

# · 第一章 ·

## 绪 论

### 第一节 工程安全鉴定与加固的重要意义

建筑是现代文明社会赖以生存和发展的条件，构筑物的安全则是人民生命财产安全的重要保证。

我国解放初期修建的一些厂房、办公楼、住宅以及桥梁使用寿命都已满 50 年或接近 50 年，怎样安全地使用、管理这些建筑，怎样加固处理一些危险建筑，是摆在我们面前的一个重要课题。

由于社会经济发展的需求，要新建许多高质量的各类建筑物和构筑物。但对已修建好的各类构筑物也应进行维修、保护，保持其正常使用功能，延长其使用寿命，同时要根据使用者的愿望和城乡规划的布局，满足使用者关于改变既有构筑物的使用功能、使用条件以及扩大使用面积等方面的要求，这就要对一些既有构筑物进行改造。要对既有构筑物进行改建、扩建、增层、托换以及移位和纠偏等，就需要使用一些新的、先进的技术手段来解决这些问题。

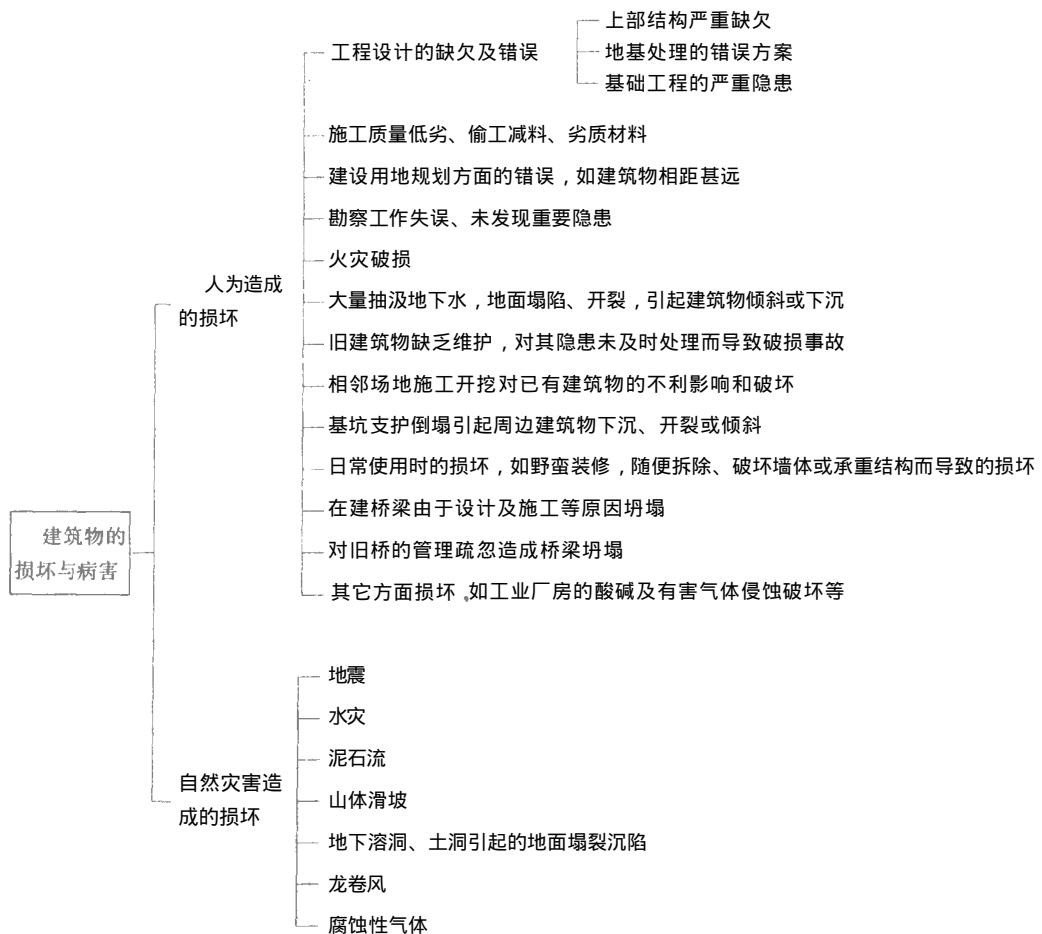
由于历史的原因我国 20 世纪 70 年代前后修建的建筑及桥梁存在许多安全隐患，随着使用时间的推移，这些构筑物的安全隐患也会逐渐加剧。怎样整改安全隐患，使之不至于造成较大的损失，这也是工程鉴定与加固技术工作者及有关管理部门的一个迫切需要解决的任务。

再就是由于我国建筑业大量使用民工，加上管理不严，许多民建项目合格率低，“劣质工程增多”，怎样检测民建项目的质量隐患，这也是工程鉴定与加固工作的一项重要内容。

## 第二节 工程安全鉴定与加固的主要内容

工程安全可靠性鉴定的主要内容是对构筑物构件进行检测后进行计算、判定。建筑物及桥梁病理学是研究构筑物病害发生、发展规律的一门学科，工程加固技术是在查明构筑物病害的基础上 对其进行可靠性鉴定 并对有问题的建筑进行加固。

构筑物损坏通常是由自然和人为两方面因素造成，见图 1-1。



大自然的破坏力是巨大的，如地震、龙卷风、泥石流、山体滑坡和洪水等自然灾害，都会造成房屋大批倒塌，各类构筑物严重毁坏。唐山大地震和日本阪神地震，毁坏了唐山和神户市；我国 1998 年的洪水灾害冲毁房屋 490 多万栋；1998 年美国有 8 个州遭受龙卷风的袭击，风灾过后 房屋倒塌 惨不忍睹。

设计、施工队伍人员素质良莠不齐，是目前发生建筑质量事故的重要原因。由于人为的因素 如火灾、过量的抽汲地下水 设计施工质量低劣 施工时偷工减料 以次充好 相邻建筑场地施工互相影响，以及对已有建筑物缺乏及时检查维护等原因，都会导致建筑物突然倒塌，或严

