

岩土材料力学特性综合检测技术体系

(V1.50)



2011-06-08 初稿

2022-02-12 第 32 次修订

2022-04-10 第 33 次修订

2022-04-22 第 34 次修订

四川升拓检测技术股份有限公司

www.scentralit.com

目录

第 1 章 概述.....	1
第 2 章 岩土材料变形特性的检测.....	2
2.1 测试的意义和现状.....	2
2.1.1 测试的意义.....	2
2.1.2 国内外路基施工质量主要检测项目和要求.....	3
2.1.3 发展趋势.....	4
2.1.4 铁路路基设计规范的要求及变迁.....	5
2.1.5 道路设计规范的要求及变迁.....	5
2.1.6 现行规范中回弹模量的测试方法对比及变迁.....	6
2.1.7 国外碾压施工质量管理方法的进展（日本，2019）.....	6
2.2 落球测试方法和原理.....	6
2.2.1 测试内容和方法.....	6
2.2.2 Hertz 弹性接触理论.....	7
2.2.3 变形特性的测试原理.....	7
2.2.4 贝克曼弯沉的推算.....	8
2.2.5 其他变形参数的推算.....	8
2.3 基于数值模拟的验证.....	9
2.3.1 概述.....	9
2.3.2 解析结果.....	9
2.4 模型验证.....	9
2.4.1 金属材料试验验证（1998~2000）.....	错误！未定义书签。
2.4.2 水稳材料试验验证.....	9
2.4.3 混凝土材料试验验证.....	9
2.5 压缩时弹性模量（变形模量）的 K30 载荷板验证.....	9
2.5.1 K30 载荷板试验的原理.....	10
2.5.2 匀质细粒材料.....	10
2.5.3 匀质粗粒材料.....	10
2.5.4 均质结构对比试验一览.....	错误！未定义书签。
2.5.5 层状结构.....	11
2.6 回弹时弹性模量（回弹模量）的现场验证.....	11
2.6.1 回弹模量的现有测试方法.....	11
2.6.2 不同材料变形模量与回弹模量的比例.....	11
2.6.3 匀质材料的 K30 对比.....	11
2.6.4 与贝克曼梁（BB）的对比.....	12
2.7 实际应用例.....	12
2.7.1 道路填方均匀性检测（杭州临平，碾压完成，2013.10）.....	错误！未定义书签。
2.7.2 软弱层及孤石的检测.....	13
2.7.3 水稳材料 2 次碾压效果检测（2017.05）.....	13
2.7.4 水稳材料与设计值比较（2019.10，郑州）.....	14
2.7.5 在役高速道路基层检测（2019.08，郑州）.....	15

岩土材料力学特性综合检测技术体系

2.7.6 素填土回弹模量检测（2021.4，临汾市）	15
2.8 物理指标的推算	16
2.8.1 无粘性土	16
2.8.2 粘性土	16
2.9 测试适用范围、影响因素及仪器检定	16
2.9.1 特点	16
2.9.2 适用范围	16
2.9.3 影响因素	错误！未定义书签。
2.9.4 仪器检定：材料的选取及变形参数的确定	错误！未定义书签。
2.9.5 仪器检定：试验结果（尼龙材料）	错误！未定义书签。
2.10 相关规程解读及落球检测的适应性	16
2.10.1 公路工程质量检验评定标准（JTG F80 1-2017）解读	16
2.10.2 公路路基路面现场测试规程（JTG 3450—2019）解读	17
2.10.3 落球检测与现行规程的适应性	18
2.11 与其它快速方法的对比	18
2.11.1 与贝克曼梁弯沉测试方法的对比	18
2.11.2 与 FWD 测试方法的对比（郑州，2019.12）	19
第3章 土质材料强度特性的检测	20
3.1 测试的意义	20
3.2 测试方法和原理	20
3.3 模型及现场验证	21
3.3.1 内摩擦角的验证	21
3.4 水泥稳定材料抗压强度的测试	21
3.5 特点和适用范围	21
3.5.1 特点	21
3.5.2 与其他方法相比的优越性	21
第4章 岩石材料力学特性的检测	22
4.1 测试的意义	22
4.2 测试方法和原理	22
4.2.1 测试内容和方法	22
4.2.2 变形特性的测试原理	22
第5章 岩体结构检测	22
5.1 岩石、岩体检测的目的	22
5.1.1 岩体分级	22
5.1.2 隧道开挖松动区测试（屈折法）	23
5.1.3 隧道开挖松动区及掌子面前方测试（干式跨孔法）	23
5.2 工程实例	23
5.2.1 隧道开挖松动区检测（杭州.建德、2017.11）	23
第6章	23
结语	24
技术支持	24

第 1 章 概述

在填方工程中，岩土材料力学特性（包括刚性特性及强度特性）是其最为重要的力学指标。同时，由于岩土材料的力学特性受到很多因素的影响，如材料种类，级配，含水量，密度，碾压方式等，长期以来一直寻求一种能够现场测试岩土材料力学特性的简便可靠的方法。特别是近年来，随着高速铁路，高速道路的迅猛发展，对填方工程的质量要求日益严格。

我们从 1999 年起，与海内外合作伙伴一道，开发了以落球式材料力学特性测试技术（简称“落球检测技术”）为核心的岩土材料力学特性的现场测试技术。该技术不仅可以快速、简便地测出材料的刚性（如压缩模量、回弹模量、地基系数等），而且可以同时测出材料的强度指标（如内部摩擦角 ϕ 等、水泥稳定土的抗压强度等），具有极其广阔的应用领域。

我们具有相关技术的全部知识产权，并申请和获得了多项国家发明专利，产品出口到日本等海外。



照片 1-1 落球式岩土力学特性测试仪（SEH-FBT）S 型

第 2 章 岩土材料变形特性的检测

2.1 测试的意义和现状

2.1.1 测试的意义

填方工程往往是道路、桥梁、铁路、水利、市政等各式工程的安全基础，也是各类基础建设的基础，填方工程的质量关系到整个工程的质量、进度、安全等，科学、合理的监控测试方法是保证填方工程施工的重要措施。特别是近年来，随着高速铁路，高速公路的迅猛发展，对填方工程的质量要求日益严格，对现场测试、施工过程控制等的需求也日益广泛。填方工程的质量往往是通过岩土材料力学指标监督控制，岩土材料力学特性（包括刚性特性及强度特性）是其最为重要的性能指标。同时，由于岩土材料的力学特性受到很多因素的影响，如材料种类，级配，含水量，密度，碾压方式等，长期以来研究者们都力求寻找一种能够现场测试岩土材料力学特性的简便可靠的方法。

