桥梁防落梁挡块

技术白皮书

公司名称： 浙江宝佳力科技有限公司 / Zhejiang Baojiali Technology Co., Ltd.

发布日期： 2026 年 8 月

文档版本： V1.0

技术领域： 路桥工程 / 施工安全装备 / 模块化钢结构

目录

第一章 行业背景与概述 3
第二章 定义与工作机理 5
第三章 分类与构造形式 9
第四章 设计规范与计算方法 12
第五章 材料与制造工艺 17
第六章 施工安装技术 22
第七章 检测验收与质量评定 27
第八章 运营维护与病害处理 32
第九章 技术发展趋势与创新方向 37
第十章 结论与实施建议 42

第一章 行业背景与概述

一、桥梁抗震与落梁震害的严重性

桥梁作为交通基础设施的关键节点，其抗震性能直接关系到震后应急救援通道的畅通和区域经济的恢复能力。在强烈地震作用下，桥梁上部结构与下部结构之间产生的相对位移可能超出支承面的有效长度，导致梁体从桥墩或桥台上脱落，即所谓的"落梁"破坏。落梁一旦发生，往往意味着桥梁结构的完全失效，不仅修复难度大、周期长，还可能引发次生灾害，阻断交通生命线。

回顾全球范围内的强震记录，落梁震害反复出现且后果严重。1971 年美国圣费尔南多地震中，多座桥梁因横向位移过大发生落梁，促使工程界开始系统研究防落梁措施。1989 年洛马普列塔地震和 1994 年北岭地震中，高架桥的连续落梁造成了交通网络的大面积瘫痪。1995 年日本阪神地震中，阪神高速道路的多处桥墩剪切破坏和落梁事故成为该次地震中最具代表性的工程震害。2008 年中国汶川地震中，都汶公路等交通干线上的多座桥梁发生落梁，严重阻碍了救援队伍进入震中区域，暴露出早期桥梁在防落梁构造方面的不足。

落梁事故的经济与社会影响远超桥梁本身的修复费用。一座关键桥梁的落梁失效可能导致整条交通干线中断数周甚至数月，间接经济损失可达直接损失的数倍至数十倍。在城市区域，高架桥落梁还可能造成桥下车辆和人员的伤亡，引发严重的公共安全事件。正是基于这些惨痛教训，各国桥梁抗震规范逐步将防落梁设计从可选的构造措施提升为强制性的设计要求，防落梁挡块也因此成为桥梁抗震体系中不可或缺的组成部分。

二、防落梁技术的发展历程

防落梁技术的演进经历了从单一构造措施到体系化设计的过程。早期桥梁主要依靠增大支承面长度（即搭接长度）来防止落梁，这种方法在中小跨径桥梁和低烈度区具有一定效果，但在强震作用下，梁端与墩顶的相对位移可能远超常规搭接长度所能覆盖的范围，单纯依靠增大支承面既不经济也无法从根本上解决问题。

20 世纪 70 年代以后，随着强震观测数据的积累和结构动力学分析手段的进步，工程界开始认识到需要通过专门的限位装置来控制梁体的位移。挡块作为最直接的限位构造，首先在横向防落梁中得到广泛应用——在盖梁两端设置混凝土或钢制挡块，限制主梁的横向位移。随后，纵向防落梁措施也逐步发展，包括在梁端与墩台之间设置纵向挡块、采用防落梁拉索或链条等连梁措施。

进入 21 世纪，防落梁设计理念发生了重要转变。研究者和工程师逐渐认识到，搭接长度、限位措施和连梁措施不应孤立设计，而应作为一个统一的防落梁体系进行整体考虑。挡块不再仅仅是"硬挡"，其刚度、强度和间隙需要与桥梁整体的抗震性能目标相匹配。在高烈度区，挡块甚至被设计为可牺牲的"保险丝"构件——在强震中通过自身的塑性变形或破坏来耗散能量，保护下部结构不发生严重损伤。

国内防落梁技术的发展与桥梁建设规模的扩张同步。2008 年汶川地震后，交通运输部组织修订了《公路桥梁抗震设计细则》，对防落梁措施提出了更明确的要求。2020 年实施的《公路桥梁抗震设计规范》（JTG/T 2231-01-2020）进一步完善了防落梁设计条款，将挡块等限位装置纳入了能力保护设计的框架。铁路系统也相继出台了相关标准，如《铁路桥梁减震榫及榫形防落梁装置》（Q/CR 709-2019），推动了防落梁产品的标准化和系列化。

三、研究现状与技术挑战

当前防落梁挡块的研究围绕碰撞机理、承载力计算和新型构造三条主线展开。碰撞效应的精细化分析是基础研究的重点，涉及碰撞刚度模型、碰撞力计算方法和碰撞对结构响应的影响。研究者通过数值模拟和模型试验，揭示了初始间隙、挡块刚度、梁体质量和地震动特性等参数对碰撞力的影响规律，为挡块设计提供了理论依据。在碰撞机理研究的基础上，挡块的承载力与破坏模式研究逐步深入。混凝土挡块可能发生斜截面剪切破坏、平截面剪切破坏或锚固失效，钢制挡块则可能发生屈服、屈曲或焊缝断裂。针对不同破坏模式，研究者提出了相应的承载力计算公式，并通过试验验证了公式的适用性，为挡块的合理设计提供了计算基础。与基础研究并行，新型挡块构造与功能集成研究也在持续推进。传统刚性挡块在碰撞时产生较大的冲击荷载，可能对梁体和墩台造成损伤，研究者因此开发了带橡胶缓冲垫

的缓冲挡块、采用滑移构造的保险丝型挡块、结合阻尼器的耗能挡块等新型形式，试图在限位的同时实现耗能和减震。部分研究还探索了将挡块与支座、伸缩装置等构件集成设计的可能性，以简化构造、提高可靠性。

研究进展并未完全消除工程应用中的挑战。挡块设计参数的选取在很大程度上依赖经验，不同规范之间的规定存在差异，工程师在实际设计中往往难以把握合理的间隙值和承载力裕度。制造和安装质量的参差不齐是另一个突出问题，预埋件定位偏差、间隙控制不准、防腐处理不到位等问题在工程中时有发生，直接影响挡块的实际效能。在役桥梁挡块的检测和维护同样缺乏系统的技术标准，许多桥梁的挡块在建成后长期缺乏检查，病害不能及时发现和处理。

本白皮书以防落梁挡块为研究对象，系统梳理其定义与工作机理、分类与构造形式、设计规范与计算方法、材料与制造工艺、施工安装技术、检测验收与质量评定、运营维护与病害处理，以及技术发展趋势与创新方向，旨在为桥梁工程的设计、施工、运维和管理人员提供一份全面、可操作的技术参考。白皮书的内容主要基于现行规范标准、学术研究成果和工程实践经验，对关键数据和结论均注明来源，力求做到事实可追溯、方法可复核、建议可执行。

第二章 定义与工作机理

一、防落梁挡块的定义与功能定位

防落梁挡块是设置于桥梁上部结构（梁体）与下部结构（墩台）之间的刚性或半刚性限位装置，其基本功能是在地震、强风、车辆撞击等极端荷载作用下限制梁体的纵向或横向位移，防止梁体因位移过大而脱离支承面发生坠落。与防落梁拉索、链条等柔性连梁装置不同，挡块属于"被动阻挡"型构造——正常使用状态下与梁体之间保持设计间隙，不参与受力；当梁体位移超过间隙值时，挡块与梁体发生接触并提供约束反力，将位移限制在允许范围内。

在桥梁抗震体系中，挡块承担着"最后一道安全防线"的角色。桥梁抗震设计通常遵循多级设防的思路：在常遇地震（E1）作用下，结构保持弹性，支座和伸缩装

置正常工作；在设计地震（E2）作用下，允许结构局部进入塑性，但不发生严重损伤；在极罕遇地震作用下，即使主要构件发生损伤，也应通过构造措施防止落梁等灾难性破坏。挡块正是在最后一级设防中发挥关键作用——当其他抗震措施不足以控制位移时，挡块通过物理阻挡确保梁体不发生坠落。

挡块与其他防落梁装置之间存在协同互补关系。搭接长度（支承面有效长度）是防落梁的基础，提供了位移余量；挡块是限位措施，直接约束位移的上限；拉索或链条是连梁措施，在挡块失效或位移超出挡块约束范围时提供兜底保护。三者共同构成完整的防落梁体系，缺一不可。在实际工程中，应根据桥梁类型、跨径、烈度和重要性等级，合理组合使用这些措施，而不是依赖某单一构造。

需要特别指出的是，挡块的功能定位决定了其设计哲学与主体结构不同。主体结构的设计目标是在设计地震下保持功能或可修复，而挡块作为极端工况下的安全储备，其设计允许在极罕遇地震中发生破坏——只要在破坏前能够将位移限制在不发生落梁的范围内。这种"可牺牲"的设计理念使得挡块在某些情况下被用作"保险丝"构件，通过自身的损伤来保护更重要的下部结构。

二、工作原理与力学机制

防落梁挡块的工作过程可以分为三个阶段：正常使用阶段、间隙闭合阶段和碰撞受力阶段。在正常使用阶段，梁体在温度变化、混凝土收缩徐变、车辆制动力等作用下产生较小的位移，这些位移在设计间隙范围内，挡块与梁体之间不发生接触，挡块不受力。这一阶段的关键是间隙值的合理设定——间隙过小会限制梁体的正常变形，导致挡块在日常运营中频繁受力而产生损伤或疲劳；间隙过大则会削弱挡块的限位效果，使梁体在碰撞前已经积累了较大的位移和速度。

当外部荷载增大到使梁体位移超过间隙值时，进入间隙闭合阶段。此时梁体与挡块的接触面开始接触，碰撞过程随即发生。碰撞是一个复杂的瞬态力学过程，涉及接触刚度、材料弹塑性、应力波传播等多种物理现象。在工程分析中，通常采用简化的碰撞弹簧模型来模拟这一过程，将挡块与梁体之间的接触关系等效为具有一定刚度的弹簧，弹簧力随压缩量的增加而增大。

碰撞发生后，碰撞力通过挡块传递到下部结构。对于横向挡块，碰撞力从梁体侧面传递到挡块，再通过挡块与盖梁（或墩顶）的连接传递到桥墩；对于纵向挡块，碰撞力从梁端传递到挡块，再传递到墩台或相邻跨梁体。在这个传递路径中，挡块本身、挡块与下部结构的连接（预埋件、焊缝或螺栓）以及下部结构的局部承压区都可能成为薄弱环节，需要在设计中逐一验算。

碰撞力的大小取决于多个因素。梁体质量越大、碰撞前的速度越高，碰撞力越大；挡块和接触面的刚度越大，碰撞持续时间越短，峰值碰撞力越高；地震动的频谱特性和强度也会通过影响梁体位移响应而间接影响碰撞力。研究表明，合理设置缓冲层（如橡胶垫）可以延长碰撞持续时间、降低峰值碰撞力，从而减小对下部结构的冲击。

三、碰撞效应与能量耗散

碰撞效应是防落梁挡块工作机理中的核心问题。当梁体与挡块发生碰撞时，两者之间产生的碰撞力不仅影响挡块本身的承载力设计，还会反作用于梁体和下部结构，改变整个桥梁的地震响应。碰撞力过大会导致挡块破坏、梁体局部混凝土压溃或桥墩损伤，因此需要在设计中对碰撞力进行合理的估算和控制。

碰撞刚度是描述碰撞力学特性的关键参数。它反映了单位压缩量所产生的碰撞力，与挡块材料、接触面面积、构造形式以及梁体混凝土的局部刚度有关。钢制挡块的碰撞刚度通常大于混凝土挡块，因为钢材的弹性模量远高于混凝土。在数值分析中，碰撞刚度的取值对计算结果有显著影响，需要通过试验或精细化有限元分析来标定。

初始间隙是挡块设计中最重要的参数之一，其取值直接影响碰撞发生的时机和频率。间隙较小意味着碰撞较早发生，梁体在碰撞前的位移和速度较小，碰撞力相对较小，但挡块在地震中会更频繁地参与工作，可能产生累积损伤；间隙较大则碰撞较晚发生，梁体在碰撞前已经积累了较大的位移和速度，碰撞力较大，但挡块参与工作的次数较少。研究表明，对于横向混凝土挡块，初始间隙取 0.06 米左右时，可以在碰撞力和限位效果之间取得较好的平衡。

挡块的能量耗散机制与其材料和构造形式密切相关。刚性挡块主要通过弹性变形传递力，耗能能力有限，碰撞能量主要由结构自身的阻尼和塑性变形耗散。带橡胶缓冲层的挡块可以通过橡胶的粘弹性变形耗散部分碰撞能量，降低峰值力。可牺牲型挡块（如设计为剪切破坏的混凝土挡块或屈服型钢制挡块）则通过自身的塑性变形或破坏来耗散能量，在强震中发挥"保险丝"作用——挡块的损伤换取了下部结构的安全。

