

新型土质材料特性快速检测技术—— 落球检测技术及其在道路工程方面的应用

黄新 郭晔

(北京航空航天大学土木工程系, 100083)

摘要: 本文介绍了一种新型的土质材料特性快速检测技术——G-STAB 系统(简称落球检测技术), 该技术以 Hertz 接触理论为基础, 通过测定落球与地基的接触时间, 自动解析软件即可算出测试对象的变形模量、地基系数、最大压缩量等指标。大量的室内土槽试验和现场实测充分证实该方法的测试精度, 以及与平板载荷试验结果的良好对应关系, 并且能够有效地指导填土过程中材料级配、含水量和碾压次数的优化。落球检测技术快速有效、费用低廉的特点, 能够很好地满足道路工程填土施工质量的全面和实时控制。

关键词: 落球检测技术; Hertz 接触理论; 平板载荷试验; 碾压次数; 填土施工

1. 前言

在道路填土工程与路基工程施工中, 对碾压质量等进行严格有效的质量管理是保证道路质量的重要环节^[1]。目前我国使用的检测技术和设备费时费力、取样率很低, 检测结果不能准确地反应道路施工的整体质量。另一方面, 施工质量的管理不仅仅是交工验收时的质量检测, 更重要的是施工过程中的质量控制。由于缺少快速有效、费用低廉的检测技术, 很难实现对施工过程的实时检测。为有效解决大面积施工现场的施工质量过程控制, 开发快速有效的检测技术是保证道路工程施工质量的亟待解决的重要课题。

由日本株式会社セントラル技研(东京)开发的土质材料特性快速检测系统 G-STAB(简称落球检测技术)能快速、精确地检测出各类土质材料(粘土、粉砂、砂质土、砂砾、改良土等)的变形性能等力学特性, 且该技术的测试作业非常简单, 仅使球体落下即可, 解析计算全都是自动进行, 工作效率极高(一点数秒左右)。因此, 少数人就可管理大面积的施工现场, 对道路路基填土、改良土等的施工质量实施有效地实时检查与控制。

该技术在日本被道路、环境部门和电力公司等机构广泛采用。在中国, 四川升拓检测有限责任公司已获得与该技术有关的全部权利, 并开始生产该技术的相关设备。

2. 落球检测技术基本原理

落球检测技术的设备构成见图 1，现场测试操作十分简单，由图 2 可以看到将落球在一定高度自由下落，附着在落球顶端的加速度传感器会自动采集球体与地基材料的接触信息，并通过特定的数据解析软件获取该落点土质的力学性能。

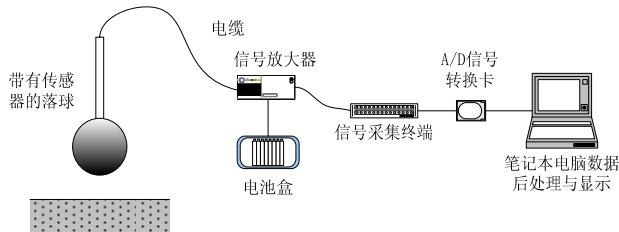


图 1 检测系统示意图



图 2 落球检测现场

该技术以 Hertz 接触理论为基础，由式 (1) 可以看到通过测定球体（均质弹性体）落下时与地基材料的接触时间，即可求得地基材料的变形模量。而且地基材料越坚固，接触的时间越短^[2,3]，见图 3。

$$T_c = 4.53 \left[\frac{(\delta_1 + \delta_2) m_1}{\sqrt{R_1 v_0}} \right]^{2/5} \quad (1)$$

式中， T_c 为接触时间 (s)； m_1 为球体质量 (kg)； R_1 为球半径 (m)； v_0 为球体和地基接触的瞬间速度 (m/s)， $v_0 = \sqrt{2gH}$ ， H 是球的下落高度 (m)； $\delta = (1 - \mu^2)/E\pi$ ，下标 1：球，2：地基， E 为变形模量 (N/m^2)， μ 为泊松比，地基材料压缩时的泊松比大致为 0.2 (砂质土) ~ 0.45 (粘性土)，这时 δ 的变化大约是 15%。因此，对同一种土预先输入特定的泊松比，即可以忽略其对接触时间的影响。