填方工程所用的材料主要是岩土类材料，主要包括碎石、砂质土、粘质土以及水泥稳定土等材料，具有天然性、多样性、复杂性等特性。其中，材料的变形特性决定了其沉降特性，对于高速铁路、高速公路这样的长、大工程显得尤为重要。美国联邦高速公路管理局（Federal Highway Administration, FHA）就曾指出，“如果每层覆盖层的平均刚度的不均匀性只减少 25%，路面的寿命就会延长一倍”。可见，保证填筑材料的变形特性的均匀性，对提高道路的耐久性具有极其重要的意义。

此外，填方工程不仅体积浩大，而且具有较强的隐蔽性，一旦填筑到上层部位，其下层部位的质量就难以得到检测和监督，从而为一些不良业者提供了可乘之机。因此工程界一直期待着能在施工现场准确、直接、快速、方便的检测填土力学特性的有效方法。

为此，研究者们作了大量的努力。现阶段我国路基施工技术规范中，现场路基填方工程质量的测试方法主要有承载板法、弯沉法、加州承载比(CBR)法、落锤弯沉仪(FWD: Falling Weight Deflectometer)法、挖坑灌砂法等，这些方法或需加载测试车，或需要牵引车牵引到位，或效率低且有损路基。同时，这些测试方法操作较复杂，技术要求高，耗时耗力，费用高，测试比较困难，且具有一定的危险性。因此，有必要研究一种快速可靠的路基质量测试方法。

近年来，以手持式落锤弯沉仪（PFWD）和动态弹性模量测试仪（Evd）为代表的动荷载测试方法开始受到关注。其中 Evd 更被纳入《铁路工程土工试验规程》（TB 10102-2004），为提高工程施工质量管理水平起到了很大的作用。但是，这些方法也存在着不少问题，造成其测试精度、适用土质范围以及测试项目等方面都有较大的局限。

我们开发的落球式岩土材料力学特性测试仪（以下简称“落球检测”）基于 Hertz 冲击理论，可以快速、高精度地测试岩土材料的变形特性，能够大面积，全断面进行填

土的施工质量监理，有效地杜绝偷工减料等不正行为，保证施工质量。同时，根据实时反馈信息，可以优化设计，以求得到技术性和经济性的最佳平衡，取得最优效果，具有巨大的社会效益和经济效益。为保证重大工程的建设质量有着非常重要的意义。

2.1.2 国内外路基施工质量主要检测项目和要求

我们对主要发达国家，以及我国的交通和铁道系统对路基施工的主要检测项目进行了收集和对比：

表 2- 2-1 国内外路基施工质量检测项目

压实质量检测方法	中国		美国	德国	法国	英国	日本
	铁路	公路					
压实系数	√	√	√	√	√	√	√
相对密度 D_r	√						
孔隙率 n	√						
含气率 n_a				√		√	√
现场 CBR			√			√	√
地基系数 K_{30}	√	√				√	√
变形模量	√		√	√	√		
贝克曼弯沉		√					

可以看出路基压实质量检测指标大致可以分为三类：

1) 物理指标

包括压实系数，相对密度、孔隙率和含气率等。其中，压实度使用历史最老、在所有调查的国家、行业均使用。

2) 强度（承载力）指标

主要为 CBR（加州承载比）试验，分为室内 CBR 和现场 CBR，以美、日为中心使用。在我国的交通行业，室内（材料）CBR 应用较广而现场 CBR 则很少应用。

3) 变形（抗力）指标

变形指标指地基系数 K_{30} 或变形模量（ E_{v2} 、 E_{vd} 等）。贝克曼弯沉也可认为是变形指标的一种。可以看出，各国都采用一定的方法以保证路基的变形特性。其中，欧美各国通常采用 E_{vd} 、 E_{v2} 等动、静荷载试验相结合的方法，而日本则多采用 K_{30} 。

在我国，铁路行业普遍采用了 K_{30} 、 E_{vd} 、 E_{v2} 等变形测试方法：

表 2-2- 2 我国高速铁路施工要求

位置	材料	评价标准
----	----	------

岩土材料力学特性综合检测技术体系

		压实度	K_{30} (MPa/m)	动变形模量 E_{vd} (MPa)
基床以下路堤	砂类土及细砾土	0.92	110	
	碎石类及粗砾土	0.92	130	
	无砟轨道	可采用 E_{v2} , $E_{v2} > 45\text{MPa}$, 且 $E_{v2}/E_{v1} < 2.6$		
基坑回填				30
过渡段基底	不限, 路堤 $\leq 5\text{m}$			40
	不限, 路堤 $< 5\text{m}$			30
基床表层下过渡段	级配碎石	0.95	150	50
基床表层下过渡段 两侧	砂类土及细砾土	0.95	130	40
	碎石类及粗砾土	0.95	150	40
基床底层	砂类土及细砾土	0.95	130	40
	碎石类及粗砾土	0.95	150	40
	无砟轨道	可采用 E_{v2} , $E_{v2} > 80\text{MPa}$, 且 $E_{v2}/E_{v1} < 2.5$		
基床表层	级配碎石	0.97	190	55
	无砟轨道	可采用 E_{v2} , $E_{v2} > 120\text{MPa}$, 且 $E_{v2}/E_{v1} < 2.3$		
碎石垫层	填高 $\leq 3\text{m}$		150	
	填高 $> 3\text{m}$		130	

2.1.3 发展趋势

关于路基填筑质量的控制, 多年来, 国内外一直普遍采用以 Proctor 压实理论为基础的密度检测法进行检测, 这是因为该法比较容易通过测定重量和体积得出, 并且具有明确的物理意义。但就对路基的性能来说, 仅用单一的密度指标难以反映出路基填方压实后的稳定与变形特性, 而且对评价非均质土石填方压实质量也有其局限性。因此为了能真实地反映土体整体压实情况, 保证压实填方具有较小的变形和足够抵抗变形的能力, 以满足路基的使用要求。近些年来, 对路基填方压实质量, 开始逐步放弃传统的密度检测法, 而是转为采用以变形控制为依归的抗力检测法。例如, E_{vd} 、FWD、平板载荷试验法……等等, 并在实际工程应用中取得良好效果。

