

# 公路软基工后沉降研究进展

汤连生<sup>1</sup>, 张庆华<sup>1, 2</sup>, 廖化荣<sup>1, 2</sup>

(1. 中山大学 地球科学系, 广东 广州 510275; 2. 中山大学 应用力学与工程学系, 广东 广州 510275)

**摘要:** 公路建成通车后, 软基土受到的附加应力水平随即发生改变, 除原来填土路堤静荷载作用外, 还受行车动荷载的作用。因此, 软基工后沉降应包含静荷载作用和动荷载作用两方面的贡献, 这也是导致实际软基工后沉降量通常要大于仅根据静力学理论分析预测的软基工后沉降量的原因所在。在综合国内外学者对公路软基工后沉降方面研究成果的基础上, 对比分析路基土在路堤静荷载作用和行车动荷载作用下的不同力学行为特征, 探讨路堤静荷载作用与行车动荷载作用在公路软基工后沉降的不同贡献, 总结当前公路软基工后沉降研究存在的主要问题, 提出公路软基工后沉降的 6 个组成分量及研究发展趋势。

**关键词:** 公路工程; 软基; 工后沉降; 静荷载; 行车动荷载

**中图分类号:** TU 471.8; U 416.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2006)增 2 - 3449 - 07

## ADVANCE IN POST-CONSTRUCTION SETTLEMENT OF SOFT SUBGRADE SOIL

TANG Liansheng<sup>1</sup>, ZHANG Qinghua<sup>1, 2</sup>, LIAO Huarong<sup>1, 2</sup>

(1. Department of Earth Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou, Guangdong 510275, China;

2. Department of Applied Mechanics and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou, Guangdong 510275, China)

**Abstract:** When road is put into use after completion, the additional stresses on the soft subgrade soil will be changed, which are composed of static stress and dynamic stress. Therefore, the post-construction settlement of soft subgrade soil should include two kinds of stresses caused by the embankment gravity and the motor vehicles. The advance in post-construction settlement of the soft subgrade soil will be studied, which includes the different mechanics behaviors and characteristics of subgrade soil under static load exerted by the road embankment and under dynamic load induced by the motor vehicles. Then, the major problems in the research of post-construction settlement of subgrade soil are presented; and the six deformation ingredients which lead to post-construction settlement are proposed. Finally, the trends of development of the post-construction settlement of subgrade soil are put forward.

**Key words:** road engineering; soft subgrade soil; post-construction settlement; static load; dynamic load by vehicle

## 1 引言

公路软基工后沉降不但直接导致路面沉降或不

均匀沉降, 且控制着(尤其是柔性)路面的车辙深度、开裂及疲劳裂纹。我国东南沿海地区, 广泛分布着软土, 公路软基工后沉降引起路面病害问题十分突出。实际监测资料显示, 广珠高速公路一软土地基

**收稿日期:** 2006 - 05 - 18; **修回日期:** 2006 - 06 - 21

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(50279056); 广东省自然科学基金资助项目(031601); 广东省科技计划资助项目(2003C33301, 2004B32801002)

**作者简介:** 汤连生(1963 - ), 男, 博士, 2000 年于中国科学院地质与地球物理研究所地质工程专业获博士学位, 现任教授、博士生导师、中山大学地球科学系岩土工程研究所所长, 主要从事岩土工程、地质工程、岩土化学力学及水 - 岩土相互作用等方面的教学与研究。E-mail: eestls@mail.sysu.edu.cn

(软基段)正式运行 3 a 后发生 1 m 的沉降,远大于预期的工后沉降量。建于 Ariake 黏土上的日本一低路堤高速公路,运行 5 a 后发生 1~2 m 的沉降量<sup>[1]</sup>。许多公路软基工后沉降达到 1 m 以上,甚至接近 1/3 的总沉降,如日本一机场高速公路正式运行后,由行车动荷载引起的工后沉降约占总沉降的 30%<sup>[2]</sup>。之所以会出现这种情况,原因在于目前的软基工后沉降研究,一直着重于探讨原路堤静荷载的影响,而很少考虑公路建成通车后。因其加载条件已经发生变化,故导致对公路软基工后沉降认识不足。研究表明,这些异常的沉降相当部分是由超出静荷载作用及行车动荷载引起的,因此,路基工后沉降应包含原路堤静荷载和行车动荷载共同作用的结果。

