

# 利用反分析方法再评价固结参数

金灿起<sup>1</sup>, 李光范<sup>2</sup>, 金重铁<sup>1</sup>, 李承连<sup>3</sup>, 河性湖<sup>3</sup>, 梁宰赫<sup>3</sup>

(1. 大真大学校 土木工程系, 韩国 京畿 487-711; 2. 海南大学 建筑工程学院, 海南 海口 570228;  
3. 瑞井 Engineering 株式会社, 韩国 首尔 138-800)

**摘要:** 研究的目的是利用预测手段推算出未来沉降, 验证有限单元法反分析方法的适用性。为改善软弱地基常采用的预压法中尽管预测沉降量很重要, 但因地层的不均匀性、试样的扰动、土体参数的输入误差、固结理论等因素, 预测结果与固结沉降及时间多数情况有一定的误差。然而采用固结期间所得到的检测资料进行预测在工程中可谓是一种非常有效方法。采用预测中常用的双曲线方法、Hoshino 和 Asaoka 方法推算出工后沉降。这些最终沉降的预测方法, 即简单明又经济, 在施工现场得到广泛的应用。但是这些方法在设计阶段往往没有加以考虑。为研究地基的固结特性, 利用有限单元法进行反分析, 并分析验证反分析方法的适用性。

**关键词:** 土力学; 沉降量; 检测数据; 有限单元分析; 反分析; 固结参数

**中图分类号:** TU 41

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2007)增 2-4490-06

## REAPPRAISAL OF CONSOLIDATION PARAMETER USING BACK ANALYSIS

KIM Chankee<sup>1</sup>, LI Guangfan<sup>2</sup>, KIM Jungcheol<sup>1</sup>, LEE Seunglun<sup>3</sup>, HA Sungho<sup>3</sup>, YANG Jaehyouk<sup>3</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Daejin University, Gyeonggi 487-711, Korea;

2. Department of Civil Engineering, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China;

3. Seojeong Engineering Co., Ltd., Seoul 138-800, Korea)

**Abstract:** The purpose is to estimate settlement using the measurement data and to verify the application of back analysis by finite element analysis. It is very important to predict settlement in pre-loading method used to improve soft ground. But the settlement measured in the field shows a considerable difference from the predicted settlement due to various factors such as non-homogeneous soft layers, sampling disturbance, erroneous selection of soil parameters and deficiency of consolidation theories among others. Therefore, analysis of actual settlement behavior based on the measurement data during consolidation period is a very useful procedure in evaluating the rates of consolidation settlement. This study estimates settlement using analysis methods such as Hyperbolic, Hoshino and Asaoka method. Because these prediction methods of ultimate primary settlement are analytically simple and economical, they are widely used in the field construction. But these methods can not predict settlement at the phase of design. To search consolidation parameter for site, back analysis technique was performed using finite element analysis. From the results of analysis, the back-analysis technique for consolidation parameter is verified.

**Key words:** soil mechanics; settlement; measurement data; finite element analysis; back analysis; consolidation parameter

**收稿日期:** 2007-09-06; **修回日期:** 2007-11-05

**作者简介:** 金灿起(1960-), 男, 博士, 1985年毕业于韩国圆光大学土木环境工学科土木工程专业, 现任教授, 主要从事岩土力学与工程方面的教学与研究工作。E-mail: ckkim@daejin.ac.kr

# 1 引言

公路路基设计中可靠性低的地基参数, 将增加因改良软弱地基的工程费用和工后的维护费用。因此必须根据试验基础上准确确定能够代表该区域的地基参数。但是确定切合实际现场地基的地基参数并非易事。为解决此类问题近来受到关注的方法就是利用检测数据的反分析方法。K. W. Lee<sup>[1]</sup>利用韩国落东江入海口黏土地基的检测数据和设计时的试验值进行比较, 验证了反分析方法的有效性。

再则为实施反分析需要实际现场的最终沉降。软弱地基的沉降依各种固结理论予以预测, 但由于地层的不均匀性和试样的扰动不仅带来试验误差, 而且沉降赖于时间, 因此沉降的预测值与实测值将显现出一定的差异。为减少此误差, 主要采用利用实测数据推算未来沉降的方法。方法有双曲线法<sup>[2]</sup>、Hoshino 方法<sup>[3]</sup>、Asaoka 方法<sup>[4]</sup>、 $\sqrt{s}$  方法<sup>[5]</sup>、修正双曲线方法<sup>[6]</sup>、似双曲线分析方法<sup>[7]</sup>。但这些预测方法的实施, 在检测之前的施工初期和连续堆载时不可能预测未来沉降。因此需有设计阶段和堆载阶段中能够预测实际沉降方法。为此近来提出利用人工神经网络<sup>[8、9]</sup>和利用 GIS 方法<sup>[10、11]</sup>的预测方法, 但真正用于实用还是为时过早。

