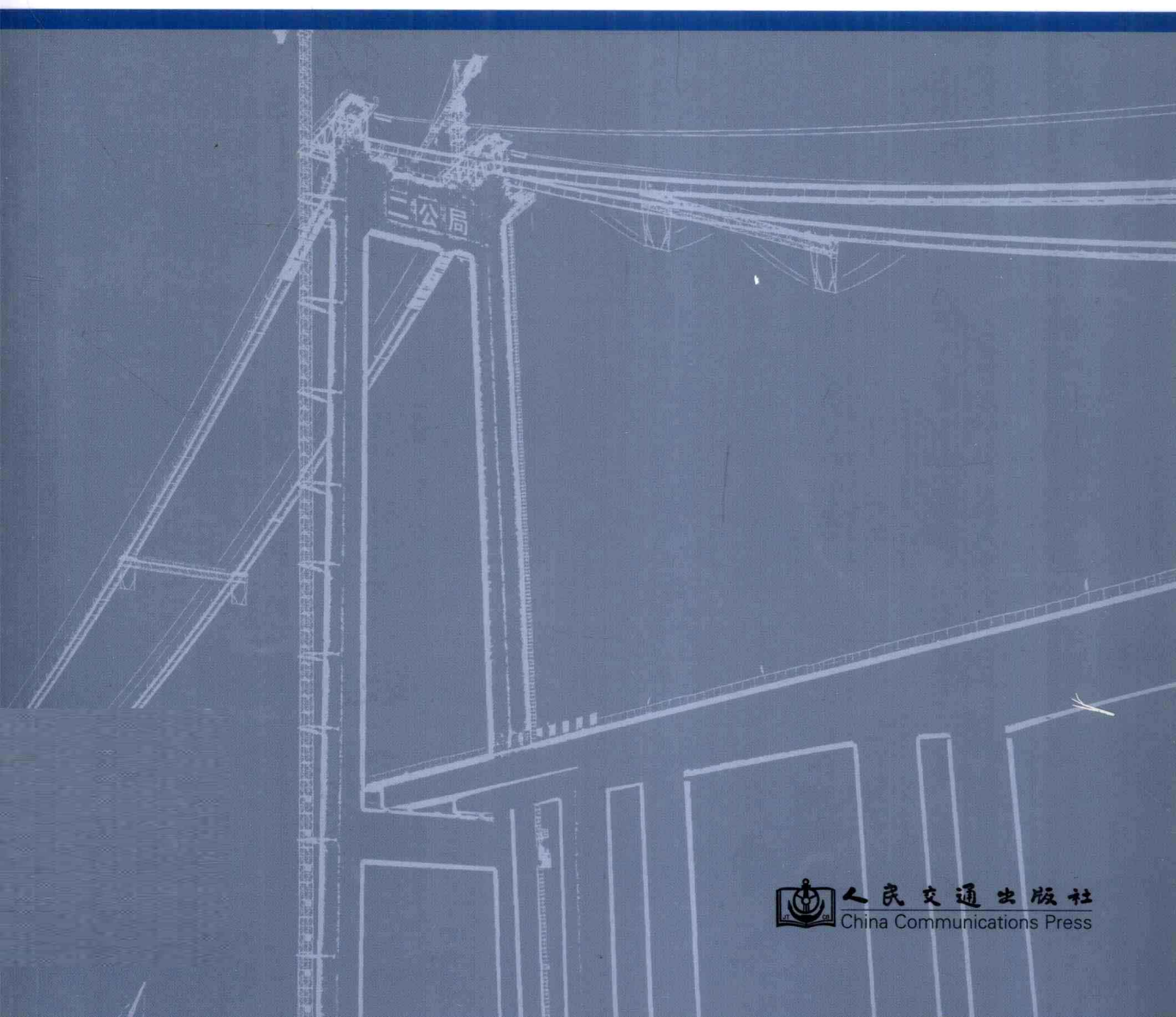


结构混凝土

耐久性及其提升技术

吉林 缪昌文 孙伟 ◆ 编著



人民交通出版社
China Communications Press

Jiegou Hunningtu Naijiuxing Jiqi Tisheng Jishu
结构混凝土耐久性及其提升技术

吉 林 缪昌文 孙 伟 编著

人 民 交 通 出 版 社

序

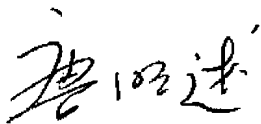
混凝土是当今最大宗的建筑结构材料。然而,国内外大量混凝土结构过早出现病害,有些甚至失效的经验教训,已经令混凝土工作者认识到其耐久性能不足的危害,并开展了大量的研究工作。提升混凝土的耐久性,满足工程建设和可持续发展的需要,已经成为混凝土研究工作者及使用者长期追求的目标。结构混凝土耐久性提升技术的出现,为保证混凝土结构在越来越复杂的使用环境条件与荷载共同作用下正常服役提供了科学的途径,其技术的应用与推广,将极大地促进混凝土结构的长寿命服役,对于重大混凝土结构工程实现寿命逾百年,意义非凡。结构过早失效所引起的各种修缮、拆除与重建费用也将由于耐久性能的提升而大幅降低,这对于推动可持续发展的低碳经济,有着深远的经济与社会意义。

本书的几位作者均长期从事混凝土及其结构的研究与工程建设工作,在混凝土耐久性能方面有着丰富的理论研究成果与实际应用经验。《结构混凝土耐久性及其提升技术》一书,是几位作者依托“润扬长江公路大桥结构混凝土耐久性与寿命预测研究”项目(2002年度江苏省交通科学研究计划项目02Y001)和“泰州长江公路大桥混凝土结构服役性能提升技术的研究”项目(2008年度交通行业联合科技攻关项目2008-353-332-140),结合润扬长江公路大桥、泰州长江公路大桥等重大工程项目建设经验编著而成。全书结合最新的混凝土科学研究进展和相关重大工程实例,阐述了现代结构混凝土服役性能提升技术及其发展。

