

# 路基压实质量快速检测技术—G-STAB 系统及其应用

## Fast ramping test system for road basement-G-STAB system and its application in field

黄新 郭晔

(北京航空航天大学 土木工程系, 北京, 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 冲击理论为基础, 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 冲击理论 平板载荷试验 碾压次数 填土施工

中图分类号: TU528.042

文献标识码: A

文章编号:

**作者简介:** 黄新 (1956- ),男,教授,博士生导师,主要从事地基处理

Huang Xin, Guo Ye

(Department of Civil Engineering, Beihang University, Beijing, 100083)

**Abstract** For silt, the relationship between the strengths of stabilized soils at various cement contents and cement contents was investigated experimentally, and the formula of cement contents for wrapping soil particle and filling pore during the structural formation of the stabilized soil was estimated. On the basis of these, the relationship between effect of cement content on the structural formation and the increasing laws of the strengths of the stabilized soils at various cement contents was analysed, it can be get that the structural formation of stabilized soil includes soil particle cementing and pore filling.

**Key words** stabilized soil, the structural formation, cementing, pore filling

## 0 前言

在道路工程中对碾压质量进行严格有效地施工质量管理是保证道路质量的重要环节。但目前我国尚缺乏快速有效的检测技术, 使用的检测技术或设备复杂或费时费力, 因此检测取样率很低, 检测结果不能准确的反映实际的道路施工的整体质量, 难以保证高等级公路对沉降和承载能力的技术要求; 同时也给偷工减料带来可乘之机。这是目前大量高等级道路投入运营后不久即发生塌陷、影响正常使用的主要原因之一。

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, 更重要的是对施工过程的质量控制。由于缺乏快速、有效、费用低廉的检测技术, 难以实现对施工过程的实时检测。对于土质材料质量离散或变化、施工机械性能改变以及气候变化等因素导致的压实度改变, 不能及时地反馈信息、指导施工工艺的调整, 因而难以保证稳定的施工质量。随着我国高等级公路和高速公路建设里程的急剧增加, 为有效解决大面积施工现场的施工质量检测与控制, 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。

## 1 当前的压实管理方法

当前主要的压实管理方法可以大致分为以下几类:

材料本身的控制: 材料种类、粒径分布等  
力学性能指标 (强度、模量和承载力) 控制:

CBR 试验

承载板试验

弯沉仪试验

物理指标控制:

相对值: 夯实度等

绝对值指标: 含水量等

但是这些管理方法, 存在着一些问题:

1) 操作不够便捷

特别是测试力学特性指标时, 大部分试验方法均要求提供足够的反力, 而且耗费大量的测量时间。为了节约时间和成本只能进行抽样检测, 但由于土质材料的离散性, 很难全面准确地把握施工质量。

2) 难以适应材料的变化

控制夯实度、最优含水量等指标时, 由于

土质材料和测试方法(如夯实能量)基准值有很大的变化,给实际操作带来诸多不便。而且对混凝土、改良(混合)材料、含水量多的粘性土和砾石多的土质等,进行夯实度管理也是比较困难的。

## 2 新型检测技术的开发

### 2.1 方法介绍

为了更好地控制路基的压实质量(特别是对力学性能指标的控制),人们开发出很多新型的静态和动态的检测方法。静态方法普遍需要提供反力设备和较长的测试时间,成本也高。动态方法简便灵活,具有很强的开发前景。当前诸多的动态测试方法大致可分为落重测试和振动响应测试两类。

落重测试方法有球体落锤试验和锥体落锤试验。

- 1) 球体落锤试验:开发这种试验方法的目的是为了简便地推定路基土的现场 CBR 值。让球体在离地面一定高度开始落下,测出地面产生的压印的大小(直径定为 D 值)。试验证实这个 D 值和现场 CBR 有非常高的相关关系,可以利用这个关系进行现场 CBR 测试。
- 2) 锥体落锤试验:使一定重量的锥体锤在一定高度上落下,可以确认最大冲击加速度还有平均加速度的值和材料的物理参数的相关性。
- 3) 重锤落锤试验(HFWD):在被测地基上面放置金属垫板,使重锤落在垫板上,根据测得的垫板的沉降量及冲击力,测定出地基反力系数。

