

混凝土刚性及强度检测技术体系

(V1.22)



2019-02-06 初稿

2021-02-26 第 20 次修订

2021-06-18 第 21 次修订

2023-07-27 第 22 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	3
第 2 章 冲击弹性波波速检测	4
2.1 概述	4
2.2 混凝土试件的弹性波波速测试	4
2.2.1 试件测试方法	4
2.2.2 波速换算系数的计算	5
2.2.3 波速换算系数的验证（北京，2015）	5
2.2.4 波速换算系数的验证（成都，2019）	5
2.3 混凝土构件的测试方法和原理	6
2.3.1 反射法	6
2.3.2 透过法：P 波单面平测法	6
2.3.3 透过法：P 波双面对测法	6
2.3.4 透过法：瑞利（表面）波法	7
第 3 章 基于冲击弹性波波速的混凝土弹性模量	7
3.1. 概述	7
3.1.1.测试的背景和意义	7
3.1.2.混凝土质量的评价方法	8
3.1.3.弹性模量测试的基本原理	8
3.2. 弹性模量测试精度提高的方法	8
3.2.1.钢筋影响的修正和钢筋率取值	9
3.2.2.不同传播路径波速的分离（优势波速）	9
3.2.3.结构混凝土动泊松比的测试及对测试结果的影响	9
3.3. 动弹性模量测试的数值模拟及验证	9
3.3.1.数值模拟（棱形/圆柱试件）	9
3.3.2.动弹性模量的验证	10
3.4. 影响因素及相互关系	10
3.4.1.动、静弹性模量的相关关系	10
3.4.2.泡水的影响	11
3.4.3.静弹性模量的验证（南京、2020-2021）	11
3.5. 弹性模量测试的现场应用	11
3.5.1.养护条件的影响（河南连霍高速，2010.12）	11
3.5.2.龄期及位置的影响（中铁二局湖南**制梁场，2010.09）	12
3.5.3.混凝土弹性模量与应力状态的关系	12
第 4 章 基于冲击弹性波波速的混凝土强度检测	12
4.1 概述	12
4.2 构件混凝土强度的检测方法	13
4.2.1.抗压强度与弹性模量间的关系（基于冲击弹性波波速）	13
4.2.2.抗压强度与弹性模量间的关系（公路桥涵设计规范 JTG D62-2004）	13
4.2.3.抗压强度与弹性模量间的拟合关系	13
4.2.4.模量~强度曲线的简易标定方法	13
4.2.5 混凝土结构强度测试流程	13

4.2.6 测试效率的提高	14
4.3 构件混凝土强度的现场验证	15
4.3.1.现场强度测试对比验证（青海**水电站导流隧洞，2012.10）	15
4.3.2.现场强度测试对比验证（安徽合肥，2014.08）	16
4.3.3.现场强度测试对比验证（重庆万州，2019.01）	16
4.3.4.现场强度测试对比验证（重庆万州，2019.02）	18
4.3.7.现场强度测试对比验证（衢宁铁路，2019.10）	19
4.3.9.混凝土预制梁强度测试对比验证（南京，2021）	20
4.3.10. 杭温铁路隧道二衬强度检测（浙江杭州、2023.06）	21
4.4 特点、适用范围及与其它方法的比较	21
4.4.1.特点及适用范围	21
4.4.2.与回弹仪的对比	22
4.4.3. 与超声波法的对比	22
4.4.4.与超声回弹综合法的对比	22
4.4.5.冲击弹性波法的优势小结	23
4.4.6.对比验证（2019.01，重庆万州，与回弹仪）	23
4.4.7.混凝土龄期与强度、模量的关系	23
4.4.8.大体积混凝土分层现象	23
4.5 与取芯压载试验的对比验证汇总	23
4.5.1.取芯压载与无损检测的异同	24
4.5.2.混凝土强度测试对比汇总（铁路隧道）	24
第5章 基于打球技术的混凝土模量及强度检测	24
5.1 测试方法和基本验证	24
5.1.1 基本原理	24
5.1.2 测试精度的基本验证	25
5.2 混凝土弹性模量和强度测试	25
5.1.1 混凝土弹性模量的推算	25
5.1.2 实际应用：衬砌混凝土拆模时期的优化（2013～，日本多个工程）	25
第6章 结构混凝土早期强度检测及推定	26
6.1 混凝土弹性模量和强度测试	26
6.1.1 等效龄期法	26

第 1 章 概述

混凝土结构是最重要的土木、建筑结构，在社会基础设施中占据举足轻重的地位。然而在使用过程中，不可避免地出现各种老化、劣化现象（如裂缝、混凝土强度降低等）。同时，如果施工质量得不到很好的保证，会加速结构的劣化，从而造成社会经济的损失。

其中，弹性模量和抗压强度能够很好地反映混凝土施工质量、老化，因此，其测试方法历来得到广泛的重视。但是，长期以来，对实体结构混凝土的弹性模量以及抗压强度一直缺乏有效的无损检测技术手段。无论是回弹法还是超声回弹综合法，其测试精度、测试范围等均不能满足工程的需要。

为此，我们以冲击弹性波及相关理论为基础，以动弹性模量为核心，建立了混凝土刚性及强度推定的技术体系，其内容主要包括：

- 1) 冲击弹性波波速的测试方法；
- 2) 基于冲击弹性波波速的混凝土动弹性模量的测试方法；
- 3) 基于冲击弹性波波速的混凝土抗压强度的测试方法；
- 4) 基于 Hertz 接触理论的混凝土弹性模量、抗压强度的快速测试方法；



混凝土强度检测仪（STL-CMT）

第 2 章 冲击弹性波波速检测

2.1 概述

冲击弹性波的波速与弹性体的动弹性模量之间有明确的理论关系，因此，通过精确地测试弹性波速，可以很好地推算材料的动弹性模量。

然而，在弹性体中传播的弹性波的波速，不仅与弹性体的材质，而且与其它诸多因素有关，例如，弹性体的形状、尺寸，弹性波的波长，测试方法等均有关系，测试得到的波速也有所不同。

因此，首先需要对各种被测体（混凝土试件或构件）、采用的弹性波波长、测试方法得到的波速进行分类，才能精确地测试对象的弹性模量。由于测试对象（构件或试件）和测试位置的不同，在系统中也集成了多种测试方法。主要有：

- 1) 基于反射特性的 P 波波速测试方法，如冲击回波法、单一反射法；
- 2) 基于透过特性的 P 波波速测试方法，如单面平测法和双面透过法；
- 3) 基于透过特性的 R 波（瑞利波）测试方法，其对应的波速为 V_R 。

2.2 混凝土试件的弹性波波速测试

对混凝土试件，采用冲击回波法进行测试，根据试件的高厚比进行相应的修正后，得到混凝土一维 P 波波速。

2.2.1 试件测试方法

对于试件（标准试件 $150 \times 150 \times 150$ 或 $100 \times 100 \times 100$ 、棱形试件 $150 \times 150 \times 300/450$ 以及圆柱形试件），应采用冲击回波法进行测试。