重损坏。据统计,发生工程事故的建筑物大约 40%的原因是设计失误所致,60%是施工或其它方面原因所致。我国建筑队伍总体素质不高以及管理经营部门的不正之风,都是促使工程事故屡屡发生的重要原因。我国某市一栋 6 层大楼由于施工质量低劣突然倒塌,6 人被压死,数十人受伤。国内某开发区一栋 5 层居民楼,1998 年突然倒塌,36 人死亡。国外也有许多事故如美国纽约一栋 15 层“观景楼”,由于设计质量低劣,突然倒塌。巴西里约热内卢一栋 22 层豪华公寓,也是由于质量问题而突然倒塌。西柏林议会大厅的倒塌则是由于原屋盖预应力钢筋锚固腐蚀后导致屋盖的倒塌。

由于对房屋的使用或防火措施不当,常常发生火灾,如纽约格士堤街 101 号七层居民楼一场大火被毁,全楼居民逃出。在我国每年由于火灾造成的严重损失更是令人触目惊心。去年北京南郊的家具城被一场大火全部焚毁。

地下铁道或地下采矿巷道施工,导致地面下沉、建筑物发生倾斜或开裂。美国纽约市坚尼路口的 7 层福隆大厦,即因地下铁道施工而引起倾斜和开裂。我国北京长安街由于修建地铁而导致地面下沉,管道断裂。

我国上海、天津、北京由于大量抽汲地下水,造成地面严重下沉,使其相邻房屋倾斜、开裂或倒塌。美国波士顿市,由于开挖高速公路的隧道,并大量抽汲地下水,致使与其相邻的一栋 46 层金融大厦下沉、倾斜。

总之,建筑物的安全鉴定与加固已成为了建筑业中一个不可或缺的重要手段。

### 第三节 工程安全鉴定与加固技术的发展趋势

随着科学技术的进步,我国的工程安全鉴定与加固技术有了新的发展,技术标准化工作也进一步加强。

我国已颁布的相关技术标准有:

- (1)《工业厂房可靠性鉴定标准》(GBJ 144—90)
- (2)《民用建筑可靠性鉴定标准》(GB 50292—1999)
- (3)《建筑抗震鉴定标准》(GB 50023—95)
- (4)《危险房屋鉴定标准》(JGJ 125—99)
- (5)《超声回弹综合法检测混凝土强度技术规程》(CECS 02:88)
- (6)《混凝土结构加固技术规范》(CECS 25:90)
- (7)《碳纤维片材加固混凝土结构技术规程》(CECS 146:2003)

近年来,我国许多地方成立了以既有构筑物改造与病害处理为服务对象的专业技术公司和科研机构,对提高这个行业的施工技术水平和推动实用科学技术的发展起到了重要作用。

为使建筑物增层改造和病害处理技术健康发展,许多部门都注意了这个学科的人才培养。一些高等院校培养了专门从事建筑物增层改造与病害处理方面的研究生,为既有建筑物的改造与病害处理技术的发展做出了贡献。同时还兴办了大量的有关本学科的短期培训班,为在职的技术人员提高和扩展本学科技术水平做了宝贵的工作。

建筑物的增层改造工程规模宏大,由北到南,由西到东,全国进行了大批高质量的增层改造工程,取得十分可喜的成就,为解决城市居民住房不足和居住条件的困难做出了贡献。

建筑物的移动和转动工程也逐渐被重视，解决了城市规划中许多难题，致使许多本应拆除的房屋通过平移挽救下来，为国家和人民节省了大量资金。这项技术是有广泛应用前景的。

适用于增层改造工程的新建筑材料不断出现，如轻质钢丝架夹心板、聚氨酯型板材，新型屋面防水材料、新建屋面钢架、轻型屋面材料等等，为增层改造技术提供了有效的手段。

增层改造工程的技术不断发展，由过去的单栋房屋小规模增层，发展到成片住宅区房屋的增层或者大面积建筑物的增层改造。由民用建筑增层改造逐渐发展到工业建筑的增层改造，扩大了旧工业厂房面积、高度和空间，改变了原来单一的使用功能，为企业改造转型提供了条件。由普通住宅房屋的增层转向大型综合性公共建筑物的增层。

过去砖混结构的增层常用直接增层法，因抗震要求的限制，增层数不能太多，工程规模也不太大。最近一些砖混结构增层工程，通过对原结构的改造（如增设纵墙、扩大横墙宽度等），进行外扩接层，取得显著效果，打开了砖混结构直接接层不能太高的“禁区”。

外套结构接法已是这些年新发展起来的常用增层结构形式。这些年用此法施工了大量的增层工程，为房屋增层工程开辟了一条新途径，积累了宝贵的设计与施工经验。由预留增层设计发展到新建房屋施工时改变设计而进行增层，由室外增层到室内增层，由地上增层发展到地下建筑物的扩建和增层。

轻型钢结构增层技术的工程实践也取得了很大进展。北京几家大饭店的轻钢结构增层工程，使这项技术表现出了很强的生命力。

建筑物加固改造技术迅速发展，工程规模也越来越大。这些年由于天灾人祸导致建筑物损坏的项目很多，为了减少国家和人民的损失，通过各种有效手段对大批病害建筑物进行了挽救和整治，已取得显著成果。在房屋纠偏、平移方面也发展了一些比较有效的手段。

通过这项技术的发展历程可以看到，在这个学科领域还有许多值得重视的工作：

1. 编制更加成熟，有实用价值和指导作用的本门学科的技术规范，将各学科的许多宝贵经验总结、提高，提升为国家技术标准，用来指导工程建设，推动建筑物改造与病害处理工程的技术水平的提高。

2. 选择成熟、可靠的技术成果，通过有关部门试点和不断完善，进一步总结有关本学科的发展经验。

3. 加强有关本学科的科研规划和科研工作，不断提出更为行之有效的理论、技术、材料、方法和机具，为建筑物改造与病害处理学科的发展提供更坚实的理论 and 更有效的手段。

4. 加强人才培养。通过不同层次的人才培养，包括研究生、大学生和各种短期培训班，提高广大青年学生和在职技术人员的技术水平，为推动本门学科的发展提供人才支撑。

5. 加强学术交流和宣传报道，把少数人的技术经验和成果更为广泛传播，提高建筑领域的整体技术水平。同时，要保护建筑物，使“有了病害可以挽救”的观念能被社会所接受、所重视，不要轻易拆除有继续使用价值的病害建筑物，为国家保持和挽救大批建筑资产。