目前, 建筑业正试图通过发展更精确地设计和更严谨地施工方法, 在提高施工质量的同时亦能降低施工费用的需要。这就意味着用于设计的结构刚度和材料模量参数也必须是用来评价施工质量。这种趋势正逐步成为各国所关注的焦点。例如: 在美国新发展的 AASTHTO2002 路面设计规范中不仅规定在设计中使用模量参数, 而且极力推荐使用模量参数来评价施工质量。

根据施加荷载的方法, 抗力检测法又可分为静载法和动载法。其中, 以 K30 平板载荷试验为代表的静载法的应用历史最为悠久。但静载法普遍存在以下缺点:

- 1) 测点有限, 难以评价整个铺设层的压实质量;

2) 测试手段上费时、费力,在一定程度上干扰和延误机械化施工。

另一方面,动载法由于测试简便、费用低,正得到越来越多的重视和应用。

2.1.4 铁路路基设计规范的要求及变迁

在我国,铁路工程师较早全面采用变形指标进行管理的行业。在2005版的《铁路路基设计规范》(TB-10001-2005)中即对基床、路堤引入了变形模量设计标准。而在2015版的《铁路路基设计规范》中做了进一步的提升。

2.1.5 道路设计规范的要求及变迁

近年来,在我国也强调采用变形模量作为道路的重要设计参数。在此,我们对路基变形性能在设计方面要求的变迁进行说明和比较。

1) 城市道路路基设计规范[S].CJJ194-2013

在该规范4.2.3中规定,“路床顶面土基设计回弹模量,对快速路和主干路应大于或等于30MPa;对次干路和支路应大于或等于20MPa。不满足上述要求时,应予以处治”。

2) 公路路基设计规范[S].JTG D30-2015

该规范与前一版(2004年版)相比,最重大的变化就在于“提出了路基结构回弹模量的控制标准及指标预估方法”。

3) 公路水泥混凝土路面设计规范[S].JTG D40-2011

该规范4.2.2中要求,“路床顶面的综合回弹模量值,轻交通荷载时不得低于40MPa,中等或重交通荷载时不得低于60MPa,特重或极重交通荷载等级时不得低于80MPa”。

此外,该规范3.0.2还规定了路床顶面回弹模量的均匀性要求。

4) 公路沥青路面设计规范[S].JTG D50-2017

该规范5.2.2中要求,“路基顶面回弹模量应符合表5.2.2的规定。不满足要求时,应采取改变填料、设置粒料类或无机结合料稳定类路基改善层,或采用石灰或水泥处理等措施提高路基顶面回弹模量”。

5) 小结

由此可见,最新的公路设计规范突出了变形参数(回弹模量)的重要性,特别是现行的公路混凝土、沥青路面设计规范中,对路床顶面回弹模量要求与原规范有了较大的提高,约为原规范的2~3倍。同时,对于抗裂性能相对较差的混凝土路面,设计规范还规定了变形参数的均匀性要求。

2.1.6 现行规范中回弹模量的测试方法对比及变迁

关于回弹模量的测试方法、参数取值，各规范也经历了发展变迁。

表 2-4-2 回弹模量测试方法

交通荷载等级	室内	现场
城市道路路基设计规范 CJJ194-2013	查表法、平板载荷试验法	承载板法、贝克曼弯沉
公路路基设计规范 JTG D30-2015	查表法、动三轴试验、CBR	未明确 ¹⁾
公路水泥混凝土路面设计 规范 JTG D40-2015	查表法	同公路路基设计规范 JTG D30
公路沥青路面设计规范 JTG D50-2017	经验关系、查表法、 动三轴试验	同公路路基设计规范 JTG D30-2015

2.1.7 国外碾压施工质量管理方法的进展（日本，2019）

2019年7月，Japanese Geotechnical Society 在“Committee on Soil Compaction Control Aiming at Realization of Required Performance of Soil Structure”（基于土工结构性能要求的填方碾压合理化委员会）的报告^[23]中，对土体碾压的管理方法进行了总结：

- (1) 压实度~含水率（最优含水率）：传统方法
- (2) 压实度~弹性模量：近年来发展的方法
- (3) 压实度~饱和度：新方法
- (4) 弹性模量~饱和度：新方法
- (5) 弹性模量区间：新方法

2.2 落球测试方法和原理

2.2.1 测试内容和方法

本方法，通过金属的刚性球体落下，利用 Hertz 碰撞理论（也称 Hertz 弹性接触理论）并经过岩土材料的塑性修正，能够直接测定材料的：

- (1) 变形模量 E ；
- (2) 回弹模量 E_{ur} ；

同时，根据弹性理论和相关经验公式，还可以推算

- (1) 基床系数 K_{30} （也称地基系数）；

- (2) 贝克曼弯沉 L ；
- (3) 物理指标（干密度、压实度、相对密度等）；

2.2.2 Hertz 弹性接触理论

本技术测试岩土材料变形特性的理论基础源于Hertz 弹性接触理论。该理论在机械、机电工程中得到了广泛的应用。

在机械、机电工程中，常遇到两曲面物体相互接触，以传递力的情况。例如齿轮、轮轨接触、联接装置、球轴承、金属加工，金属成型等。这种接触在加载前都是点接触或线接触，而在加载后，由于材料的弹性变形，接触点变为了接触面。实际工程中常常需要求解接触面的压力分布和接触区域的应力分布。接触力学就是研究两物体因受压相触后产生的局部应力和应变分布规律的学科。

1881 年，Hertz（赫兹）最早研究了玻璃透镜在使它们相互接触的力作用下发生的弹性变形，并首先用数学弹性力学方法导出接触问题的计算公式。

2.2.3 变形特性的测试原理

1) 理论基础

对于落球检测技术，有以下两点：

- (1) 被测面为平面，因此， $R_2 \rightarrow \infty$
- (2) 作为测试参数，上述应力、压缩量均难以实测。接触圆半径尽管容易测试，但测试误差较大。

但是，Hertz 碰撞理论仅适用于线弹性材料，而岩土材料是典型的弹塑性材料。因此，我们对该理论做了修正。

2) 数据处理技术

在各类落下式测试技术中，遇到大粒径材料时，往往会得到过大的测试值（特别是变形模量方面）。因此，大多数落下式测试技术往往要求避开石块进行测试，但这样也不可避免地影响测试的客观性。

为此，我们开发了独特的“等效变形法”，以取代通常的单纯平均的数据处理方法。

表 2- 2-1 不同数据处理方法的比较

	单纯平均法概念	等效变形法概念
力学意义	表面各点变形相同	表面各点受力相同
处理方法	测试的各模量单纯平均	测试模量转换成变形后平均、处理
大粒径砾石的影响	大	小

