

DOI: 10.11779/CJGE2022S2006

超重力试验孔压增量模型与适用性研究

汤兆光^{1, 2}, 王永志^{*1, 2}, 王孟伟³, 孙锐^{1, 2}, 刘远鹏^{1, 2}, 杨阳^{1, 2}

(1. 中国地震局工程力学研究所地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 地震灾害防治应急管理部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080; 3. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘要: 超重力试验是目前岩土工程领域一种日趋成熟和广泛使用的物理试验手段, 但在本构关系方面研究较少, 而其在真实应力和边界条件下对本构关系研究更具明显优势。基于 Ishibashi 各因子乘积形式的基本思想, 重点考虑有效应力、动剪应力比、循环振次和固结比等关键因子, 提出了适于任意荷载和非均等固结的全因子孔压增量模型。通过自主研发的高性能孔压传感器 DSP-II 量测液化孔压动力时程, 揭示了不同荷载、密实度、埋深条件下新孔压增量模型预测饱和砂土孔压发展过程和液化阈值的准确性与普适性。给出了不同密实度砂土的抗液化强度与计算参数, 结果表明随循环动应力比的减小, 初始液化触发循环振次 N 呈现增大规律; 而随相对密度 D_r 的增加, 抗液化强度则呈现逐渐增大规律; 该模型计算的抗液化强度预测值与实测数据基本吻合, 可较好地预测超重力液化试验饱和砂土的抗液化强度与变化趋势。

关键词: 超重力试验; 孔压传感器; 增量模型; 相对密度; 抗液化强度

中图分类号: TU435 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2022)S2-0025-05

作者简介: 汤兆光(1993—), 男, 助理研究员, 从事动力离心试验量测技术研究。E-mail: tzg158135@163.com。

Incremental model for pore water pressure and its applicability in centrifuge modelling

TANG Zhao-guang^{1, 2}, WANG Yong-zhi^{1, 2}, WANG Meng-wei³, SUN Rui^{1, 2}, LIU Yuan-peng^{1, 2}, YANG yang^{1, 2}

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake

Administration, Harbin 150080, China; 2. Key Laboratory of Earthquake Disaster Mitigation, Ministry of Emergency Management, Harbin
150080, China; 3. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: The centrifugal model test is an increasingly mature and widely-used physical test method. However, there is few researches on the constitutive relationship, and the researches on the constitutive relationship under the real stress and boundary conditions of the centrifugal model test have more obvious advantages. Based on the basic idea of Ishibashi multiplication of various factors, an incremental model for pore water pressure suitable for the arbitrary load and anisotropic consolidation is proposed. The applicability and reliability of the new incremental model with the test data of the DSP-II transducer is verified. The results show that the incremental model can well describe the development process of the pore water pressure of saturated sand and the liquefaction threshold under different seismic loads, relative densities and soil depths. The liquefaction resistance and the relevant parameters of saturated sand with different densities are given. With the decrease of the cyclic dynamic stress ratio of saturated sand, the initial liquefaction trigger vibration cycle time N increases gradually. With the increase of the relative density D_r of saturated sand, the liquefaction resistance also increases. The predicted data of liquefaction resistance calculated by the incremental model are basically consistent with the measured ones, which can better predict the liquefaction resistance of saturated sand in centrifugal model tests.

Key words: centrifugal model test; pore water pressure transducer; incremental model; relative density; liquefaction resistance

0 引言

孔压增量模型是液化机理与触发阈值研究的重要内在形式之一, 其计算结果的准确性直接影响砂土液化发展问题分析的合理性。在岩土地震工程领域中, “性态抗震设计思想”已成为主流趋势, 其要求更准

基金项目: 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项资助项目
(2019EEEV0203); 国家自然科学基金项目(51609218); 黑龙江省
自然科学基金项目(YQ2019E035)

收稿日期: 2022-12-08

*通信作者 (E-mail: yong5893741@163.com)