本书的学术价值在于,从混凝土微结构形成与损伤出发,结合重大工程实践,系统总结了结构混凝土损伤劣化规律和在此基础上形成的耐久性模型与寿命预测方法,提出了现代混凝土耐久性提升关键技术,并对混凝土服役性能提升的前沿技术进行了介绍。本书阐述了关于混凝土服役性能提升技术,从微观到宏观、从理论到实践、从成熟技术到前沿热点等一系列问题,对于混凝土学科发展和混凝土工程应用具有重要意义和参考价值。

我希望本书的出版对广大从事混凝土结构设计、施工的工程技术人员,从事混凝土技术研究与开发的科研人员,以及高等院校的师生会有所帮助,同时对混凝土结构耐久性提升技术的不断发展发挥积极的推进作用。

中国工程院院士:



2011年1月

前言

人类借助古罗马建筑文明的余晖,创造发明出的水泥混凝土至今已有数百年的历史,混凝土已经成为当代最主要的土木工程材料之一。人们只要信步于这个地球表层空间,从田野到乡村,从海滨到城镇,那里的民居、学校、商埠、娱乐城、政府大厦、道路、桥梁、机场、摩天大楼,等等,到处都有由水泥混凝土塑造的艺术。可以说,水泥混凝土改变了这个世界,塑造出一个新世界,“混凝土文明时代”的繁华尽显于此。人们希望这种繁华能够经得起岁月的洗礼,百年乃至千年屹立不倒,永不褪色。早期,人们认为只要强度得到满足,混凝土构筑物的寿命就会长久,随着技术的发展,强度问题逐步得到了解决。但与此同时,人们发现强度得到保证的混凝土结构,在自然环境中历经风霜雨雪,依旧出现了损坏,有的甚至出现早期损坏,提前退出了服役。混凝土在所处环境条件下的经久耐用性能,即“耐久性”进入人们的视野,并逐步成为当今工程界关注的焦点,如何提高混凝土的耐久性,更成为现代混凝土技术发展研究的方向。

长期以来,国内外学者对混凝土的耐久性进行了深入的研究,并取得了大量的成果。在此基础上,混凝土耐久性能的影响因素得到更为全面的认识,不同混凝土耐久性的预测模型出现,若干混凝土耐久性的提升技术问世。但现有的研究成果、论文著作在耐久性理论基础与结构混凝土耐久性提升技术的有机统一方面的研究均有待进一步深入。本书是笔者在多年科研及大量资料累积的基础上,借鉴国内外在耐久性上的最前沿研究成果,依托润扬大桥、泰州大桥、苏通大桥等江苏沿江沿海重大桥梁工程,结合当前结构混凝土耐久性提升技术最新研究发展趋势编著而成。本书以结构混凝土耐久性能提升为研究主线,分析混凝土耐久性影响因素及微结构损伤劣化机理,总结混凝土损伤劣化规律,建立混凝土耐久性预测模型,最终形成结构混凝土耐久性提升技术。全书共分六章:第一章为绪论,主要论述了结构耐久性的影响因素及耐久性提升研究的必要性;第二章介绍了混凝土微结构的形成及表征方法,从微结构角度讨论了混凝土损伤机理,便于读者从更深层次理解混凝土的劣化;第三章综合分析了混凝土的损伤劣化发展规律,为提出混凝土耐久性的预测模型打下基础;第四章建立了单因素及多因素环境耦合作用下的混凝土耐久性预测模型,为现代结构混凝土的寿命预测注入了新鲜的血液;第五章在前几章研究的基础上,结合国内重点桥梁工程,从原材料控制、混凝土制备、施工工艺、修复及保障技术角度着手,阐述了结构混凝土耐久性提升的关键技术,为实际工程提供指导;第六章从混凝土减缩抗裂、表层强化、增韧、修复及新型混凝土制备方面,介绍并展望了未来结构混凝土耐久性提升技术发展趋势和

方向。

本书在江苏省长江公路大桥建设指挥部的大力支持下完成,同时得到了东南大学、江苏省建筑科学研究院等高校和科研院所帮助,在此笔者对他们表示衷心的感谢!感谢刘加平、冯兆祥、刘建忠、陈策、张云升、林玮、阮静、石亮、蒋金洋等参与了书稿编写及相关科研工作的同志!感谢与我们一起参与结构混凝土耐久性提升技术与推广应用课题组的各位同仁!感谢书中提及的相关工程为我们提供了许多科研成果应用的机会!感谢在本书成稿过程中给予我们帮助的各位朋友和混凝土界的前辈!

由于笔者能力和水平有限,书中难免有疏漏、不足之处,敬请同行和广大读者不吝赐教。

编著者

2011年1月于泰州高港

符号对照表

符 号	定 义	符 号	定 义
MPa	10^6 帕斯卡	C_3S	硅酸三钙
C	混凝土强度等级,例如 C30 混凝土 为 28 天抗压强度达 30MPa 的混凝土	C_2S	硅酸二钙
pH	水溶液中的酸碱度	C_3A	铝酸三钙
℃	摄氏温度	C_4AF	铁铝酸四钙
AAR	碱—集料反应	CH	氢氧化钙
ASR	碱—硅酸盐反应	P. O	普通硅酸盐水泥
ACR	碱—碳酸盐反应	P	硅酸盐水泥
m	米	FA	粉煤灰
w/C	水灰比	w/B	水胶比
μm	$10^{-6} m$	SL、T	新拌混凝土的坍落度
mm	$10^{-3} m$	GPa	10^9 帕斯卡
ITZ	界面过渡区	h	小时
AFt	钙矾石	s	秒
ESEM	场发射环境扫描电镜	RH	混凝土内部相对湿度
ΔG	吉布斯自由能变化	ρ	密度
J	焦耳	V	体积
mol	摩尔	L	升
d	天	G	石子
kg	千克	S	砂
f_{cu}	混凝土立方体抗压强度	w	水
g	克	C	水泥
cm	$10^{-2} m$	min	分钟
A	安培	ASTM	美国材料与试验协会
μA	$10^{-6} A$	ACI	美国认证协会
r	混凝土内部孔半径	HPC	高性能混凝土
SEM	扫描电子显微镜	S_p	砂率
EDXA	X 射线能量散射分析	CFRP	碳纤维增强复合材料
ATEM	分析电子显微镜	SAP	超强吸水树脂
XPS	X 射线光电子能谱	SRA	减缩剂
TG-DSC	热分析法	ECE	电化学驱除氯离子
XRD	X 射线衍射	FRP	纤维增强复合材料
C-S-H	水化硅酸钙		

