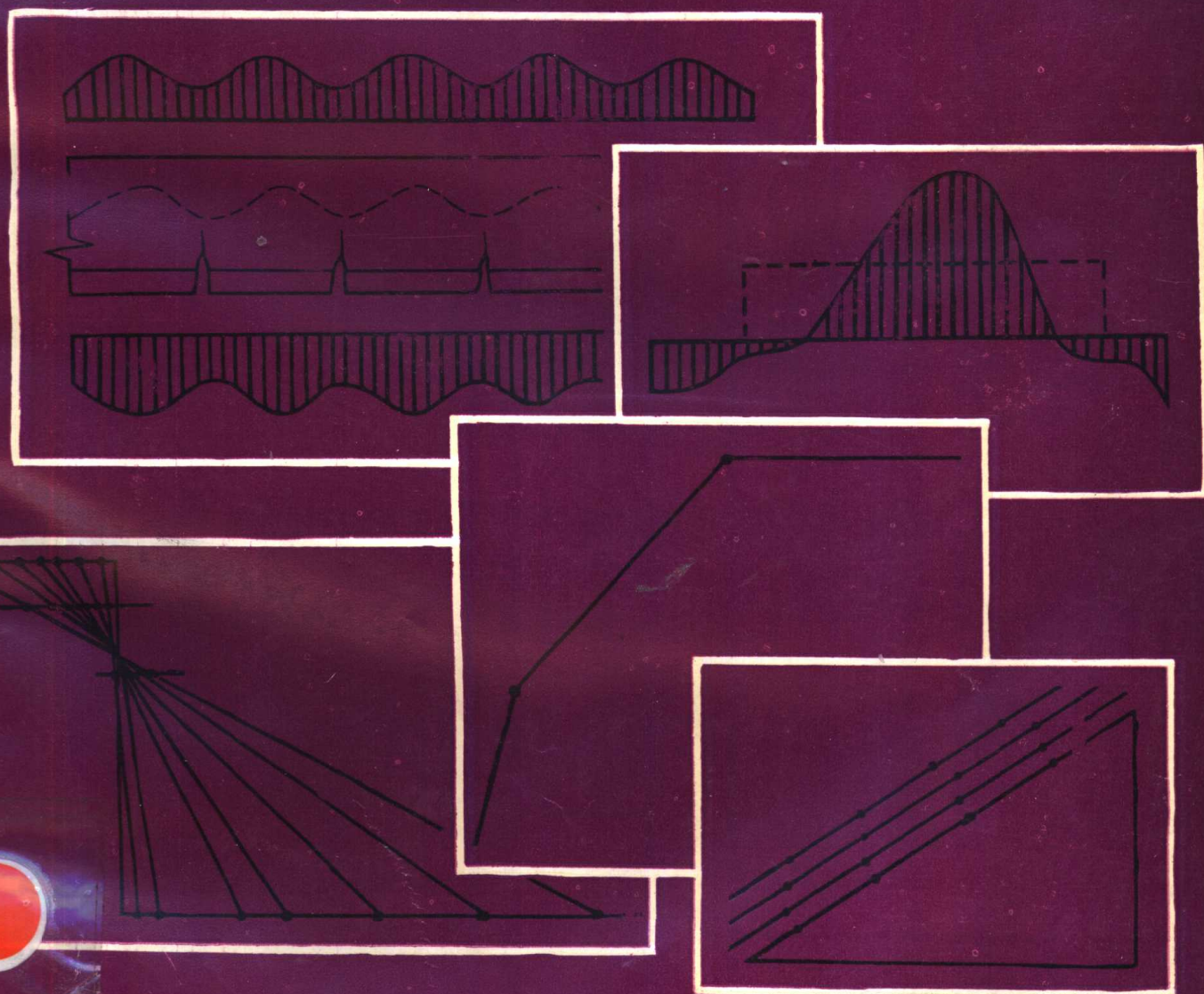


丁 大 钧 主 编

# 钢筋混凝土构件 抗裂度 裂缝和刚度



南京工学院出版社

82932

TU378

1048

712.71.4

# 钢筋混凝土构件抗裂度 裂缝和刚度

丁大钧 主编

丁大钧 蒋永生 蓝宗建 编著

南京工学院出版社

## 内 容 简 介

本书是在丁大钧教授及其领导下的科研组二十多年来科研成果的基础上编著的，书中系统地阐述了混凝土构件抗裂度、裂缝和刚度计算的基本原理、计算模式和实用计算方法，形成具有自己特色的完整而又简单的计算体系。此外还简要介绍了即将颁布的新规范中的有关计算方法，这将有助于正确地理解和应用新规范；也对国外一些计算方法作了必要的简介。在附录中给出了南京工学院所进行的约500个试件裂缝和挠度的试验结果。全书均使用即将颁布的新规范中的符号。内容丰富，具有较高的学术水平。

