



多孔混凝土与透水性铺装

Porous Concrete and Pervious Pavement

石云兴 宋中南 蒋立红 主编

中国建筑工业出版社

多孔混凝土与透水性铺装

石云兴 宋中南 蒋立红 主编

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

多孔混凝土与透水性铺装/石云兴等主编. —北京:
中国建筑工业出版社, 2016. 6
ISBN 978-7-112-19466-7

I. ①多… II. ①石… III. ①多孔性材料-轻质混
凝土-透水路面-路面铺装 IV. ①TU528. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 121700 号

本书是关于“海绵城市”建设相关技术的专著, 主要内容有透水混凝土、植生混凝土、透水混凝土制品、透水沥青混凝土以及各种常用透水性铺装等。比较系统地表述了多孔混凝土的制备原理和方法、物理力学性能以及测试方法、环境生态效益等; 介绍了各种常用透水性铺装的设计与施工技术, 以及“海绵城市”理念运用于生活小区生态系统建设的要点等。

本书可供从事多孔混凝土和“海绵城市”建设的科研、设计技术人员与管理人员作为参考书。

责任编辑: 刘瑞霞 王莉慧

责任校对: 李美娜 张 颖

多孔混凝土与透水性铺装

石云兴 宋中南 蒋立红 主编

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

北京富生印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 16½ 字数: 399 千字

2016 年 9 月第一版 2016 年 9 月第一次印刷

定价: 48.00 元

ISBN 978-7-112-19466-7

(28742)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

序

透水性铺装是建设“渗、滞、蓄、净、用、排”降水生态系统的关键技术之一，近10年来在我国获得了较快地发展，目前在“海绵城市”建设中得以广泛应用。

中国建筑技术中心在国内率先开展了透水混凝土及其铺装技术的研究，2004年向国家申请立项并获得批准，而当时国内的透水混凝土铺装技术还处在刚刚起步的阶段。多年来，在中国建筑工程总公司的领导和主管部门的支持下，研发团队通过不懈的努力，取得了一系列重要成果，并应用于多项重大标志性工程，如北京奥运公园透水混凝土路面工程、国家重大文化建设项目-西安大明宫以及西安世界花博会透水路面工程等。近年来相关成果又应用于我国的“海绵城市”建设中，对推动“海绵城市”建设发挥了积极作用。

在实施上述一系列重大工程的同时，研发团队十分注重技术创新，在透水性铺装结构与雨水收集、透水混凝土制备方法、施工机械、检测仪器与方法等方面拥有10余项专利；主编了北京市地标第1版和修订版；编写了技术专著和多项省部级工法，国内外发表了多篇有影响的论文，成果被国内外广泛引用和转载。这些研究成果和工程示范由于起步较早、见效大，对我国透水混凝土铺装技术的发展起到了重要的推动作用。

《多孔混凝土与透水性铺装》是研发团队在这一领域技术专著的又一力作，正应当前我国“海绵城市”建设之所需。书中系统地介绍了各种多孔混凝土的制备、基本性能、检测方法以及各类透水性铺装的设计方法和施工技术，与“海绵城市”建设工程契合的降水综合利用系统的技术要点等。由于作者深厚的研究基础和实践经验，内容编写得翔实而深入，是很有实用价值的技术参考书。期待它在我国“海绵城市”的建设中发挥应有的作用。

在此祝贺本书的出版。

中国建筑股份有限公司总工程师

2016年8月

前 言

地球是我们共同的家园，珍惜家园就是保护我们自己，可是多年来人类在从自然界获取大量资源的同时，忽视了自然生态的平衡和对自然环境的涵养与修复，由此产生了一系列生态方面的严重后果，并且在很多方面人类已经为此付出了代价。水资源的短缺和由此带来的生态环境的恶化仅是其中的一个方面，但已成为制约我国社会经济发展的一个瓶颈，“海绵城市”建设正是解决这一“症结”的有效途径。

“海绵城市”的主旨就是尊重自然水文的生态属性，建设对雨水的“渗、滞、蓄、净、用、排”的生态系统，涵养自然生态。透水性铺装是其中一项不可或缺的重要内容，它不仅可以有效地促进自然水文生态的恢复，而且还能减少城市的“热岛效应”，也改善车行交通环境和生活环境。