6. 我国目前对加固行业开始颁发特种工程资质，但还须建立技术成熟、管理有效的专业设计施工队伍，为我国的病害建筑物治理和从事建筑物改造工程做出更有效的工作。

## ·第二章·

# 超声回弹法检测混凝土强度

## 第一节 概述

对工程结构安全进行鉴定常常需对混凝土强度进行检测，超声回弹综合法检测混凝土强度是一种准确而常用的方法。

结构混凝土强度的综合法检测，就是采用两种或两种以上的单一方法或参数（力学的、物理的或声学的等）联合测试混凝土强度的方法。由于综合法比单一法测试误差小并有较宽的适用范围，因此在混凝土的质量控制与检测中的应用愈来愈多。一般来说，在合理选择各种单一方法组合的前提下，所采用的非破损测试方法越多，混凝土强度的测试精度也越高。

采用综合法测量混凝土强度时应符合以下几个原则：

- (1)单一法的仪器性能、测试技术和测试误差都应满足规定的要求；
- (2)在已查明单一法测强影响因素的基础上，应当采取对测强影响较大且相反的单一法进行综合，以便抵消或减少一些影响因素；
- (3)综合法比单一法应具有较小的测试误差和较宽的适应范围；
- (4)综合法适用于确定内部无缺陷部位的混凝土强度。

综合法测定混凝土强度的方法是较多的，如“超声波传播速度—回弹值”、“超声波传播速度—表面硬度”、“超声波传播速度—超声波衰减值”、“超声波传播速度—回弹值—碳化深度”以及“砂浆超声波传播速度—回弹值—碳化深度”等等综合法。而超声回弹综合法是国内外研究最多、应用最广的一种方法。

超声回弹综合法测定混凝土强度是1996年由罗马尼亚建筑及建筑经济科学研究院首次提出的，并编制了有关技术规程，曾受到各国科技工作者的重视。1976年我国引进了这一方法，在结合我国具体情况的基础上，许多科研单位进行了大量的试验。近十余年来曾完成了多

项科研成果，在结构混凝土工程的质量检测中已获得了广泛的推广和应用。1988 年由中国工程标准化委员会批准了我国第一本《超声回弹综合法检测混凝土强度技术规程》(CECS 02:88)。

超声回弹综合法是指采用超声仪和回弹仪，在结构混凝土同一测区分别测量声时值及回弹值  $R$ ，然后利用已建立起来的测强公式推算测区混凝土强度  $f_{cu}$  的一种方法。与单一回弹或超声法相比综合法具有以下特点：

### 一、减少龄期和含水率的影响

混凝土的声速值除受粗集料的影响外，还受混凝土的龄期和含水率等因素的影响，而回弹值除受表面状态的影响外，也受混凝土的龄期和含水率的影响。然而，混凝土的龄期和含水率对其声速和回弹值的影响有着本质的不同。混凝土含水率大，超声的声速偏高，而回弹值则偏低；混凝土的龄期长，超声声速的增长率下降，而回弹值因混凝土碳化程度增大而提高，因此二者综合起来测定混凝土强度就可以部分减少龄期和含水率的影响。

### 二、弥补相互不足

一个物理参数只能从某一方面、在一定范围内反映混凝土的力学性能，超过一定范围，它可能不很敏感或者不起作用。例如回弹值  $R$  主要以表层砂浆的弹性性能来反映混凝土的强度，当混凝土强度较低，塑性变形较大时，这种反映就不太敏感。当构件截面尺寸较大或内外质量有较大的差异时，就很难反映结构的实际强度。超声声速是以整个断面的动弹性来反映混凝土强度，而强度较高的混凝土，弹性指标变化的幅度也不大，其微小变化往往被测试误差所掩盖，所以对于强度大于 35MPa 的混凝土其  $f_{cu} - v$  相关性较差。

采用回弹法和超声法综合测定混凝土强度，既可内外结合，又能在较低或较高的强度区间相互弥补各自的不足，能够较全面地反映结构混凝土的实际质量。

由于综合法能减少一些因素的影响程度，较全面地反映整体混凝土质量，所以对提高无损检测混凝土强度的精度，具有明显的效果。

鉴于超声回弹综合法具有上述的许多优点，因此在国内多项工程的混凝土强度的检测中采用了这一方法，为工程质量事故的处理提供了重要依据。

超声回弹综合法测强所用的仪器有回弹仪和低频超声波检测仪及换能器，这些仪器的原理、构造、性能及使用方法已在许多文章中有详细论述，测试时的操作要点也与回弹法及超声法相同，此处不再赘言。

## 第二节 综合法强度的影响因素

近年来，我国有关单位对超声回弹综合法测定混凝土强度的影响因素，进行了全国协作研究，针对我国原材料的具体情况 & 施工特点，得出了切合我国实际情况的分析结论。

### 一、水泥品种及水泥用量的影响

用普通硅酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥及粉煤灰硅酸盐水泥配制的 C10、C20、C30、C40、C50

级的混凝土试件所进行的对比试验证明，上述水泥品种对“ $f_{cu}-v-R$ ”关系无显著影响，可以不予修正。

一般认为，水泥品种对声速  $v$  及回弹值  $R$  有影响的原因主要有两点。第一，由于各种水泥密度不同，导致混凝土中水泥体积分含量的差异；第二，由于各种水泥的强度发展规律不同，硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥中硅酸三钙的含量较高，因此强度发展较快，而粉煤灰水泥中硅酸三钙的含量相对较低，强度发展较慢，所以导致配比相同的混凝土，由于水泥品种不同而造成在 28 天以前的某一龄期区间强度不同。根据检测中的实际情况分析，水泥密度不同所引起的混凝土中水泥体积分含量的变化是很小的，不会引起声速和回弹值的明显波动。各种水泥强度发展规律的不同的确存在，但主要影响在早期，若早期以普通水泥的混凝土强度推算为基准，则矿渣水泥混凝土实际强度可能低 10%。但是 28 天以后这一影响已不明显，两者的强度发展逐渐趋向一致。而实际工程检测一般都在 28 天以后，所以在超声回弹综合法中，水泥品种的影响不予修正是合理的。