- 1) 测试方向：原则上在试件的长轴方向激振和测试。
- 2) 传感器的固定方式：传感器应采用热熔胶或者 ST-S31SC-1、ST-S21C-1 支座固定。
- 3) 激振方式：应采用 D6 或者 D10 激振锤激振，力度应轻。
- 4) 测试波速 V_t 的计算方法。其中， H ：试件的测试方向的高度/长度； T ：激振弹性波往返的时间（卓越周期）；
- 5) V_t 与 V_{p1} 的关系：根据试件的特性、尺寸， α （一维波速换算系数）可按取值

或计算。

2.2.2 波速换算系数的计算

反射法，特别是冲击回波法得到的波速 V_{ref} 与透过法得到的波速有所不同。为了便于弹性模量计算，需要将 V_{ref} 换算成一维 P 波波速 V_{P1} 。

2.2.3 波速换算系数的验证（北京，2015）

中国水利水电科学研究院吕小彬^[19]等人通过数值模拟和对比试验的方法，对 150mm 的立方体试件、 $\Phi 150 \times 300\text{mm}$ 的圆柱体以及 $\Phi 100 \times 100\text{mm}$ 的钻孔试件进行了研究。

- 1) 有限元动力响应分析
- 2) 试验验证

混凝土有 6 种配比、5 个龄期。比较了 150 立方体的波速与 $\Phi 300 \times 150$ 的波速比值。



2-2-5 混凝土试件

- 3) 结论

- (1) 在冲击弹性波测试普通混凝土试件时，各打击锤的测试结果无明显区别；
- (2) 3 种试件的几何形状系数 β 与 4.1.2 中的理论值是比较吻合的。

2.2.4 波速换算系数的验证（成都，2019）

我们对 150mm 的立方体试件、 $\Phi 100 \times 150\text{mm}$ 、 $\Phi 100 \times 100\text{mm}$ 的钻孔试件进行了对比研究。具体操作为：先在试件（150mm 立方体标准试件）上测试试件的波速及模量；然后将试件取芯（100mm 直径，150mm 长度），测试芯样的波速及模量；最后将试件切割成 100mm 的芯样，测试其的波速及模量。

测试结果表明，

- (1) 相同材料不同形状的试件对测试的波速的影响较大；
- (2) 经形状系数修正后，弹性模量的差异较小，这表明形状系数的计算是可靠的；

- (3) 在强度检测中,在利用试件及芯样进行标定时,应注意由于形状系数带来的影响。在解析时应在试件设定中选择不同的试件类型(试件、芯样)。

2.3 混凝土构件的测试方法和原理

对混凝土构件,根据测试条件,可采用反射法(冲击回波法或单一反射法)或透过法(单面平测、双面透过、瑞利波法)进行测试。

2.3.1 反射法

在结构表面激发冲击弹性波,通过测试其在结构底部反射的时间 T 和结构的厚度 H ,即可得到材料的冲击弹性波波速 V_t 。

根据结构形式,又可以分为单一反射法和冲击回波法。

- 1) 单一反射法:当测试对象较厚,激振信号与反射信号能够分离时,可以直接得到反射时间 T 。
- 2) 重复反射法(冲击回波法):当测试对象较薄,激振信号与反射信号不能很好分离时,通过频谱分析的方法可以算出一次反射的时间(即周期)。该方法也称 IE 法(冲击回波法)。

2.3.2 透过法: P 波单面平测法

在壁厚较薄且未知,且表面面积小、形状复杂时可选用 P 波单面平测法,其得到的波速为 2 维弹性波波速 V_{p2} 。同时,该方法还可以用于测试混凝土表面劣化。

该方法对测试对象的要求最小,但 P 波信号一般较为微弱,因此需要采用移动传感器距离多次测试,采用回归或者 VMC(虚拟多频道)技术。

根据“水工混凝土结构缺陷检测技术规程”(SL713-2015)的要求,接收点不少于 4 个,固定传感器 1 且与冲击点的间距为 (150 ± 10) mm,两传感器中心距离依次为 300mm、400mm、500mm、600mm,冲击点和各接收点应处在同一直线上。

结合检层技术,还可以对层状结构(如混凝土表面有装饰层、风化层)或者混凝土的表面劣化进行测试。该方法适用于混凝土内部质量优于表面质量的情形。而根据内部的分层情况,又可以分为两种分析方法:水平双层构造、渐进构造。

2.3.3 透过法: P 波双面对测法

采用双面对测法的方法测试 3 维弹性波波速 V_{p3} ,可测试整个构件。该方法适用于有两个平行测试面,且其间距较大(一般大于 1.0m)的情形。由于该方法测试精度最高,

在满足条件时应优先选用。

2.3.4 透过法：瑞利（表面）波法

此外，由于瑞利波信号能量比 P 波强，对于面积较大、厚度较厚（一般大于 20cm）的板、壁等结构，采用瑞利波测试也是有效的方法。其得到的波速为瑞利波波速 V_R 。

利用表面波法检层的基本原理为：首先计算不同频率下表面波（通常是瑞利波）的波速，频率~波速曲线也被称为频散曲线。然后，根据频谱曲线，考虑到瑞利波波长与影响深度的关系，推算不同深度的混凝土的瑞利波波速。

能够分析频散曲线的方法较多，按照激振的方式首先可以分为稳态法和瞬态法。其中，稳态表面波的分析方法比较简单、直观。而瞬态表面波的分析原理相对来讲比较复杂，目前常用的分析方法主要有两种：SASW 法和 f-k 法，其中 SASW 法(Spectral Analysis of Surface Wave，表面波谱分析法)采用两道信号的互相关函数的傅立叶频谱作为分析基准，相对简单。另一方面，我们提出了基于卓越波长的瞬态表面波法，称之为“卓越波长法”，SASW 法和卓越波长各有优缺点，可配合使用。

- 1) SASW 法
- 2) 卓越波长法

SASW 法和卓越波长法各有优缺点。SASW 法测试较为简单，一次激振可得到连续的频散曲线。但其对信号的品质要求很高，分析也较为复杂，对技术人员的经验和水平要求很高。卓越波长法则相反，测试原理和计算分析均较为简单，解析结果的稳定性也好。但该方法需要变换不同的激振锤，测试效率低，且不能保证频散曲线的连续性。

在钢筋混凝土结构中，由于弹性波在钢筋中传播的速度要快于在混凝土中的速度，会给测试带来误差。为此，我们开发了相应的钢筋影响修正技术，并申请国家发明专利。

第 3 章 基于冲击弹性波波速的混凝土弹性模量

3.1. 概述

3.1.1. 测试的背景和意义

在各种混凝土结构中，混凝土质量是非常重要的，直接影响到预应力梁的耐久性和安全性。然而，预应力梁体积庞大，形状也较为复杂。目前，通常利用混凝土试件（150×150×300 的棱形试件）进行压载试验，以便测试混凝土的压缩强度和弹性模量。

