



岩基上键槽式闸室结构与整体式闸室 结构受力特性比较

雷明月¹, 陶桂兰¹, 姜丞²

(1. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 湖北省交通规划设计院, 湖北 武汉 430051)

摘要: 以岩基上某闸室结构为例, 开展设置键槽缝底板和整体式底板闸室结构的受力特性研究。应用 Ansys 中面面接触单元 Targe170 和 Conta173 模拟键槽的非线性接触, 分析检修、低水、完建和高水 4 种工况下键槽闸室结构的应力、底板弯矩和地基反力分布规律, 并与整体式闸室结构进行对比分析。研究表明: 检修工况和低水工况两模型的应力、弯矩以及地基反力分布规律相似, 其值均较小, 检修工况底板中心产生较大的负弯矩; 完建工况两模型底板正弯矩取得 4 种工况中最大值, 分别为 18 016 和 31 163 kN·m, 整体式结构底板弯矩较大, 表明键槽缝的存在可有效减小闸室底板的正弯矩, 该工况下地基反力最大; 高水工况在底板顶部中心两侧产生最大拉应力, 两模型数值相近, 此时键槽闸室底板跨中弯矩值较小。

关键词: 岩基; 船闸; 键槽闸室; 接触非线性; 受力特性

中图分类号: U 64; TV 662

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)08-0119-06

Comparison of stress characteristics of keyway lock chamber and dock lock chamber on rock foundation

LEI Ming-yue¹, TAO Gui-lan¹, JIANG Cheng²

(1. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Traffic Planning and Design Institute of Hubei Province, Wuhan 430051, China)

Abstract: Taking a chamber structure on rock foundation for example, we discuss the stress characteristics of the keyway lock chamber and the dock lock chamber. Surface to surface contact element Targe170 and Conta173 are applied to simulate the nonlinear contact of keyway and analyze the stress, moment and foundation stress of the keyway lock chamber under four working conditions: inspection condition, low water condition, finished condition and high water condition, and compare with the dock chamber. It is shown that the stress, moment, and foundation stress rules of keyway chamber are similar to the dock chamber, and its value are small under the inspection condition and low water condition, and the bottom center has a greater negative moment under the inspection condition. While under the finished condition the bottom positive moment of two models is the maximum between four kinds of working conditions, 18 016 kN·m, 31 163 kN·m respectively, and the value of the dock lock chamber is comparatively large, indicating that the presence of the keyway joints can effectively reduce the positive moment of the chamber bottom. This condition also has the maximum stress foundation. It is also found that under high water condition the two models have the maximum tensile stress on both sides of the top center of bottom, and have congenial value. The middle moment of the keyway lock chamber bottom is smaller than another model's under this condition.

Keywords: rock foundation; lock; keyway chamber; non-linear contact; stress characteristics

收稿日期: 2016-03-25

作者简介: 雷明月 (1992—), 女, 硕士研究生, 从事港航工程结构研究。

岩基上船闸闸室结构主要有整体式和分离式两种。整体式结构边底板与中间底板连成整体,结构整体稳定性好,闸墙不均匀变形小,对地基的适应性较强,但由于底板和闸墙刚性连接,闸墙将承受的外荷载传递给底板,会使底板结构承受较大的弯矩,在水头较大、闸墙较高的情况下底板厚度会很大,对温控要求高,增加了施工难度;分离式结构边底板与中间底板之间设置平直的结构缝,减小了底板结构承受的弯矩,但结构整体性差,地基反力不均匀,且平直的接缝面传递剪力的能力弱^[1-2]。为克服分离式结构的这些不足,通常在接缝面上设置键槽,并在接缝间灌浆,通过键槽传递船闸结构两侧的压力、剪力和弯矩,同时键槽缝还可以减少大体积船闸结构在承受荷载的过程中由于温度应力产生的自发散乱裂缝。但是设置键槽的闸室结构受力特性与传统整体式结构的受力特性的差异还不明确,有必要深入研究。

