

# 中国建筑材料协会标准

T/CBMF XX—202X

T/CCPAXX—202X

## 水工生态混凝土应用设计规范

Design code for hydraulic ecological concrete application

（征求意见稿）

XXXX- XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

中国建筑材料联合会 发布  
中国混凝土与水泥制品协会

## 前 言

根据中国建筑材料联合会《关于下达2021年第四批协会标准制定计划的通知》（中建材联标发〔2021〕66号）和中国混凝土与水泥制品协会《关于下达2021年中国混凝土与水泥制品协会标准制修订计划（第一批）的通知》（中制协字〔2021〕9号）的要求（计划号2021-44-xbjh），标准编制组经广泛调查研究，认真总结实践经验，参考国内外相关标准，并在广泛征求意见的基础上，编制了本规范。

本规范的主要技术内容是：1. 总则；2. 术语；3. 基本规定；4. 材料；5. 布置与选型；6. 结构应用设计；7. 结构与稳定性计算。

本规范由中国建筑材料联合会和中国混凝土与水泥制品协会共同负责管理，由黄河勘测规划设计研究院有限公司、建华建材（中国）有限公司负责日常管理及具体技术内容的解释。执行过程中如有意见或建议，请寄黄河勘测规划设计研究院有限公司（地址：河南省郑州市金水路109号，邮政编码：450003；电子邮件：273331967@qq.com）或建华建材（中国）有限公司（地址：江苏省镇江市润州区工人大厦12楼；邮政编码：212000；电子邮件：371803673@qq.com）。

主 编 单 位： 黄河勘测规划设计研究院有限公司

建华建材（中国）有限公司

参 编 单 位： 河南省水利勘测设计研究有限公司

南京水科院勘测设计有限公司

珠江水利委员会珠江水利科学研究院

深圳大学

浙江大学

黑龙江大学

昆明顺弘新材料有限公司

嘉兴五丰生态环境科技有限公司

湖南全水生态科技有限公司

千诺（铜川）生态科技有限公司

郑州赛诺建材有限公司

河南精诚模具有限公司

大连东马混凝土构件有限公司

北京中创建投科技有限公司

主要起草人：

主要审查人：

# 目 次

- 1 总则 ..... 1
- 2 术语 ..... 2
- 3 基本规定 ..... 3
- 4 材料 ..... 4
  - 4.1 混凝土 ..... 4
  - 4.2 钢材 ..... 4
  - 4.3 其他材料 ..... 4
- 5 布置与选型 ..... 6
  - 5.1 一般规定 ..... 6
  - 5.2 坡式防护工程 ..... 6
  - 5.3 墙式防护工程 ..... 7
  - 5.4 护底工程 ..... 9
- 6 结构应用设计 ..... 10
  - 6.1 一般规定 ..... 10
  - 6.2 总体设计 ..... 10
  - 6.3 生态设计 ..... 10
  - 6.4 抗冲刷设计 ..... 11
  - 6.5 构造设计 ..... 13
- 7 结构与稳定性计算 ..... 14
  - 7.1 一般规定 ..... 14
  - 7.2 荷载分类与组合 ..... 14
  - 7.3 荷载计算 ..... 15
  - 7.4 结构应力分析 ..... 16
  - 7.5 抗滑稳定性计算 ..... 16
  - 7.6 抗倾覆稳定性计算 ..... 16
  - 7.7 地基基础计算 ..... 16
- 附录 A 常用生态框外形及基本尺寸 ..... 19
- 附录 B 常用生态砌块外形及基本尺寸 ..... 28
- 附录 C 墙式防护结构抗滑、抗倾覆稳定性计算 ..... 32
- 附录 D 加筋式墙式防护结构应力计算 ..... 34
- 用词说明 ..... 37
- 引用标准名录 ..... 38
- 附：条文说明 ..... 39

## Contents

1	General Provisions.....	1
2	Terms.....	2
3	Basic Requirements.....	3
4	Materials.....	4
4.1	Concrete.....	4
4.2	Steel Materials.....	4
4.3	Other Materials.....	4
5	Arrangement and Selection.....	6
5.1	General Provisions.....	6
5.2	Slope Type Protective Engineering.....	6
5.3	Wall Type Protective Engineering.....	7
5.4	Bottom Protective Engineering.....	9
6	Structural Application Design.....	10
6.1	General Provisions.....	10
6.2	Overall Design.....	10
6.3	Ecological Design.....	10
6.4	Anti-scour Design.....	11
6.5	Structural Design.....	13
7	Calculation of Structure and Stability.....	14
7.1	General Provisions.....	14
7.2	Load Classification and Combination.....	14
7.3	Calculation of Load.....	15
7.4	Analysis of Structural Stress.....	16
7.5	Calculation of Anti-slide Stability.....	16
7.6	Calculation of Anti-overturning Stability.....	16
7.7	Calculation of Foundation.....	17
	Appendix A: Shape and Basic Dimensions of Ecological Products.....	19
	Appendix B: Shape and Basic Dimensions of Ecological Concrete Block .....	28
	Appendix C: Calculation of Anti-slide Stability and Anti-overturning Stability for Wall Type Protective Structure.....	32
	Appendix D: Calculation of Structural Stress for Reinforced Wall Type Protective Structure ...	34
	Explanation of Wording.....	37
	List of Quoted Standards.....	38
	Addition: Explanation of Provisions.....	39

# 1 总则

**1.0.1** 为规范生态混凝土在水利工程中的应用设计，做到安全可靠、技术可行、经济合理、生态环保，特制定本标准。

**1.0.2** 本规范适用于水利工程中发挥抗冲刷、护坡、挡土等作用的生态砌块、生态框、预制植生混凝土制品和现浇透水混凝土等的应用设计。

**1.0.3** 本规范主要对生态混凝土应用于水利工程中的各类岸坡防护工程、护底工程的设计标准和技术要求进行规定。

**1.0.4** 对于有特殊要求的生态混凝土挡土结构设计，以及新型结构或受力复杂的挡土结构设计，应进行专门研究。

**1.0.5** 水工生态混凝土应用设计（以下简称“应用设计”）应综合利用已建工程实践经验和科学研究成果，并积极采用新结构、新材料、新技术。

**1.0.6** 应用设计除应符合本规范外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

## 2 术语

### 2.0.1 生态混凝土 ecological concrete

具有一定强度等级和耐久性要求，兼具生态功能的混凝土材料与制品。生态功能包括生物栖息、生物多样性保护、水土保持、环境保护、资源和能源节约、绿化、美化、文化和改善微环境（小气候）等。水利工程中应用的生态混凝土主要包括生态砌块、生态框、预制植生混凝土制品、现浇透水混凝土。

注：现浇透水混凝土包括现浇普通透水混凝土和现浇植生混凝土。

### 2.0.2 生态混凝土砌块 ecological concrete block

采用各类混凝土或钢筋混凝土材料预制而成、可供砌筑，在结构特定部位开孔或者经平面铺装后形成贯通型孔洞、可供植物生长或水生生物栖息的块状结构，简称生态砌块。

### 2.0.3 生态混凝土制品 ecological concrete products

生态砌块、生态框和预制植生混凝土制品的统称，简称生态制品。

### 2.0.4 生态开孔率 ecological opening rate

在具备必要的结构强度和固土能力等基础上，为使水工生态混凝土防护结构（以下简称“防护结构”）产生良好的生态功能，经组合铺装后在平面上形成的开孔总面积与铺装总面积的百分比。

### 2.0.5 生态孔隙率 ecological porosity

为使透水混凝土同时具有良好的生态功能和必要强度，经过一定配比组合，其材料内部与外部贯通的孔隙体积与透水混凝土总体积的百分比。

### 2.0.6 墙式防护结构 wall type protective structure

以生态制品砌筑的挡土结构为主体，用以承受土压力、防止土体塌滑的防护性工程设施称为墙式防护工程。其主体结构称为墙式防护结构。

### 2.0.7 坡式防护结构 slope type protective structure

为保护边坡坡面免受水流、风浪等冲刷侵蚀，以生态混凝土浇筑或铺砌形成主体结构的防护性工程设施称为坡式防护工程，其边坡坡体应具有自身稳定性，护坡结构可依托坡体保持稳定。其主体结构称为坡式防护结构。

### 2.0.8 护底结构 bottom protective structure

为保护河道、渠（沟）道、湖泊、水库（塘）等水道底部免受水流冲刷，以生态混凝土浇筑或铺砌形成主体结构的防护性工程设施称为护底工程。其主体结构称为护底结构。

### 2.0.9 平铺式 tiled

生态制品平着铺展于地基或垫层上的护坡或护底形式。

### 2.0.10 格构式 latticed

以普通混凝土或钢筋混凝土为框架梁，在框架梁组成的框格内现浇透水混凝土形成的护坡形式。

### 3 基本规定

**3.0.1** 应用设计一般应收集气温、风况、蒸发、降水、水位、流量、流速、泥沙、潮汐、波浪、冰情、地下水等气象、水文资料和地形、地质资料，同时宜具备工程地区的适生植被相关资料。

**3.0.2** 应用设计应符合以下原则：

- 1 有利于岸坡的稳定，且坚固耐久；
- 2 满足水量调节、水流冲刷、行洪安全的要求；
- 3 有利于结构内外水体交换，有利于生物的生存和繁衍，有利于水体的自净。

**3.0.3** 根据水利工程抗冲刷、固土、透水、生态等多方面的需要，针对其不同工程类型、所处地区、使用部位等特点，对生态混凝土的应用进行合理设计。

**3.0.4** 防护结构主要应用于河道堤防、海堤、渠（沟）道、水库、湖泊、水闸、泵站等工程岩土体的临水面或临空面防护，防护工程类型主要包括岸坡防护工程和护底工程两类。岸坡防护工程的主体结构可根据其所保护岸坡的自身稳定情况，选用墙式防护结构或坡式防护结构形式。

**3.0.5** 防护结构形式根据地形、地质、水文、气象等条件，以及水工建（构）筑物特点、生态系统功能要求等选定，其结构应满足稳定、抗冲刷、抗风浪等要求，同时应便于施工、维护。

**3.0.6** 防护结构的设计应与所属水工建（构）筑物级别和设计标准相适应。

**3.0.7** 防护结构根据所处的环境条件应满足相应的耐久性要求。植生混凝土可在现行行业标准《水工混凝土结构设计规范》SL 191 规定的一、二、三类环境中应用，在四、五类环境中应用时，宜进行相应的试验和论证。

**3.0.8** 防护结构应设置合理的生态开孔率和生态孔隙率，为绿化种植和生物活动提供空间。

**3.0.9** 墙式防护结构作为单体进行稳定计算，应符合现行行业标准《水工挡土墙设计规范》SL 379 的有关规定；坡式防护结构主要依托防护边坡进行整体稳定计算，应符合国家现行标准《堤防工程设计规范》GB 50286 和《水利水电工程边坡设计规范》SL 386 的相关要求。

**3.0.10** 布置在临水面的防护结构，应根据水流流速进行必要的抗冲刷设计；对位于风浪淘刷影响区域的防护结构应进行风浪计算。

**3.0.11** 对于改扩建工程，应用设计宜充分、合理地利用原工程设施。



## 4 材料

### 4.1 混凝土

**4.1.1** 水泥宜采用强度等级不低于 42.5 的硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥或矿渣硅酸盐水泥；细骨料宜采用洁净的中粗砂、人工砂或再生骨料，粗骨料宜采用碎石、破碎卵石或再生骨料；掺合料宜采用粉煤灰、硅灰、矿渣微粉等；混凝土各项原材料质量、性能、配合比等控制指标应符合现行国家标准《混凝土质量控制标准》GB 50164 的要求。

**4.1.2** 生态框的混凝土抗压强度等级不宜低于 C30，生态砌块的混凝土抗压强度等级不宜低于 C25；填充于普通混凝土格构内的透水混凝土抗压强度等级不宜低于 C15。

**4.1.3** 植生混凝土的连续孔隙率、pH 值等生态指标应符合设计和现行行业标准《植生混凝土》JC/T 2557 的要求。

**4.1.4** 透水混凝土的透水系数等性能指标应符合设计和现行行业标准《透水混凝土》JC/T 2558 的要求。

**4.1.5** 混凝土采用再生骨料时，再生骨料不得使用被污染或腐蚀的建筑垃圾制备，各项技术指标应符合国家现行标准《混凝土和砂浆用再生细骨料》GB/T 25176 和《混凝土用再生粗骨料》GB/T 25177 的要求。

**4.1.6** 处于冰冻、腐蚀环境时，混凝土应按现行行业标准《水利水电工程合理使用年限及耐久性设计规范》SL 654 的有关规定进行耐久性设计。

### 4.2 钢材

**4.2.1** 钢筋宜采用 HRB400、HRB500 级热轧带肋钢筋和低松弛螺旋槽钢棒，直径不应小于 6 mm，其质量应分别符合现行国家标准《钢筋混凝土用钢 第 2 部分：热轧带肋钢筋》GB 1499.2、《预应力混凝土用钢棒》GB/T 5223.3 的规定。

**4.2.2** 生态制品起吊所用吊环宜采用未经冷加工的 HPB300 级钢筋制作，其质量应符合现行国家标准《钢筋混凝土用钢 第 1 部分：热轧光圆钢筋》GB 1499.1 的有关规定。采用内埋式螺母或吊杆时，其材料质量应符合国家现行相关标准的规定。

**4.2.3** 预埋件锚筋应采用 HPB300 或 HRB400 级钢筋，不应采用冷加工钢筋。

**4.2.4** 其他结构钢质预埋件的材质性能应符合现行国家标准《碳素结构钢》GB/T 700 中 Q235B 的规定。

### 4.3 其他材料

**4.3.1** 连接用螺栓和螺杆的性能等级不宜低于 4.8 级，锚栓宜采用 Q235B 级以上的钢材，材质性能应符合现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的规定。应用时宜选用表面经镀锌钝化处理的连

接件。

**4.3.2** 钢绞线、钢丝绳、铰接件、玻璃纤维锚固棒等生态制品连接组件，除应满足防护结构的耐久性、强度等设计要求外，尚应满足有关产品标准的要求。

**4.3.3** 防护结构加筋材料宜采用平面网状筋材，常见筋材有土工格栅、土工格室、有纺土工织物等土工合成材料，其性能指标应符合国家和水利行业现行相关标准的要求。

**4.3.4** 砌筑水泥砂浆的强度等级不应低于 M15，当有抗冻要求时应符合现行国家标准《水工建筑物抗冰冻设计规范》GB/T 50622 的规定，且不应低于 M20；搁置面找平砂浆的强度等级不宜低于 M20。

## 5 布置与选型

### 5.1 一般规定

**5.1.1** 生态混凝土用于天然河道、湖库等岸坡防护时，其防护结构及布置应与河道、湖库等的天然形态、所处区域环境风貌相协调，相邻岸坡之间应平顺连接，不宜采用折线或急弯，并兼顾施工的便捷性。

**5.1.2** 防护结构型式改变或与已有结构物衔接处，应采取平顺、安全可靠的连接措施。

**5.1.3** 防护结构可采用墙式、坡式或墙式与坡式组合的结构形式。对现状岸坡较缓、软土地基且处理难度大或者具备征占地等条件的岸坡，宜采用坡式防护结构；对现状岸坡较陡、地基条件较好、受地形条件限制而且不具备征占地条件的岸坡，宜采用墙式防护结构。

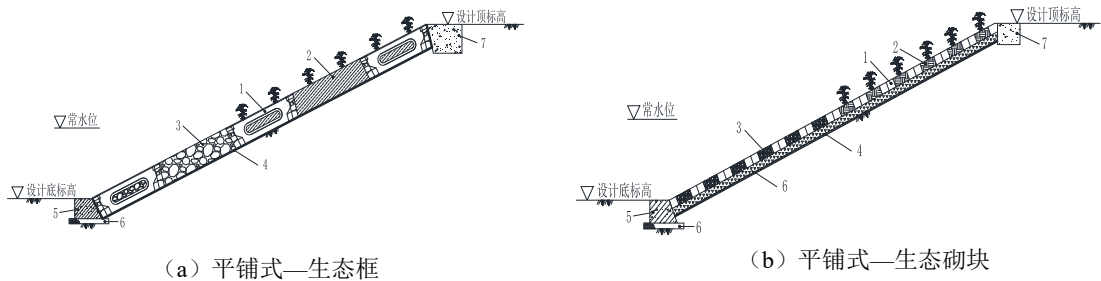
**5.1.4** 位于城市或人员密集区的岸坡防护工程，岸坡顶与常水位高差大于 0.5m 或者近岸 2.0m 范围内常水位对应水深大于 0.7m 时，应设置护栏等防护设施。

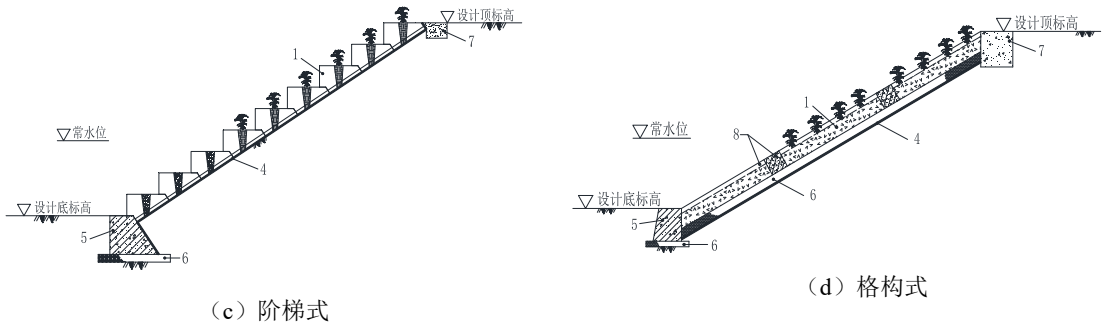
**5.1.5** 防护结构型式应根据功能需求、自然条件、材料来源和施工条件等因素，经技术经济比较确定：

