DOI：10.13245/j.hust.260090

双列半圆型充液膜式潜堤消浪特性研究

张浩天[1] 刘维杰[2] 赵西增[2]
(1．浙江海洋大学海洋工程装备学院，浙江 舟山 316022；
2．浙江大学海洋学院，浙江 舟山 316021)

摘要 为探究双列半圆型充液膜式潜堤的消浪特性，基于黏性流理论建立波浪与充液膜式潜堤相互作用的数值模型，系统探究了波浪作用下双列半圆型充液膜式潜堤在不同相对间距时的布拉格共振特性和关键参数充盈度的影响，并分析了双列潜堤相比单列潜堤的消浪优势．结果表明：双列充液膜式潜堤能够通过布拉格共振效应提高消浪效果，但其共振主频相比理论布拉格共振存在下移情况；双列充液膜式潜堤的整体建议充盈度范围为88%~96%，波浪周期越大，消波效果最优的充盈度范围越宽；较小周期(1.00 s)处90%充盈度的双列潜堤消波效果最优；较大周期(1.25 s，1.43 s)处双列潜堤充盈度96%消波效果最优；相比单列潜堤，当充盈度较小时，双列潜堤主要依靠增大反射作用提升消浪效果；当充盈度较大时，双列潜堤能通过同时强化反射作用与耗散作用实现更优消浪表现．

关键词 充液膜式潜堤；CIP方法；消浪特性；流固耦合；布拉格共振；双列潜堤
中图分类号 TV139.2 **文献标志码** A **文章编号** 1671-4512(2026)10-0147-06

Research on wave dissipation characteristics of double-row semicircular liquid-filled membrane submerged breakwater

ZHANG Haotian[1] *LIU Weijie*[2] *ZHAO Xizeng*[2]
(1．School of Marine Engineering Equipment，Zhejiang Ocean University，Zhoushan 316022，Zhejiang China；
2．Ocean College，Zhejiang University，Zhoushan 316021，Zhejiang China)

Abstract To investigate the wave-dissipating characteristics of double-row semicircular liquid-filled membrane submerged breakwaters，a numerical model for the interaction between waves and liquid-filled membrane submerged breakwaters was established based on the viscous flow theory. The Bragg resonance characteristics of double-row semicircular liquid-filled membrane submerged breakwaters at different relative spacings under wave action and the influence of the key parameter filling degree were systematically explored，and the wave-dissipating advantages of double-row submerged breakwaters over single-row submerged breakwaters were analyzed. Results show that the wave-dissipating effect of double-row liquid-filled membrane submerged breakwaters can be improved by the Bragg resonance effect，but their dominant resonance frequency is lower than the theoretical Bragg resonance frequency. The overall recommended filling degree range of double-row liquid-filled membrane submerged breakwaters is 88%~96%，and the larger the wave period，the wider the filling degree range corresponding to the optimal wave-dissipating effect. For the small wave period (1.00 s)，the optimal wave-dissipating effect is obtained by the double-row submerged breakwater with a filling degree of 90%. For the large wave periods (1.25 s，1.43 s)，the optimal wave-dissipating effect is obtained by the double-row submerged breakwater with a filling degree of 96%. Compared with single-row submerged breakwaters，the wave-dissipating effect of double-row submerged breakwaters is mainly improved by enhancing wave reflection at low filling degrees. At high filling degrees，better wave-dissipating performance can be achieved by simultaneously strengthening

收稿日期 2026-02-26．
作者简介 张浩天(2001—)，男，硕士研究生；刘维杰(通信作者)，副教授，E-mail：weijieliu@zju.edu.cn．
基金项目 国家自然科学基金资助项目(U25A20372)；国家重点研发计划资助项目(2024YFB4207000)．

wave reflection and energy dissipation.

