

基于内嵌传感器的单层护面块体摇动实测研究

郑涛

深圳大学水利工程学院, 深圳 518060, 广东, 中国

摘要: 随机安放的单层护面块体广泛应用于世界各地的斜坡式抛石防波堤。对于这类护面层, 块体因摇动而破碎可能是主要的损坏机理, 但目前尚无有效方法对摇动加以评价和量化。本文采用新型内嵌式摇动传感器, 首次获得了单层块体摇动冲击速度的实测数据。物理模型试验在不规则波作用下针对 Xbloc® 块体护面层开展。一组包含五个波高递增工况的试验序列被多次重复, 九个测量单元分别布置于三个不同高程。对于块体高程与波高的每一种组合, 均获得了 42 次以上的重复实测 (实现), 共计 640 次。由摇动传感器可得到冲击次数与转动冲击速度。结果表明, 护面层中块体发生摇动的频次远高于目视观测所得。最大冲击速度出现在水线附近以及波浪的上爬阶段。本文给出了单层块体摇动冲击速度的初步设计表达式。此外, 可视化技术显示, 块体沿坡向下的沉降是一个连续过程, 它改变了块体的取向与安放密度, 进而影响摇动行为。本文表明, 除统计移位块体数量之外, 摇动传感器等新型量测技术与可视化技术能够、也应当用于量化抛石防波堤单层护面层的损坏机理。

关键词: 摇动; 护面块体; 防波堤; IMU 传感器

Rocking of Single Layer Armour Units Measured by Embedded Sensors

Tao Zheng

Department of Hydraulic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong, China

Abstract: Single layer randomly placed armour units are used in many rubble mound breakwaters around the world. For these armour layers, breakage of armour units due to rocking could be a major damage mechanism, but no good methods exist to evaluate and quantify rocking. This paper utilizes novel embedded Rocking Sensors to obtain the first measurements of rocking impact velocities of single layer units. Physical model tests were performed on an armour layer with Xbloc® units under irregular waves. A test series with five test runs with increasing wave height was repeated several times, with the nine instrumented units being positioned at three different elevations. Over 42 repeated measurements (realizations) of the rocking motion of a unit were obtained for each combination of unit elevation and wave height (640 in total). From the Rocking Sensors the number of impacts and rotational impact velocities were obtained. It appears that the units in the armour layer experience rocking much more often than visually observed. Highest impact velocities are seen to occur around the water line, and in the uprush phase of the waves. A preliminary design expression for rocking impact velocities of single layer units is given. Additionally, a visualization technique

shows that the downslope settlement of the units is a continuous process, which changes unit orientation and placement density, and thereby influences the rocking behaviour. The paper shows that novel measurement techniques like the Rocking Sensors and visualization techniques can and should be used to quantify damage mechanisms to rubble mound single layer armour, in addition to counting the number of displaced units.

Keywords: Rocking; Armour units; Breakwater; IMU sensor

一、引言

20 世纪中叶, 四脚锥体 (Tetrapod)、扭工字块体 (Dolos) 等互锁式混凝土块体被引入防波堤护面工程。这类具有互锁外形的块体通常随机安放为双层, 与当时通用的立方块相比稳定性显著提高。此后的研究与工程经验不断优化其互锁性能, 块体自身的结构强度却未得到足够重视。这直接导致 20 世纪 70 至 80 年代若干大型防波堤因混凝土护面块体破碎而失事[1-2]。随后, 人们针对扭工字块体、立方块和四脚锥体等块体的波浪致摇动及其后续破碎开展了大量研究[3-4]。然而, 自 1981 年 Accropode™ 问世以来所使用的单层块体同样会出现摇动致破碎。图 1 给出了几种常见单层块体发生局部断裂的实例。由于在比尺模型中难以直接量测应力, 目前通常通过目视辨识摇动块体所占百分比来量化块体因摇动而破碎的可能性[5]。然而, 这一定义模糊的量与块体破碎之间的直接关系并不明确。随着互锁性能的提升和随机安放单层混凝土块体尺寸的不断增大, 摇动致块体破碎往往成为重要的失效机理。



Figure 1 Broken Single Layer Units in Reality

图 1 实际工程中破碎的单层护面块体。

对于随机安放的双层块体 (四脚锥体与立方块), 摇动冲击速度 v_i 已由 CUR[6-7] 以及 Van der Meer 和 Heydra[4] 测定。该速度是指摇动块体撞击相邻块体时的速度。将摇动冲击速度与块体的结构强度模型相结合, 即可评估块体破碎[7]。由于波场随机、块体安放随机, 每一次摇动冲击都各不相同。文献中给出了四脚锥体摇动冲击速度的超越概率分布, 可写成式 (1) 的形式[6]:

$$P_{exc}(v_i^*) = \exp\left(2.0 - 196 \frac{v_i^{*1.43} \exp(0.4|z_b^*|)}{N_s}\right), \text{ for } P_{exc} < 1 \quad (1)$$

式中, 无量纲冲击速度 $v_i^* = v_i / \sqrt{gDn}$; 块体相对于水位的无量纲高程 $z_b^* = z_b / Dn$; 稳定数 $N_s = H_s / (\Delta Dn)$ 。其中 H_s 为有效波高, Δ 为相对浮容重, Dn 为块体的名义直径。该关系式显然仅适用于分布的极值尾部, 因为在摇动冲击速度较小时它会给出大于 1 的超越概率。

摇动冲击速度 (摇动块体撞击相邻块体瞬间的速度) 受 N_s 以及块体相对于平均水位的高程 z_b 影响。如式 (1) 所示, 最大冲击速度出现在水位附近。该概率分布主要反映冲击随时间的变化 (随机波), 因为公式所依据的加速度量测只针对单个块体进行。为获得摇动, 当时选取了一个偏于不利的块体位置[8], 但这与真实情

况的可比性并不清楚。

除加速度外，其他量测手段对于揭示摇动运动对护面块体破碎的影响同样有用，包括直接量测块体临界断面上的法向力、剪力和（或）弯矩。这类量测的难度更大，离散性也更强，因为每个块体本身取向随机，且存在众多可能的断裂面。

