

冲击弹性波法检测钢筋混凝土强度技术研究应用

丁鹏程¹, 林宇², 刘恒成³, 黄宗茂³, 余根钦³, 包阿古达木⁴

(1. 四川升拓检测技术股份有限公司, 四川 自贡 643000)

(2. 中国铁路南昌局集团工程质量安全监督站, 江西 南昌 330000)

(3. 东南沿海铁路福建有限责任公司, 福建 福州 350000)

(4. 中铁十二局四公司福厦铁路项目部, 福建 福清 350300)

摘要: 本文在冲击弹性波检测混凝土结构的技术基础上, 采用冲击弹性波对4种强度等级(C25、C30、C35、C40)、不同龄期的混凝土试样进行了测试, 同时利用压力机进行了抗压试验, 通过分析, 拟合回归出混凝土模量与抗压强度之间的关系式。试验证明, 混凝土模量与混凝土的抗压强度相关性显著, 其回归公式可作为计算非破损条件下混凝土强度的推断依据; 对于不同强度等级的混凝土, 其模量与抗压强度之间存在明显的sigmoid函数关系, 笔者通过拟合, 得到混凝土模量与抗压强度基于sigmoid曲线的拟合关系式。经现场实际应用, 冲击弹性波的现场适用性和检测结果精度取得了良好的效果, 有望成为检测钢筋混凝土结构强度的新方法。

关键词: 冲击弹性波; 弹性波波速; 模量; 抗压强度; 无损检测

中图分类号: U456

文献标识码: A

DOI: 10.12230/j.issn.2095-6657.2021.44.035

在工程结构中, 钢筋混凝土是最主要的建筑材料之一。其强度是决定结构承载力的最主要因素, 也是评定结构性能的主要参数。

现阶段钢筋混凝土强度检测手段^[1]应用最广泛的有回弹法、取芯法等。但总体而言这些方法存在检测精度不高, 破坏混凝土结构、检测速度慢的缺点, 不仅不能在施工过程中进行质量控制, 而且大面积的破坏性试验还会破坏混凝土结构的安全性和耐久性。因此寻找一种无损检测的方法迫在眉睫。

本文为研究弹性波波速与混凝土抗压强度和弹性模量之间关系, 运用冲击弹性波法^[2]对不同强度等级混凝土试块进行了试验, 根据试验结果建立了混凝土模量与抗压强度的回归方程, 并明确了两者对应关系; 同时施工现场进行冲击弹性波检测强度值、回弹法测强及钻芯法芯样抗压强度值的对比试验, 为冲击弹性波无损检测混凝土强度的应用提供了相应的依据。

一、现阶段检测技术现状

目前, 我国相关行业对于混凝土强度的检测技术主要包括: 回弹法、超声—回弹综合法、钻芯法^[3]。

除了上述几种常见的混凝土强度检测方法外, 还有后装拔出法、后锚固法、剪压法、拉脱法、射钉法等^[8]。但目前这些手段大多停留在理论研究阶段, 尚未进行大规模的现场应用, 大多暂时也没有与之对应的规程。

根据TB10223-2004《铁路隧道衬砌质量无损检测规程》^[9]中第5节的内容, 声波法可检测衬砌混凝土表层的单轴抗压强度等级, 并在5.4.1给出了混凝土不同等级强度所对应的纵波波速范围。冲击弹性波实际为声波的一个分支。

二、冲击弹性波法强度检测技术研究

对混凝土构件, 基于冲击弹性波的混凝土强度特性测试原理^[10]为: 首先根据结构特性选取不同的测试方法, 测试出结构的弹性波波速; 其次根据冲击弹性波理论^[11]计算混凝土动弹性模量; 最后根据混凝土的弹性模量建立与抗压强度之间的关系, 推算出混凝土的抗压强度。

根据姜勇^[12]的研究表明, 冲击弹性波对混凝土动弹性模量的测试准确度显著, 这奠定了混凝土模量推算强度的理论基础。

(一) 波速与弹性模量的关系

混凝土动弹性模量直接影响结构的变形, 同时也是混凝土质量、耐久性的重要反映指标。

1. 动弹性模量可以体现材料的刚性特性, 是结构变形计算中的重要参数。

2. 弹模的降低也影响混凝土材料的老化, 新建结构的施工不良也会在弹模方面有所显现。

弹性模量的检测主要是通过对波速^[13]的检测。

根据弹性波波速建立动弹性模量与强度的对应关系, 算出混凝土强度值。

试验验证结果表明, 上述方法得到的动弹性模量具有很高的精度。与共振仪对比, 相对误差在2%以内。

而对于静弹性模量 E_c , E_d 与 E_c 之间则有一定的差异。根据吴佳晔^[11]的研究, 有:

$$E_c = 9.0e^{0.033E_d}$$

表1 波速、弹性模量及抗压强度

混凝土标号	龄期 (d)	波速 (m/s)	模量 (GPa)	抗压强度 (MPa)
C25	3	2916	23.1	22.1
	7	3214	25.6	26.8
	14	3330	26.6	33.5
	21	3411	27.4	37.2
	28	3522	28.6	39.5
C30	3	3010	25.2	23.9
	7	3193	28.5	28.4
	14	3354	30.4	42.5
	21	3512	31.8	46.7
C35	28	3720	32.5	47.9
	3	3298	26.3	25.6
	7	3726	29.2	30.6
	14	3921	31.1	44.6
	21	4110	33.4	52.3
C40	28	4398	34.6	54.2
	3	3807	28.3	30.3
	7	4155	30.4	34.5
	14	4326	33.2	40.9
	21	4436	34.5	58.3
	28	4569	35.3	60.5

(二) 弹性模量与抗压强度的关系

参考王雪平^[15]、张玉敏^[16]等人的试验方法, 笔者制备了

强度等级为：C25、C30、C35 和 C40 的 4 组混凝土试件，试件尺寸为 150*150*150mm，试件成型后标准养护 24h 进行拆模，再将拆模后的试件标准养护到龄期（3d、7d、14d、21d、28d）。期间采用吕小彬^[1]等人提出的冲击回波法测试混凝土波速的方法测试其波速，并计算对应的模量，然后利用液压机测定试件的抗压强度。混凝土的波速、模量与强度见表 1。

根据上表的测试值采用不同的函数模型（线性、指数、对数、多项式/二次函数、乘幂）对试验数据进行回归分析。混凝土强度一般在 28d 后增长不会太多，因此本次研究主要为 28d 内混凝土的情况。具体回归曲线如下。

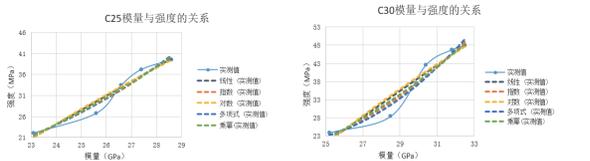


图 1 混凝土动弹性模量与抗压强度的关系（左：C25 右：C30）

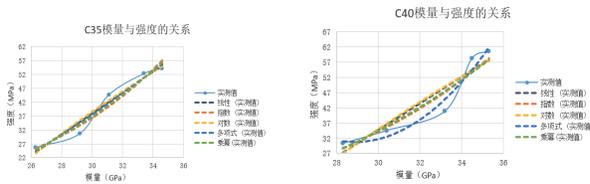


图 2 混凝土动弹性模量与抗压强度的关系（左：C35 右：C40）

从图 1 和图 2 发现混凝土的弹性模量和抗压强度之间存在着某种关系，但是一般的回归函数并不能很好地将其关联起来。笔者发现模量和抗压强度的关系可采用 sigmoid 曲线来进行拟合，即：

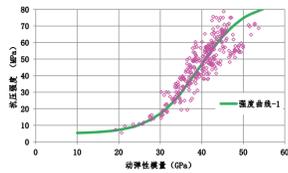


图 3 基于 sigmoid 拟合的动弹性模量与抗压强度的关系

大量的试验数据表明，对于普通的混凝土试件（芯样）动弹性模量和抗压强度的关系可以表示为：

$$f_{cu} = f_{c0} + \frac{\mathcal{F}_c}{1 + e^{\frac{E_d - E_A}{\lambda}}}$$

式中： f_{c0} —混凝土很差时的抗压强度，取 5MPa；
 \mathcal{F}_c —预测混凝土最大强度值与 f_{c0} 的差值，取 80MPa；
 E_A —sigmoid 曲线中点对应的动弹性模量，GPa；
 λ —形状修正系数。

根据拟合曲线可以看出：

1. 基于 sigmoid 拟合的混凝土动弹性模量和抗压强度的曲线趋势和上述试验数据（图 1 和图 2）趋势非常吻合。

2. 该曲线的推算强度偏低，特别是在混凝土强度大于 50MPa 后，其偏离更加明显，这就需要根据不同的情况确定 E_A 和 λ 的取值。

关于 E_A 和 λ 的取值笔者在现场做了大量的试验，试验数据表明：对于大多数结构混凝土（抗压强度在 20 ~ 75MPa），形状系数在 4 ~ 7。形状系数越小，S 型曲线的中间段越陡；反之，则越平缓。

