

文章编号: 1673-9469 (2019) 01-0001-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2019.01.001

软基差异沉降对现浇梁质量影响数值模拟研究

黄松^{1,2}, 洪宝宁^{1,2}, 刘鑫^{1,3}, 单浩^{1,2}

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏南京 210098; 2. 河海大学 岩土工程科学研究所, 江苏南京 210098; 3. 河海大学 隧道与地下工程研究所, 江苏南京 210098)

摘要: 为了掌握软基差异沉降对现浇梁体质量的影响, 运用有限元软件 ABAQUS 进行数值模拟, 通过分析不同龄期、不同差异沉降条件下, 早龄期混凝土梁构件的应力应变的变化规律。结果表明: 在混凝土早龄期阶段受到过大的不均匀位移荷载, 现浇梁体内部将出现塑性区, 这将对预制梁的质量造成重大的危害。采用极限压应变作为判据时, 结构物在 1 d 龄期能够承担的最大差异沉降为 12 mm, 在 2 d 龄期能够承担的最大差异沉降为 14 mm, 在 3 d 龄期时能够承担的最大差异沉降为 14 mm, 在 7 d 龄期能够承担的最大差异沉降为 15 mm, 在 28 d 龄期能够承担的最大差异沉降为 17 mm。

关键词: 差异沉降; 预制梁场; 现浇梁; 早龄期混凝土; ABAQUS

中图分类号: TU447

文献标识码: A

Numerical Simulation Study on the Effect of Uneven Settlement on the Quality of Cast-in-Place Beam

HUANG Song^{1,2}, HONG Baoning^{1,2}, LIU Xin^{1,3}, SHAN Hao^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Jiangsu Research Center for Geotechnical Engineering Technology, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Tunnel and Underground Engineering Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to master the influence of differential settlement on the quality of cast-in-place beam, the finite element software ABAQUS is used to simulate the stress and strain of the early age concrete beam members under different ages and different settlement conditions. The maximum allowable difference in the quality of cast-in-situ beam in prefabricated soft foundation is given. The results show that when concrete is subjected to excessive uneven displacement load in its early age, plastic zone will appear the cast-in-place beams, which will cause great harm to the quality of prefabricated beams. When the ultimate compressive strain is used as the criterion, the maximum uneven settlement of the structure is 12mm at 1 day, and it is 14mm after 2 days, 14 mm after 3 days, 15 mm after 7 days. The maximum uneven settlement at 28 days is 17mm. Therefore, the quality of cast-in-place beams caused by differential settlement of soft soil can be effectively controlled by foundation treatment before the construction of prefabricated beams.

Key words: uneven settlement; prefabricated beam field; cast-in-place beam; early age concrete; ABAQUS

高速公路建设过程中,受到地形条件、交通运输、工期等多种因素限制,需要在软基路堤上布置预制梁场^[1-4]。预制梁场具有结构荷载大、允许沉降变形

小和面积广等特点^[5-7],从荷载类型分析,梁场受到梁体自重和运输车辆动载等局部不均匀荷载,与均匀分布路堤荷载的常规软土路基相比,局部重载的

收稿日期: 2018-10-20

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51609071); 中央高校基本科研业务费专项(2018B13714); 广东省交通运输厅科技项目(2015-02-015, 2015-02-013)

作者简介: 黄松(1993-),男,江苏宿迁人,硕士研究生,主要从事地基处理研究。

梁场使得软基路段更易产生较大的差异沉降。大量研究表明,软土路基差异沉降对预制梁质量的影响主要发生在现浇梁混凝土的早龄期阶段,即混凝土开始凝结硬化到凝结硬化结束的这段时间^[8]。

混凝土早龄期阶段的差异沉降对现浇结构物生产质量方面的影响,目前还缺乏深入系统的研究。本文以有限元软件 ABAQUS 为平台,实验探讨了不同龄期、不同差异沉降条件下,早龄期混凝土梁构件的应力应变的变化规律,给出了保证软基路段预制场现浇梁质量的最大容许差异沉降值。

