

《混凝土结构设计规范》修订简介(四) ——基本构造问题

刘 刚, 徐有邻

(中国建筑科学研究院, 北京 100013)

[摘要] 阐述了《混凝土结构设计规范》修订中的基本构造问题,包括:确定伸缩缝间距的原则;根据耐久性要求对保护层厚度的调整;锚固长度的调整及机械锚固措施;钢筋连接的原则及对各类型接头的基本要求;以及受力钢筋最小配筋率的调整。

[关键词] 伸缩缝; 混凝土保护层厚度; 锚固; 连接; 最小配筋率

中图分类号: TU318.4 文献标识码: A 文章编号: 1002-848X(2011)05-0125-05

Introduction of revision of *Code for design of concrete structure part IV*: Basic structure measure problems

Liu Gang, Xu Youlin

(China Academy of Building Research, Beijing 100013, China)

Abstract: The basic structure measure problems in the revision of *Code for design of concrete structure* were described, mainly including: the principle of identifying the expansion joints spacing, the adjustment of thickness of concrete cover according to the durability requirements, the revision to the anchorage length and the measures of the mechanical anchorage, the principle of reinforcement connection and the basic requirements of various types of joints, and the adjustment of minimum ratio of the stressed reinforcement.

Keywords: expansion joint; thickness of concrete cover; anchorage; connection; minimum ratio of reinforcement

1 构造问题的重要性

1.1 混凝土结构的构造问题

混凝土结构设计除应进行结构方案、内力分析、截面计算以外,还必须满足构造要求。构造问题解决构件中钢筋的合理配置,使其能够达到计算需要的承载受力状态;同时还解决构件之间的连接构造,使连接部位(节点)具有足够的承载受力性能,能够达到内力分析中该处所必须的传递内力的能力,并具备必要的变形及裂缝控制性能。

1.2 构造问题的重要性

构造问题一般都不采取计算的形式,而多表达为根据具体条件确定的构造措施。这种做法使很多设计者对构造问题比较轻视,不去深究其中的机理和条件,不能准确灵活地掌握和应用,而只生搬硬套地机械执行,甚至加以忽略。这种做法十分有害。

构造问题是结构和构件承载受力的基本条件。如果不能满足,则结构分析和截面设计中的基本假定和计算简图就根本不能成立,设计出来的结构安全度就会大成问题。尤其是构件之间的连接构造措施,如果得不到保证,轻则发生超过允许限值的变形、裂缝,重则达不到承载力要求,甚至造成构件解体、结构倒塌的严重后果。事故分析和灾害调查屡屡证实了这一点,应当引起设计人员的重视。

1.3 基本构造的内容

构造问题分为两类:基本构造规定及各类构件的构造措施。前一类解决有关构造的共性技术问题,包括伸缩缝的设置、钢筋的混凝土保护层、受力钢筋的锚固与连接、受力钢筋的最小配筋率;后一类针对板、梁、柱、墙等具体构件,根据其受力特点分别提出了相应的构造要求。这类措施都是经过试验研究探讨、工程经验总结甚至事故原因分析而归纳总结得到的。尽管不一定需要复杂的计算,但对于结构安全却是至关重要的。

1.4 修订规范的原则

本次规范修订基本保持了2002年版规范的内容,只是根据近年来的科研探索、技术发展、工程经验和事故灾害调查,对原内容加以补充和拓展,在某些方面适当加严了构造措施的要求,以继续提高结构的安全度水平。下面介绍基本构造规定的修订情况,而对各类构件的构造措施,则因改动不大且过于繁琐,不再在文中阐述。

2 混凝土结构的设缝问题

2.1 结构缝的概念

体形庞大、复杂的混凝土结构往往要分解成若

作者简介:刘刚,工程师,硕士;徐有邻,研究员,博士;本文由徐有邻执笔。

干单元,这种分割结构的间隙称为“结构缝”。从所起的作用和功能而言,结构缝主要可以分为以下七类:1)膨胀缝:分割超静定结构,减小因膨胀造成约束应力积累而引起不利间接作用的缝;2)收缩缝:分割超静定结构,减小因收缩造成约束应力积累而引起不利间接作用的缝;3)沉降缝:分割超静定结构,减小因地基不均匀沉降而引起结构附加内力不利影响的缝;4)形体缝:分割形状复杂的结构为规则平面,使结构的质量及刚度分布均匀的缝;5)构造缝:为避免在结构形状突变处因质量及刚度不均匀,引起应力集中而设置的缝;6)防震缝:为避免结构在地震时因互相撞击造成局部破损而设置的缝;7)分割缝:为避免结构在偶然作用下因局部倒塌蔓延,而控制倒塌范围的缝。