确地描述地震荷载下饱和砂土孔压发展过程, 以反映地基基础和岩土构筑物等应力状态与破坏过程。

目前, 国内外诸多学者已提出诸多饱和砂土的孔压模型, 在此作简要阐述。Seed 等^[1]基于大量动三轴等单元试验基础上, 构建了均等固结条件下饱和砂土孔压比与振次比关系的孔压模型公式。Finn 等^[2]针对上述 Seed 孔压模型进行修正, 以适用于非均等固结条件下孔压增长过程计算。Ishibashi 等^[3]、Sherif 等^[4]利用动三轴等单元试验结果(均等固结条件), 考虑了动剪应力幅值、循环周数和砂土状态等因素, 提出了孔压增量模型。孙锐等^[5]通过新动三轴试验实测结果, 综合考虑了不同固结比对孔压增量模型的影响, 重新构建了非均等固结条件下孔压增量模型与修正系数。陈国兴^[6]引入孔压增量比概念, 建立了饱和南京细砂条件下具有普适性的新孔压模型。总体而言, 目前构建的孔压模型绝大多数主要是基于单元试验获得建立模型所需的数据, 其存在应力边界、排水条件、加载方式与实际不符等问题, 也造成了现有孔压模型形式多样、认识不统一, 使得在实际岩土水平场地孔隙水压力计算, 还需对模型进行修正。而超重力试验条件下土体应力状态测试结果与实际场地条件更吻合, 是研究孔压发展模式最先进的一种研究依据和途径, 但现有开展的诸多超重力液化试验, 在孔压本构关系方面的研究较少。因此, 基于超重力试验建立的孔压本构关系, 不仅可为单元试验发展提供参考依据与验证, 还可建立与数值模拟试验的内在联系。

本文阐述了构建适于任意荷载和非均等固结的全因子孔压增量模型的基本思想, 并重点考虑了影响液化触发阈值的超静孔压发展的关键因素; 利用自主研发的孔压传感器测试结果, 结合加速度反演分析所得动剪应力数据, 揭示了不同荷载、密实度、埋深条件下增量模型预测孔压时程和液化阈值的准确性与普适性。

1 超重力试验模型设计

1.1 试验装置与传感器

试验采用中国地震局工程力学研究所的大型离心机振动台系统 DCIEM-40-300, 如图 1 所示, 其主要性能参数: 有效半径 5.0 m, 离心加速度 100g、振动负载 15 kN, 振动加速度 30g, 频宽 10~300 Hz。试验选用 Laminar Box-I 型层状剪切箱(见图 1 (b)), 其可有效减小边界效应和模拟原位场地水平剪切运动, 最大内部空间为 1.2 m(长)×0.5 m(宽)×0.6 m(高); 试验还选用了自研的 DSP-II 孔压传感器, 其性能参数见文献[7]。

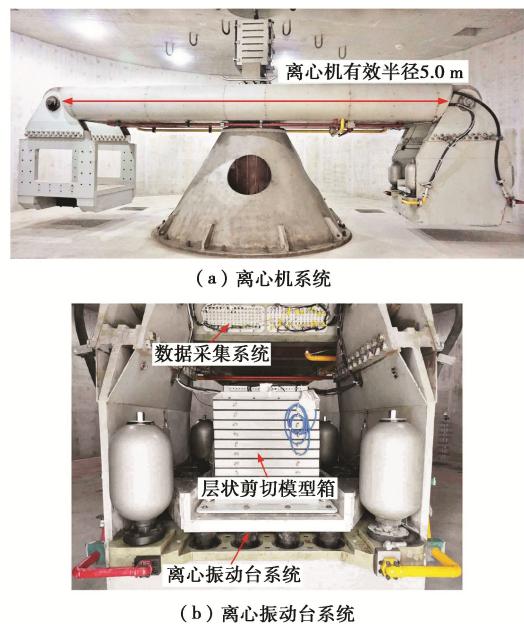


图 1 DCIEM-40-300 大型离心机振动台系统

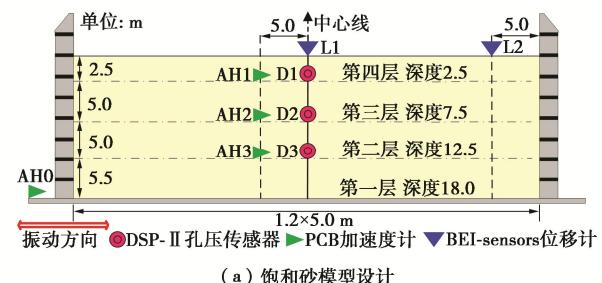
Fig. 1 Centrifuge shaking table test system of DCIEM-40-300

