

地铁车站深基坑降水诱发沉降机制及计算方法

王建秀^{1,2}, 吴林高^{1,2}, 朱雁飞³, 唐益群^{1,2}, 杨坪^{1,2}, 娄荣祥⁴

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092;
3. 上海隧道工程股份有限公司, 上海 200072; 4. 上海广联建设发展有限公司, 上海 200438)

摘要: 上海地铁9号线宜山路车站多点位移计高精度监测结果显示, 上海软土地区承压水减压诱发沉降存在着分层沉降分异(分叉)和各层分层沉降之和与地面沉降量值不等的现象。承压水减压中地面沉降与分层沉降的机制可以用高、低渗透-压缩性地层组合、深源减压-上覆地层逆回弹、深源固结-变形协调、渐进边界机制来解释。通过区分层内压缩和单点沉降, 假定逆回弹和固结同时发生, 但可以分别计算, 固结的渐进性体现在渗流场计算中按照水位等值线进行的层内小层划分, 采用顶板逆回弹系数对分层总和法进行修正。在修正的分层总和法中, 只要合理确定顶板逆回弹系数, 就能够准确地计算单点沉降, 进而计算地面沉降产生的量值。在固结诱发的层顶单点沉降小于变形协调诱发的层底沉降时, 一定的土层条件下可能产生含水层的部分膨胀。

关键词: 隧道工程; 地铁车站深基坑降水; 承压水; 地面沉降; 现场监测; 机制分析; 修正计算方法

中图分类号: U 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2009)05-1010-10

MECHANISM OF DEWATERING-INDUCED GROUND SUBSIDENCE IN DEEP SUBWAY STATION PIT AND CALCULATION METHOD

WANG Jianxiu^{1,2}, WU Lingao^{1,2}, ZHU Yanfei³, TANG Yiqun^{1,2}, YANG Ping^{1,2}, LOU Rongxiang⁴

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd., Shanghai 200072, China; 4. Shanghai Guanglian Construction and Developing Co., Ltd., Shanghai 200438, China)

Abstract: Monitoring data in Yishan Road station deep pit, subway No.9, Shanghai, China with multiple position extensometers indicate that the subsidence caused by dewatering of confined water has different rules: the accumulative multi-layered settlement is not equal to ground subsidence and some strata are not compressed but expansive. The mechanism is explained by combination of high-lower seepage characters, dewatering in deep confined aquifer-inversed rebound of overlaying strata, consolidation from deep-coordination of deformation and gradual boundary. The subsidence caused by dewatering in deep subway station pit is calculated by the accumulation method of each layer according to specification. A modified calculation method is established. Firstly, the single point deformation and compression in each layer are defined according to the law of inversed rebound, supposing that the inversed rebound and consolidation appear simultaneously but can be calculated separately; and the inversed rebound is measured by inversed rebound index. And the gradual consolidation is

收稿日期: 2008-11-05; **修回日期:** 2009-01-21

基金项目: 国家自然科学基金雅砻江水电联合研究基金资助项目(50579097); 上海市人才发展资金资助项目(2007); 白玉兰科技人才基金资助项目(2008); 上海市重点学科(地质工程)B308 资助项目

作者简介: 王建秀(1971-), 男, 博士, 1995年毕业于成都理工学院水文地质工程地质专业, 现任副教授, 主要从事地质工程、地下结构及岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: wang_jianxiu@163.com

considered by layer division. When the inversed rebound value is greater than consolidation one, the strata will expand. The ground subsidence can be precisely predicted by the method when the inversed rebound index and drawdown are measured or calculated reasonably.

Key words: tunnelling engineering; dewatering of deep subway station pit; confined water; ground subsidence; monitoring in field; mechanism analysis; modified calculation method

1 引言

近年来,越来越多的地铁车站深基坑修建于建筑密集区,基坑降水诱发沉降的计算和控制成为亟待解决的问题^[1~15]。由于现有解析方法计算不够完善,计算沉降量明显偏大,在地面沉降、分层沉降监测点布设和分析方法方面也存在着不足之处,出现了分层沉降累积值与地面沉降量不符等问题,无法科学地指导地面沉降的事前预测。王翠英等^[9]尝试采用经验系数的方法修正计算结果,但这类黑箱模型无法充分解释计算沉降偏大的物理过程和机制,特别是在基坑降水工程的分层沉降监测工作中,发现局部地层不是压缩,而是膨胀,这是传统解析计算方法无法解释的。

本文结合上海地铁 9 号线宜山路车站的现场监测工作,基于深源减压-上覆地层逆回弹、深源固结-变形协调、层内水位差-渐进边界对基坑降水诱发沉降过程和机制进行了分析,对现有计算方法进行了修正。

2 工程概况

2.1 地墙结构及周边环境控制要求

上海地铁 9 号线宜山路车站为该线一期工程的

终点站及站前折返站,位于宜山路上,西起中山西路,东至凯旋路。车站长 297.40 m,标准段宽 21.2 m,是地下四层岛式车站(见图 1)。车站原设计主体结构地下墙厚 1.2 m,标准段地下墙深 48 m,端头井地下墙深 51 m。车站基坑开挖标准段最深为 27.855 m,端头井最深为 29.718 m。

宜山路站周边环境复杂(见图 1),沉降控制要求高。车站南侧中部是上海七建装潢总汇,17 层混凝土框架结构,距离车站围护结构边 14 m;车站北侧是并排的家饰佳精品装饰城和金银岛建材商厦,距离基坑外边约 13 m;车站东侧是运营中的地铁 3 号线一期高架及已竣工的地铁 3 号线二期宜山路车站,基坑距 3 号线一期高架承台最近只有 7 m,距地铁 3 号线二期最近处 23 m;车站的西侧,为中山路高架道路,其中心距基坑最近约 25 m。以上建筑对于基坑减压诱发的沉降和不均匀沉降控制要求非常严格。

