

混凝土现代技术丛书

三向应力混凝土

蒋家奋 汤关祚 主编



中国铁道出版社

1988年北京

混凝土现代技术丛书

三向应力混凝土

蒋家奋 汤关祚 主编

中国铁道出版社

1988年·北京

内 容 提 要

本书系统地阐述了有关三向应力混凝土的发展,基本力学性能和结构形式,以及三向应力混凝土的理论基础。重点介绍有关钢管混凝土结构的科研、设计和施工经验,及一些典型工程实例。书中第三、四、六等章还附有计算例题。

本书可供土建科研、设计、施工等单位的科技人员及大专院校土建专业师生参考。

混凝土现代技术丛书

三 向 应 力 混 凝 土

蒋家奋 汤关祚 主编

中国铁道出版社出版

责任编辑 刘曼华 封面设计 安宏

新华书店总店科技发行所发行

各地新华书店经售

中国农业机械出版社印刷厂印

开本: 787×1092 毫米 $\frac{1}{32}$ 印张: 7.75 字数: 175 千

1988年4月 第1版 第1次印刷

印数: 0001—16,000册 定价: 1.90元

《混凝土现代丛书》序

自从波特兰水泥问世以来，混凝土与钢筋混凝土很快就成为主要的建筑材材，广泛地应用于各种建筑工程中。第二次世界大战以后，水泥混凝土的用量迅速增加。目前世界混凝土年产量已达60亿吨以上，不仅是用量最多的建筑材料，而且也是当代最大量的人造材料。对这样的大宗材料进行有效的研究开发工作，致力于增加品种、改进工艺、提高性能、降低成本、节约能耗，不断扩大其应用范围，充分发挥其社会效益与经济效益，已成为混凝土科技工作者的光荣职责。

我们正处于新的技术革命的伟大时代，各项技术都在互相渗透、互相促进，形成日新月异之势。混凝土技术也不例外，新技术新成就不断涌现。本丛书为了加速混凝土科学技术水平的提高，使混凝土这种主要材料在我国经济建设中发挥更大作用，对于实用意义较大的混凝土新技术，分期分批出版专册(著)。近期内将陆续出版的有：

1. 新品种与特种混凝土方面

《膨胀混凝土》，《流态混凝土》，《三向应力混凝土》，《沸石岩为气体载体的多孔混凝土》，《粉煤灰混凝土》，《轻骨料混凝土》，《聚合物浸渍混凝土》，《高强度混凝土》，《防腐蚀混凝土》等。

2. 新工艺、新设备方面

《混凝土养护节能技术》，《真空混凝土工艺及设备》，《混凝土中钢筋腐蚀与防护》，《混凝土冬季施工》，《混凝土快速硬化》等。

3. 性能与测试技术方面

《混凝土力学性能测定》，《混凝土强度综合法测试技术》等。

4. 应用理论方面

《混凝土材料科学》，《数理统计在混凝土试验中的应用》，《混凝土的徐变》，《混凝土的收缩》，《混凝土的耐久性》，《混凝土力学》等。

本丛书除了传播新知识以外，还将发挥宣传教育的作用。解放以来，我国混凝土科学技术进步很快，混凝土工程数量庞大，混凝土构件与各种水泥制品品种繁多，满足了基本建设与国民经济发展的需要，成绩是巨大的。但也不能否认，混凝土新技术的开发和普及工作还不能令人满意。至今我国高、中标号混凝土用得不多，外加剂使用得还很少，商品混凝土还刚刚起步，而混凝土工程质量问题，尤其是耐久性问题，还亟待唤起重视。总的来说，当前我国混凝土技术水平还落后于发达的工业国家，因此，必须加速信息的传播，加强宣传教育工作，尽快赶上国际先进水平，保证我国高速度的建设事业对混凝土的需要。