局部软弱部的影响	小	大
----------	---	---

可以看出，基于柔性变形概念的“等效变形法”具有以下特点：

- (1) 受大粒径砾石（孤石）的影响小；例如，在 10 次测试中，其中 9 次的测试值为 1MPa，而 1 次的测试值为 10MPa。若采用单纯平均法，测试值为 1.9MPa，仅 1 次测试值即可将平均值提高 90%。而采用等效变形法得到的测试值为 1.09MPa，显然更加能够反映实际的土质情况。
- (2) 受局部软弱部的影响大；例如，在 10 次测试中，其中 9 次的测试值为 1MPa，而 1 次的测试值为 0.1MPa。若采用单纯平均法，测试值为 0.91MPa。而采用等效变形法得到的测试值为 0.53MPa，显然对软弱土质的灵敏性有了很大的提高；

因此，采用等效变形法能够更加合理地反映不同材料的影响，从而避免了大粒径块体对测试结果的过大影响，保证了测试结果的稳定性。

3) 材料修正

由于粒径的不同，使得落球测得的变形模量也会发生一定的变化。根据我们所作的大量的试验，我们引入了相应的修正系数。根据土质材料的种类，修正系数在 0.85~0.90 之间，粒径越大，修正系数越小。此外，根据材料类型，我们也给出了参考泊松比 μ 。

2.2.4 贝克曼弯沉的推算

利用测试得到的回弹模量 E_{ur} ，通过分层累计的方法可以推算贝克曼弯沉 L 。

有关回弹模量 E_{ur} 与弯沉 L ，主要有以下两种关系：

1) 公路路面基层施工技术规范，JTJ034-2000

根据中华人民共和国行业标准（公路路面基层施工技术规范，JTJ034-2000），土基顶面的回弹弯沉值回归。

2) 公路路基路面现场测试规程，JTGE60-2008

根据中华人民共和国行业标准（公路路基路面现场测试规程，JTGE60-2008），土基整层的回弹模量 E_{ur} 与弯沉 L_0 之间的关系用理论值表示。

2.2.5 其他变形参数的推算

利用测试得到的变形模量 E 和回弹模量 E_{ur} ，可以分别推算基床系数和贝克曼弯沉。

注意事项：用本技术推算基床系数、贝克曼弯沉时，要注意影响深度的问题。落球设备（B/S 型）的测试深度范围大致在 15~25cm 左右，而 K30 平板载荷试验结果所反映的是

压板下大约 1.5 倍压板直径深度范围内地基土性状，其测试深度范围为 40~50cm。因此，在实际使用中，要注意影响深度不同所带来的差异。

2.3 基于数值模拟的验证

2.3.1 概述

在“宕渣（土石）路基施工质量控制与检测技术研究（浙江省交通运输厅科技项目，2011H16）”课题研究中，采用数值分析软件 ABAQUS 对落球与土质材料的碰撞过程进行了数值模拟。

2.3.2 解析结果

1) 响应

根据数值模拟的计算结果，接触时间 0.027s。另一方面，根据 Hertz 理论计算得到的接触时间为 0.026s，与数值模拟的结果一致。

2) 影响深度

(1) 影响深度同土体弹性模量关系

(2) 影响深度同土体内摩擦角关系

(3) 落球撞击产生的附加应力同影响深度的关系

2.4 模型验证

2.4.1 水稳材料试验验证

我们对 2 个工程的水泥稳定材料进行了落球检测，并采用钻孔取芯和单轴压缩试验进行了验证。

2.4.2 混凝土材料试验验证

下表是不同激振锤在轨道板（C60 混凝土， E_d 取 36GPa），在 0.6m 落下相当引起的弹性波频率的理论值，以及测试信号的卓越频率（FFT 求取）的比较。可以看出，其吻合得非常好。

2.5 压缩时弹性模量（变形模量）的 K30 载荷板验证

为了压缩时弹性模量的测试精度，我们主要利用 K30 载荷板进行了对比验证，材料包括粘土、砂、沙砾、碎石、水泥稳定土等。

在测试时，由于 K30 和落球测试均会对原土基产生影响。如 K30 会起到压实作用，而落球则可能使土基松动或压实。因此，两者的测试位置无法完全一致。一般来说，先进行 K30 试验，然后在试验区的外侧进行落球试验。由于试验区域的差异，难免会带来一定的离散误差。

2.5.1 K30 载荷板试验的原理

1) 基本方法

平板荷载试验是一项使用最早、应用最广泛的原位试验方法，是在一定尺寸的刚性承压板上分级施加荷载，观测各级荷载作用下天然地基土随压力和变形的原位试验。

2) 结果修正

当试验曲线经坐标原点，可不校正。当试验曲线出现明显拐点时，应沿正常曲线延伸和修正。

3) 荷载不足时的处理

当土体坚硬，反力不足时，也常常采用 $\sigma \sim S$ 直线段的斜率来推算基床系数。

2.5.2 匀质细粒材料

我们对粘土、砂、以及粘土/砂混合料进行了 K30 载荷板试验验证。

验证结果表明：

- (1) 总体而言，对于细粒土，落球测试的结果与 K30 结果的比例（即修正系数）平均在 0.95~0.98；
- (2) 砂质土的含水量对修正系数的影响较大。干燥砂的落球检测结果偏大，而湿润砂的落球检测结果偏小

2.5.3 匀质粗粒材料

自 1999 年起，我们对表层和内部较为均匀的材料进行了 K30 载荷板试验验证。

试验材料及地点

表 2- 5-1 K30 对比验证（材料及地点）

No.	土质类型	材料状态	结构形式	地点
1	GS-F（细粒土混合砂、砾石）	较坚硬	高速公路路基	（日本）DNDM 高速
2		较坚硬	高速公路路基	（日本）DNDM 高速
3		坚硬	机场跑道填方	（日本）SO 机场
4		松软	地基基础	（日本）A 工厂
5		较坚硬	地基基础	（日本）I 地铁站

6	G-FS (粉土混合砾石)	松软	隧道开挖基础	(日本) H 隧道
7	G (碎石)	松软	隧道开挖基础	(日本) H 隧道
8		坚硬	土石坝反滤层	(日本) KNG 大坝
9	GS (砂、砾石)	坚硬	机场跑道填方	(日本) S0 机场
10	CG (水泥稳定碎石)	固化前	1 级国道路基	山西忻州 208 国道
11	黄土混合砾石	较硬	1 级国道路基	山西忻州 208 国道