但是，试件与构件在浇筑、振捣、养护等方面均有不小的区别，因此仅仅根据试件

的测试结果并不能保证梁构件的质量。同时，对于既有混凝土结构，采用钻孔取样的方法显然存在诸多局限。

长期以来，基于超声波的测试方法得到了一定的应用，然而，其局限性（如测试范围窄、功能单一等）也日益显著，在测试裂缝深度、混凝土模量等方面的精度也因理论方面的缺陷而一直得不到提高。为此，自 90 年代以来，基于冲击弹性波（超声波为其一特例）的测试技术得到了飞速的发展，最广为人知的当为 PIT（基桩完整性测试）方法。近年来，将冲击弹性波推广并应用于混凝土结构物的材质（强度、模量）、缺陷（裂缝、剥离、内部空洞、蜂窝等）以及几何尺寸（厚度、埋深等）的无损检测和评价已成为国际热门的研究方向，而且逐步进入工程实际应用。例如，美国材料学会标准 ASTM-C1383-98 就规定了利用弹性波测试混凝土厚度和波速的测试方法。在日本土木学会也基于冲击弹性波波速，对混凝土结构和试样弹性模量以及强度进行了标准化和规范化。

3.1.2. 混凝土质量的评价方法

评价混凝土质量的指标有很多，但最重要的指标是其轴心抗压强度 S_c 和弹性模量 E_c 。其中，轴心抗压强度 S_c 一般采用立方体标准试件测得，概念明确，试件的测试方法较为简单，目前的应用最为广泛。但对于实体结构，难以直接测试其强度。

混凝土的弹性模量决定了结构的变形特性，而且与强度、耐久性均有非常密切的关系。特别是可以通过无损检测的方法测得，因此具有广阔的应用前景。混凝土的弹性模量 E_d 、 E_c 不仅影响到结构的变形，而且也是反映混凝土质量、耐久性的重要指标：

- 1) 可以反映材料的刚性特性，在结构的变形计算中是重要的参数。特别是对于高强度混凝土，简单地采用抗压强度反推弹模的方法往往具有较大的误差；
- 2) 混凝土材料的老化往往先从弹模的降低开始，而新建结构的施工不良也会在弹模方面有所显现。

3.1.3. 弹性模量测试的基本原理

在本系统中，采用冲击弹性波作为测试媒介，通过测试弹性波的波速，据此计算材料的动切线弹性模量 E_d 和推算相应的混凝土弹性模量 E_c 。

3.2. 弹性模量测试精度提高的方法

对于钢筋混凝土，为了提高弹性模量的测试精度，需要对钢筋的影响进行修正。此外，当有局部缺陷时，还需要对路径进行相应的修正。

3.2.1. 钢筋影响的修正和钢筋率取值

- 1) 钢筋影响的修正
- 2) 钢筋率的取值及其影响程度

3.2.2. 不同传播路径波速的分离（优势波速）

在有局部缺陷、损伤的混凝土结构中，弹性波在传播时，绕过缺陷、损伤的信号有可能先于穿过缺陷、损伤的信号到达接收点。此时，如果仅采用最先到达的信号，就有可能降低对缺陷和损伤的识别能力。

同样，对于钢筋混凝土，在有与测线平行的钢筋时，从钢筋上也会传来微小的信号。如果采用最先到达的波的时刻作为波速的计算，就可能受到钢筋的较大影响。

为了更有效地避免钢筋的影响和拾取缺陷，我们利用相关分析的方法，提出了优势传播时间以及优势波速的概念，其前提是：

- 1) 直进波（P 波）的能量要强于绕射波；
- 2) 在传播过程中，弹性波首波的形状不发生改变（不分散）。

3.2.3. 结构混凝土动泊松比的测试及对测试结果的影响

由前述可见，混凝土的动泊松比取值对动弹模的测试结果有一定的影响。

- 1) 混凝土动泊松比的取值范围
- 2) 混凝土动泊松比的取值对测试结果的影响
- 3) 现场混凝土动泊松比的测试
- 4) 在本系统中动泊松比的取值

3.3. 动弹性模量测试的数值模拟及验证

3.3.1. 数值模拟（棱形/圆柱试件）

中国水科院吕小彬等人^[18]用有限元数值模拟了单面反射法（冲击回波法）在测试混凝土试件的精度。结果表明，无论是 $150 \times 300 \text{mm}$ 的圆柱形试件还是 $100 \times 100 \times 400 \text{mm}$ 的棱形试件，其一阶自振频率与 1 维弹性波理论的计算结果完全一致，而且与激振的时间（ $20 \sim 80 \mu\text{s}$ ）无关。

3.3.2.动弹性模量的验证

1) 金属材料的验证

对于钢材等金属材料，其材质均匀，动、静弹性模量之间基本一致（低碳钢的弹性模量在 200~210Gpa 之间，平均为 206Gpa）。因此，利用对金属材料弹性模量的测定，可以验证我们开发的测试方法和设备。

2) 混凝土动弹性模量的验证

中国水科院吕小彬等人^[18]采用共振法（也称横向自振频率法），对用本设备测试（冲击回波法）得到的混凝土的动弹性模量进行了对比验证。

验证结果表明，两种方法得到的动弹性模量 E_d 结果非常一致，平均相对误差为 1.3%，最大相对误差仅 3.0%。说明利用冲击回波测试混凝土 P 波速度来计算混凝土动弹性模量的方法是非常有效和可靠的。

3.4. 影响因素及相互关系

3.4.1.动、静弹性模量的相关关系

由于通过弹性波波速计算得到的弹性模量为动弹模 E_d ，因此，混凝土静弹性模量 E_c 的推算需要根据动~静弹性模量间的相关关系进行换算。

关于该相关关系，尽管目前尚无明确的结论，但比较一致的观点有：

- (1) 对于试件，由于试件在振动荷载作用下应力很小，混凝土内部没有出现微裂缝，混凝土呈现弹性特征，动弹性模量近似等于静态初始切线模量^[27-28]；
- (2) 混凝土动弹模与静弹模的比值均大于 1.0，对于高强、中强和低强混凝土，该比值大概分别为 1.2、1.3 和 1.4，强度越高该比值越小^[26]；
- (3) 对于实际的构件，由于承受一定的荷载水平，弹性波波速得到的动弹性模量是当该应力水平下的动切线弹性模量。随着应力水平的不同，该值也会有所变化。

1) 圆柱试件的对比（水电规程）

2) 棱形试件的对比

3) 混凝土动~静弹性模量间的相关关系

除去非常软弱的片石混凝土后，混凝土动静弹模的相关关系可表示为（单位：Gpa）：

可见,对于大部分普通混凝土,采用上式回归的相关系数达到了 0.96。另一方面,若采用 $E_c = 0.83E_d$, 则对于高强混凝土,有过低评价静弹模的趋势。为此,在本系统中,即采用 $E_c = 9.0e^{0.033E_d}$ 计算静弹模。

3.4.2. 泡水的影响

对于泡水养护的影响,我们进行了相应的试验研究。采用了 6 个龄期在 1 年以上的混凝土试块。

可以发现:

- (1) 对于干燥混凝土,在泡水初期由于材料软化,其波速、动弹模均有所降低;
- (2) 随着泡水时间增加,混凝土饱和后,其波速、动弹模均逐步回升,直至超过初始值。其原因一方面在于水化作用的进行,另一方面在于孔隙中水分代替了空气,使得波速增加;
- (3) 干燥后,波速、动弹模略有下降,但仍超过初值,说明了水化的作用;
- (4) 吸水率与波速、动弹模的变化率有一定的相关关系。
- (5) 在今后的试验中,应增加强度方面的试验数据。

