

# 现场测试混凝土弹性模量的方法研究

杨成学<sup>1</sup>, 杨文礼<sup>2</sup>, 杨露<sup>1</sup>

(1. 河南高速公路发展有限责任公司, 郑州 450015; 2. 河南交通投资集团有限公司, 郑州 450015)

**摘要:**近年来, 混凝土的弹性模量值引起了日益广泛的重视, 其在计算钢筋混凝土的变形、裂缝扩展、温度应力以及估算预应力损失等方面是必不可少的指标。采用传统的静力载荷试验的方法测试混凝土材料的弹性模量存在着费事、费时、代表性不强和难以全面检测等缺点, 我们利用现场无损检测的方法测试混凝土结构和材料的弹性模量, 较好地解决了上述问题。

**关键词:**现场测试; 混凝土; 弹性模量; 无损检测

**中图分类号:** TU 41

**文献标识码:** A

## 1 研究背景

### 1.1 高性能混凝土测试弹性模量的重要性

在混凝土结构的质量控制中, 迄今主要以强度、坍落度作为主要控制指标。近年来, 混凝土的弹性模量值引起了日益广泛的重视, 其在计算钢筋混凝土的变形、裂缝扩展和大体积混凝土的温度应力等方面是必不可少的指标。尤其是在预应力钢筋混凝土梁的张拉、放张施工时, 由于混凝土标号高、需要严格控制预应力损失等因素, 实测混凝土的弹性模量值的意义显得更为重要。

对混凝土结构物特别是高性能混凝土的弹性模量测试是非常重要的指标, 意义很重大。铁道部颁布的“客运专线高性能混凝土技术条件”的混凝土力学性能抽检要求中的预应力梁的检验项目: 终拉、放张时弹性模量, 28d 或 56d 弹性模量 (检验频次每件预制梁至少各一组), 对高性能混凝土的 28d 弹性模量值要求达到 35.5 GPa。

### 1.2 工程应用

由于采用传统的静力载荷试验的方法测试混凝土材料的弹性模量存在着实验费事费时、代表性不强和难以全面检测等缺点, 因此国内外开始研究利用无损检测的方法测试混凝土结构和材料的弹性模量。该方法具有测试效率高、成本低和范围广, 特别是能够测试弹性模量随龄期变化的优点, 使其具有非常广阔的发展前景。

混凝土弹性模量的现场测试, 主要可以应用于以下

几个方面:

(1) 混凝土质量检测: 混凝土的弹性模量与强度之间有一定的相关关系, 弹模越高, 其强度一般也越高。特别是在混凝土的配合比、养护条件相同时, 混凝土的弹性模量与强度之间的相关关系更加明显<sup>[1-2]</sup>;

(2) 张拉、放张时期的最优化: 为了降低预应力在施工时损失的同时保证经济性, 利用弹性模量来控制张拉、放张时期是非常有意义的;

(3) 变形、裂缝和温度应力的预测: 在变形、裂缝以及温度应力的预测等方面, 弹性模量起到不可替代的作用;

(4) 长期健康监测的初始数据: 由于混凝土材料的刚性 (弹性模量) 比强度对劣化更为敏感, 因此, 在施工时掌握全面的弹性模量数据对今后的健康监测有非常重要的意义。

### 1.3 主要问题

作为一种新的测试方法, 利用冲击弹性波测试混凝土弹性模量, 主要有以下问题需要重视和解决:

(1) 弹性模量的实质: 利用冲击弹性波测试的弹性模量为动弹性模量, 而通常所要求的为静弹性模量。这两者之间的关系需要明确;

(2) 龄期的问题: 由于混凝土的强度、弹性模量与其龄期有密切的关系, 因此测试时间的影响是不容忽视的;

