

# 多孔混凝土的研究开发

刘新菊 赵宇光 任子明 (中国建材研究院)

## 一. 前言

近年来,面对日趋严重的全球变暖、臭氧层破坏和生态系统破坏等生存环境问题,人们的环保意识不断增强,要求社会提供多种多样的生态材料,以保障人类的可持续发展。

多孔混凝土也称无砂混凝土,以具有连续空隙结构为特征。其透水性和透气性优良,连续空隙可作为生物栖息繁衍的空间。作为环境负荷减少型的混凝土,多孔混凝土的研究开发越来越受重视。

日本混凝土工学会在 1994~1995 年设立了“生态混凝土研究委员会”,以多孔混凝土为主要课题进行了为期两年的研究工作,取得了大量的成果。在欧洲,将多孔混凝土用来减少环境负荷的技术也已经达到了实用化阶段。目前,利用多孔混凝土特有的透水功能,可供生物栖息的功能以及消声、隔音功能,欧洲和日本已用来构筑堤坝、河岸,铺设公路,建造人造海礁,制作能降低铁路、机械等噪音的吸音板。

多孔混凝土使用的材料有水泥、粗骨料、细骨料、混合材、外加剂和水,基本上与一般混凝土相同。因使用场合不同,有时不使用细骨料、混合材和外加剂,即根据用途、目的,适当地选择粗骨料。

多孔混凝土的配合是根据要求其具备的品质和功能而确定。反映多孔混凝土性能的项目有孔隙率、透水系数、抗压强度、抗冻融循环性和干缩。评价多孔混凝土的功能则是依据这些性能。

国务院常务会议通过的《全国生态环境建设规划》已经公布(光明日报 1999 年 1 月 7 日第二版)。国务院明确要求“各地结合本地区的具体情

况,因地制宜地制定当地生态环境建设规划,调动亿万群众的积极性,组织全社会的力量,投入生态环境建设”。我国生态环境恶化的趋势主要表现在水土流失日趋严重,荒漠化土地面积不断扩大,草地退化、沙化和碱化面积逐年增加,生物多样性受到严重破坏。从多孔混凝土的性能来看,多孔混凝土对阻止诸如水土流失,荒漠化、生物多样性减少等趋势的发展有效果,深入系统地进行多孔混凝土的研究开发能为我国的生态环境建设作贡献。我国除了中国建材研究院进行过透水混凝土的研究之外,目前尚未开展将多孔混凝土用作堤岸保护,公路路面和消声、隔音等材料的研究工作。

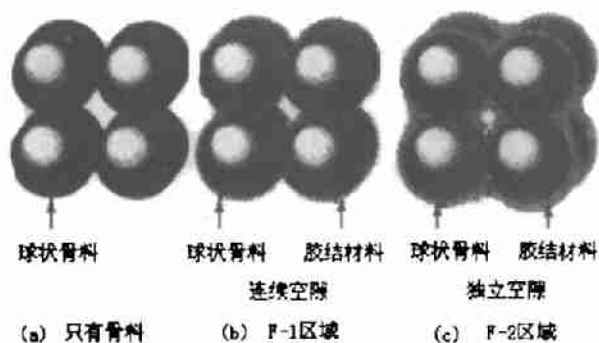


图 1 胶结材料在骨料空隙中填充的模型

## 二. 多孔混凝土 (POC) 的构成条件

这种材料的填充形式是假设骨料为固相,水泥浆体为液相,空气为气相;要求能形成连续孔隙的构成材料,即固相、气相和液相分别在连续索带 (Funicular) 的第一区域 (F-1)。固相和液相连续,而气相独立的索带的第二区域 (F-2) 的一部分包含在上述的 (F-1) 区域中的时候也符合要求,但 (F-2) 的透水性和透气性差。图 1 表示球形骨料呈立方填充时的 POC 的 (F-1) 和