读者对象：大专院校土建、水利等结构工程及有关专业的师生，结构设计人员及研究人员。

### 钢筋混凝土构件抗裂度裂缝和刚度

丁大钧主编 丁大钧 蒋永生 戴宗建 编著

南京工学院出版社出版

江苏南京市四牌楼2号

宿迁县印刷厂印刷 江苏省新华书店发行

开本787×1092毫米1/16

印张 20.375 字数 521.6千字

1986年7月第1版 1986年7月第1次印刷

印数1—3,000册

书号：15409·008 定价：4.45元

责任编辑 晏隆余

## 前 言

对钢筋混凝土构件在使用阶段的抗裂度、裂缝宽度和刚度这一重要课题,在国际上早已开展试验研究和理论探讨。但是取得有成效的进展则是四十年代后期的事。南京工学院在这方面的实验研究是从六十年代初开始的,但五十年代中已开始进行理论学习和资料准备。在专题科研组同志们的共同努力下以及历届研究生(包括博士研究生)学位论文工作的积累,我们总共试验过的试件约550根,基本完成了各种常用截面(包括集中配筋的矩形、T形、倒T形、工字形和薄腹工字形截面,以及分布配筋的环形截面)钢筋混凝土受弯和偏心受力(受拉和受压)构件裂缝和刚度的试验研究,并提出一个完整的计算体系。在该体系中,公式具有统一的形式,计算较为简单,其结果足够准确。除普通钢筋混凝土构件外,也包括钢筋陶粒混凝土和预应力混凝土以及预应力陶粒混凝土受弯构件的计算,同时还包括国外资料中尚未见到的双向受弯构件的计算以及提出目前国际上研究不多的沿保护层厚度裂缝宽度计算初步方案。对裂缝机理曾进行过探讨,对斜裂缝宽度也进行过一些试验量测和提出估算公式。我们除对使用荷载下刚度进行研究外,也对极限状态下构件的变形进行了研究,并提出相应的计算方法。此外还提出弯矩一曲率全曲线的计算,并将之应用于连续梁内力重分布全过程的计算,对连续梁,我们也进行了试验研究工作,还提出使用荷载下内力计算的简化方法。对受弯构件的长期荷载试验研究,自1965年12月开始,迄今已连续进行超过20年,共对钢筋混凝土构件、出现裂缝和不出现裂缝的预应力混凝土构件、钢筋陶粒混凝土构件、环形截面构件以及不出现裂缝的预应力陶粒混凝土构件进行过九批试验,其中持续时间最长的钢筋混凝土构件达六年两个月,第十批已出现裂缝的预应力陶粒混凝土构件正在加荷试验中。根据试验结果,提出考虑徐变和收缩影响的长期刚度实用计算公式,它和短期刚度公式能很好衔接并足够准确。所建议的有关计算方法有的已为国家规范如钢筋混凝土结构设计规范T J 10—74和给水排水工程结构设计规范G B J 69—84所采用,有的为《设计建议》及有关规程所采用或经某些调整后采用。这些研究成果曾先后获得全国科学大会奖,国家自然科学奖,省人民政府和省教育局科技成果奖,以及国家教委科学进步奖。

今主编者将我们取得的主要成果按原研究计划分项编写成册,这样便于研究者参考,同时还将主要原始资料和有关量测详细数据在附表1—1~3—23中公开发表,以便读者核对和研究新的计算方案,这也是我们所期望的。至于综合这些研究成果的文章,已在国内外有关学报上发表。

我们所取得的主要研究成果,有的已在有关国际学术会议和国外高校以及研究机构宣讲过,有的已在国外刊物上发表,有的译成英文赠送外国朋友,这都有利于和国际同行间交流,但我们做得还很不够,今后将争取进一步加强国际联系,以便互相学习,共同提高。

为了使读者了解国际上关于裂缝和刚度计算方法的主要情况,由研究组成员蒋永生副教授、蓝宗建副教授合编了第四章。此外由蒋永生副教授协助整理书中的附表。

我们虽然在这一课题领域里进行了一系列工作，但还有许多问题仍有待于我们继续深入和开展新的研究。我们将继续努力并争取把工作做得更细致些。

最后编者等将对未参加本书编写工作的本科研组同志以及协助我们完成试验任务的结构试验室同志表示感谢。感谢他们为完成现阶段的成果所作的努力。此外对吕志涛副教授为编校本书所作的工作表示感谢。底图的描绘和加工，还曾得到李猗秣、余传禹、刘桑园和邵扣霞等同志的帮助，在此一并致谢。

虽然我们在这一课题研究中作了种种努力，但由于我们设备条件还不甚完善，量测手段也不够先进，加之我们理论水平有限，因此试验和分析中必将存在不少缺点，甚至错误，欢迎批评指正，幸甚！

丁大钧

一九八六年五月于南京工学院

# 目 录

|                              |        |
|------------------------------|--------|
| 绪论                           | ( 1 )  |
| 一、研究的必要性和规范的有关规定             | ( 1 )  |
| 二、试验研究得出的重要结论                | ( 5 )  |
| 三、统一形式的计算公式                  | ( 6 )  |
| 参考资料                         | ( 6 )  |
| 第一章 抗裂度                      | ( 8 )  |
| 1—1 概述                       | ( 8 )  |
| 1—2 轴心受拉构件抗裂度的试验结果和计算        | ( 8 )  |
| 1—3 受弯构件抗裂度的试验结果和计算          | ( 9 )  |
| 1—4 偏心受力构件抗裂度的试验研究           | ( 12 ) |
| 1—5 考虑截面高度的影响                | ( 15 ) |
| 1—6 预应力构件抗裂度的试验结果和计算         | ( 16 ) |
| 参考资料                         | ( 20 ) |
| 第二章 裂缝                       | ( 22 ) |
| 2—1 裂缝的发生、分布与展开              | ( 22 ) |
| 2—2 裂缝计算方法                   | ( 28 ) |
| 2—3 轴心受拉构件裂缝的试验结果和计算         | ( 28 ) |
| 2—4 受弯构件裂缝的试验结果和计算           | ( 34 ) |
| 2—5 关于 $\psi$ 计算的进一步讨论       | ( 48 ) |
| 2—6 轻混凝土受弯构件裂缝的试验结果和计算       | ( 53 ) |
| 2—7 环形截面受弯构件裂缝的试验结果和计算       | ( 56 ) |
| 2—8 第三类预应力受弯构件裂缝的试验结果和计算     | ( 59 ) |
| 2—9 偏心受力构件裂缝的试验结果和计算         | ( 63 ) |
| 2—10 沿保护层裂缝宽度的计算             | ( 68 ) |
| 2—11 根据统计方法确定最大裂缝宽度          | ( 70 ) |
| 2—12 关于剪跨斜裂缝的试验结果和计算         | ( 73 ) |
| 2—13 新规范中裂缝计算                | ( 76 ) |
| 参考资料                         | ( 78 ) |
| 第三章 刚度                       | ( 82 ) |
| 3—1 沿纯弯区段应变分布的不均匀性           | ( 82 ) |
| 3—2 受拉区钢筋应变的计算               | ( 84 ) |
| 3—3 受压区混凝土平均应变的计算及截面弹塑性抵抗矩系数 | ( 84 ) |
| 3—4 沿截面高度应变的分布——平截面假定        | ( 90 ) |

