· 地基与基础 ·



软土地基上的港口陆域回填区场地 地震反应分析

卢生军,郭隆洽,丁建军

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司,广东广州 510290)

摘要:在软土地基上通过回填砂形成的港口后方陆域,其场地为在密实砂层下卧软弱土层的特殊场地。利用一维场地 地震反应分析软件 DEEPSOIL 的时域非线性分析方法建立分析模型,选择 10 组地震加速度记录作为输入地震动,分析该类 特殊场地的地震反应。结果表明,软弱土层在强震作用下会产生大的剪切变形,使滞回阻尼充分发挥从而耗散地震能量; 地震在通过软弱土层向上传递过程中迅速减小,软弱土层具有明显的减震和隔震效果。

关键词:软土地基;场地地震反应分析;DEEPSOIL

中图分类号: U652.7

文献标志码:A

文章编号: 1002-4972(2024)08-0256-07

Seismic ground response analysis of port backfilling land platform built on soft soil foundation

LU Shengjun, GUO Longqia, DING Jianjun

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China)

Abstract: For these port backfilling land platforms formed by sands built on soft soil foundation, its ground condition is special, which consists dense sand layer on top and with soft soil layers underneath. An analysis model is established by using the time-domain nonlinear analysis method of one-dimensional seismic ground response analysis software DEEPSOIL, and 10 sets of seismic acceleration records are selected as input ground motion to analyze the seismic response of this special ground. The results show that the soft soil layer will produce large shear strain under the action of strong earthquake, which fully utilizes hysteresis damping and dissipates seismic energy. The seismic ground motion decreases rapidly during the upward transmission in the soft soil layer, which means that the soft soil layer has obvious absorptio and isolation effects to seismic.

Keywords: soft soil foundation; seismic ground response analysis; DEEPSOIL

许多沿海港口后方陆域的建造一般是在原始 海床面以上通过回填砂土形成陆地,当海床面以 下存在天然软弱土层时,陆域建成后的场地条件 将与天然地基有明显差别。一般情况下,天然地 基中土的刚度和强度随深度而增长,而由于回填 砂层的存在,该层砂在通过密实处理后的刚度和 强度将明显高于其下方的软弱土层,此时港口陆 域形成在密实砂层下方下卧软弱土层的特殊场地。 下卧软弱土层会显著影响其上方回填砂层中的地 震反应,因而对这种特殊场地的地震反应分析在 港口陆域回填区的抗震设计中具有实际意义,例 如为评估回填砂土的液化提供合理、准确的设计 地震动参数等。

本文以某建造在天然软弱土层上的港口陆域 回填区为算例,通过 DEEPSOIL 软件中的一维时 域非线性分析方法,对其在设计地震作用下的场

收稿日期: 2024-03-20

作者简介:卢生军 (1986 —),男,硕士,高级工程师,从事海工结构的设计与研究。

地地震反应进行分析,获得了合理准确的地表动 峰值加速度 PGA_M 用于该回填区后续的砂土抗液 化设计,从而降低了工程的抗震设防成本。

1 研究现状

Wood 是最早开始进行场地地震响应分析研究 的学者,他在整理 1906 年发生在美国的旧金山大 地震的震害分析资料时发现不同场地条件出现的 地震灾害的程度不同,因此得出了场地对地面运 动是有影响的^[1]。随后,岩土地震工程领域的学 者们针对不同场地条件下的地面运动和地震反应 进行了广泛的研究。

通过 PROSHAKE 程序中的等效线性化方法, 丁玉琴^[2]对意大利中南部地区存在软土下卧层特 殊场地的地震反应进行分析,表明强震作用下软 弱土层将表现出显著的非线性特征,阻尼的增加 减小了土层的高频反应从而导致地表峰值加速度 的减小,说明软弱土层具有滤波和减震的作用。

伍林伟^[3]对含软弱夹层场地的地震反应进行 研究,结果表明地面峰值加速度放大系数受输入 地震动强度、软弱夹层厚度和软弱夹层位置的综 合影响,放大系数会随地震强度的增加而减小, 在强震作用下甚至会小于 0.5。