因此文中为评价地基参数探讨了可靠性较高的利用有限单元法的反分析方法。为此在先对设计阶段勘测的地层特性和地基参数进行周密的检讨基础上算出理论沉降。而后在检测数据基础上利用预测未来沉降的方法(双曲线方法, Hoshino 方法, Asaoka 方法)预测了最终沉降。最后对固结参数利用有限单元法进行反分析结果和设计值实施了比较探讨。

## 2 地层分布及其工程特性

本文研究的地域位于韩国光阳湾的西北部, 地层为沿河床移动所沉积而形成的第四纪冲积层。地层是由冲积土、风化土、风化岩组成。冲积土的层序为黏质砂土层、黏性土层、砂卵石层。图 1 中的 A, B, C 三点为进行未来沉降量计算和进行反分析的位置。

地质勘察中获得的 A, B, C 三点的土层地表面下标贯试验值为  $N = 2/30$ , 混有黏土的非常松散砂

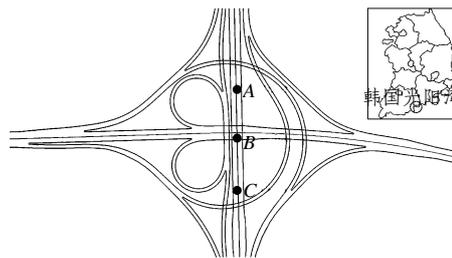


图 1 检测位置平面图

Fig.1 Sketch of measuring points

层, 其厚度为 1.0~2.5 m, 筑土时瞬时沉降量较大, 固结期间难以期待形成排水层。砂层以下为可引起固结沉降的黏土层, 其厚度为 2.7~8.8 m, 由点 A 向 C 逐渐变厚, 标贯试验值为  $N = 2/30$ , 可谓是非常软弱的地基。再下一层是可作为排水层且标贯值为  $N = 48/30 \sim 50/5$  的较密实到很密实的砂卵石层, 其厚度为 2.0~2.6 m。表 1 所示为研究地域黏土层的工程特性, 这些值在韩国南海岸自然沉积黏性土的范围之内。

表 1 研究地域黏土层工程特性

Table 1 Engineering properties of study area of clay layer

初始孔隙比	重度 /( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	统一分类 (USCS)	压缩指数	固结系数 /( $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	不排水黏聚力/kPa
1.772	16.09	CL	0.698	$1.5 \times 10^{-3}$	14.52

## 3 理论沉降量

利用地层工程特性根据理论公式计算总的沉降量。多层地基时总的沉降量是砂土层的瞬时沉降量和黏土层的固结沉降量所决定。上部砂土层的瞬时沉降量和软弱黏土层的固结沉降量分别采用 E. E. de Beer<sup>[12]</sup>和 K. Terzaghi<sup>[13]</sup>提出的公式:

$$S_i = 0.4 \frac{p_0}{N} \lg \frac{p_0 + \Delta p}{p_0} H_s \quad (1)$$

$$S_c = \frac{C_c}{1 + e_0} \lg \frac{p_0 + \Delta p}{p_0} H_c \quad (2)$$

式中:  $S_i$  为 E. E. de Beer 瞬时沉降量(cm),  $N$  为砂层标贯试验值,  $H_s$  为上层厚度(m),  $p_0$  为有效载重 ( $\text{kN}/\text{m}^2$ ),  $\Delta p$  为竖向载重增量( $\text{kN}/\text{m}^2$ ),  $H_c$  为黏土层厚度(m),  $S_c$  为 Terzaghi 一维固结沉降量(cm),  $C_c$  为压缩指数,  $e_0$  为初始孔隙比。

研究地域黏土层厚度比较薄，筑土下部宽超过 30 m，筑土下部宽度大于软弱层厚度。黏土层上部有 1.0~2.5 m 厚砂土层，竖向将发生较大的固结沉降。理论公式计算出的总沉降量如表 2 所示，在点 A 处为 42.0 cm，在点 B 处为 106.8 cm，在点 C 处为 89.3 cm。

