

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2015.09.015

复合锚杆隔离桩隔离技术的理论与实践

张怀静¹, 高永涛²

(1. 北京建筑大学, 北京 100044; 2. 北京科技大学, 北京 100083)

摘要:通过对发明的“复合锚杆隔离桩”技术在北京地铁国贸桥站建设过程中首次应用的全过程进行了系统的回顾与总结,从理论和实践两方面对该项技术进行了探讨。研究表明:(1)复合锚杆桩在垂直方向上又不受力,其连成一片则发挥了隔离墙的作用;(2)锚杆桩体与注浆加固后的桩周土结合成一体,保证了原桥桩摩阻力不受损失,提高了隧道开挖体的稳定性;(3)高压注浆与锚杆安装工艺的结合,使桩侧及桩端阻力、土层承载力及变形模量等得到了提高,形成的隔离桩墙具有较高的侧向承载能力。

关键词:隧道工程;复合锚杆隔离桩;基础隔离;地铁开挖;既有结构

中图分类号:U455.41⁺1

文献标识码:A

文章编号:1002-0268(2015)09-0092-06

Theory and Practice on Isolation Technique of Multi-anchor Isolation Pile

ZHANG Huai-jing¹, GAO Yong-tao²

(1. Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China;

2. University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The overall process of the first application of “multi-anchor isolation pile” technique in Beijing subway construction at World Trade Center bridge station is systematic reviewed and summarized. Simultaneously, this technique is deeply discussed from the aspects of theory and practice. The research result shows that (1) multi-anchor pile does not bear force in vertical direction, while their assemblies can play a role as isolation wall; (2) the soil around pile is integrated into a whole system by reinforcement of anchor pile and grouting, subsequently it preserved the frictional resistance of original bridge pile and increased the stability of excavation tunnel; (3) the combination of high-pressure grouting and installation technology of anchor increased the resistances of side and pile end, soil bearing capacity and soil deformation modulus. The formative isolation pile and wall possess relatively high side bearing capacity.

Key words: tunnel engineering; multi-anchor isolation pile; base isolation; subway excavation; existed structure

0 引言

随着城市地铁类地下工程在我国的大量修建和快速发展,开挖空间与邻近结构物之间的有效隔离渐成一项重大的技术难题^[1-8],尤其是当开挖空间与既有结构物距离过近,而采用传统隔离方案施工空间又不够的特殊情况下,问题则更为复杂。

北京地铁10号线国贸站在建设过程中即遇到了

两条换乘通道的开挖与既有国贸桥基础的隔离难题,由于传统方案难以实施,工程一度被迫停工。2005年11月,受铁道部第三勘察设计院和施工单位的委托,我们承接了该项目,提出了“复合锚杆隔离桩”的隔离方案,成功实现了开挖空间与原桥桩的加固隔离。

时光已过10年,复合锚杆隔离桩技术已经推广应用至北京乃至全国50多项地铁工程项目,成为国

收稿日期:2015-04-07

作者简介:张怀静(1962-),女,北京人,博士,教授。(zhanghuaijing@bucea.edu.cn)

内地下工程开挖与既有结构物隔离的首选技术^[9-10]。本文正是结合这项技术在北京地铁国贸桥站建设过程中首次应用的全过程进行了系统的回顾与总结,从理论和实践两方面对该项技术进行了深入探讨。

1 工程背景与难题

1.1 工程背景

国贸桥是北京东三环路的特大枢纽桥,而地铁国贸站又是地铁10号线的最大枢纽站,在其两条换乘通道的开挖过程中遇到了严重困难,工程一度被迫停顿,原因是:

(1) 换乘通道需从国贸主桥1~3号桥桩间穿过,开挖边线距桥桩最近处只有1.45 m,见图1。

(2) 更为严重的是,换乘通道的开挖深度大于原桥桩的深度。隧道的开挖必然导致上部土体沉降,进而降低桥桩的摩阻力,如不采取有效的隔离手段,就有可能酿成国贸桥主体下沉甚至倒塌的严重后果。