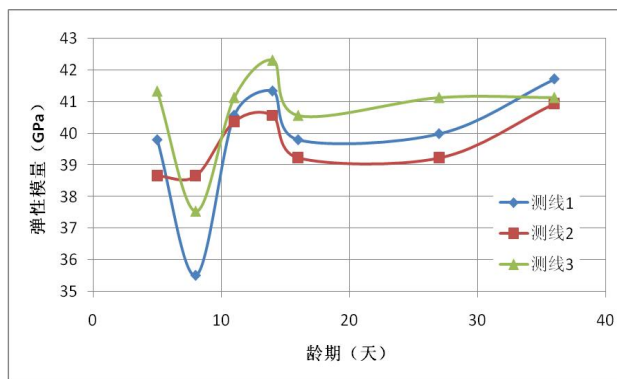
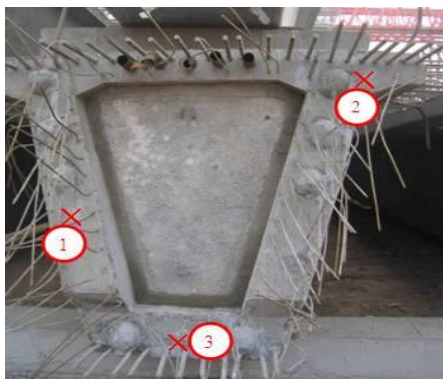
3.4.3. 静弹性模量的验证 (南京、2020-2021)

利用冲击弹性波对同一车混凝土做出来的混凝土立方体抗压试件 ($150 \times 150 \times 150 \text{mm}$) 及混凝土棱柱体弹性模量试件 ($150 \times 150 \times 300 \text{mm}$) 分别进行检测,得到各自的弹性波速度、动弹模、静弹模等值。然后利用压力机对混凝土棱柱体弹性模量试件进行压载试验,得到试件的压载静弹模。

3.5. 弹性模量测试的现场应用

3.5.1. 养护条件的影响 (河南连霍高速, 2010.12)

对蒸汽养护条件下混凝土弹性模量的变化进行了研究。



蒸汽养护对弹性模量的影响

从箱梁的静弹性模量的检测结果可以看出：

- 1) 3号测点比1号、2号测点的静弹性模量偏大，主要原因是与施工振捣时，骨料下沉至箱梁底部，导致测试波速即弹性模量增大相关；
- 2) 当箱梁蒸汽养护后，模量有明显的降低趋势。

3.5.2.龄期及位置的影响（中铁二局湖南**制梁场，2010.09）

对不同龄期（龄期为3.5d、7d、9d、10d、14d、15d、150d）的预制梁，在不同部位（梁顶板中部、腹板）测试了混凝土的材质（浇筑质量）。

根据测试结果，可以得到：

- (1) 随着龄期的增加，混凝土的弹性模量也相应增加；
- (2) 腹板下部混凝土的弹性模量 E_c 明显高于上部。其原因在于在浇筑过程中混凝土的分离，即水分上浮，固形物下沉，同时下部混凝土受到压密作用从而密实度有所增加；
- (3) 尽管并非同一片梁，得到的规律仍然十分明显。

3.5.3.混凝土弹性模量与应力状态的关系

如前所述，混凝土的切线弹性模量与其应力水平有密切的关系。不仅如此，与应力（2向、3向）状态也有一定的关系。一般来说，应力水平越高，切线弹模越低，3向应力比单、双向应力的切线弹模要低。

第4章 基于冲击弹性波波速的混凝土强度检测

4.1 概述

在各种混凝土结构中，混凝土质量是非常重要的，直接影响到预应力梁的耐久性和

安全性。然而，预应力梁体积庞大，形状也较为复杂。目前，通常利用混凝土试件（ $150 \times 150 \times 300$ 的棱形试件）进行压载试验，以便测试混凝土的压缩强度和弹性模量。

但是，试件与构件在浇筑、振捣、养护等方面均有不小的区别，因此仅仅根据试件的状况来推断实体构件的混凝土强度有明显的缺陷。另一方面，回弹法、超声回弹综合法作为目前的标准方法，其测试精度、范围等方面难以满足工程的需求。

为此，我们提出利用根据现场检测到的（动）弹性模量，来推算混凝土的抗压强度。

4.2 构件混凝土强度的检测方法

4.2.1. 抗压强度与弹性模量间的关系（基于冲击弹性波波速）

混凝土强度是混凝土最重要的性能指标，反映的是材料破坏时的承载力，因此难以用无损检测的方法进行测试。但是，对于配合比相对类似的混凝土，其弹性模量与抗压强度之间有很好的相关关系。因此，根据测试的弹性模量和标定的弹性模量～抗压强度关系，可以间接地推算混凝土的抗压强度。为此，我们与合作伙伴一道，也在国内外十数个工程，分别对混凝土试件（包括标准立方体、棱柱体、圆柱体等）和构件（采用钻孔取芯验证）进行了弹性模量（由前述的弹性波波速计算）～抗压强度关系的研究。

4.2.2. 抗压强度与弹性模量间的关系（公路桥涵设计规范 JTG D62-2004）

根据，“公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范”（JTG D62-2004）和“混凝土结构设计规范”（GB50010-2002），混凝土立方体抗压强度标准值 $f_{cu,k}$ 和弹性模量 E_c 之间有如下的对应关系。