Key words liquid-filled membrane submerged breakwater; CIP method; wave dissipation characteristics; fluid-structure coupling; Bragg resonance; double-row submerged breakwaters

防波堤是保障海岸及海洋工程设施免受波浪侵袭的重要构筑物. 斜坡堤、直立堤等传统刚性防波堤消波效果显著，但造价偏高、工期长、生态影响大，影响水体交换[1-2]. 柔性防波堤结构简单、造价低、兼具生态友好性(不影响水体交换)[3]，近年来逐渐成为波浪防护领域的研究热点之一，其中充液膜式潜堤是一种布置在水底，内部充水且密封的膜结构潜堤，凭借其建造成本低且兼顾结构安全的特性具有广阔的应用前景. 针对其消浪性能，在物理模型试验及数值模拟方面已有学者开展相关研究. 物理试验方面，Jafarzadeh 等[4]针对充液膜式潜堤在不同水深、结构直径及入射波高条件下的消波特性开展试验，指出其波浪耗散能力显著优于传统刚性潜堤. 刘畅等[5]探究了聚焦波作用下充液膜式潜堤的消浪性能，证实该类柔性潜堤在不规则波作用下同样具有更优的消波效果. 数值模拟方面，部分学者[6-7]采用黏性流理论耦合有限元的方法模拟了充液膜式潜堤的消浪过程，发现充液膜式潜堤的充盈度是影响消波性能的关键参数.

单个潜堤的消浪效果有限，基于布拉格共振原理布置的系列潜堤，是提升柔性潜堤消浪效果的有效技术途径. 该原理适用于水波，当入射波波长与结构间距满足特定比例时，周期性结构会产生最强水波反射，实现波浪能量的高效调制，当前基于布拉格共振原理的系列刚性潜堤已得到一定研究[8-11]. 本研究基于验证后的自编黏性流流固耦合模型[6]，开展波浪与双列充液膜式潜堤相互作用的数值实验，探究双列潜堤的布拉格共振消浪特性及充盈度的影响，并对比单列潜堤的消浪效果明确双列结构的消浪优势.

1　数值模型

本文数值模型的流场部分采用基于二维正交交错笛卡尔网格的黏性流模型；结构部分采用有限元法(FEM)求解结构动力方程；同时，采用改进的浸没边界法作为黏性流和柔性结构的分区耦合算法. 数值实验参照重力相似准则，模拟平底上规则波与充液膜式潜堤的相互作用，几何比尺为1∶10.

1.1　流场求解

流场求解采用基于正交二维交错笛卡尔网格的自编数值模型[6]，控制方程为不可压缩黏性流的质量守恒和动量守恒方程

$$\nabla\cdot u = 0;$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u\cdot\nabla)u = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \frac{\mu}{\rho}\nabla^2 u + F,$$

式中：u为速度；ρ为密度；p为压力；μ为动力黏度系数；F为体积力；t为时间. 潜堤与波浪的相互作用涉及固液气三相，计算域存在多相物质，因此采用体积函数对各相进行定义，控制方程为

$$\partial\phi_m/\partial t + u\cdot\nabla\phi_m = 0,$$

式中：m取值范围为1～3；ϕ_1，ϕ_2，ϕ_3分别为液体、固体、空气的体积函数. 计算得到各网格内体积函数后，进一步计算得到网格内物理属性，有

$$\lambda = \sum_{m=1}^{3}\phi_m\lambda_m,$$

式中λ_m为第m项介质对应的属性参数.

本研究采用THINC/SW(双曲正切界面捕捉法)对自由面进行捕捉，该方法依托光滑双曲正切函数实现界面重构. 设β为THINC/SW中的自由面的法向量参数，对β的取值进行优化，建立β与界面斜率的关系使其可根据界面方向动态调整，提高THINC方法的计算精度. 本文自编流场模型已在前期研究中进行充分验证及应用[12-13].