本文综合国内外学者近年来在公路软基工后沉降方面的研究成果,分析软基土在静荷载作用下和行车动荷载作用下的力学行为特性,总结了当前公路软基工后沉降研究中存在的主要问题;同时,探讨了路堤静荷载作用与行车动荷载作用在公路软基工后沉降的不同贡献,提出组成公路软基工后沉降的 6 个变形分量及今后研究发展趋势。

## 2 静荷载下软基土工后沉降研究

公路软基工后沉降研究,一直着重于分析原路堤静荷载的影响,或者将公路通车后行车动荷载作用折合成等量静荷载进行分析。这样处理的原因在于,相对于动荷载而言,软基土在静荷载下的力学行为特性要简单得多,且已有比较成熟的理论。目前对于路堤作用下的软基变形,多数都基于一维压缩变形假定,采用分层总和法计算;也有的根据软基前期沉降实测资料,采用曲线拟合法或数值法进行分析。

软基土在基础荷载作用下的沉降是由机制不同的 3 部分沉降组成,分别为瞬时沉降(初始沉降)、固结沉降和次固结沉降。瞬时沉降是指地基在加载时瞬时发生的沉降,在不排水和没有体积变化下所产生的变形;固结沉降是指饱和与接近饱和的黏性土在附加荷载作用下,随着超静孔隙水压力的消散,土骨架产生变形所造成的沉降;次固结变形是指土在超静孔隙水压力全部消散,主固结过程已经结束之后,由于土骨架本身的蠕变特性,在附加荷载作用下发生的沉降,其表达式<sup>[3]</sup>为

$$s = s_d + s_c + s_s \quad (1)$$

式中:  $s$  为总沉降量,  $s_d$  为瞬时沉降,  $s_c$  为固结沉降,  $s_s$  为次固结沉降。

工程界一般认为瞬时沉降和固结沉降在路基填筑预压时已基本完成,因此软基工后沉降主要是指少部分未完成的主固结沉降和次固结沉降,对软基土工后沉降进行预测时,也以次固结变形为主。但是也有一些学者提出不同的看法,汤连生等<sup>[4]</sup>认为,瞬时沉降不导致孔隙水的排出,其导致的变形并不是瞬间完成的,次固结沉降从一受荷载就开始,随着主固结的完成而逐渐消失,因此,在研究软基土工后沉降时,有必要对三大沉降重新定义。刘增贤<sup>[5]</sup>根据坦尾互通实测资料分析认为,软基土工后沉降中主固结沉降仍是主要的,在附加应力达到一定水平后,软土厚度是变形量的主要影响因素。赵维炳等<sup>[6]</sup>结合广珠东线高速公路深厚软基堆载预压和真空联合堆载预压两现场试验段,应用固结、流变和损伤理论对路基工后沉降规律进行有限元分析后认为,下卧层的主固结压缩和整个路基的次固结压缩是高速公路工后沉降的主要组成。王育清和洪宝宁<sup>[7]</sup>认为高速公路软基的工后沉降主要来自路面施工后的瞬时沉降和未完成的主固结沉降和次固结沉降,并建立相应的计算模式,但其理论计算中软土变形模量取值与情况有一定出入,误差较大。

也有一些学者根据软基前期变形监测资料,采用曲线拟合法和数值分析法预测工后沉降量的大小。林川<sup>[8]</sup>采用 BP 神经网络方法,通过观测软基沉降速率分析预测其工后沉降量,结果明显优于双曲线法,但是该方法仅适合预测预压期较短的软基工后沉降。仲爱宝和刘增贤<sup>[9]</sup>研究曲线拟合法与数值方法的差异,认为预测双曲线法略优于有限元法,但是在预测软基较厚,填土较高,变形速率较大情况下,2 种方法偏差均较大。周刚等<sup>[10]</sup>认为,目前公路软基路堤工程中常用的双曲线法等实测沉降经验推算法未考虑荷载变化对软基路堤工后沉降的影响,故不能较好预测超载预压软基路堤的工后沉降。许永明和徐泽中<sup>[11]</sup>通过对沪宁高速工后沉降的长期观测,提出一种推算软基土工后沉降的简易方法,该方法尤其适用于塑料排水板处理的地基,但参数较多且不容易确定。