随着科学技术的进步与我国在混凝土科研与生产经验的积累，本丛书的选题范围将继续扩大；希望同行专家与广大读者，给予支持，共同为加速混凝土新技术的发展贡献力量。

吴中伟 姚明初

一九八八年元月

前 言

三向应力混凝土是一种承载能力高, 结构性能优异并具有较好的技术经济指标的复合结构材料。其主要结构形式——钢管混凝土在近一、二十年来, 得到土木建筑工程界普遍重视, 至目前为止, 国内应用钢管混凝土结构已建成并投产的工程达五十多个, 工程项目有单层工业厂房、多层工业厂房以及一些特种结构等。我国现在从事钢管混凝土结构开发工作的科研、设计、高等院校和施工单位也有数十个之多, 近二十年来进行了大量的试验研究、设计与工程实践。在高层建筑上的应用也已出现了可喜的开端, 今后钢管混凝土结构的推广应用还将有更为广阔的前景。

由于国内外至今公开出版该类较为系统的专著甚少, 为发挥此种组合结构材料在技术上与经济上的优越性, 使之更好地推广和应用, 在我国四化建设和现代化建筑中起到应有的作用, 满足工程发展的需要, 特撰写此书。

本书以作者从事的研究试验成果和参与的工程实践为主, 并参考吸收了国内外同行的有关实践经验, 注重了理论研究、应用技术与工程实践的结合, 介绍了一些典型的工程实例。希望本书的出版对设计、施工单位具有实用意义, 也可供大专院校作为教学或教材的参考书。

本书共分七章, 除系统地阐述了有关三向应力混凝土的发展、结构形式、结构特性以及三向应力混凝土的理论基础外, 重点介绍了有关钢管混凝土结构的力学性能, 计算公式、设计方法与施工, 并对在不同结构上采用钢管混凝土进行了技术经济分析。此外, 对三向应力混凝土的另一种结构形式

——间接配筋混凝土的设计也进行了概括的介绍。

由于三向应力混凝土的研究和钢管混凝土结构的应用，其历史还不长；受力情况又比较复杂；强度理论的研究还在不断深入，钢管混凝土结构的设计方法，国内外许多学者都在进行各自的研究工作，并存在着不尽一致的见解。限于作者的水平，目前还难以将各家之说统于一书，自揣本书的深度和广度均有不足之处，谬误和不妥之处也在所难免，恳请广大读者与同行专家、教授批评指正。

书中所介绍的工程应用，主要是取材于与国家建筑材料工业局苏州混凝土水泥制品研究院多年来共同协作的中国船舶总公司第九设计院，以及一些其他设计单位的设计成果。在此谨向中国船舶总公司第九设计研究院以及有关设计单位和个人表示衷心的感谢和诚挚的谢意。

本书由蒋家奋、汤关祚负责主编，并编写了前言与第一章至第三章，而第四章至第七章分别由招炳泉、李至钧各编写两章。

作 者

一九八七年一月

基 本 符 号

内外力

- M ——标准荷载作用下的弯矩, 简称弯矩;
 N ——标准荷载作用下的轴向力, 简称轴向力;
 N_F ——钢管混凝土构件试验破坏荷载;
 N_K ——构件失稳时的临界荷载;
 N_e ——钢管混凝土偏心受压构件设计纵向承载力;
 N_{e0} ——钢管混凝土构件轴心受压计算极限承载力;
 N_p ——试件试验时外加荷载;
 N_K ——组合柱的强度极限承载力。

材料指标

- E_s ——钢材弹性模量;
 E_c ——混凝土弹性模量;
 n ——钢与混凝土弹性模量比;
 $E_{s'}$ ——核心混凝土变形模量;
 $E_{s,t}$ ——钢管混凝土构件切线变形模量;
 $E_{s,0}$ ——钢管混凝土构件割线变形模量;
 $E_{s,0}$ ——钢管混凝土构件初始切线模量 (弹性模量);
 ν_s ——钢管泊松系数;
 $\nu_{s'}$ ——核心混凝土横向变形系数;
 $\nu_{s,0}$ ——钢管混凝土横向变形系数;
 f_{sx} ——钢管屈服应力;
 R ——混凝土标号;
 f_s ——钢管抗压设计强度;
 f_c ——混凝土轴心抗压设计强度;
 f_{cx} ——混凝土轴心抗压标准强度;
 f_{co} ——在侧压力作用下混凝土轴心抗压强度。

