

DOI: 10.11779/CJGE202012015

# 砾性土动三轴液化试验橡皮膜顺变性补偿新方法

王 鸢<sup>1, 2</sup>, 孙 锐<sup>1, 2</sup>, 刘荟达<sup>1, 2, 3</sup>, 袁晓铭<sup>\*1, 2</sup>, 汪云龙<sup>1, 2</sup>

(1. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080;  
3. 中国建设基础设施有限公司, 北京 100044)

**摘要:** 橡皮膜顺变效应对砾性土动三轴液化试验结果影响显著, 采用试样注水补偿是消除橡皮膜顺变效应的基本手段。论证现有补偿方法的原理与技术缺欠, 提出橡皮膜顺变性补偿新原理及新方法。通过多种含砾量砾性土大尺寸动三轴液化试验, 结合橡皮膜嵌入体积测量, 以能够考虑橡皮膜顺变性计算修正后孔压发展结果为参照, 对新补偿方法可行性与可靠性进行对比验证。研究表明, 现有补偿原理仅以动力导致橡皮膜回弹水作为总补水体积, 将导致补偿不足, 新补偿原理考虑了补偿过程中橡皮膜分流作用, 更科学合理; 在不同含砾量、不同振次条件下动三轴液化试验中, 新补偿方法所得结果与理论计算相符, 变化规律一致; 相比现有补偿方法, 新方法在单次补偿阶段无需反复补水和多回合逼近, 可操作性明显增强, 补偿效果明显占优。新方法操作简捷高效易推广, 不仅适于砾性土动三轴液化试验, 也为粗粒土动力特性试验研究提供了新的技术支撑。

**关键词:** 砾性土; 橡皮膜顺变性; 补偿方法; 计算修正; 液化试验

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)12-2281-10

作者简介: 王 鸢(1993—), 女, 博士研究生, 主要从事土动力学方面研究。E-mail: luaniemmer@163.com。

## New method to compensate for membrane compliance in dynamic triaxial liquefaction tests on gravelly soils

WANG Luan<sup>1, 2</sup>, SUN Rui<sup>1, 2</sup>, LIU Hui-da<sup>1, 2, 3</sup>, YUAN Xiao-ming<sup>1, 2</sup>, WANG Yun-long<sup>1, 2</sup>

(1. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China; 2. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration of China Earthquake Administration, Harbin 150080, China; 3. China Construction Infrastructure Corp., Ltd., Beijing 100044, China)

**Abstract:** The membrane compliance has a significant effect on the results of the triaxial liquefaction tests. The compensation method is one of the primary means to eliminate the impact of the membrane. The theoretical defects of the existing compensation methods are analyzed and verified in the comparison tests, and the new principle and method for the compensation of membrane compliance are proposed. Based on the large-scale dynamic triaxial liquefaction tests on the gravelly soils with various gravel contents and the measurement of membrane penetration volume, the feasibility and reliability of the new compensation method are verified by taking the modified pore pressure model, which can consider the membrane compliance as a reference. The research shows that the existing compensation principle will lead to inadequate compensation, which only uses the rebound water volume caused by the dynamic force as the total water supplement volume, and the new compensation principle is more scientific and reasonable, considering the effect of membrane distributary. In the dynamic triaxial liquefaction tests with different gravel contents and stresses, the results of the new method are consistent with the theoretical ones, and the variation law is uniform. Compared with the existing compensation method, the new method does not need repeated water replenishment and multiple approximations at a single compensation stage, and its operability is enhanced, and the compensation effect is superior. It is suitable for the dynamic triaxial liquefaction tests on gravelly soils and provides a new technical support for the dynamic characteristics tests on coarse-grained soils.

**Key words:** gravelly soil; membrane compliance; compensation method; calculation correction; liquefaction test

## 0 引言

砾性土是对砾质土、砾砂、粉砾土、砂砾土和砾类土的统称<sup>[1]</sup>, 是含砾量从大于 10% 到 100% 的宽级配

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项目(2019EEEVLO201); 黑龙江省自然科学基金重点项目(ZD2019009); 国家自然科学基金项目(41602321)

收稿日期: 2020-02-09

\*通信作者 (E-mail: yxmiem@163.com)

粗粒土，是工程建设的重要材料，地理分布广泛。砾土在自然和人工场地都曾发生地震液化或失稳破坏等现象，造成极大经济损失，如 1975 年唐山地震、2008 年汶川地震与 2016 年新西兰凯库拉地震<sup>[2-3]</sup>。其力学特性与本构研究受人重点关注，但研究需基于单元试验。但橡皮膜作为单元试验关键影响因素，相关研究不甚充分，目前研究无法考虑并消除其影响，结果可靠性不足，严重制约粗粒土动力研究发展。因此，橡皮膜影响消除是粗粒土力学特性研究中的关键课题。

三轴不排水试验中，橡皮膜主要存在顺变效应<sup>[4]</sup>，即不排水试验中，有效应力变化导致橡皮膜嵌入体积顺势改变而影响孔隙水压力真实表现的现象。砾性土液化试验中，随孔压增长，有效应力降低，橡皮膜从初始嵌入位置逐渐回弹，部分孔隙水运移填补橡皮膜回弹空间，导致试样局部排水，而影响土孔压发展和动强度。已有研究表明，橡皮膜对试验结果的影响是全方位的：最大可能导致 85% 体积测量误差<sup>[5-6]</sup>；可能导致低估最多 70% 动孔隙水压力<sup>[7-8]</sup>以及最高达 50% 的抗液化强度误差<sup>[4,8-11]</sup>；最高达 50% 静强度误差<sup>[12]</sup>；对土的阻尼比和泊松比的测量也有明显影响<sup>[13]</sup>。

液化试验橡皮膜顺变性校正工作，分两个阶段：①第一阶段，橡皮膜嵌入体积的确定，是后续工作阶段的基础与前提，提供关键应用数据。②第二阶段，橡皮膜顺变性的消除，需基于前阶段结果，采取科学合理的方法实现对橡皮膜顺变性的校正。

其中，橡皮膜顺变性消除方法主要有物理缓解、仪器补偿和计算修正 3 类。物理缓解主要为处理试样外表面凹陷，如外表面涂抹硅橡胶<sup>[6]</sup>或黏土<sup>[14]</sup>、细砂充填孔隙<sup>[4,9]</sup>或冷冻试样表面光滑切割<sup>[15]</sup>等。这类方法对试样带来的附加影响难以估计，且如涂胶法无法 100% 抵消橡皮膜顺变<sup>[6]</sup>。仪器补偿需根据提前确定的橡皮膜嵌入体积，向试样内<sup>[11, 16-17]</sup>或特制的双层膜间<sup>[18]</sup>进行及时补水，补偿因橡皮膜顺变导致试样局部排水影响，被认为可 100% 消除橡皮膜影响<sup>[19]</sup>，但大多需要特殊开发新设备，适用性较低，难作为常规手段推广。计算修正基于三轴试验，从孔压发展角度对结果修正<sup>[8, 20]</sup>，得到相对真实的孔压发展规律，方法需根据大量复杂的工作建立合理孔压模型并获取可靠修正系数，在土动力学早期难以广泛开展，至今仍鲜有应用。综上，因应用效果、适用范围或理论发展等因素，橡皮膜顺变性消除方法在过去近 20 a 应用甚少，未能取得更深入发展，阻碍着液化理论深化，导致当前的土壤液化研究，尤其是大颗粒粗粒土的液化单元试验中，对其常避而不谈或选择性忽略。