2.2 场地水文地质条件

根据研究区《工程地质勘察报告》以及收集到的区域资料,地下水类型主要有浅部黏性土层中的潜水、浅部粉性土层中的微承压水和深部粉性土、砂土层中的承压水(见图 2)。潜水位埋深一般为 0.30~1.50 m,年平均地下水位埋深 0.50~0.70 m。微承压水(第④₂层和⑤₂₋₂层)和承压水(第⑦层)埋深一般低于潜水位。第④₂层及⑤₂₋₂层微承压水位

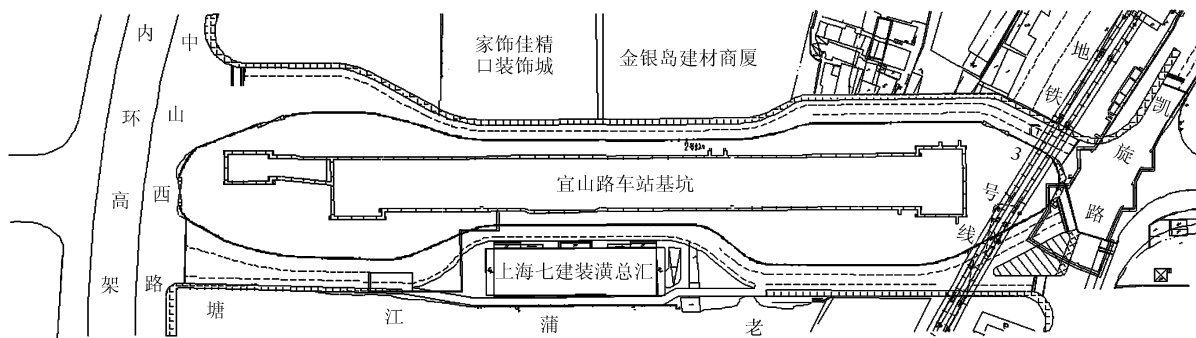


图 1 上海地铁 9 号线宜山路站总平面图

Fig.1 General plan of Yishan Road station of Subway No.9 in Shanghai, China

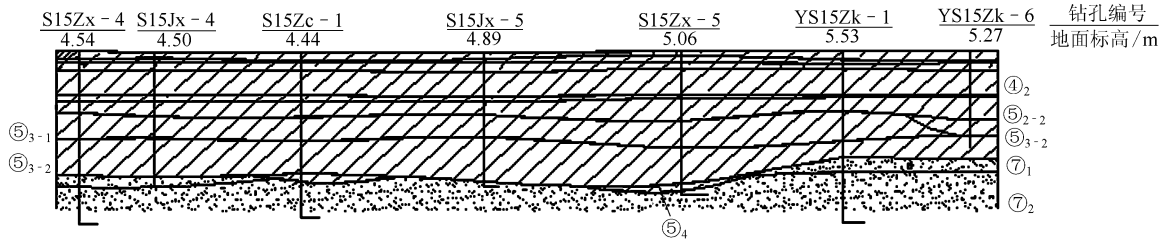


图2 2-2地层剖面图

Fig.2 Profile of geologic section 2-2

埋深一般为 3.00~6.00 m；第⑦层承压水位埋深一般为 4.0~12.0 m。潜水位和承压水随季节、气候、潮汐等因素有所变化。初勘及利用附近场地工程的注水试验测得第⑦层承压水头埋深为 5.86~8.64 m。

室内渗透试验系数见表 1。由于第⑦层为粉砂，无法取样按照室内试验精确计算，所以通过现场抽水试验反演获得。

表 1 室内渗透试验系数表

Table 1 Seepage parameters from indoor tests

土层序号	土名	室内试验渗透系数/(cm·s ⁻¹)	
		K _v	K _h
② ₁	黏土	5.72×10 ⁻⁷	2.17×10 ⁻⁶
③	淤泥质粉质黏土	7.39×10 ⁻⁷	1.21×10 ⁻⁶
④ ₁	淤泥质黏土	8.23×10 ⁻⁸	1.18×10 ⁻⁷
④ ₂	砂质粉土	5.30×10 ⁻⁵	2.99×10 ⁻⁴
⑤ ₁₋₂	黏土	4.65×10 ⁻⁷	1.67×10 ⁻⁶
⑤ ₂₋₂	砂质粉土	1.00×10 ⁻⁵	2.03×10 ⁻⁴
⑤ ₃₋₁	粉质黏土	3.75×10 ⁻⁷	2.37×10 ⁻⁶
⑤ ₃₋₂	粉质黏土	1.51×10 ⁻⁶	6.66×10 ⁻⁶

3 降水诱发沉降规律分析

由于上海地铁 9 号线宜山路车站对于周边环境控制要求极其严格，为准确测定承压水减压过程中的地面沉降规律，在分层沉降监测工作中采用多点位移计代替磁环进行测量，精度达到了±0.2 mm。多点位移计施工前布置在 Z3, Z4 基坑周边，编号为 WY1~WY6，测点深度分别位于第④，⑤，⑦层顶部，其位置见图 3。

