

文章编号: 1000-7598(2009)11-3342-05

# 交通荷载作用下公路软土地基长期沉降的计算

魏星<sup>1</sup>, 黄茂松<sup>2</sup>

(1. 西南交通大学 岩土工程系, 成都 610031; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

**摘要:** 合理预测公路软土地基在交通荷载作用下产生的长期沉降, 对公路的设计有着重要的指导作用。基于以往试验规律的分析, 提出了一个较为合理地描述软土在长期重复荷载作用下残余变形发展过程的经验模型。通过对上海软土的循环三轴试验的模拟, 初步验证了模型的合理性。对于工程边值问题, 首先, 根据拟静力法将交通荷载视为长期重复作用的静分布力; 其次, 采用弹性层状体系理论计算交通荷载在地基中引起的附加动应力; 最后, 将提出的模型用于计算各土层的残余应变, 并沿深度对应变积分得到沉降。以日本 Saga 机场公路为例, 说明了公路软土地基沉降的简化计算方法的有效性。

**关键词:** 公路; 交通荷载; 残余变形; 工后沉降

**中图分类号:** U 416.1

**文献标识码:** A

## A simple method to predict traffic-load-induced permanent settlement of road on soft subsoil

WEI Xing<sup>1</sup>, HUANG Mao-song<sup>2</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Excessive settlement of road on soft subsoil induced by traffic load is the main reason leading to pavement failure. To predict this part of settlement correctly is very important for road design. A simple empirical model for predicting residual strain under repeated load suitable for soft clays is proposed based on test results. The validity of the model is verified by cyclic triaxial test results of Shanghai soft clays. For practical boundary value problems, the traffic-load-induced dynamic stress is calculated by multilayer elastic theory; the residual strain distribution of subsoil induced by traffic load is calculated by the proposed model; and then the settlement can be given by integrating the residual strain along depth. A practical problem, Saga Airport Road, is analyzed to illustrate the proposed prediction method.

**Key words:** road; traffic load; residual strain; post-construction settlement

## 1 引言

在我国软土地区, 公路运营过程中因地基过量沉降而导致的路面开裂、错台现象时有发生<sup>[1-3]</sup>。如京珠高速公路广珠段的某些路段投入运营后 1~2 年内的沉降超过了规范所允许的 15 年的累积沉降量, 极大地影响了公路的正常使用, 增加了维修成本。有效地预测交通荷载作用下软土地基的长期沉降, 对公路设计中采用合理措施控制和减小长期沉降有着重要的指导作用。

交通荷载是一种长期重复作用的荷载, 作用次数往往高达几十万次。虽然已经提出了一些软土的

循环本构模型, 但这些模型在预测长期重复荷载作用导致的塑性累积变形方面都显得不合理, 而且采用循环本构模型预测长期沉降需要追踪每一个荷载作用过程中的应力-应变曲线, 计算量巨大。对于交通荷载作用下的地基变形问题, 重要的不是每次荷载作用下的变形情况, 而是长期的累积沉降量。因此, 一般采用实用的经验公式。经验公式一般根据试验规律拟合残余变形随荷载作用次数的发展曲线, 在平均累积意义上定量预测长期重复荷载作用下残余变形的发展过程, 其中比较有影响的有 Monismith 等<sup>[4]</sup>、Li 和 Selig<sup>[5]</sup>、Chai 和 Miura 等<sup>[6]</sup>提出的经验公式。

收稿日期: 2008-03-17

基金项目: 西南交大校基金 (No. 2006B15); 国家自然科学基金项目 (No. 10272083)。

第一作者简介: 魏星, 女, 1977 年生, 博士, 讲师, 主要从事软土本构理论方面的研究工作。E-mail: weixinghl@163.com

本文将基于现有试验成果，探讨影响残余变形的因素及其规律性，建立一个物理含义明确、参数确定简便、适用于描述软土在长期重复荷载作用下残余变形发展过程的经验模型。在提出模型的基础上，给出交通荷载作用下软土地基沉降的简化评价方法。通过对工程实例的模拟，验证本文模型及基于本文模型的简化评价方法的有效性。

