



# 高烈度地震区袋装砂堤液化数值模拟及措施\*

曾远<sup>1</sup>, 蒋腊梅<sup>2</sup>, 贾敏才<sup>3</sup>

(1. 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200120;

2. 中交第三航务工程勘察设计研究院有限公司, 上海 200030; 3. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

**摘要:** 袋装砂以工期快、造价低、适应性强的特点得到广泛应用。但对袋装砂液化问题的研究较少, 尤其是高烈度地区, 袋装砂无法像普通吹填砂一样进行密实处理, 在强震作用下, 袋装砂棱体的液化变形成为不可忽略的因素, 液化问题已经成为袋装砂棱体在海外强震国家和地区推广应用的制约。本文采用 FLAC 3D 对袋装砂堤在强震作用下的场地液化度、加速度等动力响应进行深入分析, 并提出了降低液化的措施。对袋装砂棱体结构在东南亚市场推广应用起到借鉴作用。

**关键词:** 高烈度; 袋装砂堤; 液化; 数值模拟; FLAC 3D

中图分类号: U65; TU435

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)01-0185-08

## Numerical simulation and measures of liquefaction of bagged sand embankment in high-intensity seismic areas

ZENG Yuan<sup>1</sup>, JIANG Lamei<sup>2</sup>, JIA Mincai<sup>3</sup>

(1. Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd., Shanghai 200120, China;

2. CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China;

3. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Bagged sand has been widely used due to its fast construction period, low cost and strong adaptability. However, there are few studies on the liquefaction of bagged sand, especially in high-intensity seismic areas, where bagged sand cannot be compacted like hydraulic fill sand. Under strong earthquake conditions, the liquefaction deformation of bagged sand embankment has become a non-negligible factor, and the liquefaction problem has become a restriction on the promotion and application of bagged sand embankment in overseas high-intensity seismic countries and regions. In this paper, FLAC 3D is used to analyze the dynamic response of the bagged sand embankment under strong earthquakes, such as liquefaction degree and acceleration, and measures to reduce liquefaction are proposed. It can be used as a reference for the promotion and application of bagged sand structure in the Southeast Asian market.

**Keywords:** high-intensity; bagged sand embankment; liquefaction; numerical simulation; FLAC 3D

袋装砂是通过水力作用将粉细砂或中粗砂充填至编织布或机织布袋体内形成的结构形式, 其施工工艺简单高效, 综合经济效益高。自 20 世纪 80 年代以来, 在围海造地、防汛大堤、防波堤、

护岸、路堤等各类工程项目中均得到广泛应用<sup>[1-5]</sup>。

我国沿海地区地震烈度一般不高, 大部分设防烈度为 6~7 度(0.05g~0.15g), 少部分地区设

收稿日期: 2024-03-21

\*基金项目: 中交上海航道局科技研发项目(SHJKJ-2021-023)

作者简介: 曾远(1977—), 男, 博士, 高级工程师, 从事岩土工程设计、研究工作。

防烈度达到 8 度 (0.20g ~ 0.30g)<sup>[6]</sup>, 袋装砂的液化问题并不突出。

对于海外强震国家和地区如菲律宾和印尼地区(地震峰值加速度达到 0.40g ~ 0.46g)<sup>[7]</sup>, 建造围堤通常采用全清淤结合回填散砂, 并采用振冲等手段对围堤砂进行密实, 消除液化。排水板加袋装砂结构在造价和工期方面具有明显优势。尽管袋装砂存在袋体的束缚, 在一般地震强度作用下, 液化问题并不突出, 但由于袋装砂无法像普通吹填砂一样进行密实处理, 在强震作用下, 袋装砂棱体的液化变形成为不可忽略的重要因素。如果发生严重液化, 棱体结构强度明显降低, 大堤的结构可能发生沉陷和位移破坏。解决袋装砂棱体在高烈度下的液化问题, 对推广袋装砂棱体应用, 发展海外市场具有重大的参考意义。

本文依托菲律宾某填海造地项目, 位于马尼拉的巴库尔湾。建设内容为护岸及陆域形成, 平面布置见图 1。防波堤为斜坡式结构, 堤身采用袋装砂棱体, 采用中砂充填, 高度 8.0 m。为分析袋装砂棱体抗液化能力, 采用 FLAC 3D 数值模拟袋装砂在强震下的液化、加速度等动力响应。