1 计算模型及参数

1.1 计算方案

采用有限元软件 ABAQUS,建立预制梁三维有限元箱梁简化模型,并赋予早龄期混凝土梁一定的不均匀位移荷载,进而研究在此阶段的早龄期梁内部的应力及变形状态,预制梁简化示意图如图1所示。

1.2 计算参数

浙江大学沈毅^[13]通过室内试验研究了 C40 混

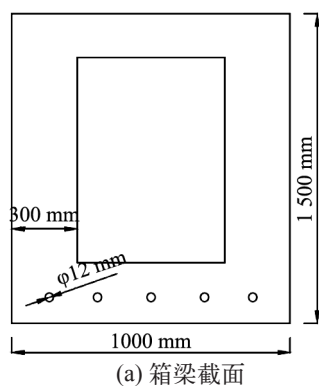
凝土的早龄期抗压强度变化规律,具体抗压强度值见表1。

根据文献[13]采用的非直接方法劈拉实验测试混凝土材料的抗拉强度。此实验相比于直拉-劈拉实验方式显得较为方便,且实验结果较好,C40混凝土的各龄期阶段的劈裂抗拉强度如表2所示。

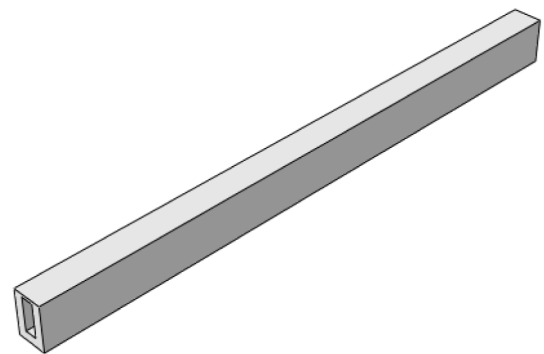
早龄期混凝土的弹性模量随着强度的增长而提高,文献[13]中根据相关规范和计算方法,获得各龄期混凝土弹性模量如表3所示。

而欧洲的混凝土设计规范^[14]针对未开裂的混凝土泊松比取0.2,开裂的混凝土取为0。刘宏伟^[15]等人通过研究也发现,不同类型、不同龄期下的混凝土泊松比总体来说变化范围不大。文献[16]中也表明:普通混凝土与高强混凝土泊松比相差不大,其范围一般为0.14~0.20,其中泊松比取0.2。

根据上述分析结果可知,混凝土材料在早龄期阶段强度较低,在此阶段易受到差异沉降的影响,本文以0.75~28d龄期的混凝土梁为研究对象。其中,钢筋材料采用HRB400(20Mn Si)型钢筋,钢筋弹性模量为200 GPa,泊松比为0.3,钢筋直径为12 mm,钢筋采用线弹性模型,箱梁材料采用混



(a) 箱梁截面



(b) 箱梁模型

图1 箱梁简化模型图

Fig.1 Simplified model of box girder

表1 C40 混凝土抗压强度

Tab.1 Compressive strength of C40 concrete

龄期/h	12	13	14	15	16	17	18	19	20
强度/MPa	3.1	4.3	5.3	6.2	7.2	9.4	10.4	12.6	14.0
龄期	21h	22h	23h	1d	2d	3d	7d	28d	
强度/MPa	14.2	14.7	15.0	15.1	18.7	21.5	26.5	42.2	

表2 C40 混凝土劈裂抗拉强度

Tab.2 Splitting tensile strength of C40 concrete

龄期/d	0.5	1	2	3	7	28
强度/MPa	0.4	1.2	2.1	2.6	3.4	3.9

表3 各龄期混凝土弹模

Tab.3 Elastic modulus of concrete at each age

龄期	18 h	1 d	2 d	3 d	7 d	28 d
弹性模量/GPa	13.0	14.6	14.7	17.6	19.3	25.5

土损伤模型 (CDP)，箱梁混凝土材料参数见表 4。

2 梁体混凝土的应力应变变化规律

预制场在不同工况下，台座附近将出现不同的沉降变形规律，本文采用 ABAQUS 建立三维有限元模型计算预制梁典型沉降曲线。其中，路堤填筑采用施工阶段分析方法，路堤填筑时间为 60 d，填土分为 4 层，填筑完成后固结 60 d 后施加梁荷载。路堤模型宽 120 m，沿纵向长 30 m，填土高度为 8 m，路堤顶部宽 26 m，边坡按 1 : 1.5 进行放坡。有限元计算模型如图 2 所示，材料参数如表 5 所示。