关于振动特性的测定方法是,假定振动系(质量、减震器)地基和计测部分,根据测定频率及振幅等求得地基的力学参数:

- 1) 反应加速度法:测定落下的夯锤在地表面的冲击加速度。通过夯锤内藏加速度计在冲击时的加速度的峰值,得到密度或者地基反力系数等指标和试验的相互关系。
- 2) 阻抗地基法:测定振动对象的振动频响函数等。使安装阻抗地基的重锤落在土的表面,对构成的振荡系给予脉冲输入使之引起振荡。根据测定这个振荡的固有频率推定地基的弹性系数。

- 3) 共振法:在地基上直接设置引起振动的振动激励体,根据测出的振动激励体和地基的振动系的特性曲线(主要是共振频率)求出地基的弹性系数及阻尼比的方法。
- 4) 轮加速度法:分析安装的振动轮轴的加速度计的加速度信号的波谱特性,利用其与地基夯实程度的相关关系,可以实时地测定施工过程中土的夯实程度。

### 2.2 各方法的不足

上述方法一般都能较敏感地测定土质压实的程度,但是各方法存在着诸多不足:球体落锤法只适用于软弱地基;对于锥体落下法和反应加速度法,如果撞上卵石反应会发生很大的变化,因此只适用于均质的细材料;重锤落锤法需要平整测试场地,下落时的需要导向杆,装置规模较大降低了工作效率和测试精度;阻抗地基法由于地基材料的粒径和接触面的不同,容易产生较大的误差;共振法需要提供加振器,设备复杂;轮加速度法在往返碾压 1 次以后,测试敏感度会大大降低,对于不同的碾压设备,需要进行标定。

此外,这些方法共通的局限性也很明显:部分方法测定指标的物理意义不够明确;多数的方法只是通过求取相关关系来测试,如果对象材料和测试设备改变,相关特性也相应变化,因此在多数情况下通用性不够;利用振动反应特性测试时,如何确定地基的质量是一个大问题;探查的深度范围不明确,难以有效地改变探测深度。

### 2.3 G-STAB 测试系统

由日本株式会社セントラル技研(东京)开发的基于 Hertz 接触理论的土质材料力学特性快速检测系统 G-STAB 具有明确的理论背景,能够快速、准确地测定出各类土质地基材料(粘土、粉砂、砂质土、砂砾、改良土等)的变形性能等力学特性。该技术的测试作业非常简单,仅使球体落下即可,解析计算全部自动完成,工作效率较高(一点数秒左右)。因此可以用少数人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进行有效地实时检查与控制。

该技术已在日本的公路、环境部门和电力公司等机构广泛使用。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。下文将对 G-STAB 系统的测试原理以及在道路工程方面的应用做一详细介绍。

## 2 G-STAB 系统测试原理

### 2.1 系统构成

G-STAB 系统的设备构成见图 1，现场测试操作十分简单，由图 2 可以看到将球体在一定高度自由下落，安装在球体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，利用 Hertz 接触理论即可由特定的数据解析软件获取该落点土质的力学性能。

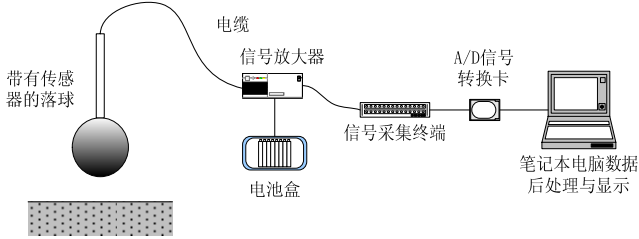


图 1 检测系统示意

Fig.1 Schematic diagram of test system



图 2 测试现场

Fig.2 Picture of testing

### 2.2 测试原理

Hertz 接触理论建立了球体与无限大平面体表面的接触时间与材料弹性模量之间的关系，见式 (1)。图 3 为 Hertz 接触理论的示意图，可见材料的弹性模量越大，接触时间就越短。

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

式中，

$T_c$ ：接触时间，单位：s；

$m_1$ ：球的质量，单位：kg；

$R_1$ ：球的半径，单位 m；

$v_0$ ：球和平面接触的瞬间速度，单位 m/s；

$v_0 = \sqrt{2gH}$ ， $H$  是球的自由下落高度，单

位 m；

$\delta$ ：Hertz 参数，下标 1 表示球体，下标 2 表示平面体。 $\delta = (1 - \mu^2)/(E\pi)$ ， $E$  为弹性模量，单位  $N/m^2$ ， $\mu$  为泊松比。

