

高等学校理工科规划教材

# 混凝土性能 及新型混凝土技术

洪雷 编著



大连理工大学出版社

高等学校理工科规划教材

# 混凝土性能及新型混凝土技术

洪 雷 编著

大连理工大学出版社

© 洪雷 2005

图书在版编目(CIP)数据

混凝土性能及新型混凝土技术 / 洪雷编著. — 大连: 大连理工大学出版社, 2005. 4

ISBN 7-5611-2848-7

I. 混… II. 洪… III. ①混凝土—性能 ②混凝土施工—施工技术  
IV. ①TU528 ②TU755

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 006106 号

大连理工大学出版社出版

地址: 大连市凌水河 邮政编码: 116024

电话: 0411-84708842 传真: 0411-84701466 邮购: 0411-84707961

E-mail: dutp@dutp.cn URL: <http://www.dutp.cn>

大连业发印刷有限公司印刷 大连理工大学出版社发行

---

幅面尺寸: 185mm × 260mm 印张: 13 字数: 315 千字

印数: 1 ~ 2 000

2005 年 4 月第 1 版

2005 年 4 月第 1 次印刷

---

责任编辑: 范业婷

责任校对: 孙伟丽

封面设计: 季 强

---

定 价: 25.00 元

# 前 言

---

近十几年,尤其是进入 21 世纪以来,我国建筑业发展速度十分迅猛,给混凝土科学技术的发展提出了更高的要求,也极大地推动了混凝土科学的进步。对高层、超高层以及超大型结构的建筑需求不断增加,新型智能化建筑的发展也进入了一个崭新的阶段。新型混凝土技术和新型混凝土施工工艺不断涌现,并在实际工程应用中获得了巨大的经济效益和社会效益。

但是由于目前高校的建筑材料课程所授内容大多比较陈旧,相当部分内容还停留在二三十年前的水平上,学生毕业后很难适应实际工作的需要。鉴于上述情况,作者在大连理工大学土木水利学院本科生各专业开设了“高性能新型混凝土施工”课程,受到了学生的一致欢迎。经数年教学实践,课程体系日趋完善,并形成了讲义。为满足教学需要,特将此讲义修改出版。

本教材十分注重理论与实践应用相结合。第一篇论述了有关混凝土材料性能的基本理论知识,第二篇论述了多种新型混凝土的生产和施工技术。本书可作为建筑、土木类专业及相关各专业本科生教学用书,也可作为建筑设计、施工和建筑材料工作者的技术参考书。

本书在编写过程中,参阅了公开发表的文献中的一些试验数据,在此表示感谢。

感谢宋玉普教授对本书的审阅。

由于作者的水平有限,不妥之处在所难免,望读者惠赐指正。

**编著者**

2005年1月

# 目 录

## 第一篇 混凝土材料基本特性

### 第1章 新拌混凝土流变特性 /1

- 1.1 流变学简介 /1
  - 1.1.1 流变学 /1
  - 1.1.2 流变基本模型 /2
- 1.2 混凝土混合料流变特性 /5
  - 1.2.1 宾汉姆体 /5
  - 1.2.2 混凝土混合料流变方程 /5
  - 1.2.3 混凝土混合料流变参数 $\tau_0$ 和 $\eta$ 的含义 /6
  - 1.2.4 流动特性的测定方法 /8
  - 1.2.5 混凝土混合料工作性 /12
- 1.3 混凝土混合料工作性的影响因素 /15
  - 1.3.1 混凝土单位用水量对流动性的影响 /15
  - 1.3.2 混凝土混合料水灰比和集灰比对工作性的影响 /17
  - 1.3.3 砂率对混凝土混合料工作性的影响 /18
- 1.4 混凝土混合料的离析和泌水 /18
  - 1.4.1 混合料的离析 /18
  - 1.4.2 混凝土混合料的沉降与泌水 /21

### 第2章 混凝土材料的力学特性 /23

- 2.1 固体材料及其强度 /23
  - 2.1.1 固体材料内部结构 /23

- 2.1.2 固体材料的理想强度 /24
- 2.2 混凝土强度 /27
  - 2.2.1 混凝土强度理论 /27
  - 2.2.2 混凝土的裂缝扩展 /28
- 2.3 混凝土的弹性和塑性 /30
  - 2.3.1 材料的弹性与塑性 /30
  - 2.3.2 混凝土的应力-应变曲线 /31
  - 2.3.3 混凝土的弹性模量 /31
  - 2.3.4 混凝土弹性模量的细观力学分析 /32
- 2.4 混凝土的徐变 /35
  - 2.4.1 混凝土徐变概念 /35
  - 2.4.2 混凝土徐变机理 /38
  - 2.4.3 混凝土徐变分析 /39

### 第3章 混凝土材料的物理特性 /41

- 3.1 混凝土材料的渗透性 /41
  - 3.1.1 普通多孔材料的渗透现象 /41
  - 3.1.2 混凝土材料的渗透性 /41
- 3.2 混凝土材料的热物理性能 /42
  - 3.2.1 材料的导热性能 /42
  - 3.2.2 材料的比热 /47
  - 3.2.3 材料的导温性能 /47
  - 3.2.4 材料的蓄热性能 /49
  - 3.2.5 混凝土材料的热物理性能 /50