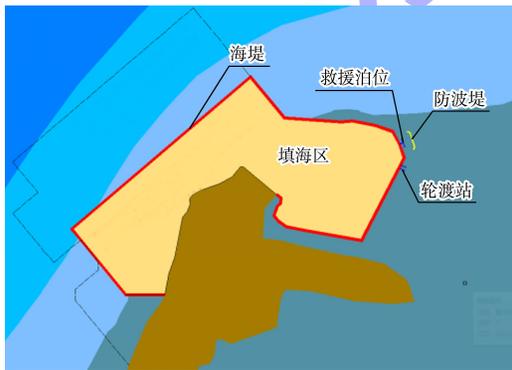


图 1 项目平面布置  
Fig. 1 Project layout

### 1 模型及计算参数

#### 1.1 本构模型及材料参数

袋装砂堤模型如图 2 所示, 模型尺寸为 12 m × 2 m × 7.2 m (长 × 宽 × 高), 分为纯流体、袋装砂堤及自由场 3 部分。袋装砂堤位于 0 ≤ X ≤ 10 m 范围内, 从上至下分为 12 层, 每层厚度为 0.6 m。10 ≤ X ≤ 12 m 范围为后方陆域回填场地。

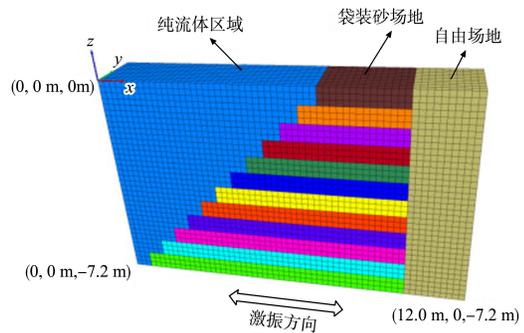


图 2 袋装砂堤模型

Fig. 2 bagged sand embankment model

砂土采用实体单元, 本构模型包括两类: 摩尔库仑模型和界面亚塑性模型。其中, 摩尔库仑模型应用于静力计算阶段, 界面亚塑性模型应用于动力计算阶段, 以考虑动孔隙压的积累与消散。

在静力计算阶段, 选用 FLAC 3D 提供的摩尔库仑模型, 包含 5 个基本力学参数, 见表 1, 对应的砂土相对密实度为 50%。

表 1 土体摩尔库仑模型参数

Tab. 1 Parameters of Mohr Coulomb soil model

砂土类型	密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 $E / \text{MPa}$	黏聚力 $c / \text{Pa}$	摩擦角 $\varphi / (^\circ)$	泊松比 $\nu$
中砂	1 614	28	0	38	0.3

在动力计算阶段, 选用 Wang 等<sup>[8]</sup>提出的界面亚塑性模型, 对应中砂的参数见表 2。该本构模型在 FLAC 3D 中能够有效地捕捉和分析地震荷载下颗粒土的超静孔隙水压力的产生, 从而模拟砂土液化, 并验证模型在模拟砂土液化问题中的可靠性<sup>[9-10]</sup>。

表 2 界面亚塑性模型的力学参数取值

Tab. 2 Mechanical parameter values of boundary surface hypoplasticity model

砂土类型	$\varphi/(\circ)$	$G_0$	$K$	$\lambda$	$R_p/R_t$	$b$	$K_r$	$h_p$	$h_r$	$d$
中砂	38	170	$1.3 \times 10^{-3}$	$6.7 \times 10^{-3}$	0.75	2	0.5	35	0.28	15

注:  $G_0$  为剪切模量系数,  $K$  为固结试验中卸载再加载的压缩性,  $\lambda$  为固结试验中初加载的压缩性,  $R_p/R_t$  为三轴压缩试验中相变线与破坏线斜率的比值,  $b$  为考虑初剪加载应力路径形状的影响,  $K_r$  为剪切荷载引起的有效平均正应力变化量,  $h_p$  为最大有效平均正应力变化引起的剪切应变增量,  $h_r$  为三轴压缩试验中剪切模量系数,  $d$  为剪切卸载引起的有效平均正应力变化率。

土工编织袋采用土工格栅单元模拟, 能抵抗受拉荷载, 但不能抵抗压力和弯曲荷载。格栅单元与实体单元发生剪切摩擦作用, 接触面的剪切特性包括黏聚力和摩擦作用。参数如表 3 所示, 包括材料密度、弹性模量、厚度参数等, 依据土工布的室内拉伸试验以及理论公式推导确定<sup>[11-12]</sup>。

表 3 土工格栅结构单元的参数取值

Tab. 3 Parameter values for geogrid structural units

$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量/GPa	切向刚度/ $(\text{N} \cdot \text{m}^{-3})$	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(\circ)$
2 250	1.8	$2.3 \times 10^6$	30	50