目 录

第1章 绪论	1
1.1 混凝土及其发展	1
1.2 结构混凝土的耐久性	4
1.3 结构混凝土耐久性的影响因素	6
1.4 结构混凝土耐久性提升的重要性	8
参考文献	9
第2章 混凝土微结构形成与损伤劣化	10
2.1 混凝土结构的形成与演变规律	10
2.2 混凝土结构的损伤劣化	15
2.3 混凝土微观结构表征技术	31
参考文献	34
第3章 混凝土损伤劣化规律	38
3.1 单因素作用下混凝土损伤劣化规律	39
3.2 双重因素耦合作用下混凝土损伤劣化规律	54
3.3 多重因素耦合作用下混凝土劣化损伤规律	78
参考文献	81
第4章 结构混凝土寿命预测	84
4.1 结构混凝土寿命预测方法	84
4.2 结构混凝土寿命预测模型	85
参考文献	112
第5章 结构混凝土耐久性提升关键技术	114
5.1 原材料质量控制技术	114
5.2 高耐久混凝土制备关键技术	126
5.3 基于耐久和抗裂的桥梁结构混凝土配合比设计方法	167
5.4 混凝土施工关键技术	177
5.5 混凝土耐久性保障体系	187
参考文献	189
第6章 结构混凝土服役性能提升新技术	192
6.1 混凝土减缩抗裂技术	192
6.2 混凝土表层强化技术	198
6.3 遥爪聚合物微凝胶材料增韧技术	202
6.4 结构混凝土修复新技术	204
6.5 基于微结构的现代混凝土配合比设计新方法	206
参考文献	207

第 1 章 绪 论

1.1 混凝土及其发展

混凝土也称砼^[1-2],是当代最主要的土木工程材料之一,它是由胶结材料、集料和水按一定比例配制,经搅拌振捣成型,在一定条件下养护而成的人造石材。混凝土具有原料丰富、价格低廉、生产工艺简单的特点,因而其使用量越来越大。同时,混凝土还具有抗压强度高、耐久性好、强度等级范围宽等优点,促使其使用范围十分广泛,不仅在各种土木工程中使用,在造船业、机械工业、海洋的开发、地热利用等工程中,混凝土也是重要的材料。

1.1.1 混凝土的萌芽与罗马混凝土

混凝土的历史可追溯至石器时代晚期。在地球上的许多地方,人类在公元前几千年就从篝火中或用类似的方法获得了(不一定是制造)生石灰。一场倾盆大雨或其他形式的降水,使这种“加热的石头”变成了细粉。当这种细粉与泥土和碎石混合以后,在空气中经历了若干时间,又变成了当时不知名的石头。通过对这种过程的观察,人类依靠自己的聪明才智创造了一种材料,用这种材料能够将石头相互紧密结合,这种材料就是“天然混凝土”,它的性能和外观近似于古罗马时期的混凝土^[3]。

真正意义上的混凝土的概念可追溯至古罗马时期。那个时期,几大文明古国——中国、埃及和古罗马的人就用烧石灰、烧黏土、烧石膏及石灰加火山灰作为胶凝材料配制混凝土。数千年前,在我国就用石灰与砂子混合配制成砂浆砌筑房屋,用砂、土、石灰和砾石建造举世闻名的万里长城^[4]。

罗马混凝土自公元前 273 年开始,大量应用于堤坝、水库、港口、水渠等,当时是作为一种生产效率高且便宜的建造方法而推广的。在文献中,很多作者认为罗马混凝土是“建筑历史上有重大意义的发明和对廉价建筑的天才贡献”。罗马混凝土原来称为“Opus-Caementitium”,其概念来自于拉丁文,Opus 代表工厂、结构工程、建造方法、建筑部件等,Caementitium 代表经加工的石材、碎石、砌墙砖、集料等。后者和砂浆混合并在胶结料硬化以后形成一种强度很高的凝块,它的外观与性能和今天的混凝土相当,因此在考古学和建筑史学中称其为浇筑墙体、浇筑混凝土、碎石混凝土、石灰混凝土、水泥墙体或简称为混凝土、罗马混凝土,也就是说,它是一种用砂浆和石材制成的抗压的建筑部件。其制作方法是先用砌墙的石材或木板制成一个外壳,然后将罗马混凝土填在其中,而作为外壳的石材或木板在混凝土硬化后即拆除,可重复使用。这样,天才的建筑工匠们将混凝土应用于筒形壳体 and 拱形圆顶,使建筑产生了一种全新的形式,开创了建筑的新时代。例如,使用石灰、砂土和石子配制成混凝土,建造著名的帕提农(Pantheon)万神庙和斗兽场的巨大墙体,在石灰中掺入火山灰制成水性水泥(Hydraulic cement)配成用于海岸工程的混凝土,成功地建造了举世闻名的那不勒斯海港,历时 2 000 多年依然完好无损,数百米长的墙体几乎无一裂缝。

1.1.2 波特兰水泥与现代混凝土

1813 年,法国的 Vicant. L. J 用石灰石和黏土加水湿磨成均匀的混合物,经过煅烧制成了人工水硬性石灰,被认为是近代波特兰水泥的雏形。1824 年,英国泥水工阿斯普丁(Joseph Aspdin)将石灰石与黏土一起煅烧,发明了波特兰水泥,并取得了专利,这种水泥就是我们今天广泛使用的硅酸盐水泥,他将这种水泥命名为 Portland 水泥,是因为它的颜色酷似英国 Portland 岛所产石材的颜色。值得一提的是,同一时期,俄罗斯人 Чериев 在 1825 年也发明了类似的胶凝材料(硅酸盐水泥)。

