

苏小卒 著

上海科学技术出版社

预应力混凝土 框架抗震性能研究



预应力混凝土框架抗震性能研究

苏小卒 著

上海科学技术出版社

预应力混凝土框架抗震性能研究

苏小卒 著

上海科学技术出版社出版、发行

(上海瑞金二路 450 号)

新华书店上海发行所经销 上海江杨印刷厂印刷

开本 850×1156 1/32 印张 6.75 插页 4 字数 170 000

1998 年 10 月第 1 版 1998 年 10 月第 1 次印刷

印数 1—2 000

ISBN 7-5323-4620-X/TU·137

定价:18.00 元

本书如有缺页,错装或损坏等严重质量问题,

请向承印厂联系调换

内 容 提 要

本书是作者从事有粘结和无粘结预应力混凝土框架抗震性能研究的总结,并对国内外有关研究状况作了综述。

全书共十一章,内容包括静力反复荷载试验、模拟地震振动台试验、非线性有限元滞回分析、恢复力模型、结构数学模型参数识别、无粘结预应力筋的耗能效应、试验后预应力损失随时间的发展等专题,其中大部分内容取自作者的科研成果,是前人未曾做过的。特别是在非线性有限元滞回分析中首次实现了包括下降段在内的力-位移滞回曲线的计算,相应论文已被 SCI 索引和 EI 索引录入。

书中论述了主滞回、次滞回等概念,提出了完整模型、无粘结预应力筋的耗能效应等新概念,并从许多新的角度对预应力混凝土框架的抗震性能和机理进行了分析。

本书供结构工程专业的研究人员、教师、工程技术人员和大专院校的学生阅读,也可供相近专业人员参考。

序 言

为庆祝建校 90 周年,同济大学准备出一批专著。本书有幸通过评审成为其中之一,并被上海科学技术出版社选中和列入出版计划。

预应力混凝土在我国虽然已经得到大力发展,但是关于预应力混凝土抗震性能的研究还做得不多,在这方面争论还较多。在各种预应力混凝土结构形式中,框架是比较能够反映预应力混凝土特性的结构形式,特别在结构的抗侧力特性方面更是如此。因此,预应力混凝土框架的抗震性能比较能够代表预应力混凝土的抗震性能。本书总结了作者长期以来在预应力混凝土框架抗震性能方面的研究成果,虽然不够全面,但其内容却是独特的。由于目前国内还未见有正式出版的论述预应力混凝土抗震性能的专著,故本书的出版将有可能促进这方面的科研、设计和教学的发展。

本书是根据作者已发表的和未曾发表的科研成果编写的。内容包括有粘结和无粘结预应力混凝土框架的静力反复荷载试验、模拟地震振动台试验、非线性有限元滞回分析、恢复力模型、结构数学模型参数识别、试验后预应力损失随时间的发展以及无粘结预应力筋的耗能效应等。这些研究中均有前人未曾做过的新的内容,其中大部分专题则是前人未曾做过的。特别是作者在英国爱丁堡 Heriot-Watt 大学工作期间完成的预应力混凝土框架有限元滞回分析算法的改进,在非线性有限元滞回分析中首次实现了包括下降段在内的力-位移滞回曲线的计算(相应论文已被 SCI 索引和 EI 索引录入)。书中论述了主滞回、次滞回等概念,提出了完整模型、无粘结预应力筋的耗能效应等新概念,并从许多新的角度对预应力混凝土框架的抗震性能和机理进行了分析。书中除照片外的

全部插图均用 AutoCAD 软件依据数字化的资料和记录绘出,因而在描述试验和计算结果方面具有较高的精确性。

本书所涉及的各项研究工作显然不是我一个人的力量所能够完成的。这里有导师朱伯龙教授在作者读研究生期间所给予的指导和帮助,有在试验工作中余安东、毛文永、陆宗林、史孝成、宋秋杰、胡质理、方重、徐安洲、周金发、陈兰芳、陈丽燕、蔡金根等老师和杨圭根师傅所给予的帮助,也有刘祖华同志在提供微机绘图程序方面的帮助。近期的研究工作还得到了国家教委留学回国人员基金和上海市留学回国人员基金的资助。在此谨表深深的感谢。