## 第二篇 新型混凝土技术

### 第4章 高性能混凝土 /53

- 4.1 概 述 /53
- 4.2 高性能混凝土研制的技术途径和措施 /55

- 4.2.1 控制水灰比 /55
- 4.2.2 改善水泥石的孔结构 /56
- 4.2.3 改善水泥石集料界面结构 /56

- 4.2.4 改善混凝土生产工艺 /57
- 4.3 高性能混凝土的新组分 /59
- 4.3.1 超细矿粉 /59
- 4.3.2 新型高效减水剂 /59
- 4.4 高性能混凝土的配合比 /60
- 4.4.1 美国混凝土协会(ACI)的方法 /60
- 4.4.2 法国国家路桥试验室(LCPC)的方法 /61
- 4.4.3 P.L. Mehta 和 P.C. Aitcin 的方法 /61
- 4.5 高性能混凝土的应用 /62
- 4.5.1 国外高性能混凝土工程实例 /63
- 4.5.2 高性能混凝土在桥梁方面的应用 /66
- 4.5.3 自密实高性能混凝土工程实例 /70
- 4.5.4 其他工程应用实例 /72
- 第5章 泵送混凝土技术 /74**
- 5.1 概述 /74
- 5.1.1 泵送混凝土的定义及其特点 /74
- 5.1.2 混凝土泵的种类 /75
- 5.2 泵送混凝土的流动特征 /75
- 5.2.1 流变学原理在泵送混凝土中的应用 /75
- 5.2.2 泵送混凝土在输送管中泵送压力变化的计算方法 /76
- 5.2.3 混凝土泵送设备的选择 /79
- 5.3 泵送混凝土配合比 /80
- 5.3.1 泵送混凝土原材料的选择 /80
- 5.3.2 泵送混凝土配合比设计 /84
- 5.4 泵送混凝土应用实例 /87
- 第6章 纤维混凝土 /91**
- 6.1 概述 /91
- 6.2 纤维混凝土的增强机理 /92
- 6.2.1 纤维间距理论 /92
- 6.2.2 复合材料力学混合定律 /94
- 6.3 钢纤维混凝土 /98
- 6.3.1 钢纤维混凝土的组成材料 /98
- 6.3.2 钢纤维混凝土的配合比设计 /100
- 6.3.3 钢纤维混凝土的物理力学性能 /104
- 6.3.4 钢纤维混凝土应用实例 /109
- 6.4 其他纤维混凝土 /113
- 6.4.1 玻璃纤维混凝土 /113
- 6.4.2 聚丙烯纤维混凝土 /116
- 6.4.3 碳纤维混凝土 /119
- 第7章 轻集料混凝土 /120**
- 7.1 概述 /120
- 7.2 轻集料的分类 /120
- 7.3 轻集料混凝土的分类 /122
- 7.4 轻集料性能 /123
- 7.5 轻集料混凝土的配合比设计 /127
- 7.5.1 配合比设计要求和特点 /127
- 7.5.2 配合比设计的方法 /129
- 7.6 轻集料混凝土的性能 /133
- 7.6.1 力学性能 /133
- 7.6.2 热物理性能 /134
- 7.6.3 耐久性 /135
- 7.7 轻集料混凝土施工 /136
- 7.7.1 混凝土的搅拌 /136
- 7.7.2 拌合物的运输、浇筑和成型 /136
- 7.7.3 混凝土的养护和缺陷修补 /137
- 第8章 喷射混凝土 /138**
- 8.1 概述 /138
- 8.2 喷射混凝土的原材料 /138
- 8.3 喷射混凝土的配合比 /140
- 8.4 喷射混凝土的性能 /142
- 8.4.1 力学性能 /142
- 8.4.2 变形性能 /144
- 8.4.3 耐久性 /145
- 8.5 钢纤维喷射混凝土 /146
- 8.5.1 原材料 /146
- 8.5.2 配合比 /146
- 8.5.3 主要力学性能 /146
- 8.6 喷射混凝土施工 /146
- 8.6.1 施工工艺 /146
- 8.6.2 作业区段划分 /148
- 8.6.3 施工过程中的注意事项 /148
- 8.6.4 质量检查 /149
- 8.7 喷射混凝土施工实例 /149
- 8.7.1 杜邦环形地下火车站 /149
- 8.7.2 联邦德国博览会展览厅的维修 /150
- 8.7.3 北京石化区聚丙烯成品库 /151
- 第9章 无砂大孔混凝土 /154**
- 9.1 概述 /154
- 9.1.1 无砂大孔混凝土的定义及分类 /154
- 9.1.2 无砂大孔混凝土的发展史 /154
- 9.1.3 无砂大孔混凝土的特点及用途 /155
- 9.2 无砂大孔混凝土原材料及配合比 /155

