

非饱和粘性路基土回弹模量之研究

杨树荣¹, 拱祥生², 黄伟庆¹, 林宏达²

(1. 中央大学土木系, 台湾 桃园; 2. 台湾科技大学营建系, 台湾 台北)

摘要: 利用 MTS 动力三轴试验系统, 进行一系列路基土回弹模量试验, 并于试验后以滤纸法量测土样之基质吸力, 以探讨非饱和粘性路基土之回弹模量特性及基质吸力对回弹模量之影响。研究结果显示重复荷载下之偏应力愈大则回弹模量愈小, 且回弹模量随基质吸力的增加而增加。本文并建立以重复荷载之偏应力及基质吸力预测非饱和粘性路基土回弹模量之模式, 改善传统模式未能考虑含水率对路基之影响。

关键词: 回弹模量; 滤纸法; 非饱和土; 基质吸力。

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2006)02-0225-05

作者简介: 杨树荣(1978-), 男, 台湾省高雄市人, 中央大学工学博士, 主要从事岩土工程与道路工程研究。

Resilient modulus of unsaturated cohesive subgrade soils

YANG Shu-rong¹, KUNG Johnson H S², HUANG Wei-hsing¹, LIN Horn da²

(1. Civil Engineering, National Central University, Taoyuan County, Taoyuan, China; 2. Construction Engineering, National Taiwan

University of Science and Technology, Taipei, China)

Abstract: This study carried out the resilient modulus tests with the MTS cyclic triaxial system. After that, the matric suctions were measured by the filter paper method. Based on the above test results, the characteristics of resilient modulus of unsaturated cohesive subgrade soils were investigated. Experimental results showed that the resilient modulus of unsaturated cohesive subgrade soils reduced with the increase of deviator stress and the decrease of matric suction. A prediction model incorporating cyclic deviator stress and matric suction for unsaturated cohesive subgrade soils was established.

Key words: resilient modulus; filter paper method; unsaturated soils; matric suction

0 前言

回弹模量可以反应路面结构在承受车辆重复荷载下之应力-应变性状, 因此取代 GI、CBR 值, 成为近年来国际上用来评估路面厚度设计的主要参数^[1]。事实上, 路基从一开始建筑到使用年限期间, 大部分皆处于非饱和状态, 因此本文引入非饱和土之观念, 进行非饱和粘性路基土回弹模量特性之研究。

国际间到目前为止, 非饱和土较为被接受的理论是 Fredlund and Morgenstern^[2] 所提出的广义 Mohr-Coulomb 破坏准则, 以多相连体力学之观点, 导入第四相(气水接口)之观念, 并考虑基质吸力之影响, 提出非饱和土单元体可用 3 个应力状态参数(σ, u_a, u_w)中之任两个变量之组合, 定义其应力条件。其中($u_a - u_w$)定义为基质吸力, 而能了解基质吸力便能掌握非饱和土的力学性状。本研究下述之试验及分析模式均考虑了基质吸力对非饱和路基土之力学性状影响。路基根据工程规范之要求会先压实至最佳含水率

(optimum moisture content, OMC)附近, 并要求相对压实度(relative compaction, RC)达到 95%以上。但由于降雨入渗的影响, 在道路使用后 3~5 a 间, 粘性路基土之含水率会由原先之最佳含水率(OMC)逐渐增加至平衡含水率(equilibrium moisture content, EMC), 一般平衡含水率会较塑限增加 20%~30%^[3]。为了符合实际现场之情况, 本文将分别于最佳含水率(OMC)、平衡含水率(EMC)及介于 OMC 及 EMC 之间的过渡含水率(transition moisture content, TMC)条件下, 进行非饱和粘性路基土之动力三轴试验, 以探讨该类路基土的回弹模量。为了解基质吸力对回弹模量之影响, 并于动力三轴试验后, 将土样取出, 以滤纸法量测不同状态下实验后土之基质吸力大小, 以探讨基质吸力与回弹模量之关系。最后并建立基质吸力与回弹模量之关系模式, 以预测非饱和粘性土之回弹模量。