1.2 砂土试样与模型制备

本次砂土试样选用福建标准石英砂^[7], 其基本物理参数: 最大和最小干密度分别为 1.69, 1.41 g/cm³, D_{60} , D_{50} , D_{10} 分别为 0.43, 0.39, 0.32 mm, C_u 为 1.35, C_c 为 0.94。采用砂雨法制备砂土模型^[7], 模型相对密度 D_r 为 0.50 和 0.80, 分别代表中密、密实两种砂土状态。为了协调超静孔压累积过程与消散时间相似比的矛盾问题, 调配 50cst 甲基纤维素溶液(密度 1.012 g/cm³)作为饱和流体, 采用真空法实现模型的充分饱和。

1.3 传感器布设与测试方案

试验目的是基于超重力液化试验, 以自主研发 DSP-II 孔压传感器的实测结果, 结合加速度计反演分析所得动剪应力数据, 构建适于非均等固结条件下的全因子孔压增量模型。试验模型设计与实物, 如图 2 所示, 在模型中心处不同深度布设 3 组传感器, 每组包含 1 支 DSP-II 孔压传感器 (D1~D3) 及 1 支加速度计 (AH1~AH3)。离心加速度 50g 下各传感器沿土层深度, 依次对应原型深度 2.5, 7.5, 12.5 m。



(a) 饱和砂模型设计

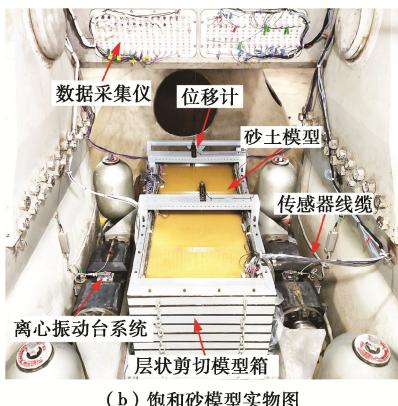


图 2 超重力试验模型设计与实物照片

Fig. 2 Design configuration and photo of centrifuge model

在离心加速度 50g 下, 分别施加原型为 0.1g, 0.2g, 0.3g 等幅和变幅正弦荷载 ($f=1.0 \text{ Hz}$), 输入动荷载如图 3 所示。此外, 模型与原型之间基本相似律见文献 [7], 相关物理量均已转换为原型数值。