2.5.4 层状结构

对于路床、面层，一般是上部坚硬，下部较软，具有典型的层状特性。即使是较为均质的材料，由于表面受到车辆荷载的反复碾压，而容易变得比内部更为密实和坚硬。另一方面，由于 K30 试验的影响深度要大于落球，因此对于层状结构，两种试验方法之间就有较大的差别。

2.6 回弹时弹性模量（回弹模量）的现场验证

在我国沥青路面和水泥混凝土路面的设计施工质量以及使用性能的评价中，路基回弹模量是反映路基抗变形能力的主要力学参数，它的取值直接影响到路面结构的设计。我国现有规范已经给出不同的自然区划和土质的回弹模量推荐值，具体参见《公路沥青路面设计规范》(JTGD50-2006) 等。

路基回弹模量对道路的变形、强度以及耐久性等方面均有较大的影响，回弹模量值的检验正逐步成为控制施工质量的一个重要指标。

2.6.1 回弹模量的现有测试方法

现行路面设计规范中规定确定土基回弹模量的方法有三种，即查表法、室内实验法和 K30 承载板法。此外，利用 BB (贝克曼弯沉) 也可以推算回弹模量。

2.6.2 不同材料变形模量与回弹模量的比例

对于土质材料而言，回弹模量均高于变形模量。一般而言，压实度越高，回弹模量与变形模量的比值越低。

- 1) E_{v2}/E_{v1} 的关系
- 2) 典型材料的平板载荷~卸载关系
- 3) 落球检测与平板载荷试验的对比

2.6.3 匀质材料的 K30 对比

利用落球检测技术测试材料回弹模量时，有两点需要说明：

- (1) 计算用接触时间的选取：回弹模量计算时本应采用图 2-2-2 中回弹时间。但在实际计算中，由于回弹时间一般较短，其选取误差会在回弹模量计算中产生放大，从而降低了测试的稳定性。此外，该回弹时间与材料实际的回弹时间不完全一致，因此，在实际计算中，采用全体碰撞时间作为回弹模量的计算时间；
- (2) 回弹模量修正系数 κ 的选取：从图 2-6-2~图 2-6-4 可以看出，对于水稳土、粉土以及砾石，当压实度较高时，载荷板试验与落球检测得到的 $E_{wr}/E \sim E_{wr}$ 关系基本一致。说明在此情况下，变形模量和回弹模量采用相同的 κ 是适当的。但是，在压实度较低时，材料中空隙较大，此时载荷板试验得到的 E_{wr}/E 要大于落球检测。但从实际工程需要和安全角度考虑，采用相同的 κ 也是可行的；

2.6.4 与贝克曼梁 (BB) 的对比

我们在 8 个工程中，对比了用落球测试的弯沉值和用贝克曼梁测试的弯沉值。

表 2- 6-3 BB 对比验证 (材料及地点)

No.	土质/结构类型	材料状态	结构形式	地点
1	黄土混合砂、砾石	较坚硬、雨后表面湿润	1 级公路路基	山西晋城
2	砂砾混合粉土	较坚硬	高速公路路基	山西忻州
3	砂砾石	较坚硬	1 级公路路基	山西大同
4	黄土水泥稳定层	坚硬	高速公路路床	河南洛阳
5	砂石	较坚硬	1 级公路路基	山西代县
6	砂砾石	较坚硬	1 级公路路基	山西浑源
7	宕渣砾石	坚硬	高速公路路基	浙江杭州
8	页岩砾石	坚硬、表层重车碾压	高速公路路基	重庆巴南

2.7 实际应用例

自 1999 年以来，我们开发的落球检测及相关技术在国内（特别是日本）已经在 300 多个实际工程（铁道、高速公路、堤防等）中进行了应用，主要应用领域的实绩在：

- 1) 交通、铁道、机场：共约 120 件，业主、施工及检测单位主要有 JR 东日本、小田急电铁、NEXCO 东日本、铁道运输机构、NEXCO 西日本、近畿地方整备局、东北地方整备局、首都高速公路、港湾空港技术研究所，国内的杭州交通质监局、河南高速等，代表性的工程有道路及铁路路床评价、桥墩回填材料评价、机场填方材料评价等；
- 2) 水利、堤防工程：共约 90 件，业主、施工及检测单位主要有中国水科院、水资源机构、鹿岛建设、清水建设、（日本）国土交通省、新潟县、大阪府、三重县、电力公司等，代表性的工程有填方材料、质量评价；

岩土材料力学特性综合检测技术体系

- 3) 大型工业基础：共约 50 件，业主、施工及检测单位主要有东北电力、东京电力、四国电力等，代表性的工程有发电厂基础评价、回填材料管理等；
- 4) 环境行业：共约 25 件，业主、施工及检测单位主要有熊本县、冈崎市、(日本)环境研究所、X 都市计划、鹿岛建设等，代表性的工程有废弃物覆盖土填方管理、净水厂基础评价等；
- 5) 研究开发：共约 10 件，业主、施工及检测单位主要有交通部公路科学研究院、沈阳建筑大学、天津交委质监站、山西公路局、鹿岛建设等；

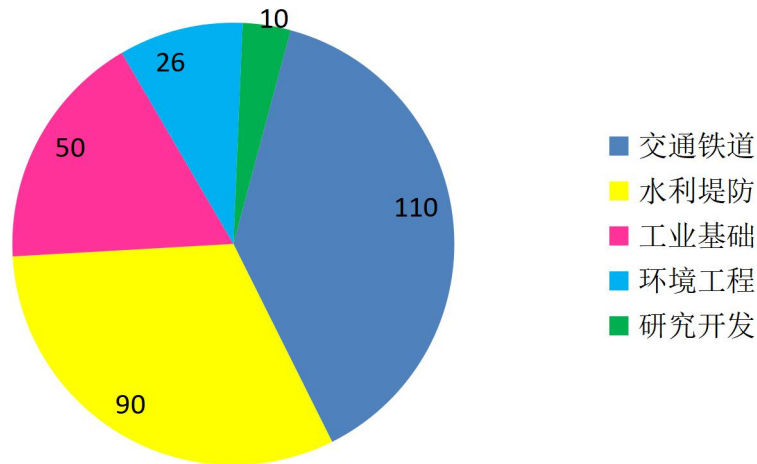


图 2-7-0 落球应用实绩及分布

2.7.1 软弱层及孤石的检测

本次预设缺陷测试对象为新铺装路基，填土材料为自然粉土，最大干密度为 1.98g/cm^3 。整个测试路段处于断交状态。测试区域介于 K34+630-K34+660，做了 2 个埋设孤石试验和 1 个软弱层试验。

