

DOI: 10.11779/CJGE201708001

黄土的结构屈服及湿陷变形的分析

邵生俊^{1, 2}, 王丽琴^{1, 2}, 邵 帅¹, 王 强¹

(1. 西安理工大学岩土工程研究所, 陕西 西安 710048; 2. 陕西省黄土力学与工程重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要: 黄土是一种典型的结构性土, 其湿陷性是浸水后黄土结构破坏的反应。黄土的结构性可用构度指标定量地描述, 它既包含了土的物质组成, 还包含了不同沉积年代黄土的结构特征。加载和浸水均可引起黄土结构性衰减, 加载结构性衰减可由一定含水率黄土的压缩结构屈服应力和压缩变形曲线表征; 浸水结构性衰减可由浸水的压缩结构屈服应力减小和压缩变形曲线的变化表征。针对不同场地、不同沉积年代的 Q₃ 黄土和 Q₂ 黄土, 依据不同含水率黄土的压缩曲线, 分析了不同黄土构度指标与其压缩结构屈服应力之间的关系, 以及黄土压缩变形过程中孔隙比和初始孔隙比比值与压缩应力和压缩结构屈服应力比值对数之间的关系。表明不同沉积年代黄土的构度随其反映基本物性的综合物理特征量单调变化, 压缩结构屈服应力与构度之间近似呈线性关系, 压缩结构屈服前后的孔隙比比值和压缩应力比值对数之间服从近似一致的变化规律。建立了由黄土沉积年代和基本物性指标确定构度, 进而确定压缩结构屈服应力; 依据孔隙比比值与压缩应力比值对数的关系, 分别描述天然含水率黄土和浸水饱和黄土的压缩曲线; 进而, 确定饱和自重作用下黄土的自重湿陷系数, 计算场地自重湿陷变形的评价方法。该方法应用于西安地区黄土地基湿陷评价, 得到了与现场浸水试验实测自重湿陷量比较一致的结果, 论证了考虑黄土结构性的湿陷性评价方法的合理性和准确性, 为建筑黄土地基湿陷变形和大厚度湿陷性黄土地下结构地基湿陷变形评价提供了一种新途径。

关键词: 黄土; 结构性; 湿陷变形; 自重湿陷量; 湿陷性评价

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)08-1357-09

作者简介: 邵生俊(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事黄土力学等方面的教学和科研工作。E-mail: sjshao@xaut.edu.cn。

Structural yield and collapse deformation of loess

SHAO Sheng-jun^{1, 2}, WANG Li-qin^{1, 2}, SHAO Shuai¹, WANG Qiang¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Loess Mechanics and Engineering, Xi'an 710048, China)

Abstract: The loess is a typically structural soil, thus its collapsibility is actually the response of damaged structure under water immersion. The structure of loess, which can reflect the physical composition and the structure-deposited characteristics of different geological ages for loess, can be quantitatively described by the structural index. Both loading and water immersion can result in the attenuation of the structure of loess. However, the representative indexes of the two attenuation actions are different, i.e., the loading-induced attenuation can be represented by the compressive yield stress of structure and the compression curve of loess under certain water content; while the water immersion-induced attenuation can be illustrated by the decrease of the compressive yield stress of structure and the variation of compression curve. Two kinds of compression tests and structural index tests are performed on a series of loess specimens with different water contents, which are sampled from several sites deposited in the Middle and Upper Pleistocenes. According to the test results, the relationship between the structural index and the compressive yield stress of structure is analyzed, as well as the logarithmic relationship between the ratio of the pore ratio of loess under compressive deformation to initial pore ratio and the ratio of compression stress to the compressive yield stress of structure. The analysis indicates that the structural index of loess has a monotonic relation with the comprehensively physical quantity representing the fundamental physical property. The compressive yield stress of structure is approximatively linear with the structural index. The variation law of the ratio of pore ratio is approximatively consistent with that of the logarithmic value of the ratio of compressive yield stress. Then, the method for the calculation of structural index is proposed that the structural index can be derived from several fundamental physical parameters, moreover, the compressive yield stress of structure can be determined according to the linear relation with structural index. The compression curves of natural loess and saturated loess can be respectively described

基金项目: 国家自然科学基金项目(41272320, 11572245)

收稿日期: 2016-05-25

in accordance with the logarithmic relationship between the ratio of pore ratio and the ratio of compressive stress, thereby, the coefficient of collapsibility under overburden pressure of saturated loess can be obtained. This method has been used in several loess sites in Xi'an district to calculate the collapse deformation under overburden pressure. The computed results are in good agreement with the measured ones of the filed immersion tests, demonstrating the rationality and accuracy of the collapsibility evaluation method for the structural loess. It can be applied as a new method, by which the collapse deformation evaluation of loess foundation can be calculated for the construction engineering and the underground structure embedded in the loess layer with a larger thickness.

Key words: loess; structure; collapse deformation; collapse under overburden pressure; collapsibility evaluation

0 引言

天然黄土具有大孔隙随机分布和竖向裂隙发育的特殊结构。在浸水作用下,浅层的新黄土反应敏感,表现出显著的湿陷变形特性。针对这一特殊性,规范^[1]中规定了黄土湿陷性的分析方法包括黄土场地试坑浸水试验实测自重湿陷变形及地基湿陷变形的评价方法,以及探井或钻孔采取天然含水率原状黄土室内单轴压缩试验测试自重湿陷系数和湿陷系数的分层总和修正计算自重湿陷变形及地基湿陷变形的评价方法,在实际工程中得到了大量的应用。然而,在应用中也发现了一些问题,湿陷变形的计算值与现场试验实测值的差异较大,部分场地的湿陷类型判别截然相反。比较现行规范中黄土湿陷性室内试验的评价方法和现场浸水试坑试验的评价方法,两者具有以下不同特征。前者是在黄土场地内通过探井或钻孔分层采取原状黄土,在上覆土层饱和自重应力及附加应力与饱和自重应力作用下压缩变形稳定后,通过浸水饱和测试土的湿陷变形,分别可以确定自重湿陷系数和湿陷系数。依据自重湿陷系数和湿陷系数计算相应土层的自重湿陷变形和湿陷变形,总和地面以下非自重湿陷性土层以上或基础底面以下至非湿陷性土层以上各个土层的自重湿陷变形量或湿陷变形量,可以分别评价场地的自重湿陷变形及地基的湿陷变形,进而判别场地的湿陷类型和地基的湿陷等级。后者是在场地上开挖直径大于湿陷性土层厚度的试坑,分别模拟地表浸水入渗和基底压力作用下的基底面浸水入渗,在原位直接测试场地的自重湿陷变形或地基湿陷变形,也可以分别评价场地的自重湿陷变形和场地类型,以及地基的湿陷变形和湿陷等级。前者自重湿陷变形计算值是在后者试坑浸水试验实测值的基础上进行修正而确定的。