四、关键设计参数的力学意义

间隙值是挡块设计中最具双重性的参数。一方面，间隙必须足够大，以容纳梁体在温度变化、混凝土收缩徐变、制动力等正常使用荷载下的位移，避免挡块在日常运营中参与受力；另一方面，间隙又必须足够小，以确保在地震作用下挡块能够及时发挥限位作用，将梁体位移控制在不发生落梁的范围内。这两个要求之间存在内在矛盾，需要根据桥梁的具体情况（跨径、结构形式、温度范围、烈度等）进行权衡。

挡块的刚度与强度需要合理匹配。刚度决定了碰撞力随位移增长的速率，强度决定了挡块能够承受的最大碰撞力。如果刚度过大而强度不足，挡块会在碰撞时迅速达到极限承载力而发生脆性破坏，无法有效限位；如果刚度较小而强度富余，挡块虽然不会破坏，但可能产生较大的变形，限位效果不佳。理想的设计是使挡块在达到设计位移时刚好达到屈服或极限承载力，既能有效限位，又能通过塑性变形耗散能量。

挡块的高度决定了有效约束范围。挡块必须高于梁体底面一定高度，才能在梁体发生竖向位移（如支座失效、梁体转动）时仍然保持横向约束。如果挡块高度不足，梁体在碰撞过程中可能越过挡块顶部，导致限位失效。规范通常要求挡块顶面高出梁底不小于一定数值，具体取值与梁高、支座高度和设计位移有关。

挡块与梁体之间的接触面处理也影响其工作性能。接触面应平整、垂直，以保证碰撞力均匀传递。在钢制挡块的接触面上设置橡胶缓冲垫，可以降低碰撞刚度、延长碰撞持续时间、减小峰值碰撞力，同时还能避免钢材与混凝土直接接触产生的

局部压碎。缓冲垫的厚度和硬度需要根据设计碰撞力和允许位移来选择，过软则限位效果差，过硬则缓冲效果不明显。

第三章 分类与构造形式

一、按材料分类

防落梁挡块按主要承重材料可分为混凝土挡块、钢制挡块和组合挡块三大类，三者在力学性能、构造特点、施工方式和适用场景上各有侧重。

混凝土挡块是最早应用且最为常见的形式，通常与盖梁或墩台整体浇筑，也可以预制后安装。其优点是构造简单、造价低廉、与下部结构整体性好，能够承受较大的横向碰撞力；缺点是自重大、延性差、碰撞时刚度大，容易产生较大的冲击荷载，且损坏后修复困难。混凝土挡块的强度等级一般不低于 C30，高烈度区可采用 C40 或更高等级，内部配置加强钢筋以提高抗剪和抗弯能力。对于需要承受较大碰撞力的部位，还可以在挡块内设置型钢骨架，形成型钢混凝土组合挡块。

钢制挡块采用钢板焊接或铸钢制造，通过预埋件、螺栓或焊接与下部结构连接。其优点是强度高、延性好、自重轻、安装方便、损坏后易于更换，可以通过设计截面形状和尺寸来精确控制刚度和承载力；缺点是造价较高、需要防腐处理、与混凝土下部结构的连接节点是薄弱环节。钢制挡块的主材通常采用 Q235B 或 Q355B 钢板，重载或高烈度区可采用 Q420B 或更高强度钢材。表面防腐一般采用热浸镀锌（锌层厚度不小于 80 微米）或多元合金共渗加封闭层处理，以适应桥梁户外恶劣的腐蚀环境。

组合挡块结合了混凝土和钢材的优点，常见形式是在混凝土挡块的碰撞面设置钢板或橡胶面层，或者在钢制挡块内部填充混凝土以提高刚度和阻尼。组合挡块可以在保持混凝土挡块经济性的同时，通过钢面层提高碰撞面的局部承压能力，通过橡胶层降低碰撞刚度。另一种组合形式是双层挡块——内侧为刚度较小的缓冲挡块，外侧为刚度较大的刚性挡块，两级挡块协同工作，小位移时内侧挡块受力，大位移时外侧挡块参与，实现分级限位和耗能。

二、按受力方向分类

按限制位移的方向，防落梁挡块可分为横向挡块、纵向挡块和双向挡块。

横向挡块用于限制梁体的横向位移，是应用最广泛的挡块形式。横向挡块通常设置在盖梁两端、墩顶两侧或桥台两侧，与梁体侧面相对。对于简支梁桥，每跨梁的两端各设置一对横向挡块；对于连续梁桥，在每个墩顶设置横向挡块。横向挡块的设计需要考虑梁体在地震作用下的横向位移响应、碰撞力大小以及挡块与盖梁的连接强度。在高烈度区，为了提高横向限位的可靠性，有时采用双层挡块构造——内侧挡块和外侧挡块协同工作，即使内侧挡块破坏，外侧挡块仍能发挥限位作用。

纵向挡块用于限制梁体的纵向位移，通常设置在梁端与墩台之间、相邻跨梁端之间，或者在支座附近设置纵向限位构造。纵向挡块的受力机制与横向挡块类似，但纵向位移通常大于横向位移，且纵向碰撞可能涉及相邻跨梁体之间的相互作用，设计更为复杂。纵向挡块需要与伸缩装置的设计相协调——挡块的限位位移不能小于伸缩装置的最大伸缩量，否则会影响伸缩装置的正常工作。对于大跨径桥梁和连续梁桥，纵向防落梁有时采用拉索或链条替代挡块，因为拉索可以适应更大的纵向位移且具有更好的延性。

双向挡块同时限制横向和纵向位移，通常用于桥台处或特殊桥梁部位。双向挡块的构造比较复杂，需要在两个方向都提供足够的承载力和刚度，同时两个方向的受力可能相互影响。在实际工程中，双向挡块有时采用 L 形或 T 形截面，一个翼缘承担横向力，另一个翼缘承担纵向力。双向挡块的设计需要分别验算两个方向的承载力，并检查两个方向同时受力时的组合效应。

三、按功能特性分类

按功能特性，防落梁挡块可分为刚性挡块、缓冲挡块和可更换（保险丝型）挡块。

刚性挡块是最传统的形式，其设计目标是在设计碰撞力下保持弹性或仅发生微小变形，通过自身的刚度和强度直接限制梁体位移。刚性挡块的优点是构造简单、限位明确、日常维护少；缺点是碰撞时刚度大，产生的冲击荷载大，可能对梁体和

下部结构造成不利影响。刚性挡块适用于低烈度区、中小跨径桥梁以及对位移控制要求严格的场合。

缓冲挡块在刚性挡块的基础上增加了缓冲层，通常是在碰撞面设置橡胶垫、聚氨酯块或其他粘弹性材料。缓冲层的作用是延长碰撞持续时间、降低碰撞刚度、减小峰值碰撞力，同时耗散部分碰撞能量。缓冲挡块的优点是碰撞力小、对结构冲击小、耗能能力强；缺点是缓冲层存在老化问题，需要定期检查和更换，且缓冲层的力学性能受温度影响较大。缓冲挡块适用于高烈度区、城市桥梁、对结构损伤控制要求高的场合。

可更换挡块也称为保险丝型挡块，其设计理念是在强震中通过挡块自身的塑性变形或破坏来耗散能量、保护下部结构，震后可以快速更换受损挡块以恢复功能。可更换挡块通常采用钢制，通过设计薄弱截面（如剪切槽、缩颈）来控制破坏模式和承载力，确保挡块在预期的碰撞力下发生可预测的屈服或剪切破坏。可更换挡块的优点是能够有效保护下部结构、震后修复快、抗震性能可控；缺点是设计复杂度高、需要精确计算承载力和变形能力、日常需要储备备件。可更换挡块适用于高烈度区、重要桥梁、抗震韧性要求高的场合，是当前挡块技术发展的重要方向之一。

四、典型构造形式与适用场景

盖梁端挡块是公路桥梁中最常见的横向挡块形式，设置在盖梁的两端，与主梁侧面相对。盖梁端挡块通常与盖梁整体浇筑，构造简单，与下部结构整体性好。对于预制小箱梁或 T 梁桥，盖梁端挡块在盖梁施工时预留，梁体架设后形成横向约束。盖梁端挡块的高度一般高出梁底 150～300 毫米，厚度根据碰撞力计算确定，一般不小于 200 毫米。挡块与梁体侧面的间隙通常为 20～50 毫米，具体取值根据温度变形和地震位移计算确定。

墩顶挡块设置在桥墩顶部，用于连续梁桥或桥墩较宽的场合。墩顶挡块可以是混凝土现浇，也可以是钢制装配式。钢制装配式墩顶挡块的优点是安装速度快、损坏后易于更换，特别适用于预制拼装桥梁和高架桥梁。装配式挡块通过预埋螺栓与墩顶连接，安装时调整位置和间隙后拧紧固定。墩顶挡块的设计需要特别注意连接

螺栓的抗剪承载力和预埋件的锚固强度，因为这些节点往往是挡块体系中的薄弱环节。

桥台挡块设置在桥台两侧或台帽前端，同时限制梁体的横向和纵向位移。桥台处的挡块构造比较特殊，因为桥台本身刚度大，碰撞力直接传递到桥台和路基，需要考虑挡块与桥台背墙、侧墙的协调。桥台纵向挡块通常与背墙结合设计，在梁端与背墙之间设置缓冲材料或预留间隙。桥台横向挡块设置在侧墙内侧，限制梁体的横向位移。桥台挡块的设计还需要考虑台后填土沉降、桥台位移等因素对间隙的影响。

特殊桥梁用挡块包括曲线桥挡块、斜桥挡块、大跨径桥梁挡块等。曲线桥在地震作用下可能产生复杂的空间位移，挡块需要同时考虑径向和切向的限位，有时需要设置多个方向的挡块。斜桥的挡块需要考虑斜交角对碰撞力方向的影响，挡块的布置和受力分析比正交桥复杂。大跨径桥梁的挡块需要适应较大的位移量，有时采用多级挡块或挡块与拉索组合的形式，以确保在各种工况下都能有效防止落梁。

第四章 设计规范与计算方法

一、国内外主要规范体系

防落梁挡块的设计依据主要来自桥梁抗震设计规范和相关产品标准。不同国家和地区的规范在设防目标、设计方法和构造要求上存在差异，了解这些差异有助于工程师在具体项目中选择合适的设计依据。

中国公路桥梁抗震设计的主要依据是《公路桥梁抗震设计规范》（JTG/T 2231-01-2020）。该规范将桥梁抗震设防分为 A 类、B 类、C 类和 D 类四个类别，分别对应不同的重要性等级和设防标准。规范明确要求在 E2 地震作用下，桥梁应满足"不发生落梁"的设防目标，并对防落梁措施提出了具体要求。规范规定，对于地震基本烈度 7 度及以上地区的桥梁，应设置横向限位装置；对于简支梁桥，梁端支承长度应满足规范要求，必要时设置纵向防落梁装置。规范还给出了挡块与梁体之间间隙的取值原则、挡块的最小尺寸要求以及连接构造的规定。

在行业标准层面，《公路桥梁防落梁装置》（JT/T 930-2014）对防落梁装置的产品分类、技术要求、试验方法和检验规则做出了规定，是防落梁挡块产品制造和验收的重要依据。该标准将防落梁装置分为刚性挡块、缓冲挡块和防落梁链条等类型，规定了各类产品的材料要求、力学性能指标和防腐要求。此外，部分地方标准和团体标准也对防落梁挡块的设计和应用做出了补充规定，如内蒙古自治区的《公路梁桥抗震设计规范》（DB15/T 1659-2019）对高烈度区挡块的设置提出了更具体的要求。

铁路系统的防落梁设计主要依据《铁路工程抗震设计规范》（GB 50111）和相关铁路桥梁标准。铁路桥梁对行车安全要求高，防落梁措施更为严格。《铁路桥梁减震榫及榫形防落梁装置》（Q/CR 709-2019）规定了铁路桥梁用减震榫和榫形防落梁装置的技术要求，这类装置结合了限位和耗能功能，在高速铁路桥梁中得到应用。

国外规范中，美国 AASHTO《桥梁抗震设计指南》（SGS）和 AASHTO LRFD 桥梁设计规范对防落梁措施有详细规定。AASHTO 规范强调采用能力保护设计方法，要求防落梁装置的承载力大于下部结构的预期承载力，以确保在强震中下部结构先于防落梁装置发生延性破坏，或者两者按设计顺序依次发挥作用。AASHTO 还规定了最小支承长度的计算公式，该公式考虑了跨径、墩高、场地条件和地震位移等因素。欧洲规范 Eurocode 8（EN 1998-2）对桥梁抗震设计中的防落梁措施也有相应规定，强调通过能力设计和延性设计来确保结构在地震中的安全性。日本《道路桥示方书》在 1995 年阪神地震后大幅修订了抗震设计条款，对防落梁措施提出了严格要求，包括增大支承长度、设置挡块和连梁装置等。