土工格栅从上至下分为 12 层, 与实体单元建模中袋装砂场地的分层相对应。在两层土工袋的相邻界面, 均存在两层土工格栅, 一层从属于上部实体单元, 另一层从属于下部实体单元。在动力荷载作用下, 除了土体与格栅之间会产生剪切摩擦外, 格栅与格栅之间也存在剪切摩擦, 从而模拟土工袋之间的相互摩擦耗能。

### 1.2 边界条件、阻尼设置及地震荷载

模型采用自由场边界作为动力分析的边界条件。FLAC 3D 程序会自动在模型周围生成一圈自由场网格, 自由场网格与模型中的网格相互耦合, 两者运动同步, 以达到模拟自由场边界的目的。

本文模型较为简单, 单个模型中仅存在 1 组砂土参数, 因此可以采用滞后阻尼, 使用模量衰减系数  $M_s$  描述土体的非线性特性:

$$M_s = s^2(3-2s) \quad (1)$$

$$\text{其中: } s = (L_2 - L) / (L_2 - L_1) \quad (2)$$

式中:  $L = \lg y$ ,  $L_1$  与  $L_2$  为默认模型的 2 个参数, 表示  $M_s$  曲线的循环应变范围。对于中砂的阻尼参数分别取 -3.113 和 0.823。

数值模拟中的动力荷载采用地震波, 方向与 X 轴平行, 输入的动力荷载曲线见图 3, 峰值加速

度 0.46g, 可通过命令流中的数据“乘子”控制荷载幅值的大小。

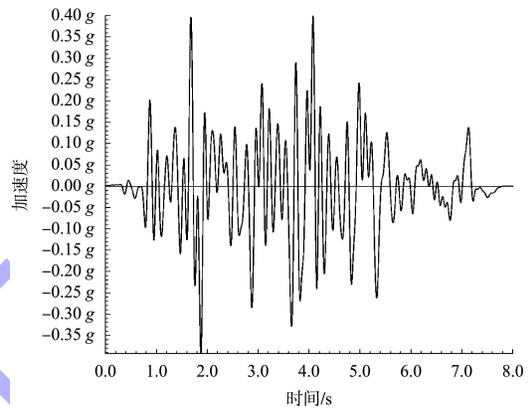


图 3 输入的动力荷载波形

Fig. 3 Input dynamic load waveform

### 1.3 监测点设置和计算工况

监测点均位于模型中心线上, 深度分别为 -0.9、-2.7、-4.5、-6.3 m。并取周围 4 个节点的平均值作为监测点的数据。

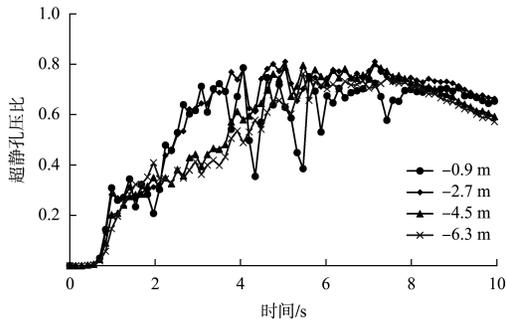
计算模型底部为不透水边界, 孔隙水可向模型表面、边坡面及与右侧砂土相邻面流动, 因此, 依据排水条件共设置 4 种工况。工况 1 为 3 个边界均可排水, 工况 2 为仅上表面不排水, 工况 3 为仅边坡面不排水, 工况 4 为上表面、边坡均不排水。

## 2 数值计算结果

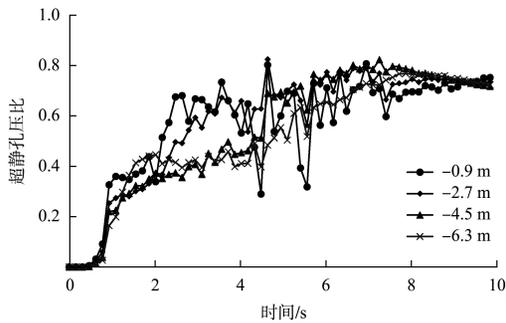
### 2.1 孔压分析

4 组工况下的场地超静孔压比时程曲线见图 4, 模型的液化度沿深度的变化曲线见图 5。为方便对比, 图 5 中加入了中砂自由场模型在 0.46g 地震峰值加速度作用下的场地液化度。由图可知, 各工况下袋装砂堤模型的场地液化度均明显低于自由场, 且当模型的表面或边坡不密封时, 场地