由于室内试验相对于现场试验在模拟应力条件、变形条件、浸水入渗、土样饱和度、地层结构的连续性和完整性等方面存在差异,依据室内试验对场地自重湿陷变形、湿陷类型和地基的湿陷变形和湿陷等级的评价往往与现场试验存在较大的差异。即使依据现

场试坑浸水试验结果对室内试验的评价方法经过修正,仍然存在显著的误差,甚至得出截然相反的结论^[2]。室内侧限变形压缩应力条件下黄土湿陷性试验的不足主要表现在以下3个方面:①试样尺度小,采样及制备样的扰动易损伤土的原状结构。对试样结构的扰动程度取决于试样维持结构稳定的能力。在一定埋深范围内采取土样的孔隙分布和土骨架结构代表相应土层土性具有随机性,从而影响了采取、制备扰动试样反映黄土结构性等性状的代表性。②室内湿陷试验包括了单线法和双线法,即在自重应力或附加应力和自重应力共同压缩作用下变形稳定后,浸水饱和试样,测试试样的湿陷变形;或者,分别对天然含水率原状土和原状土饱和后测试不同压缩应力作用下的压缩变形,再确定饱和自重应力或附加应力加自重应力压缩作用下的湿陷变形。不论是单线法还是双线法,黄土结构性不同,土结构抵抗压缩作用的能力不同,土的压缩变形不同,从而影响黄土的湿陷变形。压缩作用还可以使饱和土样中含有的孔隙气排出,从而增大了试样的饱和度,一般均高于现场地层土浸水过程的饱和度。尽管饱和自重应力是按照饱和度为0.85条件下确定的,但湿陷变形趋于稳定时试样的饱和度可能大于0.85。比现场试验浸水过程地基土的饱和度高。同时,试验的分级压缩应力作用范围较小,一般仅反映自重湿陷压缩应力和地基土湿陷压缩应力。原状黄土的强结构单元与弱结构单元的结构特征及其孔隙特征显著地影响测试的湿陷变形。③室内试验限制了试样的侧向变形,同时亦抑制了剪切作用。现场试验时,浅层新黄土湿陷性越强,湿陷变形显著发展导致的地裂缝使得侧向浸水饱和土体的范围越大,产生了明显的侧向变形,进而增大了竖向沉降变形。在中国陇西地区和陇东—陕北—晋西地区,新黄土一般为砂黄土和粉黄土,湿陷性强,现场浸水试验实测场地地层土的湿陷变形一般大于依据探井或钻孔采取土样室内试验结果未经修正计算的湿陷变形。其它地区的一般小于室内试验结果未经修正计算的湿陷变形。

黄土的湿陷性与其随机分布大孔隙、高孔隙比、

高粒含量、低饱和度、竖向裂隙发育等特殊物质结构性状有本质联系。黄土的结构性不仅反映了各相的物质成分、存在状态、相对含量的粒度、密度、湿度，而且反映了各相的相互作用、结构特征、运动变化。土的粒度、密度和湿度是反映土基本物性的重要方面。然而，土的结构性不仅包含土的粒度、密度、湿度特征的影响，还包含了土的组构和土各相相互作用的联结作用，综合反映了土的粒度、密度、湿度和结构特性。因此，从结构性出发揭示黄土的湿陷性具有重要的理论和实际意义。

为此，本文从土的结构性是黄土湿陷性力学反应的综合本质因素出发，在克服黄土湿陷性评价时测试土样骨架结构和孔隙分布的随机性，压缩结构屈服应力的变化，以及室内浸水试样饱和度高于现场地层土饱和度而引起误差的基础上，定量分析结构性对压缩屈服变形特性的影响，将构度指标^[3]引入黄土湿陷性的评价及湿陷变形的计算，从而完善室内压缩试验不能全面考虑黄土结构性对其湿陷变形反应影响的湿陷性评价方法。进而，与现场浸水试坑实测结果比较，验证考虑结构性的黄土室内试验湿陷性评价方法的可靠性。

1 黄土构度与物理指标之间的关系

笔者在关中地区的西安和陇西地区的兰州采取了晚更新世 Q₃ 黄土 (L₁) 和中更新世 Q₂ 黄土 (L₂) 进行了包括扰动灵敏度和浸水灵敏度的构度试验研究。所采用的原状黄土分别为西安曲江 Q₃ 黄土 1 (XAqj-Q₃-1)，西安曲江 Q₃ 黄土 2 (XAqj-Q₃-2)，西安泾河右岸 Q₂ 黄土 (XAjh-Q₂)，西安泾河岸 Q₃ 黄土 (XAjh-Q₃)，西安白鹿塬 Q₃ 黄土 (XAably-Q₃)，西安白鹿塬 Q₂ 黄土 (XAably-Q₂)，兰州大青山 Q₂ 黄土 (LZdqs-Q₂)，西安月登阁 Q₃ 黄土 (XAydg-Q₃)，西安月登阁 Q₂ 黄土 (XAydg-Q₂)，西安航天城 Q₂ 黄土 (XAhtc-Q₂)，兰州市榆中 Q₃ 黄土 (LZyz-Q₃)。晚更新世 Q₃ 黄土 (L₁) 采取试样的埋深范围为 1~17 m，中更新世 Q₂ 黄土 (L₂) 采取试样的埋深范围为 15~20 m。

对以上黄土做物性试验，每个指标均做两组平行试验。若平行试验结果相差不大，则取平均值作为最终指标值；若相差较大，则将其废弃重做，直至符合要求为止。11 种试验用黄土的基本物理性质指标见表 1。兰州黄土属于砂黄土，西安黄土属于黏黄土。

文献[4]分析了构度(m_u)与其表征土物性的综合物理特征量 ($I_L \rho_d / (\rho_w e_0)$ 或 $I_L G / (1+e_0) e_0$) 之间的关系。如图 1 所示。可见，Q₃ 黄土的构度随综合物理特征量

具有较好的单调变化关系，同样，Q₂ 黄土的构度随综合物理特征量同样具有较好的单调变化关系。一方面表明黄土的液塑限、含水率和孔隙比反映的粒度、湿度和密度对其构度有显著的影响；另一方面又表明同一构度黄土的液塑限、含水率和孔隙比不同。构度指标既反映了黄土粒度、密度和湿度相关的液塑限、含水率和孔隙比，还反映了不同沉积年代黄土的结构。它们一起描述黄土的力学性质更具有合理性。