波特兰水泥的发明开创了现代混凝土的历史,阿斯普丁也因此被认为是现代水泥的鼻祖。水泥发明后迅速在世界范围传播,并得到广泛应用。20 年后,法国、英国、德国、美国、日本和我国先后建立了水泥厂,为混凝土工业开辟了新的一页。我国于 1876 年在唐山开平煤矿附近设窑生产水泥,即唐山启新洋灰厂,为我国水泥工业之始,此时距波特兰水泥发明仅 50 年。1886 年,美国首先用回转窑煅烧熟料,使波特兰水泥进入了大规模工业化生产阶段。此后水泥品种和性能不断扩大和改进,为混凝土在工程中广泛应用准备了条件,成为现代社会不可缺少的重要建筑材料。

1.1.3 钢筋混凝土和预应力钢筋混凝土

混凝土具有很高的抗压性,但抗拉性较弱,如天然石材一样。混凝土的抗拉强度与抗压强度相比,前者是后者的 $1/10$ 左右。于是,人们开始寻找解决混凝土抗拉性弱的办法。1850 年,法国人兰伯特(Lambot)用加钢筋的混凝土做了小水泥船。1861 年巴黎花匠蒙耶(Monier)发明了在水泥砂浆花盆中放置铁丝网,制成的花盆薄且强度大,并获得专利,其后又陆续获得了梁、板、管等多项专利。至此,钢筋混凝土开始具有实用价值,蒙耶因此被称为钢筋混凝土结构的创始人。

当然,这一段时间,钢筋混凝土的发展仍处于经验摸索阶段,没有相关理论的支撑。在蒙耶的钢筋混凝土板中,钢筋放在混凝土板的中间,这显然不是十分合理的。钢筋混凝土成为主要建筑材料及其广泛使用与工程力学的发展是分不开的。对梁、柱等建筑构件在各种荷载下的受力状态一直是人们关心的问题,伽利略、胡克、武尔茨、马里奥特等都对梁在承受重力荷载下所受应力通过实验进行了分析,并提出各种假说。这些理论发展成后来的材料力学、结构力学及弹性力学等,并广泛应用于工程之中。正因为对梁的受力形成科学的精确分析,人们认识到要将钢筋放置在梁的受拉力一侧,该侧混凝土受拉力作用将开裂,拉力将完全由钢筋来承受。钢筋混凝土设计逐渐科学化^[2],并出现了大量混凝土材料的科学理论:1887 年科伦(Koenen)发明了钢筋混凝土的计算方法,大大促进了混凝土的应用范围;1896 年,法国人 Ferret 提出了以孔隙含量为主要因素的强度公式;而 1918 年美国阿布拉姆(Abram D)通过大量实验建立的水灰比理论,则是混凝土材料性能研究的一次重要发展。随后就出现了配合比设计法和各种工艺规程,使混凝土强度、耐久性以至均匀性得到了保证,为混凝土材料可靠地在工程中广泛应用提供了依据。

预应力钢筋混凝土的概念最早是 1886 年美国工程师杰克逊(Jackson)在楼板中应用的。1888 年,德国工程师德林(Dohling)获得在混凝土板、梁中用钢筋施加预应力的专利。但使得预应力混凝土取得重要发展的是法国著名的桥梁工程师弗瑞西奈(Freyssinet)。1919 年,弗瑞

西奈在法国建成了三孔跨度为 171.7m 的博浪加斯特(Plougastel)公路铁路两用混凝土拱桥,在此之前桥梁跨度不超过 100m,在此期间,他发现混凝土的收缩和徐变现象,并提出了混凝土收缩、徐变理论,奠定了预应力钢筋混凝土研究的基础。1928 年,弗瑞西奈开始专门从事预应力混凝土的研究工作,1932 年制成预应力混凝土电线杆,并陆续发明了施加预应力的机械,从而使得预应力混凝土在建筑业中广泛使用。预应力钢筋混凝土结构^[2]更加充分发挥了混凝土与钢筋共同作用的复合功能,为减少结构断面、增大抵抗荷载能力、提高抗裂和耐久性等起到重要的作用,使长跨、高耸、重载等结构使用钢筋混凝土及预应力混凝土作为主体材料成为可能,这是混凝土技术的一次飞跃,大大推动了建筑工程的进步。

1.1.4 减水剂的发明与泵送混凝土

混凝土外加剂的历史很长,如古罗马人用动物油脂、乳液和动物血来改善混凝土的工作性和耐久性,我国很早就使用动物血、桐油、糯米汁等来改善砂浆的性能。20 世纪 30 年代末,美国发明的松脂类引气剂和纸浆废液减水剂使混凝土的耐久性、流动性得到前所未有的提高,在工程中迅速得到应用。1935 年,美国的 E. W. Scripture 首先研制成以木质素磺酸盐为主要成分的减水剂,1937 年获得专利,20 世纪 50 年代开始在美国滑模混凝土、大坝混凝土和冬季施工混凝土中大量使用。第二次世界大战结束后,强力搅拌、振动成形设备进一步发展,出现了干硬与半干硬性混凝土,混凝土强度得到了很大的提高,C50、C60 混凝土已在工程中得到了相当广泛的应用,高层、超高层建筑与大跨度桥梁也相继出现,但这时期混凝土生产与施工的噪声也困扰着人们,增加了环境负荷。

1962 年,日本花王石碱公司服部健一博士首先研制成以 β -萘磺酸甲醛缩合物钠盐为主要成分的减水剂,简称萘系减水剂。这类减水剂具有减水率高的特点,适宜于制备高强(抗压强度达 100MPa)或坍落度达 20cm 以上的混凝土。1964 年,联邦德国研制了磺化三聚氰胺甲醛树脂减水剂,该类减水剂与萘系减水剂同样具有减水率高、早强效果好、低引气量等特点,对蒸养混凝土制品和铝酸盐(主要为 C_3A)含量高的水泥制品适应性较好,能制备高强或大流动性混凝土。德国由此发明了流态混凝土,使混凝土由原来的人工浇筑或吊罐浇筑发展为泵送施工,节省人力,提高工效,保证质量,减少噪声,使混凝土技术水平与施工水平有了极大的飞跃。高效减水剂的应用成为继钢筋混凝土和预应力混凝土之后,混凝土发展史上第三次重大突破,混凝土材料也进入由塑性、干硬性到流态化的第三代,泵送混凝土得到巨大发展和广泛应用。近年来,随着混凝土材料的高性能化,聚羧酸系、氨基磺酸系等减水率高、大流动度和坍落度经时损失小的新型高效减水剂得到了迅速开发和应用。