1.2　固体求解

通过有限元方法对控制方程进行数值离散，结构物的动力学平衡方程为

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{S}} + \boldsymbol{C}\dot{\boldsymbol{S}} + \boldsymbol{K}\boldsymbol{S} = F(t),$$

式中：$\boldsymbol{M}$，$\boldsymbol{C}$，$\boldsymbol{K}$分别为质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵；$F(t)$为流场对潜堤结构的作用力；$\boldsymbol{S}$，$\dot{\boldsymbol{S}}$，$\ddot{\boldsymbol{S}}$依次对应单元节点的位移、速度与加速度. 该式反映了结构在时变荷载作用下的内力与位移. 结构模型选取直接积分法中的Newmark-β法.

1.3　流固耦合

本研究采用基于虚拟单元的浸没边界法[14]来处理潜堤与流体交界处的信息交换. 该方法将结构物对流场的影响通过N-S方程中引入体积力F_{B}来表征

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u\cdot\nabla)u = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \frac{\mu}{\rho}\nabla^2 u + F + F_{\mathrm{B}}.$$

计算域内的网格被划分为固体单元、流体单元与虚拟单元. 如图1所示，当网格中心点位于固体单元且紧挨着流体单元时，该单元为虚拟单元. 体

积力在流体单元中为零，在虚拟单元中不为零.

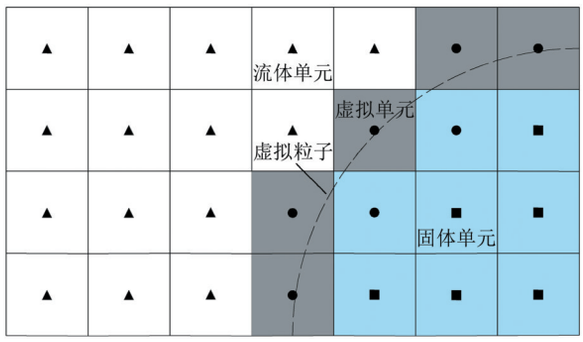


图1　网格单元类型划分

流固耦合求解计算过程如图2所示，图中：n为当前耦合时间步；F_{B}^{n}为结构所受外力．当在第n步时，结构物位移S^{n}与运动速度$\dot{S}^{n}$传入流场求解器，更新得到该时刻速度场u^{n}与压力场p^{n}；随后将流场力插值到结构物各节点处，作为下一时间步的外力F_{B}^{n+1}；下一耦合时间步，在结构求解器中求解受该外力作用下的结构物位移S^{n+1}及速度$\dot{S}^{n+1}$．重复上述迭代过程，直至完成所有耦合时间步的计算.

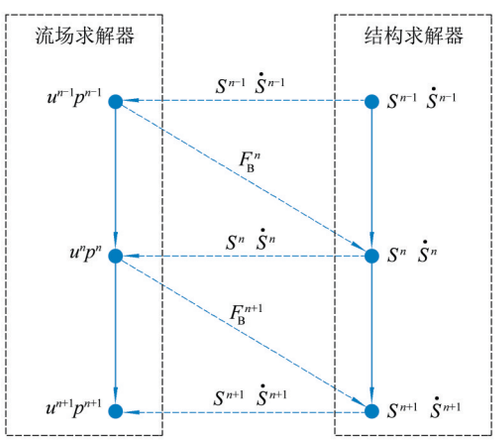


图2　流固耦合求解计算过程

2　模型验证

2.1　数值水槽设置

模型验证基于Zhao等[6]的单个充液膜式潜堤与波浪相互作用的物理模型试验数据．图3所示为试验中采用的充液膜式半圆型潜堤的物理模型．潜堤表面薄膜材料为氯丁橡胶，厚度为1 mm，密度为1.24 g/cm^3，弹性模量为3.0 MPa，邵氏A硬度为70，可承受最大压力范围为3～8 MPa，有较高的拉伸强度和伸长率．潜堤宽度B=0.5 m，半径D=0.25 m.

