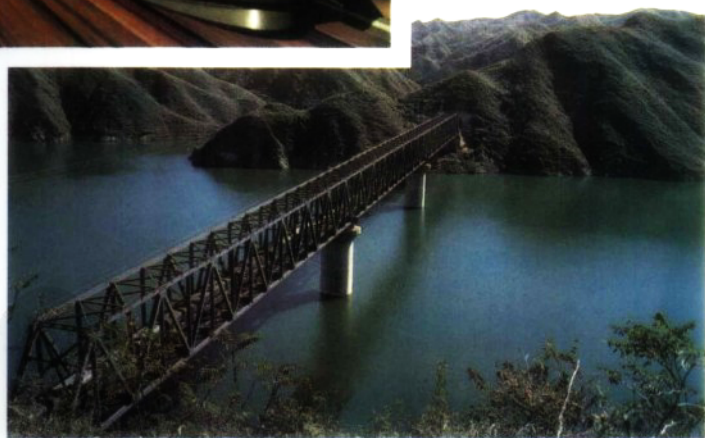


西南交通大学出版社

铁路继续教育系列教材

桥梁工程

铁道部人事司 组织编写
铁道部人才交流培训中心



铁路继续教育系列教材

桥梁工程

铁道部人事司
铁道部人才交流培训中心 组织编写

强士中 周 璞 主 编

张 琳 林国雄 主 审

西南交通大学出版社

• 成 都 •

图书在版编目 (CIP) 数据

桥梁工程 / 强士中主编. — 成都: 西南交通大学出版社, 2000. 4

(铁路继续教育系列教材)

ISBN 7-81057-417-5

I. 桥… II. 强… III. 桥梁工程 IV. U44

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 10608 号

铁路继续教育系列教材

桥 梁 工 程

铁 道 部 人 事 司 组 织 编 写
铁道部人才交流培训中心

强士中 周 璞 主 编

张 琳 林国雄 主 审

*

出 版 人 宋绍南

责任编辑 李彤梅

封面设计 郑 宏

西南交通大学出版社出版发行

(成都交大路 148 号 邮政编码: 610031 发行科电话: 7600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

E-mail: cbs@center2.swjtu.edu.cn

四川森林印务有限责任公司印刷

*

开本: 787mm × 1092mm 1/16 印张: 22.875

字数: 553 千字 印数: 3001 ~ 6000 册

2000 年 4 月第 1 版 2001 年 4 月第 2 次印刷

ISBN 7-81057-417-5/TV · 201

定价: 33.00 元

图书如有印装质量问题, 本社负责调换。

铁路继续教育系列教材编委会

主 任	华茂昆			
副主任	费克勤	安立敏	温继武	
编 委	杨友根	吴 风	丁圻墀	宋凤书
	胡东源	卢祖文	曹 菁	柳呈祥
	于 川	许守祜	章根明	柴浦安
	顾 聪	蔡申夫	刘国祥	王申庆
	何 壁	张玉秀	杨安立	吴信然
	王 成	朱克勤	赵建国	张全寿
	黄大光			

《桥梁工程》编委会

主 编 强士中 周 璞

主 审 张 琳 林国雄

编 委 王秋明 华有恒 李 乔 严国敏

赵人达 周 璞 周 履 钱永久

强士中 廖海黎 戴玉民

序 言

《铁路继续教育系列教材》，是对铁路专业技术人员进行继续教育的基础读本。它的问世，对于抓好铁路继续教育，提高铁路专业技术队伍的素质是有益的。

铁路是我国交通运输的骨干。在加快改革开放和发展社会主义市场经济的新形势下，铁路面临着新的机遇和挑战。为把我国铁路现代化建设事业全面推向 21 世纪，我们必须以十五大精神为指导，加快铁路改革与发展，实施科教兴路战略，使铁路从传统产业逐步走向现代化。

实现铁路现代化，关键是科技，基础在教育。加快铁路科技进步，提高铁路专业技术队伍的素质，直接关系到铁路现代化的进程，现代科技发展日新月异，世界铁路在高速技术、重载技术、管理技术、安全技术和信息技术等方面取得了重大进展。为了适应新的形势，必须对全路专业技术人员广泛开展继续教育。

为了搞好铁路专业技术人员的继续教育，编写一套好的教材是非常重要的。《铁路继续教育系列教材》反映了现代科学技术发展的水平和铁路企业技术进步的特点，兼顾了教材理论体系的系统性和专业人员选修的适用性，对专业技术人员了解和把握本专业学科领域国内外科技发展动态，学习掌握先进的技术、理论和方法等会有帮助。希望全路各级组织、各级领导都来关心继续教育的工作。各单位要根据实际，以这套教材为基础读本，切实抓好继续教育的工作。全路广大专业技术人员要通过继续教育，不断更新知识内容，拓宽知识面，为我国铁路现代化建设事业作出新贡献。

