

刚性防水屋面设计与施工

罗国强 傅松甫 李启培

中国建筑工业出版社

国外对屋面防水工程非常重视。外国屋面防水专家认为，从使用功能观点看，屋面是建筑设计中的一个困难部位，尤其是平屋面的处理更为困难。为保证屋面防水效果，许多国家法律上追究屋面防水工程质量事故的经济责任是很严格的。

防水屋面板工作特性主要分柔性防水屋面（简称柔性屋面）和刚性防水屋面（简称刚性屋面）两大类。柔性屋面以柔性的卷材、薄膜或涂膜为防水层；刚性屋面以刚性的细石混凝土等材料为防水层。此外，还有刚柔结合的双重防水屋面。目前，我国传统的热作业卷材防水屋面正向冷粘贴卷材（片）材防水屋面发展，混凝土刚性屋面正向补偿收缩混凝土和双向预应力混凝土刚性屋面发展。除此之外，近几年来，我国各地还对蓄水屋面、种植屋面等作了一些有益的研究和应用，为刚性屋面的综合利用展示了新的前景。

本书着重论述混凝土刚性屋面防水的基本原理，避免混凝土防水层开裂的基本方法，以及防水层的设计与施工。

本书由罗国强（湖南大学）傅松甫（湖南省建筑总公司）、李启培（湖南省建筑研究设计院）合作，以罗国强为主编写。

编写过程中，曾得到湖南省建筑总公司等有关单位领导的关怀和支持，以及山西省建筑工程局王寿华，四川省第九建筑工程公司叶琳昌，湖南省建筑研究设计院刘宏庆、齐志成等同志的热情帮助，在此表示衷心感谢。读者对本书有何宝贵意见，请运告湖南大学土木系。

作者 1983年12月

本书阐述了细石混凝土刚性防水屋面的基本概念、防水基本原理、防水层设计方法和避免防水层开裂、渗漏的途径，总结了各种刚性屋面的施工工艺及维修方法。书中并对正在发展中的一些刚性屋面，如预应力混凝土刚性屋面、补偿收缩混凝土刚性屋面以及深蓄水刚性屋面的设计与施工作了扼要的介绍。

本书可供从事房屋建筑设计和施工人员参考，也可供大专院校有关专业师生教学参考。

刚性防水屋面设计与施工

罗国强 傅松甫 李启培

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
北京市昌平长城印刷装订厂印刷(北京市昌平县上苑)

开本：787×1092毫米 1/32 印张：4 1/4 字数：92千字

1985年3月第一版 1985年3月第一次印刷

印数：1—39,600册 定价：0.60元

统一书号：15040·4739

前 言

屋面防水工程直接影响到建筑物的使用功能和寿命，关系到人民生活和生产的正常进行，历来受到人们的重视。我国不少古建筑，虽经千年仍巍然屹立，其妙之一在屋顶做得好：传统的搭盖式粘土瓦，特别是釉瓦，耐冰冻抗腐蚀，伸缩自如；陡坡屋面排水畅通迅速，不渗不漏。这些古人成功的经验，对我们今天研究屋面防水仍有参考价值。

随着建筑工业化的发展和人们对利用屋面空间要求的增长，传统的坡屋面日趋减少，新式的平屋面日益增多。但是，我国平屋面防水材料和防水技术目前仍较落后，渗漏现象相当普遍。

1980年建材部技术情报研究所与湖南省建材科技情报总站联合对长江以南十三个省、市、地区的99项约80万平方米屋面的防水现状和防水材料进行了一次较大规模的调查。调查表明^[1]，湖北武汉97%的平屋面存在不同程度的渗漏，湖南衡阳1975年以来新建的油毡屋面73%漏水，海南铁矿26个厂房有24个渗漏，严重地影响到人民的生产和生活。

造成平屋面普遍渗漏的主要原因是，人们对于这类屋面的构造层次及各层次的功能关系缺乏全面了解，设计不当，材料不好，施工不仔细以及使用维修管理等方面存在弊病。与此相关的是各地对防水技术培训重视不够，专业防水技工缺少。因此，文献[9]在报告中建议：设计要改进，施工质量要提高，要加强防水技术培训和建立经济责任制。这些意见都是有益的。