对于现代随机安放的单层护面块体，作者未见冲击速度的实测资料。相反，这类块体的设计导则通常以每个块体的摇动次数和发生运动的块体数量两方面给出摇动事件的最大允许百分比[5]。这些百分比一般通过目视观测取得，而对处于泡沫翻涌、水线移动区域的护面块体而言，目视观测既困难又主观[5]。

近年来已有若干关于块体受力与摇动的研究。一些未经同行评议的初步研究报告了在双层立方块简化布置上的试验，以及在单层 Xbloc® 上的初步试验，其中块体内嵌了运动传感器。与 CUR 的研究不同，这些研究并未分辨冲击过程中的加速度，而是量测冲击发生前瞬间的（转动）冲击速度。这种在冲击前瞬间确定冲击速度的方法，所需采样频率远低于对短历时冲击过程中加速度进行积分的做法。由这些初步试验与分析可见，CUR 关于冲击发生次数的某些结论似乎并不正确。此外，Eden 近期对固定于坡面上方的单个 Core-Loc 块体开展了力的量测，发现最大受力出现在水线附近的块体上。

本研究采用 Xbloc®，这是一种以随机取向单层安放的混凝土护面块体，与 Accropode™ II、Accropode™、Core-Loc™ 等块体类似。按设计手册，Xbloc 块体损坏的设计值取安全值 $H_s/(\Delta D_n) = 2.8$ 。在块体研发阶段的模型试验中，损坏起始（定义为出现一个或多个被冲出的块体，即失去与相邻块体互锁并被移出护面层的块体）所对应的 $H_s/(\Delta D_n)$ 在 3.25~3.85 之间变化，平均为 3.5。失稳起始（护面层丧失整体性和 / 或垫层被淘刷）对应值在 3.61 至 ≥ 4.31 之间（4 组试验中有 3 组未出现损坏）。摇动大致自 $H_s/(\Delta D_n) = 3.1$ 开始出现。上述数值是在坡度 3:4、1:30 缓坡前滩、透水核心体、安放密度约 1.2 块/D² 的条件下获得的。

护面层中的块体一旦破碎，将损失大量质量与互锁能力，更易被移出护面层。块体缺失使局部互锁中断，护面层随之削弱。破碎的块体碎块有可能撞击并击碎其他块体而造成进一步损坏，不过已有观测表明碎块基本处于静止状态。De Rover 对含有最多 15%（初始）破碎块体的 Xbloc 护面层进行了试验，研究发现：当坡面上有 7.5% 或 15% 的破损块体时，首次出现块体冲出的 $H_s/(\Delta D_n)$ 降至 2.8 左右，而完全崩塌所对应的数值与无损坡面相近。

关于采用内嵌独立式传感器量测块石运动，在天然砾石与防波堤块体方面均可查到一些报道初步成果的灰色文献。此外，Nistor 等报道了在模型集装箱内嵌入传感器的工作。微机电系统（MEMS），特别是手机中常见的惯性测量单元（IMU），目前在摇动研究中的应用还很少。该技术是可行的，但其应用方式以及获取有用信息的后处理方法尚不成熟。

综上，由文献可见，摇动可能影响 Xbloc® 或 Accropode™ 等互锁式随机安放单层护面块体的稳定性[5]。虽然对双层体系的摇动冲击速度已有一定认识，但单层体系仍缺乏相应知识。作者未查到任何针对可随护面层压密而自由运动、因而处于真实位置的独立式护面块体摇动的处理后实测资料。

本文的目标是建立一套量测并处理真实安放块体摇动冲击速度的方法；进一步的目标是在此基础上描述并量化随机安放单层护面块体的摇动过程。本研究采用基于低成本微机电（MEMS）器件的摇动传感器，可独立内嵌于块体之中。所研究的块体类型为 Xbloc®。试验在不透水核心体坡面上以不规则波进行。

第二部分介绍内嵌式智能摇动传感器、波浪水槽中护面坡的试验布置以及试验方案；第三部分阐述摇动传感器数据的后处理；第四部分分析并给出结果，重点讨论高程、摇动事件数量与冲击速度的影响，并与通常的目视观测结果进行比较，其中一小节介绍基于图像的沉降分析，用以捕捉护面层沿坡向的沉降与（去）压密，

从而研究沉降 / 压密与摇动之间的潜在联系；第五部分讨论结果，重点关注摇动传感器的性能、该技术的进一步发展前景以及结果对护面层评价的意义；第六部分给出结论与建议。

二、模型布置

本研究采用 Xbloc® 块体。由于模型块体内部必须安装传感器，可用的最小模型块体高度为 $D = 56 \text{ mm}$ 。内嵌传感器置于中空 3D 打印块体的中心，见图 2。按照 Caldera 所述方法，在块体各腿内配置铅块，使整个测量单元的重量与重量分布同其他模型块体一致。最后向块体内灌满环氧树脂，使其完全防水。

测量单元的运动采用九轴惯性测量单元 (IMU) 量测。该芯片安装在 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的电路板上，与手机中所用者类似，可量测加速度、转动速率 (陀螺仪) 和磁场 (罗盘) 三个方向的分量。本研究仅使用加速度与转动速率信号。IMU 传感器与其他电路板一起集成于模块化的 Arduino 平台 TinyDuino，构成独立式内嵌系统。这套电子器件的总尺寸约为 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ ，包含：九轴 IMU 传感器，型号 ST LSM9DS1；带 32 kB Flash 和 2 kB RAM 的 Atmega328P 处理器；SD 卡存储器 (V30 型)；与 TinyDuino 系统手工连接的防水 micro USB 接口；3.7 V / 150 mAh 锂电池；以及用于启停量测的磁开关。