## 2 残余变形计算的经验模型

### 2.1 试验现象及规律

交通荷载导致的沉降源于软土在循环荷载作用下的变形特性。对软土在循环荷载作用下的变形特性已经进行了大量的试验研究。由于软土的渗透系数低，试样中水的排出需要较长时间，这些试验一般都采用不排水试验。影响软土残余变形的因素主要有土的物理性质和荷载条件（静应力条件、动应力的作用和作用次数等）。已有试验成果发现，荷载条件对残余变形影响的规律如下。

#### (1) 荷载作用次数 $N$ 的影响

残余变形随着荷载作用次数的增加而增大<sup>[4]</sup>。在动应力较小的条件下，许多学者基于对试验曲线的拟合提出了残余变形与荷载作用次数的关系式，如 Monismith 等<sup>[4]</sup>的指数关系、Lentz 的对数关系等<sup>[7-8]</sup>，在众多的模式中以指数关系应用最广<sup>[4]</sup>。

#### (2) 动偏应力 $q_d$ 的影响

①在相同围压下，动偏应力越大，残余变形随荷载作用次数的增加速率越快<sup>[9-10]</sup>。②对于一定的围压，存在一门槛应力值，当实际作用在土样上的动偏应力高于该门槛应力值时，土样的残余变形发展速率迅速变大，试样很快破坏；反之，残余变形的发展速率将逐渐减小，残余变形趋于稳定<sup>[9-11]</sup>。

#### (3) 围压 $p_c$ 的影响

Chen 等<sup>[12]</sup>和 Ping 等<sup>[13]</sup>通过研究认为：围压较小时，围压的变化对残余变形影响有限；围压较高时，围压增加虽然会减小残余变形，但此时土样的应力状态很可能超出了实际地基中的应力状态。

#### (4) 静偏应力 $q_s$ 的影响

静偏应力对残余变形影响的试验研究相对较少。Chai 等<sup>[6]</sup>提出应当考虑静偏应力对残余变形的影响，这符合地基土所处的真实应力状态。黄茂松等<sup>[10]</sup>研究了动偏应力和静偏应力组合对残余变形的影响。他们的试验结果表明：较大的动偏应力和静偏应力之和会产生较大的残余变形；当动偏应力和静偏应力之和相同时，较大的动偏应力引起较大残余变形。

杨树荣<sup>[11]</sup>分析了动应力、围压和荷载作用次数同残余变形间的相关性，发现这三者同残余变形相关性显著，均为影响残余变形的因素。根据相关性分析结果，动应力对残余变形的影响最大（相关系数最大），荷载作用次数次之，围压的影响最小。不过杨树荣<sup>[11]</sup>并未研究静偏应力同残余变形间的相关性。相关性的分析很好地说明了不同因素对残余变形影响的程度。

### 2.2 残余变形计算模型的建立

根据交通荷载在地基中产生的动应力较小的特点，本模型只考虑较小动应力的情况下（即动偏应力低于门槛应力值）残余变形的发展过程。采用 Monismith 等<sup>[4]</sup>建议的如下指数方程确定残余变形  $\epsilon_p$  同荷载作用次数的关系：

$$\epsilon_p = \epsilon_{p1} N^b \quad (1)$$

式中： $N$  为循环次数； $b$  为材料参数； $\epsilon_{p1}$  的物理意义为第 1 次荷载作用过程中产生的残余变形，其大小由材料的物理性质、当前应力水平及应力历史决定。如图 1 所示，第 1 次荷载作用过程中产生的残余变形  $\epsilon_{p1}$  可计算如下：

$$\epsilon_{p1} = \left( \frac{1}{E_1} - \frac{1}{E_{R1}} \right) q_d = C_R q_d \quad (2)$$

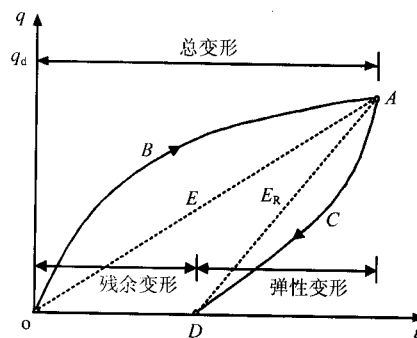


图 1 循环过程中典型应力-应变关系  
Fig.1 Typical stress-strain relationship during one load cycle