为了深入了解键槽在外荷载作用下的工作特性,本文基于增广拉格朗日接触算法,以某岩基上高水头船闸闸室结构为例,应用 Ansys 软件对梯形键槽工作性态进行数值模拟,研究键槽对闸室结构受力特性的影响,并对比分析整体式闸室结构。

1 闸室结构有限元计算模型

1.1 工程概况

算例中船闸最大工作水头为 25.6 m,闸室的有效尺寸为 280.0 m×34.0 m×5.5 m(长×宽×门槛水深)。闸室分为 14 个结构段,本文选取第 2 结构段进行建模研究,船闸闸室结构各部分尺寸见图 1a)。键槽闸室结构的边底板和中间底板之间设置键槽缝,并在接缝间进行灌浆,边底板和中间底板的钢筋不过缝,通过键槽缝传递结构两侧的压力和剪力,梯形键槽尺寸见图 1b)。整体式闸室结构的边底板和中间底板连成整体,其他尺寸与键槽闸室结构相同。

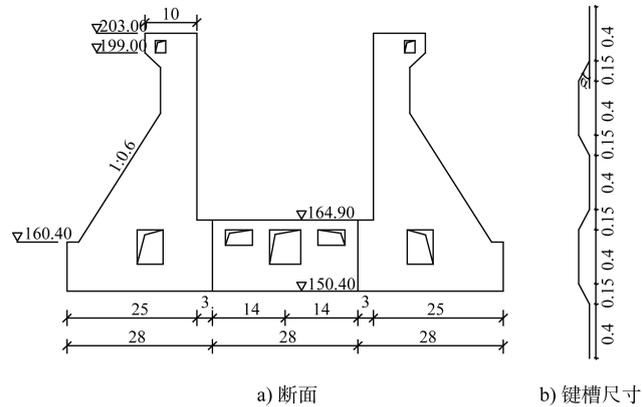


图 1 闸室结构(单位:m)

1.2 键槽接触特性模拟

1.2.1 接触算法

接触问题具有非线性性质,接触面的状态影响相互接触结构体的接触特性,继而影响到整体结构体系的应力分布,整体应力的改变又会影响到接触面的接触状态,因而接触问题是一个复杂且不断变化的问题^[3-5]。接触问题的关键在于接触体之间的相互关系,接触前后的法向关系必须实现接触力的传递和接触面间没有穿透。Ansys 软件提供了多种算法来实现法向接触关系,主要有罚函数法、拉格朗日乘子法和增广拉格朗日乘子法^[6]。本文采用增广拉格朗日乘子法进行计算。

增广拉格朗日算法是为了找到精确的拉格朗日乘子而对罚函数的接触刚度反复修改并迭代求解,直到计算的穿透值小于允许值为止。在迭代的开始,接触协调条件由罚刚度决定,一旦达到平衡,就检查穿透量。如果迭代中发现穿透量大于最大允许穿透值(使用 FTOLN 值控制),则将各个接触单元的接触刚度加上接触力乘以拉格朗日乘子的数值,继续进行迭代。增广拉格朗日法同时吸取了罚函数和拉格朗日乘子法的优点,在整个过程中不增加总体方程的未知个数,而且大大降低了对罚值选取的要求,同时数值实施比较方便,对界面的约束条件及本构关系考虑比较充分。

1.2.2 切向接触本构关系

缝面的切向本构关系采用常规的库伦模型^[7],接触面在相互滑动之前,在接触界面上会达到某

一大小的剪应力产生^[8]。模型中给出了一个等效剪应力 τ , 如果在法向应力 p 的作用下接触面上的剪应力达到该值, 表面则开始滑动, 公式表示为:

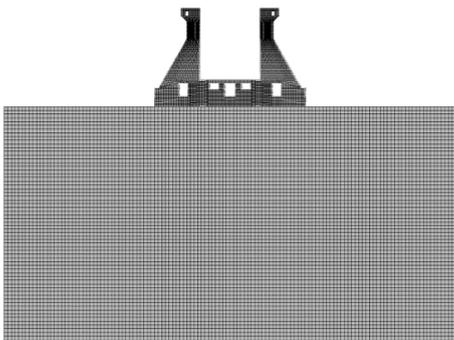
$$\tau = \mu p + COHE \leq T_{\text{aumax}} \quad (1)$$