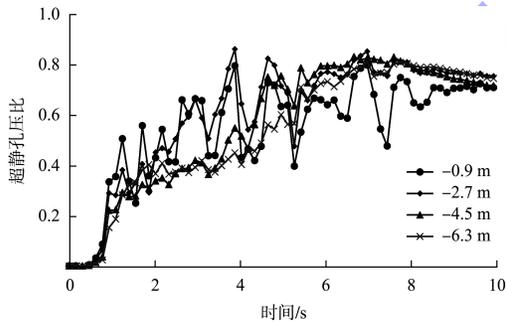
液化度约 0.83；当模型表面及边坡均密封时，场地液化度约达到 0.93，此时场地有发生液化的风险，需采取一定的措施降低液化度。



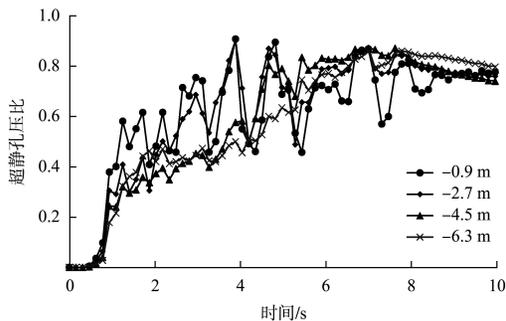
a) 工况1-中砂-不密封



b) 工况2-中砂-仅表面密封



c) 工况3-中砂-仅边坡密封



d) 工况4-中砂-表面、边坡均密封

图4 超静孔压比时程曲线

Fig. 4 Time history curves of ultra static pore pressure ratio

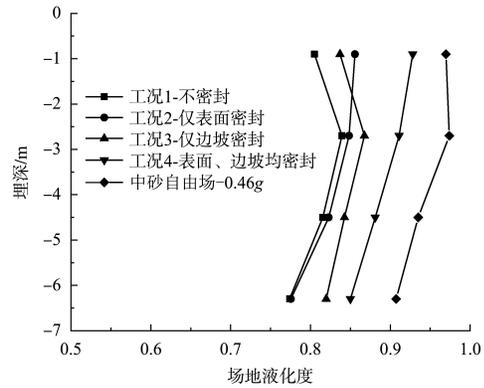


图5 袋装砂堤模型的液化度沿深度的变化

Fig. 5 Variation of liquefaction degree of bagged sand embankment model with depth

### 2.2 加速度分析

根据袋装砂堤模型的场地加速度响应绘制地表峰值加速度 (peak ground-motion acceleration, PGA) 沿深度变化曲线(图6)，其中PGA放大系数定义为某一点的加速度响应峰值与输入加速度峰值的比值。由图6可知，袋装砂堤对加速度没有明显的场地放大效应，相反，埋深越小，加速度响应的峰值越小，说明袋装砂堤对加速度有显著的减振隔振作用。

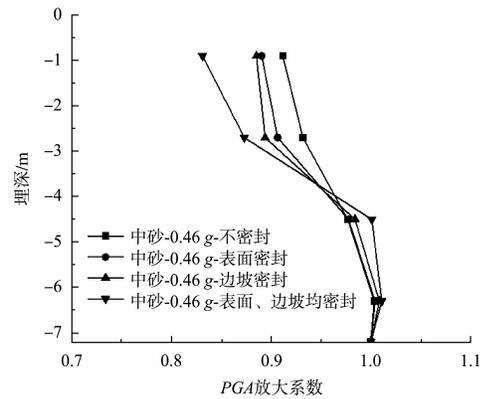


图6 PGA放大系数沿深度的变化

Fig. 6 Variation of PGA amplification factor with depth

与前3组工况相比，工况4浅层的加速度响应峰值明显减小，这是因为当袋装砂堤模型的表面及边坡均密封时，场地浅层的液化度达到0.9，接近液化；而当土层接近液化时，将阻碍加速度的传播，导致场地浅层的加速度响应减小。因此，从加速度的角度说明该工况下场地的液化度较高。

### 3 降低液化措施

#### 3.1 铺设碎石垫层

大量工程证明, 铺设碎石垫层可有效快速疏导外界荷载作用下产生的超静孔隙水压力。模型设置的碎石垫层为厚度 0.1 m、渗透系数 0.3 cm/s 的实体单元, 以模拟实际工程中的碎石垫层, 其余参数与土层一致。根据碎石垫层的埋设深度, 共设置 3 组工况, 埋深依次为 0.6、2.4、4.2 m。