二、关键设计参数选取

初始间隙是挡块设计中最关键的参数，其取值需要综合考虑正常使用变形和地震位移两个方面。在正常使用状态下，梁体会因温度变化、混凝土收缩徐变、制动力等产生纵向和横向位移，挡块间隙必须大于这些正常位移，以避免挡块在日常运营中参与受力。温度变形是最主要的正常使用位移，其大小与桥梁跨径、结构形

式、温度变化范围和梁体材料有关。对于混凝土梁，温度变形一般按线膨胀系数 1×10^{-5}/℃计算；对于钢梁，线膨胀系数约为 1.2×10^{-5}/℃。

在地震作用下，梁体与墩台之间会产生相对位移，挡块间隙需要与这个位移相匹配。如果间隙过小，挡块会在较小的地震位移下就参与工作，频繁碰撞可能导致挡块损伤；如果间隙过大，挡块参与工作时梁体已经积累了较大的位移和速度，碰撞力大，且可能在挡块发挥作用前梁体已经接近落梁临界状态。研究和工程实践表明，横向挡块的初始间隙一般取 20～50 毫米，对于大跨径或高墩桥梁可适当增大。中国公路桥梁抗震规范要求挡块间隙应满足正常使用变形要求，同时在 E2 地震作用下挡块应能发挥限位作用。

挡块的尺寸包括高度、厚度（顺桥向或横桥向宽度）和长度。挡块高度应确保在梁体发生竖向位移时仍然保持横向约束，一般要求挡块顶面高出梁底不小于 150 毫米，高烈度区不小于 200 毫米。挡块厚度由承载力计算确定，混凝土挡块的厚度一般不小于 200 毫米，钢制挡块的板厚根据计算确定，一般不小于 16 毫米。挡块长度（沿梁体纵向的尺寸）影响碰撞接触面积和局部承压，一般不小于 300 毫米。对于混凝土挡块，研究建议挡块高度可取 0.55～0.65 米，厚度可取 0.48～0.58 米，具体取值应根据碰撞力计算和构造要求确定。

挡块承载力的确定遵循能力保护设计原则。挡块的设计承载力应大于在设计地震作用下可能产生的碰撞力，同时应与下部结构的承载力相匹配。如果挡块作为能力保护构件，其承载力应高于下部结构的预期承载力，确保下部结构先发生延性破坏；如果挡块作为保险丝构件，其承载力应低于下部结构的承载力，确保挡块先发生破坏以保护下部结构。具体采用哪种设计策略，应根据桥梁的抗震设防目标、结构形式和重要性等级确定。

三、承载力计算方法

混凝土挡块的承载力主要由抗剪承载力控制，可能的破坏模式包括斜截面剪切破坏和平截面剪切破坏。斜截面剪切破坏是指挡块在碰撞力作用下沿斜截面发生剪切错动，通常发生在挡块高度较小、碰撞力作用点较高的情况；平截面剪切破坏是

指挡块沿与盖梁交接的水平面发生剪切破坏，通常发生在挡块高度较大、碰撞力作用点较低的情况。

对于混凝土挡块的抗剪承载力，研究者基于拉压杆模型提出了计算公式。该方法将挡块内的应力流等效为斜向压杆和水平拉杆组成的桁架体系，通过平衡条件推导抗剪承载力。计算公式通常考虑混凝土抗压强度、挡块截面尺寸、配筋率和碰撞力作用点高度等因素。在工程设计中，也可以采用简化的剪切承载力公式，将挡块视为悬臂构件，验算其斜截面抗剪承载力和支座处的剪切承载力。对于配置了水平钢筋和竖向钢筋的混凝土挡块，抗剪承载力由混凝土项和钢筋项共同组成。

钢制挡块的承载力计算需要分别验算强度、稳定和连接节点。对于焊接钢板挡块，应验算危险截面的弯曲正应力和剪应力，确保不超过钢材的设计强度；对于受压翼缘和腹板，应验算局部稳定和整体稳定，防止发生屈曲破坏。钢制挡块的承载力还受到焊缝强度的控制，角焊缝的计算长度和焊脚尺寸应满足承载力要求。对于螺栓连接的装配式挡块，应验算螺栓的抗剪承载力和承压承载力，以及螺栓群在偏心荷载下的受力分配。

连接节点是挡块体系中的关键薄弱环节，需要重点验算。对于混凝土挡块，连接节点主要是挡块与盖梁的交接面，需要验算该截面的抗剪承载力和抗弯承载力，确保挡块不会从盖梁上整体剪切脱落。对于钢制挡块，连接节点包括预埋件与混凝土的锚固、挡块与预埋件的焊接或螺栓连接。预埋件的锚固承载力应验算锚筋的抗拉、抗剪承载力以及混凝土的局部承压和锥体破坏。锚筋的锚固深度一般不小于30倍锚筋直径，以确保充分发挥锚筋的强度。

四、碰撞分析与性能设计

碰撞力的计算是挡块设计中的核心问题。在初步设计阶段，可以采用简化方法估算碰撞力。一种常用的简化方法是基于动量守恒和能量守恒，假设梁体在碰撞前的速度为 v，碰撞后梁体与挡块共同运动或反弹，通过动量定理计算平均碰撞力。另一种简化方法是将碰撞等效为弹簧-质量系统，根据碰撞刚度和最大压缩量计算

碰撞力。这些简化方法可以快速估算碰撞力的量级，但精度有限，适用于方案比选和初步设计。

对于重要桥梁或高烈度区桥梁，应采用非线性时程分析方法进行碰撞分析。该方法建立桥梁的有限元模型，将挡块与梁体之间的接触关系模拟为非线性碰撞弹簧，输入地震动记录进行时程分析，得到碰撞力的时程曲线和最大值。非线性时程分析可以考虑碰撞刚度的非线性、挡块的塑性变形、结构的几何非线性和材料非线性等因素，计算精度较高。在分析中，应选择多条符合场地条件的地震动记录，取计算结果的平均值或包络值作为设计依据。

基于性能的挡块设计是近年来发展的设计理念，其核心思想是根据桥梁的抗震性能目标来确定挡块的设计参数，而不是简单地按承载力设计。基于性能的设计通常设定多个性能水平，如"立即使用"、"可修复"和"生命安全"，对应不同的地震动强度和结构损伤状态。挡块的设计应确保在各个性能水平下都能满足预期的功能要求——在小震下挡块不参与工作或仅发生弹性变形，在中震下挡块发生屈服但不破坏，在大震下挡块可以发生破坏但不发生落梁。

基于性能的设计还需要考虑挡块的可更换性和震后恢复能力。对于重要桥梁，挡块应设计为可快速更换的形式，震后能够在短时间内恢复交通。这要求挡块与下部结构的连接采用螺栓连接等可拆卸方式，挡块的尺寸和重量适合吊装更换，且备件易于获取。可更换挡块的设计还需要设置明显的损伤标识，便于震后快速判断挡块是否需要更换。

五、设计流程与工程案例

防落梁挡块的设计一般遵循以下流程：首先根据桥梁的抗震设防类别、烈度和结构形式，确定是否需要设置挡块以及挡块的类型；其次计算梁体在正常使用状态下的位移，确定挡块的最小间隙；然后进行地震作用下的结构分析，得到梁体与墩台之间的相对位移和碰撞力；接着根据碰撞力和构造要求设计挡块的尺寸、配筋和连接；最后验算挡块的承载力、变形和稳定性，确保满足设计要求。

在设计过程中，常见的问题包括间隙取值不合理、挡块与伸缩装置不协调、连接节点薄弱、防腐处理不到位等。间隙取值过小会导致挡块在温度变形下频繁受力，加速老化和损伤；间隙过大则削弱限位效果。挡块与伸缩装置的协调是纵向挡块设计中的重点，挡块的限位位移必须大于伸缩装置的最大伸缩量，否则会影响伸缩装置的正常工作。连接节点是挡块体系中最容易失效的部位，设计时应留有足够的承载力裕度，并采取可靠的锚固和连接构造。

以一座位于 8 度烈度区的 30 米跨径预制小箱梁桥为例，横向挡块的设计过程如下：该桥为双车道公路桥，单跨由 4 片小箱梁组成，桥墩为双柱式墩，盖梁宽度 1.6 米。根据规范要求，8 度区必须设置横向挡块，采用混凝土刚性挡块，与盖梁整体浇筑。正常使用状态下，梁体横向位移主要由温度梯度和制动力引起，计算值约为 10 毫米，考虑施工偏差和安全裕度，挡块间隙取 30 毫米。地震作用下，通过非线性时程分析得到梁体与盖梁之间的最大横向相对位移约为 80 毫米，扣除 30 毫米间隙后，挡块的最大压缩量约为 50 毫米。根据碰撞刚度模型计算得到最大碰撞力约为 1200 千牛。挡块尺寸取高度 600 毫米、厚度 500 毫米、长度 400 毫米，混凝土强度等级 C40，配置水平钢筋和竖向钢筋。经验算，挡块的抗剪承载力和抗弯承载力均满足要求，挡块与盖梁交接面的剪切承载力也满足要求。

第五章 材料与制造工艺

一、结构钢材料标准

钢制防落梁挡块的主材通常采用碳素结构钢或低合金高强度结构钢，具体牌号根据设计承载力和使用环境确定。Q235B 是最常用的碳素结构钢，屈服强度不低于 235 兆帕，抗拉强度 370～500 兆帕，具有良好的塑性、韧性和焊接性能，适用于常规静载工况和中低烈度区的挡块。Q355B（原 Q345B）是低合金高强度结构钢，屈服强度不低于 355 兆帕，抗拉强度 470～630 兆帕，强度高于 Q235B，同时保持良好的焊接性能和低温韧性，适用于重载、高寒或高烈度区的挡块。对于承载力要求更高的特殊桥梁，可采用 Q420B 或 Q460 等更高强度的钢材，但高强度钢材的焊接难度较大，需要采取相应的焊接工艺措施。

钢材的质量等级根据使用环境的温度条件选择。A 级钢不保证冲击韧性，B 级钢保证 20℃冲击韧性，C 级钢保证 0℃冲击韧性，D 级钢保证-20℃冲击韧性，E 级钢保证-40℃冲击韧性。对于寒冷地区的桥梁挡块，应选用 C 级及以上质量等级的钢材，以确保低温下的冲击韧性，防止发生脆性断裂。钢材的化学成分和力学性能应符合《碳素结构钢》（GB/T 700）和《低合金高强度结构钢》（GB/T 1591）的规定，进场时应附有质量证明书，并按规定进行复验。

锚筋和连接件是钢制挡块的重要组成部分，其材料性能直接影响挡块的锚固可靠性。预埋锚筋通常采用 HRB400E 抗震钢筋，屈服强度不低于 400 兆帕，抗拉强度不低于 540 兆帕，且具有良好的延性（断后伸长率不小于 16%）和抗震性能（强屈比不小于 1.25，屈强比不大于 1.30）。对于承受较大拉力的锚筋，可采用 HRB500E 高强钢筋。连接螺栓通常采用 10.9 级高强度螺栓，材质为 20MnTiB 或 35VB，抗拉强度不低于 1000 兆帕，屈服强度不低于 900 兆帕。高强度螺栓的性能等级和材料应符合《钢结构用高强度大六角头螺栓》（GB/T 1228）的规定。

材料选用应遵循"性能适配、经济合理、耐久可靠"的原则。对于常规公路桥梁的横向挡块，Q235B 钢板配合 HRB400E 锚筋通常能够满足要求；对于高烈度区、大跨径或重载桥梁，应采用 Q355B 或更高强度钢材，并适当提高锚筋规格；对于海洋环境或腐蚀严重地区的桥梁，除了选用耐候钢或不锈钢外，还应加强防腐处理。材料选用时还应考虑焊接性能和加工性能，避免选用焊接性差的钢种导致制造困难。

二、混凝土材料要求

混凝土挡块的强度等级一般不低于 C30，高烈度区或承受较大碰撞力的挡块可采用 C40 或 C50。混凝土的抗压强度是挡块承载力的基础，同时还应关注混凝土的抗拉强度、抗剪强度和弹性模量等力学性能。C30 混凝土的立方体抗压强度标准值为 30 兆帕，轴心抗压强度设计值为 14.3 兆帕，轴心抗拉强度设计值为 1.43 兆帕；C40 混凝土的轴心抗压强度设计值为 19.1 兆帕，轴心抗拉强度设计值为 1.71 兆帕。在挡块设计中，混凝土的抗拉强度通常较低，挡块的受拉区主要依靠钢筋承担，混凝土主要承担压力和剪力。

挡块用钢筋应符合《钢筋混凝土用钢》（GB/T 1499）的规定，纵向受力钢筋采用 HRB400E 或 HRB500E 抗震钢筋，箍筋采用 HPB300 或 HRB400 钢筋。钢筋的锚固长度和搭接长度应符合《混凝土结构设计规范》（GB 50010）的规定，受拉钢筋的基本锚固长度与钢筋直径、钢筋外形、混凝土强度等级和抗震等级有关。对于挡块与盖梁连接的预埋钢筋，锚固长度不应小于 30 倍钢筋直径，以确保钢筋与混凝土之间的粘结力充分发挥。

