入式水力坡降比试验; 临界气泡法; 孔径分布; 抗阻塞潜能

中图分类号: TU 472. 33; TV 223. 5; U 655. 54

文献标识码: A

文章编号: 1000- 4548(2004) 04- 0500- 05

作者简介: 张达德(1954-), 男, 中原大学土木工程学系教授, 中原大学防灾救灾科技中心主任, 从事岩土工程 土工布研究 20 余年。

CHANG Dave Tarrtech¹, TING Yuanhao², CHENG Chia ling²

(1. Department of Civil Engineering, Chung-Yuan Christian University, Chungli Taiwan, China; 2. Institute of Technology Management, Chung Hua University, Shing-chu Taiwan, China)

Abstract: A complete test procedure had been studied including Modified Gradient Ratio Test and Bubble Point Method in order to evaluate the anti-clogging potential of a soil/geotextile system. The performance mechanism of soil particles and geotextile fabrics during filtration/drainage behavior had been revealed. The tests used in this study had been recommended with specific application conditions.

Key words: modified hydraulic gradient ratio test; bubble point method; grain size distribution; anti-clogging potential

0 绪 论^{*}

土工布中的无纺布(Nonwoven)材料, 在应用上多偏重于它的过滤/排水功能。在各种物理性质中, 土工布的孔径分布(pore size distribution)是影响过滤/排水效能的主要因素。因此, 如何有效地量测土工布的孔径分布并建立其与过滤/排水行为间的关系, 实为土工布过滤/排水功能设计的一重要课题。

1 过滤/排水行为

过滤/排水过程, 包含了保留土壤颗粒与排除土内水分两个功能需求。按照传统级配层的设计原则, 土工布在过滤/排水应用上, 同样必须达到保留土壤颗粒维持土体与系统渗透性的要求。

(1) 保留土壤(soil retention)准则 土工布必须具有相对于土壤颗粒更小的孔径, 以保留土壤颗粒。

(2) 渗透性(permeability)准则 土工布的渗透性是为了确保能让液体在土工布中自由地流动。

(3) 阻塞(clogging)准则 土工布在设计时限内, 应维持不发生阻塞, 确保长期使用的可靠性。

现今工程界对于土工布在过滤/排水功能选材上, 多半采用表观开孔径(apparent opening size, AOS)与水力坡降比试验(gradient ratio test)配合。然而, Carroll(1983)指出^[1], 仅依据土工布的表观开孔径与渗透性等性质, 无法完整且充分地表达出土工布在过滤/排水

行为的效能, 亦无法反应土工布抗阻塞潜能的特性。Holtz 及 Luna^[2]等学者曾以水银渗入法, 进行土工布孔径分布试验。其研究指出, 具有相同表观开孔径的材料, 可能具有差异甚大的孔径分布。仅采用表观开孔径作为过滤/排水设计的依据, 无法确实掌握土工布与土壤在过滤/排水过程中, 纤维结构与土壤颗粒间的互制作用。Carroll(1987)^[3]发现, 对土工布保留土壤与维持系统渗透性的要求, 在土壤具有很大的阻塞潜能时, 并不能完整地表现出其阻塞行为, 因而建议以 GR 试验来评估土工布的抗阻塞潜能。

水力坡降比(Gradient Ratio, GR)试验, 是最常使用来评估土工布阻塞潜能的试验(Calhoun, 1972^[4]; Haliburton and Wood, 1982^[5])。水力坡降比试验是将土壤置于土工布上, 以水流垂直通过此系统, 仿真土壤/土工布间的过滤/排水行为。通过比较上层土壤和接近土工布附近之土壤的水力坡降, 可评估其阻塞潜能。

因此, 本研究除采用改良 Calhoun Type 伸入式水力坡降比试验, 进行土工布与土壤在过滤/排水互制作用下的行为仿真外, 还采用临界气泡法对原状土工布与经过水力坡降比试验后土工布进行孔径分布量测。除可探讨土工布孔径分布对过滤/排水行为的影响外, 还可通过土工布在过滤/排水行为前/后孔径分布的改变, 确实探讨土壤颗粒与土工布纤维在过滤/排水作用下的互制作用。