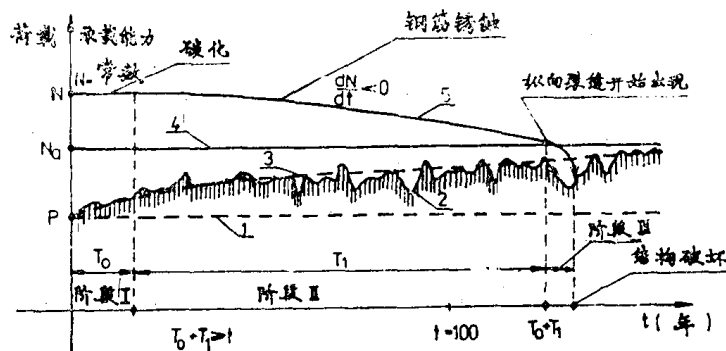
|            |                             |        |
|------------|-----------------------------|--------|
| 3—5        | 受弯构件刚度计算公式                  | ( 90 ) |
| 3—6        | 挠度计算中最小刚度原则                 | ( 92 ) |
| 3—7        | 受弯构件挠度的试验和验算结果              | ( 93 ) |
| 3—8        | 长期荷载作用下受弯构件挠度的试验结果和计算       | ( 95 ) |
| 3—9        | 配筋陶粒混凝土受弯构件变形试验结果和刚度计算      | (104)  |
| 3—10       | 环形及圆形截面受弯构件的变形试验结果和刚度计算     | (107)  |
| 3—11       | 双向受弯构件的变形试验和刚度计算            | (110)  |
| 3—12       | 预应力受弯构件的变形试验结果和刚度计算         | (111)  |
| 3—13       | 连续梁的变形试验结果和挠度计算             | (128)  |
| 3—14       | 薄腹梁的变形试验结果和挠度计算             | (136)  |
| 3—15       | 直接承受重复荷载受弯构件的变形试验结果和挠度计算    | (137)  |
| 3—16       | 偏心受力构件的变形试验结果和刚度计算          | (138)  |
| 3—17       | 受弯及大偏心受压构件挠度 ( 或曲率 ) 全曲线的计算 | (143)  |
| 3—18       | 压弯构件的塑性铰                    | (149)  |
| 3—19       | 偏心受压柱的纵向弯曲                  | (154)  |
| 3—20       | 新规范中有关计算                    | (162)  |
|            | 参考资料                        | (163)  |
| <b>第四章</b> | <b>国外计算方法介绍</b>             | (169)  |
| 4—1        | 概述                          | (169)  |
| 4—2        | CEB—FIP标准规范中的裂缝计算方法         | (169)  |
| 4—3        | 国外其他规范中的裂缝计算方法              | (177)  |
| 4—4        | 其他研究者的裂缝计算方法简介              | (185)  |
| 4—5        | CEB—FIP标准规范中的刚度计算方法         | (189)  |
| 4—6        | 国外其他规范中的刚度计算方法              | (196)  |
| 4—7        | 其他研究者的刚度计算方法简介              | (203)  |
|            | 参考资料                        | (209)  |
| <b>附表</b>  |                             | (212)  |

## 绪 论

### 一、研究的必要性和规范的有关规定

混凝土的极限拉应变或抗拉强度是很低的。因此,钢筋混凝土构件在受拉情况下,当荷载不大时,混凝土拉应变或相应拉应力即已达到极限值,这时构件将出现裂缝。但在某些情况下根据使用要求,不允许构件出现裂缝。如圆水池的池壁,往往要求验算抗裂强度<sup>①</sup>。对非预应力混凝土构件,一般并不要求限制裂缝的出现,而是要求限制裂缝的宽度。对预应力混凝土构件,则根据使用条件,常提出不同的抗裂要求。

构件出现裂缝后,刚度大为降低。当裂缝宽度超过一定限度时,不仅影响建筑物的外观,而且影响结构的耐久性。因为当混凝土保护层碳化至钢筋处,将使钢筋表面在混凝土中形成的氧化膜(钝化膜)破坏。在较大的裂缝处,如果有水份侵入,钢筋首先发生个别点的“坑蚀”,继而逐渐形成“环蚀”,使截面削弱,同时向裂缝两边扩展,形成锈蚀面。锈蚀后的钢筋,其抗拉能力亦将降低,最后导致破坏〔0·2〕。钢筋的锈蚀最终将影响结构的安全,尤其在侵蚀性的环境中,钢筋的锈蚀程度将大大加剧〔0·3〕。



1—恒载; 2—活载随机过程; 3—活载趋向的假定函数; 4—分析的承载力; 5—已锈蚀的结构的承载力。

图0—1

埋置在混凝土内的钢筋,由于混凝土的高碱性的保护层而得到保护(在钢筋表面上形成氧化膜)。防锈蚀的主要因素为混凝土的渗透性、保护层厚度、裂缝宽度、形状和长度以及裂缝展开时间的周期。当化学介质  $\text{CO}_2$  渗入包裹钢筋的混凝土内,碱性被中和,则防锈蚀

<sup>①</sup> 根据湖北给排水设计院的研究〔0·1〕,考虑池壁内外湿度和温度差异而产生的弯矩,提出应按偏心受拉计算。若截面未裂穿,在轴心拉力作用下,剩余截面仍能保证抗裂度要求,则水池可不漏水,否则将会渗漏。

