

部分粘结预应力抗拔(浮)桩的优化设计

何世鸣¹, 郭跃龙², 赵晓东², 程金霞¹, 贾城¹, 杨敏¹

(1. 北京建材地质工程公司, 北京 100102; 2. 北京工业大学建工学院, 北京 100124)

摘要:介绍了一种新型的抗拔(浮)桩——部分粘结预应力抗拔(浮)桩。该新型桩有效改善了抗拔桩的桩身结构,能充分发挥抗拔桩的承载力,改变了混凝土受拉时的受力性状,克服了普通抗拔桩容易产生裂缝的弊病。结合有关地下结构浮力方面的研究成果及现场实际的部分粘结预应力抗拔桩荷载试验结果,对抗拔(浮)桩进行了优化设计。

关键词:部分粘结预应力抗拔(浮)桩;孔隙水压力折减系数;桩身结构

中图分类号:TU473.1 文献标识码:A 文章编号:1672-7428(2010)07-0039-05

Optimal Design of Part-bonding Pre-stress Uplift Pile/HE Shi-ming¹, GUO Yue-long², ZHAO Xiao-dong², CHENG Jin-xia¹, JIA Cheng¹, YANG Min¹ (1. Beijing Building Material Geotechnical Engineering Company, Beijing 100102, China; 2. Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: The paper introduces a new uplift pile, part-bonding pre-stress uplift pile. It effectively improves the pile shaft structure; can make full use of the bearing capacity, remodel the mechanical characteristic of the stretched concrete and overcome the cracks of the normal uplift pile. Optimal design was made on the uplift pile by combining the research on underground structure buoyancy with the on-site test on part-bonding pre-stress.

Key words: part-bonding pre-stress uplift pile; reduction coefficient of pore water

0 引言

随着城市建设的发展和居民生活水平的不断提高,地下空间(地下室、地下车库、地下商场等)的利用已经成为了一种趋势。随着基坑开挖深度越来越大,抗浮设计已成为地下建筑设计中重要问题之一,其关键是以结构所受浮力的确定和抗拔桩的合理设计方法为主。

有关现场试验及数值模拟结果表明,北京市区受地下水位持续下降的影响,建筑场地内孔隙水压力分布呈现明显的非线性特征,实测孔隙水压力曲线明显偏离按最高水位计算求得的理论静水压力曲线;砂土、粉土等渗透性好的含水层中实测孔隙水压力同按该层地下水水位求得的理论静水压力值基本吻合,即在不考虑渗流作用时不对浮力进行折减;渗透性较差的粘土及粉质粘土等相对隔水层中,实测孔隙水压力明显小于理论静水压力,有关实验结果表明,孔隙水压力折减系数可取为 0.6~0.8,实际工程中若地下室底板位于厚层粘性土层中时可根据具体情况按此系数进行折减。

在抗浮设计中,除了结构所受浮力在某些土层

中可以适当折减外,抗拔桩的设计也是一个很关键的问题。传统钻孔灌注桩在承受抗拔(浮)力时,桩身混凝土呈拉伸状态,混凝土的抗拉强度很低,所以抗拔(浮)桩在拉伸作用下混凝土产生裂隙,随着桩身混凝土的破坏桩身钢骨架也随之发生破坏。我们在工程应用实践中提出一种新型的预应力抗拔(浮)桩——部分粘结预应力抗拔(浮)桩,该新型桩已获国家发明和实用新型专利(CN200710065368.6, CN200720104256.2)。部分粘结预应力抗拔(浮)桩能够克服抗拔桩桩身混凝土受拉使混凝土产生裂缝的弊病,同时使桩身受力及其传递更加合理。

1 部分粘结预应力抗拔(浮)桩的特征

1.1 桩身轴力

非预应力抗拔(浮)桩的桩身轴力沿桩身向下逐渐减小(见图1),桩顶位置的桩身轴力最大,桩底最小。而预应力抗拔(浮)桩的桩身轴向力沿桩身向上逐渐减小,轴力最大处取决于施加预应力的着力点位置。

1.2 桩周摩阻力

收稿日期:2010-03-01

作者简介:何世鸣(1965-),男(汉族),河北涉县人,北京建材地质工程公司副总工程师、教授级高级工程师、一级注册建造师、注册岩土工程师,北京市建委岩土工程技术专业专家,兼中国地质大学研究生导师,长春工程学院及北京工业大学客座教授、昆明理工大学兼职教授,探矿工程专业,硕士,从事岩土工程设计施工技术质量管理及新技术开发研究工作,北京市朝阳区望京西路甲50-1号卷石天地大厦A座4层,he.shi.ming@263.net。