混凝土的耐久性是挡块长期性能的重要保障。桥梁挡块处于户外环境，经受温度变化、雨水侵蚀、冻融循环和除冰盐等不利因素的作用，混凝土应具有良好的抗渗性、抗冻性和抗氯离子渗透能力。对于严寒地区，混凝土的抗冻等级不应低于 F200；对于海洋环境或使用除冰盐的地区，混凝土的氯离子渗透系数应满足相应要求。混凝土中应掺入适量的矿物掺合料（如粉煤灰、矿渣粉、硅灰）和高效减水剂，以改善混凝土的工作性能和耐久性。混凝土的最大水胶比、最小胶凝材料用量和保护层厚度应符合《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362）的规定。

三、防腐处理工艺

钢制挡块的防腐处理是确保其耐久性的关键环节。桥梁挡块处于户外腐蚀环境，钢材如果不做防腐处理，会在数年内发生严重锈蚀，导致截面削弱和承载力下降。常用的防腐处理工艺包括热浸镀锌、多元合金共渗和涂层防腐三大类。

热浸镀锌是将除锈后的钢件浸入熔融的锌液中，在钢件表面形成锌-铁合金层和纯锌层的防腐工艺。热浸镀锌的优点是镀层厚、附着力强、耐腐蚀寿命长、成本适中，是钢制挡块最常用的防腐方式。热浸镀锌的锌层厚度一般不低于 80 微米，对于腐蚀严重的环境可提高至 100 微米以上。热浸镀锌的质量应符合《金属覆盖层 钢铁制件热浸镀锌层 技术要求及试验方法》（GB/T 13912）的规定，检验项目包括外观、镀层厚度、附着力和密封性。热浸镀锌后应进行钝化处理，以提高镀层的耐蚀性和外观质量。

多元合金共渗是一种较新的表面处理工艺，将钢件与锌粉、铝粉、稀土元素等混合粉末一起放入密封炉中，在一定温度下加热使金属元素扩散渗入钢件表面，形成锌-铝-铁多元合金渗层。多元合金共渗的优点是渗层均匀、无氢脆、耐磨性好、耐蚀性优于普通热浸镀锌，特别适用于形状复杂、有螺纹或小孔的构件。多元合金共渗的渗层厚度一般为 30～60 微米，表面硬度较高，与基体结合牢固。多元合金共渗后通常还需要涂覆封闭层，以进一步提高耐蚀性和装饰性。

涂层防腐是在钢件表面涂覆有机或无机涂层来隔绝腐蚀介质的防腐方式。常用的涂层体系包括环氧富锌底漆+环氧云铁中间漆+聚氨酯面漆的三层体系，以及热喷涂锌铝+封闭涂层的体系。涂层防腐的优点是涂层颜色可选择、修复方便、适用于大型构件现场涂装；缺点是涂层寿命相对较短，需要定期维护重涂。涂层防腐的施工应符合《公路桥梁钢结构防腐涂装技术规程》（JTG/T 72）的规定，表面处理等级、涂层厚度和附着力应满足设计要求。

防腐质量检验包括外观检查、厚度检测、附着力测试和耐蚀性试验。外观检查要求涂层均匀、无漏涂、无气泡、无裂纹和无剥落。厚度检测采用磁性测厚仪，每平方米至少测量 5 个点，取平均值，最低值不低于设计厚度的 85%。附着力测试采用划格法或拉开法，涂层附着力应不低于规定值。耐蚀性试验可采用中性盐雾试验（NSS），试验时间根据防腐等级确定，一般不低于 480 小时，试验后涂层不应出现红锈。

四、制造工艺流程与质量控制

钢制挡块的制造工艺流程包括材料检验、下料、坡口加工、组装定位、焊接、矫正、防腐处理和成品检验。材料检验是第一道工序，应对钢材的牌号、规格、外观质量和质量证明书进行核对，必要时进行化学成分和力学性能复验。下料采用数控火焰切割或等离子切割，切割面应平整，无裂纹和大于 1 毫米的缺棱，切割公差应符合规范要求。坡口加工采用坡口机或碳弧气刨，坡口形式和尺寸应符合焊接工艺要求。

组装定位在专用胎架上进行，确保各部件的位置、角度和间隙符合设计要求。组装时应预留焊接收缩余量，防止焊接后尺寸超差。定位焊采用与正式焊接相同的焊条或焊丝，定位焊缝的长度和间距应符合工艺要求，定位焊不得有裂纹、气孔和夹渣等缺陷。

焊接是钢制挡块制造的关键工序，直接影响挡块的力学性能和耐久性。焊接应按照经评定合格的焊接工艺规程（WPS）进行，焊工应持有相应资格证书。常用的焊接方法包括手工电弧焊、二氧化碳气体保护焊和埋弧焊。焊接材料应与母材匹配，Q235B 钢采用 E43 系列焊条，Q355B 钢采用 E50 系列焊条。焊接过程中应控制焊接电流、电压、焊接速度和层间温度，多层多道焊时应逐层清理焊渣。焊接完成后应进行外观检查和无损检测，重要焊缝应进行超声波探伤（UT）或磁粉探伤（MT），探伤比例和合格等级应符合设计要求。

焊接后应进行矫正，消除焊接变形。矫正可采用机械矫正或火焰矫正，火焰矫正的加热温度应控制在 600～800℃，不得超过 900℃，矫正后应自然冷却，不得用水急冷。矫正后的构件尺寸偏差应符合《钢结构工程施工质量验收标准》（GB 50205）的规定。

混凝土挡块的预制工艺流程包括模板制作、钢筋绑扎、预埋件安装、混凝土浇筑、养护和脱模。模板采用钢模板，应具有足够的刚度和稳定性，模板表面应平整光滑，接缝严密不漏浆。钢筋绑扎应确保钢筋的规格、数量、间距和保护层厚度符合设计要求，钢筋交叉点应全部绑扎牢固。预埋件（如锚板、锚筋）的位置应准确，固定牢固，防止浇筑混凝土时移位。

混凝土浇筑应连续进行，采用插入式振捣器振捣密实，不得漏振或过振。浇筑时应注意观察预埋件和模板的状态，发现移位或变形应及时处理。混凝土浇筑完成后应及时养护，养护时间不少于 7 天，对于掺加缓凝剂或抗渗要求高的混凝土不少于 14 天。养护期间应保持混凝土表面湿润，防止发生干缩裂缝。混凝土强度达到设计强度的 75%以上方可脱模，脱模时应注意保护混凝土边角，不得磕碰损坏。

预埋件是挡块与下部结构连接的关键部件，其制造质量直接影响连接可靠性。预埋件通常由锚板和锚筋焊接组成，锚板采用钢板切割加工，锚筋采用钢筋切断后弯制。锚筋与锚板的焊接采用穿孔塞焊或角焊缝，焊接质量应符合设计要求。预埋件制造完成后应进行防腐处理，防腐工艺与挡块本体一致。预埋件的尺寸偏差、锚筋位置和焊接质量应进行检验，合格后方可使用。

制造过程的质量控制应建立从原材料到成品的全过程质量保证体系。每道工序完成后应进行自检和互检，关键工序应进行专检，合格后方可进入下一道工序。制造厂家应保存完整的质量记录，包括材料质量证明书、焊接工艺评定报告、焊工资格证、无损检测报告、防腐检测报告和成品检验报告，以备工程验收和追溯。

第六章 施工安装技术

一、施工准备与测量放线

防落梁挡块的施工安装虽然属于桥梁工程中的附属设施工序，但其安装质量直接影响挡块功能的发挥，必须给予足够重视。施工准备阶段应完成技术准备、材料准备和机具准备三项工作。技术准备包括熟悉设计图纸和规范要求，编制施工方案和作业指导书，对施工人员进行技术交底和安全交底。材料准备包括挡块成品、预埋件、连接螺栓、缓冲垫、焊接材料和防腐修补材料的进场验收，核对产品的规格、数量和质量证明书，对关键材料进行抽样复验。机具准备包括吊装设备（汽车吊或履带吊）、测量仪器（全站仪、水准仪、游标卡尺、塞尺）、焊接设备（电焊机、气保焊机）、扭矩扳手和切割打磨工具等，确保机具性能良好、计量器具在检定有效期内。

测量放线是挡块安装的第一道关键工序，其精度直接影响挡块的位置和间隙。测量放线应在梁体架设完成、支座位置确认后进行。首先根据设计图纸计算挡块的设计坐标和标高，然后使用全站仪在墩顶或盖梁上放出挡块的中心线和边线，用红漆做出明显标记。对于横向挡块，应同时放出左右两侧挡块的位置，确保两侧对称。标高控制采用水准仪，根据墩顶设计标高和挡块高度计算挡块顶面和底面的标

高，在墩柱或盖梁侧面做出标高标记。测量放线的允许偏差应符合规范要求，平面位置偏差不大于 5 毫米，标高偏差不大于 3 毫米。

测量放线完成后，应进行复核检查，确认挡块位置与梁体侧面的相对关系正确，间隙值在设计范围内。如果发现梁体实际位置与设计位置偏差较大，导致一侧间隙过小而另一侧间隙过大，应及时与设计单位沟通，确定调整方案。常见的调整方法包括适当移动挡块位置、在挡块与预埋件之间加垫钢板调整，或者在梁体侧面对称调整。调整方案应确保两侧间隙均匀，且不小于设计最小间隙。

施工技术交底应将挡块安装的技术要求、质量标准、安全注意事项和成品保护要求向施工班组详细说明。交底内容包括挡块的类型和规格、安装位置和方向、间隙控制要求、螺栓拧紧力矩、焊接工艺要求、防腐层保护和修补方法、验收标准和常见缺陷防治措施。交底应形成书面记录，由交底人和被交底人签字确认。

二、预埋件安装与定位

预埋件是挡块与下部结构连接的关键部件，其安装质量直接影响挡块的连接可靠性。预埋件分为梁体预埋件和墩台预埋件两类，分别在梁体预制（或现浇）和墩台施工时安装。

梁体预埋件通常设置在梁体端部侧面或梁底，用于与纵向挡块或横向挡块连接。在梁体预制时，应根据设计图纸将预埋件固定在模板内侧，确保位置准确。预埋件的锚筋应与梁体主筋绑扎或焊接固定，防止浇筑混凝土时移位。预埋件的锚板表面应与模板内表面紧密贴合，确保浇筑后锚板表面与混凝土表面齐平。对于需要在梁体侧面安装的预埋件，应注意锚板的垂直度，偏差不大于 2 毫米/米。混凝土浇筑时应避免振捣器直接触碰预埋件，防止预埋件移位或锚筋变形。

墩台预埋件设置在盖梁顶面、墩顶或桥台侧面，用于与横向挡块或纵向挡块连接。墩台预埋件的安装在盖梁或墩台钢筋绑扎完成后、模板封闭前进行。预埋件的位置应根据测量放线标记确定，锚筋与墩台主筋焊接或绑扎固定。预埋件的锚板顶面标高应与设计标高一致，偏差不大于 3 毫米。对于需要与挡块螺栓连接的预埋

件，锚板上的螺栓孔位置应准确，孔位偏差不大于 2 毫米。预埋件安装完成后应进行隐蔽工程验收，合格后方可封闭模板和浇筑混凝土。

预埋件固定后应采取保护措施，防止在后续施工中被损坏或污染。锚板表面应涂抹脱模剂或粘贴保护膜，防止混凝土浆污染锚板表面影响后续焊接或螺栓连接。螺栓孔应采用棉纱或塑料塞封堵，防止混凝土浆进入孔内。在混凝土浇筑和养护期间，应避免重物撞击预埋件，发现移位或损坏应及时修复。

预埋件的安装质量应在混凝土浇筑前和拆模后分别进行检查。浇筑前检查预埋件的规格、数量、位置、标高、锚固长度和固定情况；拆模后检查预埋件的外露情况、表面平整度和位置偏差。预埋件的位置偏差应符合规范要求，锚板中心位置偏差不大于 10 毫米，标高偏差不大于 5 毫米，锚板表面平整度偏差不大于 3 毫米。对于偏差超标的预埋件，应制定处理方案，经设计单位同意后进行处理，不得擅自切割或焊接修改。

三、挡块吊装与固定

挡块吊装是安装过程中的重要环节，应根据挡块的重量和安装位置选择合适的吊装设备。钢制挡块的重量一般在几十公斤到几百公斤之间，小型挡块可采用人工配合手拉葫芦安装，大型挡块应采用汽车吊或履带吊吊装。混凝土预制挡块重量较大，通常采用吊车吊装。吊装前应检查吊具和索具的安全性，钢丝绳的安全系数不小于 6，卡环的额定荷载应大于吊重。吊装时应设置溜绳，防止挡块在空中旋转和摆动，避免碰撞梁体和墩台。

