

文章编号: 1000-7598 (2013) 10-3028-05

一种装配式新型张力计的研制

陈 锐¹, 刘 坚², 吴宏伟^{3,4}, 乔 劼¹

(1. 哈尔滨工业大学 深圳研究生院深圳市城市与土木工程防灾减灾重点实验室, 广东 深圳 518055;

2. 河海大学 岩土力学及堤坝工程教育部重点实验室, 南京 210098;

3. 广州市香港科大霍英东研究院, 广州 511458; 4. 香港科技大学 土木及环境工程学系, 香港)

摘 要: 土体干湿过程引发的岩土工程问题已逐渐受到重视。通常采用张力计量测 80 kPa 以内的土体吸力, 并将其应用于边坡失稳等岩土工程问题的分析中。然而, 传统张力计由于内部腔体体积过大且结构复杂, 造成张力计难以饱和, 吸力量测时反应时间长, 并易发生汽化, 严重影响其可靠性和灵敏性。为弥补传统张力计的设计缺陷, 提出了一种装配式新型张力计。该张力计内腔结构简单且体积小。饱和前先拆分张力计再分别饱和其主要部件, 最后重新装配。此设计简化了饱和程序并提高了效率。通过对比传统张力计和新型张力计的性能, 证实了新型张力计具有更强的汽化持久性, 其吸力量测的灵敏性和可靠性得到了显著的提高。标定试验表明, 相比于传统张力计, 新型张力计的灵敏性提高了 90%。测量 -80 kPa 的孔隙水压力时, 新型张力计的平衡时间为 1.5 min, 仅占传统张力计反应时间的 10%。相同的测量条件下, 传统张力计的测量误差为 30%, 而新型张力计的测量误差仅为 0.7%。

关 键 词: 吸力量测; 张力计; 灵敏性; 可靠性

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

Development of a new fabricated tensometer

CHEN Rui¹, LIU Jian², NG C W W^{3,4}, QIAO Jie¹

(1. Shenzhen Key Laboratory of Urban and Civil Engineering for Disaster Prevention and Mitigation, Shenzhen Graduate School of

Harbin Institute of Technology, Shenzhen, Guangdong 518055, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and

Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Fok Ying Tung Research Institute, Hong Kong University of Science and Technology,

Guangzhou 511458, China; 4. Department of Civil and Environmental Engineering, Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong, China)

Abstract: Ever more attention has been paid to geotechnical problems induced by wetting and drying of soils recently. Suction up to 80 kPa, measured by tensometers, has been used for analyzing geotechnical problems such as slope instability during wetting and drying. However, existing tensometer generally has a long response time and is easy to cavitate since it has a large volume of water reservoir and complicated internal structure. These drawbacks affect the sensitivity and reliability of a conventional tensometer seriously. In order to overcome these shortcomings, a newly developed fabricated tensometer is introduced. This type of new tensometer with fabricated structure has a simple internal structure and a small volume of water reservoir. At the same time, a drainage hole is introduced to prevent large excess pore water pressure during the process of reassembling. More importantly, its saturation procedure is simple and efficient since the high air-entry ceramic disc and pore pressure transducer of this new tensometer can be disassembled for saturation separately and effectively. After the saturation of the high air-entry ceramic disc and pore pressure transducer, these key components are reassembled together as a tensometer ready for use. As compared with a conventional tensometer, the sensitivity and reliability of this new tensometer are justified. The results of calibration test show that the sensitivity of the new tensometer increases by 90% by comparing with the conventional tensometer. In the case of measuring the pore water pressure of -80 kPa, the equilibrium time required for this new tensometer is only 1.5 minite, about 10% of that for the conventional tensiometer. Moreover, the reliability of the new tensometer is better than that of the conventional tensometer. The measurement error of the conventional tensiometer is about 30%, when measuring the pore water pressure of -80 kPa. Subjected to the same conditions, the new tensometer shows a measurement error of only 0.7%.