九轴 IMU 传感器的采样频率可达 100 Hz。然而，向 SD 卡写入数据才是实现高采样率的瓶颈。为此，只有在发生摇动之后才把量测数据写入 SD 卡。当测量单元测得的转动速率超过阈值 $|\omega| = 0.05 \text{ rad/s}$ ，或加速度超过阈值 $|a_{\text{tot}}| = 1.01g$ 时，数据在积累 10 个采样点 (约 0.1 s) 后由 RAM 存入 SD 卡。在未发生摇动的时段内仍需保留部分数据，以判断块体位置是否发生改变。为此，即使未超过阈值，每 0.5 s 也保存一个采样点。这种存储方式减少了 SD 卡上的数据量，对数据采集速率同样有利。

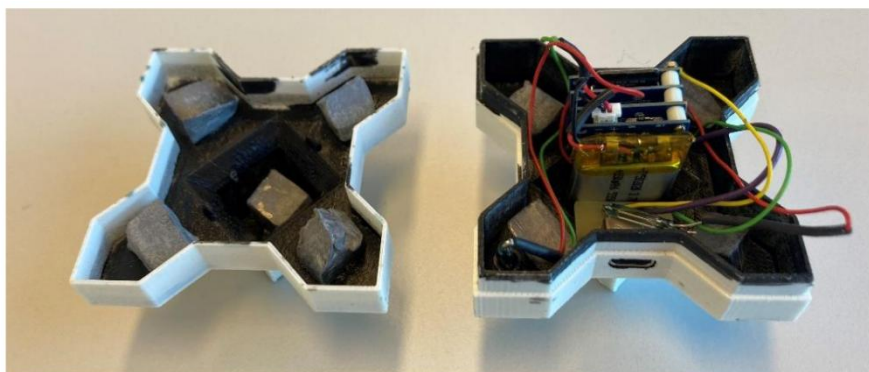


Figure 2 Two Halves of the 3D Printed Model Armour Unit Including Embedded Sensor, Battery, and Micro USB Connection

图 2 3D 打印模型护面块体的两个半体，内含传感器、电池与 micro USB 接口。

加速度计通过改变器件取向、将各分量与重力的 $\pm 1g$ 读数比对而得到验证。加速度的精度在 2% 以内，并对该偏差作了修正。陀螺仪的检验方法是把全部传感器装在一根下落并转过 90 度的杆上，比较最终转角，误差同样一般为百分之几。静止状态下陀螺仪的零漂也作了修正。更精细的标定是可行的，但本文认为并无必要。若要对块体较长历时的完整运动作积分，例如由加速度量测求得位置，则需要很高的精度，而这并非本研究的目标。

全部试验在代尔夫特理工大学水利工程实验室完成。波浪水槽长 40 m、宽 0.8 m、高 1.0 m。不规则波由带主动吸收系统的推板式造波机生成。防波堤模型位于距造波板 20 m 处。图 3 给出了布有一排测量单元的试

验布置。

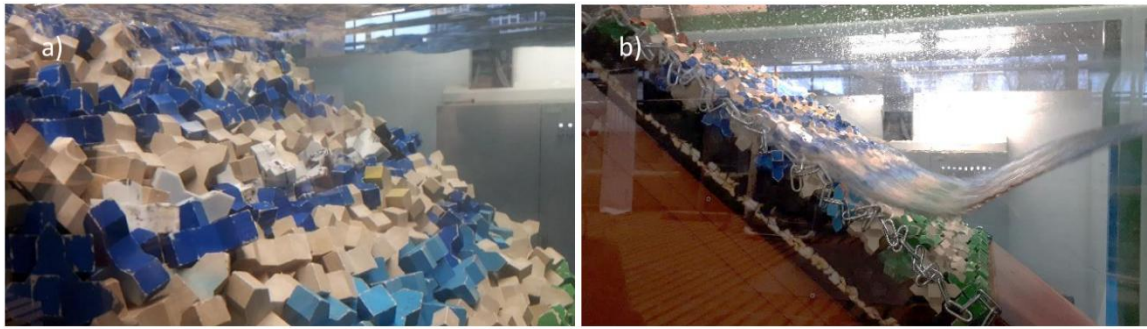


Figure 3 a) Close-Up of the Row of Instrumented Units in the Armour Layer with Non-Instrumented Units; b) Side View of a Wave Attack on the Slope

图 3 a) 护面层中测量单元（白色及一个黑色）与普通块体（米色和蓝色）所在排的特写；b) 波浪作用于坡面的侧视图。

模型块体的密度为 $\rho_c = 2341 \text{ kg/m}^3$ ，高度 $D = 56 \text{ mm}$ ，相应的名义直径 $D_n = 39 \text{ mm}$ 。安放密度取该类块体所推荐的常用值，横向间距 $\delta x = 1.3D$ ，沿坡向上间距 $\delta z' = 0.64D$ ，对应的安放密度为每 D^2 布置 1.2 块。

试验布置示意图 4a。坡角取常用的 2:3。相对于另一常用坡角 3:4，这一较缓坡角因互锁较弱而预期摇动稍多。此外，本研究选用不透水核心体，据报道其稳定性低于透水核心体。护面层自半水深处起铺，其下以光滑坡面延伸至床面，坡体置于水平床面之上。因此，与设置浅水前滩的试验相比，本试验中的最大波高 ($H_{\max}/H_s$) 会更大。护面块体共布置 26 排，各组试验的水线均位于自底部数起的第 15 排附近。第一层垫层由名义直径 $D_{n50} = 15.2 \text{ mm}$ 、密度 $\rho_s = 2970 \text{ kg/m}^3$ 的棱角块石构成；其下一层 $D_{n50} = 10.0 \text{ mm}$ 的块石胶结于底部的不透水木板上。