鉴于上述问题的存在,北京市地铁10号线建设指挥部将地铁国贸桥站定为地铁建设一级风险源,

并确定在换乘通道开挖之前,必须采取有效措施对开挖空间与原桥桩进行隔离,绝对确保原桥桩本身的稳定以及开挖施工过程的安全。

本工程地铁隧道采用浅埋暗挖施工方法,隧道断面高为7.76 m,宽为5.80 m,开挖后采用管片衬砌支护。根据工程地质勘察报告提供的地层资料,本次勘探深度42.00 m范围内的土层主要为第四纪沉积层,按照岩性、工程性质指标从上至下划分为5层,各个土层的基本岩性特征见表1。地下水稳定水位埋深为24.00~24.30 m,年变幅1~2 m。

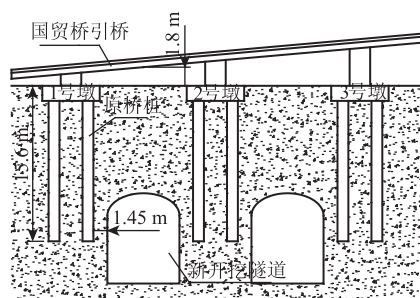


图1 开挖空间与原桥桩关系

Fig. 1 Relation between excavation space and original bridge pile

表1 土层工程地质特征及物理参数

Tab. 1 Engineering geological characteristics and physical parameters of soil

序号	土层名称	土层性状	层厚/m	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力/kPa	摩擦角/($^{\circ}$)	泊松比	变形模量/MPa
1	杂填土	杂色-黄褐-褐黄色	5.50	1 850	10.0	10.0	0.35	15.0
2	粉土填土	褐黄,低-中低压缩性	3.00	1 950	20.0	20.0	0.33	20.0
3	细砂-粉砂	褐黄-杂色,低压缩性	6.50	2 000	0.0	20.0	0.25	45.0
4	黏质粉土	褐黄,低-中低压缩性	3.00	2 050	21.5	25.5	0.31	40.0
5	细砂-中砂	褐黄-杂色,低压缩性	8.50	2 015	0.0	28.0	0.24	55.0

1.2 工程难题

然而,传统的隔离方案需在原桩基四周打一圈钢板桩或做灌注桩等进行隔离,但这些方案在此时此地却难以实施:

(1) 没有足够的施工空间,桥下施工净空高度局部不足2 m,无法架设常规的成桩设备。

(2) 工程范围内有一砾卵石层和粉砂层,稳定性较差,打常规隔离桩会造成原土层结构被扰动,进而导致原桥桩摩阻力下降。

(3) 传统的常规方案施工工期长,费用高。

欲彻底消除既有风险源,实现开挖空间与原桥桩之间安全有效的隔离,必须打破常规,另辟蹊径,本文在这个过程中做了成功的探索。

2 基本方案

2.1 方案要点

锚杆隔离桩布置图如图2所示,施工方案要点^[11-12]如下:

(1) 桥墩基础周围垂直钻凿两排 $\phi 150$ mm的钻孔,插入钢筋,注浆后形成锚杆桩,桩与桩之间通过注浆连为整体,在原桥桩周围形成一道隔离围墙。

(2) 每根锚杆桩长21.6 m(超过开挖空间底板2.5 m),间距1 000 mm,内外排间距800 mm,呈梅花形布置。

(3) 通过预埋管在锚杆桩安装的同时进行分层多次高压注浆。

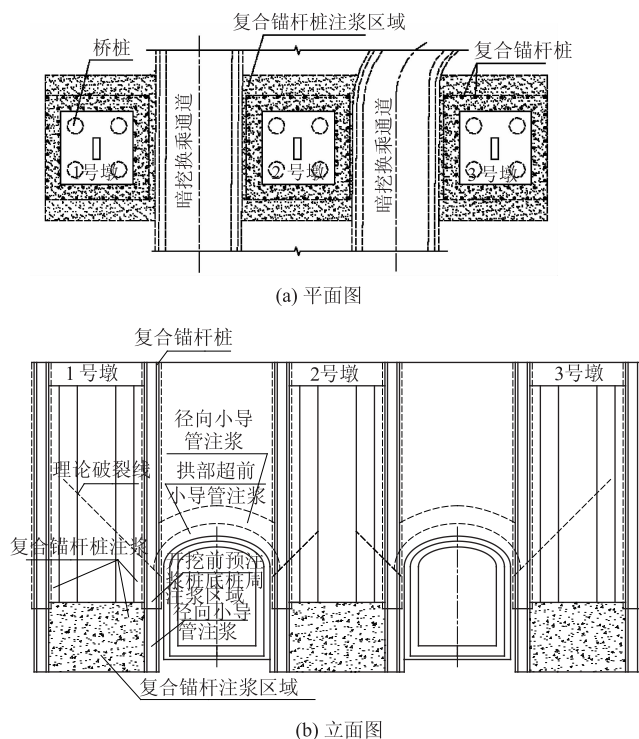


图2 锚杆隔离桩布置图

Fig. 2 Layout elevation view of anchor isolation piles

该方案最大优点是,施工机械体积小,最低施工净空 1.0 m 左右,可以满足最苛刻的施工条件。

2.2 桩体结构与施工工艺

所谓锚杆桩就是将常规锚杆垂直打下,作为桩来使用,但此处的锚杆已经不是常规意义上的锚杆,它不需要承载纵向荷载,但它要承担抑制土体侧向变形和原土体增强改性的双重任务:(1)在锚杆安装过程中要实施分层多次高压注浆;(2)需要采用特殊的锚杆结构;(3)需要采用特殊的施工工艺。

2.2.1 桩体结构

锚杆体由 3 根 $\phi 20$ 螺纹钢构成,见图 3,中间每隔 1 000 mm 安装一个隔离环作定位支撑。

2.2.2 安装工艺

(1)成孔后,一次性将加工好的锚杆分段连接,一次性插至孔底。

(2)锚杆安装完成后,即实行分层多次高压注浆,浆液水灰比为 0.5:1,分 3 次完成,见图 4。

第 1 次注浆,采用常压注浆,以孔口溢浆为准;第 2 次注浆,采用中高压注浆,在第 1 次注浆完成后 18~20 h 内进行,注浆压力为 1.0~1.5 MPa;第 3 次注浆,在第 2 次注浆完成后 5~10 h 内进行,注浆压力为 1.5~2.0 MPa。

2.3 方案要求

(1)锚杆的布置参数要根据工程的对象来具体

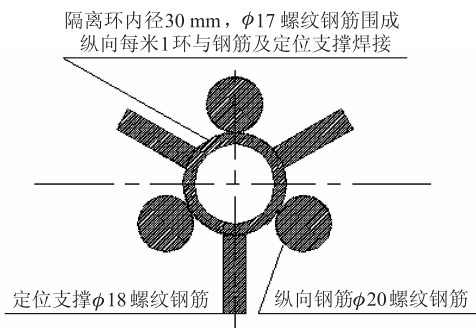


图3 复合锚杆桩截面大样

Fig. 3 Section detail drawing of multi-anchor pile

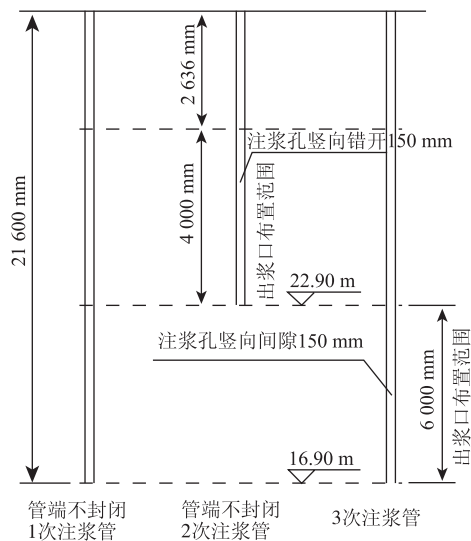


图4 复合锚杆桩注浆管示意图

Fig. 4 Schematic diagram of grouting pipe of multi-anchor pile

确定,基本原则是:锚杆深度至少超过开挖空间底部 2.0 m 以上,桩间距则根据注浆最小扩散半径确定。

(2)注浆是该技术能否成功的关键环节,高质量的注浆不仅可以分散孤立的锚杆桩个体连为整体,更重要的是通过浆液的有效扩散加固了拟开挖的岩土体,反过来又间接增加了拟隔离的原桥桩本身的稳定。