Key words: suction measurement; tensometer; sensitivity; reliability

收稿日期: 2013-04-28

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (No. 50909030); 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 (No. 2012CB719805); 国家自然科学基金项目 (No. 51279049); 江苏 2012 年度普通高校研究生科研创新计划项 (No. CXZZ12_0232)。

第一作者简介: 陈锐, 男, 1978 年生, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事非饱和岩土力学及应用方面的研究工作。E-mail: chenrui1005@hotmail.com

1 引言

气候变化直接影响着地球表面水量平衡，降雨入渗会导致土体含水率升高，吸力减小；而蒸发蒸腾引发土体失水，吸力增大^[1]。土体中吸力的变化是引发了一系列岩土工程问题的主要原因^[2]，如土体湿化引起的沉降和土体干化引发的裂缝等。目前土体干湿过程引发的工程问题已逐渐受到重视。吸力作为非饱和土干湿过程的应力状态变量，已被应用于边坡分析^[3-4]、浅基坑开挖变形分析^[5]以及公路沉降分析^[6]等岩土工程问题中。与非饱和土理论快速发展相比，用于土体吸力量测的设备和技术，目前发展缓慢，仍然存在很多缺陷和困难。

量测吸力的方法一般分为两种：间接测量法和直接测量法。间接测量法包括热传导探头、时域反射计、电容式吸力仪和滤纸法等^[2]。虽然间接测量法的量测范围较大，但都需要进行标定，易受外界影响，平衡时间较长且准确度不高，限制了其使用。直接测量法主要是使用张力计对负孔隙水压进行量测^[7]。目前常用的张力计主要是 Soil Moisture 公司生产的张力计^[8]（如 2100F 型）。此类型张力计的内部腔体体积通常较大，内部传递张力的水体经过的管线较长，因此，内部水体受到的阻滞力较大，容易造成张力计在吸力量测时反应时间长，并且容易发生汽化，严重影响其使用可靠性和灵敏性。另外，传统张力计的饱和过程复杂，对操作者要求高。而饱和效果对张力计的可靠性和灵敏性影响很大。在使用过程中，内部传力水体不仅受土体温度和压力影响，还受外界条件（大气温度等）影响，影响因素复杂。

基于张力计现有的发展情况，为了弥补传统张力计设计原理的缺陷，陈锐等^[9]提出了设有隔离腔的装配式新型张力计和其相应的饱和方法。本文以新型张力计为研究对象，阐述其工作原理及使用方法，并通过比较传统张力计和新型张力计的吸力量测结果，评价新型张力计的可靠性和灵敏性。

2 新型张力计的设计及使用

2.1 新型张力计的设计原理

通常情况下水的受拉强度很低，当水压（仪表压力）达到一个负的大气压即绝对压力为 0 时，水就会发生汽化。以传统的张力计 Soil Moisture Probe 2100F 为例，由于采用双层细管引导传力水体，因此，管壁的摩阻力会延长张力计的反应时间。并且受力水体的体积较大，使张力计更容易发生汽化。

De Benedetti^[10]指出：水汽化的原因是受到张拉的水通常处于一种亚稳定状态。也就是说原来内部存在很多小气泡的水由于内部气体容易膨胀而常常处于不稳定状态，一旦这种亚稳定状态被打破，水中的气泡就会很快膨胀贯通，致使内部水体变得不连续而无法继续进行水张力的测量。

张力计的测量效果很大程度取决于内部传力水体的状态。减小传力水体体积，是一种缩短反应时间的有效方法，更能减缓张力计在测量范围以内汽化^[11]。然而，如果仅仅减小张力计的腔体体积，会给张力计的饱和带来很大困难，例如，目前高量程张力计普遍采用微小腔体，导致在提高吸力量测范围的同时，需要一套非常复杂的饱和装置及步骤^[12]。为了克服减小腔体引起的张力计饱和问题，陈锐等^[9]提出了把张力计的结构设计为装配式，以简化饱和过程，提高饱和效率。