式中： $E_1$  为第 1 次压缩过程中的割线模量； $E_{R1}$  为第 1 次卸载过程中的回弹模量； $C_R$  为残余压缩系数； $q_d$  为动偏应力。动偏应力与静偏应力之和为荷载作用过程中的峰值应力，因此，定义应力水平  $R$  如下：

$$R = \frac{q_d + q_s}{q_f} \quad (3)$$

式中： $q_s$  为静偏应力； $q_f$  为静强度。

假设：①应力水平  $R$  越大，残余变形就越大；②相同应力水平下， $q_d$  越大，残余变形越大；③围

压的影响相对较小。认为  $C_R$  的大小主要由荷载水平  $R$  控制, 忽略围压变化对残余变形的直接影响, 建议采用下式计算  $C_R$  :

$$C_R = aR^m \quad (4)$$

式中:  $a$  为一个系数 ( $\text{kPa}^{-1}$ );  $m$  为一常数。

由式 (2) ~ (4) 可得残余变形计算的表达式:

$$\varepsilon_p = a \left( \frac{q_d + q_s}{q_f} \right)^m q_d N^b \quad (5)$$

式 (5) 综合考虑了动偏应力、静偏应力及静强度对残余变形的影响。

### 2.3 参数确定方法

本文模型有 3 个参数  $a$ 、 $b$  和  $m$ 。首先将式 (5) 两边取对数:

$$\lg \varepsilon_p = \lg \left[ a q_d \left( \frac{q_d + q_s}{q_f} \right)^m \right] + b \lg N \quad (6)$$

由式 (6) 可知,  $\lg \varepsilon_p$  和  $\lg N$  呈线性关系, 参数  $b$  为斜率, 含有参数  $a$  和  $m$  的第 1 项为截距。假设某组试验数据取对数后, 截距为  $K_i$ , 则有:

$$K_i = \lg a + m \lg q_d \left( \frac{q_d + q_s}{q_f} \right) \quad (7)$$

由式 (7) 可知,  $K_i$  与  $\lg q_d R_i$  也呈线性关系,  $m$  为该直线的斜率,  $\lg a$  为截距。因此, 要确定本模型的参数至少需要两组不同的  $K_i$  值试验数据。在试验的设计上, 采用控制  $q_d$  不变而改变  $q_s$ , 或者控制  $q_s$  不变而改变  $q_d$  两种方案均可。

### 2.4 上海软土动三轴试验的模拟

黄茂松等<sup>[10]</sup>对上海黏土在循环荷载作用下的应力-应变特性进行了试验研究。试验土样为上海第④标准层的灰色淤泥质黏土, 土样直径为 39.1 mm, 高为 80 mm。采用单向等幅应力控制循环加载方式, 加载频率为 0.5 Hz。具体试验步骤如下: 首先, 将试样抽气饱和, 施加围压, 分别采用 100 kPa 和 200 kPa 两种围压, 并在指定的围压下排水固结 48 h; 然后, 在不排水条件下施加不同的静偏应力; 再进行不同循环应力比的三轴循环试验, 采用的循环次数为 10 000 次。根据文献[10]和文献[14], 当围压  $p_c=100$  kPa 时, 剪切强度  $q_f=87.4$  kPa; 当  $p_c=200$  kPa 时,  $q_f=174.8$  kPa。

对围压为 100 kPa 的两组试验进行拟合, 得到参数分别为  $a=0.08 \text{ MPa}^{-1}$ ,  $b=0.29$ ,  $m=2.8$ 。采用该组参数分别模拟了围压为 100 kPa 和 200 kPa 的 4 组试验数据, 如图 2 和图 3。模拟结果和试验

结果较相符, 说明本文提出的模型可以较为合理地模拟试验的基本规律。

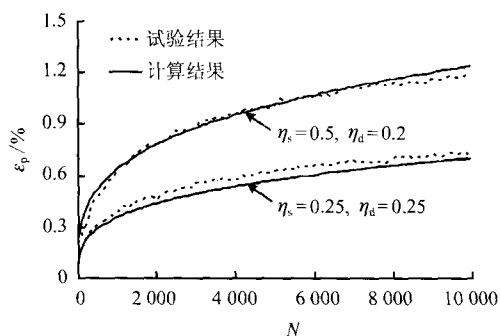


图2 围压为 100 kPa 时的残余变形的模拟  
Fig.2 Simulations of residual strain at  $p_c=100$  kPa