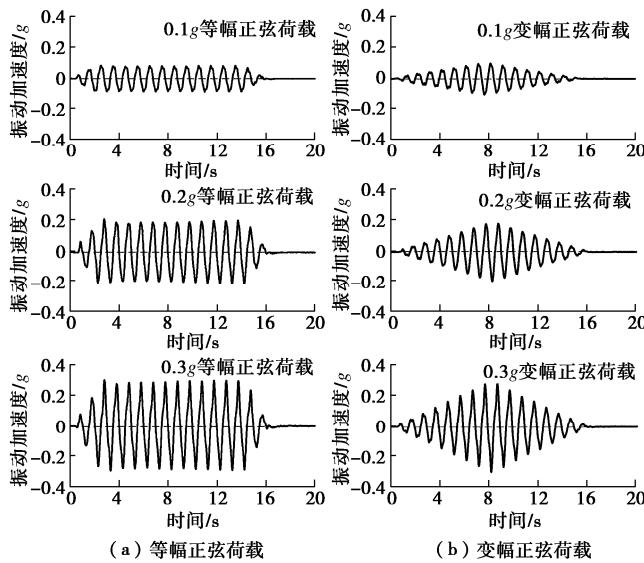


图 3 施加动荷载

Fig. 3 Application of dynamic loads

2 孔压增量模型构建

2.1 基本思想

本文构建适于超重力试验孔压发展的新增量模型的基本思想如下: ①以超重力液化试验数据为参考依据, 建立孔压发展的增量模型, 以适用等幅规则和变幅不规则荷载条件下超静孔压增长过程的计算; ②超静孔压状态项, 忽略孔压增长过程中“循环往复”动态变化过程, 以累积孔压比变化进行表示; ③重点考虑影响液化触发条件下孔压发展的关键因子, 如有效应力、动剪应力比、循环振次和固结比等, 并忽略各因子之间的可能耦合关系, 提出了各个关键因子直接以相乘形式计算, 以表达超静孔压增长过程; ④选用适合描述超重力试验液化砂土特征的主要物理参数指标表达孔压增量模型, 可有效提高孔压增量模型的适

用性及减少人为换算产生的随机误差; ⑤选取了合适的孔压增量模型的边界限制条件, 如影响孔压初始增长速率和孔压比达到 1.0。

2.2 公式构建

本文构建的全因子孔压增量模型 Δu_N 如式 (1) 所示, 包含 4 个关键因子: 有效应力、循环动剪应力比、循环振次和固结比。

$$\Delta u_N = F_N(A) \cdot F_N(R) \cdot F_N(N) \cdot F_N(K) \quad (1)$$

式中, $F_N(A)$ 为有效应力状态项, $F_N(R)$ 为第 N 周实时循环动剪应力比项, $F_N(N)$ 为循环振次影响项, $F_N(K)$ 为固结比影响项。

(1) 有效应力状态项

$F_N(A)$ 用于表征孔压初始增长速率和孔压比达到 1.0 的边界约束条件, 其计算公式为

$$F_N(A) = \sigma' - u_{N-1} \quad (2)$$

式中: σ' 为土体初始有效应力; u_{N-1} 为第 $N-1$ 周应力循环荷载结束或第 N 周循环荷载初始超静孔压值。

(2) 第 N 周循环动剪应力比项

$F_N(R)$ 用于表征剪切应力的强度 (无量纲), 其计算公式为

$$F_N(R) = k' \left[\frac{\tau_N}{\sigma' - u_{N-1}} \right]^c \quad (3)$$

式中: τ_N 为第 N 周中单周循环动正、负剪应力的最大值; k' 和 c 为待定常系数; k' 与土体相对密实相关。

(3) 循环振次 N 影响项

$F_N(N)$ 用于表征不同土体类型、颗粒级配的影响, 其计算公式为:

$$F_N(N) = \frac{1}{N^b} \quad (4)$$

式中, b 为待定常系数, N 为第 N 次等效循环荷载。

(4) 固结比影响项

$F_N(K)$ 计算公式为

$$F_N(K) = 1 - k_1(k_c - 1)^{k_2} \quad (5)$$

式中, k_1 和 k_2 为待定常系数, 与土体类型、相对密度相关。由于单次试验中固结比 k_c 不变, 使得 $F_N(K)$ 在试验中保持不变。

综上, 针对超重力试验简化孔压模型可表达为

$$\Delta u_N = \frac{k}{N^b} \left[\frac{\tau_N}{\sigma' - u_{N-1}} \right]^c (\sigma' - u_{N-1}) \quad (6)$$

$$k = [1 - k_1(k_c - 1)^{k_2}]k' \quad (7)$$

$$u_N = \Delta u_N + u_{N-1} = \frac{k}{N^b} \left[\frac{\tau_N}{\sigma' - u_{N-1}} \right]^c (\sigma' - u_{N-1}) + u_{N-1} \quad (8)$$

式中, k , b , c 为待定常系数, b , c 保持不变, k 和 k' 与相对密度相关, k' 在单次试验保持不变, $u_0 = 0$ 。

2.3 参数确定

基于超重力液化试验中不同土层深度 DSP-II 孔压传感器和加速度计反演分析数据, 分别采用最小二乘法确定式(3)、(4)和(7)中系数 k 、 c 、 b , 其中, 待定系数 k 与相对密度相关, 参照文献[5]在 $D_r=0.50$ 和 $D_r=0.80$ 状态下 k 分别取值 4.9 和 2.8。