式中: μ 为摩擦系数; $COHE$ 为粘聚滑动阻力; p 为法向应力; T_{aumax} 为接触界面最大的许可剪应力。本文采用标准接触, 接触张开时法向应力为 0; 定义混凝土与混凝土材料摩擦系数为 0.6, 混凝土与地基摩擦系数为 0.4。

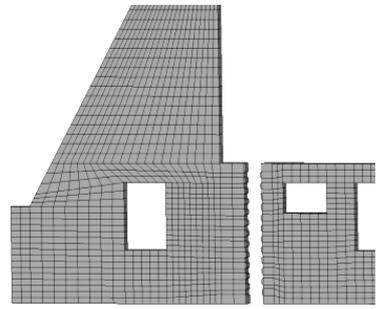
1.3 闸室结构有限元模型

船闸闸室及地基均采用线弹性本构模型, 计算采用的材料参数如下: 闸室结构为 C25 混凝土、密度 2.45 t/m^3 、弹性模量 28 GPa 、泊松比 0.167; 上层地基为粉砂质黏土岩, 密度 2.5 t/m^3 、弹性模量 2.5 GPa 、泊松比 0.35; 下层地基为泥质粉砂岩, 密度 2.6 t/m^3 、弹性模量 3.5 GPa 、泊松比 0.3。

算例中闸室底板总宽 84.0 m , 数值模型中取地基水平工作范围为 3 倍的底板宽度为 252.0 m , 地基深度取 1.5 倍闸室底板宽度为 125.0 m 。应用 Solid45 实体单元模拟船闸闸室结构和地基, Targe170 和 Conta173 单元模拟键槽接缝接触以及闸室与地基的接触。模型 1 为键槽闸室结构, 划分单元总数为 11 818 个, 其中闸室单元数为 3 384 个, 地基单元数为 7 938 个, 接触单元数为 496 个; 模型 2 为整体式闸室结构, 划分单元总数为 11 344 个, 其中闸室单元数为 3 170 个, 地基单元数为 7 938 个, 接触单元数为 236 个。其有限元模型见图 2。

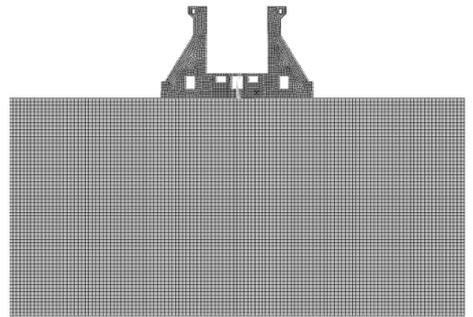


a) 闸室及地基整体有限元模型

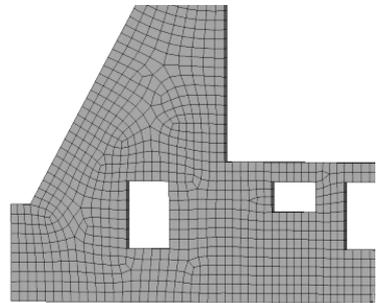


b) 边底板与中间底板接触有限元模型

图 2 键槽式闸室结构有限元模型 (模型 1)



a) 闸室及地基整体有限元模型



b) 边底板与中间底板接触有限元模型

图 3 整体式闸室结构有限元模型 (模型 2)

2 键槽式闸室结构与整体式闸室结构受力比较

本文主要选取检修工况、完建工况、高水工况和低水工况进行研究。检修工况闸室内无水, 闸室外水位为 178 m ; 完建工况地下水位与闸室底板底高程齐平; 高水工况闸室内侧水位为 196 m , 外侧水位为 171.4 m ; 低水工况闸室内侧水位为 191.5 m , 外侧水位为 190.14 m 。算例结构主要承受荷载为自重、水压力以及作用在闸室底板的扬压力。