此外,美标 ASCE 7-16^[4]、欧标 EN 1998-1^[5] 以及菲律宾国家标准 NSCP-2015^[6] 均提出,对于 存在软弱土层的特殊场地,应开展专门的场地地 震反应分析确定场地设计地震动参数,因为该软 弱土层在强震作用下将发生较大的剪切变形而表 现出显著的非线性。

2 分析模型的建立

2.1 场地条件概况

依托工程位于菲律宾马尼拉湾内海域,通过 回填约15m厚的中粗砂层形成陆地用于港口开发 建设。在回填区范围内的原始海床面以下存在厚 度5~20m不等的天然软弱淤泥层,该淤泥层标贯 击数介于0~3击,抗剪强度极低、可压缩性强。 该回填陆域建成后的场地条件自上而下可概 括为4个土层单元:1)回填中粗砂层。厚度约 15.0m,经振冲及碾压处理后密实,饱和密度为 2.00 t/m³,内摩擦角36°。2)淤泥层。由上游河 流所挟带的泥沙沉积形成,标贯击数介于0~3击, 厚度5~20m不等,采用堆载预压工艺对其进行固 结处理,处理后的饱和密度为1.45 t/m³,不排水 抗剪强度约50 kPa。3)硬黏土层。属第四纪冲积 层,为硬黏土,标贯击数普遍大于20击,厚度15~ 30m不等,饱和密度为1.74 t/m³,不排水抗剪强 度大于150 kPa。4)凝灰岩层。为第四纪更新世 时期的沉积岩,剪切波速 v,在360~760 m/s。

2.2 分析方法及土体模型

强震作用下软弱土层会产生大的剪切变形而 表现出明显的非线性特征。因此,本文选择 DEEPSOIL的一维时域非线性方法开展场地地震反 应分析。

分析模型中土的本构关系采用双曲线本构 (MRDF)模型,骨架曲线选择广义二次/双曲线 (GQ/H),滞回阻尼特性选择 non-massing 准则。 此外,考虑大应变情况下对土体骨架曲线通过抗 剪切强度进行调整,即限制土的最大剪切应力不 超过其自身的抗剪强度^[7]。

模型中土层的分层厚度 h 根据各土层允许地 震波传播的最大频率 fmax 由下式确定:

$$f_{\rm max} = v_{\rm s}/(4h) \tag{1}$$

式中: ν_s 为剪切波速,m/s。一般情况下,每一土 层允许地震波传播的最大频率不得小于 25 Hz,本 文模型中取 f_{max} = 50 Hz。

2.3 场地土参数

分析模型考虑通过 DEEPSOIL 软件中的 Darendeli参考曲线拟合得到土的动剪切模量和阻 尼比。据此,模型中用于时域非线性分析的土参 数共6个,即土的密度、抗剪强度、超固结比、 塑性指数、剪切波速、动剪切模量及阻尼比,其 中前4个参数根据已有土工试验结果统计分析得 到,见表1。

~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~					
土层	密度/(t・m ⁻³)	不排水强度/kPa	内摩擦角/(°)	超固结比	塑性指数
回填砂层	1.80(天然),2.00(饱和)	-	36	1.0	-
淤泥层	1.45	45~55	-	2.0	71
硬黏土层	1.74	>150	-	2.0	40
凝灰岩层	1.71	-	-	-	-

(2)

表1 土层参数

2.3.1 剪切波速

回填砂层的剪切波速采用 Mayne 经验公式计算,即:

$$y = 118.5 \lg f + 18.5$$

式中:f。为静力触探试验的锥侧阻力,kPa。

淤泥层的剪切波速采用 Dickenson 经验公式计算,即:

$$v_{\rm s} = 23 S_{\rm u}^{0.475} \tag{3}$$

式中:S_u为土的不排水抗剪强度,kPa。

硬黏土层的剪切波速采用 PEER 经验公式计算,即:

$$v_{\rm s} = 30 N_{60}^{0.125} \sigma_{\rm v}^{\prime 0.275} \tag{4}$$

式中: N₆₀ 为标贯击数; σ',为竖向有效应力,kPa。 凝灰岩层属于软岩,根据菲律宾国家规范

NSCP-2015, 剪切波速在 360~760 m/s

通过上述方式确定的分析模型中土的剪切波 速随深度变化关系曲线见图 1。可以看出,经堆载 预压固结处理后的淤泥层的剪切波速在 150 m/s 左 右,仍明显小于其上方的回填砂层和下方的硬黏 土层,场地存在软弱中间夹层的特征十分明显。