从缝的结构形式而言,有完全将结构断开的缝;有基础相连而仅分割地上结构的缝;有仅分割屋盖部分的交叉式缝;有仅断开混凝土但钢筋相连而仍具有一定传力功能的缝等等。从形成缝的时间而言,还有为消除阶段性间接作用而设置的临时性缝,如施工缝(接槎)、预制-装配缝、后浇带、引导(控制)缝等。我国设计人员大多缺乏有关“结构缝”的概念,应逐步加强对结构缝的认识,结合结构方案合理地布置结构缝,并进行结构缝的设计。

2.2 伸缩缝的作用

从结构的受力和安全而言,大尺度的超静定结构整体稳固性较好。但混凝土胀缩变形会在超静定结构中引起约束应力,当结构体量较大时,这些胀缩变形和约束应力积累过多,往往就会引起较大的次内力和裂缝。“伸缩缝”是膨胀缝和收缩缝的合称,其目的是避免由于结构尺度过大,约束应力过度积累而引起间接裂缝。

混凝土结构膨胀的原因是温度上升,热源是施工期的水化热和使用期的季节温差(夏季升温);而引起混凝土收缩的原因是施工期的凝固硬化-收缩和使用期的季节温差(冬季降温)。近年混凝土结构体量增大,建材工业提供的水泥具有高强、快凝、发热大的特点,再加上推广现浇结构和商品混凝土,以及“泵送”、“免振”等新的施工工艺,上世纪末以来混凝土的收缩明显增加,现浇结构中引起的间接裂缝十分普遍,以致成为用户投诉的首位。

2.3 修订原则

其实此类由于胀缩变形引起的间接裂缝对结构安全并无实质影响,但有可能影响使用功能(防水、渗漏等),主要是从观感上给用户造成“不安全”的心理压力,往往引起矛盾和纠纷。而为防止这类不影响安

全的“无害裂缝”,过多的经费投入并不值得。

影响间接裂缝的内外因素多,且不确定性很大,目前很难找出定量计算方法或成熟的控制措施。为此,本次修订基本维持原规范有关伸缩缝间距的规定,仅将“宜”改为“可”,给设计人员更大的选择余地。同时总结近年我国丰富的工程实践经验,列举应加严或放宽伸缩缝间距的措施,供设计人员参考。

2.4 减小伸缩缝间距的情况

柱高不大的排架结构常用作单层工业厂房。屋盖因季节温差的胀缩变形,会引起端柱过大的水平强迫移位而造成次内力,无保温、隔热措施时尤甚。故应限制伸缩缝间距,控制胀缩变形引起的水平位移的积累。

干燥、炎热而常遭暴雨影响的地区和常处于高温作用的结构,因同样的理由应加严控制。

滑模施工的墙体(不仅是剪力墙)结构,整体性很强,故约束很大,也应该加严控制。

采用泵送和免振(自流平)施工工艺的混凝土,一般收缩较大;跨季节施工而结构外露时间过长;尤其是北方地区冬季干燥、寒冷、多风的影响,都容易发生开裂,需控制伸缩缝间距。

挑檐、雨篷等外露构件受气候影响太大,伸缩缝间距不能按结构考虑而应减小。根据实践经验,统一取为12m。

2.5 增大伸缩缝间距的措施

施加预应力可以抵消混凝土的约束拉应力,在易开裂的部位布置构造配筋也可以改变裂缝的形态(细而密)。在采取此类有效的措施以后,伸缩缝间距可以适当放大。

采取控制材料的措施(采用专门原材料、改善级配、外加剂等)可以控制混凝土收缩,因而加大伸缩缝间距,但实际工程效果不一,学术界和工程界对此尚有很大的争议。故需经试验验证后方可应用。

