

立波和近破波对双排钢板桩围堰作用的试验研究

朱艳^{1,2}, 林靖^{1,3}, 彭铭^{2,4}

(1. 中船第九设计研究院工程有限公司, 上海 200063; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092;
3. 上海市海洋工程和船厂水工特种工程研究中心, 上海 200063;
4. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要:为探明不同波态时双排钢板桩围堰的不同响应,采用光纤测试技术,通过水槽试验对比研究立波和近破波对双排钢板桩围堰产生的波浪荷载作用机理。结果表明:立波对双排钢板桩围堰的主要不利作用是反射波导致的海侧钢板桩踢脚冲刷;近破波对双排钢板桩围堰的主要不利作用是巨大的破碎能量和快速冲击导致钢板桩变形,可能造成钢板桩接头错位、渗漏、冲刷等事故。

关键词:立波;近破波;双排钢板桩;围堰;水槽试验

中图分类号:TV641.4 文献标志码:A 文章编号:1006-7647(2022)01-0085-06

Experimental study on influence of standing waves and near breaking waves on a double steel sheet pile cofferdam//ZHU Yan^{1,2}, LIN Jing^{1,3}, PENG Ming^{2,4} (1. China Shipbuilding NDRI Engineering Co., Ltd., Shanghai 200063, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Research Center of Ocean & Shipbuilding Engineering, Shanghai 200063, China; 4. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstracts: To explore the response of a double-row steel sheet pile cofferdam under the condition of different wave modes, the effects of near breaking wave and standing wave on steel sheet piles was compared through flume test using optical fiber testing technology, and the mechanism of wave load caused by standing wave and near breaking wave was analyzed. It is found that the main unfavorable effect of standing waves on the double-row steel sheet pile cofferdam is the scouring of the seaside steel sheet piles caused by the reflected waves. The main unfavorable effect of the breaking wave on the double-row steel sheet pile cofferdam is the huge crushing energy and rapid impact during wave breaking. The deformation of the steel sheet pile may cause accidents such as leakage of the joint and soil erosion of the infilled sands.

Key words: standing wave; near breaking wave; double-row steel sheet pile cofferdam; water flume test

双排钢板桩围堰是由2排钢板桩、1道或多道钢拉杆、桩间回填砂共同组成的复合结构。双排钢板桩结构动力稳定性好、变形能力强、防渗性能好、工程适应性强,正越来越多地应用于海堤加固、海岸修复等重要工程。海岸带地区的双排钢板桩围堰将不可避免地受到周期性海浪,甚至极端风暴潮或海啸等动水压力作用。按照围堰面海侧基床水深和堰前水深的比值大小,可以将围堰坐落的基床分为暗基床、中基床、高基床。在不同的基床类型,波高和堰前基床水位条件下将产生远破波、近破波和立波的动水压力作用^[1],对双排钢板桩围堰的安全性能会造成不同程度的影响。

现有关于双排钢板桩围堰的研究可以分为静力分析和动力分析两大类。在静力分析方面,侯永茂

等^[2]对上海某大型船坞工程双排钢板桩围堰进行现场监测,并结合施工工况对大跨度双排钢板桩围堰的变形特性进行了研究。江杰^[3]分析了双排钢板桩围堰结构的冗余度,并通过冗余度指标得到不同结构对整体安全性的贡献。朱艳等^[4]基于贝叶斯方法开展了双排钢板桩的可靠度分析,发现贝叶斯方法可以有效融合统计数据和现场勘查资料。张玉成等^[5-6]采用有限元法对典型围堰支护结构进行了计算分析,得到了不同参数对围堰变形的敏感性。吴留伟等^[7]研究了滨海超深厚软土地基中双排钢板桩围堰设计方案与施工技术,并采用有限元模拟得到了不同施工工况下钢板桩、拉杆的受力状态以及围堰变形情况。Khan等^[8-9]开展了砂性地基和黏性地基双排钢板桩静力离心机试验,提出了影响双