表 1 黄土的基本物性指标

Table 1 Fundamental physical parameters of loess

| 土样 | e_0 | G | ρ_d ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) | w_0 /% | w_L /% | w_p /% | I_p |
|------------------------|-------|------|---|-------------|-------------|-------------|-------|
| XAqj-Q ₃ -1 | 1.00 | 2.70 | 1.35 | 18.00 | 37.0 | 23.0 | 14.0 |
| XAqj-Q ₃ -2 | 0.98 | 2.70 | 1.36 | 17.00 | 36.0 | 22.5 | 13.5 |
| XAjh-Q ₂ | 0.71 | 2.70 | 1.58 | 2.80 | 31.0 | 19.0 | 12.0 |
| XAjh-Q ₃ | 1.03 | 2.70 | 1.33 | 10.80 | 33.5 | 21.5 | 12.0 |
| XAably-Q ₃ | 0.98 | 2.70 | 1.36 | 22.00 | 37.0 | 20.5 | 16.5 |
| XAably-Q ₂ | 0.82 | 2.70 | 1.46 | 19.00 | 38.0 | 21.0 | 17.0 |
| LZdqs-Q ₂ | 0.73 | 2.70 | 1.56 | 10.50 | 28.6 | 18.0 | 10.6 |
| XAydg-Q ₃ | 0.99 | 2.70 | 1.35 | 19.20 | 33.3 | 19.9 | 13.4 |
| XAydg-Q ₂ | 0.89 | 2.70 | 1.43 | 20.20 | 34.5 | 22.4 | 12.1 |
| XAhtc-Q ₂ | 1.00 | 2.70 | 1.40 | 12.50 | 30.8 | 18.8 | 12.0 |
| LZyz-Q ₃ | 1.01 | 2.71 | 1.39 | 10.20 | 25.8 | 17.2 | 8.6 |

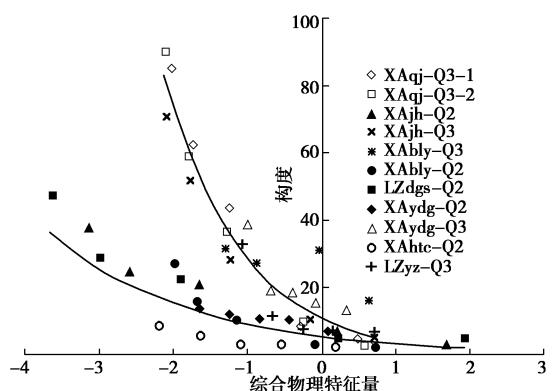


图 1 黄土的构度随综合物理特征量的变化关系

Fig. 1 Relationship between structural index of loess and comprehensive physical quantity

经过分析，其表达式分别为

$$Q_3 \text{ 黄土 } , \quad m_u = 10.7 e^{-0.98 - (I_L \rho_d / (\rho_w e_0))} + 1 \quad , \quad (1)$$

$$Q_2 \text{ 黄土 } , \quad m_u = 6.75 e^{-0.52 - (I_L \rho_d / (\rho_w e_0))} + 1 \quad . \quad (2)$$

从以上分析可知：含水率 w 越大，构度越小；干密度 ρ_d 越大，构度越小；液性指数 I_L 越大，构度越小。根据黄土的基本物性指标即可计算出不同含水率黄土的构度指标。

2 黄土压缩曲线与结构性的分析

2.1 压缩曲线分析

本文针对西安曲江 Q₃ 黄土 1、西安曲江 Q₃ 黄土 2、西安白鹿塬 Q₂ 黄土、兰州大青山 Q₂ 黄土制备了不同含水率 (15%, 18%, 20%, 25%, 28%) 试样, 进行了压缩试验, 西安月登阁 Q₂、Q₃ 黄土、西安航天城 Q₂ 黄土、兰州市榆中 Q₃ 黄土制备了不同含水率 (10%, 13%, 16%, 19%, 23%) 试样, 进行了压缩试验, 得到了各场地黄土的 $e - \lg p$ 曲线见图 2 所示。可以看出: 随着初始含水率的增加, 黄土压缩曲线从平缓段进入陡降段的压缩结构屈服应力 p_{sc} 逐渐减小。仿照卡萨格兰德确定先期固结压力的方法, 可得不同黄土的压缩结构屈服应力 p_{sc} 。区分 Q₂ 黄土和 Q₃ 黄土, 压缩结构屈服应力 p_{sc} 与构度 m_u 之间的关系如图 3 所示。