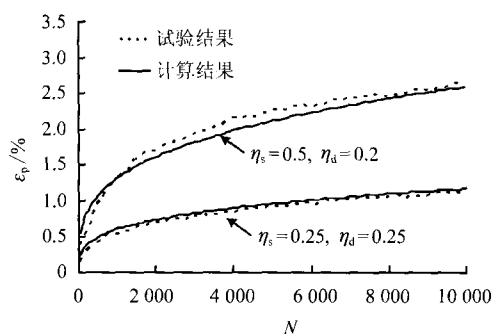


图3 围压为 200kPa 时的残余变形的模拟  
Fig.3 Simulations of residual strain at  $p_c=200$  kPa

## 3 交通荷载下公路软土地基沉降计算

公路地基的工后沉降主要包括路堤静荷载作用下沉降的未完成部分和交通荷载在地基中引起的附加动应力导致的沉降。路堤静荷载作用下的地基的静应力分布及其在地基中引起的沉降的计算, 本文不再赘述。本节只介绍交通荷载在地基中引起的附加动应力和沉降的计算方法。

计算交通荷载导致的附加沉降的基本步骤为<sup>[15]</sup>:

①根据简化后的交通荷载条件, 计算地基中的附加动应力分布; ②由静应力条件、动应力条件(大小、作用次数), 根据提出的经验公式计算各土层中残余变形沿深度的分布; ③将残余变形沿深度积分(分层总和法)得到地表的沉降。

交通荷载的等效简化形式采用拟静力荷载法, 将交通荷载视为多次作用的静分布力。荷载的大小采用后轴轴重, 分布范围为路面与车胎接触面积相同的圆。在该种简化下可采用弹性层状体系理论或有限元数值方法来计算交通荷载引起的动应力在地基中的分布。

交通荷载在地基中引起的附加动应力随深度衰

减很快，到一定深度后附加动应力在土层中引起的残余应变就可以忽略不计了。因此，从实用角度出发，交通荷载作用下地基的沉降计算只需考虑路堤以下一定深度内的土层，该深度范围内的土层称为压缩层。压缩层的厚度取决于附加动应力的大小和分布，而附加动应力的大小和分布又取决于交通荷载的大小，路面、路堤结构类型以及路面、路堤与地基之间的模量差异。Chai等<sup>[6]</sup>、凌建明等<sup>[17]</sup>对于典型的公路结构型式建议了压缩层的厚度。

#### 4 Saga 机场高速公路长期沉降计算

日本的 Saga 机场高速公路所在区域地层中有约 20 m 厚的具有高压缩性和高灵敏度的 Ariake 黏土。该公路建于 1990—1992 年之间，路面宽度为 20 m，路面结构的厚度为 1.1 m，由 4 层材料组成（见表 1）。投入运营后，该公路于 1994 年 8 月进行了全面整修，路面上加铺了 0.1 m 厚的沥青层。监测结果显示，由于交通荷载的作用 Saga 公路的地基发生了明显的沉降<sup>[3]</sup>。本文以 Ap-A 截面为例进行分析。Ap-A 处路段于 1991 年 8 月开始修建，于 1992 年 3 月中旬修建完成，在 1992 年 5 月初通车。通车后 Saga 机场正处于建设期，每天约有 400 辆货

车经过该路段，货车平均重量约为 200 kN。

表 1 Saga 机场路动应力计算的材料参数  
Table 1 Material parameters of Saga airport road for dynamic stress calculation

路面及地基	名称	厚度/m	E/MPa	$\nu$
路面结构	沥青面层	0.1	100	0.20
	砂砾垫层 1	0.3	35	0.20
	砂砾垫层 2	0.4	30	0.20
	压实浅基层	0.4	30	0.25
地基	地基表层	1	5	0.25
	黏土层 Ac1	4	5	0.30
	粉土层 As1		10	0.25