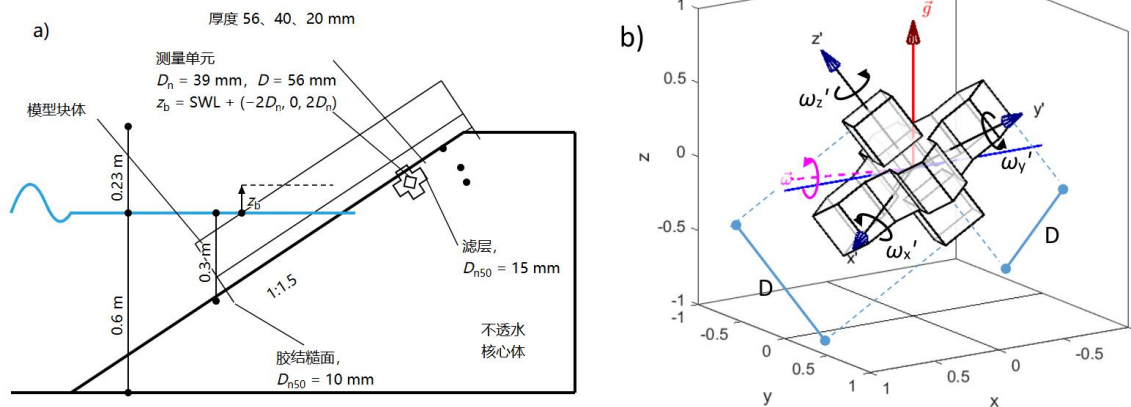


Figure 4 a) Side View of Setup of Armour Layer on Slope; b) Definition of Axes Used

图 4 a) 坡面护面层试验布置侧视图；b) 所用坐标轴的定义。局部坐标轴 (x' , y' , z') 相对整体参考系 (x , y , z) 发生转动。蓝线表示水线，紫红色虚线为转动矢量 ω （假定其近似平行于水线），红色矢量为重力加速度。

(一) 水动力条件与试验方案

由五个波高递增工况（见表 1）构成的试验序列被多次重复。每一试验序列通常在某一高程处成排布置九个测量单元。测量单元所用的三个高程（以质心高程计）相对水准分别为 $z_b = -2D_n$ 、0 和 $+2D_n$ ，即自底部数起的第 11、15 和 19 排。每一高程处的试验序列一般重复五次（见表 2）。序列 T5 中块体被误置于低一排的位置，但可以认为其行为相同。并非所有传感器始终正常工作，偶尔也会在其他高程另置一个测量单元（见表 2）。最终，对块体高程与波浪条件的每一种组合，均获得了 42 或 43 个块体的重复运动实测。因此，全历时试验工况下的运动实测共计 640 次（ ≈ 9 个块体 $\times$ 每序列 5 个工况 / 波况 $\times 3$ 个高程 $\times 5$ 次重复）。对每一个工况与块体的组合，在公开数据文件中均赋予了唯一的序列号。

试验模拟的 $H_s/(\Delta D_n)$ 范围为 1.9 至 3.4，使得在后期工况中可以预期出现摇动乃至块体冲出。各组试验波陡恒定为 $sp = 4.4\%$ ，按标准 JONSWAP 波谱造波，水深 0.6 m，每个工况历时约 1200 个波。

Table 1 Measured Wave Conditions for the Five Test Runs in One Test Series

表 1 一个试验序列中五个试验工况的实测波浪条件：有效波高 $H_{m0,i}$ 、谱峰周期 T_p 、波陡 sop 、破碎相似参数 ξ_{op} 与稳定数 N_s 。

试验工况	$H_{m0,i}$ (m)	T_p (s)	sop (%)	ξ_{op} (-)	N_s (-)
1	0.10	1.28	3.9	3.4	1.9
2	0.12	1.41	3.9	3.4	2.3
3	0.14	1.54	3.8	3.4	2.7
4	0.16	1.75	3.3	3.6	3.1
5	0.18	1.90	3.2	3.7	3.4

Table 2 Measured Test Series for the Three Elevations of Instrumented Units

表 2 三个测量单元高程处的实测试验序列，其中 $N_{tot,blocs}$ 为该高程上成功记录的块体总数。

高程 z_b	$N_{tot,blocs}$	试验序列
SWL $-2D_n$	42	T17、T19、T20、T21、T22
SWL	43	T5(4-11)**、T6、T7、T8(3-10)、T9、T17*、T21*、T22*
SWL $+2D_n$	43	T12(5-26)、T13、T14、T16、T18

注：试验序列名称的下标依次表示块体被冲出时所在的试验工况号与排号。*) 表示该高程仅布置了一个测量单元的序列；**) 表示试验序列 T5 中测量单元被置于低一排 ($\frac{1}{2}D_n$) 的位置。

每完成一个完整序列（其间不重建坡面）后，从块体中读取数据，为块体充电，并重新铺筑护面层。

各组试验期间，均自一侧透过水槽玻璃壁目视观测护面层的摇动，并记录发生摇动的块体数量。波高由布置于造波板与坡面之间的三支 Deltares 电阻式波高仪阵列量测，入射波要素采用 Zelt 和 Skjelbreia 的方法由三支波高仪的资料求得。一台朝下的相机固定安装于岸线上方、水位以上约 3 m 处，在每个工况前后对坡面拍照。由于相机位于水面之上、高度为最低块体水深的十倍，光线穿过水面的折射对由这些图像求得的位移几乎没有影响（ $<2\%$ ）。

三、信号处理

（一）IMU 信号调理

本部分说明如何处理 IMU 传感器信号，以获取量化摇动现象所需的信息。九轴 IMU 包含加速度计、陀

螺仪和罗盘, 每种仪器量测三个分量。加速度计量测总加速度 a_{tot} , 即真实加速度 a 与重力加速度 g (恒为竖直向上 9.81 m/s^2) 之和, 后者使所测加速度分量产生偏置。陀螺仪量测转动速率 ω' , 因而可用于获取 (短历时的) 角度信息。罗盘可提供长历时转动的补充信息, 但本文分析中未予采用, 给出了一个摇动运动频繁的典型工况中 a_{tot} 与 ω' 的实测分量。

由于块体取向随机, 其确切取向事先未知且在试验过程中还会改变, 因此难以在整体 x 、 y 、 z 坐标系中获得取向与运动 (见图 4b)。同时, 运动型式 (平动、转动或二者组合) 也决定了量测手段是否适用: 量测平动需要加速度, 量测转动 (速率) 则依靠陀螺仪。此外, 重力加速度在局部 x' 、 y' 、 z' 坐标系中的影响随取向改变而改变。重力分量可由块体静止时的量测得知, 但在转动摇动过程中, 重力矢量取向的改变会改变所测加速度。因此, 要找到描述摇动运动的方式并不直接, 必须作出若干合理的简化假定。