如图 1 所示，新型张力计包括进气值为 1Bar 的陶土头、顶盖、排水孔、O 型圈、压力传感器芯体、尾部盖板、电缆和隔离腔。陶土头用环氧树脂固定在顶盖的顶部。在装配时，压力传感器芯体插入顶盖内部，并用尾部盖板固定压力传感器芯体，连接处采用 O 型圈密封；压力传感器芯体通过电缆将信号传递到数据采集仪进行数据采集^[9]。前述张力计的各主要部件均可拆分，在无气水中进行装配，能确保无气水充满张力计内部腔体。

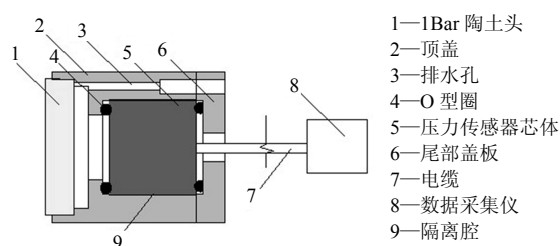


图 1 新型张力计结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the new tensiometer

新型张力计内腔体积仅为 0.6 cm^3 ，远小于传统张力计的传力水体。此张力计设有隔离腔体，降低了土压力对张力计量测的影响。采用压力传感器进行孔压的量测，不仅可以量测正、负孔压，而且整个张力计埋入土体中，能有效避免外界条件对读数系统的影响。由于陶土板渗透系数低，当张力计在水中进行装配时，内部腔体会产生较大的正孔压，可能会损坏陶土板及其与顶盖的黏结，还会超过压力传感器的量程，对其产生损害。因此，在顶盖增设了一个排水孔，以快速消散张力计装配时产生的

正孔压,起保护陶土板和压力传感器的作用。

2.2 新型张力计的饱和及使用方法

新型张力计适用范围较广,可用于室内试验的吸力测量,也可用于工程现场。新型张力计的使用过程简单,易于操作,所需辅助设备简单,并且可调整其外形尺寸,以满足特殊需要。此张力计饱和过程简单,其步骤如下:

第1步:将新型张力计拆分,把所有部件置于封闭的真空饱和缸中,使真空饱和缸中的无气水浸没张力计的所有部件,抽真空 2~3 h;

第2步:在饱和缸的无气水中将压力传感器安装至顶盖的中空腔室,并且在顶盖底端安装尾部盖板进行密封及固定,然后将排水孔用螺栓拧上密封,完成张力计的装配;

第3步:将装配好的张力计继续浸没于无气水中,再次密封饱和缸并抽真空 30 min;

第4步:将饱和好的张力计与数据采集仪 8 连接,安放于待测位置,即可量测土体的吸力。

在张力计使用过程中,埋设条件和接触紧密程度等因素也会影响其测量结果。

(1) 在埋设过程中,张力计往往会受到土体压力的影响,导致读数误差较大。而新型张力计适用条件广,对埋设条件的要求低,隔离腔体的设计能有效地避免土体压力对传感器的影响,提高了量测精度;

(2) 张力计一般要求陶土头和土体的紧密接触。对于细粒土(如黏土、粉土),张力计需压在土体之上;对于粗粒土(如砂土和砾石),张力计可以同时陶土头和土体之间涂抹泥浆,以增加接触面积。值得注意的是,本文提出的新型张力计的陶土头可根据情况将平板式陶土头更换成中空圆柱状陶土头。

2.3 新型张力计的标定

本文采用负水压对已饱和的新型张力计进行标定,其中负压通过水头差提供。对新型张力计采用先加压后降压的标定过程,结果如图 2 所示。横坐标代表张力计显示的电压信号值 v ,纵坐标代表标定所使用的压力值 P 。在标定范围内,两者线性度高。在加压与卸压过程中,新型张力计的读数稳定性较好,可靠性高,误差仅为 $\pm 0.3\%$ 。

值得注意的是,在此标定过程中,从加压到张力计读数稳定的时间都很短,最长时间仅有 20 s,说明了新型张力计的反应时间较短。其原因可能包括以下两方面:

(1) 新型张力计内腔水体的体积很大程度地减小;

(2) 提供负压的介质为水体,而不是土体,大大加速了张力计内部的水压传递。

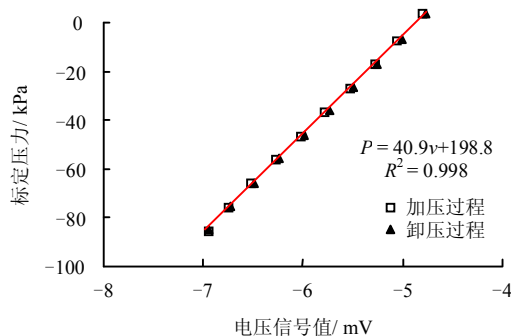


图2 新型张力计标定曲线

Fig. 2 Calibration curve of the new tensometer

2.4 新型张力计的汽化特性

新型张力计的汽化特性通过自由蒸发试验来展示。将已饱和的新型张力计放在干燥空气中自由蒸发,观测其读数变化。由于干燥空气的相对湿度很小,空气所提供的吸力可假设为无穷大,因此,可用来测试新型张力计的汽化持久性能。

新型张力计的汽化持久性能试验结果如图 3 所示,在表面自由蒸发的情况下,张力计的吸力值在 30 min 内上升至 100 kPa,之后读数继续上升达到 110 kPa。读数在峰值处持续约 140 min,随后会出现波动式浮动,浮动数值在 100~110 kPa 之间,最后张力计在 700 min 时,完全汽化,读数降为 0。

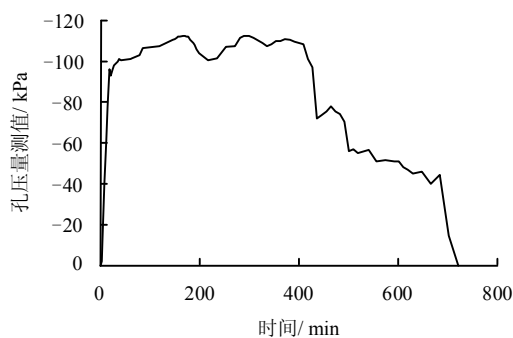


图3 自由蒸发时张力计的读数响应

Fig.3 Readings of the new tensometer during evaporation

3 新型张力计的性能检验

为了进一步验证新型张力计的性能,本文采用传统张力计与新型张力计同时量测同一土体的吸力,比较其灵敏度和可靠性。其中土体的吸力预先采用吸力校准系统施加,其装置如图 4 所示。首先装配吸力校准设备,对陶土板饱和,并排除陶土板

和底座之间空隙的气泡。其次放入土体，所用土体高度为 20 mm，直径为 80 mm。随后对系统抽真空，调整真空开关，改变土体孔压为基准孔压。待土样吸力达到平衡后，将新型张力计和传统张力计埋设在土体中，监测两者的读数变化。本文采用的土样基准孔压为 0、-30、-80 kPa。使用的传统张力计为 Soil Moisture Probe 2100F，并严格按其建议方法进行饱和^[8]。饱和后对饱和效果进行验证：传统张力计饱和完成后将其置于空气中，将陶土头土体擦干，如果读数有大幅度的变化，就说明其饱和效果较好。

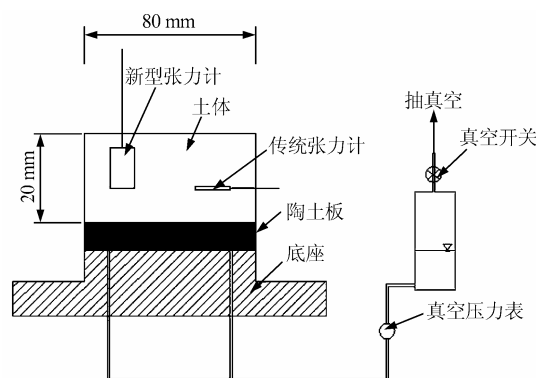


图 4 吸力校准系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of suction calibration system

