



方块码头安装偏差过大的计算分析及解决办法

汪舟红¹, 许伟群²

(1. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510230;

2. 中交四航局第三工程有限公司, 广东 广州 510230)

摘要: 依据安哥拉某重力式方块码头施工过程中发生的安装偏差超标的实例, 根据海侧实测数据, 利用静力计算、修正静力计算、有限元分析计算 3 个阶段的渐进过程分析偏差超标方块的受力情况, 为后续工作的合理安排提供依据, 在解决施工问题并保证进度方面具有普遍的参考意义。

关键词: 方块码头; 安装偏差; 接触模型; ANSYS

中图分类号: U 656.1⁺ 11

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)03-0066-08

Calculation analysis and solution for exceeded install tolerance of block quay wall

WANG Zhou-hong¹, XU Wei-qun²

(1. CCCC Fourth Harbor Consultants Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;

2. The Third Engineering Company of CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: Taking the exceeded deviations of block installation during construction of Angola certain gravity block type quay wall for example, according to the sea-side actual measurement data, and using three stages of gradual processes analysis including static calculation, amended static calculation, and finite element analysis, we analyze the stress of blocks exceeding the install deviation to provide a basis for the reasonable arrangement of the follow-up work, and serve as reference for solving the construction problem and ensure the construction progress as well.

Keywords: block quay wall; install deviation; contact model; ANSYS

1 工程概况

安哥拉某重件泊位采用重力式实心方块结构, 码头立面采用错缝布置, 方块典型断面见图 1, 为方便安装定位及增加码头整体稳定性, 每层方块设置凹凸榫。单个块体质量约 250 t, 底面积约 30 m², 方块起吊采用马腿吊孔吊装工艺。安装偏差执行英标 (表 1)。

表 1 方块安装允许偏差

偏差	本项目采用 标准 (英标) /mm	对应国标/mm
平面偏差	± 25	± 50
相邻方块顶面高差	10	30
铅垂度偏差	12	

其中某一段安装完后实测偏差值 (墙后已完成块石抛填) 40% 超出要求, 统计实测临水面相邻方块的高差值, 30% 高差处于 10 ~ 20 mm, 个别方块超出 30 mm, 最大达 40 mm。咨工提出暂停其他段的方块安装工作, 责令整改。因关键工作受阻, 各方都积极谋划寻找最优解决办法, 尽量减少工期损失。

2 定性分析

2.1 外部自然条件良好

本工程施工区域有掩护, 施工期波浪很小, 无海流, 环境影响因素几乎可以忽略。

收稿日期: 2015-07-17

作者简介: 汪舟红 (1983—), 女, 硕士, 工程师, 从事港口航道设计。

2) 当上部方块悬臂时(图 4), 除需验算上述 2 条之外还需补充下层方块的稳定验算, 不考虑上部方块的自重传递。以 B3 方块为例, 核算 B3 的重力能否抵抗墙后土体自重土压力、均载土压力和剩余水压力、墙前系缆力等水平荷载(图 5), 其他几层方块类似处理。

经计算, 部分长悬臂方块抗弯剪不满足, 每一层的方块抗滑稳定验算不满足, 底层方块最危险, 最小安全系数 0.88, 未到达 1 的要求。

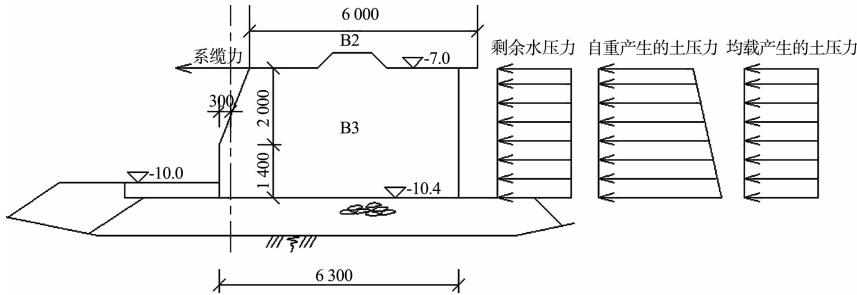


图 5 B3 方块受力分析 (高程: m; 尺寸: mm)

