

关于地基基础工程中的环境效应问题研究*

卢粉贵¹ 李 飞² 程鹏环²

(1. 盐城市建设局造价处 江苏 盐城 224001 2. 盐城工学院 建筑工程系 江苏 盐城 224003)

摘 要 对于广大的软土地区,在保证地基基础工程施工安全的同时,要求兼顾周围环境土体工程的安全问题;对于城市固体废弃物地基的环境污染及工程利用,软土地基化学处理后的污染与工程力学性质变异等问题,本文通过近年来的有关研究与实践,综述了当前地基基础工程中环境效应问题研究的前沿热点课题。

关键词 地基基础;环境效应;变形;沉降;污染

中图分类号: TU447

文献标识码: A

文章编号: 1671-532X(2003)04-0058-06

近十多年来,土木工程师考虑的问题不仅是工程技术本身的问题,许多情况下,需要考虑以环境为制约的工程条件。在地基基础工程中,如挤土桩(静、动力压桩)、地基处理(强夯法、化学注浆法)、基坑工程(开挖与降水)和地下工程(盾构法)施工等都不同程度的对周围环境产生影响。由桩基础施工引起的地面和地层运动,基坑开挖与降水引起地表沉降,可能导致邻近建筑物倾斜、开裂甚至破坏,还可能引起道路设施、给排水管、煤气管及通讯电力电缆等地下管线的断裂和损坏,给工程建设和人民生活及国家财产带来巨大损失,并产生不良的社会影响。事故的主要原因是对地基基础工程施工扰动引起周围土体性质的改变和在施工中结构与土体介质的变形、失稳、破坏的发展过程认识不足,如土的应力状态和应力路径的改变,密实度和孔隙比的变化,土体抗剪强度的变化以及土体变形特性的改变等。长期以来,人们利用传统的土力学理论和方法,以天然状态的原状土为研究对象,进行有关物理力学特性的研究,并将结果直接用于受施工扰动影响的土体强度、变形和稳定性,显然不符合由施工过程引起的周围土体的应力状态改变、结构的变化、土体变形、失稳和破坏的发展过程,从而造成不少工程的失稳和破坏,给工程建设和周围环境带来很大危害。还有固体废弃物地基的污染与利用,化学法处理

软土地基后土体的物理、化学及力学性质变异等问题。因此,在确保工程安全的同时,如何顾及周围土体介质的环境效应问题,已经成为岩土工程师们普遍关注的热点课题。

1 城市地基工程中的环境化学问题

1.1 城市固体废弃物对地基土产生的环境效应

面广量大的垃圾堆放在城市周围,已成为严重的环境问题。由于大多数垃圾堆放和填埋场沥滤液防渗透及处理设施不完善甚至根本没有,已经或即将对场地周围的地表水、地下水和土壤造成难以处置的污染。城市中制造酸碱的工厂、石油化纤厂、煤气工厂、燃料库、污水处理厂及一些轻工业工厂,如印染、造纸、制革等企业产生的废渣、废液等。全国矿区各类固体废弃物累计存放约 70×10^8 t, 不仅直接占用和破坏土地 $1.7 \sim 2.3 \times 10^4$ km² (每年以 $200 \sim 300$ km² 的速度增加);另据不完全统计,我国的生活垃圾年产量以 9% 的速度递增,带来了现实与潜在的污染危害,对周围地基土也造成了不同程度的污染。

污染物通过多种途径进入地基土后,并不断积累,如果超过土的自净能力,就会引起污染,造成地基土的组成、结构和功能发生变化。地基土中污染物主要有无机污染物,如重金属汞、镉、铜、锌、铬等,非金属砷、硒等,放射性元素铯、锶等,有