挡块就位时应缓慢操作，将挡块吊至安装位置上方约 20 厘米处暂停，调整挡块的方向和角度，使其与预埋件的螺栓孔或焊接位置对齐，然后缓慢下落就位。对于螺栓连接的装配式挡块，应先穿入定位螺栓，将挡块初步固定，然后调整挡块的位置、标高和垂直度，确认无误后穿入全部螺栓并按规定力矩拧紧。对于焊接固定的挡块，就位后应先进行定位焊，将挡块与预埋件临时固定，调整位置和间隙后进行正式焊接。

挡块的调整包括平面位置调整、标高调整和垂直度调整。平面位置调整通过千斤顶或撬棍微移挡块，使其中心线与设计位置对齐；标高调整通过在挡块底部加垫钢板来实现，垫板的数量不宜超过 3 层，总厚度不大于 20 毫米，垫板应与挡块和预埋件焊接固定；垂直度调整通过在挡块侧面加垫或调整螺栓松紧来实现，垂直度偏差不大于 3 毫米/米。调整过程中应随时测量间隙值，确保间隙符合设计要求。

螺栓连接的拧紧应采用扭矩扳手，按设计规定的力矩进行。10.9 级高强度螺栓的拧紧分为初拧和终拧两步，初拧力矩为终拧力矩的 50%，初拧后检查挡块位置和间隙，确认无误后进行终拧。终拧应按从中间向四周的顺序对称进行，防止挡块变形。螺栓拧紧后应在螺母和螺杆上划线标记，便于检查是否松动。螺栓的螺纹有效结合长度不小于 1.2 倍螺栓直径，外露丝扣不少于 2 扣。

焊接固定的挡块应按照焊接工艺规程进行焊接。焊接前应清理焊接区域的铁锈、油污和水分，露出金属光泽。定位焊的焊缝长度不小于 30 毫米，间距不大于 300 毫米。正式焊接采用多层多道焊，每层焊渣应清理干净后再焊下一层。焊接完成后应清理焊渣和飞溅，进行外观检查，焊缝表面不得有裂纹、气孔、夹渣和未焊满等缺陷。焊接区域的防腐层在焊接完成后应进行修补，修补范围超出焊接区域边缘不少于 50 毫米，修补涂层的厚度和性能应与原涂层一致。

四、间隙控制与调整

间隙控制是挡块安装质量的核心指标，直接影响挡块的工作性能。间隙是指挡块与梁体侧面（或端面）之间的水平距离，包括横向间隙和纵向间隙。间隙的测量应在挡块固定完成后、梁体处于自由状态下进行，测量时应选择梁体的常温状态，避免在极端高温或低温下测量导致误差。

间隙测量采用游标卡尺或钢直尺，在挡块与梁体接触面的上、中、下三个位置分别测量，取平均值作为该侧的间隙值。对于横向挡块，应同时测量梁体左右两侧的间隙，两侧间隙之差不大于 5 毫米。间隙的允许偏差应符合设计要求，一般为设计值的±5 毫米。如果设计未明确规定，横向间隙可控制在 20～50 毫米范围内，纵向间隙根据伸缩量确定。

间隙调整应根据偏差的大小和方向采取不同的措施。当间隙偏差在 5～20 毫米范围内时，可通过在挡块与预埋件之间加焊热浸锌钢垫板来调整，垫板厚度等于偏差值，垫板面积不小于挡块底面积的 70%，垫板与挡块和预埋件四周焊接固定。当间隙偏差在 20～50 毫米范围内时，可在挡块与梁体之间加装聚氨酯缓冲垫块，缓冲垫块的厚度等于需要调整的间隙值，缓冲垫块采用结构胶粘贴或螺栓固定在挡块接触面上。当间隙偏差超过 50 毫米时，说明梁体位置偏差过大或挡块位置错误，应重新定位挡块或增设副挡块，严禁用砂浆填充间隙或直接在梁体上焊接挡块。

缓冲层的安装是间隙控制的重要组成部分。对于带橡胶缓冲垫的挡块，缓冲垫应在挡块固定完成后安装，缓冲垫的尺寸与挡块接触面匹配，厚度根据设计要求确定。缓冲垫采用高强度结构胶粘贴在挡块的接触面上，粘贴前应清理接触面，确保干燥、清洁、无油污。粘贴后应用夹具加压固定，待结构胶完全固化后拆除夹具。缓冲垫安装后应检查粘贴牢固性，不得有空鼓、翘起和脱落现象。

五、施工质量验收

挡块安装完成后应进行施工质量验收，验收内容包括外观检查、尺寸偏差检查、连接质量检查和间隙检查。外观检查要求挡块表面无裂缝、蜂窝、麻面和破损，钢构件无明显变形和锈蚀，防腐层完整无损伤，焊缝外观质量合格，螺栓齐全无松动。尺寸偏差检查包括挡块的平面位置、标高、垂直度和外形尺寸，各项偏差应符合规范和设计要求。

连接质量检查包括预埋件的锚固质量、焊缝的无损检测和螺栓的扭矩检查。预埋件的锚固质量通过检查隐蔽工程验收记录确认，必要时进行拉拔试验。焊缝的无损检测按设计要求的比例进行，超声波探伤或磁粉探伤的合格等级应符合设计规定。螺栓的扭矩检查采用扭矩扳手抽检，抽检比例不小于 10%，且不少于 5 套，扭矩值应在设计值的±10%范围内。

间隙检查是验收的重点项目，应逐块测量并记录间隙值。横向挡块应测量左右两侧间隙，纵向挡块应测量梁端与挡块之间的间隙。间隙值应符合设计要求，两侧间隙均匀。缓冲垫应粘贴牢固，无脱落和损坏。

验收时应提交完整的质量保证资料，包括挡块和预埋件的出厂合格证、材料质量证明书、焊接工艺评定报告、焊工资格证、无损检测报告、防腐检测报告、隐蔽工程验收记录、安装施工记录、螺栓扭矩检查记录和间隙测量记录。资料齐全且各项检查合格后，方可签署验收合格文件。

常见的施工缺陷包括预埋件位置偏差、挡块间隙不均匀、螺栓扭矩不足、焊缝质量不合格和防腐层损坏。预埋件位置偏差主要是由于固定不牢或浇筑混凝土时碰撞导致，预防措施是加强预埋件的固定和保护，浇筑时避免振捣器触碰。挡块间隙不均匀主要是由于梁体位置偏差或挡块定位不准导致，预防措施是加强测量放线和安装调整，确保两侧间隙对称。螺栓扭矩不足主要是由于未使用扭矩扳手或拧紧顺序不当导致，预防措施是严格按工艺要求使用扭矩扳手，分初拧和终拧两步对称拧紧。焊缝质量不合格主要是由于焊接工艺不当或焊工操作不规范导致，预防措施是严格执行焊接工艺评定，加强焊工培训和过程检查。防腐层损坏主要是由于吊装和安装过程中磕碰导致，预防措施是加强成品保护，损坏后及时修补。

第七章 检测验收与质量评定

一、出厂检验项目与标准

防落梁挡块作为桥梁工程的重要安全构件，其制造质量必须通过严格的出厂检验来保证。出厂检验由制造厂家的质量检验部门负责，在产品出厂前逐批进行，检验合格并附质量证明书后方可出厂。出厂检验分为常规检验和型式检验两类，常规检验每批产品均需进行，型式检验在新产品定型、材料或工艺变更、停产半年以上恢复生产或质量监督部门提出要求时进行。

外观与尺寸检验是出厂检验的首项内容。外观检查要求挡块表面平整，无裂纹、夹层、折叠和明显的凹凸不平；焊缝表面均匀，无裂纹、气孔、夹渣、未焊满和咬边等缺陷；防腐层完整，无漏镀、漏涂、起皮和剥落。尺寸检验包括挡块的外形尺寸（长、宽、高）、螺栓孔位置和孔径、锚筋位置和长度、接触面平整度等。尺寸偏差应符合设计图纸和相关标准的规定，一般外形尺寸偏差不大于±3 毫米，孔位偏差不大于±2 毫米，孔径偏差不大于+1 毫米/0 毫米，接触面平整度不大于 2

毫米/米。外观和尺寸检验采用目测、钢直尺、游标卡尺、角尺和塞尺等工具，逐件检查。

力学性能检验是确保挡块承载能力的关键环节。力学性能检验包括原材料的力学性能复验和成品的力学性能试验。原材料复验应对每批进场的钢板和钢筋进行抽样，检验项目包括屈服强度、抗拉强度、断后伸长率和冷弯性能，试验方法按照《金属材料 拉伸试验》（GB/T 228.1）和《金属材料 弯曲试验》（GB/T 232）进行。成品力学性能试验主要针对关键焊缝和连接节点，包括焊缝的拉伸试验、剪切试验和冲击试验，以及螺栓连接的抗滑移系数试验。对于新型挡块或重要工程用挡块，还应进行整体承载力试验，通过加载试验验证挡块的实际承载力和变形能力是否满足设计要求。

防腐性能检验直接关系到挡块的使用寿命。防腐检验项目包括防腐层外观、厚度、附着力和耐蚀性。防腐层厚度采用磁性测厚仪测量，每平方米至少测量 5 个点，取算术平均值，热浸镀锌层厚度不低于 80 微米，涂层体系的总厚度不低于设计要求。附着力测试采用划格法（GB/T 9286）或拉开法（GB/T 5210），涂层附着力不低于 1 级（划格法）或 5 兆帕（拉开法）。耐蚀性试验采用中性盐雾试验（GB/T 10125），试验时间根据防腐等级确定，热浸镀锌件不低于 480 小时，涂层体系不低于 720 小时，试验后试件表面不应出现红锈。对于多元合金共渗处理，还应检测渗层厚度、渗层硬度和渗层中金属元素含量，渗层厚度一般为 30～60 微米，表面硬度不低于 250HV。

出厂检验的程序包括检验计划制定、抽样、检验实施、数据记录和结果判定。每批产品出厂前，质检部门应根据产品标准和合同要求制定检验计划，明确检验项目、抽样数量、检验方法和判定标准。抽样应具有代表性，从同一批次、同一规格的产品中随机抽取。检验实施应严格按照检验规程操作，确保检验数据准确可靠。检验数据应如实记录，形成检验记录和检验报告。结果判定根据检验数据和判定标准进行，全部项目合格则判定该批产品合格，出具产品合格证和质量证明书；如有不合格项目，应加倍抽样复检，复检仍不合格则判定该批产品不合格，不得出厂。

二、现场验收内容

挡块运抵施工现场后，应进行进场验收。进场验收由施工单位会同监理单位共同进行，必要时邀请建设单位和设计单位参加。验收内容包括资料审查、外观检查和抽样复检。资料审查应核对产品合格证、质量证明书、出厂检验报告、材料质量证明书和焊接工艺评定报告等文件，确认文件齐全、内容完整、数据合格。外观检查应逐件检查挡块的外观质量、防腐层状况和标识，核对产品的规格、型号和数量是否与供货合同一致。抽样复检应对关键性能指标进行现场抽样，送有资质的第三方检测机构复检，复检项目一般包括防腐层厚度、附着力和焊缝外观质量，必要时进行力学性能复检。

安装过程验收是确保挡块安装质量的重要环节，应在安装过程中同步进行，而不是等到全部安装完成后才检查。安装过程验收包括预埋件验收、挡块就位验收、连接质量验收和间隙验收。预埋件验收在混凝土浇筑前进行，检查预埋件的规格、位置、标高、锚固长度和固定情况，签署隐蔽工程验收记录。挡块就位验收在挡块吊装就位后、固定前进行，检查挡块的位置、标高、垂直度和方向是否符合设计要求。连接质量验收在螺栓拧紧或焊接完成后进行，检查螺栓的扭矩、焊缝的外观质量和无损检测结果。间隙验收在挡块完全固定后进行，逐块测量间隙值并记录。

竣工验收是挡块安装完成后的最终验收，在桥梁整体竣工验收前进行。竣工验收应对全部挡块进行普查，检查内容包括外观质量、安装位置、连接状态、间隙值和防腐层完整性。竣工验收应形成完整的验收资料，包括进场验收记录、隐蔽工程验收记录、安装施工记录、螺栓扭矩检查记录、焊缝无损检测报告、间隙测量记录和质量评定表。竣工验收合格后，方可将挡块工程纳入桥梁整体竣工验收范围。

三、第三方检测要求

对于重要桥梁、高烈度区桥梁或建设单位有明确要求的工程，挡块的质量检测应由具有相应资质的第三方检测机构进行。第三方检测机构应具备桥梁工程或金属结构检测的资质，检测人员应持有相应的资格证书，检测设备应在检定有效期内。第三方检测的目的是独立、客观地评价挡块的制造和安装质量，为工程验收提供权威依据。

第三方检测的项目根据检测阶段和目的确定。出厂阶段的第三方检测主要包括原材料力学性能复验、焊缝无损检测、防腐层厚度和附着力检测、盐雾试验等。安装阶段的第三方检测主要包括预埋件位置偏差检测、挡块安装尺寸检测、螺栓扭矩检测、焊缝外观和无损检测、间隙测量等。运营阶段的第三方检测主要包括挡块外观普查、腐蚀状况检测、连接状态检测、间隙变化监测和承载力评估等。