采取控制温差的措施(保温、隔热、散热等)也可以减小温度应力,增加伸缩缝间距。

混凝土的水化热和体积收缩都发生在混凝土凝固早期。因此采取跳仓法浇筑、后浇带施工、布置膨胀补偿带、妥善处理施工缝、加强早期养护等措施,都可以有效地减小早期收缩,因而适当减小留缝间距。但这些临时性的设缝绝不能代替伸缩缝,因为其只起临时性作用,无法在使用期继续发挥作用。对此,设计人员必须牢记。

2.6 控制缝的作用

对约束应力引起的间接裂缝可用堵、补、导三种手段解决。前述方法多属于“堵”,实践证明混凝土

的收缩是不可避免的,因此单纯想堵住裂缝是不可能的。比较现实的出路是在开裂以后对可见裂缝进行修“补”,消除其对于观感、功能和耐久性的影响。还有一种方法是“导”,即利用设计手段在施工时削弱结构的确定部位,利用混凝土的收缩在此形成局部裂缝,并预先在此采取措施,消除裂缝可能带来的不利影响。

例如超长的墙体结构可以不设伸缩缝,而间隔10m布置薄弱截面并预先埋入止水带。这样在浇筑混凝土收缩后,就不会无规则地开裂,而只会在指定截面以10m间距形成规则裂缝。由于预埋了止水带,防水抗渗的问题已不存在;再加上用建筑手段掩盖裂缝,开裂引起不利影响的问题就妥善解决了。这种采取“预留-引导”裂缝按预定位置、预定方式出现的“控制缝”应成为今后解决间接裂缝的有效方法之一。

3 混凝土的保护层

3.1 混凝土保护层的作用

混凝土结构中钢筋被混凝土包裹,才形成可以承载受力的构件。规范修订将混凝土的保护层定义为最外层钢筋至最近构件表面的距离。保护层混凝土的作用是握裹钢筋,通过粘结锚固作用建立起设计所要求的应力;同时混凝土碱性的环境还隔绝了酸性介质对钢筋的腐蚀(钝化);此外,当火灾等意外事故发生时,还保护了钢筋免遭高温作用。

3.2 确定保护层厚度的原则

设计中确定保护层厚度的因素有三个:纵向受力钢筋的保护层厚度不得小于钢筋直径(d),在此基础上确定了钢筋的基本锚固长度;而耐久性则因环境类别、混凝土碳化速度和使用时间,提出了最小保护层厚度的要求;同样,结构防火也提出了类似的要求。

过大的保护层厚度会降低截面的有效高度(h_0),直接减小构件的承载力,明显影响结构安全。我国传统设计基本不考虑耐久性及防火,出于承载力的要求,保护层厚度明显小于国外规定。近年基于可持续发展及国外“五倍定律”的前车之鉴,耐久性问题受到重视。经调查研究及试验分析,权衡各方面的利弊,本次规范修订确定原则为:对一般构件稍有加大,而恶劣环境的保护层厚度则大幅度增加。

3.3 钢筋的混凝土保护层厚度

修订规范给出了不同环境类别下,最小保护层厚度的限值。构件类型划分为杆状(梁、柱)及面状(板、墙、壳)两类,这是由于其碳化速度和构件的重要性不同。对强度等级规定也作了简化。表中数值基本与2002年版规范相当,但最重要的变化是保护

层厚度的取值由“纵向受力钢筋”改为“最外层钢筋”,因此实际上普遍增加了箍筋或构造钢筋的直径;而对于恶劣环境,则保护层厚度增加更为明显。

应该注意的是:规范提供了设计使用年限为50年的要求。对于100年的结构,需乘以1.4的系数加大。这是根据碳化速度推论的结果,当然还须配合其他的耐久性措施。

3.4 保护层厚度的调整

鉴于实际工程的复杂性,在总结实践经验并反映试验研究及技术进步的基础上提出,采取下列措施时,可以适当减小保护层的厚度:1)构件表面如有可靠的防护层,则其改善了可能引起混凝土材料性能弱化的环境条件;2)工厂化生产的预制构件,工艺、设备条件较好,混凝土质量能够得到保证;3)在混凝土材料中掺加阻锈剂,对钢筋采取阴极保护措施;4)地下室墙体采取防水做法或防腐措施;5)基础设置垫层,从垫层顶面算起的保护层厚度可取40mm;6)梁、柱、墙中保护层大于50mm时,保护层内加配的防裂-防剥落网片钢筋的保护层厚度可取25mm,但应采取措施与受力钢筋隔绝。