静力计算不满足的原因在于假设的长悬臂违背了力学平衡原理, 在上部荷载作用下方块会发生自我调整, 必定会在长悬臂下方存在一个接触点, 图 4 显示的临空状态只反映了临水侧的情况, 极有可能在背水侧有接触。同时为了保守考虑, 完全忽略上层方块的自重, 也即自重传递受限, 但水平荷载、剩余水压力、土压力、系缆力等传递依旧按正常传递计算, 互为矛盾。单独的脱离体无法验算抗倾, 因为一旦发生倾覆, 必然连同上层方块一起受力, 与脱离体的假设相矛盾。接触实际应为一个区域, 考虑成点接触过于保守。

3.2 修正后的静力计算

因为存在上述缺陷, 与咨工讨论之后调整了计算原则:

- 1) 按照实测数据考虑接触宽度, 把简支梁调整成多跨连续梁(图 6)。
- 2) 补充复核接触面的承载力。
- 3) 稳定计算考虑上部方块的自重传递, 从立面中扣出一组方块(图 7), 验算这组独立体每一层方块的抗倾抗滑(不考虑立面方向的滑动和倾覆, 仅做断面方向的稳定验算)。

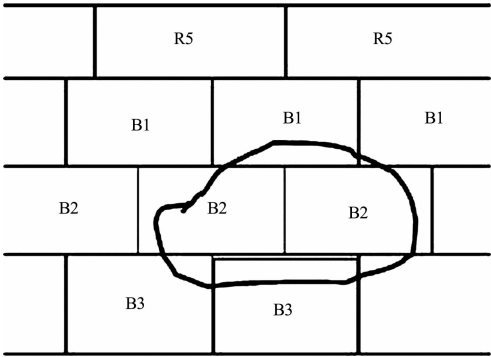


图 4 上部方块悬臂

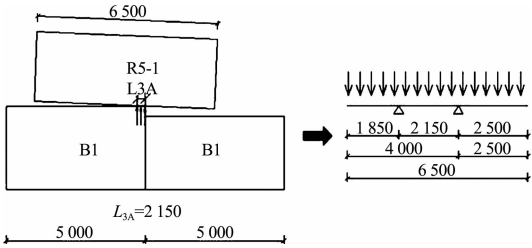


图 6 优化后手算法简图 (单位: mm)

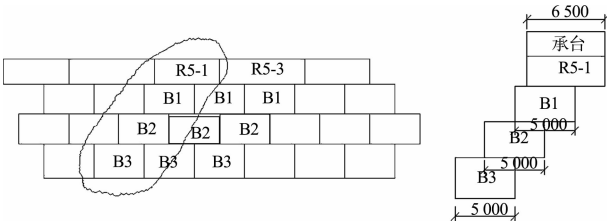


图 7 稳定计算独立体 (单位: mm)

结果显示, 依旧有个别长悬臂块体抗弯抗剪计算不满足要求, 各层抗倾验算也不满足要求。

尽管临水面的实测结果显示悬臂很长, 甚至个别方块海测实测无接触(图 7), 因方块墙后已抛填块石, 无法测探, 实测数据仅代表海测接触情况, 实际上肯定存在其他接触面(如凹凸樨接触或背水侧接触), 方块不可能出现悬空状态, 否则违反了力学平衡。如果能在长悬臂下加以支持垫,

从计算上可大大减小块体内力, 实际受力也更安全。

假设的模型将胸墙独立出来, 大幅减少了胸墙长度 (实际胸墙长 15 m) 导致显著缩减系缆力的扩散宽度, 相当于这组独立体均需抵抗 12.5 kN 的系缆力, 越上层的块体越容易滑动, 需要调用上下层方块之间凹凸榫才能使每一层方块的抗滑计算满足要求, 但对于抗倾, 底层最不利, 安全系数 0.82, 存在倾覆风险。

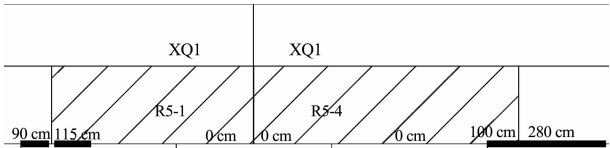
尽管各偏差下实际方块的受力很复杂, 假定的计算原则与实际情况存在差异, 但简化的静力计算在一定程度上可起到指导和参考作用。