这套教材由铁道部人事司、人才交流培训中心组织各方面的专家、教授和学者编写，部机关有关司局进行指导和审定，在此，我谨向为这套教材的编写、出版倾注了大量心血的所有工作人员表示衷心的感谢。

傅 玉 震

一九九七年十二月一日

前 言

本教材是为了适应铁路现代化建设的需要, 进一步提高专业技术人员的素质, 在铁道部人事司、人才交流培训中心的组织领导下编写的。

继续教育是对在职专业技术人员进行知识和技能的增新、补充、拓宽和提高, 不断完善知识结构, 提高创新能力和专业技术水平的一种教育途径。每一个科技人员都应接受终生受教育的观念, 以适应科技知识不断发展、更新的需要。因此, 本书按适于自学、利于实用的要求, 在大学本科《桥梁工程》教材的基础上, 就桥梁工程的一些较专门的内容作更进一步的阐述, 尽量避免与本科教材重复。本教材以专题形式编写, 分别围绕一个专题作较为全面、深入地介绍, 以期使读者能了解该专题的基本内容及该领域的最新进展和成就。每一章的内容相对独立, 可独立讲授和学习。

本书由西南交通大学强士中教授、铁道部大桥工程局周璞高级工程师主编统稿。主审是铁道部科学研究院张琳研究员和大桥工程局总工程师林国雄。参加编写工作的有: 西南交通大学强士中教授、李乔教授、赵人达教授、廖海黎教授、钱永久教授; 大桥工程局周璞高级工程师、华有恒高级工程师、赵煜澄高级工程师、顾金钧高级工程师等。两位主审对本书花费了不少心血, 作了认真审校, 并提出了许多宝贵的修改意见, 对此编者深表感谢和敬意。

由于编者水平有限, 错误在所难免, 衷心希望读者批评指正。

主 编

1999年10月8日

目 录

专题 1	桥梁新(高性能)材料	1
专题 2	现代预应力混凝土结构	19
专题 3	可靠度理论及其在桥梁设计中的应用	49
专题 4	有限元法与桥梁结构分析	70
专题 5	桥梁工程中的计算机辅助设计(CAD)技术	90
专题 6	桥梁结构的稳定性分析	106
专题 7	桥梁抗风	136
专题 8	桥梁抗震	167
专题 9	桥梁检测与评定	187
专题 10	斜拉桥	210
专题 11	悬索桥	244
专题 12	城市立交桥	261
专题 13	复合结构桥梁	272
专题 14	深水基础的施工技术	302
专题 15	21 世纪特大跨度桥梁展望	335

专题 1 桥梁新(高性能)材料

1.1 概 论

在世界桥梁发展史中,有以木桥和石桥为主的时代。欧洲工业革命以后,1979 年,第一座铸铁桥建成,开始了修建铁桥的时期。1874 年,第一座钢桥建成,开始了大规模修建钢桥的时期。波特兰水泥的工厂化生产开始于 1823 年,但直到 1867 年才有混凝土桥,1875 年以后才有钢筋混凝土桥。20 世纪 40 年代以前,除了拱桥以外,钢筋混凝土桥基本上局限于小跨度桥梁。1937 年第一座预应力混凝土桥建成,开始了预应力混凝土向中、大跨度大量发展的时期。可见,桥梁技术的每一次重大的进步,莫不以材料的革新为其先导。新材料的发展推动着桥梁的发展。但是在历史上,并不是当时出现的新材料都有发展前途,也并不是所有的旧材料都被废弃不用。有些旧材料被废弃了,有些仍在其适用的范围内被采用,有些则被改进成为新材料。总之,新材料,包括改进而成的新材料,将使桥梁的性能发展到一个新的水平,以满足桥梁对时代的需要。

本专题的论述是以 20 世纪末期的视野进行的回顾与展望,意在既反映当前的水平,又为 21 世纪的发展提供有用的线索。

1.2 高性能钢材

1.2.1 国内新开发的钢材

1.2.1.1 15MnVNq-C 钢

15MnVNq-C 钢是根据 1987 年 11 月铁道部和冶金部的协议标准,由鞍山钢铁公司生产的优化 15MnVNq 钢。它具有优良的厚板(板厚达 56 mm)可焊性、冲击韧性和其他机械性能,被用于九江长江大桥正桥钢梁中的受拉及由疲劳控制的构件和箱形截面的部件上。

