

无粘结预应力混凝土 设计与施工

陶学康 编著

地震出版社

(京)新登字095号

内 容 提 要

本书介绍无粘结预应力混凝土结构性能和施工方法的最新研究成果、新编《无粘结预应力混凝土结构技术规程》的背景资料,以及无粘结后张混凝土简支梁、连续梁、单向板、双向平板、井式梁板和框架等的设计方法和施工工艺。此外,还介绍了新近的工程应用实例和设计计算例题。

本书可供土建工程的技术人员和大专院校有关专业师生阅读参考。

无粘结预应力混凝土设计与施工

陶学康 编著

责任编辑:蒋乃芳

地震出版社 出版

北京民族学院南路9号

北京通县向阳印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

850×1168 1/32 8.5印张 218千字

1993年5月第一版 1993年5月第一次印刷

印数 0001—5000

ISBN 7-5028-0781-O/TU·74

(1174) 定价:7.50元

目 录

第一章 概述

- 第一节 发展简史.....(1)
- 第二节 我国无粘结后张混凝土的发展.....(3)

第二章 无粘结预应力梁板性能

- 第一节 无粘结预应力混凝土的受弯特性.....(5)
- 第二节 无粘结部分预应力混凝土的性能.....(7)
- 第三节 无结粘部分预应力带状布束九柱四板
荷载试验.....(14)
 - 一、模型板的设计及试验.....(14)
 - 二、试验结果及分析.....(16)

第三章 受弯设计中的基本问题

- 第一节 预应力度及裂缝控制要求.....(24)
 - 一、国际预应力混凝土协会(FIP)实用设计建议(24)
 - 二、《混凝土结构设计规范(GBJ10-89)》的规定(25)
 - 三、中国土木工程学会《部分预应力混凝土结构
设计建议》的建议.....(26)
 - 四、《无粘结预应力混凝土结构技术规程》的规定.....(27)
- 第二节 无粘结预应力筋摩擦损失.....(28)
 - 一、概述.....(28)
 - 二、无粘结预应力筋的摩擦损失.....(30)
- 第三节 部分预应力混凝土受弯构件无粘结筋的
极限应力.....(31)

一、概述.....	(31)
二、无粘结部分预应力混凝土梁(板)受弯性能综述.....	(34)
三、无粘结筋应力设计值计算公式.....	(36)

第四章 无粘结部分预应力混凝土梁的设计

第一节 概述.....	(39)
第二节 常用截面形式.....	(39)
第三节 部分预应力混凝土截面分析.....	(42)
一、截面的弹性应力分析.....	(42)
二、裂缝截面的应力分析.....	(44)
三、截面抗弯效率.....	(46)
第四节 裂缝宽度计算.....	(47)
一、中国土木工程学会《部分预应力混凝土结构设计建议》的裂缝计算公式	(48)
二、无粘结部分预应力混凝土梁的裂缝计算.....	(50)
三、用名义拉应力控制裂缝的方法.....	(52)
四、裂缝宽度的限制.....	(53)
第五节 刚度计算.....	(55)
一、影响刚度的主要因素.....	(55)
二、刚度计算公式.....	(56)
第六节 设计步骤.....	(63)
第七节 构造规定.....	(65)

第五章 预应力连续结构的设计计算原理

第一节 概述.....	(67)
第二节 预应力连续梁的弹性分析.....	(68)
一、预应力筋为直线配筋.....	(68)
二、预应力筋为曲线配筋.....	(70)
三、线性变换和吻合束.....	(72)

第三节 预应力引起的等效荷载·····	(74)
一、曲线预应力筋的等效荷载·····	(74)
二、折线预应力筋的等效荷载·····	(75)
三、常用预应力筋线形及等效荷载·····	(75)
第四节 荷载平衡法·····	(77)
一、荷载平衡法的原理·····	(77)
二、荷载平衡法设计步骤·····	(79)
第五节 荷载平衡法在超静定结构中的应用·····	(80)
一、应用举例·····	(80)
二、应用中的几个实际问题·····	(84)
三、荷载平衡法的局限性·····	(86)