* 收稿日期: 2003-07-02

作者简介: 卢粉贵(1964-),男,江苏盐城人,盐城市建设局造价处工程师。

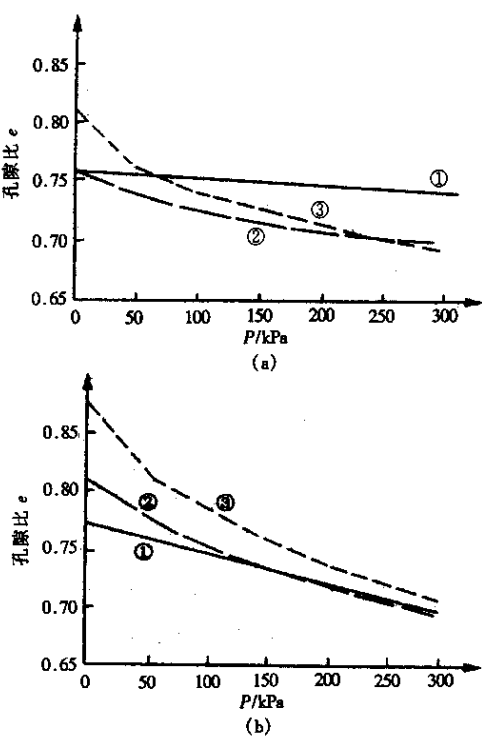
机污染物,如酚、氰化物、石油、有机性洗涤剂。此外,城市污水和医院污水中还有一些有害微生物。

1.2 地基土污染后的主要工程危害

地基土受污染后,土的性质会发生很大变化^[1]。图 1 为某地基土受废碱液浸渍后的压缩曲线对比。表 1 为某土的物理力学性质指标比较。

研究地基土受污染的物理力学性质变异的目的:一是为了保健和农业目的,以卫生为出发点,偏重于对土壤肥力和人的健康有关的有毒的微量元素方面;二是为了工程的目的,从工程的安全出发,着重研究腐蚀引起的基础土工程特征的变化。前者虽不是岩土工程师的主要任务,但常常是作为岩土工程师进行防护设计的一种标准和要求。如工业废料磷石膏用于软土地基加固工程中,就必须考虑其放射性防护标准,避免造成二次污染等^[2]。

地基土被污染时,首先是颗粒间的胶结盐类被溶蚀,胶结强度被破坏,盐类在水作用下溶解流失,土孔隙比和压缩性增大,抗剪强度降低。其次,土颗粒本身腐蚀后,形成的新物质在土的孔隙中产生相变结晶而膨胀,并逐渐溶蚀或分裂碎化成小颗粒,新生成含结晶水的盐类,在干燥条件



①—原生土 ②—浸清水 ③—浸废碱液 27d

图 1 土受废碱液浸渍后的压缩曲线对比

Fig.1 The compression curve of the soil dipping into the alkali liquid in contrast to others

表 1 土的物理力学性质指标比较

Table 1 The physical & mechanical indexes of the soils

类别	含水量 W(%)	重度 γ (kN/m^3)	干重度 γ_d (kN/m^3)	孔隙比 e	饱和度 $S_r(\%)$	抗剪强度		压缩系数 a_{1-2} (MPa^{-1})	压缩模量 E_s (MPa)	承载力 f_k (kPa)
						内聚力 c (kPa)	内摩擦角 φ ($^\circ$)			
A	27.9	19.1	15.0	0.81	93	5	20.5	0.30	5.87	73
B	38.5	18.2	13.1	1.06	98	6	16.5	0.35	5.43	64
C	+10.6%	-5.0%	-13%	+31%	+5%	+20%	-20%	+17%	-7.5%	-12%

下,体积增大而膨胀,浸水收缩,经反复交替作用,土质受到破坏。再次,地基土遇到酸碱等腐蚀性物质,与土中的盐类形成离子交换,从而改变土的性质。对于建筑物地基土经腐蚀后就会出现地基变形:一是土壤结构破坏,造成地基沉陷变形,如腐蚀的产物为易溶盐,在地下水中流失或使土变成稀泥,如某工厂建厂前地下水的 pH 值为 6~7,数年后的 pH 值降低到 3,由于土粒结构破坏,变成疏松多孔,使地基产生不均匀变形,造成其软化装置倾斜^[3]。二是土壤腐蚀后的生成物具有结晶膨胀性质,如氢氧化钠厂房,生石灰埋入地基内等,引起地基土膨胀。

2 基坑施工开挖与降水过程中的环境效应问题 万方数据

2.1 基坑开挖应力状态和应力路径的改变

在基坑开挖过程中,从主动区到被动区,主应力方向发生旋转,而且围护墙与基坑壁之间的摩擦作用,使得土体各点的应力路径变得较为复杂。图 2 为基坑开挖过程中坑壁与坑底的应力变化。基坑开挖扰动可分两种典型的应力路径区,如图 2 中的 1、2 所示,即基坑坑壁为一个路径区 1,坑底为一个路径区 2,其各自的应力路径如图 3 所示。