拟采用灌浆封堵方案, 但由于工期紧张, 希望能先浇筑胸墙。咨工指出, 对于浇筑胸墙和修补灌浆的先后顺序还需计算之后确定, 如果复核施工期 (考虑胸墙自重、剩余水压力、土体自重产生的土压力, 不考虑上部使用荷载) 方块的稳定和抗剪抗弯应力能满足要求, 那么先浇筑胸墙, 浇筑胸墙一定程度上有助于下部方块的重新调整, 否则先修补灌浆。

3.3 ANSYS 有限元分析

根据上文的分析论述, 静力计算简化成线性梁的方法无法考虑方块实际的接触情况, 采用 ANSYS 有限元模型进行模拟, 更接近真实, 计算原则如下:

1) 目标方块与下层方块的接触。采用只受压不受拉的弹簧单元模拟, 弹簧刚度取与混凝土刚度等效, 方块采用实体单元。以凹榫为界, 凹榫前侧临海侧按照实测数据考虑接触, 凹榫后侧考虑全部接触。以图 8 中的 R5-4 卸荷板为例, 临水侧实测接触宽度 1 m, 凹榫前侧考虑接触面积 1.74 m × 1 m, 凹榫位置不考虑接触, 凹榫后侧接触面积 2.4 m × 8.5 m (图 9)。R5-4 卸荷板应力云图见图 10。



注: 粗线表示接触, 粗线上数据表示实测接触宽度。

a) 卸荷板实测接触宽度

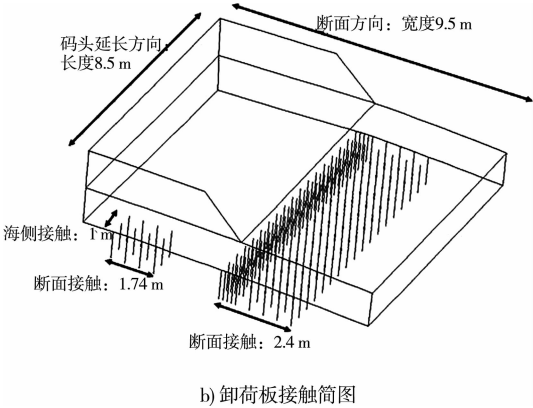
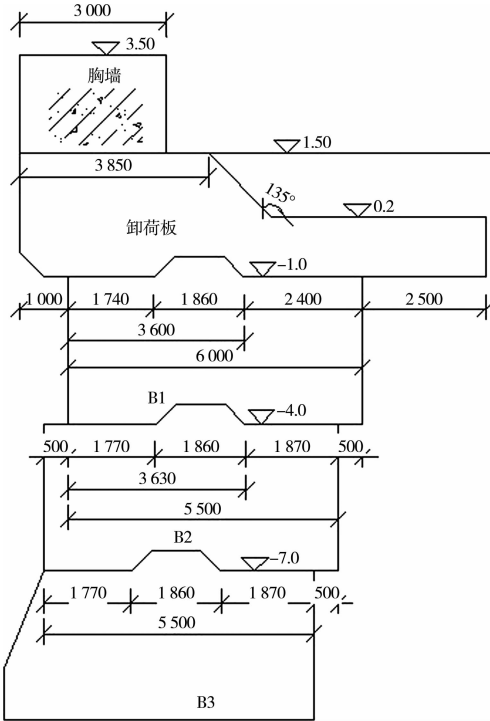
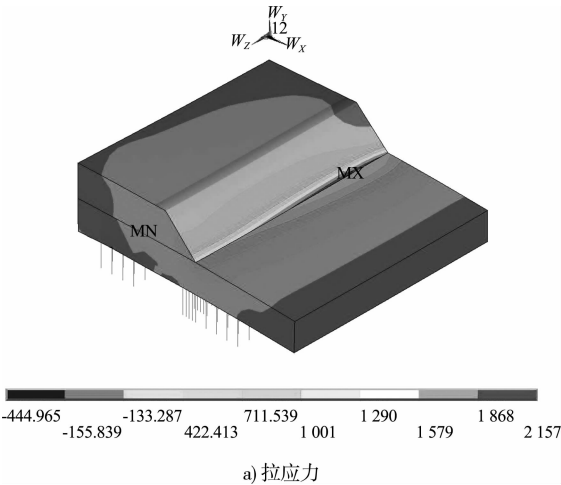