3 理论计算

3.1 建立计算模型

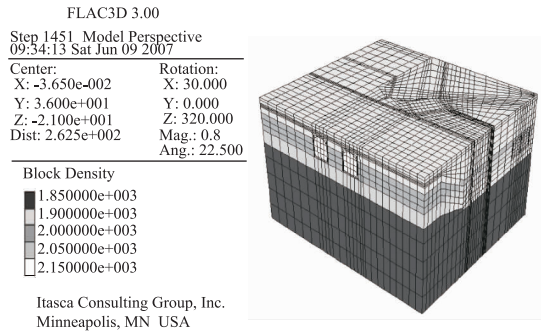
3.1.1 建模依据

以《北京地铁 10 号线一期(含奥运支线)第 7 标段国贸站“换乘通道风险源专项设计”施工设计文件》及相关说明提供的基础勘察数据、原国贸桥设计资料为计算依据。

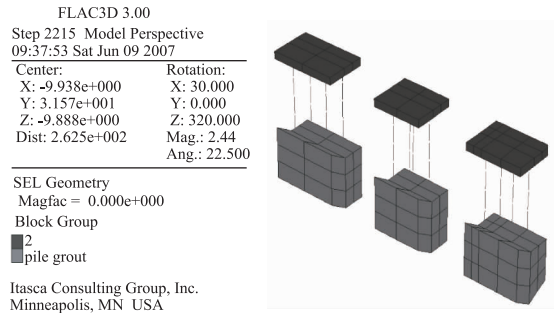
3.1.2 计算网格划分

考虑到尺寸效应引起的计算误差, 计算边界取: 左右边界为3倍隧道开挖宽度, 前后边界为以桥桩为中心的3倍隧道开挖宽度, 下边界为3倍隧道开挖宽度, 上边界到地表。最后确定为左右34.4 m, 下边界32.0 m; 整个模型高50.0 m, 宽80.0 m, 长72.0 m。整体模型网格划分如图5(a)所示。

采用三维弹塑性有限差分法进行模拟计算。主体划分成 brick 体, 本构模型选取 Mohr-Coulomb 模型, 土层类型及计算参数见表1。衬砌及临时支撑采用 shell 结构单元模拟, 桩采用 pile 结构单元模拟, shell、pile 等结构单元的计算参数见表2。整个模型共20 336个网格, 22 575个网格点, 3 824个结构单元, 1 717个节点。桥桩及桥墩如图5(b)所示。



(a) 整体模型网格划分图



(b) 桥基及桩加固区划分

图5 数值计算模型

Fig. 5 Numerical calculation model

表2 结构单元计算参数

Tab. 2 Calculation parameters of structure element

结构单元	弹性模量/MPa	泊松比	重度/(kN·m ⁻³)
衬砌	23 000	0.20	25

结构单元	黏结强度/(kN·m)	法向刚度/(kN·m ⁻²)	切向刚度/(kN·m ⁻²)
锚杆桩	4e8	2e9	2e7

3.2 典型工况划分

根据工程的进程, 划分了5种典型工况, 见表3。

表3 典型工况的划分

Tab. 3 Division of typical working conditions

工况序号	工况说明
1	复合注浆锚杆桩施工完毕
2	左侧1、2号导洞开挖、支护完毕
3	左侧3、4号导洞开挖、支护完毕
4	右侧1、2号导洞开挖、支护完毕
5	右侧3、4号导洞开挖、支护完毕