4.2.3. 抗压强度与弹性模量间的拟合关系

基本公式、标准试件、小型圆柱形芯样。

4.2.4. 模量～强度曲线的简易标定方法

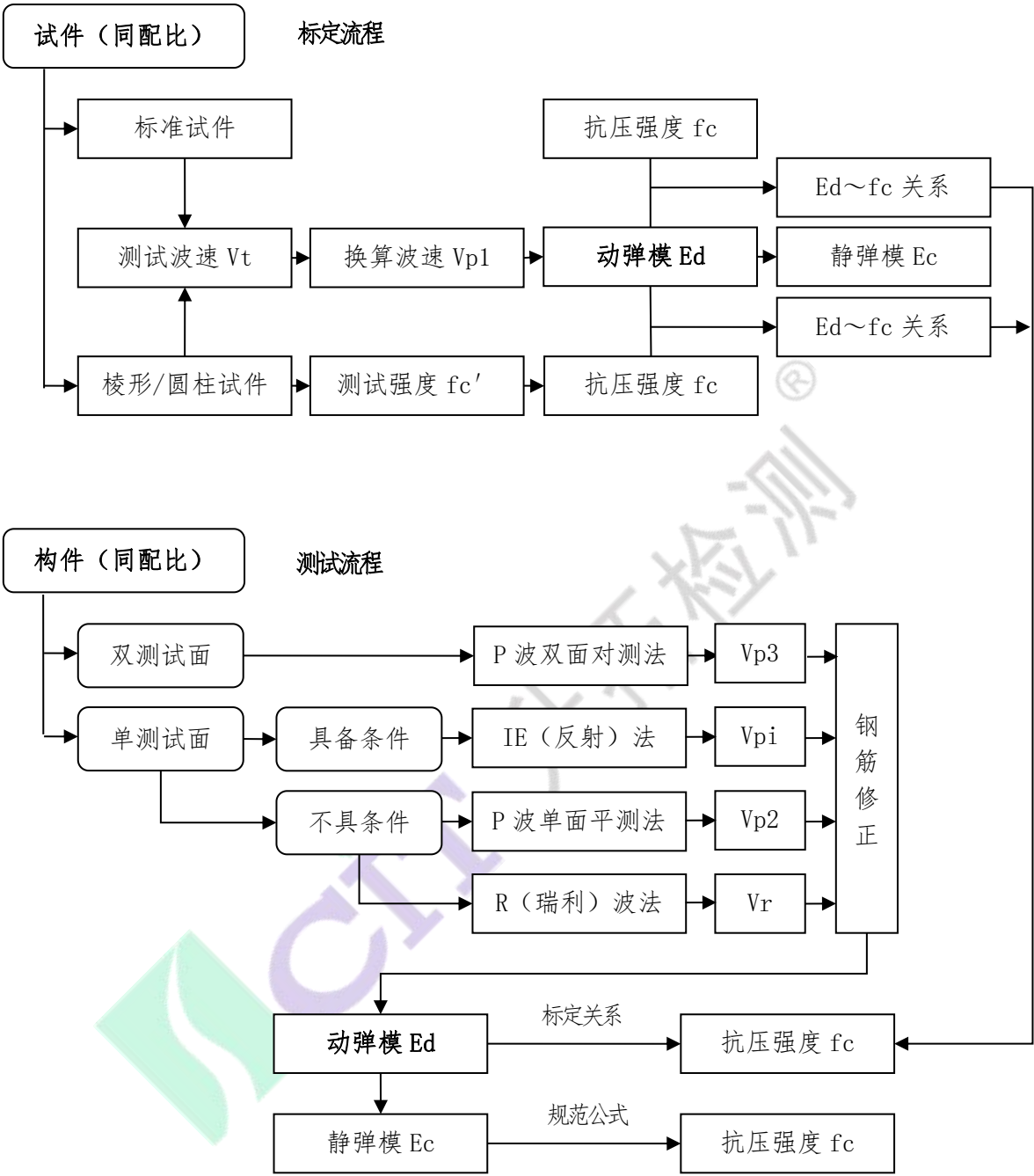
1) λ 的取值：对于大多数结构混凝土（抗压强度在 $20 \sim 75\text{Mpa}$ ），形状决定系数 λ 在 $4 \sim 7$ 。 λ 越大，S 型的中间段越陡，反之，则越平缓。

2) E_A 的回归

4.2.5 混凝土结构强度测试流程

本技术体系的混凝土结构检测的核心在于以动弹性模量作为中间载体，将标定与现场检测、不同检测方法之间进行了有机的结合。

1) 流程图



混凝土结构强度无损检测流程

2) 计算公式汇总

各种方法测试得到的波速 V_i 与混凝土动弹性模量 E_d 间的换算关系。

4.2.6 测试效率的提高

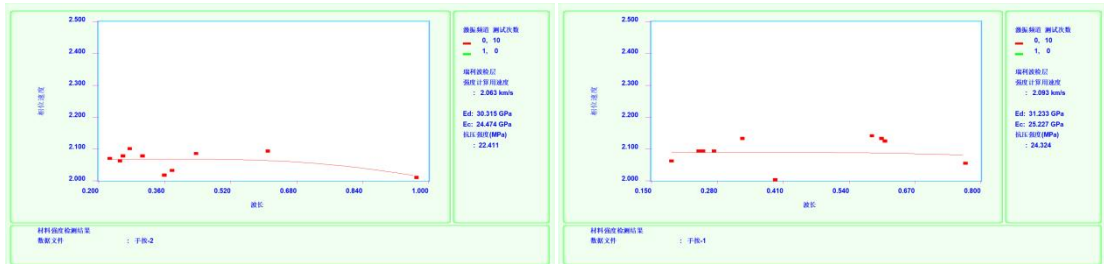
为了提高测试效率，我们设计了专用支架。利用专用支架，一人即可完成传感器的

固定和激振。

对比测试结果表明，使用专用支架的测试稳定性、测试结果均与直接用手按压接近。



图 4-2-9 混凝土强度测试支架及使用情形



上：直接按压测试结果

下：使用支架测试结果

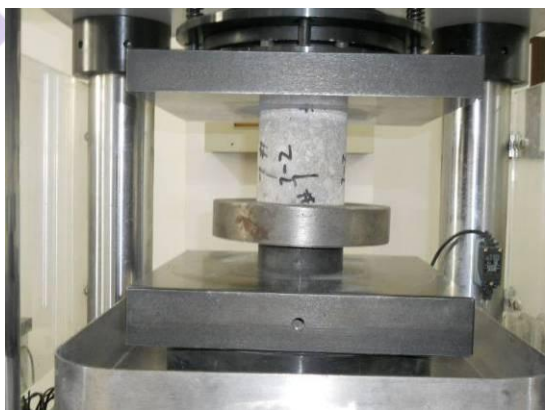
4.3 构件混凝土强度的现场验证

4.3.1.现场强度测试对比验证（青海**水电站导流隧洞，2012.10）

受业主方委托，对**水电站导流隧洞衬砌的强度、厚度以及灌浆质量进行了检测。其中，衬砌混凝土强度采用表面波法。为了验证测试结果的精度，业主还进行了钻芯取样和压载试验，总数为 24 个。



4- 3-1 现场检测情景



4-3- 2 压载试验情景

根据式（3-5）测试得到的强度与压载强度的对比如下图所示，平均绝对误差为 1.08Mpa、误差率为 11.1%。考虑到测试范围、位置的偏差，测试精度是十分令人满意的。

4.3.2.现场强度测试对比验证（安徽合肥，2014.08）

受冶金建筑设计研究总院邀请，我们对合肥某大道现浇预应力箱梁的混凝土强度进行了检测。测试部位腹板厚度为 0.5m，顶板和底板厚度均为 0.3m，设计强度为 C55。

无损检测采用了单面反射法（IE、冲击回波法），每个部位布置 10 个测区。此外，还采用了回弹、钻芯等方法相互进行了对比和验证。由于测试位置不能一一对应，我们采用了平均值进行对比。



作业情景

测试结果表明：

- （1） 单面反射法测试结果与回弹取芯综合法推定值均值基本一致，两者的均值的偏差仅有 1.8Mpa，即 5.3%；
- （2） 单面反射法测试得到的混凝土的抗压强度是腹板较大而底板、顶板相对较小。考虑到腹板较高，混凝土自重对其有一定的压实作用，其抗压强度一般会有所提高。因此，我们认为这种趋势是合理的，而且在钻芯取样中，腹板的某芯样的强度为 51.8Mpa（在数据处理中被舍去），表明直腹板可能存在较高的强度区。

4.3.3.现场强度测试对比验证（重庆万州，2019.01）

受中铁某局邀请，我司于 2019 年 01 月 23 日-2019 年 01 月 25 日对郑万铁路重庆段段 DZ 隧道、XZ 隧道、RH 隧道等隧道衬砌混凝土强度进行了检测，本次检测采用面波法、直达波法（平测法）进行检测，面波法分别采用 D17、D30、D50 三种冲击锤测试，直达波法分别采用 D17、D30 两种冲击锤测试。