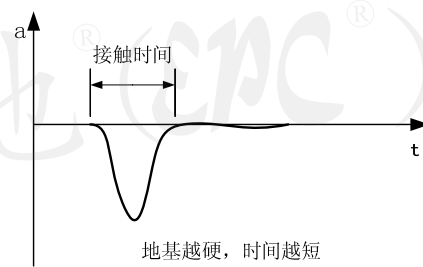


图 3 Hertz 接触理论示意

Hertz 接触理论以弹性体为对象，考虑到地基材料的特性本技术进行了相应的修正。

根据用上述得到的变形模量，可以进一步换算出地基系数 K_{30} 。此外本技术通过对加速度信号的积分，还可以便捷地获得落球陷痕直径和最大压缩量等指标。

3. 检测试验结果

通过与平板载荷试验的对比，得到图 4 所示的两种检测技术测得的变形模量之间的关系。试验土质包括：粘土、粘土混杂沙、砂质土、砂砾、细粒粉混杂砂质砾岩、细粒粉混杂砾岩等（室内试验），以及具有不同土质特性的河堤工程（工程 A）和道路工程（工程 B~E）

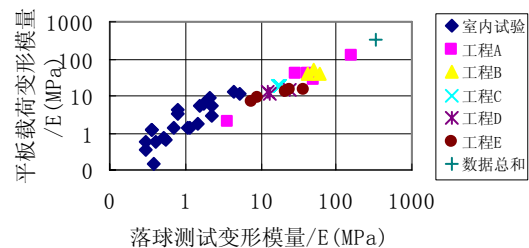


图 4 落球试验与平板载荷试验对比

等实际工程。

可见，两种方法所测的变形模量之间具有较好的对应关系和测试精度，特别是在实际工程中数据吻合得很好。

4. 道路工程应用

通过在道路工程中的现场检测证实，本技术所测得的变形模量能够敏感地反映了填土的碾压效果，有效地指导碾压次数的最优化。

对于级配良好的土质材料(例如工程 B 和工程 E 的 a 段)，随着碾压次数的增加，填土的密度不断增加，增加碾压次数可以有效的增加填土的密度，详见图 5, 6 和 7 (下文图 5~图 10 中， μ 表示测试数据的平均值， σ 表示测试数据的标准方差)。而对于级配不良的的土质材料 (例如工程 C)，则碾压的效果不明显。提高碾压次数，并不能提高的密实程度，如图 8 所示。

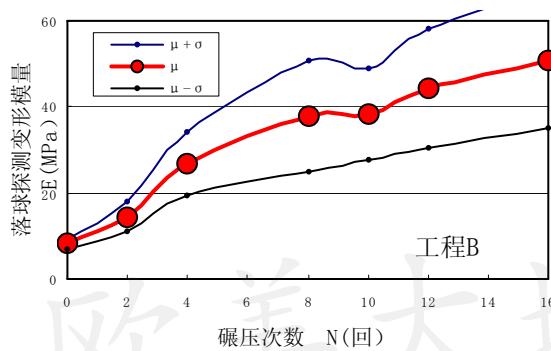


图 5 细粒粉混杂砂质砾岩 (软岩石:凝灰岩砾岩)

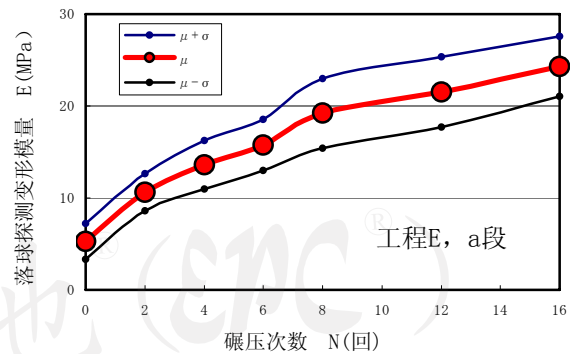


图 6 粘土 (CL)

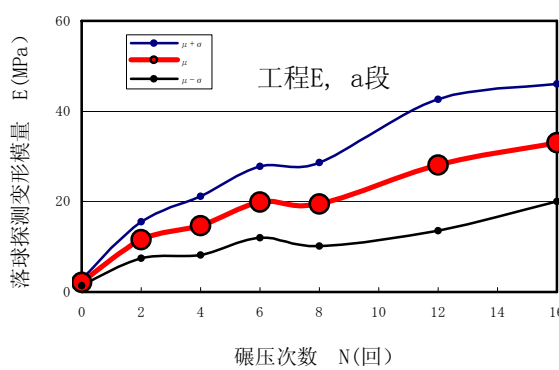


图 7 碎石 (RC 碎石)