2.1 结构应力

图 4~7 给出了键槽闸室和整体式闸室在检修

工况、完建工况、高水工况和低水工况第一主应力云图。低水和检修工况下键槽接缝接触较好，两模型均在底板底部产生较大的拉应力，在边墙内侧与底板顶部相接处产生较大压应力，应力值相差较小。完建工况下，闸室边墙由于自重作用向内倾斜，使底板下部产生较大拉应力，而键槽闸室接缝下侧张开，减小了底板下侧的拉应力，所以键槽闸室最大拉应力比整体式闸室最大拉应力小。高水工况下闸室在内侧较大水压力作用下向外侧倾斜，边墙外侧角点受到较强挤压作用产生较大压应力，底板上部中心产生最大拉应力；此时键槽闸室接缝上部张开，中间底板与边底板连接较差，底板弯矩减小，所以底板上部最大拉应力小于整体式闸室底板上部最大拉应力。4种工况下，闸室结构底板均受到较大的拉应力和压应力，键槽闸室在4种工况产生的最大拉应力分别为检修工况410 kPa、低水工况460 kPa、完建工况800 kPa、高水工况1 080 kPa，显然高水工况和完建工况闸室底板产生的最大拉应力相比其他两种工况下更大。分析可知，完建和高水工况产生更大的拉应力，对结构更加不利，而此时键槽接缝的存在对减小拉应力起到了很好的作用。