根据Zhao等[6]的物理模型试验，模型验证的数



图3　充液膜式半圆型潜堤实物图

值水槽设置如图4所示，图中x为水槽水平坐标．数值水槽长为38 m，高为0.8 m，水槽左侧x=−8～0 m范围内及右侧x=22～30 m范围内设置有海绵层消波区．采用动量源项法进行造波，造波源点设置在x=0 m处，潜堤中心位于x=12.7 m，前后设置有四个浪高仪G1～G4记录波浪传播情况．水槽静水深h=0.4 m，入射波采用规则波，入射波高0.04 m.

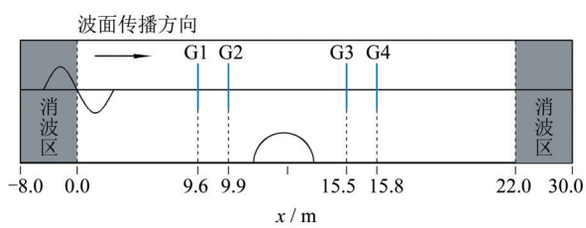
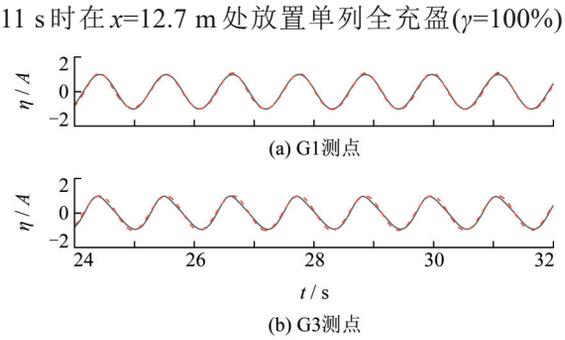


图4　模型验证数值水槽示意图(m)

2.2　模型验证结果

首先验证模型空水槽造波的准确性．图5为入射波周期T=1.11 s的条件下，模拟计算得到的空水槽两个位置处(G1，G3)的波面历时曲线与线性波理论结果的对比，图中：η为波面高程；A为入射波振幅．由图可知：波高的数值计算结果与理论结果的最大波高误差在5%以内，符合良好，说明了本文模型造波的可靠性.

设γ为潜堤充盈度，即潜堤内部实际充水体积与最大充水体积的比值．图6展示了波浪周期T=1.11 s时在x=12.7 m处放置单列全充盈(γ=100%)潜



—— 理论结果；- - - 数值结果.