图 7a) 为不同深度埋设碎石层后与不做抗液化处理的袋装砂堤场地液化度沿深度的变化曲线。对比可知, 铺设碎石垫层后, 各深度下的场地液化度均不同程度下降, 碎石垫层在袋装砂堤中形成良好的排水通道, 加快了超静孔压的消散, 从而降低场地液化度。

以不做抗液化处理的工况为基准, 绘制各工况中各组模型的液化度下降幅度, 见图 7b)。发现碎石垫层附近的场地液化度降幅较大, 约为 8%; 随着距离的增加, 液化度降幅明显减小。

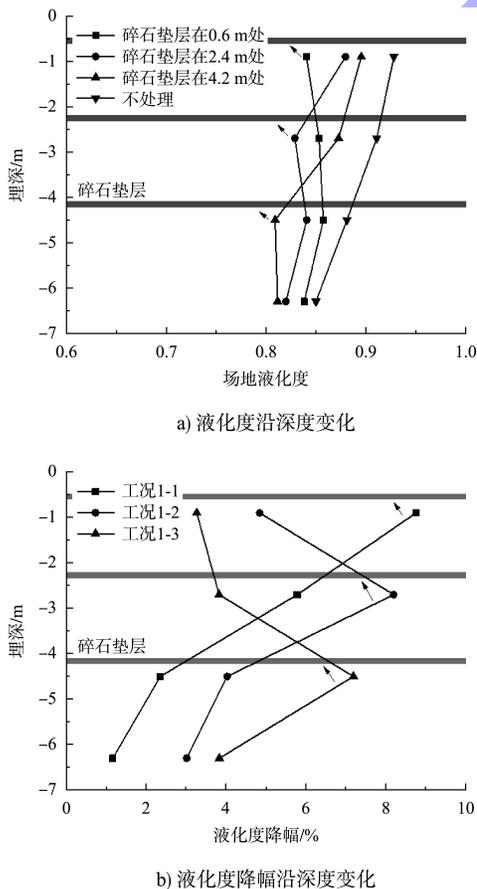


图 7 不同深度埋设碎石层后的场地液化度  
Fig. 7 Liquefaction degree of site after burying gravel layers at different depths

将测点到碎石垫层的距离与该点的液化度降幅建立联系, 如图 8 所示, 发现其下降曲线近似二次函数, 碎石垫层主要影响距离 2 m 以内场地的液化程度, 对距离 5 m 以上场地液化度的影响较小, 排水效果不明显。

图 9 为增加碎石垫层后各深度的加速度响应峰值, 图中各条曲线的差异并不明显, 这说明仅改变土层的渗透系数不会对地震波的传播产生太大影响。实际情况下的碎石垫层除了渗透性不同于周围土层外, 其静动力特性也可能存在一定差异, 本文的简化结果存在一定局限性。

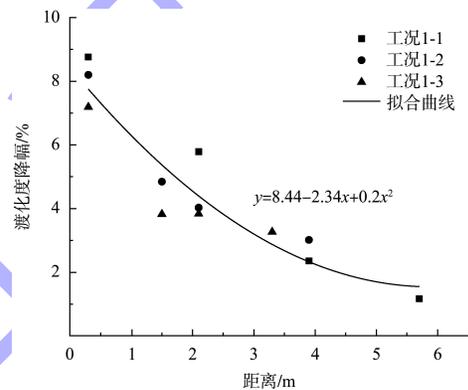


图 8 液化度降幅与碎石垫层距离的关系曲线  
Fig. 8 Relationship curve between decrease in liquefaction degree and distance of gravel cushion layer

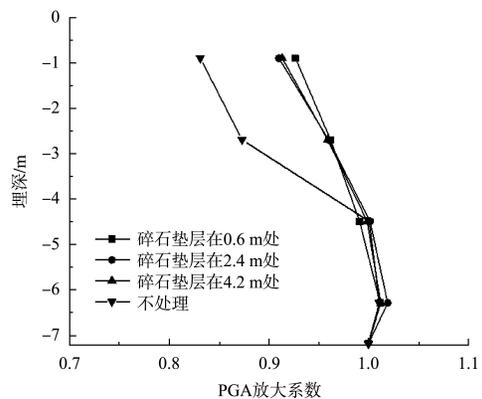
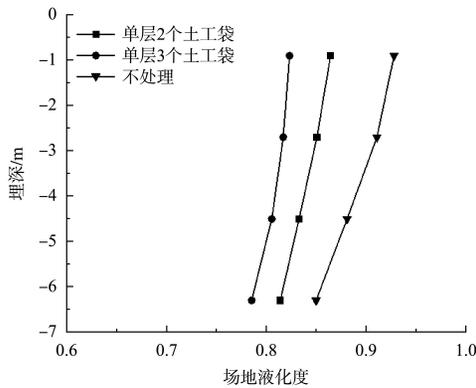


