

无粘结预应力 混凝土结构

——试验、理论及应用

杜进生 著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



无粘结预应力混凝土结构

——试验、理论及应用

杜进生 著



机械工业出版社

前 言

体内或体外无粘结预应力混凝土结构是指预应力筋与其周围混凝土没有粘结作用，仅通过锚具和转向块对结构施加预应力的一种后张预应力混凝土结构体系。与后张有粘结预应力混凝土结构相比，无粘结预应力混凝土构件由于不需预留孔道，可减小结构尺寸，从而减轻结构自重；施工时，无制孔、压浆等工序，施工速度快，综合效益高。另一方面，也正是由于无粘结预应力筋与其周围混凝土没有粘结作用，因此在外荷载作用下，预应力筋的应力变化不能由单个截面的应变相容来确定，而与结构的变形有关，即无粘结筋的应力变化与结构变形耦合。这一特点给无粘结配筋结构的设计计算带来了困难。本书是对解决这一困难的研究成果的系统总结。

本书共8章。第1章为绪论，介绍了无粘结配筋结构的概念和特点、发展历程及存在的问题；第2章论述了CFRP筋及钢绞线无粘结预应力混凝土梁的试验研究；第3章阐述了无粘结预应力筋极限应力计算方法；第4章论述了使用荷载下无粘结部分预应力混凝土梁的应力分析方法；第5章、第6章、第7章和第8章则分别对无粘结部分预应力混凝土梁的挠度、延性、可变形性及可靠度等问题进行了研究。

本书所述的各项研究，得到了东南大学赖国麟教授、清华大学刘西拉教授、香港大学区达光教授的悉心指导和启发，也得到了中交第一公路勘察设计院有限公司刘士林、牛宏、赵永国、汪晶、王学军、许宏元教授级高级工程师的大力支持和帮助，硕士研究生赵益鹏参加了第2章的试验工作。在此一并表示诚挚的感谢。

杜进生

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 无粘结预应力混凝土结构的概念及特点	1
1.2 无粘结预应力混凝土结构的发展历程	2
1.3 存在的问题	8
第 2 章 CFRP 及钢绞线无粘结预应力混凝土梁的试验研究	11
2.1 试验梁的设计和制作	11
2.2 试验过程	19
2.2.1 钢绞线的有效预应力和张拉控制应力	20
2.2.2 CFRP 筋的有效预应力和张拉控制应力	21
2.2.3 综合配筋指标	22
2.3 试验数据分析	22
2.3.1 加载全过程与破坏形态	22
2.3.2 荷载-挠度全过程曲线	26
2.3.3 荷载-预应力筋应力增量曲线	30
2.3.4 荷载-非预应力受拉钢筋应变曲线	33
2.3.5 无粘结预应力筋应力增量与跨中挠度的关系曲线	39
2.3.6 连续梁的支座反力变化及其内力重分布	42
2.3.7 试验梁弯矩重分布实测值与主要规范计算值的对比	45
2.4 小结	47
第 3 章 无粘结预应力筋极限应力计算方法研究	49
3.1 引言	49
3.2 既有典型方法评述	49
3.2.1 粘结折减系数法	49
3.2.2 根据截面配筋指标而建立的回归公式	50
3.2.3 基于变形或等效塑性铰区长度的计算方法	51
3.3 三个独立研究者的试验及参数 φ 的分析	59
3.3.1 香港大学的试验	59
3.3.2 北京交通大学的试验	60
3.3.3 Ghallab 和 Beeby 的试验	60

3.3.4 试验梁参数 φ 的分析	64
3.4 连续梁的等效塑性铰区长度	66
3.5 建议的无粘结预应力筋极限应力计算公式	67
3.6 建议公式在公路桥梁中的应用	68
3.6.1 具体表达式	68
3.6.2 计算示例	70
3.7 小结	72
第4章 使用荷载下无粘结部分预应力混凝土 (UPPC) 梁的应力分析	73
4.1 引言	73
4.2 既有方法评述	73
4.3 参数 λ 的数值分析	77
4.3.1 数值计算结果的验证	80
4.3.2 参数分析	81
4.4 建议的使用荷载应力计算方法	84
4.5 与试验结果的对比	86
4.6 小结	87
第5章 UPPC 梁的挠度分析	88
5.1 引言	88
5.2 UPPC 梁中开裂截面惯性矩 I_{cr} 的简化计算方法	88
5.3 简化计算 I_{cr} 方法的验证及评述	91
5.3.1 杜拱辰和陶学康的试验梁	91
5.3.2 北京交通大学的试验梁	95
5.3.3 Ghallab 和 Beeby 的试验	96
5.3.4 有效惯性矩 I_e 随外荷载弯矩的变化情况	98
5.3.5 建议方法与 PCI 设计手册方法的对比	99
5.4 小结	100
第6章 UPPC 梁的延性分析	102
6.1 引言	102
6.2 曲率延性系数	102
6.3 数值分析	103
6.3.1 数值模型及材料特性	103
6.3.2 数值分析过程	106
6.3.3 数值计算结果的验证	107
6.3.4 参数研究	108
6.4 无粘结部分预应力混凝土梁与相应粘结部分预应力混凝土梁的延性对比	112
6.5 小结	113