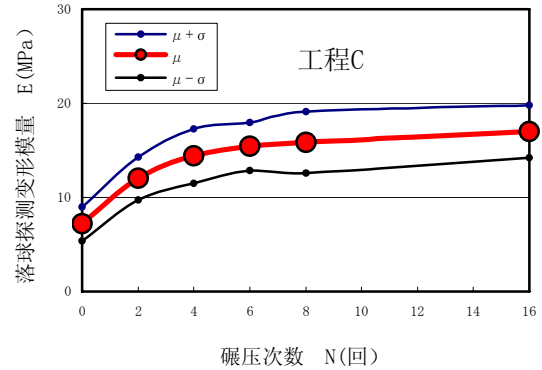


图 8 细粒粉混

即使土质材料特性相同，由于含水量不当造成的碾压效果不良的现象，采用落球技术也可以充分反映出来。例如：工程 E 地段 b 的土质条件与地段 a 大体上相同，但由于含水量不同，碾压效果并不显著，增加碾压效果，不能提高填土的密度，如图 9 所示。

此外，落球探查结果和修正 CBR 中间，有良好的相关关系。特别在工程 D 中，根据 CBR 曲线，碾压超过某种程度，发现 CBR 值反而有所降低。对于这个现象，落球检测技术也能

很好地探明，见图 10。对于这种过度压实造成材料破碎、侧向流动等原因，导致的刚性和强度下降的现象，采用传统的密度等指标很难反映出来。

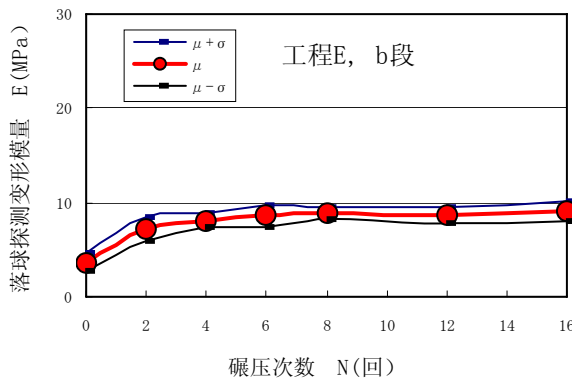


图 9 粘土 (工程 E, b 段)

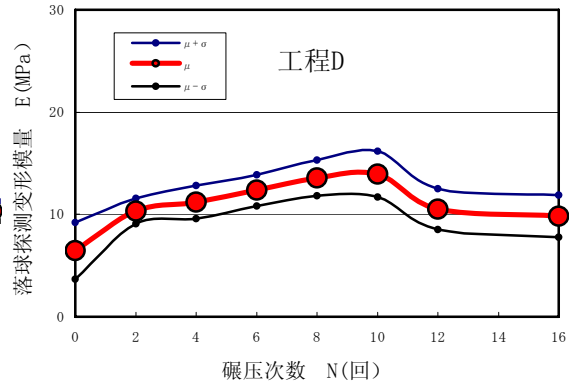


图 10 细粒粉混杂砂质砾岩(软岩石)

因此，可以把变形模量作为参考指标，利用落球探测技术可以有效地指导材料组成、级配和碾压次数的优化。

5. 结论

基于 Hertz 接触理论开发的落球检测技术能够快速测试出土质地基材料的力学特性，并且具有良好精度，以及与平板载荷试验结果的良好对应关系，能够鲜明地反映碾压效果。特别是，用传统的密度测定的方法一直以来难以把握的材料破碎、侧向流动和强度降低等，本技术也能明确的把握。从而可以对相对夯实程度得到准确的把握，指导碾压次数的优化。

本技术主要用于填土工程、建筑地基和地基处理的质量（如密实度等）检测与控制。试验研究和工程实践表明：对于从软弱粘土~硬质砾岩广大范围的土质材料都有很高的可靠性，测量精度、重复性等能达到实用的程度。

本技术操作简单，仅需使球体从一定高度落下即可，数据解析全部自动完成。能够很好地满足道路工程填土施工质量的全面和实时控制。

注：本文资料、数据由日本株式会社セントラル技研(东京)和四川升拓检测有限责任公司提供。

参考文献

1. 公路路基路面现场测试规程 (JTJ 059-95). 北京: 人民交通出版社. 2004,1
2. K. L. Johnson, 徐秉业译. 接触力学. 北京: 高等教育出版社. 1992
3. W. Goldsmith, Impact: the theory and physical behavior of colliding solids. Mineola, N.Y: Dover Publications, 2001