监测工作从现场抽水试验开始，一直监测到基坑降水过程结束，分层沉降监测曲线见图 4。

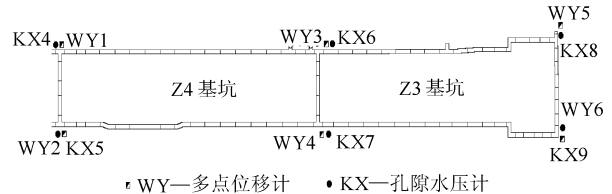


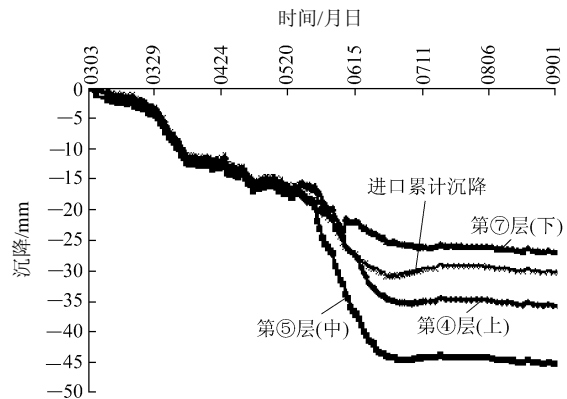
图 3 多点位移计布置位置图

Fig.3 Distribution of multi-displacement meters nearby pit

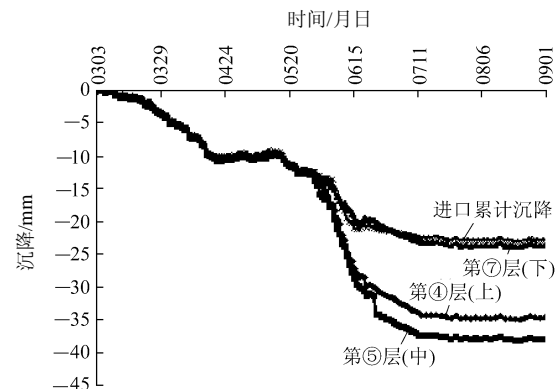
深层沉降具有如下规律：

(1) 同层沉降分异

从开挖开始，6 组多点位移测得的第④层顶部、⑤层顶部、⑦层顶、底位移是一致的，即每层都发生了均匀的沉降，采用每层中的一点，都可代表层内所有点的沉降，称之为均匀沉降阶段。随着降水



(a) 多点位移计(分层沉降)WY1



(b) 多点位移计(分层沉降)WY2

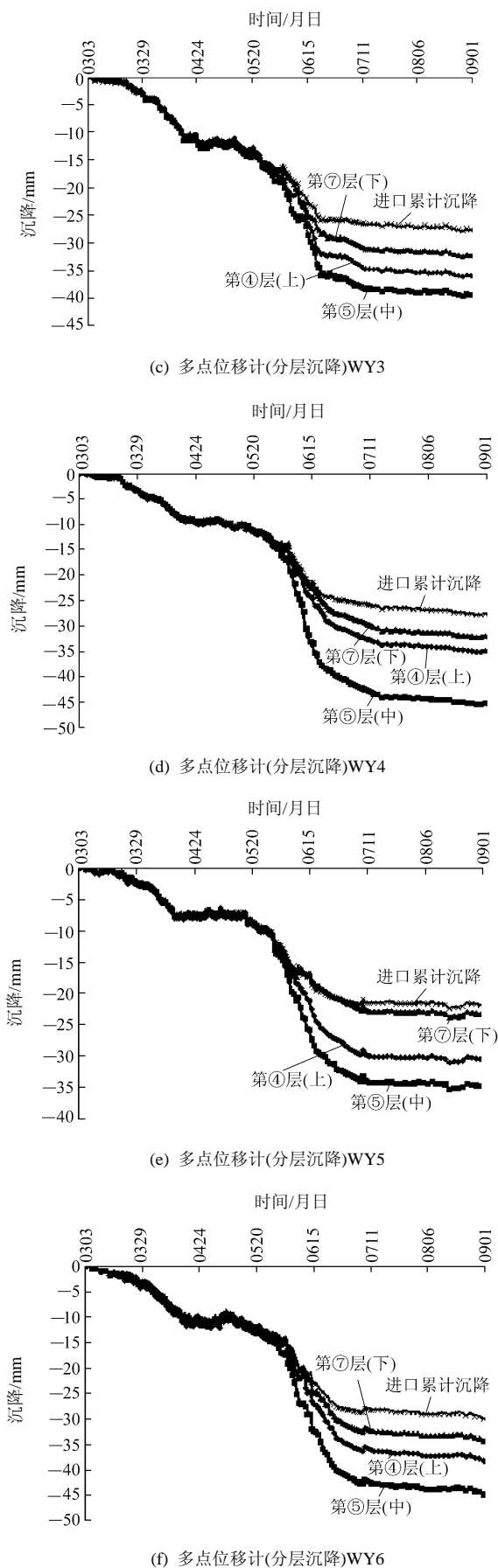


图 4 分层沉降监测曲线(2007 年)

Fig.4 Multi-layered settlements by multiple position extensometers nearby pit(in 2007)

工作的正式展开, 第④层顶部、第⑤层顶部、第⑦层顶、底位移开始加速并出现分异, 表现在深层沉降监测曲线上同层顶、底沉降“分叉”现象, 说明土层顶、底面之间产生了不协调的沉降。按照具体时间推算, 2007 年 6 月 25~30 日, 各段基坑分别处于下第④层开挖和第四道混凝土支撑养护等不同工况, Z4 基坑从 2007 年 6 月 21 日开始正式降水。持续大流量降水加速了深层土层沉降, 并诱发了各层土体的差异沉降, 时间应为降水开始后的 5~10 d 后。

(2) 深部单点沉降累积量大于地面沉降

按照多点位移计监测成果, 地层各层沉降累积量远大于监测到的地面沉降量值(见图 5), 这 and 传统认识的“地面沉降总量值等于各层沉降之和”不相符。同时, 通过计算各层的压缩量发现, 在沉降分异条件下, 减压含水层(第⑤, ⑦层)地层压缩量为正, 说明抽水导致的固结作用使地层发生了压缩, 而对于相对隔水层(第④层及其以上地层)或者承压水减压过程中没有直接影响到的地层, 地层压缩量为负值(见图 6), 说明该地层在此过程中发生了膨胀。

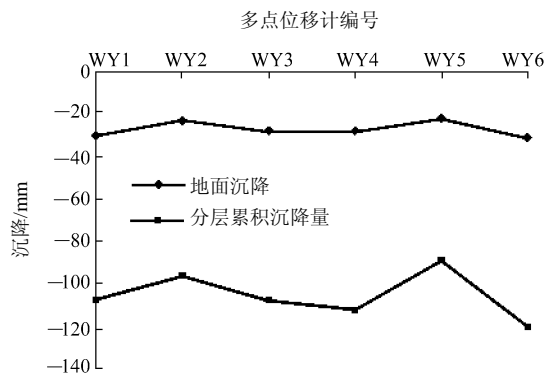


图 5 多点位移计监测到的地面沉降量与分层累积沉降量对比

Fig.5 Comparison of ground subsidence and accumulation multi-layered settlements monitored by multiple position extensometers