目 录

前 言

第一章 概述	1
第一节 刚性屋面的一般概念	1
第二节 刚性屋面的分类	2
第二章 刚性屋面防水的基本原理	6
第一节 混凝土的拉伸与压缩	6
第二节 混凝土的干缩与冷缩	7
第三节 混凝土防水板块的温度应力	13
第四节 有害裂缝与无害裂缝	21
第三章 避免和减轻混凝土板块开裂的方法	23
第一节 减小混凝土的总收缩值	23
第二节 减小防水板块的温度应力	29
第三节 对防水板块施加预应力	31
第四节 采用补偿收缩混凝土	33
第四章 刚性屋面的设计	42
第一节 刚性屋面防水层设计的基本要求	42
第二节 钢筋混凝土和预应力混凝土刚性屋面设计	43
第三节 补偿收缩混凝土刚性屋面的设计特点	73
第四节 种植屋面和蓄水屋面设计	79
第五章 混凝土刚性屋面的施工	90
第一节 材料要求	90
第二节 施工前的准备工作	93
第三节 钢筋混凝土刚性屋面的施工	95
第四节 预应力混凝土刚性屋面的施工	98

第五节	补偿收缩混凝土刚性屋面的施工.....	104
第六节	敞开式无保温层深蓄水刚性屋面的施工.....	108
第七节	各种刚性屋面施工注意事项.....	112
第八节	工程质量要求及验收.....	113
第六章	刚性屋面的维修	115
第一节	刚性屋面的耐久性.....	115
第二节	刚性屋面的维修.....	118
参考文献	124

第一章 概 述

第一节 刚性屋面的一般概念

刚性屋面是指设有混凝土防水层的一种屋面。这种屋面主要依靠混凝土的密实性并配合一定的构造措施（如屋面仍要有一定的坡度使雨水及时排除；混凝土要分块设缝，使板块在温度、湿度变化的条件下不致开裂，油膏嵌缝，使分格缝既不渗漏又能适应屋面基层的变形），以达到防水的目的。刚性防水屋面实质上是一种刚性板块防水，柔性接头应变。刚柔结合的防水屋面，但习惯上仍称之为刚性防水屋面。

刚性屋面在我国是从本世纪五十年代以后开始研究和使用的。这种防水屋面耐久性能好，施工方便，改善劳动条件，并能加快施工进度，也便于维修，材料容易取得，综合经济效果较好。但如果设计不当，施工不良，将引起屋面渗漏。近十几年，各地加强了对刚性屋面的研究，认识到混凝土极限拉应变小，抗拉强度低，在各种不利因素如干缩、冷缩、以及结构变位的作用下，当总收缩或拉应变超过混凝土的极限拉应变时，将引起屋面开裂。故从各个不同的角度采取措施克服这一缺点，如：减少总收缩值^[10]；对混凝土施加预应力^[11]；采用补偿收缩混凝土^[12]；采用砂垫层和减小板块尺寸^[13]；采用优质嵌缝材料，从而使刚性屋面技术又有新的发展。刚性屋面比较适用于屋面结构刚度较大、地质

条件较好的建筑，但不适用于高温车间、设有振动设备的厂房和设置保温层的屋面。因为在后几种情况下混凝土防水层都容易产生受力裂缝。

第二节 刚性屋面的分类

一、按构造形式分

刚性屋面按构造形式可分为以下两种类型：

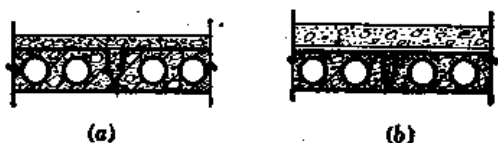


图 1 刚性防水屋面的构造形式

(a) 防水层与结构层紧密结合；(b) 防水层与结构层完全脱开

(一) 防水层与结构层紧密结合的构造形式 (图1a)

这种构造的特点是，直接在结构层上做混凝土刚性防水层，省工省料、造价较低。但当分格尺寸较大且为普通混凝土时，防水层极易开裂，很难做到不渗漏。因此，这种构造只在分格尺寸小的普通混凝土刚性屋面、补偿收缩混凝土刚性屋面以及蓄水屋面中采用。对于蓄水屋面，图1a中的混凝土防水层与结构层板缝一道浇筑。