1.1.5 高性能混凝土与混凝土的绿色化

近年来,伴随着经济社会的快速发展,混凝土的耐久性等性能指标成为人们对混凝土的重点追求,相继研究、开发出具有各种特殊性能良好的混凝土,也就是说混凝土由过去的以强度为中心,发展为以耐久性为中心。1990 年,美国国家标准与技术研究院(NIST)及美国混凝土协会(ACI)联合提出“高性能混凝土”的概念,定义高性能混凝土为同时具有高力学性能、高工作性和高耐久性的匀质混凝土。高性能混凝土概念的提出,既是对近年混凝土技术成就的总结,又是对混凝土未来发展的展望,至少在今后,混凝土的高性能化将成为努力方向^[5]。

随着对高性能混凝土研究的不断深入,对高性能混凝土的概念,很多专家学者都提出了自

己的新看法。国外方面,1990年,美国的 Mehta. P. K. 提出:高性能混凝土不仅要求高强度,还应具有高耐久性(抗化学腐蚀)等其他重要性能,如高体积稳定性(高弹性模量、低干缩率、低徐变和低温度变形)、高抗渗性和高工作性等。1992年,法国的 Malier 把高性能混凝土定义为:高性能混凝土的特点在于具有良好的工作性、高强度和早期强度、工程经济性高和高耐久性,特别适用于桥梁、港口、核反应堆以及高速公路等重要混凝土建筑结构。同年,日本小泽一稚和冈村莆提出,高性能混凝土应具有高工作性(高流动性、黏聚性和可浇筑性)、低温升、低干缩率、高抗渗性和足够的强度。然而,具有对比意义的是,加拿大的研究者则将填充废矿井的强度约为 1MPa 的混凝土亦称为高性能混凝土。

国内方面,蒲心诚教授认为高性能混凝土应具有优良的施工性能、高的硬化后强度、良好的体积稳定性和高的耐久性。他认为,不能因为某种性能好,将满足了工程某种功能要求的混凝土称为高性能混凝土,否则,高性能混凝土涵盖太广,也就失去了高性能混凝土的意义^[6]。冯乃谦教授认为,高性能混凝土必须是高强度,且要保证施工的密实性、高的工作度和高的耐久性,他亦指出,耐久性还应与使用的环境相结合,采取相应的对策,仅仅是高强度是不够的^[7]。吴中伟院士认为,第一,高性能混凝土应以耐久性作为设计的主要指标,针对不同的用途要求;第二,对下列性能有重点地予以保证:耐久性、工作性、适用性、强度、体积稳定性、经济性。为此,高性能混凝土配制的特点是低的水胶比,选用优质原材料,除水泥、水、集料外,还必须掺加足够数量的矿物细掺料和高效外加剂^[8]。

高性能混凝土的概念是基于土木工程的需要,在强调混凝土高强度的同时,兼顾到混凝土的高耐久性和高工作性要求而提出的。但由于不同的领域对高性能混凝土的要求不尽相同,因此,不同的国家、不同的研究者对高性能混凝土概念的界定也不尽相同。在这些定义中,有强调强度的,有强调流动性的,有强调耐久性的,有同时强调流动性、强度和耐久性的。不少研究者还将满足某种功能或某种功能良好的混凝土,都称为高性能混凝土。可见,目前高性能混凝土的定义还比较混乱,很不严格。

近年来,“绿色高性能混凝土”作为一个重要的概念被提了出来^[9]。它要求在使用混凝土的同时,要同时降低水泥用量,减轻环境污染,合理利用工业“三废”,有效替代部分水泥,降低混凝土用水量,提高混凝土的工作性、耐久性,延长使用寿命,降低维修费用,减少废弃物,从而减轻混凝土产业对环境的危害,使其成为可持续发展产品。绿色高性能混凝土是高性能混凝土的延续与发展。把绿色高性能作为混凝土的发展方向,目的在于加深人们对绿色的重视,加强绿色意识,使混凝土工作者更自觉地提高混凝土的“绿色”含量或加深其“绿色度”,节约更多的资源、能源,不仅会使工程建设对环境的破坏减少到最少,而且还有利于环境的改善,这不仅是混凝土材料和土建工程健康发展的需要,也是可持续发展的需要,更是人类生存和发展的需要。

1.2 结构混凝土的耐久性

混凝土材料在服役期内经受着力学因素与环境因素的多重损伤作用。首先,在力学因素作用下,其性能与功能将逐步衰减,这是一个不可逆的客观规律,特别是混凝土自身徐变特性以及疲劳荷载对于混凝土材料的损伤劣化作用,是造成结构耐久性失效的关键问题。其次,在各种环境介质作用下,例如冻融循环、硫酸盐侵蚀等,将导致混凝土材料内部结构的改变与损

伤,造成混凝土结构发生耐久性失效问题。在力学与环境因素的多重合作用下,混凝土材料的损伤劣化将进一步加剧。图 1-1 ~ 图 1-3 显示了实际工程中由于力学和环境因素造成的混凝土开裂、剥落、露筋等耐久性危害。