15MnVNq-C 钢的化学成分和机械性能分别列于表 1.1 及表 1.2。

表 1.1 15MnVNq-C 钢的化学成分(%)

项 目	C	Mn	Si	S	P	V	N
验收标准	<0.18	1.3~1.7	0.2~0.6	≤0.015	≤0.020	≤0.18	≤0.018
生产控制	≤0.16	1.3~1.7	0.2~0.6	≤0.015	≤0.020	0.10~0.16	0.01~0.015

表 1.2 15MnVNq-C 钢的机械性能

项 目	屈服强度 σ_s (MPa)	抗拉强度 σ_b (MPa)	延伸率 δ_5 (%)	-40°C 冲击 AKV(J·cm ⁻²)	时效冲击 AKV(J·cm ⁻²)
验收标准	≥412	≥549	≥19	≥49	≥49
生产控制	≥412	≥549	≥19	≥69	≥69

15MnVNq-C 钢与国外同级钢材性能的比较列于表 1.3。可见 15MnVNq-C 钢材的强度和韧性均达到或超过国外标准。

表 1.3 15MnVNq-C 钢主要性能与国外相似钢材性能比较

项 目	σ_s (MPa)	σ_b (MPa)	C_v	
			-5°C	-35°C
九江桥 15MnVNq-C 钢板 试验统计值	449.7	606.8	107 ~ 177	95 ~ 120
日本 SM58	431.2	568.2~715.4	48	
美国 ASTM A 572-72	413.6	550.8~688.9		41

1.2.1.2 14MnNbq 钢

鉴于我国铁路钢桥使用最普遍的 16Mnq 钢对板厚效应十分敏感, 枪焊钢桥一般只能用到 32 mm 板厚, 15MnVNq-C 钢的成材率较低, 冶炼成本较高, 1987 年铁道部大桥工程局与武汉钢铁公司达成协议, 适当降低 16Mnq 钢含碳量, 加入少量铌 (Nb) 元素, 并采用钢锭模内稀土处理工艺, 使钢晶粒细化, 还控制降低了硫的含量, 从而大大降低钢板的板厚效应, 提高了厚钢板的强度和韧性。新钢种定名为 14 锰铌桥 (14MnNbq) 钢。根据试验, 40 mm 厚的 14MnNbq 钢板的 V 形缺口 -40°C 的冲击功达 146 J, 50 mm 板达 142 J, 落锤试验 NDT 温度达到 -40°C, 此外抗裂和疲劳性能也均良好。证明 14MnNbq 钢在各方面的性能与 16Mnq 相比, 有了很大的提高。

14MnNbq 钢于 1993 年用于京九线京杭运河大桥的试验钢桁梁; 1996 年底通过了鉴定; 1998 年用于芜湖长江大桥钢梁。现根据芜湖桥 14MnNbq 桥梁用钢板的供货技术条件, 将 14MnNbq 钢的化学成分和机械性能列于表 1.4 及表 1.5。

表 1.4 14MnNbq 钢化学成分 (%)

C	Mn	Si	S	P	Nb
0.11~0.17	1.20~1.60	≤0.50	≤0.010	≤0.02	0.015~0.035

注 碳当量不大于 0.425, 当 C < 0.16% 时, Mn 可按 1.65% 交货。

表 1.5 14MnNbq 钢的机械性能

交货状态	取样方向	板 厚 (mm)	屈服强度 σ_s (MPa)	抗拉强度 σ_b (MPa)	延伸率 δ_5 (%)	冷 弯 180°	- 40℃ 冲 击 AKV(SJ)	时效冲击 10%纵向应 变时效 AKV(SJ)
正 火 横 向		6~16	≥370	530~685	≥20	$d=2a$	≥100	≥100
		17~25	≥355	510~665	≥19	$d=3a$		
		26~36	≥350	500~645				
		37~60	≥340	490~625			≥120	≥120

注: 1. 正火交货, 板厚 < 25 mm 时, 允许热轧交货;

2. 夏比冲击功按 3 个试样的算术平均值计算, 允许其中一个试样比规定值低, 但不得低于 75%, 第一次检验不合格, 允许复验;

3. > 32 mm 的钢板需探伤交货。

1.2.2 日本的 HT-70 和 HT-80 钢

日本的 HT-70 和 HT-80 钢与美国的 ASTM A514 钢及德国的 St. E69 钢属于同一级别。

日本的 HT-70 和 HT-80 曾用于 1974 年完工的港大桥 (跨度 $235+510+235$ m), 对化学成分、机械性能和焊接工艺都作了详细规定。至 1978 年日本本四连络桥公团为考虑在大鸣门桥、与岛桥等采用, 又制订了“钢上部结构用的 70 kgf/mm^2 、 80 kgf/mm^2 级钢”的标准 (HBSG3102), 较港大桥所用略有改进。表 1.6 所示为本四公团的标准。