第六章 无粘结预应力混凝土框架结构设计

第一节 概述·····	(88)
一、应用简况·····	(88)
二、材料·····	(89)
三、结构选型·····	(89)
第二节 设计原则及设计过程·····	(90)
一、设计原则·····	(90)
二、设计步骤·····	(91)
三、预应力筋用量估算·····	(93)
第三节 结构设计与计算·····	(94)
一、预应力筋的布置方式·····	(94)
二、预应力筋的锚固损失·····	(98)
三、次弯矩及其计算·····	(101)
第四节 构造设计和张拉顺序·····	(106)
一、无粘结筋的并束铺置·····	(106)
二、锚固区构造设计·····	(107)
三、锚固区受力及配筋计算·····	(110)

四、开洞梁洞口构造.....	(112)
五、张拉顺序的影响.....	(113)

第七章 无粘结预应力混凝土楼盖设计

第一节 概述.....	(116)
一、无粘结预应力楼盖体系.....	(116)
二、板厚度的选择.....	(117)
三、设计原则和设计过程.....	(119)
四、防腐保护.....	(120)
第二节 平板分析和设计方法.....	(121)
一、等代框架法.....	(121)
二、无粘结预应力筋的布置方式.....	(123)
第三节 平板受弯设计.....	(126)
一、抗裂验算及裂缝控制.....	(126)
二、非预应力钢筋的配置.....	(127)
三、平均预压应力.....	(128)
四、受弯承载力计算.....	(129)
五、双向板挠度计算.....	(129)
六、双向板挠度简化计算方法.....	(131)
七、边板和角板的构造配筋.....	(132)
第四节 冲切设计计算.....	(133)
一、无粘结筋对抵抗冲切荷载的有利影响.....	(133)
二、无粘结预应力混凝土板受冲切承载力计算.....	(134)
三、锚栓抗冲切配筋.....	(138)
四、型钢剪力架设计方法.....	(140)
五、配筋冲切加强措施的限制条件.....	(145)
第五节 井式梁板结构设计.....	(145)
一、概述.....	(145)
二、井式梁板结构布置.....	(146)

三、井式梁板结构设计	(149)
四、构造措施	(150)
第六节 支撑结构影响和减小约束措施	(151)
一、平面框架用于分析约束作用	(151)
二、减小约束的措施	(153)

第八章 抗震设计和计算

第一节 概述	(155)
第二节 无粘结预应力混凝土结构抗震性能特点	(156)
第三节 等代框架中楼板计算宽度取值	(157)
第四节 强柱弱梁延性抗弯框架的形成	(158)
第五节 板柱节点不平衡弯矩的传递	(159)
第六节 地震区的应用	(162)

第九章 无粘结预应力施工工艺

第一节 无粘结筋的制作及质量要求	(165)
第二节 锚具系统及性能要求	(167)
一、概述	(167)
二、单根无粘结筋锚具系统	(168)
三、单根无粘结筋群锚系统	(171)
四、性能要求	(173)
五、锚具效率系数计算	(174)
六、质量检验	(176)
第三节 张拉设备	(177)
第四节 预应力筋下料和编束	(178)
一、预应力筋下料长度计算	(178)
二、预应力筋下料和编束	(180)
第五节 无粘结筋的铺放及浇筑混凝土	(181)
一、无粘结筋的铺放	(181)

二、浇筑楼板混凝土.....	(183)
第六节 开洞处理.....	(183)
第七节 施加预应力.....	(185)
一、张拉控制应力.....	(185)
二、张拉伸长值计算.....	(186)
三、锚固时预应力筋的内缩量.....	(187)
四、施加预应力时的混凝土强度.....	(187)
五、曲线筋一端张拉工艺.....	(188)
六、分批张拉的影响.....	(189)
七、允许偏差.....	(191)
第八节 对锚固区的保护.....	(191)

第十章 工程应用实例

第一节 高层建筑.....	(196)
第二节 多层建筑.....	(198)
第三节 框架及门式刚架.....	(202)
第四节 储仓.....	(204)
第五节 地面板.....	(207)
第六节 锚杆.....	(209)
附录一 9m×9m柱网双向板设计计算	(210)
附录二 18m 跨无粘结预应力混凝土框架设计计算.....	(223)
附录三 预应力钢材性能.....	(238)
附录四 某些后张法锚固体系的若干资料.....	(240)
参考文献.....	(258)