本书为“海绵城市”建设主要相关技术方面的专著，总结了作者多孔混凝土和透水性铺装这一领域多年从事研究和工程的经验，同时借鉴了国内外最新研究成果。

各章编写人及分工如下：

第1章 石云兴、宋中南、蒋立红、李景芳；第2章 石云兴、王庆轩；第3章 石云兴、石敬斌；第4章 石云兴、张少彪、王珂；第5章 张燕刚、石云兴；第6章 张涛、张燕刚、张发盛；第7章 石云兴、倪坤、石敬斌；第8章 石云兴、戢文占、倪坤；第9章 张涛、霍亮、冯雅；第10章 石云兴、罗兰、张涛；第11章 吴文伶、孙鹏程、罗兰；第12章 霍亮、戢文占、张东华、冯建华；第13章 霍亮、张燕刚、廖娟、李艳稳；第14章 石云兴、刘伟、张鹏。

本书多处引用了国内外文献，在参考文献中都标明了出处，在此向各位相关作者表示感谢。

由于作者的水平所限，书中的缺点与不足之处在所难免，请各位读者批评指正。

作者

2016年6月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 多孔混凝土的概念	1
1.2 多孔水泥混凝土	1
1.3 透水有机胶结材混凝土	2
1.4 透水混凝土砖	3
1.5 透水混凝土路面的结构	3
1.6 常用的透水性铺装实例	3
1.7 透水性铺装与海绵城市建设的密切相关性	7
参考文献	12
第 2 章 透水混凝土的原材料与混合料的制备	14
2.1 透水混凝土制备的原理	14
2.2 透水混凝土的原材料	14
2.3 透水混凝土配合比的计算	17
2.4 透水混凝土制备工艺	18
2.5 骨料特性与混合料制备及其性能的相关性	19
参考文献	25
第 3 章 透水混凝土基本物理力学性能	26
3.1 透水混凝土的强度与受力破坏特征	26
3.2 透水混凝土抗压强度的影响因素	29
3.3 抗压强度与劈裂强度和抗弯强度的相关性	38
3.4 抗压强度与孔隙率和透水系数的相关性	39
3.5 粗骨料的级配对透水混凝土抗弯强度和透水性能的影响	40
3.6 透水混凝土的收缩性能	40
3.7 透水混凝土的抗冻融性	43
参考文献	45
第 4 章 植生混凝土	47
4.1 植生混凝土的特点与原材料要求	47
4.2 普通植生混凝土的制备与基本性能的试验研究	49
4.3 陶粒植生混凝土	52
4.4 植生混凝土的工程应用	53
参考文献	57
第 5 章 预制透水混凝土地砖	58
5.1 概述	58
5.2 普通透水砖的生产	59

5.3	仿石材纹理透水混凝土地砖的生产	65
5.4	透水混凝土砖的铺装施工	69
	参考文献	72
第6章	再生资源骨料透水混凝土	74
6.1	旧混凝土再生骨料透水混凝土	74
6.2	钢渣透水混凝土	76
6.3	火山渣骨料透水混凝土	78
6.4	旧砖瓦再生骨料透水混凝土	85
	参考文献	87
第7章	透水沥青混凝土	89
7.1	透水沥青混凝土概念	89
7.2	透水沥青混凝土的原材料与配合比	89
7.3	透水沥青混合料的基本性能	91
7.4	透水沥青混凝土路面的结构	91
7.5	PAC路面的施工要点	93
7.6	PAC路面的基本问题	93
7.7	PAC路面的表面强化修饰	94
	参考文献	95
第8章	透水混凝土的试验方法与相关研究	96
8.1	透水混凝土拌合物工作性的检测	96
8.2	力学性能的试验	98
8.3	透水系数的试验	105
8.4	孔隙率的测定	107
8.5	表面密实度的试验	108
8.6	耐磨性的试验	110
8.7	耐久性的试验	112
8.8	吸声率的试验	115
8.9	缓解热效应的测试	116
8.10	多孔路面透水时效性与相关试验	117
	参考文献	120
第9章	透水混凝土铺装的生态环境友好性	122
9.1	透水与容水功能	122
9.2	热工功能	125
9.3	降噪功能	132
9.4	净化功能	135
9.5	对植物生长的友好性	137
	参考文献	139
第10章	透水性铺装的设计	140
10.1	透水路面类型的确定	140