表 1.6 日本 HT-70 与 HT-80 钢化学成分及机械性能 (本四公团标准)

种 类	化 学 成 分 (%)						机 械 性 能					
	板厚 (mm)	C	Si	Mn	P	S	板 厚 (mm)	屈 服 强 度	抗 拉 强 度	延 伸 率		
								(MPa)	(MPa)	板 厚	试 片	(%)
HT-70	8~75	≤0.14	0.15 ~ 0.55	0.60 ~1.50	≤0.015	≤0.015	8~50	≥600	700~850	8~16	5号	≥17
										16~25	5号	≥23
							50~75	≥580	680~830	20~75	4号	≥17
HT-80	8~75	≤0.14	0.15 ~ 0.55	0.60 ~1.50	≤0.015	≤0.015	8~50	≥700	800~950	8~16	5号	≥16
										16~25	5号	≥22
							50~75	≥680	700~930	20~75	4号	≥16

注: 除表中所列元素之外, 可根据需要, 添加微量 Cu, Ni, Cr, Mo, V 或 B。

采用高强钢可以减轻桥梁自重, 减少构件尺寸, 从而减少节点次应力, 港大桥共用 HT-70 和 HT-80 钢 5 272 t, 占全部钢桥重量的 15.1%。构件中 HT-80 钢板厚度达 75 mm。

* 按国际单位制的有关国家标准, $1 \text{ kgf/mm}^2 = 9.8 \times 10^6 \text{ Pa}$ 。

1.2.3 耐候钢

在钢中加入少量铜、磷、锰、镍等合金元素不仅能提高钢的强度,保持良好的综合性能,而且能提高钢材的耐大气腐蚀性能,故称为耐候钢。表 1.7 为美国 ASTM A588E 耐候钢的化学成分与机械性能。

表 1.7 美国 ASTM A588E 钢 (耐候钢) 化学成分与机械性能

化 学 成 分 (%)										机 械 性 能			
C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Cu	V	板 厚 (mm)	屈服点 (MPa)	抗拉强度 (MPa)	δ_5 (%)
≤ 0.15	≤ 1.20	≤ 0.04	≤ 0.05	≤ 0.30	0.75~1.05	—	0.08~0.25	0.50~0.80	≤ 0.05	< 100	345	485	≥ 21
										100~125	315	460	≥ 21
										125~200	290	425	≥ 21

用耐候钢制造的钢桥在最初 2~3 年的空气暴露中,表面将产生一层悦目光泽的锈膜,此即成为防止钢材进一步锈蚀的保护膜,故无需再油漆,因此得到很快推广。美国在 1977 年建成的新河峡谷 (New River Gorge) 桥 (世界最大跨度的拱桥,跨度为 518 m) 以及日本的神户大桥 (主跨 217 m) 都以耐候钢建造。据统计,美国到 80 年代用耐候钢建造的桥梁已占美国全部钢桥总数的 50%。到 1992 年,美国耐候钢桥梁已超过 2 000 座,所用钢材逾百万吨。但是根据日本文献,因气候潮湿,空气中盐份及 SO_2 含量大,耐候钢锈膜不易稳定,因此日本又研究成功了一种耐候钢锈膜的稳定技术。经过稳定处理的耐候钢桥不再需涂油漆,经济效益显著。

我国武汉钢铁公司已冶炼出桥梁用焊接结构耐候 NH35q 钢。1988 年铁道、冶金两部对该钢种进行了技术鉴定。1990 年由宝鸡桥梁厂试制 3 孔 19.3 m 箱形板梁,架设并试用于武昌附近的巡司河铁路桥上 (1991 年开始)。

NH35q 钢的设计指标为: $\sigma_s=335\sim 365$ MPa, $\sigma_b=490\sim 610$ MPa, $\delta_5\geq 21\%$, 时效 $AKV\geq 120$ J, 化学成分含有 Cu、Cr、Ni、V 等, 限定含量 $P\leq 0.035$, $S\leq 0.007$ 。经多项研究证明, NH35q 钢的物理力学性能比 16Mnq 有所提高。这种钢需在大气中形成致密连续的保护性锈层才能防止钢材继续锈蚀, 估计约需 6~7 年时间。