计算系数

μ ——含钢率, $\mu = 4t/D$;

η ——偏心距增大系数;

β_e ——偏心受压钢管混凝土构件截面强度特征系数;

ϕ ——钢管混凝土构件纵向弯曲系数;

k_1 ——核心混凝土抗压强度提高系数;

k_2 ——核心混凝土在侧压力作用下的强度提高系数;

k_e ——偏心受压时受压区核心混凝土抗压强度提高系数;

$\phi_x(\eta)$ ——轴心受压格构式组合柱的稳定系数;

ϕ ——钢管混凝土纵向弯曲系数;

γ ——不同含钢率的调整系数;

n ——承受荷载的柱肢数;

μ_t ——体积配筋率。

φ ——弹性模量降低系数

几何尺寸

A ——钢管混凝土构件截面面积;

A_0 ——钢管混凝土构件折算断面面积;

A_c ——核心混凝土面积;

A_s ——钢管面积;

D ——钢管外径;

J_s ——钢管截面惯性矩;

J_c ——核心混凝土截面惯性矩;

r_c ——核心混凝土半径;

r ——钢管半径;

t ——钢管壁厚;

e_0' ——外荷作用初始偏心距;

e_s ——构件附加初始偏心距;

e_0 ——设计计算初始偏心距;

e_1 ——外荷作用计算偏心距;

L_0 ——构件计算长度；

λ ——钢管混凝土构件长细比；

λ_0 ——中长柱和长柱的分界长细比；

θ_0 ——钢管混凝土构件受压区圆心角的一半。

应力应变

σ_s ——钢管的屈服应力；

σ_s ——钢管纵向应力；

σ_{s2} ——钢管环向应力；

σ_c ——核心混凝土所受侧向压应力；

σ_c ——核心混凝土所受纵向应力；

σ_1 ——钢管混凝土构件平均纵向应力；

σ_2 ——钢管混凝土构件平均横向应力；

σ_1^1 ——钢管混凝土构件平均纵向应力的极限值；

σ_k ——钢管混凝土构件平均临界应力；

ε_1 ——钢管混凝土构件纵向应变；

ε_2 ——钢管混凝土构件环向应变；

ε_1^1 ——钢管混凝土构件纵向应变的极限值；

目 录

第一章	三向应力混凝土与钢管混凝土的发展	1
第一节	三向应力混凝土包含的内容	1
第二节	三向应力混凝土在国内外的发 展概 况	3
第三节	三向应力混凝土结构的特性及其应 用范 围	15
第二章	三向应力混凝土的理论基础——混凝土	
	受压破坏机理	20
第一节	抗压强度是混凝土的主要力学性能	20
第二节	混凝土受压破坏的本质	24
第三节	混凝土强度理论	28
第四节	混凝土受压破坏机理的基本概念与 研究情况	31
第五节	混凝土受压后的变形与破坏的关系	36
第六节	三向应力混凝土的理论基础	45
第七节	混凝土内部结构的破坏与混凝土其他 重要力学性能的关系	49
第三章	钢管混凝土基本构件的力学性能和计算公式	52
第一节	轴向受压构件的试验	52
第二节	钢管混凝土轴心受压构件的计算	55
第三节	钢管混凝土偏心受压构件的试验	67
第四节	钢管混凝土偏心受压构件的计算	71
第五节	钢管混凝土受压构件变形模量的计算	74
第六节	钢管混凝土构件设计原则和设计公式	75
第七节	计算实例	92
第四章	钢管混凝土结构的设计	108
第一节	钢管混凝土单层工业厂房柱的 研究与设计	108