性能将降低。保护层的碳化是钢筋锈蚀的主要条件，但在干燥环境中不易引起锈蚀。防冻盐类的氯化物、海水等都是非常活泼的锈蚀介质。混凝土保护层薄，渗透性大，可能引起沿钢筋纵向的普遍锈蚀。裂缝数量增多和宽度加大，裂缝两侧混凝土碳化将加速，这将导致裂缝处和相邻两侧碳化区中钢筋都发生锈蚀。

通常，人们都以混凝土表面上的裂缝宽度来评价其锈蚀影响的程度。事实上，裂缝的形状，亦即混凝土表面和钢筋表面裂缝宽度的变化以及裂缝长度对锈蚀影响，也同样重要，而裂缝表面宽度通常被过分强调〔0.4〕。其实应该考虑环境侵蚀的条件，全面地考虑上述诸因素的影响以估计锈蚀速率。另外钢筋直径对锈蚀很重要，因在一定的锈蚀深度时，小直径的钢筋其截面损失更大。从而要求混凝土保护层尽可能密实，而在结构整个使用期间，碳化深度不致达到钢筋表面。在这一前提下，采用标准保护层厚度时，借助限制混凝土外表最大裂缝宽度来控制锈蚀是目前可行的方法。据现有资料，有认为在正常条件下，外表裂缝宽度达0.4mm，对受有不是很大拉应力的钢筋将不引起锈蚀或很少锈蚀，然而，有的报告没有这样乐观。

但是，在正常环境中，根据国内对普通无有害性气体的民用建筑及车间的调查研究发现，尽管构件表面裂缝宽度较大，混凝土虽已碳化，但钢筋还不至锈蚀。我们曾参加“耐久性小组”的调查，见到过裂缝宽度为1.6和1.7mm的两栋建筑，分别经历约55年和20年之久，敲出钢筋检查，表明尚未锈蚀〔0.3〕。因此，在一般条件下，限制裂缝宽度似不完全是为了耐久性，而更多地是考虑建筑外观或人的感受。

钢筋的锈蚀，不仅可能在裂缝处发生，也可能沿钢筋纵长普遍发生，即所谓“普遍锈蚀”。这种情况往往因保护层不够密实所致。这时，当有害性介质（包括水份）和氧气通过孔隙渗入，即可能使钢筋发生普遍锈蚀。锈蚀后体积膨胀，使混凝土沿钢筋纵向产生裂缝（纵向裂缝）。这种裂缝展开往往很大，有时可能达到2~3cm，最后使保护层崩脱，习称“暴筋”。曾有过一车间大型屋面板（刚性屋面），当一个区格有水迹（雨水渗入痕迹）时，该区格发生“暴筋”现象。凡无水迹的，表明该区格混凝土较密实，即不发生上述现象。这种因锈蚀引起的纵向裂缝，较横向裂缝更为危险。在具有高侵蚀性车间，如化工厂房，有时保护层虽厚度和密实程度达到要求，但生产工艺不完善，或设备失于检修，以至碱或酸水溢漏，侵蚀混凝土的结构而导致侵蚀性介质渗入，促使钢筋锈蚀。如果构件中掺入氯化钙较多，施工质量较差，混凝土不密实；或者构件制作后放置在露天时间较长，雨水渗入；如构件用火山灰水泥制作，其碳化速度因而大大加快〔0.5〕，纵向裂缝往往在较短的时间内即可能发生，构件常需加固。加固中如未能将包裹钢筋的原掺有氯化钙的混凝土清除干净，而外包混凝土又很难做到完全封闭，经过一段时间后，氧和水的侵入又将会出现新的纵向裂缝。

影响耐久性的横向裂缝宽度应通过计算加以控制。我国现行的《钢筋混凝土结构设计规范》（T J 10—74）〔0.6〕（以下简称规范T J 10—74或T J 10—74）对屋架、托架的受拉杆件，烟囱、用以贮存松散体的筒仓以及处于液体压力下而无专门保护措施的结构，规定其最大裂缝宽度不应超过0.2mm；对处于正常条件下的构件，则不应超过0.3mm。

在预应力混凝土构件中，采用完全预应力时，虽保证了抗裂度，但常带来一些其它缺点，因而除必要的场合外，不必采用完全预应力。如果采用部分预应力构件，当混凝土拉应力超过混凝土抗拉强度时，受拉区仍然出现裂缝（习称第三类预应力构件），但此裂缝较容

易控制在规定的限度内。部分预应力比完全预应力混凝土有很多的优点，其中采用部分非预应力钢筋的构件在国外已逐渐更多地被采用。

即将批准颁布的新规范中规定，根据使用要求选用不同的裂缝控制等级。裂缝控制等级的划分应符合下列规定的要求：

一级——严格要求不出现裂缝的构件：在荷载短期效应组合作用下，构件受拉边缘混凝土不应产生拉应力；

二级——一般要求不出现裂缝的构件：在荷载长期效应组合作用下，构件受拉边缘混凝土不应产生拉应力，而在荷载短期效应组合作用下，构件受拉边缘混凝土允许产生拉应力，但拉应力不应超过  $\alpha \gamma_m f_{tk}$  (此处， $\alpha$  为混凝土拉应力限制系数； $\gamma_m$  为截面抵抗矩的塑性系数，见表1—1； $f_{tk}$  为混凝土抗拉标准强度)。

三级——允许出现裂缝的构件：按荷载短期效应组合计算并考虑荷载长期作用影响的最大裂缝宽度计算值，不应超过允许值。

钢筋混凝土和预应力混凝土结构构件的裂缝控制等级、混凝土拉应力限制系数  $\alpha$  及最大裂缝宽度允许值，应根据结构构件的工作条件和钢筋种类按表0—1采用。