虽然作者尽了很大努力,但由于研究工作本身带有探索性质,及限于作者的学识、时间和精力,书中仍难免会有不足之处,欢迎各位专家学者批评指正。

苏小卒

1997 年 9 月于同济大学建筑工程系

目 录

第一章 引言	1
第二章 与本研究有关的前人的工作	5
第一节 静力试验及理论	6
一、单调加载试验	6
二、重复加载试验	12
三、反复加载的恢复力特性试验	16
四、可修复性	21
五、有关试验方法	22
六、理论分析的模型及结果	22
第二节 动力试验及理论	25
一、动力试验	25
二、动力分析及结果	28
第三节 设计方法	28
一、无粘结预应力混凝土的静力设计方法	28
二、抗震设计方法	29
第四节 实际地震时预应力结构的表现	31
第五节 综合评述	31
一、无粘结预应力混凝土的静力特性	31
二、恢复力特性和动力特性	32
三、需要研究的问题	34
第六节 本研究的起源和概要	35
第三章 静力试验	36
第一节 试验概况	36
一、试件	37

二、加载及测点	41
第二节 主要试验结果及其讨论	44
一、试件破坏过程的宏观描述	44
二、滞回曲线	45
三、预应力筋的应变	47
四、试验后的预应力值	53
五、非预应力筋的应变	54
六、塑性铰	56
第三节 本章小结	56
第四章 非线性有限元滞回分析	58
第一节 结构离散与单元分析	58
第二节 预应力筋的处理	61
第三节 本构关系	62
一、混凝土的应力应变关系	62
二、非预应力筋的应力应变关系	64
三、预应力筋的应力应变关系	65
四、预应力筋与灰浆之间的粘结滑移关系	66
第四节 切线模量的正确选取	67
第五节 总体平衡方程	68
第六节 加位移的算法	69
第七节 加力和加位移之间的自动转换	69
第八节 预应力引起的节点荷载	70
第九节 预应力筋与灰浆间粘结滑移本构关系的实现	71
第十节 循环加载的滞回控制方式	72
第十一节 总体计算步骤	73
第十二节 试件的计算	76
第十三节 本章小结	79
第五章 模拟地震振动台试验	80
第一节 试验概况	80
一、相似条件分析	80

二、动力试验应注意的特殊问题	81
三、试件	82
四、输入振动时程及测点布置	84
第二节 主要试验结果及其分析	90
一、试验过程中试件的宏观表现	92
二、拟滞回曲线及其估计和分析	95
三、预应力筋的应变变化	100
四、传递函数及谱分析	104
五、位移和加速度反应	107
六、损伤变量	110
第三节 对几个问题的讨论	111
一、抗震机理	111
二、移动跳跃效应	112
三、窄带与宽带激励的破坏性	113
四、力-位移曲线下降段的作用	115
五、关于损伤指标的下降	115
第四节 本章小结	116
第六章 恢复力模型	117
第一节 主滞回和次滞回的概念	117
第二节 恢复力模型的组成	118
一、骨架曲线	119
二、主滞回规则	120
三、次滞回规则	121
四、模型的参数向量	122
第三节 恢复力模型的状态	122
第四节 本章小结	122
第七章 结构数学模型参数识别	124
第一节 数学模型和目标函数	125
第二节 完整模型识别法	125
第三节 改进的自适应步长随机搜索法	127