1.2.4 180 kgf/mm² 级悬索桥主缆用 $\phi 5$ mm 镀锌钢丝

这种高强镀锌钢丝是日本为明石海峡大桥 (主跨 1 996 m, 1998 年完工) 开发的。以前, 悬索桥主缆钢丝亦采用 $\phi 5$ mm 镀锌钢丝, 但强度最多为 160 kgf/mm², 屈服点在 118 kgf/mm² (0.7% 伸长率) 左右。明石海峡大桥因恒载过大, 如仍采用 160 kgf/mm² 级钢丝, 每侧将改为 2 根主缆。为了保持每侧一根主缆, 专门开发了 180 kgf/mm² 级的钢丝, 其标准规格如表 1.8。

180 kgf/mm² 级 $\phi 5$ mm 镀锌钢丝的原料是直径 11 mm 的钢琴钢丝热处理后从直径 11 mm 拉伸到直径 5 mm。进而提高其强度, 最后进行镀锌处理。镀锌也起到回火的作用, 改善钢丝的延伸韧性。在化学成分上, 180 kgf/mm² 级钢丝比 160 kgf/mm² 级钢丝增加了微量的 Si 合金元素。

表 1.8 180 kgf/mm²镀锌钢丝的标准规格

项 目		标 准 规 格
材料	线 材	HBSG3507 平行钢丝索用高强度镀锌钢丝 HWRC 82B
尺寸	直 径 直径偏差	$d \pm 0.06 \text{ mm}$ (d : 直径 5.00~5.50 mm)
		0.06 mm 以上
机 械 性 能	抗拉强度	180~200 kgf/mm ² (1 770~1 960 MPa)
	0.8%伸长屈服强度	140 kgf/mm ² (1 370 MPa)
	延伸率	$\geq 4.0\%$ (标距 250 mm)
	抗扭性能	试件两端距离等于 10 倍钢丝直径, 握紧两端扭转, 扭断时扭转次数大于 14 次
	卷绕性能	围绕直径等于 3 倍钢丝直径的芯轴, 密缠 8 次无折损
镀锌 质量	附着性	围绕直径等于 5 倍钢丝直径的芯轴密缠 2 圈以上, 用指轻击无脱落、剥离、龟裂等现象
	附着量	$\geq 300 \text{ g/m}^2$, 镀锌后钢丝直径增加不大于 0.12 mm, 镀层均匀

明石海峡大桥跨度为 960 m+1 990 m+960 m, 桥面宽 35.5 m, 采用 180 kgf/mm²级钢丝后, 每侧 1 根主缆由 290 索股组成, 每根索股含 127 根 $\phi 5.22 \text{ mm}$ 镀锌钢丝。

1.3 具有高耐腐蚀保护层的钢筋、钢绞线和钢丝束

1.3.1 环氧涂层钢筋及钢绞线

环氧涂层钢筋于本世纪 70 年代开始用于美国宾夕法尼亚州的公路桥面, 效果显著, 迅速在美国推广。80 年代后期, 美国又发展了环氧树脂喷涂钢绞线。这种技术很快为日本采用。美国和日本都制订了有关标准和使用指南。环氧涂层钢绞线分表面喷涂和内外涂满的两种。在喷涂前将钢绞线解扭, 预热到 300°C 左右, 用喷枪将带静电的环氧树脂干粉向接地的钢绞线喷涂。钢绞线的涂层厚度为 0.60~1.10 mm, 普通钢筋的涂层厚度为 0.18~0.30 mm。从表面状态区分, 有表面粘砂的高粘结涂层与表面不粘砂的光面涂层之分。环氧涂层钢绞线在锚固区无须将涂层剥除, 而是采用“咬透式 (bite through) 夹片”进行锚固。

环氧涂层钢绞线一般采用低松弛钢绞线制成, 其 1 000 h 松弛率比无涂层的低松弛钢绞线大 60% 左右, 但比一般应力消退钢绞线的松弛率小 60% 左右。

美国 1986 年修建的跨密西西比河的贝维尤 (Bay View) 桥 (主跨 274 m 斜拉桥) 以及

日本 90 年代在东京附近名胜区修建的主跨 122 m 的低塔斜拉桥的斜拉索,均采用 $\phi 15.24$ mm 环氧涂层钢绞线^[1]。

1.3.2 热挤 P.E.索套

单根或多根平行钢绞线或微扭(扭转角 $2^{\circ}\sim 4^{\circ}$)的平行钢丝束通过挤塑机,将加热熔化的高密度聚乙烯直接紧裹钢绞线或钢丝束,形成连续的高密度聚乙烯(P.E.)护套。一般在聚乙烯中掺 2%~3% 碳黑可以有效地防止紫外线的作用,延长耐老化寿命。