表0—1 裂缝控制等级、混凝土拉应力限制系数及最大裂缝宽度允许值

| 钢筋种类       |                | 钢筋混凝土结构               | 预应力混凝土结构                   |                                        |
|------------|----------------|-----------------------|----------------------------|----------------------------------------|
|            |                |                       | 冷拉Ⅱ级钢筋<br>冷拉Ⅲ级钢筋<br>冷拉Ⅳ级钢筋 | 碳素钢丝<br>刻痕钢丝<br>钢绞线<br>热处理钢筋<br>冷拔低碳钢丝 |
| 结构工作条件     |                | Ⅰ级钢筋<br>Ⅱ级钢筋<br>Ⅲ级钢筋  |                            |                                        |
| 露天或室内高湿度环境 |                | 三级<br>0.2 mm          | 二级<br>$\alpha = 0.5$       | 一级                                     |
| 室内正常环境条件   | 一般构件           | 三级<br>0.3 mm (0.4 mm) | 二级<br>0.2 mm               | 二级<br>$\alpha = 0.5$                   |
|            | 屋面梁、托梁         | 三级<br>0.3 mm          | 二级<br>$\alpha = 1.0$       | 二级<br>$\alpha = 0.5$                   |
|            | 屋架、托架、         | 三级<br>0.2 mm          | 二级<br>$\alpha = 0.5$       | 二级<br>$\alpha = 0.25$                  |
|            | 吊车梁            | 三级<br>0.2 mm          | 二级<br>$\alpha = 0.25$      | 一级                                     |
|            | 重级工作制<br>中级工作制 | 三级<br>0.3 mm          | 二级<br>$\alpha = 0.5$       | 二级<br>$\alpha = 0.25$                  |

- 注：①属于露天或室内高湿度环境一栏的构件，系指直接受雨淋的构件、无维护结构的房屋中经常受雨淋的构件或经蒸汽或凝结水作用的室内构件(如浴室等)以及与土壤直接接触的构件；
- ②对处于年平均相对湿度小于60%的地区且可变荷载标准值与恒荷载标准值之比大于0.5的构件，其最大裂缝宽度允许值可采用括弧内数字；
- ③对承受二台及二台以上相同吨位，且起重量不大于50吨的中级工作制吊车的预应力混凝土等高度吊车梁，当采用冷拉Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ级钢筋配筋时，可根据使用要求，选用允许出现裂缝的预应力混凝土构件，其正截面最大裂缝宽度允许值采用0.1 mm；
- ④采用冷拉Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ级钢筋的承受重级工作制吊车的预应力混凝土吊车梁，当处于露天或室内高湿度环境，其裂缝控制等级不变，仍采用  $\alpha = 0.25$ ；
- ⑤烟囱、用以贮存松散体的筒仓及处于液体压力下的构件应符合现行专门规范的有关规定；
- ⑥表中预应力结构构件的混凝土拉应力限制系数及最大裂缝宽度允许值仅适用于正截面。斜截面的验算条件应符合规范第五章的规定。

在一般建筑中,对构件的挠度有一定要求。拟订受弯构件允许挠度值应考虑四个方面的问题,即结构的可使用性,对结构的影响和对非结构构件的影响,以及人们感觉的可接受程度〔0.4〕。

结构的可使用性方面与结构的用途有关,如对屋面构件,应保证能很好排水;对吊车梁挠度应限制较严以保证吊车的正常行驶;对健身房和支承灵敏设备的楼面,应保持“平面”等。

对结构构件的影响是指防止结构性能和设计中假定的不符。例如梁端旋转将使支承面积改变;又如构件刚度的选择应注意避免引起共振等。

对非结构构件的影响包括防止非结构构件如隔墙及天花板的开裂、压碎、臃出或其它形式的损坏,故必须限制挠度值。又如挠度应不妨碍活动部件如门、窗的正常开关等。

在人们感觉的可接受方面,如应防止小尺寸的单块装配式板在人登上后的颤动,活荷载及风载动力影响引起振动对人的感觉效应,以及由振动引起的噪声对人的听觉效应等。由于使用者个人观点和感觉的不同,所以,至少目前在感觉接受程度上广泛地确定挠度控制值是有困难的。

根据经验,规范TJ10—74和即将颁布的新规范,对允许挠度值作出了相同的规定,见表0—2。

表 0—2 受弯构件的允许挠度

| 项 次 | 结 构 类 型                  | 允许挠度(以计算跨度 $l_0$ 计算)    |
|-----|--------------------------|-------------------------|
| 1   | 吊车梁:                     |                         |
|     | 手动吊车                     | $l_0/500$               |
|     | 电动吊车                     | $l_0/600$               |
| 2   | 屋盖、楼盖及楼梯构件:              |                         |
|     | 当 $l_0 < 7$ m时           | $l_0/200$ ( $l_0/250$ ) |
|     | 当 $7 \leq l_0 \leq 9$ m时 | $l_0/250$ ( $l_0/300$ ) |
|     | 当 $l_0 > 9$ m时           | $l_0/300$ ( $l_0/400$ ) |

注:①如果构件制作时预先起拱,而且使用上也容许,则在验算挠度时,可将计算所得的挠度值减去起拱值。预应力混凝土构件尚可减去预加应力所产生的反拱值。

②表中括号内的数值适用于在使用上对挠度有较高要求的构件。

③悬臂构件的允许挠度值按表中相应数值乘2取用。

表0—2中只对受弯构件的允许挠度作了规定,这并不等于说只对受弯构件有刚度的要求。在某些情况下,对偏心受力构件也有需要计算刚度的。譬如,在计算屋架位移时,必须确定受偏心荷载的屋架上弦和下弦的刚度。上弦属偏心受压构件,而下弦在考虑自重影响以及当节点间有悬挂荷载时则属偏心受拉构件。它们的刚度都需计算。