试验还证明，当每立方米混凝土中水泥用量在 200、250、300、350、450kg 范围内变化时，对“ $f_{cu}-v-R$ ”综合关系也没有显著的影响。但当水泥用量超出上述范围时，应另外制订专用曲线。

## 二、细集料 砂 品种及砂率的影响

用山砂、中河砂及细砂配制的 C10、C20、C30、C40 级的混凝土进行对比试验的结果证明，砂的品种对“ $f_{cu}-v-R$ ”综合关系无明显影响。而且当砂率在常用的 30% 上下波动时，对“ $f_{cu}-v-R$ ”综合关系也无明显影响。其主要原因是，在混凝土中常用砂率的波动范围有限，同时砂的粒度远小于超声波长，对超声波在混凝土中的传播状态不会造成很大影响。但要指出，当砂率小于 28% 或大于 44% 明显超出混凝土常用砂率范围时，不可忽视砂率，而应另外制订专用曲线。

## 三、粗集料 石子 品种、石子用量及粒径的影响

用卵石和碎石配制的混凝土进行对比试验，结果证明，石子品种对“ $f_{cu}-v-R$ ”综合关系有十分明显的影响。

试验表明，若以卵石混凝土为基础，则碎石混凝土所推算的强度平均约偏高 25% 左右。这是由于碎石和卵石的表面情况完全不同，使混凝土内部界面的粘结情况也不同。在相同的配合比下，碎石因表面粗糙，与砂浆的界面粘结较好，所以混凝土的强度较高；卵石则因表面光滑而影响粘结，混凝土强度较低。但超声速度和回弹值对混凝土内部的界面粘结状态并不敏感，因此在同一超声速度、回弹值的情况下，所推算的平均强度就有偏差，需要进行修正。试验证明，许多单位得出的修正值也并不一致，当石子品种不同时，应分别建立“ $f_{cu}-v-R$ ”关系曲线。

当石子用量变化时，声速和回弹值均随含石量的增加而增加。

当石子粒径在 2 ~ 4cm 范围内变化时，对“ $f_{cu}-v-R$ ”的影响不明显。但石子粒径超过 4cm 后，其影响不可忽视。

由此可见，在超声回弹综合法测强中，石子的影响是必须予以重视的。

## 四、外加剂的影响

混凝土的外加剂品种繁多，当选择常用的木钙减水剂、硫酸钠及三乙醇胺早强复合剂掺入

混凝土中进行对比试验证明，上述外加剂品种对“ $f_{cu}-v-R$ ”关系无显著影响。

一般认为，外加剂的主要效应在早期，即混凝土塑化作用和 3~5 天早期强度均增高，而超声回弹综合法测强规定在 14 天后进行，所以外加剂的影响可以不予修正。

### 五、碳化深度的影响

在回弹法测强中，碳化对回弹值有显著影响，因此必须把碳化深度作为一个重要参量。试验证明在综合法测强中碳化深度每增加 1mm，用“ $f_{cu}-v-R$ ”关系推算的混凝土强度仅比实际强度高 0.6% 左右。为了简化修正项，在实际检测中碳化因素可不予考虑。

在综合法测强中，碳化因素可不予修正的原因，是由于碳化仅对回弹值产生影响，而碳化深度较大的混凝土，含水量相应降低，导致声速稍有下降，因此在“ $f_{cu}-v-R$ ”关系中可抵消部分因回弹值上升所造成的影响。

### 六、混凝土含水率的影响

试验证明，混凝土表面的湿度对回弹值有显著影响。一般来说，湿度越大，回弹值越低。但对超声来说，声波在水中传播比在空气中传播速度快，因此在“ $f_{cu}-v-R$ ”关系中抵消了因回弹值下降所造成的影响。湿度影响随混凝土强度的提高而变小，但是，由于混凝土的湿度与气候条件、龄期、混凝土原材料条件等均有关系，各地所测得的影响程度区别较大，因此在现场测试中应尽可能采用干燥状态的混凝土。

### 七、测试面的影响

当测试在混凝土浇筑上表面或底面进行时，由于石子离析下沉及表面水、浮浆等因素的影响，其回弹值与声速值均与侧面测量时不同。若以侧面测量为准，上表面或底面测量时对回弹值及声速值均应分别乘以修正值系数。回弹值的修正见表 2-1 声速值的修正见表 2-2。

不同浇筑面的回弹值修正值

表 2-1

RB	$\Delta R$		RB	$\Delta R$	
	表面	底面		表面	底面
20	+2.5	-3.0	40	+0.5	-1.0
25	+2.0	-2.5	45	0	-0.5
30	+1.5	-2.0	50	0	0
35	+1.0	-1.5			

超声值修正系数

表 2-2

测试状态	K	测试状态	K
浇筑的两侧面	1.0	浇筑的上表面与底面	1.034

注 ①表中未列入的相应于  $R$  的  $\Delta R$  修正值，可用内插法求得，精确至一位小数；

表中有关混凝土浇筑面的修正值，是指一般原浆抹面后的修正值；

表中有关混凝土底面的修正值，是指结构或构件底面与侧面采用一类模型在正常浇筑情况下的修正值

从以上分析看出，超声一回弹综合法的影响因素，比声速或回弹单一参数法要少得多。现

将各影响因素汇总列于表 2-3 中。

“超声一回弹”综合法的影响因素

表 2-3

因素	试验验证范围	影响程度	修正方法
水泥品种及用量	普通水泥、矿渣水泥、粉煤灰水泥 250 ~ 450kg/m <sup>3</sup>	不显著	不修正
细集料(砂子、品种、用量)	山砂、特细砂、中砂;28% ~ 40%	不显著	不修正
粗集料(砂子、品种、用量)	卵石、碎石、骨灰比;1:4.5 ~ 1:5.5	显著	必须修正或制订不同的测强曲线
粗集料(石子)粒径	0.5 ~ 2cm;0.5 ~ 4cm;0.5 ~ 3.2cm	不显著	> 4cm 应修正
外加剂	木钙减水剂,硫酸钠,三乙醇胺	不显著	不修正
碳化深度		不显著	不修正
含水率		有影响	尽可能干燥
测试面	浇筑侧面与浇筑上表面及底面比较	有影响	对 $v$ 、 $R$ 分别进行修正

