

高液限黏土的动力响应研究

吴文娟¹, 李洪利², 苏春华¹, 徐钦升¹, 张正超¹

¹山东省交通科学研究院, 山东 济南

²山东高速服务开发集团有限公司, 山东 济南

Email: wuwenjuan@sdjtky.cn

收稿日期: 2021年5月10日; 录用日期: 2021年6月11日; 发布日期: 2021年6月18日

摘要

高液限黏土是一种特殊土体, 为探究其在行车荷载作用下的动力响应, 本文采用GDS动三轴试验模拟车辆荷载作用下高液限黏土路基性能随车辆载重(动应力幅值)、循环周次、压实度、含水量以及围压(路基埋深)等条件的响应规律。结果表明: 1) 不同动应力幅值作用下, 高液限黏土存在3种响应模式, 临界动应力介于20~30 kPa之间, 试样动弹性模量随循环周次增加而逐渐减小, 并在 $N = 500$ 时趋于稳定; 2) 含水率对高液限黏土路基的动力特性影响于最为显著明显, 压实度次之, 建议将路基填筑含水率低于最优含水率2%; 3) 相同动应力幅值条件下, 固结围压越大, 高液限黏土累积应变均越小, 路基埋深越深, 动荷载对高液限黏土的影响越小。研究结果对高液限黏土路基设计具有重要参考价值。

关键词

高液限黏土, 行车荷载, 动弹性模量, 累积应变

Research on Dynamic Response of High Liquid Limit Clay

Wenjuan Wu¹, Hongli Li², Chunhua Su¹, Qinsheng Xu¹, Zhengchao Zhang¹

¹Shandong Transportation Institute, Jinan Shandong

²Shandong Hi-Speed Service Development Group Co., Ltd., Jinan Shandong

Email: wuwenjuan@sdjtky.cn

Received: May 10th, 2021; accepted: Jun. 11th, 2021; published: Jun. 18th, 2021

Abstract

High liquid limit clay is a special kind of soil. In order to investigate its dynamic response under driving load, GDS dynamic triaxial test was carried out to simulate the response of high-liquid-limit clay subgrade performance under vehicle loading with vehicle load (dynamic stress amplitude),

cycle times, compaction, water content and confining pressure (subgrade burial depth). The results show that: 1) Under the action of different dynamic stress amplitudes, there are three response modes for high liquid limit clays. The critical dynamic stress is between 20 kPa and 30 kPa. The dynamic elastic modulus of the sample gradually decreases with the increase of cycle cycles, and it tends to be stable when $N = 500$; 2) The moisture content has the most significant impact on the dynamic characteristics of the high liquid limit clay roadbed, followed by the degree of compaction. It is recommended that the water content of the roadbed filling be lower than the optimal water content of 2%; 3) Under the same dynamic stress amplitude conditions, the greater the consolidation confining pressure, the smaller the cumulative strain of the high-liquid-limit clay, the deeper the subgrade is buried, and the smaller the impact of dynamic load on the high-liquid-limit clay. The research results have important reference value for the design of high liquid limit clay roadbed.

Keywords

High Liquid Limit Clay, Driving Load, Dynamic Elastic Modulus, Cumulative Plastic Deformation

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在我国广西、云南、贵州等西南地区以及山东、河南等东部地区多数省份、自治区都分布有大量具有天然含水率高、液限高、塑性指数大的黏性土，西南等湿热地区以红黏土最为典型，东部地区主要是黄泛区冲淤积黏性土。通常，路基土在行车荷载作用下易发生沉陷和变形，然而在进行公路路基设计时路基土的动稳定性问题未给予充分考虑[1][2]。行车荷载作用下路基土的承载力和变形是路基填筑质量控制的重点之一，国内外学者针对此问题进行了一些研究。胡一峰等[3]采用以动剪应变参数为基础的方法对德国纽伦堡第三纪沉积黏土的长期动稳定性进行了分析，并利用共振柱试验确定了是否对土体进行换填以及确定换填深度依据的长期动稳定性指标；Okur D V 等[4]进行了大量的动三轴试验，认为应将塑性指数和围压结合起来共同判定累积变形的发展；Gibel 等[5]为分析交通荷载对土累积变形的影响，提出用交通荷载特征和土体强度特性的关联函数进行分析的方法；Abedelkrim 等[6]在 Gibel 的研究基础上考虑了残余应力对累积变形的影响。与普通黏性土相比，高液限黏土难失水，难压实，强度低[7][8][9]，动荷载作用下表现出不同与普通黏土的动力特性。国内学者对高液限土的研究主要在路基模量和施工特性上，龙滔[10]等进行了掺砂条件下湖区黏土的工程特性研究，蒋红光等[11][12]针对黄泛区高液限黏土的模量特性及压实标准开展了研究，刘先林等[13]分析了高液限黏土的沉降特性，张军辉[14]探讨了湿热地区路基检测方法，崔宏环等[15]围绕高液限黏土沉降特性开展了研究，但较少关注高液限黏土动力特性。