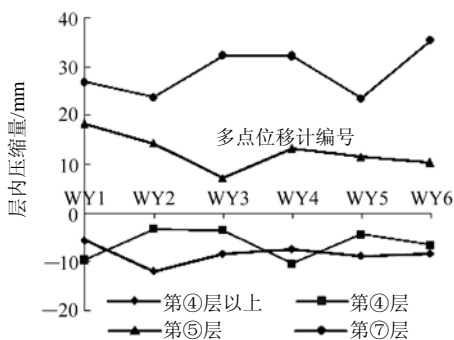


图 6 多点位移计监测到的层内压缩与膨胀(压缩为正)

Fig.6 Stratum compression and expansion monitored by multiple position extensometers (compression is positive)

4 降水诱发沉降机制分析

承压水减压中地面沉降与分层沉降的机制可以用高、低渗透 - 压缩性地层组合、深源减压 - 上覆地层逆回弹、深源固结 - 变形逆协调、渐进边界机制来解释。

4.1 高、低渗透与压缩性地层组合

监测到分层沉降分叉的上海地层都涉及到了承压含水层、中间地层和第④层淤泥质黏土及其以上地层的组合，而在多点位移计分层沉降监测过程中，发生了层内膨胀的主要是第④层淤泥质黏土及其以上地层的组合。分析其机制，是因为此过程中减压承压含水层和其紧邻上覆层(含有砂及粉砂性土)受减压影响较大，较快产生固结沉降。监测数据表明，层内压缩最大的仍为减压含水层，之所以测得第⑤层顶沉降最大，是因为该点沉降是叠加了与第⑦层的变形协调及本身固结沉降的结果。所以，在分析地面沉降和分层沉降过程中，需要定义层内压缩和单点沉降。单点沉降是叠加了层内压缩和下伏层顶协调变形后的相对位移，只能代表一个点的沉降情况，尚不能代表整层的沉降，整层的压缩量应该用顶底面单点位移的差值来定义。这也是分层沉降累积量远大于地面沉降的原因之一。

4.2 深源减压与上覆地层逆回弹

一般而言，土层处于自重应力场中，由于应力历史作用处于一定的固结状态和应力环境，无论是从地层的层顶还是层底卸荷，地层都会出现回弹现象。在深基坑开挖过程中，在坑底卸除土体后，会监测到坑底明显的回弹变形，在上海地铁车站深基坑建设中，甚至出现过由于地层回弹导致围护结构支撑立柱桩上抬的现象，而在承压含水层中对承压水进行减压，实质上原先由承压水和地层共同承担的上部地层的荷载部分转嫁到土体骨架上，会使承压含水层较快出现固结沉降，此时如果假定上覆相对渗透性较弱(隔水)地层孔隙水压力尚未发生变动，则地层顶、底面将在自身强度和周边环境约束下因向下回弹出现下沉。这时，该地层因逆向回弹发生膨胀。将由于基坑在地层顶部卸荷产生的向上回弹称为正回弹，则地层因承压水减压产生的向下回弹称为逆回弹。

本工程中，第⑤，④及④层以上土层都可能存

在逆回弹现象，由于第⑤层存在较强的越流渗透，其固结沉降也是很明显的，因此总的层内压缩量仍为正，并未发生膨胀的情况，而第④层内及以上的土层由于没有受到固结影响，就直接表现为层厚膨胀了。

4.3 深源固结与变形协调

用于附加应力作用下固结计算的公式，其荷载源一般位于多地层组合的顶部，荷载由上向下扩散，所以，其变形是由上向下协调的，称为变形正协调。其地层不能彼此脱开，上层底位移等于下层顶位移。而在承压水减压过程中，基于有效应力原理的荷载源一般位于多地层组合的底部，随着降落漏斗的扩展，荷载由下向上传递，所以，其变形是由下向上协调的，称为变形逆协调。由于地层处于一定应力环境中，在卸荷后会产生回弹变形，在承压含水层因为减压表现为向下垂直位移的固结变形过程中，上覆地层底面通过这种回弹变形保持变形的协调，不至出现地层间脱空现象，上层底位移等于下层顶位移。

图7为长100m，厚40m的地层在底部盆状位移边界下的位移边界 - 逆回弹产生顶底板位移的分异情况，可见，在靠近盆状边界边上位置地层出现了膨胀，可作为逆回弹膨胀的一个解释。

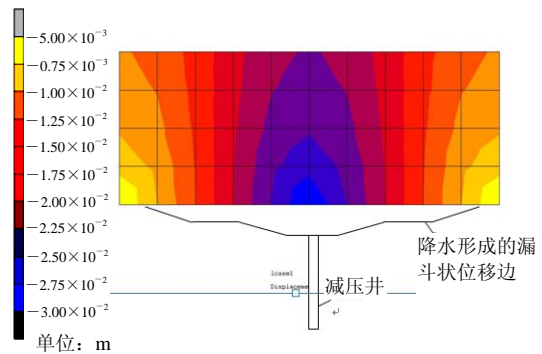


图7 位移边界 - 逆回弹产生顶底板位移的分异
Fig.7 Differentiation between roof and floor of same stratum caused by displacement boundary-inversed rebound

4.4 层内水位差与渐进边界

承压含水层减压过程和潜水含水层的疏干不同，实际上只是一定范围内承压水位降低，以满足基坑坑底的抗突涌条件，对于透水性较好的承压含水层而言，其固结变形可能很快实现，达到较大的

固结度, 而对于含砂性土较少的淤泥质土而言, 由于其透水性较差, 在承压含水层水位降落环境下, 其渗透固结可能会持续相当长的时间, 这就出现一定的水位边界在此类地层中的渐进性发展问题 (见图 8, 9)。随着渗透过程的发展, 水位降落在弱透水层中缓慢发展。如果将此地层划分为若干小层的话, 则靠近减压源方向的小层先通过逆回弹发生与下层层顶一致的垂向变形, 同时也发生自身的固结变形, 而在远离减压源方向靠上部的地层, 由于水位降落小于下部, 所以其固结变形较小。即使对于减压含水层而言, 也不是减压部位所有点的水位值都是一致的, 特别是对于非完整井渗流, 其是通过水力梯度与水量协调后形成的一个渗流场, 所以在按照工程地质、水文地质参数划分的土层内, 还应该按照水位降落情况, 在层内再细分小层, 按照不同分层内部水位降落的累加计算层内压缩。不