收稿日期: 2005-07-06

1 试验材料与方法

1.1 土基本物理性质及土-水特征曲线

研究选取台湾地区常见之两种粘性土作为研究对象,分别是台湾北部地区常见的红土及第二高速公路竹南段之灰土。两种土的基本物理性质试验结果如表 1 所示,并根据 AASHTO 之分类系统,红土与灰土分别为 A-7-6 与 A-6。两种土的粒径分布曲线如图 1 所示。由图 1 中可知红土的粒径远较灰土为小,土粒径对于非饱和土之基质吸力影响,可由压力锅所做的土-水特征曲线得知,试验结果如图 2 所示。由图 2 中可知,因红土的颗粒较细,红土的保水能力较灰土为高。

表 1 土壤基本物理性质试验结果

Table 1 Basic properties of the soils

土类	G_s	w_L /%	w_p /%	塑性指数 I_p	AASHTO 分类
1	2.71	46	25	19	A-7-6
2	2.67	37	22	15	A-6

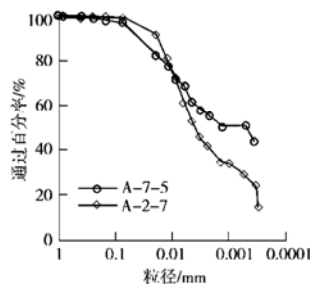


图 1 土壤粒径分布曲线

Fig. 1 Particle-size distribution curve

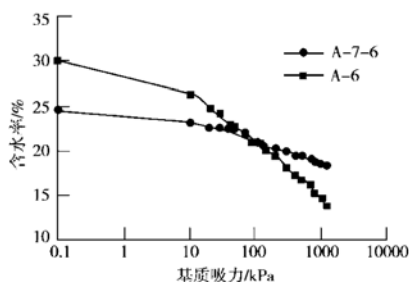


图 2 土-水特征曲线

Fig. 2 Soil water characteristic curve

1.2 土样准备及湿治

土样系以动力压实制作,而土样最佳含水率系以改良压实试验(ASTM D 1557-91)求得。试验结果得知红土 OMC 为 18%,最大干土单位重为 1.76 t/m³;灰土 OMC 为 17%,最大干土单位重为 1.8 t/m³。后续的试样准备即根据上述试验结果压实至 OMC。压实完成后之试样直径为 70 mm,高度为 150 mm。并根据现场观察路基土含水率变化之情形,控制土样之含水

率至预定试验之状态。根据 LTPP 针对 137 处服务中道路的路基进行调查,其中 78 处为粒状土;59 处为粘性土。现场调查结果指出,全部 59 处粘性土的现场含水率皆位在最佳含水率之湿侧(wet side of OMC),且大部分路段之路基处于非饱和状态,而主要分布于 OMC 至 OMC+7%^[4]。

Uzan^[3]指出粘性路基土在开放交通服务后之含水率变化,会由建筑完工之 OMC 逐渐提升至 OMC 湿侧,并达到平衡状态,称为平衡含水率(equilibrium moisture content, EMC)。本研究参考 Yang, et al^[5]湿治土样的方式,提升土样含水率,以模拟路基自建造时之 OMC 状态逐渐发展到 EMC 状态的过程。

1.3 回弹模量试验

本研究依据 AASHTO T292-91 进行回弹模量试验,试验仪器采用 MTS-810 试验系统及 458 控制器,此为油压式闭合回路伺服系统。试验时采用荷重控制的方式施加重复荷载,重复荷载波形为方波,荷载周期为 0.1 s,荷载延时为 1 s,皆满足 T292-91 之要求。根据 AASHTO T292-91,对于粘性土试验系在固定之 21 kPa 围压下,以 21 kPa 或 42 kPa 之偏应力施加 1000 次重复荷载,以完成预处理(conditioning)程序。预处理主要目的在于进行回弹模量试验前,使仪器与土样间接触不良的现象降低,以提升试验准确度并降低差异性^[5]。