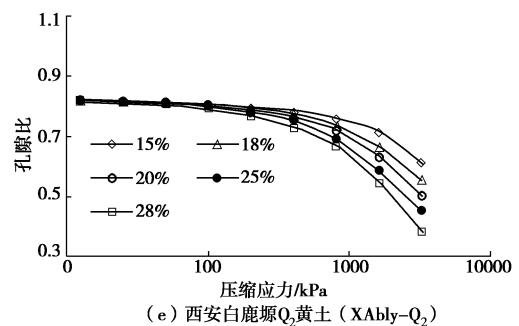
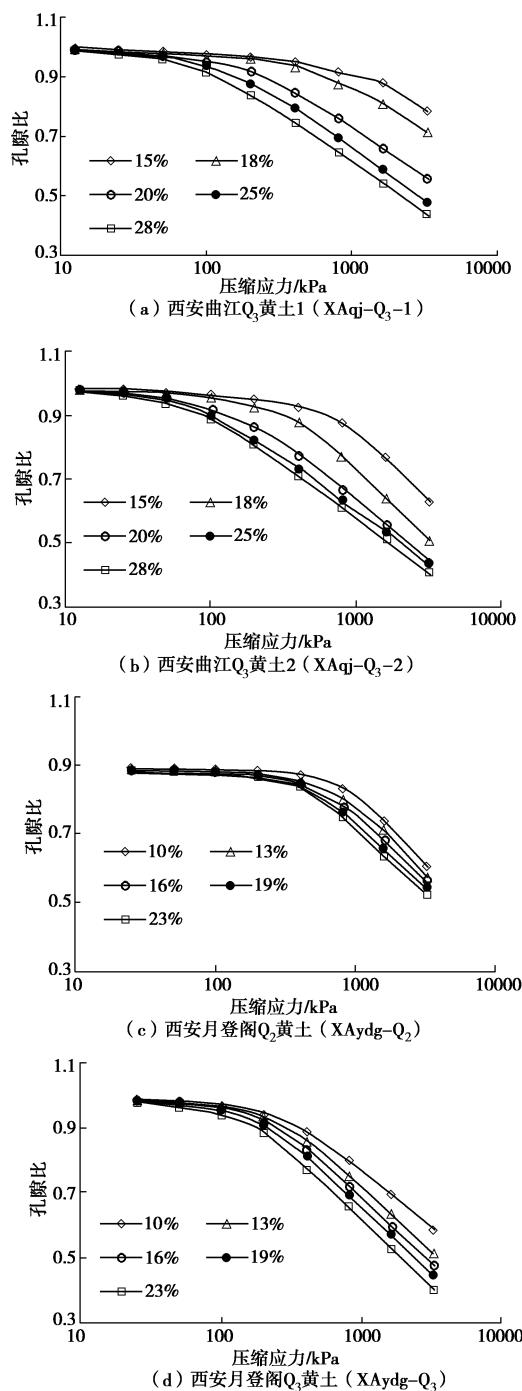
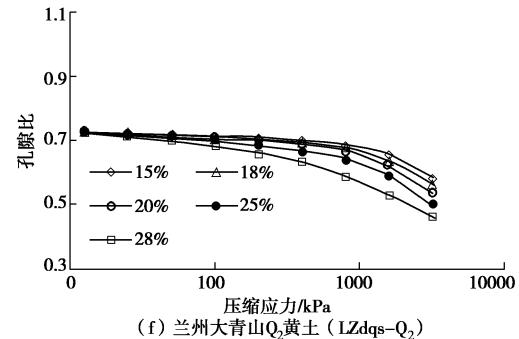
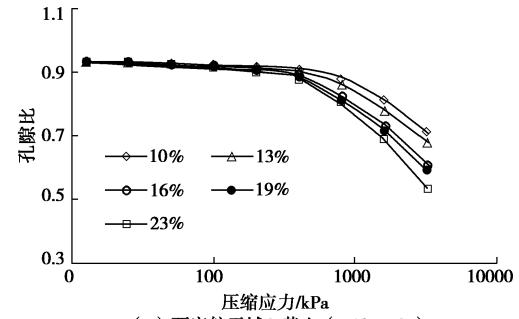
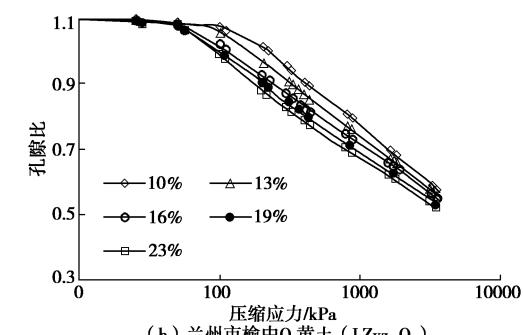
(e) 西安白鹿塬 Q₂ 黄土 (Xably-Q₂)(f) 兰州大青山 Q₂ 黄土 (LZdqs-Q₂)(g) 西安航天城 Q₂ 黄土 (Xahtc-Q₂)(h) 兰州市榆中 Q₃ 黄土 (LZyz-Q₃)

图 2 不同含水率黄土的压缩曲线

Fig. 2 Compression curves of loess under different water contents

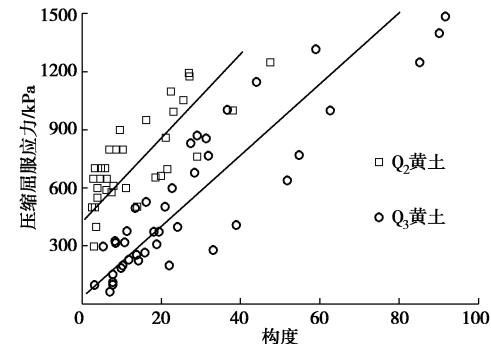


图 3 不同沉积年代黄土压缩屈服应力和构度的关系

Fig. 3 Relationship between compressive yield stress and structural index of loess with different geological times

可见, 黄土构度 m_u 越大, 压缩结构屈服应力 p_{sc} 越大, 其关系近似呈现线性规律。当构度指标相同时, Q_2 黄土的压缩结构屈服应力要明显大于 Q_3 黄土的压缩结构屈服应力, 说明 Q_2 黄土的压缩性要明显小于 Q_3 黄土的压缩性。

区分 Q_2 、 Q_3 黄土, 压缩结构屈服应力 p_{sc} 与构度 m_u 之间关系分别为

$$Q_3 \text{ 黄土 }, p_{sc} = 18.5m_u + 42 , \quad (3)$$

$$Q_2 \text{ 黄土 }, p_{sc} = 21.8m_u + 430 . \quad (4)$$

2.2 黄土 $e - \lg p$ 曲线归一化分析

依据不同黄土初始孔隙比 e_0 和压缩结构屈服应力 p_{sc} , 由 $e - \lg p$ 曲线可得黄土的 $\frac{e}{e_0} - \lg \frac{p}{p_{sc}}$ 曲线, 如图 4 所示。