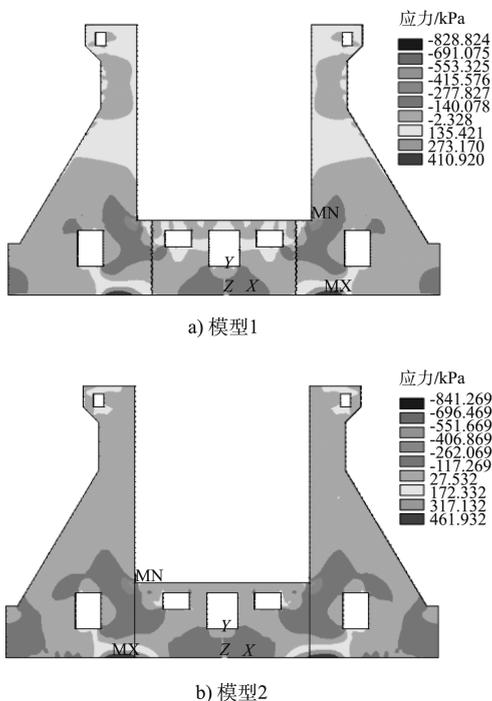


图4 检修工况

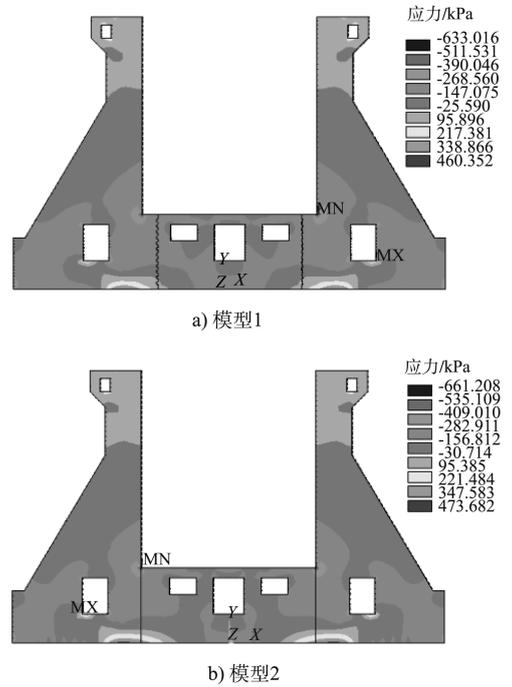


图5 低水工况

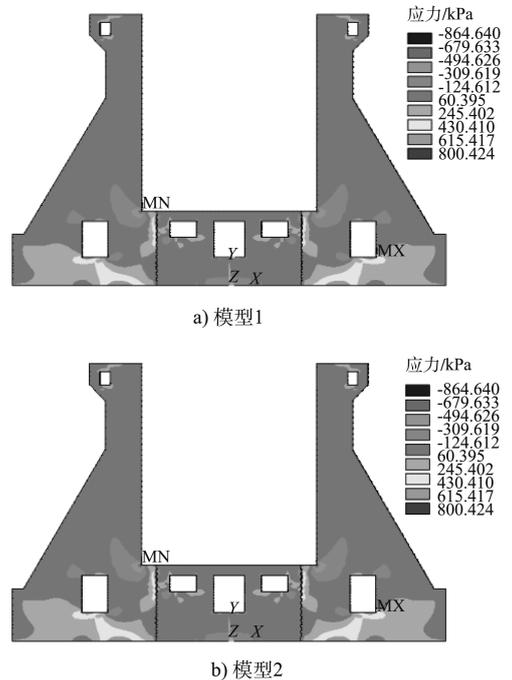
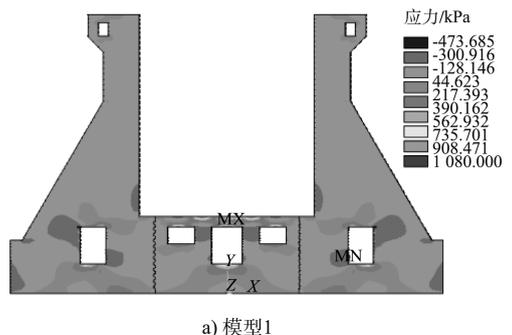


图6 完建工况



a) 模型1

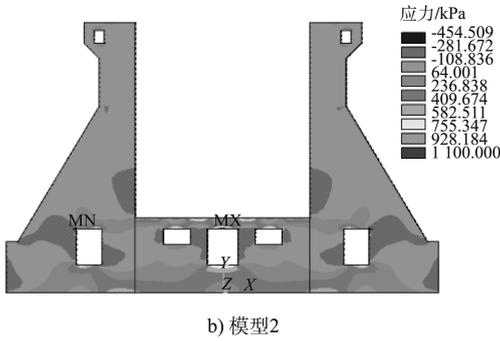
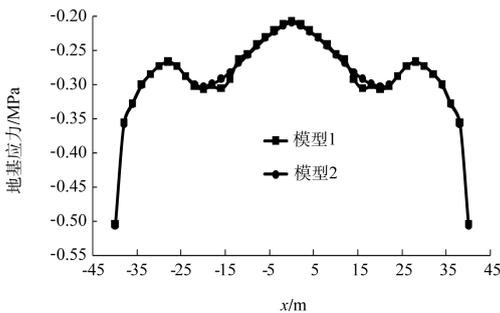