(F-2) 区域的模型。

### 三. 多孔混凝土的制造方法

水泥可以使用普通波特兰水泥 (CN)、矿渣水泥 B 种和 C 种 (CB)、粉煤灰水泥 (CF) 等。用于生物环境时, 需要降低游离石灰的溶出, 不对动植物产生影响同时又不使耐久性下降。为此, 最好使用  $C_3S$  少的水泥或者掺加火山灰质混合材的水泥。骨料以 5 号 (20~13mm)、6 号 (13~5mm)、7 号 (5~2.5mm) 等粒径相等的碎石 (G) 为好。

表 1 绿化混凝土的配合例子

配比类型	胶结材料种类	$\frac{SF}{C+SF}$	$\frac{W}{C+SF}$	单位用量 ( $kg/m^3$ )				
		(%)	(%)	W	C	SF	G	SP
A	CN	—	25	72.8	292	—	1560	2.8
B	CB	—	25	71.5	286	—	1560	2.1
C	CN+SF	20	25	68.8	220	55	1560	4.6

CN: 普通水泥; CB: 矿渣水泥; SF: 硅灰;  
W: 水; C: 水泥; G: 粗骨料; SP: 高效减水剂

关于多孔混凝土的配合, 要根据使用目的选择骨料的粒径和水胶结材料比及其单位用量。从实用角度看, 胶结材料在骨料空隙内的填充率为 25%~50%, 水胶结材料比在纯水泥浆中为 35%~50%。为实现高强度, 可适量掺加高效减水剂 (SP), 此时的水胶结材料比为 20%~30% 比较适宜。为了进一步改善粘附在骨料上的胶结材料的流变特性和强度性能, 最好适量掺加 (SP) 和硅灰 (SF) 之类的细粒火山灰质填充材料及聚合物。表 1 表示在骨料空隙中填充胶结材料 40% 时的配合例子。

骨料粒径增大后, 孔隙率即使相同, 粘附在骨料上的胶结材料的厚度也会增加, 在新拌状态下, 胶结材料容易发生脱落。此外, 在硬化后干缩也增大, 从而降低耐久性, 对此改进的适当方法之一乃是将细砂和胶结材料等量掺入。

### 四. 多孔混凝土的性能

#### 1. 胶结材料的性质

具有连续空隙的 POC 的制造方法的要点在于

胶结材料的稠度, 制造时即使施加一定程度的振动, 该稠度应能维持胶结材料不与骨料分离, 即和流变量及其填充量有关。此外还需要形成索带的第一区域。例如, 胶结材料的流变量如果小, 便会从骨料上脱落; 如果过大, 胶结材料则与骨料粘接不均匀。用 6 号碎石作骨料的场合, 胶结材料的屈服值为 20~80Pa, 粘性粘度 10Pa·S, 比较适当。

#### 2. 透水性

一般要求砂的透水系数 (K) 对细砂 (0.25~0.5mm) 为 0.85mm/s, 对粗砂 (0.5~1.0mm) 为 3.5mm/s 左右。在排水性路面, (K) 为 1~3mm/s 左右, 对于植物的生长而言, 种类不同, (K) 也不同, 但考虑到根的扎入, 以细砂为好。POC 的透水系数和各种骨料的空隙填充率与使用的粗骨料的粒径成正比, 与胶结材料用量成反比。从该结果可知, 如果使用 7 号 (2.5~5.0mm) 以上的骨料, 并将胶结材料对空隙的填充率控制在 50% 以下, 则可用于各种材料。但是用作生物对应型的种植混凝土时, 需要在考虑根部根茎扎入的前提下再作决定。即只根据透水系数并不行, 最好是根据孔隙直径进行处理。对此可通过适当选取骨料粒径而解决。如表 2 所示, 孔隙率相同时, POC 的透水系数 (K) 与骨料的粒径成正比。此外尚需注意 POC 的透水系数与试验时的压头差成反比的关系。<sup>[1]</sup>