- 9.2.1 原材料 /155
- 9.2.2 配合比 /156
- 9.3 无砂大孔混凝土的物理力学性能 /157
  - 9.3.1 普通无砂大孔混凝土的物理力学特性 /157
  - 9.3.2 轻集料无砂大孔混凝土的物理力学特性 /160
- 9.4 无砂大孔混凝土的施工 /161
  - 9.4.1 搅拌工艺 /161
  - 9.4.2 成型工艺 /161
  - 9.4.3 养护工艺 /161
- 9.5 无砂大孔混凝土质量检验 /161
  - 9.5.1 质量要求 /161
  - 9.5.2 验收标准 /162
- 第10章 防水混凝土 /163**
  - 10.1 概 述 /163
  - 10.2 普通防水混凝土 /164
    - 10.2.1 普通防水混凝土的原材料组成 /164
    - 10.2.2 配合比计算 /165
    - 10.2.3 普通防水混凝土施工 /166
  - 10.3 外加剂防水混凝土 /167
    - 10.3.1 减水剂防水混凝土 /167
    - 10.3.2 引气剂防水混凝土 /169
    - 10.3.3 氯化铁防水混凝土 /171
  - 10.4 膨胀水泥防水混凝土 /173
- 第11章 聚合物混凝土 /176**
  - 11.1 概 述 /176
  - 11.2 聚合物浸渍混凝土 /176
    - 11.2.1 生产工艺 /177
    - 11.2.2 聚合物浸渍混凝土的性能 /179
  - 11.3 聚合物混凝土 /179
    - 11.3.1 聚合物混凝土原材料 /181
    - 11.3.2 聚合物混凝土生产工艺及配合比 /182
    - 11.3.3 聚合物混凝土常用参考配合比 /183
    - 11.3.4 聚合物混凝土的搅拌、成型和养护 /184
    - 11.3.5 聚合物混凝土的物理力学性能 /185
  - 11.4 聚合物水泥混凝土 /187
    - 11.4.1 聚合物水泥混凝土原材料 /187
    - 11.4.2 配合比及施工工艺 /188
    - 11.4.3 聚合物水泥混凝土的物理力学性能 /189
- 第12章 导电混凝土 /191**
  - 12.1 概 述 /191
  - 12.2 水泥石墨导电混凝土 /191
  - 12.3 水泥碳纤维导电混凝土 /196
    - 12.3.1 水泥碳纤维混凝土的导电机理 /196
    - 12.3.2 碳纤维的掺量对水泥碳纤维导电混凝土导电性能的影响 /196
    - 12.3.3 温度对水泥碳纤维导电混凝土导电性能的影响 /197
    - 12.3.4 养护龄期对水泥碳纤维导电混凝土导电性能的影响 /197
    - 12.3.5 循环应力对水泥碳纤维导电混凝土导电性能的影响 /198
  - 12.4 钢纤维导电混凝土 /198
- 参考文献 /200**



---

# 第一篇 混凝土材料基本特性

本篇主要介绍新拌混凝土材料(混凝土混合料)和硬化混凝土材料的一些基本特性。主要包括新拌混凝土的流变特性,硬化混凝土材料的力学特性以及其物理特性和使用耐久性。这部分内容,是进一步掌握高性能混凝土以及各类新型混凝土的基础。

## 第1章 新拌混凝土流变特性

混凝土材料是由其组成材料(水泥、粗细集料、矿物磨细粉、外加剂、拌合水等)按一定比例拌合、浇筑、成型和养护(凝结硬化)而成的一种复合材料。混凝土这种复合材料的最终性能与其组成材料的性质、比例、拌合、浇筑、成型、养护等一系列作业有着密切的关系。通常,我们将各种组成材料,按一定比例拌合而得到的尚未凝结硬化的材料,称为新拌混凝土,也称为混凝土混合料。它可以看成是一种由水和分散粒子组成的体系,它具有弹性、黏性、塑性等特征。对新拌混凝土特性的研究,可以更好地指导混凝土材料的施工,对获得设计要求的混凝土材料,是十分必要的。本章主要介绍运用流变学原理,来研究新拌混凝土流变特性的一些内容。

### 1.1 流变学简介

#### 1.1.1 流变学

流变学,是研究物体流动和变形的科学。它是近代力学的一个分支,但是它和力学又有明显的差别。力学只研究物体作为一个实体的运动规律,不联系物体本身的内部结构和性质。而流变学在研究流动和变形规律时必须联系到物体机构中质点之间的相对运动,也就是说,必须要联系到物体的结构和性质。在掌握质点间相对运动规律的基础上,区别出物体的弹性、塑性、黏性的不同变形状态来。

早在1928年,在美国宾汉姆(E. C. Bingham)教授的倡议下,在美国成立了流变学会。1940年,英国成立了流变学俱乐部。然而,流变学真正应用于材料科学的研究,成为材料科学发展的重要基础学科之一,是在第二次世界大战之后。随着人工合成材料的发展,流变学的内容日益完善,日趋系统化。目前,它广泛地应用于各种金属和非金属材料,各种有机和无机材料的研究中。

流变学的研究对象,几乎包括了所有的物质,综合研究物质的弹性变形、塑性变形和黏性流动。对新拌混凝土即混凝土混合料而言,则主要研究其黏、塑、弹性的演变。

### 1.1.2 流变基本模型

研究材料的流变特性,要研究材料在某一瞬间的应力和应变的定量关系,这种关系常用流变方程来表示。而一般材料的流变方程的建立,都基于以下三种理想材料的基本模型(或称流变基元)的基本流变方程。