图 8 R5-4 卸荷板接触模型



注: ① 卸荷板与上部胸墙由钢筋连成整体; ② 沿码头纵向, 卸荷板长度 6.5 m 和 8.5 m 间隔布置, 方块长度均为 5 m。

图 9 典型断面方块细部尺寸 (高程: m; 尺寸: mm)



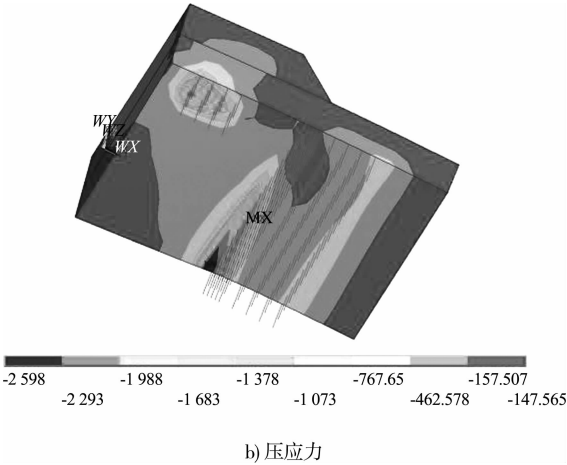


图 10 R5-4 卸荷板应力云图(单位:kPa)

2) 目标方块与上层方块的接触：通过荷载传递体现接触，即上部荷载通过接触面传递给目标方块。以凸樁为界，凸樁前侧临海侧包括凸樁位置按照实测数据考虑接触，凸樁后侧考虑全部接触。以图 11 中的 B1 为例，临水侧只与 R5-3 有接触，实测接触宽度 1 m，B1 以上的所有荷载在前侧仅通过 $3.6\text{ m} \times 1\text{ m}$ 接触面积传递到 B1，凸樁后侧接触面积 $2.4\text{ m} \times 5\text{ m}$ (图 9)，荷载传递同理想状态。

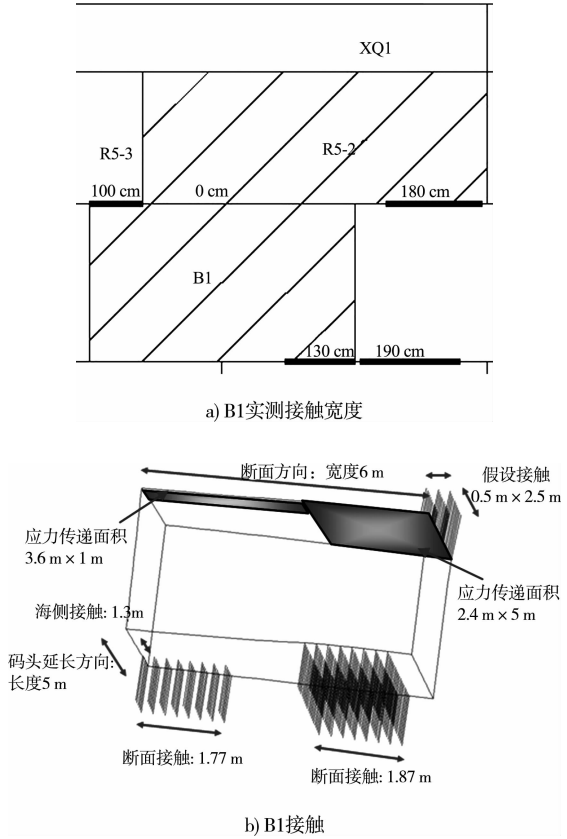


图 11 B1 接触模型

3) 验算施工期工况，墙后填料填至 1.5 mCD，荷载包括施工荷载、胸墙自重、方块自重、土体自重、剩余水压力、土压力，考虑水平荷载的正常传递，但是作为稳定荷载的结构自重保守起见，只考虑本层自重加上 0.5 倍的本层以上块体自重。