上述研究均采用静力学的观点对软基工后沉降加以分析,建立其预测和计算模型,但没有考虑公路建成后,行车动荷载在软基土工后沉降中所起的作用,因此具有较大的局限性,这也是导致在软土

分布广泛且厚度较大的地段, 实测路基工后沉降远大于预测结果的原因。一些实际工程及研究资料表明, 行车动荷载对软基土变形的影响要大于静荷载的影响<sup>[12]</sup>。因此, 软基土工后沉降应该包含路堤静荷载作用下的变形与行车动荷载作用下的变形 2 种贡献, 如图 1 所示。

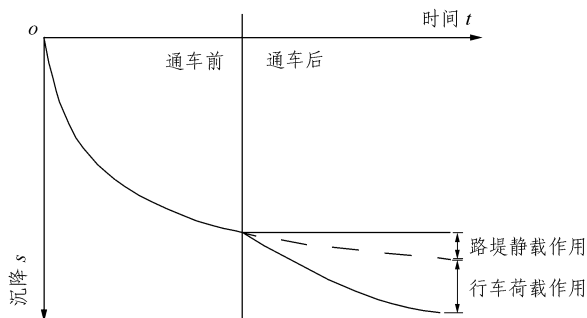


图 1 软基土工后沉降的组成

Fig.1 Components of post-construction settlement of soft subgrade soil

### 3 行车动荷载下软基土工后沉降研究

现在, 越来越多的学者注意到行车动荷载对软基土工后沉降的影响。软基土受行车动荷载作用时, 所产生的变形可分为两部分, 如图 2 所示<sup>[13]</sup>, 一部分为可回复的弹性变形, 不会对软基土工后沉降产生影响, 另一部分为不可恢复的塑性变形, 随着行车动荷载次数的增加, 塑性变形逐渐积累, 是软基土工后沉降的重要原因之一。

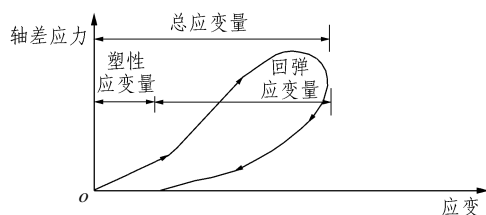


图 2 软基土回弹行为与塑性行为<sup>[13]</sup>

Fig.2 Resilience and plastic behaviours of soft subgrade soil<sup>[13]</sup>

#### 3.1 行车动荷载下软基土力学行为特性

动荷载下软基土力学行为的研究, 最早可追溯到 20 世纪 30 年代。1936 年, 首先由 E. Melan<sup>[14]</sup>针对弹塑性和动态硬化材料推导形成安定理论, 以描述通常的工程材料在动荷载下的力学问题。1956 年, H. B. Seed 等<sup>[15]</sup>研究压缩黏土在循环荷载下的强度和变形特征, 由于试验仪器的限制, 这些分析

仅仅能建立变形与循环荷载水平在定性上的关系。1984 年 Shakedown 理论首次被引入路面结构<sup>[16]</sup>, 用于分析路面结构的力学行为特征, 为路基土力学行为分析开创了一个新领域。

软基土累积永久变形主要受土体含水量、行车动荷载应力水平、围压、车载频率及车载次数等因素影响, 另外还与土的超固结度有关系。因此, 对于不同特性的软基土, 由于行车动荷载作用导致的工后沉降量可能有很大差别。

A. F. L. Hyde 和 S. F. Brown<sup>[17]</sup>用 Keuper Marl 淤泥质黏土, 在蠕变荷载和反复荷载下分别进行循环加荷间隔时间为 1, 10 s 的试验。试验结果表明, 在应变率和时间之间可用一个关系来反应塑性应变的累积, 应变率没有明显的变化。A. S. Muhanna<sup>[18]</sup>曾进行过土三轴循环加载试验, 分析循环加载所产生的塑性变形行为可归纳出以下 4 个结论: (1) 累积永久变形随着加载次数的增加而增加。(2) 较大的应力水平下会有较大的累积永久变形量。(3) 当应力水平相同时, 含水量较高的土将会产生较高的累积永久变形量。(4) 在未产生破坏的应力水平的条件下, 近 50% 的永久变形量在最初的 10 个循环内即已发生。有学者对红层黏性土试验结果进行分析, 分析结果表明, A. S. Muhanna<sup>[8]</sup>的结论中第(1), (2)及(4)条是成立的, 第(3)条则不尽相同, 这是由于试验土的含水量范围为最佳含水量(OMC) $\pm 2.5\%$ , 且试验土含有较多粉粒, 对含水量的影响不如黏性土敏感。