在单层厂房中对偏心受压柱的刚度一般用规定最小构件尺寸来保证。但对重要结构,有时则需计算刚度,因为对位移需满足一定要求,如不大于 $H/1000$ 等。在计算平腹杆双肢柱的刚度时,则一肢为偏心受压构件,另一肢往往为偏心受拉构件,腹杆则为受弯构件。

随着高强度混凝土及高强钢筋在工程实践中的广泛采用,构件尺寸越来越小,较准确地

计算刚度以保证正常的使用要求就更加需要，因而使变形验算和裂缝验算一样，成为两个极限状态之一，即正常使用的极限状态。

当考虑纵向弯曲对偏心受压构件承载能力的影响时，还需计算破坏时的位移值，即确定极限状态时的偏心距。研究结构动力特性时，正确地确定构件刚度以防止结构产生共振也是必要的。进行结构弹塑性分析中，不仅需要计算使用荷载下的刚度，而且还需知道在荷载的全过程中的刚度变化规律。

在进行结构抗震设计时，我们还需知道结构的延性，即钢筋混凝土构件进入极限状态时的位移值对构件中钢筋屈服时的位移的比值。

## 二、试验研究得出的重要结论

20多年来，南京工学院结构研究室曾对500多根各类（受弯、偏心受压和受拉）试件进行过试验研究，这些试件包括几种常遇到的截面形式：矩形、T形、倒T形、工字形和环形，如图0—2所示。在图2中，可能为偏心受压或为偏心受拉（图中虚线所示）；当 $N \rightarrow 0$ ， $e \rightarrow \infty$ 时，则为受弯。此外，在图2（a）中，当没有受拉翼缘时，即成为T形截面；当没有受压翼缘时，成为倒T形截面；当受压和受拉翼缘都没有时，即成为矩形截面。

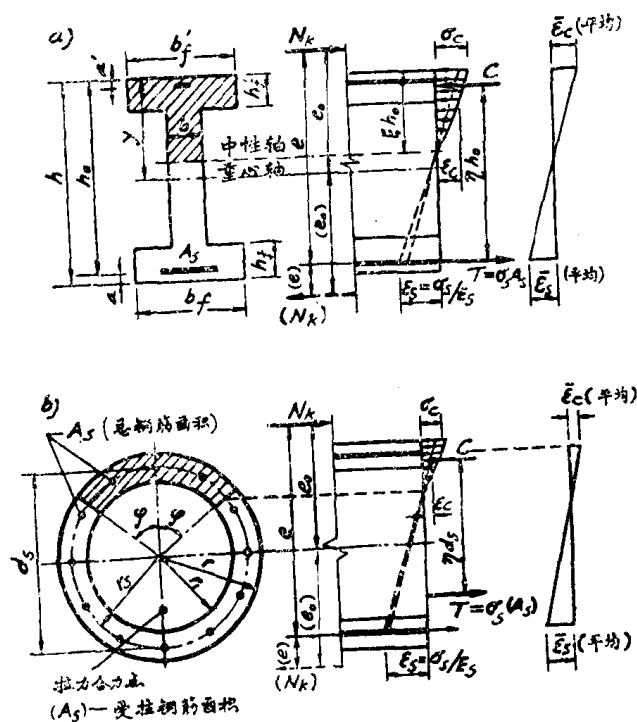


图0—2

从整理大量试验资料中，得出下列几项重要结论，将作为计算依据。这些结论是：

1. 裂缝平均间距和平均宽度大致分别为钢筋直径（ $d$ ）和配筋率（ $\mu$ ）之比 $d/\mu$ 及钢筋应力 $\sigma_s$ 的线性函数，对后者可近似地取与 $\sigma_s$ 成正比。

2. 钢筋计算应变（按裂缝截面） $\varepsilon_s$ 和量测的平均应变 $\bar{\varepsilon}_s$ 曲线间存在近似平行关系。  
 3. 使用荷载范围内计算受压边缘混凝土平均应变的截面弹塑性抵抗矩系数 $\xi$ 可取为常数。

4. 平均应变符合平截面假定，但量测区段必需有足够的长度。

5. 预应力梁和非预应力梁的 $M-f$ （弯矩—挠度）曲线间存在近似平行关系。

结论1、2将在第2章中阐述，其余则在第3章有关节次内分别阐述。

正因为有了这些结论，我们就有可能提出统一形式的计算公式，完成了包括在工程实践中经常遇到的五种截面的一个完整计算体系。这一体系相当简单且有足够的准确性。

可以认为，以下所提出的计算建议是有可靠的试验基础。因为有了以上结论作为理论计算模式。因而所建议的计算公式不是纯经验的。

### 三、统一形式的计算公式

#### 1. 裂缝

根据结论1、2，建立以下裂缝统一计算公式：

$$\text{平均裂缝间距 } l_{cr} = \gamma_{cr} (a + b \frac{d}{\mu}) v \quad (1)$$

$$\text{平均裂缝宽度 } w_{cr} = \psi \frac{\sigma_s}{E_s} l_{cr} \quad (2)$$

$$\text{裂缝截面钢筋应力 } \sigma_s = \frac{M_{cr}}{A_s(\eta) h_0 (\text{或 } d_s)} \quad (3)$$

$$\text{钢筋应变（或应力）不均匀系数 } \psi = S_1 \left( 1 - \frac{M_{cr}}{M_{sk}} \right) \quad (4)$$

#### 2. 刚度

根据结论3、4，建立短期荷载下的刚度 $B_s$ 统一计算公式：

$$B_s = \frac{E_s A_s h_0^2 (\text{或 } d_s^2)}{\frac{\psi}{(\eta)} + \frac{\alpha_E \mu}{(\xi)}} \quad (5)$$

以上公式可适用于各种截面形式的各类构件。公式中符号，可分别参见以下有关章节。  
 对预应力梁，可根据结论5计算挠度。

建议的计算公式被有关规范和规程所采用。采用时，有的未加修改，有的则经调整。

### 参 考 资 料

- [0·1] 湖北给水排水设计院：钢筋混凝土圆形水池设计，中国建筑工业出版社，1977。  
 [0·2] S. Sygula, K. Ryz: Longitudinal Cracking and Its Relation to Service Life of Reinforced Concrete Bridges, Preliminary Reports of International Symposium on Long-Term observation of Concrete Structures, RILEM-ACI, Sept. 17-20, 1984, Budapest, V. I.