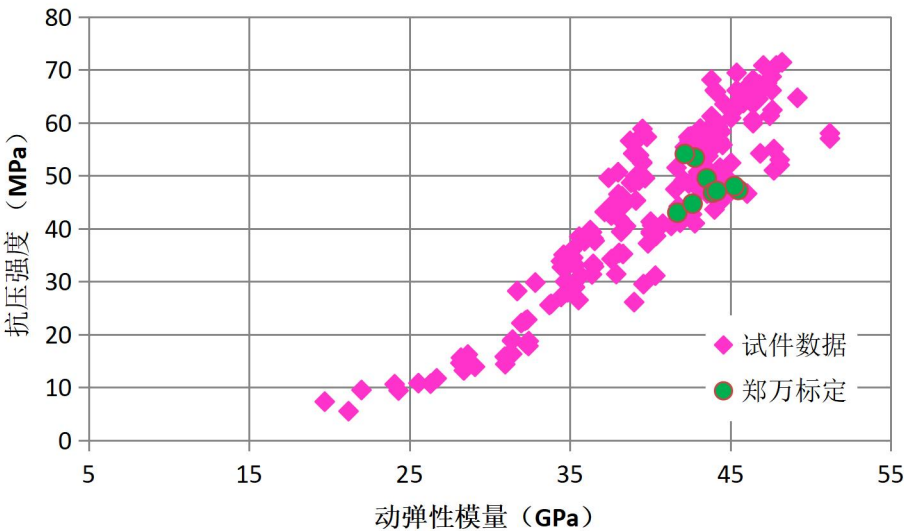


作业情景

1) 标定

本次在 5#拌合站实验室选取三组标准试块进行标定，每组有 3 个试块，第一组试块浇筑日期为 2019 年 1 月 3 日，第二组试块浇筑日期为 2019 年 1 月 15 日，第三组试块浇筑日期为 2018 年 12 月 20 日，各试块测试得到的模量和抗压试验测得的强度。

标定得到回归参数 E_A 为 40.8，其在既有的 $E_d \sim f_c$ 关系中的位置如下。可以看出，标定试块的数据与既有数据保持一致。



郑万标定数据位置

2) 面波法验证结果

面波法的验证结果如下表及图所示所示。

可以看出，绝大部分测点的测试结果与钻芯压载结果吻合较好。偏离较大的一个测点中，发现有 30cm 深的裂缝，说明了面波法对缺陷的敏感性。

3) 小结

- (1) 郑万线 D、X 周隧道的混凝土的 $E_d \sim f_{cu}$ 关系与既有关系基本一致；
- (2) 经钻芯验证，面（瑞利）波法、P 波平测法测试得到的强度均较为可靠，且对裂缝等缺陷较为敏感；
- (3) 试块标定的 E_A 值与我们积累的经验值基本一致；

4.3.4.现场强度测试对比验证（重庆万州，2019.02）

受中铁某局邀请，我司于 2019 年 02 月对郑万铁路重庆段段 XZ 隧道、DZ 隧道、HS 隧道等隧道衬砌混凝土强度进行了检测。每座隧道测试 300 米衬砌。

1) 标准试块标定

本次在黄石隧道出口试验室选取三组标准试块进行标定，每组有 3 个试块，第一组试块浇筑日期为 2019 年 1 月 26 日，第二组试块浇筑日期为 2019 年 1 月 16 日，第三组试块浇筑日期为 2019 年 1 月 7 日。

试块标定一览表

组号	试块编号	动弹模 (Gpa)	强度 (Mpa)
一组	1#	40.585	41.16
	2#	37.417	42.10
	3#	39.519	40.23
二组	4#	39.647	44.76
	5#	39.629	48.80
	6#	38.139	37.04
三组	7#	42.998	52.93
	8#	41.464	46.12
	9#	41.497	46.58

标定得到回归参数 E_A 为 38.9。

2) 现场芯样标定

本次在黄石隧道和小周隧道钻取了 11 个芯样 ($10 \times \Phi 10$)，进行了弹性波和压载试验，求取得到的 E_A 为 40.5。

芯样标定一览表

组号	试块编号	动弹模 (Gpa)	强度 (Mpa)
HS 隧道一组	1#	37.95	36
	2#	37.09	38
HS 隧道二组	3#	44.93	44.1
	4#	37.76	47.2

	5#	43.5	47.5
XZ 隧道一组	6#	43.02	50
	7#	41.78	45.3
	8#	42.35	52.5
	9#	43.02	38.1
XZ 隧道二组	10#	42.07	38
	11#	44.65	45.6