接着依序施加 21、34、48、69、103 kPa 等 5 个不同阶段之重复荷载偏应力,并纪录各阶重复荷载的最后 5 次之荷重及回弹变形,作为计算各阶重复荷载下土样之回弹模量的依据。重复荷载及回弹应变分别由动力三轴室内荷重计及 LVDT 加以量测。数据撷取速率为每个频道每秒 200 次,以得到足够之数据计算回弹模量。

1.4 滤纸法量测总吸力及基质吸力

以滤纸法量测土样的基质吸力,具有经济、准确及量测范围大的优点。本法的基本原理是在封闭的恒温环境下,滤纸的含水率与土样中的吸力保持平衡,再藉由滤纸之校正曲线,而得到土样的吸力。滤纸法依据的规范是 ASTM D5298-94,而本研究采用的滤纸型号为 Whatman NO.42,其直径为 5.5 mm。

滤纸之校正曲线系将滤纸与调配好莫耳浓度的氯化钠溶液一同放入密闭的容器中,进行吸力平衡。不同莫耳浓度的氯化钠溶液之吸力,可依据 Kelvin's Equation 计算,如下式所示:

$$h_t = \frac{RT}{V} \ln \left(\frac{P}{P_0} \right), \quad (1)$$

式中, h_t 为总吸力(kPa), R 为理想气体常数 (8.31432 J

$\text{mol}^{-1}\text{K}^{-1}$), T 为绝对温度(K), V 为水之莫耳体积 ($18.016 \text{ m}^3/\text{kmol}$), P/P_0 为相对湿度(RH , %), P 为溶液所造成之蒸汽分压(kPa), P_0 为相同温度状态下, 纯水所产生之饱和蒸汽压(kPa)。

不同莫耳浓度下之蒸汽分压可由拉午耳定律计算求出, 如下式所示:

$$P_A = P_A^0 X_A \quad (2)$$

式中, P_A^0 为纯水饱和蒸汽压, X_A 为溶液中溶剂的莫耳分率, P_A 为溶液之蒸汽压。

大约经过 10 d 后, 滤纸会与氯化钠溶液之蒸汽分压达到吸力平衡。平衡后将滤纸取出, 以精度可达 0.0001 g 的电子秤称重, 计算滤纸含水率, 可得到滤纸不同含水率对应吸力的校正曲线, 如图 3 所示。

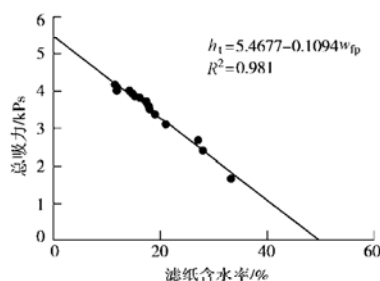


图 3 滤纸校正曲线

Fig. 3 Calibration curve for filter paper

土样基质吸力试验主要透过三张滤纸, 与土样进行接触式试验。吸力平衡过程系将三张迭合的滤纸放入两块切割平整之土样间, 且与土样完全接触, 并藉由中间张滤纸量测土样的基质吸力, 而外面两张滤纸系防止中间张滤纸被土吸附及污染, 而影响量测的准确性。

将滤纸与土样移入密封的瓶罐中, 接着将密封之瓶罐置入保温箱中, 进行至少 10 d 的吸力平衡过程。待吸力平衡完成后, 利用有效位数达 0.0001 g 电子磅秤, 精确量测滤纸含水率, 再利用滤纸校正区线, 求出对应状态之基质吸力。

2 试验结果讨论

2.1 回弹模量

为模拟非饱和粘性路基土自建筑完成到使用服务阶段之含水率状态, 本研究分别以 OMC 模拟路基刚施工完成之含水率状态、EMC 模拟使用服务长时间之平衡含水率状态及 TMC 模拟路基含水率于建筑完成后至平衡阶段时之过渡状态等 3 个含水率, 并进行回弹模量试验。