排钢板桩静力稳定性的设计参数,结果反映了双排钢板桩围堰在静水压力和土压力组合下的受力和变形规律以及各参数的影响,但其受力与海岸带围堰所处的动水荷载和风、浪、流作用存在较大差异。现有静力分析方面的研究成果可以为理解双排钢板桩的结构特征和受力机理提供帮助,但难以为揭示波浪动水压力作用下双排钢板桩受力变形机理提供指导。双排钢板桩动力分析方面的研究成果相对较少,而其他结构形式围堰的波浪荷载方面的研究成果相对较多^[10-15]。刘春阳等^[16]基于 Drucker-Prager 本构模型 ANSYS 软件,分析了双排钢板桩海堤在地震和动水压力作用下结构的响应规律。Mitobe 等^[17]以 2011 年西太平洋大海啸为背景,开展了双排钢板桩堤坝的水槽模型试验,表明了双排钢板桩卓越的动力性能。但其模拟的双排钢板桩插入砂性土坝,与本文所述直立式围堰存在较大差异,而且模型坝高仅为 15 cm,未对结构构件、土体等进行监测,仅得到了双排钢板桩维持坝高有效性的部分结论。总体来看,现有针对波浪作用下双排钢板桩的动力性能研究相对缺乏,针对其他结构类型的相关研究成果很难直接应用于指导双排钢板桩结构的设计和施工。

为了简化计算,现有工程设计中常把波浪力简化为静力,该方法可以满足河流围堰等一般条件下的计算需求,但海岸带围堰波浪力幅值相对较高且破坏力较强,采用静力计算得到的结果常常偏于不安全。本文通过大型水槽模型试验研究,对比近破波和立波作用时双排钢板桩围堰的不同响应。通过高速摄像机分析围堰结构的变形发展规律,通过高频光纤测试技术获取钢板桩上的应力数据,进而揭示不同波浪类型作用下双排钢板桩围堰的动力响应规律。

1 模型试验

1.1 试验装置

模型试验在同济大学水利工程实验室的波流水槽试验装置上完成(图 1),水槽长 42 m,高 1.25 m,宽 0.8 m。造波系统由推波板、伺服电机、伺服驱动器、伺服控制器、运动控制卡、AD/DA 接口及计算机与外设等部分组成。造波机后侧设有直立式消能网,槽尾设有消能坡,可以消除波浪反射影响。造波系统可以模拟规则波、椭圆余弦波、孤立波等国内外

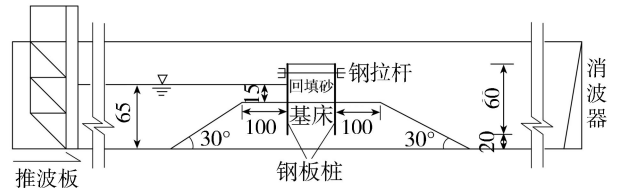


图 1 试验装置示意图(单位:cm)

常用的频谱,波高变化范围为 0.02 ~ 0.3 m。测试设备采用高速摄像机和光纤测试系统。

1.2 试验模型

试验原型为上海市长兴造船基地大跨度双排钢板桩围堰^[18],按照相似比 1 : 30 开展模型试验。双排钢板桩长 60 cm,插入基床深度 30 cm,围堰宽 30 cm,基床两侧肩宽 100 cm,两侧坡脚 30°,基床厚 50 cm(图 1)。双排钢板桩围堰试验中基床水深 d_1 为 15 cm,堰前水深 d 为 65 cm,其比值 $d_1/d=0.23$,小于 1/3,属于高基床。试验分为 3 个工况,对应的波高 h 分别为 4 cm、8 cm、12 cm,其中工况 1 和工况 2 属于立波,工况 3 属于近破波(表 1)。

表 1 试验工况

工况	堰前水深/cm	基床水深/cm	波高/cm	周期/s	波形
1	65	15	4	2	立波
2	65	15	8	2	立波
3	65	15	12	2	近破波

模型试验中的钢板桩用 1.5 mm 厚的 Q235b 钢板制作,高度为 600 mm,水槽宽度为 800 mm,预留橡胶止水带,见图 2。双排钢板桩顶部钢拉杆用不锈钢制作,基床和两排钢板桩之间的回填砂均采用中密石英砂,粒径 0.05 ~ 0.3 mm,天然摩擦角 30°。钢板与水槽两侧玻璃之间采用 U 型橡胶止水。