(1)虎克(Hooke)固体模型(简写H-模型),它表示具有完全弹性的理想材料。

(2)圣维南(St. Venant)固体模型(简写StV-模型),它表示超过屈服点后,只有塑性变形的理想材料。

(3)牛顿(Newton)液体模型(简写N-模型),它表示只具有黏性的理想材料。

以上三种理想材料基本模型的表示方式、流变方程和应力-应变-时间关系,如图1-1所示。

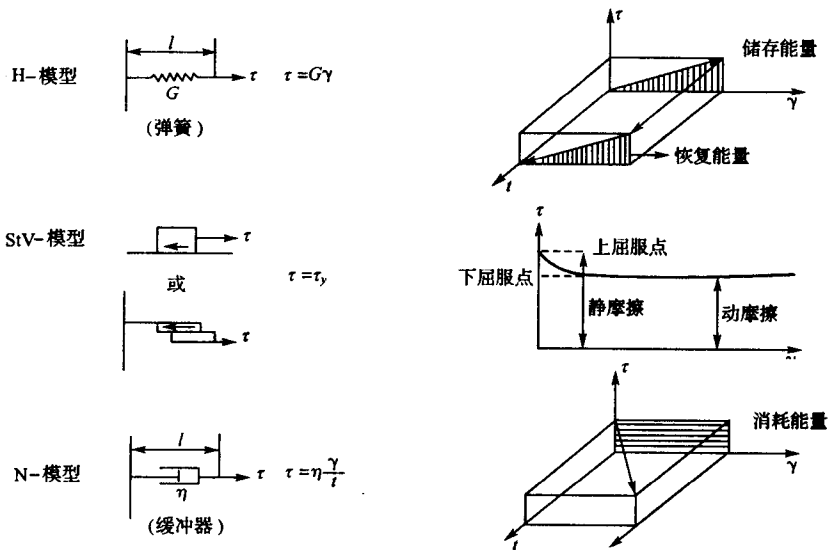


图1-1 流变基本模型

弹性、塑性、黏性和强度,是4个基本流变性质。

所谓弹性,是使物体产生变形的力,在作用停止后,物体能恢复其原来的体积(指气体和液体)或形状(指固体)的性能。对固体而言,在弹性极限以内的变形,变形大小与作用力成正比关系。作用力除去后,变形一般都能全部消失。当作用力超过物体弹性极限时,固体就失去弹性,这时若不出现破裂,便出现塑性变形。

所谓塑性,是使固体产生变形的力,超过该固体的屈服值后,在应力保持不变的情况下,出现能使该固体长期保持平衡状态的一种性能。塑性变形是不可逆的。从材料结构分析,塑性变形是由产生在构成材料的晶体的滑移面上的剪切应力引起的。但滑移面上的塑性变形并不出现断裂现象。对软质材料而言,塑性也可解释为保持材料固定形状的能力。

所谓黏性,是指包括气体和液体在内的流体,由其内部结构所产生的阻碍相对流动的一种性能,因此也称为内摩擦。

流动着的流体中若从平行于流动的方向分成不同流速的若干层,则相邻两层间所产生的与平面平行而流向相反的阻力即为黏性。

黏性以泊(符号为P)为量度,即在流体内两个相距1 cm,面积各为1 cm<sup>2</sup>的平行层,在其剪切方向作用1 达因(dyn)的力,使两层流速相差1 cm/s 的黏度为1 泊,所以

$$1 P = 1 \text{ dyn} \cdot \text{s} / \text{cm}^2 = 1 \text{ g} / (\text{cm} \cdot \text{s})$$

温度对黏性很敏感,液体温度升高时黏性下降,而气体温度升高时黏性反而增大。20°C 时,水的黏度为0.01 P 或称1 cP,空气20°C 时黏度为 $1.8 \times 10^{-4} P$ 。

所谓强度,可以这样理解,当符合虎克定律的物体,应变不断增加时,可能出现两种情况,一是如该物体具有塑性,达到超过屈服值后呈圣维南体的变形,即塑性变形在应力不再增加的情况下无限制地发展;二是物体如具有脆性,则在达到屈服值前即出现断裂。这两种情况下的应力都称为该材料的强度。因此,强度极限也就是材料承受变形的极限。

从流变学观点分析,材料承受变形的极限是与外力施加速度和持续时间密切相关的,因此,材料强度的大小也必然受外力施加速度和持续时间所影响。

弹性、塑性、黏性和强度是物质的4个基本流变特征。任何实际存在的物质都同时具有以上4种特征,只是程度各不相同而已。与其中弹性和塑性变形存在密切关系的性能还有刚性、脆性、延性和韧性,但这4种性能均是由弹性和塑性派生出来的。

刚性是指材料抵抗弹性变形的能力。

脆性是指材料在外力作用下一直到破碎以前不出现塑性变形的一种性能。一般地,所谓脆性是材料在出现塑性变形以前,也就是达到屈服值以前就发生了断裂,因此脆性材料的强度不会超过该材料的弹性极限。它的抗冲击能力和抗动荷载能力都会很差。

延性,也称可锻性,是与脆性恰好相反的一种性能。它表现为材料在破碎以前所能承受塑性变形的总的能力。

韧性是指材料在外力作用下产生塑性变形过程中吸收能量的能力。或理解为材料在达到断裂前单位体积内所需消耗的功的总量。

混凝土材料改性的主要方向是改脆性为韧性,因此,从流变学的角度研究改性途径和措施是一个正确的方向。

以上3种模型是3种理想物体模型,严格地讲,在实际中并不存在。虎克固体具有弹性和强度,而没有塑性。圣维南固体具有弹性和塑性,但没有黏性。牛顿液体具有黏性,但没有强度和弹性,也没有塑性。

而实际材料的流变性质具有所有以上4种基本流变性质,只是程度上有差异。所以各种材料的流变性质均可用具有不同弹性模量G,黏性系数 $\eta$ 和表示塑性屈服应力 $\tau_y$ 的流变基元(基本模型),以不同的形式组合成的流变模型来研究。

若用H、N、StV 分别表示上述三种流变基元,用符号“|”表示并联,“—”表示串联,则可用不同的符号表示出各种流变模型的结构式。最常见的是以下两种:

一是麦克斯韦(Maxwell)模型,它是最简单的串联模型,即牛顿液体模型与虎克固体模型相串联而成, $M = N - H$ 。它用来表示恒定变形下的应力变化历程(图1-2)。

在该模型中,各基元受应力相等,而总的变形为各基元变形之和,即

$$\begin{aligned} \tau &= \tau_e = \tau_v \\ \gamma &= \gamma_e + \gamma_v \end{aligned}$$