每层各选取一个最为不利块体，因底层 B3 与柔性基床接触，认为完全接触，故予以忽略。

根据图 11 的实测数据，B1 方块顶面仅与 R5-3 接触，接触宽度为 1 m，与 R5-2 无接触；底面与 B2 接触，接触宽度为 1.3 m。上部荷载通过顶面左侧 1 m 宽度往下传递，而海侧下部仅右侧接触，形成一种受扭状态，为控制工况，在这种扭矩作用下，B1 顶面右侧势必会与 R5-2 底层接触，故为了保证有限元计算的收敛性，在 B1 顶面右侧 $0.5\text{ m} \times 2.5\text{ m}$ 范围内采用与底面接触弹簧相同属性的弹簧约束其竖向位移。

理想状态下，上部传递给 B1 方块的荷载可转换成前趾 156 kPa、后趾 0 kPa 的三角形应力，在凸樁后侧点处，对应的应力为 60 kPa。

在有安装偏差的情况下原本由 5 m 长度分担的荷载只通过 1 m 接触往下传递，即该区域承担的荷载为：前趾 $156\text{ kPa} \times 5 = 780\text{ kPa}$ ，后趾 $60\text{ kPa} \times 5 = 300\text{ kPa}$ ，凸樁后侧区域按照计算假定考虑全部接触，即 $5\text{ m} \times 2.4\text{ m}$ 区域按照理想状态传递荷载，承受前趾 60 kPa、后趾 0 kPa 的三角形荷载（图 12）。B1 有限元模型见图 13，应力云图见图 14。

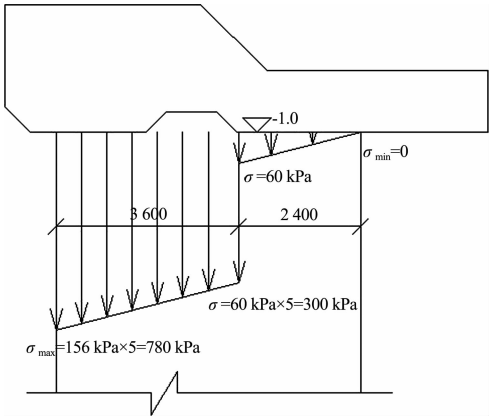


图 12 应力传递

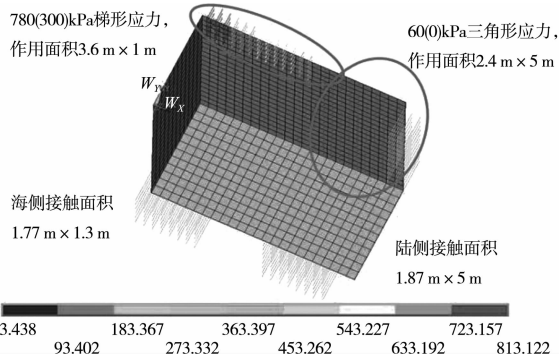


图 13 B1 有限元模型 (单位: kPa)

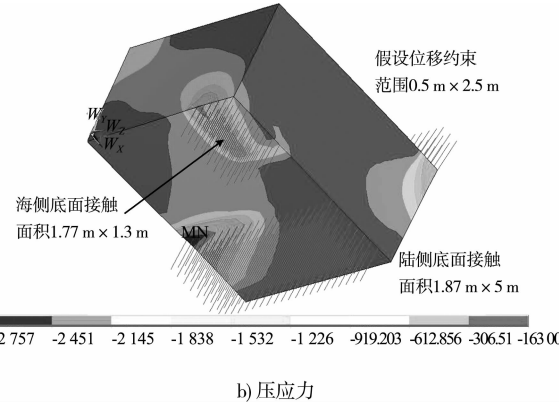
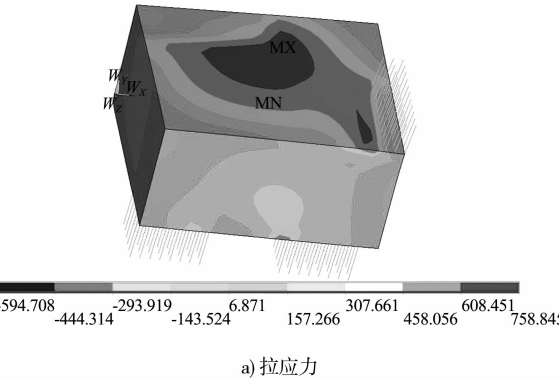