2.2 降低地下水引起的环境效应

降低地下水引起的环境效应表现为:①降低地下水位引起的地面沉降;②地下水渗透破坏引起的基坑坍塌;③基坑突涌导致的基土开裂。在基坑的开挖过程中,通常采用井点降水来达到地

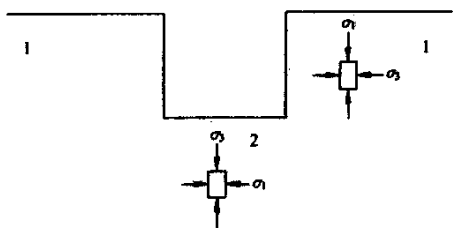


图 2 基坑开挖中坑壁与坑底的应力状态

Fig.2 The stress state of the pit walls & that of the pit bottom during excavating

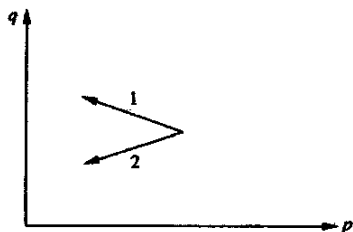


图 3 基坑典型应力路径

Fig.3 The typical stress path of the pit

下水位、固结土体、稳定边坡和便于开挖的目的。同时,基坑降水,由于水位降落而引起地面沉降,相应形成以水位漏斗中心的地面沉降变形区,导致此范围内的建筑物、道路、管网等设施因不均匀沉降而发生断裂、倾斜,影响其正常使用和安全。降低地下水引起的环境变化的机理为:①水位降低减少了土中地下水对地上建筑物的浮托力,使软弱土层受到压缩而沉降;②是孔隙水从土中排出,土体固结变形,本身就是压缩沉降过程;③降水过程中,常会随着抽出的水流带走土层中部分细微土粒,引起周围地面沉降。地面沉降量与地下水位降落是对应的,地下水位降落的曲面分布必然引起邻近建筑物的不均匀沉降。当不均匀沉降大到一定程度时,建筑物就会发生开裂、倾斜甚至倒塌现象;④基坑开挖时,基坑内、外地下水位存在一定的水头差,在动水压力作用下,基坑土会发生流(土)失、潜蚀现象,导致岩土体结构松动和破坏,引起基坑坍塌。⑤当基坑内、外水位差较大,或基坑下部有承压水存在,开挖基坑使原有土压力减少到一定程度时,承压水的水头压力大于基坑底土体浮重力,形成管涌、流砂现象,造成基土开裂。

2.3 支护结构发生变形和位移引起的环境效应

支护结构发生变形和位移引起的环境效应表现为:①支护结构自身破坏而导致边坡失稳;②支护结构整体破坏而导致基坑隆起;③支护结构发生变形和位移引起邻近建筑设施破坏。支护结构

发生变形和位移引起的环境效应的机理为:①基坑地基土卸载改变坑底原始应力状态,在基坑开挖时,土体中自重压力减少,土体的弹性效应使基坑底面产生一定的回弹变形(隆起),坑底表现为弹性隆起,其特征为坑底中部隆起最高,弹性隆起在基坑开挖停止后很快就停止,基本不会引起坑外土体向坑内移动,随着开挖深度的增大,坑内外高差所形成的加载和地面各种超载的作用使围护墙外侧土体向坑内移动,使坑底产生向上的塑性变形,其特征为两边大中间小的隆起状态;②在基坑周围产生较大的塑性区,并引起地面沉降;③基坑底面暴露时间过长,或基坑积水,一方面,使得粘性土吸水体积增大,抗剪强度降低,回弹变形增大。另一方面,由于粘性土的流变性,将增大墙体被动压力区的土体位移和墙外土体向坑内的位移,从而增加地表的沉降。④支撑物受破坏或锚杆体系抗拔力不足,拉杆自身断裂或拉杆及锚座的连接不牢等引起支护结构体系承载力丧失,支护结构嵌入深度不足引起基坑隆起,并使地基土强度降低或丧失。