因此

$$\gamma = \tau/G + \tau t/\eta$$

式中  $\tau, \gamma$ ——模型总应力和总变形；

$\tau_e, \gamma_e, \tau_v, \gamma_v$ ——分别表示弹性基元的应力、变形和黏性基元的应力、变形。

在外力作用在该模型上的瞬间，首先产生弹性变形  $\gamma_e$ ，随着应力作用时间  $t$  的增加，黏性流动  $\gamma_v$  也随之增加。若在时间  $t$  时将外力除去，则弹性变形立即恢复，而残余的永久变形保持恒定不变，为黏性流动  $\gamma_v = \tau t/\eta$ 。若外力作用在模型上后，保持变形不变，则应力  $\tau$  将随时间  $t$  的增加而减少，这是因为弹性变形转化为黏性流动的结果。

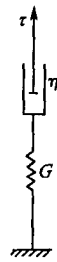


图 1-2 麦克斯韦模型

设在时间无限小为  $dt$  时，M-模型将发生  $d\gamma$  的变形，它等于  $d\gamma_e$  与  $d\gamma_v$  之和，即

$$d\gamma = d\gamma_e + d\gamma_v$$

$$d\gamma = \frac{1}{G}d\tau + \frac{\tau}{\eta}dt$$

当  $\gamma$  为一定时，即保持 M-模型变形恒定， $d\gamma = 0$ ，上式变为

$$\frac{d\tau}{\tau} = -\frac{G}{\eta}dt$$

对上式积分，并考虑边界条件  $t = 0$  时， $\tau = \tau_0$ ，即初始应力为  $\tau_0$ ，得

$$\tau = \tau_0 e^{-\frac{G}{\eta}t} = \tau_0 e^{-\frac{t}{T}}$$

式中  $T = \frac{\eta}{G}$  具有时间的因次，称为松弛时间。由上式可以看出，应力  $\tau$  将随时间的增加而减少，这种现象称为应力松弛。当  $t = T$  时，模型上应力  $\tau$  只有初始应力  $\tau_0$  的  $1/e$ 。  $t \rightarrow \infty, \tau \rightarrow 0$ ，即模型最终应力将全部消失，弹性变形全部转化为黏性流动。

另一种模型是开尔文 (Kelvin) 模型，它是最简单的并联模型，即牛顿液体模型与虎克固体模型相并联而成， $K = N | H$ ，它表示恒定应力条件下的变形过程 (图 1-3)。

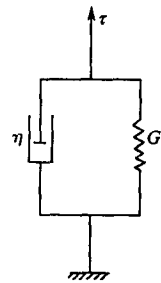


图 1-3 开尔文模型

在该模型的情况下，各基元的变形都相等，而总的应力则等于各基元应力之和，即

$$\gamma = \gamma_e = \gamma_v$$

$$\tau = \tau_e + \tau_v$$

因而

$$\tau = G\gamma + \eta \frac{d\gamma}{dt} = G\gamma + \eta \frac{d\gamma}{dt}$$

对上式积分，考虑边界条件  $t = 0$  时， $\gamma = 0$ ，则得

$$\gamma = \frac{\tau}{G} (1 - e^{-\frac{G}{\eta}t})$$

由上式可知，模型在外力作用的瞬时 ( $t = 0$ )， $\gamma = 0$ 。随时间  $t$  的增加， $\gamma$  也增加，当  $t = \infty$  时， $\gamma = \frac{\tau}{G} = \gamma_e$ ，即模型最终以弹性应变为其极限值。这说明弹性变形并不是立刻完成，而是随时间按指数关系推迟完成，这种现象称为徐变，也称为滞弹性。

在除去外力以后，变形恢复也是逐渐的。设除去外力时变形为  $\gamma_0$ ，则变形的恢复与时间

的关系为

$$\gamma = \gamma_0 e^{-\frac{G}{\eta} t}$$

可见当  $t \rightarrow \infty$  时,  $\gamma = 0$ , 即变形才能完全消失, 这种现象称为弹性后效。

## 1.2 混凝土混合料流变特性

### 1.2.1 宾汉姆体

早在 1919 年, 美国宾汉姆教授首先发现, 油漆是属于同时具有塑性和黏性的物质。在此基础上, 他把理想圣维南塑性体和理想牛顿黏性体的流变方程合并成为

$$\tau = \tau_0 + \eta \frac{d\gamma}{dt}$$

后来人们称之为宾汉姆体。式中  $\tau_0$  为屈服应力;  $\eta$  为塑性黏度系数, 其流变曲线见图 1-4。

从图中可以看出, 宾汉姆体在  $\tau \leq \tau_0$  时, 不发生流动。因此, 圣维南体是宾汉姆体黏性为零时的特殊形式。同时,  $\tau > \tau_0$  后, 宾汉姆体就按牛顿理想液体的规律产生流动。

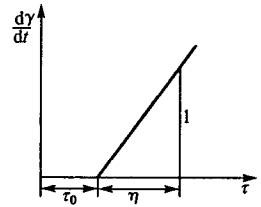


图 1-4 宾汉姆体流变曲线

图 1-5、图 1-6 为宾汉姆体在细管中的流动示意。图中可以看出,  $OA$  段表示  $\tau < \tau_0$ , 细管中没有流动。 $AB$  段, 流体沿管壁首先克服阻力, 开始产生流动, 也就是结构开始破坏。这种沿管壁的流动, 属于塞流现象。 $BC$  段应力加大, 塞流现象逐渐消失, 接近于全部流动。而  $CD$  段, 则速度梯度  $d\gamma/dt$  接近抛物线, 全部流动, 其流速与  $\tau - \tau_0$  成正比。因此, 在图 1-5 中, 将  $CD$  线延长到  $E$  点,  $E$  点即为屈服应力  $\tau_0$ 。