3.3 计算结果分析

3.3.1 地表及桩体沉降量

图6表示在不同工况下, 各相邻原桥桩的沉降量, 结果表明: 复合锚杆隔离桩施工完成后, 相邻桥桩的最大沉降量不足15 mm。

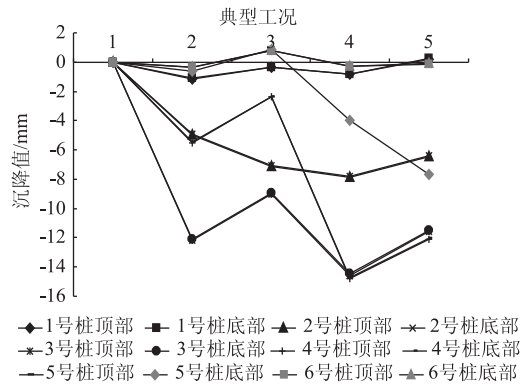


图6 桥基沉降随典型施工工况的变化

Fig. 6 Bridge base subsidence varying with typical working condition

表4对相应桥桩的差异沉降量进行了归纳, 结果表明复合锚杆隔离桩施工完成后, 相邻原桥桩的最大差异沉降量不足1 mm, 几乎可以忽略, 这说明, 即使在极端情况下, 地铁开挖过程中不会由于产生差异沉降而引起原桥桩的破坏, 同时也证明了复合锚杆隔离桩的采用, 在实现隔离功能的同时, 也实现了对原桩边土体的均匀加固。

表4 各工况下桩顶、底差异沉降量 (单位: mm)

Tab. 4 Discrepant subsidence of pile top and bottom under different working conditions (unit: mm)

工况	典型工况 2	典型工况 3	典型工况 4	典型工况 5
1号桩顶	-1.128	-0.378 9	-0.852 6	0.214 7
1号桩底	-1.104	-0.323 6	-0.796 6	0.269
差异沉降	-0.024	-0.055 3	-0.056	-0.054 3
2号桩顶	-4.994	-7.122	-7.863	-6.468
2号桩底	-4.919	-7.079	-7.815	-6.421
差异沉降	-0.075	-0.043	-0.048	-0.047
3号桩顶	-12.16	-9.019	-14.56	-11.59
3号桩底	-12.12	-8.98	-14.47	-11.5
差异沉降	-0.04	-0.039	-0.09	-0.09

3.3.2 原桥桩摩阻力的变化分析

按照桩周摩阻力及接触力计算原理^[8], 采用 FLAC 内置语言编译 fish 函数, 计算获得的桩周摩擦力、接触压力极值如表 5 所示。由表 5 可知, 桩周摩擦力最大值为 78.50 kPa (1 号桩), 出现在距桩顶 12.69 m 处, 变化幅度不大; 桩周接触压力最大值为 74.80 kPa (2 号桩), 出现在距桩顶 4.23 m 处。各典型工况中桩周摩擦力和桩周接触压力沿桩身分布大体相同。这说明, 复合锚杆桩能有效控制原桥桩基摩擦力的损失并维持在较高水平, 这对维持原桥桩的稳定至关重要。

表 5 桩周摩擦力和桩周接触压力极值

Tab. 5 Extremums of frictional force and contact pressure around pile

桩编号	桩周摩擦力 P_{ss}		桩周接触压力 P_{ns}	
	最大值/kPa	位置/m	最大值/kPa	位置/m
1	78.50	12.69	50.40	2.82
2	71.50	12.69	74.80	4.23
3	77.10	12.69	55.30	5.64
4	77.70	12.69	50.70	5.64
5	70.80	12.69	78.30	4.23
6	77.00	12.69	53.50	2.82

注: 表中位置是距桩顶的距离

4 工程施工

2006 年初, 开始按设计要求进行施工 (图 7), 施工过程中, 克服了成孔困难、注浆压力难以控制等一系列技术难题, 历时一个半月, 完成了复合锚杆隔离桩的全部施工任务。



图 7 施工现场

Fig. 7 Construction site

此后, 又经过了近半年的开挖施工, 两条人行通道顺利开挖通过了原桥桩段, 监测结果表明, 桥桩总体沉降量最大值低于 3 mm, 没有出现明显的位移变形; 由于复合锚杆隔离桩施工过程中实施了高压注浆, 原来的不稳定土层得到整体改性, 两条人行通道在整个开挖过程中, 安全顺利, 地表沉降最