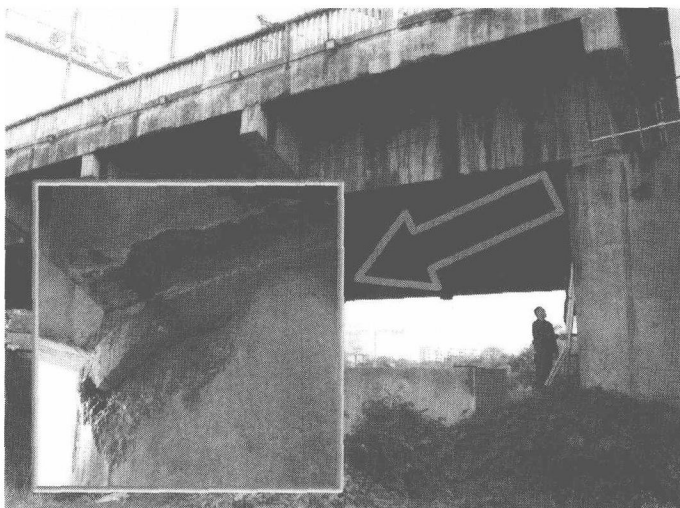


图 1-1 混凝土开裂



图 1-2 混凝土剥落

对于预应力混凝土来说,长期以来,由于预应力混凝土结构不产生裂缝或裂缝宽度很小,一直被认为其耐久性要大大高于普通混凝土结构。但大量的工程实践表明,预应力混凝土结构也存在耐久性问题,有时甚至比普通混凝土结构更严重。由于预应力混凝土结构的特殊性,其破坏具有无预兆性和突发性,更加剧了预应力混凝土结构破坏的危险,因此预应力混凝土结构一旦出现耐久性不足问题,其后果可能就是灾难性的。

耐久性支配着混凝土结构在整个服役过程中的“健康”和“寿命”,结构耐久性不足所造成的后果非常严重。近年来,由于混凝土结构耐久性问题,造成建筑物功能丧失,需要停用、修缮、废弃、拆除和重建的事件多有发生,甚至发生严重事故,造成十分巨大的经济、社会损失,威胁公共安全。据统计,美国混凝土基建工程的总价为 60 000 亿美元,今后每年用于混凝土工

程维修和重建的费用估计将高达 3 000 亿美元。1978 年,美国仅用于修复公路混凝土桥面板的费用即为 63 亿美元。1980 年,北海 Stavanger 近海钻井平台 Alexander Kjell 号突然破坏,导致 123 人死亡。英国建筑和土木工程的维修费用也高达 150 亿英镑,其中混凝土工程维修费用为 5 亿多英镑。国内大规模混凝土工程建设历史虽然不如发达国家长,但仅仅从近几年的工程实际情况来看,其损害也是严重的。一些机场跑道、高速公路、铁路桥梁轨枕、京津地区的立交桥、华东南地区的海港码头等混凝土工程在远低于其设计寿命(个别工程甚至刚建成几年即遭破坏)。可见混凝土耐久性问题已严峻地摆在我们面前,应该引起高度的重视,切实采取措施提高混凝土的耐久性。



图 1-3 混凝土露筋

造成这一现象的原因是多方面的,主要包括设计理论和结构构造体系不完善以及施工和管养水平低下。施工上的缺陷虽然短期不会对混凝土结构的正常使用产生明显的影响,但却会对结构的长期耐久性产生非常不利的危害。在承认施工存在问题的同时,也不可否认,在结构设计领域,关于结构安全性的问题还有许多需要改进的地方。

1.3 结构混凝土耐久性的影响因素

耐久性对混凝土工程来说意义非常重要,若耐久性不足,将会产生极严重的后果,甚至对未来社会造成极为沉重的负担。影响结构混凝土耐久性的因素很多,而且各种因素间相互联系、错综复杂。结构混凝土所处的环境可以划分为一般大气环境、海洋环境及工业环境,影响其耐久性的因素主要为混凝土碳化收缩及其钢筋锈蚀、碱—集料反应、温湿度变化、氯离子钢筋锈蚀、酸气(SO_2 、 NO_x)侵蚀、硫酸盐腐蚀破坏、冻融循环和空隙中盐类结晶、应力损失以及施工质量等。

1.3.1 混凝土碳化

混凝土碳化是指环境中的 CO_2 与混凝土表面接触并且通过混凝土孔隙不断向混凝土内

部扩散,与混凝土中碱性水化物发生复杂的多相物理化学反应的过程。混凝土碳化会使混凝土的收缩加剧,混凝土表面因为收缩产生拉力出现微裂纹,从而又进一步降低混凝土强度以及抗渗能力。同时,混凝土碳化会降低混凝土的 pH 值,当混凝土中 pH 值降低到一定数值时,混凝土中的钢筋钝化膜就会被破坏,造成钢筋锈蚀。

影响混凝土碳化的主要因素有:材料因素(水灰比、水泥品种和用量、掺合料种类和掺量等);环境因素(环境的湿度、温度、 CO_2 浓度等);施工因素(混凝土搅拌、振捣和混凝土的养护等)。因此,控制碳化的技术措施主要有三项:①提高混凝土的气密性;②将混凝土中的 pH 值保持在一个可靠范围之内;③将混凝土与恶劣环境隔离开来。

1.3.2 混凝土钢筋锈蚀

混凝土中的钢筋表面有一层致密的钝化膜,在正常情况下钢筋不会发生锈蚀,但是钝化膜破坏以后,在有足够的水和氧化剂的条件下钢筋就会发生锈蚀。钢筋锈蚀后导致混凝土结构破坏主要表现在:钢筋锈蚀导致钢筋截面积减少;钢筋锈蚀导致钢筋不能把所受的力传递给混凝土;钢筋锈蚀产物体积增大,对混凝土的压力增大导致混凝土保护层开裂。pH 值、氯离子浓度、温度、杂散电流、孔隙水饱和度和混凝土碳化等因素都会对钢筋锈蚀的速度产生影响:①pH 值。当混凝土中 pH 值大于 11.5 时,钢筋处于钝化状态,钢筋就不会锈蚀;pH 值小于 9 时,钢筋完全脱钝,pH 值的大小不再影响锈蚀速度;pH 值由 11.5 降至 9 时,钢筋钝化膜逐渐减小,锈蚀速度逐渐增大。②氯离子浓度。③温度。温度对钢筋锈蚀有着重要影响,研究认为在 40°C 以下时,随着温度的增加钢筋的锈蚀率增加,但在 40°C 以上时,反而会延缓钢筋的锈蚀。