能按照一点水位降落, 计算整个含水层的压缩量。

5 单点沉降与层内压缩

目前, 国内有关地铁车站降水诱发沉降的计算方法, 主要是按照《地下铁道、轻轨交通岩土工程勘察规范》(GB50307 - 1999)第 8.5.7 条计算。按照该规范, 因地下水下降引起的土层附加荷载, 可按下式计算:

$$\Delta P = \gamma_w (h_1 - h_2) \tag{1}$$

式中: ΔP 为降水引起的土层附加荷载(kPa), h_1 为降水前土层的水头高度(m), h_2 为水位下降后的水头高度(m), γ_w 为水的重度(kN/m³)。

降水引起的地面附加沉降量, 可采用分层总和法按下式计算:

$$S = \sum_{i=1}^n S_i = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta P_i}{E_i} H_i \tag{2}$$

式中: n 为按照水位降落等值线划分的同一地层内细分土层数, 即按照等水压线图在层内划分一定厚度土层, 使层内水位降落基本一致; S 为降水引起的地面总附加沉降量(m), S_i 为第 i 计算土层的附加沉降量(m), ΔP_i 为第 i 计算土层降水引起的附加荷载(kPa), E_i 为第 i 计算土层的压缩模量(kPa), H_i 为第 i 计算土层的厚度(m)。

但在软土地区工程应用中, 发现了一些特殊的规律, 如监测获得的地面沉降和分层沉降之和不等, 分层沉降出现了“分叉”现象, 部分地层在膨胀等, 以上现象无法采用现行计算方法来解释。同时, 在工程实践中, 也存在按照理论计算的地面沉降量值明显偏大等一系列问题。

在以往基坑降水引发的地面沉降和分层沉降监测工作中, 常将某一个监测点的沉降值和该层厚度的变化混为一谈, 常期望地层中一点的变形值能够代表整个地层的变形, 而没有充分考虑到某一地层的沉降除了和本层固结变形有关外, 还与临近层的固结变形及变形协调有关。同时, 没有充分考虑到承压水减压过程中, 同层内仍然存在水头差, 同层内不同点由于降水所产生的附加应力也有所不同。这就出现了将实测的单点沉降等同于该地层厚度变化, 按照分层沉降累加的沉降远大于地面沉降, 分层总和法与实际不符的假象。实际上, 按照分层总和法, 地面沉降等于分层沉降之和是正确的, 关键

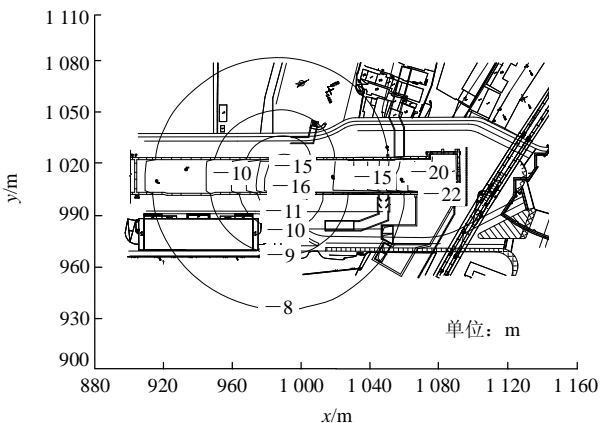


图 8 上海地铁 9 号线宜山路车站某计算时刻坑内外水头差平面图

Fig.8 Plan of head difference inside and outside pit, Yishan Road station of subway No.9 in Shanghai, China

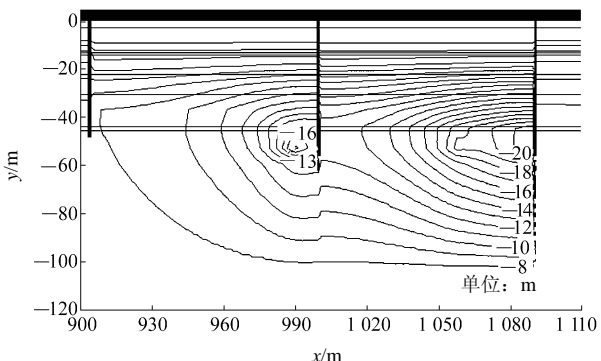


图 9 上海地铁 9 号线宜山路车站某计算时刻第 III 类渗流的层内水头差

Fig.9 Head difference inside layer of the seepage flow class III, Yishan Road station of subway No.9 in Shanghai, China

在于区别单点沉降和层内压缩。

图 10(a)为多点位移计布设示意图。如果地层如图 10(b)所示,层底不动,则层内压缩 D 等于层顶单点沉降, $D = h_{top1} - h_{top0}$; 如果地层如图 10(c)所示,地层顶底均有位移时,层内压缩不等于层顶单点位移,而等于层顶、底单点位移的差值, $D = (h_{btm1} - h_{top1}) - (h_{btm0} - h_{top0})$ 。

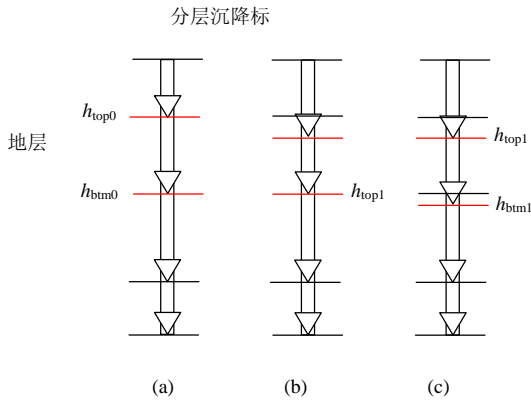


图 10 单点沉降与层内压缩示意图

Fig.10 Single point subsidence and compression in a stratum

定义单点沉降为地层内某点因变形协调与本身固结产生的竖向位移值,是用测量时测点的实测绝对标高减去初始绝对标高得到的数值,一般为负值。

定义层内压缩为地层因固结和不同层之间变形协调产生的总体变形量,是用固结 - 变形协调过程中某时刻顶面的绝对标高减去底面的绝对标高计算得到的数值,压缩为正,膨胀为负。