第一章 概 述

第一节 发展简史

早在1925年,美国的 R.E. Dill 就提出了无粘结预应力筋的设想,在张拉后容许预应力筋对周围混凝土发生纵向相对滑动。到30年代,由粗钢筋经镀锌或涂层保护制作而成的无粘结筋曾用于圆筒形储罐,采用花篮螺丝施加预应力;法国的 E. Freyssinet 在预应力混凝土桥梁的初期实践中,也曾试用过涂以沥青并缠绕纸带的无粘结束,但在当时没有受到重视。一直到50年代初期,美国将无粘结筋用到升板建筑中。随着大跨度平板的发展,无粘结筋开始在美国得到较大的推广应用。最初的无粘结筋为直径6.5mm 1600 MPa 级的应力消除钢丝,经涂油脂后用纸带缠绕包裹制作而成,采用墩头式锚具。60年代早期,采用单根钢绞线缠绕纸带制成的无粘结筋开始代替由钢丝制作的无粘结筋;60年代中期,出现了内涂油脂外包塑料护套的钢绞线无粘结筋。大约到1970年,塑料护套的制作工艺得到重大改进,采用挤出涂塑工艺制作无粘结筋取得成功,并于1972年获得美国专利。以后这种无粘结筋在施工中得到了大量应用。

无粘结预应力混凝土的无粘结筋可如同非预应力筋一样,按设计要求铺放在模板内,然后浇筑混凝土,待混凝土达到设计强度要求后,再张拉锚固,预应力筋与混凝土间没有粘结,张拉力全靠锚具传到构件混凝土上去。因此,无粘结预应力混凝土结构,不需要预留孔道、穿筋及灌浆等复杂工序,简便了操作,加快了施工进度。无粘结预应力筋摩擦力小,且易弯成多跨曲线形状,特别适于

建造需用复杂的连续曲线配筋的大跨度楼盖和屋盖。由于无粘结预应力结构性能良好,施工方便,非常经济合理,近20多年来,已为许多国家所采用,国外ACI、BS8110及DIN4227等结构设计规范对无粘结预应力混凝土的设计与应用都有具体规定。据美国后张委员会的统计,无粘结预应力混凝土自50年代初开始少量应用以来,现已有1亿m²以上的房屋建筑采用,目前每年以1000万m²的速度增长,无粘结后张预应力在美国已成了后张法施工中的主要施工方法。从1965年至1989年,美国共约耗用100万t后张预应力筋(不包括缠丝制造管道和储罐所用的钢材),其中无粘结筋占73万t,其应用情况见表1-1-1。

1965—1989年美国后张混凝土中高强钢材用量 表1-1-1

项 目	有粘结及无粘结筋(t)	无粘结筋(t)
工业与民用建筑	550000	532000
桥 梁	205000	10000
地 面 板	126000	120000
核 工 程	46000	41000
土 工	40000	20000
其 它	13000	7000
含 计	980000	730000

无粘结预应力混凝土在加拿大、英国、瑞士、德国、澳大利亚、日本、泰国、新加坡等国家也有很多应用,非洲已建成后张楼盖200万m²。近10多年来,后张无粘结预应力技术在我国发展迅速,并正在获得越来越多的应用。

第二节 我国无粘结后张混凝土的发展

60年代后期,陕西、四川等地曾采用电热后张无粘结预应力檩条和T形板,并对下弦无粘结预应力管屋架进行试验研究。70年代上半期,上海农业局仓库和上海晴纶厂毛条车间分别采用无粘结预应力升板楼盖和门式刚架。在这些早期的无粘结预应力构件中,多采用冷拉钢筋或冷拔丝制作无粘结筋使用。这时,中国建筑科学研究院、北京市建筑工程研究所等单位开始采用高强钢丝或钢绞线制作无粘结筋,并研究这种高效无粘结后张混凝土的结构性能以及无粘结筋的制作和后张工艺。经过10多年的工作,目前我国在无粘结预应力的结构设计、预应力筋的挤压涂塑法生产及施工工艺等方面已较成熟。

80年代以来,用无粘结预应力混凝土已建成广东国际大厦(63层)超高层建筑,新世纪饭店(31层),亚运村写字楼(20层),石家庄某学院图书馆,北京科技活动中心报告厅 $27\text{m} \times 27\text{m}$ 井式梁楼盖,无锡第一纺织厂、天津四新纱厂一纺厂多层厂房及电厂煤仓等。至1991年底,我国采用无粘结预应力混凝土的建筑面积已逾100万 m^2 ,目前正以每年百万平方米的速度递增。深圳、珠海、海南、福州、厦门及内地一大批采用无粘结预应力楼盖的多层及高层建筑正在施工中。无粘结预应力混凝土主要用于多层和高层建筑中的单向、双向连续平板和密肋板。近年又扩大应用于井字梁、悬臂梁、框架梁、扁梁、受拉结构和预应力拉桩(锚杆)等。用来建造多层工业厂房、住宅、办公楼、宾馆、停车库、商场、报告厅、储仓、以及地面板、大型基础、板式桥梁和工程加固等。