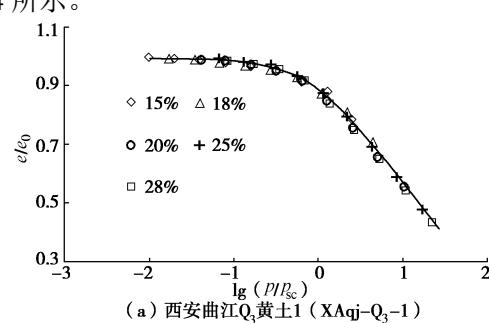
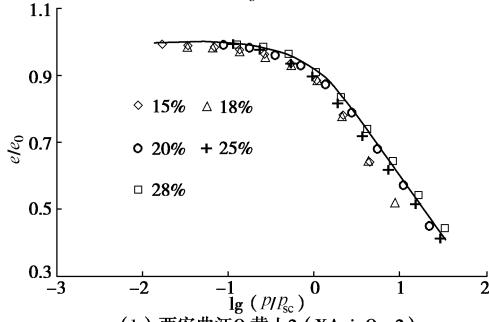
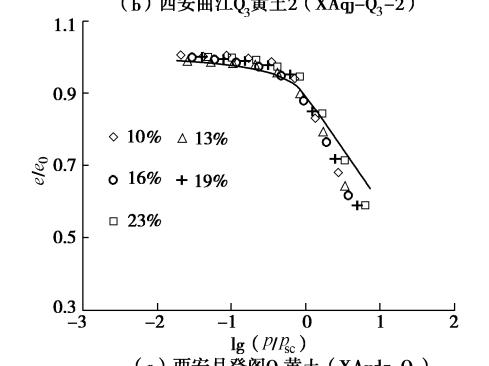
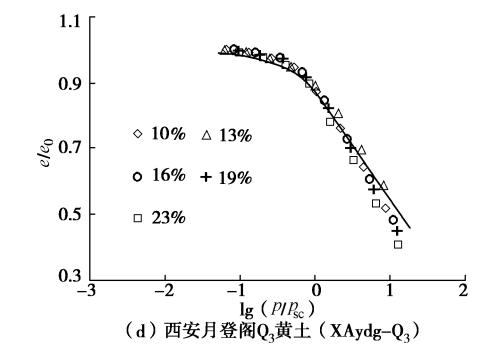
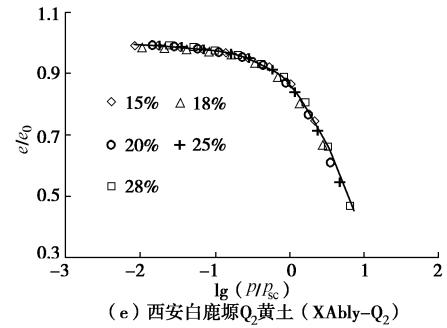
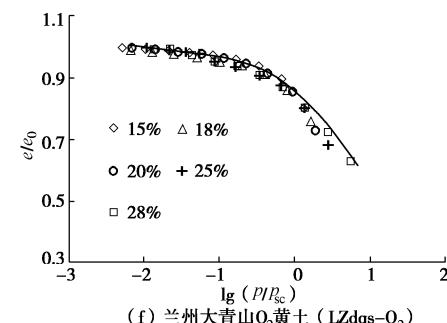
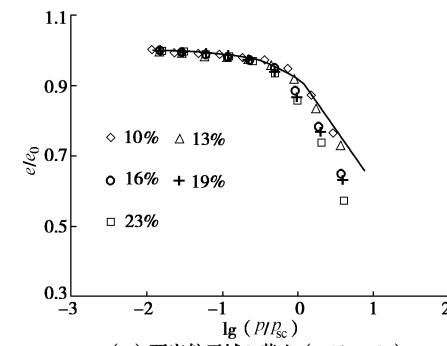
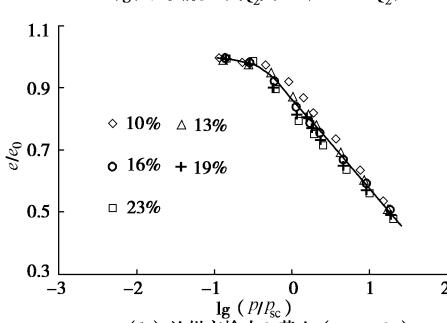
(a) 西安曲江 Q₃ 黄土 1 (Xaqj-Q₃-1)(b) 西安曲江 Q₃ 黄土 2 (Xaqj-Q₃-2)(c) 西安月登阁 Q₂ 黄土 (Xaydg-Q₂)(d) 西安月登阁 Q₃ 黄土 (Xaydg-Q₃)(e) 西安白鹿塬 Q₂ 黄土 (Xably-Q₂)(f) 兰州大青山 Q₂ 黄土 (LZdqs-Q₂)(g) 西安航天城 Q₂ 黄土 (Xahtc-Q₂)(h) 兰州市榆中 Q₃ 黄土 (LZyz-Q₃)

图 4 不同含水率黄土的归一化压缩曲线

Fig. 4 Normalized compression curves of loesses with different water contents

从图 4 可以看出: 不同含水率下的 $\frac{e}{e_0} - \lg \frac{p}{p_{sc}}$ 曲

线趋近于同一曲线。将 Q_3 黄土 (西安曲江 Q_3 黄土 1、西安曲江 Q_3 黄土 2、西安月登阁 Q_3 黄土、兰州市榆中 Q_3 黄土) 与 Q_2 黄土 (西安白鹿塬 Q_2 黄土、兰州大青山 Q_2 、西安月登阁 Q_2 黄土、西安航天城 Q_2 黄土) 的 $(\frac{e}{e_0}, \lg \frac{p}{p_{sc}})$ 试验点分别绘于同一坐标系中, 可得图 5。

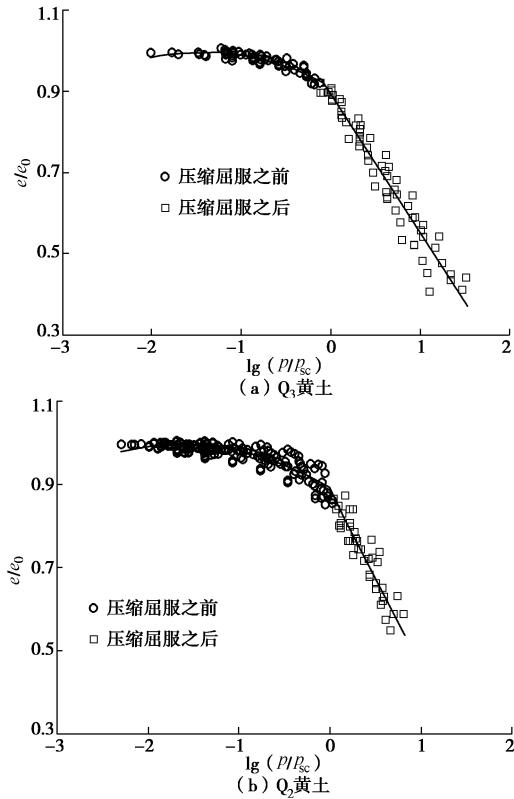


图 5 孔隙比比值与压缩应力比值对数之间的关系曲线

Fig. 5 Relationship between ratio of pore ratio to initial pore ratio and ratio of compression stress to compressive yield stress

从图 5 (a) 可以看出 Q_3 黄土的 $\frac{e}{e_0}$ 与 $\lg \frac{p}{p_{sc}}$ 关系在压缩屈服应力前是一条曲线, 其后呈直线关系; 从图 5 (b) 可以看出 Q_2 黄土的 $\frac{e}{e_0}$ 与 $\lg \frac{p}{p_{sc}}$ 关系在压缩屈服应力前是一条曲线, 其后也可近似为直线。将 Q_3 、 Q_2 黄土压缩屈服应力前后不同阶段 $\frac{e}{e_0} - \lg \frac{p}{p_{sc}}$ 曲线分别进行拟合, 可得如下关系。

Q_3 黄土:

压缩屈服前

$$\frac{e}{e_0} = 0.9 - 0.0037 \left(\lg \frac{p}{p_{sc}} \right)^4 - 0.0391 \left(\lg \frac{p}{p_{sc}} \right)^3 - 0.1279 \left(\lg \frac{p}{p_{sc}} \right)^2 - 0.1772 \lg \frac{p}{p_{sc}}, \quad (5)$$

压缩屈服后

$$\frac{e}{e_0} = 0.9 - 0.328 \lg \frac{p}{p_{sc}}. \quad (6)$$

Q_2 黄土:

压缩屈服前

$$\frac{e}{e_0} = 0.876 - 0.0158 \left(\lg \frac{p}{p_{sc}} \right)^3 - 0.0819 \left(\lg \frac{p}{p_{sc}} \right)^2 - 0.1609 \lg \frac{p}{p_{sc}}, \quad (7)$$

压缩屈服后

$$\frac{e}{e_0} = 0.876 - 0.328 \lg \frac{p}{p_{sc}}. \quad (8)$$

3 黄土湿陷性系数的确定方法

黄土的自重湿陷系数由室内压缩试验附加上覆饱和土柱自重作用变形稳定后, 浸水测试湿陷变形确定。如果确定了相应的孔隙比, 也可由下式计算:

$$\delta_{zs} = \frac{e_z - e'_z}{1 + e_0}, \quad (9)$$

式中, e_z 为保持天然湿度和结构的试样, 加压至该试样上覆土的饱和自重压力时, 下沉稳定后的孔隙比, e'_z 为上述加压稳定后的试样, 在浸水(饱和)作用下, 附加下沉稳定后的孔隙比, e_0 为试样的初始孔隙比。

同理, 黄土的湿陷系数也可表述为下式:

$$\delta_s = \frac{e_p - e'_p}{1 + e_0}, \quad (10)$$

式中, e_p 为保持天然湿度和结构的试样, 加至一定压力时, 下沉稳定后的孔隙比, e'_p 为上述加压稳定后的试样, 在浸水(饱和)作用下, 附加下沉稳定后的孔隙比, e_0 为试样的初始孔隙比。

根据前述分析, 式 (9)、(10) 可经以下步骤得出:

(1) 根据不同地区黄土的沉积年代和基本物理性质指标, 由式 (1)、(2) 计算天然含水率及饱和含水率(饱和度为 0.85) 黄土的构度指标 m_u 。

(2) 根据不同地区、不同沉积年代黄土的构度指标, 由式 (3)、(4) 计算天然含水率及饱和含水率黄土(饱和度为 0.85) 的压缩结构屈服应力 p_{sc} 。

(3) 区分不同沉积年代的黄土, 由孔隙比之比值 (e/e_0) 和压缩应力比值 (p/p_{sc}) 对数关系拟合曲线确定的式 (5)、(6) 或式 (7)、(8), 计算天然含水率及饱和含水率黄土(饱和度为 0.85) 在饱和自重压力下的孔隙比 e_z , e'_z 及在一定压力下的孔隙比 e_p , e'_p 。

(4) 将孔隙比 e_z , e'_z 代入式 (9), 即可计算得到自重湿陷系数 δ_{zs} 。将孔隙比 e_p , e'_p 代入式 (10), 即可计算得到湿陷系数 δ_s 。

上述考虑结构性的黄土湿陷性评价方法与传统室内试验湿陷性评价方法的不同在于以下 4 个方面:

(1) 区分西安和兰州的 Q_2 、 Q_3 黄土, 依据它们的基本物性指标可以确定土的构度指标。不同沉积年代黄土的压缩结构屈服应力与构度指标具有近似线性变化的关系, 依据构度指标可以确定黄土的压缩结构屈服应力。

(2) 黄土的孔隙比与压缩应力对数关系曲线的压缩试验结果分析中, 压缩应力变化范围大。试样中大

孔隙-土粒骨架弱骨架结构单元在较低压缩应力作用下即遭到破坏。随着压缩应力增大, 大孔隙-土粒骨架强结构单元也可能遭到破坏。黄土结构屈服的压缩曲线实质上反映了分级压缩应力增大作用过程中不同特征土骨架结构及其孔隙因破坏而压密。比较天然含水率黄土和饱和黄土的压缩曲线得到的湿陷性分析结果即反映了黄土结构性、结构压缩屈服特性的影响。

(3) 同一场地不同埋深黄土的 $e - \lg p$ 曲线不同, 其压缩结构屈服应力和线性段变化斜率反映了土的基本物性指标变化和结构变化的影响。依据土的构度指标确定压缩结构屈服应力和初始孔隙比反映了土的基本物性和结构, 使得不同场地同一沉积年代黄土的 $(e/e_0) - \lg(p/p_{sc})$ 的压缩试验测试结果近似变化一致。它的拟合曲线消除了同一土层不同试样差异引起的压缩变形变化, 使得一个试样反映相应土层的基本力学性质更具有代表性。

(4) 浸水作用引起土的含水率变化, 导致黄土的结构性衰减。构度指标减小, 土的压缩结构屈服应力也减小, 土的 $e - \lg p$ 曲线降低。由天然含水率原状黄土和饱和含水率黄土(饱和度为0.85)的 $e - \lg p$ 曲线, 在给定的压缩应力条件下可以确定湿陷变形。

4 场地湿陷变形分析

4.1 西安市地铁五号线月登阁^[5]黄土场地的分析

为验证上述方法, 首先利用西安市地铁五号线D5KC-5标段CK43+377现场试坑浸水试验结果, 通过场地内一个探井不同土层的基本物理指标进行了分析。按规范^[1], 文献[5]给出探井CS5-22的自重湿陷量计算值为61.7 cm, 湿陷量计算值为104.8 cm。除此之外, 利用该场地内探井CS5-23的室内试验结果, 得到自重湿陷量计算值为46.1 cm, 湿陷量计算值为107.2 cm; 探井XS5-22的自重湿陷量计算值为50.7 cm, 湿陷量计算值为107.5 cm。现场试坑浸水试验自重湿陷量的平均实测值为19.94 cm^[5], 属于自重湿陷性场地。结合湿陷量的计算值, 可判定地基的湿陷等级为IV级(很严重)。但是, 自重湿陷量计算值约为实测值的2.3~3.1倍, 差距太大, 这显然与实际场地情况不符。同时, 依据探井CS5-22各土层的物理性质指标, 应用本文前述的计算方法, 可得不同土层预测的自重湿陷系数。图6为室内试验及本方法所得的自重湿陷系数随深度的变化曲线。

根据本文方法计算自重湿陷系数和湿陷系数, 不考虑土层自重湿陷变形和湿陷变形计算值的修正, 可计算得到探井CS5-22自重湿陷量计算值为28.6 cm, 湿陷量计算值为60.7 cm; 探井CS5-23的自重湿陷量计算值为26.2 cm, 湿陷量计算值为51.9 cm; 探井XS5-22的自重湿陷量计算值为33.8 cm, 湿陷量计算值为62.6

cm。自重湿陷量平均计算值为29.78 cm, 湿陷量平均计算值为58.2 cm, 据此判定该场地属自重湿陷性场地, 地基湿陷等级为II级(中等)。判定结果与现场浸水试验实测结果近似一致。如果对计算值进行修正, 该场地自重湿陷变形的计算值更加接近实测值。初步论证了考虑黄土结构性影响的湿陷变形评价方法的合理性和可靠性。