图 14 B1 应力云图 (单位: kPa)

分析图 15 的实测数据,按照本节的接触假设原则,顶层和底层接触均发生在方块右侧,形成同侧受压的状态,记为工况 1。因本文的有限元计算原则是针对现场的实际情况临时讨论所得,尚未有文献资料可循,为了尽可能保证计算的全面性,不遗漏最不利受力状态,故 B2 顶面可考虑完全传递荷载(图 16),则形成顶面正常受力,底面右侧接触的受扭转状态,记为工况 2。工况 1,同前述 B1 方块,先求出理想状态下的方块顶面前

后趾应力,再考虑实际安装偏差,海侧荷载仅通过接触宽度传递,故对应所承受的荷载为理想状态下的 5/2.45 倍,凸樁后侧应力按照理想状态考虑,见图 17a)。工况 2, B2 底层接触按照实测数据,即 1.7 m,顶层荷载考虑理想状态传递,前趾 204 kPa、后趾 58 kPa 的梯形分布荷载作用范围 5.5 m x 5 m,有限元模型见图 17b)。经比较,控制工况为工况 2,这是因为工况 2 左侧海侧底面悬空而左侧海侧顶面受压形成一种比工况 1 更为危险的受扭状态。B2 应力云图见图 18。

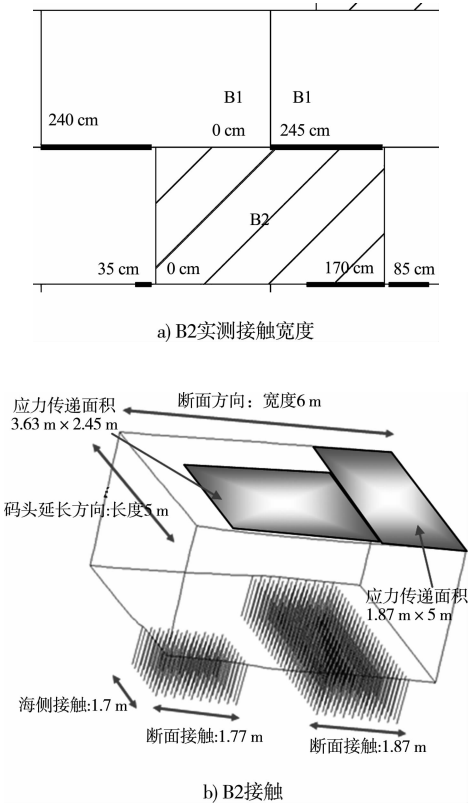


图 15 B2 接触模型

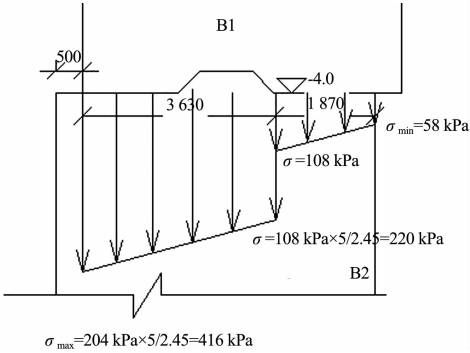
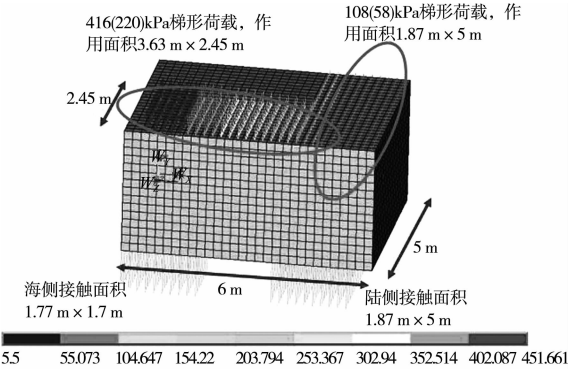
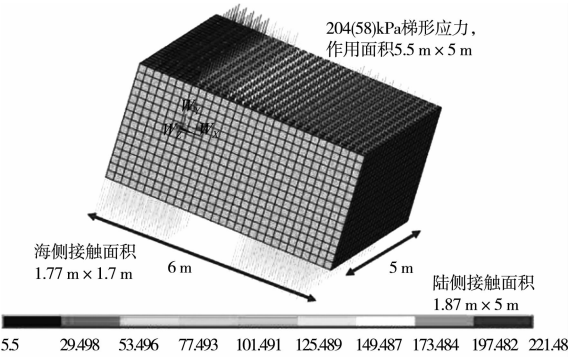