(二) IMU 导出参数

对于测量单元撞击相邻块体的每一次事件, 都需要求得摇动冲击速度。正如摇动一词所暗示的, 若假定主要运动型式为转动, 则冲击前瞬间的 (峰值) 瞬时转动速率与块体之间的冲击速度直接相关。Hofland 等采用绝对转动速率作为估算冲击速度的首选量度:

$$|\vec{\omega}| = \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2 + \omega_z^2} \quad (2)$$

该量的峰值 $|\omega|_{peak}$ 可与测量单元表面撞击相邻块体的冲击速度相联系。假定块体绕垫层上某点转动、其腿部随之转动, 则一个块体的腿撞击另一块体的腿时, 冲击速度为:

$$v_i \approx D |\vec{\omega}|_{peak} \quad (3)$$

需要注意的是, 在包含上爬与回落两个阶段、通常两阶段均产生冲击的单个波中, $|\omega|$ 可预期出现两个峰值。为获得一个既能描述转动运动又包含方向信息的标量, 假定转动绕固定轴发生, 并用下式区分运动方向:

$$\omega_s = |\vec{\omega}| \cdot \text{sign}(\omega_j) \quad (4)$$

式中, ω_j 是整个试验中标准差最大的角速度分量, 即对所有 $j \neq i$ 满足 $\sigma(\omega_j) > \sigma(\omega_i)$ 。该分量的信噪比最大, 故用以确定运动的符号。引入符号之后, 即可区分波浪上爬阶段与回落阶段的摇动运动。

采用 ω_s 确实能够区分摇动方向: 块体的一次上下运动在 ω_s 上表现为两个符号相反的峰值。由于重力向下作用, 向上的摇动运动发生在波浪上爬阶段的较晚时刻, 向下的摇动运动则发生在回落阶段的较早时刻。因此, 对于间隔很近的一对峰值, 可以认为第一个峰对应上爬。绘制 ω_s 还可看出一些短时段内块体在初次冲击后上下弹跳, 而此时 $|\omega|$ 通常只表现为一个较宽的单峰。

一次摇动事件中的合成转角, 由绝对转动速率在摇动持续时间内的积分求得, 并除以 2, 因为一次完整的摇动事件包含上爬与回落两个峰。因此, 合成转角按 $\Delta \theta = \frac{1}{2} \sum |\omega| \Delta t$ 确定。

(三) 二维假定

假定转动绕平行于水线的整体 x 轴发生, 即 $\omega_x = |\omega'|$, 见图 4b。若该假定合理, 则问题可按准二维处理。重力方向取加速度的众数 (记为 $\vec{a}$) 确定, 它在各次摇动事件之间等于 g ; 块体静止时已作了大量量测。转动轴与重力矢量之间的夹角由式 (5) 确定:

$$\theta \approx \arccos \left(\frac{\vec{a} \cdot \vec{\omega}_{peak}}{|\vec{a}| |\vec{\omega}_{peak}|} \right) \quad (5)$$

对所有摇动事件均确定了 $\vec{a}$ 与 ω_{peak} , 并按式 (5) 求得各实测事件的 θ 。离散虽大, 但摇动的主方向接近 90° , 因而二维假定看来是合理的。

（四）事件甄别

假定摇动事件由单个波产生，因而把由一个波引起的全部摇动运动（通常包含上爬与回落两个动作）定义为一次事件。每一次连续的摇动事件以 ω_s 超过 0.05 rad/s 的小阈值为起点，凡超过阈值且距首个采样点在 $0.25T_p$ 之内（即属于同一个波）的采样点，均归入同一次摇动事件。

（五）沉降分析

为使沿坡向沉降及由此产生的块体安放压密可视化，采用各组试验前后拍摄的坡面照片。相机采用远程触发以避免机位发生移动，从而便于直接确定试验过程中坡面的变化。利用坡面四角固定点的已知坐标，对图像的透视畸变作了改正。块体在试验过程中的沉降 S （向下为正）可按 Hofland 和 Van Gent 的方法确定：以约两个块体高度的区域作相关，追踪图像中图案的位移。由于对全部试验重复了同一量测，共处理了其中十组试验，从而可得到每 10 组试验沿宽度平均的沉降以及各组试验的个别离散。

四、结果与分析

（一）总体行为

15 组试验序列中有 3 组出现了块体冲出，但在其后的试验工况中并未对稳定性产生明显影响（见表 2）。其中两次冲出所对应的稳定数与文献给出的范围（3.25 至 3.85）相符，另一次略低。其余 12 组试验序列在稳定数直至 $N_s = 3.4$ 时均未出现任何冲出。

总体摇动行为在（重复的）试验工况与试验序列之间、以及不同护面块体之间存在差异。在 1200 个波的全部实测中（对应特定工况与特定测量单元），仅有 15% 未识别出明显的摇动事件。多数情况下摇动过程表现为平稳随机过程。但在许多试验中摇动行为更具间歇性：其间几乎没有摇动发生，然而仅有的两次大摇动事件却使块体产生了很大的净转角——这一点可由事件前后静止加速度值 $\ddot{a}$ 各分量的差异看出。

测量单元自身或其周围块体取向的改变，也可能使摇动行为本身发生剧变，出现历时数十秒至数百秒、摇动幅值明显不同的时段。显然，块体在这些时段内的位置稳定程度大不相同。

给出了全部测量单元与试验工况的最大绝对转动速率 $|\omega|_{\max}$ 的总览，以此作为摇动强度的表征。横轴上的试验序列号通常重复出现数次，因为每组试验序列在一排中布置了多个测量单元；由于有时会在不同高程单独布置一个测量单元，图中也会出现某一序列号只有单个数据点的情形。图中显示摇动是一种随机现象，不同试验序列乃至不同波高之间未见明显差异。可以看出，同一块体在同一序列的多个连续工况中往往都表现出较大的运动，说明块体可供活动的空间可以持续多个试验工况。