在国内, 周建等<sup>[19]</sup>研究应力水平、加载频率和次数、及超固结比对饱和软土塑性变形特性的影响, 研究结果表明: (1) 在循环荷载作用下, 土体存在临界循环应力水平和门槛循环应力水平。(2) 土体产生的塑性应变随加荷周数的增加而增加。(3) 随着超固结比的不断增长, 土体产生的塑性应变不断减小。蒋军<sup>[20]</sup>的试验研究表明: (1) 在循环荷载作用下, 黏土的应变速率随时间的增大而减小, 应变速率对数与时间对数间的关系可用线性加以描述。(2) 加载频率越大, 应变速率越大; 循环应力比愈大, 应变速率也愈大。应变速率对数与循环应力比间的关系可用线性加以描述(未破坏前)。(3) 黏土的应变速率衰减率与加载频率、循环荷载应力比无关, 但与超固结度有关。钟辉虹等<sup>[21]</sup>通过对饱和和软黏土进行一系列应力控制的循环三轴试验, 研究软黏土在不排水条件下受循环荷载作用时的累积

残余变形规律, 研究结果表明: (1) 在给定的围压和动应力水平下, 随着循环次数的增加, 累积轴向残余应变逐渐增大, 且当动应力水平较低时, 循环达到一定次数后累积轴向残余应变值趋于稳定。(2) 对于给定的循环加载次数, 若动应力水平增大, 则累积残余应变值相应增大, 然而当动应力水平增大至某一量值时, 土样则由塑性体变硬化转变为塑性体变软化并达到破坏状态。(3) 土样循环受剪前的应力历史对其后的受力行为有着显著的影响, 具体来说, 对于相同的动应力水平和循环加荷次数, 若剪前所受固结应力水平较高, 则累积残余应变较小, 反之则较大。

### 3.2 行车动荷载下软基土的固结特性

行车动荷载下软基土塑性变形逐渐积累的同时, 还会引起超静孔隙水压力提高, 致使排水固结变形持续, 也是导致软基土工后沉降量增大的原因所在。

E. E. Alonso 和 R. J. Krizek<sup>[22]</sup>分析随机荷载作用下弹性黏土层的沉降; M. M. Baligh 和 J. N. Levdoux<sup>[23]</sup>基于 Terzaghi 的一维固结理论, 根据叠加原理对土体动固结变形作非线性分析; 吴世明等<sup>[24]</sup>推导以积分形式表达的任意荷载的一维固结方程的通解; 谢康和和潘秋元<sup>[25]</sup>研究双层及任意层地基在简单变化荷载作用下的固结问题; M. A. Rahal 和 A. R. Veuz<sup>[26]</sup>对土体在循环荷载作用下的沉降和孔隙水压进行分析; 梁旭等<sup>[27]</sup>对半透水边界和循环荷载同时存在的软黏土的固结问题进行研究, 利用 Laplace 变换, 得到时域内的通解, 通过数值 Laplace 逆变换, 结合算例进行讨论。

K. Yasuhara 等<sup>[28]</sup>的试验研究则认为, 土体只要于循环荷载产生超静孔隙水压力就会出现再压缩沉降, 再压缩固结指标主要受预固结荷载与循环荷载的大小的影响, 土体的循环荷载下固结沉降取决于循环荷载产生的超静孔隙水压力的累积及土的超固结比, 这种固结量甚至可超过静荷载下的次固结量, 其中超静孔隙水压力的大小取决于循环剪应变的振幅、循环次数和超固结比。

R. P. Elliot 等<sup>[29]</sup>的研究结果表明, 永久变形的累积发展趋势主要取决于应力状态、应力历史和循环加载的间隔时间。在永久变形和循环荷载的施加之间存在线性关系, 当发生快速破坏时, 可观测到动固结, 且动固结是静固结的 60% 左右。