10.2	各种透水基层的设计要点	141
10.3	透水混凝土面层和结构层的设计	143
10.4	其他透水性铺装的设计	149
10.5	透水和容水功能设计	153
10.6	排水和集水功能设计	154
10.7	排水、集水透水混凝土路面设计实例	160
10.8	城镇居住生活小区降水综合利用的设计实例	165
	参考文献	166
第 11 章	透水混凝土铺装-人工湿地雨水收集处理系统	167
11.1	透水性铺装雨水收集系统	167
11.2	人工湿地雨水处理系统	177
11.3	透水铺装-人工湿地成套技术	185
	参考文献	190
第 12 章	透水混凝土路面施工技术	191
12.1	路基施工	191
12.2	透水基层的施工	192
12.3	透水混凝土的生产和运输	194
12.4	模板施工	197
12.5	摊铺施工	198
12.6	成型施工	199
12.7	表面处理	202
12.8	养护	203
12.9	锯缝、填缝	203
12.10	普通混凝土基层加铺透水混凝土施工	203
12.11	露骨料透水混凝土路面施工	204
12.12	透水混凝土砖铺设施工	205
12.13	特殊天气施工	206
12.14	质量检验和竣工验收	208
	参考文献	209
第 13 章	透水混凝土铺装的工程案例	211
13.1	露骨料透水混凝土路面工程	211
13.2	彩色透水混凝土路面工程	229
13.3	仿石材纹理透水混凝土路面工程	234
13.4	透水砖路面工程	238
13.5	透水混凝土在隧道工程中的应用	241
	参考文献	245
第 14 章	透水混凝土路面常见质量问题	246
14.1	不均匀沉降导致的开裂	246
14.2	透水混凝土混合料工作性不良	247

14.3	收缩导致的开裂·····	248
14.4	路面荷载和基层承载力不够导致的开裂·····	248
14.5	混合料稠度不当或过振导致的路面“连浆”现象·····	249
14.6	颗粒脱落·····	250
14.7	表面“泛白”·····	251
14.8	层间空鼓·····	251
14.9	因未设置胀缝导致的损坏·····	252
14.10	透水树脂混凝土铺装易发生的质量问题·····	253
	参考文献·····	254

第 1 章 绪 论

在混凝土这个种类众多的大体系中，大多数混凝土为达到耐久性和强度的要求而追求高密实度，为此不仅要优化配合比和掺用辅助材料，还要采用相应的生产工艺手段；但其中有一类混凝土并不是追求自身密实，而是在形成坚固节点的同时有意保留或产生一定的孔隙率，并且形成以贯通孔隙为主的大孔，被称为多孔混凝土。

1.1 多孔混凝土的概念

多孔混凝土（porous concrete）是指有足够贯通性孔隙率的混凝土，是透水混凝土（pervious concrete）和植生混凝土（green grow concrete）的统称^{[1]~[6]}，透水混凝土又可分为地面铺装用和非地面铺装用，前者主要用于路面和地面景观铺装，后者常在地下施工中作为渗水墙使用。普通混凝土可渗水的孔隙率一般在 8% 以内，主要为毛细孔。通常，其渗水的动力来自于毛细管的表面张力作用，除非施加水压头，否则渗水缓慢。而透水混凝土的孔隙率一般在 10%~25%，植生混凝土的孔隙率在 20%~35%，主要为大孔。多孔混凝土透水的动力主要来自于水的自身重力，水通过的速度较快。从所含孔隙的数量和性状的角度，混凝土类别的划分如图 1-1 所示^{[1]~[9]}。

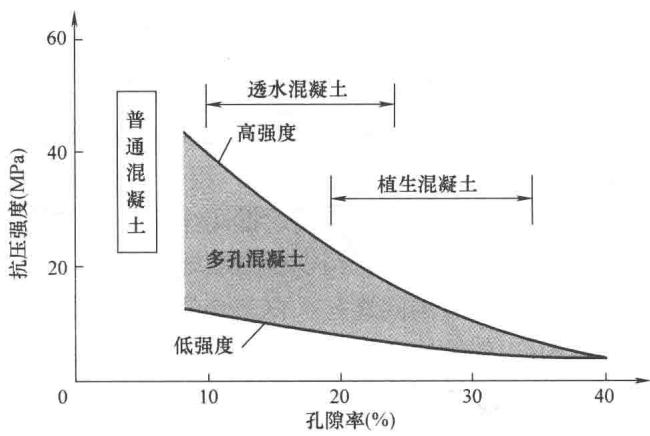


图 1-1 多孔混凝土与普通混凝土的划分示意图

常用的透水混凝土按照使用的胶结材料分为透水水泥混凝土和透水有机胶结材混凝土，而透水有机胶结材混凝土又分为透水沥青混凝土、透水聚合物（树脂）混凝土和透水橡胶混凝土等；按照铺装施工类型，透水水泥混凝土铺装分为普通透水混凝土路面、彩色透水混凝土路面和露骨料透水混凝土路面等。

1.2 多孔水泥混凝土

1.2.1 透水水泥混凝土

透水水泥混凝土常简称透水混凝土，是由一系列相连通的孔隙和混凝土实体部分骨架

构成的具有透气透水性的多孔水泥混凝土。从组成材料上看，与普通混凝土不同，透水混凝土仅含少量的细骨料或不含细骨料，以留下粗骨料之间的空隙，胶结材与骨料的比在1:4左右。从内部结构来看，主要靠包裹在粗骨料表面的胶结材浆体将骨料颗粒胶结在一起，颗粒之间为点接触，孔隙率一般为10%~25%，抗压强度在10~30MPa。