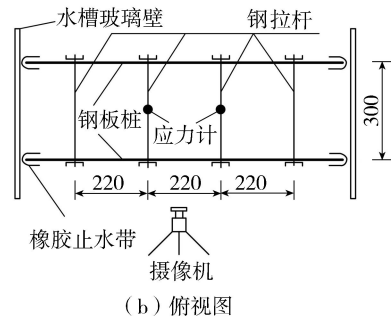
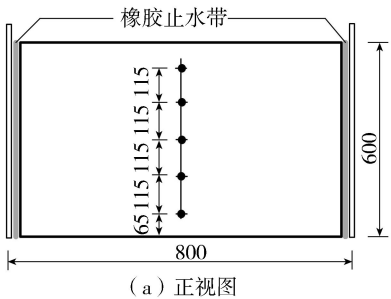


图 2 双排钢板桩围堰模型(单位:mm)

1.3 试验步骤

步骤 1 在水槽壁前后侧均绘制双排钢板桩围堰定位点和分层填砂定位线,分层铺填基床石英砂,每层厚度 10 cm。

步骤 2 在钢板桩的中间粘贴预先制作好的带有 5 个测点的光纤串,海侧钢板桩和陆侧钢板桩均

布置在迎水面,其中测点间距为 115 mm(图 2(a))。

步骤 3 基床石英砂铺填完成后,开钢板桩定位槽,并将钢板桩放入,两侧回填石英砂直至钢板桩两侧填砂密实,能够自立。

步骤 4 安装钢拉杆,调节至 30 cm 设计宽度,在两排钢板桩之间填入石英砂,边填边压实,直至钢拉杆下方。

步骤 5 在中间两根钢拉杆上粘贴单点光纤应力计(图 2(b)),单点光纤需要现场熔接,待钢拉杆上的光纤应力计充分干燥后,继续回填砂,直至与两排钢板桩顶部齐平。

步骤 6 钢板桩上的光纤串和钢拉杆上的单点光纤通过导线接入解调仪,在钢板桩围堰正面和侧面安装高速摄像机,利用高速摄像机得到钢板桩围堰的变形数据,利用光纤测试系统得到钢板桩和钢拉杆的应力数据。

步骤 7 试验时,水位升至 65 cm 后静置 30 min,然后作用波高为 4 cm(工况 1)的余弦波 10 min,而后停止 5 min,再依次作用波高为 8 cm(工况 2)和 12 cm(工况 3)的余弦波 10 min。

2 试验结果与分析

2.1 堰前波型及海床冲刷分析

a. 工况 1(波高 4 cm)。工况 1 设计波高为 4 cm,于围堰前形成立波,图 3 所示为一个完整的波浪行进周期。 $t=1\text{ s}$ 时,波面由下向上达到最大幅值,于围堰处形成波峰,并随即发生反射; $t=2\text{ s}$ 时,水质点由上向下运动达到最大幅值,形成波谷; $t=3\text{ s}$ 时,水质点再次达到波峰,与反射波部分叠加,形成比 $t=1\text{ s}$ 时更高的波峰。在波浪持续作用下,基床出现波浪形均匀砂纹。