2 试验用土工布

本研究选取三种针轧无纺布, 分别为 CNS I、CNS II 和 CNS III, 材料编号及其基本性质试验结果如表 1 所示。

表 1 无纺布基本性质试验结果

Table 1 Physical properties of the nonwoven geotextiles

无纺布编号	A	B	C
透水系数/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	4.39×10^{-3}	2.53×10^{-3}	7.85×10^{-4}
厚度/mm	2.87	3.15	3.36
单位重量/($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)	278.8	308.5	362.3
CNS 分类	I	II	III

3 试验用土壤

本研究采用编号为 ASTM- C- 109 的渥太华标准砂作为越级配土壤粗粒料。细粒料土壤采用台湾省高雄县田寮乡泥岩边坡示范区采集的风化泥岩, 通过 200# 筛的细粒料含量达 95%。将标准砂与泥岩依泥岩含量占土样总重的 0%, 20%, 40%, 60% 调配并充分搅拌均匀而成试验用越级配土壤(粒径分布曲线见图 1)。

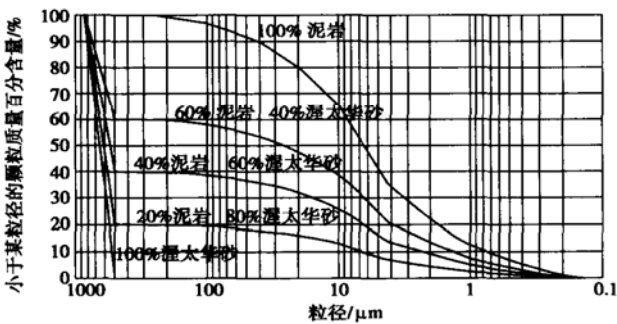


图 1 试验用土壤粒径分布曲线图

Fig. 1 Grain size distribution curves for the test soils

4 水力坡降比试验

本研究所采用的水力坡降比试验设备, 是由 Chang 等人(2000)^[6] 发展的伸入式水力坡降比试验仪, 它与 Calhoun Type 的水力坡降比试验设备相比, 不同之处在于其管壁的测管伸入土体内 10.0 mm, 并在土壤/土工布间增加一测管, 增加的测管也伸入土体内 10.0 mm。水力坡降比值的计算(如图 2 所示) 可以表达为

$$\text{GR} = \frac{(\Delta H_3 + \Delta H_g)/(L_3 + L_g)}{(\Delta H_1 + \Delta H_2)/(L_1 + L_2)} \quad (1)$$

本研究共进行 108 组伸入式水力坡降比试验, 分别使用 A、B 及 C 三种土工布, 配合泥岩含量为 0%, 20%, 40% 及 60% 的试验土样进行, 试验的系统水力坡

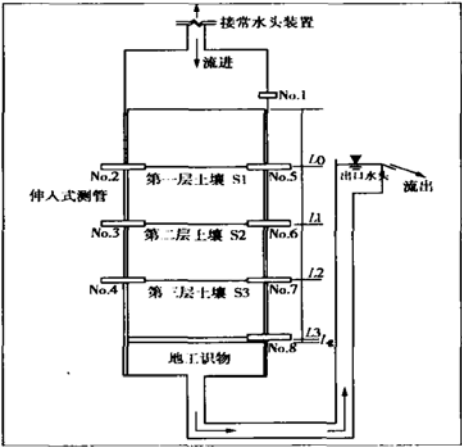


图 2 伸入式水力坡降比试验仪分层水力坡降比示意图

Fig. 2 Hydraulic gradient measuring system of modified hydraulic gradient ratio test

降为 1、5 及 10。此外还配合临界气泡法, 量测水力坡降比试验前、后土工布的孔径分布。

5 临界气泡法(Bubble Point Method)