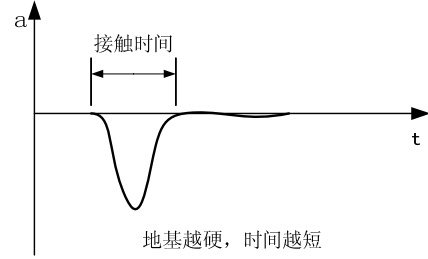


图 3 Hertz 接触理论示意图

Fig.3 Schematic diagram of Hertz law of contact

基于 Hertz 接触理论开发的新型土质材料力学特性快速检测技术 G-STAB 系统能够测定以下的力学参数：

#### (1) 材料的变形模量

从式 (1) 可以看到对于给定的球体，半径  $R_1$ 、质量  $m_1$ 、泊松比  $\mu_1$ 、弹性模量  $E_1$  和自由下落高度  $H$  均为已知。地基材料的泊松比  $\mu_2$  大致在 0.2（砂质土）~0.45（粘性土）之间，在此范围  $\delta_2$  的变化大约达到 15%，可以根据土质特性预先输入有代表的泊松比值。如果把地基看作无限大的平面体，即可利用上述公式通过测定球体自由下落时与地基材料的接触时间，求取地基材料的弹性模量  $E_2$ 。

Hertz 接触理论以弹性体为分析对象，压实的地基材料虽然体现出较好的弹性性能，但并非理想的弹性体，该技术进行了相应的材料修正。

#### (2) 地基系数 $K_{30}$

根据用上述得到的变形模量  $E_2$ ，可以进一步换算出铁道工程中常用的地基系数  $K_{30}$ ：

$$K_{30} = \frac{E_2}{0.79 \times D \times (1 - \mu^2)} \quad (2)$$

式中， $D$  是载荷板的直径，为 0.30m。

#### (3) 最大压缩量

根据下面的公式对加速度信号积分能直接求得最大压缩量  $d$ ：

$$d = v_0 T_{stop} - \int_0^{T_{stop}} a(T_{stop} - t) dt \quad (3)$$

式中， $T_{stop}$  是落球和地基接触瞬间开始到速度成为零（即最大压缩时）的时间。

(4) 最大接触半径和面积

根据几何原理,最大接触半径  $r$  可由下面的公式求得:

$$r = \sqrt{(2R_1 - d)d} \quad (5)$$

因此,最大接触面积由公式  $A_{\max} = \pi r_{\max}^2$  求得。

(5) 压缩变形

根据压缩量和半径等,在弹性理论的基础上能求得压缩变形。

### 3 对比试验结果

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)等实际工程。表 1 和表 2 分别为用两种测试方法进行室内试验和现场