图 9 增加碎石垫层后的加速度响应峰值  
Fig. 9 Peak acceleration response after adding gravel cushion layer

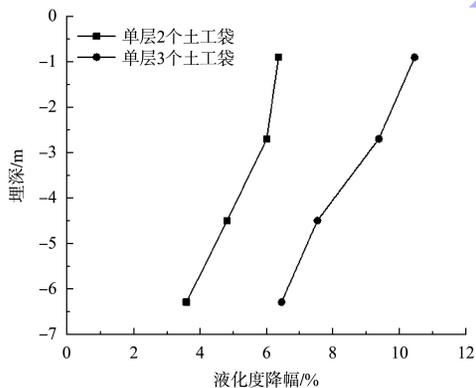
#### 3.2 减小土工袋尺寸

在原通长袋装砂堤模型的基础上, 减小单个土工袋尺寸, 将单层土工袋的数量分别设为 2 个和 3 个。

图 10a)为调整砂袋长度后与通长砂袋的袋装砂堤场地液化度沿深度的变化曲线。对比结果表明,相较于单层通长土工袋,当单层土工袋数量为2时,场地液化度下降约4%~6%;当单层土工袋数量为3时,液化度下降约6%~10%。这是由于土工袋数量的增加增大了土体与土工袋之间的接触面积,在动力荷载作用过程中,结构耗能增加。



a) 液化度沿深度变化



b) 液化度降幅沿深度变化

图 10 工况 2 的场地液化度

Fig. 10 Ground liquefaction degree under condition 2

模型的加速度响应峰值沿深度的变化规律见图 11, 加速度响应峰值随土工袋数量的增加明显减小。PGA 放大系数在深度约 6 m 处出现拐点, 且 0~6 m 埋深土层的地震波峰值均小于输入波峰值, 这表明地震波在向上传播的过程中, 很大一部分能量被模型中下部的土工袋消耗, 表现出优异的减震性能, 从而起到抵抗液化作用。

理论上增加单层土工袋数量可以增加模型的排水通道, 但局限于建模精度, 本文并未考虑土

工袋界面的排水效果, 因而相较于实际情况, 数值模拟的结果偏大, 计算结果偏保守。模型浅层的液化度约在 0.8 以下, 场地发生液化的可能性较低。

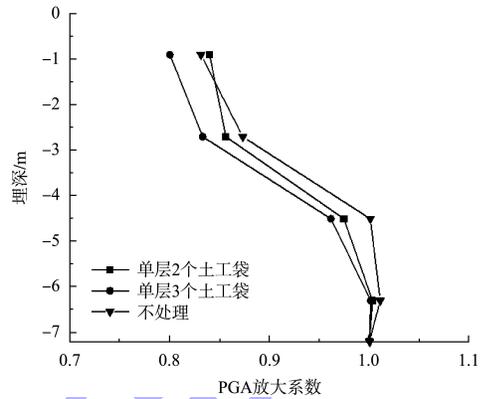


图 11 工况 2 的加速度响应峰值

Fig. 11 Peak acceleration response of condition 2

图 12 为单层 3 个土工袋工况下的最大膜应力云图, 反映了土工袋受力后的拉应力大小。比较 3 种工况, 单层设置 1 个土工袋的最大拉应力为 823.7 kPa, 出现在袋体的拐点处; 单层 2 个土工袋的最大拉应力为 1 045.9 kPa; 单层 3 个土工袋的最大拉应力为 1 533.6 kPa。土工袋尺寸越小、单层土工袋数量越多, 土工袋所产生的拉应力越大, 越可约束袋内土体, 起到加固土体的作用。因此减小土工袋尺寸能更好地抵抗土体液化。

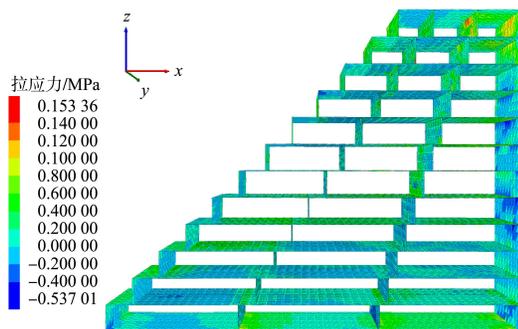


图 12 单层 3 个土工袋的拉应力

Fig. 12 Tensile stress of three geotbags in single-layer

### 3.3 增大土工袋模量

设置 3 组工况对应不同的弹性模量, 分别为初始弹性模量(1.8 GPa)的 1.5、2 和 3 倍, 以此探究土工袋的材料性能对抗液化的影响。

3 个模型的液化度沿深度的变化规律见图 13a)。随着土工袋弹性模量的增大, 模型整体的液化程度明显下降。与弹性模量为 1.8 GPa(即初始弹性模量)条件相比, 各组模型的液化度的下降幅度见图 13b), 发现各深度下峰值下降幅度趋同。土工袋弹性模量越大, 抵抗液化的能力越高。