第7章 FRP 无粘结预应力混凝土梁的可变形性分析	114
7.1 引言	114
7.2 各类可变形性指标	114
7.2.1 基于能量的指标	114
7.2.2 基于挠度的指标	115
7.2.3 基于弯矩和变形的指标	116
7.3 FRP 预应力混凝土梁的数值分析	117
7.4 数值计算结果与试验结果对比	118
7.4.1 Ghallab 和 Beeby 的试验梁	118
7.4.2 Grace 的试验梁	119
7.5 可变形性指标比较	120
7.5.1 分析中所考虑的参数	120
7.5.2 代表性结果及讨论	120
7.6 小结	124
第8章 UPPC 梁的可靠度分析	125
8.1 引言	125
8.2 可靠度与可靠指标	126
8.3 随机变量的极值理论	127
8.3.1 n 个独立同分布随机变量极值的确切分布	127
8.3.2 n 个独立同分布随机变量极值的渐近分布	129
8.4 预应力筋的面积变化及其对结构可靠度的影响	130
8.4.1 预应力筋的面积变化	130
8.4.2 预应力筋面积变化所引起的构件抗力变化	131
8.4.3 对构件可靠度的影响	132
8.5 小结	136
参考文献	137

第 1 章 绪 论

1.1 无粘结预应力混凝土结构的概念及特点

体内或体外无粘结预应力混凝土 (Unbonded Prestressed Concrete, UPC) 结构是指预应力筋仅通过锚具及转向块对结构施加预应力的一种后张预应力混凝土结构体系。与传统的将预应力筋布置于混凝土截面内的后张有粘结预应力混凝土结构相比,无粘结预应力混凝土结构的主要特点有:

- 1) 由于在构件中不设预埋孔道,可使腹板厚度减小,从而减轻结构自重。
- 2) 梁体混凝土灌注无管道阻碍,易保证质量,从而提高结构的耐久性。
- 3) 可方便地检测预应力筋的腐蚀程度,必要时可更换预应力筋。

4) 无制孔、压浆等工序,结合逐跨施工法及悬臂施工法,施工速度快,综合效益高。

5) 当无粘结预应力用于既有桥梁的加固时,可以较明显地提高结构的承载能力和改善结构的使用性能,同时对桥下净空几乎无影响,并且施工时可以最大限度地减少对车辆交通的干扰。

正是由于无粘结预应力具有的上述诸多优点,国际结构混凝土协会 (FIB) 前主席 Virlogeux^[1] 在《预应力混凝土桥梁的新趋势》一文中指出:“目前,预应力混凝土桥梁发展的一个主要趋势是不断增加应用体外无粘结预应力技术。”促使预应力混凝土桥梁中更多地采用体外无粘结预应力的一个现实原因是结构安全性和耐久性的要求。对于管道压浆的后张预应力混凝土桥梁,原先认为管道一经压浆,预应力筋的防腐即有保障;但通过对事故的检查发现,事实并非如此;加上预应力筋的状态不易检查,不易更换等情况,英国运输部在 1992 年颁布命令:“在新标准颁布以前,不得再采用管道压浆的后张预应力混凝土桥梁”。德国也曾发文严格限制采用体内管道压浆的后张预应力混凝土桥梁^[1]。

在 2002 年至 2007 年进行的欧盟研究行动计划“新材料和新体系的预应力混凝土结构”(COST Action 534 “New Materials and Systems for Prestressed Concrete Structures”)中,以纤维复合材料为无粘结预应力筋的结构体系是该计划的一个重要组成部分^[2]。