(1) 确定系数 c

依次求解不同深度、相对密度砂在超静孔压增长阶段下循环周数 N 条件下孔压增量比 $\bar{U}=\Delta u_N/(\sigma'-u_{N-1})$ 与实时动剪应力比 $\bar{\tau}_N=\tau_N/(\sigma'-u_{N-1})$ 的关系。由于孔压增量比 \bar{U} 上升段一般出现在循环周数 $N=3\sim 5$ 之前, 因此, \bar{U} 与 $\bar{\tau}_N$ 的关系将采用前 3 周循环荷载的试验数据进行分析, 并将 \bar{U} 与 $\bar{\tau}_N$ 关系曲线及拟合曲线, 绘制于图 4 所示。观察图 4 拟合曲线, 可获得待定系数 c 取值范围在 1.5235~1.6185, 为简化后续数据分析, 将 c 取平均值为 1.58。

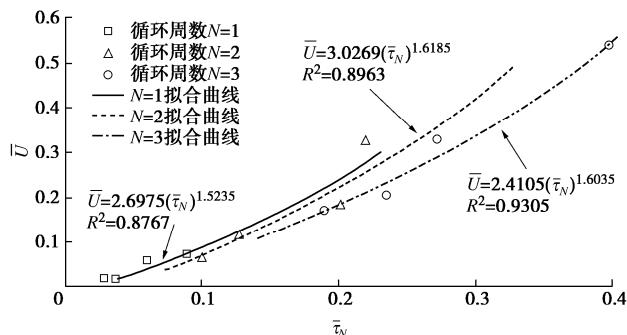


图 4 孔压增量比 \bar{U} 与实时动剪应力比 $\bar{\tau}_N$ 关系曲线

Fig. 4 Relationship between pore water pressure increment ratio \bar{U} and dynamic shear stress ratio $\bar{\tau}_N$ for medium dense sand

(2) 确定系数 b

图 5 给出了不同土层深度超静孔压增长阶段下循环周数 $N=16$ 次的孔压增量比 \bar{U} 与循环周数 N 的关系。由图 5 可计算出拟合曲线为 $\bar{U}=1.4437/N^{1.3312}$, 图 5 中以黑线表示, 为简化后续数据分析, b 取平均值为 1.33。

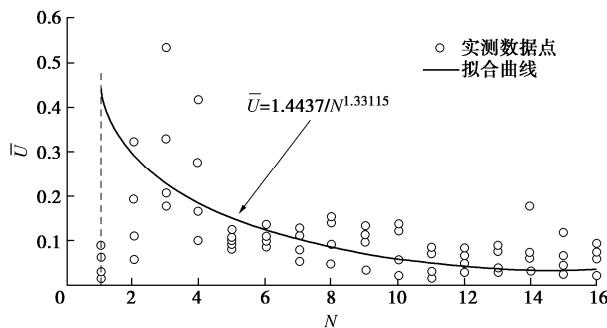


图 5 孔压增量比 \bar{U} 与循环周数关系曲线

Fig. 5 Relationship between pore water pressure increment ratio \bar{U} and number of cycles

3 模型适用性初步验证

3.1 等幅和变幅正弦荷载输入

图 6 给出了 $0.1g$ 等幅和变幅荷载 ($D_r=0.50$) 及 $0.2g$ 、 $0.3g$ 等幅工况下, 福建标准石英砂的孔压增长情况实测数据与构建的新孔压增量模型的计算结果的对比。观察可发现采用新孔压增量模型的计算数据与超重力液化试验实测数据相比, 十分吻合。