表 2 点 A, B, C 处的沉降量预测结果

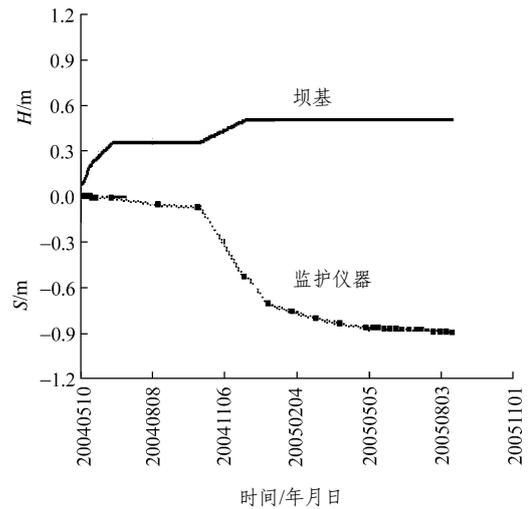
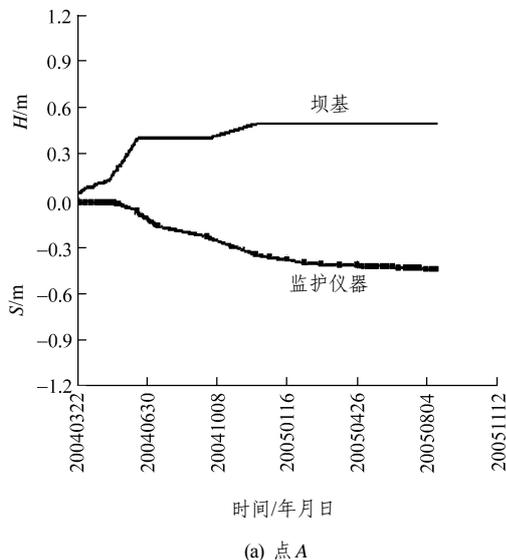
Table 2 Prediction results of settlement of points A, B and C

测点	筑土高/cm	砂土层厚度/cm	软弱层厚度/cm	平均 N 值	竖向载重增量/(100 kPa)	瞬时沉降量/cm	竖向沉降量/cm	总沉降量/cm
A	500	250	270	2	0.95	7.3	34.7	42.0
B	500	100	850	2	0.95	2.1	104.7	106.8
C	350	100	880	2	0.67	1.8	87.5	89.3

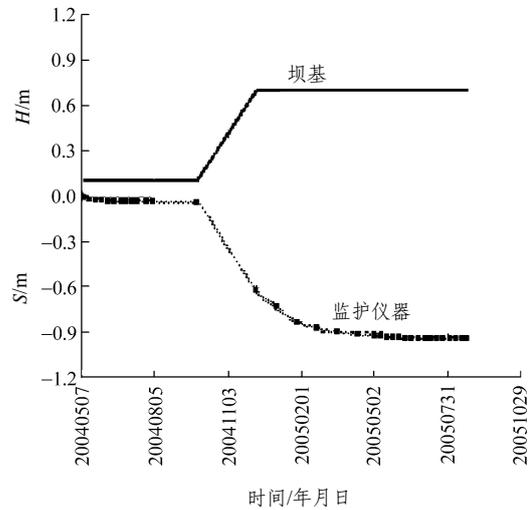
### 4 依据检测资料分析的沉降量

利用已有检测资料得到的检测点 A, B, C 随筑土高度增长的时间 - 沉降量曲线如图 2 所示。图 2 所示筑土分两阶段实施，2004 年 3 月~2004 年 12 月共 10 个月间筑土。2005 年 8 月进行了检测，结果为点 A 的沉降量为 44.5 cm，点 B 的沉降量为 89.9 cm，点 C 的沉降量为 94.4 cm。

实际施工时应采用利用实测数据预测最终沉降的预测方法。双曲线方法是在“沉降速度随时间以双曲线形式变化”的假定下提出的方法。其资料整理比较简单，预测精度较高，且预测可能的时期较快。据已有资料知固结度达 70% 以上时，其误差范围可在 10% 以内。



(b) 点 B



(c) 点 C

图 2 由检测结果绘出的沉降曲线

Fig.2 Settlement curves on measuring data

Hoshino 方法与双曲线方法类似，但资料整理比双曲线方法复杂。沉降预测值初期显现出较小值，随时间的经过预测值接近实测值，固结度超过 75% 后，其预测值误差范围在 10% 以内。