- 1 一般性河道和湖泊，应根据总体布置、地质条件、生态需求等要求综合确定。
- 2 景观性河道和湖泊，墙式防护结构可选用阶梯式、陡坡式，坡式防护结构可选用平铺式、阶梯式或格构式。
- 3 行洪、灌溉、排水渠道或河道，以及其他水流流速较大的水道，墙式防护结构的形式宜选用直立式或陡坡式；坡式防护结构的形式可选用平铺式、阶梯式或格构式。
- 4 易冲刷河床等水道底部需防护时，宜采用生态混凝土护底，护底结构形式宜采用平铺式，当具备施工条件时也可采用现浇透水混凝土作为护面层的格构式结构。

### 5.2 坡式防护工程

**5.2.1** 坡式防护结构（见图 5.2.1）应包括封顶、护面层、回填料、垫层、反滤层和护脚等。





1—护面层；2—水上区回填料；3—水下区回填料；4—反滤层；5—基座；6—垫层；7—封顶；8—格构梁。

图 5.2.1 坡式防护结构示意图

**5.2.2** 坡式防护工程的边坡应保持自身稳定，护面层主要材料可选用生态制品铺砌或现浇透水混凝土，护面层厚度、连接方式应根据抗冲稳定的需要确定，设计时可从表 5.2.2 中初选，生态制品的外形和规格可参考附录 A 和附录 B。

表 5.2.2 坡式防护结构特征及适用条件

生态混凝土种类		产品名称	断面形式	连接方式		适用坡度
				上下层连接方式	纵向连接方式	
生态制品	生态框	-	平铺式	-	螺栓（对角）	≤1:1.5
	生态砌块	自嵌式砌块	阶梯式	防滑凸台、凹凸榫	-	≤1:1.0
		连锁块	平铺式	自锁、钢塑带、钢绞线或其他铰接件	自锁	≤1:1.5
		铰接块	平铺式	钢塑带或其他铰接件	钢塑带或其他铰接件	≤1:1.5
	预制植生混凝土制品	-	平铺式	-	螺栓（对角）	≤1:1.5
			阶梯式	防滑凸台、凹凸榫	-	≤1:1.0
现浇透水混凝土		-	格构式	-	-	≤1:1.0

**5.2.3** 在坡式防护工程的堤脚、戕台或改变坡度处，应设置基座，基座埋深应满足设计要求且不宜小于 0.5m。坡顶应设置封顶。

**5.2.4** 生态制品用于水下区时，开孔处的回填材料宜选用碎石、块石、卵石、透水混凝土等透水性材料；水上区宜回填种植土。

**5.2.5** 格构式防护结构平面布置应根据地形、地质和防护要求确定，可选择方形、菱形、人字形和城门洞形等形式。

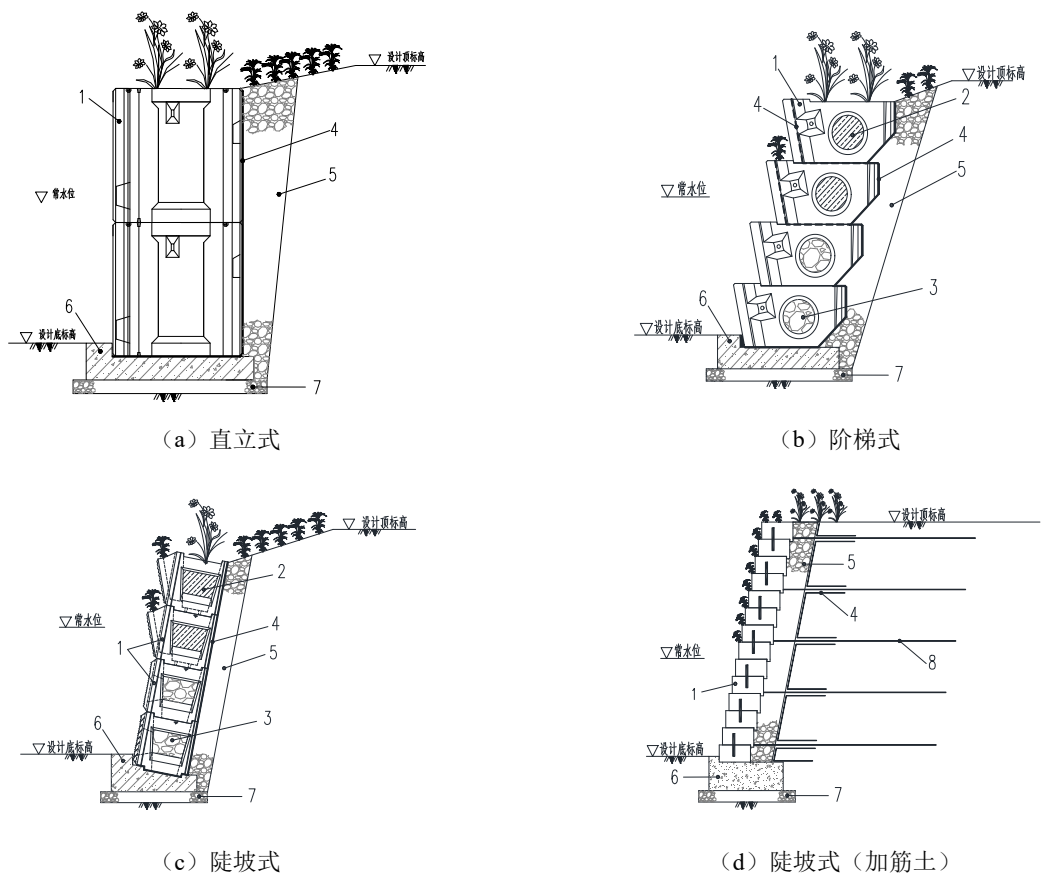
**5.2.6** 在坡式防护结构与地基土间，应根据防护结构和地基土特性设置必要的反滤层，反滤材料宜采用反滤土工布，水上部位宜采用营养土工布。

**5.2.7** 冲刷性河床上的坡式防护结构底部应设置护脚，护脚结构形式应根据地形地质条件、水流条件、材料来源等确定，可采用基础梁、板桩、模袋混凝土排、铰链混凝土排、抛石棱体等，护脚的延伸范围应符合现行国家标准《堤防工程设计规范》GB 50286 的规定。

5.3 墙式防护工程

**5.3.1** 墙式防护结构（图 5.3.1）应包括墙身、墙身回填料、底板、反滤层、基础等，反滤层可由碎

石排水层和土工布组成，冲刷性河床还应设置护脚和护底。



1—墙身；2—水上区回填料；3—水下区回填料；4—土工布；5—碎石排水层；6—基础底板；7—垫层；8—筋材。

图 5.3.1 墙式防护结构示意图

**5.3.2** 墙式防护工程的墙身宜由生态砌块、生态框等生态制品砌筑形成，墙身材料的型号和规格应根据沿各层间和基底面的稳定性分析确定，初步设计时可按表 5.3.2 选用，生态制品的外形和规格可参考附录 A 和附录 B。

表 5.3.2 墙式防护结构特征及适用条件

防护结构		断面形式	连接方式		适用坡度
生态混凝土种类	产品名称		上下层连接方式	纵向连接方式	
生态制品	仿石型生态框	阶梯式	无	无	1:0.3~1:0.7
	阶梯型生态框	阶梯式	无或销钉	螺栓	1:0.3~1:1
	堆砌型生态框	阶梯式、直立式（包括直角梯形）	混凝土抗滑块	螺栓	垂直~1:1
	箱式生态框	阶梯式、直立式、陡坡式	无	相邻构件间浇筑混凝土或回填碎石	垂直~1: 0.5
	植草型生态框	陡坡式	凹凸榫	螺栓	1:0.2~1:1
	鱼巢型生态框	陡坡式	凹凸榫	螺栓	1:0.2~1:1

		卵石型生态框	陡坡式	凹凸樨	螺栓	1:0.2~1:1
		重力式空箱型生态框	陡坡式	防滑凸台	凹凸樨	1:0.1
	生态砌块	自嵌式、铰接式砌块	阶梯式、陡坡式 (加筋土)	锚固棒和凸樨	无	1:0.2~1:1

**5.3.3** 在水下区宜布置带有生物孔洞的生态砌块、生态框等生态制品，为鱼类等水生生物提供栖息、产卵的场所。

**5.3.4** 墙式防护工程墙身内开孔的回填料应根据水位、水流流速、当地材料和经济性等因素综合确定，水下区一般回填碎石、卵石、块石和透水混凝土等透水材料，水上区回填种植土等可满足植物生长的材料。

**5.3.5** 生态框内回填细颗粒土时，应内衬土工布、透水板等反滤隔层。

**5.3.6** 墙式防护工程应沿墙身的临土侧铺贴反滤土工布，并在反滤土工布与土坡之间填充卵石、碎石或中粗砂作为排水层，构成墙式防护结构的反滤层。

## 5.4 护底工程

**5.4.1** 护底工程一般由生态混凝土结构面层和垫层组成，垫层宜选用碎石垫层或土工织物垫层。

**5.4.2** 护底工程的设计范围应根据波浪、水流的冲刷强度和地质条件确定。

**5.4.3** 护底结构面层应结合其所处工程的设计断面布置，宜采用生态砌块、生态框或格构式平铺结构。生态砌块、生态框的相邻块体间宜采用柔性连接，连接材料宜采用钢丝绳、尼龙绳等。

**5.4.4** 护底结构的开孔应采用块石或碎石填充，填充料粒径应满足抗冲刷要求。

## 6 结构应用设计

### 6.1 一般规定

**6.1.1** 坡式防护结构应根据地质勘察结论和稳定计算选取合适的土坡坡比，边坡不稳定时应进行边坡加固；墙式防护工程基础承载力应满足设计要求，基础承载力不足时应进行地基处理。

**6.1.2** 墙式防护结构所防护土体应根据稳定要求采取相应处理措施，必要时采取加筋措施；加筋带层间距及加筋带长度应根据整体稳定和内部稳定要求确定。

**6.1.3** 根据总体布置要求、功能需求、结构形式及使用部位，提出植物配置、生态做法、生态开孔率等生态设计要求。配置的绿化植物在其生长过程中不应有碍于防护结构的安全稳定。

**6.1.4** 防护结构基础应满足抗冲刷要求，必要时增加一定的防冲措施。

### 6.2 总体设计

**6.2.1** 防护结构应用组合型式、整体外观应与周边建（构）筑物、人文环境、生态环境相协调。

**6.2.2** 生态砌块大小应综合考虑设备、制造、安装能力和施工条件，以及防护工程的安全、外观等要求确定。

**6.2.3** 采用生态砌块防护时，砌块间宜互相嵌扣或用铰链连接形成整体。当水流流速大于砌块单体的允许抗冲流速时，还应对砌块连接后形成的整体进行抗冲刷计算。

**6.2.4** 植生混凝土防护结构应根据工程特性和生态修复、景观绿化要求，确定是否选择人工营养基质。当基质营养物质不足，而绿化要求较高时，宜选择设置人工营养基。

**6.2.5** 位于常水位以上的坡式防护工程绿化覆盖率不宜小于 95%。结构表面植被，可根据工程位置、绿化要求，选择适合工程地区生长的一种或几种缓青期、枯黄期不同的草籽进行混播。

**6.2.6** 当被保护土特征粒径较小时，应根据土体特征粒径，在防护结构与土体接触部位设置反滤层。

**6.2.7** 为提高植被存活条件，根据工程实际需要，可在防护结构表面适当进行覆土。

### 6.3 生态设计

**6.3.1** 防护结构的植物配置设计，应根据当地气候、生态环境、土壤及水流条件，结合工程需要选择与周边环境协调、适合当地生长的植物。

**6.3.2** 防护结构上的植物配置设计，应根据不同的河湖水位情况选择适宜的物种，植物种类的选择

和养护参照现行有关行业标准。

**6.3.3** 在满足防护结构稳定、抗冲刷的基础上，应控制结构合理的生态开孔率（生态孔隙率）以获得最佳的生态效果。预制植生混凝土制品和现浇透水混凝土的生态孔隙率宜控制在 25%~30%，防护结构经组合铺装后的生态开孔率宜在 35% 左右。

**6.3.4** 防护结构用于常水位以下防护时，应根据实际需要选择其防护结构形式和生态制品种类，在满足抗冲刷要求前提下，其开孔内可根据需要不填充或部分填充碎石、卵石、块石和透水混凝土等，为水生植物生长和鱼类等水生动物栖息提供条件，具备条件时可在开孔内种植耐水湿生植物。用于常水位以上防护时，防护结构开孔内宜填充种植土，并种植陆生植物。

**6.3.5** 位于常水位以上的防护结构，根据气候、土壤、生态修复及景观绿化等需求，可采取以下方式：

- 1 防护结构下部反滤层可采用营养土工布，营养土工布的营养层应在上侧，反滤层应在底侧。
- 2 预制植生混凝土制品和现浇透水混凝土孔隙内宜填充满足盐碱改性要求和营养供应要求的填充材料，以改善孔隙内生物生存环境。孔隙填充方式可视具体情况采用吹填法、水填法、振填法等。
- 3 预制植生混凝土制品和现浇透水混凝土防护表面需回填种植土的，回填土厚度不宜大于 20mm。
- 4 坡式防护结构开孔内种植植物宜根据其固土能力、绿化覆盖要求、景观效果等因素选择。
- 5 阶梯式防护结构可根据河段景观需要种植多彩植物。

## 6.4 抗冲刷设计

**6.4.1** 防护结构应满足抵抗水流冲刷、波浪淘刷以及冻胀荷载、漂浮物和冰层撞击作用等的要求。坡式防护工程在水流冲刷和波浪淘刷作用下的生态混凝土防护厚度不应小于公式 6.4.4 的计算厚度。

**6.4.2** 应用于河道洪水位以下的生态混凝土，开孔内填料亦应满足抵抗水流冲刷、波浪淘刷以及冻胀荷载、漂浮物和冰层撞击作用等要求，必要时需对开孔填料表面采取必要抗冲刷防护措施。

**6.4.3** 岸坡防护结构宜根据地基条件设置素混凝土或钢筋混凝土等基础，基础埋置深度、厚度等应根据地形、地质、水流冲刷条件等综合确定。

1 对于土质地基，基础顶面不应高于岸前地面高程；对于无底板的防护结构，其墙趾顶面高程不应高于地面以下 0.5m。

2 对有可能被水流冲刷的土质地基，基础埋深宜为计算冲刷深度以下 0.5m~1.0m，否则应采取可靠的防冲措施。

**6.4.4** 坡式防护工程中生态砌块或预制植生混凝土制品在水流作用下，使防护工程保持稳定的生态砌块或预制植生混凝土制品的抗冲块径（折算粒径）可按下列公式计算：

$$d = \frac{V^2}{C^2 2g \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}} \quad (6.4.4-1)$$

$$W = \frac{\pi}{6} \gamma_s d^3 \quad (6.4.4-2)$$



式中： $d$ —折算实体粒径（m），按球型折算；

$W$ —块体重量（kN）；

$V$ —水流流速（m/s）；

$g$ —重力加速度（m/s<sup>2</sup>）；

$C$ —块体运动的稳定系数；平底坡  $C=1.2$ ，倾斜底坡  $C=0.9$ ；

$\gamma_s$ —块体的容重（kN/m<sup>3</sup>）；

$\gamma$ —水的容重（kN/m<sup>3</sup>）；

坡式防护工程中生态砌块或预制植生混凝土制品在波浪作用下块体厚度：

$$Q = 0.1 \times \frac{\gamma_s H^3}{K_D (\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1)^3 m} \quad (6.4.4-3)$$

$$t = nC \left( \frac{Q}{0.1 \gamma_s} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (6.4.4-4)$$

$$m = \cot \alpha \quad (6.4.4-5)$$

式中： $Q$ —主要护坡面层的单个块体质量（t）。当护面由两层块体组成，则块体质量可为  $0.75Q \sim 1.25Q$ ，但应有 50% 以上的块体质量大于  $Q$ ；

$\gamma_s$ —块体的容重（kN/m<sup>3</sup>）；

$\gamma$ —水的容重（kN/m<sup>3</sup>）；

$H$ —设计波高（m），当平均波高与水深比值  $\bar{H}/d < 0.3$  时，宜采用取  $H_{5\%}$ ，当  $\bar{H}/d \geq 0.3$  时，取  $H_{13\%}$ ；