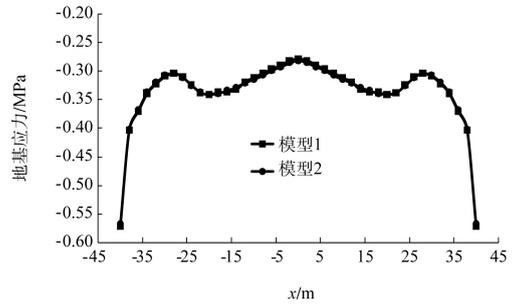
图 7 高水工况

2.2 地基反力

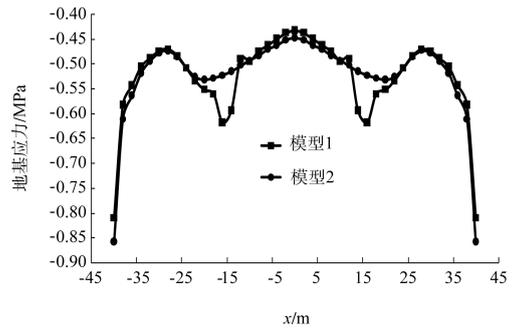
图 8a)~d) 分别为 4 个工况下键槽闸室和整体式闸室地基反力对比。从图中可以看出, 检修工况和低水工况两闸室地基反力分布规律相似, 数值相差不大, 这两种工况键槽闸室接缝开度小, 接缝两侧结构协同作用好, 结构受力特性与整体式结构相似。完建工况键槽闸室和整体式闸室地基反力分布略有差异, 由于荷载的作用键槽闸室边墙有向内偏转的趋势, 接缝下部开度较大, 键槽附近地基反力略有增大, 增加值小于 95 kPa; 而整体式结构整体性好, 地基反力分布较均匀。高水工况闸室在内侧较大水压力作用下向外侧倾斜, 键槽闸室接缝上侧张开, 键槽位置边底板一侧地基反力减小, 中间底板一侧地基反力略有增大, 变化幅度小于 67 kPa, 而整体式结构整体性好, 地基反力分布较均匀。在 4 种工况下键槽闸室与整体式闸室地基反力分布规律相似, 底板中心应力最小, 向两侧增大, 在边墩重心附近取得较大值。其中完建工况时闸室外侧水位与底板底高程齐平, 底板不受扬压力作用, 所以完建工况地基反力比其他 3 种工况大。分析可知, 整体式闸室结构地基反力更加均匀, 键槽闸室的存在使结构地基反力在接缝处略有增加。



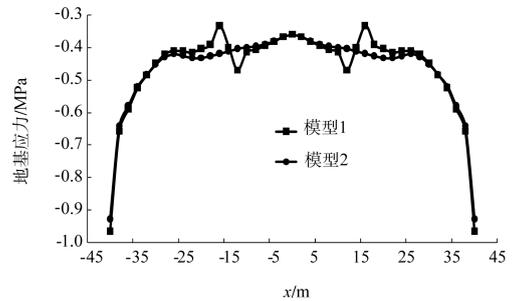
a) 检修工况



b) 低水工况



c) 完建工况



d) 高水工况

图 8 各工况地基反力

2.3 底板弯矩

图 9a)~d) 分别为 4 个工况下键槽闸室和整体式闸室底板弯矩分布对比。检修和低水工况键槽闸室接缝的接触咬合作用强, 其底板弯矩值与整体式闸室相近, 键槽闸室底板最大正弯矩值略小于整体式闸室。完建工况在整个底板上键槽闸室弯矩值小于整体式闸室, 中间底板上两闸室弯矩数值相差较大, 键槽闸室比整体式闸室弯矩小很多, 其原因为荷载作用下边墙向内倾斜, 整体式结构中间底板与边底板刚性连接, 中间底板下侧受到较大的拉应力, 而键槽闸室接缝在荷载作用下会张开, 中间底板所受拉应力较小, 故键槽闸室中间底板的弯矩值较小; 此时键槽闸室底板最大正

