

DOI: 10.11779/CJGE2024S10051

# 砂砾土振动体变评价方法与离心机模型试验验证

夏 鹏<sup>1,2</sup>, 周燕国<sup>\*1</sup>, 刘 凯<sup>1,3</sup>, 陈云敏<sup>1</sup>

(1. 浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江大学岩土工程研究所, 浙江大学超重力研究中心, 浙江 杭州 310058;

2. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210024; 3. 中建丝路建设投资有限公司, 陕西 西安 710000)

**摘 要:** 2008 汶川地震出现了砂砾土大范围液化致灾现象, 现场震害调查表明砂砾土场地存在砾石效应影响, 现有砂土场地的震后沉降评价方法不适用于砂砾土场地。对此, 在“张-社本”振动体变评价方法的基础上进一步发展了考虑砾石含量的砂砾土振动体变评价方法, 然后开展动三轴试验确定评价方法中的相关参数, 最后开展 3 组典型砾石含量的砂砾土地基离心机振动台模型试验对评价方法的可靠性进行验证。试验结果表明, 砾石含量越高, 振动引起的场地沉降变形越小; 砂砾土振动体变评价方法可以较为准确地预测新近沉积砂砾土场地的震后沉降, 但对存在地震历史影响的砂砾土场地, 本文提出的评价方法较为保守, 建议进一步发展考虑地震历史效应的砂砾土振动体变评价方法。

**关键词:** 砂砾土; 动三轴试验; 振动体变; 沉降; 离心机振动台; 模型试验

中图分类号: TU432

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)S1-0207-05

**作者简介:** 夏 鹏(1993—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事地震液化灾害评价以及岩土物理模拟方面的研究工作。

E-mail: xiapeng\_1994@163.com。

## Evaluation method for shaking-induced volumetric strain for gravelly soils and validation by centrifuge model tests

XIA Peng<sup>1,2</sup>, ZHOU Yanguo<sup>1</sup>, LIU Kai<sup>1,3</sup>, CHEN Yunmin<sup>1</sup>

(1. MOE Key Laboratory of Soft Soil and Geoenvironmental Engineering, Institute of Geotechnical Engineering, Center for Hypergravity

Experiment and Interdisciplinary Research, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education for

Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China; 3. China State Construction Silkroad

Construction Investment Group Co., LTD, Xi'an 710000, China)

**Abstract:** Liquefactions of gravelly soils are widely distributed in the 2008 Wenchuan earthquake. Field investigations show that the existing settlement evaluation methods for sands are not applicable to the gravelly soils due to the gravel content effects. It is aimed to develop the evaluation method for shaking-induced volumetric strain for the gravelly soils with consideration of gravel content, which is based on the so-called "Zhang-Shamoto" model. The dynamic triaxial tests are conducted to parameterize the evaluation method, and three centrifuge model tests on the gravelly soil grounds with typical gravel contents are carried out to check the performance of the proposed evaluation method. The test results show that the higher the gravel content, the smaller the shaking-induced settlement. The proposed evaluation method can accurately predict the shaking-induced settlement for recently deposited gravelly soils, but shows a conservative prediction performance in cases with pre-shaking effects, which suggests the need to further improve the proposed evaluation method by considering the pre-shaking effects.

**Key words:** gravelly soil; dynamic triaxial test; shaking-induced volumetric strain; settlement; centrifuge shaking table; model test

## 0 引 言

砂砾土在中国分布广泛, 由于这类土具有承载力高、压缩性低、抗剪强度高、渗透性好等特点, 曾一度视作非液化土并广泛应用于填海造陆、地基处理、路堤、堤坝等工程中<sup>[1]</sup>。2008 汶川地震现场震害调查表明砂砾土也会发生液化, 并产生类似于砂土液化的特征, 如喷出砂砾土、建构筑物沉降侧移等<sup>[2]</sup>, 并且

由于砾石颗粒的存在, 地震引起的沉降要比典型砂土场地小。因此基于现有砂土场地的震后沉降评价方法预测砂砾土场地的震后沉降是偏保守的<sup>[3]</sup>, 有必要进一步发展适用于砂砾土场地的震后沉降评价方法。