层内压缩和单点沉降表述对象和参照系均不同。层内压缩研究对象是目标区域内某一地层,参照系为地层的初始厚度;而单点沉降研究对象是某一地层内的一个点,参照系为地层内该点的初始绝对标高。

分层总和法中的分层沉降应为层内压缩而非层顶单点沉降,层内压缩可以用单点沉降计算。实际监测中所谓分层沉降应为本定义中的层顶单点沉降,而非层内压缩。

6 修正分层总和法

本文结合上海地铁 9 号线宜山路车站深基坑承压水减压过程中沉降的现场监测工作,在规律和机制分析的基础上,提出一种修正的计算方法。

6.1 分层总和法计算公式

对式(2)进行修正,按下式计算:

$$S = S_0 + S_u = S_0 + \sum_{i=1}^m S_i \quad (3)$$

式中: S_0 为减压目标含水层的层内压缩量(m), S_u 为减压目标含水层上覆地层总沉降量(m), m 为参加沉降计算的上覆土层数。

6.2 目标含水层层内压缩计算

减压目标含水层指降水工作中需要降低水位的含水层,水位降低增加的附加应力由此层开始,是地面沉降的初始诱发源。图 11 给出了减压目标含水层计算模型。

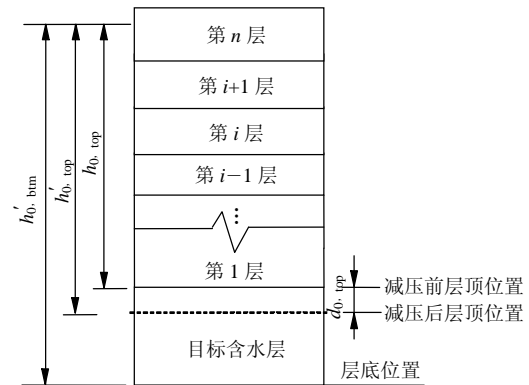


图 11 减压目标含水层计算模型

Fig.11 Calculation model of dewatering confined aquifer

层内压缩为抽水前地层厚度与抽水后地层厚度之差可表示为

$$S_0 = \sum_{i=1}^n S'_i = \sum_{i=1}^n [(h_{i, btm} - h_{i, top}) - (h'_{i, btm} - h'_{i, top})] = \sum_{i=1}^n (d_{i, top} - d_{i, btm}) = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta P'_i}{E_0} H_i \quad (4)$$

式中: S'_i 为层内细分小层单层压缩量; $h_{0, top}$, $h'_{0, top}$, $h_{0, btm}$, $h'_{0, btm}$ 分别为承压含水层减压前后的顶底面标高; $d_{0, top}$, $d_{0, btm}$ 分别为承压含水层减压后顶底面单点沉降; $\Delta P'_i$ 为第 i 小层降水引起的附加荷载; E_0 为承压含水层的压缩模量。

因地下水位下降引起的地层附加荷载,可按下式计算:

$$\Delta P'_i = \alpha_i \gamma_w (h_{i1} - h_{i2}) \quad (5)$$

式中: h_{i1} 为降水前 i 地层内水位标高(m); h_{i2} 为降水后 i 地层内的水位标高(m); α_i 为修正系数,可按相关计算理论或地区经验取值。

对于式(4)中的 E_0 , 对于砂土, 应为弹性模量; 对于黏土和粉土, 可按下式计算:

$$E_0 = \frac{1+e_0}{a_v} \quad (6)$$

式中: e_0 为土层的原始孔隙比; a_v 为土层的体积压缩系数(MPa^{-1}), 应取自土的有效自重压力至土的有效自重压力与附加压力之和的应力段。

6.3 上覆地层层内压缩计算

按照逆回弹基本原理, 假设逆回弹和固结同时发生, 但可以分别计算, 逆回弹自下而上产生, 地层顶、底回弹量可不一致(即在回弹过程中, 由于周边土体的约束作用, 顶部回弹量可小于底部回弹量), 固结沉降在逆回弹 - 变形协调后的单层厚度上发生。

(1) 逆回弹 - 协调变形计算

设地层变形协调前不考虑固结的单层厚度为 H_i , 变形协调后单层厚度为 H'_i , 变形协调前层顶标高为 $h_{i, \text{top}}$, 层底标高为 $h_{i, \text{btm}}$, 变形协调后层顶标高为 $h'_{i, \text{top}}$, 层底标高为 $h'_{i, \text{btm}}$, 变形协调后层顶单点沉降为 $d'_{i, \text{top}} = h'_{i, \text{top}} - h_{i, \text{top}}$, 层底单点沉降(见图 12)为 $d'_{i, \text{btm}} = h'_{i, \text{btm}} - h_{i, \text{btm}}$ 。

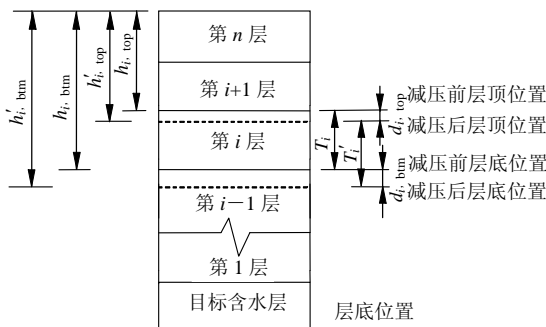


图 12 第 i 层计算模型

Fig.12 Calculation model of stratum No. i

变形协调后单层的厚度为

$$H'_i = h'_{i, \text{top}} - h'_{i, \text{btm}} \quad (7)$$

变形协调后单层的厚度变化为

$$\Delta H'_i = H_i - H'_i = h_{i, \text{top}} - h_{i, \text{btm}} -$$

$$(h'_{i, \text{top}} - h'_{i, \text{btm}}) = d'_{i, \text{btm}} - d'_{i, \text{top}} \quad (8)$$