第四节 仿真识别	131
一、模型	131
二、单时程仿真	132
三、多时程仿真	135
第五节 关于阻尼的讨论	140
第六节 关于模型及其识别的讨论	142
一、关于模型类的识别	142
二、简单模型和复杂模型	142
第七节 预应力混凝土框架试件的数学模型的识别	144
一、线性识别	144
二、非线性识别	151
第八节 本章小结	164
第八章 无粘结预应力筋的耗能效应	165
第一节 运动微分方程及其解	165
第二节 每周期的能量消耗	168
第三节 粘滞系数 k_v 的测定	170
第四节 对试件的计算分析和讨论	170
一、微分方程解	171
二、近似解	172
三、 D_E 与总的每周能量消耗的比值	172
四、讨论	172
第五节 本章小结	173
第九章 试验后预应力损失随时间的发展	174
第一节 试验后预应力损失的测量	174
第二节 测量结果及其分析	175
一、间断点的消除	175
二、无粘结试件 UB-2 的测量结果分析	176
三、有粘结试件 B-1 的测量结果分析	178
第三节 讨论	180
第四节 本章小结	181

第十章	研究结果的几种比较分析和讨论	183
第一节	主滞回耗能和次滞回耗能	183
第二节	无粘结框架和有粘结框架的比较	184
第三节	预应力混凝土框架和钢筋混凝土框架的比较	186
第十一章	结语	189
参考文献		193

第一章 引言

预应力混凝土分为有粘结预应力混凝土和无粘结预应力混凝土。无粘结预应力混凝土即预应力钢筋与混凝土之间不存在粘结力的预应力混凝土,其形式可大致分为以下3种:(1)将受过无粘结涂敷处理的预应力筋直接固定在钢筋骨架中,浇混凝土并待混凝土达到一定强度后,再张拉无粘结预应力筋。这种无粘结预应力混凝土的特点是预应力筋处处与周围混凝土相接触。(2)像通常后张法一样,预应力筋放在预留孔道中,但张拉后不灌浆。这种方法的特点是预应力筋可能不与周围混凝土相接触,或只是预应力筋的部分区段与周围混凝土相接触。(3)预应力筋与混凝土构件的仅在几点处相接触^[132]。

目前,已在地震区建造了不少预应力混凝土结构,无粘结预应力混凝土的应用也越来越广泛。早在20世纪30年代,E. Freyssinet就试用过无粘结预应力混凝土,但未作推广^[1]。在40年代末,欧洲就已进行了无粘结预应力混凝土的试验研究和理论分析。1952年,无粘结预应力混凝土开始在美国得到实际应用^[2]。后来,加拿大、日本、英国、新加坡也开始应用无粘结预应力混凝土。进入60年代后,应用规模逐渐扩大。目前,应用无粘结预应力混凝土的趋势有增无减。在美国等国家里,无粘结预应力混凝土已被广泛地用于民用建筑中,在厂房、基础、桩以及压力容器、电视塔等特种结构中也得到了应用。在美国,有85%的后张预应力混凝土和99%的后张预应力平板采用了无粘结技术^[3]。日本从1972年起开始研究无粘结预应力混凝土,最近十几年来对这种混凝土的抗震性能尤感兴趣。我国从1974年开始逐步注意无粘结预应力混凝土的研究和应用^{[33][34]},并陆续建造了一些无粘结预应力结

构^{[4][22]},形成了成套的生产工艺。无粘结预应力混凝土已成为后张法预应力的主要发展方向。

长期以来国际上对预应力混凝土结构的抗震性能存在较大的意见分歧,对无粘结预应力混凝土的抗震性能研究得更少,意见分歧更大。然而,已建造的无粘结预应力混凝土结构多数分布在地震区,并且还不断在地震区建造新的无粘结预应力混凝土结构。因此,十分有必要研究无粘结预应力混凝土的抗震性能。事实上,无粘结预应力混凝土的抗震性能已成为争论的焦点之一。

问题的最早提出要追溯到 1964 年阿拉斯加大地震。在这次地震中,一幢名叫“四季大楼”的无粘结预应力结构被震塌。这件事在 1965 年第三届世界地震工程会议上引起了激烈的争论^[5]。有的代表认为倒塌的原因不在于无粘结预应力混凝土本身,而在于主要承受侧向力的非预应力电梯井筒壁根部的钢筋搭接的破坏,有的代表则认为倒塌的主要原因在于无粘结预应力板的首先破坏。会议对此问题没有取得一致意见。但不管怎样,四季大楼倒塌的既成事实,还是引起了人们对预应力结构抗震性能的怀疑和不安。会上, J. Despeyroux^[9]还正式提出了预应力混凝土能否作为抗震结构的问题。