$K_D$ —稳定系数，取值为 5.5~10.0；

$t$ —护面块体护面层厚度（m）；

$n$ —护面块体的铺砌层数；

$m$ —斜坡坡率  $1.5 \leq m \leq 5.0$ ；

$\alpha$ —斜坡坡角（°）；

$C$ —系数，取值一般为 1.3~1.4。

现浇透水混凝土板作为岸坡护面时，满足混凝土板整体稳定所需的护面板厚度可按下列公式计算：

$$t = \eta H \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma_b - \gamma} \times \frac{L}{Bm}} \quad (6.4.4-6)$$

$$m = \cot \alpha \quad (6.4.4-7)$$

式中： $t$ —混凝土护面板厚度（m）；

$\eta$ —系数，对开缝板可取 0.075；对上部为开缝板，下部为闭缝板可取 0.10；

$H$ —计算波高（m），取  $H_{1\%}$ ；

$\gamma_b$ —混凝土板的容重（kN/m<sup>3</sup>）；

$\gamma$ —水的容重（kN/m<sup>3</sup>）；

$L$ —波长（m）；

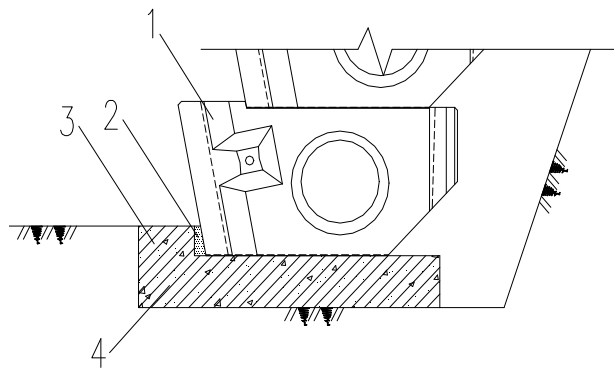
$B$ —沿斜坡方向（垂直于水边线）的护面板长度（m）；

$m$ —斜坡坡率；

$\alpha$ —斜坡坡角（°）。

## 6.5 构造设计

6.5.1 墙式防护结构底板前趾上方宜设置抗剪键，抗剪键高度不宜小于 100mm，宽度不宜小于 200mm。抗剪键内侧与生态制品的外立面应贴合，空隙处采用素混凝土填充密实，填充混凝土强度等级不宜低于 C20。



1—生态框；2—素混凝土填充；3—抗剪键；4—底板

图 6.5.1 底板抗剪键

6.5.2 坡式防护结构宜设置护脚，护脚范围应根据波浪、水流、冲刷强度和床质条件确定。

6.5.3 岸坡防护结构面层后应贴坡铺设反滤土工布，在土工布和防护土体间可设置砂砾石或中粗砂垫层。

6.5.4 在防护结构底板处，沿岸坡纵向宜设置结构缝，缝宽宜为 10mm~20mm，缝间距可根据岸坡构件尺寸、地基条件等综合确定，缝间距一般不宜大于 20m。

6.5.5 非自嵌式砌块、连锁块的其他生态制品砌筑的防护结构，宜采取连接组件连接，连接组件的布置间距和方式应适应生态制品条件，并能使其连接后的防护结构形成完整的整体。连锁块或者用铰链连接的生态砌块、生态框拼装而成的护面层，其边长宜为 5m~20m。

6.5.6 格构式防护结构应设变形缝，缝宽宜为 10mm~20mm，变形缝间距一般不宜大于 20m，其中位于松软土基的防护结构变形缝间距不宜大于 10m。格构式防护结构临缝侧应布置框格梁。

6.5.7 生态砌块厚度不宜小于 80mm；格构式防护结构的现浇透水混凝土护面层厚度应满足抗冲刷和适应变形要求，且不宜小于 100mm。

6.5.8 岸坡防护结构后填土顶面宜设置良好的地表排水设施。

6.5.9 位于冲刷严重部位的防护结构，可在其与下部岩土体间增设锚杆等连接措施。

6.5.10 生态制品砌筑的岸坡防护结构，构件纵向或角部宜采用螺栓、锚栓、螺杆和钢绞线等连接。

## 7 结构与稳定性计算

### 7.1 一般规定

**7.1.1** 根据防护结构的分类，结合结构布置及受力特点，按坡式防护工程、墙式防护工程、护底工程等分别进行结构和稳定计算分析。

**7.1.2** 坡式防护结构的计算应进行整体抗滑稳定计算。

**7.1.3** 墙式防护结构的计算应包括以下内容：

- 1 结构应力分析；
- 2 抗滑稳定计算和整体抗滑稳定计算；
- 3 抗倾覆稳定计算；
- 4 地基基础计算。

**7.1.4** 护底工程下部若有防渗结构，应进行整体抗浮稳定计算。

**7.1.5** 防护结构计算与稳定计算应根据地基情况、结构特点及施工条件进行计算，在各种运用情况下，均应满足承载力、稳定和变形的要求。

**7.1.6** 坡式防护结构设计应根据工程级别、地形地质条件，结合其结构形式、高度及填筑材料等因素，选择具有代表性的断面进行计算。

**7.1.7** 墙式防护工程和护底工程的结构与稳定计算单元应根据其结构及布置型式确定：

- 1 顺水流方向结构及布置形式比较规则的标准段，可取 1 延长米作为稳定计算的单元；
- 2 结构及布置形式组合复杂段，可取分段长度内整体作为稳定计算单元；不同分段存在差异时应分段分别计算。

**7.1.8** 防护结构的排水布置应根据地基条件和水位差等因素，结合所属水工建筑物的总体布置要求分析确定。

**7.1.9** 土质地基上的墙式防护结构，凡属下列情况之一者，应进行地基沉降计算：

- 1 软土地基或下卧层内夹有软弱土层时；
- 2 结构地基应力接近地基允许承载力时；
- 3 相邻结构的地基应力相差较大时。

**7.1.10** 墙式防护结构不宜建在不均匀地基上，否则应采取工程措施。

### 7.2 荷载分类与组合

**7.2.1** 作用于防护结构的荷载可分为基本荷载和特殊荷载两类。

1 基本荷载主要有下列各项：

- 1) 防护结构及其底板以上填料和永久设备的自重；
- 2) 防护结构后部土体破裂范围内的车辆、人群等附加荷载；
- 3) 相应于正常挡水位、设计洪水位或防护结构后部正常地下水位情况下的土压力；

- 4) 相应于正常挡水位、设计洪水位或防护结构后部正常地下水位情况下的水重、静水压力和扬压力；
- 5) 淤沙压力；
- 6) 相应于正常挡水位、设计洪水位情况下的风浪压力；
- 7) 冰压力；
- 8) 土的冻胀力。

2 特殊荷载主要有列各项：

- 1) 相应于校核洪水位或防护结构后部地下高水位情况下的土压力；
- 2) 相应于校核洪水位或防护结构后部地下高水位情况下水重、静水压力和扬压力；
- 3) 相应于校核洪水位情况下的风浪压力；
- 4) 地震荷载；
- 5) 其他出现机会较少的荷载等。

**7.2.2** 墙式防护结构计算时，应根据不同设计状况或工况下可能同时出现的作用，采用各自最不利的组合进行设计，荷载组合可分为基本组合和特殊组合两类。可按表 7.2.2 的规定采用。

防护结构前部有水位降落时，还应按特殊荷载组合计算此种不利工况。

表 7.2.2 荷载组合表

荷载组合	计算情况		荷载											说明	
			自重	附加荷载	土压力	水重	静水压力	扬压力	淤沙压力	风浪压力	冰压力	土的冻胀力	地震荷载		其他
基本情况	完建情况		✓	✓	✓	✓	✓	✓	—	—	—	—	—	必要时,可考虑地下水产生的扬压力	
	正常挡水情况		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	—	—	—	—	按正常挡水组合计算水重、静水压力、扬压力、土压力及风浪压力	
	设计洪水情况		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	—	—	—	按设计洪水组合计算水重、静水压力、扬压力、土压力及风浪压力	
	冰冻情况		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	—	—	按正常运行水位组合计算水重、静水压力、扬压力、土压力及冰压力
特殊组合	I	施工情况	✓	✓	✓	—	—	—	—	—	—	—	—	✓	应考虑施工过程中各个阶段的临时荷载
		校核洪水位情况	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	—	—	—	—	按校核洪水位组合计算水重、静水压力、扬压力、土压力及风浪压力
	II	地震情况	✓	—	✓	✓	✓	✓	✓	✓	—	—	✓	—	按正常运行水位组合计算水重、静水压力、扬压力、土压力及风浪压力

注：✓ 为考虑此荷载；— 为不考虑此荷载。

### 7.3 荷载计算

**7.3.1** 墙式防护结构的自重按照制品、填料的尺寸和容重分别计算确定。

**7.3.2** 作用在墙式防护结构后填土破裂体范围内的车辆、人群等附加荷载，可按国家现行的有关标

准的规定确定。

**7.3.3** 作用在墙式防护结构墙背的土压力宜按主动土压力考虑。

**7.3.4** 作用在墙式防护结构上的静水压力应根据挡土墙不同运用情况时的墙前、墙后水位组合条件计算确定。多泥沙河流和湖泊上的防护结构还应考虑含沙量对水的重度的影响。

**7.3.5** 作用在防护结构上的相关荷载的计算方法采用现行行业标准《水工建筑物荷载计算规范》SL 744 的相关规定确定。

## 7.4 结构应力分析

**7.4.1** 墙式防护结构，其结构应力分析应根据结构布置型式、尺寸、受力特点及工程地质条件进行。

**7.4.2** 墙式防护结构底板可按受弯构件计算，也可按弹性地基梁计算，底板上设有抗剪键的部位应进行截面受剪承载力验算。连接构件应按国家现行有关标准进行强度验算。

**7.4.3** 土质地基上加筋式墙式防护结构，应根据采用的结构形式和土工织物的材质，按不同计算工况分别验算其结构应力，详见附录 D。

**7.4.4** 受力条件复杂的组合式墙式防护结构宜按整体结构采用空间有限单元法进行复核。

## 7.5 抗滑稳定性计算

**7.5.1** 坡式防护结构，应首先保证土坡自身稳定，土坡自身稳定计算可按现行国家标准《堤防工程设计规范》GB 50286 规定计算。

**7.5.2** 土质地基上的墙式防护结构，除应计算墙身或沿基底面的抗滑稳定性外，还应验算墙式防护结构及墙后填土的整体稳定性，必要时应采取相应的基础处理或加筋防护措施。

**7.5.3** 墙式防护结构基底和墙身各层护岸制品间的抗滑稳定性计算详见附录 C。

**7.5.4** 墙式防护结构及墙后填土的整体稳定性，可按简化毕肖普法计算或瑞典圆弧滑动法计算。当持力层内夹有软弱土层时，应采用折线滑动法（复合圆弧滑动法）对软弱土层进行地基整体抗滑稳定验算。整体抗滑稳定计算方法应符合现行国家标准《堤防工程设计规范》GB 50286 的相关规定，整体抗滑稳定安全系数的计算值不应小于现行行业标准《水工挡土墙设计规范》SL 379 和现行国家标准《堤防工程设计规范》GB 50286 规定的允许值。

## 7.6 抗倾覆稳定性计算

**7.6.1** 墙式防护结构的抗倾覆稳定性计算，可按现行行业标准《水工挡土墙设计规范》SL 379 的规定计算。

**7.6.2** 土质地基上的墙式防护结构基底应力的最大值与最小值之比不大于表 7.7.2 规定的允许值时，可不作抗倾覆验算。

## 7.7 地基基础计算

**7.7.1** 在各种运用工况下，应能满足承载力、稳定性和沉降变形的要求。

### 7.7.2 土质地基和软质岩石地基上的墙式防护工程基底应力计算应满足下列要求：

- 1 在各种计算情况下，墙式防护工程平均基底应力不大于地基允许承载力，最大基底应力不大于地基允许承载力的 1.2 倍；
- 2 墙式防护工程基底应力的最大值与最小值之比不大于表 7.7.2 中规定的允许值。

表 7.7.2 基底应力最大值与最小值之比的允许值

土质地基	荷载组合	
	基本组合	特殊组合
松软	1.50	2.00
中等坚实	2.00	2.50
坚实	2.50	3.00

注：对于地震区的墙式防护工程，其基底应力最大值与最小值之比的允许值可按表列数值适当增大。

### 7.7.3 硬质岩石地基上的墙式防护工程基底应力计算应满足下列要求：

- 1 在各种计算情况下，最大基底应力不大于地基允许承载力；
- 2 除施工期和地震情况外，基底不应出现拉应力；在施工期和地震情况下，基底拉应力不应大于 100kPa。

### 7.7.4 墙式防护工程基底应力应按公式（7.7.4）计算：

$$P_{\min}^{\max} = \frac{\sum G}{A} \pm \frac{\sum M}{W} \quad (7.7.4)$$

式中：  $P_{\min}^{\max}$  ——墙式防护工程基底应力最大值或最小值（kPa）；

$\sum G$  ——作用在墙式防护工程上全部垂直于水平面的荷载（kN）；

$\sum M$  ——作用在墙式防护工程基底面上的全部荷载对于水平面平行前墙墙面方向形心轴的力矩之和（kN·m）；

$A$  ——墙式防护工程基底面的面积（m<sup>2</sup>）；

$W$  ——墙式防护工程基底面对于基底面平行前墙墙面方向形心轴的截面矩（m<sup>3</sup>）。

### 7.7.5 岩石地基和碎石土地基的允许承载力可根据岩石类别、岩石风化程度和碎石土的密实度按现行有关标准规定确定。

土质地基上墙式防护工程的地基允许承载力，通常可采用下列两类计算方法：一类是根据地基塑性变形区的开展范围确定地基允许承载力；另一类是根据地基发生剪切破坏时的极限荷载除以一定的安全系数确定地基允许承载力。有关土质地基允许承载力的具体计算方法可按现行行业标准《水闸设计规范》SL 265 的规定执行，本规范不再列入。

### 7.7.6 在竖向对称荷载作用下，可按限制塑性区开展深度的方法计算土质地基的允许承载力；在竖向荷载和水平向荷载共同作用下，可按 CK 法验算土质地基的整体稳定，也可按汉森公式计算土质地基的允许承载力。地基允许承载力可按现行有关标准的规定计算。

### 7.7.7 土质地基上墙式防护工程的沉降计算应根据下列规定进行：

- 1 最终地基沉降量可按公式（7.7.7-1）进行计算：

$$S_{\infty} = m_s \sum_{i=1}^n \frac{e_{1i} - e_{2i}}{1 - e_{1i}} h_i \quad (7.7.7-1)$$