图 16 应力传递 (高程: m, 尺寸: mm)

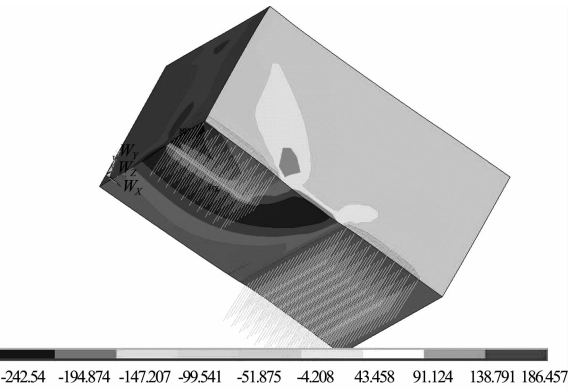


a) 工况1

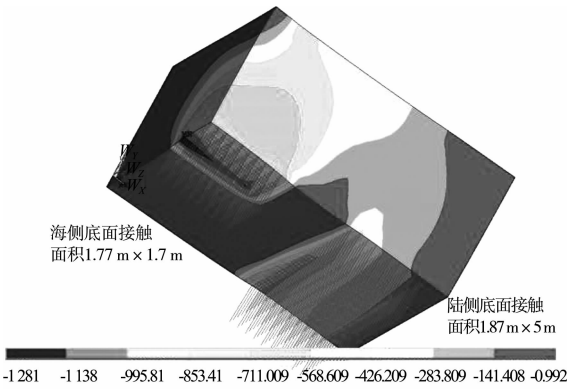


b) 工况2

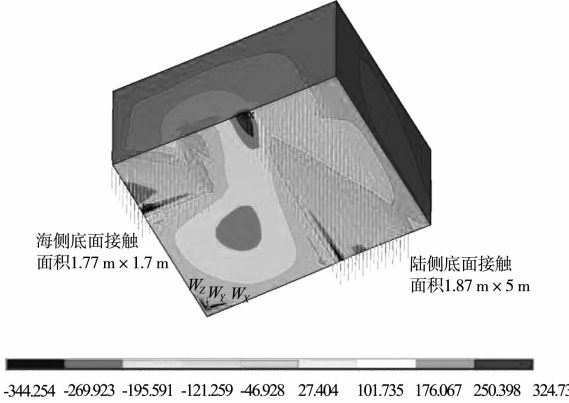
图 17 B2 有限元模型 (单位: kPa)



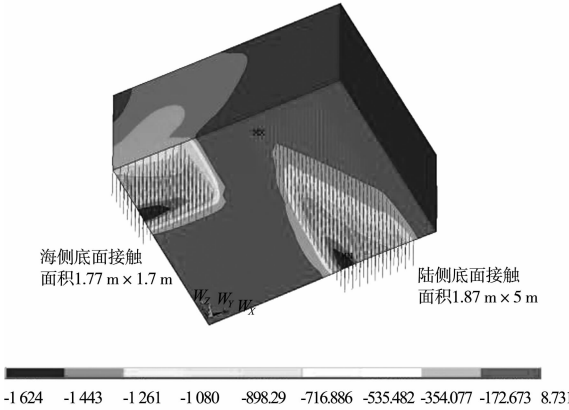
a) 工况1拉应力



b) 工况1压应力



c) 工况2拉应力



d) 工况2压应力

图 18 B2 拉压应力云图 (单位: kPa)