根据有限元模型分析结果，预制梁台座附近典型沉降曲线如图 3 所示。采用二次多项式拟合，可以得到位移曲线沿长度方向表达式为： $y = -0.0409x^2 + 0.817x + 13.404$ 。由典型沉降曲线可知，箱梁周围土体沉降关于箱梁中部对称式分布，且箱梁

中部沉降量最大。

本文选取典型沉降曲线，施加到早龄期预制梁上，从而得到不同不均匀沉降规律下，早龄期阶段梁体受到差异沉降作用时梁体内部应力分布情况，其中位移云图与应力云图如图 4 所示。

由上述云图可以看出，在位移荷载 $y = -0.0409x^2 + 0.817x + 13.404$ (mm) 作用下，现浇梁体内部出现了塑性区，此时过大的差异沉降对现浇混凝土梁的性质造成了一些不可逆转的影响。

3 计算结果分析

若假设该梁场上预制梁所受到的差异沉降荷载

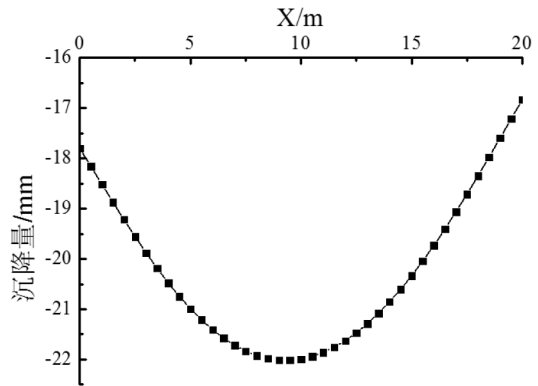
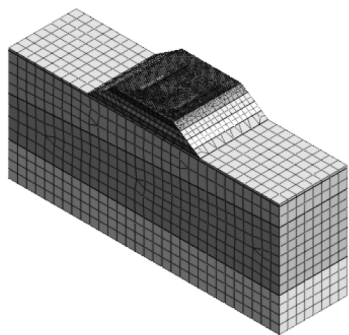


图 3 典型沉降曲线

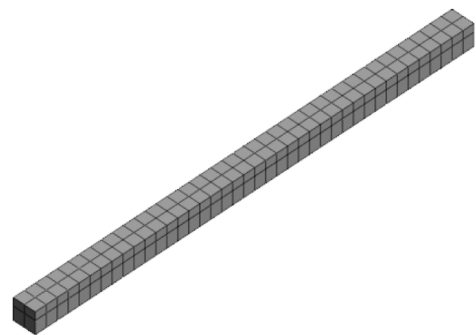
Fig.3 Settlement curve of precast beam

表 4 箱梁简化模型材料参数
Tab.4 Material parameters of simplified box girder model

E/GPa	ν	$\psi/^\circ$	ε	σ_{b0}/σ_{c0}
14.6	0.2	30	0.1	1.16
K_c	μ	σ_u/MPa	σ_{cu}/MPa	
0.667	0.000 5	25.6	32.8	



(a) 预制场计算模型



(b) 预制梁台座

图 2 预制场有限元模型图

Fig.2 Finite element model of precast beam

表 5 模型计算参数
Tab.5 Model calculation parameter

材料名称	$\gamma_d/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$c(\text{kpa})$	$\phi/^\circ$	E/MPa	μ	$k/(\text{m}\cdot\text{d}^{-1})$	材料模型
路堤填土	18.3	29	35	16	0.3	1.30e-2	摩尔 - 库伦
淤泥质土	17.8	8	24	8	0.35	8.64e-4	摩尔 - 库伦
粉质粘土	17.6	23	30	24	0.3	2.16e-3	摩尔 - 库伦
中风化岩	20	32	40	60	0.2	1.03e-4	摩尔 - 库伦
砂垫层	19.6			50	0.3	4.32	线弹性