式中：  $S_{\infty}$  ——最终地基沉降量（m）；

$n$  ——地基压缩层计算深度范围内的土层数；

$e_{1i}$  ——基底面以下第  $i$  层土在平均自重应力作用下，由压缩曲线查得的相应孔隙比；

$e_{2i}$  ——基底面以下第  $i$  层土在平均自重应力加平均附加应力作用下，由压缩曲线查得的相应孔隙比；

$h_i$  ——基底面以下第  $i$  层土的厚度（m）；

$m_s$  ——地基沉降量修正系数，可采用 1.0~1.6（坚实地基取较小值，软土地基取较大值）。

2 地基沉降计算深度，可按式确定：

$$\frac{\sigma_z}{\sigma_B} = 0.1 \sim 0.2 \quad (7.7.7-2)$$

式中：  $\sigma_z$  ——计算层面处土的附加应力（kPa）；

$\sigma_B$  ——计算层面处土的自重应力（kPa）。

3 软土地基取小值，坚实地基取大值。

4 实际压缩层厚度小于公式（7.7.7-2）的计算值时，应按实际压缩层厚度计算沉降量。

**7.7.8** 墙式防护工程的土质地基允许最大沉降量和最大沉降差，应以保证工程安全和正常使用为原则，根据具体情况研究确定，且地基最大沉降量不宜超过 150mm，相邻部位的最大沉降差不宜超过 50mm。坡式防护工程可不做地基沉降计算。

**7.7.9** 当地基沉降量或相邻基础最大沉降差不满足 7.7.8 中的规定时，应进行地基处理。

附录 A 常用生态框外形及基本尺寸

A.0.1 仿石型生态框常用外形及基本尺寸见图 A.0.1-1～图 A.0.1-6（单位为毫米）。

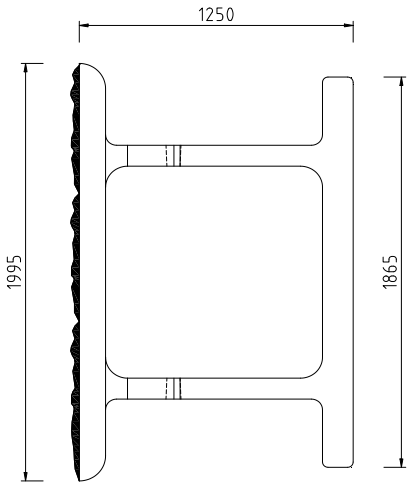


图 A.0.1-1 仿石A型生态框平面图

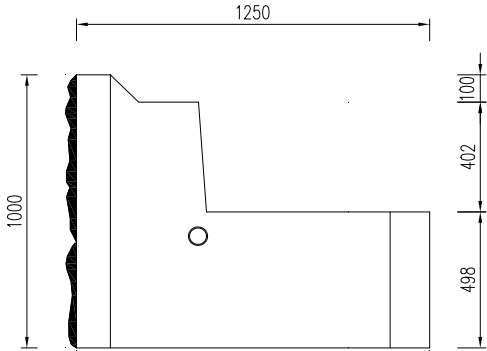


图 A.0.1-2 仿石A型生态框侧立面图

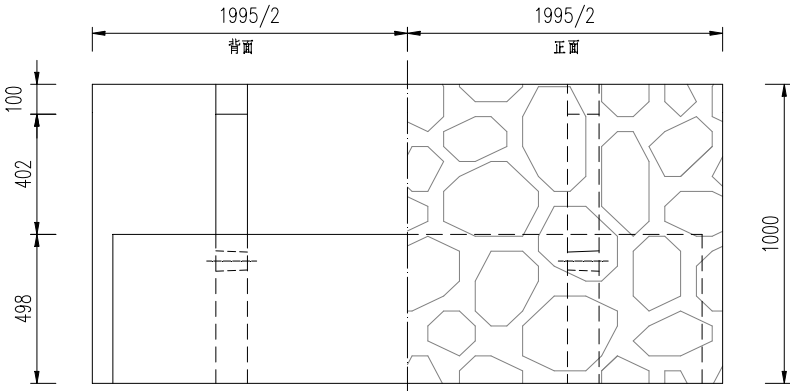


图 A.0.1-3 仿石A型生态框立面图

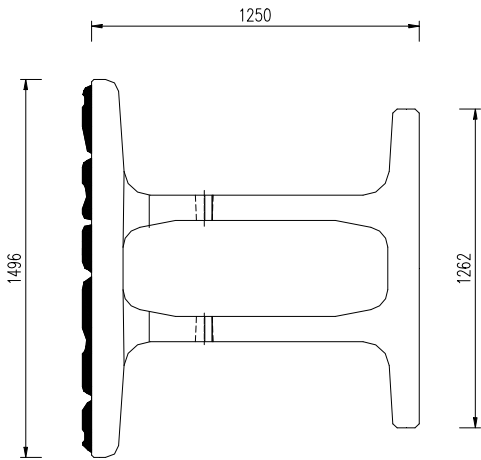


图 A.0.1-4 仿石B型生态框平面图

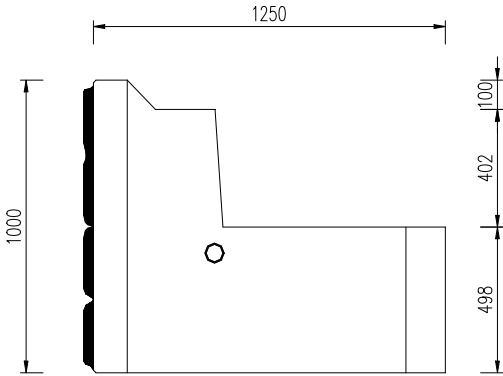


图 A.0.1-5 仿石B型生态框侧立面图



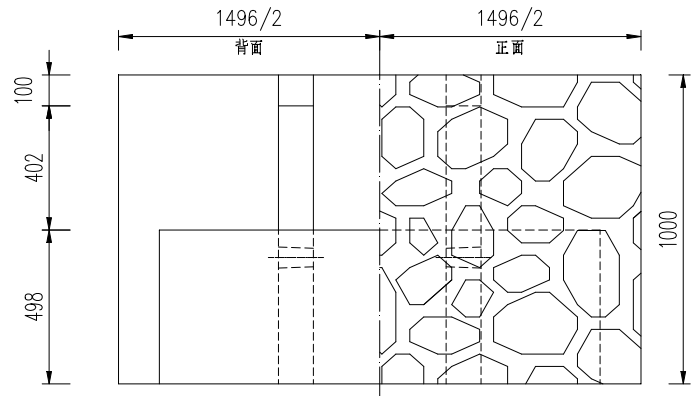


图 A.0.1-6 仿石B型生态框立面图

A.0.2 阶梯型生态框常用外形及基本尺寸见图 A.0.2-1～图 A.0.2-8（单位为毫米）。

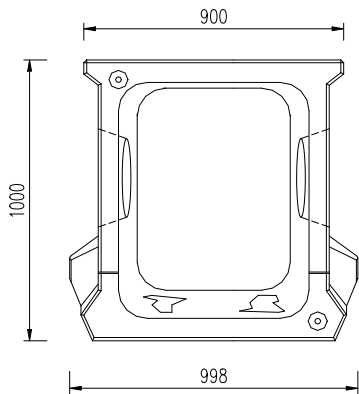


图 A.0.2-1 阶梯A型生态框平面图

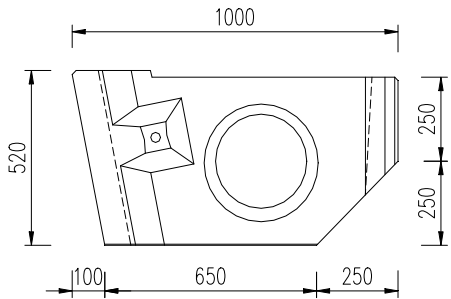


图 A.0.2-2 阶梯A型生态框侧立面图

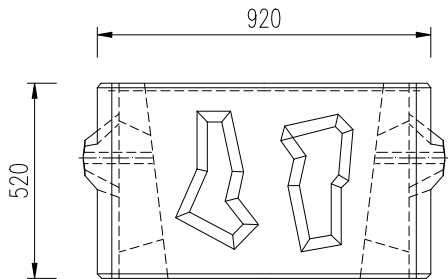


图 A.0.2-3 阶梯A型生态框立面图

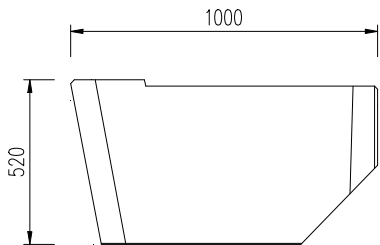


图 A.0.2-4 阶梯A型生态框剖面图

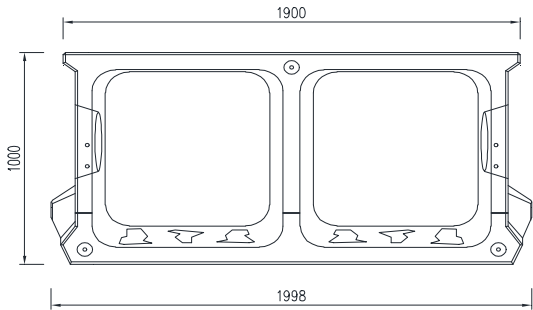


图 A.0.2-5 阶梯B型生态框平面图

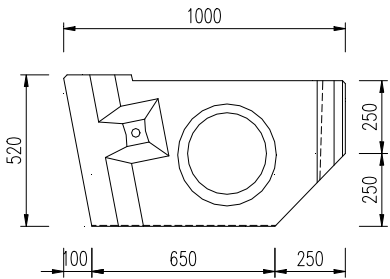


图 A.0.2-6 阶梯B型生态框侧立面图

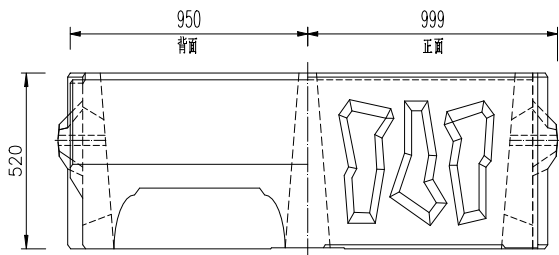


图 A.0.2-7 阶梯B型生态框立面图

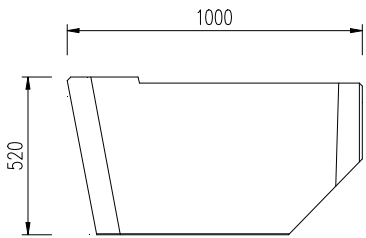


图 A.0.2-8 阶梯B型生态框剖面图

A.0.3 平铺型生态框常用外形及基本尺寸见图 A.0.3-1～图 A.0.3-4（单位为毫米）。

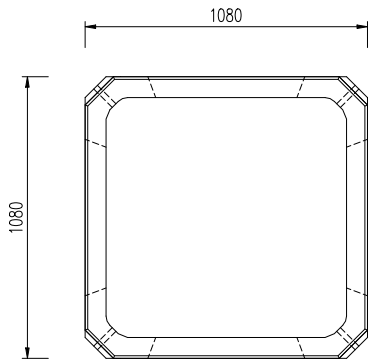


图 A.0.3-1 平铺A型生态框平面图

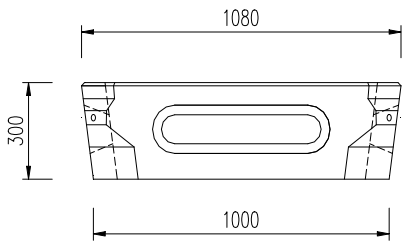


图 A.0.3-2 平铺A型生态框立面图

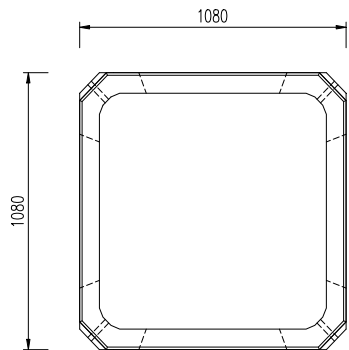


图 A.0.3-3 平铺B型生态框平面图

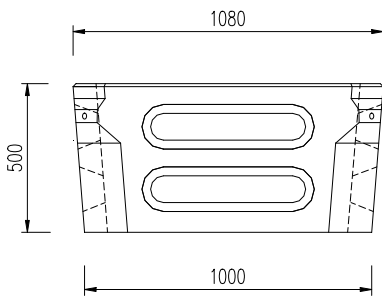


图 A.0.3-4 平铺B型生态框立面图

A.0.4 箱式生态框外形及基本尺寸见图 A.0.4-1～图 A.0.4-8（单位为毫米）。

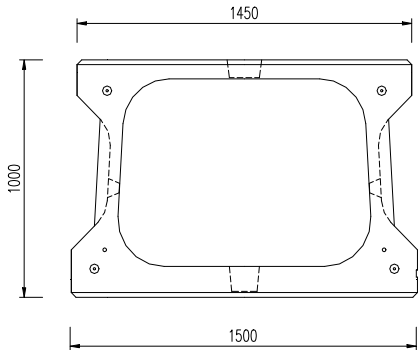


图 A.0.4-1 箱式A型生态框平面图

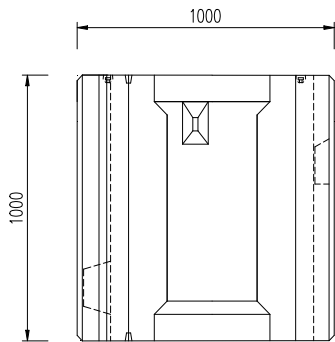


图 A.0.4-2 箱式A型生态框侧立面图

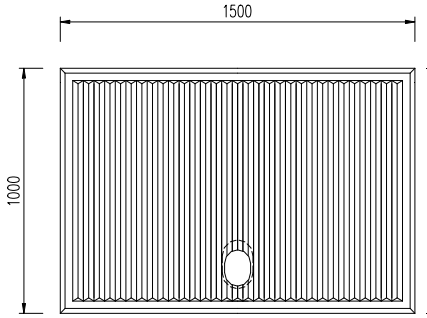


图 A.0.4-3 箱式A型生态框立面图

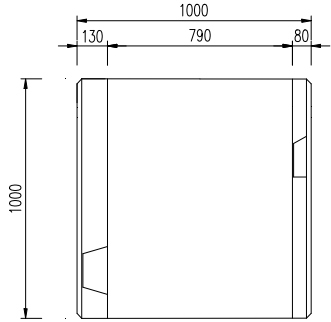


图 A.0.4-4 箱式A型生态框剖面图

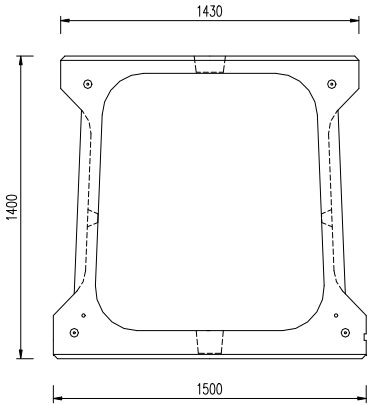


图 A.0.4-5 箱式B型生态框平面图

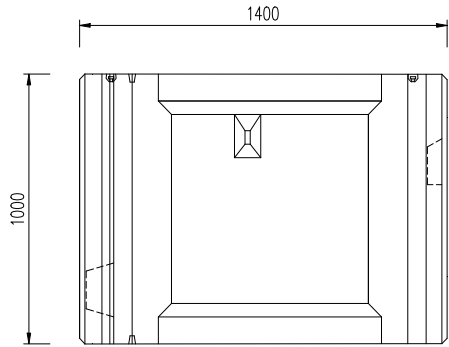


图 A.0.4-6 箱式B型生态框侧立面图

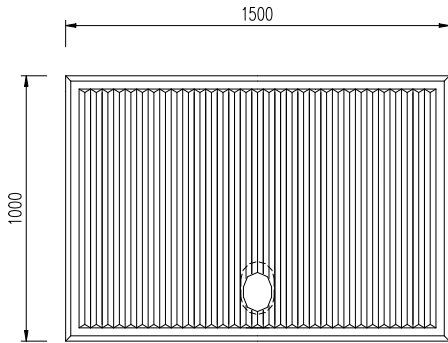


图 A.0.4-7 箱式B型生态框立面图

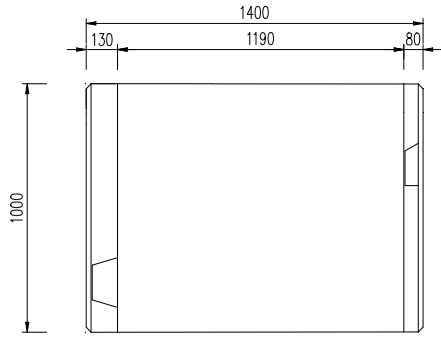


图 A.0.4-8 箱式B型生态框剖面图

A.0.5 卵石型生态框常用外形及基本尺寸见图 A.0.5-1～图 A.0.5-4（单位为毫米）。

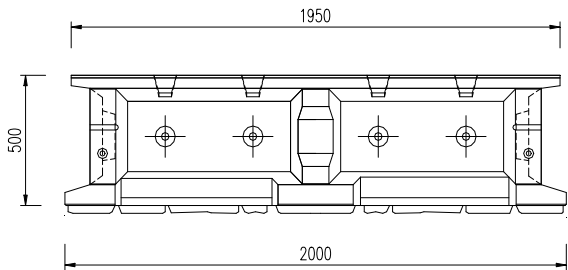


图 A.0.5-1 卵石型生态框平面图

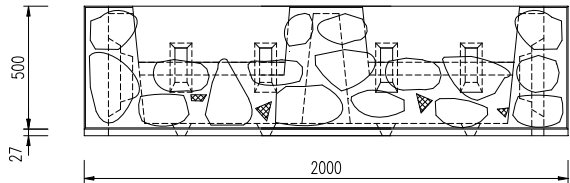


图 A.0.5-2 卵石型生态框立面图