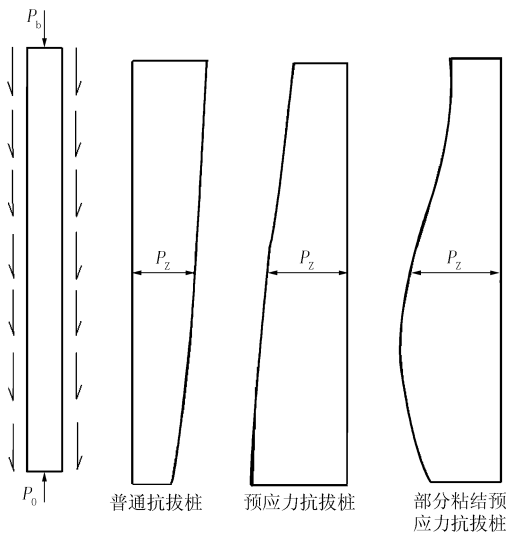


图1 桩身轴力沿桩段分布示意图

抗拔(浮)桩的荷载传递除桩身自重平衡一小部分以外,其余全部由桩周摩阻力来平衡。非预应力抗拔(浮)桩随着上拔荷载的增加,桩侧摩阻力由浅而深逐步发挥,其规律与承受静压荷载时的桩侧摩阻力发挥情况一样,但是摩阻力的方向相反。而部分粘结预应力抗拔(浮)桩的桩周摩阻力随着上拔荷载的增加,桩侧摩阻力在粘结段以上由深而浅逐步发挥,在粘结段以下,由浅而深发挥。

1.3 桩土应力

由桩身变形曲线可以知道,部分粘结预应力抗拔桩的桩土间应力分布特征如图2右侧所示。

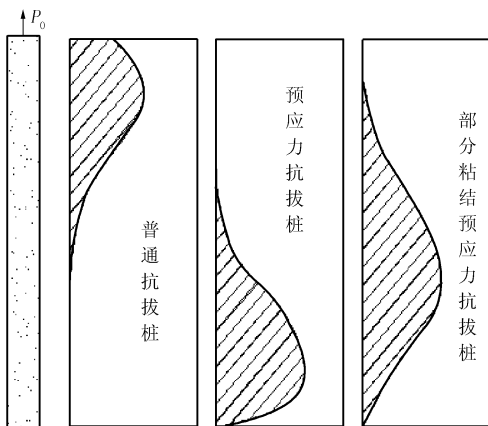


图2 桩土之间应力沿桩段分布示意图

预应力抗拔(浮)桩是一个方兴未艾的抗浮手段,与普通抗拔(浮)桩相比,预应力抗拔(浮)桩具有以下一些优点:

- (1) 能充分合理地发挥桩体与土体之间的侧阻力,提高桩的抗拔力;
- (2) 与普通抗拔桩相比,预应力抗拔桩具有桩

身短、桩径小、结构轻的特点;

(3) 成本较低,经济,根据我们实例对比,预应力抗拔桩的工程造价比普通抗拔桩的工程造价低;

(4) 可以根据现场张拉锁定的变形数据,及时调整预应力的锁定值,一旦发现异常不良情况,能立即采取相应加固措施,避免出现大的事故,这就能提高工程的安全性;

(5) 改善了混凝土的受力性状,防止混凝土裂隙的产生,防止桩身钢骨架的锈蚀破坏;

(6) 与现有的预应力抗拔(浮)桩相比,部分粘结预应力抗拔(浮)桩可实现干作业,文明施工,粘结可靠,质量易于保证,施工速度快,效率高。

2 抗拔桩设计

本文以北京大学留学生公寓一~五号楼地库部分粘结预应力抗拔(浮)桩工程的设计及施工为背景进行研究探讨。

2.1 工程概况及水文地质条件

2.1.1 工程概况

北京大学留学生公寓位于北京市海淀区中关村,是一个集住宿、餐饮、会议、文化交流、办公休闲、健身娱乐于一体的综合性公寓园区。本工程于公寓园区西部,一、二、三号楼地下部分连为一体,基础埋深12.0 m左右;四、五号楼地下部分连为一体,基础埋深8.0 m左右。一~五号楼均为筏板基础,一号楼东西两侧为地下3层车库、地上部分无建筑物。本工程 $\pm 0 = 51.9$ m。

2.1.2 工程地质条件

2.1.2.1 地形地貌

拟建场地为永定河冲积扇的中部,地形平坦,各钻孔孔口绝对标高为49.49~49.89 m。

2.1.2.2 地层

根据钻孔资料及土工试验资料,拟建场地地层分为人工填土层及一般第四系沉积层,划分为7个土层。

①素填土,褐黄、灰褐、灰黑色,软塑~可塑,主要由粉质粘土组成,含少量树根及碎石、灰渣等建筑垃圾,个别钻孔顶部为水泥路面;