#### 3. 强度性能

以 5、6、7 号碎石为骨料, CN、CB、CN+SF 为胶结材料的填充率为 40% 时, 28 天龄期的抗压强度达到 15~22N/mm<sup>2</sup>。关于抗压强度与龄期的关系, 使用 CN 时, 从早期到后期的增进率一直很稳定; 使用 CB 和 CN+SF 时, 早期虽低, 但后期增进大。此外, 抗压强度与骨料粒径成反比。这种现象与试体的尺寸固然有关, 但也可以认为是单位体积内骨料接触点的个数急剧减少所致。表 3 表示使用不同粒径的骨料的 POC 的抗压强度。

由于 POC 不出现浮浆现象, 骨料与胶结材料的粘附极好, 所以其抗折强度和抗拉强度与抗压强度之比都比普通混凝土的比值大得多。

#### 4. 游离石灰的溶出

表 2 使用不同粒径骨料的 POC 的透水性(mm/s)

碎石种类	孔隙率 (%)		
	30	25	20
No. 6 (5~13mm)	17.5	12.3	6.5
No. 7 (2.5~5.0mm)	10.5	7.5	4.0
No. 8 (1.2~2.5mm)	4.6	2.7	1.3

No.6:5~13mm No.7:2.5~5.0mm No.7:1.2~2.5mm

POC 的内部与凹凸的表面相同, 表面积很大, 所以在降雨和洒水时, 游离石灰的溶出极为显著, 尤其在早期会对动植物产生不利影响。这种现象使得包裹在骨料表面的胶结材料的薄膜老化, 进而降低耐久性。从这一点考虑, 最好在 POC 的胶结材料中掺加硅灰或使用矿渣水泥, 以便通过火山灰反应抑制游离石灰的溶出。此外, 掺加特殊的聚化物, 不但能阻止游离石灰的溶出, 也可以防止骨料的剥离。

表 3 抗压强度与龄期的关系 (空隙率 25%~28%)

配比类型		抗压强度 (N/mm <sup>2</sup> )		
		7 天	28 天	56 天
A	*	10.7	12.7	13.5
B	No. 5	8.6	11.4	12.7
C	*	9.1	12.5	14.8
A	*	14.8	18.6	20.5
B	No. 6	12.2	17.5	20.1
C	*	13.5	20.2	21.8
A	*	16.3	19.7	21.6
B	No. 7	14.4	18.2	21.4
C	*	15.2	20.6	23.3

A: 普通波特兰水泥 B: 矿渣水泥 (B 种)  
C: 普通波特兰水泥+硅灰(20%) \*: 碎石种类

### 五. 多孔混凝土的应用

#### 1. 降低环境负荷的材料

##### (1) 隔热、结构、飘浮等

形成独立空隙的加气混凝土板具有良好的隔热性, 而且相对于密度的比强度大于普通混凝土。以不具吸收性的超轻质骨料或泡沫苯乙烯为骨料的混凝土可在水中飘浮, 可用作浮桥、浮码头等。

##### (2) 排水性路面材料

除了透水性、隔热性之外, 为了追求舒适性, 在城市内的人行道和轻车道上使用以 7 号或 6 号碎石为骨料的 POC。这种混凝土路面不仅能使雨水还原于地下, 而且在路面下形成微生物栖息的良好环境, 对通过的水加以净化。

##### (3) 消声材料<sup>[5]</sup>

声能进入多孔材料以后变成摩擦热及振动, 于是声音被吸收。此外, 多孔材料的孔径大的时候或在其内部设置空间的时候, 声音与声音由于相互缓冲而消失。这项成果在德国已实用化, 在日本也已产品化。如果根据噪音频率考虑骨料、胶结材料的性能和构件厚度及其排列, 则能进一步提高其消声特性。

##### (4) 有害气体的吸收材料

骨料粒径为 1mm 的 POC, 其 10cm 厚的表面积约为普通混凝土单侧表面积的 400 多倍, 所以在骨料和胶结材料中使用了特定的气体(CO<sub>2</sub>、SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>等)吸收物质以后, 就能吸收有害气体而实现无公害化。吸附材料以离子交换容量大的无机材料(人造沸石)等为主, 吸附 SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>。