由转动速率 ω_s 的信号还可获得摇动事件中第一个与第二个冲击峰值大小之差的信息，二者被推断分别对应上爬冲击与回落冲击。1:1 趋势线表示两者相等的情形；而过原点的数据趋势线表明，第一个（上爬）峰平均比第二个峰高 54%，尽管离散较大。在一个波事件中，第一与第二冲击峰之间的时间间隔，对较低的两个位置（ $z_b = \text{SWL}$ 与 $\text{SWL} - 2D_n$ ）平均约 0.1 s，而对较高位置（ $z_b = \text{SWL} + 2D_n$ ）则为其两倍。

（二）实测摇动参数

1. 事件数量

给出了一个试验工况内事件数量的超越概率（涵盖全部序列、工况、水位、块体与重复次数）。可以看出，仅有 15% 的实测在一个工况内未检出摇动事件；50% 的测量单元每个工况的事件数少于 10 次；10% 的块体在至少 10% 的波中发生摇动。

给出了每个块体每个工况的平均摇动事件数。可以看出，摇动事件大多发生在水线附近。该位置的摇动事

件数随波高增大,由工况 1 的约每块体每次试验 30 次增至工况 4 的 110 次。然而,在最后进行的最大波高工况中,事件平均数又急剧下降。另外两个块体高程 $z_b = \pm 2D_n$ 处的平均事件数则相对稳定,介于 20 至 40 之间。

2. 冲击速度分布

接下来给出冲击速度的超越概率,其超越百分数以每个块体、每个(入射)波计。据此,例如在历时 1000 个波、一排 10 个块体的条件下,若假定各事件互不相关,则预期最大摇动冲击的超越概率为 10^{-4} ,记为 $|\omega|0.01\%$ 。

分别给出三个块体位置、五个试验工况下实测摇动冲击速度的超越曲线。在 $N_s = 2.7$ 至 3.4 (工况 3 至 5)时,位于水线附近块体的冲击速度 $|\omega|0.01\%$ 最大。在该位置,冲击速度随稳定数增大,但工况 5 例外,其极值冲击速度与工况 4 大致相当。对另外两个块体高程,极值速度较低,约至 3 rad/s 。然而在 $N_s = 1.9$ (工况 1)时, $|\omega|0.01\%$ 的数值仍与水线附近块体相近,约为 1.8 rad/s 。此外,在这两个高程处速度随稳定数的增长并不明显:块体位于最低位置时冲击速度约增大 40%,而位于水线处则约增大 170%。对于最高高程,未见任何趋势,且最大波高试验的冲击速度反而是五个工况中最低的。

3. 净转角

给出了各次事件中实测合成转角 $\Delta \theta$ 的分布,可见超过 40% 的事件转角小于 0.25° 。

以对数纵坐标给出超越曲线,以显示分布的尾部。需注意,这是以发生摇动为条件的超越值,与定义 $|\omega|_{\text{peak}}$ 时所用的按波计超越概率不同。该超越曲线相当平直,说明它接近对数分布。实测中出现了大于 30° 的极端转角。将冲击速度 $|\omega|_{\text{peak}}$ 对合成转角作图,可见二者存在明显相关(这也在预期之中),但离散显著。对离散的一种合理解释是:最大摇动冲击速度不仅取决于可供活动的空间,还取决于随机的波致流速。

4. 目视观测到的运动

整个试验期间由一名观测者对坡面进行目视监测,并记录全部发生摇动的块体。表 3 给出了测量单元所在排中目视观测到的摇动块体数量,以便与实测摇动事件数作比较。有 59% 的试验在该排未观测到摇动。而由于测量单元在 85% 的试验中至少捕捉到 1 次摇动事件,一排九个测量单元中几乎必然有一个能在每个工况中检出摇动事件。可见,摇动传感器在检出摇动运动方面比目视观测灵敏得多。

目视确定的摇动百分比与波高之间未见明显趋势,但与所在排的高程之间趋势明显:最低一排每次试验平均有 0.84 个测量单元摇动,最高一排则为 0.24 个。需要注意的是,目视观测到摇动块体最多的位置在水线以下,而内嵌摇动传感器检出运动最多的位置在水线附近。

Table 3 Number of Observed Rocking Units in Instrumented Row

表 3 测量单元所在排中目视观测到的摇动块体数量。

高程 z_b	试验序列	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5
SWL - $2D_n$	T17	0	0	0	1	3
	T19	0	1	1	0	0
平均: 0.84	T20	1	2	1	1	2
	T21	0	1	0	0	0
	T22	1	2	1	2	1
SWL	T5	1	1	2	2	1
	T6	0	0	0	0	0

平均: 0.60	T7	2	1	1	2	1
	T8	0	0	0	0	0
	T9	1	0	0	0	0
SWL +2Dn	T12	2	0	0	0	0
	T13	0	0	0	0	0
平均: 0.24	T14	0	0	0	1	0
	T16	1	0	0	0	0
	T18	0	0	1	1	0
平均:		0.60	0.53	0.47	0.67	0.53

将目视观测到的摇动与实测摇动速度和转角作比较。由于一个工况中对多个块体同时作了目视观测，此处取该工况内全部块体实测 $|\omega|_{\text{peak}}$ 与 $\Delta\theta$ 的最大值。这些未被目视检出的事件几乎全部转角小于 10° （即位于竖直虚线左侧），在峰值角速度较大时尤为如此；只有若干冲击速度恒为最大值的事件例外，它们似乎源于转角判定有误。由此可见，目视观测到的摇动事件其合成转角大致大于 5° 至 10° 。

5. 初步设计建议

基于这一针对单一布置的详细试验，本文提出一个初步设计公式。该分布中摇动概率按每个波、每个块体给出，并假定冲击速度服从式 (1) 那样的韦布尔型关系。该概率再乘以随机选取的某一护面块体在某一个波中发生摇动的单一概率。这一按护面块体与入射波计的摇动概率 P_{rock} 略有变化，此处统一取 5%。采用这种表述后，在假定极端摇动事件互不相关的前提下，摇动冲击即可由易于确定的潜在摇动块体数量与波数推算。