目前,在北京、大连、南京、福建、天津、长沙等地已建成约10条无粘结筋生产线,可生产提供无粘结筋。无粘结筋的制作,采用挤压涂塑工艺为外包聚乙烯套管,内涂防腐建筑油脂,经过挤出成型机后,塑料包裹层一次成型在钢绞线或钢丝束上。目前有 $\phi 12$ 和

$\phi 15$ 高强钢绞线以及 $7\phi 5$ 高强钢丝三种规格。用于无粘结筋的锚固体体系分夹持单根钢绞线的三夹片筒式锚与钢丝束镦头锚两种锚固体体系,如果夹持钢绞线的三夹片筒式锚具的夹片是斜的,也可用以夹持由7根 $\phi 5$ 钢丝组成的平行钢丝束。无粘结预应力混凝土技术是国家科委和建设部“八五”科技成果重点推广项目之一。建设部还下达任务组织编制了《无粘结预应力混凝土结构技术规程》,以供设计与施工单位使用。

第二章 无粘结预应力梁板性能

第一节 无粘结预应力混凝土的受弯特性

在后张混凝土中，凡张拉后通过灌浆或其他措施使束与混凝土产生粘结力而不能发生纵向相对滑动的束叫做“有粘结”束；反之，凡拉张后永远容许预应力束对周围混凝土发生纵向相对滑动的束叫做“无粘结”束。

在预应力混凝土受弯构件中，无粘结束钢材应力随荷载变化的规律与有粘结束是不同的如图2-1-1所示。从图2-1-1可清楚地看到，无粘结预应力筋的应力增量总是低于有粘结预应力筋的应力增量，随着荷载的增大，这个差距越来越大，当结构达到极限荷载时，无粘结筋的极限应力都不可能超过钢材的条件屈服强度 $f_{p0.2}$ 。原因在于，当有粘结梁承受荷载时，任何截面处束中应变的变化都是与其周围混凝土的变化相等的，所以有粘结束的最大应力发生在最大弯矩的截面内。无粘结梁承受荷载后，由于无粘结束能发生纵向相对滑动，整个束中的应变（亦即应力）是一样的，其应变的改变等于沿束全长周围混凝土应变变化的平均值。这样，当梁的弯曲破坏受压截面混凝土达到极限应变时，无粘结束中的最大应变将比有粘结束的应变小。所以无粘结束中的极限拉应力低于最大弯矩截面破坏时有粘结束的极限拉应力。实验表明一般要低10%—30%。

Pannell 采用跨中一点加载方式，以无粘结筋的有效预应力，配筋指标 $q_p \left(= \frac{A_p \sigma_{pe}}{b h_p f_{cu}} \right)$ 和梁的跨高比为主要参数，作了三组共38

根无粘结预应力梁的试验，三组梁的跨高比分别为 12，27 和 40，每组又分为 $q_p < 0.15$ ， $q_p > 0.30$ 和 $0.15 \leq q_p \leq 0.30$ 三种配筋率。Cook 等采用三分点加载方法，试验了 12 块简支板，其中有三组 9 块为无粘结板，它们的跨高比近似分别为 20，30 和 40，力学配筋指标 q_p 分别为 0.021，0.104 和 0.21。