本文以广西高液限黏土为研究对象，采用 GDS 动三轴试验，模拟车辆荷载作用下高液限黏土路基性能随车辆载重(动应力幅值)、循环周次、压实度、含水量、围压(路基埋深)等条件的变化规律，为丰富高液限黏土填筑路基设计的动参数体系提供可靠的科学参考。

2. 试验土样与方案

2.1. 土样的基本物理性质

试验土样取自广西南宁武宁县境内。参照《公路土工试验规程》(JTG E40-2007)[16]，测得土的基本物理性质如下表 1 所示。

Table 1. Index of physical properties of soil**表 1.** 土的物理性质指标

比重	天然含水率/%	液限/%	塑限/%	塑性指数	最优含水率/%	最大干密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	自由膨胀率/%
2.82	44.1	55.9	29.1	26.8	24.6%	1.60	32.6

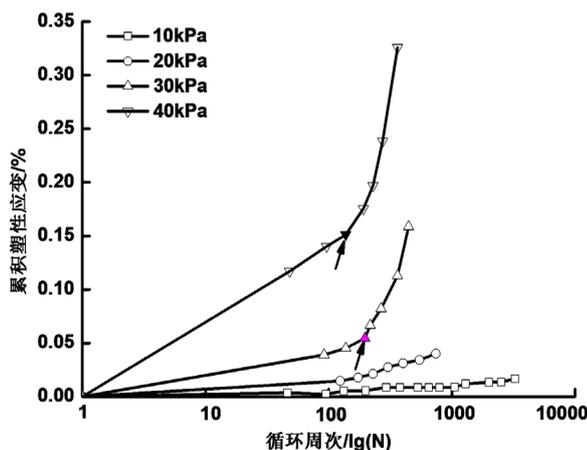
2.2. 试验方案

利用 GDS 动三轴试验设备, 循环荷载为正弦波形; 采用湿法制备、静压法成型重塑试验试样, 施加荷载主要考虑车辆载重(应力幅值)、围压(路基埋深)以及压实度、含水量、循环周次等条件的影响, 设计工况试验情况如下: 1) 规范中规定路基施工含水率控制为最优含水率 $\pm 2\%$, 本文试验含水率依次取 22.6%、24.6% 和 26.6%; 2) 规范规定路床压实度为不低于 94%, 考虑到现场施工的变异性, 试验压实度分别取 92%、94% 和 96%; 3) 考虑 10 m 以内的路基埋深, 试验设计围压分别为 50、100 和 150 kPa; 4) 考虑不同车辆载重对路基的影响, 分别设计 10、20、30 和 40 kPa 的动应力幅值。

3. 试验结果与分析

3.1. 临界动应力

图 1 表示的是压实度 96% 的饱和高液限黏土样在 50 kPa 围压、1 Hz 振动频率条件下, 不同动应力幅值 (10 kPa、20 kPa、30 kPa 和 40 kPa) 累计应变随循环周次的变化曲线。从图 1 可见, 动应力幅值较小 (10 kPa) 时, 试样累积塑性应变随循环周次线性增加, 但增幅较缓, 这表明当应力幅值较低时, 试样处于逐渐压密过程。当加载到一定循环周次后, 可认为试样已趋于应变稳定状态, 此类曲线称之为“稳定型”曲线。