拟合以水线处块体及工况 3、4 为重点。这两个工况的摇动冲击速度 v_i 最大，因为到工况 5 时冲击速度已不再继续增大。对工况 1、2 和 5，该拟合偏于安全。表达式为：

$$P_{\text{exc}}(\omega_{\text{peak}}^*) = P_{\text{rock}} \exp(-500 \omega_{\text{peak}}^{*1.4} N_s^{-2.7}) \quad (6)$$

式中， $P_{\text{rock}} = 0.05$ ， $\omega_{\text{peak}}^* = |\omega|_{\text{peak}} / \sqrt{g/D_n}$ ， $N_s = H_s / (\Delta D_n)$ 。

$|\omega|_{\text{peak}}^*$ 的幂次与 Van der Meer 和 Heydra 在式 (1) 中针对四脚锥体给出的 v_i 幂次相近。对于其他高程 $z_b = \pm 2$ ，冲击速度大致小一半。因此，以现有认识可假定冲击速度线性衰减，即把式 (6) 给出的冲击速度乘以修正系数 $\gamma(z_b)$ ：

$$\gamma = 1 - 0.25 \left| \frac{z_b}{D_n} \right| \quad \text{for} \quad \left| \frac{z_b}{D_n} \right| \leq 4 \quad (7)$$

由所采用的伊里巴伦数 $\xi_{\text{op}} = 2.5$ 至 2.8 可以预期，本次试验中发生的是崩破波至激破波。对崩破波而言，块石的最大损坏与块体内部的最大应力通常都出现在水线附近高程。因此，本文公式可视为对实际摇动速度的良好初步估计。建议针对其他块体和不同布置（如 3:4 坡度与透水核心体）开展更多试验，以建立更完善的摇动运动数据库。此外，不同的护脚布置或排数可能产生不同的沉降型式，从而预期给出不同的摇动特征。

（三）沉降

块体沿坡向的差异沉降会改变块体的安放密度，可以预期也会改变可供摇动的空间。由试验前后坡面照片相关分析所得的块体沿坡向沉降（向下为正）。给出了某一试验序列的典型二维沉降型式：沿坡向下的沉降在水槽中部最大，但沿宽度方向仍相当均匀。由于全部试验序列重复了相同的波浪条件，可以求得 10 组试验沿宽度的平均沉降及各组试验的离散。

可以看出，平均沉降自（固定的）坡脚处的零值起，向水线以上约 $2D_n$ 高程逐渐增大。在该最高高程处，沿宽度平均的沉降约为 $0.4D_n$ ，个别块体还要再多沉降约 $0.2D_n$ 。沉降最大值所在位置随试验工况略有上移，

这大概是因为波高及相应的爬高不断增大。沉降的正梯度 (dS/dz) 表明护面层将发生压密, 因而可以预期块体的摇动空间减小。可以看出, 多数试验在测量单元所处高程处的梯度确为正值, 即该层正在压密。这意味着在连续的试验工况中, 波致流速不断增大的同时, 可供摇动的空间却在减小。只有在工况 1 至 3 中可以看到 +2Dn 高程处的局部块体密度平均而言有所降低。

五、讨论

首先讨论本研究所用处理方法在获取摇动冲击强度量度方面的总体精度。Maniatis 讨论了在地质研究中采用 IMU 器件量测块石运动的若干问题, 包括: 重力对加速度量测的影响、位置估计中的积分误差、取向估计中的积分误差、传感器标定, 以及复杂传感器运动描述所需 (开源) 代码的使用与开发。Maniatis 还指出, 分析应与所研究现象的物理机制相联系。因此, 确实存在比本文所用方法更精细的标定与分析技术, 如加速度计轴向标定, 以及综合加速度计与陀螺仪各自优势的混合技术。不过, 这些技术主要在需要对护面块体的完整运动作积分时才是必需的, 例如块石沿坡滚落的情形。对本文这种自相对固定位置出发的短历时事件而言, 现有方法已经足够。Maniatis 指出, 上述精细技术适用于历时超过 2 s 的运动, 而本文的摇动事件典型历时为 0.3 s, 其中摇动峰历时约 0.1 s, 积分误差很小。由于本研究关注块体的转动, 故无需对加速度中的重力影响作修正。因此, 第二部分所讨论的传感器精度对本文的应用而言可以认为是足够的。

本文所用的量测频率相对较低。作为对比, Sokolewicz 以 20 kHz 量测摇动, 比此处所用量测频率高 200 倍。需要说明的是, 那是用嵌入块体的外接单分量加速度计完成的, 采用如此高的频率是为了对冲击本身的冲量作积分; 由于处理耗时过长, 最终改用积分冲量与峰值加速度之间的经验关系来估算冲量。分辨冲击过程中加速度的时程似无必要, 因为摇动块体所施加的冲量取决于冲击前瞬间的 (角) 速度。因此, 如本研究所做的那样, 直接求取冲击前瞬间的速度反而更好。

本文所用硬件可以 100 Hz 量测, 这对获取转动速度峰值而言相当适宜, 因为较大的冲击峰由 5 至 10 个数据点分辨。目前每次向 SD 卡写入 10 个采样点, 其后约需 0.08 s 完成写卡。保存前连续量测的这 10 个采样点不足以覆盖一次双向摇动事件——后者通常需要 30 个采样点, 因而 30 似乎是能同时捕捉一次摇动事件两个峰 (向上与向下) 的更佳取值。若改进硬件以实现 100 Hz 连续量测则最为理想。在许多情形下, 所幸写卡的间歇时段恰好落在摇动事件两个峰 (上爬与回落) 之间, 因而两个峰都被良好捕捉。

式 (6) 的无量纲化基于弗劳德相似。块体尺寸足够大, 足以保证块体腿部周围形成充分发展的紊流。由于采用冲击前的速度确定冲击速度, 可以预期这些运动遵循弗劳德相似, 比尺效应有限, 与常规防波堤损坏试验相当。而在 Sokolewicz 那种分辨冲击过程中运动的方案里, 冲击历时与峰值力受材料弹性影响, 可以预期会出现比尺效应。