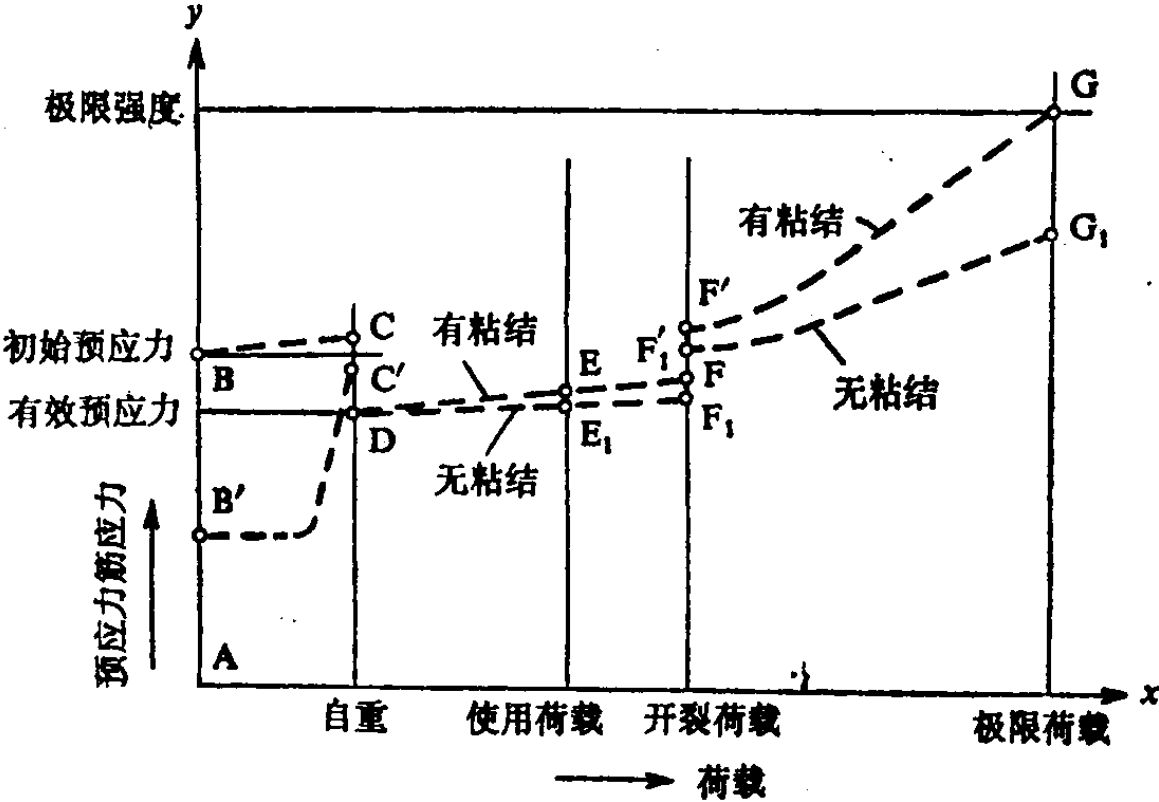


图 2-1-1 荷载-应力变化

比较这两批无粘结梁的裂缝性质和破坏形态，与有粘结梁的是不一样的。对配筋率较低的梁，它们只出现一条或少数几条裂缝，发生在最大弯矩截面附近。随着荷载的增加，这条裂缝的宽度与高度都迅速扩展，并常于裂缝的顶部开叉，荷载增加不多梁就发生脆性破坏。破坏机构类似于一个低矢高的三铰拱而不大象梁，混凝土的变形几乎全部集中在裂缝断面。

这种只配置无粘结筋梁的这些不利性能可以采取附加有粘结非预应力筋的措施来改变。如若配置适量的普通钢筋，则裂缝和破坏特征均有显著的改善。

第二节 无粘结部分预应力混凝土的性能

采用预应力与非预应力混合配筋的部分预应力混凝土是介于“全”预应力和普通钢筋混凝土之间的一种中间状态的结构。非预应力筋可以在一个很大的范围内变化。附加非预应力有粘结钢筋有利于改善裂缝的分布和提高梁的抗弯强度。然而迄今为止,国外有关文献和一些主要的设计规范,如ACI318-89和BS8110都还没有考虑附加有粘结钢筋对无粘结筋极限应力的影响。ACI规范附加有粘结筋的目的只是为了改善梁的裂缝分布,因此仅规定一个最低配筋率(混凝土受拉区面积的4%),而忽略它的影响。

为了研究不同数量非预应力有粘结钢筋对无粘结筋极限应力和梁的极限强度的影响,取试验梁为 $16 \times 28\text{cm}$ 矩形截面,无粘结筋离梁顶面距离 $h_p = 22\text{cm}$, $h_s = 25\text{cm}$,梁全长 440cm ,试验跨度 420cm ,用三分点加集中荷载(图2-2-1)。梁跨高比 $l/h_p = 19.1$ 。无粘结筋采用直线束,每根梁一束,由2—8根 $\phi 5$ 高强钢丝组成。在钢丝上涂以1—2mm厚的黄油,外缠3层塑料纸。为了减少锚具的滑移损失,采用锚头锚具。各试验梁于试验前张拉,实测有效预应力,约为钢丝屈服强度的55%—65%。混凝土强度取用30—50MPa。