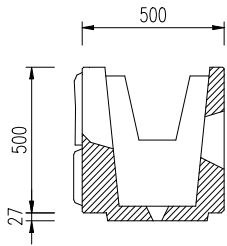


图 A.0.5-3 卵石型生态框剖面图

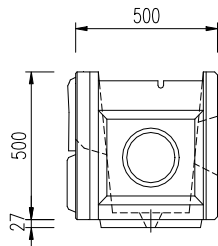


图 A.0.5-4 卵石型生态框侧面图

A.0.6 植草型生态框常用外形及基本尺寸见图 A.0.6-1～图 A.0.6-4（单位为毫米）。

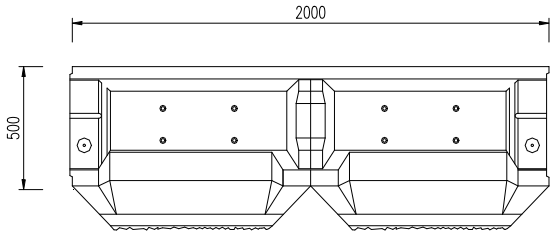


图 A.0.6-1 植草型生态框平面图

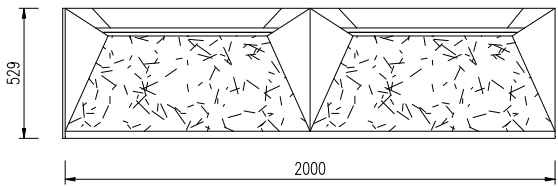


图 A.0.6-2 植草型生态框立面图

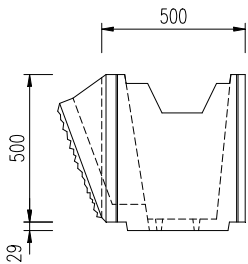


图 A.0.6-3 植草型生态框剖面图

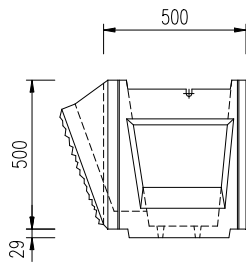


图 A.0.6-4 植草型生态框侧面图

A.0.7 鱼巢型生态框常用外形及基本尺寸见图 A.0.7-1～图 A.0.7-4。

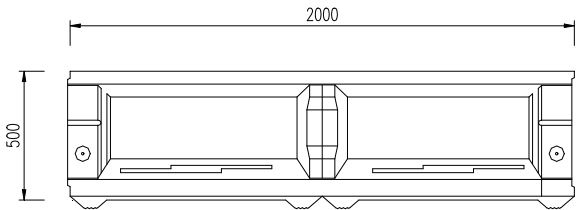


图 A.0.7-1 鱼巢型生态框平面图

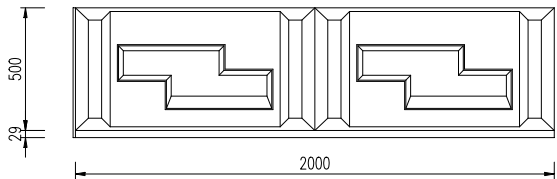


图 A.0.7-2 鱼巢型生态框立面图

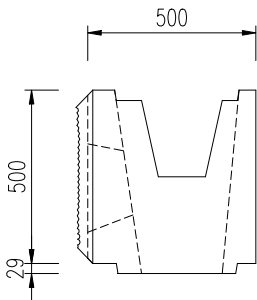


图 A.0.7-3 鱼巢型生态框剖面图

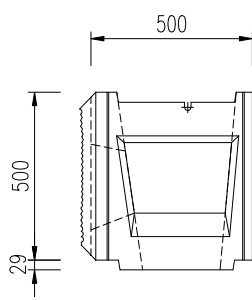


图 A.0.7-4 鱼巢型生态框侧面图

A.0.8 堆砌型生态框常用外形及基本尺寸见图 A.0.8-1～图 A.0.8-8（单位为毫米）。

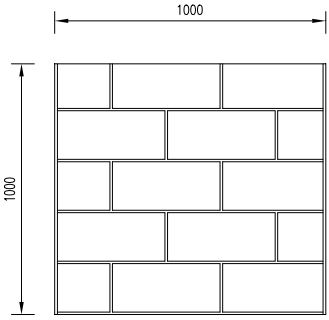


图 A.0.8-1 堆砌型生态框立面图

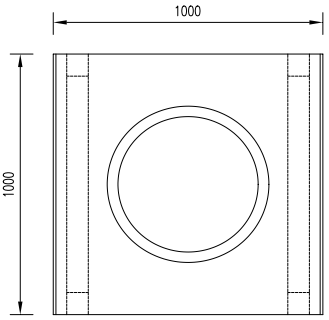


图 A.0.8-2 堆砌型生态框背面图

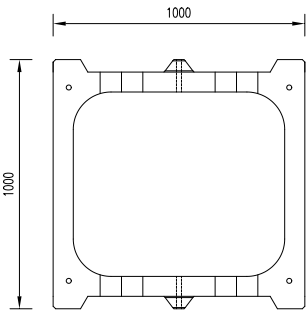


图 A.0.8-3 堆砌型生态框（单仓）顶面图

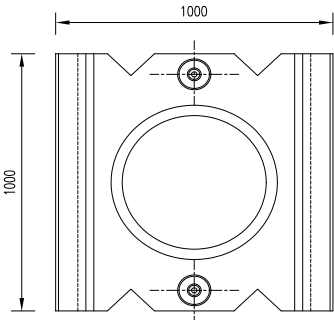


图 A.0.8-4 堆砌型生态框（单仓）侧面图

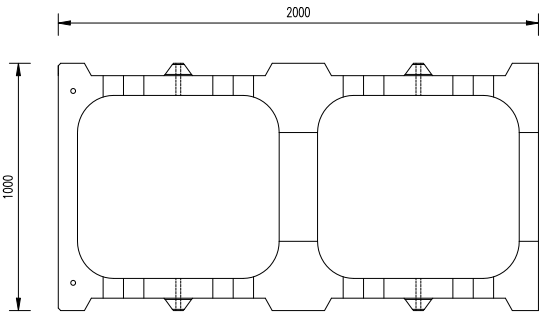


图 A.0.8-5 堆砌型生态框（双仓）顶面图

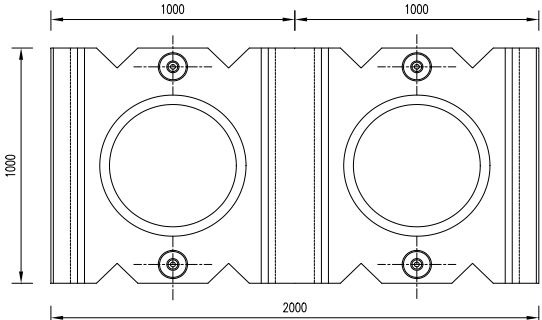


图 A.0.8-6 堆砌型生态框（双仓）侧面图

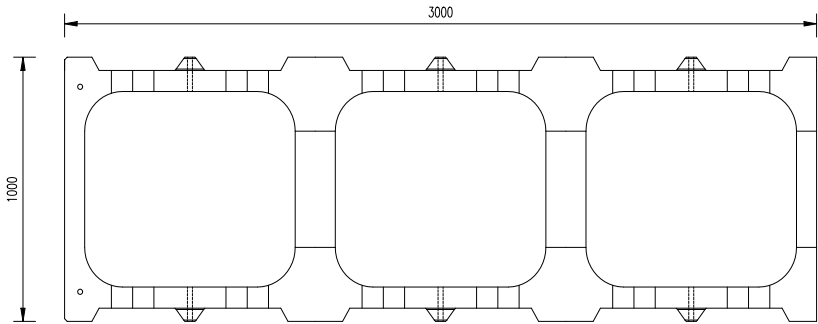


图 A.0.8-7 堆砌型生态框（三仓）顶面图

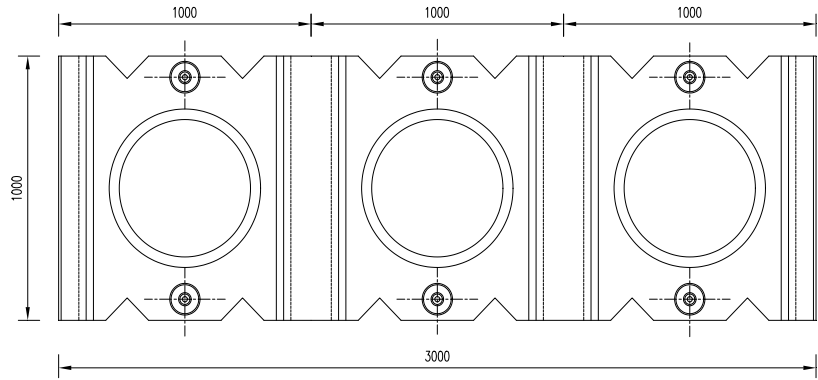


图 A.0.8-8 堆砌型生态框（三仓）侧面图

A.0.9 重力式空箱型生态框常用外形及基本尺寸见图 A.0.9-1～图 A.0.9-16（单位为毫米）。

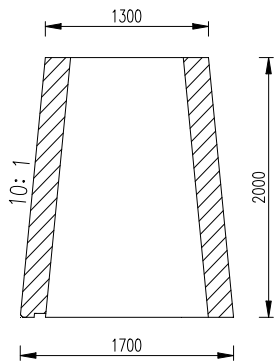


图 A.0.9-1 I 型构件A断面图

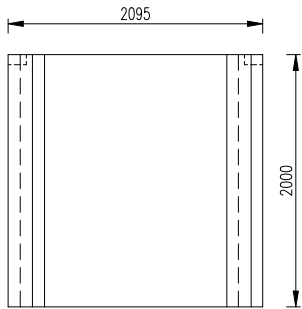


图 A.0.9-2 I 型构件A立面图

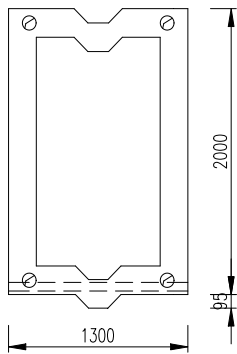


图 A.0.9-3 I 型构件A顶面图

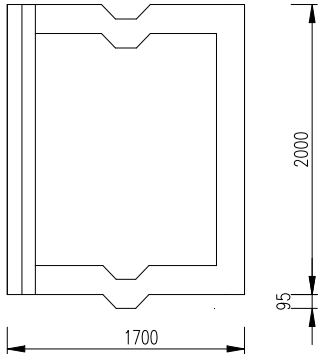


图 A.0.9-4 I 型构件A底面图

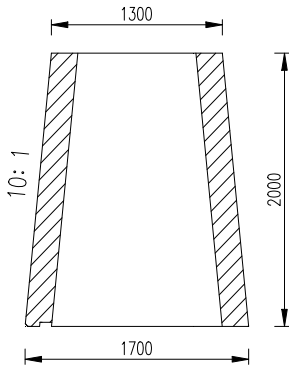


图 A.0.9-5 I 型构件B断面图

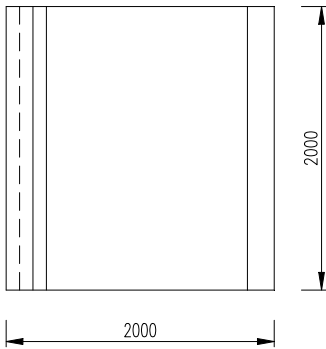


图 A.0.9-6 I 型构件B立面图

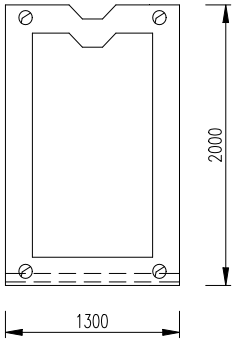


图 A.0.9-7 I 型构件B顶面图

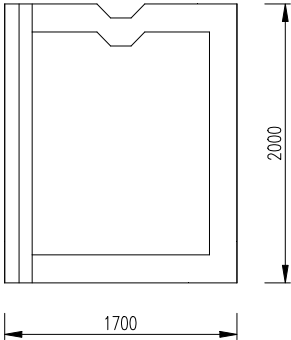


图 A.0.9-8 I 型构件B底面图

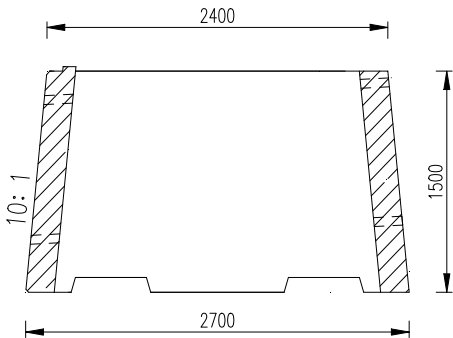


图 A.0.9-9 II 型构件C断面图

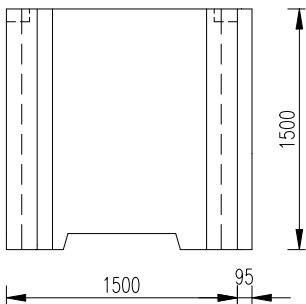


图 A.0.9-10 II 型构件C立面图

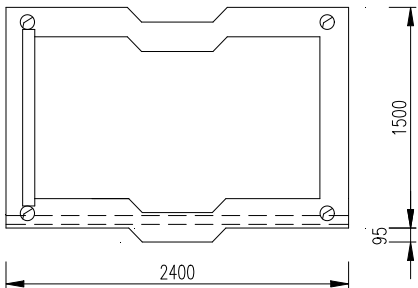


图 A.0.9-11 II 型构件C顶面图

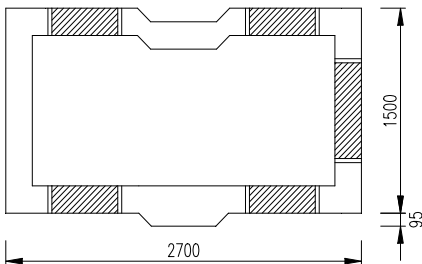


图 A.0.9-12 II 型构件C底面图

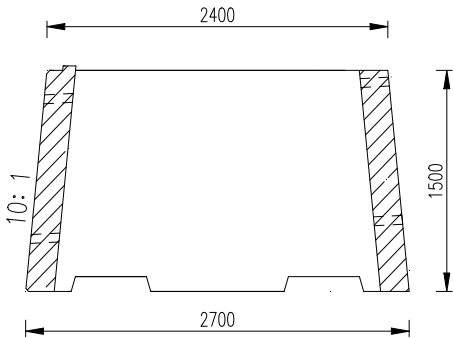


图 A.0.9-13 II 型构件D断面图

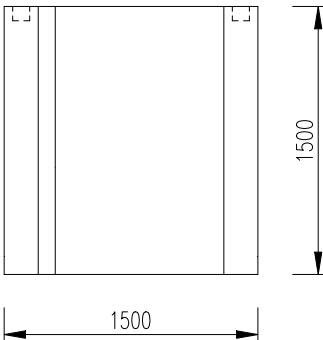


图 A.0.9-14 II 型构件D立面图

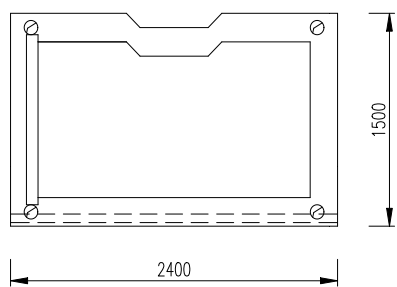


图 A.0.9-15 II型构件D顶面图

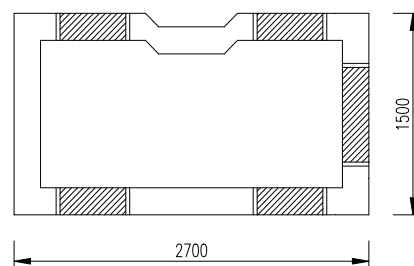


图 A.0.9-16 II型构件D底面图



附录 B 常用生态砌块外形及基本尺寸

B.0.1 自嵌式生态砌块常用外形及基本尺寸见图 B.0.1-1～图 B.0.1-2（单位为毫米）。

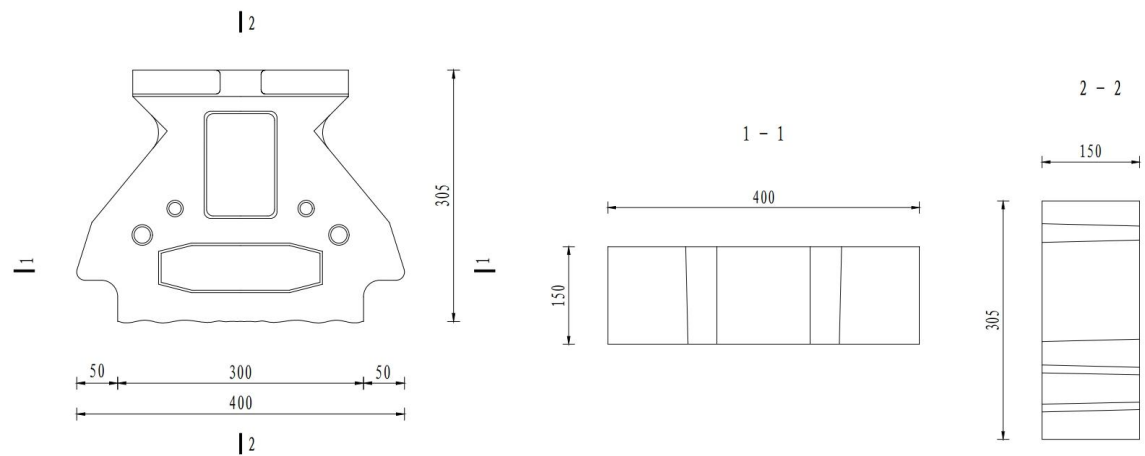


图 B.0.1-1 自嵌式生态砌块平面图

图 B.0.1-2 自嵌式生态砌块剖面图

B.0.2 水工连锁砖常用外形及基本尺寸见图 B.0.2-1～图 B.0.2-3（单位为毫米）。

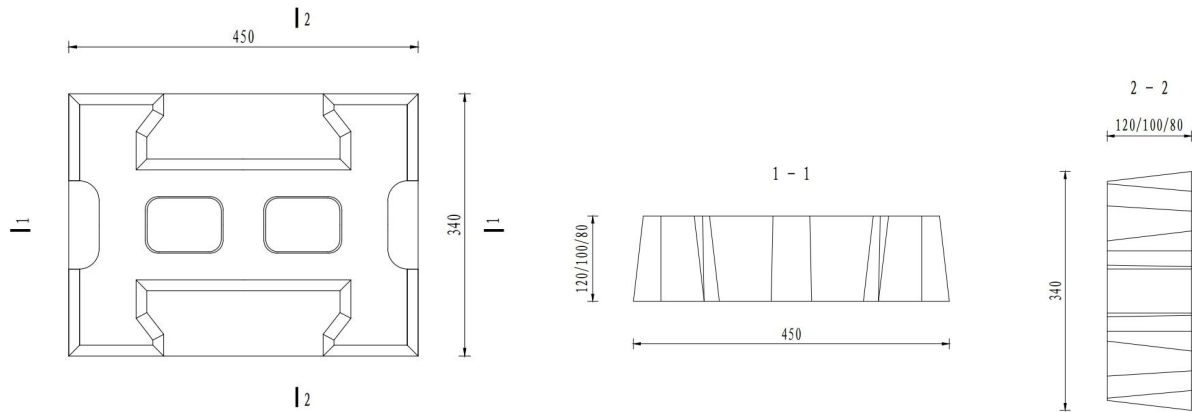


图 B.0.2-1 水工连锁砖平面图

图 B.0.2-2 水工连锁砖剖面图

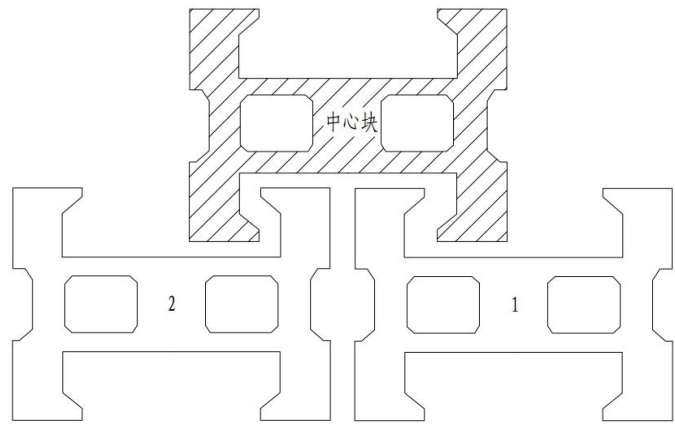