##### (5) 湿度调节材料

现在的普通混凝土建筑物在潮湿条件下墙面结露, 非常适合霉菌大量繁殖。如在房间内部装配特殊的 POC, 在潮湿时能吸潮, 在干燥时则能加湿<sup>[7], [8]</sup>, 起到自动调节湿度的作用。

##### (6) 蓄热材料

POC 可将太阳热能和燃烧热能储存起来并可随时放出。POC 使用的骨料的比重为 5 左右, 可储存从工厂排出的热能和太阳热能。导热体使用液体或气体。导热体的温度差高于 10 度时, 通过热泵用于发电或空气调节。

## 2. 动植物等生物对应型材料

栖息在地球上的 3000 万种生物每年消失 0.3%~0.5%。鉴于这种现状,我们作为水泥混凝土工作者也应有一定的对策。21 世纪完全是一个恢复环境的时代。

每年以微生物为主有几百种的生物从地球上消失,在日本栖息的 174 种哺乳动物中有 80 种处于危险之中,为了保护濒临灭绝的生物种群,日本建设省提出,在河流的整治中不再像以往那样用混凝土铺设表面,要向重视生物的多自然型的河流改造方向转变。公路主管部门也确立今后的方向是重视绿化,建造与生物共存和舒适的道路。

### (1) 种植混凝土

在具有连续空隙的 POC 上直接播种草坪和各种杂草类的种子及移植草苗,或者在 POC 表面覆盖土层后进行播种或移植,使植物在其上能茁壮生长<sup>[9], [10]</sup>。

考虑到根系的扎入和固定,骨科以 5 号碎石或 4 号碎石为宜。混凝土在现场浇灌或在工厂做成制品即可。在施工现场,为使空隙表面碳化。需在自然状态下放置一个月左右。如果想尽早地种植植物,在制品上喷射液化硫酸铁雾,也能使其碳化。然后在 POC 的空隙中填充蛭石和泥炭等保水性好的土,即做成混凝土种植床。关于肥料,可在覆盖在表面的薄土层中掺入颗粒状肥料,也可在种植植物后施加液体肥料。种植混凝土用于河流、道路和住宅地区的坡面。POC 完成后,在其表面种植草坪、杂草类、矮灌木等。

还有一种用于绿化的喷射混凝土,在坡面上先放置含有肥料成份的有机物块状体,然后再喷射这种混凝土。为了使植物根系在 POC 的空隙部分伸展,这种混凝土中掺入具有膨胀性和保水性的绿化骨料。各种植物在混凝土中的固定良好,从而保护坡面。因此,混凝土自身强度低,一般为 3~6Mpa。其目的是使矮灌木的根系在软质岩石和山地上成活。