Asaoka 方法是由 Mikasa(1963)导出的固结微分方程为依据提出。至少具有 60% 以上的沉降资料时 Asaoka 方法可获得较为可靠的预测结果。

根据施工时观测到的资料，利用双曲线方法和 Hoshino 及 Asaoka 方法算出的最终沉降量预测值和当时的固结度参见表 3。

理论分析最终沉降量和沉降分析结果与利用 3 种预测方法所得结果进行比较可以看出判断它们的优劣很难。但是利用双曲线法和 Asaoka 方法计算的固结度各为 92.6%~93.4%和 95.9%~99.9%，

表 3 3 种预测方法得出的最终沉降量和当时固结度

Table 3 Final settlements and degree of consolidation by three prediction methods

测点	时间 /d	沉降量 /cm	理论沉降量 /cm	预测沉降量/cm				固结度/%				筑土高度 /m
				双曲线方法	Hosino方法	Asaoka方法		双曲线方法	Hosino方法	Asaoka方法		
						$\Delta t = 25\text{ s}$	$\Delta t = 50\text{ s}$			$\Delta t = 25\text{ s}$	$\Delta t = 50\text{ s}$	
A	259	44.5	42.0	47.8	62.7	46.5	46.4	93.3	71.1	95.9	96.1	5.0
B	260	89.9	106.8	96.9	102.5	92.1	89.9	92.6	87.6	97.5	99.9	5.0
C	260	94.4	89.3	101.1	100.6	94.8	94.9	93.4	93.8	99.5	99.5	3.5

在各观测点上变化范围不大, 而利用 Hoshino 方法计算的固结度为 71.1%~93.8%, 比起利用双曲线法得到的计算结果分散范围较大且偏小。

### 5 反分析

反分析所采用的有限元程序是“Plaxis 7.2”, 此程序可用于平面应变条件和轴对称条件下的固结分析中。分析中对筑土、填埋层、卵石层地基采用了 Mohr-Coulomb 模型, 对固结沉降层地基采用了 Cam-clay 模型<sup>[14]</sup>。假定水平渗透系数  $k_h$  为竖向渗透系数  $k_v$  的两倍, 并在进行反分析中维持砂土层地基参数保持不变, 只变化黏土层的固结参数。应用于黏土层 Cam-clay 模型的参数  $\lambda^*$  和  $\kappa^*$  可用式(3)和(4)计算, 压缩指数  $C_c$  和回弹指数  $C_s$  可利用式  $\lambda = 0.434 2C_c$  和  $\kappa = 0.434 2C_s$  计算:

$$\lambda^* = \frac{\lambda}{1+e} \tag{3}$$

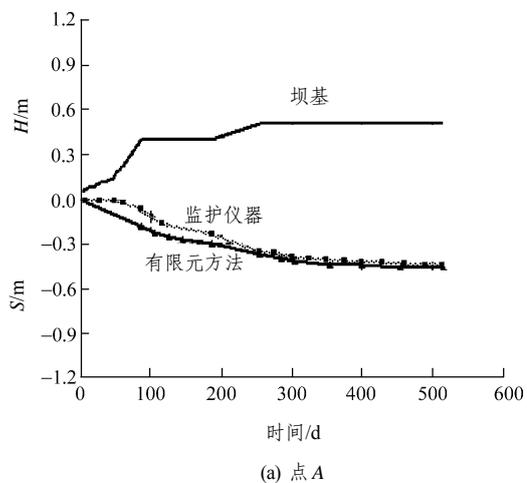
$$\kappa^* = \frac{\kappa}{1+e} \tag{4}$$

经过多次试运算所确定的用于有限元分析的地基参数  $\lambda^*$  和  $\kappa^*$  与表 4 一致时, 利用有限元方法计算的沉降量, 与较好地预测沉降量的双曲线方法其结果相近。图 3 所示为随时间实施各观测点通过