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (51988101, 52278374, 52308347); 高等学校学科创新引智计划项目 (111 计划, B18047)

**收稿日期:** 2024-04-29

**\*通信作者** (E-mail: qzking@zju.edu.cn)

砂砾土的静动力行为受砾石含量（GC）影响显著。随着砾石含量的增加，砂砾土的力学行为会由砂土主导向砾石主导转变，并分别呈现“类砂”特性和“类砾”特性，标志砂砾土力学行为转变的阈值砾石含量为 60%~70%<sup>[4]</sup>。与“类砾”砂砾土相比，“类砂”砂砾土的渗透性差、抗液化强度低，地震引起的液化致灾效应更为严重。揭示砾石含量对“类砂”砂砾土振动体变的影响规律，发展“类砂”砂砾土地震后沉降评价方法具有重要工程价值。

鉴于此，本文首先开展不同砾石含量“类砂”砂砾土的动三轴试验，在经典砂土振动体变评价方法的基础上进一步考虑砾石含量的影响，建立适用于砂砾土的振动体变评价方法；其次，针对典型砾石含量的砂砾土地地，开展离心机振动台模型试验，以检验砂砾土振动体变评价方法的可靠性。

1 砂砾土振动体变评价方法

本节以经典砂土振动体变评价方法（“张-社本”模型）<sup>[5]</sup>为基础，进一步考虑砾石含量对土体液化再固结体变的影响，将“张-社本”模型拓展到“类砂”砂砾土中，并通过开展动三轴试验确定相关参数。

1.1 “张-社本”振动体变评价方法

“张-社本”振动体变评价方法的构建框架如下：首先，在饱和砂土不排水振动试验中，砂土的残余体变  $\varepsilon_{vr}$  可由相对压缩系数  $R_c$  统一表达，其中，相对压缩系数  $R_c$  的定义如下式所示：

$$R_c = \frac{\Delta e}{e_0 - e_{min}} \quad (1)$$

式中： $e_0$  为砂土的初始孔隙比； $e_{min}$  为砂土的最小孔隙比； $\Delta e$  为砂土液化再固结引起的孔隙比变化量。

社本等<sup>[6]</sup>通过大量试验研究发现， $R_c$  仅与试样振动加载过程中的最大剪应变  $\gamma_{max}$  相关，与砂土的种类和密实度无关，两者之间的定量关系可由下式表达：

$$R_c = R_0 \gamma_{max}^m \quad (2)$$

式中： $R_0$  和  $m$  为拟合参数。

根据体变的定义，砂土液化再固结产生的残余体变  $\varepsilon_{vr}$  可由下式计算得到

$$\varepsilon_{vr} = \frac{\Delta e}{1 + e_0} = \frac{e_0 - e_{min}}{1 + e_0} R_c = \frac{e_0 - e_{min}}{1 + e_0} R_0 \gamma_{max}^m \quad (3)$$

基于式（3）可以得到砂土在振动荷载作用下产生的最大体变，可用于计算水平砂土地地在振动荷载作用下产生的沉降变形。

由于砂砾土的最大、最小孔隙比会随着砾石含量的增加呈现“先下降后上升”趋势，直接影响砂砾土相对压缩系数  $R_c$  的统一表达。因此，通过构建出拟合参数  $R_0$ 、 $m$  与砾石含量之间的定量相关关系，将砾石

含量对相对压缩系数的影响进行归一化表达，可在“张-社本”振动体变评价方法的基础上发展出适用于砂砾土的振动体变评价方法。

1.2 动三轴试验

本次试验所采用的土样取自成都郫县某工地基坑底部（深度-4.0~-3.0 m），现场原型砂砾土如图 1（a）所示。考虑到试验设备的能力，需对原型砂砾土进行筛分并控制最大颗粒粒径为 20 mm。这里选取 4 种典型砾石含量（0，20%，40%，60%）开展动三轴试验，相应的筛分曲线如图 1（b）所示，物理力学性质如表 1 所示。本次试验是在浙江大学 GDS 双向伺服动三轴仪上开展的，试样尺寸为  $\phi 100\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ 。主要试验步骤如下：①采用湿捣法和分层制样法制备试样；②反压饱和，当试样的孔压系数  $B$  值超过 0.95 可认为试样已经饱和；③将试样等压固结至 100 kPa；④施加不同振幅的循环剪应力，加载频率设为 0.1 Hz，当试样到达液化后停止加载；⑤将液化试样轴向位移归零并进行等压固结和测量体变，固结压力仍设为 100 kPa。本次试验对每一种砾石含量的砂砾土设置 2 种孔隙比并采用 3 种不同的动应力比进行加载，典型动三轴试验加载时程曲线如图 2 所示。