图5　模拟计算得到的空水槽波面历时曲线与线性波理论结果的对比

堤，模型计算的G1～G4的波面历时曲线与试验数据的对比．由图可知：当模型计算趋于稳定后，该充盈度各位置的计算波面曲线与试验结果符合良好．

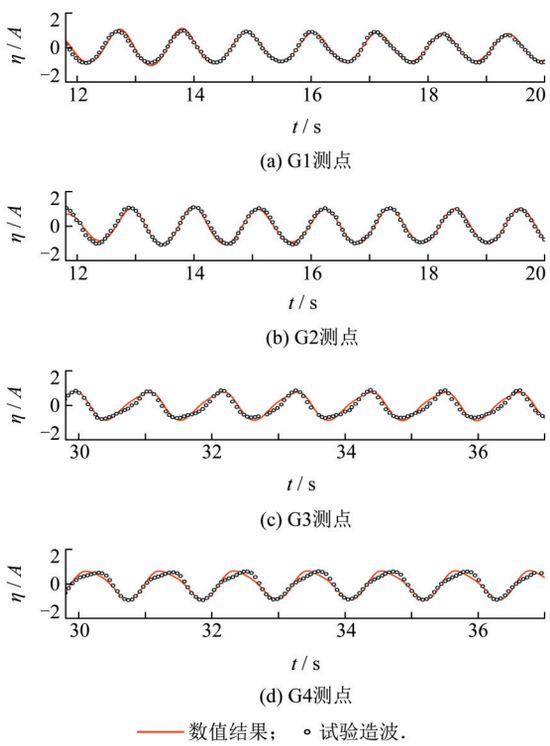


图6　全充盈试验与数值模拟波面历时曲线

图7展示了模型计算的全充盈(γ=100%)单列充液膜式潜堤的透射及反射系数变化，并与试验结果进行了对比．图7中：B/L为无量纲参数，其中L为波长；C_T为透射系数；C_R为反射系数．该无量纲参数的变化由改变波浪周期(0.83～1.43 s)从而改变波长实现．透反射系数均采用GODA(合田两点法)计算，如图7所示，在不同B/L下，全充盈潜堤的数值模型结果与试验数据符合度较高，反射系数的变化规律与试验结果基本一致，透射系数在中长波时透射系数略有差异，最大误差不超过5%，说明该模型对模拟全充盈潜堤效果良好．

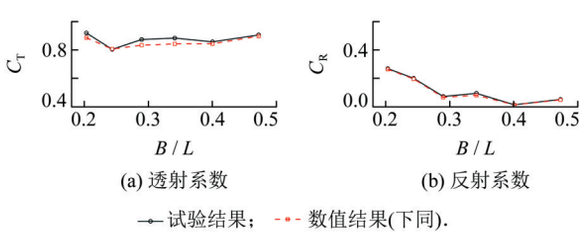


图7　模型计算的全充盈单列充液膜式潜堤透射及反射系数与试验结果的对比

图8展示了模型计算的较小充盈度(γ=84%)单列充液膜式潜堤透射及反射系数变化，并与试验结果进行了对比．对于充盈度较小的情况，在不同B/L下，反透射系数的变化趋势基本与试验结果一致，反射数值结果只在中长波时略有差异，可能由于试验的三维效应造成的．上述结果表明：无论是充盈度较高或较低的情况，本研究构建的流固模型均能合理复现充液膜式潜堤的消浪情况，可进一步开展后续数值实验研究．

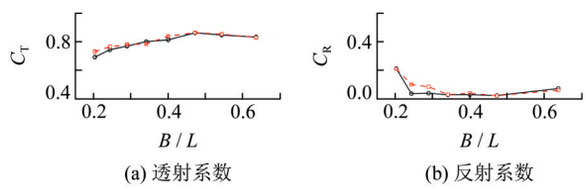


图8　模型计算的较小充盈度单列充液膜式潜堤透射及反射系数与试验结果的对比

3　双列充液膜式潜堤数值试验结果

基于前述已验证的流固耦合数值模型，进一步开展了波浪与双列充液膜式潜堤相互作用的数值试验，探究双列充液膜式潜堤的布拉格共振消浪特性及关键参数充盈度对潜堤消浪作用的影响，并与单列潜堤的消浪效果进行了对比，明确双列充液膜式潜堤相较于单个充液膜式潜堤的消浪优势．

3.1　数值实验工况设置

数值试验水槽设置如图9所示．空水槽及潜堤参数均与第2节一致．水槽中布置有双列充液膜式潜堤，第一列潜堤中心固定于x=12.7 m处，两列潜堤底部中心间距为s，s随第二列潜堤中心位置的改变而改变，从而探究不同相对间距$2s/L$情况下双列充液膜式潜堤的消浪特性．

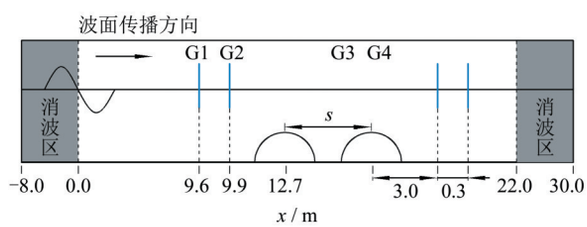


图9　双列潜堤数值水槽示意图

试验工况如表1所示，设水槽静水深为0.4 m，入射波为规则波，波高为0.04 m．考虑三种波浪周期的情况，每个周期下$2s/L$的变化范围为0.8～2.0．试验中两列潜堤保持相同充盈度，充盈度变化范围为84%～100%，涵盖了充液膜式潜堤从低充盈到全充盈的典型工作状态．数值水槽设置有四个浪高仪(G1～G4)用于记录堤前堤后的波面情况以计算波浪反透射系数，其中G1在x=9.6 m处，G2在x=9.9 m处；G3位于第二列潜堤中心后方3 m

处，G4 位于 G3 后方 0.3 m 处.