### 第三节 综合法测强曲线

用混凝土试块的抗压强度与非破损参数之间建立起来的相关关系曲线,即为测强曲线对于超声回弹综合法来说,即先对试块进行超声测试,然后进行回弹测试,最后将试块进行抗压试验直至破坏当取得超声声速值  $v$ 、回弹值  $R$  和混凝土强度值  $f_{cu}$  之后,选择相应的数学模型来拟合它们之间的相关关系。

#### 一、测强曲线的分类

测强曲线可按其适用范围分以下三种类型:

##### (一) 统一测强曲线(全国曲线)

这类曲线以全国一般经常使用的有代表性的混凝土原材料、成型养护工艺和龄期为基本条件。

这种曲线的建立是以全国许多地区曲线为基础,经过大量的分析研究和计算汇总而成。它适用于无地区测强曲线和专用测强曲线的单位,对全国大多数地区来说,具有一定的现场适应性因此使用范围广但其精度不很高。

##### (二) 地区部门测强曲线

采用本地区或本部门通常使用的有代表性的混凝土材料、成型养护工艺和龄期为基本条件,在本地区或本部门制作相当数量的试块进行非破损和破损的平行试验建立的测强曲线。这类曲线适用于无专用测强曲线的工程测强。这种曲线是针对我国地区辽阔和各地材料差别较大这一特点而建设起来的。

##### (三) 专用率定测强曲线

以某一个具体工程为对象,采用与被测工程相同的质量、成型养护工艺和龄期,制作一定

数量的试块，进行非破损和破损平行测试建立的测强曲线。制定的这类曲线因针对性较强，故测试精度较地区、部门曲线为高。

## 二、测强曲线的建立方法

在综合法测强中，混凝土的配合比、水泥品种及用量、粗集料性质及粒径、龄期等因素对测试结果都有不同程度的影响，为了解决这个问题，提高测试精度，在如何建立测强曲线这个问题上有两种做法。一种是采用标准曲线，然后用多个系数进行修正以确定混凝土的强度，即所谓标准混凝土法；另一种是根据所采用的配合比、原材料等制作多组测强曲线，即所谓常用配合比或最佳配合比法。

### (一) 标准混凝土法

所谓标准混凝土，即人为规定影响因素的影响系数均为 1 的情况下所制成的混凝土，用这样的混凝土来建立测强曲线称标准曲线。在罗马尼亚采用的标准混凝土是：

- (1) 32.5 级普通硅酸盐水泥；
- (2) 水泥用量为  $300\text{kg}/\text{m}^3$ ；
- (3) 粗集料为石英质河卵石，最大集料粒径为 30mm；
- (4) 粒径为 0~1.0mm 细集料的含量为 12%；
- (5) 不掺外加剂；
- (6) 试块尺寸为边长 20cm 立方体，采用标准养护；
- (7) 混凝土的成熟度为 1000 度·天。

为了得到不同的混凝土强度，用改变水灰比的办法把混凝土试块的强度从低到高拉开。用这样的混凝土建立的测强曲线规定其影响因素为 1，其余均为非标准混凝土。当改变混凝土原材料种类或配合比时则应建立相应的修正系数。每改变一个因素就要建立一个相应的修正系数。修正系数  $C_0$  用式 (2-1) 计算：

$$C_0 = f_{\text{标}}/f_{\text{非}} \quad (2-1)$$

式中  $f_{\text{标}}$ ——标准混凝土强度；

$f_{\text{非}}$ ——非标准混凝土强度。

在罗马尼亚回弹超声综合法测强中共建立了五个修正系数，即：

- (1) 水泥品种修正系数  $C_1$ ；
- (2) 水泥用量修正系数  $C_2$ ；
- (3) 粗集料种类修正系数  $C_3$ ；
- (4) 最大集料粒径修正系数  $C_4$ ；
- (5) 0~1.00mm 细集料的比例修正系数  $C_5$  等。

当采用标准曲线确定非标准混凝土强度时，则用下式计算：

$$f_{\text{非}} = f_{\text{标}} \cdot C_0 \quad (2-2)$$

式中  $C_0 = C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot C_5$

### (二) 最佳配合比或常用配合比法

采用最佳配合比配制不同强度等级的混凝土试块，然后在不同龄期进行测试，以建立测强曲线，这样建立的曲线针对性强、精度较高，但曲线的数量多，这是我国应用较多的一种形式。

### 三、区(或专用)测强曲线的制订方法

在制订测强曲线时应注意以下问题：

#### (一) 选择合适的测试仪器

在综合法检测混凝土强度的试验中，常用的仪器是超声仪和回弹仪，这些仪器的各项性能必须符合有关要求。

#### (二) 试块的制作和养护

在制作试块之前，必须对使用的混凝土原材料的种类、规格、产地及质量情况进行全面地调查了解，制订详细的试验计划，有针对性地进行试验。

制订地区测强曲线试块的数量一般不少于 150 块，制订专用测强曲线时试块的数量一般不少于 30 块。为了减少龄期等因素的影响，试块的制作应尽可能在短时间内完成。

试块的尺寸是边长为 150mm 立方体。

混凝土试块的强度等级可分 C10、C20、C30、C40、C50 等数种，可根据实际需要进行选择。每种强度等级的混凝土试块可采用最佳配合比或常用配合比进行配制。

试块的制作应在振动台上振捣成型或采用与被测构件相同的浇捣工艺，试块的养护方法也应与被测构件相同。如若建立蒸气养护混凝土测强曲线时，则试块应进行蒸气养护。如建立自然养护测强曲线时，则试块进行自然养护时，应在试块成型的第二天拆模，然后移到不受日晒雨淋处按品字形堆放养护至一定的龄期进行非破损测试。

试块的测试龄期可分别在 7 天、14 天、28 天、60 天、90 天、180 天、365 天……进行。根据曲线允许使用的时间进行选择。在每一个龄期和每一个强度等级的试块至少应试验一组试块，以保证具有足够的的数据，满足曲线的计算需要。