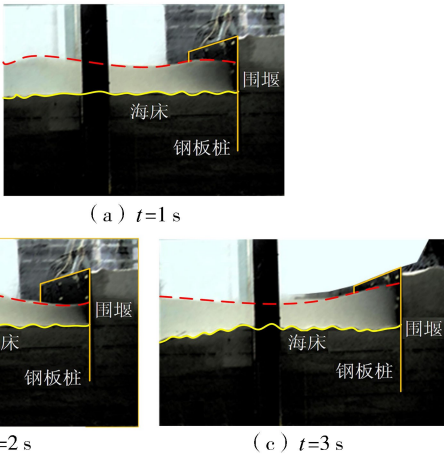


图 3 双排钢板桩围堰前的立波(工况 1,波高 4 cm)

b. 工况 2(波高 8 cm)。波高为 8 cm 时,依然形成立波,波浪同样存在波峰波谷(图 4)。与工况 1

不同之处在于,由于波高的增加导致波浪反射叠加效果更佳明显,较大的波谷吸力作用导致靠近海侧钢板桩的基床踢脚处产生明显冲刷,从而减小了外排钢板桩的插入深度。

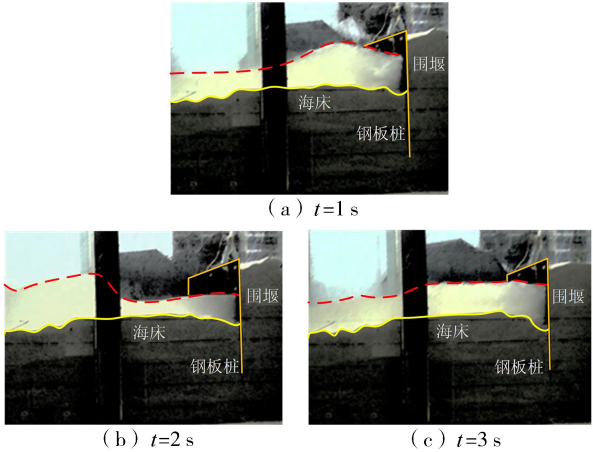


图 4 双排钢板桩围堰前的立波(工况 2,波高 8 cm)

c. 工况 3(波高 12 cm)。波高为 12 cm 时,围堰前形成近破波,见图 5。 $t=1\text{ s}$ 时,波浪在钢板桩处产生较大冲击波; $t=2\text{ s}$ 时,波浪破碎后退,下一次冲击能正在孕育形成; $t=3\text{ s}$ 时,波浪再次对钢板桩产生较大冲击,迫使外排钢板桩向内侧倾斜,内侧土体受挤压发生向内侧变形,外侧土体紧贴钢板桩向内变形。但由于外侧土体的约束作用,钢板桩尽管应力水平处于弹性阶段,但变形不能够完全恢复。而且,变形随着每一次波浪动荷载逐级累加,使得钢板桩弯曲度越来越大,应力不断增大。同时,较大的波浪在基床处产生淤积,一定程度增大了钢板桩外侧的土压力和变形。

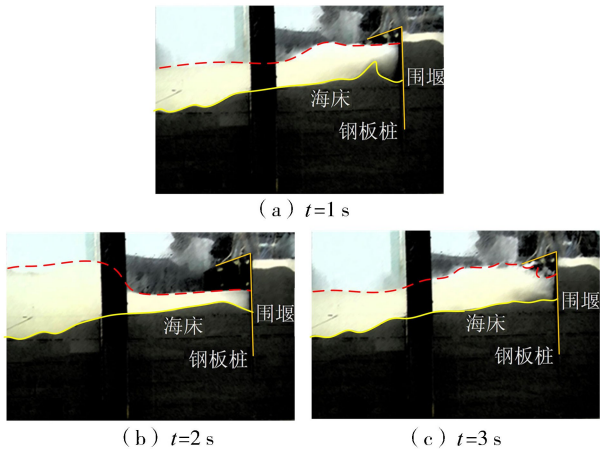


图 5 双排钢板桩围堰前的近破波(工况 3,波高 12 cm)

对比图 3 至图 5 可知,近破波工况,波浪在向双排钢板桩围堰推进时向上、向前卷积泥沙,波浪在破碎后,马上开始下一次冲击,因此近破波对钢板桩围堰的作用是周期性的压力。而立波对双排钢板桩围堰产生的是波峰压力和波谷吸力的循环。立波时,