3.1 灵敏性比较

图 5 展示了基准孔压为 -30 kPa 下传统张力计和新型张力计的孔压量测数据。传统张力计读数变化缓慢，在 0.75 min 时传统张力计读数开始变快，在 2.5 min 时读数达到最大值，之后保持稳定。可见，传统张力计的反应时间约为 2.5 min。而新型张力计在安放于土体后反应较快，在 0.8 min，其读数就达到稳定。相比于传统张力计，其反应时间缩短了约 70%。

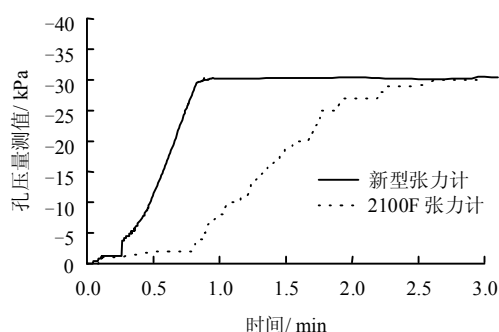


图 5 张力计量测的孔压读数变化（基准孔压为 -30 kPa）

Fig.5 Development of readings from tensometers for pore-water pressure measurement under an applied pore water pressure of -30 kPa

图 6 为基准孔压在 -80 kPa 时张力计的读数变化。传统张力计读数变化较缓，大约在 7 min 时开始显著增加，在 15 min 时读数达到稳定。而新型张力计在初始时反应很快，在 1.5 min 时达到稳定值，与传统张力计相比其反应时间缩短了约 90%。值得注意的是，试验过程中，传统张力计的读数偏小且延迟性大，稳定时的孔压量测值没有达到基准孔压值。这可能由于土体吸力较大，导致传统张力计在吸力量测初始阶段已经发生汽化。

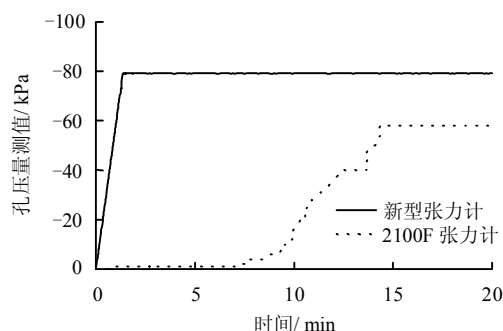


图 6 张力计量测的孔压读数变化（基准孔压为 -80 kPa）

Fig.6 Development of readings from tensometers for pore-water pressure measurement under an applied pore water pressure of -80 kPa

图 7 为两种张力计的反应时间与基准孔压的关系。其中 x 轴代表土体基准孔压， y 轴代表张力计达到平衡时的反应时间。张力计的反应时间与基准孔压近似成线性关系，其斜率可用来评价张力计的灵敏度性能。新型张力计所对应曲线斜率较缓，其斜率仅为传统张力计的约 10%。这意味着，在同一基准孔压下，新型张力计灵敏度更高，比传统张力计提高了 90%。

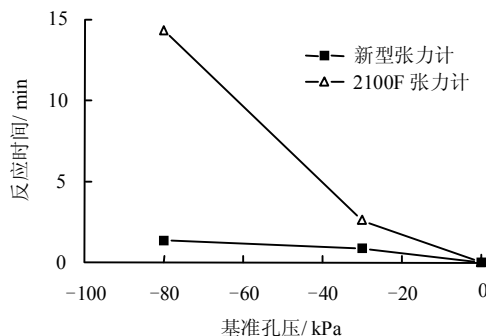


图 7 张力计反应时间与基准孔压的关系

Fig.7 Relationship between the applied pore-water pressure and the response time of tensometers