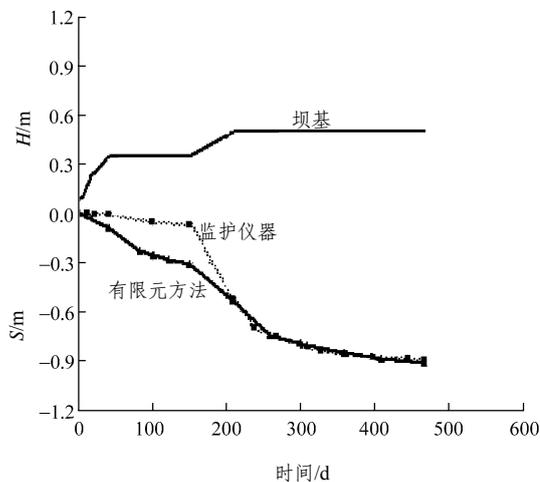
有限元法反分析计算出的沉降量结果和观测沉降量结果。由图 3 可看出筑土初期显示较为明显的差异, 随着时间的增长, 这种差异在逐渐减小, 最终沉降量近于一致。

利用反分析结果算出固结参数与设计值进行了比较探讨。

固结系数是利用图 3 中采用有有限元分析所得沉降量和采用双曲线法所得沉降量, 与最终筑土载重以后一致的时间(现阶段筑土结束时刻期经过 260 d)



(a) 点 A



(b) 点 B

表 4 计算参数与沉降量

Table 4 Calculation parameter and settlements

测点	$\lambda^*$	$\kappa^*$	竖向渗透系数 $k_v/(10^{-4}\text{ m} \cdot \text{d}^{-1})$	双曲线法预测沉降量/cm	有限元预测沉降量/cm
A	0.130	0.016	$1.00 \times 10^{-4}$	47.8	46.5
B	0.116	0.015	$2.00 \times 10^{-4}$	96.9	98.1
C	0.123	0.017	$3.93 \times 10^{-4}$	101.1	101.0

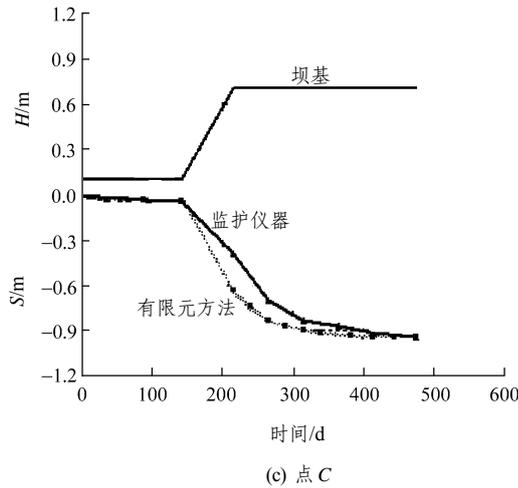


图3 时间 - 沉降量  
Fig.3 Time-settlement

的竖向渗透系数  $k_v$ ，利用下式计算。此时孔隙比  $e$  采用了设计时的室内试验值：

$$\left. \begin{aligned} a_v &= \frac{\Delta e}{\Delta p} \\ m_v &= \frac{a_v}{1 + e} \\ C_v &= \frac{\gamma_w k_v}{m_v} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

表5所示为设计时采用的固结参数和反分析所得固结参数的比较结果。通过反分析所得的压缩指数  $C_c = 0.555 \sim 0.671$ ，比设计时所采用的值 0.698 稍小。反分析算出的回弹指数  $C_s$  为压缩指数的  $1/6 \sim 1/7$ ，位于一般正常固结黏土的回弹指数范围  $C_s = (0.1 \sim 0.2) C_c$ 。  $C_v = (1.04 \sim 1.43) \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$ ，与设计时所采用值差距不大。

表5 设计采用的固结参数和反分析所得固结参数比较  
Table 5 Comparison of consolidations parameters

项目	压缩指数 $C_c$	回弹指数 $C_s$	固结系数 $C_v$ $/(10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
设计时采用地基参数	0.698	-	$1.50 \times 10^{-3}$
反分析结果			
点A	0.555	0.083	$1.04 \times 10^{-3}$
点B	0.588	0.083	$1.43 \times 10^{-3}$
点C	0.671	0.116	$1.08 \times 10^{-3}$

## 6 结 论

本文利用韩国南海岸光阳地区软弱地基的观测资料，采用双曲线方法、Hoshino 和 Asaoka 方法推算出了未来沉降。且利用有限单元法的反分析方法分析比较了固结特征值和设计时采用的试验值。得到了如下结论：