粗骨料一般采用单粒级或间断级配（开级配），细骨料可采用河砂、人工砂或工业废渣，胶结材以水泥为主，为降低成本和调整性能，可掺入一定比例的矿物掺合料，必要时也采用少量有机添加剂等。

透水混凝土路面是采用透水混凝土混合料，通过特定工艺铺装施工，形成的整体结构既有均匀分布的贯通性孔隙，同时满足路用强度和耐久性要求的路面铺装^[2]。

透水混凝土混合料的坍落度较低，一般不超过50mm，为同时满足透水性和强度要求，不能像普通混凝土那样采用强力振捣的密实成型方法，主要采用刮平、表面振动整平、抹光等施工方法。

1.2.2 植生混凝土

植生混凝土是以水泥为胶结材，大粒径的石子为骨料制备的能使植物根系生长于其孔隙的大孔混凝土，它与透水混凝土有相同的制备原理，但由于骨料的粒径更大，胶结材用量较少，所以形成孔隙率和孔径更大，便于灌入植物种子和肥料以及植物根系的生长^{[3],[6]}。

1.3 透水有机胶结材混凝土

1.3.1 透水沥青混凝土

透水沥青混凝土（porous asphalt concrete-PAC）是以高黏度沥青为胶结材，并加入少量的细骨料和矿粉形成具有粘结性和稳定性的基材，将间断级配（开级配）的粗骨料粘结在一起形成的多孔混凝土，主要用于道路、广场和公园等场所的透水性铺装。

透水沥青混凝土中，粗骨料约占总骨料的85%，粗骨料形成骨架，沥青包裹于骨料表面，形成粘结层，将骨料颗粒粘结在一起，同时掺用少量细骨料和矿粉调整混合物的黏性和提高稳定性，为改善施工性能，经常掺用少量废旧轮胎粉。

透水沥青混凝土路面最容易发生的问题是，在炎热的夏天路面会变得很热，这时表面的沥青会软化流淌一直到与下边的较冷的层面相遇，随后凝固，长期积累会逐渐造成路面的孔隙堵塞，使透水效果下降。另一个问题是沥青路面受到阳光照射和空气的氧化作用，表面逐渐变脆，在受到轮胎的碾压、摩擦后脱落，对温、湿度变化敏感，耐候性差^[4]。

透水沥青混凝土路面由于其有一定的弹性，车行与人行时的舒适感都比较明显，常用于运动、娱乐场所和停车场的铺装等。

1.3.2 透水树脂混凝土

透水树脂混凝土（俗称胶粘石）是以树脂为胶结材，靠树脂聚合固化将骨料胶结成的多孔混凝土，树脂用量一般在骨料重量的5%左右，目前多用环氧树脂，由于树脂对骨料的包裹层较薄，可以利用堆积空隙率较低的骨料，甚至用连续级配的骨料。

透水树脂混凝土一般多用于景观广场，由于树脂透明，石子多用彩色石子，以显露石子本色，增加景观效果。彩色石子多经工艺处理，呈圆滑的表面，以增加混合料的工作性和石子之间的接触面积。有些透水树脂（如环氧树脂）混凝土硬化后较脆，耐冲击性能

差,且在紫外线的作用下容易老化,一般不用于有车辆行驶的路面。

透水有机胶结材混凝土除上述种类外,还有橡胶乳液透水混凝土,由于目前应用还不多,在此暂不述及。

1.4 透水混凝土砖

透水混凝土砖也称透水混凝土铺装砌块,是以水泥作为胶结材,天然石子或再生骨料作为粗骨料,经过工厂化生产的预制透水混凝土砖,在施工现场直接铺设于透水基层上,主要用于人行而非车行的地面铺装。为增加装饰效果,还可以制成各种形状、表面具有纹理和各种颜色的透水砖,便于拼成图案^{[4],[10]~[12]}。

1.5 透水混凝土路面的结构

根据透水混凝土铺装的断面结构,可将其分为:以下3种^{[5],[25]}。

1.5.1 直渗型

直渗型透水混凝土铺装由透水面层、透水结构层和透水基层构成,降水能通过透水性铺装直接渗入地下,补充地下水资源。

(1)透水面层是透水混凝土路面的表面层,作为承受荷载的主要结构之一,它不仅应具有装饰效果,而且应达到规定的平整度,具有较高的结构强度、抗变形能力和耐磨性能,使用的骨料粒径通常5~8mm,面层的孔隙率约10%~15%。