1.2 无粘结预应力混凝土结构的发展历程

事实上,世界上第一座预应力混凝土桥是采用无粘结预应力技术于1936年建造的,该桥位于德国的Aue,为主跨69m的悬臂梁桥,比第一座体内有粘结预应力混凝土桥早一年建成。20世纪50年代,比利时、法国也建造过几座体外预应力混凝土桥。但这些早期的体外预应力混凝土桥梁由于没有很好解决预应力筋的防锈蚀等方面的问题,未能体现出工程应用上的优越性,导致体外预应力混凝土桥梁的发展在整个20世纪60年代处于停滞阶段^[3]。20世纪70年代以来,随着斜拉桥的复兴,节段施工的大量应用及预应力筋防腐技术等的改进,使体外预应力桥梁得到快速发展。自法国人Muller在1979年将体外无粘结预应力成功应用于美国佛罗里达的Long Key桥后,美国在20世纪80年代初相继修建了佛罗里达州的Seven Mile桥、明尼苏达州的Wiscasset桥、阿拉斯加州的Dauphin Island桥等。美国佛罗里达州的Mid-Bay桥和Garcon-Point跨海大桥(该桥长5782m)采用了干接缝、体外无粘结预应力、节段预制逐跨拼装施工法,分别在1992年9月和1998年3月创造了逐跨拼装施工一周架桥290m和299m的世界纪录^[3-5]。

2000年建成的泰国曼谷邦纳高速公路高架桥,全长55km,几乎全部采用体外无粘结预应力、干接缝、逐跨拼装技术,整个工程施工期仅26个月。邦纳高架桥不仅是世界上最长的桥梁,同时也创造了采用预制节段逐跨拼装施工桥梁的世界之最^[6]。韩国首尔沿江高架桥一期和四期工程采用了预制节段逐跨拼装施工、干接缝、体外无粘结预应力技术。1991年建成通车的墨西哥蒙特雷地铁线高架桥梁(全长17.6km),采用体外无粘结预应力技术、短线法偶配浇筑节段、环氧树脂胶接缝、逐跨施工法。2000年建成的马来西亚吉隆坡轻轨采用了预制节段逐跨拼装施工法。美国亚特兰大轻轨采用了预制节段逐跨拼装法、全体外预应力技术、干接缝技术。2000年建成通车的法国TGV地中海线的阿维尼翁特大桥,是首次在高速铁路桥梁上采用预制节段上行式移动支架悬臂拼装的体外预应力结构。目前,世界范围内采用体外无粘结预应力技术建造的桥梁日益增多。

在法国,约80%的新建大桥使用体外预应力^[1]。随着梁体分节段预制,现场使用体外预应力拼装桥梁在工程实践中的发展,美国、日本、德国等相继在桥梁设计和施工规范或规程中制订了相关的条款。美国将节段预制体外预应力混凝土结构设计条款正式纳入了1994年AASHTO桥梁设计规范,1998年AASHTO、PCI、ASBI联合发布了预制节段箱梁标准^[7]。1996年的日本《铁路结构设计标准和解释》对节段式混凝土桥的设计做了相应规定。1999年德国制订了《体外

无粘结预应力结构设计指南》。虽然这些设计指南的相关规定还有待于进一步完善,但毕竟为设计者提供了依据。

我国早期主要采用体外预应力对既有桥梁结构进行加固,而现在则是在新建桥梁结构中的应用不断增多。1990年建成通车的福州洪塘大桥引桥采用了与Long Key桥相类似的体外预应力体系,这是我国首次采用体外预应力技术的预应力混凝土连续梁桥。中交第一公路勘察设计院自1999年以来就从事体外无粘结预应力桥梁的设计、加固设计及与施工有关的工作和研究,到目前为止已在全国各地成功地实施于十多座桥梁,如深圳梅观高速公路观澜河大桥、坂田桥、深圳机荷高速公路的平湖大桥与黄鹤立交CD2号匝道桥等均属于加固项目;东莞市莞深高速莞樟立交及沪宁高速锡澄运河桥等则属于加固设计与施工总承包项目;宁夏回族自治区古王高速蔡家梁桥与西安5101工程专用桥梁等则属于新设计的体外无粘结预应力桥梁。所竣工的桥梁虽同为体外无粘结预应力桥,但其设计及施工方法各异,均有各自不同的风格。如在观澜河桥的缺陷处理中采用了体外无粘结预应力加固手段和施工工艺,在桥梁加固领域中具有一定的代表性,桥梁加固后刚度得到大幅度的提高,箱梁通车运营时的振幅明显减小,改善了箱梁的运营环境,达到了设计加固要求。在CD2号匝道桥($4 \times 28\text{m} + 2 \times 40.5\text{m} + 5 \times 28\text{m}$ 预应力混凝土连续曲线箱梁)的缺陷处理中采取了在箱梁两侧腹板上各增设2束每束由15根直径15.24mm的钢绞线组成的体外无粘结预应力钢束的加固措施。该桥加固完成后,箱梁的刚度和应力均得到了较大的改善,并通过了荷载试验,取得了较为理想的加固效果。