在波谷吸力和反射波的作用下,会在海侧钢板桩踢脚处形成冲刷坑,而近破波波浪破碎后没有反射波,也不存在波谷吸力,因此,不会形成冲刷坑,而是不断的卷积泥沙,看似外排桩的插入深度增加,但增加的部分砂土密实度非常低,故所增加的深度并不能当成外排桩插入深度的真实增量。

2.2 钢板桩受力分析

对双排钢板桩围堰进行荷载分析:围堰海侧受到土压力、周期性改变的动水压力,以及波浪力(当围堰前发生立波时,波浪力为波峰压力和波谷吸力的循环;发生近破波时,仅为波压力的循环)作用,围堰陆侧受到土压力和静水压力作用。

由于3组试验中围堰前的水深均不变,故海侧土压力、陆侧静水压力及土压力均一致。影响围堰受力特性的关键荷载为周期性动水压力和波浪力。波浪力的计算较为复杂,参照JTS145—2015《港口与航道水文规范》中直立式建筑物波浪力的计算方法,本文立波波峰时水底处波浪力 P_d 、波谷时水底处波浪力 P'_d ,以及近破波时水底处波浪力 P''_d 均按式(1)计算。立波波峰时静水面处波浪力 P_s 和墙底处波浪力 P_b 分别按式(2)、式(3)计算;立波波谷时静水面处波浪力 P'_s 和墙底处波浪力 P'_b 分别按式(4)、式(5)计算。近破波时静水面处波浪力 P''_s 按式(6)计算,墙底处波浪力 P''_b 按式(7)计算。

$$P_d = P'_d = P''_d = \frac{\rho g H L}{\cosh(2\pi d)} \tag{1}$$

$$P_s = (P_d + \rho g d) \frac{H + h_s}{d + H + h_s} \tag{2}$$

$$P_b = P_s - (P_s - P_d) \frac{d_1}{d} \tag{3}$$

$$P'_s = \rho g (H - h_s) \tag{4}$$

$$P'_b = P'_s - (P'_s - P'_d) \frac{d_1 + h_s - H}{d + h_s - H} \tag{5}$$

$$P''_s = 1.25\rho g H \left[\left(13.9 - 36.4 \frac{d_1}{d} \right) \left(\frac{H}{d_1} - 0.67 \right) + 1.03 \right] \left(1 - 0.13 \frac{H}{d_1} \right) \tag{6}$$

$$P''_b = 0.6P''_s \tag{7}$$

其中 $h_s = \frac{\pi H^2}{L} \coth \frac{2\pi d}{L}$

式中: H 为建筑物所处波高; L 为波长; d 为建筑物前水深; ρ 为水的密度; g 为重力加速度; d_1 为墙前水深; h_s 为波浪中线超出静水面的高度。

由式(1)~(7)计算得到3种工况下立波和近破波水底处、静水面处和墙底处波浪力如表2所示。

2.3 钢板桩应力变化规律分析

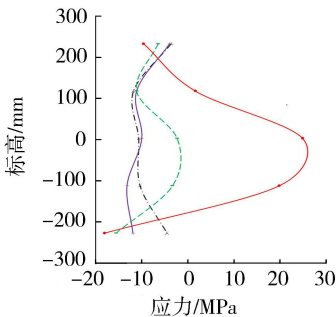
图6为光纤串测试得到的外排(海侧)和内排

(陆侧)钢板桩上的应力曲线。

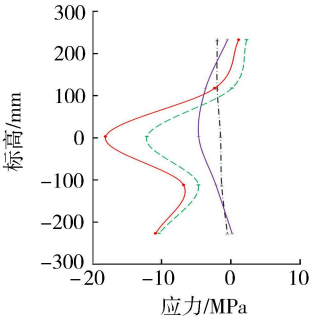
表2 3种工况下的波浪力

工况	波高/ cm	围堰前方的 波浪形态	波浪力/kPa		
			水底处	静水面处	墙底处
1	4	波峰	0.277	0.407	0.377
		波谷	0.277	0.384	0.365
2	8	波峰	0.555	0.826	0.763
		波谷	0.555	0.738	0.714
3	12	近破波	0.832	2.345	1.407