第二节	钢管混凝土多层框架柱的设计·····	137
第三节	用于工业设备的钢管混凝土构架设计·····	146
第四节	钢管混凝土其它结构·····	158
第五章	钢管混凝土结构的施工·····	166
第一节	概述·····	166
第二节	钢管混凝土结构的施工特点·····	167
第三节	钢管混凝土单层工业厂房柱的施工·····	168
第四节	钢管混凝土多层框架柱的施工·····	174
第五节	大直径圆筒仓钢管混凝土柱施工·····	177
第六节	钢管混凝土锅炉框架的施工·····	180
第七节	钢管混凝土结构的施工质量和检查·····	185
第六章	间接配筋混凝土的设计·····	188
第一节	概述·····	188
第二节	螺旋箍筋混凝土的计算·····	190
第三节	螺旋配筋柱的构造要求·····	206
第四节	关于双向螺旋配筋柱的试验研究·····	207
第五节	预应力螺旋配筋柱的特点和 设计计算公式·····	210
第六节	网片体积配筋的特点和设计计算公式·····	211
第七节	网片体积配筋的构造要求·····	213
第七章	钢管混凝土结构的技术经济效益·····	216
第一节	钢管混凝土单层工业厂房柱的 技术经济效益·····	216
第二节	钢管混凝土多层与高层框架结构的 技术经济效益·····	220
第三节	钢管混凝土构架的技术经济效益·····	223
第四节	钢管混凝土其它结构的经济效益·····	226
	参考文献·····	229

第一章 三向应力混凝土与 钢管混凝土的发展

第一节 三向应力混凝土包含的内容

自1824年波特兰水泥问世、至今一个半世纪以来,混凝土已成为工程建设中使用最广泛的一种建筑材料。目前世界上水泥混凝土的年使用量据统计,大约已达70亿吨。到本世纪末,许多超大型结构物和超高层建筑物也将采用混凝土作为主要建筑材料。因此,要求混凝土不仅具有较高的材料强度,而且还要求具备较好的结构性能。

近百年来,混凝土技术领域内曾经历了二次重大的技术突破,即19世纪中叶出现了钢筋混凝土,以弥补混凝土抗拉强度及抗折强度低的缺陷;1887年提出了钢筋混凝土的计算方法;20世纪30年代左右又出现了预应力混凝土。这两次重大的技术突破使混凝土的应用范围不断扩大。近二、三十年,混凝土技术又有了新的发展和提高,主要反映在高强、超高强混凝土,以及各种化学外加剂(特别是混凝土减水剂)的开发与应用。但是到目前为止,在提高混凝土的抗压强度的同时,还不能同步地提高混凝土的弹性模量,一般说来,高强混凝土的脆性问题更为突出,而且在某些工程结构上还受到了刚度的控制。因此,高强混凝土往往由于其结构性能的原因,不能更为广泛地应用于工程结构上。

经过几十年的试验研究,三向应力混凝土已被国内外土木建筑工程界公认为是一种具有优异结构性能的建筑材料。

所谓三向应力混凝土,它是一种由金属材料与混凝土共

同组合而成的复合结构材料，在混凝土承受单向压荷载后，组合在混凝土外围的金属材料将约束混凝土的横向变形。因此，使混凝土处在三向压应力状态下工作。从而延缓了混凝土受压后内部微裂缝的扩展，相应地大幅度提高了轴向受压承载能力和变形性能，而且还能使混凝土的破坏特征由脆性破坏转变为塑性破坏。

三向应力混凝土，也有称之为“约束混凝土”。在国内也有称“套箍混凝土”。在实际工程中的应用，它主要包含如图1-1所示的三种结构型式——钢管混凝土；网片体积配筋混凝土和预应力螺旋配筋混凝土。