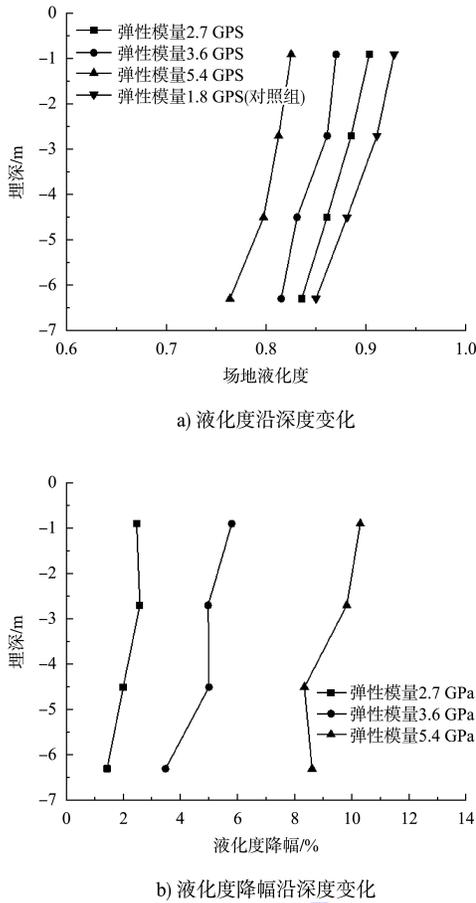


图 13 不同弹模的袋装砂的液化度  
Fig. 13 Liquefaction degrees of bagged sand with different elastic modulus

理论上, 土工袋的弹性模量越大, 在受到地震荷载作用后, 土工袋的拉应力越大, 其对土体施加的附加应力也越大, 土体内部能够产生更大的附加黏聚力, 以更好地抵抗液化。根据 3 个模型土工袋的最大拉应力云图, 其应力峰值分别为 1 228.0、1 672.0、1 977.5 kPa。初始弹性模量 1.8 GPa 的土工袋产生的最大拉应力为 823.7 kPa, 随着土工袋弹性模量的增大, 土工袋的最大拉应力也随之增加, 增幅分别为 49.1%、103.0%、

140.1%, 因此, 证明土工袋的弹性模量与受到地震荷载作用后所产生的拉应力成正比。

图 14 为不同模量土工袋的袋装砂加速度响应峰值沿深度的变化曲线, 各工况下加速度响应较为相似, 说明单独改变弹性模量对场地加速度响应的影 响不大。

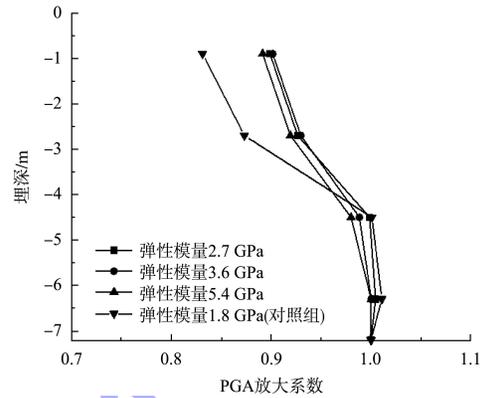


图 14 不同弹性模量袋装砂的加速度响应峰值  
Fig. 14 Peak acceleration responses of sand bags with different elastic molds

### 3.4 抗液化措施效果对比

表 4 为各种抗液化措施作用下, 袋装砂堤模型的场地液化度相较于初始工况的下降幅度。其中铺设厚度 0.1m 的碎石垫层能降低周围土体约 8%的液化度, 但随着距离的增加, 抗液化效果逐渐减弱; 减小土工袋尺寸、增大土工袋弹性模量均可减低模型整体的液化度, 降幅为 2%~10%。

表 4 抗液化措施作用下的袋装砂堤液化度降幅  
Tab. 4 Reduction of liquefaction degree of bagged sand embankments under anti-liquefaction measures