表 1　数值试验工况

组况	$2s/L$	T/s	γ/%
1	0.8～2.0	1.00	
2	0.8～2.0	1.25	84,88,90,92,94,96,100
3	0.8～2.0	1.43	

3.2　双列充液膜式潜堤的布拉格共振特性

图 10 展示了不同周期情况下波浪反透射系数随 $2s/L$ 的变化(γ=90%，100%)，可见：波浪周期越大，双列充液膜式潜堤的消浪性能越好；各周期下，无论是高充盈度、中充盈度还是低充盈度，充液膜式潜堤的反射系数均呈现先增大后减小、再增大再减小的趋势；反射系数的极大值均出现在 $2s/L$=0.9 与 1.8 左右，此时透射系数出现极小值，且最大反射系数和最小透射系数均出现在 $2s/L$=0.9 左右．上述结果证明了双列充液膜式潜堤能对波浪产生一定的布拉格反射效果，且当布拉格反射最强

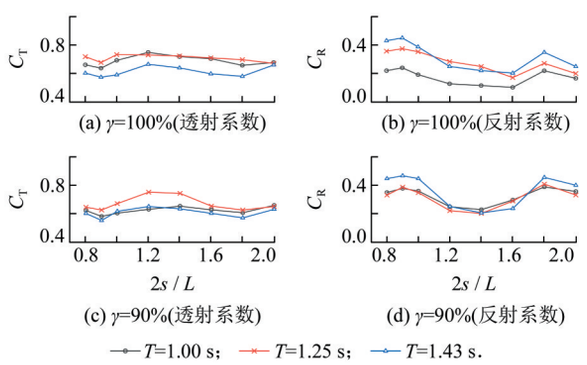


图 10　不同周期下波浪反透射系数随 $2s/L$ 的变化

时，消波性能最好；但双列充液膜式潜堤的布拉格共振主频($2s/L$=0.9)相比理论布拉格共振主频($2s/L$=1)存在下移的情况，这应该是由于柔性结构在波浪作用下会发生结构非线性运动响应，从而改变了布拉格共振主频发生的位置.

3.3　充盈度影响分析

在确认了双列充液膜式潜堤的布拉格共振效果之后，将进一步探究关键参数充盈度对双列充液膜式潜堤消浪效果的影响．图 11 对比了组况 1 在不同充盈度情况下，双列充液膜式潜堤的反射系数、透射系数及耗散系数 C_D 随 $2s/L$ 的变化情况．耗散系数根据能量守恒原理由下式计算

$$C_D = \sqrt{1 - C_R^2 - C_T^2}.$$

如图 11 所示，除了图 10 中涉及的充盈度，其他充盈度情况下双列充液膜式潜堤也都呈现在 $2s/L$ 为 0.9 及 1.8 时反射系数较大、透射系数较小．当双列充液膜式潜堤在充盈度为 88%～92% 范围内时，反射和消波效果更佳，其中充盈度为 90% 时消波效果最好，而大充盈度及低充盈度消波效果相对较差．此外，双列充液膜式潜堤的耗散系数也在充盈度为 88%～92% 范围内整体较大，此时双列潜堤结构变形幅度较大，反射能力较强；且在不同充盈度情况下，耗散系数也在 $2s/L$ 为 0.9 及 1.8 时呈现较大的特征，表明当双列充液膜式潜堤布拉格共振时，不仅能增大反射系数，也能增大耗散系数，从而增强整体消浪效果.