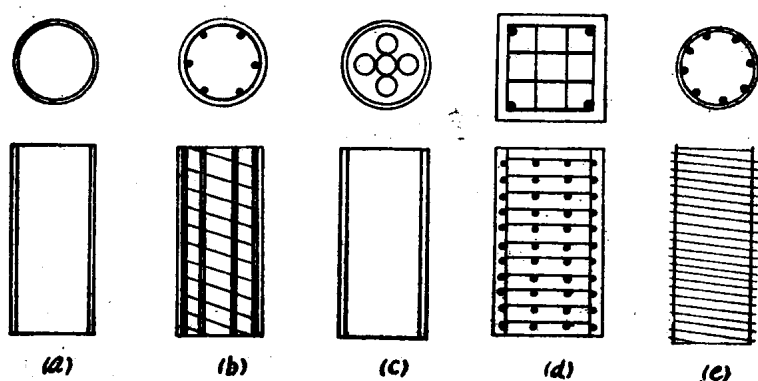


图 1-1

图注：(a)、(b)、(c)——钢管混凝土；(d)——网片体积配筋；
(e)——预应力螺旋配筋

钢管混凝土是将混凝土灌入钢管内振捣密实，并使两者能共同工作的一种组合结构材料。图1-1(a)所示的钢管混凝土是目前国内使用最广和最多的一种三向应力混凝土。图1-1(b)是在钢管内配置螺旋箍筋和少量纵向钢筋，配置纵筋的目的是结构构造或连接等方面的要求。在国外(如苏联)，还采用

了钢管束配筋的钢管混凝土,如图1-1(c)所示。在日本除在钢管内灌混凝土外,有的在钢管外再浇筑钢筋混凝土的构件。钢管混凝土根据使用场合的不同,其形式也是多种多样的,本书重点介绍的是图1-1(a)所示的一种钢管混凝土结构。

网格配筋的混凝土如图1-1(d)所示。它大多用于那些需要局部增加强度或具备变形能力的部位,如框架轻板建筑和装配式柱子的接头、钢管混凝土柱和钢筋混凝土柱或梁连接部、后张预应力钢索的锚固区、桩的尖端、梁的塑性铰区等。在抗震结构中,采用网格配筋混凝土比用局部浇灌高强混凝土更有效。因在网格作用下处于三向应力的混凝土,在提高其强度的同时还大大提高其塑性性能。

图1-1(e)所示的为预应力螺旋配筋。当预应力螺旋筋对核芯混凝土建立的侧压应力为 $0.3f_{cs}$ 时,核芯混凝土在 $1.3 \sim 1.4f_{cs}$ 的应力下仍表现为弹性,而普通混凝土的弹性极限大致在 $0.3 \sim 0.4f_{cs}$ 以内。故采用预应力螺旋配筋的混凝土柱有较高弹性极限,从而提高了整个构筑物的刚度,减小在使用条件下的变形。

第二节 三向应力混凝土在国内外的发展概况

最早在工程中应用三向应力混凝土的是英国1879年完工的赛文(Severn)铁路桥的桥墩。当时在空钢管内灌入混凝土的目的仅仅是为了防锈。

1902~1906年法国Conidere在探索三向受荷的混凝土性能时,发现受箍混凝土的承载能力约等于配置同样重量的纵向钢筋构件承载力的2.4倍,此时箍筋中的拉应力值与纵向钢筋压应力值相同。在本世纪初,美国也在一些单层和多层房屋建筑中采用了称为“Lally Column”的钢管混凝土柱。