2.7.2 水稳材料 2 次碾压效果检测 (2017.05)

应滁州相关单位邀请，我们于 G312 某路段进行了落球检测，对水稳材料到达 20 天龄期后 2 次振动碾压的效果，以及与落锤式弯沉车的测试结果进行了对比。

1) 概述

现场测试段为纵向约 400m、横向约 10m 的 5%水泥稳定碎石上基层；



图 2-7-19 测试情景及材料

2) 测试结果

- (1) 落球测试得到的换算弯沉较落锤测试得到的弯沉值要小；
- (2) 落球测试结果的稳定性高，离散性小；
- (3) 碾压前后落球测试数据之间的相关性较好，但落锤数据的相关性较差；
- (4) 碾压前后落球测试值无明显变化，而落锤测试得到的弯沉有增加的趋势。

3) 结论

落球的测试结果表明，碾压前后回弹模量及换算弯沉的变化不大，但落锤式弯沉仪的测试结果表明碾压后弯沉有明显增加。

2.7.3 水稳材料与设计值比较（2019.10，郑州）

2019年10月，河南工程学院使用落球设备对某公路路基中水稳层及粘土层进行了回弹模量测试，现场测试如下。



图 2-7-23 现场测试场景（左侧为粘土材料、右侧为水稳材料）

1) 测试结论：

测试结果符合《公路水泥混凝土路面设计规范 JTGD40-2011》和《公路路基设计规范 JTG D30-2015》中，对水泥稳定材料以及粘土质砂的设计值要求。

2.7.4 在役高速道路基层检测（2019.08，郑州）

某已运营高速公路，经养护单位日常养护时发现，该路基承载力和弯沉等可能存在一定问题，现场养护单位采用贝克曼梁和承载板等方法对相关参数进行检测，但是传统的方法繁琐而复杂。

受养护单位委托，我公司采用落球式回弹模量检测仪对其进行检测。将养护单位用贝克曼梁和承载板检测的位置，采用落球式回弹模量检测仪进行复测并对比结果。

由于开挖到粘土层时，其面积较小只能布置 1 个测点。因此我们在同一个点进行了 3 次测试，粘土层落球仪检测显示：第一次测试的回弹模量值为 98.40Mpa（与粘土层回弹经验值吻合）。随着测试次数的增加，球体（19.1kg）对测试面的冲击次数增加，测区的压实度增加，测试的回弹模量值也随之增大。

验证结果表明，落球测试结果与载荷板检测结果吻合较好，也与现场情况相符。

2.7.5 素填土回弹模量检测（2021.4，临汾市）

受 XJ 高速路基总承包项目部委托，我公司技术人员利用落球式岩土力学特性检测仪对工地路基填土进行回弹模量检测。现场检测场景请参图 2-7-35，盖板涵洞台背回填土检测结果请参考图 2-7-36，素填土填筑路堤顶检测结果请参考图 2-7-37。



图 2-7-35 现场检测场景

经过检测，

- 1) 落球式岩土力学特性检测仪能够有效的对回填土变形和回弹模量进行检测，并且能够合理的推算出相应的弯沉值、K30、CBR 等；
- 2) 测试回填土位置与现场实际情况基本一致。

2.8 物理指标的推算

2.8.1 无粘性土

以压实度为中心的物理指标，由于具有概念简单等优点，在填土工程中是最重要的控制指标。通过大量的现场试验发现，对于无粘性土，落球测试的变形模量与干燥密度、压实度之间有良好的相关关系。

2.8.2 粘性土

对于粘性土，特别是饱和粘土，由于超孔隙水压力的影响，变形模量与干密度之间的相关关系没有唯一的对应关系。

2.9 测试适用范围、影响因素及仪器检定

2.9.1 特点

1) 集成度高

在本套测试设备 SEH-FWD 中，集成了变形模量、回弹模量、基床系数（地基系数） K_{30} 和贝克曼弯沉。同时，还可以推算其他物理指标

2) 测试效率和测试精度的平衡

测试作业非常简单，仅将球体提至一定高度（标准为 0.5m）自由落下即可。无需平整测试场地，也不必刻意挑选测试位置，每个测点的时间低于 3 分钟。同时，测试精度满足工程的要求，客观性高，解析作业为全自动，无人误差。

3) 快速图形化机能

由于本设备测试效率很高，可以成片地测试。同时，设备附属的软件具备

2.9.2 适用范围

粒径不大于 15cm 的岩土材料、水泥稳定材料、沥青混凝土。

2.10 相关规程解读及落球检测的适应性

2.10.1 公路工程质量检验评定标准（JTG F80 1-2017）解读

在现行公路工程质量检验评定标准（JTG F80/1-2017）中，关于路基土石方工程、级配碎（砾）石、填隙碎石（矿渣）基层和底基层，均要求采用压实度和弯沉进行质量

检验及评定。

1) 检测设备

落锤式弯沉仪 (FWD)、贝克曼梁和自动弯沉仪。

2) 评价步骤与方式

- (1) 根据检测设备, 按照规定的测点得到弯沉值, 并计算统计值 (均值、标准偏差等);
- (2) 根据道路等级确定可靠指标或者保证率, 并以此计算弯沉代表值。其中, 对于路基需要进行湿度修正;
- (3) 根据代表值和设计值的关系, 来进行合格与否的评定。

3) 主要问题

然而, 该检评标准有较大的问题, 主要体现在:

- (1) 在现行的路基路面设计规程中, 已经不再采用弯沉作为主要的设计值, 代之以回弹模量, 而本标准仍然沿用弯沉值;
- (2) 落锤式弯沉仪 (FWD)、贝克曼梁和自动弯沉仪得到的弯沉并不相同, 甚至相互之间还有较大的区别。其中, 不同产家的设备 (特别是自动弯沉仪) 之间的测试结果也可能存在较大的差别, 这为检评工作带来相应的困难。

2.10.2 公路路基路面现场测试规程 (JTG 3450—2019) 解读

在现行公路路基路面现场测试规程 (JTG 3450—2019) 中, 对承载能力部分的检测试验方法做了较为完善的规定。

1) 测试项目及方法分类

表 2-10-1 测试项目及测试方法

CBR	回弹模量	弯沉
T0941-2008 静载法 T0945-2008 动力锥法	T0943-2008 承载板法 T0944-1995 贝克曼梁法 T0946-2019 落球仪法	T0951-2008 贝克曼梁法 T0952-2008 自动弯沉仪法 T0953-2008 落锤式弯沉仪法 T0957-2019 激光式高速弯沉法