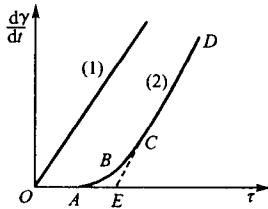


图 1-5 牛顿液体(1)与宾汉姆体(2)的流变曲线

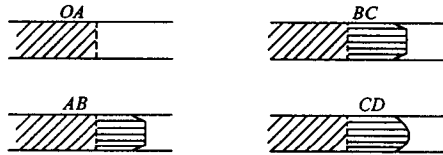


图 1-6 细管流动示意图

图 1-7 为宾汉姆体流变模型。当作用力  $P$  小于重物与桌面间的摩擦力时, 弹簧做弹性伸长, 重物未发生移动。当  $P$  等于摩擦力时, 弹簧中的应力保持不变而重物做连续运动。这时,  $P$  即为屈服应力  $\tau_0$ 。如果没有油壶存在, 这就是圣维南固体。但由于桌子后面连接一个油壶, 塑性变形必随应力的增加而增加, 塑性黏度则是一常数。

### 1.2.2 混凝土混合料流变方程

固体材料在外力作用下, 发生弹性变形和流动。应力小时作弹性变形, 应力大于某一限度(屈服值)时发生流动。混凝土混合料也具有上述类似的变形特性, 但由于屈服值很小, 所以由流动方面的特征所支配。

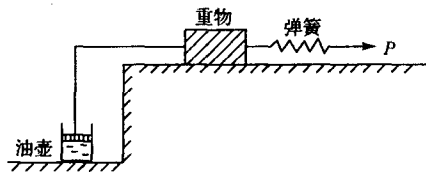


图 1-7 宾汉姆体流变模型

通常，混凝土混合料的流变性质可用宾汉姆模型来研究。宾汉姆模型也可画成图 1-8 式样，其结构式为  $B = (N|StV) - H$ 。

显然， $\tau < \tau_0$  时，并联部分不发生运动，因此

$$\tau = G \cdot \gamma_c$$

即

$$\gamma_c = \frac{G}{\tau}$$

式中  $G$ —— 弹簧的弹性模量；

$\gamma_c$ —— 虎克基元的位移。

当  $\tau > \tau_0$  时，并联部分发生与应力  $\tau - \tau_0$  成正比的黏性流动，故有

$$\tau - \tau_0 = \eta \frac{d\gamma_v}{dt}$$

式中  $\gamma_v$ —— 牛顿基元的位移。

因为总的变形  $\gamma = \gamma_c + \gamma_v$ ，并注意， $\gamma_c$  对时间而言为常数， $d\gamma/dt = d\gamma_v/dt$ ，则上式可写成

$$\tau = \tau_0 + \eta \frac{d\gamma}{dt}$$

此式即为宾汉姆方程。一般地将符合宾汉姆方程的液体均称为宾汉姆体。式中  $\tau_0 = 0$ ，则成牛顿液体公式。

牛顿液体和宾汉姆体的流变方程中黏度系数  $\eta$  为常数，变形速度梯度  $d\gamma/dt$  和剪切应力  $\tau$  的关系曲线成直线形状(如图 1-9 中  $a, c$ )。但若液体中有分散粒子存在，其中凝聚结构比较强，则黏度系数  $\eta$  将是  $\tau$  或  $\frac{d\gamma}{dt}$  的函数，则流动曲线形状如图 1-9 中  $b$  与  $d$  那样，分别称为非牛顿液体和一般宾汉姆体。

一般地，超流动性的混凝土混合料接近非牛顿液体，一般的混凝土混合料接近于一般宾汉姆体。

### 1.2.3 混凝土混合料流变参数 $\tau_0$ 和 $\eta$ 的含义

由混凝土混合料流变方程  $\tau = \tau_0 + \eta \frac{d\gamma}{dt}$  可知，屈服剪切应力  $\tau_0$  与黏度系数  $\eta$ ，是决定混合料流变特性的基本参数。搞清二者的含义，对了解混合料的受力的流动特性，有十分实际的意义。

屈服剪切应力  $\tau_0$  是阻止塑性变形的最大应力，故又称塑性强度。当在外力作用下产生的剪切应力小于屈服剪切应力时，混合料不发生流动，只有当剪切应力比屈服剪切应力大时，才会发生流动，并可将物体塑成某一形状制品。并且只有当制品本身的重量不产生超

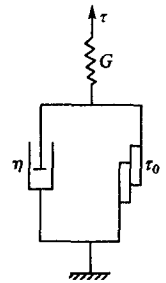


图 1-8 宾汉姆体另一模型

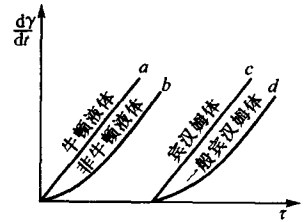


图 1-9 流动曲线的基本类型

过屈服剪切应力的应力时,其形状才能保持长久不变。

混合料的屈服剪切应力是由其组成材料各粒子之间的附着力和摩擦力引起的。如图1-10所示,物体A在B的表面开始滑动时,如果两物体之间不存在附着力,这个面上所产生的剪切应力 $\tau$ 与垂直应力 $P$ 之间的关系符合库仑定律