试验的材料选择和试验结果。

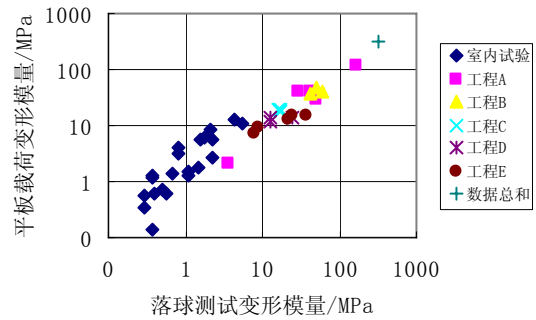


图 4 G-STAB 测试与平板载荷测试对比

Fig.4 Comparison of G-STAB test and load slab test

可见,两种方法测得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

不同道路施工(工程 B~工程 E)现场的实测结果证实,G-STAB 系统测得的变形模量能够敏感

表 1 室内对比试验的材料选择和测试结果

Table 1 Materials and results in lab test of two methods

试验场所	试验条件	试料区分	压实度区分	编号	平板载荷试验	G-STAB 测试	备注
					变形模量/Mpa	变形模量/Mpa	
室内试验	砂质土	干燥	缓压	1	0.56	0.299	干燥材料
			中压	2	1.36	0.695	
			密压	3	5.63	2.282	
		自然	缓压	4	1.21	0.367	自然含水量材料
			中压	5	3.27	0.810	
			密压	6	11.21	5.340	
	最优	缓压	7	1.28	0.364	最优含水量材料	
		中压	8	5.56	1.576		
		密压	9	13.09	4.260		
	湿润	缓压	10	4.20	0.817	加水湿润材料	
		中压	11	6.08	1.736		
		密压	12	8.58	2.067		
室内试验	混合土	4: 2	缓压	13	0.34	0.292	粘性土: 砂质土 =4:2
			中压	14	0.59	0.406	
			密压	15	1.33	1.090	
		4: 3	缓压	16	0.14	0.374	粘性土: 砂质土 =4:3
			中压	17	0.74	0.505	
			密压	18	1.71	1.473	
		4: 4	缓压	19	0.63	0.551	粘性土: 砂质土 =4:4
			中压	20	1.45	1.120	
			密压	21	2.76	2.285	

表 2 现场对比试验的材料选择和测试结果

Table 2 Materials and results in field test of two methods

试验场所	试验条件	试料区分	压实度区分	编号	平板载荷试验	G-STAB 探查	备注
					变形模量/Mpa	变形模量/Mpa	
河堤工程	工程 A	コア材	碾压面	1	2.1	3.6	センターコア
			碾压面	2	40.2	42.6	下流の粗・細流フィルター
		碾压面	3	40.2	28.8		
		碾压面	4	28.8	50.6		
		碾压面	5	118.3	163.3	下流の内・外部ロックゲーン	
道路工程	工程 B	细粒粉混杂砂质砾岩	N=16 碾压面	A	41.6	60.2	上部路体
			N=16 碾压面	B	38.1	41.4	(軟岩: 凝灰角礫岩)
			N=16 碾压面	C	47.6	49.1	第 1 層
	工程 C	细粒粉混杂砂质砾岩	N=16 碾压面	A	18.6	16.6	下部路体
			N=16 碾压面	B	18.8	17.5	(土砂: レキ混じり粘土)
			N=16 碾压面	C	18.4	17.6	第 1 層
	工程 D	细粒粉混杂砂质砾岩	N=10 碾压面	2-A	13.6	12.7	上部路床相当
			N=10 碾压面	2-B	11.4	12.9	(軟岩)
			N=10 碾压面	2-C	14.1	23.9	第 2 層
	工程 E	粘土	N=16 碾压面	A	15.1	24.3	下部路体
N=16 碾压面			B	8.9	9.1	(土砂)	
N=16 碾压面		C	7.1	7.8			
碎石		N=16 碾压面	A	13.1	21.8	裏込	
		N=16 碾压面	B	14.5	37.7	(RC 碎石)	

地反映填土的碾压效果，有效地指导碾压次数和填土材料的优化。

对于级配良好的土质材料(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，碾压次数的增加可以有效地提高填土的密度，详见图 5, 6 和 7。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。(下文图 5~图 10 中， $\mu$  表示测试数据的平均值， $\sigma$  表示测试数据的标准方差。)

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 G-STAB 系统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，碾压次数的增加并不能提高填土的压实密度，如图 9 所示。此外，G-STAB 探查结果和 CBR 测试结果有着良好的相关关系。特别在工程 D 中，碾压超过某种程度 CBR 值有所降低。对于这个现象，G-STAB 测试也能很好地探明，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。