2) 与设计规程的对应

除了 CBR 法以外，其它方法与现行设计规程（JTG D30）之间均不吻合。

3) 与检评标准的对应

除高速激光弯沉之外，其余三种弯沉测试方法与现行 F80/1 相吻合。

2.10.3 落球检测与现行规程的适应性

在此，基于落球检测技术的技术背景，就其与现行规程的适应性进行说明：

- 1) 落球检测技术首先是基于 Hertz 接触理论，通过分离压缩和回弹过程，直接得到变形模量和回弹模量。由于接触时间很短，得到的值为动态模量；
- 2) 如果材料是均值弹性体（如金属、PPR 材料等），则该模量与静弹性模量基本一致。实际上，落球式回弹模量测试仪检定规程（JJG（交通）151-2020）就是基于这个原理规定的；
- 3) 对于岩土材料，由于应变水平、载荷时间等对模量均有较大的影响，因此采用被公认为最可靠的载荷板试验（K30）进行相关关系的研究和试验。其结果就反映在材料修正上（公路路基路面现场测试规程（JTG 3450—2019）3.1.4、本技术方案表 2-2-2）。也就是说，通过材料修正得到的模量即为静变形模量及静回弹模量。

基于以上分析，可以看出，落球检测技术得到的动回弹模量可直接用于公路路基设计规范（JTG D30-2015）。

2.11 与其它快速方法的对比

2.11.1 与贝克曼梁弯沉测试方法的对比

落球检测与贝克曼弯沉的区别主要体现在：

- 1) 影响深度不同：落球检测的影响深度在 20cm 左右，恰好可检测每一填筑层的质量。而贝克曼弯沉的影响深度一般大于 40cm，容易受到下层材料影响
- 2) 贝克曼梁弯沉测得是材料的回弹性质，而岩土材料的压缩特性和回弹特性往往有较大的区别。特别是塑性较大的粘性土，由于卸载后沉降不能复原（如留有车辙），此时测得的弯沉就会明显偏小。
- 3) 对于铺装、水泥稳定土等弹性模量大的坚硬材料，弯沉值很小，测试误差较大。

表 2-11-1 落球测试技术与贝克曼梁弯沉的对比

项目	落球测试技术	贝克曼梁
测试内容	压缩、回弹变形特性	回弹变形特性

测试对象要求	无特别要求	表面平整
适用材料特性	弹性、半弹性、弹塑性 从软弱土~混凝土	弹性、半弹性 不适用软弱或坚硬材料
适用材料种类	粘土、沙砾、砾石、水泥稳定土、铺装	砾石、水泥稳定土、铺装
影响深度范围	0.15~0.25m	0.5~0.8m
测试效率	快	快
测试设备	轻便	笨重（要求卡车）

2.11.2 与 FWD 测试方法的对比（郑州，2019.12）

1) 概述

2019年12月，在郑州一建集团滨河路基工程，对落球式回弹模量测试仪与车载式落锤弯沉仪进行弯沉和回弹模量比对实验。其中，车载式落锤厂家为丹麦丹纳特公司。设备均经过计量检定，且在检定周期内。

落球采用质量为 19.1kg 的球体，自由落高为 50cm。因落锤荷载盘为 30cm，大于落球直径，测试范围较大，所以落球测试为一直径 60cm 的圆形区域。中心点测试一次，面对大里程方向，距中心点 40cm 的左、上、右、下各点依次测试一次。

落锤测试采用检测标准规定力值 50KN，设备为 9 个弯沉传感器，实验只采用中心点弯沉值。测试时在圆形中心点预砸一锤，然后以 50KN 测试两锤。计算时以后两锤的平均值作为该点弯沉。

此外，由于落锤测试力值较大，测试后对路基会有压实作用。所以先进行落球测试，然后同点落锤测试。共测试 40 个区域，分别以中心点弯沉和周围弯沉均值进行比对。

2) 测试结果比较

比较结果表明：

- (1) 落球的中心点值和周围点均值均与 FWD 弯沉有良好的相关关系，其相关系数在 0.87~0.95；
- (2) 落球的中心点值与 FWD 弯沉的相关关系要优于周围点均值，表明材料的离散性较大；
- (3) 落球值 (x) 与 FWD 弯沉 (y) 的回归直线的截距 >0 而斜率 <1，表明对于松软的土体（弯沉大），落球测试弯沉值要大于 FWD 测试值。而对于坚硬的土体，落球测试弯沉值则偏小。也就是说，FWD 测试值的变动率小于落球，其原因在于两者测试深度范围有不同。FWD 的测试深度要大于落球，测试范围更广，因此，其变动率更小。

第 3 章 土质材料强度特性的检测

3.1 测试的意义

岩土材料的另一个重要的力学特性是强度特性（如内摩擦角 ϕ 和粘聚力 c ）。在岩土材料的强度特性只有在较大应变水平时才能显现，往往需要较大的荷载或者采用较小的截面积。用于深度较深的地基勘测的圆锥动力触探、标准贯入试验方法一般难以用于填土材料强度的检测，因此学者们用各种方法进行了尝试。

日本国土交通省近畿地方整備局在 2005 年提出了名叫“キャスポル”的简易支持力测定装置，在日本得到了较为广泛的应用。通过测试的加速度，并根据事先标定的经验公式来推求岩土材料的各种指标（ c ， ϕ ，CBR 等）。

但是，即使是这些为数不多的方法，对于强度指标的测试都是不能令人满意的。由于缺乏有效的现场测试方法，因此只有通过室内试验对比的方法进行。然而，由于碾压方式、材料粒径等的差异，即使干密度、含水量相同，材料的强度特性也不尽一致。

为此，我们开发了岩土材料的强度特性（ c ， ϕ ）的测试理论和技术，并集成到落球测试仪（S 型）中。

需要指出的是，由于现场验证困难，本设备测试的强度指标（ c ， ϕ ）尚缺乏足够的验证，测试结果仅供参考。

3.2 测试方法和原理

强度指标的测定，是基于 A. S. Vesic 理论的“空洞扩张”理论。

根据 Vesic 的“空洞扩张”理论，当有桩、锚、旁压仪等压入土体时，会产生一个膨胀区。在膨胀区中岩土材料会发生屈服，从而使得材料的强度特性得到发挥。

而当球体落入岩土材料中时，也会像桩压入土体一样，产生一个膨胀区域。因此，可以利用 Vesic 的“空洞扩张”理论来测试材料的强度。

我们通过大量的理论研究及试验，修正了 Vesic “空洞扩张”理论使之能够满足落球测试技术的要求。

3.3 模型及现场验证

3.3.1 内摩擦角的验证

对 ϕ 的测试结果表明，除一点（堆石材料）外与自然含水量条件下三轴不排水剪切试验结果吻合较好。

值得特别指出的是，对某大坝堆石材料的强度指标 ϕ 所进行的测试中，落球检测得到的 ϕ 为 58° ，而在相同设计干密度条件三轴排水剪切下得到 ϕ 仅为 43° 。其间巨大的差异恰恰反映了室内实验的局限性。