形式均为上述二次多项式的形式,在 ABAQUS 软件中设定差异沉降曲线的幅值 (amplitude) 从 0.001 到 0.11 m 进行变化,就可以得到最大值为 1 mm 到 110 mm 的 11 条差异沉降曲线。将上述最大差异沉降幅值带入到上述拟合公式中,并将模型材料参数按表 1 至表 4 中进行设定,分别计算 0.75 d、1 d、3 d、7 d、28 d 龄期下各结构物的应力应变分布情况。图 5 给出了各龄期混凝土箱梁构件受到不同差异沉降值后梁体内的最大拉应变和最大压应变与差异沉降的关系曲线。

而在 7 d 以后,5 mm 的差异沉降产生的拉应变为 1.6×10^{-4} ,这个数值一直到 28 d 都是一样的,也就是说,7 d 拆模以后,该箱梁模型能够承受的最大抗裂的差异沉降为 5 mm。

3.2 极限压应变判据

而如果以混凝土极限压应变 $\epsilon_u=3.3 \times 10^{-3}$ 为判据的话,当龄期为 0.75 d 时,混凝土箱梁模型的极限压应变很小,为 3.272×10^{-5} ;当龄期为 1 d 时极限压应变为 6.543×10^{-5} ,差异沉降为 7 mm 时候达到