— 静水压力阶段 — 工况1 — 工况2 — 工况3



(a) 外排钢板桩



(b) 内排钢板桩

图6 不同工况内外排钢板桩应力分布曲线(以拉为正)

在工况1较小立波(波高4cm)的作用下,外排桩在土压力作用下产生向外侧的变形,由于有钢拉杆的存在,顶部变形较小,接近基床处变形最大,进入基床后在外侧土体侧限的作用下,变形逐渐变小。因此,外排桩外表面的应力整体出现负值,但在上端和下段钢拉杆和基床约束的作用下应力值变小。内排桩在土体的作用下出现整体向陆侧变形,由于受到钢拉杆和基床的约束,其类似单支点板桩受力,中部弯矩较大,测得应力也较大,上下应力较小。总体上,由于两排桩之间回填砂的作用较大,外侧波浪力较小,外侧波浪的作用仅对外排桩产生影响,对内排桩的影响较小。

在工况2较大立波(波高8cm)的作用下,随着外侧波浪力增大,应力出现S形反弯状。两排桩之间土体的向内侧变形使得内排钢板桩应力明显增大,基床面附近应力出现最大值。

在工况3近破波(波高12cm)的作用下,波浪在堰前半周期内发生破碎,产生远大于立波的动水

压力,使得外排桩产生巨大的向内侧向变形,最大位移出现在桩顶,同时,外排钢板桩在此工况下产生了巨大拉应力,最大弯矩出现在基床面以下 40 mm 的位置,根据其变形和应力特征,可将其视为悬臂板状,嵌固点位于基床面以下。尽管有两排桩之间的土体缓存作用,近破波强大的冲击能仍然通过钢拉杆和回填砂传递至内排桩,内排桩向内侧向变形和应力继续增大,表明近破波巨大的冲击能转化为双排钢板桩围堰的变形能,同时也说明了双排钢板桩具有良好的能量吸收能力,降低了波浪对围堰结构的破坏。

图 7 为钢拉杆的应力测试值。在静水压力阶段钢拉杆几乎不受力,表明静水压力作用下两排桩未发生相对变形。在工况 1 下,海侧钢板桩向陆侧弯曲,陆侧钢板桩向陆侧弯曲,但由于海侧变形较陆侧大,此时,钢拉杆呈相对受压状态;在工况 2 下,随着波浪荷载的增加,海侧钢板变形较陆侧钢板变形继续增大,钢拉杆上的压应力达到峰值;当工况 3 近破波发生时,双排钢板桩围堰在巨大的冲击能影响下整体向陆侧变形,海侧钢板桩在卷积淀高砂的作用下,变形增幅较小,陆侧钢板桩由于漫顶和渗漏冲刷的双重作用,向陆侧变形量增大,随着周期性的近破波的反复冲击,拉杆应力逐渐由压应力向拉应力转变,但由于海侧钢板桩的变形仍然比陆侧大,所以钢拉杆上的应力尚未达到初始预拉力。

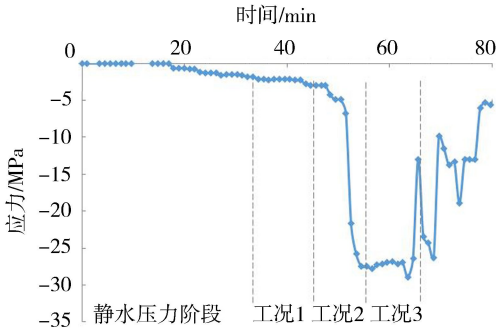


图 7 钢拉杆所受应力分布规律(以拉为正)

图 8 为双排钢板桩围堰及基床在工况 1、工况 2 和工况 3 下的最终形态。工况 1 下,双排钢板桩围堰几乎无明显可见变形,海侧基床呈现波浪式砂纹,堰顶产生少量越浪冲刷,陆侧基床保持完好。工况 2 下,由于前述分析,海侧钢板桩踢脚冲刷,插入深度下降,导致钢板桩围堰变形增量较大,产生局部渗漏,引起陆侧钢板桩踢脚少量冲刷。工况 3 下,尽管近破波波高(12 cm)不及工况 2 立波叠加后的波高(16 cm)大,然而在巨大的冲击能下,变形较工况 2 有明显增大,钢板桩脱离水槽玻璃壁,形成较大流量渗漏,同时,破碎波越过海侧钢板桩顶,持续冲刷堰顶填砂和陆侧基床,进一步导致围堰向陆侧变形。