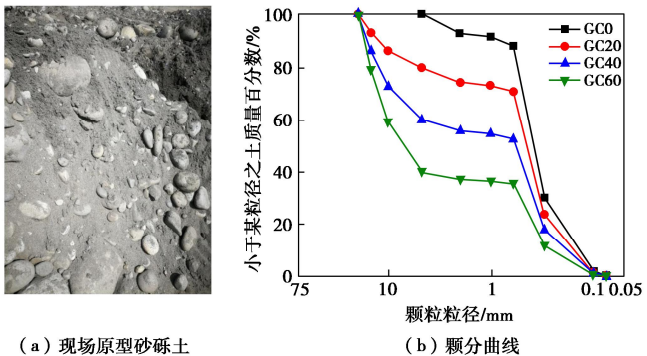


图 1 试验所用砂砾土

Fig. 1 The tested gravelly soils

表 1 制备砂砾土的物理力学性质

| Table 1 Physical properties of the tested gravelly soils |       |       |       |       |
|--|-------|-------|-------|-------|
| 参数   | 值     |       |       |       |
| GC/%   | 0     | 20    | 40    | 60    |
| $G_s$  | 2.71  | 2.71  | 2.71  | 2.71  |
| $d_{10}/\text{mm}$                                       | 0.137 | 0.152 | 0.18  | 0.252 |
| $d_{50}/\text{mm}$                                       | 0.382 | 0.443 | 0.573 | 7.025 |
| $C_u$  | 3.16  | 3.4   | 26.33 | 40.44 |
| $e_{min}$  | 0.465 | 0.385 | 0.295 | 0.24  |
| $e_{max}$  | 0.885 | 0.769 | 0.693 | 0.621 |
| $k/(10^{-2}\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$                 | 0.397 | 0.395 | 0.485 | 1.015 |

1.3 考虑砾石含量的砂砾土振动体变评价方法

通过试样液化再固结过程中排出水的体积（或残余体变  $\varepsilon_{vr}$ ）可以计算出试样的相对压缩系数  $R_c$ 。基于同一砾石含量试样的相对压缩系数  $R_c$  与最大剪应变  $\gamma_{max}$  的关系可以非线性拟合得到对应砾石含量下的参

数  $R_0$  和  $m$ , 其与砾石含量的关系如图 3 所示。可以发现, 参数  $R_0$  随砾石含量的增加呈线性降低趋势, 拟合关系如式 (4) 所示; 而参数  $m$  随砾石含量的增加呈非线性降低趋势, 拟合关系如式 (5) 所示。式 (4) 和式 (5) 表明砾石含量对降低振动引起的残余体变起关键作用, 砂砾土中的砾石含量越高, 振动引起的沉降变形越小, 这与现有的工程认识一致<sup>[2]</sup>。