检测方法应严格按照国家和行业标准执行。力学性能试验按照《金属材料 拉伸试验》（GB/T 228.1）、《金属材料 弯曲试验》（GB/T 232）和《金属材料 夏比摆锤冲击试验》（GB/T 229）进行。焊缝无损检测按照《焊缝无损检测 超声检测》（GB/T 11345）和《焊缝磁粉检测》（JB/T 6061）进行。防腐层检测按照《磁性覆盖层 厚度测量 磁性法》（GB/T 4956）、《色漆和清漆 拉开法附着力试验》（GB/T 5210）和《人造气氛腐蚀试验 盐雾试验》（GB/T 10125）进行。尺寸和间隙检测按照《工程测量规范》（GB 50026）和相关桥梁施工规范进行。

第三方检测机构应出具正式的检测报告，检测报告应包括工程概况、检测依据、检测仪器、检测方法、检测数据、结果评定和检测结论。检测报告应有检测人员、审核人员和批准人员的签字，并加盖检测机构的资质印章和检测专用章。检测报告是工程质量验收的重要依据，应纳入工程档案永久保存。

四、质量评定标准

挡块工程的质量评定应按照《公路工程质量检验评定标准》（JTG F80/1）和相关桥梁施工规范进行，分为分项工程质量评定和分部工程质量评定两个层次。挡块安装通常作为桥梁上部结构或附属工程中的一个分项工程进行评定，评定内容包括基本要求、实测项目和外观鉴定三个部分。

基本要求是质量评定的前提条件，包括挡块的材料、规格和质量必须符合设计要求，预埋件的位置和锚固必须符合设计要求，挡块的安装位置和间隙必须符合设计要求，连接螺栓和焊缝必须符合设计和规范要求。基本要求中有一项不合格，则该分项工程不得进行评定，必须整改合格后方可评定。

实测项目是质量评定的核心内容，通过现场实测数据来评定质量等级。挡块安装的实测项目一般包括挡块平面位置、标高、垂直度、间隙值、螺栓扭矩和焊缝质量。每个实测项目规定了允许偏差或合格标准，以及检查方法和检查频率。实测项目的合格率计算方法为：合格点数除以总检查点数乘以 100%。分项工程的评分采用加权平均法，根据各实测项目的权重计算综合得分。

外观鉴定是质量评定的重要组成部分，通过目测检查挡块的外观质量。外观鉴定的内容包括挡块表面是否平整、有无裂缝和破损，防腐层是否完整、有无脱落和锈蚀，焊缝是否均匀、有无明显缺陷，螺栓是否齐全、有无松动，缓冲垫是否粘贴牢固、有无脱落。外观鉴定实行扣分制，每发现一处缺陷扣一定分数，扣完为止。外观鉴定得分作为分项工程评分的组成部分。

质量等级分为合格和不合格两级。分项工程评分不小于 75 分且基本要求全部满足、实测项目合格率达到规定要求、外观鉴定无严重缺陷的，评定为合格；否则评定为不合格。不合格的分项工程必须进行整改，整改后重新评定。经加固补强或经法定检测单位鉴定能够达到设计要求的，其质量可评定为合格；经鉴定达不到设计要求但建设单位认可能满足结构安全和使用功能要求的，可按验收标准进行验收。

不合格处理程序应严格执行。发现不合格项后，应立即标识、隔离不合格品，防止误用。同时组织分析不合格原因，制定纠正措施和预防措施。对于制造环节的不合格品，能够返修的进行返修，返修后重新检验；不能返修的予以报废。对于安装环节的不合格项，能够整改的限期整改，整改后重新验收；不能整改的应与设计单位协商处理方案，必要时进行加固或更换。所有不合格处理过程应形成记录，纳入工程质量档案。

第八章 运营维护与病害处理

一、日常巡检制度

防落梁挡块在桥梁运营期间长期承受环境侵蚀和偶然荷载作用，其技术状况会随时间逐渐劣化。建立科学的日常巡检制度，及时发现和处理挡块的早期病害，是确保挡块始终处于有效工作状态的关键。日常巡检由桥梁养护单位的巡检人员负责，按照规定的周期和内容对挡块进行巡回检查，发现异常情况及时记录和上报。

巡检周期根据桥梁的技术状况等级和重要性确定。对于一类、二类桥梁，挡块的日常巡检每季度不少于一次；对于三类桥梁，每月不少于一次；对于四类、五类桥梁，应加密巡检频次，必要时安排专人值守。在汛期、台风季、寒潮等特殊天气前后，以及地震、车辆撞击等突发事件后，应进行专项巡检。新建桥梁交付使用后的第一年，应适当加密巡检频次，重点观察挡块的间隙变化和连接状态。

巡检内容以目测检查为主，重点关注以下几个方面：挡块的外观状况，包括混凝土挡块有无裂缝、破损、露筋和剥落，钢制挡块有无变形、锈蚀和防腐层脱落；挡块与梁体之间的间隙是否正常，有无因梁体位移导致间隙消失或异常增大；连接节点的状态，包括螺栓有无松动、缺失，焊缝有无开裂，预埋件有无松动和混凝土开裂；缓冲垫的状况，包括有无脱落、老化和严重变形；挡块周围有无杂物堆积、积水和植物生长，影响挡块的正常工作。

巡检方法以步行目测为主，配合望远镜、强光手电和裂缝宽度对比卡等简易工具。对于桥下空间受限或高处的挡块，可使用桥梁检查车或登高平台进行近距离检查。巡检时应注意安全，穿戴好防护装备，在交通量大的桥梁上应设置交通警示标志。每次巡检应填写巡检记录表，记录检查日期、天气、巡检人员、挡块编号、检查内容和发现的问题，对病害部位应拍照留存，标注病害的位置、类型和程度。

巡检人员应具备桥梁养护的基本知识，熟悉挡块的构造和工作原理，了解常见病害的特征和处理方法。养护单位应定期对巡检人员进行培训和考核，提高巡检质量和病害识别能力。巡检中发现的问题应按照严重程度分级处理：对于轻微病害，如防腐层局部脱落、间隙微小变化等，纳入年度养护计划处理；对于较严重病害，

如挡块明显变形、连接螺栓松动、裂缝宽度超限等，应在一个月内安排维修；对于危急病害，如挡块断裂、连接失效、间隙完全消失等，应立即设置警示标志，限制交通，并在 24 小时内上报和启动应急处置。

二、定期检查项目

定期检查是对挡块进行全面、系统的检查，比日常巡检更为深入和详细，通常由专业技术人员或委托有资质的检测机构进行。定期检查的周期根据桥梁技术状况确定，一般每三年不少于一次；对于技术状况较差或位于高烈度区的桥梁，每年检查一次；新建桥梁在交付使用一年后进行第一次全面定期检查。在经常检查中发现挡块有严重缺损时，应立即安排一次定期检查。

定期检查的项目包括外观详细检查、尺寸测量、材料性能检测和连接状态评估。外观详细检查应对每一块挡块进行近距离观察，记录病害的类型、位置、长度、宽度和程度，绘制病害展开图。混凝土挡块应重点检查裂缝分布、混凝土碳化深度、钢筋锈蚀状况和混凝土强度；钢制挡块应重点检查腐蚀程度、截面损失率、防腐层状况和变形情况。

尺寸测量包括挡块的外形尺寸、间隙值和位移量。间隙值是定期检查的重点项目，应使用游标卡尺或塞尺在挡块接触面的上、中、下三个位置测量，与初始值对比，分析间隙的变化趋势。间隙变化可能反映梁体的位移趋势、支座的老化变形或下部结构的沉降，需要结合其他检查结果综合判断。对于挡块的位移和变形，可使用全站仪或水准仪进行测量，与设计值对比评估偏差程度。

材料性能检测在定期检查中根据需要进行。对于混凝土挡块，可采用回弹法或超声回弹综合法检测混凝土强度，采用酚酞试剂检测碳化深度，采用钢筋锈蚀仪检测钢筋锈蚀电位。对于钢制挡块，可采用超声波测厚仪测量钢板剩余厚度，计算截面损失率；采用涂层测厚仪测量防腐层厚度，评估防腐层的剩余寿命。对于连接螺栓，可采用扭矩扳手检测预紧力，判断是否松动。材料性能检测的结果应与出厂值和规范限值对比，评估挡块的剩余承载力和使用寿命。

技术状况评定是定期检查的总结性工作，根据检查结果对挡块的技术状况进行分级评定。挡块的技术状况可分为一类（完好）、二类（轻微缺损）、三类（中等缺损）、四类（严重缺损）和五类（危险缺损）五个等级。评定应综合考虑挡块的材料劣化程度、结构损伤程度、连接可靠性和间隙异常程度。一类、二类挡块可正常使用，纳入日常养护；三类挡块需要进行中修加固；四类挡块需要进行大修或更换，并限制交通；五类挡块处于危险状态，应立即关闭交通，进行应急处置。技术状况评定结果应纳入桥梁总体技术状况评定，并作为制定养护计划的依据。

三、常见病害类型与成因

混凝土挡块的常见病害包括裂缝、混凝土剥落、露筋锈蚀和整体剪切破坏。裂缝是混凝土挡块最常见的病害，按成因可分为受力裂缝和非受力裂缝。受力裂缝主要由碰撞荷载引起，通常出现在挡块与盖梁交接处或挡块中部，裂缝方向与主拉应力方向一致，宽度较大时可能影响挡块的承载力。非受力裂缝包括温度收缩裂缝、干缩裂缝和施工裂缝，通常宽度较小，分布不规则，对承载力影响不大，但可能成为钢筋锈蚀的通道。混凝土剥落和露筋锈蚀通常是由于裂缝扩展、冻融循环或除冰盐侵蚀导致，钢筋锈蚀后体积膨胀，进一步加剧混凝土剥落，形成恶性循环。整体剪切破坏是最严重的病害，挡块从盖梁交接面整体剪切脱落，通常是由于碰撞力超过抗剪承载力或锚固失效导致，一旦发生将完全丧失限位功能。

钢制挡块的常见病害包括腐蚀、变形、焊缝开裂和螺栓松动。腐蚀是钢制挡块最主要的病害形式，在户外环境中，防腐层逐渐老化破损，钢材表面发生电化学腐蚀，导致截面削弱和承载力下降。腐蚀的严重程度与环境条件密切相关，海洋环境、工业大气环境和使用除冰盐的地区腐蚀速率明显高于普通内陆地区。变形通常是由于碰撞荷载超过钢材屈服强度导致，挡块发生弯曲或屈曲变形，改变间隙值和受力状态。焊缝开裂是钢制挡块的常见连接病害，通常是由于焊接质量缺陷、应力集中或疲劳荷载导致，焊缝开裂后会迅速扩展，导致连接失效。螺栓松动在装配式挡块中较为常见，通常是由于碰撞振动、温度循环或初始预紧力不足导致，螺栓松动后挡块的位置和间隙会发生变化，严重时可能导致挡块脱落。

连接节点病害包括预埋件锚固失效、混凝土局部承压破坏和锚筋断裂。预埋件锚固失效通常是由于锚筋锚固长度不足、混凝土强度不够或腐蚀导致，预埋件从混凝土中拔出，挡块失去支撑。混凝土局部承压破坏发生在预埋件锚板下方的混凝土中，由于碰撞力通过锚板传递到混凝土，当承压面积不足或混凝土强度不够时，锚板下方混凝土发生压碎和劈裂。锚筋断裂通常是由于腐蚀削弱截面或疲劳荷载导致，锚筋断裂后预埋件的承载力大幅下降。

间隙异常包括间隙过小、间隙过大和两侧间隙不均匀。间隙过小可能是由于梁体横向位移、支座老化变形或下部结构倾斜导致，间隙过小会使挡块在正常使用状态下就参与受力，加速挡块损伤。间隙过大可能是由于挡块移位、连接松动或梁体位置变化导致，间隙过大会削弱挡块的限位效果，地震时梁体在碰撞前已经积累较大位移。两侧间隙不均匀通常是由于梁体偏位、挡块安装偏差或下部结构不均匀沉降导致，会使一侧挡块提前受力，受力不均衡。

四、维修加固方法

挡块的维修加固应根据病害类型和技术状况等级采取不同的方法，遵循"安全可靠、技术可行、经济合理、耐久适用"的原则。维修方案应经过设计计算，确保维修后的挡块满足承载力和正常使用要求。

小修保养适用于一类、二类挡块的轻微病害，主要包括防腐层修补、裂缝封闭、间隙微调和杂物清理。防腐层局部破损时，应先清理破损区域的锈蚀和污物，露出金属光泽，然后按原防腐体系涂刷底漆和面漆，修补范围超出破损边缘不少于 50 毫米。混凝土挡块的非受力裂缝宽度小于 0.2 毫米时，可采用环氧树脂表面封闭处理；宽度大于 0.2 毫米的裂缝应进行压力灌浆。间隙微调可通过在挡块与梁体之间加装或更换缓冲垫来实现，调整量一般不超过 20 毫米。小修保养应结合日常巡检及时进行，防止轻微病害发展为严重病害。