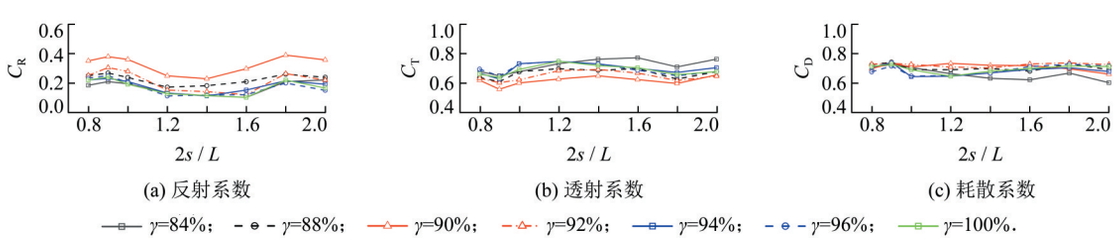


图 11　组况 1 各充盈度反射、透射和耗散系数对比

3.4　与单列充液潜堤的对比

图 12 展示了组况 1～组况 3 中 $2s/L$=0.9 情况下双列充液膜式潜堤反射、透射系数随充盈度的变化与单列充液膜式潜堤的对比．如图 12 所示，两个组况中双列充液膜式潜堤的反射系数在不同充盈度下均明显大于单列潜堤；相比单列潜堤，双列充液膜式潜堤透射系数随充盈度的变化幅度较小，而单列潜堤只在一个较小的充盈度范围内才能展现出其消浪优势．上述结果证明了双列充液膜式潜堤相比单列潜堤的消浪优势．基于布拉格共振原理，双列充液膜式潜堤可进一步提高消浪效果，并显著降低充盈度对潜堤整体消浪效果的影响，增大充液膜式潜堤实际应用的便利性.

图 13 为组况 1 和组况 3 中 $2s/L$=0.9 情况下双列充液膜式潜堤耗散系数随充盈度的变化与单列充液膜式潜堤的对比．如图 13 所示：双列充液膜式潜堤的耗散效果随充盈度的变化较小，在充盈度大于 92% 的情况下比单列潜堤结果整体更好，而当充盈度小于 92% 时，双列充液膜式潜堤的耗散效果会接近或低于单列潜堤．上述结果表明：相比单列潜

堤，当充盈度较小时，双列充液膜式潜堤主要通过增大反射作用提高消浪效果；当充盈度较大时，双列充液膜式潜堤主要通过增大反射和耗散作用提高消浪效果.

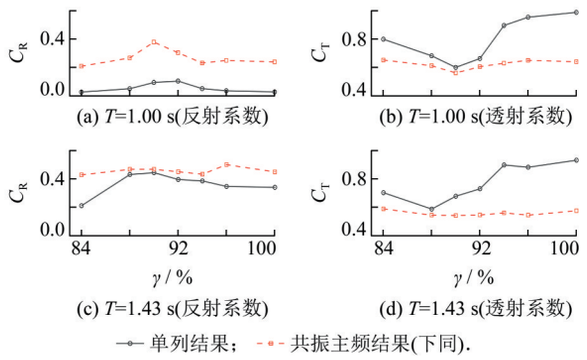


图 12　反射、透射系数随充盈度的变化

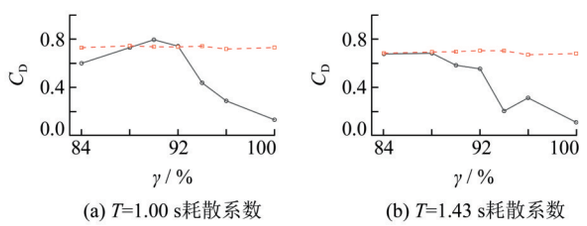


图 13　不同入射波周期下耗散系数对比

4　结论

a．双列充液膜式潜堤能通过布拉格共振效应强化消波效果，且在 $2s/L$=0.9 情况下存在显著共振效应，此时透射系数最小、反射系数最大，消波效果最佳；相比理论布拉格共振，双列充液膜式潜堤布拉格共振存在主频下移的现象；相比刚性潜堤的布拉格共振，柔性潜堤增大反射系数的同时也增大耗散系数.