#### (三) 试块的测试

到达测试龄期的试块，清除测试面上的粘杂物后，进行超声和回弹测试。

##### 1. 声时值的测量及声速计算

在试块上测量声时值时，应取试块的一对侧面为测试面，保证换能器与测试面间有良好的声耦合。测量时采用对测法，在一个相对测试面上测量三点或五点，这样就可以反映试块在浇注方向上的上、中、下的质量情况。为了避免不同测距对测试结果的影响，发射和接收换能器应在同一轴线上。

测试后得到的每一试块声时值  $t_1, t_2, t_3$  取平均值，保留小数点后一位数字，然后除以声通路的距离  $L$  (试块两测试面间的距离)即可得到声速值 并保留小数点后二位数字。

$$v = \frac{L}{(t_1 + t_2 + t_3)/3} \quad (\text{km/s}) \quad (2-3)$$

##### 2. 回弹值的测量及计算

回弹值的测量应选用未进行超声测量的一对侧面。将测过超声值的侧面的油污擦净，放置于压力机的上、下承压板之间 根据试块的强度大小 预压 30 ~ 50kN 并在以上压力下 在每个试块的对应测试面上各弹击 8 次 二个测试面共测得 16 个回弹值。回弹测试时要求回弹仪的轴线应与试块侧面保持垂直，测点宜在测区范围内均匀分布，并不应弹击在气孔或外露石子上，同一测点只允许弹击一次，相邻两测点的间距一般不小于 30mm 测点离试块边缘的距离不

小于 30mm。

将 16 个回弹值中的三个最大值和三个最小值剔除，余下的 10 个回弹值取平均值 作为试块的回弹值  $R$  保留小数后一位数字。

### 3. 抗压强度试验

回弹测试完毕后，卸装载，将试块回弹值测试面放置在压力机平板间加压，以每秒  $6 \pm 4\text{kN}$  的速度连续均匀进行，直至试块破坏为止，计算抗压强度  $f_{\text{cu}}$  精确至  $0.1\text{MPa}$ 。

### (四) 测强曲线的建立

当所有测试龄期的试块全部测试完成后，即每个试块都可得到这样的三个数据：回弹值  $R$ 、声时值  $v$  和抗压强度值  $f_{\text{cu}}$ 。从统计学来看， $R$ 、 $v$ 、 $f_{\text{cu}}$  变量均属于非确定量，这些不确定量之间却有某种规律性，这种规律性的联系称之为相关关系。回归分析是一种处理自变量与因变量之间关系的一种数理统计方法，其目的是寻求非确定联系的统计相关关系，找出能描述变量之间关系的数学表达式，去预测它们统计关系的因变量的取值，并估计其精确程度。

要确立混凝土试块抗压强度  $f_{\text{cu}}$ 、声速值  $v$  和回弹值  $R$  三者之间关系，有下列一些方程式可供选择：

#### 1. 线性 或非线性 函数方程

$$f_{\text{cu}}^c = A + Bv + CR \quad (2-4)$$

$$f_{\text{cu}}^c = A + Bv + CR + DL \quad (2-5)$$

$$f_{\text{cu}}^c = A + Bv + CR + 10^{D \cdot L} \quad (2-6)$$

#### 2. 幂函数方程

$$f_{\text{cu}}^c = Av^B R^C \quad (2-7)$$

$$f_{\text{cu}}^c = Av^B R^C \cdot 10^L \quad (2-8)$$

$$f_{\text{cu}}^c = Av^B R^C L^D \quad (2-9)$$

#### 3. 指数方程

$$f_{\text{cu}}^c = A \cdot e^{(Bv + CR)} \quad (2-10)$$

#### 4. 对数方程

$$f_{\text{cu}}^c = A + B \lg v + C \lg R \quad (2-11)$$

上述式中： $A$ ——常数项；

$B$ 、 $C$ 、 $D$ ——回归系数；

$e$ ——指数；

$\lg$ ——自然对数；

$L$ ——混凝土的碳化深度。

在  $f_{\text{cu}}$ 、 $v$ 、 $R$  及  $L$  已知的情况下 系数  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  可用最小二乘法确定。当采用几种方程式进行计算比较后，取其相对标准差  $e_r$  值小和相关系数  $r$  值大的公式作为测强曲线的方程式。据国内许多单位的计算证明，其中幂函数方程是一种比较理想的方程。

一般地说，如果建立的全国测强曲线的相对标准误差  $e_r \leq 15\%$  相关系数  $r \geq 0.9$  地区测强曲线  $e_r \leq 14\%$ ， $r \geq 0.9$ ；专用测强曲线  $e_r \leq 12\%$ ， $r \geq 0.9$ ，即可满足测强使用要求。

为了尽量减少曲线的数量和便于使用，对影响程度不大的试块测试数据可以合并计算，对

影响较大的测试数据应分别建立各自的专用测强曲线。比如粗集料影响较大，则可分别建立卵石测强曲线和碎石测强曲线。

曲线建立完成后，应写明建立曲线的技术条件，比如粗集料种类、水泥品种、混凝土的强度等级、龄期等等。测强曲线仅适用于建立测强曲线时的技术条件下使用，一般不能外推，以保证测试结果的准确性。

(五) 测强曲线的表达形式

超声回弹综合法测强曲线可用二种形式表达。

1. 回归方程

如北京地区自然养护、粗集料为卵碎石、矿渣水泥 龄期为 7~90 天的幂函数回归方程如下：

$$f_{cu}^r = A \cdot v^B \cdot R^C = 0.0223 v^{1.91} R^{1.81} \quad (2-12)$$

如果被测混凝土符合建立曲线的技术条件时，当取得回弹值和声速值之后，代入上述公式，即可得到结构混凝土的强度值。几个省市测强曲线的回归方程及技术条件列入表 2-4 中。