苏联从1931~1958年在中央建筑科学研究所和全苏运输建筑科学研究所等单位,先后进行了大量的有关钢管混凝土柱的试验工作,在1955年、1963年、1974年和1978年先后出版了介绍钢管混凝土的书籍数本。较多的应用于桥梁建筑以及一些公用和民用建筑。如30年代用钢管混凝土建造的跨度为101m的公路拱桥和跨度为140m的铁路桥。日本在50年代就把钢管混凝土用于地下铁道车站柱。在鸣户海峡的架线输电塔也是用钢管混凝土建造的,该塔高140m,架线距离为170m。日本建筑学会在1967年出版了《钢管混凝土结构设计规范同解说》,并在1979年再次出版了修订版。在西欧,如比利时在建造船坞桁架时,桁架上弦压杆和立柱使用了钢管混凝土。瑞士跨越努菲尔山口的输电塔也使用了钢管混凝土结构。美国将轴心受压钢管混凝土柱的计算公式列入了1963年制定的ACI规范中,1971年又把钢管混凝土构件作为组合构件单独分列,并把受弯的计算也一起列入修改的规范中。美国旧金山市,用钢管混凝土柱和钢梁建成了一座高175.4m的50层大楼,设计者是为了提高建筑物的抗震能力和节约钢材,另外还用钢管混凝土建成了跨越超速干道的架空停车场的预应力混凝土拱桥的压杆,该桥跨度为175.5m,上弦压杆钢管混凝土的直径为1.83m。苏联在建造装配式钢筋混凝土框架结构高层建筑(14层)中,为了保持各层柱子的横截面尺寸一致,对负荷较大(6000kN以上)的底层各柱子,采用了密排的横向方格钢筋网配筋,同时配以屈服强度较高的纵向钢筋。在梯比利斯地铁工程中,使用预应力螺旋配筋混凝土柱,其中“列宁广场”车站所使用的柱子,柱芯系采用离心法生产的厚壁空心柱,见图1-2(a)。“依山契”车站采用的为实心柱,如图1-2(b)。柱高3.3m,钢筋混凝土

土芯直径为0.53m，混凝土标号为500号，外缠 $\phi 4\text{mm}$ 高强钢丝，间距8mm。柱子保护层在“依山契”车站用石棉水泥套筒，其内径为0.57m，外径为0.63m，柱与套筒之间的空隙以1:1.7水泥砂浆（水灰比为0.42）填实。柱子设计荷载12000kN。该工程试验了四根柱子，当荷载为22000kN时，石棉水泥套筒发生破裂，当荷载为26700kN时，柱子因螺旋钢丝断裂而破坏。

根据文献报导，因预应力螺旋配筋混凝土柱的弹性极限较高，故可提高结构物在正常使用条件下的刚度。报导还提到20000 kN水压机机架，由于采用预应力螺旋配筋的三向应力混凝土柱，柱子的纵向应变只有 25×10^{-5} ，绝对变形值为0.3mm。该文还报导了苏联2000m高的电视塔也采用预应力螺旋配筋混凝土柱的设计方案。另据资料报导在预应力混凝土的水压机机架中，由于采用了钢管混凝土柱，使机架柱的截面尺寸大为减小，如45000 kN水压机机架柱的外径仅500mm。与钢结构水压机相比较，节省钢材70%以上。

在国内，应用三向应力混凝土的主要结构为钢管混凝土。1963年开始，国家建材工业局苏州混凝土水泥制品研究院（原

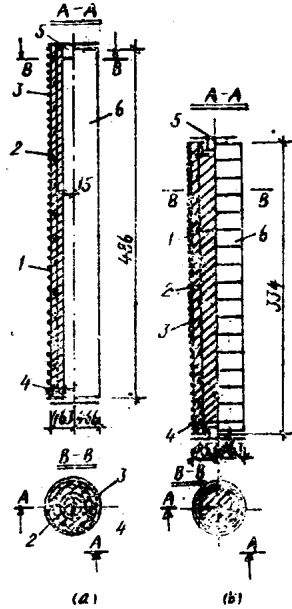


图1-2 梯比利斯地铁车站
预应力螺旋筋柱结构

- 1——钢筋混凝土柱芯；2——钢筋骨架；3——预应力螺旋箍筋；4——支座法兰；5——杯形铰；6——保护层。