4 钢筋的锚固

4.1 钢筋锚固的机理

混凝土结构是复合材料结构,钢筋与混凝土的粘结锚固是结构承载受力后,两者协调受力的基础。受力钢筋只有在周围混凝土的充分握裹下,才能建立起设计所需的应力。粘结锚固作用由界面的化学胶结力、摩阻力、钢筋横肋与混凝土齿的咬合力,以及钢筋端部构造的局部挤压作用所构成。直段钢筋靠锚固长度上的咬合作用锚固;当锚固长度不足时,还要依靠钢筋端部的机械锚固作用。

根据试验研究,影响锚固的因素很多,主要是钢筋的强度及外形,还有握裹层混凝土的强度、保护层厚度、握裹层内的配筋约束、锚固长度、侧向压力、筋端构造的形式、锚筋间距等因素。但设计时前述因素不能都有反映,只能选择主要因素作简化处理。

4.2 钢筋的锚固长度

一般钢筋以锚固长度实现锚固。根据试验研究结果,校准传统方法并参考国外规范,修订规范提出了计算锚固长度的公式。基本锚固长度 l_{ab} 反映了钢筋强度、外形、直径以及混凝土强度的影响。本次修订淘汰了锚固性能极差的刻痕钢丝,将适用混凝土强度等级提高到C60,以缩减高强混凝土中的锚固长度。反映锚固条件的影响,实际的锚固长度 l_a 还应以基本锚固长度 l_{ab} 乘修正系数 ζ_a 而得。

应该强调:基本锚固长度是在最小保护层厚度、

必要的约束构造配筋条件下得出的。因此设计时应注意满足锚固长度范围内横向构造钢筋直径和间距的要求。

4.3 锚固长度修正系数

当锚固条件有变化时,锚固长度 l_a 可以减短或加长,锚固长度修正系数 ζ_a 取值如下:1)大直径带肋钢筋的相对肋高减小,锚固性能减弱而应加长锚固长度,修正系数 ζ_a 取 1.10;2)为耐久性而采用环氧涂层钢筋时,粘结性能变差而应加大锚长,修正系数 ζ_a 取 1.25;3)采用滑模施工等工艺时,施工荷载扰动了钢筋的粘结锚固,应增加锚长 ζ_a 取 1.10;4)保护层加厚有利于锚固:保护层为 $3d$ 时 ζ_a 可取 0.8,保护层为 $5d$ 时 ζ_a 可取 0.7,中间内插取值,锚固长度因而可以缩短;5)实际配筋比计算值有裕量时,可以比例减短锚固长度,修正系数 ζ_a 可按比值求得,但此项修正不适用于抗震设计及疲劳问题。

利用修正系数连乘,可以有效地减短锚固长度,但应有一个最低限度。修订规范规定,连乘后的总修正系数不得小于 0.6,锚固长度不得小于 200mm。

对于受压钢筋的锚固长度,根据试验研究及传统经验,取受拉锚固长度的 0.7 倍。

4.4 筋端的机械锚固措施

随着钢筋强度增加,锚固长度越来越长,给设计和施工带来很大的困难。根据试验研究、工程经验并参考国外规范,提出了在钢筋端部采用机械锚固的解决办法。其机理是机械锚头的局部挤压作用;形式有 90° 弯钩、 135° 弯钩、一侧贴焊锚筋、两侧贴焊锚筋、焊接锚板、螺栓锚头六种形式。

前三种形式为偏置锚固,弯后余长 ($12d$ $5d$) 及锚筋长度 ($5d$) 应满足受力要求。当布置在截面边角时,还应将弯钩、锚筋偏向内侧,以防止挤压引起劈裂裂缝。后三种形式为对称锚固,焊缝(双锚筋长度 $3d$ 、穿孔塞焊)及螺栓长度均应满足承载力要求。锚板及锚头的挤压面积应为锚筋面积的 4 倍,对方形边长 $1.98d$,对圆形直径 $2.24d$ 即可;此外锚筋净间距不宜小于 $4d$,否则应考虑群锚的影响。