日本多多罗大桥(主跨 890 m)及我国杨浦大桥(主跨 602 m)都采用由 $\phi 7$ mm 微扭平行钢丝热挤 P.E.索套形成的斜拉索。前者最大索每根为 379 根 $\phi 7$ 钢丝,后者最大索每根由 301 根 $\phi 7$ 钢丝组成。武汉长江公路桥(主跨 400 m)则用镀锌的 $\phi 7$ mm 钢丝束微扭后热挤 P.E.索套,与前两桥相比又多了一层镀锌保护层。这种斜拉索一般两端用冷铸锚。安装以后在黑色护套外面再缠一层白色或浅色反射带,以减缓温度作用。

目前国内外流行的无粘结力筋就是在钢绞线或镀锌钢绞线表面涂油或蜡之后热挤 P.E.护套做成。

近来颇为流行的由弗莱西奈(Freyssinet)公司发展的弗莱西奈斜拉索是一种平行钢绞线索,由平行的各自具有完整防腐系统的单根 $\phi 15.7$ mm 镀锌钢绞线(抗拉强度 1770 MPa)组成。绞线内钢丝间空隙填满蜡,绞线外挤包 1.5 mm 厚的高密度聚乙烯。这样每根钢绞线就有三重(镀锌、填蜡及 P.E.护套)保护。将单根钢绞线逐根拉入一个高密度聚乙烯总管,逐根地用耐疲劳楔片锚固在塔顶和主梁上。待一根斜拉索的全部钢绞线锚固以后再用短行程的大千斤顶进行索力校正。这样,斜拉索有 4 重保护(即单根钢绞线的 3 重保护加总 P.E.管的保护)。只需注意两端锚固区的封闭,就可形成全封闭的斜拉索,法国诺曼底(Normandie)桥(主跨 856 m, 1994 年建成),澳大利亚的格莱贝(Glebe)桥(主跨 345 m, 1995 年建成),香港的汲水门大桥(主跨 430 m, 1997 年建成)均采用弗莱西奈斜拉索。每根斜拉索中钢绞线的数目为 25~102 束不等。

1.3.3 新型管道及灌浆材料

由于侵入桥面或梁体的腐蚀性介质对金属波纹管仍易腐蚀,管内硬固的水泥浆在活载作用下也往往裂碎。90 年代以来国外进行了下述改进。

1.3.3.1 采用新型管道

采用不腐蚀、不导电的高密度聚乙烯或聚丙烯管道,这种管道表面带肋以提高其与混凝土的粘着力,管壁厚度约 2 mm。

1.3.3.2 改进灌浆材料

日本曾采用由聚丙烯酸乳胶、波特兰水泥加去泡剂调制的聚合物水泥浆,这种灌浆材料具有动载下不裂,养护时不析水、不收缩,并具有较高的延伸韧性等特点。

另一种由日本在斜索中采用的灌浆材料为聚丁二烯-聚氨酯,其优点是动载下不裂,粘度低,能透入钢绞线中微小空隙,凝固后具有高柔度及高电阻。其缺点是易燃且费用较高。

法国在诺曼底大桥采用石油蜡灌浆,其熔点在 $85^{\circ}\text{C}\sim 105^{\circ}\text{C}$ 之间,不开裂、不导电,防腐蚀能力亦强。

1.4 高性能混凝土 (HPC)

1.4.1 高性能混凝土

高性能混凝土是具有所要求性能的匀质混凝土, 这些性能包括: 易灌注, 易密实, 不离析, 早期强度高, 韧性高, 体积稳定性好, 能长期保持优越的力学性能, 在恶劣的环境下寿命长等。

显然, 这是一个笼统的定义。首先, 所要求的性能视使用目的和环境而异, 而且可以有所侧重。因此, 高性能混凝土可以是高强度、高流动性、高密实的耐久混凝土, 也可以是强度较低的自密实混凝土。但是, 绝大多数 HPC 桥梁多着重于耐久性、强度与工作度等性能。这是因为自 80 年代以来, 混凝土桥梁的坏化已成为国际上普遍关注的问题, 耐久性已成为当前和 21 世纪桥梁的共同目标。欧洲国家利益从 80 年代起推行 HPC 桥梁迄今已逾 10 年。90 年代已修建过好几座大型 HPC 桥梁的挪威工程师萨尔默 (Selmer) 说: “耐久性是第一号目标, 但我们同时也得到了更高的强度。” 丹麦的大贝尔特桥、法国的诺曼底大桥的 HPC 在强度方面都从过去的 35~40 MPa 提高到 52~66 MPa。到 90 年代末, 加拿大修建的 HPC 桥已超过 100 座。美国从 1993 年开始, 联邦公路管理局 (FHWA) 推行 HPC 的示范行动 (Showcase program), 得到了各州的积极响应。纽约州在 1996 年宣布, 以后州内新建桥梁必须用 HPC。他们说, 从抗渗性来衡量, 可以期望 HPC 桥面结构的耐久性两倍于原先的结构。