本次标定数据在既有的 $E_d \sim f_c$ 关系中的位置如下。可以看出，标定试块的数据与既有数据保持一致

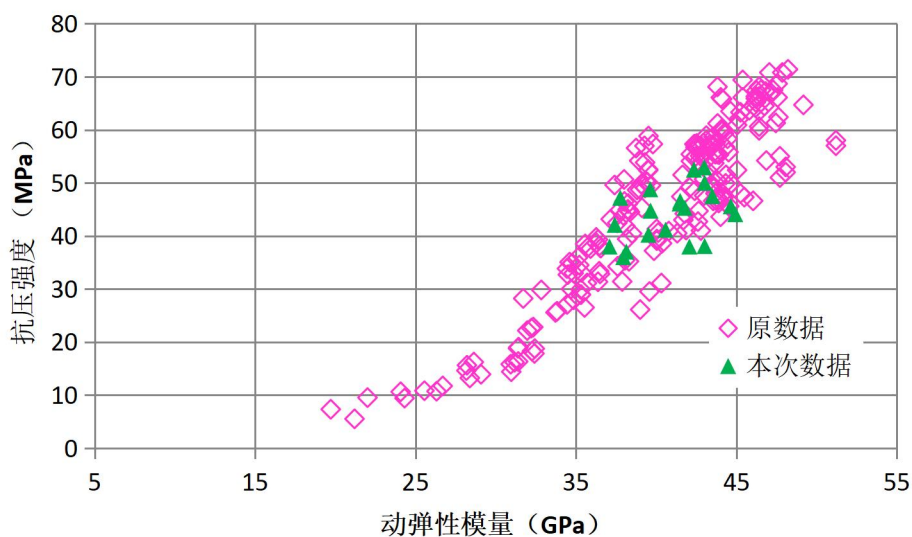


图 4- 3-5 郑万标定数据位置

4.3.7.现场强度测试对比验证（衢宁铁路，2019.10）

受相关单位邀请，我司于 2019 年 11 月对衢宁铁路多条隧道的衬砌混凝土强度进行了检测。检测采用 R 波测试，并利用钻芯芯样修正了 E_d 。

1) 芯样标定结果

利用 10 个芯样，对 E_d 值进行了标定，结果为 36.5。

2) 现场测试结果

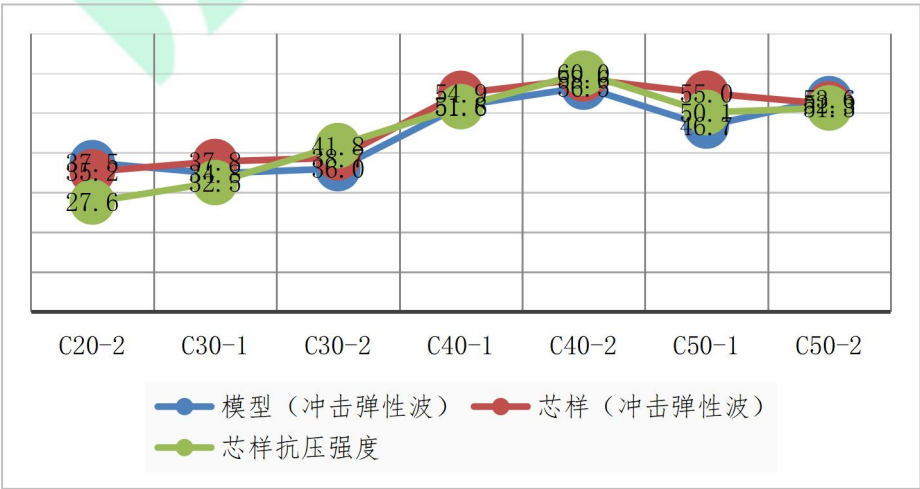
本次现场取芯验证共计 45 个芯样，分别位于 8 处测点位置，其中各点采用冲击弹性波测试结果与钻芯抗压结果对比。可见，采用冲击弹性波测试强度结果与现场取芯抗压结果基本吻合。

4.3.9.混凝土预制梁强度测试对比验证（南京，2021）

采用冲击弹性波对不同强度等级（C20\C30\C40\C50）的强度模型进行测试，得到强度模型的无损检测结果。然后在模型梁上面取芯，然后采用冲击弹性波对取得的芯样进行测试，得到芯样的无损检测结果。最后用压力机对芯样进行压载试验，得到芯样的强度，并与模型、芯样的冲击弹性波检测强度进行对比。



强度模型测试、取芯、芯样测试、芯样压载



冲击弹性波与压载对比图

注：芯样 C20-1 由于偏心受压，因此在相关系数计算时未采用。

由此可见，芯样抗压强度与模型无损检测强度之间的相关性达到了 87.9%。

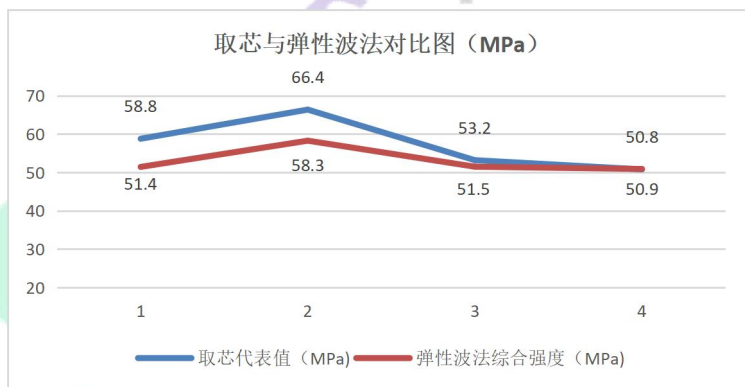
4.3.10. 杭温铁路隧道二衬强度检测（浙江杭州、2023.06）

受杭温铁路某公司检测中心委托，我公司对杭温铁路杭温铁路某隧道衬砌强度进行了现场检测。此次检测以冲击弹性波为媒介，利用表面波（R 波法）进行现场测试。现场对比采用取芯抗压对部分结果进行了对比，验证位置取 1~3 个芯样，切割成 2~5 可压载试块。



现场测试照片

对比分析取芯结果与弹性波法检测结果：取芯离散最小为 2.0MPa，离散最大达 19.8MPa，以取芯结果的代表值与弹性波法综合强度比较，其相关性为 0.897，整体相关性较好。



可见：基于冲击弹性波的表面波（R 波法）强度检测结果和压力机压载结果具有较好的相关性，且该方法检测不受结构碳化影响，可快速无损真实反映隧道衬砌强度状况。

4.4 特点、适用范围及与其它方法的比较

4.4.1. 特点及适用范围

本技术具有如下特点：测试精度高；功能齐全：不仅可精确测试混凝土的弹性模量，而且可以推算混凝土的抗压强度。同时，还可以测试混凝土不同深度的弹性模量及抗压强度；测试盲区少、适用范围广。

适用于各类构件、试件，但注意区分普通混凝土和高强混凝土。对于高强混凝土，其模量~抗压强度的关系与普通混凝土的模量~抗压强度关系往往有较大的不同，通常需要另外标定。

4.4.2.与回弹仪的对比

回弹仪具有结构简单、操作方便等优点，长期以来是最主要的现场检测设备之一。然而，其缺陷和问题一直无法得到很好的解决。

总体而言，回弹仪的测试精度不令人满意。下图是在某铁路隧道衬砌的回弹值与钻芯取样值的对比，可见，回弹仪与钻芯压载值之间几无相关性。

4.4.3. 与超声波法的对比

作为相似技术，超声波（或非金属超声波）作为混凝土结构无损检测的方法也有较为广泛的应用。但是，其在混凝土强度测试中有很大的局限性，其主要缺点在于：

- 1) 不完全满足弹性波理论，测试结果受信号频率影响大
- 2) 测试面和测试方法的影响

另一方面，由于平测法波线主要沿着混凝土表面传播，因此不可避免地受到混凝土表面状态的影响，而且无法测试混凝土的内部强度。

- 3) 受钢筋影响大

由于超声波发生的信号在钢筋中的传播速度快于其在混凝土中的传播速度，因此其测试结果很容易受到钢筋的影响。

4.4.4.与超声回弹综合法的对比

表面来看，超声回弹法综合了超声法和回弹法的特点，其测试精度被认为优于超声法、回弹法。但实际上，超声回弹法的实际应用非常少，基本上不被工程界所认可。

其原因主要在于精度不如预期，而测试效率却大幅降低。其精度不高的主要原因有以下：

- 1) 双参数拟合本身的局限性：
- 2) 并未解决超声波法和回弹法的缺点：
- 3) 测试效率大幅降低，且有附加误差因素

据此，我们认为，超声回弹法是一种落后的技术，不具备推广使用的意义。

4.4.5.冲击弹性波法的优势小结

管弹性波的测试与超声波相比有很多类似之处，但由于其具有波长长（根据学者的研究^[11]，当弹性波的波长大于混凝土中骨料直径的 10 倍以上时，骨料颗粒对弹性波的散射影响将大大降低）、频谱响应特性好（适用于单面反射测试）、能量大等特点，使得其在测试范围、精度、功能等方面均得到了大幅度的提高。同时，我们开发的针对钢筋的修正方法很好地解决了钢筋影响的问题。

4.4.6.对比验证（2019.01，重庆万州，与回弹仪）

我们在实际工程中，对 R 波法、P 波平测法和回弹仪的测试精度做了对比。

对比结果表明：

- 1) 回弹法的测试精度非常不令人满意，体现在：
- 2) 基于冲击弹性波的方法的精度普遍优于回弹仪。其中，面波的测试精度相对最好，而且对缺陷敏感。特别是剔除异常值后，其平均误差仅有 8%，而相关系数达到了 0.8 左右；
- 3) 若将面波法与 P 波平测法平均，其精度可望进一步提高。