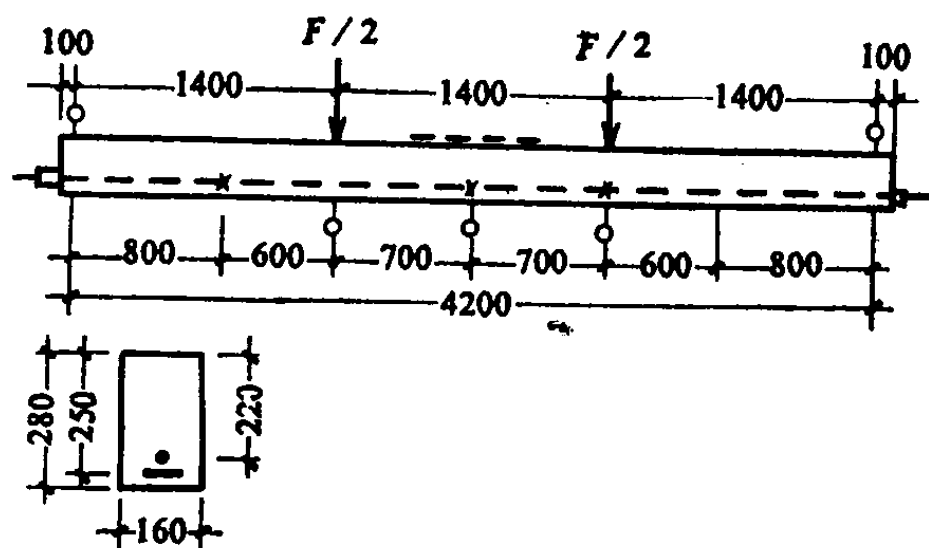


图2-2-1 试验梁与加荷体制

非预应力粘结钢筋为2—4根 $\phi 10$, $\phi 14$ 和 $\phi 16$ 的中等强度变形钢筋。这样的选择是为了使梁破坏时非预应力筋承担约 30%, 50% 或 70% 的极限荷载, 以便于直观地看出两种钢材比例的变化对梁极限强度和预应力筋极限应力的影响。同时也是为了把总的配筋指标 $q_0 (= q_{pe} + q_s = A_p \sigma_{pe} / b h_p f'_c + A_s f_y / b h_p f'_c)$ 大体分为低 ($q_0 < 0.15$)、中 ($q_0 = 0.15 \sim 0.25$) 与高 ($q_0 > 0.25$) 三个范围, 以观察配筋数量多少对预应力筋极限应力的影响。非预应力有粘结钢筋的最低配筋率为 $0.004 b h_p$ 。