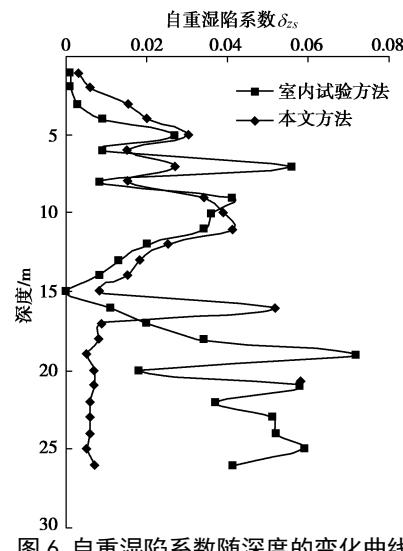


图6 自重湿陷系数随深度的变化曲线

Fig. 6 Curves of self weight collapsible coefficient with depth

4.2 不同黄土场地的分析

在西安市地区, 除月登阁之外, 还收集到了表2所述场地的现场浸水试坑试验结果和探井不同埋深土

表2 不同场地^[6-9]湿陷变形计算结果与实测结果的对比

Table 2 Comparison between computed and measured results for collapse deformation of different sites

| 场地 | 试坑浸水试验 实测值/cm | 室内试验自重湿 陷计算值小值 (规范)/cm | 本文方法 湿陷计算 值小值/cm |
|----------------|------------------|------------------------------|------------------------|
| 财经学院 (鱼鲍头村) | -0.70 | 12.70 | 0 |
| 中海B地 (金浮沱村) | 0.60 | 24.80 | 5.93 |
| 阳村 | -0.90 | 12.20 | 1.50 |
| 高望堆村 | -0.40 | 8.19 | 3.32 |
| 黄渠头1 | 7.41 | 19.30 | 12.60 |
| 黄渠头2 | 10.60 | 16.20 | 20.30 |
| 龙湖花千树 (蕉村) | 0.95 | 9.40 | 3.70 |
| 龙湖源著 (浮沱村) | 14.50 | 31.10 | 70.60 |
| 摆旗寨村 | 0.30 | 2.50 | 0 |
| 布里村 | 38.10 | 15.20 | 29.20 |
| 北池头村 | 0.82 | 15.80 | 3.40 |

注: 1.黄渠头2场地试坑内有试桩, 因此实测值较小; 2.龙湖花千树场地在用本文方法计算时是参照阳村地层的划分计算的; 3.龙湖源著场地应用本文方法计算的结果较大的原因分析是由于收集的场地的物性指标不合理造成的。

基本物理力学性质和湿陷性室内试验成果。进行了试坑浸水试验实测值, 依据室内试验成果, 按照《湿陷性黄土地区建筑规范》(GB50025—2004) 的自重湿陷变形计算值, 以及本文依据基本物性指标和沉积年代确定天然含水率黄土压缩曲线和饱和黄土压缩曲线的自重湿陷变形计算值的比较。表 2 所述 11 个场地不同方法的比较表明, 除龙湖源著(浮沱村)场地之外, 本文关于考虑黄土结构性的湿陷变形评价方法计算的自重湿陷变形介于浸水试坑试验实测值和《规范》^[1]室内试验评价方法计算的自重湿陷变形之间, 且判断的场地类型与浸水试坑试验判断的结果一致。

5 结论与建议

(1) 黄土的湿陷性与其沉积环境和沉积历史形成的特殊结构有本质的联系。黄土特殊结构具有的性状可以用既包含反映其多相物质成分相互作用的物性指标, 还包含反映组构特征及其联结作用的结构影响的构度指标描述。它反映了场地土层压缩作用下结构潜在变化的扰动灵敏度和水分楔入作用结构潜在变化的浸水灵敏度。黄土的湿陷变形实质上是一定压缩应力条件下扰动灵敏度和浸水灵敏度的结构演变反应。

(2) 不同地质沉积时期黄土的结构性不同, 其压缩曲线反映的压缩特性不同, 分别建立了 Q₂ 黄土(L₂) 和 Q₃ 黄土(L₁) 的构度与反映物性的综合物理特征指标之间的关系, 以及压缩结构屈服应力与构度之间的关系。区分不同地质时期的 Q₂ 黄土和 Q₃ 黄土, 通过制备不同含水率的黄土试样改变黄土的构度, 进行了压缩变形规律分析, 表明压缩过程孔隙比与初始孔隙比比值和压缩应力与结构屈服应力比值对数之间具有近似一致的相关关系, 建立了结构屈服前和屈服后压缩变形规律的拟合数学方程。

(3) 通过不同沉积年代黄土的构度随其反映基本物性的综合物理特征量单调变化, 压缩结构屈服应力与构度之间近似呈线性关系, 压缩结构屈服前后的孔隙比比值和压缩应力比值对数之间服从近似一致的变化规律, 建立了由黄土沉积年代和基本物性指标确定构度, 进而确定压缩结构屈服应力; 依据孔隙比比值与压缩应力比值对数的关系, 分别描述天然含水率黄土和浸水饱和黄土的压缩曲线; 进而, 确定饱和自重作用下黄土的自重湿陷系数, 地基附加应力作用下黄土的湿陷系数, 评价场地的自重湿陷变形和类型, 以及地基湿陷变形的方法。

(4) 经与关中地区西安不同黄土地场试坑浸水试验结果比较表明: 由构度确定压缩结构屈服应力, 分别描述天然含水率黄土和浸水饱和黄土压缩变形规

律, 分析场地不同埋深黄土的湿陷性和评价场地自重湿陷变形、地基湿陷变形的方法, 进行的评价比较符合实际。通过场地地层地质年代的划分和不同土层的物理性质指标, 应用压缩屈服前后变形规律的关系, 即可实现场地和地基湿陷变形的评价。

(5) 黄土构度随物性指标综合特征量的关系, 黄土压缩结构屈服应力随构度线性变化关系, 以及压缩结构压缩屈服前后压缩变形规律的相关分析能够克服因不同结构性黄土压缩结构屈服应力与压缩试验作用压缩应力差异不同而导致测试自重湿陷系数和湿陷系数的误差。同时, 可以考虑现场浸水黄土的饱和度与室内试样饱和度的差异。应用这种方法评价的场地和地基湿陷性结果不同于探井或钻孔采样由室内试验计算场地自重湿陷变形和地基湿陷变形, 更加符合实际, 为建筑黄土地基湿陷变形和大厚度湿陷性黄土地下结构地基湿陷变形评价提供了一种实用的途径。