(二) 防水层与结构层完全脱开的构造形式 其特点是在防水层与结构层之间做找平隔离层。这是从漏雨的教训中总结出来的一种构造形式。过去，刚性防水屋面的设计强调防水层要与结构层紧密结合，并曾在施工验收规范 GBJ16—66 修订本第47条中作了明确的规定。但工程实践和理论分析^[14]表明，防水层与结构层越是紧密结合，结构层的变形

对防水层的影响越大，温度变化产生的温度应力也就越大，因而越容易引起防水层开裂。关于隔离层的具体做法，各省都有比较成功的经验^{[11]、[12]、[13]}，本书将作详细介绍。

二、按混凝土性质分

刚性屋面按混凝土的性质可分为以下三种。

(一) 普通混凝土刚性屋面 这种屋面施工简便，造价低廉，设计和施工都有章可循，且经验较多，目前广泛采用。但如果隔离层效果不好、节点构造和分格不当或施工质量不良，结构层的变形和温湿度变化容易引起防水层开裂，防水效果较差。

(二) 补偿收缩混凝土刚性屋面 这种屋面用一种具有适度膨胀的混凝土即补偿收缩混凝土作防水层，以抵消混凝土全部或大部分收缩，避免或减轻开裂。补偿收缩混凝土大多数是用膨胀水泥或在混凝土拌和物中掺膨胀剂制成。这种混凝土养护好后，在空气中干燥也会收缩，但遇水又产生膨胀，且膨胀的可逆性较大，下雨时可使屋面微细裂缝闭合，不致渗漏。此外，还具有抗渗性好、早期强度高等优点，比普通混凝土刚性屋面使用年限长，比油毡屋面的寿命更高达数倍，且造价有所降低。

补偿收缩混凝土目前虽已进入推广应用阶段，但还有不少技术问题，例如膨胀机理、膨胀能的有效利用，标准测试方法、合理的设计与施工方法等有待研究解决。

(三) 聚合物混凝土刚性屋面 聚合物混凝土是采用硅酸盐水泥和聚合物树脂(如热塑料树脂的水乳液或水溶液等)作复合胶结料，卵石作骨料，砂子作填充料制成的。其性能视聚合物种类及聚合物与水泥的比例而异。其主要特点是，和易性好，抗拉强度、伸长率高(比普通混凝土高一倍甚至

数倍)，抗冻性、防水性、抗腐蚀性能强（比普通混凝土强一倍到数倍）。聚合物混凝土可使结构与防水施工一次成活，省工省料，缩短工期，是一种大有发展前景的新型建筑材料，但目前尚处于研究阶段。

三、按配筋情况分

普通混凝土刚性屋面按配筋又可分为以下三种。

（一）素混凝土刚性屋面 这种屋面要求防水层的分格尺寸小，隔离层的隔离效果好。如湖北沙市采用的砂垫层素混凝土刚性防水屋面，分块尺寸为 4×4 米以内，板厚4厘米，混凝土200号以上，防水效果良好，与钢筋混凝土刚性防水屋面相比，每万平米可节约钢材10吨^[13]。

（二）钢筋混凝土刚性屋面 这种屋面是在混凝土防水层中配置钢筋网，用以提高防水层的抗裂性，限制裂缝开展宽度。钢筋网的直径和网距与混凝土开裂情况密切相关。严格地讲，根本不产生裂缝的混凝土是不存在的。试验证明，宽度在0.05毫米以下的发丝裂缝对混凝土的防水性能和对钢筋的锈蚀是没有影响的。当细钢筋网网距在100毫米以下时，混凝土裂缝宽度可限制在0.05毫米以内^[11]。这种配筋率较高的防水屋面在国外采用较多。我国刚性屋面防水层配筋率较低，一般用直径为 ϕ^4 的冷拔低碳钢丝，网距有100、120、150、200毫米几种（以150为好），板块厚度为35~45毫米（以40为好），分格一般横向为3~6米，纵向为6米左右，或按开间分格^[15]。湖南省省标XJ—203规定每2~3开间留一分格缝，分格面积不超过60平方米。钢筋宜中偏上布置，但要保证上面有15毫米以上的保护层。这种刚性层面是目前我国南方各省采用最多的一种。