3 桩基施工引起的环境危害

3.1 桩基施工的振动特征

锤击沉桩施工过程中,将引起桩身及桩周附近地基土体的强烈振动,这种振动在垂直和水平方向同时存在,在振动频率较低的地基土中,垂直振动比水平振动容易感受到,且垂直振动比水平振动所引起的危害影响更大。由于振动会以应力波的形式向更远范围的地基土体扩散传播,造成沉桩区及其邻近地基土的水平位移和竖向位移,从而影响周围建(构)筑物及地下管线的正常使用和安全。由于振动波的传播及距振源某点的反应与锤击能量、地层性质、地下水位、地面堆载、桩的材料、截面和长度、桩距、打入深度、桩垫的材质以及周围有无屏障等因素有关,对邻近建(构)筑物而言,又与它们的结构特征有关。如何估量沉桩振动对周围环境的影响,用什么参数作为衡量依据,目前世界各国终无统一,但具有一些定性的结论:①振动反应将随振源的距离增加而减少,但沉桩引起的振动影响效果除与锤击能量大小、传播距离有关外,还与地基土软弱程度有关;②振源强,传播距离远,振动波衰减快;③振动频率高,传播时衰减较快;④离振源近,衰减快;⑤在密实土中传播,衰减较慢,随着沉桩深度的增加,振动强

度总的趋势是增加的,但土体相对不易振动,特别是当沉桩遇到地下障碍物时,振动强度势必增强,但振动影响随沉桩深度变化无规律可循。

3.2 单桩挤土效应理论分析

①小孔扩张理论 Cooke 等人通过对模型桩和工程桩的沉桩过程的研究发现,在单桩的沉桩过程中,桩尖土的变形类似一个球形孔的扩张,而桩尖和地表以外的土体则类似一个圆柱形孔的扩张。Vesic 提出可以将沉桩过程视为无限土体中孔的扩张,由于属于轴对称问题,所得应力场只是距桩轴线距离 R 的函数,而与深度 Z 无关,这显然不符合实际情况,Randolph 等人在 Vesic 的基础上,将粘性土中的沉桩过程视为土体中柱形孔的扩张,假定土是均质各向同性的弹塑性体,沉桩期间,粘土体处于不排水状态,即不可压缩;土的本构关系采用 Mohr - Coulomb 屈服准则。由此可解得塑性区和弹性区的应力场,再利用 Hankel 公式,就可求得孔隙水压力分量。后来的学者,在小孔扩张理论基础上,做了进一步的研究。Sagaseta^[4]于 1987 年结合弹性力学和流体力学,运用源 - 汇理论给出了半无限空间土体中小孔扩张产生的位移场,解决了自由表面处面力为零的边界条件。但该方法的缺点也是很明显的,由于假定了桩周土体仍处于弹性状态,与实测的结果显然不符;且又没有考虑土的分层性,只假设土体为单一均质弹性体。姚笑青等人^[5]结合小孔扩张理论和土压力理论,认为桩侧土体处于极限平衡状态,计算了沉桩过程引起的超静孔隙水压力。

②应变路径法 Baligh^[6]于 1985 年提出此种方法,仍然将沉桩过程视为准静态问题,通过假定土体的变形速度场,给出土体的位移场。由于该方法假定了桩周土的变形与土的抗剪强度无关,且无法解释表面隆起等现象,故只适用于特定条件下的深部地层分析。③有限单元法 采用有限单元法作为手段,结合小孔扩张理论、Biot 固结理论、应力波理论或无限元等方法来模拟沉桩过程,计算桩周土体的位移、应力和超孔隙水压力,这是近年来沉桩分析广泛采用的一种有效手段。如朱泓^[7]等人采用圆柱孔扩张法,仍假定沉桩过程为平面应变问题,结合 Biot 固结理论和有限单元法对沉桩过程进行了初步的数值计算。徐建平^[8]等人假定沉桩过程是一个分段的、侧向的挤土过程,也考虑为平面应变问题,计算结果与模型试验的趋势基本吻合,但位移大小有偏差,需折减才能与

实际结果较一致。

4 强夯法地基处理引起的土体环境效应评价

强夯的巨大冲击能量可以使附近的场地下沉和隆起,并以冲击波向外传播,对邻近土体和建筑物产生扰动影响,引起地表和建筑物不同程度的损伤和破坏,对人的身心健康造成危害,并产生震动和噪声等环境公害。