$$\tau = \mu P = P \tan \varphi$$

式中, $\mu$ 为摩擦系数, $\varphi$ 为摩擦角。

假设两物体之间有附着力,接触面上产生的剪切应力用 $\tau_0$ 表示,则 $\tau_0$ 与 $P$ 之间的关系为

$$\tau_0 = \tau' + P \tan \varphi$$

式中, $\tau'$ 可以认为是垂直应力 $P$ 为零时(即不考虑外力及重力作用)存在的剪切阻力,称为附着力,它是由A与B之间内聚力引起的。

测定屈服剪切应力可用如下两种方法。

其一是直接剪切试验,如图1-11装置,把试料装入上下分成两段的容器内,当改变垂直压力 $P$ 时,可测得不同的使混凝土混合料发生运动的最大剪切应力 $\tau_{max}$ 。作 $P$ - $\tau$ 曲线,得 $P$ - $\tau$ 直线,延长此直线交于 $\tau$ 轴上的数值即为 $\tau_0$ ,与 $P$ 轴的交角是摩擦角 $\varphi$ ,如图1-12所示。

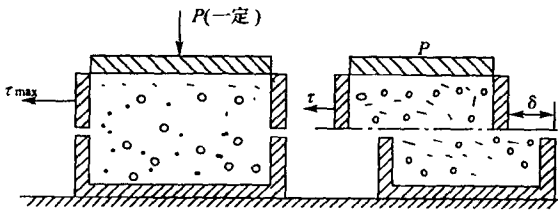


图1-11 直接剪切试验

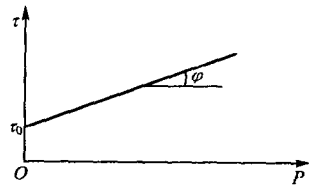


图1-12  $P$ - $\tau$ 曲线

图1-13为剪切应力 $\tau$ 与剪切变形 $\delta$ 的关系曲线。图中, $OAB$ 的面积代表试件达到破损所消耗的 $\tau \times W$ 。破坏应力最大值 $\tau_{max}$ 和其后限 $\tau'_{max}$ 的比值是一个变数,反映混凝土混合料的黏性。从而可以找出混合料各流变参数间的定量关系。

另一种方法是三轴压缩试验。试验使用圆柱形试料,用橡皮膜包裹放在试验腔中。轴向施加压力 $P_1$ ,用液压施加侧压应力 $P_3$ ,测定最大垂直应力 $P_1$ (图1-14)。

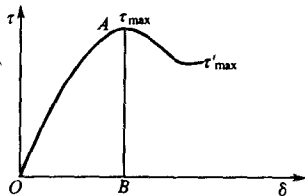


图1-13  $\tau$ - $\delta$ 曲线

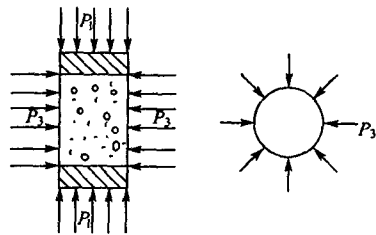


图1-14 三轴压缩试验

变动侧压应力 $P_3$ 可得到一系列对应的“ $P_1 - P_3$ ”数值差应力,这样在“ $\tau$ - $P$ ”图上可得到一组莫尔(Mohr)圆(图1-15)。莫尔应力圆是在横轴上取 $P_3$ 、 $P_1$ 为一组,画出以 $\overline{P_3 P_1}$ 为直径的圆。莫尔圆的共同切线(或包络线)就是表示法向应力 $P$ 和剪切应力 $\tau$ 的关系直线。三轴压缩试验得到的数值和直接剪切试验的结果不甚一致,数值变异也较大,但 $\tau_0 = \tau' + P \tan \varphi$ 的

关系还是成立的。作为简易测定内部摩擦角的方法,今后仍有研究的必要。在三轴压缩试验中,因为垂直应力的一部分是由混凝土中的间隙水压承受的,试验中应做适当修正。

像混凝土混合料这样带有分散粒子、形成凝聚结构的液体,其黏性系数会随剪切应力或速度梯度变化而变化,实质上是随其凝聚结构的破坏程度而变化。如图 1-16、图 1-17 所示,α 表示结构破坏程度,η 表示黏性系数。这种随结构破坏程度而变化的黏性系数称为结构黏性系数。由图 1-16、图 1-17 可知,当剪切应力小于 τ<sub>1</sub> 时,凝聚结构实际上未被破坏,此时黏性系数具有恒定的最大值(η<sub>0</sub>),虽然也会发生缓慢的流动,但实际上觉察不出来。当接近于 τ<sub>0</sub> 时,黏性系数大大降低,结构发生“雪崩”式的破坏。当结构完全破坏时,黏性系数就会达到最低值 η<sub>min</sub>,也就是说黏度不再随应力的变化而变化。