（三）预应力混凝土刚性屋面 它是将屋顶圈梁作为张

拉台座用先张法生产的一种新型防水屋面，它利用施工阶段在混凝土内建立的预应力来对付在使用过程中可能发生的温度（湿度）变化、结构变位引起的拉应力，克服混凝土抗拉强度低的缺点。使用这种刚性屋面防水层的分格面积可以加大，减少油膏嵌缝的麻烦，也减少了漏源。当采用300号以上干硬性混凝土、板厚40毫米，双向配直径 ϕ^4 ，中距200毫米的预应力冷拔低碳钢丝时，根据江西南昌多年的经验分块面积一般为50~70平方米，最大可达108平方米^[11]。这种屋面不仅抗裂度高、防水性好、材料省、造价低于或接近于钢筋混凝土刚性屋面^[11]，而且施工简单，不需外脚手架，劳动强度低很有发展前途。

四、按隔热方式分

刚性屋面按隔热方式分为以下几种。

（一）架空隔热刚性屋面 它是在刚性防水层上设置小墩上铺小块薄板，形成架空层，以达到通风、隔热、降温的目的。这种屋面在气候炎热的地区采用较多。

（二）蓄水隔热刚性屋面 它是在刚性防水层四周设墙蓄水，以达到隔热降温的目的。这种屋面最适合于年平均降雨量大于或等于蒸发量的多雨地区。

（三）种植隔热刚性屋面 这种屋面是在刚性防水层上铺设种植基层（天然土层或轻质材料如蛭石层等），其上种植花草，既可隔热降温，又美化环境，适用于城市民用建筑。

上述各种刚性屋面均指细石混凝土刚性屋面，除此之外按刚性防水材料的不同，还有特细砂混凝土刚性屋面、水泥石屑粉浆刚性屋面、平铺红砖填心的防水剂砂浆刚性屋面等。它们都具有因地制宜，就地取材的特点。关于这些刚性屋面的设计与施工，本书未一一作详尽介绍。

第二章 刚性屋面防水的基本原理

如前所述，刚性屋面是利用混凝土的密实性，并配合一定的构造措施达到防水目的。这是指混凝土不开裂而言的。如果混凝土一旦开裂并超过一定的宽度，屋面将丧失防水能力。因此，必须研究混凝土的变形——“伸”与“缩”的性能。如：在外力作用下的拉伸与压缩；在温度或湿度变化作用下的热胀冷缩与湿胀干缩。混凝土的抗压强度约十倍于抗拉强度，抗压极限应变约二十倍于抗拉极限应变，在刚性屋面中不会产生由于混凝土压坏引起的渗漏事故。因此，本章着重介绍混凝土拉伸、干缩和冷缩的基本性能，以及在温度变化的条件下，混凝土防水板块温度应力的计算。

第一节 混凝土的拉伸与压缩

刚性屋面防水板块，在轴向力的作用下，将发生拉伸与

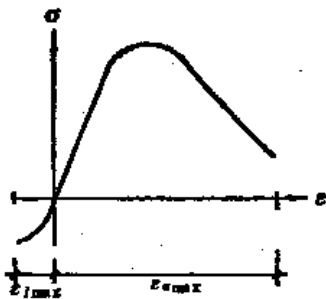


图 2 混凝土应力-应变曲线

压缩的变形。典型的混凝土棱柱受压和中心受拉的应力-应变曲线如图 2 所示。图中混凝土的极限压应变值 ϵ_{\max} 约为 3500×10^{-6} 左右，而混凝土的极限拉应变 ϵ_{\min} 仅为 150×10^{-6} 左右，可见混凝土抵抗拉伸的能力很差。刚性屋面防水

板块，在温度（湿度）变化的作用下引起混凝土收缩时，由于结构层的约束作用，将在板块的中间部位产生最大的拉力（拉应力）；在结构层变位的影响下，在板块出现负弯矩的地方也将产生拉应力。因此这些部位最容易引起开裂，设计时，应予计算或采取必要的构造措施。