中修加固适用于三类挡块的中等缺损，主要包括混凝土挡块的加固修补、钢制挡块的矫正和防腐翻新、连接节点的补强。混凝土挡块出现受力裂缝或局部剥落时，可采用粘贴钢板或碳纤维布加固，提高挡块的抗剪和抗弯承载力；混凝土缺损

部位应剔除松散部分，采用高强聚合物砂浆或环氧混凝土修补。钢制挡块发生轻微变形时，可采用千斤顶或火焰矫正恢复形状，矫正后进行无损检测确认无裂纹；腐蚀严重但截面损失率不超过 20%的，可进行防腐翻新处理，包括表面喷砂除锈、重新涂装防腐层。连接节点补强包括更换松动或锈蚀的螺栓、补焊开裂的焊缝、加大预埋件锚板或增加锚筋数量等。中修加固应由专业施工队伍实施，完成后进行质量验收。

大修更换适用于四类、五类挡块的严重缺损，当挡块的承载力严重不足、发生整体破坏或无法通过加固恢复功能时，应进行更换。更换施工应先制定详细的施工方案，包括临时支撑措施、交通组织方案和安全防护措施。更换时应先拆除旧挡块，清理连接面，检查预埋件的状况，预埋件完好的可继续使用，预埋件损坏的应重新植筋或增设新的预埋件。新挡块应按设计要求制造，安装时严格控制位置和间隙，连接固定后进行防腐修补。大修更换应选择在交通量较小的时段进行，施工期间应设置临时限位措施，确保施工期间的桥梁安全。

维修质量验收应按照相关施工规范和设计要求进行，验收内容包括材料质量、施工工艺、外观质量、尺寸偏差和承载力检验。维修所用的材料应符合设计要求和相关标准，并有质量证明书。施工工艺应严格按照施工方案和操作规程执行，关键工序应有施工记录。外观质量应平整、无明显缺陷，防腐层完整。尺寸偏差应在允许范围内，间隙值符合设计要求。对于加固和更换的挡块，必要时应进行荷载试验或承载力检测，确认满足设计要求后方可投入使用。维修验收资料应纳入桥梁养护档案。

五、灾后应急评估

地震是对防落梁挡块最严峻的考验，地震后应立即对挡块进行应急检查，评估挡块的损伤状况和桥梁的安全性。地震后应急检查应在确保人员安全的前提下尽快进行，重点检查挡块有无断裂、变形、移位和连接失效，间隙有无异常变化，梁体有无过大位移。对于检查中发现挡块严重损坏或梁体位移接近落梁临界状态的桥梁，应立即关闭交通，设置警示标志，禁止车辆和行人通行。

应急检查的方法以目测为主，配合简单的测量工具。检查人员应从桥面和桥下两个角度观察挡块的状况，注意挡块与梁体之间的接触痕迹——如果挡块与梁体之间有明显的碰撞痕迹，说明地震中挡块已经参与工作，需要仔细检查挡块和连接节点的损伤情况。对于碰撞痕迹明显的挡块，应测量间隙值的变化，检查混凝土有无裂缝和剥落，钢制挡块有无变形和焊缝开裂，连接螺栓有无松动和剪断。

车辆撞击是挡块损伤的另一个常见原因，桥下车辆超高撞击挡块或梁体可能导致挡块变形、连接松动甚至脱落。撞击后应检查挡块的变形程度、连接状态和间隙变化，评估撞击对挡块承载力的影响。如果挡块仅发生轻微变形、连接完好，可进行矫正和防腐处理后继续使用；如果挡块严重变形、连接失效或承载力不足，应进行更换。撞击还可能导致梁体损伤，应同时检查梁体的状况。

应急处置措施根据损伤程度确定。对于挡块轻微损伤、不影响限位功能的，可设置观察标志，纳入后续维修计划。对于挡块中等损伤、限位功能下降但未完全失效的，应限制重型车辆通行，设置限速标志，尽快安排维修加固。对于挡块严重损伤、完全丧失限位功能或梁体存在落梁风险的，应立即关闭交通，疏散人员，设置临时支撑或限位措施，并组织专家评估和制定修复方案。应急处置期间应安排专人值守，密切观察桥梁状况的变化，防止次生灾害发生。

灾后挡块的修复应遵循"先临时、后永久"的原则。首先采取临时措施恢复基本的限位功能，如设置临时钢支撑、安装临时拉索等，确保桥梁在修复期间的安全。然后根据损伤评估结果制定永久修复方案，对损坏的挡块进行加固或更换，对移位的梁体进行复位，对异常的间隙进行调整。永久修复完成后，应进行全面的质量验收和荷载试验，确认桥梁恢复到安全状态后方可恢复正常交通。

第九章 技术发展趋势与创新方向

一、高性能材料应用

材料是防落梁挡块技术发展的基础，新型高性能材料的应用正在不断拓展挡块的性能边界。超高性能混凝土（UHPC）是近年来最受关注的水泥基复合材料，其抗

压强度可达 150 兆帕以上，是普通混凝土的 5～8 倍，同时具有优异的抗拉强度、韧性和耐久性。将 UHPC 用于挡块制造，可以在保持相同承载力的情况下大幅减小挡块尺寸，减轻自重，同时提高挡块的抗冲击性能和耐久性。研究表明，UHPC 挡块在碰撞荷载下表现出更好的能量吸收能力和更小的损伤，特别适用于高烈度区和重要桥梁。目前 UHPC 挡块的应用还处于研究和试点阶段，成本较高是制约其大规模推广的主要因素，但随着 UHPC 技术的成熟和成本下降，未来有望在高端桥梁工程中得到更多应用。

形状记忆合金（SMA）是一种具有独特形状记忆效应和超弹性的智能材料，在土木工程中的应用日益广泛。SMA 的超弹性特性使其能够在大变形后自动恢复原状，同时在变形过程中耗散大量能量。将 SMA 用于挡块的连接或耗能构件，可以实现挡块在地震后的自复位，减少震后修复工作量。例如，采用 SMA 螺栓连接的装配式挡块，在碰撞后螺栓可以自动恢复初始长度，使挡块回到原位，同时 SMA 的超弹性变形耗散了碰撞能量。SMA 还可以制成阻尼器或复位装置，与传统挡块组合使用，提高挡块体系的抗震韧性。SMA 的主要缺点是成本高、力学性能受温度影响大，目前主要用于科研和示范工程。

纤维增强复合材料（FRP）具有轻质高强、耐腐蚀、抗疲劳等优点，在桥梁加固和新建中得到广泛应用。FRP 可以用于挡块的加固和新建，例如在混凝土挡块表面粘贴 FRP 布提高抗剪承载力，或者采用 FRP 型材制造轻质挡块。FRP 挡块的优点是自重轻、耐腐蚀、安装方便，特别适用于旧桥加固中需要减轻附加荷载的场合。FRP 的缺点是弹性模量较低、耐高温性能差、长期蠕变性能需要进一步研究，这些因素限制了 FRP 在主要承重挡块中的应用。目前 FRP 更多用于挡块的加固和辅助构件，而非主体结构。

耐候钢和不锈钢是提高钢制挡块耐久性的重要材料方向。耐候钢通过添加铜、铬、镍等合金元素，在表面形成致密的氧化锈层，阻止进一步腐蚀，可以免涂装或减涂装使用，降低全生命周期成本。耐候钢挡块适用于大气腐蚀环境，在桥梁工程中已有较多应用案例。不锈钢具有优异的耐腐蚀性能，特别适用于海洋环境和腐蚀严重的地区，但成本较高，通常用于关键部位或对耐久性要求极高的工程。双相不

锈钢和超级不锈钢的发展进一步提高了不锈钢的强度和耐蚀性，为特殊环境下的挡块设计提供了更多选择。

二、自复位与可更换技术

自复位技术是桥梁抗震韧性设计的重要方向，其核心思想是使结构在地震后能够自动恢复到初始位置，减少残余变形和震后修复工作量。自复位挡块通过在挡块体系中引入复位元件（如预应力筋、形状记忆合金、碟形弹簧等），使挡块在碰撞变形后能够自动复位。自复位挡块通常与耗能元件组合使用，复位元件提供恢复力，耗能元件耗散地震能量，两者协同工作实现"可恢复抗震"。研究表明，自复位挡块可以有效减小地震后的残余位移，降低震后修复成本和交通中断时间，对于城市桥梁和交通干线桥梁具有重要意义。

可更换耗能构件是基于"保险丝"理念发展的抗震技术，将挡块设计为在强震中通过自身损伤耗散能量、保护主体结构，震后可以快速更换受损构件以恢复功能。可更换挡块通常采用模块化设计，挡块本体与下部结构之间通过螺栓连接，受损后可以拆卸更换。可更换挡块的关键技术在于：一是精确设计挡块的承载力和破坏模式，确保挡块在预期的碰撞力下发生可预测的延性破坏，而不是脆性断裂；二是实现挡块的快速连接和拆卸，震后能够在短时间内完成更换；三是建立挡块的损伤识别和评估方法，便于震后快速判断哪些挡块需要更换。可更换挡块在高烈度区和重要桥梁中具有广阔的应用前景，是当前挡块技术研究的热点之一。

模块化设计是实现可更换和工业化制造的重要途径。模块化挡块将挡块分解为若干标准化模块，如基础模块、耗能模块、缓冲模块和连接模块，不同模块可以组合形成不同性能的挡块产品。模块化设计的优点是：可以通过更换耗能模块实现挡块性能的升级和修复；可以实现工厂预制和现场快速装配，提高施工效率和质量；可以根据不同桥梁的需求灵活组合，实现产品的系列化和标准化。模块化挡块的设计需要解决模块之间的接口标准化、力的传递可靠性和装配精度等问题。

三、智能监测与数字化

智能监测技术正在深刻改变桥梁运维管理模式，防落梁挡块作为桥梁安全的关键构件，其智能监测也日益受到重视。传感器集成是挡块智能化的基础，通过在挡块中集成位移传感器、应力传感器、加速度传感器、腐蚀传感器和碰撞传感器，可以实时监测挡块的工作状态和健康状况。位移传感器可以监测挡块与梁体之间的间隙变化，判断梁体是否发生异常位移；应力传感器可以监测挡块在碰撞时的受力情况，评估挡块的承载力裕度；腐蚀传感器可以监测挡块的腐蚀速率和剩余厚度，预测挡块的使用寿命；碰撞传感器可以记录挡块遭受的碰撞次数和碰撞强度，为损伤评估提供数据。

物联网与远程监测技术使挡块的监测数据可以实时传输到管理平台，实现远程监控和预警。通过在挡块上安装无线传感器节点，利用 LoRa、NB-IoT 或 5G 等通信技术将监测数据传输到云端管理平台，管理人员可以在办公室实时查看每一块挡块的工作状态。当监测数据超过预警阈值时，系统自动发出警报，提示管理人员及时处理。物联网监测还可以实现大数据分析，通过积累大量挡块的监测数据，建立挡块性能退化模型和寿命预测模型，为预防性养护提供科学依据。

数字孪生与 BIM 技术为挡块的全生命周期管理提供了新的工具。在设计阶段，通过 BIM 模型进行挡块的参数化设计和碰撞检查，优化挡块的构造和布置；在施工阶段，利用 BIM 模型指导施工，进行施工模拟和进度管理；在运维阶段，建立挡块的数字孪生模型，将实时监测数据映射到数字模型中，实现挡块健康状况的可视化管理。数字孪生还可以用于模拟挡块在不同地震工况下的响应，评估挡块的抗震性能和剩余寿命，为维修加固决策提供支持。

人工智能技术在挡块监测数据的分析和预警中发挥着越来越重要的作用。通过机器学习算法对大量监测数据进行训练，可以建立挡块损伤识别模型，自动识别挡块的异常状态和损伤类型。深度学习算法可以处理图像数据，通过挡块的外观照片自动识别裂缝、锈蚀和变形等病害。人工智能还可以用于预测挡块的性能退化趋势和剩余寿命，实现基于状态的预防性养护。随着监测数据的积累和算法的优化，人工智能在挡块智能运维中的应用将越来越广泛和深入。

四、标准化与产业化

产品标准化是防落梁挡块行业发展的必然趋势。目前挡块产品大多按照项目定制，不同项目的挡块规格、构造和连接方式差异较大，导致生产效率低、成本高、质量参差不齐。推进挡块产品的标准化，制定统一的产品系列、规格参数、连接接口和技术要求，可以实现规模化生产，降低成本，提高质量。标准化应覆盖挡块的分类、型号编制、尺寸系列、材料要求、性能指标、试验方法和检验规则等内容，形成完整的标准体系。行业协会和标准化组织应在标准制定中发挥主导作用，联合设计单位、制造企业和科研机构共同制定科学合理、切实可行的标准。