临界气泡法可测得多孔环境下的最大孔径, 可应用在多种材料上, 如薄膜、多孔性陶瓷等^[7]。此试验法的标准为 ASTM F316- 86(ASTM Test Method for Pore Size Characteristics of Membrane Filters by Bubble Point and Mean Flow- Pore Tests)。临界气泡法应用在土工布上可以计算土工布阻塞和延伸的孔径尺寸和分布。

临界气泡法为体积量测孔径法的一种, 其原理是基于毛细管流(Capillary flow), 当压力达到液体在最大孔隙的毛细吸引力, 其多孔性材料将会允许液体通过。不同的压力对应不同的孔径大小, 持续增加压力, 即可获得对应尺寸孔径的资料。

由表面张力和压力平衡可得

$$4\pi d\tau\cos\theta = d^2\pi p, \quad (2)$$

式中 d 为最大孔隙直径; τ 为液体在饱和和渗透性材料的表面张力; θ 为多孔性材料和液体的摩擦角; p 为不同的压力状况。假设孔隙为圆柱状, 其最大孔径可计算为

$$d = 4\tau/p, \quad (3)$$

当气压增加, 气体会通过更小的孔隙。将干状态下和饱和状态下气体通过试体的流速与压力资料, 加以叠加合并, 气流通过特定尺寸的孔径的百分比将可计算出, 计算式为

$$Q = \left| \frac{\text{WetFlow}_h}{\text{DryFlow}_h} - \frac{\text{WetFlow}_l}{\text{WetFlow}_l} \right| \times 100\%, \quad (4)$$

式中 Q 为气流通过材料特定孔径的百分率; h 表示较高的压力极限; l 表示较低的压力极限。

6 临界气泡法仪器介绍

本实验所用的临界气泡法仪器是由 Porous Materials Inc. 所生产, 型号为 Ithaca, NY, Model No. App-200, 此设备符合 ASTM F 316 的规定(如图 3 所示)。

为了使应用于水力坡降比试验的试片, 在进行水力坡降比试验前后可以进行临界气泡法试验, 特别订制新的样品置放室, 以配合水力坡降比试验中较大的试片, 如图 4 所示。



图 3 临界气泡法试验仪外观

Fig. 3 The equipments of the bubble point method

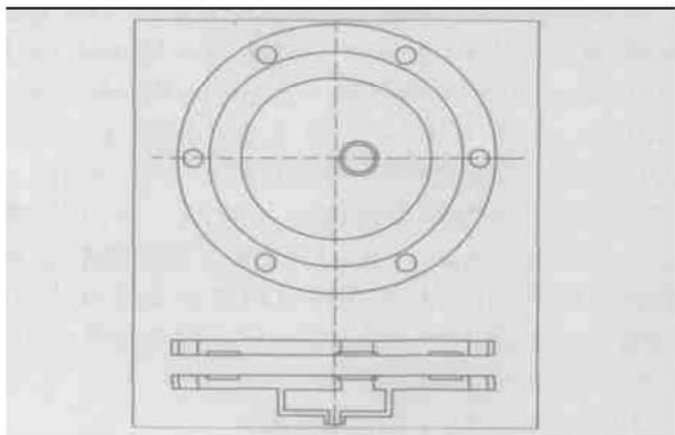


图 4 新型样品置放室示意图

Fig. 4 The new type sampling cell of the bubble point method

7 过滤/排水系统行为

本研究所进行的水力坡降比试验, 在改变水力坡降时, GR 值出现不规则跳动之情形, 其值有快速上升之趋势, 此一趋势在 1~2 h 后, 逐渐恢复并重新达成稳定(参见图 5)。究其原因, 参考前人的研究成果, 可推论其为水力坡降改变时, 土壤内部原本不稳定的颗粒, 受到水力坡降增加的影响, 开始移动并重新组合所造成的现象。

综合本研究所所有伸入式水力坡降比试验资料, 各试验系统的 GR 值, 虽然均有其差异性, 但就整体趋势观之, 仍具有随试验时间增长而上升的整体趋势。而

其上升的趋势, 一般均在 4~6 h 内停止, 系统的 GR 值达到稳定不再变动, 此一现象可验证以短期试验评估长期过滤/排水效能的可靠性。而此上升之趋势即代表在此改变水力坡降的过程中, 细颗粒土壤因为水流的带动, 进入更为下方的土层, 并在下方土层或者土工布中, 遭受阻留, 直接造成下层土壤或土工布水力坡降的上升, GR 值因而上升。