当然锚固区还须符合前述约束构造配筋条件,在满足上述所有要求的情况下,采用机械锚固的锚固长度 l_a (投影长度) 就可以减短为基本锚固长度 l_{ab} 的 0.6 倍。

5 钢筋的连接

5.1 钢筋接头的形式

混凝土结构体量庞大,而钢筋的长度有限,故受力钢筋的连接不可避免。钢筋接头的形式有绑扎搭接、机械连接、焊接三种形式。搭接是最传统的连接

形式,适用于直径不大(受拉钢筋不大于 25mm、受压钢筋不大于 28mm)的钢筋连接,且不得用于轴拉及小偏拉构件;焊接对钢筋的品牌及直径有所选择;机械连接是近年开始工程应用的新型连接形式,其应用条件也应加以控制。总之,三种连接形式不分优劣,都可在工程中得到有效的应用。

5.2 钢筋连接的基本要求

钢筋通过接头传力,与整体钢筋相比,其传力性能不可避免地会弱化,这是所有设计者都必须牢记的重要基本概念。传力性能包括:强度、变形性能、恢复力、破坏形态、质量稳定性。钢筋直至屈服、拉断也不发生接头断开,这是所有连接形式都必须满足的基本要求。

搭接接头受力后相对滑移,机械连接螺纹间隙造成的伸长变形加大,都使变形的割线模量小于整筋的弹性模量,因而就可能造成裂缝、刚度及内力分配不匀的问题;同样的理由,当钢筋接头受力后卸载,整筋可以完全复原,而连接接头处就会因残余的伸长而形成永久性的变形和裂缝。只有通过接头熔融金属直接传力的焊接才没有变形性能及恢复力弱化的问题。但是焊接的弱点是施工质量的稳定性及破坏形态:焊接缺陷、温度应力、检验手段的局限性可能影响其传力性能,甚至可能发生脆断的破坏形态。某些机械连接也存在同样的问题,只有绑扎搭接接头,只要保证长度,绝不可能因脆断而中止传力,造成结构解体。

5.3 钢筋连接的原则

由于所有接头都是对传力性能的削弱,钢筋连接的原则如下:1)接头宜设置在受力较小处,如反弯点附近;并宜避开关键受力部位,如梁、柱端部,尤其是可能出现塑性铰的箍筋加密区;2)应限制在同一跨度或层高内受力钢筋连接头的数量,以确保传力可靠;3)应限制同一连接区段内受力钢筋的接头面积百分率,以保证传力性能弱化不过于集中;4)应保证搭接长度,并按有关规程保证机械连接及焊接的施工质量及连接区段的配筋构造要求。

近年有些接头声称具有“超强”的力学性能,可以“不受限制”地在结构的“任何部位”应用。对于此类并无科学根据的广告式宣传,稍有结构常识的设计人员即可识破,因而绝不能轻信。鉴于受力钢筋传力失效、中断可能引起构件断裂、结构倒塌的严重后果,应严格执行设计规范的要求,才能真正保证结构的安全。

5.4 钢筋的绑扎搭接

绑扎搭接是可靠的传统连接形式,其本质是两

根相向锚固钢筋通过握裹层混凝土的传力,因此搭接长度 l_l 由锚固长度 l_a 导出。对搭接长度、接头面积百分率、连接区段的定义、受压钢筋的搭接连接、搭接区段的约束构造配筋要求等规定,本次修订未改动。长期工程实践证明是可行的。

本次修订仅在以下两处作了小的修改、完善:搭接长度修正系数 ζ_l 由定点取值改为可按内插取值;对预制构件的拼接连接,接头面积百分率可有条件地放宽为 100%。

5.5 焊接及机械连接

机械连接及焊接的工艺要求及质量检验,分别由国家现行标准《钢筋机械连接技术规程》(JGJ107)及《钢筋焊接及验收规程》(JGJ18)予以保证。设计规范仅规定了连接区段的长度,统一取为 $35d$,而接头面积百分率不宜大于 50%。此外鉴于连接套筒处直径加大,适当放松了保护层厚度的要求,由“应”改为“宜”;同样连接区段中箍筋间距应适当调整(减小),以避免套筒所处位置。