本文基于橡皮膜顺变效应影响机理，以仪器补偿作为消除橡皮膜顺变性研究的主要手段，分析现有补

偿手段存在的理论缺陷，提出一种对饱和试样进行补偿的新原理和新方法，结合砾性土的橡皮膜嵌入体积测量的前序成果，利用大型动三轴仪，以汶川地震中液化砾性土为基础料，开展新型补偿试验，通过与已有补偿方法、计算修正后无橡皮膜顺变性的理论结果等对比，验证新方法的技术可行性，理论可靠性和方法适用性。研究成果为开展粗粒动力试验研究提供新途径，为深化土动力学理论发展提供新动力。

## 1 橡皮膜顺变性现有补偿理论方法

### 1.1 修正理论与计算方法

Martin 等<sup>[20]</sup>提出了基于孔压产生及发展规律的针对橡皮膜顺变效应的理论和计算方法。理想不排水条件下，饱和土受动荷载所产生的孔隙水压力满足

$$\Delta u_0 = E_r \cdot \Delta \varepsilon_{vd} , \quad (1)$$

式中， $\Delta u_0$  为完全不排水条件下的残余孔压增量， $E_r$  为某动力初始阶段土的体积回弹模量， $\Delta \varepsilon_{vd}$  为排水条件下土在同等应力条件下受到相同动荷载作用后所产生的体应变增量。

当进一步考虑了橡皮膜顺变性所导致土局部排水后，由式（1）得到

$$\Delta u_m = \frac{\Delta \varepsilon_{vd}}{\frac{1}{E_r} + \frac{1}{E_m}} = \frac{E_r \cdot \Delta \varepsilon_{vd}}{(1+C_r)} , \quad (2)$$

式中， $\Delta u_m$  为存在橡皮膜顺变效应影响的残余孔压增量， $E_m$  为某动力初始阶段时对应的橡皮膜的变形模量， $C_r$  为橡皮膜顺变性修正系数， $C_r = E_r / E_m$ ，可由橡皮膜嵌入体积测量试验确定。结合式（1）可得

$$\Delta u_0 = \Delta u_m \cdot (1+C_r) . \quad (3)$$

式（3）即为考虑橡皮膜顺变性的孔隙水压力修正计算基础公式。其理论科学合理，被视为橡皮膜顺变性校正的理论结果，曾得到短暂发展和应用。但近 20 a 在粗粒土试验中鲜有深入研究，一方面，粗粒土孔压模型发展有限，如 Finn 模型的代表性参数由二氧化硅砂所得<sup>[21]</sup>，能否推广至更宽级配粗粒土尚未可知。另外该理论对孔压全量模型并不适用，曾有学者误对累计残余孔压时程修正橡皮膜顺变效应影响<sup>[22]</sup>，与孔压增长规律相悖。同时，确定修正系数  $C_r$  依赖于能够准确确定橡皮膜嵌入体积<sup>[4,23-24]</sup>，这在以往难度较大。因此计算修正方法原理科学可靠但实际应用较少。

### 1.2 现有仪器补偿方法及缺陷

Ramana 等<sup>[17]</sup>提出一种利用压力控制器的补偿方法，简称 Ramana 方法（下同），成为后续学者研发更高级补水仪器和系统的核理论和技术源头<sup>[11, 16]</sup>，被认为可达 100% 补偿效果<sup>[19]</sup>。其无需进行常规液化试验，可直接由补偿液化试验得到土的真实抗液化强度。基

本原理是将液化试验过程中, 某动力阶段用于回弹橡皮膜的水再补回试样中, 来保证土试样本身的不排水状态, 可表达为

$$V_{cp} = V_d, \quad (4)$$

式中,  $V_{cp}$  为向试样补偿水的体积,  $V_d$  为因产生有效应力变化  $\Delta\sigma'_3$  而支持橡皮膜回弹的水的体积, 由橡皮膜嵌入体积与有效应力关系确定, 如图 1 中黑色实线所示。

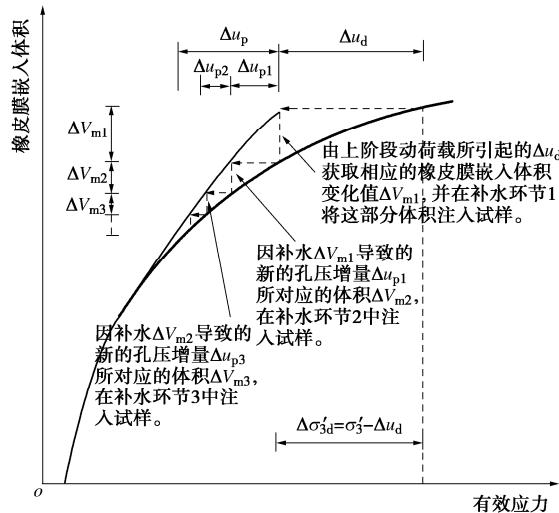


图 1 传统橡皮膜补偿的工作示意图

Fig. 1 Working diagram of traditional membrane compensation

操作方法为, 获取膜嵌入体积与有效应力关系, 如图 1 黑色实线, 随后由某动力阶段有效应力变量  $\Delta\sigma'_3$ , 读取其导致的橡皮膜回弹体积  $\Delta V_{m1}$ , 将该体积的水及时补充到试样内, 可得无橡皮膜顺变影响的试验结果。考虑注水引起新的孔压增长导致橡皮膜顺变, 如图 1 箭头与虚线所示需多回合注水, 反复逼近使总注水体积与有效应力增量重新在曲线上重合, 一次补偿工作完成, 并可以开始下一阶段动力试验。

为方便讨论, 提出孔隙水体积与回弹水体积两概念。孔隙水体积为在存在于土颗粒孔隙未与橡皮膜接触水的体积, 根据孔压增长机理, 土受动荷载过程中孔隙水对孔压发展起正向贡献作用。回弹水定义为有效应力变化后运移至土颗粒与橡皮膜之间填补膜回弹空间的水的体积, 等于橡皮膜回弹体积, 这部分水体积的增加将对孔隙水压力的发展起负向作用。