图 1 剪切波速随深度变化

2.3.2 动剪切模量和阻尼比

模型采用 Darendeli 参考曲线拟合确定土的动剪 切模量和阻尼比,归一化的动剪切模量 *G*(γ)/*G*₀ 随 循环剪切应变幅值的双曲函数变化关系为:

$$\frac{G(\gamma)}{G_0} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_0}\right)^{\alpha}}$$
(5)

式中: G_0 为小应变时土的初始剪切模量, kPa, 其 值为 ρv_s^2 , ρ 为土的密度, t/m³; α 为曲率系数, 取 0.92; γ 为土体剪切应变, %; γ_r 为剪切应变阀 值, %, 采用下式计算:

$$\gamma_{\rm r} = (\phi_1 + \phi_2 + I_{\rm p} R_{\rm oc}^{\phi_3}) (\sigma_0' / p_{\rm a})^{\phi_4}$$
(6)

式中: $\phi_1 \sim \phi_4$ 为常数; I_p 为塑性指数; R_{oc} 为超 固结比; σ'_0 为围压,kPa; p_a 为参考压力,kPa。

因此, Darendeli 参考曲线中需要输入的土参数共4个:土的密度 ρ 、剪切波速 v_s 、超固结比 R_{oc} 和塑性指数 I_p 。此外,因为模型中考虑了土的抗剪强度限制,故还需要输入土的抗剪强度值,比如黏土的不排水抗剪强度 S_u 或砂土的内摩擦角 φ_o 。

通过 Darendeli 参考曲线拟合得到的某一深度 土体的动剪切模量和阻尼比曲线见图 2。



由图 2 可知,基于 Darendeli 参考曲线拟合的土体动剪切模量和阻尼比曲线与 Darendeli 参考曲线吻合较好,因为考虑了土的抗剪强度限制,拟合曲线中土的剪应力在大应变时将小于参考曲线,从而防止在大应变下土中的剪应力被高估。

2.4 输入地震动

本工程地震灾害性评估报告中确定的对项目 有主要影响的震源有 2 个,具体特征为:1) 震源 1 的震级为 7.6 级,475 a 重现期基岩地震峰值加 速度 PGA 为 0.40g;2) 震源 2 的震级为 8.2 级, 475 a 重现期基岩地震峰值加速度 PGA 为 0.40g。

美标 ASCE 7-16 规定,场地地震反应分析应 至少选择 5 组实测记录的或人工模拟的水平地震 动加速度时程,因此分析模型选取震源 1 和 2 各 5 组实测地震加速度时程,在进行目标谱匹配及基 线校正后,得到用于设计的 10 组地震加速度时程 曲线和加速度谱见图 3、4,其中目标谱采用菲律 宾国家规范 NSCP-2015 中的设计谱。





图 4 输入 FKS_ EW 地震加速度谱

2.5 模型验证

为验证 DEEPSOIL 计算模型的有效性,采用 PLAXIS 2D 软件建立相同的时域非线性分析模型, PLAXIS 模型中土层分布和土体参数同 DEEPSOIL 模型,土体本构模型选择小应变土体硬化(HSS) 模型,模型底部边界采用吸收边界以输入上行波 而吸收反射下来的下行波,模拟露头岩地震动。 得到在相同地震加速度时程 FKS_EW 作用下,地 震峰值加速度 PGA 随深度的变化见图 5。可以看 出,两个模型的 PGA 的规律与计算结果基本 一致。





3 场地敏感性分析

本文选择 DEEPSOIL 的一维时域非线性方法 分析场地的地震反应,但实际上地震作用下土层 的响应是一个复杂的三维问题。为评估场地条件 的空间变化对地震反应结果的影响,分析模型分 别对场地的基岩深度、基岩刚度、软土层厚度和 软土强度等4个方面开展敏感性分析。