几种测强曲线的回归方程及技术条件表 2-4

曲线种类	原 材 料		曲线龄期 (d)	回 归 方 程
	水泥品种	粗集料		
统一曲线	矿渣、普通	卵石	7~720	$f_{cu}^r = 0.0038 v^{1.23} R^{1.95}$
	矿渣、普通	碎石	7~720	$f_{cu}^r = 0.008 v^{1.72} R^{1.57}$
北京地区	矿渣	卵石	7~90	$f_{cu}^r = 0.0223 v^{1.91} R^{1.81}$
北京地区	矿渣	卵石	7~90	$f_{cu}^r = 0.0186 v^{1.75} R^{1.96}$
四川地区	矿渣、普通	卵石	14~720	$f_{cu}^r = 0.00678 v^{3.57} R^{1.43}$
四川地区	矿渣、普通	碎石	14~720	$f_{cu}^r = 0.034 v^{3.2} R^{1.19}$
云南地区	矿渣	碎石	7~90	$f_{cu}^r = 0.0061 v^{3.16} R^{1.06}$
云南地区	矿渣	碎石	180~360	$f_{cu}^r = 0.088 v^{3.5} R^{0.89}$
大庆地区	矿渣、普通	卵石	7~90	$f_{cu}^r = 0.004 v^{4.78} R^{1.13}$
山西地区	矿渣、普通	卵石	14~90	$f_{cu}^r = 0.4422 v^{1.49} R^{1.17}$
山西地区	矿渣、普通	碎石	14~90	$f_{cu}^r = 0.585 v^{2.49} R^{1.35}$

2. 图表法

为便于在工程测试中使用，减少计算工作量，可将系数已知的回归方程，在非破损参数  $v$ 、 $R$  的有效范围之内，从小到大为序等距分级，与计算的对应混凝土强度制图或列表（表 2-5）。

矿渣卵石混凝土超声回弹综合法强度计算表

$$(f_{cu}^r = 0.0223 v^{1.81} R^{1.91} \text{ 自然养护})$$

表 2-5

$f_{cu}^r$ $v$	$R$	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	...	44
3.60					7.5	8.1	8.7	9.3	10.0	10.6	11.3	...	24.1
3.65					7.7	8.3	8.9	9.6	10.2	10.9	11.6	...	24.8
3.70					7.9	8.5	9.1	9.8	10.5	11.2	12.0	...	25.4

续上表

$\frac{f_{cu}^c}{v}$	R	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	...	44
3.75					8.1	8.7	9.4	10.1	10.8	11.5	12.3	...	26.1
3.80				7.6	8.3	8.9	9.6	10.3	11.0	11.8	12.6	...	26.7
3.85				7.8	8.5	9.2	9.9	10.6	11.3	12.1	12.9	...	27.6
3.90				8.0	8.7	9.4	10.1	10.8	11.6	12.4	13.2	...	28.1
3.95			7.5	8.2	8.9	9.6	10.3	11.1	11.9	12.7	13.5	...	28.8
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	...	⋮
5.00		10.8	11.8	12.9	13.9	15.1	16.2	17.4	18.6	19.9	21.2	...	45.1

#### 四、测强曲线的验证

全国或地区测强曲线建立之后 应进行系统的验证工作 以检验曲线的测试精度及其实用性。

在我国《钢筋混凝土工程施工及验收规范》中规定，以立方体试块进行非破损测试而得出测试强度与实际抗压强度之间的误差分析作为曲线测试精度的验证手段。

验证用的试块可采用预留的有代表性的同条件养护试块。当没有同条件试块时 也可采用与结构混凝土同材料、同配合比成型的龄期在 7 天以上的试块。最直接可靠的办法还是采用钻取芯样试件进行验证。

立方体试块的非破损测试与数据处理方法和建立测强曲线时的方法相同。而芯样非破损试件是从结构混凝土测区上获得的，这就要求钻芯的位置必须在破损测区内。

每个试块测出非破损参数后，代入相应的回归方程计算出非破损强度值，然后将试块进行抗压试验直至破坏求出实际抗压强度，最后按下述公式计算测强曲线的误差范围。

$$e_r = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left( \frac{f_{cu}}{f_{cu}^c} - 1 \right)^2} \times 100\% \quad (2-13)$$

式中： $e_r$ ——相对标准差；

$f_{cu}$ ——试块抗压强度 (MPa)；

$f_{cu}^c$ ——试块非破损测试强度 (MPa)。

当计算的相对标准差符合要求时，则这条曲线可作为本地区测强时使用。

### 第四节 综合法测混凝土强度技术

综合法检测混凝土强度技术，实质上就是超声法和回弹法两种单一测强的综合测试，因此有关检测方法及规定与前述相同。

#### 一、检测准备

##### (一) 资料准备

需进行综合法测试的结构或构件，在检测前应具备下列有关资料：

- (1)工程名称及设计、施工和建设单位名称；
- (2)结构或构件名称、编号、施工图(或平面图)及混凝土强度等级；
- (3)水泥品种、强度等级、用量、出厂厂名、砂石品种、粒径、外加剂或掺合料品种、掺量，以及混凝土配合比等；
- (4)模板类型、混凝土浇筑和养护情况以及成型日期；
- (5)结构或构件存在的质量问题，混凝土试块抗压报告等。

## (二) 被测结构或构件准备

检测结构或构件时需要布置测区，因为测区是进行超声、回弹测试的测量单元。所以，测区布置应符合下列规定：

- (1)按单个构件检测时，应在构件上均匀布置测区，且不少于 10 个；
  - (2)当对同批构件抽样检测时，构件抽样数应不少于同批构件的 30% 且不少于 4 件，每个构件测区数不少于 10 个；
  - (3)对长度小于或等于 2m 的构件，其测区数量可适当减少，但不应少于 3 个。
- 当按批抽样检测时，凡符合下列条件的构件，才可作为同批构件：
- (1)混凝土强度等级相同；
  - (2)混凝土原材料、配合比、成型工艺、养护条件及龄期基本相同；
  - (3)构件种类相同；
  - (4)在施工阶段所处状态相同。

每个构件的测区，应满足以下要求：

- (1)测区的布置应在构件混凝土浇筑方向的侧面；
- (2)测区应均匀分布，相邻两测区的间距不宜大于 2m；
- (3)测区宜避开钢筋密集区和预埋铁件；
- (4)测区尺寸为 200mm×200mm，相对应的两个 200mm×200mm 方块应视为一个测区；
- (5)测试面应清洁、平整、干燥，不应有接缝、饰面层、浮浆和油垢，并避开蜂窝、麻面部位，必要时可用砂轮片清除杂物和磨平整，并擦净残留粉尘。