$$R_0 = 4 - 2 \cdot GC \quad (4)$$

$$m = -0.0625 \cdot GC^2 - 0.0975 \cdot GC + 0.761 \quad (5)$$

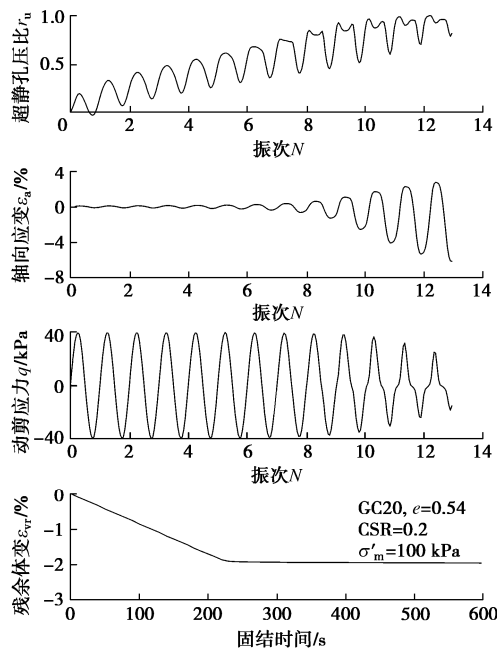


图 2 砂砾土动三轴试验典型试验结果

Fig. 2 Typical records of undrained cyclic tests on gravelly soils

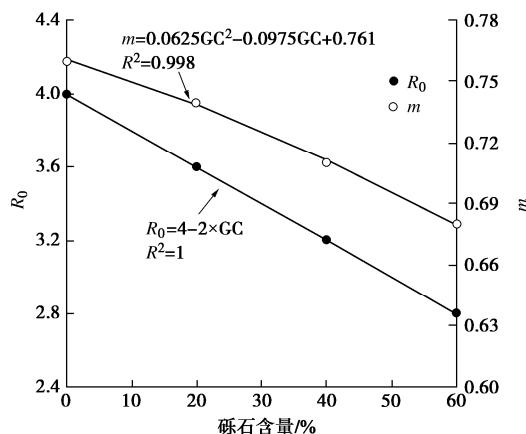


图 3 参数  $R_0$  和  $m$  与砾石含量的关系

Fig. 3 Relationship between GC and  $R_0$  or  $m$

## 2 离心机振动台模型试验

本节通过开展砾石含量为 0, 20%, 60% 的 3 组砂砾土水平地基离心机振动台模型试验, 以验证砂砾土振动体变评价方法的准确性。

### 2.1 离心机振动台模型试验设计

3 组模型试验所用的颗分曲线与单元体试验一致, 制样孔隙比分别为 0.651, 0.532, 0.341, 对应于中密状态。试验采用的离心加速度为 50g, 根据离心机振动台试验相似律, 采用黏度系数为 50cST 的甲基硅油饱和模型。本次试验采用真空负压法进行模型饱和<sup>[4]</sup>, 真空压力设为 -90 kPa, 进油速度控制为 400 mL/h, 通过上述较高的真空度和较低的进油速度以保证模型饱和度。3 组试验的模型高度均为 390 mm, 对应的原型深度为 19.5 m。3 组试验的传感器布置相同, 位置排布如图 4 所示。

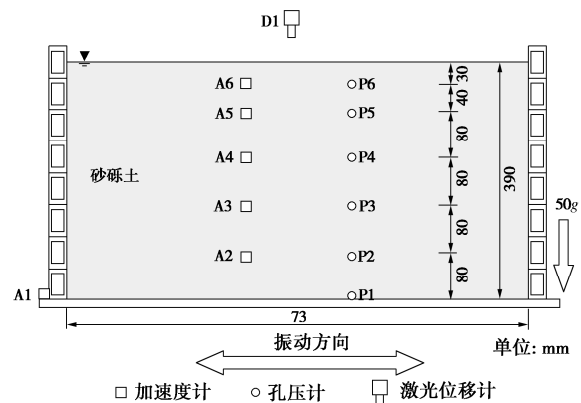


图 4 3 组模型试验传感器布置示意图

Fig. 4 Instrumentations in three model tests

离心机试验所采用的加载流程如下: 首先以 10g 为间隔分级加载至 50g, 然后在 50g 下施加振动荷载, 当前一次振动产生的超静孔压完全消散以及地表沉降稳定之后施加下一次振动, 重复直至完成所有加载工况, 最后再以 10g 为间隔分级卸载至 1g。本次试验共施加 9 次振动, 振动波形为 1 Hz 的 15 圈等幅正弦波, 台面输入的目标峰值加速度分别为 0.1g, 0.15g, 0.2g, 0.3g, 0.4g, 0.3g, 0.2g, 0.15g 和 0.1g。