3.1 基岩深度的影响

该回填区的岩面高程空间分布不均,在海床 面以下 25~50 m 深度范围变化。为评估基岩层深 度对场地地震反应的影响,模型中分别计算了 25、 30、40、50 m 的 4 个不同基岩深度,得到在相同 地震加速度时程 FKS_ EW 作用下,地震峰值加速 度 PGA 随深度的变化见图 6。



图 6 基岩深度对 PGA 的影响

由图 6 可以看出,总体上地震峰值加速度 PGA 在由地震基层向地表传递过程中,随基岩深 度的增加而减小,但当地震向上传递通过淤泥层 到达其顶部时的 PGA 不同深度结果趋于同一值, PGA 在回填砂层中不同基岩深度计算结果无明显 差异。导致这一结果的主要原因在于地震基层越 深,其向上传递的路径越长,因阻尼所消耗的地 震能量也越多,故相同位置处的 PGA 也越小。

3.2 基岩刚度的影响

根据菲律宾国家规范 NSCP-2015 的规定,该 基岩层为凝灰岩,剪切波速 v_s在 360~760 m/s, 范围较大。为评估基岩刚度对场地地震反应的影 响,模型中分别考虑基岩剪切波速为 300、400、 500、600、700 m/s 的 5 种情况,得到在相同地震 加速度时程 FKS_EW 作用下,地震峰值加速度 PGA 随深度的变化见图 7。

由图 7 可看出,总体上地震峰值加速度 PGA 在由地震基层向地表传递过程中,随基岩层刚度 的增加而增大,但当地震传递通过淤泥层到达其 顶部时的 PGA 将趋于同一值,PGA 在回填砂层中 不同基岩刚度计算结果无明显差异,这说明基岩 刚度对淤泥层上方回填砂层中的地震反应几乎没 有影响。



3.3 软土厚度的影响

该港口陆域回填区的软土(淤泥)层厚度空间 分布不均,在5~20 m范围变化,平均厚度约为 10 m。为评估软土层厚度对场地地震反应的影响, 模型分别模拟了软土层厚度为5、10、15、20 m的 4 种工况,得到在相同地震加速度时程 FKS_EW 作 用下,地震峰值加速度 PGA 随深度的变化见图 8。



由图 8 可看出,软土层的厚度对场地的地震 反应有显著影响。总体上,场地的地震峰值加速 度 PGA 随软土层厚度的增加而减小,这主要因为 强震作用下软土层将发生大的剪切变形和阻尼, 软土层越厚, 地震向上在软土层中传递的路径越 长, 因阻尼所消耗的能量越多, 从而导致的地震 反应就越小。

3.4 软土强度的影响

对软土层采用堆载预压固结处理,堆载高度 在空间上分布不均,为2~5m,软土越厚的区域 堆载越高。因软土处理后的强度随堆载高度正相 关,这将导致处理后的软土强度在空间上分布不 均。为评估该软土层强度变化对场地地震反应的 影响,模型分别计算了堆载高度为0、2、4、6、 8、10m的6种工况,得到在相同地震加速度时程 FKS_EW作用下,地震峰值加速度 PGA 随深度的 变化见图9。



由图 9 可看出,软土层的强度对场地地震反应 有明显影响。其中,软土强度的变化对其下方土层 的地震反应虽有影响,但没有明显的规律可循。然 而,在软土上方的回填砂层中,PGA 随软土强度的 增加而增大,这主要是因为强震作用下软土上方回 填砂层的地震反应受软土刚度和抗剪强度限制明 显,软土层的强度越大其刚度也相应越大,导致 地震在该层中消耗的能量越少而向上传递的能量 越多,故而其上方土层的地震反应也越大。