该实例的具体计算过程如下：

(1) 静应力计算

本文不予探讨，Chai 等<sup>[6]</sup>对此进行了计算，计算结果见表 2。

(2) 动偏应力  $q_d$  的计算

该路段较多的车辆为总重量 200 kN 的货车，认为后轴轴重为车辆总重量的 80%，即 160 kN，车轮同路面间接触压力为 0.7 MPa，圆形分布荷载的半径为 0.191 m。计算参数见表 1，采用 BISAR 计算的  $q_d$  见表 2。

表 2 截面 Ap-A 的地基分层、应力及残余变形计算参数

Table 2 Layers, stresses and parameters for residual strain calculation of subsoils at section Ap-A

地基分层	深度/m	厚度/m	应力情况			经验模型参数		
			$q_d$ /kPa	$q_s$ /kPa	$q_r$ /kPa	$a$ /MPa <sup>-1</sup>	$m$	$b$
1	1.45	0.5	9.917	15.287*	25.0*	0.50	2.2	0.29
2	1.95	0.5	5.903	16.821*	25.0*	0.50	2.2	0.29
3	2.70	1.0	3.632	16.793*	30.2*	0.40	2.0	0.22
4	3.70	1.0	2.029	13.310*	32.6*	0.40	2.0	0.22
5	4.70	1.0	1.371	13.946*	34.6*	0.40	2.0	0.22
6	5.70	1.0	0.933	13.622*	36.8*	0.40	2.0	0.22
7	6.80	2.0	0.768	10.137*	40.0*	0.08	2.0	0.13

注：“\*” 指数数据来自参考文献<sup>[6]</sup>。

(3) 沉降的计算

计算采用的地基内压缩层厚度为 7 m，分层及各层的计算参数见表 2。其中压缩层土体参数主要是依据 Sakai 等<sup>[18]</sup>的试验成果，并参考了 Li 等<sup>[5]</sup>的总结进行估算的。本文所提经验模型计算得到总的沉降情况如图 4、5。图 4 给出了路面处沉降的发展情况，图 5 则给出了不同深度范围内沉降随时间的发展情况。

由图 5 可见，地基内的沉降主要集中在浅层。沉降随着深度的增加而迅速降低，并且随着时间的变化浅层地基的沉降发展较为迅速，而深层地基的沉降发展较为缓慢，在地基土厚 5 m 以下变化就十分缓慢了。因此，加大路堤的厚度或对地基浅层土

进行加固处理，对减小交通荷载导致的附加沉降均会起到较好的作用。

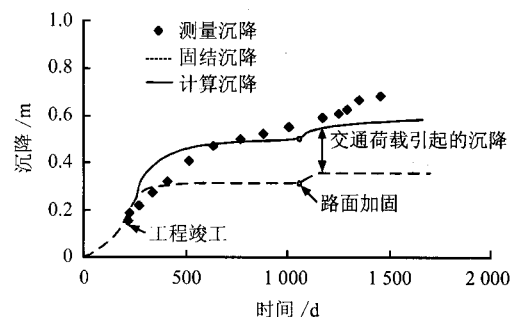


图 4 计算结果与测量结果的对比

Fig. 4 Comparison of prediction results and measurements

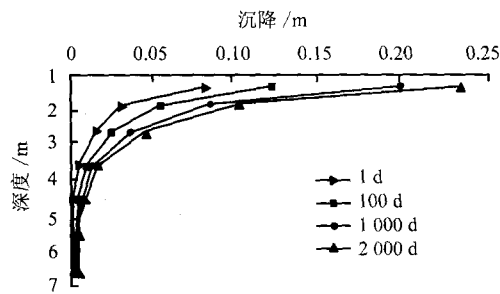


图5 地基土层的沉降分布随运营时间的变化  
Fig.5 settlements distribution vs. operation time

## 5 结论

(1) 通过对软土循环三轴试验结果的分析,总结了影响残余变形发展的主要因素及其规律,提出了一个适用于软土在交通等长期重复荷载作用下残余变形发展过程的经验公式。该公式考虑了不同荷载因素(静应力、动应力、循环次数等)对残余变形发展的影响程度,并认为动偏应力的影响最为显著。通过对上海软土的试验结果的模拟,初步验证了该模型的有效性。