**Figure 1.** Cumulative plastic strain change curve with cycle times**图 1.** 累积塑性应变随循环周次变化曲线

当应力幅值较大 (30 kPa、40 kPa) 时, 振动一开始, 试样的应变就随循环周次的增加而明显增大, 且应力幅值越大, 应变增长速率越快, 当循环振动到 200 次时, 曲线斜率陡增, 这表明试样土体内部变形由初始压密迅速向塑性损伤转变, 直至试样发生破坏为止, 此类曲线称为“破坏型”曲线。动应力幅值介于 10~30 kPa 时, 应变随循环周次曲线变化规律介于前述两种情况之间, 这表明试样由应变稳定向塑性破坏转变时, 存在某一临界应力幅值, 初步可知该值处于 10~30 kPa, 该类曲线称之为“过渡型”曲线。

不同动应力幅值条件下高液限黏土试样的动弹性模量随循环振动周次的变化规律如图 2 所示。

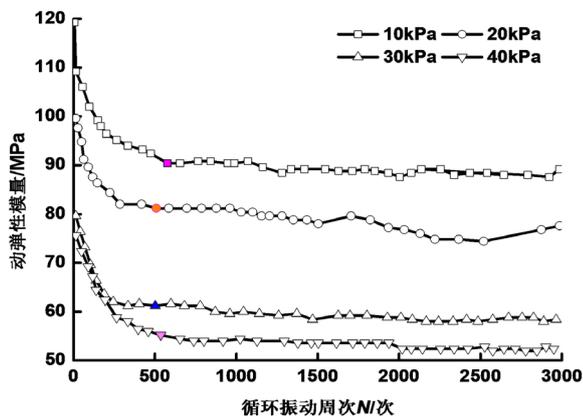


Figure 2. Dynamic elastic modulus change curve with cycle times
图 2. 动弹性模量随循环周次变化曲线

由图 2 可知, 当应力幅值一定时, 动弹性模量逐渐降低至某一稳定值。当应力幅值为 10 kPa、20 kPa 时, 试样稳定动弹性模量在 80~90 MPa 之间, 远大于动应力幅值为 30、40 kPa 对应的稳定值(50~60 MPa), 动弹性模量是土体在循环荷载作用下抵抗变形的综合反映。由此可进一步认定, 试样临界动应力幅值在 20~30 kPa 之间。此外, 动弹性模量达到稳定值所需的震动周次与应力幅值变化关系不大, 基本在 $N = 500$ 时变化趋于稳定, 路基土体在各试验动应力幅值内均能保持动态稳定。此外, 试样动弹性模量与在相同的循环周次下, 动应力幅值越大, 高液限黏土的动弹性模量越小, 动应力幅值从 10 kPa 提高到 40 kPa, 动弹性模量稳定值从 90 MPa 左右降至 50 MPa 左右, 降幅达到了 45%以上。

3.2. 压实度的影响

图 3 是不同压实度下试样累积应变随循环周次变化关系曲线。当压实度小于 96%时, 应变发展曲线可分为应变激增及应变稳定两个阶段, 当压实度等于 96%时, 应变随循环周次基本呈线性增长, 且在振次 $N = 3000$ 次时累积应变仅为压实度为 90%累积应变的 45%。图 4 是进一步体现了不同振次下累积应变随压实度变化曲线。由图 4 可知, 密实度为 90%时, 累积塑性应变受振动周次和压实度的双重影响, 当压实度增至 96%时, 不同振次下累积应变幅值较低且变化较小, 以压实度控制为主。不同压实度下试样动弹性模量随循环周次变化曲线如图 5 所示。在相同的动应力幅值、振动次数条件下, 试样的动弹性模量随着压实度的提高而增大, 压实度从 90%提高到 96%, 试样动弹性模量稳定值提高了约 40%。