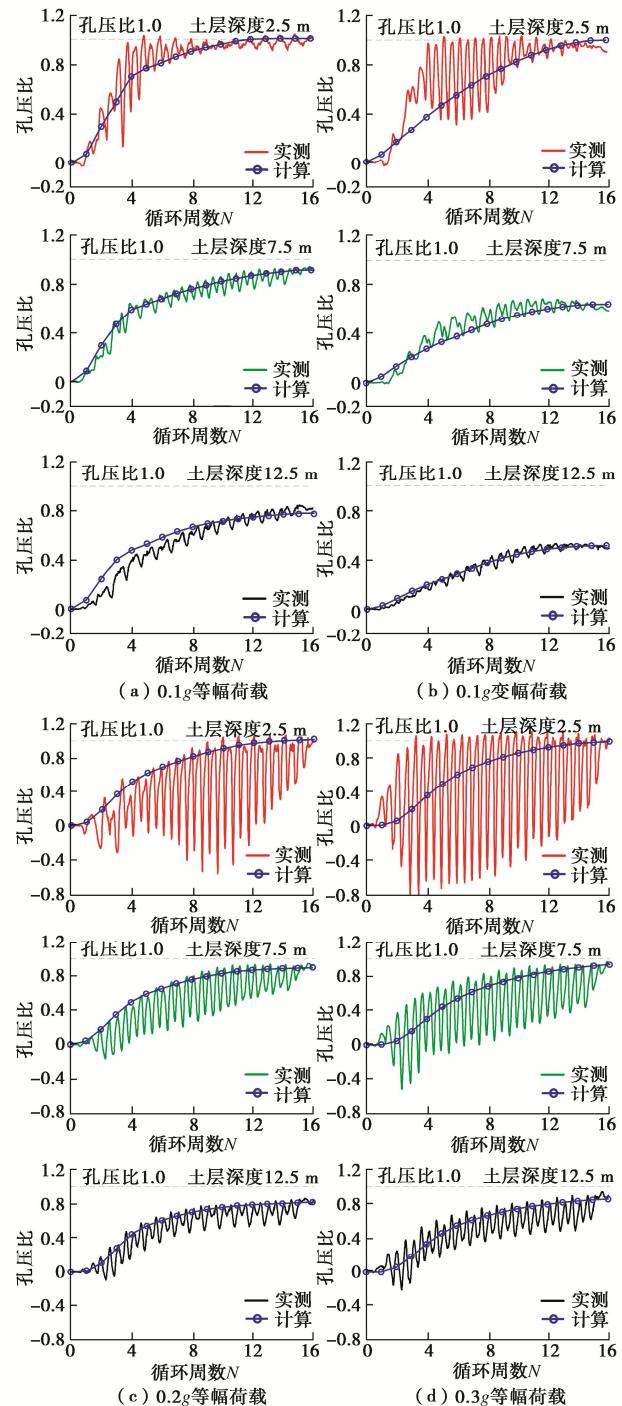


图 6 等幅和变幅正弦荷载下计算与实测孔压增长对比

Fig. 6 Comparison between calculated and measured excess pore water pressures under uniform and variable amplitude sine waves

通过分析图 6 的孔压增长过程, 可发现如下规律特征: ①采用福建标准石英砂, 在输入等幅和变幅荷载条件下, 饱和砂土由深层 12.5 m 至浅层 2.5 m 处超静孔压增长速率也随之加快, 且孔压比相应快速上升;

②在相同砂土状态和埋深条件下, 输入荷载幅值越大时, 见图 6 (c), (d), 孔隙水压力发展越快, 液化程度相对略高; ③相同条件下, 输入变幅荷载土层液化程度明显低于等幅荷载, 见图 6 (a), (b); ④不同试验工况下, 孔隙水压力增长趋势具有较好的区分度。

综上, 该孔压增量模型可很好呈现不同荷载、相对密度和土层深度等条件对饱和砂土的孔压发展过程, 且描述出的孔压变化规律与现有经验与认识相一致, 也说明构建的新孔压增量模型计算的孔压结果可较为真实反映变幅动荷载条件下典型孔压的规律特征, 进一步验证了该孔压增量模型的准确性与适用性。

3.2 砂土抗液化强度

图 7 给出了不同密实度砂土的孔压增量模型预测的抗液化强度与超重力试验实测结果的对比, 纵轴为等效循环动应力比, 横轴为初始液化触发循环振次 N ; 可发现随循环动应力比减小, 循环振次 N 呈现增大规律; 而当相对密度 D_r 由 0.50 增至 0.80 时, 抗液化强度也随之增大; 新孔压增量模型计算的抗液化强度预测值与试验实测基本吻合, 可较好地预测超重力试验饱和砂土抗液化强度发展趋势。