结构或构件上的测区应注明编号，并记录测区所处的位置和外观质量情况。每一测区宜先进行回弹测试，然后进行超声测试。

对非同一测区的回弹值及超声声速值，不能按综合法计算混凝土强度。

## 二、测试技术

### (一) 回弹值的测量与计算

#### 1. 回弹值的测量

用于综合法测量的回弹仪，必须是处于标准状态，并在钢砧上率定值为  $80 \pm 2$  的仪器。用回弹仪测试时，宜使仪器处于水平状态测试混凝土侧面，此情况修正值为 0。若不能满足这一要求，也可以非水平状态测试或测试混凝土的顶面或底面，但其回弹值应进行修正。

回弹测点宜在测区范围均匀分布，但不得打在气孔或外露石子上，相邻两测点的间距一般不小于 30mm，测点距构件边缘或裸露钢筋铁件的距离不小于 50mm，且同一测点只允许弹击一次。回弹仪的轴线方向应与测试面相垂直。

## 2. 回弹值的计算

计算测区平均回弹值时，应从该测区的两个相对测试面 16 个回弹值中，分别剔除 3 个最大值和 3 个最小值，然后将余下的 10 个回弹值按下式计算：

$$R_m = \sum_{i=1}^{10} R_i / 10 \quad (2-14)$$

式中： $R_m$ ——测区平均回弹值，计算至 0.1；

$R_i$ ——第  $i$  个测点的回弹值。

如为非水平状态测得的回弹值，应按下式进行修正：

$$R_a = R_m + R_{\alpha} \quad (2-15)$$

如顶面或底面测得的回弹值，应按下式进行修正：

$$R_a = R_m + (R_a^t + R_a^b) \quad (2-16)$$

上述式中： $R_a$ ——修正后的测区回弹值；

$R_{\alpha}$ ——测试角度为  $\alpha$  的回弹修正值；

$R_a^t$ ——测试顶面回弹修正值；

$R_a^b$ ——测试底面回弹修正值。

测试时，如仪器处于非水平状态，同时构件测区又不是浇筑混凝土侧面，则应对测得的回弹值先进行角度修正，后进行浇筑面修正。

## (二) 超声声速值的测量与计算

### 1. 超声声时值的测量

超声仪必须是符合技术要求并具有质量检查合格证。超声测点应布置在回弹测试的同一测区内。应保证换能器与混凝土耦合良好，且发射和接收换能器的轴线应在同一直线上。每个测区内的相对测试面上，应布置三个测点。

### 2. 声速值的计算

声速值按下式计算

$$v_i = L / t_{mi} \quad (2-17)$$

$$t_{mi} = (t_1 + t_2 + t_3) / 3 \quad (2-18)$$

式中： $v_i$ ——测区声速值 (km/s)；

$L$ ——超声测距 (mm)；

$t_{mi}$ ——第  $i$  个测区平均声时值 ( $\mu s$ )；

$t_1, t_2, t_3$ ——测区中三个测点的声时值。

当在浇筑混凝土的顶面与底面测试时，由于上表面砂浆较多强度偏低，底面粗集料较多强度偏高，综合起来与成型侧面是有区别的，另浇筑表面不平整，因此，会使声速偏低，所以进行上表面与底面测试时声速应进行修正：

$$v_a = 1.034 v_i \quad (2-19)$$

式中： $v_a$ ——修正后的测区声速值 (km/s)。

## 第五节 结构构件混凝土强度的推定

用综合法检测结构或构件混凝土强度时，应在结构或构件上所布置的测区内分别进行超

声和回弹测试，用所获得的超声声速值和回弹值等参数，按已确定的综合法相关曲线进行测区强度计算，然后按测强曲线公式计算出构件混凝土强度。

当结构所用材料与制订相关曲线所用材料有较大差异时，需用同条件试块或从结构构件测区中钻取的混凝土芯样进行修正，试件数量应不少于 3 个。此时，测区混凝土强度应乘以修正系数。修正系数按下式计算：

有同条件试块时：

$$\eta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{cu,i} / f_{cu,i}^c \quad (2-20)$$

有混凝土芯样时：

$$\eta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{cor,i} / f_{cu,i}^c \quad (2-21)$$

式中： $\eta$ ——修正系数，精确至小数点后两位；

$f_{cu,i}$ ——第  $i$  个混凝土试块抗压强度 (MPa) 精确至 0.1 MPa

$f_{cor,i}$ ——对应于第  $i$  个试块按综合法计算的混凝土强度值 (MPa) 精确至 0.1MPa；

$n$ ——试件数量。

### 一、单个构件混凝土强度的推定

在施工中，常常发生只有几个构件混凝土强度未达到设计要求，每一个构件上布置 10 个测区，分别用超声、回弹检测，最后计算每个测区强度值。单个构件的混凝土强度推定值  $f_{cu,e}$  取构件各测区中最小值作为该构件的混凝土强度推定值。

如有一采用卵石、中砂配制的混凝土强度等级为 C20 的柱 柱断面为 300 mm × 300 mm 用综合法对该柱进行检测后（回弹测试角度为 0° 测试面为侧面）计算如表 2-6 所示。第 7 测区的强度最小 则柱推定强度为 17.8MPa。

测区强度值 (MPa)

表 2-6

序 号	测区强度值(MPa)	序 号	测区强度值(MPa)
1	4.86,33.2,24.7	6	5.04,30.1,21.3
2	4.70,33.5,24.1	7	4.44,29.8,17.8
3	4.60,31.6,20.9	8	4.17,32.1,19.1
4	4.48,32.3,21.2	9	4.18,33.8,21.2
5	4.34,32.7,20.8	10	4.35,31.1,18.9

### 二、批量构件混凝土强度的推定

由于施工管理方面的原因，有时也会出现致使一大批构件或某工程某层结构混凝土强度都未达到设计强度等级的情况，如果确实是属于相同的同批构件，则可按批进行抽样检测，构件抽样数应不少于构件总数的 30% 且不少于 4 件，每个构件测区不少于 10 个。该批构件的混凝土强度推定值  $f_{cu,e}$  可按下列公式计算 并取两者中较大值。

$$f_{cu,e1} = m f_{cu}^c - 1.645 S f_{cu}^c \quad (2-22)$$