图 B.0.2-3 水工连锁砖组合图

B.0.3 多边形阶梯式生态砌块常用外形及基本尺寸见图 B.0.3-1～图 B.0.3-3（单位为毫米）。

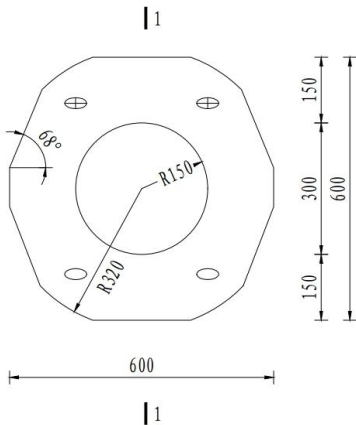


图 B.0.3-1 多边形生态砌块平面图

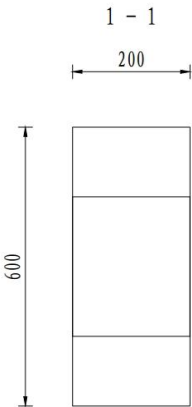


图 B.0.3-2 多边形生态砌块剖面图

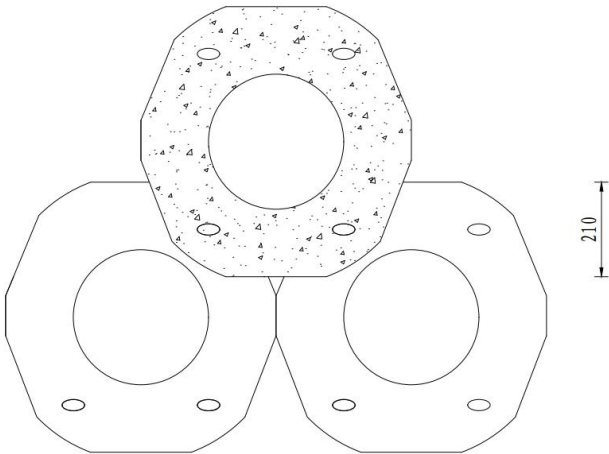


图 B.0.3-3 多边形阶梯式生态砌块组合图

B.0.4 六边形生态砌块常用外形及基本尺寸见图B.0.4-1～图B.0.4-3（单位为毫米）。

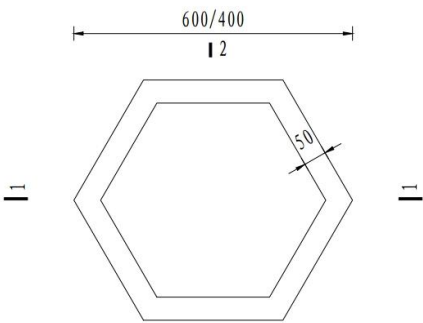


图 B.0.4-1 六边形生态砌块平面图

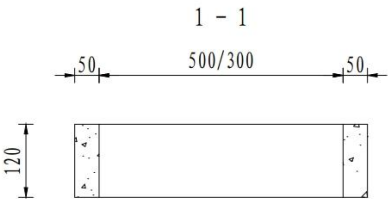


图 B.0.4-2 六边形生态砌块剖面图

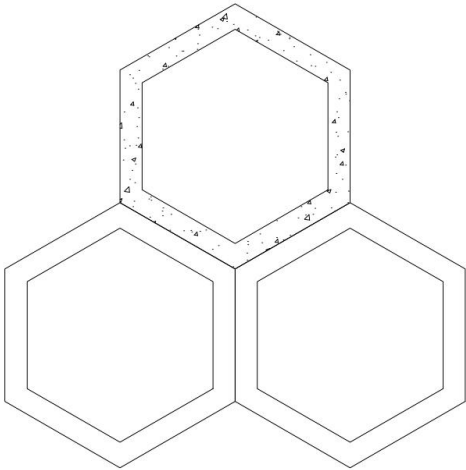


图 B.0.4-3 六边形生态砌块平铺组合图

B.0.5 阶梯型生态砌块常用外形及基本尺寸见图 B.0.5-1～图 B.0.5-2（单位为毫米）。

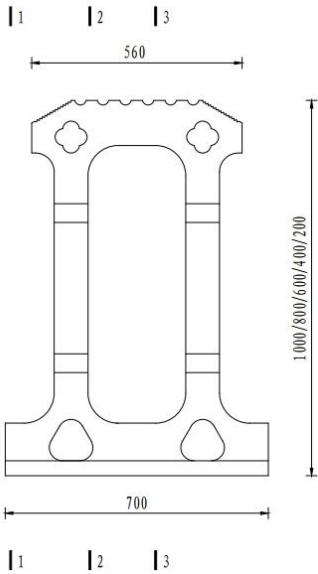


图 B.0.5-1 阶梯型生态砌块平面图

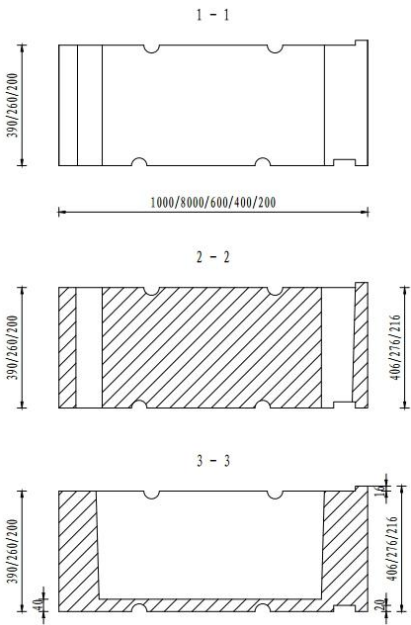


图 B.0.5-2 阶梯型生态砌块剖面图

B.0.6 三角形平铺式生态砌块常用外形及基本尺寸见图 B.0.6-1～图 B.0.6-3（单位为毫米）。

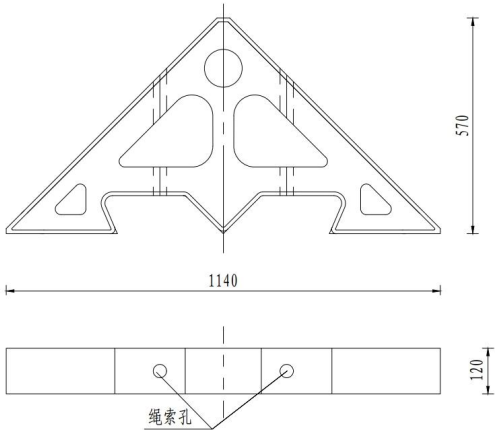


图 B.0.6-1 三角形生态砌块 A 平面及侧面图

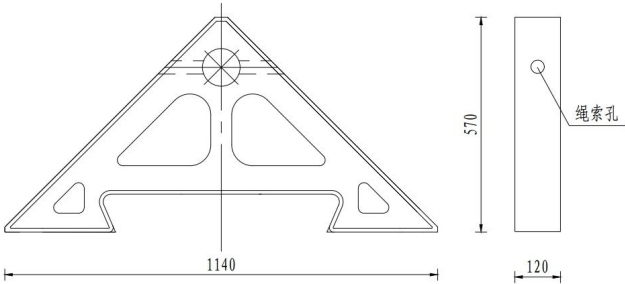


图 B.0.6-2 三角形生态砌块 B 平面及侧面图

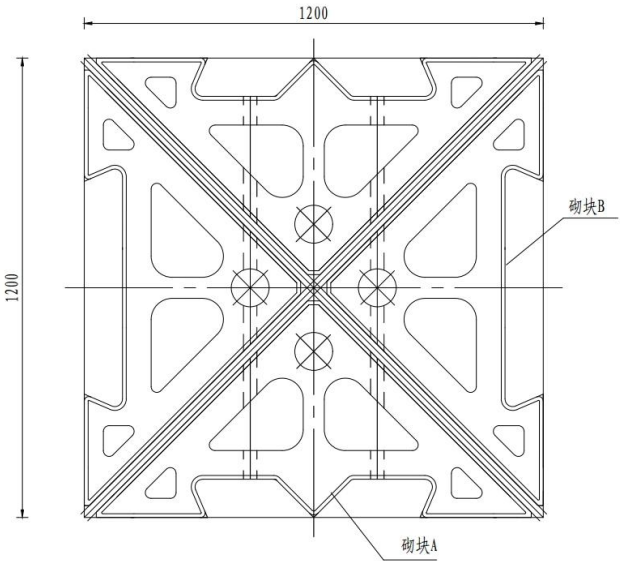


图 B.0.6-3 三角形平铺式生态砌块组合图

B.0.7 三角形阶梯式生态砌块常用外形及基本尺寸见图 B.0.7-1~图 B.0.7-3（单位为毫米）。

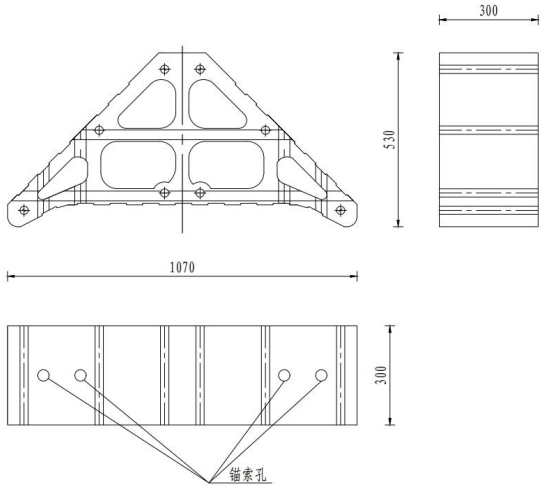


图 B.0.7-1 三角形生态砌块A平面及侧面图

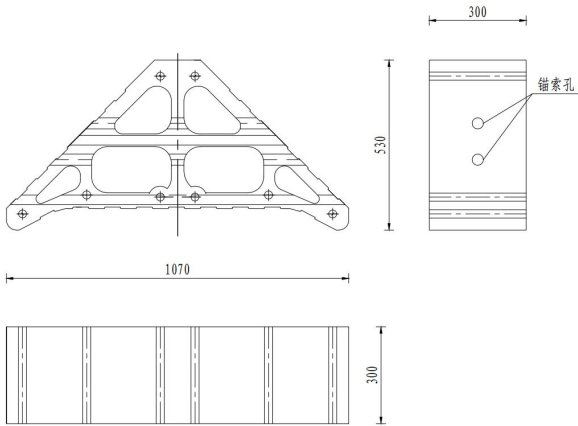


图 B.0.7-2 三角形生态砌块B平面及侧面图

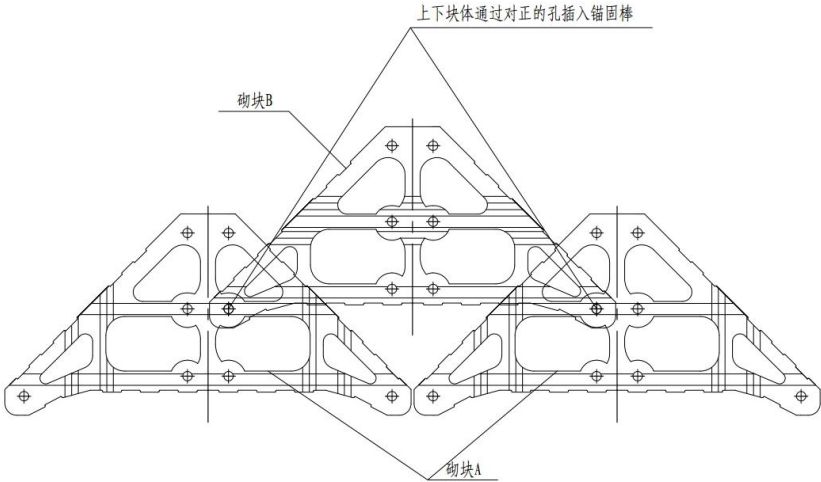


图 B.0.7-3 三角形阶梯式生态砌块平面图

## 附录 C 墙式防护结构抗滑、抗倾覆稳定性计算

**C.0.1** 墙式防护结构沿各层生态制品底面、基底面的抗滑稳定安全系数（图 C.0.1），可按下列公式计算：

1 基底面水平时，可按公式（C.0.1-1）和（C.0.1-2）计算：

$$\min\{K_{c,1}, K_{c,2}, \dots, K_{c,i}, \dots\} \geq K_c \quad (\text{C.0.1-1})$$

$$K_{c,i} = \frac{f \sum G_i}{\sum H_i} \quad (\text{C.0.1-2})$$

式中：  $K_c$  ——抗滑稳定安全系数；

$K_{c,i}$  ——第  $i$  层生态制品底面、基底面的抗滑稳定安全系数；

$f$  ——沿计算面的摩擦系数，基底面可由试验或根据类似的工程经验确定，对各层生态制品间有可靠连接时可取 1.0，否则可取 0.55；

$\sum G_i$  ——作用在第  $i$  层生态制品底面、基底面上全部垂直于水平面的荷载（kN）；

$\sum H_i$  ——作用在第  $i$  层生态制品底面、基底面全部平行于水平面的荷载（kN）。

2 基底面向填土方向倾斜时，可按公式（C.0.1-3）计算：

$$K_{c,i} = \frac{f(\sum G_i \cos \alpha + \sum H_i \sin \alpha)}{\sum H_i \sin \alpha - \sum G_i \cos \alpha} \quad (\text{C.0.1-3})$$

式中：  $\alpha$  ——基底面、生态制品底面与水平面的夹角（°），土质地基基底面与水平面夹角不宜大于 7°，岩石地基基底面与水平面夹角不宜大于 12°。

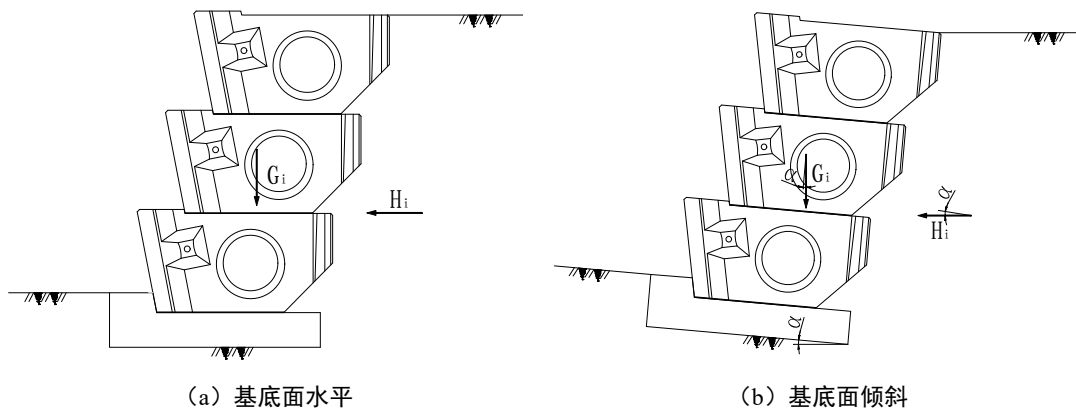


图 C.0.1 墙式防护结构计算荷载示意图

**C.0.2** 墙式防护结构对各层生态制品底面前趾点和基底面前趾点的抗倾覆稳定安全系数，可按下列公式计算：

$$\min\{K_{o,1}, K_{o,2}, \dots, K_{o,i}, \dots\} \geq K_o \quad (\text{C.0.2-1})$$

$$K_{O,i} = \frac{\sum M_{V,i}}{\sum M_{H,i}} \quad (\text{C.0.2-2})$$

式中：  $K_o$  ——抗倾覆稳定安全系数；

$K_{O,i}$  ——第*i*层生态制品底面、基底面的抗倾覆稳定安全系数；

$\sum M_{V,i}$  ——作用在第*i*层生态制品底面、基底面前趾点的抗倾覆力矩（kN·m）；

$\sum M_{H,i}$  ——作用在第*i*层生态制品底面、基底面前趾点的倾覆力矩（kN·m）。

## 附录 D 加筋式墙式防护结构应力计算

**D.0.1** 加筋式墙式防护结构内部稳定性验算应包括筋材强度验算和抗拔稳定性验算，并按下列方法进行：

1 筋材强度验算应符合下列规定：

1) 每层筋材均应进行强度验算。第  $i$  层单位墙长筋材承受的水平拉力  $T_i$  应按下列式计算：

$$T_i = \frac{[(\sigma_{vi} + \sum \Delta\sigma_{vi})K_i + \Delta\sigma_{hi}]s_{vi}}{A_r} \quad (\text{D.0.1-1})$$