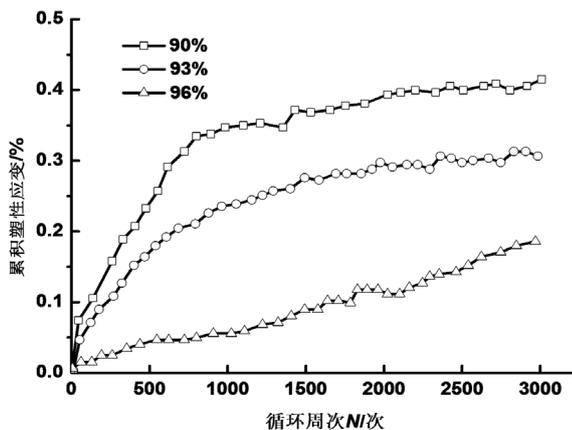


Figure 3. Development law of cumulative plastic deformation with different compaction degrees
图 3. 不同压实度土样累积塑性变形发展规律

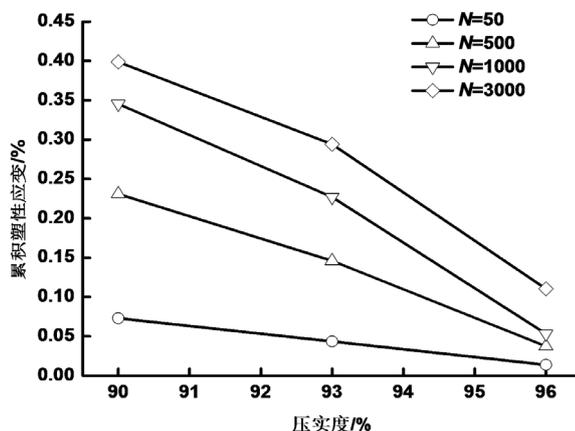


Figure 4. Cumulative plastic strain changes with the degree of compaction

图 4. 累积塑性应变随压实度变化规律

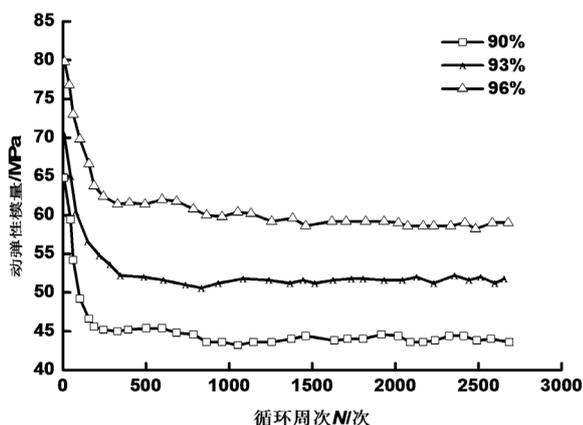


Figure 5. Dynamic modulus of elasticity changes with the degree of compaction

图 5. 动弹性模量随压实度变化规律

由此可见，路基变形特性及动弹性模量对压实度变化非常敏感，因此，在路基填筑过程中，为减小在交通荷载作用下累积塑性变形对路基带来的不利影响，应严格控制路基压实度(压实度不应小于 96%)。

3.3. 含水率的影响

含水率是高液限黏土路基动力特性的重要影响因素。图 6 给出的是围压 50 kPa、动应力幅值 30 kPa、振动频率 1 Hz 条件下含水率为 22.6%、24.6%和 26.6%试样的累积塑性变形随振动循环周次的变化规律，由图可知，当含水率为 22.6% (低于最优含水率 2 个百分点)，累积应变稳定值仅为含水率为 26.6% (高于最优含水率 2 个百分点)的 10%左右，而稳定动弹性模量增长了 140% (图 7 所示)，图 8 反映了不同振次下累积应变与含水率的变化规律，含水率较低时，累积应变随振次变化幅度不大，且应变幅值较小，表明含水率较低时试样在循环荷载作用下的稳定性更高。随着含水率增大，试样累积应变受振次与含水率的双重控制。

在实际路基填筑过程中，含水率对压实质量具有很大影响，现行规范一般要求填筑含水率应控制在最优含水率 2%上下范围内。由本文试验结果可知，试样动弹性模量及累积应变对含水率变化十分敏感，且在含水率为 22.6%时路基填筑效果最优，因此，建议高液限黏土路基填筑时的含水率低于最优含水率两个百分点。