试验结果如下。

1. 荷载-挠度关系

荷载-挠度关系是梁抗弯总体性能的一种重要反映。试验梁的典型荷载-挠度曲线(短期加载, 荷载从零加到破坏)见图2-2-2。

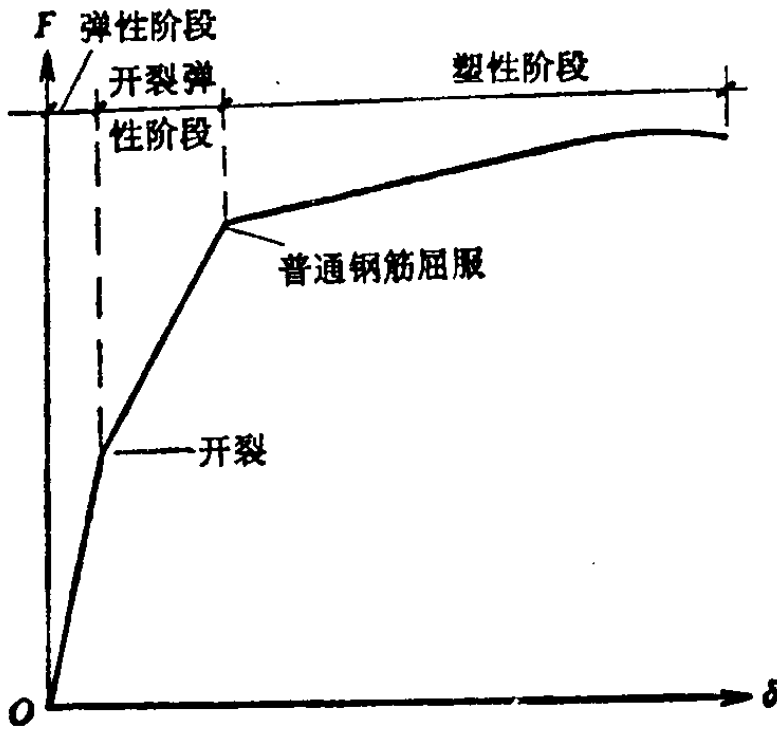


图2-2-2 附加普通钢筋的无粘结梁荷载-挠度曲线

从图中可见, 这种配有适量非预应力普通钢筋(配筋率 $> 4\%$) 的无粘结梁和配有普通钢筋的先张预应力混凝土梁一样, 也具有不开裂弹性、开裂弹性和塑性三个阶段的 $F-\delta$ 曲线图, 呈现近于三直线的形状。第二阶段进入第三阶段是由普通钢筋屈服引起的,

象普通钢筋混凝土梁的 $F-\delta$ 曲线一样,呈现一个突然的转折点。第三阶段开始也是直线的,直到预应力钢丝进入非线性范围之后才变为曲线。

q_0 值较低的梁($q_0 \leq 0.15$),延性较好,破坏时梁的挠度为 $90-120\text{mm}$ ($L/47-L/35$)。 q_0 较高的梁($q_0 > 0.25$),由于中和轴位置低,因此破坏时挠度较小,约为 $40-45\text{mm}$ ($L/105-L/93$)。

2. 无粘结预应力筋的应力增长

无粘结筋随荷载而增长的应力系根据贴在钢丝上的电阻片实测值的平均值,通过钢丝的实测应力-应变曲线求出。各梁所测数值与安放在无粘结筋锚头下测力传感器的实测值基本上是一致的。

为减少篇幅,现仅将A组梁的荷载-应力增长 $F-\Delta\sigma_{pa}$ 曲线绘于图2-2-3。除配筋率较高($q_0 > 0.25$)的梁外,其余所有梁的 $F-\Delta\sigma_{pa}$ 曲线线型也都是三直线的。应力增长在不开裂阶段是很小的,在开裂弹性阶段,无粘结筋应力的增长率虽有较快的发展,但绝大部分的应力增长多发生于梁的塑性阶段,亦即发生于普通

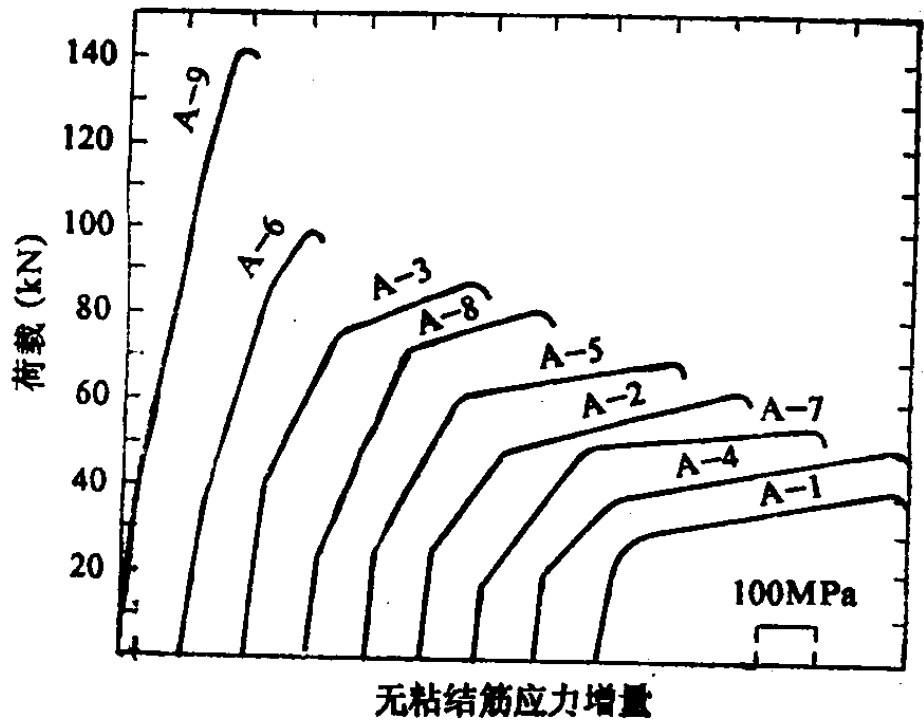


图2-2-3 预应力筋应力增长与荷载之间的关系