(3) 钢筋的影响: 在混凝土构件中的钢筋的波速一般快于混凝土的波速, 对其影响应有充分的认识。

## 2 测试理论

### 2.1 理论思路

弹性模量是反应应力与应变关系的物理量, 由于混凝土是弹塑性体, 随荷载、龄期的不同, 其弹性模量也不是定值。

本论文的理论思路是通过测试动弹性模量, 并结合动弹性模量与静弹性模量的关系, 推测出静弹性模量。

### 2.2 静弹性模量测试

参考规范 GB/T 50081-2002 《普通混凝土力学性能试验方法标准》的规定, 采用 (150 × 150 × 300mm) 的棱柱体试件。混凝土弹性模量应按下式计算:

$$E_c = \frac{F_a - F_0}{A} \times \frac{L}{\Delta l} \quad (1)$$

其中,  $E_c$  可以是初期切线弹性模量, 也可以是割线弹性模量。然而, 对大体积混凝土构件的静弹性模量尚无可行的测试方法。

### 2.3 动弹性模量测试

动弹性模量 ( $E_d$ ) 测试的测量方法是振动法。当材料受力振动时, 材料经历着周期性的应力应变过程, 各项振动参数正是材料性质的反应。根据材料振动的状态不同, 振动法包括: 共振法、敲击法以及超声脉冲法。

#### (1) 共振法与敲击法

在测定  $E_d$  时要求试件具有一定的长、宽、高的比例, 并成条杆状便于称取重量, 因此, 它仅适用于试验室的试件及形状有规则的部分预制构件, 而不宜用于大型的、非杆状件或变异截面的试件以及直接在构建物上测试。

因此如何扩大应用范围、测量更多类型的截面试件以及现场结构物混凝土的弹性模量, 仍然是一个值得深入研究的课题。

#### (2) 超声脉冲法

主要是通过超声纵波平测法或通过检测技术, 并通过数学最小二乘法, 时、距回归方程等测出超声声速值来计算混凝土的弹性参数。

#### (3) 弹性波理论

弹性波的各种波中, P波速度最快。在通常的混凝土构件中, P波的传播速度  $V_p$  由下式表示:

$$V_{p3} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (2)$$

其中,  $E$  为材料的动弹性模量,  $\mu$  为泊松比, 一般可取 0.16-0.20  $\rho$  为混凝土密度, 一般可取  $2300\text{kg/m}^3 - 2400\text{kg/m}^3$ 。而对于棱形试件, 则为一维传播, 其 P波的传播速度为:

$$V_{p1} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3)$$

因此, 可以通过测试 P波波速来推算混凝土材料的弹性模量。此外, P波波速的测试可以用透过法, 也可以用重复反射法 (即冲击回波法)。

## 3 研究基础

### 3.1 测试设备

四川升拓检测技术有限公司开发了针对混凝土结构材料弹性模量的测试设备 (SCE-EMT)。该设备既可用于棱形试件, 也可以测试实际的构件, 其测试距离可达 20米以上。

### 3.2 静动弹性模量间的关系

目前对混凝土结构中静弹性模量和动弹性模量的关系作了大量的基础研究。其研究结果主要有:

一般认为, 利用超声波测试的波速换算的动弹性模量要比相应的静弹性模量大 10% - 40%。

对于冲击弹性波测试的动弹性模量与相应的静弹性模量 (初始切线模量) 一般认为相差不大。图 1 是四川升拓检测技术有限公司的测试结果, 图 2 和图 3<sup>[3]</sup> 是日本清水研究所的研究成果。

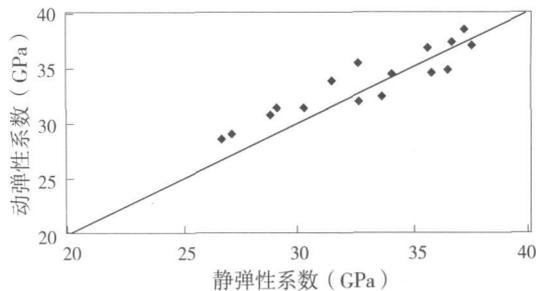


图 1 升拓公司的研究成果

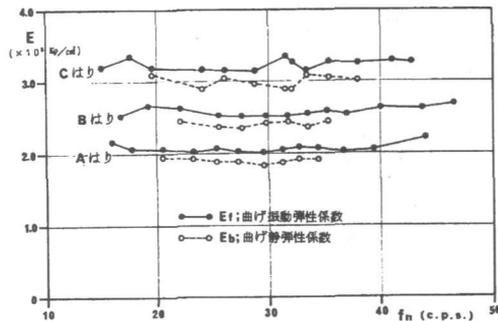


图 2 振动法测试动弹性模量与实验室试件测试的静弹性模量的关系

### 3.3 静、动弹性模量的影响因素

影响混凝土静弹性模量的因素有:

混凝土的强度等级越高, 弹性模量越高。水泥用量少, 水灰比小, 粗细骨料用量较多, 弹性模量大。

骨料弹性模量大, 混凝土弹性模量也大。

早期养护温度较低的混凝土具有较大的弹性模量。

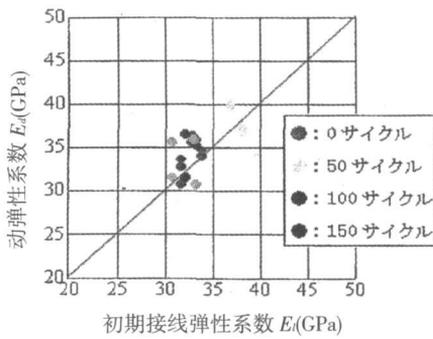


图3 振动法测试动弹性模量与实验室试件测试的静弹性模量的关系

在相同强度情况下,蒸汽养护混凝土弹性模量较在标准条件下养护的混凝土弹性模量小。引气混凝土弹性模量较普通混凝土低 20% - 30%。

影响混凝土动弹性模量(主要是波速参数)的因素见表 1。

表 1 影响动弹性模量因素

项目	影响要素	传播速度变化方式
配合	水灰比的增加	降低
	单位用水量的增加	降低
	粗骨材的最大粒径的增大	降低
	粗骨材种类	影响
	骨材量增加	增加
养生	空气量增加	降低
	养生方法	影响
	材龄增加	增加
	含水量增加	增加(P波)
状态变化 裂化	空隙增加	降低
	各细微裂缝的增加	降低
埋设钢筋	外力的裂缝	多少降低
	钢筋密集	多少增加

### 3.4 混凝土品质与 P波速度的关系

基于 P波速度对混凝土品质的评价,表 2是 ASTM 的提案。但是表 2 的品质分类不适合所有的混凝土。P波速度与骨材种类、用量,混凝土配合、养护等的变化相关。收集混凝土相关的信息可很好的解释弹性波速度<sup>[4]</sup>。

表 2 ASTM提案

品质	评价
> 4570	优
3660~ 4570	良
3050~ 3660	一般
2130~ 3050	不好
< 2130	不可

注:混凝土密度: 2400kg/cm<sup>3</sup>, 速度单位: m/s

### 3.5 混凝土龄期与 P波速度 弹性模量的关系

根据研究,混凝土的 P波速度或弹性模量与龄期的关系可以用指数形式表示:

$$E_T = C \cdot T^n \quad (4)$$

其中,  $E_T$  为 T天的模量,  $C$ 、 $n$ 均为常数。因此,对一定的配合、养护条件下的混凝土,只要能够测出 2个以上的值,即可推算 28天龄期的模量。

### 3.6 钢筋的影响

对于超声波等波长较短的测试方法,钢筋的影响比较明显。而对于冲击弹性波这样的波长较长的测试媒介,钢筋的影响程度大大减弱,并可以加以较好的修正。

此外,冲击弹性波还可以测试混凝土-钢筋复合体的弹性模量,在实际的变形计算、预应力分析时有较高的实际意义。

## 4 应用实例

我们采用四川升拓检测技术有限责任公司开发的基于冲击弹性波的混凝土材料 结构弹性模量测试系统,并在连霍高速郑洛段扩建工程参与了“通过控制弹性模量来防止预应力结构物的预应力损失”课题。

### 4.1 箱梁弹性模量测试

本次检测对象为连霍高速郑洛段扩建程 NO. 3预制箱梁,箱梁的长度为 30m,检测的数量为 8根,每根箱梁中布测线 3条(分别在翼板、腹板和底板)。测线的布置方向为长方向,箱梁的其中一端的布点如图 4所示,另一端布点与其对应,构成测线。