Ramana 方法符合对橡皮膜顺变效应机理认识, 但对补水体积认识存在误区: 向试样内补水不仅需要补偿动载阶段回弹水的体积。补偿的目的是对试样内饱和土的孔隙水进行补偿。如图 2, 随补水的进行, 橡皮膜二次回弹对所注入水量起到即时分流作用, 即向试样补偿的水不能完全用于补偿土孔隙中的水分流失。从总注水体积角度而言, 因时刻存在的分流作用,

Ramana 方法将动力阶段橡皮膜回弹水体积作为补水总量, 必然且始终有一部分顺应膜再回弹成为回弹水, 而实际孔压贡献的孔隙水体积仍然得不到充分补偿, 故无法 100% 消除橡皮膜顺变效应。且该方法未提出明确的注水截止标准, 实际操作易出现“越补偿待补体积越大”的死循环, 试验效率低, 不易操作。

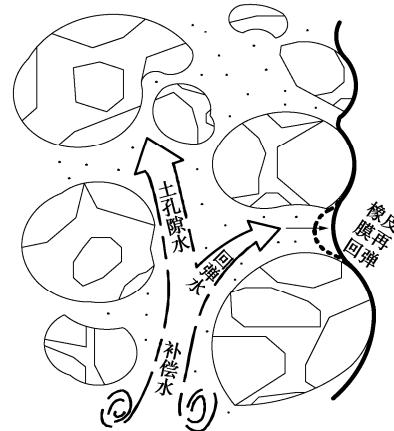


图 2 补水过程中橡皮膜回弹的分流作用

Fig. 2 Effects of distributary of membrane rebound during compensation

由前文可见, 无论计算修正或仪器补偿方法, 都需要开展橡皮膜嵌入体积测量作为基础, 为确定修正系数或补偿体积提供关键数据, 对此笔者已在前续文章展开研究<sup>[23]</sup>, 本文不再赘述研究细节。

## 2 橡皮膜顺变性补偿新原理方法

### 2.1 仪器补偿新原理

本文提出一种考虑橡皮膜实时分流的试样补偿新原理。新原理以孔隙水得到 100% 补偿为目标。补偿过程中, 向试样内部的总注水体积  $V_{\text{试样}-cp}$  包含对孔隙水补偿体积  $V_{\text{孔隙水}-cp}$  以及补水过程中支持橡皮膜进一步回弹的回弹水体积  $V_{\text{回弹水}-cp}$ 。其中对土的孔隙水补偿体积  $V_{\text{孔隙水}-cp}$  等于动力阶段产生有效应力变化值  $\Delta\sigma'_3$  所对应的回弹水的体积  $V_{\text{回弹水}-\Delta\sigma'_3}$ , 具体可表达为

$$V_{\text{试样}-cp} = V_{\text{孔隙水}-cp} + V_{\text{回弹水}-cp}, \quad (5)$$

$$V_{\text{孔隙水}-cp} = V_{\text{回弹水}-\Delta\sigma'_3}. \quad (6)$$

即若考虑橡皮膜的分流作用, 向试样内补水的体积应大于动力阶段橡皮膜的回弹体积, 才能够对试样土骨架内真正的完全补水。

补偿水体积可根据橡皮膜嵌入体积测量试验结果进一步确定。不排水条件下, 有效应力、孔隙水体积、回弹水体积三者协调变化。以汶川地震液化砂性土为例, 由双尺寸法可确定三轴试验中有效应力、各类型水体积随总注水体积变化曲线<sup>[23]</sup>, 如图 3 所示。基于这种协调关系与式 (5), (6), 可确定如下补水关系:

$$\left. \begin{aligned} V_{\text{试样-}cp} &= k \cdot V_{\text{孔隙水-}cp}, \\ V_{\text{孔隙水-}cp} &= V_{\text{回弹水-}\Delta\sigma'_3}, \\ k &= \frac{V_{\text{孔隙水-}\Delta\sigma'_3} + V_{\text{回弹水-}\Delta\sigma'_3}}{V_{\text{孔隙水-}\Delta\sigma'_3}}, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中,  $k$  为体积调整系数, 可根据预先的补水试验结果确定,  $V_{\text{回弹水-}\Delta\sigma'_3}$  与  $V_{\text{孔隙水-}\Delta\sigma'_3}$  需由某动力阶段初始有效应力  $\sigma'_3$ 、动力阶段有效应力变化值  $\Delta\sigma'_3$  与前序橡皮膜嵌入体积测量试验结果联合确定, 见图 3。

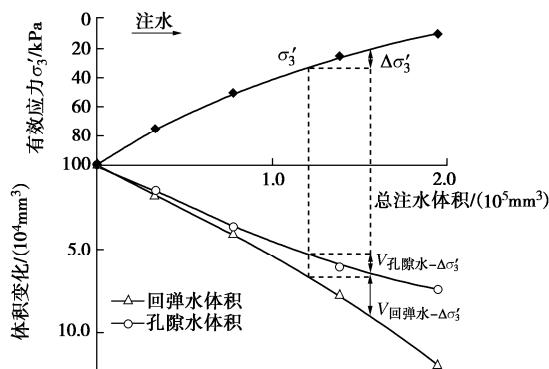


图 3 试样中各类型水体积、有效应力随注水体积变化示意图  
Fig. 3 Diagram of volume change of different water and effective stresses with water injection

## 2.2 仪器补偿新方法

根据仪器补偿新原理, 新补偿方法将在饱和试样受动载试验中, 开展多阶段单回合注水补偿, 如图 4。

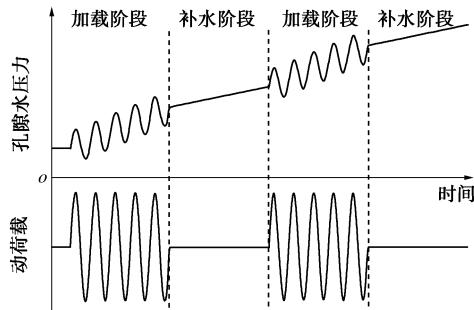


图 4 新补偿方法操作示意图

Fig. 4 Operation diagram of new compensation method

单阶段补偿具体操作为: 当饱和试样在某阶段动荷载作用下产生一定孔压增量后, 暂停动力加载; 随后, 根据此动力阶段的初始有效应力  $\sigma'_3$ 、孔隙水压力增量  $\Delta u$ , 由预先在橡皮膜嵌入体积测量中得到的有效应力、孔隙水、回弹水三者关系<sup>[23]</sup>, 结合式 (7), 确定待补水体积  $V_{\text{试样-}cp}$ ; 最后一次性缓慢将这部分水注入试样, 得到稳定后的孔压值即为该动力阶段无橡皮膜顺变性影响的孔隙水压力, 并可继续动加载。

**补偿节点:** 试验中可根据施加的动应力的大小、实际孔隙水压力的增长程度、振动次数预判等综合决定补偿节点。建议两种节点选取方法: ①孔压增量阈

值, 建议以单次或多次振动后, 以残余孔隙水压力增长达到或大于 5 kPa 作为一次补偿节点, 或根据研究需求适当放宽至 10 kPa 作为阈值; ②振动次数预设, 现有三轴仪器均可满足预设振动次数功能, 因此试验中可根据动应力大小与孔压增长水平, 依实际工况选取如 5, 10 或 15 等固定振次作为补偿节点。以上两种节点选取方法可根据实际研究需求单独或混合使用。