HPC 一般具有较低的水灰比, 但仍有良好的流动性, 主要依靠掺用较多的超细矿物掺合料 (如硅粉、磨细碱矿渣、粉煤灰) 以及高效减水剂来提高混凝土的综合性能。超细掺合料 (比表面积 $> 4\,000\text{ cm}^2/\text{g}$) 具有填充效应、减水效应和增强效应, 可以降低水灰比, 增加流动度, 提高密实度和强度, 并且可以降低水化热。美国得克萨斯州 (Texas) 大学的研究说明, 将 25%~35% 的水泥用粉煤灰代替可以降低透水性一半以上。以上三种矿物掺料中, 以硅粉的效果最好, 矿渣次之。但硅粉的供应量较少, 价格高, 后两者都是有大量供应的工业废料, 成本低, 来源广, 关键在于解决磨细的工艺及设备问题。

1.4.2 高强度混凝土

1.4.2.1 混凝土强度等级的换算

由建设部制定的我国国家标准 GBJ10-89 规定, 混凝土强度等级应以边长为 150 mm 的立方体, 按标准方法制作及养护, 在 28 d 龄期后, 按标准试验方法测得的具有 95% 保证率的抗压强度, 用等级 C 表示。但公路、铁路、港口等部门目前仍沿用标号作为混凝土强度分类的标准, 其所用标准试件为边长 200 mm 的立方体, 强度保证率为 85%。而美国与日本的标准试件为 $\phi 150\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ 的圆柱体, 与我国同样用 150 mm 立方体试件的有芬兰、德国、英国等, 法国则用 $\phi 160\text{ mm} \times 320\text{ mm}$ 的圆柱体, 接近于美国, 所以同一混凝土用不同标准表示的强度等级值就有所不同。表 1.9 为不同标准的强度对照表。

表 1.9 所列对应关系基本与文献[21]表 2.1.1 中 80 级以下的数据相符。

表 1.9 不同试件标准的强度等级对照

C (等级)	C20	C30	C40	C50	C60	C70	C80	C90	C100	C110	C120
标 号	23 (220)	33 (320)	43 (420)	53 (520)	63 (620)	73 (715)	83 (815)	93 (910)	103 (1005)	112 (1100)	122 (1200)
美国 ACI 规范设计强度 f'_c (MPa)	16	24	32	40	50	60	70	80	90	100	110

注: 括号内为过去采用 kg/cm^2 单位时的标号。

1.4.2.2 高强度混凝土的定义

怎样的混凝土才算高强度混凝土, 在不同时代、不同地区, 有不同的定义。目前较为适当的是芬兰的定义, 如表 1.10 表示。

表 1.10 芬兰的混凝土强度划分

强 度 等 级	设计抗压强度 (MPa)
一般结构混凝土	20~60
高强度混凝土	60~100
甚高强度混凝土	100~200 或 250

此外, 美国联邦公路管理局 (FHWA) 和美国战略公路研究纲要 (Strategic Highway Research Program) 对混凝土强度划分各如表 1.11 和表 1.12 所示。

表 1.11 FHWA 的混凝土强度划分

强 度 划 分	设计抗压强度 (MPa)
普通强度混凝土	≤ 41
高强度混凝土	41~84

表 1.12 美国战略公路研究纲要的混凝土强度划分

强 度 划 分	抗 压 强 度 (MPa)
甚早强混凝土	灌注后 4 h, 最高抗压强度达到 21 MPa
高早强混凝土	灌注后 24 h, 抗压强度不少于 34.5 MPa
甚高强混凝土	灌注后 28 d, 抗压强度不少于 69 MPa

1.4.2.3 高强度混凝土的应用与发展

80 年代中后期, 美国、加拿大和法国分别将一些桥梁的混凝土从当时流行的 35~41 MPa 级提高到 55~60 MPa 级^{*}。90 年代以后, 又向更高的方向发展。例如, 1994 法国建成的诺曼底桥主塔混凝土从 40 MPa 提高到 60 MPa, 使主塔壁厚从 600 mm 减为 400 mm。至 1996 年法国建成的埃洛恩桥 (Elorn bridge) 主塔顶部用 B60 MPa 级混凝土, 下部采用 B80 MPa, 实际强度达 100 MPa。美国则正在规划将 AASHTO 的标准截面先张梁的混凝土强度从 40 MPa 提高到 70 MPa。德国在 90 年代修建的高速铁路双线预应力混凝土简支梁 (跨度 58 m) 的