(2)透水结构层是透水面层和透水基层之间的透水层,是垂直荷载的主要承载层,它的另一个作用是让透过面层的水通过其传递到基层,所使用骨料的粒径通常10~15mm,结构层的孔隙率大于面层,约15%~25%。

(3)透水基层是在土基与透水结构层之间,可以采用大孔混凝土、水泥稳定石或级配石铺设。它的功能是作为透水混凝土层的排水通道或容水空间,并阻止土基的土进入透水结构层。

1.5.2 导向渗透型

导向渗透型透水混凝土铺装也称有组织排水型,是通过导向型结构把透过路面的水排到路基以外的部位再渗回地下的铺装结构。

以普通混凝土路面或沥青混凝土路面为基层(实际上是中间层,因其下面仍设有路基),铺设超过10cm厚的透水混凝土层,雨水通过中间层的表面排走,在离开路基、路床一定距离后渗入地下,避免雨水对路基、路床的浸透和冲毁,例如路基为湿陷性黄土、软土、膨胀土、盐渍土等情况,或是对既有道路进行修缮,需加透水面层的情况,可采用导向渗透型。

1.5.3 雨水收集型

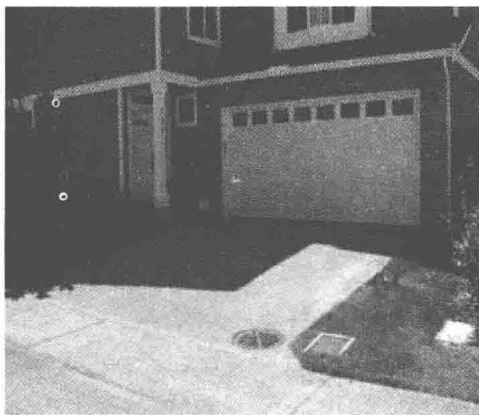
将透水混凝土路面和雨水收集利用系统集成,能够将透过路面的雨水进行收集、储存和利用的透水路面系统,而且可以在其中设置过滤系统将雨水进行净化,改善水质,使其有更多的用途^{[26],[27]}。

1.6 常用的透水性铺装实例

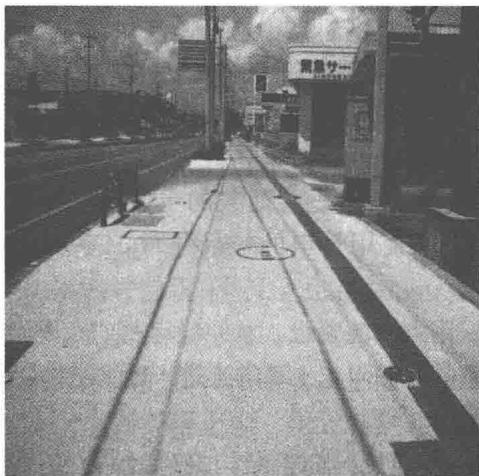
1.6.1 用于轻交通的透水混凝土铺装

透水混凝土铺装用于城镇街道、小区内的路面、停车场等,这些场合主要是轻交通和

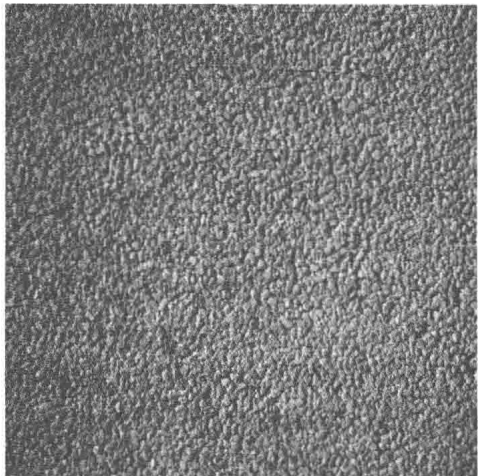
人行道，一般采用经济适用的普通透水混凝土。用于轻交通的透水混凝土铺装要经过承载设计，承载设计要综合考虑轴荷载、透水混凝土强度以及路基状况等来决定铺装厚度。图 1-2 是一些应用实例。



(a) 居民区街道的透水路面



(b) 城区的人行道(日本)