### 2.2 典型振动时程曲线

图 5 给出了 3 组模型地基在振动 3 作用下 (PBA = 0.2g) 的加速度和孔压响应时程曲线。可以看出, 3 组试验中台面输入的振动基本一致, 地震动由底部向上部传递过程中出现了显著的放大效应。从孔压响应时程曲线可以看出, 在振动 3 作用下只有浅层土体出现了液化现象, 振动完成后超孔压会由底层向上层消散。在超静孔压消散过程中, GC60 模型地基的消散速度最快, GC20 和 GC0 模型地基的消散速度相当, 主要原因是 GC60 砂砾土的渗透系数要显著高于 GC20 和 GC0 砂砾土, 而 GC0 和 GC20 砂砾土的渗透系数相近 (3 组模型土体的渗透系数测量值见表 1)。

图 6 给出了 3 组模型地基在振动 3 作用下的沉降时程曲线, 可以看出, 随着砾石含量的增加, 砂砾土

场地在相同振动输入下的震后沉降会显著降低。

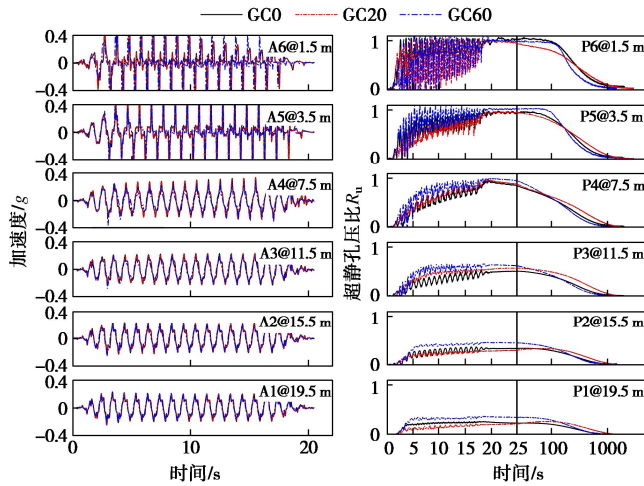


图 5 3 组模型在振动 3 作用下的加速度和孔压响应时程曲线

Fig. 5 Time histories of acceleration and excess pore pressure responses of three model grounds under Motion 3

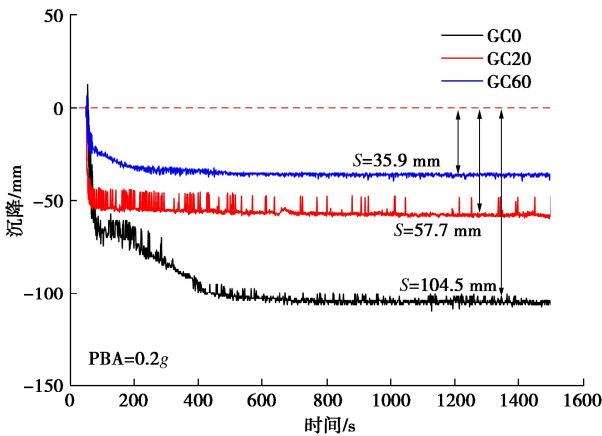


图 6 3 组模型地基在振动 3 作用下的沉降时程曲线

Fig. 6 Time histories of settlements of three model grounds under Motion 3

## 2.3 试验结果及分析

图 7 给出了 9 次振动产生的沉降实测值（换算至原型工况）与振动序列的关系，可以发现，砾石含量越高，振动产生的沉降越小，GC0 模型地基在 9 次振动后产生的累积沉降达到约 0.76 m，GC20 模型地基约 0.52 m，而 GC60 模型地基仅有约 0.37 m，因此高砾石含量砂砾土场地具有较强的抗液化变形能力。

下面基于砂砾土振动体变评价方法计算出场地沉降预测值，然后与图 7 中的沉降实测值进行对比，据此验证砂砾土振动体变评价方法的准确性。首先需要确定振动荷载作用下不同深度处土层的最大剪应变  $\gamma_{\max}$ ，本文采用的计算方法如下：根据加速度响应时程曲线，通过两次积分计算得到土体的振动位移时程曲线<sup>[4]</sup>，然后根据剪应变的定义由式 (6) 计算得到两