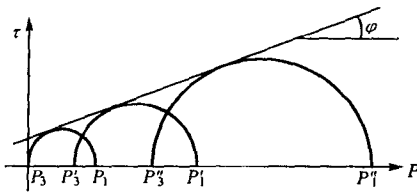


图 1-15 三轴压缩试验结果

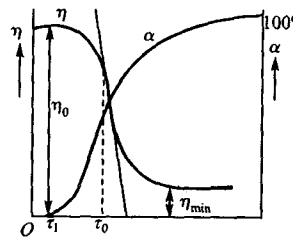


图 1-16 在稳定流动下,结构黏性系数(η),结构破坏程度(α)与剪切应力 τ 的关系曲线

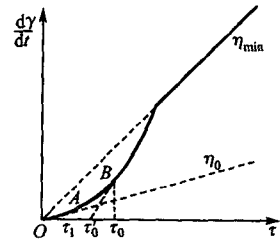


图 1-17 在具有凝聚结构的系统中,流动速度与剪切应力的关系曲线

### 1.2.4 流动特性的测定方法

#### 1. 同轴回转圆筒黏度计

为了知道流体的流动特性,依据变化的剪切应力 τ,来测定速度梯度  $D(= d\gamma/dt)$ ,就可确定流动特性方程函数式:

$$D = f(\tau)$$

用于这一目的的试验装置叫黏度计(Viscometer)、塑性仪(Plastometer)或流变计(Rheometer)。另外还有毛细管黏度计、落球式黏度计、旋转式黏度计等。

由于砂浆或混凝土混合料中的颗粒较大,因此采用旋转式黏度计较为合适。

同轴回转圆筒黏度计由两个同心圆筒组成,中间有微小间隙放试料,一筒回转,一筒固定,转筒可以是外筒,也可以是内筒,内筒与外筒共轴,且配有扭力计,如图 1-18 所示。当外筒旋转时,由于试料的黏性,在内筒壁上就会产生旋转力矩。通过试验可测得外筒的角速度 Ω 及加到外筒上的旋转力矩 T,并以 Ω-T 曲线表示它们之间的关系。黏度计设计尺寸、内外筒半径及装料高度 L,要根据试料性质而定。

#### 2. D-τ 曲线与 Ω-T 曲线

在外筒旋转式黏度计内,成稳定流动状态的试料中,我们将距中心轴的距离为 r,厚度为 dr,装料高度为 L 的试料薄圆壳作为研究对象。如假设作用在圆筒壳外侧表面的切线方向的力为 F,则  $T = F \cdot r$ ,因此相当于作用在这个表面上的单位面积的力,即剪切应力为

$$\tau = \frac{F}{2\pi rL} = \frac{T}{2\pi r^2L} \tag{1-1}$$



设该面上的角速度为  $\omega$ ，则沿试料圆筒壳的厚度  $dr$  的速度梯度为

$$D = \frac{dv}{dr} = r \frac{d\omega}{dr}$$

因为已给出流体的流动特性为  $D = f(\tau)$ ，故

$$r \frac{d\omega}{dr} = f(\tau)$$

或

$$d\omega = f(\tau) \frac{dr}{r} \quad (1-2)$$

结合式(1-1)得

$$\frac{dr}{dr} = -\frac{T}{\pi r^3 L} = -\frac{2}{r} \left( \frac{T}{2\pi r^2 L} \right) = -\frac{2\tau}{r}$$

所以

$$\frac{dr}{r} = -\frac{d\tau}{2\tau}$$

因而式(1-2)可化为

$$d\omega = -\frac{f(\tau)}{2\tau} d\tau \quad (1-3)$$

考虑边界条件，在黏度计内筒表面( $r = R_1$ )处

$$\omega = 0, \quad \tau = \tau_1 = \frac{T}{2\pi R_1^2 L}$$

在外筒的表面( $r = R_2$ )处

$$\omega = \Omega, \quad \tau = \tau_2 = \frac{T}{2\pi R_2^2 L}$$

将式(1-3)从  $R_1$  到  $R_2$  进行积分，则为

$$\Omega = -\frac{1}{2} \int_{\tau_1}^{\tau_2} \frac{f(\tau)}{\tau} d\tau \quad (1-4)$$

所以，如果  $f(\tau)$  的函数式确定，则  $\Omega-T$  的关系也相应确定。

在牛顿液体的情况下，由于  $f(\tau) = \tau/\eta$ ，故

$$\begin{aligned} \Omega &= -\frac{1}{2} \int_{\tau_1}^{\tau_2} \frac{f(\tau)}{\tau} d\tau = -\frac{1}{2} \int_{\tau_1}^{\tau_2} \frac{d\tau}{\eta} = -\frac{\tau}{2\eta} \Big|_{\tau_1}^{\tau_2} \\ &= \frac{1}{2\eta} (\tau_1 - \tau_2) = \frac{T}{4\pi\eta L} \left( \frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2} \right) \end{aligned}$$

可见  $\Omega-T$  曲线也和  $D-\tau$  曲线一样是通过原点的直线。黏性系数  $\eta$  由  $\Omega-T$  直线的斜率  $\alpha$  从下式求出

$$\eta = \frac{1}{4\pi\alpha L} \left( \frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2} \right)$$

试料如果是宾汉姆体时，有

$$f(\tau) = \begin{cases} 0 & (\tau \leq \tau_0) \\ (\tau - \tau_0)/\eta & (\tau > \tau_0) \end{cases}$$

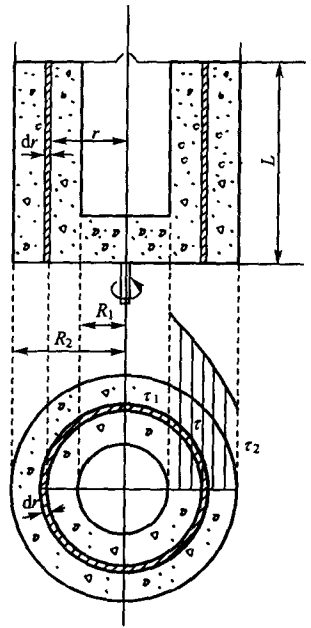


图 1-18 同轴回转圆筒黏度计