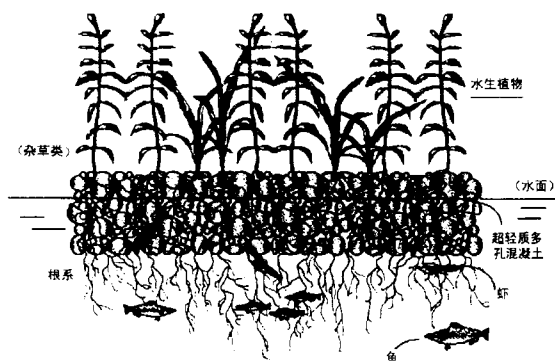


图 2 超轻质多孔混凝土的漂浮结构

### (2) 生物的附着基盘和生息空间

POC 放置在河流、湖泊和海滨等水域后,在其凹凸不平的表面和连续空隙内有陆地和水中的小动物附着栖息,因彼此的相互作用和共生作用而形成食物链。

POC 能够用作这些小动物的生存基础。在水中,POC 的表面附着栖息藻类、贝类和水生小动物,在连续空隙内栖息原始生物,从而创造了多样性生物的生存基础。

将 POC 沉到日光射入的海水中,海藻很快地附着在上面。为了进一步提高效果,使用能溶出铁离子的转炉渣和铁矿石作骨料比较适宜。

### (3) 用于水质净化的混凝土<sup>[9]</sup>

通过附着在 POC 内、外表面上的各种微生物间接地净化河流和湖泊的水质。需厌氧菌、氨氧化菌、硝酸氧化菌等菌类附着后,使有机物和氮分解并无机化。这些无机物与  $\text{CO}_2$  通过光合作用进行初级生产而生成有机物,然后从二级生产向多元生产发展,形成食物链。在河流施工中使用 POC,同时栽种芦苇,能够消除氮和磷<sup>[11]</sup>。图 2 表示由超轻质 POC 建造的漂浮结构上种植水生植物和杂草的例子。在位于海岸、水域里的构筑物 and 减浪砌块的表面上覆盖单层的 POC,除了能保证原有功能外,还兼有使海岸生物多样化的作用。

## 六. 结束语

混凝土一直被认为是破坏自然的元凶,但是只要使连续空隙得以形成,就能创造其与自然环

境的衔接点,极大地改变过去的形象。多孔混凝土对于恢复不断遭受破坏的地球环境是一种创造性的材料,将对人类的可持续发展作出贡献。

将这种多孔混凝土作为环境材料的利用技术中,减少环境负荷的技术正在欧洲实用化,日本开发了生物对应型的利用技术。

多孔混凝土具备的特殊功能普通混凝土并不具备,这些功能无一不是与环境保护和生态环境建设有关。但是多孔混凝土存在两个重大缺陷,一是其强度比普通混凝土低,二是其耐久性差。在日本和欧洲,这两个难点也未克服。我们认为,恰恰是通过对多孔混凝土的深入研究开发,解决这两个关键问题,才会形成我国的自主知识产权,从而产生经济效益和社会效益。由此可见,深入而全面地研究开发多孔混凝土具有重要意义。

#### 参考文献

1. (社)日本コンクリート工学協会エココンクリート研究委員会報告書(自然環境との調和を考慮したエココンクリートの現状と将来展望), pp. 1~78, 1995
2. M. Tamai, H. Mizuguchi, T. Okamoto Organism Adaptable Concrete, JGEE, Vol. 3, pp. 65~75, 1997
3. 玉井元治コンクリートの高性能・高機能化(透水性コンクリート), コンクリート工学, Vol. 32, No. 7, pp. 134~138, 1994
4. I. C. Caestecker Test Sections of Noiseless Cement concrete Pavement, Special Report of Flemish Brabant Roads Division, 1997
5. M. Tamai, T. Tanaka Sound Absorbing Properties of Porous Concrete Using Shirasu Pumice, Transaction of JCI, vol. 16, pp. 81~88, 1994
6. 玉井元治他 NOx を吸着する人工ゼオライトを用いた吸音性コンクリート, 建設用原材料, Vol. 7, No. 1, pp. 33~38, 1997
7. 田中光徳, 玉井元治他 シラス軽石を用いた多孔質コンクリートの空隙と吸湿性, セメント・コンクリート论文集, No. 51, pp. 888~893, 1997
8. 寒河江昭夫, 和美广喜他 调湿性コンクリート, コンクリート工学, Vol. 36, No. 1, pp. 37~40, 1998
9. 玉井元治 緑化とコンクリート(コンクリート材料), コンクリート工学, Vol. 32, No. 11, pp. 64~69, 1994
10. 柳桥邦生 植生型エココンクリート, コンクリート工学, vol. 36, No. 3, pp. 28~31, 1998
11. 玉井元治他 自然の海水に沈漬した多孔質コンクリートへの生物付着と水质浄化, 自然環境との調和を考慮したエココンクリートの現状と将来展望に関するシンポジウム论文集, コンクリート工学協会, pp. 83~90, 1995



在公园中铺设的多孔混凝土(PGC)路面