由于存在分歧,在实用上便各行其事。在美国,以林同炎为代表的学派推崇使用无粘结预应力混凝土,相应地,工程界在地震区建造了大量的无粘结预应力结构;在新西兰,以 R. Park 为代表的学派则认为在地震区所有的后张预应力混凝土均须灌浆,因而,在新西兰,无粘结预应力混凝土是被禁止应用的;在澳大利亚,工程界几乎一致认为无粘结预应力混凝土不仅不适于抗震结构,就连作为普通承重结构也是不适宜的,因而,在澳大利亚,无粘结预应力混凝土也是被禁止应用的。

与此相应,各国规范对无粘结预应力混凝土的应用,特别是在地震区的应用,意见亦不一致。CEB-FIP 样本规范规定^[90],除非给出充分证明,否则在框架构件中预应力筋应该灌浆。法国抗震设计规范及原苏联地震区建筑设计规范明确规定在抗震结构中不得使

用无粘结预应力筋^{[6][7]}。一些规范则没有提到无粘结预应力混凝土在地震区的应用问题,如我国规范即是如此。

国际预应力混凝土协会(FIP)对无粘结预应力混凝土的态度也在逐步转变^[1]。1972年以前,FIP认为在后张预应力混凝土中灌浆是必要的。在1974年FIP第七届会议上,由于意见分歧未能统一看法。由于无粘结预应力混凝土的迅速发展,在FIP第八届会议上,在加了若干较强限制的条件下,无粘结预应力混凝土被认为可以在地震区应用。然而,正如会议主席所说,意见分歧还是相当大的。在1982年FIP第九届会议上,日本六车教授发言认为无粘结部分预应力混凝土对抗震是有效的,值得提倡应用,是今后的一个发展方向。在会议讨论时,竹本清介绍了有关无粘结预应力筋在地震时安全性的试验结果^[8]。

在国际上存在较大意见分歧的情况下,无粘结预应力混凝土在国内外仍得到了较大发展,且日益受到重视。这主要是因为无粘结预应力混凝土与有粘结预应力混凝土相比有许多优点:(1)经济性。无粘结技术免去了繁琐的灌浆工艺,使预应力筋可在专门工厂中成批生产,因而造价较低。(2)必要性。在后张预应力平板等结构中,有时几乎无法灌浆,故只能用无粘结预应力技术。(3)可靠性。在预应力混凝土原子能反应堆等结构中,为确保安全及检查更换方便起见,只能用无粘结预应力技术。(4)可预见性。由灌浆引起的不确定性因素是较大的。因此,就理论估计的精度而言,有粘结混凝土不如无粘结混凝土。(5)施工方便。(6)其他。诸如在大幅反复荷载下不存在粘结退化问题,等等。

有粘结与无粘结预应力混凝土之间有不少差异,但同作为预应力混凝土,二者又有许多共性。人们对预应力混凝土的抗震性能亦存在较大的意见分歧,只是对无粘结预应力的分歧要比对有粘结预应力的分歧大些。

在80年代中期,虽然到那时为止已进行了不少研究,但人们对预应力混凝土特别是无粘结预应力混凝土的抗震性能的认识还很不完善,意见分歧还较大。1982年2月至1987年2月,笔者师

从朱伯龙教授读研究生,在导师的指导下开始从事预应力混凝土框架抗震性能的研究。获博士学位后,在英国做博士后期间以及回国后,仍继续从事这方面的研究。所得预应力混凝土框架抗震性能方面的主要成果皆总结于本书中。

结构在地震作用下的反应取决于主要抗侧力结构的性能。零散的预应力构件在结构中的应用一般不会显著地改变原主要抗侧力结构的性能,而预应力框架作为主要抗侧力结构则明显地具有预应力混凝土的特性。所以,对预应力框架抗震性能的研究,从本质上接触到了预应力结构抗震性能的问题。