4.4.7.混凝土龄期与强度、模量的关系

根据大量的试验研究结果表明，混凝土的弹性模量/波速与龄期之间可以用幂函数表示。下图为日本土木研究所公布的“衝撃弾性波試験 iTECS 法による新設の構造体コンクリート強度測定要領（案）”（基于冲击弹性波试验 iTECS 法的新设混凝土强度测定纲要案）中，关于冲击弹性波 P 波波速与龄期之间的关系一例。

4.4.8.大体积混凝土分层现象

在大体积混凝土施工（如隧道衬砌、大坝等）时，常常出现混凝土表面振捣密实、强度较高而内部振捣不良、强度较低的现象。

对此，利用 R 波检测，可以较好地对混凝土强度的不均匀性进行检测、评估。下图是对某铁路隧道衬砌混凝土检测的频散曲线以及推算的强度分布。

4.5 与取芯压载试验的对比验证汇总

与取芯压载试验对比，是验证本检测方法最直接、最有效的手段。但是，由于测试区域和范围、深度，以及混凝土的不均匀性等原因，取芯压载试验和基于弹性波的无损检测方法之间必然有一定的区别。

4.5.1.取芯压载与无损检测的异同

如前所述，对结构无损检测得到的强度，与钻芯取样的芯样压载的强度之间，通常会有一定的误差。

1) 误差来源主要有：检测误差、代表性不同、微细裂缝的影响。

2) 注意事项

(1) 深度范围：由于取芯后需要整形和切割（一般整形成 $\Phi 100 \times 100$ 的圆柱体），因此，在与无损检测结果对应时，应注意对应其深度范围；

(2) 部分预留试块的混凝土与实体混凝土材料并不完全一致，在标定时要特别留意；

(3) 由于混凝土的不均匀性，即使是对同一区域的取芯压载试验，不同芯样间的压载强度也有一定的离散，其离散程度严重时可接近 10MPa。

4.5.2.混凝土强度测试对比汇总（铁路隧道）

自 2019 年 1 月以来，已在郑万高铁等十余条铁路线的数十个隧道进行了检测，共积累现场验证数据（现场 R 波与钻孔取芯后的压载试验对比）共 145 组。

其中，除部分区段外，均采用我公司提供的缺省 E_d 值进行的计算。期间，检测技术也随着现场验证的积累和深入而不断完善，测试精度也在逐步提高。与初期（上图编号 47 之前，大约在 2019 年 6 月以前）相比，相对偏差率（除个别点外）呈收缩的趋势。

第 5 章 基于打球技术的混凝土模量及强度检测

前述的基于弹性波波速的混凝土弹性模量及强度的检测方法尽管有诸多优点，但检测效率仍然不十分理想。为此，我们利用 Hertz 接触理论，开发了“打球检测技术”。可以快速测试混凝土表层弹性模量和强度。

5.1 测试方法和基本验证

5.1.1 基本原理

本方法，利用金属刚性球体击打混凝土表面，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，能直接测定混凝土材料的变形模量。

本技术测试岩土材料变形特性的理论基础源于 Hertz 冲击理论。

5.1.2 测试精度的基本验证

为了验证所研发技术的测试精度，我们对金属材料的变形模量进行了测试。



圆形不锈钢块（196GPa）



半球铸铁（206GPa）

利用金属材料的验证

在测试过程中，用直径 5cm 的球体从 10cm 的高度落下，对每个试样进行了 12 次测试。对离散超过 20%的数据进行了舍去处理后，余下的数据进行平均。测试结果表明，其测试误差在 1%之内，充分证明了 Hertz 碰撞理论的正确性及本测试技术的可信性。

5.2 混凝土弹性模量和强度测试

5.1.1 混凝土弹性模量的推算

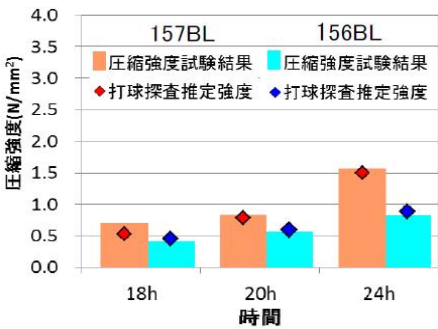
由于混凝土并非均值弹性体，而且在表面往往有浮渣和相对松软区，因此，打球测的混凝土弹性模量 E_{cb} 往往略小于实际的弹性模量 E_c 。

5.1.2 实际应用：衬砌混凝土拆模时期的优化（2013～，日本多个工程）

鹿岛建设利用本技术以优化隧道衬砌的拆模时间预测。目前，已有 10 余台 SH-SBT 在各个工地上广泛应用。



隧道衬砌混凝土检测



不同龄期混凝土打球测试结果对比

第 6 章 结构混凝土早期强度检测及推定

在混凝土工程施工中，后续工序的进度安排往往取决于混凝土强度的增长速度，例如当混凝土强度达到设计标号的 40% 时方可扣板，模板拆除要求达到 50%、而吊装以及预应力张拉则需达到 70% 后才能进行。因此，混凝土浇筑后何时才能达到预期强度，是施工人员十分关心的问题。

目前，结合预留试块，有多种方法可以预测混凝土的早期强度。然而，试块与构件的施工状态、养护条件等均有较大的差异，因此如果结合现场检测结果来预测，无疑更为准确和科学。

6.1 混凝土弹性模量和强度测试

目前，规范规定的混凝土早期强度预测的方法主要有等效龄期法和成熟度差值系数法。

6.1.1 等效龄期法

由于混凝土并非均值弹性体，而且在表面往往有浮渣和相对松软区，因此，打球测的混凝土弹性模量 E_{cb} 往往略小于实际的弹性模量 E_c 。

结语与致谢

我们潜心多年研制的混凝土多功能检测仪（SCE-MATS）可以对混凝土材料及结构的材质、裂缝深度及倾斜、剥离、内部缺陷及尺寸等进行综合无损检测。经过大量的现场验证，其测试精度、测试效率、适用范围等均可满足工程要求，对保证工程质量具有非常积极的意义。

在该设备中，包含了大量的独创性技术，如裂缝深度的“表面波法”、修正 BS 法，混凝土浇筑质量检测中的钢筋影响修正技术、简易标定模型等。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。

同时，在设备中我们还集成了弹性波雷达扫描技术（EWR）、弹性波层析扫描技术（CT）和快速成像、虚拟多频道技术等，大大提高了测试精度和分辨力。

在此，我们衷心期望这些技术、方法和设备能够为我国的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为本文提供宝贵资料及关心、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

- ✓ 有关本资料的简要版的更新，可在本公司网站的下载中心下载：

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

- ✓ 升拓相关官网与平台：

升拓检测媒体矩阵 | 扫码识别即可进入

升拓检测官网



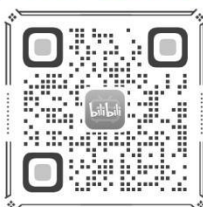
升拓官方公众号



抖音平台官网号



哔哩哔哩官网号



*抖音和淘宝请分别使用对应软件扫码