4.1 强夯法的振动特征

强夯产生的竖向夯击能传给地基的能量是由压缩波(P波)、剪切波(S波)和瑞利波(R波)联合传递组成的,在地基中产生一个波场。体波(压缩波和剪切波)沿着一个半环波阵面径向地向外传播,而瑞利波则沿着一个圆柱波阵面径向地向外传播。根据国外学者的计算,三种弹性波总输入能量的百分比分别为:瑞利波 67%,剪切波 26%,压缩波 7%。可见瑞利波携带了约 2/3 的能量,瑞利波以夯击点为中心沿地表向四周传播,由于瑞利波随距离的增加而衰减要比体波慢得多,因此,对位于或接近地面的地基土,瑞利波的竖向分量起到了松动的作用。强夯振动是一种瞬时型的冲击振动,其引起的地面运动与地震作用有相似之处,但由于强夯振动的延续效应较短,其振动的水平分量远不如地震作用强烈,但其垂直作用的能量引起的地面振动是强烈的。由强夯引起的地面振动加速度(速度)随着与夯点距离的增加而减少,并按负幂数曲线衰减(见图 4),其幅值衰减方程为

$$\alpha_{\max} = k\gamma^{-\beta} \quad (1)$$

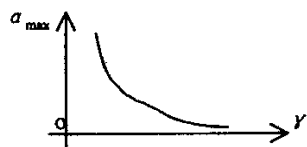


图 4 振动加速度随距离衰减曲线示意图

Fig.4 The attenuation sketch map of the vibration acceleration with distance

式中 α_{\max} ——地面某点最大加速度, cm/s^2 ;

γ ——测点距夯点距离, μm ;

β ——衰减常数;

k ——当量系数。

4.2 强夯振动对人体产生的响应

强夯冲击激扰振动类似于爆炸冲击振动,落锤作用时间一般仅为几十毫秒,冲击锤瞬时落地

后 ,冲击振源随即消失 ,冲击能量以波的形式从震源向四周传播 ,地基土体沿深度和径向做自由衰减振动 ,带动附近人体和建筑物(含居室里人)的振动。计算建筑结构对外界激励的响应时 ,参数确定不是一件容易的事情 ,此外 ,外界激励也很难用确定的方程来描述 ,一般采用现场测试或在实验室内对模型进行实验以获取有关的响应数据。至于建筑物内的居民的响应 ,必须考虑居民的生理和心理。在振动问题中 ,具体来说 ,人体的响应由以下因素决定 :一是激励的特性 ,包括激励的强度、激励的方向、激励的周期 ,是变动还是固定激励 ,激励是振动性还是冲击性的 ,是瞬时性的还是定常性 ;二是结构系统的特性 ,包括结构的刚度、质量和结构的阻尼性质 ,当然 ,这取决于建筑材料

的特性、建筑物的几何外观、建筑物的地面条件以及地基基础的性质等 ;三是结构的响应 ,包括频率、振幅、速度、加速度、阻尼、周期和运动响应的重复性 ;四是人体本身的情况 ,包括是否有恐惧和其他人的状况等。也正是由于居民的心理而造成了问题的复杂性 ,需要用模糊数学来解决此类问题。

4.3 强夯振动对建筑物危害的评价

国内外还没有一个统一的强夯振动控制标准。一些研究者认为 ,夯坑离建筑物的最小距离为 15 ~ 20 m ,当小于此距离时 ,一般应考虑强夯对建筑物及其他设施可能产生的影响 ,或采取有效措施进行处理。

表 2 国内常用的地震烈度与振动速度(加速度)的对应关系

Table 2 The Accepted Corresponding Relationship between Earthquake Intensity and Vibration Acceleration in China

烈度	振动特征	人的感觉	建 构 筑物状态	振动速度 (cm/s)	振动加速度 (cm/s ²)
1	微震	无感觉	无损坏	< 2.5	0.25
2	弱震	一般人都能感到地动	简易房屋轻微损伤	2.5 ~ 5.0	0.25 ~ 0.50
3	中强震	感到强烈地动	简易房屋损坏 ,一般房屋轻微损坏。涵洞伸缩缝及地下管道接头轻微变化	5.0 ~ 10.0	0.5 ~ 1.0
4	强震	地动剧烈 ,甚至使人跳离地面	简易房屋破坏 ,一般房屋损坏 ,砂浆地面出现裂缝	10 ~ 25	1.0 ~ 2.5
5	破坏震	极其剧烈的地动 ,人不能站稳	建筑物破坏和严重破坏 ,涵洞、地下管线可能挤压变形 ,混凝土结构产生开裂 ,公路路面局部破坏	25 ~ 50	2.5 ~ 5.0