### 3.3 行车动荷载下软基土累积永久变形的预测

动荷载下软基土永久变形的积累, 最终将导致软基土工后沉降的产生, 因此行车动荷载作用是导致软基土工后沉降的重要因素之一。许多学者根据土的动力学特性, 提出动荷载作用下的软基土累积永久变形预测模型。公路软基土工后沉降与行车动荷载轴次关系的预测模型, 最初是由 C. L. Monismith 等<sup>[30]</sup>在总结前人永久变形方面的研究成果基础上提出的, 即

$$e_p = AN^b \quad (2)$$

式中:  $e_p$  为永久变形或塑性变形;  $N$  为循环荷载加载次数;  $A$ ,  $b$  均为材料系数。

该模型明确指出永久变形与循环荷载加载次数的对数之间呈线性关系, 用于预测路基对车辙的影响, 且一直作为大部分后续有关软基土变形特性研究的起点。

J. Poulsen 和 R. N. Stubstad<sup>[31]</sup>对 6 个国家 16 个位置采集的未扰动样进行循环荷载试验研究, 提出与 Monismith 相似的模型方程; R. W. Lentz<sup>[32]</sup>试验研究表明, 应力历史对永久变形有很重要的影响, 并提出基于土静态固结度的永久变形预测模型; K. Yasuhara 等<sup>[28]</sup>提出收敛塑性应变的预测方法及沉降预测模型; 邱延峻和孙振堂<sup>[33]</sup>提出一个软基土永久变形计算模型, 分析软基土永久变形对柔性路面车辙和开裂的影响; V. A. Diyaljee 和 G. P. Raymond<sup>[34]</sup>建立一个预测长期反复荷载作用下永久变形的方案; D. L. Allen 和 R. C. Deen<sup>[35]</sup>提出一个用于预测所有的路面结构层永久变形的车辙模型; D. Li 和 E. T. Selig<sup>[36]</sup>提出一个扩展的预测软基土塑性应变累积的能量模型。

需要指出的是, 动荷载作用下软基土的力学行为研究, 包括其弹性变形和塑性变形特性、固结特性及累积永久变形预测方程, 几乎全部建立在动三轴试验和室内研究的基础上, 原因在于开展野外原型观测试验比较困难, 表现在以下两个方面: (1) 软基土工后沉降包括路堤静荷载作用和行车动荷载作用两方面的贡献, 进行原型观测时很难将 2 种贡献导致的软基土变形分离开。(2) 软基土中动应力分布规律尚不清楚, 因此很难确定行车动荷载对软基的影响深度。

## 4 存在的主要问题

当前对于软基土工后沉降的研究, 总体上重视

路堤静荷载作用对工后沉降的贡献, 轻视行车动荷载作用对工后沉降的贡献; 重视土体静固结变形研究, 轻视土体动固结变形研究; 重视静应力在土中的分布规律研究, 轻视动应力的扩散规律研究。公路软基工后沉降的研究存在以下几个主要问题:

(1) 未能在宏观上准确把握行公路软基土工后沉降的组成特征, 区分路堤静荷载作用与行车动荷载作用的不同贡献, 研究往往局限于其中的某一个侧面。在研究静荷载对工后沉降的贡献时, 以未完成的主固结变形和次固结变形为主, 较少考虑侧向变形(瞬时沉降)的长期性。在研究动荷载作用对工后沉降的贡献时, 以累积永久变形为主, 较少考虑行车动荷载作用下软基土的动固结变形及侧向变形。

(2) 对行车动荷载下软基土中动应力分布规律及累积过程缺乏深入认识和系统研究, 也缺乏系统的试验或监测数据。因而, 在处理行车动荷载对软基土工后沉降的贡献时, 仍是采用将行车动荷载简化为集中分布的静荷载的计算方法<sup>[37]</sup>, 而不是根据应力波的特性加以分析, 同时, 也很难确定行车动荷载在软基土中的影响深度。

(3) 由于野外原型观测试验的困难, 对于行车动荷载作用下软基土永久变形的预测仅限于室内动三轴试验研究的基础上, 考虑到土样扰动及室内试验与野外原型边界条件存在的巨大差异, 不同时期和不同条件得出的试验数据严格来讲可比性差, 推出的模型实用性局限大。到目前为止, 仍然不清楚行车动荷载下软基土工后沉降大于单纯静荷载下的内在原因及其基本特征, 仍未掌握行车动荷载影响范围内饱和软基土排水固结的基本规律及为什么不同于静荷载的作用, 也未掌握其估算基本模式。