第二节 混凝土的干缩与冷缩

混凝土体积的收缩，最主要和最常见的是干缩和冷缩。前者由混凝土中水分的散失（或环境温度下降）引起，后者由混凝土中热量的散失（或环境温度下降）引起。混凝土的干缩与冷缩并非在任何情况下都不利。如：混凝土的干缩和冷缩若处于自由条件下，由于变形是相向变形——混凝土质点间的距离缩小，非但不会引起混凝土开裂，而且能起到增强混凝土密实性的有利作用。在工程中常见的小尺寸混凝土块和板梁构件，即使不配钢筋或只配少量钢筋而无其它约束时，收缩再大也不会开裂。但是，混凝土的干缩和冷缩如果处在约束条件下，由于变形是背向变形——混凝土质点间的距离增大（相对于自由收缩），当其变形超过混凝土极限拉应变时就会引起开裂。

混凝土干缩和冷缩的约束条件有两种。一种是混凝土内部的约束。如混凝土中配置的钢筋对混凝土收缩的约束。在收缩过程中，混凝土强制钢筋发生相向变形（压应力），由于钢筋的弹性，力图使钢筋恢复原来的状态，于是使混凝土发生背向变形（拉应力）。因此，当配筋率过高且自由收缩较大时可能引起混凝土开裂。又如，板块沿高度方向混凝土表面与内部温差的存在，使表面混凝土的冷缩受到内部混凝

土的约束，因而在表面（低温面）产生背向变形，可能导致混凝土表面开裂，再如板块沿长度（或宽度）方向，高温区与低温区的存在，也产生内部的约束条件，高温区将阻止低温区的自由冷缩，使低温区产生背向变形，也可能导致低温区开裂。另一种是混凝土外部的约束，如刚性屋面中结构层对混凝土板块的约束，阻止混凝土板块自由收缩（干缩或冷缩）。如果板块有足够的抗力能克服这种约束的话，混凝土板块即可自由收缩。对于周边为自由状态的板块，这种“外部约束”与前述“内部约束”有质的区别：“外部约束”可以克服，一旦克服后开裂与否与温度（湿度）的变化无关；“内部约束”不可以克服，开裂与否与温度（湿度）的变化密切相关。因此，对于上述“外部约束”，需要研究混凝土防水板块克服结构层约束的条件；对于“内部约束”，需要直接研究混凝土的干缩和冷缩对板块的影响。

一、混凝土的干缩

混凝土中水分的散失引起干缩。水分存在于各种孔隙之中，这些孔隙分布在骨料和水泥石中，以及骨料与水泥石、钢筋与水泥石的交界处。孔隙有胶孔、毛细孔与气孔三种。气孔最大，直径约为0.01~1毫米。气孔中的自由水的增减不引起混凝土体积变化，即与干缩无关。毛细孔的尺寸比气孔约小100倍，其中存在受毛细管力作用的可蒸发水。毛细孔的数量取决于混凝土的加水量与制作条件。胶孔比毛细孔又小1000倍，占凝胶体积的1/3~1/4。胶孔中经常充满着水，不易蒸发。混凝土体积的变化与毛细孔水和胶孔水的变化有密切关系。这种关系可用美国柏惠尔斯(T.C.Powers)干缩机理的假说描述。原来在凝胶的固体粒子之间存在着吸力。当水进入“干燥”的凝胶结构时，水分子处于一种高度

密集状态或“被吸附状态”，均匀地分布到固体粒子的全部表面上，当环境相对湿度为100%时，固体粒子表面吸附水膜的平均厚度为5个分子直径，也就是说二个固体粒子之间需要10个水分子直径的间距。但是，凝胶中胶孔的平均尺寸约5个水分子直径，容纳不下10个水分子直径厚度的吸附水。因此，产生吸附水对固体粒子的胀力，此胀力的大小随环境湿度而变。当相对湿度为100%或放在水中时，胀力最大，膨胀的积体也最大，即出现“湿胀现象”。当湿度降低，胀力减小，毛细孔水分随之蒸发，体积也随之减小。毛细孔含量愈多，收缩率也愈大。当环境湿度降低到相对湿度的40%以下时，固体表面吸附水膜的厚度不足两个水分子直径，胶孔中不饱含水分子，就不产生胀力，体积收缩就更加剧烈。几十年来，很多人从事混凝土干缩的研究，提出了不少计算公式。但是，运用这些公式常常得不到符合实际的结果。因此，还必须结合具体条件通过试验测定干缩值。表1为长沙地区配制的200号、250号、300号混凝土，当相对湿度为50%时的轴向干缩值^[1]，表2为相对湿度对干缩的影响系数。从表中可知，干缩值随水泥用量的增加而加大，随环境潮湿程度的增大而减小。