大值仅 11.5 mm, 远远低于设计规定的 30.0 mm 的地表沉降控制标准。

5 结论

复合锚杆隔离桩技术作为一项崭新的技术, 从诞生之日即取得了圆满成功, 其后又在全国开花结果, 显现出其强大的生命力。它是锚杆又非锚杆, 是桩又非桩, 是桩-锚-注(浆)的有机结合体, 具有不同于一般的桩和锚的特殊作用机理:

(1) 复合锚杆桩集成了锚杆桩和压力注浆方法的优点, 是建立在现代桩基基础理论上的一种新的桥基加固隔离方法, 作为桩它在垂直方向上又不受力, 其连成一片则发挥了隔离墙的作用。

(2) 锚杆桩体与注浆加固后的桩周土结合成一体, 既保证了原桥桩摩阻力不受损失, 又提高了隧道开挖体的稳定性, 进一步保证了开挖施工过程的安全, 超出了常规工程隔离桩单纯的隔离作用。

(3) 高压注浆与锚杆安装工艺的结合, 使桩侧及桩端阻力、土层承载力及变形模量等得到了提高, 形成的隔离桩墙具有较高的侧向承载能力, 不仅稳定了原桥桩本身, 而且还有效抑制了由于通道开挖而引起地表沉降。

(4) 仅就地铁开挖隧道与既有结构物的隔离来说, 复合锚杆隔离桩技术可以适应各种苛刻的施工限制, 且工期更省, 施工成本更低廉。

参考文献:

References:

- [1] 张志强, 何川. 地铁盾构隧道近接桩基的施工力学行为研究 [J]. 铁道学报, 2003, 25 (1): 92-95.
ZHANG Zhi-qiang, HE Chuan. Research on Mechanics Behaviors of a Shield Tunnel Construction in Metro Adjacent to Existing Pile Foundation [J]. Journal of the China Railway Society, 2003, 25 (1): 92-95.
- [2] 林刚, 何川. 盾构隧道基础上修建三连拱地铁车站结构参数研究 [J]. 铁道学报, 2003, 25 (6): 93-98.
LIN Gang, HE Chuan. Study on Structural Parameters of the Three-arch Metro Station Built on the Basis of Shield Tunnels [J]. Journal of the China Railway Society, 2003, 25 (6): 93-98.
- [3] 李强, 王明年, 李德才, 等. 地铁车站暗挖隧道施工对既有桩基的影响 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25 (1): 184-190.
LI Qiang, WANG Ming-nian, LI De-cai, et al. Effects of Sub Surface Construction of Metro Station Tunnel on Existing Pile Foundation [J]. Chinese Journal of Rock