5 结语

环境问题是当今世界上人类面临的最重要的问题之一。在环境变化的过程中 ,人类工程活动起了很重要的作用。本文从地基基础工程出发 ,着重分析了城市地基基础工程中的环境化学效应、基坑工程中的环境土工效应、桩基施工引起的

环境危害、强夯法地基处理中的环境评价等方面的问题。随着我国高层建筑、地铁、道路交通、隧道等工程建设以及城市化进程步伐的加快 ,各类地基基础工程中的环境效应问题愈来愈突出 ,需要有关学科的不断交融、新技术的不断产生、新材料的不断发明、新试验手段的不断涌现 ,从而不断向广大的岩土工程师提出新的挑战。

参考文献 :

[1] 顾季威. 酸碱废液侵蚀地基土对工程质量的影响 [J]. 岩土工程学报 ,1988 ,10(4) :9 - 12.
[2] 李飞 ,卢廷浩. 磷石膏加固软土的试验分析与应用研究 [J]. 工程勘察 ,2003 (4) :17 - 21.
[3] 李相然 ,姚志祥. 城市岩土地基工程地质 [M]. 北京 :中国建筑工业出版社 ,2002.
[4] Sagaseta C. Analysis of undrained soil deformation due to ground loss [J]. Geotechnique ,1987 ,37(3) :301 - 302.
[5] 姚笑青 ,胡中雄. 饱和软土中沉桩引起的孔隙水压力结算 [J]. 岩土力学 ,1997 ,18(4) :12 - 16.
[6] M. M. Baligh(1985) ,strain path Method J. Geotech ,Engineering Div ,ASCE 11(GT 9).
[7] 朱泓 ,殷宗泽. 打桩效应的有限元分析 [J]. 河海大学学报 ,1996 ,24(1) :25 - 29.
[8] 徐建平 ,周健等. 沉桩挤土效应的数值模拟 [J]. 工业建筑 ,2000 ,30(7) :22 - 25.

A Study of Environmental Effects on the Soil & Foundation Engineering

LU Fengui¹ ,LI Fei² ,CHENG Penghuan²

(1. Department of Project Cost ,Constrecton Bureau of Yancheng City ,Jiangsu Yancheng 224001 ,China
2. Department of Constrecton Engineering of Yancheng Institute of Technology ,Jiangsu Yancheng 224003 ,China)

Abstract :In the soft soil regions , safety problems not only in constructing of foundations , but also in soils all round of the engineering , should be considered carefully. Through related studying and practicing recently , the hot spots of environmental effects in the soil & foundation engineering are discussed , for instance , the soil with solid waste used , chemical treatment involved in pollution and the mechanical nature of the soil.

Keywords :soil and foundation ; environmental effect ; deformation ; settlement ; pollution

(上接第 57 页)

[3] 梅国雄 , 宰金珉 . 现场监测实时分析中的土压力计算公式 [J] . 土木工程学报 , 2000 , 33 (5) : 79 - 82 .

[4] 梅国雄 , 宰金珉 . 考虑变形的朗肯土压力模型 [J] . 岩石力学与工程学报 , 2001 , 20 (5)

[5] 徐日庆 , 俞建霖 , 龚晓南 . 基坑开挖中土压力计算方法探讨 [A] . 王铁宏 , 杨灿文 , 张在明 . 中国土木工程学会第八届土力学及岩土工程学术会议论文集 [C] . 北京 : 万国学术出版社 , 1999 , 667 - 670 .

Earth Pressure Model Considering Settlement and Time Effect

ZHAO Jianping , MEI Guoxiong , ZAI Jinmin

(Civil Engineering College , Nanjing University of technology , Jiangsu Nanjing 210009 , China)

Abstract :According to the characteristic that earth pressure p versus as the settlement of retaining wall , earth pressure model considering settlement is presented. On the basis of the model above , Rankine earth pressure model considering settlement is derived. Then according to the characteristic that earth pressure p versus as the time , earth pressure model considering time effect is presented. In the end , earth pressure model considering settlement and time effect is presented.

Keywords :settlement ; time effect ; earth pressure ; retaining wall