**补水速率:** 包含本文在内的补偿方法皆以待补水总体积作为某补偿阶段控制目标, 但以往鲜对补水速率作出要求。对本文将应用的 300 mm 直径砾性土样, 参考反压饱和过程中压力控制器注水速率(0~150 mm<sup>3</sup>/s), 以其中后期平稳注水阶段的 5~50 mm<sup>3</sup>/s 作为补偿注水速率, 该阶段主要特点为孔压/反压接近预设值, 注水体积缓慢增长至逐渐稳定。其他尺寸试样, 可参考自身此阶段注水速率。具体试验中可根据含砾量调整注水速率(渗透系数会影响孔隙水压力场的均匀程度和平衡速率), 具体原则: 补水速率应随含砾量降低而逐步减小。同时本文建议利用试样双向同步补水<sup>[16]</sup>、控制补水速率与增加透水石厚度的手段相结合以缓解注水导致孔压场不均匀分布或局部孔压瞬时较大的可能。

新方法由于需要中断动荷载加载, 可能会改变动应力历史。但对于均等固结条件下受正弦荷载的单元试验而言, 土的密实度、排水条件、累计孔压增量、动应力(变)幅值、土的回弹模量等因素的影响相对动应力加载历史对结果影响更显加显著。如 Finn 模型<sup>[25]</sup>、Byrne 模型<sup>[26]</sup>中以土的一维回弹模量、塑性体应变及增量、相对密度作为主要计算参数, Ishihara 等<sup>[27]</sup>也认为应力作用速率在一定范围内影响很小。相比之下, 橡皮膜顺变性对液化结果的影响则更加显著, 如含砾量对液化势影响研究中, 因橡皮膜顺变性的存在, 现有研究成果<sup>[4, 28~30]</sup>截然不同甚至自相矛盾。据此, 本文认为相比橡皮膜顺变性对土抗液化强度影响的显著性, 可适当放松对动应力加载历史要求, 后文将结合试验结果做进一步论证。

综上, 本文仪器补偿新方法, 原理上更科学合理; 操作上, 暂停式补偿与 Ramana 等<sup>[17]</sup>和 Tokimatsu 等<sup>[11]</sup>补偿方法研究一致, 但单次补偿效率高, 补偿截止标准明确, 可实施性显著增强; 成本上, 相比 Seed 等<sup>[16]</sup>特制研发的低频振动补水系统, 新方法由现有通用三轴仪即可完成补偿, 开展成本大大降低。

## 3 补偿试验设计

利用 GDS 大型动三轴仪, 基于常规无补偿、

表 1 试验砂性土基本参数及工况

Table 1 Basic parameters of soils and tests

名称	$d_{10}$	$d_{20}$	$d_{50}$	含砾量 /%	试样直径 /mm	橡皮膜厚度 /mm	试验 CSR		
	/mm	/mm	/mm				无补偿	Ramana	本文
SBC-G65 (真液化土)	0.43	0.95	13.6	65	300	2	0.075~0.2	0.1/0.15	0.1/0.15
SBC-G80	0.8	5	25	80	300	2	0.125~0.25	0.1/0.15	0.1/0.15
SBC-G100	10	13	32	100	300	2	0.15~0.275	0.1/0.15	0.1/0.15

Ramana、本文新补偿 3 种试验方法, 开展砂性土液化试验, 验证本文方法的理论可靠性和技术可行性。仪器装备 ADVDPC 型号高精度压力/控制器, 为本文研究提供重要技术保障。

以汶川地震中发生实际液化的松柏村砂性土为基础料, 制备 3 种含砾量的砂性土, 级配曲线如图 5, 土的基本物性指标如表 1。含砾量为 5 mm 以上粒组占土总质量百分比。试样干法装填, 分十层击实或振密, 相对密度 50%, 注意尖锐棱角朝向以防刺破橡皮膜, 采用二氧化碳与反压饱和法, 保证试样 B 值达到并维持在 0.97 以上, 试样两端为 4 cm 厚粗烧陶瓷透水石。

试验基本工况设计如表 1 所示, 首先根据振动三轴试验方法<sup>[31]</sup>开展常规无补偿条件下砂性土的液化试验, 以孔压等于初始有效应力 100 kPa 作为液化标准, 另选择循环剪应力比 CSR ( $\sigma_d/2\sigma'_3$ ) 为 0.1, 0.15 的工况分别开展两种橡皮膜补偿方法的液化-补偿试验, 探究本文补偿方法在不同液化振次条件下的适用及可行情况。本文以孔隙水压力增长大于或等于 5 kPa 作为补偿节点, 孔压稳定增长阶段辅助以预设振次 5 或 10 次提升工作效率, 而孔压增长初期和接近液化阶段则以“少振次, 多补偿”原则增加补偿节点, 以记录残余孔压变化中的细节规律。振动频率 1 Hz。

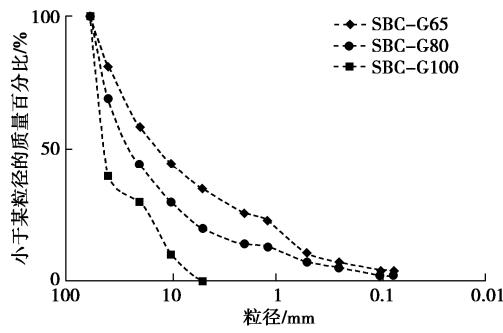


图 5 砂性土试样级配曲线

Fig. 5 Gradation curves of gravelly soils

#### 4 新方法验证

本节将从新方法的补偿过程与补偿结果两方面进行论证。补偿结果方面, 通过确定砂性土孔压增量模型参数及橡皮膜修正系数  $C_t$ , 进行橡皮膜顺变效应计

算修正, 作为补偿试验结果的理论参照; 通过对比本文与 Ramana 两种补偿方法液化试验结果, 探究新补偿方法的适用性与结果可靠性。

##### 4.1 新补偿方法对试样的影响分析

砂性土 SBC-G65 某补偿阶段, 总补水量、孔隙水压力、轴应变时程, 如图 6 所示。补水量率为 25  $\text{mm}^3/\text{s}$ 。孔隙水压力随注水进程逐渐升高, 未出现瞬时激增现象。注水停止后, 孔压基本保持稳定, 未出现显著下降。表明补偿过程中试样内部孔压场均匀变化, 未因端部补水而出现局部孔压显著升高现象。可见本文增厚透水石、控制补水量率、双向同步补水措施可有效实现孔隙水压力均匀、同步变化。同时本文 3 种试验砂性土, 含砾量较高, 自身渗透系数较大, 对注水补偿能够快速实现内部孔压自平衡。说明本文补偿方法未对试样内部孔压分布造成显著影响。