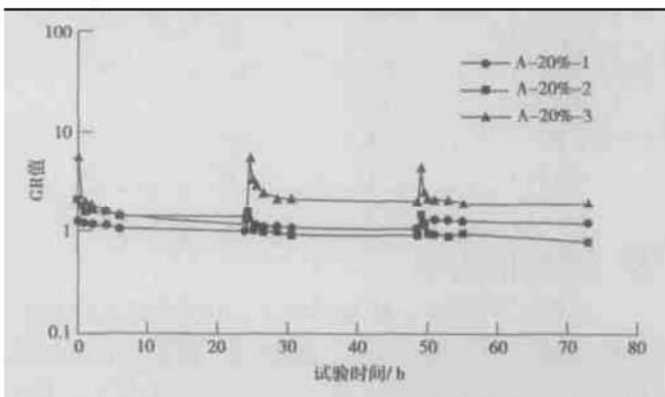


图 5 无纺布 A 与泥岩含量 20% 土壤伸入式水力坡降比试验结果

Fig. 5 The results of the modified hydraulic gradient ratio test for nonwoven geotextile A and the soil with 20% mudstone

8 土壤级配种类与水力坡降比值分析

为了比较不同级配与水力坡降比试验结果, 将同一条件下的三组试验结果予以平均, 并以稳定后的水力坡降比值表示该系统条件的过滤/排水成效(参见图 6)。根据各组试验资料, 发现下列各现象: ①泥岩含量 0% 的试验土壤, 其水力坡降比值在 $i_s = 5$ 时, 均有下降之趋势; ②泥岩含量 20%、40% 与 60% 的试验土壤, 其水力坡降比值随 i_s 的上升而上升; ③水力坡降比值随 i_s 上升的趋势, 不论无纺布种类, 均以 20% 及 40% 较为明显, 60% 较不明显。

上述现象, 经比较分层水力坡降值, 作出推论:

(1) 在级配为 0%、 $i_s = 5$ 试验条件下, GR 值出现下降的情形, 这是第三层土壤受水流影响进入土工布中, 土壤出现较疏松的现象, 使得接近土工布土壤的水力坡降比值下降。在更大的系统水力坡降($i_s = 10$)下, GR 值出现持平或小幅上升的情形, 这是第三层土壤受到更大水力坡降的冲刷, 重新排列紧密, 致使该层水力坡降上升所造成的现象。

(2) 级配为 20% 及 40% 的条件下, 系统 GR 值随系统水力坡降上升的趋势明显, 对照分层水力坡降图可以发现, 这是第一、第二层中的细颗粒土壤, 在水流的冲刷下, 逐渐往下移动进入第三层土壤或土工布中, 造成此层的水力坡降变大所造成的现象。