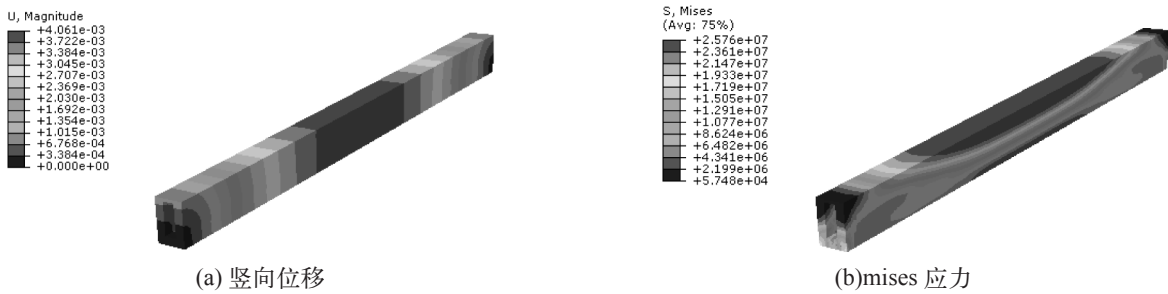


图 4 差异沉降作用下早龄期梁应力变形分布

Fig.4 Stress distribution of early age beam under uneven settlement

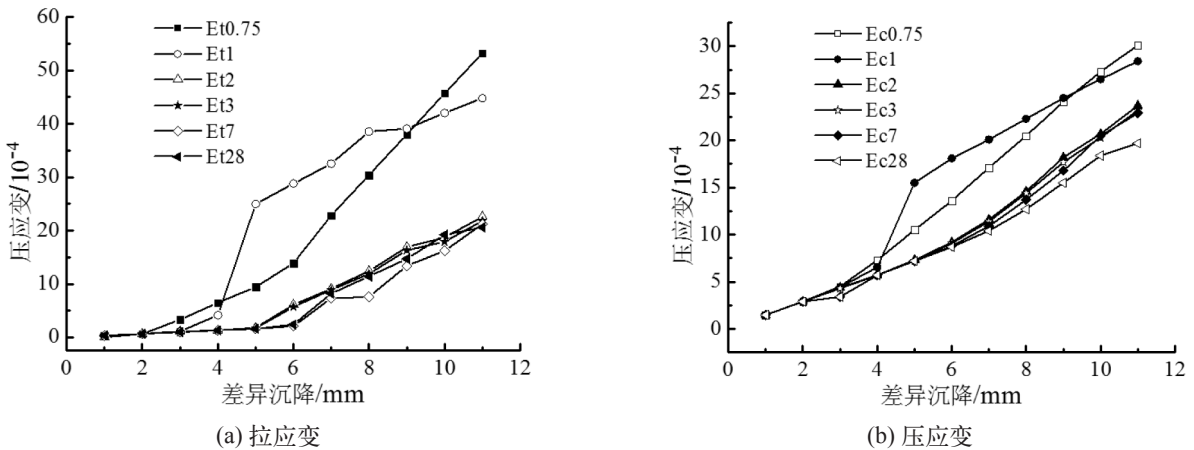


图 5 应变与最大差异沉降关系曲线

Fig.5 Strain curve and maximum uneven settlement curve

3.1 极限拉应变判据

上图可以看出,如果将混凝土的极限拉应变 $\epsilon_t=1 \times 10^{-4}$ 作为判据的话,结果在龄期为 0.75 d 时,当最大差异沉降为 3 mm 时,最大拉应变达到 3.3×10^{-4} ,已经超过了最大拉应变,此时钢筋开始工作,也就是说刚浇筑 0.75 d 的混凝土梁基本不能承受太多差异沉降。而当龄期变成 1 d 时,差异沉降 3 mm 时候的最大拉应变减少到 1.118×10^{-4} ,也就是说最大差异沉降 4 mm 时混凝土将出现拉裂缝。

2.28×10^{-3} , 9 mm 时达到 3.8×10^{-3} ,此时混凝土发生受压破坏,出现了压裂缝。因此,龄期为 0.75 d 时的混凝土箱梁模型能够承受的极限不均匀沉降为 9 mm。当龄期为 1 d 时,可以发现该混凝土箱梁模型在 11 mm 差异沉降时候仍能够保持不出现受压裂缝。从图上也可以看出,该箱梁模型的最大压应变数值在 6 mm 差异沉降之后保持的较好的线性关系,将其拟合如图 6 所示:

通过上述拟合曲线,可以预测该 C40 箱梁

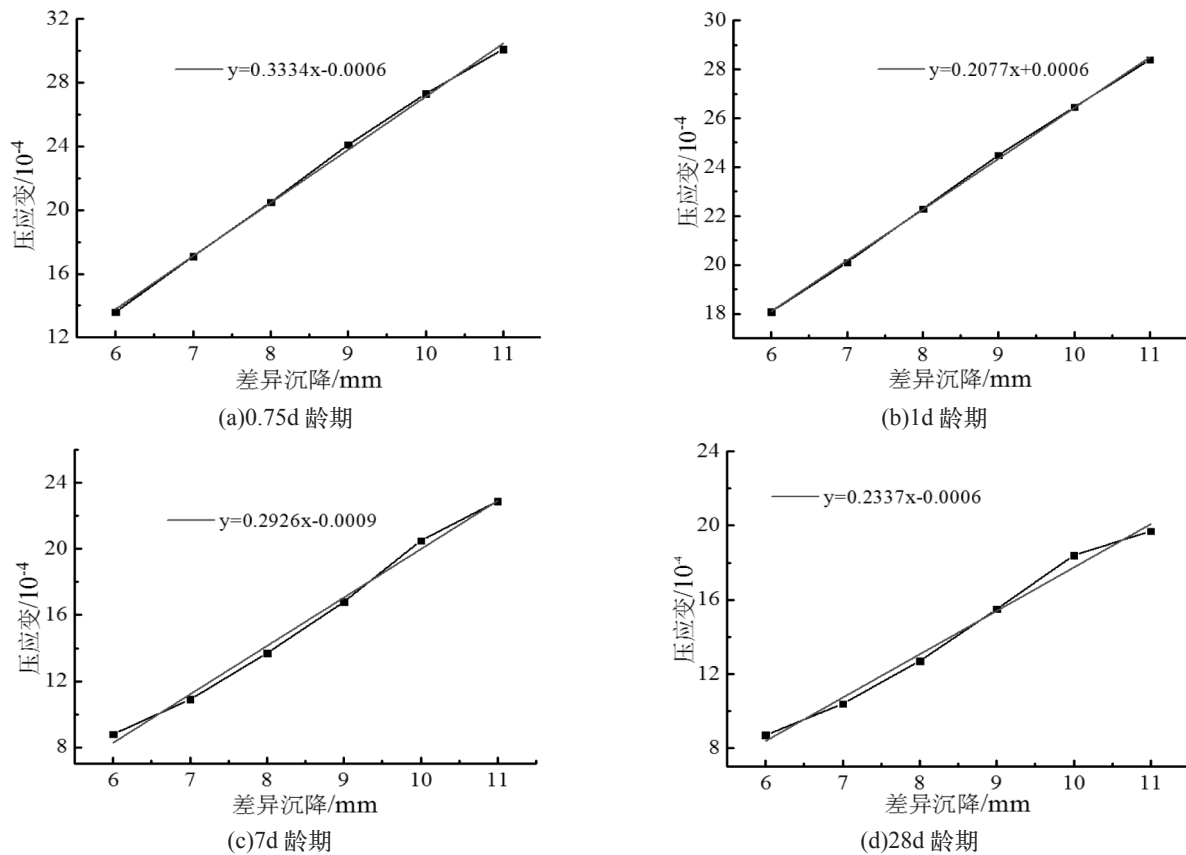


图 6 各龄期压应变与差异沉降关系曲线

Fig.6 The relationship between stress and uneven settlement at each age

各龄期内能够承受的最大差异沉降分别为：1 d 为 12 mm，2 d 为 14 mm，3 d 为 14 mm，7 d 为 15 mm，28 d 为 17 mm。根据混凝土极限拉应变和极限压应变判据，可以分别得到不同龄期内混凝土箱梁的允许最大差异沉降值。但考虑到模型的简化以及实际工程中，钢筋骨架对拉应力的分担作用，可以根据极限压应变的判据进行允许最大差异沉降的判断，最终确定各龄期下最大差异沉降值。

4 结论

1) 在混凝土早龄期阶段受到过大的不均匀位移荷载，现浇梁内部将出现塑性区，这对预制梁的质量造成重大的危害。

2) 随着各龄期混凝土箱梁构件受到差异沉降的增大，梁体内最大压应变逐渐增大。且箱梁最大压应变数值在差异沉降 6 mm 之后保持良好的线性关系。

3) 采用极限压应变作为判据时，结构物在 1 d 龄期能够承担的最大差异沉降为 12 mm，在 28 d 龄期能够承担的最大差异沉降为 17 mm。因此在预制梁浇筑施工前进行地基处理可以有效的控制因软土

差异沉降而引起的现浇梁质量问题。

参考文献：

- [1] 姜立贵, 邓国才. 预制梁厂的规划和筹建 [J]. 隧道建设, 2005, 25(2): 76-80.
- [2] 葛瑞银, 景葵黄. 高速公路昌江大桥预制梁场设置一例 [J]. 科技致富向导, 2010(12): 220-221.
- [3] 张亚军, 张项铎. 高速公路分离式路基桥梁预制场施工技术 [J]. 预应力技术, 2005(4): 7-10.
- [4] 黄丰, 代书学, 何勇. CFG 桩在苏通大桥预制场地基处理中的运用 [J]. 施工技术, 2005(增刊 1): 264-266.
- [5] 李艳茹. 预制梁场建设规模优化与内部布局问题研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
- [6] 曾伟东. 桥梁工程预制场的设计与施工 [J]. 华东公路, 2005(6): 8-10.
- [7] 孙逢宾, 张宇, 倪金龙. 软基地区 100t 箱梁预制场方案优化设计例析 [J]. 洛阳理工学院学报, 2013(1): 13-18.
- [8] 金贤玉, 沈毅, 李宗津, 等. 混凝土早龄期受力对后期性能的影响 [J]. 混凝土, 2003(7): 35-37.
- [9] 孙荣, 陈忠汉, 邵永健, 等. 混凝土 (下转第 16 页)