(c) 照片(b)的细部形貌



(d) 城区停车场和周围道路的透水性铺装

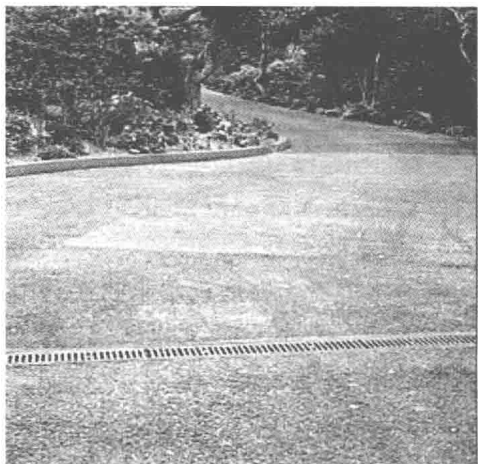


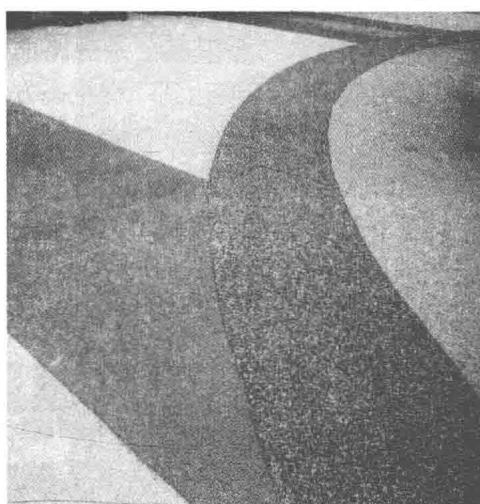
图 1-2 轻交通透水性铺装



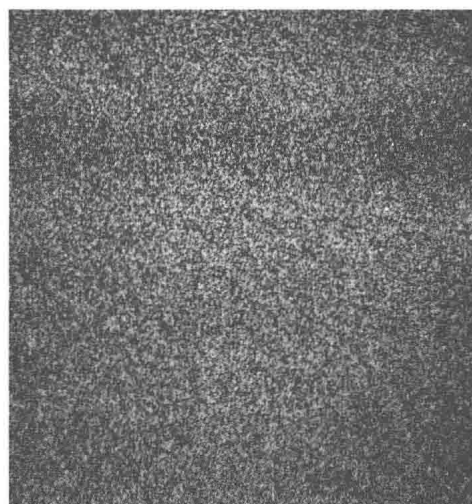
(a) 与红色地砖相间的透水铺装(旧官府庭院)



(b) 某景区的彩色透水混凝土砖路面



(c) 上海世博会景观透水混凝土



(d) 树脂透水混凝土景观路面铺装

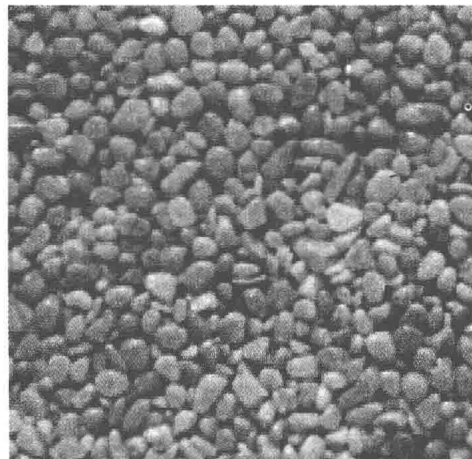


图 1-3 用于景观的透水性铺装

图 1-2 (a) 是居民区街道内与住宅和绿茵相间分布的透水路面；图 1-2 (b) 是日本某城区用透水混凝土铺装的街区的辅路；图 1-2 (c) 是其细部形貌；图 1-2 (d) 是国外的一个停车场和市区周围道路的透水性铺装，虽然场地被开辟利用，但由于铺装了透水路面，使这片场地仍然保持着与周围自然环境原有的热、水分和空气交换的生态平衡，其中左图的树围采用木屑植被透水性铺装，更有利于植物的生长，体现了人与自然和谐共生的理念。