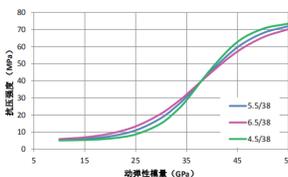


图 4 不同 λ 对 sigmoid 曲线的影响

根据现场试验数据和拟合曲线发现：

1. 对于 P 波， λ 可取 5.5。
2. 对于 R 波， λ 可取 6.5。

确定 λ 的取值后，拟合曲线需要回归的参数仅一个 E_A ，笔者根据最小二乘法回归拟合得到 E_A 。

$$E_A = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(E_d + 5.5 \ln \left(\frac{80}{f_{cu} - 5} - 1 \right) \right)$$

式中： E_d —混凝土的动弹性模量，GPa；

f_{cu} —混凝土的抗压强度值，MPa。

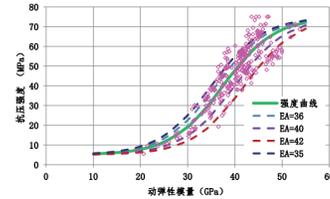


图 5 不同 E_A 值对 sigmoid 曲线的影响

结合图 5 并根据现场大量的实验数据表明：当 E_A 取 37.5 时，测试值和强度的抗压值曲线重合度较好。

（三）钢筋修正的影响

弹性波的测试速度受钢筋混凝土结构中钢筋影响，根据等效模量的概念，可以根据综合配筋率 ρ_s 加以修正：

$$E_{cd} = \frac{E_t - \rho_s E_{sd}}{1 - \rho_s}$$

式中： E_{cd} —为修正后的混凝土动弹性模量，GPa；

E_t —未经修正的测试动弹性模量，GPa；

ρ_s —为综合配筋率；

E_{sd} —为钢筋的动弹性模量，取 210GPa。

三、现场应用

（一）冲击弹性波与钻芯法、回弹结果对比

2020 年在中铁某局承建的隧道进行了隧道二衬强度检测，此次利用冲击弹性波检测结果与钻芯以及回弹均进行对比，对比结果如下。



图 7 回弹和钻芯抗压强度结果对比

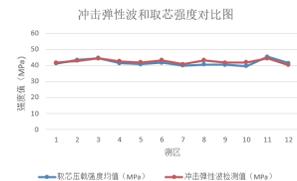


图 8 冲击弹性波和钻芯抗压强度结果对比

由图 7 和图 8 可以看出：

1. 回弹法的检测结果与钻芯抗压强度值的相关性很差，甚至出现钻芯强度低回弹强度高的情况；同时回弹法很难反映高强混凝土的强度值。

2. 冲击弹性波的检测结果与钻芯抗压强度值非常吻合，检测精度高，能很好地反映混凝土的整体强度情况。

(二) 冲击弹性波法现场应用汇总

针对现场混凝土实体结构质量检查，笔者通过钻芯法和冲击弹性波法进行大量混凝土强度比较和验证。



图9 钻芯法检测(左)冲击弹性波检测(右)

自2019年以来,对于同一部位的隧道二衬(存在钢筋网片)分别采用冲击弹性波法和钻芯法进行现场检测,冲击弹性波法检测值和取芯法压载值对比如下:

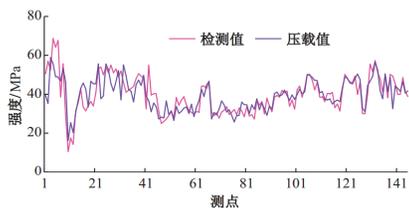


图10 冲击弹性波法和钻芯法结果对比

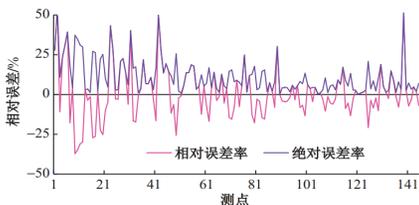


图11 冲击弹性波法和钻芯法相对误差对比

期间,检测技术也随着现场验证的积累和深入而不断完善,与第一次现场运用(上图47号点前)相比,冲击弹性波的检测结果和钻芯压载强度值的相对偏差率(个别点除外)呈收缩的趋势。