1.3.3 碱—集料反应

碱—集料反应(AAR)是指混凝土中的碱性物与集料中的活性组分之间发生膨胀反应破坏混凝土结构,是影响混凝土耐久性的主要原因之一。由于碱—集料反应不同于其他混凝土病害,它的开裂破坏是整体性的,而且目前还没有有效的修补方法,因此被学术界称为混凝土的“癌症”。碱—集料反应必须同时具备以下三个条件才能发生:①混凝土中含有过量的碱(Na_2O 和 K_2O);②集料中含有碱活性矿物,如果集料中不含有碱活性矿物,混凝土中含有再多的碱都不会有碱—集料反应的发生;③混凝土处于潮湿环境,因为碱—集料反应都需要有大量的水的存在才能进行,因此潮湿的环境是碱—集料反应的必要条件。

1.3.4 混凝土冻融破坏

总会有一些水存留在混凝土毛细孔中,而这些水在温度正负交替作用下,就会进行“冻结—消融—冻结”的循环过程。混凝土在这个循环过程中受到水冻胀压力和渗透压力的双重作用,产生疲劳损伤,最终使得混凝土由外到内发生剥蚀破坏。混凝土的冻融破坏形式主要有冻胀开裂和表面剥落两种,其主要影响因素有混凝土的水灰比、含气量、水泥品种、降温速度和养护方法等:①水灰比。水灰比直接影响混凝土中毛细孔的结构和孔隙率。水灰比越大,混凝土中自由水的含量越多,抗冻融能力就越差。②含气量。当混凝土中含有大量的不连通小孔时,在混凝土受冻的时候这些小孔可以减小混凝土受到的静水压力并抑制混凝土中水结冰,因此我们通过掺入引气剂等外加剂来增加混凝土中的含气量来提高混凝土的抗冻性。

1.3.5 氯盐侵蚀

在海洋环境下,结构混凝土中的钢筋主要是受到氯离子的侵蚀,因此混凝土中钢筋表面氯离子含量的多少就成为衡量结构混凝土在海洋环境下耐久性的一个重要指标。氯离子除了来自混凝土的各种原料外,还来自于外界环境。氯离子会通过混凝土表面的吸附、渗透、扩散、毛细吸附等各种途径侵入混凝土内部。氯离子经过混凝土保护层侵入到钢筋表面,氯离子在钢筋表面积累到一定浓度就会引起钢筋锈蚀。氯离子引起混凝土结构破坏的过程一般分为两个阶段:①初始阶段,氯离子透过混凝土保护层,不断在钢筋表面积聚,当氯离子浓度超过临界值后,钢筋开始锈蚀;②钢筋锈蚀发展阶段,钢筋开始锈蚀后,锈蚀产物体积膨胀使保护层开裂,一旦混凝土出现裂缝,钢筋锈蚀速度加快,导致混凝土结构的破坏。

1.3.6 硫酸盐腐蚀

硫酸盐的腐蚀是硫酸盐溶液从混凝土结构物表面侵入到内部,一部分发生反应生成膨胀性盐,一部分在混凝土内部的微裂纹处不断结晶,最后导致混凝土体积不断膨胀,致使混凝土结构内部遭到破坏的过程。大多数情况,混凝土结构物所处的环境如水中或土中含有 SO_4^{2-} ,有时除环境中含有 SO_4^{2-} 外,混凝土还采用含有 SO_4^{2-} 的化学外加剂。控制硫酸盐的腐蚀对混凝土结构耐久性的影响,应该在拌和混凝土的原料选择上把关或采用表面防护材料。

1.3.7 耦合因素作用

现代结构混凝土的服役环境越来越复杂,人们逐渐发现混凝土耐久性能的变化不是单一因素作用效果的叠加,而是多因素耦合作用导致的。海洋环境中的结构混凝土会遭受到冰冻、风浪、水质、潮汐等多种天然因素的共同作用,北方寒冷地区的道路、桥梁结构混凝土通常在冻融循环与氯离子侵蚀的双重因素作用下服役。对结构混凝土耐久性产生影响的耦合因素包括:荷载—碳化、荷载—冻融循环、荷载—氯盐侵蚀、干湿循环—氯盐侵蚀、荷载—冻融循环—氯盐侵蚀、荷载—干湿循环—氯盐侵蚀等。在不同耦合因素作用下,结构混凝土或服役性能提升,或服役寿命缩短。系统研究不同耦合因素作用对混凝土耐久性能的影响,并建立相关预测模型是实现结构混凝土在复杂环境下服役性能提升的关键。

1.3.8 施工因素

结构混凝土的施工对其整体耐久性至关重要。混凝土材料品质低下和混凝土配合比选择不当导致混凝土性能不良,施工操作粗放形成潜在的混凝土缺陷,都极易使混凝土很快产生破坏,这就需要有良好的施工组织管理来杜绝施工环节的不稳定因素。保证结构混凝土的耐久性要做到以下几点:①混凝土配合比的合理设计;②混凝土拌制及运输的规范化;③混凝土浇筑过程中振捣的充分性;④加强混凝土的养护;⑤不同季节施工技术的合理控制。

1.4 结构混凝土耐久性提升的重要性

目前,我国的基础设施建设规模宏大,每年投资均超过2万亿元,其中混凝土结构占有极大的比重。作为混凝土结构最基本的组成——结构混凝土,如果能确保和提高其耐久性,将会

给基本建设带来巨大的经济效益和社会效益。

结构混凝土作为我国土木、水利和交通工程中应用最为广泛的一种材料,加强其服役性能提升研究,对我国推行可持续发展战略将有积极意义。建筑业消耗了全世界 40% 的能源和资源,节约能源和资源是执行可持续发展战略的重要内涵。通过提升结构混凝土的耐久性,能够有效节省相关维护、修缮费用,避免过早失效而进行拆除、重建,避免资源和能源浪费。仅就基建工程的主要材料水泥而言,其生产能耗和气体排放量就占相当分量,以 CO_2 排放量计,2006 年全球水泥排放约 20 亿吨,通过提升结构混凝土的服役性能,从而提高水泥的利用效率,这比水泥工业本身的节能减排的效益要高得多。从这一点来说,结构混凝土耐久性的提升对于环境保护也有着非同寻常的意义。