上述 3 个典型模型的计算结果见表 2。

表 2 有限元计算结果

模型	混凝土等级	混凝土抗压强度/MPa	混凝土抗拉强度/MPa	最大拉应力/MPa	最大压应力/MPa
R5-4	C35/45	34.5	1.76	2.157	2.598
B1	C30/45	27.6	1.57	0.759	2.757
B2	C30/37			0.325	1.624

尽管计算结果显示卸荷板 R5-4 最大拉应力超出素混凝土抗拉强度，查看图 10，最大值仅出现在局部，在卸荷板顶层配有一层直径 32 mm、间距 120 mm 的钢筋，故足以抵抗 2.157MPa 的拉应力，所以 3 个方块的施工期受力均能满足要求。

4 施工修补

根据 3.3 节的有限元分析，采用先浇筑胸墙后全面修补的施工顺序是可行的。对少数长悬臂

方块,在海侧水平缝处建议先垫临时支垫,保障应力传递,浇完胸墙后,再处理剩下的安装偏差超标的块体,采用同样的支垫封堵水平缝。支垫摆放前清理缝里的杂物,支垫均采用薄膜加工成的袋子,每个袋子宽度约为 1 m,连续摆放数个袋子,往里泵送浆料,堵住所有的水平缝,修补完成后派潜水员检查,发现灌浆袋与方块紧贴,效果非常理想。后因商务原因码头后补了堆载预压,观测沉降位移均未发现异常。

5 结语

海外项目对施工精度要求往往很严格,在水下施工条件下相邻方块顶面高差偏差控制在 10 mm 以内难度较大,综合分析水下探摸实测数据,利用静力计算手法和 ANSYS 有限元软件对问题简化处理,得出如下结论:

- 1) 方块顶面接触面积以凸槽为界,海侧(包括凸樁位置)按照实测数据考虑接触,凸樁后侧考虑全部接触。上部荷载通过方块顶面接触面积传递,传递的荷载需在理想状态基础上考虑扩大系数,大小为方块延长与实测接触宽度的比值。
- 2) 方块底面接触面积以凹槽为界,海侧按照实测数据考虑接触,凹樁后侧考虑全部接触,凹

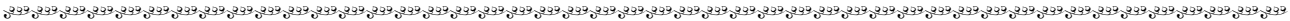
樁位置考虑不接触。

- 3) 模型计算需尽可能全面考虑计算工况,上下层对角接触的类似受扭状态的方块受力更为不利。
- 4) 多数安装偏差不达标的方块都满足施工期先浇筑胸墙的受力要求。
- 5) 计算分析仅作为一种辅助手段,在施工过程中还需综合考虑各道工序之间的联系,严格控制每个分项工程的施工精度,才能确保最后方块的安装精度符合规范要求。例如严格控制底模的平整度,建议同类工程采用钢制底模,浇注预制方块时要严格控制侧模高度、顶面混凝土的浇注高程和平整度;为避免多次起放方块破坏基床平整,需严格控制起重船移船定位精度;严格限制累计偏差,比如对负偏差及时用正偏差的方块进行修正,确保累计误差不至影响到顶层方块。

参考文献:

[1] BS 6349-2: 2010 Maritime works-part 2: Code of practice for the design of quay walls, jetties and dolphins [S].
[2] JTS 167-2—2009 重力式码头设计与施工规范[S].

(本文编辑 武亚庆)



· 消 息 ·

振华重工产品进入第 92 个国家和地区

2 月 22 日,振华重工为瓦努阿图建造的桁架桥项目发运,振华重工产品进入了第 92 个国家和地区。此项目包括 2 座桁架桥,采用标准化建造,每段采用螺栓连接,段与段之间、零件与零件之间能够实现精准互换。项目于 2015 年 11 月在国内开工建造,2016 年 2 月完工。项目的修建,将为当地居民的出行带来便利,对当地物流及旅游经济发展具有重要意义。
(摘编自《中国交通建设网》)