2001年建成的北京学知桥采用了体外无粘结预应力钢-混凝土组合梁的结构。2003年,北京四丰立交桥1号、2号匝道桥采用了体外无粘结预应力预制节段拼装混凝土箱梁结构。香港自青衣北沿海道和马鞍山T7道也采用了体外无粘结预应力逐跨拼装技术,有效地利用节段施工法克服了陡峭地形带来的不便,加快了施工进度。苏通长江大桥引桥采用了75m跨径节段预制拼装的体外无粘结预应力混凝土箱梁结构,其体外无粘结预应力体系的构造和布置情况分别如图1-1和

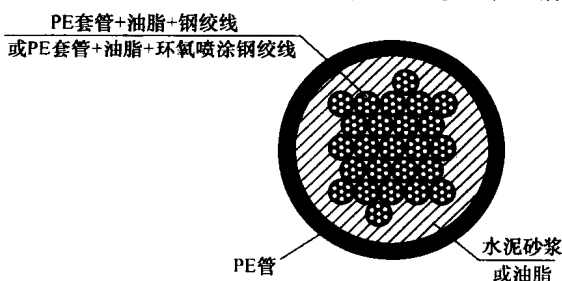


图1-1 苏通大桥引桥体外无粘结预应力筋的构造

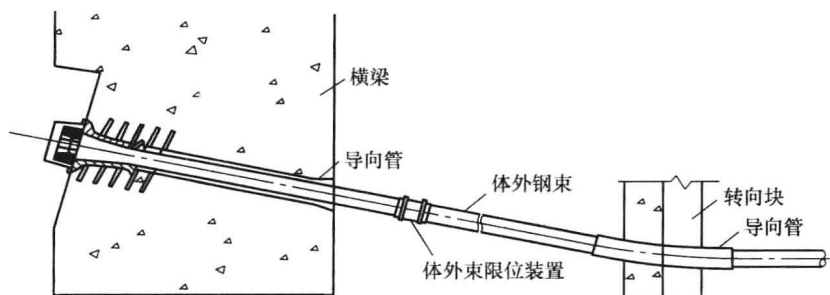
图 1-2 所示^[8]。

图 1-2 苏通大桥引桥体外预应力体系

除高强度钢筋外，以纤维复合材料为无粘结预应力筋的桥梁结构也开始出现。纤维复合材料（FRP）是由包裹在树脂母体中的连续纤维做成的复合材料，纤维起加劲作用，树脂主要起粘合纤维的作用。纤维复合材料视其所用纤维的不同可分为碳纤维复合材料（CFRP）、玻璃纤维复合材料（GFRP）及芳纶纤维复合材料（AFRP）三大类。在这三类纤维复合材料中，以 CFRP 在混凝土结构中的应用为最多，这与其抗拉强度和弹性模量较高，且在多种外界环境条件下的稳定性较好等特性是分不开的。Grace 等^{[9][10]}通过系列研究建议采用体内先张有粘结 CFRP 筋与体外无粘结 CFRP 筋相结合的预应力配筋措施。因为这样的配筋方式可使结构破坏呈现延性破坏模式。以 Grace 的研究为基础而建造的 Bridge Street 桥，是美国第一座 CFRP 预应力混凝土公路桥。该桥全长 62m，由 3 跨各约 20m 的简支梁构成；全桥由两座平行独立的结构组成，即结构 A 和结构 B。结构 A 的上部结构采用常规的 AASHTO III 型梁，而结构 B 则由 12 根 CFRP 预应力混凝土双 T 形梁构成（图 1-3）。



图 1-3 美国第一座 CFRP 体外预应力混凝土桥

除双 T 形梁外, Grace 也试验研究了采用体内先张有粘结筋与体外后张无粘结筋相结合的 CFRP 混凝土连续梁及箱梁。连续梁的预应力筋布置如图 1-4 所示。连续梁的模型试验表明, 体内先张有粘结 CFRP 筋的张拉控制应力值不应超过其抗拉强度的 60%, 而体外后张无粘结 CFRP 筋的张拉控制应力应为其抗拉强度的 40% 左右。