试验随注水补偿回弹, 轴应变有所降低。根据笔者前续研究中的补水试验研究<sup>[23]</sup>, 这部分变形为有效应力下降导致的弹性回弹, 基本不含塑性变形。当注水停止后, 试样后续未出现显著变形。以图 6 为例, 注水时轴应变由 0.6073% 回弹至 0.6049%, 稳定阶段轴应变变化区间为 0.6048%~0.6050%, 都属于小应变范畴。说明本文新方法在补偿过程中, 试样不会出现显著变形甚至影响试样自身力学性质。

综上, 新补偿方法在补偿过程中能够保证不对试样造成显著附加影响, 从而确保补偿结果可靠性。

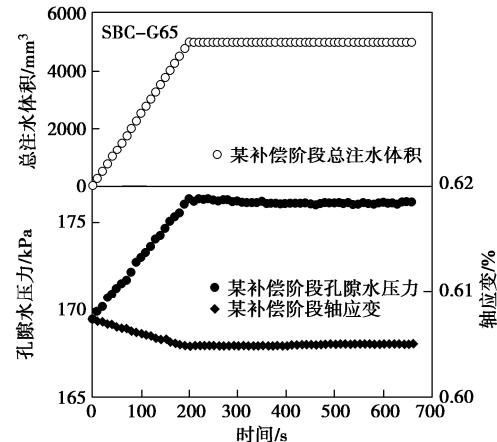


图 6 某补偿阶段孔压、轴应变随注水体积变化时程

Fig. 6 Time histories of pore pressure and axial strain with water injection during a compensation stage

#### 4.2 砾性土橡皮膜计算修正的关键参数

基于丰万玲等<sup>[32]</sup>和孙锐等<sup>[33]</sup>给出的均等固结饱和土孔压增量模型,可以建立砾性土孔压增量计算式:

$$\overline{U}_N = \frac{\Delta u_N}{\sigma'_3 - u_{N-1}} = \frac{C_{1,0}}{N^{C_{2,0}}} \left( \frac{\tau_N}{\sigma'_3 - u_{N-1}} \right)^{A_{4,0}}, \quad (8)$$

式中,  $\overline{U}_N$  为第  $N$  次动力荷载的孔压增量比,  $\Delta u_N$  为第  $N$  次荷载的孔压增量,  $\sigma'_3$  为初始有效固结应力,  $u_{N-1}$  为第  $N-1$  动循环后的累计残余孔压,  $\tau_N$  为第  $N$  次动应力幅值,  $C_{1,0}$ ,  $C_{2,0}$ ,  $A_{4,0}$  为待定系数, 与土性有关。

该理论模型成熟, 以此为基础发展考虑橡皮膜顺变性的计算修正模型, 可作为补偿试验的理论参考。砾性土由常规无补偿试验确定的孔压增量模型基本参数如表 2 所示, 参数确定细节及讨论将在后续文章中开展, 本文不做赘述。但如图 7, 存在顺变效应影响的残余孔压实测值与基于表 2 的孔压计算值非常接近, 变化规律一致, 说明本文孔压增量模型参数可以有效地描述均等固结下不同含砾量砾性土的孔压变化情况。

根据式(3), 还需确定橡皮膜顺变性修正系数  $C_r$ 。由笔者前续研究, 已利用双尺寸法<sup>[23]</sup>获得几种砾性土在不同有效应力下单位面积橡皮膜嵌入体积  $\Delta v_m$  与土骨架体应变两  $\varepsilon_v$  两个关键指标<sup>[23]</sup>, 如图 8 所示。 $\Delta v_m$  和  $\varepsilon_v$  同有效应力  $\sigma'_3$  在半对数坐标系内呈线性关系,  $\Delta v_m$  关于  $\lg \sigma'_3$  的斜率用  $S_m$  表示,  $\varepsilon_v$  随  $\lg \sigma'_3$  变化斜率

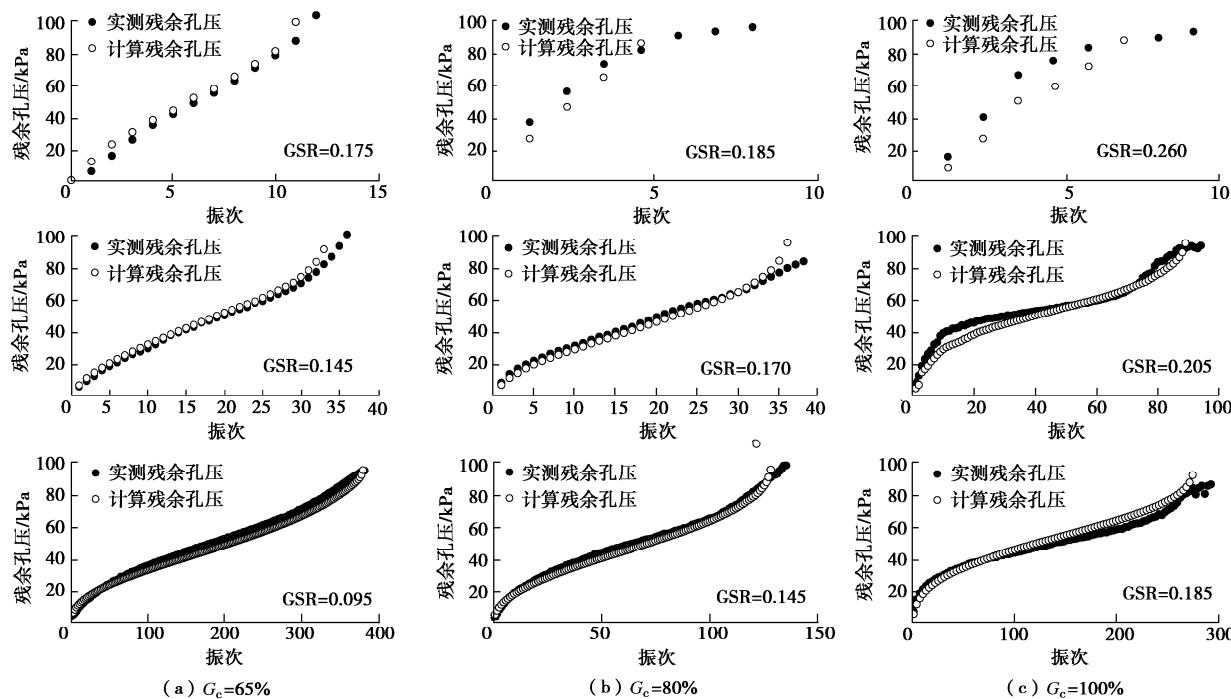


图 7 不同含砾量土的残余孔压实测值与计算值代表性对比 ( $\sigma'_3=100$  kPa)

Fig. 7 Representative comparison between measured and calculated residual pore pressures of different gravelly soils