个加速度计中间深度处的剪应变时程曲线。基于剪应变时程曲线， $\gamma_{\max}$  取某一圈循环剪切过程中双幅动剪应变的最大值，然后根据式 (7) 分层计算土体在振动荷载作用下的总沉降  $D_s$ <sup>[6]</sup>，其中，不同振次下土体的孔隙比  $e_{j,k}$  根据先前振动实测沉降累计值反算得到，并假设了各个土层的孔隙比一致。

$$\gamma(z_{i-1/2}) = \frac{u_i - u_{i-1}}{\Delta z_{i-1}}, \quad (6)$$

$$D_s = \sum_{j=1}^n \frac{e_{j,k} - e_{\min}}{1 + e_{j,k}} R_0 \gamma_{\max}^m \Delta z_j. \quad (7)$$

式中： $\gamma(z_{i-1/2})$  为第  $i$  和  $i-1$  个加速度计中间深度处的剪应变； $u_i$  为第  $i$  个加速度计的位移； $\Delta z_i$  为两个加速度计的深度差； $n$  表示场地一共划分  $n$  个土层； $j$  表示第  $j$  个土层； $k$  表示第  $k$  次振动工况； $e_{j,k}$  为第  $k$  次振动工况中第  $j$  个土层的孔隙比； $\Delta z_j$  为第  $j$  个土层的厚度。

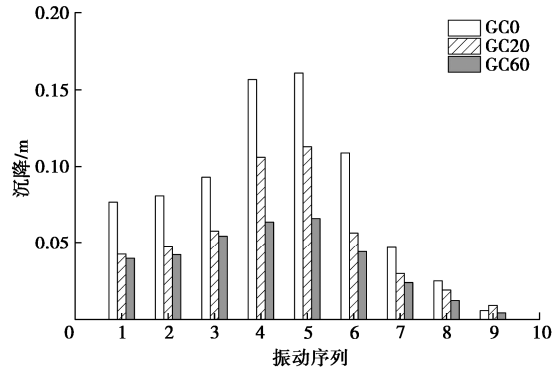


图 7 沉降实测值与振动序列的关系

Fig. 7 Evolution of measured settlements with motion sequence

3 组试验的沉降预测值与实测值的对比如图 8 所示，可以发现，3 组试验中振动 1~6 的沉降实测值与预测值比较接近（误差 20% 以内），而振动 7~9 的沉降实测值与预测值相差较大。产生这种现象的主要原因是地震历史的影响<sup>[7]</sup>。地震历史效应会引起土体密度增加，抗变形能力提高。本次试验中，模型地基在经历过 0.4g 和 0.3g 的大振后孔隙比变化较小（见图 7），但对后续小振有较强的地震历史影响，例如，振动 2 和振动 8 两次振动输入的 PBA 相同，振动产生的放大效应和土体剪应变相近，两次地震动的沉降预测值相近，但是振动 8 的沉降实测值要显著低于振动 2。整体而言，本文提出的考虑砾石含量的砂砾土振动体变评价方法可以较为准确的预测新近沉积砂砾土场地的震后沉降。对于存在地震历史效应影响的砂砾土场地，本文提出的评价方法较为保守，建议进一步分析先期地震应力历史对砂砾土液化后残余体变的影响规律，完善砂砾土场地震后沉降评价方法。