## 5 公路软基工后沉降的组成

根据前面的分析, 公路软基工后变形主要受路堤静荷载和行车动荷载的控制, 因此在对其工后沉降进行预测时, 必须同时对 2 种荷载作用下的软基土变形特征有清晰和全面的认识。考虑到软土路基侧向变形的长期性, 在原路堤静荷载作用下, 软基土工后变形除包含少部分未完成的主固结变形及次固结变形外, 还应该包括缓慢发生的侧向变形。同时, 由于增加行车动荷载, 公路软基在动荷载作用

下产生塑性变形(土骨架本身的形变、晶格之间距离减小, 不导致孔隙水排出)积累的同时, 行车动荷载作用还会引起土体超静孔隙水压力提高, 致使排水固结变形持续, 且还应当伴随侧向变形。因此, 公路建成通车后, 软基工后沉降应该包括 6 个组成分量, 公路软基工后沉降的组成如表 1 所示。

表 1 公路软基工后沉降的组成

Table 1 Components of post-construction settlement of soft subgrade soil

| 路堤静荷载作用      |       |      | 行车动荷载作用 |       |       |
|--------------|-------|------|---------|-------|-------|
| 少部分未完成的主固结变形 | 次固结变形 | 侧向变形 | 累积永久变形  | 动固结变形 | 动侧向变形 |

## 6 展望与结论

综上所述, 国内外有关专家学者在公路软基工后沉降方面进行大量研究工作, 取得许多重要的成果, 特别是静荷载作用下公路软基的固结与次固结变形的研究已比较成熟, 但动荷载下公路软基力学行为研究目前仍以动三轴试验和室内研究为主, 在国内还处于起步阶段, 尚未有成熟的公路软基工后沉降的计算模式。因此, 今后的研究可从以下几个方面进行:

(1) 全面分析高速公路工后沉降的基本组成及特性, 包括路堤静荷载作用下的主固结变形、次固结变形和侧向挤出变形及行车动荷载作用下的塑性变形、动固结变形和动侧向变形产生的机制及其特征。

(2) 基于地震等动荷载下土中应力传播问题的研究成果。同时, 应研究行车动荷载下公路软基土中动应力释放与累积过程的基本规律, 分析和确定行车动荷载作用对公路软基的影响范围和深度。

(3) 进一步探讨公路软基工后沉降各组成分量及影响或控制因素的量化途径, 确立行车动荷载条件下软基工后沉降与车载应力水平、车载次数、通车频率之间和土壤含水量及面层、基层厚度之间的量化函数关系, 探索能正确反映边界条件和各组成分量实际情况的公路软基工后沉降的计算模式, 为公路软基工后沉降计算的理论和实用方法奠定基础。