因此，可以把变形模量作为参考指标，利用 G-STAB 系统可以有效地指导材料组成、级配和碾压次数的优化。

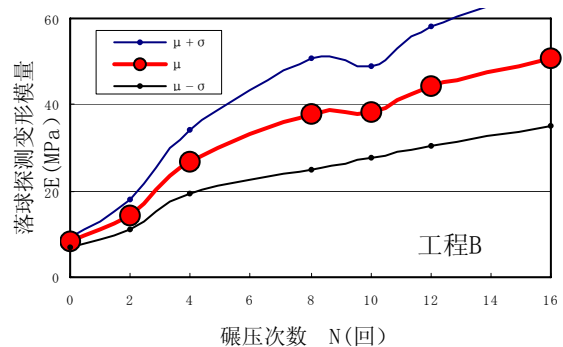


图 5 工程 B 碾压效果测试曲线

Fig.5 Test result of rolling effect in Project B

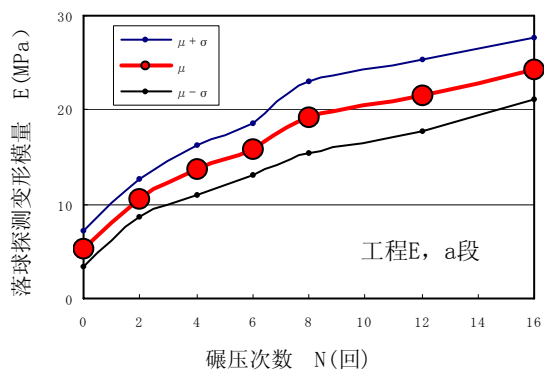


图6 工程Ea段(碎石)碾压效果测试曲线  
Fig.6 Test result of rolling effect in Project Ea (gravel)

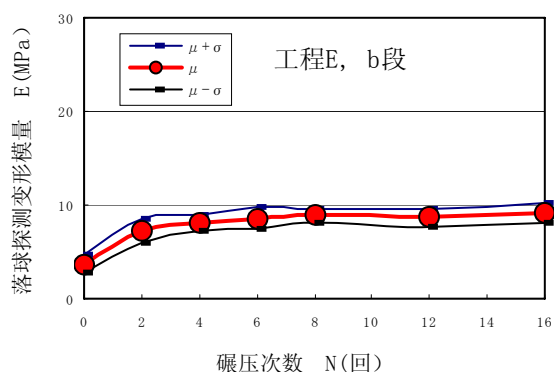


图9 工程Eb段(粘土)碾压效果测试曲线  
Fig.9 Test result of rolling effect in Project Eb (clay)

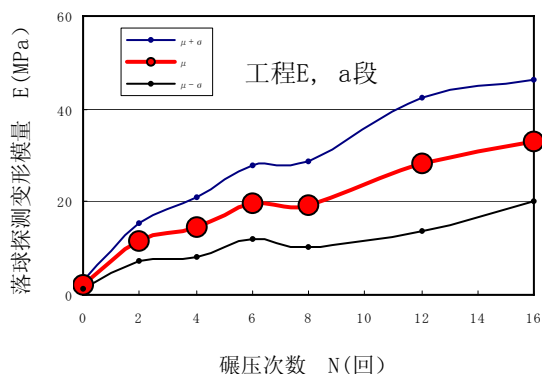


图7 工程Ea段(粘土)碾压效果测试曲线  
Fig.7 Test result of rolling effect in Project Ea (clay)

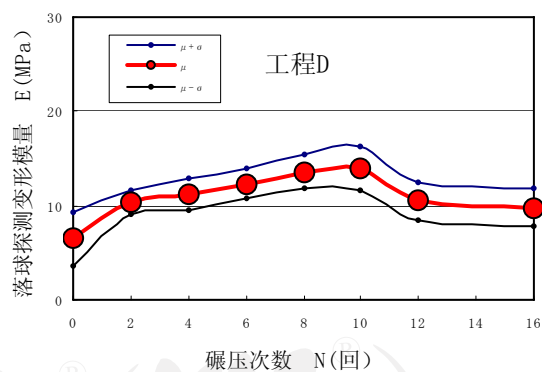


图10 工程D 碾压效果测试曲线  
Fig.10 Test result of rolling effect in Project D

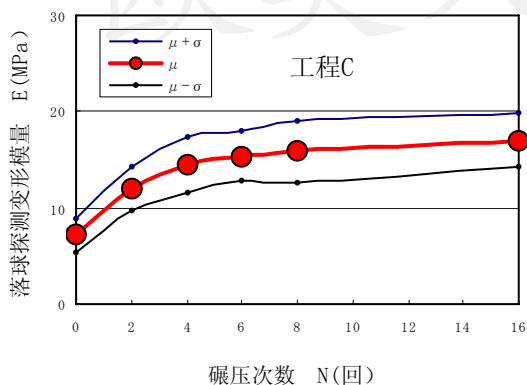


图8 工程C 碾压效果测试曲线  
Fig.8 Test result of rolling effect in Project C

## 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的破碎、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。

致谢: 本文试验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

欧美大地® (EPC®)