对于高层建筑、机场道面、大型桥梁、海洋平台、核电站等特种结构混凝土工程,如果由于耐久性的不足,过早对其进行维修加固,一方面要花费大量财力,造成极大浪费;另一方面对此类工程进行维修,将对人民的生活、交通运行及能源供应等众多方面产生不利影响,给人民的工作和生活带来诸多不便。因此,加强结构混凝土耐久性研究对确保人民生活质量,促进社会和谐稳定发展有着积极的作用。国内外大量统计数据表明,如果对结构混凝土的耐久性考虑不周,重视不够,所造成的巨大损失中,高昂的维修和重建费用往往只占较小的部分,更大的损失来源于建筑物功能丧失所造成的间接经济损失与社会影响。

重视结构混凝土耐久性提升对于整个混凝土学科的发展也具有重要意义。结构混凝土耐久性的提升研究,需要在整个混凝土科学研究内部将水泥基材料微观结构研究、水泥基材料宏观性能研究以及混凝土结构整体性能研究有机结合起来。同时,结构混凝土耐久性的提升研究也需要相关研究学者,跨学科跨领域共同联手攻克耐久性技术难题。这些必将推动整个混凝土学科的快速发展。

参 考 文 献

- [1] 冯乃谦. 混凝土技术新进展. 建筑机械, 1999(3).
- [2] 卢汝生, 吴秋飞. 混凝土——人类的伟大发明. 中山大学学报论丛, 2001(1).
- [3] 吴正直译. 混凝土——历史悠久的房建材料. 房材与应用, 2003(4).
- [4] 梁思成. 中国建筑史. 北京: 百花文艺出版社, 1998.
- [5] 林旭健. 混凝土的高性能化与可持续发展. 福州大学学报(哲学社会科学版), 2000(2).
- [6] 蒲心诚. 超高强高性能混凝土. 重庆: 重庆大学出版社, 2004.
- [7] 冯乃谦. 混凝土技术手册. 北京: 中国建筑工业出版社, 1996.
- [8] 吴中伟, 廉慧珍. 高性能混凝土. 北京: 中国铁道出版社, 1999.
- [9] 吴中伟. 高性能混凝土(HPC)的发展趋势与问题. 建筑技术, 1998(1).

第2章 混凝土微结构形成与损伤劣化

2.1 混凝土结构的形成与演变规律

材料的性能很大程度上取决于其内部结构。换句话说,混凝土的组成及内部结构决定了其性能的优劣,而混凝土微结构在服役过程中的变化则导致了其宏观性能的变化。因而,了解混凝土结构的形成与演变规律非常重要。

2.1.1 水泥浆体的微观结构形成与演变

1. 硅酸盐水泥的水化硬化

硅酸盐水泥是将水泥熟料、混合材料与一定数量的石膏磨细制成的水硬性胶凝材料,所以熟料中的各单矿物在各自水化的同时,还会发生相互之间的作用,石膏也要与铝酸盐和铁铝酸盐反应,甚至进入硅酸盐的水化产物。水泥加水后,首先石膏迅速溶解于水, C_3A 立即发生反应, C_4AF 与 C_3S 亦很快水化,而 $\beta-C_2S$ 则稍慢。几分钟后在电子显微镜下可以观察到水泥颗粒表面生成针状晶体、立方片状晶体和无定型的水化硅酸钙凝胶(C-S-H)。尺寸相对较大的立方板状晶体是氢氧化钙,针状晶体(或立方棱柱状晶体)是三硫型水化硫铝酸钙(钙矾石AFt)。以后由于不断地生成三硫型水化硫铝酸钙,使液相中的 SO_4^{2-} 离子逐渐耗尽后, C_3A 与 C_4AF 和三硫型水化硫铝酸钙作用,生成单硫型水化硫铝酸钙(AFm)。生成的 $3CaO \cdot (Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3) \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$ 可以再和 $4CaO \cdot (Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3) \cdot 13H_2O$ 形成固溶体。如果石膏不足还有 C_3A 或 C_4AF 剩留,则会生成单硫型水化物和 $C_4(AF)H_{13}$ 的固溶体,甚至单独的 $C_4(AF)H_{13}$,而后逐渐变成稳定的等轴晶体 $C_3(AF)H_6$ 。

综上所述,硅酸盐水泥水化生成的主要水化产物有:水化硅酸钙、氢氧化钙、水化铝(铁)酸钙和水化硫铝(铁)酸钙晶体,在充分水化的水泥石中,C-S-H凝胶约占70%, $Ca(OH)_2$ 约占20%,钙矾石和单硫型水化硫铝酸钙约占7%。

水泥石的结构是由未水化的水泥颗粒、水化产物以及孔隙组成,水化产物晶体共生和交错,形成结晶网络结构,在水泥石中起重要的骨架作用,水化硅酸钙凝胶填充于其中。水化硅酸钙凝胶比表面积很大,表面能高,相互间受到分子间的引力作用,相互接触而发展了水泥石的强度。因此,随着水化龄期的推移,水化硅酸钙生成量增加,有助于水泥石强度增长。

水泥的水化和凝结硬化是从水泥颗粒表面开始,逐渐往水泥颗粒的内核深入进行。初期水化速度较快,水泥的强度增长快,但随着水化反应的不断进行,堆积在水泥颗粒周围的水化物不断增多,阻碍水和水泥未水化部分的接触,水化减慢,强度增长也逐渐减慢,但无论时间多久,水泥颗粒的内核是很难完全水化的。因此,在硬化水泥石中,同时包含有水泥熟料矿物水化的凝胶体和结晶体、未水化的水泥颗粒、水(自由水和吸附水)和孔隙(毛细孔和凝胶孔),它们在不同时期相对数量的变化,使水泥石的性质随之改变。

水泥石的强度与其他多孔材料一样,取决于内部孔隙的数量,这类影响强度的孔隙,是指