- Mechanics and Engineering, 2006, 25 (1): 184-190.
- [4] 关宝树. 隧道工程施工要点集 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- GUAN Bao-shu. Experience of Tunneling Construction [M]. Beijing: China Communications Press, 2003.
- [5] 李强, 王明年. 浅埋隧道近接施工地表沉降有限元分析 [J]. 四川建筑, 2004, 24 (1): 98-101.
- LI Qiang, WANG Ming-nian. FE Analysis on Grout Surface Settlement of Shallow Buried Tunnel [J]. Sichuan Architecture, 2004, 24 (1): 98-101.
- [6] 李围, 何川. 盾构隧道基础上修建三条平行隧道地铁车站的施工力学行为研究 [J]. 现代隧道技术, 2004, 41 (1): 5-9.
- LI WEI, HE Chuan. Study on the Mechanical Behavior of a Metro Station With Three Parallel Tubes Based on Shield Tunnel [J]. Modern Tunnelling Technology, 2004, 41 (1): 5-9.
- [7] 彭卫平, 廖建三. 广州地区建筑桩基设计参数分析与选取 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23 (6): 1032-1036.
- PENG Wei-ping, LIAO Jian-san. Analysis and Selection of Building Pile Design Parameter in Guangzhou [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23 (6): 1032-1036.
- [8] 张素情, 侍倩. 桩侧负摩阻力的有关研究 [J]. 建筑技术开发, 2004, 31 (4): 23-25.
- ZHANG Su-qing, SHI Qian. Study on the Negative Skin Friction of Pile Shaft [J]. Building Technique Development, 2004, 31 (4): 23-25.
- [9] 高永涛, 张怀静, 吴顺川, 等. 失稳坡间桥台基础的加固 [J]. 北京科技大学学报, 2006, 28 (2): 104-107.
- GAO Yong-tao, ZHANG Huai-jing, WU Shun-chuan, et al. Reinforcement of an Unstable Abutment-slope [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2006, 28 (2): 104-107.
- [10] 高永涛, 张怀静, 孙金海, 等. 高填方路基单纯侧滑失稳治理的理论研究及工程应用 [J]. 公路交通科技, 2004, 21 (9): 9-12.
- GAO Yong-tao, ZHANG Huai-jing, SUN Jin-hai, et al. Theoretical Study on Treatment of Side Slope in High Filled Road Subgrade and Its Application in Engineering [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21 (9): 9-12.
- [11] TBJ108—92, 铁路隧道喷锚构筑法技术规则 [S].
- TBJ108—92, Technical Regulation for Shotcrete-bolt Construction Method of Railway Tunnel [S].
- [12] TB10003—2004, 铁路隧道设计规范 [S].
- TB10003—2004, Code for Design on Tunnel of Railway [S].
- +++++
- (上接第91页)
- [7] 彭晖, 王博. CFRP-混凝土界面粘结的疲劳性能试验研究 [J]. 实验力学, 2014, 29 (2): 189-199.
- PENG Hui, WANG Bo. Experimental Study of CFRP-concrete Interfacial Bonding Fatigue Behavior [J]. Journal of experimental mechanics, 2014, 29 (2): 189-199.
- [8] BAZANT Z P, CANER F C, CAROL I, et al. Microplane Model M4 for Concrete. I: Formulation with Work-conjugate Deviatoric Stress [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2000, 126 (9): 944-953.
- [9] 李杰, 吴建营. 混凝土弹塑性损伤本构模型研究 I: 基本公式 [J]. 土木工程学报, 2006, 38 (9): 14-20.
- LI Jie, WU Jian-ying. Elastoplastic Damage Constitutive Model for Concrete Based on Damage Energy Release Rates, Part I: Basic Formulations [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 38 (9): 14-20.
- [10] FARJA R, OLIVER J, CERVERA M. A Strain-Based Biscous-plastic-damage Model for Massive Concrete Structures [J]. International Journal of Solids and Structures, 1998, 35 (14): 1533-1558.
- [11] NEUBAUER U, ROSTASY F S. Bond Failure of Concrete Fiber Reinforced Polymer Plates at Inclined Cracks-experiments and Fracture Mechanics Model [C] // Proceedings of 4th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures. Farmington Hills, Michigan: American Concrete Institute, 1999: 369-382.
- [12] NAKABA K, KANAKUBO T, FURUTA T, et al. Bond Behavior Between Fiber-reinforced Polymer Laminates and Concrete [J]. ACI Structural Journal, 2001, 98 (3): 359-367.
- [13] MONTI G, RENZELLI M, LUCIANI P. FRP Adhesion in Uncracked and Cracked Concrete Zones [C] // Proceedings of 6th International Symposium on FRP Reinforcement for Concrete Structures. Singapore: World Scientific Publications, 2003: 183-192.
- [14] SAVIOA M, FARRACUTI B, MAZZOTTI C. Non-linear Bond-slip Law for FRP-concrete Interface [C] // Proceedings of 6th International Symposium on FRP Reinforcement for Concrete Structures. Singapore: World Scientific Publications, 2003: 163-172.
- [15] UEDA T, DAI J G, SATO Y. A Nonlinear Bond Stress-slip Relationship for FRP Sheet-concrete interface [C] // Proceedings of International Symposium on Latest Achievement of Technology and Research on Retrofitting Concrete Structures. Kyoto, Japan: [s. n.] 2003: 113-120.