用  $S_r$  表示, 其本质为土骨架回弹系数, 与回弹模量互为倒数。并结合各参数物理意义, 可推导  $C_r$  的计算式:

$$C_r = \frac{E_r}{E_m} = \frac{1/S_r}{1/(S_m \cdot A/V)} = \frac{S_m \cdot A}{S_r \cdot V} = \frac{4S_m}{S_r \cdot D}, \quad (9)$$

式中,  $S_r$ ,  $S_m$  可由图 8 拟合得到,  $A$  为试样表面积,  $V$  为试样体积,  $D$  为试样直径。3 种砾性土橡皮膜顺变性修正系数  $C_r$ , 如表 2。由式 (3), (8) 与表 2, 可确定考虑橡皮膜顺变性的孔压结果。

表 2 砾性土橡皮膜顺变性计算修正的关键参数

Table 2 Key parameters for calculation correction of membrane compliance of gravelly soils

含砾量 /%	孔压增量模型参数			橡皮膜顺变性修正 系数 $C_r$
	$C_{1,0}$	$C_{2,0}$	$A_{4,0}$	
65	10.80	0.710	2.67	1.688
80	6.97	0.777	2.73	2.930
100	5.985	0.950	2.95	5.820

#### 4.3 新方法的结果检验

不同动荷载条件下, 砾性土由两种补偿方法、常规无补偿的三轴液化试验孔压结果对比, 如图 9, 10 所示。其中黑色实心圆点为存在橡皮膜顺变性的常规液化残余孔压结果, 空心圆点为新补偿方法所得残余孔压, 空心三角为 Ramana 方法所得残余孔压。

联立式 (3), (8) 与表 2, 可得对橡皮膜计算修正的残余孔压结果, 如图 10 黑色实心方点所示。其中式 (3), 即 Martin 等<sup>[20]</sup>的基础模型, 符合孔压发展机理, 被作为橡皮膜校正的孔压理论解与参考值<sup>[10-11,14]</sup>。

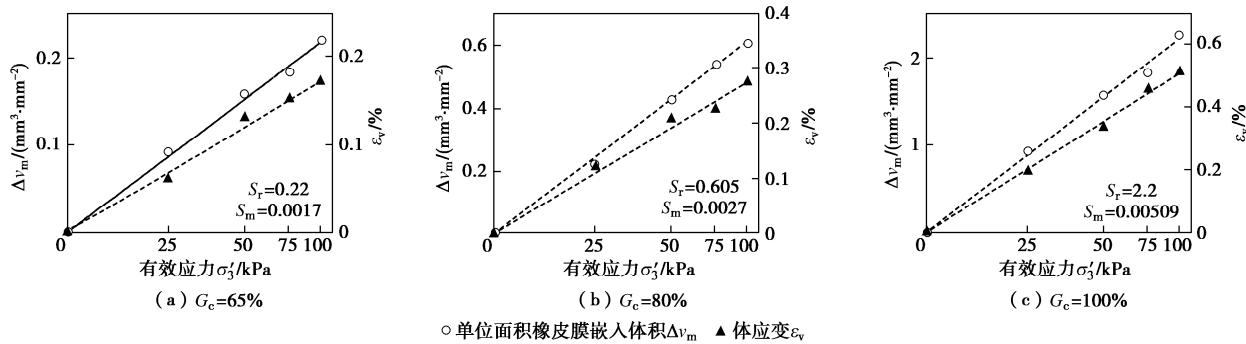
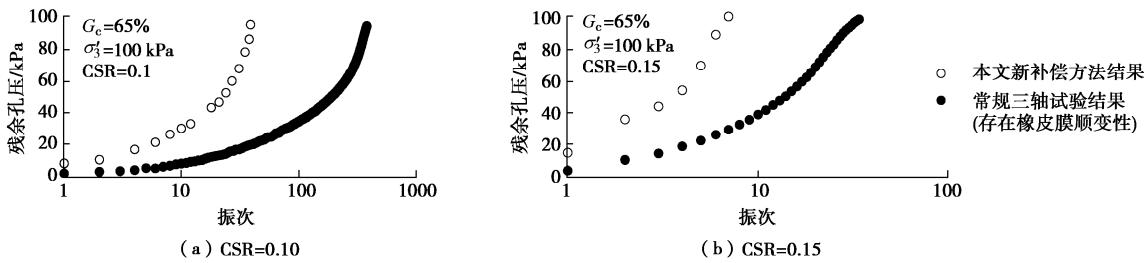
图 8  $\Delta v_m$  与  $\varepsilon_v$  随有效应力  $\sigma'_3$  变化的关系图Fig. 8 Relationship between  $\Delta v_m$ ,  $\varepsilon_v$  and effective stress  $\sigma'_3$ 

图 9 新补偿方法孔压时程与常规三轴试验结果对比

Fig. 9 Comparison of time histories of pore pressure from new compensation method and traditional triaxial test

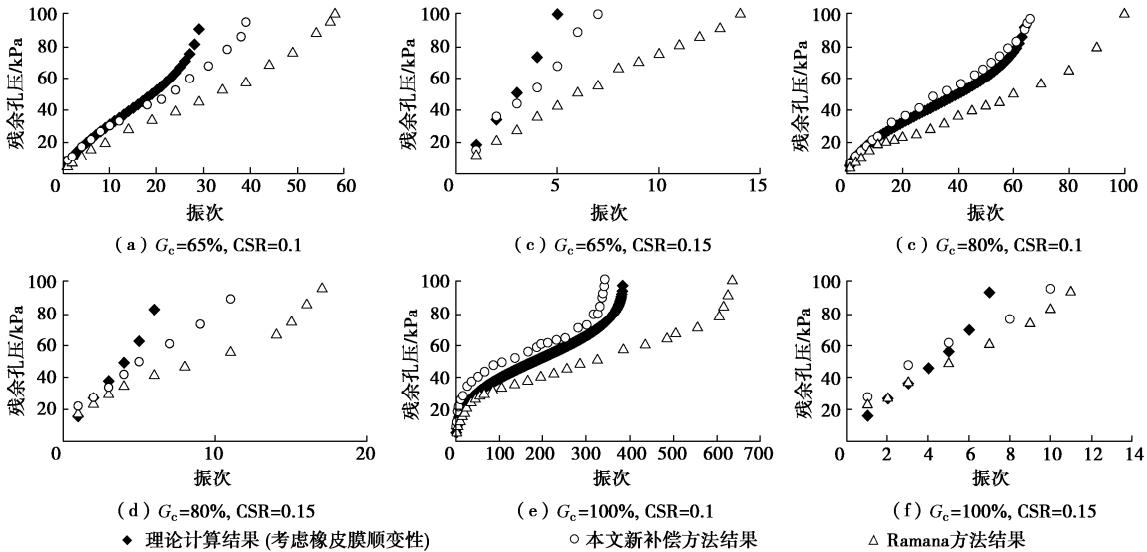
图 10 两种补偿方法所得孔压时程与理论计算结果对比 ( $\sigma'_3=100 \text{ kPa}$ )