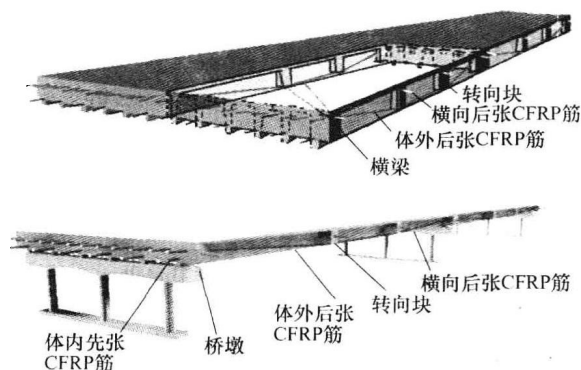


图 1-4 体内先张有粘结筋与体外后张无粘结筋相结合的 CFRP 预应力混凝土连续梁

国内多采用 CFRP 片材对既有工程结构物进行粘贴加固, 而以 CFRP 棒材作为预应力筋的混凝土结构则较少。目前, 在新建预应力混凝土桥梁及既有桥梁的加固中, 体外无粘结预应力的应用逐渐广泛。以碳纤维复合材料为体外预应力筋, 不仅可以保持体外无粘结预应力技术的优势, 还可以充分发挥碳纤维复合材料的高强、轻质、耐腐蚀及抗疲劳等优良特性。另一方面, 由于 CFRP 筋的极限应变远小于高强钢筋的极限应变, CFRP 筋对应变的突然增加比较敏感, 预应力混凝土构件关键截面 CFRP 筋应变的急剧变化有可能导致构件过早失效。由于预应力混凝土梁中关键截面体外无粘结预应力筋的应变比相应粘结预应力筋的应变小很多, 因此, Burgoyne^[11] 及陶学康^[12] 均指出: 单从材料性能出发, CFRP 筋更适合应用于体外及体内无粘结预应力混凝土结构中。

荷兰 Dintelhaven 桥是首次在大跨度预应力混凝土箱梁桥中采用碳纤维复合材料 (CFRP) 为体外无粘结预应力筋的桥梁^[13]。该桥位于荷兰鹿特丹港, 由 2 座平行的箱梁桥组成, 主跨约为 185m, 采用悬臂施工法。1996 年, 该桥业主决定在 Dintelhaven 桥的其中一幅桥上用 4 根 CFRP 体外无粘结预应力束代替原设计的 4 根传统的后张有粘结预应力钢绞线束。每根 CFRP 束由 91 个直径为 5mm 的 CFRP 筋组成。4 根 CFRP 束的长度均为 75m, 而 CFRP 预应力束沿桥纵向的布置

如图 1-5 所示。为了解决 CFRP 预应力筋在 Dintelhaven 桥应用时面临的多种技术难题，成立了专门委员会，该委员会包括钢筋混凝土及 FRP 领域的多位知名专家。

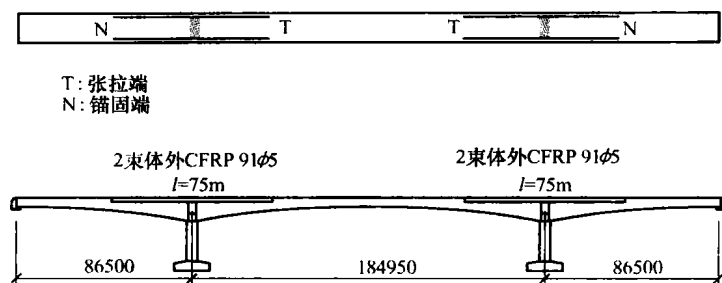


图 1-5 4 根体外无粘结预应力 CFRP 束在 Dintelhaven 桥中的位置

采用体外无粘结预应力筋，可使该桥的箱梁顶板的厚度减小，但该桥当时考虑到如果采用更多的 CFRP 体外束，步子迈得太大。为了积累工程经验，故先采用 4 根 CFRP 束，并随时监测其性能变化。将来即使需要换束，也容易处理。CFRP 筋具有良好的抗腐蚀及抗疲劳性能，因而可不采取额外的防腐措施。这可补偿 CFRP 筋代替钢绞线后由于 CFRP 筋材料本身及其锚具造价较高而引起的费用。