3.2 可靠性比较

张力计稳定时读数的可靠性是张力计的另一重

要指标。图 8 为两种张力计在稳定时的可靠性结果。在基准孔压较高时 (-30 kPa), 两种张力计的准确度均很高。当基准孔压减小时 (-80 kPa), 传统张力计的读数偏差较大, 偏大了约 30%。而新型张力计的读数较为准确, 仅偏差了 0.7%, 与传统张力计相比, 其可靠性提高了 98%。这可能由于传统张力计已汽化。试验结束后发现传统张力计内部存在较多气泡, 将陶土头放入水中, 气泡不消失。这说明了传统张力计在试验中已汽化。

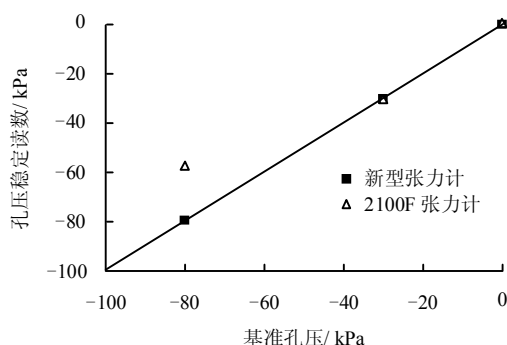


图 8 张力计稳定时读数的可靠性
Fig.8 Reliability of the new tensiometer

4 结 论

(1) 由于新型张力计减小了内腔水体的体积, 明显提高了灵敏性和可靠性。而且新型张力计的饱和程序简单, 易于操作。

(2) 新型张力计灵敏度比传统张力计提高了 90%。在测量 -80 kPa 的孔压时, 新型张力计所需的平衡时间仅为 1.5 min, 约为传统张力计的 10%。

(3) 新型张力计稳定后读数的可靠性比传统张力计高。在测量 -80 kPa 的孔压时, 传统张力计的读数偏差较大, 偏大了约 30%, 而新型张力计的读数较为准确, 仅偏差了 0.7%。

参 考 文 献

- [1] YASUHARA K. Recent Japanese experiences with lightweight geomaterials[C]//Proceedings of the International Workshop on Lightweight Geo-Materials. Tokyo: Japanese Geotechnical Society, 2002: 35—60.
- [2] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. New York: John Wiley and Sons Inc, 1993.
- [3] NG C W W, SHI Q. A numerical investigation of the stability of unsaturated soil slopes subjected to transient seepage[J]. *Computers and Geotechnics*, 1998, 22(1): 1—28.
- [4] NG C W W, WANG B, TUNG Y K. Three-dimensional numerical investigations of groundwater responses in an unsaturated slope subjected to various rainfall patterns[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2001, 38(5): 1049—1062.
- [5] 廖红建, 姬建. 深基坑开挖中饱和-非饱和土体渗流-沉降的耦合分析[J]. *应用力学学报*, 2008, 4: 637—641.
- [6] 罗军. 旧路拓宽粉土路基的水分运移及差异沉降形成机理研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2010.
- [7] HENDRICKX J M H, NIEBER J L, SICCAMA P D. Effect of tensiometer cup size on field soil water tension variability[J]. *Soil Sci. Soc. J.*, 1994, 58: 309—315.
- [8] SOIL Moisture equipment corp. Operating instructions[M]. [S. l.]: [s. n.], 2009.
- [9] 陈锐, 刘坚, 乔劼, 等. 用于测量土中水的水势的张力计及其组装方法: 中国, 2012105540257[P]. 2012.
- [10] DE BENEDETTI P G. Metastable liquids[M]. [S. l.]: Princeton University Press, 1996.
- [11] MAHLER C F, PACHECO A C, SOUZA H G. Development of an automatic tensiometer in laboratory using a mini-lysimeter[C]//3rd Int. Conf. on Unsaturated Soils. Brazil: [s. n.], 2002.
- [12] 陈锐, 陈中奎, 张敏, 等. 新型高量程张力计在吸力量测中的应用[J]. *水利学报*, 44(6): 743—747.

CHEN Rui, CHEN Zhong-kui, ZHANG Min, et al. Application of a high-capacity tensiometer for direct measurement of suction[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 44(6): 743—747.