表2 混凝土强度检测结果统计表

参数	相关系数	误差率均值	误差率均值
全体数据	0.791	0.8%	10.9%
后期数据(48号以后)	0.881	-0.3%	7.6%

同时,从验证结果可以看出:

1. 约80%的检测误差在±10%之内(图12)。
2. 约90%的检测误差在±20%之内(图13)。

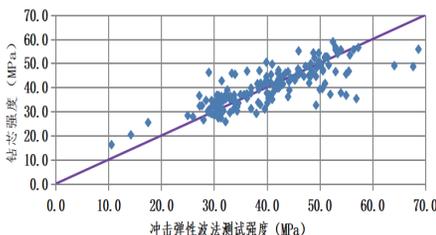


图12 现场测试验证结果

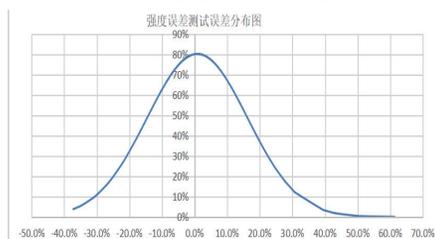


图13 测试误差率分布

四、结束语

通过理论分析和现场应用、验证。

(一) 验证了冲击弹性波检测钢筋混凝土强度的可行性,结合取芯法可更限度地减少取芯对结构的影响,有利于结构的安全性和稳定性。

(二) 取芯法是现阶段强度评价最常规的手段,但是取芯法属于破坏性检测手段,过多地使用会对混凝土结构产生一定的影响,且抗压强度只能代表当前抗压芯样的位置,对抗压试件外的强度很难体现。而冲击弹性波法能很好地弥补钻芯法的缺点,冲击弹性波法代表的范围广且可反映混凝土表、中、深层的强度值。

(三) 冲击弹性波法检测的速度较快,一般来说冲击弹性波检测一个测区仅须1-2分钟,效率远优于取芯法。冲击弹性波的现场适用性和检测结果的精度在现场应用中取得了良好的效果,有望成为检测钢筋混凝土结构强度的新方法。

参考文献:

[1] 罗勤.关于混凝土强度检测方法的探讨[J].建筑结构,2010(S2):569-571.

[2] 姜勇,吴佳晔,马永强,冯源,黄伯太.基于声(冲击弹性)波的隧道衬砌检测技术及应用[J].中国铁路,2020(12):89-96.

[3] 王小平.建筑工程检测中混凝土强度实例分析[J].城市建设理论研究:电子版,2012(36):1-4.

[4] 四川省建筑科学研究院.回弹法检测混凝土抗压强度技术规程[M].西南交通大学出版社,2014.

[5] 浅析回弹法检测混凝土强度存在的问题[J].建筑工程技术与设计,2018(25):185.

[6] 肖广娜.超声回弹综合法在混凝土强度检测中的应用[J].河南水利与南水北调,2019,48(02):71-72.

[7] 孙刚.钻芯法在混凝土强度检测中的应用研究[J].山东工业技术,2013(14):153-153.

[8] 侯高峰.混凝土抗压强度现场检测技术方法研究现状及发展方向[J].混凝土与水泥制品,2017(04):76-80.

[9] 中国铁路工程总公司.铁路隧道衬砌质量无损检测规程[M].中国铁道出版社,2004.

[10] 王志田.冲击弹性波检测结构混凝土强度研究[J].城市住宅,2020,27(03):201-202.

[11] 吕小彬,吴佳晔.冲击弹性波理论与应用[M].中国水利水电出版社,2016.

[12] 姜勇,吴佳晔,马永强,等.基于冲击弹性波的隧道衬砌混凝土强度检测技术研究和应用[J].铁道建筑,2020(06):1-5.

[13] 吕小彬,吴佳晔,李秀琳,等.冲击回波测试混凝土试件弹性波波速研究[J].水利水电技术,2015,46(03):84.

[14] 王华,刘雪峰,彭建新,等.PC构件承载力快速评定方法试验研究[J].公路与汽运,2016(03):187-190.

[15] 王雪平,刘素瑞,杨久俊,王战忠,荣辉,张磊.混凝土超声波速与抗压强度之间关系的试验研究[J].混凝土,2015(12):34-37.

[16] 张玉敏,王忠海.混凝土抗压强度和弹性模量与其超声声速之间关系的试验研究[J].混凝土,2002(12):40-42+52.

作者简介:丁鹏程(1993-),男,四川巴中人,四川升拓检测技术股份有限公司,从事混凝土无损检测研究,通讯作者。