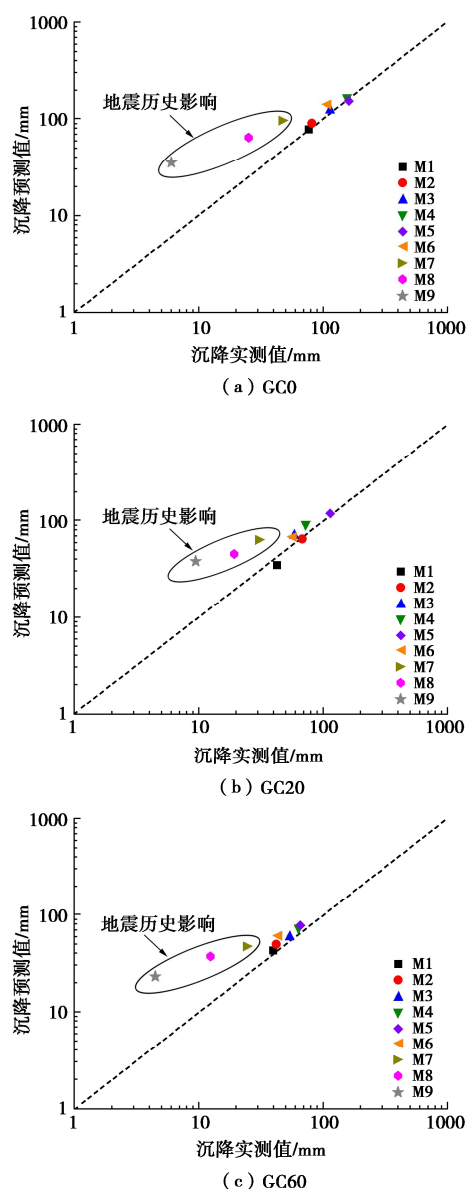


图 8 沉降实测值与预测值的对比

Fig. 8 Comparison between measured and predicted settlements

### 3 结 论

本文初步建立了考虑砾石含量的砂砾土振动体变评价方法, 并开展离心机模型试验验证其可靠性, 主要得到以下 3 点结论。

(1) 砾石含量是引起砂砾土场地震后沉降比砂土场地小的主要原因, 通过在“张-社本”振动体变评价方法的拟合参数  $R_0$  和  $m$  中引入砾石含量参数, 初步建立了考虑砾石含量的“类砂”砂砾土振动体变评价方法, 可对不同砾石含量的“类砂”砂砾土场地的震后沉降进行合理评价。

(2) 开展了动三轴试验, 确定了砂砾土振动体变评价方法中  $R_0$  和  $m$  与砾石含量的关系, 其中,  $R_0$  与砾石含量呈线性关系,  $m$  与砾石含量呈非线性关系。这一结果表明砾石含量对降低振动引起的残余体变起关键作用, 砾石含量越高, 振动引起的震后体变越小。

(3) 开展了 3 组不同砾石含量的饱和砂砾土地基离心机振动台模型试验。试验结果表明, 本文建立的砂砾土振动体变评价方法可较为准确地预测新近沉积砂砾土地地的震后沉降; 但对存在先期地震历史影响的工况, 本文提出的评价方法偏保守。因此, 有必要进一步研究先期地震应力历史对砂砾土振动体变的影响规律。

### 参考文献:

- [1] 袁晓铭, 秦志光, 刘荟达, 等. 砾性土层液化的触发条件[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(5): 777-785. (YUAN Xiaoming, QIN Zhiguang, LIU Huida, et al. Necessary trigger conditions of liquefaction for gravelly soil layers[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(5): 777-785. (in Chinese))
- [2] ZHOU Y G, XIA P, LING D S, et al. Liquefaction case studies of gravelly soils during the 2008 Wenchuan earthquake[J]. Engineering Geology, 2020, 274: 105691.
- [3] DHAKAL R, CUBRINOVSKI M, BRAY J D. Evaluating the applicability of conventional CPT-based liquefaction assessment procedures to reclaimed gravelly soils[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2022, 155: 107176.
- [4] 夏 鹏. 砂砾土动力行为特征与抗液化强度评价研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022. (XIA Peng. Studies on the Dynamic Behaviors and the Liquefaction Evaluation of Gravelly Soils[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022. (in Chinese))
- [5] SHAMOTO Y, ZHANG J M. Evaluation of seismic settlement potential of saturated sandy ground based on concept of relative compression[J]. Soils and Foundations, 1998, 38: 57-68.
- [6] SHAMOTO Y, SATO M, ZHANG J M. Simplified estimation of earthquake-induced settlements in saturated sand deposits [J]. Soils and Foundations, 1996, 36(1): 39-50.
- [7] YE B, XIE X L, ZHAO T, et al. Centrifuge tests of macroscopic and mesoscopic investigation into effects of seismic histories on sand liquefaction resistance[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2022, 26(8): 4302-4324.

(编校: 黄贤沙)