式中： $\sigma_{vi}$ —验算层筋材所受土的垂直自重压力（kPa）；

$\sum \Delta\sigma_{vi}$ —超载引起的垂直附加压力（kPa）；

$\Delta\sigma_{hi}$ —水平附加荷载（kPa）；

$A_r$ —筋材面积覆盖率。 $A_r = \frac{1}{s_{hi}}$ ，筋材满铺时取 1；

$s_{hi}$ —筋材水平间距（m）；

$s_{vi}$ —筋材垂直间距（m）；

$K_i$ —土压力系数。

2) 土压力系数  $K_i$ ：应按下列公式计算：

对于柔性筋材 [见图 D.0.1-1(a)]：

$$K_i = K_a \quad (\text{D.0.1-2})$$

对于刚性筋材 [见图 D.0.1-1(b)]：

$$K_i = K_0 - \frac{[(K_0 - K_a)]Z_i}{6} \quad 0 < Z \leq 6m \quad (\text{D.0.1-3})$$

$$K_i = K_a \quad z > 6m$$

式中： $K_a$ —主动土压力系数；

$K_0$ —静止土压力系数。

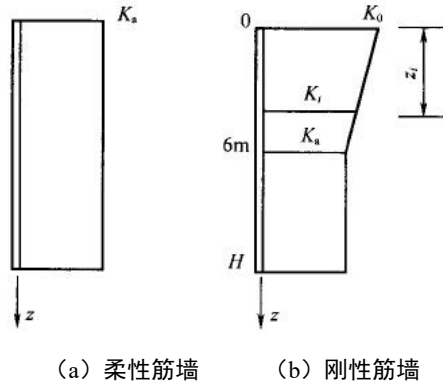


图 D.0.1-1 挡墙土压力系数

3)  $T_i$  应满足下式要求:

$$\frac{T_a}{T_i} \geq 1 \quad (\text{D.0.1-4})$$

式中:  $T_a$ ——筋材的允许抗拉强度。

4) 当  $\frac{T_a}{T_i}$  值小于 1 时, 应调整筋材间距, 或改用具有更高抗拉强度的筋材。

## 2 筋材抗拔稳定性验算应符合下列规定:

1) 第  $i$  层筋材的抗拔力  $T_{pi}$  应根据填土破裂面以外筋材的有效长度  $L_{ei}$  与周围土体产生的摩擦力 (图 D.0.1-2) 按下式计算:

$$T_{pi} = 2\sigma_{vi} B L_{ei} f \quad (\text{D.0.1-5})$$

式中:  $f$ ——筋材与土的摩擦系数, 应由试验测定;

$L_{ei}$ ——筋材有效长度 (m), 即破裂面以外的筋材长度, 该长度最小不得小于 1m;

$B$ ——筋材宽度 (m); 筋材满堂铺时,  $B=1$ 。

2) 筋材抗拔稳定性安全系数应按下式确定:

$$F_s = \frac{T_{pi}}{T_i} \quad (\text{D.0.1-6})$$

3) 安全系数不应小于 1.5。当不能满足时, 应加长筋材或增加筋材用量, 重新进行验算。



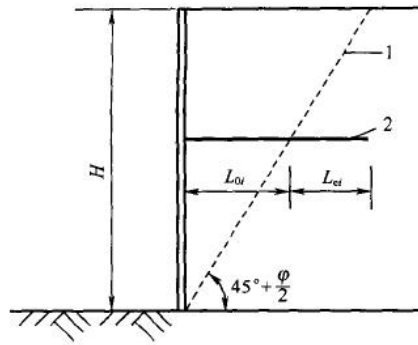
1—破裂面；2—第  $i$  层筋材

图 D.0.1-2 筋材长度

**D.0.2** 第  $i$  层筋材总长度  $L_i$  应按下列式计算：

$$L_i = L_{oi} + L_{ei} + L_{wi} \quad (\text{D.0.2})$$

式中：  $L_{oi}$ ——第  $i$  层筋材破裂面以内长度（m）；

$L_{wi}$ ——第  $i$  层筋外端部包裹土体所需长度，该长度不得小于 1.2m；或筋材与墙面连接所需长度（m）。

为施工方便自上而下筋材宜取等长度，墙高度较大时也可分段采用不同长度。

## 用词说明

为便于在执行本规范条款时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

1 表示很严格，非这样做不可的：

正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”。

2 表示严格，在正常情况下均应这样做的：

正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”。

3 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的：

正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”。

4 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

## 引用标准名录

本规范引用下列标准。其中，注日期的，仅对该日期对应的版本适用本规范；不注日期的，其最新版适用于本规范。

- 《钢结构设计标准》GB 50017
- 《混凝土质量控制标准》GB 50164
- 《堤防工程设计规范》GB 50286
- 《水工建筑物抗冰冻设计规范》GB/T 50622
- 《碳素结构钢》GB/T 700
- 《钢筋混凝土用钢 第1部分：热轧光圆钢筋》GB 1499.1
- 《钢筋混凝土用钢 第2部分：热轧带肋钢筋》GB 1499.2
- 《预应力混凝土用钢棒》GB/T 5223.3
- 《混凝土和砂浆用再生细骨料》GB/T 25176
- 《混凝土用再生粗骨料》GB/T 25177
- 《水工混凝土结构设计规范》SL 191
- 《水闸设计规范》SL 265
- 《水工挡土墙设计规范》SL 379
- 《水利水电工程边坡设计规范》SL 386
- 《水利水电工程合理使用年限及耐久性设计规范》SL 654
- 《水工建筑物荷载计算规范》SL 744
- 《植生混凝土》JC/T 2557
- 《透水混凝土》JC/T 2558

# 水工生态混凝土应用设计规范

T/CBMF XX—202X

T/CCPA XX—202X

条文说明

# 目 次

- 1 总则 ..... 41
- 3 基本规定 ..... 42
- 4 材料 ..... 43
  - 4.1 混凝土 ..... 43
  - 4.2 钢材 ..... 43
  - 4.3 其他材料 ..... 43
- 5 布置与选型 ..... 44
  - 5.1 一般规定 ..... 44
  - 5.2 坡式防护工程 ..... 44
  - 5.3 墙式防护工程 ..... 45
  - 5.4 护底工程 ..... 45
- 6 结构应用设计 ..... 46
  - 6.1 一般规定 ..... 46
  - 6.2 总体设计 ..... 46
  - 6.3 生态设计 ..... 46
  - 6.4 抗冲刷设计 ..... 47
  - 6.5 构造设计 ..... 47
- 7 结构与稳定性计算 ..... 49
  - 7.1 一般规定 ..... 49
  - 7.2 荷载分类与组合 ..... 49
  - 7.3 荷载计算 ..... 50
  - 7.4 结构应力分析 ..... 50
  - 7.5 抗滑稳定性计算 ..... 50
  - 7.6 抗倾覆稳定性计算 ..... 50
  - 7.7 地基基础计算 ..... 51
- 附录 C ..... 52

# 1 总则

**1.0.1** 在我国，随着生态文明建设的不断深入，生态混凝土在包括水利行业的多行业已经有了约 20 年的实践应用，但是我国尚无针对水利行业的生态混凝土应用设计方面的规程规范。本规范在对生态混凝土进行定义的基础上，对水利工程中生态混凝土应用设计的要点予以规定，可用于指导工程实践中的应用设计，为生态混凝土在水利行业的应用设计与推广提供可靠有效的科学依据，推动水利工程建设不断向绿色、低碳、生态方向发展。

**1.0.2、1.0.3** 水利工程中具有抗冲刷、护坡或挡土作用的防护结构一般位于岸坡防护工程、护底工程中，而抗冲刷、护坡、挡土作用发挥的可靠性直接关系到工程的安全性，这是此类水利工程设计的关键问题之一。因此，本规范仅对具有抗冲刷、护坡、挡土等作用的水工生态混凝土应用设计进行规定。用于水利工程管理区地面铺装、停车场铺装等部位的生态混凝土应用设计可参考其他相关规范。

目前，在国内水利工程中发挥抗冲刷、护坡、挡土作用的生态混凝土主要包括生态砌块、生态框、预制植生混凝土制品和现浇透水混凝土。

**1.0.5** 吸取已建工程的经验教训、审慎合理地利用已有科学研究成果是做好设计工作的基础，同时要积极合理地采用新结构、新材料、新技术，以更好地提高设计质量，提升工程的可靠性与先进性，促进行业的高质量发展。

### 3 基本规定

**3.0.1** 水工生态混凝土结构具备结构安全和生态绿化两种特性，水位、流速、波浪是确定防护结构形式和稳定计算需要的最基本资料，应充分收集。工程地区的适生植被相关资料主要用于绿化种植的种类选取。其他资料应根据设计需要，有针对性地收集，例如：多雨地区，需要施工期降雨天数及降雨强度等资料，冰冻地区需要冰情资料等。

**3.0.7** 植生混凝土作为新型材料，目前应用于四、五类环境中工程案例较少，因此在该环境中应用时，宜进行相应的试验和论证。

**3.0.8** 根据水利工程的特点，水工生态混凝土应满足抗冲刷、固土、透水、生态等多个方面的需要，因此在保证防护结构满足强度需求前提下，设置合理的生态开孔率和生态孔隙率可保证植物根系顺利穿透混凝土防护结构，同时为小型动物、微生物提供生存空间。

**3.0.9** 护底工程主要是应对水流等冲刷侵蚀，布置在河道、渠（沟）道、湖泊、水库（塘）等底部的防护性工程，可根据工程具体设计情况确定是否进行相关稳定计算。

**3.0.10** 水工的临水堤坡往往受到水流冲刷、波浪淘刷、冰和漂浮物的撞击破坏，所以其外部的防护结构形式应安全可靠，并通过必要的计算确定。

**3.0.11** 对于水工生态混凝土结构改扩建工程，往往是补充或提高原工程的生态性。利用原工程可以有效减少占地、减少投资，从而实现更加优质的综合效益，所以改扩建工程应用设计时，综合考虑已建工程结构形式、使用材质、整体稳定、生态效果等情况，按照有关规范分类别、分区域合理对原工程进行生态改扩建。

## 4 材料

### 4.1 混凝土

**4.1.2** 现行行业标准《水工混凝土结构设计规范》SL 191 中规定：二、三类环境条件下，钢筋混凝土结构的混凝土强度等级不低于 C25，素混凝土可适当降低。生态框为钢筋混凝土薄壁构件且尺寸相对较大，为保证脱模、吊装环节不产生开裂等影响结构耐久性的损伤，规定其最低混凝土强度等级不宜低于 C30；生态砌块多为素混凝土构件且构件尺寸小、自重轻，生产和施工环节与生态框相比要求可适当降低，最低混凝土强度等级可按 C25 控制；透水混凝土作为格构式防护结构内的填充物，相对主体结构其无受力和外观需求，主要功能是防止土体冲刷，故按《透水混凝土》JC/T 2558 的最低要求确定了其混凝土强度等级。

**4.1.5** 天然资源开采已经对自然环境产生了不可逆的改变，同时每年全社会产生的数十亿吨建筑垃圾亟需处理，无论是天然资源过度开采还是废弃材料处理，都带来不同程度的社会问题，不利于社会绿色、可持续发展。从“十三五”开始国家频繁出台鼓励建筑垃圾资源化利用的指导意见，并发布了一批国家及行业标准，“十四五”又相继出台《关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见》、《“十四五”全国清洁生产推行方案》等文件，全面推进再生资源利用，通过标准、政策形成全方位技术支撑。为此，本规范将再生骨料应用纳入。

再生骨料品质关系混凝土的强度、耐久性，为明确其技术指标要求依据，同时强调其加工所用原材料品质控制，特别指出除满足现行国家标准中的检验指标外，加工材料不得使用被污染或腐蚀的建筑垃圾，强调源头控制，以确保本规范中结构物可满足设计所需的混凝土质量和耐久性。

### 4.2 钢材

**4.2.1** 生态制品多为异形结构且多开设孔洞，虽然各使用阶段受力较小，但部分产品考虑其吊运特点、使用环境，若不配置钢筋，其在使用、脱模及吊装过程中易产生裂缝，进而影响其使用功能。为提高其抗裂能力，保证结构安全，部分生态制品需根据结构形式配置构造钢筋。

**4.2.2** 本条中规定的吊环材料要求与行业标准《水工混凝土结构设计规范》SL 191 的规定一致。生态制品形状、规格多样，为达到节约材料、适配产品的目的，并避免外露铁件锈蚀或吊环割除，生态制品的吊点也可选用吊杆、内埋式螺母等，此类部件应根据相应的产品标准进行选用。

### 4.3 其他材料

**4.3.4** 部分砌块制品形成墙式防护结构时，需采用砂浆砌筑，为保证其结合面承受水平荷载的能力，规定砌筑水泥砂浆的最低强度不低于 M15。



## 5 布置与选型

### 5.1 一般规定

**5.1.2** 对于生态制品的防护结构，在型式改变或与已有结构物衔接处，如无法避免缝隙时，应采取相应的措施，如现浇混凝土衔接，并在墙后设置可靠的反滤措施。

**5.1.5** 防护结构型式的选择是在结构稳定的基础上进行的，景观性河道和湖泊，其需要满足人们观景的需求，故需要丰富的景观因素，同时也要考虑人员观景的安全，因此，运用墙式防护结构时一般使用阶梯式和陡坡式，可实现多层绿化，亦可满足人员、动物落水后能迅速自救并上岸；行洪、灌溉和排水等渠道或河道，需要满足过水流量的要求，且相对一般河道其流速均较大，可选用过流能力和防冲能力更强的结构形式，如墙式防护结构的直立式和陡坡式；易冲刷河床，若无水作业周期长，可考虑采用格构式护底，格构间护底材料可采用现浇透水混凝土。

### 5.2 坡式防护工程

**5.2.2** 生态制品通过在岸坡坡面铺砌安装形成防护结构，制品间应通过可靠的连接方式保证其整体性，以达到防护的目的。而其铺砌形成的断面形式和连接方式，主要取决于生态制品的形状、铺砌方式及其抗冲稳定性，铺砌方式包括错缝安装、对角安装等，如果铺砌方式有变化时，设计人员也可根据实际情况对其连接方式进行适当调整。

**5.2.3** 坡式防护结构在坡面的转折处受力较为复杂，且极易影响护坡的稳定，同时对于生态制品在转折处亦需要平顺过渡，故在这些部位需要设置可靠的基座结构。坡顶封顶主要是防止地表水形成顺垫层的渗流通道，造成局部冲刷。

**5.2.4** 水下区要求防护结构为水生物提供一定的生存空间，且保证内外水系和能量的充分交互，以维持周边生态系统循环，故开孔处回填后，需要具有一定的孔隙，以满足其生态需求，同时还要防止填料被水流带走，造成岸坡土体流失，因此需要综合各因素确定填料类型、规格。

**5.2.6** 水位以上防护结构开孔内宜回填种植土，并绿化种植，植被除了有利于工程场地的环境恢复，还有利于防护结构内回填土的保护，营养土工布既有反滤功能，又可为植物生长提供长期缓释肥料，减少前期植被生长的维护强度，可以帮助植被快速生根和生长，故建议在水上部位采用营养土工布。

### 5.3 墙式防护工程

**5.3.2** 生态制品适用的断面形式是根据产品外形特点确定的，如堆砌型生态框，其结构为规整的长方体且又有不同长度规格的产品，故应用方式比较灵活，堆砌原则以满足稳定性和使用要求为准。

**5.3.3** 生态制品突破传统护岸结构固化的设计方式，融入水体交互、资源节约、低碳环保等可持续发展理念，显而易见，生态性为其设计的基本原则。生态制品的结构形式和砌筑方式可保证防护结构前后水体的交互，同时在邻水侧设置孔洞，可为水生物生存和繁衍提供条件，并且可以增强水体的自净能力。

**5.3.4** 水下区生态制品中的外露回填料若无约束，在规格尺寸不足时易被冲刷，需要根据水流流速配置填料。

**5.3.6** 反滤层外设置卵石、碎石或中粗砂排水层，主要有两方面的作用：一是形成稳定的排水面，快速降低墙背水位，保持墙体前后水体平衡；二是作为护岸结构的垫层，改善其受力情况；三是对反滤土工布进行保护。

### 5.4 护底工程

**5.4.3** 柔性连接对于变形的适应性强，发生变形时对被连接产品的损伤小，故建议采用钢丝绳、尼龙绳等耐久性好的柔性材料进行块体间的连接，以保证其与河道、渠（沟）道、湖泊、水库（塘）等底部变形相适应。

## 6 结构应用设计

### 6.1 一般规定

**6.1.1** 生态混凝土主要是依附于土质边坡的外部防护结构，所以边坡本身应保证整体的稳定性，边坡的加固参考《水利水电工程边坡设计规范》SL 386 设计。

**6.1.2** 生态混凝土墙式防护结构目前工程应用中多采用砌体结构，为提高工程整体的安全性，对墙体高度大于 1.0m 时，多辅助加筋措施与后部填筑土体形成整体稳定性，加筋带相关设计计算主要参考《土工合成材料应用技术规范》GB/T 50290。

**6.1.3** 通过植物配置、生态做法、生态开孔率等生态设计指标控制可以使建成后的生态混凝土防护结构具有较大的孔隙，从而满足排水和动、植物的生长需求。水利工程中不同的部位受水流、风浪影响不同，所以不同部位的生态需求应有区别，例如：水流冲刷较大的河道凹岸、风浪影响较大的岸坡段、水流冲刷较大的河底等结构安全要求比较高的部位，其生态设计指标可以适当降低以保证安全强度为主。