图 4 为红土于不同含水率状态下的回弹模量试验结果。由图 4 中可知, 在 OMC 状态, 回弹模量对重

复荷载偏应力之影响并不敏感, 然而于 TMC 及 EMC 状态, 回弹模量均随重复荷载偏应力的增加而降低。从 OMC 增加至 TMC 状态, 回弹模量降低达 50%~80%之间。TMC 升高至 EMC 状态, 回弹模量降低量则不明显。

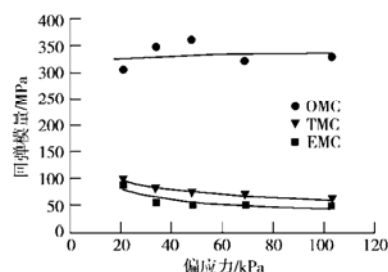


图 4 红土 (A-7-6) 回弹模量试验结果

Fig. 4 Variation of resilient modulus of A-7-6 soil

灰土在不同夯实度及含水率状态下, 回弹模量试验结果如图 5 所示。不论含水率高低, 回弹模量皆随重复荷载的偏应力增加而降低。与红土类似, 从 OMC 至 TMC 状态, 回弹模量亦急遽的降低, 比例介于 60%~90%之间。不论灰土及红土, 含水率对回弹模量之影响皆较重复荷载之偏应力显着。

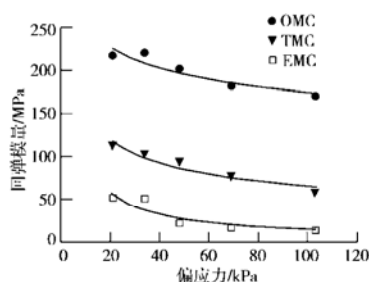


图 5 灰土 (A-6) 回弹模量试验结果

Fig. 5 Variation of resilient modulus of A-6 soil

2.2 基质吸力

回弹模量实验后, 将土样以滤纸法进行基质吸力之量测, 红土及灰土基质吸力量测结果如图 6 所示。由图 6 中可知, 不论红土与灰土, 土之含水率愈高, 基质吸力愈低, 且由 OMC 增加至 TMC 时, 基质吸力急剧降低, 但 TMC 增加至 EMC 时, 基质吸力下降趋于缓和, 此可解释为何红土及灰土之回弹模量由 OMC 提升至 TMC 时会迅速下降, 但 TMC 升高至 EMC 状态, 回弹模量降低量则不明显。此外于 OMC 状态下, 红土之基质吸力较灰土高出许多, 但于 TMC 及 EMC 时相差不远。

进一步探讨红土与灰土于不同含水率下之基质吸力与回弹模量之关系, 而基质吸力对应偏应力 103 kPa 时之回弹模量, 结果如图 7 所示。由图 7 中可知, 基

质吸力与回弹模量之关系则呈正相关,且相关性甚高,即基质吸力越大则回弹模量越大。显示基质吸力越大能够使颗粒间的键结更强,进一步提升了回弹模量。

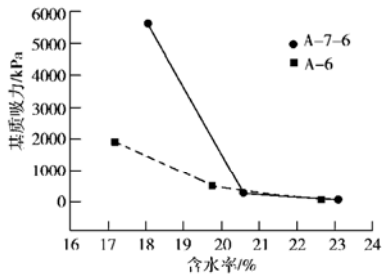


图 6 红土与灰土基质吸力量测结果

Fig. 6 Variation of matric suction of A-7-6 soils and A-6 soils

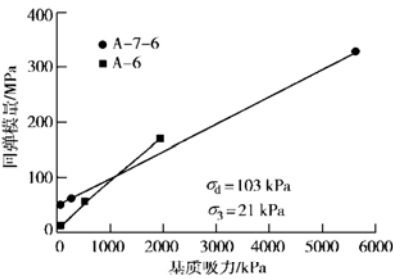


图 7 红土与灰土之基质吸力与回弹模量之关系图

Fig. 7 Variation of matric suction with resilient modulus for A-7-6 soils and A-6 soils