由于 CFRP 筋的横向强度（抗剪强度）较低，因此研究开发出可靠的 CFRP 筋锚固系统是必须解决的难题之一。在 Dintelhaven 桥中，仍采用通过环氧树脂将 CFRP 筋粘结在钢套筒中，而钢套筒则通过螺母锚固于承压板上的锚固方式。所不同的是，环氧树脂的硬度（弹性模量）沿钢套筒长度是变化的。因为试验研究表明，如果钢套筒中填充的环氧树脂的硬度是均匀的，则沿被握裹的 CFRP 筋上所分布的剪应力很不均匀（图 1-6），很容易导致 CFRP 筋被剪断。在 Dintelhaven 桥中，为使钢套筒中剪应力分布较为均匀，采用了 6 层不同硬度（弹性模量）的环氧填充层（图 1-7）。钢套筒中还设置了 3 个玻璃纤维（GFRP）隔板以使 91 个直径为 5mm 的 CFRP 筋适当分散为扇形；另外，还用 GFRP 端板与 CFRP 筋的末端相粘结。

Dintelhaven 桥中每根 CFRP 体外无粘结束是按照与原设计的钢绞线体外束（由 19 根直径为 12.9mm 的钢绞线组成）承受相同的后张力 2650kN 来设计的。考虑到系统的安全性和目前对 CFRP 筋性能的了解，每根 CFRP 束由 91 根直径为 5mm 的 CFRP 筋组成。

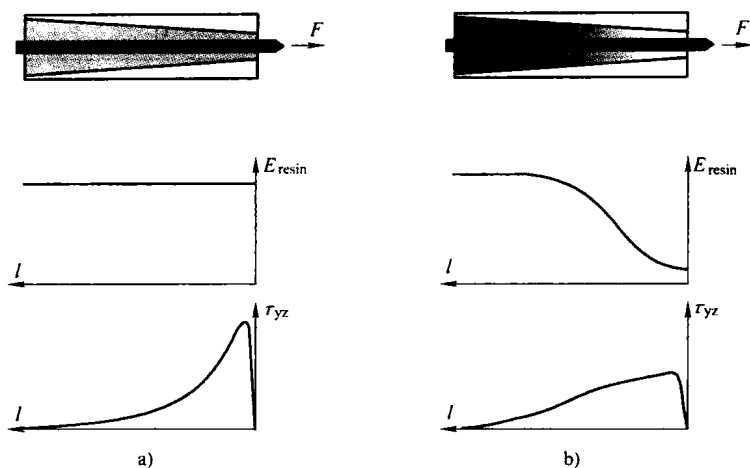


图 1-6 CFRP 筋锚具中的荷载传递机理

a) 环氧树脂的弹性模量（硬度）沿长度为常量 b) 环氧树脂的弹性模量（硬度）沿长度为变量

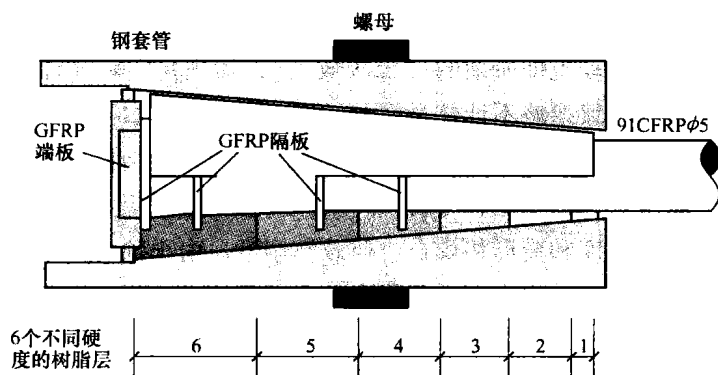


图 1-7 Dintelhaven 桥中 CFRP 预应力束的锚固系统

图 1-8 所示为钢绞线体外无粘结束与等效的 CFRP 体外无粘结束的横截面构造。表 1-1 则给出了两种材料的相关特性。

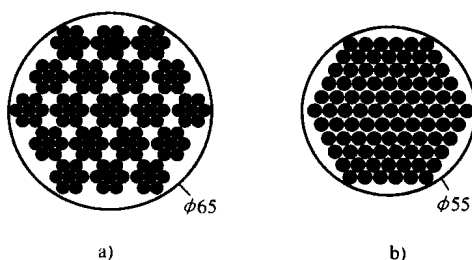


图 1-8 体外无粘结束的横截面组成

a) 钢绞线体外无粘结束（19 根直径 12.9mm 的钢绞线） b) CFRP 体外无粘结束（91 根直径 5mm 的 CFRP 筋）

表 1-1 钢绞线及 CFRP 筋的材料特性对比

材料特性	直径 12.9mm 钢绞线	直径 5mm CFRP 筋	
	设计值	设计值	实测值
横截面积/mm ²	100	19.63	19.63
抗拉强度/MPa	1860	2400	3086
拉断力/kN	186	47	61.3
弹性模量/GPa	195	160	177
极限应变(%)	3.5	—	1.8
单位重量/(g/m)	785	31	31