如果减压含水层编号为 0, 向上依次编号, 由于地层在地下某点不能悬空, 减压含水层顶应与直接相邻地层的底板变形完全协调, 有 $d'_{1, \text{btm}} = d_{0, \text{top}}$ 。

而对于上覆地层而言, 由于其顶、底板均可能

存在位移, 可用逆回弹系数表述顶底板变形的不一致性。

定义不考虑本层固结, 在变形协调过程中, 顶板单点沉降与底板单点沉降的比值为含水层逆回弹系数, 则有

$$\alpha_1 = d'_{1, \text{top}} / d'_{1, \text{btm}} \quad (9)$$

$$\alpha_i = d'_{i, \text{top}} / d'_{i, \text{btm}} \quad (i > 1) \quad (10)$$

$\alpha_i = 0$ 时, 则顶板未动, 层内压缩等于底板单点沉降; 取 1 时, 顶、底板单点沉降完全一致, 层内压缩为 0; $0 < \alpha_i < 1$ 时, 顶板沉降小于底板沉降, 地层“膨胀”。在进行沉降计算时, 可先根据抽水试验过程中相关监测数据, 计算逆回弹系数, 然后在工程实施中, 按照下式计算逆回弹量:

$$d'_{i, \text{top}} = \alpha_i d'_{i, \text{btm}} \quad (i \geq 1) \quad (11)$$

(2) 层内压缩计算

设在变形协调后(靠近目标含水层侧渗流达到稳定)的层底标高不变, 固结沉降层顶产生的单点沉降等于层内压缩, 可以写为

$$d''_{i, \text{top}} = h'_{i, \text{top}} - h''_{i, \text{top}} = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta P_i}{E_i} H'_i \quad (12)$$

式中: $h''_{i, \text{top}}$ 为在固结变形后地层顶板的标高。

则考虑变形协调和固结沉降后本层的层内压缩(膨胀为负)可以按照下式计算:

$$S_i = d''_{i, \text{top}} + d'_{i, \text{btm}} - d'_{i, \text{top}} \quad (13)$$

如果减压承压含水层编号为 0, 向上依次编号(见图 11, 12)。

承压含水层上覆地层层内压缩总量为

$$S_u = \sum_{i=1}^n S_i = \sum_{i=1}^n (d'_{i, \text{btm}} + d''_{i, \text{top}} - d'_{i, \text{top}}) \quad (14)$$

(3) 地面总沉降计算

由式(3)~(14), 地面沉降可以写为

$$S = S_0 + S_u = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta P_i}{E_0} H_i + \sum_{j=1}^m \left(d'_{j, \text{btm}} - d'_{j, \text{top}} + \sum_{k=1}^l \frac{\Delta P_{j, k}}{E_j} H'_{j, k} \right) \quad (15)$$

$$d'_{1, \text{ btm}} = d'_{0, \text{ top}} = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta P'_i}{E_0} H_i \quad (16)$$

$$d'_{1, \text{ top}} = \alpha_1 d'_{1, \text{ btm}} \quad (17)$$

$$d'_{j+1, \text{ top}} = d'_{j, \text{ btm}} - d'_{j, \text{ top}} + \sum_{k=1}^l \frac{\Delta P'_{j, k}}{E_j} H'_{j, k} \quad (j \geq 1) \quad (18)$$

$$d'_{j+1, \text{ top}} = \alpha_{j+1} d'_{j+1, \text{ btm}} \quad (19)$$

式中: j 为上覆地层内小层层面以下分层数。

6.4 工程应用

按照宜山路车站与多点位移计 WY1~WY6 对应的孔隙水压力监测成果分析, 第④层孔隙水压力未发生明显变化, 则可按其多点位移计监测获得的顶、底面分层沉降计算逆回弹系数(见表 2)。对于第⑤层, 按照和多点位移计配对设置的孔压计监测成果及相关计算, 获取的顶板逆回弹系数见表 3。

表 2 宜山路车站不同监测点④层顶板逆回弹系数
Table 2 Inverse rebound index monitored in stratum IV of different measuring points in Yishan Road station

多点位移计编号	沉降/mm		逆回弹系数
	第④层顶部	第④层底部	
WY1	-35.2	-44.7	0.79
WY2	-34.9	-38.0	0.92
WY3	-35.3	-38.7	0.91
WY4	-34.2	-44.6	0.77
WY5	-30.5	-34.5	0.88
WY6	-37.3	-43.8	0.85

表 3 宜山路车站不同监测点⑤层顶板逆回弹系数表
Table 3 Inversed rebound index calculated in stratum V of different measuring points in Yishan Road station

多点位移计编号/孔压计编号	孔压计监测水位降落深度/m	150 d 计算固结度	150 d 计算固结沉降/mm	顶板单点沉降/mm	顶板逆回弹量/mm	底板逆回弹量/mm	逆回弹系数
WY3/KX6	2.81	0.24	-13.13	-38.5	25.37	31.20	0.813 1
WY4/KX5	2.92	0.24	-13.64	-44.2	30.56	31.00	0.985 8
WY5/KX8	2.46	0.24	-11.49	-34.4	22.91	23.00	0.996 1
WY6/KX9	2.51	0.24	-11.73	-43.3	31.57	32.90	0.959 6

由表 2, 3 可见, 由于地层及边界的约束作用,

第④层顶板因变形协调产生的单点沉降约为底板的 77%~92%, 底板单点沉降大于顶板, 由此产生了单层的膨胀现象。第⑤层顶板因变形协调产生的单点沉降位移为底面的 81.31%~99.61%, 叠加了水位降落产生的固结沉降后, 顶板单点位移沉降大于底板, 单层表现为层内压缩。采用此系数及式(15)~(19)计算出的地面沉降数据与实际吻合较好。

7 结 论

(1) 多点位移计高精度监测成果显示, 上海软土地区承压水减压诱发沉降存在着分层沉降分异(分叉)和各层分层沉降之与地面沉降量值不等的现象, 现有的计算方法和监测理论无法对其进行合理解释, 相关机制分析亟待开展。