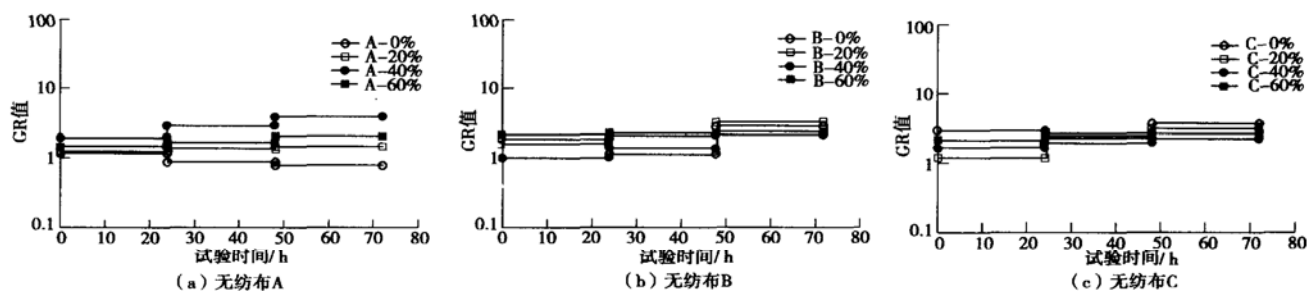


图6 无纺布与各级配的水力坡降比值图

Fig. 6 Hydraulic gradient ratio for nonwoven geotextile and tested soils

(3) 级配为60%的条件下,系统GR值随系统水力坡降上升而缓慢上升,但是其值均较泥岩含量较少的试验条件为大,因此,据此可推论60%泥岩含量的试验条件下,系统会出现较明显的阻塞情形(GR值较大),但是其系统中因为较细颗粒的比例增加,使其直接增进土壤颗粒结构的稳定性($C_u = 40$),因此,GR值变动幅度并不大,亦相当稳定,处于“在较高范围内稳定且缓慢上升”的情形。

本研究发现,由于标准砂与泥岩的粒径尺寸差异太过悬殊(参考图7),有超过92%的泥岩比标准砂的最小粒径还小10倍以上;超过40%的泥岩比标准砂的最小粒径还小100倍以上。在如此悬殊之粒径分布状态下,泥岩含量低的试验条件,越级配土壤中由大多数颗粒(标准砂)构成的孔隙,就会比泥岩颗粒大上许多,此种不稳定的结构,正是在过滤/排水行为中导致颗粒移动的主因。

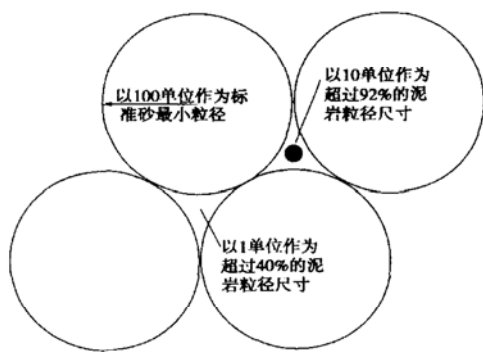


图7 试验用越级配土壤粒径差异示意图

Fig. 7 Grain size variation of the gap graded soil in the test

9 临界气泡法试验结果分析

将本研究配合水力坡降比试验所进行的36组临界气泡法试验结果加以整合,可以发现在土工布的小孔径端,不论试验用土工布种类、土壤种类,均出现孔径明显缩小的情形,参考图8。

土工布在过滤/排水行为中,细颗粒土壤受到水流

带动进入土工布,一部份的颗粒因其粒径小于隘口的孔径,得以通过土工布。而部分颗粒并未穿过土工布,并停留在土工布的孔隙中,造成土工布的阻塞,亦直接造成土工布在小孔径端孔径分布的缩小。

此外,同一土工布的试验结果显示,泥岩含量并非决定土工布经过过滤/排水过程后孔径缩小情形的依据。比较多组试验资料可以发现,泥岩含量20%的试验结果亦会出现比40%或60%更小的孔径分布。因此推论:泥岩(细颗粒土壤)含量并非决定土工布在过滤/排水行为中阻塞与否的重要因素。

与各细颗粒含量多少相比,土壤本身颗粒的特性、粒径分布与其结构完整与否更是颗粒是否进入并阻塞土工布的关键。由上述试验结果可以推论,标准砂40%与风化泥岩60%的试验土壤,虽然在细粒料含量上比较多,但是因为其粒径分布较为完整,因此对于土壤颗粒抵抗水流冲刷防止土工布阻塞,反而有正面帮助。