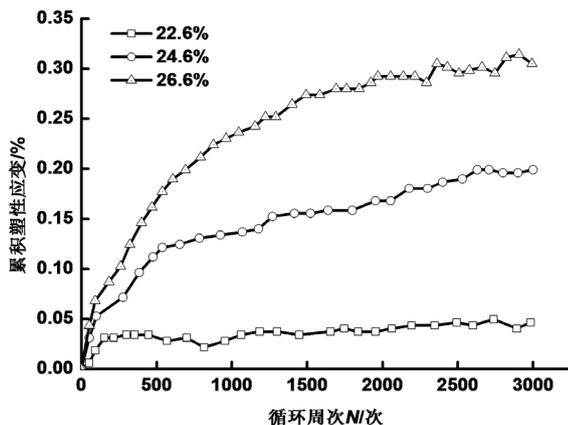


Figure 6. Change of cumulative plastic strain with cycle times
图 6. 累积塑性应变随循环周次的变化

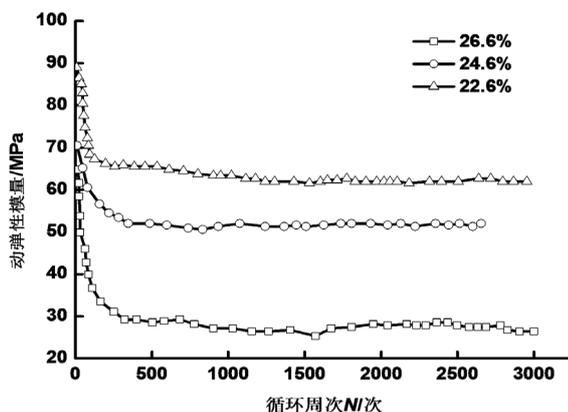


Figure 7. Dynamic elastic modulus of different moisture content changes with cycle times
图 7. 不同含水率的动弹性模量随循环周次的变化

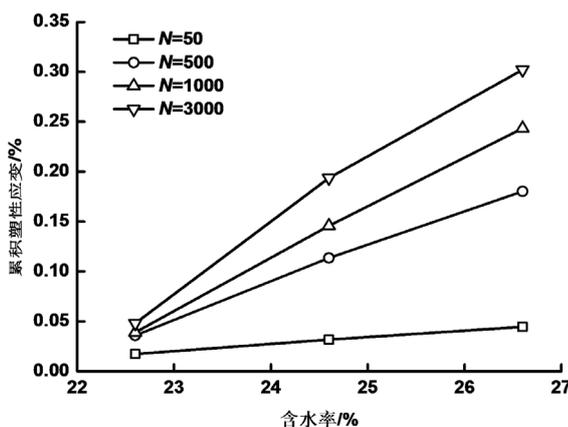


Figure 8. Change of cumulative plastic strain with water content
图 8. 累计塑性应变随含水率的变化情况

3.4. 围压的影响

实际工程中，土体所受的围压随所处地层深度的变化而变化，因此考虑围压对土体动力特性的影响尤为重要，尤其对于高填方路基[17] [18]。对不同围压条件下的土样进行振动次数 3000 次条件下的循环加载

试验, 得到高液限黏土试样的累积塑性应变随围压的发展规律如图 9 所示。可以看出, 随着围压的增加, 双幅应变和累积塑性应变均很明显的减小, 至围压 100 kPa 已经衰减至很小值, 而且围压 150 kPa 条件下, 不同振动次数的双幅应变和累积塑性应变均逐渐趋于稳定值。围压 100 kPa 大致相当于埋深 4~5 m 的路基土体所处的应力状态。因此, 在实际设计和施工过程中, 埋深超过 4 m 的路基土体可以不考虑动荷载对其影响。

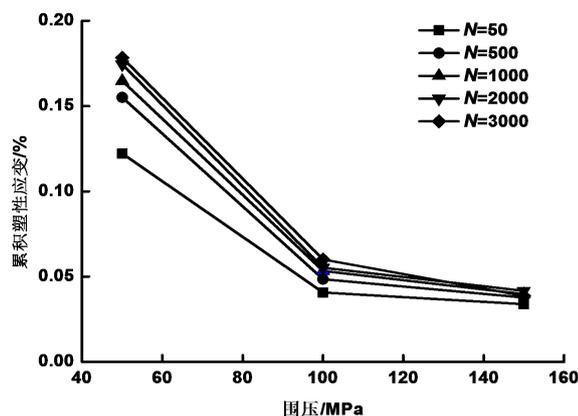


Figure 9. The relationship between cumulative plastic strain and confining pressure
图 9. 累积塑性应变与围压的关系曲线