图 4 测线布点

从图 5箱梁的静弹性模量的检测结果可以看出:

(1)测试的 3根箱梁的弹性模量均达到设计的模量 35. 5GPa

(2)底部测点比翼板、腹板的静弹性模量偏大,主要原因是与施工振捣时,骨料下沉至箱梁底部,导致测试波速增大相关;

(3)在 5-7天弹模有较大幅度的降低,其原因在于养护条件的变化。

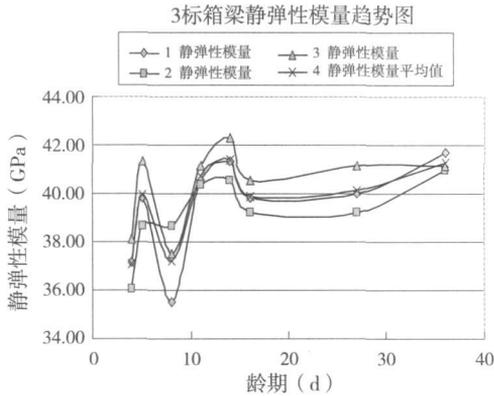


图 5 NO. 3箱梁静弹性模量趋势图

4.2 试件验证试验

我们对 NO.3 预制箱梁试验室龄期为 28D 标准试件 (15m\* 15m\* 15m)进行了测试。测试方法采用反射法测试。测试的试件总数为 9件,每件试件的测点位置在试件侧面的中心位置,每个试件的测试数据总数为 10次。测试的结果采用 10次测试数据的等价值,结果见表 3。

试件得到的弹性模量的平均值 (41.0GPa)与构件的 28天模量平均值 (40.1GPa)非常接近,在一定程度上说明了测试结果的可信性。

5 结束语

通过以上研究,我们认为,采用冲击弹性波,可以较好地测试混凝土材料的动弹性模量,并可以换算成相应

的静弹性模量,为现场施工质量的有效管理提供了新的方法。

表 3 试件测试结果一览表

编号	波速 (KM /S)	动弹性模量 (GPa)	静弹性模量 (GPa)
1	4.291	44.19	41.1
2	4.073	39.11	36.4
3	4.345	45.30	42.1
4	4.311	44.60	41.5
5	4.388	46.21	43.0
6	4.124	40.81	38.0
7	4.273	43.82	40.8
8	4.388	46.21	43.0
9	4.388	46.21	43.0
均值	4.287	44.05	41.0

参考文献:

[1] 日本土木学会. 弹性波法によるコンクリートの非破壊検査に関する委員会報告及びシンポジウム論文集 [M]. 东京: 日本土木学会, 2004

[2] Jones R: Non-destructive testing of concrete[M]. Cambridge University Press 1962

[3] 日本土木学会. 弹性波法によるコンクリートの非破壊検査に関する委員会報告及びシンポジウム論文集 [M]. 东京: 日本土木学会, 2007.

[4] ASIM (American Standard for Testing and Materials): Standard Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plate Using Impact-Echo Method [S]. ASIM-C1383-98 1998.

Field Testing Method for Elastic Modulus of Concrete

YANG Cheng-xue<sup>1</sup>, YANG Wen-li<sup>2</sup>, YANG Lu<sup>1</sup>

(1. Henan Expressway Development Co., Ltd., Zhengzhou 450015, China

2. Henan Traffic Investment Group Co., Ltd., Zhengzhou 450015, China)

**Abstract** In recent years, the elastic modulus of concrete, which is an essential indicator for calculating the deformation of reinforced concrete, crack propagation, temperature stress and estimating loss of pre-stress, etc., is paid great attention. Traditional method of static load with the shortcoming of time-consuming and cumbersome, poor representation, difficult to fully detect. The method reported in this paper, a non-destructive testing method of field testing of concrete structures and the elastic modulus, provides a good solution.

**Key words** field test method; concrete; elastic modulus; NDT