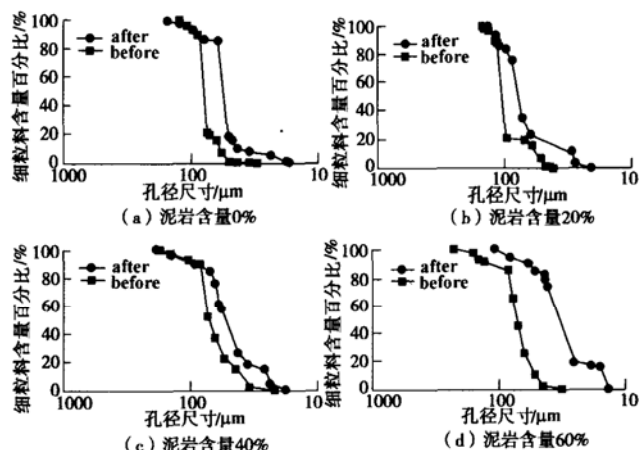


图8 无纺布C与不同泥岩含量的各组土壤GR试验前/后孔径分布图

Fig. 8 The pore size distribution before/after GR test of the nonwoven geotextile C and the soils with various percentage mudstone

10 结 论

汇总本研究分析成果,整理下列结论:

(1) 临界气泡法为体积量测孔径法的一种,其具有

精确、迅速的优点,对于土工布相关性质的量测,有极大的助益。本研究采用临界气泡法针对土工布进行水力坡降比试验前、后之孔径分布情形进行量测。除了可清楚掌握土工布原状孔径分布之外,配合水力坡降比试验进行试验后孔径分布量测,则可了解土工布在特定土壤级配的试验条件下,孔径受到阻塞的程度,对于土壤/土工布在过滤/排水中的互制作用可有更为清楚的了解。

(2) 在水力坡降比试验中,土工布虽然在不同部分具有不同的孔径分布,但若埋置在相同级配状况的土壤,仍会出现相近的过滤/排水行为,且土工布孔径受到土壤颗粒影响而改变的情形亦相当接近。

(3) 土壤中细颗粒的含量越多,系统的 GR 值具有越高的趋势,显示细粒料含量越高的土壤,本身具有较差的抗阻塞潜能,容易产生土体内的遮蔽现象。而细颗粒含量较少的土壤,则由于不易拦阻受水流影响而往下层移动的细颗粒,导致颗粒进入土工布的情形较为严重,容易导致土工布的阻塞。

(4) 级配较为良好之土壤(均匀细数较大),在水力坡降比试验中,可以导致比较稳定之试验成果,而其试验成果亦不易出现变异性大,跳动严重的 GR 值。此点再次印证土壤本身的结构稳定性,影响了水力坡降比试验成效的论点。

(5) 完整的土工布选材评估方法,应包括符合过滤/排水规范的规定、土工布抗阻塞潜能良好以及土壤本身具有良好的抗阻塞潜能(不易产生严重的遮蔽现象)等三个部分。

参考文献:

- [1] Carroll R G. Geotextile Filter Criteria, TRR 916, Engineering Fabrics in Transportation Construction[M]. Washington D C, 1983. 46- 53.
- [2] Holtz R D, Luna J D. Pore Size Distribution of Nonwoven Geotextile[J]. Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, 1989, 12(4): 261- 268.
- [3] Carroll R G Jr. Hydraulic properties of geotextile[A]. Fluent J E, ed. Geotextile Testing and the Design Engineer, ASTM STP 952 [C]. Philadelphia: American Society for Testing Materials, 1987. 7- 20.
- [4] Calhoun C C. Development of Design Criteria and Acceptance Specifications for Plastic Filter Cloths(Technical Report 5- 27- 7)[R]. U S Army Engineer.
- [5] Haliburton T A, Wood P D. Evaluation of the U S Army Corps of engineer gradient ratio test for geotextile performance[A]. Proceedings of the 2nd International Conference on Geotextiles, Las Vegas, Vol II[C]. St Paul, MN: Industrial Fabrics Association International, 1982. 97- 102.
- [6] Chang D T T, Hsieh C, Chen S Y, et al. Review the clogging behavior of soil-geotextile system using a modified gradient ratio test device with implanted piezometers[A]. Goddard J B, Suits L D, Baldwin J S, eds. Testing and Performance of Geosynthetics in Subsurface Drainage, ASTM STP 1390[C]. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials, 2000. 109- 121.
- [7] Bathia S K, Smith J L. Application of the bubble point method to the characterization of the pore size distribution of geotextiles [J]. Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, 1995, 18(1): 94- 105.