### 6.2 总体设计

**6.2.1** 工程与人文、生态、景观相和谐是当前工程生态设计的需求，生态混凝土防护结构通过选取不同的组合型式、构建不同的外观形式、搭配高低色彩适宜的绿植等措施，与周边的建（构）筑物、人文环境、生态环境相呼应，是水利工程的一种整体生态设计。

**6.2.4** 植生混凝土通过孔隙内填充营养材质，给植物初期生产提供充足的养分和水分，填充方法可自然落淤或采用客土喷撒覆盖法。当防护结构落淤或下层土质营养不足时，为满足植物初期生长和后期持续性，通过在植生混凝土中增加人工营养基质来提高植生混凝土防护结构绿色生态的持续性。

**6.2.5** 在水利工程临水坡岸中，断面根据多年的水位变化情况，可以分为水下、水位变动区、常水位以上等三个区域，考虑到水下及水位变动区植物生长受限较大，难以长久保持绿化覆盖效果，所以只对常水位以上区域提出了绿化覆盖率要求。选用生态混凝土防护结构种植的植物，要考虑草本植物的美观，特别是城镇河段，有环境美化要求，同时应考虑便于维护管理，通过混播尽量实现冬季不枯黄、四季常青、草花结合等不同生态效果。

**6.2.7** 根据以往的工程实践，在工程防护结构表面覆盖一定厚度的种植土，可以有效提高工程初期的植被存活条件，保障工程生态效果。

### 6.3 生态设计

**6.3.2** 水位对植物种植及生产影响较多，河湖一般有正常运行时的常水位，以及汛期时的洪涝水位的变化，因此，应根据常水位、洪涝水位等不同时段的水位变化情况选择沉水植物、挺水植物、湿生植物以及陆生植物等物种。

**6.3.3** 从生态性角度出发需要较大的生态开孔率（生态孔隙率），考虑到水利工程对结构和抗冲刷等的要求，也不能一味地提高生态开孔率（生态孔隙率），经查阅资料和调研，结合部分地方和行业标准，预制植生混凝土制品和现浇透水混凝土的生态孔隙率的范围一般在 25%~30%，生态砌块经组合铺装后的生态开孔率一般在 35%左右，能达到相对较好的生态绿化效果。比如三角形生态砌块平铺后生态开孔率为 37%，阶梯式组合后为 40%，水工连锁砖组合为 24%。

**6.3.5** 对于土壤贫瘠的区域，反滤层可以采用营养土工布，为防止对水体造成影响，不建议在常水位以下区域使用。

为促进植生混凝土和透水混凝土能够达到良好的生态效果，在常水位以上区域可以填充满足盐碱改性要求和营养供应要求的填充材料，以改善孔隙内生物生存环境。

表面回填一定厚度的种植土有利于播种初期草籽发芽及防热，可使根须深入植生混凝土和透水混凝土内部。回填土层较厚时，种草后易横长，出现“根毡”现象而枯死；同时覆土过厚时，易被水流冲蚀流失。

## 6.4 抗冲刷设计

**6.4.1、6.4.2** 坡式防护工程防护厚度应考虑水流冲刷和波浪淘刷两种作用，两种作用下生态混凝土防护厚度计算公式不同。生态砌块一般开孔尺寸较小，通过其自重可满足抗冲刷要求，抗冲块径已在条文 6.4.4 中予以规定，因此其开孔内填料一般可不进行冲刷计算。生态框内部填料一般回填碎石、卵石、块石和透水混凝土等透水材料，因生态框开孔尺寸较大，对未能与生态框形成整体的内部填料需进行复核计算。

**6.4.3** 土质地基下岸坡防护结构底板（或墙趾）的埋置深度，一般情况下是由挡土结构的稳定条件决定的。但由于坡前过水的原因，水流的冲刷会造成岸坡防护结构底板（或墙趾）淘空影响安全，底板（或墙趾）的埋置深度还与周围地形、地质、水流冲刷等条件有关。若无有效的抗冲刷措施，必须将岸坡防护结构底板（或墙趾）埋置于设计冲刷线以下一定深度，才能保证安全。

**6.4.4** 水流作用下和波浪作用下生态砌块或预制植生混凝土制品的抗冲块径（折算粒径）计算公式及现浇透水混凝土板作为岸坡护面时，满足混凝土板整体稳定所需的护面板厚度计算公式与《堤防工程设计规范》GB 50286 中相同。

水流作用下，生态砌块或预制植生混凝土制品的抗冲块径计算时，根据质量相等的原则，实际块径可采用抗冲块径（折算实体粒径）进行转换。

波浪作用下，坡式防护工程中生态砌块或预制植生混凝土制品块体厚度  $K_D$  取值，参考了《堤防工程设计规范》GB 50286 和水利部水利水电规划设计总院理事李胜利的研究成果。《堤防工程设计规范》GB 50286 规定，块石安放（立放）一层的  $K_D$  取值为 5.5；水利部水利水电规划设计总院理事李胜利的研究成果提出，预制混凝土砌块的  $K_D$  取值为 10.0，安徽省地方标准《预制混凝土砌块护坡工程技术规程》DB 34/T 2233 引用了此成果，因此本规范规定  $K_D$  取值为 5.5~10.0，实际使用时可根据生态砌块间是否有连接选择其取值，一般情况下生态砌块间有连接时可取较大值。C 值参考了《堤防工程设计规范》GB 50286 中表 D.3.2-2，块石安放（立放）一层的取值为 1.3~1.4，如生态砌块间互相嵌扣或用铰链连接，C 值可根据试验研究情况适当折减。

## 6.5 构造设计

**6.5.3** 防护结构自身多为镂空结构，上下层之间及纵向相邻之间为缝隙，故岸坡防护结构具有可靠的排水通道，为防止土体流失且考虑施工便捷，结构后一般采用土工织物作为反滤层，主要是考虑施工便捷。针对岩土开挖面存在难以整平或尖锐凸起情况，土工布和防护土体间设置砂砾石或中粗砂垫层，主要有两方面的考虑：一是开挖面找平；二是保护反滤土工布。

**6.5.4** 《水工挡土墙设计规范》SL 379中说明，从近年来的一些工程实例看，当土质地基上浆砌石和混凝土结构的挡土墙长度超过15m、钢筋混凝土结构的挡土墙长度超过20m时，墙身出现竖向裂缝的概率大大增加。防护结构的底板大多数为素混凝土或钢筋混凝土结构，因此纵向结构缝缝间距建议一般不宜大于20m。考虑到相邻建筑物因温度变化引起的热胀冷缩现象，以及相互之间的不均匀沉降影响，相邻建筑物之间需要设置永久缝（变形缝），永久缝的缝宽原则上应根据温度变化所计算的热胀冷缩量确定，根据大量的工程实例，本规范涉及的水工生态混凝土永久缝缝宽一般取10mm~20mm是可以满足要求的。

**6.5.7** 生态砌块厚度一般是由公式6.4.4计算所得。经过对大量工程调查研究，常用生态砌块厚度有80、100、120、150、200、220、250和300mm，如格尔木防洪工程采用的自嵌式砌块厚度为100mm、开封一渠六河连通工程采用铰接式砌块厚度为120mm和平顶山湛河治理工程采用多边形阶梯式生态砌块厚度为200mm。厚度小于80mm的生态砌块在水利工程中较少应用。考虑到模具制作的便利性及成本等因素，本规范规定生态砌块厚度不宜小于80mm。格构式防护结构的现浇透水混凝土护面层厚度不宜小于100mm，主要是考虑施工的便捷性。

**6.5.8** 为了尽可能降低防护结构后的水位，以减少其所承受的水平向荷载，同时减少坡面冲刷，防护结构后的填土顶面设置良好的地表水排水设施，可将降水引起的地表积水尽快排出，如设置排水明沟或暗沟，将收集的地表水集中后从适当的地方排出。

**6.5.9** 在冲刷严重部位的防护结构，防护结构的稳定性较差。可通过在岩土体设置锚杆，使防护结构与岩土体整体性更好，可较好地承担上部防护结构传来的弯矩，提高结构的抗冲刷能力、抗滑和抗倾覆稳定性。

**6.5.10** 生态制品砌筑的岸坡防护结构由多个构件组合而成，构件纵向或角部采用螺栓、锚栓和螺杆连接，主要作用是固定连接各个构件，提高结构的整体稳定性。

## 7 结构与稳定性计算

### 7.1 一般规定

**7.1.4** 生态制品有开孔或孔隙，护底工程一般不需要进行抗浮稳定计算。护底工程下部若有防渗结构，地下水位高于防渗结构底高程时，需要对护底工程进行整体抗浮稳定计算，使得作用在防渗层全部向下的荷载与作用在防渗层底面的扬压力之比满足抗浮稳定安全系数允许值的要求。

**7.1.7** 对于标准段截面尺寸一致，受力条件简单，为简化计算，一般取 1 延长米作为稳定计算单元。组合复杂段，如圆弧转弯段或直角转弯段，由于其受土压力作用的方向随墙体纵向线型变化而变化，受力条件复杂，宜选取两相邻永久结构缝间的区段整体计算较为合理。

**7.1.9** 土质地基上的墙式防护结构，当地基持力层或下卧层有软弱夹层时，容易引起结构的较大沉降，影响其使用功能；当基底应力接近地基允许承载力时，由于墙底板前后基底应力的不均匀，容易引起墙体前后的不均匀沉降致使墙体倾斜；此外，当基底应力与相邻建筑物的基底应力有较大的差异时，较大的沉降差易造成墙式结构的破坏。因此，对上述情况进行地基沉降计算是十分必要的。

**7.1.10** 建造在不均匀地基（如半岩半土或半硬半软）上的墙式防护结构，很可能由于产生过大的不均匀沉降，使得墙式结构倾斜甚至倒塌而影响正常使用。因此，墙式防护结构不宜建造在不均匀的地基上；否则，必须采取严格的工程措施。避免建筑物建造在不均匀的地基上，这是设计的基本原则。但是在工程设计中往往难以避免，尤其是建造在土质地基上，由于基坑边坡的开挖，在墙体与河（渠）坡衔接处，其基础总是一半落在原状土一半落在回填土上。即使回填土质量控制的较好，仍不能避免墙体发生倾斜和变形。近年来修建的一些类似工程，开始重视这一问题，基本做法是在回填土处采取地基加固的措施，如在回填后采用深层搅拌、回填混凝土、水泥土等处理方法，收到了一定的效果。

### 7.2 荷载分类与组合

**7.2.1** 在防护结构设计中，对于其作用荷载，按作用条件和出现概率分为基本（设计）荷载和特殊（校核）荷载两类。本规范将可能受到的这两类荷载分项列出，但不是每座防护结构都会受到这两类荷载中各分项荷载的作用。

**7.2.2** 在施工或运用过程中，各种荷载的大小及分布情况是随机变化的，因此应根据防护结构不同的工作条件和荷载机遇情况进行荷载组合。荷载组合的原则是：考虑各种荷载出现的概率，将实际上可能同时出现的各种荷载进行最不利的组合，并将水位作为组合条件。由于地震与设计洪水位或校核洪水位同时遭遇的概率极少，因此本规范规定，地震荷载只应与正常挡水位情况下的相应荷载组合。对于行洪河道上的建筑物，应考虑水位骤降的工况；对于挡潮建筑物，潮水的涨落也属于墙前水位降落的情况。

### 7.3 荷载计算

**7.3.1** 生态混凝土中具有一定的开孔，在自重计算时应区分制品和填料分别计算，生态制品的平均重度可以实测确定，施工图设计中可以采用制品标定的重量。

**7.3.3** 作用在墙式防护结构墙背的土压力计算方法可按库仑主动土压力进行计算。对于采用错台阶梯式布置的墙式防护，实际墙背为折线形，建议采用简化方法计算，即将生态制品墙背顶点相连作为防护结构的假想墙背进行土压力计算。

**7.3.5** 墙式防护结构由生态制品组合形成，其挡土结构断面与传统挡土墙断面类似，因此作用在墙式防护结构上的荷载计算方法和公式可以参照《水工建筑物荷载计算规范》SL 744 的相关规定确定。

### 7.4 结构应力分析

**7.4.2** 墙式防护结构的底板一般与混凝土预制构件无直接连接，底板可按受弯构件计算，也可按弹性地基梁计算。墙式防护结构构件本身，其内力一般较小，采用构造配筋可满足要求，故不要求对其进行内力计算。抗剪键直接承担构件的水平荷载，需按照《水工混凝土结构设计规范》SL 191 对其截面的抗剪承载力进行复核，保证满足结构强度要求。连接构件主要为螺栓、锚栓和螺杆等钢结构时，按照《钢结构设计规范》GB 50017 对其强度进行验算。

### 7.5 抗滑稳定性计算

**7.5.2** 墙式防护结构稳定性计算时应考虑构件本身自重及其内部回填料的总重。考虑生态制品内部空间有限，内部回填料一般采用人工压实，因此，不以常规的压实度或相对密度指标对内部回填质量进行控制。但稳定性计算时，其总重应考虑填料孔隙或固结影响，回填料的密度应介于松散和压实状态之间，设计时应进行适当折减，对于回填土料可取天然密度的 0.9 倍，对于回填块石若无二片石填充或码砌时可取堆积密度，否则可取湿重度，对重要工程应通过试验确定。当抗滑稳定安全系数计算值小于允许值时，可从增大墙前被动区对墙体滑移的限制作用或者减小墙后填土的推移作用两方面来增强墙式防护结构的抗滑性。可采用基础深埋、放缓坡度、加宽底板、底板下方设置抗滑樁、墙后回填料间敷设土工合成材料等措施，土工合成材料应符合国家现行相关标准的规定。

### 7.6 抗倾覆稳定性计算

**7.6.2** 土质地基上的墙式防护结构基底应力的最大值与最小值之比不大于表 7.7.2 规定的允许值时，基底应力的合力作用点至少在底板宽度的三分点以内（基底应力最大最小之比为 3 时，合力偏心距为  $B/12$ ，在六分点上），不可能出现绕前趾的倾覆，因此可不作抗倾覆计算。

## 7.7 地基基础计算

**7.7.2、7.7.3、7.7.4** 墙式防护工程是以生态制品砌筑的挡土结构为主体，用以承受土压力、防止土体塌滑的防护性工程，其主体结构仍属于水工挡土墙结构的一种，其基底结构与传统水工挡土墙基底结构相似，其受力特点基本一致。因此，土质地基、软质岩石地基和硬质岩石地基上的墙式防护工程基底应力计算要求与《水工挡土墙设计规范》SL 379 保持一致。目前对挡土墙基底应力的计算，普遍采用偏心受压公式，即公式（7.7.4）。由于挡土墙底板在墙前墙后方向的刚度很大，其基底应力可视为直线分布。

**7.7.7** 目前我国水工建筑物的地基沉降计算多数是采用分层总和法，即本规范的公式（7.7.7-1），与《水工挡土墙设计规范》SL 379 保持一致。

**7.7.8** 《水工挡土墙设计规范》SL 379中说明，根据工程实践经验，在不危及挡土墙结构安全和影响其正常使用的条件下，一般认为水工挡土墙最大沉降量达100~150mm 是允许的。但沉降量过大，往往会引起较大的沉降差，对挡土墙结构安全和正常使用是不利的。至于最大沉降差的允许值，一般认为最大达 30~50mm 是允许的。水工挡土墙沉降差，还与止水结构有很大关系：最大沉降差不宜超过50mm，是依据采用金属止水片（如紫铜片止水）时的控制值，因为金属的水平止水的设计上允许有50mm的沉降差而不至于拉开；如果采用橡胶或塑料的止水结构，则不能适应这么大的沉降变形，这时，应根据止水材料的允许变形来控制沉降变形量。墙式防护工程主体结构仍属于水工挡土墙结构的一种，且不设置止水带，不会受到止水带的限制，因此墙式防护工程的土质地基允许最大沉降量不宜超过150mm，最大沉降差不宜超过50mm。

**7.7.9** 对于软土地基上的墙式防护工程，当计算地基最大沉降量或相邻部位的最大沉降差超过本规范规定的允许值，不能满足设计要求时，应采取工程措施减小地基最大沉降量或相邻部位最大沉降差。如调整基础尺寸与埋置深度，必要时进行地基处理，常用地基处理方法有强力夯实法、垫层法、深层搅拌法、振冲挤密法、桩基础、沉井基础等。



## 附录 C

C.0.1、C.0.2 给出了墙式防护结构抗滑、抗倾覆稳定性计算表达式，要求进行分层计算。由于墙式防护结构是通过生态制品多层堆砌形成，构件间存在缝隙，故其各层构件相当于独立挡土墙，因此，有必要分别对各层分缝处的抗滑和抗倾覆稳定性进行分析。摩擦系数的取值与材质特性和连接方式有关，当上下层生态制品之间采用销钉、混凝土抗滑块、凹凸榫等连接方式时，构件间基本不会产生相对滑移，故摩擦系数可取为 1.0；无特殊连接时，上下层生态制品为混凝土面与混凝土面的接触，无实测资料时可参照《码头结构设计规范》JTS 167-2018 中表 7.1.10 的规定取为 0.55。近 6 年来，通过数百项实际工程的应用，采用该摩擦系数进行设计的工程未发生任何滑移破坏事故，并且达到了预期的治理效果。