(a) 工况1



(b) 工况2



(c) 工况3

图 8 不同工况双排钢板桩围堰及基床最终形态

2.4 有限元数值模拟对比分析

利用前述规范计算波浪力最大值,作为循环荷载的峰值加载于双排钢板桩围堰的海侧,开展有限元数值模拟,计算结果见表 3。对比光纤测试值可见,计算变形较实测偏小非常多,而计算应力较实测偏大 30% 左右。

表 3 有限元数值模拟计算结果

工况	外排桩最大应力/MPa	内排桩最大应力/MPa	外排桩最大变形/mm	内排桩最大变形/mm
1	27.07	27.09	0.26	0.20
2	31.94	32.01	1.04	0.78
3	36.80	43.95	3.70	2.80

造成钢板桩变形计算误差较大的原因主要有以下两点:①试验中存在冲刷和渗漏,有限元计算中未模拟冲刷和渗漏;②真实的状态是土体发生变形后无法恢复,钢板桩在压力和吸力作用下会发生“左摇右摆”,由此在钢板桩和土体之间产生了间隙,加剧了渗流和渗漏的影响,改变了回填砂的密实度和含水率。这些因素在数值模拟中并未充分考虑。

3 结 论

a. 双排钢板桩围堰类似高基床条件下的直立式挡墙,在相同水深和不同波高条件下,可产生立波和近破波。

b. 除循环荷载外,立波对双排钢板桩围堰的主要不利作用是反射波导致的海侧钢板桩踢脚冲刷;近破波对双排钢板桩围堰的主要不利作用是巨大的

破碎能量和快速冲击导致钢板桩变形,可能造成钢板桩接头错位、渗漏、冲刷等事故。本文通过数值模拟和试验对比分析发现,由于冲刷、渗漏引起的钢板桩变形远远超过常规未考虑这些因素开展的有限元数值模拟结果,故应当在设计计算时给予高度重视,对于重要工程采取考虑多因素影响的可靠度计算,同时,在施工控制方面通过工程措施减少冲刷、渗漏。

c. 本文设计的试验条件为高基床,波浪破碎形态为卷破破碎,在波浪遇到双排钢板桩围堰发生卷破后,波压力使得双排钢板桩围堰向陆侧变形,冲击能转化为势能,波压力迅速减小。

d. 对比立波和近破波试验,近破波作用下双排钢板桩围堰发生了明显的向陆侧变形,钢板桩上的弯矩也约为立波作用时的 2~3 倍。尽管立波会叠加 2 倍波高,且叠加后的波高大于近破波波高,但立波作用于双排钢板桩围堰时并无较大的冲击能量,仅仅是由于波高叠加而增加的波压力,由此可见,仅考虑波高和水位的静力计算方法对近破波的冲击能估计不足。在工程设计中,应尽量避免在围堰前方形成近破波。

参考文献:

[1] 康海贵,孙英伟. 近破波对直立建筑物的作用及冲击流场研究[J]. 水运工程,2010(3):21-25. (KANG Haigui, SUN Yingwei. Study on mechanism of breaking wave loads on vertical walls [J]. Port & Waterway Engineering,2010 (3):21-25. (in Chinese))

[2] 侯永茂,王建华,顾倩燕. 大跨度双排钢板桩围堰的变形特性分析[J]. 上海交通大学学报,2009,43(10):1577-1580. (HOU Yongmao, WANG Jianhua, GU Qianyan. Deformation performance of double steel sheet piles cofferdam [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University,2009,43(10):1577-1580. (in Chinese))