* 指美国的东亨廷顿 (East Hunting ton) 桥 (1985)、加拿大的舒本纳卡德 (shubenacadle) 桥 (1989) 和法国的伊隆 (Yronne) 桥 (1987)。

顶板和底板均采用 B85（相当于我国的 C85）混凝土，腹板则用厚 27 mm 的波形钢板。英国在 1992~1996 年修建的第二塞文大桥（Second Severn Crossing）的引桥（跨度 98 m 预应力混凝土箱形连续梁）中，采用掺有 28% 高炉矿渣公称强度为 80 MPa 的混凝土，胶粘材为 480 kg/m³，以保证在 12 h 达到 12 MPa 的拆模强度，18 h 达 17.5 MPa 的起吊强度。

我国铁路预应力混凝土梁的设计强度一般为 C50~C60，超低高度梁的混凝土为 C65。施工时的实际强度有超过 C72 的。公路方面，上海的杨浦大桥主塔（高 208 m），武汉的长江二桥主塔（高 124 m）都采用了 C50 掺粉煤灰的泵送混凝土。而北京和上海的一些高层建筑中的框架结构和立柱都已成功地采用了 C80 混凝土。由北京城建集团总公司构件厂施工的北京市财税大楼的首层立柱混凝土设计强度为 C110，实际平均强度达到 127.5 MPa（采用 525 水泥，掺硅粉及高效减水剂，水胶比为 0.23）。广州羊城管桩有限公司采用磨细石英砂（细度 > 4 300 m²/g）加高效减水剂，在蒸压条件下制成抗压强度达 100 MPa 的高性能管桩，并已正式投入生产和应用。

1.4.2.4 高强度混凝土的配制

高强或甚高强混凝土的配制应遵循高性能混凝土的原理，适当减少水泥用量，依靠掺细矿物掺料与高效减水剂来降低水灰比，增加流动度，改进混凝土的微观结构与综合性能，使之具有高强度、高流动度、高密实、高耐久性等各种优良性能。而过去那种习惯于依靠提高水泥用量而摒弃掺料的做法必须加以改变。

1.4.2.5 高强度混凝土的力学性质

高强混凝土除了具有抗压强度高、密实度高、耐久等优点外，也有一些缺点，即其韧性较低、破坏应变小，抗拉或抗剪强度的增加不与抗压强度的增加成比例，而是比抗压强度的增加慢得多。表 1.13 是文献[2]所列各种强度等级的混凝土的力学性质。

表 1.13 各种强度等级的混凝土力学性质

混凝土力学性质	符号	单位	各种强度等级					
			C30	C40	C50	C60	C70	C80
特征抗压强度	f_{ck}	MPa	30	40	50	60	70	80
抗拉强度平均值	f_{ctm}	MPa	2.9	3.5	4.1	4.6	5.1	5.6
特征抗拉强度最小值	$f_{ctk, min}$	MPa	2.0	2.4	2.8	3.1	3.5	3.8
特征抗拉强度最大值	$f_{ctk, max}$	MPa	3.8	4.7	5.4	6.1	6.8	7.4
弹性模量（原点切线）	E_c	10 ³ MPa	34	36	39	41	43	44
折算弹性模量	E_{cs}	10 ³ MPa	29	31	33	35	36	38
相应于最大应力的应变	ϵ_{cl}	10 ⁻³	-2.2	-2.2	-2.2	-2.2	-2.2	-2.2
极限应变	ϵ_{cu}	10 ⁻³	-3.7	-3.3	-3.0	-2.8	-2.6	-2.4
泊松比	ν_c	$-0.5f_{ck} < \sigma_c < f_{ctk}$ 时， $\nu_c=0.1\sim0.2$						

注：（1）进行混凝土结构分析时采用折算弹性模量；
（2）以上资料对单调增加的压应力或压应变，加载速率分别为 1.0 MPa/s 或 30×10^{-6} /s 时有效；
对拉应力或拉应变分别为 0.1 MPa/s 或 3×10^{-6} /s 时有效；
（3）表中 ϵ_{cl} 、 ϵ_{cu} 、 E_c 及 E_{cs} 含义示于图 1.1，此外，各种强度混凝土的应力—应变曲线示于图 1.2。