Fig. 10 Comparison of time histories of pore pressure from 2 compensation tests and theoretical results

而式(8)为成熟的孔压增量模型, 满足式(3)中  $\Delta u_m$  定义, 且兼顾了周景星等<sup>[8]</sup>提出孔压增量模型需能够考虑已有的累积孔压水平的要求, 能够反映动应力历史。由此, 图 10 中理论计算结果可作为橡皮膜顺变性校正的理论参考值, 并检验各补偿方法的试验结果。

由图 9 孔压时程, 本文新方法可成功使试样达到初始液化状态, 但相比常规三轴试验, 达到液化状态所需振动次数大大减少, 验证了本文新方法的可行性, 也说明橡皮膜顺变性对粗粒土液化特性影响显著。

图 10 对比新、老两补偿方法结果。本文新方法相比 Ramana 方法在相同试验条件下达到液化所需振动次数始终更少, 土更迅速达到初始液化状态, 此现象与两方法的总补水体积的大小关系相符。Ramana 方法把回弹水作为全部补水, 而新方法仅将回弹水用于补偿试样中土的孔隙水, 总补水体积更高, 也因此获得了数值更高、发展更快的补偿后孔隙水压力。

整理各方法达到初始液化所需平均振次于表 3。结合图 9, 10, 新方法达到液化所需平均振次仅为计算修

表 3 不同补偿方法达到初始液化所需要的振动次数

Table 3 Vibration times required by different compensation methods to achieve initial liquefaction

方法名称	SBC-G65		SBC-G80		SBC-G100	
	CSR=0.1	CSR =0.15	CSR =0.1	CSR =0.15	CSR =0.1	CSR =0.15
计算修正法	29.5	5	64.5	6.5	383.5	7.5
本文新补偿法	39.5	7	66.5	11.5	342.0	10.5
Ramana 方法	58.0	14	100.0	17.5	635.0	11.5

注：单次振动周期内试样达液化，按 0.5 次计。

正结果 1.3 倍，最大不超过 1.7 倍，而 Ramana 方法则平均需要 2 倍的振动次数，最高时振次接近 3 倍。可见新方法所得残余孔压规律更接近理论参考值，且不受含砾量影响，能够得到更贴近真实的动力试验结果。因此结合前文关于 Ramana 方法在补水体积方面的讨论，该方法并非以往认知中的 100% 补偿方法<sup>[19]</sup>。相较下，本文新方法能够更好消除橡皮膜顺变性对饱和土动力反应的影响，是更接近 100% 的补偿方法。

图 10 中，新补偿方法结果在中、高振次条件更接近理论计算值，低振次结果略有偏差，但与理论计算结果的一致性仍优于 Ramana 方法。新补偿方法同理论计算结果间的差异，本文认为与仪器施加动应力并非完全恒定有关。低振次工况，孔压增长迅速，土体刚度变化较快，三轴仪难以稳定施加大幅值动应力，即便配置应力自适应功能，但临近液化阶段动应力施加值与预设值差异会明显增加，达到液化所需振次也有所增加。中、高振次对应动应力较低，孔压发展较慢，动应力幅值较为稳定，所得结果与计算参考值更加一致。因此本文建议新补偿方法在较低振次的液化工况时，可适当降低振动频率，使动应力施加更充分，有利于获取更接近理论值的液化结果。另外膜嵌入体积测量结果可靠性对橡皮膜校正结果具有较大影响。

对比新方法、理论修正与常规试验结果发现，新方法补偿所得残余孔压结果仍呈现反 S 型趋势，土的基本动力特性未因新方法的暂停补偿而受明显影响，说明暂停式补偿新方法技术可行，所得结果有效合理。

## 5 结 论

橡皮膜顺变效应是影响砾性土三轴液化试验结果可靠性的关键，直接影响粗粒土动力特性研究的发展。

(1) 提出橡皮膜顺变性补偿新原理。将土孔隙水得到 100% 补偿作为目标，以动力阶段橡皮膜回弹水体积与补偿过程补充土孔隙水体积二者相等为

准则，认为总补水体积为补偿土孔隙水体积与补偿过程中伴随橡皮膜回弹水体积之和，合理考虑了橡皮膜对补偿水的分流作用，克服了现有补偿原理仅以动力导致的回弹水作为总补水体积而补偿不足的缺点。

(2) 提出橡皮膜顺变性补偿新方法。液化试验中当孔压达到预设补偿节点后暂停动荷载，基于新原理由橡皮膜嵌入体积、阶段性初始有效应力与孔压增量确定待补水总体积，通过控制补给速率对试样进行单回合补水作为一次完整补偿环节；与现有补偿方法相比，新方法单补偿阶段仅需注水一次，无需多回合逼近，补偿、截止标准明确，可操作性更强，试验效率更高，开展成本更低。

(3) 基于新仪器补偿方法成功开展液化试验，补偿过程对试样附加影响小；所得结果与成熟的计算修正理论结果进行对比，二者接近，均呈现一致的反 S 型；与现有方法比较，新方法得到的残余孔压发展更加接近理论修正结果，表明新方法是一种更接近试样 100% 补偿的试验方法。

## 参 考 文 献：

- [1] 袁晓铭, 秦志光, 刘荟达, 等. 砾性土液化的触发条件[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(5): 777 - 785. (YUAN Xiao-ming, QIN Zhi-guang, LIU Hui-da, et al. Necessary conditions of trigger liquefaction for gravelly soils layers[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(5): 777 - 785. (in Chinese))
- [2] 陈龙伟, 袁晓铭, 孙 锐. 2011 年新西兰  $M_w$ 6.3 地震液化及岩土震害评述[J]. 世界地震工程, 2013, 29(3): 1 - 9. (CHEN Long-wei, YUAN Xiao-ming, SUN Rui. Review of liquefaction phenomena and geotechnical damage in the 2011 New Zealand  $M_w$ 6.3 earthquake[J]. World Earthquake Engineering, 2013, 29(3): 1 - 9. (in Chinese))
- [3] CUBRINOVSKI M, BRAY J, DE La Torre C, et al. Liquefaction effects and associated damages observed at the Wellington Centreport from the 2016 Kaikoura earthquake[J]. Bulletin of the New Zealand Society for