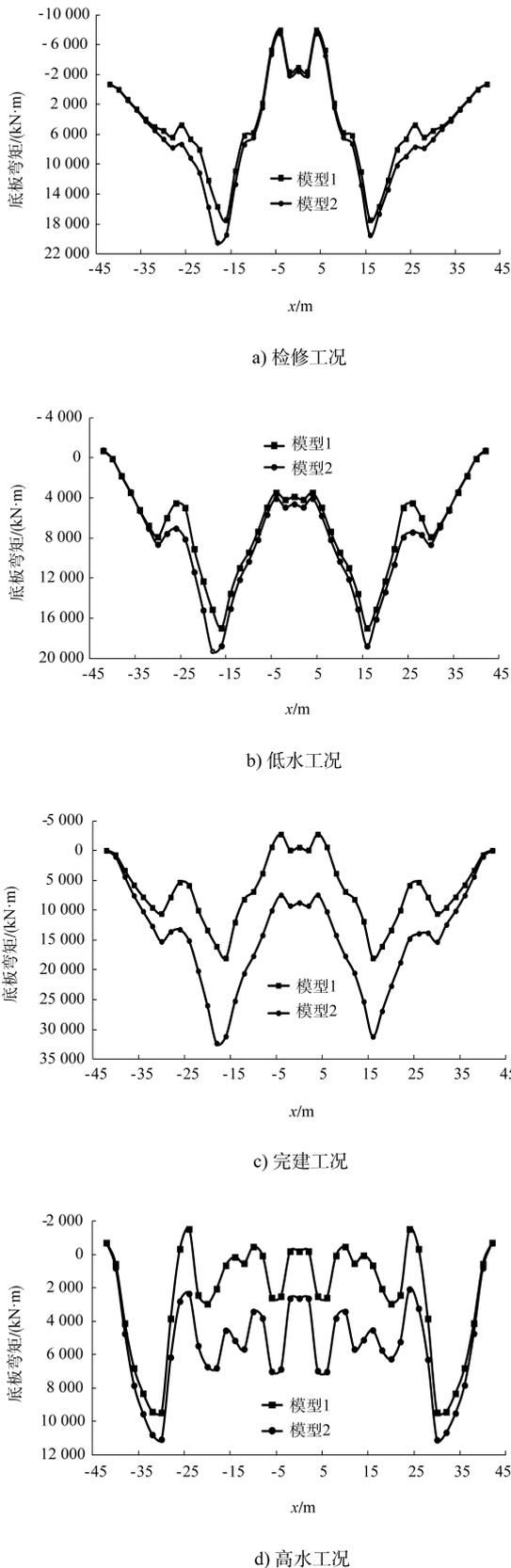


图9 各工况底板弯矩

两侧结构协同作用差，边底板对中间底板的影响小，中间底板弯矩较小，而整体式闸室边底板和中间底板是一个整体，由于两者的协同作用整体式闸室中间底板弯矩值比键槽中间底板弯矩值大 2 800 kN·m 左右。由图可知，前 3 种工况在底板与边墙相接截面取得最大正弯矩，高水工况在边底板中心产生最大正弯矩，其中完建工况键槽闸室底板弯矩值为 18 016 kN·m，整体式闸室底板弯矩为 31 163 kN·m，远大于其他 3 种工况；检修工况底板受到扬压力和边墩自重作用，在底板中心附近产生较大负弯矩 -7 962 kN·m，其他 3 种工况无较大负弯矩产生。分析可知，键槽缝的接触状态影响结构弯矩的分布和数值，底板正弯矩在完建工况取得最大值，而此时键槽缝的存在可有效减小闸室中间底板的弯矩。

3 结论

1) 检修工况和低水工况下，键槽接缝接触较好，接缝两侧结构协同作用强，键槽船闸与整体式闸室的结构应力、弯矩以及地基反力分布规律均相似。两模型均在底板底部产生较大的拉应力，在边墙内侧与底板顶部相接处产生较大压应力，在边墩重心附近地基反力较大；边墙与底板相交的截面附近产生最大正弯矩，检修工况两模型弯矩值分别为 15 647、19 410 kN·m，低水工况其弯矩值分别为 15 106、18 725 kN·m；检修工况底板受到扬压力和边墩自重作用，在底板中心附近产生较大负弯矩分别为 -7 962、-7 486 kN·m，其他 3 种工况无较大负弯矩产生。

2) 完建工况闸室边墙由于自重作用向内偏转，两模型在底板底部产生较大弯矩和拉应力，其弯矩值分别为 18 016、31 163 kN·m，拉应力值分别为 800、1 090 kPa，键槽闸室底板底部拉应力较小；两模型在接缝处附近产生较大地基反力，整体式闸室底板的地基反力略小。计算结果表明，底板正弯矩在完建工况取得最大值，键槽缝的存在可有效减小闸室中底板的最大正弯矩，对结构受力有利。

弯矩比整体式闸室底板最大正弯矩小 13 147 kN·m。高水工况在荷载作用下键槽闸室接缝张开，接缝