b．双列充液膜式潜堤的整体建议充盈度范围为 88%～96%；波浪周期对该范围存在调控作用，波浪周期越大，消波效果最优的充盈度范围越宽；较小周期(1.00 s)时充盈度为 90% 的双列充液膜式潜堤消波效果最优，较大周期(1.25 s，1.43 s)时充盈度为 96% 的消波效果最优.

c．相比单列充液膜式潜堤，具备布拉格共振效应的双列充液膜式潜堤消浪效果整体更佳，且能显著降低充盈度对潜堤消浪效果的影响．当充盈度较小时，双列潜堤主要依靠增大反射作用提升消浪效果；当充盈度较大时，双列潜堤能通过同时强化反射作用与耗散作用实现更优消浪表现.

本文模型尚未考虑三维效应、不规则波及不同海底地形的影响，后续可开展相关研究.

参　考　文　献

[1] 王禹迟．软土地基上重力式防波堤动力稳定性及长期变形特性研究[D]．天津：天津大学，2017.

[2] 夏志盛，牛圣良，侯法垒，等．孤立波对复式斜坡堤上行人冲击作用研究[J]．华中科技大学学报(自然科学版)，2026，54(4)：123-130.

[3] 彭秀凤，裴芸．橡胶坝运行管理中存在的问题及对策[J]．山东水利，2022(7)：59-60.

[4] JAFARZADEH E，KABIRI-SAMANI A，MANSOURZADEH S，et al．Experimental modeling of the interaction between waves and submerged flexible mound breakwaters[J]．Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers，Part M：Journal of Engineering for the Maritime Environment，2021，235(1)：127-141.

[5] 刘畅，刘维杰，金袭，等．聚焦波与水囊潜堤相互作用的试验与数值模拟研究[J]．海洋工程，2025，43(2)：12-24.

[6] ZHAO X Z，ZHOU Y W，ZONG Y Y，et al．A CIP-based numerical simulation of wave interaction with a fluid-filled membrane submerged breakwater[J]．Ocean Engineering，2022，260：111819.

[7] 王臣，杨志坚，赵西增，等．波浪与水囊潜堤相互作用的数值模拟[J]．水运工程，2022(2)：23-29.

[8] LIU H W，SHI Y P，CAO D Q．Optimization of parabolic bars for maximum Bragg resonant reflection of long waves[J]．Journal of Hydrodynamics：B，2015，27(3)：373-382.

[9] LIU Y，LI H J，ZHU L．Bragg reflection of water waves by multiple submerged semi-circular breakwaters[J]．Applied Ocean Research，2016，56：67-78.

[10] 张发鸿．聚焦波与多个潜堤相互作用的数值模拟[J]．水资源研究，2021，10(1)：102-110.

[11] YU S，LEE S，HEO S，et al．Numerical and experimental study on the wave-attenuation effect according to the height of a two-row submerged rectangular structure[J]．Journal of Ocean Engineering and Technology，2024，38(6)：361-369.

[12] 陈本毅，赵西增，刘竹琴，等．柔性水囊潜堤消波特性的溃坝水槽试验研究[J]．海洋工程，2020，38(5)：71-79.

[13] ZONG Y Y，YU C H，ZHAO X Z．Simulations of interaction between flow and a thin elastic beam using CIP-based model with adaptive mesh[J]．Ocean Engineering，2023，270：113621.

[14] ZHENG K Y，ZHAO X Z，YANG Z J，et al．Numerical simulation of water entry of a wedge using a modified ghost-cell immersed boundary method[J]．Journal of Marine Science and Technology，2020，25(2)：589-608.