- Earthquake Engineering, 2017, **50**(2): 152 – 173.
- [4] EVANS D M, SEED H B. Undrained Cyclic Triaxial Testing of Gravels-the Effect of Membrane Compliance[R]. Report No. UCB/EERC-87/08. 1987.
- [5] NOOR M J M, NYUIN J D, DERAHMAN A. A graphical method for membrane penetration in triaxial tests on granular soils[J]. J Inst Eng, Malaysia, 2012, **73**(1): 23 – 30.
- [6] 王洪瑾. 橡皮膜顺变性对三轴试验中体变和孔隙水压力影响的试验研究[C]// 中国土木工程学会第四届土力学及基础工程学术会议论文选集, 1983, 北京. (WANG Hong-jin. Experimental study on the influence of membrane compliance on bulk deformation and pore water pressure in triaxial test[C]// Selected papers of the 4th soil mechanics and foundation engineering academic conference of China Civil Engineering Society, 1983, Beijing. (in Chinese))
- [7] SIVATHAYALAN S, VAID Y P. Truly undrained response of granular soils with no membrane-penetratio[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, **35**(5): 730 – 739.
- [8] 周景星, 周克骥, 王洪瑾. 动三轴试验中橡皮膜顺变性的影响及其校正方法[J]. 水利学报, 1986(5): 11 – 18. (ZHOU Jing-xing, ZHOU Ke-ji, WANG Hong-jin. The membrane effect and its alignment methods in dynamic triaxial test[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1986(5): 11 – 18. (in Chinese))
- [9] 王昆耀, 常亚屏, 陈 宁. 粗粒土试样橡皮膜嵌入影响的初步研究[J]. 水电与抽水蓄能, 2000, **24**(4):45 – 46. (WANG Kun-yao, CHANG Ya-ping, CHEN Ning. A preliminary study on membrane penetration effects in coarse-grained soil specimens[J]. Dam Observation and Geotechnical Tests, 2000, **24**(4): 45 – 46. (in Chinese))
- [10] BANEJEE N G, SEED H B, CHAN C K. Cyclic Behavior of Dense Coarse Grained Materials in Relation to the Seismic Stability of Dams[R]. California: Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1979: 79 – 13.
- [11] TOKIMATSU K, NAKAMURA K. A liquefaction test without membrane penetration effects[J]. Journal of the Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1986, **26**(4): 127 – 138.
- [12] 陈春霖, 张惠明. 饱和砂土三轴试验中的若干问题[J]. 岩土工程学报, 2000, **22**(6): 659 – 663. (CHEN Chun-lin, ZHANG Hui-ming. Some problems in triaxial test on saturated sands[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, **22**(6): 659 – 663. (in Chinese))
- [13] YAMASHITA S, TOKI S, SUZUKI T. Effects of membrane penetration on modulus and poisson's ratio for undrained cyclic triaxial conditions[J]. Soils and Foundations, 1996, **36**(4): 127 – 133.
- [14] HAERI, S M, SHAKERI, M R, SHAHCHERAGHI S A. Dynamic strength of gravelly sand with emphasis on the effect of membrane compliance[C]// 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, 2008.
- [15] MIURA S, KAWAMURA S. A procedure minimizing membrane penetration effects in undrained triaxial test[J]. Soils and Foundations, 1996, **36**(4): 119 – 126.
- [16] SEED R B, ANWAR H. Development of a Laboratory Technique for Correcting Results of Undrained Triaxial Shear Tests on Soils Containing Coarse Particles for Effects of Membrane Compliance[R]. California: Reprint of Stanford University Research, Leland Stanford Junior University, 1987.
- [17] RAMANA K V, RAJU V S. Constant-volume triaxial tests to study the effects of membrane penetration[J]. Geotechnical Testing Journal, 1981, **4**(3): 117 – 122.
- [18] KRAMER S L, SIVANESWARAN N. A Nondestructive Specimen-Specific Method for Measurement of Membrane Penetration in the Triaxial Test[J]. Geotechnical Testing Journal, 1989, **12**(1): 50 – 59.
- [19] 谢定义. 土动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011. (XIE Ding-yi. Soil Dynamics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2011. (in Chinese))
- [20] MARTIN G R, SEED H B, FINN W D. Effects of system compliance on liquefaction tests[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1978, **104**(4): 463 – 479.
- [21] 陈育民, 徐鼎平. FLAC/FLAC<sup>3D</sup> 基础与工程实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009. (CHEN Yu-min, XU Ding-ping. FLAC/FLAC<sup>3D</sup> Fundamentals and Engineering Applications[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2009. (in Chinese))
- [22] HAERI S M, SHAKERI M R. Effects of membrane compliance on pore water pressure generation in gravelly sands under cyclic loading[J]. Geotechnical Testing Journal, 2010, **33**(5):658-661.
- [23] 刘荟达, 袁晓铭, 王 鸾, 等. 宽级配砾性土橡皮膜嵌入量计算新方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2020. DOI:

- [10] 10.13722/j.cnki.jrme.2019.1216. (LIU Hui-da, YUAN Xiao-ming, WANG Luan, et al. Research and new calculation formula of membrane penetration in wide graded gravel soils sample[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2019.1216. (in Chinese))
- [24] TANAKA Y, KOKUSHO T, YOSHIDA Y, et al. Method for evaluating membrane compliance and system compliance in undrained cyclic shear tests[J]. Soils and Foundations, 1991, **31**(3): 30 - 42.
- [25] MARTIN G R, FINN W D I, SEED H B. Fundamentals of Liquefaction under Cyclic Loading[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division ASCE, 1975, **101**(GT6): 551 - 569.
- [26] BYRNE P M. A cyclic shear-volume coupling and pore pressure model for sand[C]// Second International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics. 1991, Saint Louis.
- [27] ISHIHARA K, TATSUOKA F, YASUDO S. Undrained deformation and liquefaction of sand under cyclic stresses[J]. Soils and Foundations, 1975, **15**(1): 29 - 44.
- [28] 王昆耀, 常亚屏, 陈宁. 饱和砂砾料液化特性的试验研究[J]. 水利学报, 2000(2): 37 - 41. (WANG Kun-yao, CHANG Ya-ping, CHEN Ning. Experimental study of liquefaction characteristics of saturated sandy gravel[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000(2): 37 - 41. (in Chinese))
- [29] 王艳丽, 饶锡保, 王占彬, 等. 含砾量对饱和砂砾土液化特性的影响[J]. 地震工程学报, 2015, **37**(2): 390 - 396. (WANG Yan-li, RAO Xi-bao, WANG Zhan-bin, et al. Effect of gravel content on liquefaction characteristics of saturated sandy gravels[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, **37**(2): 390 - 396. (in Chinese))
- [30] EVANS M D, ZHOU S. Liquefaction behavior of sand-gravel composites[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1995, **121**(3): 287 - 298.
- [31] 土工试验规程: SL237—1999[S]. 1999. (Geotechnical Test Rules: SL237—1999[S]. 1999. (in Chinese))
- [32] 丰万玲, 石兆吉. 判别水平土层液化势的孔隙水压力分析方法[J]. 工程抗震, 1988(4): 30 - 33. (FENG Wan-ling, SHI Zhao-ji. Pore pressure analysis method for estimating liquefaction potential of horizontal soil strata[J]. Earthquake Resistant, 1988(4): 32 - 33. (in Chinese))
- [33] 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 pressure of saturated sands under anisotropic consolidation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(9): 1021 - 1025. (in Chinese))