- [0.3] Research Group on Durability (written by Ding Dajun): Observations on Reinforced Concrete Structures under Long-Term Service and Relevant Experiments, idem.
- [0.4] R. Park, T. Paulay: Reinforced Concrete Structures, 1975.
- [0.5] 钢筋混凝土结构设计规范科研组耐久性专题研究组: 钢筋混凝土保护层厚度取值的研究, 《建筑技术通讯》(建筑结构), 1982年第3期。
- [0.6] 钢筋混凝土结构设计规范(TJ 10-74), 中国建筑工业出版社, 1974。

# 第一章 抗裂度

## 1—1 概述

如在绪论中所述,当钢筋混凝土构件受拉,混凝土拉应变或相应拉应力达到极限时,构件将出现裂缝。从理论上说应该如此,但实际情况往往差异很大。因为利用混凝土试件确定的极限延伸率(极限拉应变  $\varepsilon_{\text{极限}}$ )或抗拉强度与构件的实际情况有一定的差异,有时甚至很大。首先,混凝土试件的尺寸、养护条件、加荷速度等与构件不完全一致<sup>①</sup>;其次,在钢筋混凝土构件中,由于钢筋存在的内部约束使混凝土内产生收缩应力。此外,由于构件受到外部约束还将产生较大的温度应力,如温度降低时,混凝土与钢筋的线膨胀系数也不完全一致,前者一般低于后者〔1·2〕,故在温度升高时使混凝土内产生温度拉应力。不过温度不大时,这种影响较小。此外,利用一组混凝土试件确定的指标是平均值,而在钢筋混凝土构件中,裂缝往往是在最薄弱的截面发生的,个别截面的缺陷会导致抗拉强度的降低或应力集中,这些都将会使裂缝较按平均指标估计为早出现。

至于钢筋能否提高混凝土的极限延伸率问题,国内外都有所研究和争论。我们认为均匀分布在混凝土体积内的配筋,如钢丝网水泥,对以宏观裂缝出现为标准的极限延伸率是可以提高的。但是对内部微裂缝扩展是否有影响,是值得怀疑的。因为从钢丝网水泥受拉试验的  $P-\delta$  曲线看,在宏观裂缝出现后曲线出现转折点以前很早即已出现另一个转折点,这应表示内部微裂缝在缓慢地扩展。受弯或大偏心受力构件的混凝土,极限延伸率高于轴心受拉构件的值。在这些构件中,由于拉应力是非均布的,因此计算值与试验值的差异还牵涉到计算应力图形的采取。

## 1—2 轴心受拉构件抗裂度的试验结果和计算

已知混凝土的应力应变图形为曲线(参看图 1—2 a),因此弹性模量为变值。在裂缝将出现时,受拉混凝土发挥较大的塑性,这时其弹塑性模量  $E_c'$  大约降低至弹性模量的一半,即  $E_c' = 0.5 E_c$ 。在第 I 工作阶段末,即在裂缝将出现的瞬间,构件中钢筋应力根据它和混凝土相同的拉伸应变来确定。

混凝土即将出现裂缝时的应变为

$$\varepsilon_{\text{极限}} = \frac{f_{tk}}{0.5 E_c} \quad (a)$$

则这时钢筋应力为

$$\sigma_{s, \text{极限}} = E_s \varepsilon_{\text{极限}} = E_s \frac{f_{tk}}{0.5 E_c} = 2 \alpha_E f_{tk} \quad (b)$$

①据统计,后者与前者之比平均值  $\mu_{k_0} = 0.88$ , 变异系数  $\delta_{k_0} = 0.10$  [1·1]

根据力的平衡并利用 (b) 式, 可求得构件所承受的抗裂轴向拉力为

$$\begin{aligned} N_{cr} &= f_{tk} A_c + 2 \alpha_E f_{tk} A_s \\ &= f_{tk} (A_c + 2 \alpha_E A_s) \\ &= f_{tk} A_{cr} \end{aligned} \quad (1-1)$$

式中  $f_{tk}$ ——混凝土的轴心抗拉极限强度;

$A_c$ ——混凝土截面面积;

$\alpha_E$ ——钢筋和混凝土弹性模量之比;

$$\alpha_E = \frac{E_s}{E_c}$$

$A_{cr}$ ——轴心受拉时的换算截面面积。

在验算试验的抗裂荷载  $N_{cr}$  时, 应按试验确定的平均抗拉强度  $f_{tk}$  代替公式 (1-1) 中  $f_{tk}$ 。

根据对抗裂的不同要求, 对按式 (1-1) 计算的裂缝将出现时构件所受的拉应力  $\sigma$ , 应不大于  $\alpha f_{tk}$ , 则有:

$$\begin{aligned} N_k \leq N_{cr} &= \alpha f_{tk} (A_c + 2 \alpha_E A_s) \\ &= \alpha f_{tk} A_{cr} (1 + 2 \alpha_E \mu_1) \end{aligned} \quad (1-2)$$

式中  $\alpha$ ——见表 0-1;