- [2] 杨子胜. 深基坑事故分析与防范措施[J]. 河南科技大学学报: 自然科学版, 2004, 25(4): 71-74.
- [3] 杨子胜. 基坑工程项目风险管理研究[J]. 科技情报开发与经济, 2004, 14(9): 205-207.
- [4] 商丽. 基于未确知测度理论与 Midas/GTS 模拟的边坡稳定性分析[J]. 矿业研究与开发, 2017, 37(8), 56-60.
- [5] 陈占锋, 向娟, 胡毅夫. 基于未确知测度的边坡稳定性评价研究[J]. 工业建筑, 2014, 44(增刊), 621-624.
- [6] 刘晓云. 基于未确知测度理论的巷道稳定性评价[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(1), 26-31.
- [7] 吴刚, 张鑫, 李娜, 等. 基于层次分析法的基坑开挖引起地表沉降风险评价[J]. 绍兴文理学院学报, 2017, 37(9), 24-29.
- [8] 刘保县, 戴佳伟, 舒志乐. 变权层次分析法在深基坑支护方案优选中的应用[J]. 西华大学学报: 自然科学版, 2016, 35(6)51-56.
- [9] 张航. 基于三标度法的层次分析法在储层分类评价中的应用[J]. 重庆科技学院学报: 自然科学版, 2015, 17(6), 30-32.
- [10] 刘开第. 城市环境质量的未确知测度评价[J]. 系统工程理论与实践, 1999(12): 52-58.
- [11] 付文光. 基坑深度分级及不同深级支护技术适用性的探讨[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊1): 99-103.
- [12] 卢一凡. 武汉地区深基坑工程支护结构安全评价研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [13] 张社荣. 地基土抗剪强度设计值取值[J]. 水利水电技术, 2001, 32(12), 69-72.
- [14] 孙宏伟, 姜玮, 杨启安. 黏性土抗剪强度参数勘察试验值与基坑工程设计取值初步分析[C]. 第三届全国岩土与工程学术大会论文集, 成都, 2009: 145-148.
- [15] 傅志峰. 基于安全预警分级的基坑安全模糊评价研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(12), 3693-3700.
- [16] 谢北成. 试论“地表水”对深基坑支护工程的影响及其对策[J]. 施工技术, 2003, 23(6), 82-83.
- [17] 赵羚伊. 邻近荷载位置对基坑变形稳定影响规律的分析[D]. 西安: 长安大学, 2017.
- [18] 李青青. 邻近建筑物对基坑工程影响的研究[D]. 西安: 长安大学, 2016.
- [19] 吴凤平. 基坑工程施工质量风险管理研究与应用[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
- [20] 李淑. 基于变形控制的北京地铁车站深基坑设计方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.

(责任编辑 李新)

(上接第5页)

- 梁早期受力性能的试验研究[J]. 土木工程与管理学报, 2006, 23(3): 85-88.
- [10] 徐仲卿, 袁泉, 杨振坤, 等. 早龄期混凝土力学性能试验及其单轴本构模型[J]. 沈阳工业大学学报, 2015, 37(1): 92-96.
- [11] 熊维, 丁红岩. 早龄期张拉对预应力混凝土梁徐变的影响[J]. 建筑结构, 2014(14): 24-27.
- [12] 金贤玉, 田野, 金南国. 混凝土早龄期性能与裂缝控制[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(6): 204-212.
- [13] 沈毅. 早龄期混凝土若干性能的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [14] SAUL A G A. Principles underlying the steam curing of concrete at atmospheric pressure[J]. Magazine of concrete research, 1951, 2(6): 127-140.
- [15] 刘宏伟, 谢丽, 吴胜兴. 混凝土早龄期弹性模量无损检测初探[J]. 混凝土, 2008(6): 36-38.
- [16] FATTUHI N, AIMUTAIRI N M, AISHALEH M S. Assessment of fire-damaged kuwaiti structures[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1999, 11(2): 7-14.
- [17] 谢军. 早龄期混凝土强度和变形特性的试验分析[J]. 低温建筑技术, 2011, 33(6): 19-21.
- [18] LEW H S, REICHARD T W. Mechanical properties of concrete at early ages[M]. ACI J, 1978. 75(10): 533-542.
- [19] 杨晓明, 李小妮. 浅谈重载对软土地基基础影响的数值模拟分析[J]. 山西建筑, 2011, 37(24): 79-80.
- [20] 关秋枫, 刘文华, 陈清冰, 等. 软弱地基上大型预制场的规划与建设[J]. 中国港湾建设, 2005(增刊1): 92-95.
- [21] HAMMONS M I, SMITH D M. Early-time strength and elastic modulus of concrete with high proportions of fly ash[C]//Serviceability and Durability of Construction Materials. Virginia: ASCE, 2015.

(责任编辑 李新)