(2) 分层总和法(规范)无法解释地面沉降与分层沉降之和不等、分层沉降“分叉”以及部分地层膨胀等现象, 需要对计算方法进行修正。

(3) 承压水减压中地面沉降与分层沉降的机制可以用高、低渗透-压缩性地层组合、深源减压-上覆地层逆回弹、深源固结-变形协调、渐进边界机制进行解释。

(4) 在地面沉降和分层沉降分析中, 需要定义层内压缩和单点沉降。单点沉降是叠加了层内压缩和下伏层顶协调变形后的相对位移, 只能代表一个点的沉降情况, 尚不能代表整层的沉降, 整层的压缩量应该用顶底板单点位移的差值来定义。

(5) 按照逆回弹-变形协调原理, 假设逆回弹和固结同时发生, 可以分别计算, 逆回弹采用逆回弹系数予以表征和计算, 对分层总和法进行了修正。应用成果表明, 修正计算方法能够准确地计算单点沉降和地面沉降。

(6) 在固结诱发的层顶单点沉降小于变形协调诱发的地层厚度变化时, 在一定的土层条件下, 可能产生地层的部分膨胀, 修正的计算方法对此作出合理解释。

参考文献(References):

[1] 吴林高, 刘陕南, 李恒仁. 工程降水设计施工与基坑渗流理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.(WU Lingao, LIU Shannan, LI Hengren. Design and construction of dewatering engineering and theory of pit seepage[M]. Beijing: China Communications Press, 2003.)

- Chinese))
- [2] WANG J X, HU L S, WU L G, et al. Hydraulic barrier function of the underground continuous concrete wall in the pit of subway station and its optimization[J]. Environmental Geology, 2009, 57(2): 447 - 453.
- [3] 王国光, 严平, 龚晓南, 等. 采取止水措施的基坑渗流场研究[J]. 工业建筑, 2001, 31(4): 43 - 45.(WANG Guoguang, YAN Ping, GONG Xiaonan, et al. Research on the seepage field of excavation with waterproof structure[J]. Industrial Construction, 2001, 31(4): 43 - 45.(in Chinese))
- [4] 师颖. 基坑工程非稳定渗流场的三维有限元分析[硕士学位论文][D]. 天津: 天津大学, 2004.(SHI Ying. The 3D finite element analysis for unsteady seepage in excavation engineering[M. S. Thesis][D]. Tianjin: Tianjin University, 2004.(in Chinese))
- [5] 张俊霞, 李莉, 张宝森. 基坑降水的三维渗流计算分析[J]. 岩土工程界, 2002, 5(5): 50 - 51.(ZHANG Junxia, LI Li, ZHANG Baosen. 3D calculation and analysis of seepage in pit dewatering[J]. Geotechnical Engineering Field, 2002, 5(5): 50 - 51.(in Chinese))
- [6] 俞洪良, 陆杰峰, 李守德. 深基坑工程渗流场特性分析[J]. 浙江大学学报(理学版), 2002, 29(5): 595 - 600.(YU Hongliang, LU Jiefeng, LI Shoude. Study on seepage field characteristics of foundation pit excavation[J]. Journal of Zhejiang University(Science Edition), 2002, 29(5): 595 - 600.(in Chinese))
- [7] 高福华. 深基坑工程渗流与变形分析[硕士学位论文][D]. 南京: 河海大学, 2004.(GAO Fuhua. Analysis of seepage and deformation of deep excavation of foundation pit[M. S. Thesis][D]. Nanjing: Hohai University, 2004.(in Chinese))
- [8] 张勇, 赵云云. 基坑降水引起地面沉降的实时预测[J]. 岩土力学, 2008, 29(6): 1 593 - 1 596.(ZHANG Yong, ZHAO Yunyun. Real-time prediction of land subsidence caused by foundation pit dewatering[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(6): 1 593 - 1 596. (in Chinese))
- [9] 王翠英, 黄理兴, 段卫昌, 等. 深基坑降水引起周边地面沉降量值计算修正系数 M_s 的确定[J]. 岩土力学, 2006, 27(6): 1 011 - 1 016. (WANG Cuiying, HUANG Lixing, DUAN Weichang, et al. Determination of coefficient M_s during calculation of surrounding ground settlement due to foundation pit dewatering[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(6): 1 011 - 1 016.(in Chinese))
- [10] 许锡金, 李东霞. 基坑降水引起地面沉降计算方法研究[J]. 岩土工程技术, 2004, 18(4): 194 - 198.(XU Xijin, LI Dongxia. Study on calculating method of ground subsidence caused by pit-dewatering[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2004, 18(4): 194 - 198.(in Chinese))
- [11] 张莲花, 李荣强, 刘德坊. 基坑降水总应力变化时有效应力增量和沉降量计算[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2001, 12(1): 66 - 67, 77.(ZHANG Lianhua, LI Rongqiang, LIU Defang. The calculation of effective stress and settlement based on the variable total stress in pit dewatering[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2001, 12(1): 66 - 67, 77.(in Chinese))
- [12] 施成华, 彭立敏. 基坑开挖及降水引起的地表沉降预测[J]. 土木工程学报, 2006, 39(5): 117 - 121.(SHI Chenghua, PENG Limin. Ground surface settlement caused by foundation pit excavation and dewatering[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(5): 117 - 121. (in Chinese))
- [13] 骆祖江, 刘金宝, 李朗. 第四纪松散沉积层地下水疏降与地面沉降三维全耦合数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(2): 193 - 198.(LUO Zujiang, LIU Jinbao, LI Lang. Three-dimensional full coupling numerical simulation of groundwater dewatering and land-subsidence in Quaternary loose sediments[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(2): 193 - 198.(in Chinese))
- [14] 张莲花, 孔德坊. 沉降变形控制的基坑降水最优化方法及应用[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(10): 1 171 - 1 174.(ZHANG Lianhua, KONG Defang. Optimum method of dewatering controlled by surrounding settlement and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(10): 1 171 - 1 174.(in Chinese))
- [15] 李筱艳. 基于位移反分析的深基坑渗流场与应力场完全耦合分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(8): 1 269 - 1 274.(LI Xiaoyan. Fully coupling analysis of seepage and stress for deep foundation pit based on displacement back analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(8): 1 269 - 1 274.(in Chinese))