6 钢筋的最小配筋率

6.1 受力钢筋最小配筋率的意义

受力钢筋的最小配筋率(ρ_{\min})是区分钢筋混凝土结构与素混凝土结构的界限。受拉钢筋的最小配筋率是根据“开裂即破坏”的概念而确定的,该原理至今仍为确定预应力构件最小配筋率的原则。但实际上在混凝土构件中适度配筋,还有在受拉或受压状态下保证其必要变形性能(避免非延性破坏)和控制混凝土长期性能(徐变)的作用。此外,设计规范中的最小配筋率不仅是技术问题,还反映了当时的经济状况,因而带有一定的社会性。

6.2 历次规范修订的最小配筋率

在物资匮乏的计划经济时代,我国的最小配筋率曾远低于世界各国的水平。但文革后,情况有了变化。表 1 为我国历次规范中一般受拉钢筋的最小配筋率,以及考虑主力钢筋强度的最小配筋强度。可以看出,随着我国国力增强及“以人为本、安全第一”设计思想的转变,我国的最小配筋率有了大幅度的提高。随着时代进步,不排除今后继续提高的可能性。

历次规范受拉钢筋最小配筋率及最小配筋强度 表 1

规范编号	TJ10-74	GBJ10-89	GB50010-2002	GB50010-2010
最小配筋率/%	0.10~0.20	0.15~0.20	0.20	0.20
最小配筋强度/MPa	0.38	0.47	0.59	0.86

注:最小配筋强度为常用最小配筋率及常用受力钢筋设计强度(按应用比例)乘积的数值。

6.3 受拉钢筋的最小配筋率

受弯及轴拉、偏拉构件中的受拉钢筋的最小配筋率(ρ_{\min})采取“双控”的形式,即除 0.20% 外,还受控于配筋特征值 $45f_t/f_y$,与混凝土及钢筋的相对强度有关。其物理意义为:混凝土强度越高,材料越“脆”,对破坏形态不利;配置钢筋则可增加强度及延性,因此应用高强钢筋有利。故分别在分子、分母中表达。此外,通常楼板(悬臂板除外)是较次要的受力构件,根据工程经验及设计习惯,最小配筋率 0.15% 也可保证足够的安全度及必要的结构性能。

还应指出的是:计算配筋率的底面积是构件的全截面。因为在开裂前,保护层混凝土也是起作用的。此外,配筋率是指构件一侧的钢筋,设计计算时务必注意。

6.4 受压构件的最小配筋率

受压构件的最小配筋率分为一侧 0.20%;全截面 0.40%。修订规范中,一侧配筋不变,而全截面配筋率与混凝土及钢筋的相对强度(f_t/f_y)有关。但因与抗震设计衔接和匹配,未采用计算形式而按钢筋强度级别,取为 0.60% (300MPa 级、335MPa 级)、0.55% (400MPa 级)、0.50% (500MPa 级);此外 C60 以上的高强混凝土还须增加 0.10%。此规定比 2002 年版规范普遍增加了 0.05%,因而会更加安全。

6.5 大截面构件的最小配筋率

实际工程结构中还有不少因构造或功能需要,截面很大而内力极小的构件。若按最小配筋率的规定配筋,就会出现截面越大配筋越多的不合理结果。修订规范就此作了局部调整。

卧置于地基上的混凝土基础筏板,最小配筋率 ρ_{\min} 可适度降低为 0.15%。

结构中次要的大截面受弯构件,还可以用弯矩和最小配筋率 ρ_{\min} 反求其临界高度 h_{cr} ,即在此临界高度下的最小配筋率 A_{\min} 已足可承受实际弯矩。则截面高度继续加大的情况下,仍可保持配筋不变。这样在确保结构安全的条件下可以节省配筋,临界高度最多可取为 $h/2$,故减少配筋最多可达一半。

7 结语

混凝土结构的力学性能是依靠基本构造措施加以保证的。文中简介了伸缩缝间距、保护层厚度、锚固长度及机械锚固措施、钢筋连接的原则及接头的技术要求,以及受力钢筋的最小配筋率。修订规范在传统方法的基础上作了适当加严。本文可辅助设计人员深入理解和正确执行修订后规范的有关规定。