1.6.2 用于景观路面

透水路面经常被用于景区的地面铺装，设计时要考虑与环境的协调，可采用彩色透水混凝土、露骨料透水混凝土、有表面纹理或图案的彩色透水混凝土、透水树脂混凝土等^[5]。

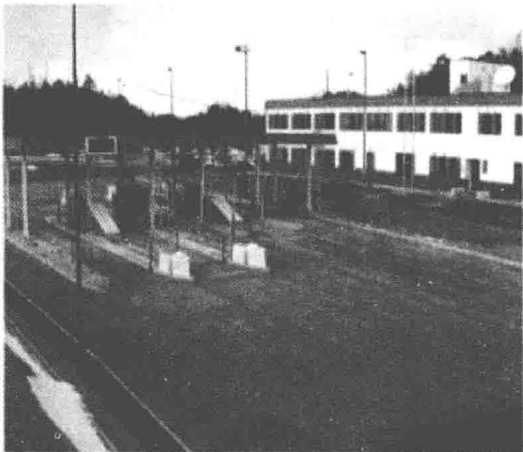
图 1-3 (a) 是日本琉球官府旧址（已有数百年以上的历史）观光地，红色宫殿为原有建筑，路面为近些年铺设，为了与红色建筑物相协调，路面设计成了红色地砖与透水混凝土相间的景观；图 1-3 (b) 为用彩色透水混凝土砖铺设的某景区的路面；图 1-3 (c) 为上海世博会广场景观透水混凝土；图 1-3 (d) 为某会所的透水树脂混凝土景观路面。可见，用于景观路面的透水混凝土除了要满足路用要求的性能外，还要达到环境生态方面的透水性要求，此外也要有与环境相协调的美学效果。

1.6.3 用于承载路面

作为承载路面材料，目前，透水混凝土的力学性能还达不到普通混凝土的水平，大规模地应用于承载路面的还不多，但在国外已经有一些试用工程，如图 1-4 所示。



(a) 高等级公路



(b) 高速路收费站

图 1-4 透水性铺装 in 承载路面中的应用 (日本)

图 1-4 中的透水路面为 1991 年日本水泥协会和福井县合作修建的透水混凝土试验性路面的一部分，混凝土抗折强度大于 4.5MPa，孔隙率大于 15%，设计交通量 100~250 (辆/日·方向)，使用三年后经检查，路面状态良好，各项性能指标正常。

1.6.4 其他类型的透水性铺装

除多孔混凝土铺装之外，透水性铺装还包括具有透气、透水性功能的人工地面铺装，如混凝土花格砌块透水性铺装、石块透水性铺装、砾石透水性地坪，木屑植被地坪以及它们的组合等。图 1-5 和图 1-6 是常见透水性铺装的举例，详细构造情况见第 10.4 节“其他

透水性铺装的设计”。今后在我国，这些透水性铺装将更多地融入“海绵城市”的建设中。

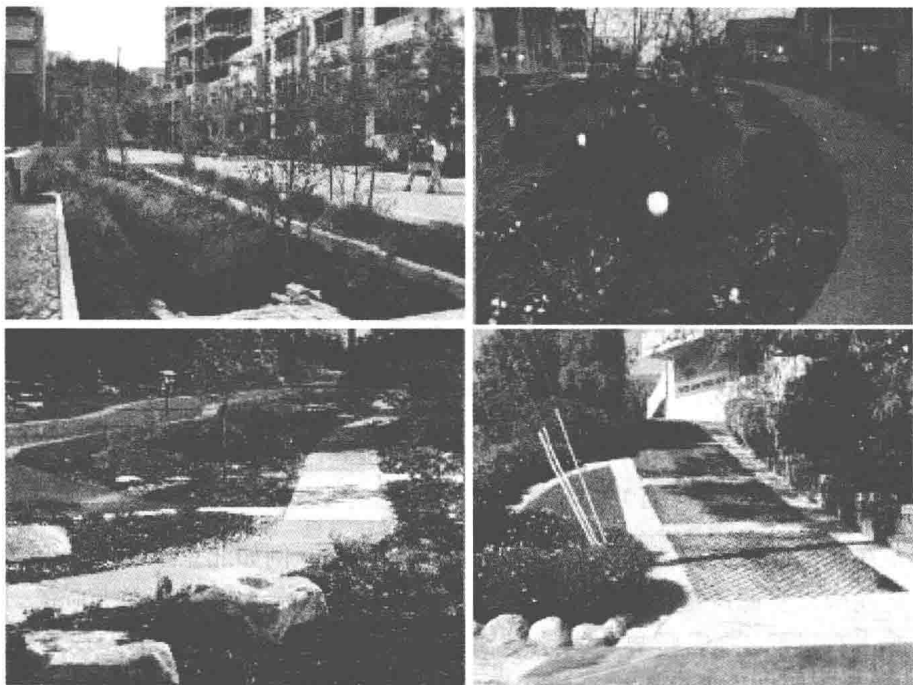


图 1-5 融入“海绵城市”建设的透水性铺装实例 I



图 1-6 融入“海绵城市”建设的透水性铺装实例 II

1.7 透水性铺装与海绵城市建设的密切相关性

1.7.1 我国的水资源状况

中国水资源人均占有量仅相当于世界人均占有量的 $\frac{1}{4}$ ，美国的 $\frac{1}{6}$ ，日本的 $\frac{1}{8}$ ，被联合国列为 13 个水资源贫乏的国家之一。