(4) 分析总结公路软基土工后沉降各组成分量的影响因素及基本规律, 研究工后排水系统边界等因素对工后沉降各组成分量的影响或控制规律及不

同含水状态、应力历史等条件下软基土工后沉降各组成分量的变形特性, 寻找其主要影响因素或控制因素, 并探索预控公路软基土工后沉降的措施。

### 参考文献(References):

- [1] Sakai A, Samang L, Miura N. Partially-drained cyclic behavior and application to the settlement of a low embankment road on silty-clay[J]. *Soils and Foundations*, 2003, 43(1): 33 - 46.
- [2] Yasuhara K, Hirao K, Hyodo M. Partial-drained behavior of clay under cyclic loading[A]. In: *Proceedings of the 6th International Conference on Numerical Methods in Geomechanics*[C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1988. 659 - 664.
- [3] 陈仲颐, 周景星, 王洪瑾. 土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994.(Chen Zhongyi, Zhou Jingxing, Wang Hongjin. *Soil Mechanics*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1994.(in Chinese))
- [4] 汤连生, 刘增贤, 王洋. 软土路基工后沉降组成分析研究[J]. *城市勘测*, 2002, (2): 6 - 8.(Tang Liansheng, Liu Zengxian, Wang Yang. *Research on the components of post-construction settlement for soft soil*[J]. *Urban Geotechnical Investigation and Surveying*, 2002, (2): 6 - 8.(in Chinese))
- [5] 刘增贤. 软基工后沉降的观测与分析[J]. *中外公路*, 2002, 22(2): 33 - 35.(Liu Zengxian. *Observation and analysis of soft subgrade soil post construction settlement*[J]. *Journal of China and Foreign Highway*, 2002, 22(2): 33 - 35.(in Chinese))
- [6] 赵维炳, 艾英钵, 张静. 排水固结加固高速公路深厚软基工后沉降[J]. *水利水运工程学报*, 2003, (1): 28 - 33.(Zhao Weibing, Ai Yingbo, Zhang Jing. *Study on post-construction settlement of thick soft roadbed improved by drainage preloading*[J]. *Hydro-science and Engineering*, 2003, (1): 28 - 33.(in Chinese))
- [7] 王育清, 洪宝宁. 高速公路软基沉降预估方法和误差分析[J]. *交通科技*, 2005, (3): 6 - 9.(Wang Yuqing, Hong Baoning. *Analysis of settlement estimation method and error of soft soil base in expressway*[J]. *Transportation Science and Technology*, 2005, (3): 6 - 9.(in Chinese))
- [8] 林川. 汕汾高速公路软基工后沉降控制方法探讨[J]. *广东公路交通*, 2005, (2): 45 - 48.(Lin Chuan. *Study on controlling post-construction settlement of Shantou - Linfen Expressway*[J]. *Guangdong Highway and Transportation*, 2005, (2): 45 - 48.(in Chinese))
- [9] 仲爱宝, 刘增贤. 公路软土地基沉降计算及预测的探讨[J]. *公路*, 2004, (8): 217 - 219.(Zhong Aibao, Liu Zengxian. *Study on calculating method of soft subgrade soil post-construction settlement*[J]. *Highway*, 2004, (8): 217 - 219.(in Chinese))
- [10] 周刚, 陈谦应, 周一勤, 等. 软基路堤超载预压路段工后沉降预测[J]. *重庆交通学院学报*, 2003, 22(4): 53 - 56.(Zhou Gang, Chen Qianying, Zhou Yiqin, et al. *The post-construction settlement prediction of the surcharge preloading embankment on soft ground*[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University*, 2003, 22(4): 53 - 56.(in Chinese))
- [11] 许永明, 徐泽中. 一种预测路基工后沉降量的方法[J]. *河海大学学报*, 2000, 28(5): 111 - 113.(Xu Yongming, Xu Zezhong. *A new method to predict the settlement of embankment*[J]. *Journal of Hohai University*, 2000, 28(5): 111 - 113.(in Chinese))
- [12] Tohno I, Iwata S, Shamoto Y. Land subsidence caused by repeated loading[A]. In: *Proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*[C]. Blazil: Rio De Janeiro, 1989. 1 819 - 1 822.
- [13] Elliott R P, Thornton S I. Simplification of subgrade resilient modulus testing[A]. In: *Transportation Research Record(1 192)*[C]. Washington, D. C.: [s. n.], 1988. 1 - 7.
- [14] Melan E. Theorie statisch unbestimmter ysysteme ausideal-plastischen baustoff[J]. *Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften in Wien*, 1936, 1: 45 - 195.
- [15] Seed H B, McNeill R L, Guenin J de. A soils deformation in normal compression and repeated loading tests[R]. [s. l.]: HRB Bulletin 141, 1956.
- [16] Sharp R W, Booker J R. Shakedown of pavements under moving surface loads[J]. *Journal of Transportation Engineering, ASCE*, 1984, 110(1): 1 - 14.
- [17] Hyde A F L, Brown S F. The plastic deformation of a silty clay under creep and repeated loading[J]. *Geotechnique*, 1976, 26(1): 173 - 184.
- [18] Muhanna A S. A testing procedure and a model for resilient modulus and accumulated plastic strain of cohesive subgrade soils[Ph. D. Thesis][D]. Raleigh, North Carolina: North Carolina State University, 1994.
- [19] 周建, 龚晓南, 李建强. 循环荷载作用下饱和软黏土特性试验研究[J]. *工业建筑*, 2000, 30(11): 43 - 47, 4.(Zhou Jian, Gong Xiaonan, Li Jianqiang. *Experimental study on saturated soft clay under cyclic loading*[J]. *Industrial Construction*, 2000, 30(11): 43 - 47, 4.(in Chinese))
- [20] 蒋军. 循环荷载作用下黏土应变速率试验研究循环荷载作用下黏土应变速率试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2002, 24(4): 528 - 531.(Jiang Jun. *Study on the strain rate of clay under cyclic loading*[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2002, 24(4): 528 - 531.(in Chinese))
- [21] 钟辉虹, 黄茂松, 吴世明, 等. 循环荷载作用下软黏土变形特性研究[J]. *岩土工程学报*, 2002, 24(5): 629 - 632.(Zhong Huihong,