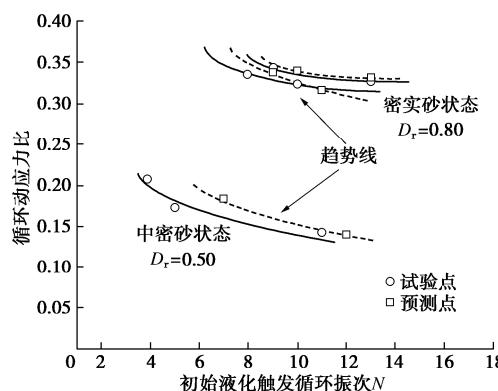


图 7 不同相对密度砂土抗液化强度计算与实测对比

Fig. 7 Comparison between calculated and measured liquefaction resistances under sands with different relative densities

4 结 论

本文基于超重力液化试验数据为参考依据, 构建了适用于全因子孔压增量模型, 并通过等幅和变幅正弦荷载超重力试验数据与预测结果的对比, 验证了新孔压增量模型的准确性与适用性, 得到以下 3 点结论。

(1) 基于各因子乘积形式的基本思想, 并利用超重力液化试验孔压实测数据, 构建适用于超重力试验孔压发展的新增量模型, 该模型归结为与有效应力、循环动剪应力比、循环振次和固结比相关的数学函数。

(2) 在等幅和变幅正弦荷载多种工况下新建孔压增量模型可很好描述不同幅值荷载、相对密度和土层埋深等关键因素对饱和砂土孔压发展过程和液化阈

值, 且模拟的孔压变化规律与现有经验与认识相一致, 初步验证了新建孔压增量模型的准确性与普适性。

(3) 随循环动应力比的减小, 初始液化触发循环振次 N 呈现逐渐增大规律; 但随相对密度 D_r 的增大, 抗液化强度也则呈现增大规律; 新建孔压增量模型预测的抗液化强度与试验实测基本吻合, 可较好地预测超重力试验饱和砂土的抗液化强度趋势。

需指出, 本文试验数据十分有限, 对于建立孔压增量模型预测不同砂类土的适用性, 将作进一步探索。

参 考 文 献:

- [1] SEED H B, MARTIN P P, LYSMER J. Pore water pressure changes during soil liquefaction[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1976, **102**(GT4): 323 – 345.
- [2] FINN W D L, BNATIA S K. Prediction of seismic pore water pressures[C]// Proceedings of 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Rotterdam: A. A. Balkema, 1981.
- [3] ISHIBASHI I, SHERIF M A, TSUCHIYA C. Pore-pressure rise mechanism and soil liquefaction[J]. Soils and Foundations, 1977, **17**(2): 17 – 27.
- [4] SHERIF M A, ISHIBASHI I, TSUCHIYA C. Pore-pressure prediction during earthquake loadings[J]. Soils and Foundations, 1978, **18**(4): 19 – 30.
- [5] 孙 锐, 袁晓铭. 非均等固结下饱和砂土孔压增量简化计算公式[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(9): 1021 – 1025. (SUN Rui, YUAN Xiao-ming. Simplified incremental formula for estimating pore water pressure of saturated sands under anisotropic consolidation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(9): 1021 – 1025. (in Chinese))
- [6] 王炳辉, 陈国兴. 循环荷载下饱和南京细砂的孔压增量模型[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(2): 188 – 194. (WANG Bing-hui, CHEN Guo-xing. Pore water pressure increment model for saturated Nanjing fine sand subjected to cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(2): 188 – 194. (in Chinese))
- [7] 汤兆光, 王永志, 段雪峰, 等. 分体高响应微型孔隙水压力传感器研制与性能评价[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(7): 1210 – 1219, 1375. (TANG Zhao-guang, WANG Yong-zhi, DUAN Xue-feng, et al. Development and performance evaluation of separable high-frequency response miniature pore water pressure transducer[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(7): 1210 – 1219, 1375. (in Chinese))

(编校: 孙振远)