1.3 存在的问题

1) 在配有体外无粘结预应力筋的结构中, 外荷载作用下体外预应力筋的重心与梁体存在相对移动也即所谓的“二次效应”, 为满足实际设计工作需要和简化抗弯强度计算, 一般忽略不计体外预应力筋的“二次效应”及转向块处的摩擦力的影响。体外无粘结预应力筋通常近似地按体内无粘结预应力筋来处理。与有粘结预应力混凝土结构相比, 分析体外及体内无粘结预应力混凝土结构的最大困难在于: 结构的强度和变形相耦合, 荷载作用下, 由于预应力筋与混凝土之间可以发生滑动, 预应力筋应力增量不能由单个截面的应变相容来确定, 而与结构的变形有关(图 1-9)。为获得无粘结预应力混凝土梁的正截面抗弯强度, 必须首先确定体外预应力筋的极限应力。许多学者对体外或体内无粘结预应力筋的极限应力进行了试验及分析研究, 但这些研究几乎全部以钢材为研究对象, 很少以 FRP 作为研究对象。由于 FRP 与钢材在弹性模量等方面有较大的差异, 因此有

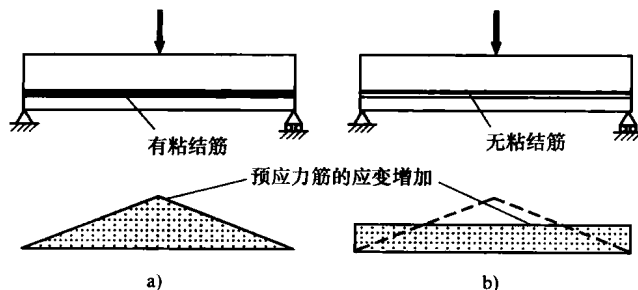


图 1-9 外荷载作用下预应力筋的应变增加

a) 有粘结预应力梁 b) 无粘结预应力梁

必要对既有确定无粘结预应力筋极限应力的方法进行深入分析,并建立既适合于高强钢筋又适合于 FRP 预应力筋的极限应力计算方法。

2) 延性是指材料、截面、构件或结构破坏前,在其承载能力没有显著下降的情况下,抵抗非弹性变形的能力。延性不仅使结构破坏前能给人以一定的征兆,而且对结构抗震,以及超静定中的弯矩重分布等均有重要作用。在通常的钢筋混凝土及预应力混凝土结构中,一般以构件关键截面的曲率延性系数来衡量截面的延性大小。曲率延性系数为关键截面失效时的曲率 ϕ_u 与关键截面屈服时的曲率 ϕ_y 的比值。图 1-10 所示分别为美国的 Naaman^[14] 和新西兰的 Park^[15] 关于失效曲率 ϕ_u 和屈服曲率 ϕ_y 的定义。对结构而言,作为构件或截面在承载能力没有显著下降的情况下承受变形能力的延性是和强度或极限承载能力同等重要的。为方便设计并确保结构具有良好的延性性能,各设计规范大都采取限制破坏时截面受压区高度或配筋指标等措施。而在计算破坏时截面受压区高度或配筋指标时,必然涉及无粘结预应力筋的极限应力取值问题。但是,设计规范的无粘结预应力筋极限应力计算公式一般是由试验回归及取下限的方法得到的,当用来计算截面的抗弯强度时,是偏于安全的;但当用于延性性能的验算时并不偏于安全,有时反而会高估截面的延性性能。而关于无粘结预应力混凝土梁的延性性能及其与体内有粘结预应力混凝土梁延性性能的差异等问题,目前的研究很少。