(1) 采用设计阶段的地层条件和地基参数算出理论沉降(点A~C区间)。对于非常松散上部砂土层采用 E. E. de Beer 提出计算公式，算出的瞬时沉降为 1.8~7.3 cm，利用 Terzaghi 一维固结理论算出固结沉降为 34.7~104.7 cm，点A~C区间理论总沉降为 42.0~106.8 cm。尤其是砂土层厚为 2.5 m 的A区间的总沉降 42.0 cm 中瞬时沉降 7.3 cm 时为较大。

(2) 考虑施工历时，采用沉降预测方法预测出的最终沉降值双曲线方法比 Hoshino 方法和 Asaoka 方法其预测精度更高一些。采用双曲线方法算出固结度在所有的检测点上也得到了相近的结果(92.6%~93.4%)。采用 Asaoka 方法预测的沉降随设计间隔  $\Delta t$  的增大最终沉降接近实测值，因此对时间间隔  $\Delta t$  的选定应予以慎重考虑。

(3) 反分析的固结特征值压缩指数为 0.555~0.671，比设计采用值 0.698 显得偏小，回弹指数为 0.083~0.116，是压缩指数的  $1/6 \sim 1/7$ ，表现出了正常固结黏土的特性。固结系数为  $(1.04 \sim 1.43) \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ ，与设计时采用的固结系数  $1.5 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$  相近。

(4) 经反分析得到的固结参数数值大小在室内试验结果范围内。通过研究发现活用检测数据的沉降反分析以及通过有限单元法分析的固结参数的验证，将是评价可靠性比较高的地基参数的有效方法之一。

**致谢** 本文是韩国建设交通部建设核心技术开发事业亲环境智能型道路设计技术开发研究团('05~'10)的亲环境智能型道路设计及评价系统开发(第一细部课题)研究成果的一部分。在此感谢韩国建设交通部建设核心技术开发事业亲环境智能型道路设计技术开发研究团的资助!

**参考文献(References):**

- [1] LEE K W. Reappraisal of compressibility properties of Nakdong river estuarine clays from field measurement[C]// KGS Spring Conference. [S. l.]: [s. n.], 2005: 1 013 - 1 022.
- [2] TAN T S. Hyperbolic method for consolidation analysis[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1991, 117(11): 1 723 - 1 737.
- [3] 星野和. 最新にあける基礎の諸問題[C]// 土質學會第17回年次學術. [S. l.]: 日本土木學會, 1962: 63 - 67.
- [4] ASAOKA A. Observational procedure of settlement prediction[J]. Soils and Foundations, 1978, 18(4): 87 - 101.
- [5] CHUNG S G.  $\sqrt{s}$ -observational procedure for consolidation analysis[J]. Journal of Korean Geotechnical Society, 1998, 14(2): 41 - 52.
- [6] YOO H K. A study on the prediction of long-term settlement by the modified hyperbolic method[J]. Journal of Korean Geotechnical Society, 2000, 16(3): 163 - 172.
- [7] KIM J S. Development of practical analysis method for the consolidation settlements[J]. Journal of Korean Geotechnical Society, 2005, 21(3): 141 - 148.
- [8] KIM Y S. Estimations of settlement in field ground using neural networks[J]. Journal of Korean Geotechnical Society, 2003, 19(5): 27 - 33.
- [9] KIM D S. The settlement prediction of soft ground embankment using artificial neural network[C]// KGS Spring National Conference. [S. l.]: [s. n.], 2007: 386 - 393.
- [10] KIM H T. Prediction of long-term settlement in the big reclamation site using GIS[J]. Journal of Korean Geotechnical Society, 2002, 18(2): 107 - 121.
- [11] KIM H T. A prediction of long-term settlements using the GIS and secant secondary compression index[C]// KSCE Conference and Civil Expo. [S. l.]: [s. n.], 2006: 149 - 153.
- [12] DE BEER E E. Bearing capacity and settlement of shallow foundations on sand[C]// Proc. Symp. on Bearing Capacity and Settlement of Foundations. [S. l.]: Duke University, 1965: 15 - 33.
- [13] TERZAGHI K. Theoretical soil mechanics[M]. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1943.
- [14] ROSCOE K H, BURLAND J B. On the generalized stress-strain behavior of 'wet' clay[C]// Engineering Plasticity. [S. l.]: Cambridge University Press, 1968: 18 - 24.
- [15] Yeosu Port Construction Office. Geotechnical report of the Kwangyang Port West Rear Road[R]. [S. l.]: Yeosu Port Construction Office, 2001.