相对湿度为50%时的轴向干缩值

表 1

混凝土标号	水灰比	用水量 (kg/m ³)	用水泥量 (kg/m ³)	干缩值 (×10 ⁻⁶)
200	0.75	170	227	380
250	0.65	170	261	400
300	0.58	170	293	480

影响混凝土干缩率的因素较多，主要的有：

(一) 骨料 首先是数量, 其次是弹性模量。骨料的数量越多, 弹性模量越大, 收缩值越小, 因为骨料起着阻止水泥石收缩的作用。骨料的尺寸与级配一般影响不大。

相对湿度对干缩的影响(折减)系数

表 2

相对湿度	50%	60%	70%	80%	90%
相对湿度影响系数	1.0	0.85	0.68	0.48	0.28

(二) 存放条件 首先是环境湿度, 湿度越高收缩值越小(表 2 及图 3)。延长湿养时间可推迟干缩的发生与发展, 但它对最终干缩值并无显著影响。干燥速度也不影响最终干缩值。

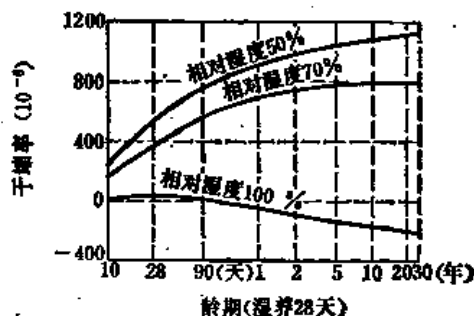


图 3 不同相对湿度时混凝土的干缩值

(三) 加水量和水泥用量 水泥用量一定时, 加水量越大, 即水灰比越大, 干缩性也越大; 加水量一定时, 水泥用量越大, 干缩值也越大(表 1)。

(四) 配筋 配筋能减小收缩值, 配筋率越大, 收缩值越小。

(五) 尺寸形状 试件或构件尺寸增加则干缩率减小。国际钢筋混凝土实践法规建议^[33]用虚拟厚度 d_v 来考虑构件暴露于大气中的尺寸的影响, 虚拟厚度越大, 收缩率越小(图 4)。

与干缩的同时, 混凝土在长期荷载作用下将产生徐变变

形。由于刚性屋面防水板块一般不承受持压外力，或只承受比抗压强度小的预压应力，徐变变形较小，而受拉时产生的徐变变形可以提高混凝土的极限应变值，是有利的徐变，故一般忽略不计刚性屋面防水板块的徐变影响。但是，结构层（屋面板）混凝土徐变对防水层的影响则不可忽视。

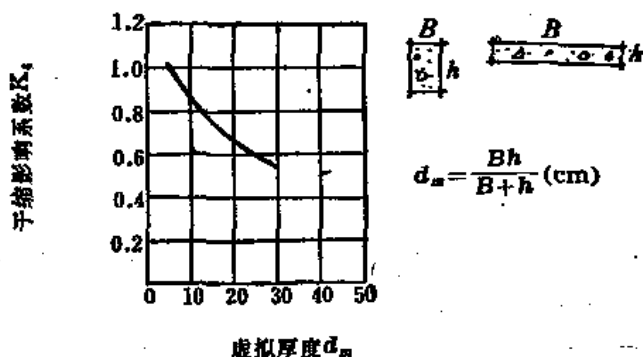


图 4 构件暴露在大气中的面积对干缩的影响系数 K_s 。
(取自文献[32])

二、混凝土的冷缩

混凝土热量的散失引起冷缩。混凝土中热量来源包括原材料带来的、从较高气温环境吸收来的和水泥水化作用放出的。后者称为水泥水化热。

水泥水化热量和发热的迟早随水泥品种、组成、细度等因素而异。快硬高强水泥因所含硅酸三钙与铝酸三钙较多，故水化热较高；水泥细度愈细，水化热放出愈早，但总的发热量不变。混凝土水化热与水泥用量成正比，随水灰比增高也略有增加。

混凝土中的温度，一方面由于水化热积聚而上升，另一方面又因不断散热而降低。当混凝土体积不大，散热面很大