制造工业化是提高挡块质量和效率的关键。传统的挡块制造多为小作坊式生产，工艺落后，质量控制薄弱。推进挡块制造的工业化，采用数控切割、自动化焊接、机器人涂装、流水线装配等先进制造技术，可以大幅提高生产效率和产品质量的一致性。工业化制造还应建立完善的质量管理体系，从原材料采购、生产过程控制到成品检验，每一个环节都有严格的质量标准和检验程序。大型专业制造企业在工业化制造方面具有优势，应鼓励行业资源向优势企业集中，提高产业集中度。

市场集中化是挡块行业发展的另一个重要趋势。目前挡块生产企业数量众多，但大多规模较小、技术水平较低、产品同质化严重，市场竞争激烈且不规范。随着行业标准的完善和业主对产品质量要求的提高，小型企业将逐渐被淘汰，市场资源向技术实力强、产品质量好、服务能力强的大型企业集中。市场集中化有利于行业的健康发展，大型企业有更多的资源投入技术研发和质量提升，推动行业整体技术水平的进步。预计未来 5～10 年，防落梁挡块行业将经历一轮整合，形成若干家具有较强竞争力的龙头企业。

五、绿色低碳发展

绿色低碳是土木工程领域的发展方向，防落梁挡块的设计、制造和运维也应贯彻绿色低碳理念。材料循环利用是绿色低碳的重要方面，钢制挡块在达到使用寿命后可以回收再利用，钢材的回收利用率高，再生钢材的性能与新钢材基本相当，应鼓励在挡块制造中使用再生钢材。混凝土挡块的回收利用相对困难，但可以通过破

碎后作为再生骨料用于非承重结构，减少建筑垃圾。设计时应考虑挡块的可拆卸性和可回收性，采用螺栓连接代替焊接连接，便于拆除和材料回收。

节能制造工艺是降低挡块制造过程碳排放的有效途径。热浸镀锌是钢制挡块常用的防腐工艺，但其能耗较高，锌液的加热和保温需要消耗大量能源。开发低能耗的防腐工艺，如冷镀锌、水性涂料涂装、气相沉积等，可以降低制造过程的能源消耗。焊接是挡块制造中的主要能耗工序之一，采用高效焊接方法（如气体保护焊、埋弧焊）和优化焊接工艺参数，可以提高焊接效率，减少能源消耗。制造企业还可以通过优化生产流程、采用节能设备、利用清洁能源等方式降低碳排放。

全生命周期碳减排是绿色低碳发展的系统方法，应从挡块的设计、材料、制造、运输、施工、运维到拆除回收的全生命周期各个环节减少碳排放。设计阶段通过优化挡块构造，减少材料用量，降低隐含碳；材料阶段选择低碳排放的材料，如再生钢材、低碳水泥等；制造阶段采用节能工艺和清洁能源；运输阶段优化物流方案，减少运输距离和空载率；施工阶段采用装配式施工，减少现场作业和施工能耗；运维阶段延长挡块使用寿命，减少更换频率；拆除阶段做好材料回收利用。全生命周期碳减排需要建立挡块的碳排放核算方法和数据库，为低碳设计和决策提供量化依据。

第十章 结论与实施建议

一、主要结论

防落梁挡块是桥梁抗震体系中保障极端工况下不发生落梁的关键安全构件，其技术价值贯穿桥梁全生命周期。通过对防落梁挡块的定义与工作机理、分类与构造形式、设计规范与计算方法、材料与制造工艺、施工安装技术、检测验收与质量评定、运营维护与病害处理以及技术发展趋势的系统梳理，可以得出以下主要结论。

在技术体系方面，防落梁挡块已经形成了较为完整的技术链条。从设计层面，国内外规范对挡块的设置要求、设计参数和计算方法做出了规定，能力保护设计和基于性能的设计理念正在逐步推广；从制造层面，钢制挡块和混凝土挡块的制造工

艺日趋成熟，防腐处理和质量控制体系不断完善；从施工层面，挡块的安装工艺和质量验收标准基本建立，装配式挡块的应用提高了施工效率；从运维层面，挡块的巡检、定期检查和病害处理制度正在形成，灾后应急评估机制逐步建立。整个技术体系覆盖了从设计到运维的各个环节，为挡块的工程应用提供了技术支撑。

在关键问题方面，当前防落梁挡块的工程应用仍存在若干需要改进的地方。设计层面，挡块设计参数的选取在很大程度上依赖经验，不同规范之间的规定存在差异，碰撞分析的精度和可靠性有待提高；制造层面，部分企业的制造工艺和质量控制水平参差不齐，防腐处理的耐久性需要进一步提升；施工层面，预埋件定位偏差、间隙控制不准、螺栓扭矩不足等问题在工程中时有发生，影响挡块的实际效能；运维层面，在役桥梁挡块的检测和维护缺乏系统的技术标准，许多桥梁的挡块长期缺乏检查，病害不能及时发现和处理。这些问题需要通过技术进步和管理提升逐步解决。

在发展方向方面，防落梁挡块技术正朝着高性能、智能化、标准化和绿色化的方向发展。高性能材料（如 UHPC、SMA、FRP）的应用将不断提升挡块的力学性能和耐久性；自复位和可更换技术将提高挡块体系的抗震韧性和震后恢复能力；智能监测和数字化技术将改变挡块的运维管理模式，实现从被动维修到主动预防的转变；标准化和产业化将提高挡块产品的质量和效率，降低成本；绿色低碳理念将贯穿挡块全生命周期，推动行业可持续发展。这些发展方向将共同推动防落梁挡块技术迈向新的高度。

二、对设计单位的建议

设计是防落梁挡块质量的源头，设计单位应在以下几个方面加强工作。

更新设计理念，从"构造措施"向"体系设计"转变。挡块不应被视为简单的附属构造，而应作为桥梁抗震体系的重要组成部分进行系统设计。设计时应将搭接长度、限位措施和连梁措施作为统一的防落梁体系进行整体考虑，合理确定各措施的分工和协同关系。应根据桥梁的抗震设防目标和性能要求，确定挡块的设计策略——是作为能力保护构件确保不破坏，还是作为保险丝构件允许在强震中破坏以保护

下部结构。设计理念的更新需要设计人员加强对桥梁抗震理论的学习，提高对抗震体系整体性的认识。

改进设计方法，提高挡块设计的科学性和可靠性。对于重要桥梁和高烈度区桥梁，应采用非线性时程分析方法进行挡块的碰撞分析，而不是仅依赖简化计算和经验取值。分析时应选择多条符合场地条件的地震动记录，考虑碰撞刚度的非线性和挡块的塑性变形，得到可靠的碰撞力和位移响应。应加强对挡块连接节点的设计，预埋件的锚固、螺栓的抗剪和焊缝的承载力都应进行详细验算，确保连接节点不先于挡块本体破坏。设计文件中应明确挡块的关键参数和验收标准，为制造和施工提供清晰的指导。

加强设计质量控制，建立挡块设计的校审制度。挡块设计虽然看似简单，但涉及力学、材料、构造和施工等多个方面，容易出现疏漏。设计单位应将挡块设计纳入设计质量控制体系，实行设计、校对、审核三级校审制度，重点检查挡块的设置位置、间隙取值、承载力计算和连接构造。应建立挡块设计的标准化图库和计算模板，减少人为错误，提高设计效率。对于新型挡块或特殊桥梁的挡块设计，应组织专家评审，确保设计方案的安全性和合理性。

三、对施工单位的建议

施工安装质量直接决定挡块的实际效能，施工单位应从管理、技术和人员三个方面加强控制。

强化施工管理，建立挡块安装的质量保证体系。挡块安装虽然属于附属设施工序，但安全意义重大，施工单位应将其作为关键工序进行管理。应编制专项施工方案，明确施工工艺、质量标准和安全措施，经审批后严格执行。应建立材料进场验收制度，挡块和预埋件进场时必须核对产品合格证和质量证明书，对关键性能进行抽样复检，不合格产品不得使用。应加强施工过程的质量检查，实行班组自检、工序互检和专职质检员专检的三检制度，每道工序合格后方可进入下一道工序。

控制关键工序，确保挡块安装精度和连接可靠性。预埋件安装是第一道关键工序，应在混凝土浇筑前仔细核对预埋件的位置、标高和锚固长度，固定牢固，浇筑

时避免振捣器触碰，浇筑后及时检查预埋件的位置偏差。挡块吊装就位是第二道关键工序，应使用合适的吊装设备，缓慢操作，准确对位，就位后及时调整位置、标高和垂直度。连接固定是第三道关键工序，螺栓连接应使用扭矩扳手按规定力矩分初拧和终拧两步对称拧紧，焊接连接应严格执行焊接工艺规程，焊后进行外观检查和无损检测。间隙控制是贯穿安装全过程的关键指标，应在挡块固定后逐块测量，确保间隙值符合设计要求。

加强人员培训，提高施工队伍的技术水平和质量意识。挡块安装的质量最终取决于施工人员的操作水平，施工单位应定期对施工人员进行技术培训和质量教育，使其熟悉挡块的构造特点、安装工艺和质量标准。应加强对焊工、起重工和测量工等特殊工种的管理，确保持证上岗。技术交底应详细、具体，不仅要讲清操作步骤，还要讲清质量要求和常见问题的防治方法。通过培训和交底，使每一位施工人员都认识到挡块安装的重要性，自觉按照规范和设计要求施工。

四、对运维管理的建议

运营维护是确保挡块长期有效发挥作用的关键，桥梁管理单位应建立完善的挡块运维管理体系。

完善养护制度，将挡块纳入桥梁常规养护范围。许多桥梁的挡块在建成后长期缺乏检查，主要原因是养护制度中没有将挡块作为独立的检查对象。桥梁管理单位应在桥梁养护规范和检查制度中明确挡块的检查内容、周期和标准，将挡块的日常巡检和定期检查制度化、规范化。应建立挡块的技术档案，记录每一块挡块的设计参数、安装时间、检查记录和维修历史，为养护决策提供依据。应根据桥梁的技术状况等级和重要性，合理确定挡块的检查周期，对高烈度区、重要桥梁和技术状况较差的桥梁适当加密检查频次。

加强监测能力建设，逐步推广挡块的智能监测。对于重要桥梁和高烈度区桥梁，可以在挡块上安装位移传感器、应力传感器和腐蚀传感器，实现挡块工作状态的实时监测。监测数据通过物联网传输到管理平台，管理人员可以远程查看挡块的状况，发现异常及时处理。智能监测还可以积累大量数据，为挡块的性能退化分析

和寿命预测提供支持。在推广智能监测时，应注重传感器的可靠性和耐久性，选择适合桥梁户外环境的工业级传感器，并建立数据质量控制和异常报警机制。

提升应急能力，建立挡块灾后应急评估和处置机制。地震、撞击等突发事件后，挡块可能遭受损伤，需要快速评估和处置。桥梁管理单位应制定挡块灾后应急处置预案，明确应急检查的内容、方法和流程，配备必要的应急检查设备和工具。应建立应急专家库，在突发事件后能够迅速组织专家进行评估和决策。应储备一定数量的挡块备件和应急抢修材料，确保灾后能够快速修复。应定期组织应急演练，提高应急队伍的反应能力和处置水平。通过完善的应急机制，最大限度地减少突发事件对桥梁安全和交通的影响。

五、行业发展展望

防落梁挡块作为桥梁工程的重要安全构件，其技术水平和产业发展将随着桥梁建设的发展而不断进步。展望未来，行业发展将呈现以下几个趋势。

技术创新将持续推动挡块性能的提升。随着材料科学、力学分析和制造技术的进步，挡块的力学性能、耐久性和抗震韧性将不断提高。自复位挡块、可更换挡块、智能挡块等新型挡块将从研究走向工程应用，为桥梁抗震提供更多选择。多学科交叉融合将催生更多创新技术，如将人工智能用于挡块的损伤识别和寿命预测，将数字孪生用于挡块的全生命周期管理等。

标准化和产业化将促进行业健康发展。随着相关标准的制定和完善，挡块产品将逐步实现标准化、系列化，制造企业将向规模化、专业化方向发展。市场集中度将逐步提高，技术实力强、产品质量好的企业将获得更多市场份额，行业整体技术水平和产品质量将随之提升。产业集群的形成将促进技术交流和协同创新，降低产业链成本。

绿色低碳将成为行业发展的重要导向。在"双碳"目标的背景下，土木工程领域的绿色低碳转型势在必行。挡块的设计、制造和运维将更加注重全生命周期的碳排放控制，再生材料、节能工艺和可拆卸设计将得到更多应用。绿色低碳不仅是社会责任，也将成为企业竞争力的重要组成部分。

防落梁挡块虽然只是桥梁工程中的一个小型构件，但其安全意义重大，技术内涵丰富。本白皮书系统梳理了防落梁挡块的技术体系，旨在为行业提供一份全面、可操作的技术参考。希望广大工程技术人员和管理者能够在实践中不断总结经验、推动创新，共同提升我国桥梁抗震安全水平，为交通基础设施的安全运营保驾护航。