近几十年来，由于我国经济的快速发展导致地下水过采，城市化的加快带来的硬化地面面积迅速扩大，使大量的降水不能回渗到地下，因而使地下水位快速下降，产生了一系

列的生态方面的严重后果。

图 1-7 (a) 是河床干涸的状况，1-7 (b) 是由于地下水位下降导致的路面塌陷。

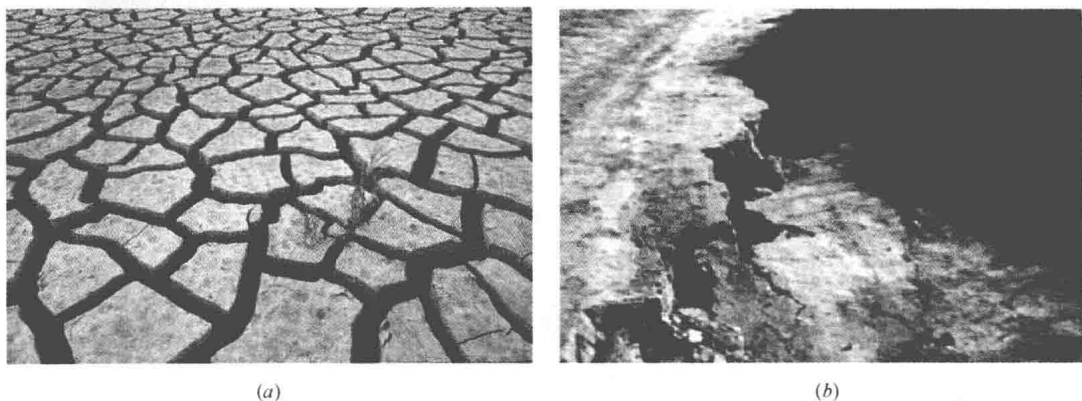


图 1-7 地下水位下降引起的生态灾难

尤其是在我国北方的广大地区，缺水情况十分严重。例如北京地处于水资源匮乏的海河流域，是我国水资源严重短缺的地区之一，其人均水资源占有量不足 300m^3 ，只有全国人均水资源占有量的 $1/8$ ，世界人均水资源占有量的 $1/30$ ，远远低于人均水资源占有量 1000m^3 的缺水下限，按照联合国标准，属于极度缺水地区。近年来，由于地下水的超量开采，且地下水不能及时得到补充，北京平原地面沉降呈快速增加趋势。到目前为止，在东郊八里庄一大郊亭、东北郊来广营、昌平沙河一八仙庄、大兴榆垓一礼贤、顺义平各庄等地已经形成了五个较大的沉降区，沉降中心累计沉降量分别达到 722mm 、 565mm 、 688mm 、 661mm 和 250mm 。最严重的地方，地表还在以每年 $20\sim 30\text{mm}$ 的速度下沉。如遇枯水年份可供水资源缺口更大，水资源短缺已成为制约首都经济和社会发展的一大瓶颈^{[5],[15]}。

1.7.2 我国的城市建设对水文生态的影响

在自然地形地貌条件下， $70\%\sim 80\%$ 的降水可以通过自然滞渗进入地下^{[4],[19]}，自然水文的循环过程如图 1-8 所示。而城市过度开发后，导致 $70\%\sim 80\%$ 的降水形成径流外

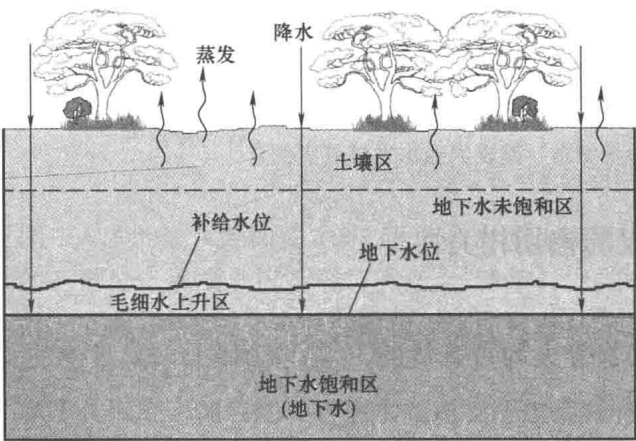


图 1-8 自然水文过程

排，仅有 $20\%\sim 30\%$ 的降水能入渗，出现了相反的水文特征。

我国的城镇建成面积在 2000~2010 年扩张了 64.45% ，远高于城镇人口 45.9% 的增长速度。城镇区域的扩大，带来硬化地面面积的迅速增加，加上各种开山、毁林和填湖等急功近利的粗放式开发，使得能回渗到地下的降水大量减少，切断了自然的水循环，出现了“逢雨必涝”，“雨过即旱”的严重状况，图 1-9