首先，关于沙砾等无粘性材料，在充分压实的状态下其可能拥有非常高的摩擦角。龙岗教授 (Tatsuoka) 指出，当压实度超过 95% 后，沙砾石的摩擦角 ϕ 完全可以达到 60° 以上（下图）。其次，在现场测试中，测试场所正好位于重型机械（载重卡车）的通道上，其压实度非常高。

因此，我们认为落球测试的结果更加符合实际状况，而室内三轴试验则过小地评价了堆石材料的强度特性。此外，在中国四川的“5.12 汶川大地震”，日本“6.14 岩手/宫城内陆地震”中，众多土石坝都经受了强震的考验。例如，在日本石渊大坝（CFRD，最大坝高 53m，距震中 9km）上记录的最大加速度（表-1[5]）达到了 2G 以上，尽管远远超出了设计地震加速度，但其堆石坝体未见明显的损坏。这说明，堆石材料的实际强度应当远远超出其设计强度。

3.4 水泥稳定材料抗压强度的测试

水泥稳定材料的抗压强度与其变形模量一样，都是非常重要的力学指标。利用落球检测技术，通过回归变形模量~抗压强度的关系，不仅可以测试其变形模量，还可以很好地在现场检测水泥稳定材料的抗压强度。

3.5 特点和适用范围

3.5.1 特点

可直接测试现场材料的强度指标；测试简便、快捷；可测试水泥稳定土的单轴抗压强度。

3.5.2 与其他方法相比的优越性

岩土材料的强度特性只有在较大应变水平时才能显现，往往需要较大的荷载或者采用较小的截面积。用于深度较深的地基勘测的圆锥动力触探、标准贯入试验方法一般难

以用于填土材料强度的检测。日本国土交通省近畿地方整備局在 2005 年提出了名叫“キャスポル”的简易支持力测定装置，是目前比较先进的技术。通过测试的加速度，并根据事先标定的经验公式来推求岩土材料的各种指标（ c ， ϕ ，CBR 等）。

第 4 章 岩石材料力学特性的检测

4.1 测试的意义

岩体和岩石的力学特性中，变形模量和单轴压缩强度是代表性的指标。目前，利用钻孔取芯和压缩试验是最通常的方法，但其作业性和代表性均不理想。为此，我们开发的“打球检测技术 SBT”可以快速地测试岩石材料的变形特性，进而根据相关特性还可推算其他特性。

4.2 测试方法和原理

4.2.1 测试内容和方法

本方法，利用金属刚性球体击打岩石或岩体，并利用其上安装的传感器记录击打（碰撞）过程。利用 Hertz 碰撞理论并经过相应的修正，能够直接测定岩石材料的变形模量。

4.2.2 变形特性的测试原理

1) 理论基础

本技术测试岩石材料变形特性的理论基础源于 Hertz 冲击理论，与落球检测技术基本相同。

2) 材料修正

对于岩石材料，其回弹时的弹性模量也大于其压缩时的弹性模量。因此，与落球检测一样，将碰撞过程分为两个部分，即压缩过程和回弹过程。

第 5 章 岩体结构检测

5.1 岩石、岩体检测的目的

5.1.1 岩体分级

利用弹性波 P（纵）波波速，还可以测试岩体的完整性和对基本岩体进行分级^[8]。

岩体弹性波速可以直接利用测试面检测，也可利用钻孔进行检测。需要说明的是，我们开发的孔内检测设备采用无水耦合，不仅可利用垂直孔，还可以利用水平孔、斜孔乃至向上的孔道，而且测试距离可达 30~50 米以上。

5.1.2 隧道开挖松动区测试（屈折法）

利用弹性波 P（纵）波检层，可以测试岩体的松动区范围。当开挖引起周围岩体松动时，其波速会有降低。因此，利用弹性波屈折法检层的原理，可以推断松动区的厚度。

5.1.3 隧道开挖松动区及掌子面前方测试（干式跨孔法）

利用弹性波 P（纵）波干式跨孔法可以适用于水平、上方向孔的特点，从而能够较为准确地测试隧道开挖松动区范围，并对掌子面前方的岩体特性进行测试。

5.2 工程实例

5.2.1 隧道开挖松动区检测（杭州.建德、2017.11）

受浙江相关单位的委托，利用公司跨孔式岩体力学特性检测仪（SRE-CMT）对浙江砚岭某隧道岩体质量进行检测。根据现场情况，对隧道地面进行钻芯成孔，孔径为 90mm，孔深约 3.0m，孔距约 2.0m。

经过检测，发现距离地面下 0.8m 左右出现岩体质量的明显变化，进一步验证了该设备在岩体质量检测中的应用精度以及体现了传感器机械无水耦合的可行性。

结语

我们潜心多年研制的

落球式岩土力学特性测试仪（SEH-FBT）

手持打球式弹性模量测试仪（SH-SBT）

包含了大量的独创性技术，如变形模量、 c ， ϕ 等。这些方法使得我们的测试技术得到了国内外广泛的认可，均已申请了国家发明专利并取得多项授权。

在此，我们衷心期望这些技术、方法和设备能够为我国的道路、铁道、港口、机场、市政等基础建设贡献自己的力量，同时也期待着在实际应用中不断地完善和成熟。

最后，衷心向各位合作伙伴以及关心、支持我们的各位朋友表示诚挚的谢意！

技术支持

✘ 本资料为内部资料，仅供本公司及相关单位人员参考。未经本公司许可，任何单位和个人不能下载、阅读以及转载；

✘ 有关本资料相关的任何疑问，请咨询：

✘ 四川升拓检测技术股份有限公司 客服咨询专线

✘ TEL: (028)6861-1507、6861-1511、6861-1527

✘ MAIL: Support@scentralit.com

✘ HTTP: www.scentralit.com

✓ 有关本资料的最新更新，可在本公司网站的下载中心下载：

http://www.scentralit.com/download_201003181343459218.html