抗液化措施	工况	液化度降幅/%			
		0.9 m	2.7 m	4.5 m	6.3 m
铺设碎石垫层	1-1	8.8	5.8	2.4	1.2
	1-2	4.8	8.2	4.0	3.0
	1-3	3.3	3.8	7.2	3.8
减小格栅尺寸	2-1	6.4	6.0	4.8	3.6
	2-2	10.5	9.4	7.5	6.5
增大格栅模量	3-1	2.5	2.6	2.0	1.4
	3-2	5.8	5.0	5.0	3.5
	3-3	10.3	9.8	8.3	8.6

注: 无抗液化措施时, 埋深 0.9、2.7、4.5、6.3 m 的液化度分别为 0.928、0.911、0.881、0.850。

由于袋装砂堤的液化程度往往呈现出浅层高、深部低的规律,袋装砂堤模型表层存在弱透水层条件下,埋深 4.5 m 范围内的土层液化度在 0.88 以上,场地浅层一般需要采取抗液化措施。可对该部分的袋装砂堤采取上述措施,以保证袋装砂堤结构的稳定性与安全性。

#### 4 结论

1) 相比于自由场,袋装砂堤的场地液化度明显降低,体现出良好的抗液化性能;从加速度响应规律出发,袋装砂堤的加速度响应随场地埋深的减小而减小,体现了土工袋的减振隔振作用。

2) 当不密封时,袋装砂堤在 0.46g 地震峰值加速度作用下,场地液化度约为 0.83,发生液化的可能性较低;当仅表面或边坡密封时,场地液化度略有增加,但均未超过 0.90,表明此时袋装砂堤发生液化的可能性仍较低,结构保有较高的安全度。

3) 当袋装砂堤的表面及边坡均密封时,场地液化度明显上升,浅层的液化度约达到 0.93。这是因为此时孔隙水仅能向袋装砂堤相邻的自由场砂土一侧消散,超静孔压的消散速率大大降低。在此工况下,需对场地采取抗液化措施,以降低场地液化度。

4) 铺设碎石垫层(厚度 0.1 m)可有效降低袋装砂堤临近土层的液化度。研究发现,碎石垫层附近的场地液化度降低约 8%,距离 2 m 处的液化度降低约 4%;当距离超过 5 m 时,垫层对土体的排水效果不明显。

5) 减小土工袋尺寸、选用弹性模量更大的土工袋均能起到降低场地整体液化度的作用,降幅约为 2%~10%。

6) 由于数值模拟中未考虑土工袋的滤波与排

水作用,得到的场地孔压与加速度响应模拟结果较实际偏大,计算结果偏保守。

#### 参考文献:

- [1] 赵良奎. 长江口深水航道治理工程中袋装砂堤心斜坡堤结构设计[J]. 水运工程, 2006(S2): 24-27.
- [2] 刘若元, 张剑. 预制袋装砂在洋山深水筑堤工程中的应用[J]. 水运工程, 2007(6): 117-120.
- [3] 严海青, 杨志雄, 王远宏, 等. 大型袋装砂挡水围堰在市政工程中的应用[J]. 施工技术, 2019, 48(5): 119-122.
- [4] 刘斯宏, 松冈元. 土工袋加固地基新技术[J]. 岩土力学, 2007, 28(8): 1665-1670.
- [5] 刘斯宏, 汪易森. 土工袋技术及其应用前景[J]. 水利学报, 2007(S1): 644-648.
- [6] 中国建筑科学研究院. 建筑抗震设计规范(2016年版): GB50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [7] Association of Structural Engineers of The Philippines, INC. National Structural Code of the Philippines 2015: NSCP-2015 [S]. Quezon: Association of Structural Engineers of The Philippines, INC. 2015.
- [8] WANG Z L, DAFALIAS Y F, SHEN C K. Bounding surface hypoplasticity model for sand [J]. Journal of engineering mechanics(ASCE), 1990, 116(5): 983-1001.
- [9] 栾茂田, 吴兴征, 李相崧. 堆石料的亚塑性界面模型及其验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(2): 164-170.
- [10] 吕西林, 任红梅, 李培振. 地震作用下可液化土的数值模拟与试验验证[J]. 建筑科学与工程学报, 2009, 26(4): 1-6.
- [11] 水利部水利水电规划设计总院, 中国水利水电科学研究院. 土工合成材料应用技术规范: GB/T 50290—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [12] 高军军, 刘斯宏, 王柳江. 竖向荷载下土工袋的有限元数值模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2014, 42(6): 524-528.

(本文编辑 赵娟)