$\mu_1 = A_s / A_c$ ——按全截面面积的配筋率。

在试验时, 一般是凭借肉眼和放大镜发现裂缝, 因为裂缝一出现即有一定的初始宽度  $w_0$ ,  $w_0$  与配筋率  $\mu_1$  有关, 当  $\mu_1$  很小时,  $w_0$  一般较大, 随  $\mu_1$  的增大而减小。正常视力的人, 可以看出宽度为 0.005 mm 的裂缝。当有可疑的情况时, 我们则用大倍数 (20—100 倍) 的读数放大镜核对。此外, 我们还用荷载或钢筋应力—应变图 (参看图 2-48) 来校核, 因为在裂缝出现时, 图上将出现第一个转折点。

由于种种原因, 抗裂荷载是较分散的, 譬如南京工学院进行的 6 根轴心受拉试件, 抗裂荷载的试验值  $N_{cr}^t$  和计算值  $N_{cr}$  之比为 0.483~0.913 [1-3], 平均为 0.791, 均方差<sup>①</sup>  $\sigma = 0.163$ , 离散系数  $\delta = 0.205$ 。

### 1-3 受弯构件抗裂度的试验结果和计算

受弯构件裂缝将出现时, 截面上应力状态如图 1-1b 所示, 混凝土拉应力达到抗拉强度  $f_{tk}$  ( $f_{tk}$  为标准抗拉强度, 考虑按平均抗拉强度  $f_{tk}$  减 1.645 均方差  $\sigma$ , 本书图中统一用  $f_{tk}$  表示以与计算公式对应)。这时由于混凝土塑性的发展, 除靠近中和轴附近拉应力图形呈曲线外, 其余部分大致成矩形, 但混凝土压应力对其抗压强度而言, 为较小或很小, 因此压应力图形近似地成三角形。为了简化, 可采用图 1-1c 所示的计算图形。当计算  $M_{cr}$  时, 必须确定中和轴位置, 即相应的受压区高度  $x_{cr}$ 。因此须引入附加假定。这时和轴心受拉时一样,

对混凝土取弹塑性模量  $E'_c = \frac{1}{2} E_c$ , 则  $\varepsilon_{s,cr} = 2 \frac{f_{tk}}{E_c}$ 。

<sup>①</sup>由于试件数量少, 此处是取  $n-1$  计算的。

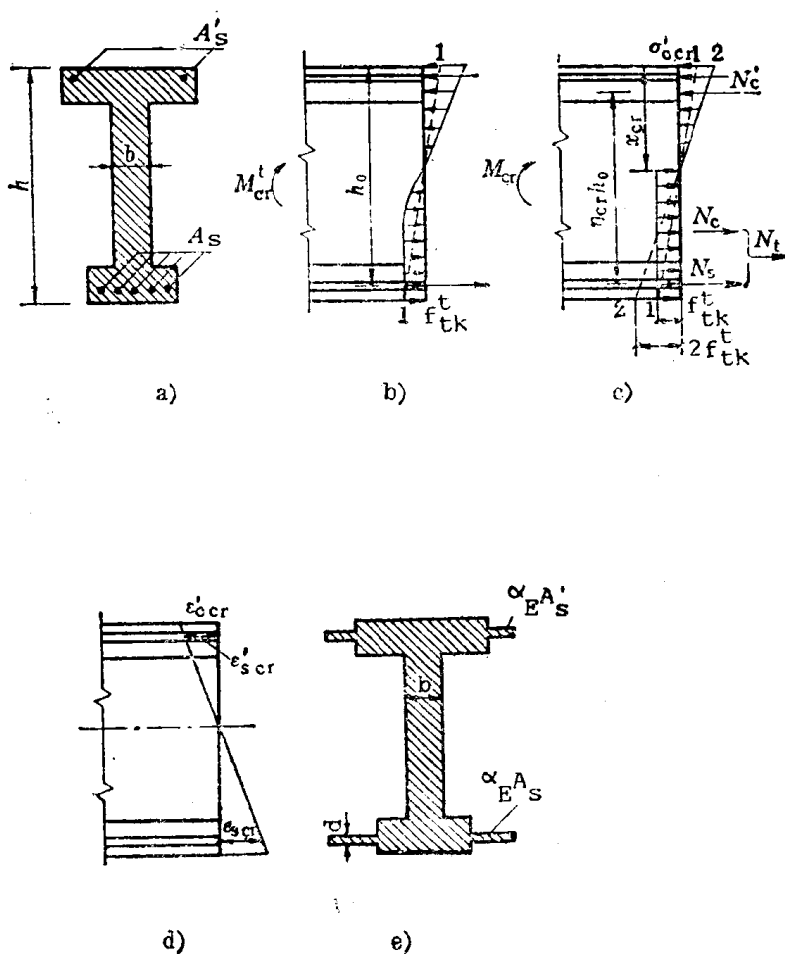


图1—1

根据平截面假定 (图 1-1b), 则有:

$$\begin{aligned}\sigma'_{ocr} &= E_c \varepsilon'_{ocr} = E_c \frac{x_{cr}}{h - x_{cr}} \varepsilon_{tk} = E_c \frac{x_{cr}}{h - x_{cr}} \cdot 2 \frac{f_{tk}}{E_c} \\ &= 2f_{tk} \frac{x_{cr}}{h - x_{cr}}\end{aligned}\quad (1-3a)$$

这即相当于按图 1-1c 中所示最大拉应力为  $2f_{tk}$  的虚线采取;

$$\begin{aligned}\sigma_{s,cr} &= E_s \varepsilon_{s,cr} = E_s \frac{h_0 - x_{cr}}{h - x_{cr}} \varepsilon_{tk} = E_s \frac{h_0 - x_{cr}}{h - x_{cr}} \cdot 2 \frac{f_{tk}}{E_s} \\ &= 2\alpha_E f_{tk} \frac{h_0 - x_{cr}}{h - x_{cr}}\end{aligned}\quad (1-3b)$$

$$\sigma_{s,cr} = 2\alpha_E f_{tk} \frac{x_{cr} - a'}{h - x_{cr}}\quad (1-3c)$$