- Huang Maosong, Wu Shiming, et al. On the deformation of soft clay subjected to cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(5): 629 - 632.(in Chinese)
- [22] Alonso E E, Krizek R J. Randomness of settlement rate under stochastic load[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1974, 100(6): 1 211 - 1 226.
- [23] Baligh M M, Levdox J N. Consolidation theory for cyclic loading[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1978, 104(4): 415 - 431.
- [24] 吴世明, 陈龙珠, 杨 丹. 周期荷载作用下饱和黏土的一维固结[J]. 浙江大学学报, 1988, 22(5): 60 - 70.(Wu Shiming, Chen Longzhu, Yang Dan. One-dimensional consolidation of saturated clay under cyclic loading[J]. Journal of Zhejiang University, 1988, 22(5): 60 - 70.(in Chinese))
- [25] 谢康和, 潘秋元. 变荷载下任意层地基一维固结理论[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(5): 80 - 85.(Xie Kanghe, Pan Qiuyuan. One-dimensional consolidation theory of subgrade under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17(5): 80 - 85.(in Chinese))
- [26] Rahal M A, Veuz A R. Analysis of settlement and pore pressure induced by cyclic loading of a silo[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124(12): 1 208 - 1 210.
- [27] 梁 旭, 蔡袁强, 吴世明, 等. 半透水边界饱和土层在循环荷载作用下的一维固结分析[J]. 水利学报, 2002, (7): 31 - 36.(Liang Xu, Cai Yuanqiang, Wu Shiming, et al. One-dimensional consolidation analysis of saturated soil with semi-pervious boundaries under cycle loads[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, (7): 31 - 36.(in Chinese))
- [28] Yasuhara K, Yamanouchi T, Hirao K. Cyclic strength and deformation of normally consolidation clay[J]. Soils and Foundations, 1982, 22(3): 77 - 91.
- [29] Elliot R P, Dennis N D, Qiu Y J. Permanent deformation of subgrade soils. phase I: a test protocol(MBTC FR - 1069)[R]. Fayetteville, Arkansas: University of Arkansas, 1998.
- [30] Monismith C L, Ogawn N, Freeme C R. Permanent deformation characteristics of subgrade soils due to repeated loading[A]. In: Transportation Research Record(537)[C]. Washington, D. C.: [s. n. ], 1975. 1 - 17.
- [31] Poulsen J, Stubstad R N. A laboratory testing of cohesive subgrades: results and implications relative to structural pavement design and distress model(TRR 671)[R]. Washington, D. C.: [s. n. ], 1980. 84 - 91.
- [32] Lentz R W. Permanent deformation of a cohesionless subgrade material under cyclic loading[Ph. D. Thesis][D]. East Lansing, Michigan, USA: Michigan State University, 1979.
- [33] 邱延峻, 孙振堂. 柔性路面路基土的永久变形[J]. 西南交通大学学报, 2000, 35(2): 116 - 120.(Qiu Yanjun, Sun Zhentang. Permanent deformation of subgrade soils in flexible pavement[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2002, 35(2): 116 - 120.(in Chinese))
- [34] Diyajee V A, Raymond G P. Repetitive load deformation of cohesionless soil[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1982, 123(7): 663 - 670.
- [35] Allen D L, Deen R C. A computerized analysis of rutting behavior of flexible pavement(TRR 1095)[R]. Washington, D. C.: [s. n. ], 1986. 1 - 10.
- [36] Li D, Selig E T. Accumulative plastic deformation for fine-grained subgrade soils[J]. Journal of the Geotechnical Engineering, ASCE, 1996, 122(12): 1 006 - 1 013.
- [37] 黎 冰, 高玉峰, 魏代现, 等. 车辆车载的影响深度及其影响因素研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(增2): 310 - 313.(Li Bing, Gao Yufeng, Wei Daixian, et al. Research on influential depth of vehicle loads and its influencing factors[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(Supp.2): 310 - 313.(in Chinese))