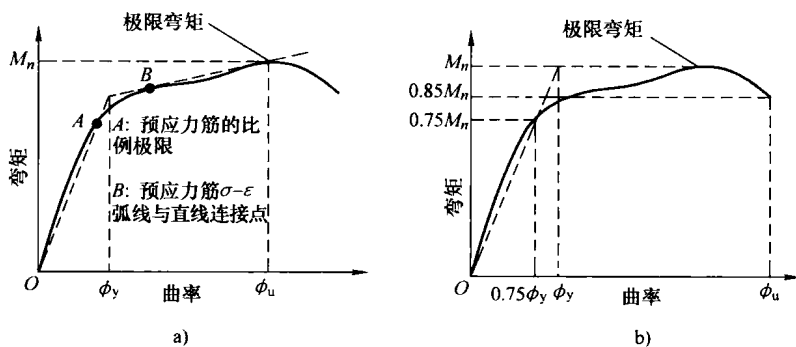


图 1-10 两种屈服曲率 ϕ_y 和失效曲率 ϕ_u 的定义

a) Naaman b) Park

3) GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》^[16]及 JTG D62—2004《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》^[17]均是以概率极限状态设计方法为基础的,在结构构件设计中通常以最不利截面进行控制计算,在抗弯构件的可靠度计算中,钢筋截面积是一个随机变量,采用的是针对一个截面的钢筋截面积的分布模型,但是在采用无粘结预应力配筋的受弯构件中,相邻锚具间预应力筋长度

范围内只要任意一截面失效，则整个构件也将失效。预应力筋的截面积不应是一个简单的随机变量，而是一个沿预应力筋长度方向分布的随机过程（图 1-11）。因此无粘结预应力配筋构件的可靠度计算中预应力钢筋截面积应该采用钢筋全长内的截面积最小值，这势必比某一个截面上的截面积要小，从而构件的可靠度水平也要降低。定量估算这一可靠度水平的降低值有助于消除人们对无粘结预应力配筋结构安全性的某些担心。

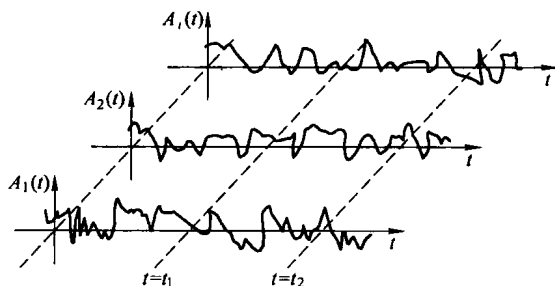


图 1-11 沿长度方向无粘结预应力筋的截面积变化

第2章 CFRP及钢绞线无粘结 预应力混凝土梁的试验研究

2.1 试验梁的设计和制作

试验梁共计7根,包括4根编号分别为B1、B2、B3和B4的简支梁,3根编号分别为B5、B6和B7的两等跨连续梁。试验梁设计时,CFRP无粘结预应力筋的有效预应力为660MPa,钢绞线无粘结预应力筋的有效预应力为900MPa,混凝土立方体强度取40MPa。7根试验梁截面尺寸均相同,截面宽度为200mm、高度为300mm。

4根简支梁的设计长度均为3200mm。B1、B2、B3和B4分别采用直径为14mm、16mm、16mm和18mm的HRB335级钢筋为非预应力纵向受拉钢筋。每根梁的无粘结预应力筋为2束,其中B1、B3和B4的每束无粘结预应力筋由3根直径为7mm的碳纤维筋组成;B2的每束预应力筋则采用直径为15mm的带塑料套管的无粘结钢绞线。4根简支梁的架立钢筋均采用直径为12mm的HRB335级钢筋;箍筋为直径8mm的HPB300级钢筋。

3根连续梁的设计长度均为5200mm。试验梁的梁底、梁顶非预应力纵向受力钢筋完全相同,B5、B6和B7梁底、梁顶非预应力纵向受力钢筋分别为直径14mm、16mm和18mm的HRB335级钢筋。试验梁预应力筋为2束,每束采用直径约为15.24mm的带塑料套管的无粘结钢绞线。箍筋采用直径为8mm的HPB300级钢筋。

CFRP无粘结预应力筋采用承压式锚具锚固,钢绞线采用夹片式锚具锚固。试验梁的详细设计尺寸和配筋如图2-1和图2-2所示;加载布置如图2-3和图2-4所示。用于锚固CFRP筋的锚具及张拉时与千斤顶的连接示意图分别如图2-5和图2-6所示。梁端的承压钢板及梁体转向块分别如图2-7和图2-8所示。

试验梁成型后的实际尺寸见表2-1。