以往的摇动冲击速度概率密度函数是针对位置或安放密度定义不清的块体建立的, 因而难以估计究竟有多少块体会真正表现出该概率密度函数所描述的摇动行为。本文式 (6) 给出的概率密度函数是针对真实护面层中的块体建立的, 因此原则上可用极限状态冲击速度的超越概率乘以波数与块体数来估算发生摇动或破碎的块体数量。不过这一做法假定每个波所对应冲击速度与前一个波互不相关。考虑到在下一个极端波到达坡面之前块体位置多少已发生变化, 该假定看来是合理的, 但仍有待检验。

分析中所作的一项重要假定是: 信号中每一个极大值都代表一次冲击。事实未必如此, 并非所有峰值都对应冲击。特别是幅值较小的转动峰, 可能是整层块体保持接触的轻微移动, 也可能是块体上抬而未触及相邻块体。然而, 对设计而言最为重要的极端冲击速度, 其最高速度确与冲击相关这一点看来是合理的, 否则不可能

出现如此大的速度。今后研究中可增设坡面同步波高仪或视频图像等量测手段,以便更好地解释实测结果。

各次试验、各种波高下几乎所有实测都显示存在运动和/或摇动,而每个工况对整片块体区域仅能作出寥寥几次摇动的目视观测。可见内嵌传感器远比目视观测灵敏。然而,基于目视观测的现行设计导则已沿用数十年,指导了大量防波堤的设计。因此可以预期,现行设计导则大致可与 5 至 10 度的摇动转角相对应——这正是目视可观测到摇动时的大致运动角度。该角度约相当于 2 至 4 rad/s,即无量纲冲击速度 $vi/\sqrt{gDn}=0.18$ 至 0.36。这些数值可用于指示在特定原型条件下可容许的摇动冲击量级。此外,由于在块体(与波浪)尺寸增大时,相同的无量纲冲击会产生更高的应力,因此当采用更大块体或不同混凝土强度时,可将摇动冲击速度与内部应力的力学模型结合起来估算容许的摇动运动。

对摇动与沉降的精细量测揭示了随机安放单层护面层持续而渐进的运动。这些运动可产生摇动冲击并导致块体破碎,而持续的沉降则使护面层得到加强。另一方面,作为量化混凝土护面损坏的常规手段,为数不多的块体冲出观测似乎并未影响护面层的整体性。随机安放单层护面块体的防波堤稳定性试验,应当纳入对摇动与沉降更明确、更客观的量化准则;如本文所示,这些准则现已可以量测。

六、结论与建议

本文介绍了利用新型摇动传感器评价防波堤护面块体模型摇动行为的方法。该技术基于内嵌于模型块体中的独立式 Arduino 硬件。在护面层于连续试验中不断沉降、压密的过程中,量测了真实安放块体的摇动冲击速度量值。针对三个块体高程、每次试验约九个测量单元,对由五个波高递增工况构成的不规则波试验序列作了五次重复,共获得 640 次单块体在 1200 个波作用下的实测。

在 100 Hz 的有效采样频率下可以分辨角转动冲击速度,这对分辨模型块体的转动运动而言已足够。由于块体的转动轴大致垂直于水线,带符号的绝对转动量 ω_s 被证明是描述摇动运动的便利参量。可以看到块体在上爬与回落阶段来回转动,最大冲击量值出现在第一个峰,推断其发生于波浪的上爬阶段。

摇动的频次与量值受块体随机位置及波浪条件影响。冲击次数最多、冲击速度最高的实测均出现在水线附近的块体上。本文给出了该位置 Xbloc 块体摇动冲击速度的概率分布。最大冲击速度在模型比尺下为 0.34 m/s。对水线附近的块体,极端摇动冲击速度量值随波高增大,但(出乎意料地)在最大波高时不再继续增大。对高程 $\pm 2Dn$ 处的块体,未见明显趋势。

测量单元可以分辨转角小于 0.1° 的摇动事件,因而实测到的摇动事件远多于以往关于双层块体的文献,也远多于目视所能观测到的数量。据此推断,只有当摇动转角大于约 5° 时才可能被目视察觉。

试验过程中块体的沉降使水线附近块体的安放密度提高,很可能改变摇动行为。这可以解释最大波高工况下摇动事件数减少、摇动冲击速度不再增大的现象。不过,沉降梯度与摇动量值之间未见明确关系。

摇动是一种认识尚浅的现象,却与世界各地大量采用随机安放单层护面的抛石防波堤密切相关。本文提出的量测与后处理技术,为更精细地描述和研究这一过程提供了可能,并有望带来更完善的设计准则。将该技术应用更多布置形式、不同条件与不同类型的护面块体,将改进防波堤针对这一失效机理的设计。

参考文献

- [1] Baird W F, Caldwell J M, Edge B L, et al. Report on the damages to the Sines breakwater, Portugal. Coastal Engineering Proceedings, 1980, 1(17): 181.
- [2] 夏运强, 王绿卿, 张庆丰, 等. 基于葡萄牙Sines港防波堤破坏案例的国内外规范关于护面块体稳定质量计算量的比较. 水运工程, 2025(11): 1-6.

-
- [3] Juul Jensen O, Allsop W, Burgess K. Safety of breakwater armour layers with special focus on monolayer armour units. *Proceedings of Coasts, Marine Structures and Breakwaters 2013*. Edinburgh: ICE, 2013.
- [4] 夏运强, 葛栋林, 杨佳, 等. 不同安放方式扭王字块体护面稳定性试验研究. *水运工程*, 2025(6).
- [5] Burcharth H F, Howell G L, Liu Z. On the determination of concrete armour unit stresses including specific results related to Dolosse. *Coastal Engineering*, 1991, 15(1): 107-165.
- [6] Van der Meer J W, Heydra G. Rocking armour units: number, location and impact velocity. *Coastal Engineering*, 1991, 15.
- [7] 梁伟. 防波堤护面结构修复加固技术. *珠江水运*, 2024(17): 54-56.
- [8] 朴正, 马小舟, 董国海. 斜坡式建筑物上异形人工护面块体的发展及应用. *中国水运 (下半月)*, 2013, 13(7): 249-252.