2.3 路基土回弹模量之预测模式

AASHTO T292-91 建议采用偏应力模式预测粘性路基土之回弹模量,如下式所示:

$$M_r = k_1 (\sigma_d)^{k_2}, \tag{3}$$

式中, M_r 为回弹模量, σ_d 为重复荷载偏应力, k_1 及 k_2 为材料参数。

式(3)反映出交通载重对路基回弹模量所造成的影响,但模式并未考虑含水率或基质吸力对回弹模量之影响。根据 Fredlund and Morgenstern^[2] 提出之非饱和土理论,非饱和土之净正向应力及基质吸力为决定非饱和土力学性状的重要变量。本研究根据偏应力模式,并引入基质吸力之概念,提出偏应力-基质吸力模式(deviator stress - matric suction model)作为新的预测模式,如下式所示:

$$M_r = k_3 (\sigma_d + \chi \psi_m)^{k_4}, \tag{4}$$

式中, M_r 为回弹模量, σ_d 为重复荷载偏应力, k_3 及 k_4 为材料参数, ψ_m 为基质吸力, χ 为 Bishop 饱和度参数,对干燥土而言 $\chi = 0$, 而饱和土之 $\chi = 1$ 。

偏应力-基质吸力模式中的重复荷载偏应力反应了净正向应力之影响; $\chi \psi_m$ 则考虑了基质吸力之贡献。同时当土接近饱和时,基质吸力对回弹模量的影响较

重复荷载偏应力为小。当土在低饱和度时,基质吸力对回弹模量的影响则较重复荷载偏应力为大。对于 χ 之求取, Loret and Khalili^[6] 认为当土的基质吸力 ψ_m 小于进气吸力值 ψ_e 时,土可视为饱和状态,满足 Terzaghi 有效应力式,因此, $\chi = 1$ 。对于不饱和土壤, Loret and Khalili^[6] 针对 14 种土进行非饱和土三轴剪切试验,土种类包含粉土、砂质粘土及粘土等。试验结果发现 χ 与 ψ_e / ψ_m 具有良好相关性,如下式所示:

$$\chi = (\psi_e / \psi_m)^{0.55}, \tag{5}$$

式中 χ 可以视为基质吸力之权重,意义上是指基质吸力一部份贡献至有效应力,而并非全部。图 8、9 分别显示由压力锅试验所求得之红土与灰土之进气吸力值 ψ_e 。试验结果可得红土进气吸力值为 20 kPa; 灰土进气吸力值为 7 kPa,此结果亦证实红土持水能力较灰土高。

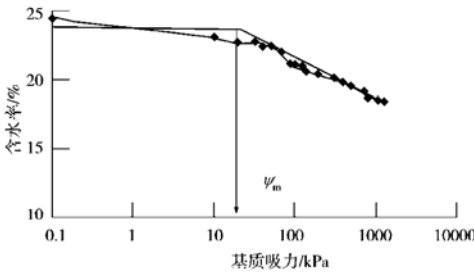


图 8 红土进气吸力值量测结果

Fig. 8 Air entry value of A-7-6 soil

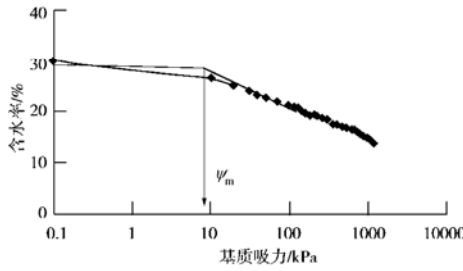


图 9 灰土进气吸力值量测结果

Fig. 9 Air entry value of A-6 soil

表 2 列出红土与灰土之偏应力-基质吸力模式参数值,由表中可看出偏应力-基质吸力模式呈现甚佳之回归结果($R^2 > 0.7$)。

表 2 偏应力 - 基质吸力模式之材料参数

Table 2 Parameter for deviator stress-matric suction model			
土类	k_3	k_4	R_2
A-7-6	5.83	0.467	0.918
A-6	0.99	0.709	0.757