(2) 采用弹性层状体系理论或有限元数值方法计算交通荷载在地基中引起的附加应力,然后采用本文模型计算各土层的残余应变,可计算得到地基在交通荷载作用下的长期沉降。采用该方法,对日本 Saga 机场高速公路的工后沉降进行了模拟,说明了本文模型在应用于实际工程边值问题的合理性。

## 参考文献

- [1] 陈宝, 马传明. 珠江三角洲地区高速公路软基路堤工后沉降分析[J]. 西部探矿工程, 2003, 15(6): 154-156.
- [2] 刘升传, 王连俊, 冯震, 等. 胶新铁路路基实测沉降与预测分析[J]. 铁道勘察, 2006, 32(5): 38-41.  
LIU Sheng-chuan, WANG Lian-jun, FENG Zhen, et al. Research on settlement behavior and deformation prediction of subgrade in Jiao-Xin Railway[J]. *Railway Investigation and Surveying*, 2006, 32(5): 38-41.
- [3] MIURA N, FUJIKAWA K, SAKAI A, et al. Field measurement of settlement in Saga airport highway subjected to traffic load[J]. *Tsuchi-to-Kiso*, 1995, 43-6(449): 49-51.
- [4] MONISMITH C L, OGAWA N, FREEME C R. Permanent deformation characteristics of subsoil due to repeated loading[J]. *Transportation Research Record*, 1975, 537: 1-17.
- [5] LI D, SELIG E T. Cumulative plastic deformation for fine grained subgrade soils[J]. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 1996, 122(12): 1006-1013.
- [6] CHAI J C, MIURA N. Traffic-load-induced permanent deformation of road on soft subsoil[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 2002, 128(11): 907-916.
- [7] LENTZ R W. Permanent deformation of a cohesionless subgrade material under cyclic loading [D]. East Lansing: Michigan State University, 1979.
- [8] BEHZADI G, YANDELL W O. Determination of elastic and plastic subgrade soil parameters for asphalt cracking and rutting prediction[J]. *Transportation Research Record*, 1996, 1540: 97-104.
- [9] 周建, 龚晓南, 李剑强. 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.  
ZHOU Jian, GONG Xiao-nan. Experimental study of saturated soft clay under cyclic loading[J]. *Industrial Construction*, 2000, 30(11): 43-47.
- [10] 黄茂松, 李进军, 李兴照. 饱和软黏土的不排水循环累积变形特性[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(7): 891-895.  
HUANG Mao-song, LI Jin-jun, LI Xing-zhao. Cumulative deformation behaviour of soft clay in cyclic undrained tests[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(7): 891-895.
- [11] 杨树荣. 路基土壤反复载重下之回弹与塑性行为及模式建构[D]. 台北: 国立中央大学土木工程研究所, 2002.
- [12] CHEN D H, ZAMAN M M, LAGURÓ J G. Resilient moduli of aggregate materials variability due to testing procedure and aggregate type[J]. *Transportation Research Record*, 1994, 1462: 57-64.
- [13] PING W V, YANG Z. Experimental verification of resilient deformation for granular subgrades[J]. *Transportation Research Record*, 1998, 1639: 12-22.
- [14] 袁聚云. 软土各向异性性状的试验研究及其在工程中的应用[D]. 上海: 同济大学, 1995.
- [15] 魏星, 黄茂松, 刘明. 公路软土地基工后沉降的计算[C]//岩土力学与工程新进展. 上海: 同济大学出版社, 2007: 87-91.
- [16] 高大钊. 软土地基理论与实践[M]. 北京: 建筑工业出版社, 1992.
- [17] 凌建明, 王伟, 邬洪波. 行车荷载作用下湿软路基残余变形的研究[J]. 同济大学学报, 2002, 30(11): 1315-1320.  
LING Jian-ming, WANG Wei, WU Hong-bo. On residual deformation of saturated clay subgrade under vehicle load[J]. *Journal of Tongji University*, 2002, 30(11): 1315-1320.
- [18] SAKAI A, SAMANG L, MIURA N. Partially-drained cyclic behavior and its application to the settlement of a low embankment road on silty-clay[J]. *Soils and Foundations*, 2003, 43(1): 33-46.