在本书中,除非另有说明,“钢筋”一词仅表示非预应力筋。在有关比较的图中,均以实线表示原值或试验值,以虚线表示计算值或识别值。

第二章 与本研究有关的前人的工作

预应力混凝土的抗震性能在世界上较为正式地引起注意是1965年的事情。这一年发生了两件有关的事。一件是J. Despeyroux^[9]在第三届世界地震工程会议上正式提出了以预应力混凝土作为抗震结构的问题提交会议讨论。这个较为新奇的问题引起了人们的兴趣,许多代表包括像居易翁这样的预应力专家参加了讨论;有赞成的,也有不赞成的。所提出的论点不少是对的,但也有一些论点在今天看来有明显的错误,这反映了当时人们对这个问题的认识是较模糊的。另一件事是林同炎发表了一篇论文,对预应力混凝土的抗震性能作了较为肯定的论述^[10]。

当时提出的主要问题有如下几点:(1)承受反复荷载时由于偏心预应力筋而可能产生的不利影响。(2)延性及吸能性能的好坏。(3)节点设计问题。(4)由于预应力混凝土结构的柔性而产生的问题。(5)预应力混凝土结构的地震荷载的确定。(6)适用于地震区的结构形式。

在1965年以前,虽然有不少文献论述了预应力混凝土的动力特性,但多数是研究高周低幅疲劳问题的。尽管如此,其中一些结果对于推断预应力混凝土的抗震性能仍有相当大的参考价值。

自1965年以来,对有粘结预应力混凝土的抗震性能的研究进行得较多,已弄清了其主要性能。相比较而言,对无粘结预应力混凝土的抗震性能的研究则进行得很少。事实上,即使对无粘结预应力混凝土在静力荷载作用下的特性,人们的认识还远不够完善,而动力特性一般来说是要以静力特性为基础的。

文献回顾将以80年代中期以前的文献为主,以此说明我们从那个时候开始的关于预应力混凝土框架的抗震性能的研究工作所

处的历史背景。

第一节 静力试验及理论

一、单调加载试验

(一) 梁

有粘结预应力梁的试验做得较多,其特性也已为大家所熟知。

较早进行无粘结梁试验的是 Baker,他提出用系数 F 来反映无粘结预应力筋的应力情况:

$$F = \frac{\text{预应力筋应变变化}}{\text{破坏截面处与预应力筋相邻的混凝土的应变变化}} \quad (2-1)$$

1953 年, F. W. Gifford^[16] 和 Stephen Revesz^[17] 分别做了较为系统的试验, 得出了关于无粘结预应力梁特性的较为系统的结果, 基本上认识了无粘结预应力梁的大致特性。1963 年, 美国规范 ACI 318-63 根据当时的研究成果规定: 设计时无粘结预应力筋的极限应力为有效预应力加一个常量(下限)。1959 年, 英国规范 CP 115 规定了无粘结预应力梁极限弯矩的计算法, 但由于未考虑高跨比的影响, 计算误差较大。1969 年, F. N. Pannell^[18] 着重以高跨比作为变量进行了试验研究并提出了计算方法。英国规范 CP 110 采纳了根据他的计算方法而得到的数据。还是在 1969 年, G. I. N. Rozvany 和 J. F. Woods^[19] 通过理论预测及实验验证发现了无粘结预应力梁当配筋率太小时会在开裂后出现“失稳”。同一年, Kenneth B. Bondy^[20] 认为只要按规范去做, “失稳”现象事实上是不存在的。1971 年, Alan H. Mattock^[21] 等人通过试验研究提出了无粘结预应力筋极限应力的新的经验公式, 这一结果被美国规范 ACI 318-71 采纳。1978 年, 云南预应力钢索混凝土研究小组进行了无粘结预应力钢索混凝土的试验研究^[22]。1979 年, 中国建筑科学研究院杜拱辰和陶学康做了 10 根跨高比为 20 的 T 形和矩形无粘结预应力梁的试验, 并提出了相应的经验公式^[23]。在 1979