偏应力-基质吸力模式能更适度反应各个影响参数且具有物理意义。根据回弹模量试验结果,以偏应力-基质吸力模式模式预测之回弹模量与试验结果比

较如图 10 所示。此外, 藉由引入基质吸力至模式中, 可以了解季节性含水率变化对路基土壤回弹模量之影响。

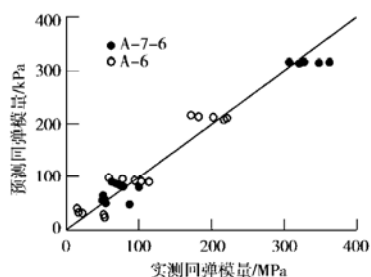


图 10 回弹模量预测与试验结果比较图

Fig. 10 Predicted versus measured resilient modulus using deviator stress-matrix suction model

3 结 论

本研究透过对非饱和粘性路基土之服务期间实际含水率状态的模拟、回弹模数试验、滤纸法量测基质吸力及回弹模式预测模式的建立, 已成功掌握路基土壤回弹模量随着使用期间环境变化的影响。其中含水率及重复荷载偏应力均是控制回弹模数的因素, 且含水率影响较大。此外, 本研究提出同时考虑净正向应力及基质吸力之回弹模数预测模式, 具有不错之预测结果。

致 谢: 感谢台湾国科会计划 (NSC-92-2211-E-008-053 及 NSC-93-2211-E-011-011) 给予经费支持, 使得研究工作得以顺

利推动。此外, 硕士班研究生戴裕聪先生、林建良先生及蔡孟堃先生对于本文的协助亦一并致谢。

参考文献:

- [1] American Association of State Highway and Transportation Officials. T292-91 Standard Method of Test for Resilient Modulus of Subgrade Soils and Untreated Base/Subbase Materials[S]. 1992.
- [2] FREDLUND D G, MORGENSTERN N R, Stress state variables for unsaturated soils[J]. Geotechnical Division, 1978, **GT11**, 1415 - 1416.
- [3] UZAN J. Characterization of clayey subgrade materials for mechanistic design of flexible pavements[C]// In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1629, TRB, National Research Council. Washington, 1998, 188 - 196.
- [4] QUINTUS H V, KILLINGSWORTH B. Analyses relating to pavement material characterizations and their effects on pavement performance[M]// Publication FHWA-RD-97-085, FHWA, U S Department of Transportation, 1998.
- [5] YANG S R, HUANG W H, TAI Y T. Variation of resilient modulus with soil suction for compacted subgrade soils[C]// 84th Annual Meeting of Transportation Research Board. Washington, 2005.
- [6] LORET B, KHALILI N. An effective stress elastic-plastic model for unsaturated porous media[J]. Mechanics of Materials, 2002, **34**: 97 - 116.

请订阅《岩土工程学报》

《岩土工程学报》创办于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表我国理论和实践水平的论文、报告、实录等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国有自然科学基金项目及其它重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先刊用这些稿件。主要栏目有论文、短文、工程实录、焦点论坛、学术讨论和动态简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续 4 版确认为核心期刊, 并在建筑类核心期刊中排列首位; 本刊被收录为国家科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊), 并被评为“百种中国杰出学术期刊”; 本刊被“中国科技论文与引文数据库”、“中国期刊全文数据库”和“中文科技期刊数据库”

等多个国内重要的数据库收录, 并可在《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》、万方网和重庆维普网全文检索; 本刊被美国工程索引 EI 网络版等国际检索系统收录。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊 2005 年起为月刊, A4 开本, 双栏排版, 120 页, 每月中旬出版, 每期定价 15 元, 全年 180 元。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000 - 4548, 国内统一刊号 CN 32 - 1124/TU, 国内发行代号 28 - 62, 国外发行代号 BM 0520。

欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购。编辑部订购地址: (210024) 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 联系电话: (025) 85829534, 85829553; 传真: (025) 85829555; E-mail: ge@nhri.cn。

(本刊编辑部)