(6) 本文开展的试验研究仅限于陇西地区的砂黄土和关中地区的黏黄土, 还需要对陇东—陕北—晋西地区开展研究, 以便考察本文研究成果的普遍性。

参考文献:

- [1] GB50025—2004 湿陷性黄土地区建筑规范 [S]. 2004. (GB50025—2004 Code for building construction in collapsible loess regions [S]. 2004. (in Chinese))
- [2] 邵生俊, 李骏, 李国良, 等. 大厚度自重湿陷黄土湿陷变形评价方法的研究 [J]. 岩土工程学报, 2015, 37(6): 956–978. (SHAO Sheng-jun, LI Jun, LI Guo-liang, et al. Evaluating method on self weight collapsible deformation of large thickness loess foundation [J]. Chinese Journal Geotechnical Engineering, 2015, 37(6): 956–978. (in Chinese))
- [3] 邵生俊, 周飞飞, 龙吉勇. 原状黄土结构性及其定量化参数研究 [J]. 岩土工程学报, 2004, 26(4): 531–536. (SHAO Sheng-jun, ZHOU Fei-fei, LONG Ji-yong. Structural properties of loess and its quantitative parameter [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(4): 531–536. (in Chinese))
- [4] 邵生俊, 王丽琴, 陶虎, 等. 黄土的构度及其与粒度、密度、湿度之间的关系 [J]. 岩土工程学报, 2014, 36(8): 1387–1393. (SHAO Sheng-jun, WANG Li-qin, TAO Hu, et al. Structural index of loess and its relation with granularity, density and humidity [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(8): 1387–1393. (in Chinese))
- [5] 机械工业勘察设计研究院有限公司. 西安市地铁五号线月登阁试坑浸水试验报告 [R]. 西安: 机械工业勘察设计研

- 究院有限公司, 2014. (China Jikan Institute of Engineering Investigations and Design Co Ltd. Report on soaking test of Yue Deng Ge site in Xi'an Metro Line 5[R]. Xi'an: China Jikan Institute of Engineering Investigations and Design Co Ltd, 2014. (in Chinese))
- [6] 机械工业勘察设计研究院有限公司. 西安财经学院新校区一期工程湿陷性黄土地现场试坑浸水试验报告[R]. 西安: 机械工业勘察设计研究院有限公司, 2004. (China Jikan Institute of Engineering Investigations and Design, Co., Ltd. Report on soaking test of collapsible loess site of the first phase of the new campus of Xi'an Institute of Finance and Economics[R]. Xi'an: China Jikan Institute of Engineering Investigations and Design Co Ltd, 2004. (in Chinese))
- [7] 西安市地下铁道有限责任公司. 西安地铁穿越湿陷性黄土工程性质及应对措施研究成果报告[R]. 西安: 西安市地下铁道有限责任公司, 2013. (Xi'an Metro Co Ltd. The research report on engineering behaviors and measures of tunnel passing collapsible loess strata in Xi'an Metro[R]. Xi'an: Xi'an Metro Co Ltd, 2013. (in Chinese))
- [8] 机械工业勘察设计研究院有限公司. 曲江新区黄渠头村桩基浸水载荷试验[R]. 西安: 机械工业勘察设计研究院有限公司, 2004. (China Jikan Research Institute of Engineering Investigations and Design Co Ltd. Immersed field loading test of pile foundation at the Huangqutou village, New-Qujiang district, Xi'an city[R]. Xi'an: China Jikan Research Institute of Engineering Investigations and Design Co Ltd, 2004. (in Chinese))
- [9] 中煤西安设计工程有限责任公司. 西安北至机场城际轨道交通工程岩土工程勘察现场试坑浸水试验报告[R]. 西安: 中煤西安设计工程有限责任公司, 2015. (China Coal Xi'an Design Engineering Co Ltd. Report on the field immersion test of geotechnical investigation for intercity rail engineering from the Northern of Xi'an to Xianyang airport[R]. Xi'an: China Coal Xi'an Design Engineering Co Ltd, 2015. (in Chinese))

第十届全国土动力学学术会议

(一号通知)

主办单位: 中国振动工程学会土动力学专业委员会; 中国地震学会岩土工程防震减灾委员会。

支持单位: 中国土木工程学会土力学与岩土工程分会; 中国水利学会岩土力学专业委员会; 中国力学学会岩土力学专业委员会; 中国地震学会地震工程委员会; 中国地震学会基础设施防震减灾委员会; 中国建筑学会地基基础分会; 江苏省地震学会。

承办单位: 南京工业大学。

协办单位: 《岩土工程学报》; 《防灾减灾工程学报》; 《地震工程与工程振动》; 《地震工程学报》。

第十届全国土动力学学术会议将于2018年11月2日—4日在南京召开。本次会议是继1980年12月6日—12日在安徽合肥召开的“土的动力特性学术讨论会”后从事土动力学与岩土地震工程的科技人员和工程人员的又一次盛会, 在汶川特大地震10周年之际的2018年召开“第十届全国土动力学学术会议”, 将是一次具有历史意义的学术盛会。

会议主题与内容: 围绕“一带一路”战略、“建设海洋强国”战略和“西部大开发”战略中的重大工程灾害灾前预防与综合防范, 本次会议重点研讨防灾减灾救灾工作实施“两个坚持、三个转变”新理念中遇到的土动力学与岩土地震工程领

域的前沿科学与关键技术。

具体征文专题如下: ①土的动力特性与本构关系; ②土与结构动力相互作用; ③土动力学数值与物理模拟研究; ④土动力学室内试验方法与新技术; ⑤原位动力测试与表征技术; ⑥砂土液化评价与防治; ⑦强地震动与场地非线性效应; ⑧环境振动与测试技术; ⑨近海工程的特殊土动力学问题; ⑩重大工程的土动力学与岩土地震工程问题; ⑪工程场地地震损失评估与灾害保险。

大会秘书处联系人: 庄海洋 13584050564, 吴志坚 13919182444, 陈炜昀 13770620150、赵凯 13951863149, 王盛年 15077865785。通讯地址: 南京工业大学虹桥校区实验楼400-1室(鼓楼区中山北路200号, 210009)。论文提交邮箱: 王盛年 myresort@126.com, 赵凯 zhaokai@njtech.edu.cn。重要时间: 论文全文截止2018年4月30日, 修改稿截止2018年5月30日, 论文录用通知2018年6月30日。

会议论文征集: 会议论文应为未经正式发表的最新成果, 学术委员会将组织专家对提交论文进行审查, 推荐优秀论文在《岩土工程学报》专刊发表, 其余论文将在《防灾减灾工程学报》、《地震工程与工程振动》和《地震工程学报》增刊发表。

(大会组委会 供稿)