4. 结论

通过室内试验开展高液限黏土的动力特性研究, 主要结论如下:

1) 试验表明该区域高液限黏土的临界动应力为 20~30 kPa。当循环动应力幅值小于临界动应力时, 随着循环周次的增加, 试样的变形会趋于稳定状态; 当循环动应力大于临界动应力时, 随着循环周次的增加, 试样最终达到破坏状态。高液限黏土动弹性模量随动应力幅值增大逐渐减小, 随循环周次增加逐渐减小, 在循环周次 $N = 500$ 时趋于稳定。

2) 含水率对高液限黏土的动力稳定性影响最为显著。高液限黏土路基填筑时应将含水率控制在最优含水率以下 2% 范围内。

3) 相同动应力幅值条件下, 固结围压越大, 高液限黏土的累积塑性应变均越小, 围压从 50 kPa 增至 100 kPa 后试样的累积塑性应变已经衰减至很小。

参考文献

- [1] 王林峰, 田耘, 曾彪, 等. 高液限红黏土的压实特性与路基填筑方案[J]. 材料导报, 2019, 33(10): 1666-1670.
- [2] 吴立坚, 钟发林, 吴昌兴, 等. 高液限土路基填筑技术研究[J]. 中国公路学报, 2003, 16(1): 32-35.
- [3] 胡一峰, 李怒放. 高速铁路无砟轨道路基设计原理[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2010.
- [4] Okur, D.V. and Ansal, A. (2007) Stiffness Degradation of Natural Fine Grained Soils during Cyclic Loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27, 843-854. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2007.01.005>
- [5] Gidel, G., Bresse, D. and Hornych, P. (2001) A New Approach for Investigating the Permanent Deformation Behavior of Unbound Granular Material Using the Repeated Load Triaxial Apparatus. *Bulletin Des Laboratoires Des Ponts et Chaussees*, 233, 5-21.
- [6] Abdelkrim, M., de Buhan, P., et al. (2006) A General Method for Calculating the Traffic Load-Induced Residual Settlement of a Platform, Based on a Structural Analysis Approach. *Soils and Foundations*, 46, 401-414. <https://doi.org/10.3208/sandf.46.401>
- [7] 蒋文字. 广西红黏土土质特征及土性改良研究[D]: [博士学位论文]. 南宁: 广西大学, 2015.

- [8] 张磊. 南方湿热地区高液限黏土永久变形预估研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 长沙理工大学, 2016.
- [9] 周雄, 胡海波. 干湿循环作用下高液限黏土抗剪强度试验研究[J]. 公路工程, 2014, 39(5): 352-355.
- [10] 龙滔, 石婧. 掺砂对于湖区路基黏土工程性质的影响研究[J]. 中外公路, 2019, 39(1): 19-33.
- [11] 蒋红光, 陈思涵, 孙辉, 等. 黄泛区中高液限黏土动、静态回弹模量及预估模型研究[J]. 中国公路学报, 2020, 33(10): 1-12.
- [12] 蒋红光, 曹让, 马晓燕, 等. 考虑持水能力的黄泛区高液限黏土路用压实标准[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2019, 46(11): 154-163.
- [13] 刘先林, 骆俊晖, 米德才. 广西花岗岩软土地基沉降预测及承载力评价[J]. 中外公路, 2020, 40(4): 25-28.
- [14] 张军辉, 邓宗煌, 刘杰. 南方湿热地区既有路基快速检测方法研究[J]. 中外公路, 2019, 39(6): 6-10.
- [15] 崔宏环, 王志阳. 冲积扇粉质黏土路基在交通荷载作用下的沉降变形影响因素分析[J]. 中外公路, 2018, 38(5): 1-7.
- [16] 交通部公路科学研究院. 公路土工试验规程 JTG E40-2007 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [17] 张勇. 武汉软粘土的变形特征与循环荷载动力响应研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所), 2008.
- [18] 张思远. 长沙绕城高速公路路基动力特性及动态施工控制指标研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 长沙理工大学, 2015.