[3] 江杰. 双排钢板桩围堰的冗余度分析[J]. 岩土力学,2015,36(增刊1):518-523. (JIANG Jie. Study of redundancy of double-row steel sheet pile cofferdam[J]. Rock and Soil Mechanics,2015,36(Sup1):518-523. (in Chinese))

[4] 朱艳,顾倩燕,江杰,等. 基于贝叶斯方法的船坞双排钢板桩围堰整体稳定性可靠度分析[J]. 岩土力学,2016,37(增刊1):609-615. (ZHU Yan, GU Qianyan, JIANG Jie, et al. Reliability analysis for overall stability of large-span double-row steel sheet-piled dock cofferdam based on Bayesian method [J]. Rock and Soil Mechanics,2016,37(Sup1):609-615. (in Chinese))

[5] 张玉成,杨光华,姜燕,等. 软土地区双排钢板桩围堰支护结构的应用及探讨[J]. 岩土工程学报,2012,34(增刊1):659-665. (ZHANG Yucheng, YANG Guanghua, JIANG Yan, et al. Application of retaining structure of

steel sheet pile cofferdam in soft area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2012,34(Sup1):659-665. (in Chinese))

[6] 李玉伟,谢蒙,丰土根,等. 软土地基双排钢板桩围堰数值分析[J]. 水利水电技术,2015,46(9):40-44. (LI Yuwei, XIE Meng, FENG Tugen, et al. Numerical analysis double-row steel sheet pile cofferdam for soft soil foundation [J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2015,46(9):40-44. (in Chinese))

[7] 吴留伟,郑国兵,吴蕾,等. 双排钢板桩围堰在超深厚软土地基中的应用[J]. 水运工程,2018(3):143-148. (WU Liuwei, ZHENG Guobing, WU Lei, et al. Application of double-row steel sheet pile cofferdam in deep soft soil foundation[J]. Port & Waterway Engineering,2018(3):143-148. (in Chinese))

[8] KHAN M R A, TAKEMURA J, FUKUSHIMA H, et al. Behavior of double sheet pile wall cofferdam on sand observed centrifuge test [J]. IJPMG-International Journal of Physical Modelling in Geotechnics,2001(4):1-16.

[9] KHAN M R A, TAKEMURA J, KUSAKABE O. Centrifuge model tests on behavior of double sheet pile wall cofferdam on clay [J]. IJPMG-International Journal of Physical Modelling in Geotechnics,2006(3):1-23.

[10] 祝兵,殷瑞涛,张家玮,等. 哑铃型跨海桥梁围堰不规则波浪力试验研究[J]. 铁道科学与工程学报,2020,17(8):2004-2012. (ZHU Bing, YIN Ruitao, ZHANG Jiawei, et al. Experimental study of irregular wave force on dumbbell-shaped cofferdam for sea-crossing bridge [J]. Journal of Railway Science and Engineering,2020,17(8):2004-2012. (in Chinese))

[11] 蔡正银,陈海军,张桂荣,等. 波浪荷载作用下滩海人工岛工程稳定性评价[J]. 水利学报,2007,38(增刊1):220-225. (CAI Zhengyin, CHEN Haijun, ZHANG Guirong, et al. Stability analysis on the artificial island under wave loading[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2007,38(Sup1):220-225. (in Chinese))

[12] 遆子龙,李永乐,秦顺全,等. 海洋桥梁施工围堰的波浪压力实测与数值模拟[J]. 西南交通大学学报,2017,52(3):466-474. (TI Zilong, LI Yongle, QIN Shunquan, et al. In-situ measurement and numerical simulation of wave pressure on marine bridge cofferdam [J]. Journal of Southwest Jiao Tong University,2017,52(3):466-474. (in Chinese))

[13] 李静,陈健云,徐强,等. 滑坡涌浪对坝面冲击压力的影响因素研究[J]. 水利学报,2018,49(2):232-240. (LI Jing, CHEN Jianyun, XU Qiang, et al. Study on the influence factors of landslide surge wave on the impact pressure on dam's surface [J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2018,49(2):232-240. (in Chinese))

(下转第 102 页)