4 设计场地地震峰值加速度的确定

该港口工程受强震作用,且为密实回填砂层

下卧软弱土层的特殊场地,通过常用的不同国际 抗震规范确定的场地地震峰值加速度 PGA_M 存在 一定差异。为获得合理准确的场地设计地震动参 数 PGA_M 用于该港口陆域回填区后续的抗震设计, 对设计场地条件下的地震反应进行分析,模型中 采用的设计场地条件为根据上述敏感性分析结果 确定,具体为:1)基于敏感性分析可知,强震作 用下,软土层上方场地的地震反应主要受淤泥层 厚度和强度的影响显著,而与基岩层深度和刚度 关系不大,故分析模型的基岩深度取 25 m,基岩 的 v_s = 500 m/s_s 2) 基于敏感性分析可知,软土厚 度越小其上方场地的地震反应越大,软土强度越 高反应也越大。出于结构安全考虑,分析模型中 软土厚度取小值为5m,软土强度按最大堆载高度 5 m 考虑, 以便获得最不利的场地设计地震动 参数。

基于上述分析模型,计算得到地表加速度反 应谱与输入加速度谱的对比见图 10。可以看出, 地表加速度反应谱明显小于输入地震加速度谱, 谱面积约为输入加速度谱面积的 60%,但当周期 大于 1.5 s 时,地表加速度反应谱值则略大于输入 地震加速度谱,说明软土场地对地震反应谱的长 周期部分有增强作用。



反应谱输入加速度谱对比

计算得到的土层最大剪切应变随深度变化关 系见图 11。可以看出,硬黏土层和回填砂层中, 土体的最大剪切应变基本不超过 0.1%,此时土体 出于小应变的阶段,非线性特征不明显,而在淤 泥层中,由于土的抗剪强度低,土体的最大切应 变超过 1.0% 且最大达到了 3.0%,此时土体表现 出高度的非线性特征,滞回阻尼将充分发挥。



图 11 设计场地条件的土体最大切应变分布

计算得到的场地 PGA 随深度变化关系见图 12。 可以看出,不同加速度时程作用下场地 PGA 在淤 泥层迅速减小并在淤泥层与回填砂层的交界面处 趋于稳定的同一值。10 组输入地震加速度时程下 的地表 PGA_M 值介于 0. 20g~0. 24g。出于结构安 全考虑,最终选取 PGA_M = 0. 24g 用于该港口陆域 回填区的回填砂土抗震设计,该场地 PGA_M 值远 小于输入地震动的 0. 40g,以及根据菲律宾国家规 范 NSCP-2015 中简化方法计算得到的 0. 44g,从而 降低了该工程的抗震设防成本。



图 12 设计场地条件的场地 PGA 分布

5 结论

 软土地基上填筑形成的港口陆域,其场地 为在密实砂层下方下卧软弱土层的特殊场地,强 震作用下回填砂层的地震反应受其下方软土厚度 和强度的影响显著,而与基岩层深度和刚度关系 不大,软土层厚度越小或强度越高其上方场地的 地震反应越大。

2)下卧软土层因刚度小、抗剪强度低,在强 震作用下将发生大的剪切变形使得土体的滞回阻 尼得以充分发挥从而耗散地震能量,下卧软土层 具有明显的减震和隔震效果,但同时软土场地也 会导致地震反应谱的长周期部分有所增加。

 3)对存在软弱土层的特殊场地,建议通过场 地地震反应分析确定场地设计地震动参数,其往 往可以降低抗震设防成本。

参考文献:

- [1] 刘冰冰. 基于 DEEPSOIL 的场地反应研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2020.
- [2] 丁玉琴.场地非线性地震反应分析方法及其应用研究[D].重庆:重庆大学,2010.
- [3] 伍林伟.含软弱夹层场地地面峰值加速度放大系数影响因素分析[D].武汉:华中科技大学,2016.
- [4] American Society of Civil Engineer. Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures: ASCE 7-16[S]. Reston: ASCE, 2017.
- [5] European Committee for Standardization. Eurocode 8: design of structures for earthquake resistance: EN 1998-1 [S]. Brussels: CEN, 2018.
- [6] Association of Structural Engineers of the Philippines. National structural code of the philippine: NSCP-2015[S].
 Manila: Association of Structural Engineers of the Philippines, 2015.
- [7] STEWART J P, AFSHARI K, HASHASH Y M A. Guidelines for performing hazard-consistent onedimensional ground response analysis for ground motion prediction [R]. Berkeley: PEER, 2014.

(本文编辑 王璁)