①₁杂填土,灰褐色,稍湿,松散,主要成分为建筑垃圾;

②₁砂质粉土,褐灰、青灰色、局部褐黄色,很湿,稍密,夹有粘质粉土及粉质粘土,含有小贝壳及朽树根;

②₂粉砂,褐黄、灰褐色,饱和,中下密~中密,局

部密实,含有机质,局部夹有砂质粉土及粘质粉土,偶夹有细砂薄层,分布不均;

②₃粉质粘土,灰、褐灰色,可塑,夹有粉质粘土及重粉质粘土,含有贝壳等有机质及少量姜石,分布不均;

②₄粘质粉土,褐灰色,很湿,中密,含有云母片,分布不均;

③₁粉质粘土,褐黄色,可塑,局部夹有粘质粉土,含少量姜石,分布不均;

③₂粘质粉土,黄、褐黄色,局部褐灰色,湿~很湿,中密,夹有粉质粘土,含少量姜石及铁锰质氧化物,分布不均,局部缺失;

③₃细砂,褐黄色,中下密,饱和,含有云母和氧化铁;

④₁细砂,褐黄、黄褐色,饱和,含有云母碎片,局部含有少量姜石;

④₁砂质粉土,褐黄色,很湿,中密,含有少量云母碎片;

④₂粘土,褐黄色,可塑,仅64号孔揭遇;

⑤₁重粉质粘土,黄褐、褐黄色,可塑~硬塑,含有少量铁锰质氧化物及姜石;

⑤₁粉砂,褐黄色,饱和,中密,在⑤层中以透镜体形式产出;

⑤₂粉质粘土,褐黄色,可塑;

⑤₃砂质粉土,褐黄色,很湿,中密,含有云母;

⑥₁粘土,黄褐、褐黄色,可塑,含少量铁锰结核及姜石,偶夹有重粉质粘土薄层;

⑥₁粘质粉土,褐黄色,很湿,中密,含有云母片;

⑦₁砂质粉土,黄褐、褐黄色,湿~很湿,密实,偶夹有粉砂及粘质粉土,局部缺陷;

⑧₁细中砂,褐黄、黄色,中密~密实,主要由石英质的颗粒组成,含少量云母碎片;

⑨₁卵石,杂色,饱和,密实,成分以微风化的安山岩为主,含少量石英砂岩、辉岩,中粗砂充填,粒径一般为30~40 mm,最大约60 mm,含量30%~70%,冲击钻进较为困难;

⑩₁细砂,褐黄色,饱和,中上密,含有少量云母碎片,分布不均,仅部分钻孔揭露;

⑩₁粘土,褐黄、黄色,可塑~硬塑,夹有姜石,偶夹有粘质粉土及重粉质粘土薄层;

⑩₁粉质粘土,褐黄、黄褐色,硬塑;

⑪₁卵石,杂色,饱和,密实,成分以微风化的安山岩为主,含有少量石英质砂岩,中粗砂填充,粒径一般为30~40 mm,最大约60 mm,含量60%~70%,

本层未钻穿。

2.1.3 水文地质条件

据勘察揭露,场地内地下水有4层,主要为第四系地层中的孔隙水、微承压水和承压水,稳定水位为0.80~3.40 m,水位标高为46.20~48.82 m。主要受大气降水和地下径流补给,水位应季节性而变化。各层地下水类型及赋存条件见表1。

表1 地下水类型

层号	主要含水层地层名称及层号	地下水类型
1	② ₁ 砂质粉土、② ₂ 细砂	台地潜水
2	④粉砂	台地潜水
3	⑦砂质粉土、⑧细中砂、⑨卵石	微承压水
4	⑪卵石	承压水

历史水位:1959年地下水位接近地表,近3~5年水位绝对标高49 m。

抗浮设防功能水位标高为49 m。

腐蚀性评价:根据水质分析结果,场地地下水对混凝土无腐蚀性;但在干湿交替条件下,对钢筋混凝土结构中的钢筋有弱腐蚀性。

2.2 抗拔桩设计方案

该工程有地下3层车库,一号楼东西两侧地上部分无建筑物,其中A区面积为 $S_A = 840 \text{ m}^2$,B区面积为 $S_B = 2005 \text{ m}^2$,地下建筑物按每层 $c = 20 \text{ kN/m}^2$ 计算。根据勘察报告及施工经验,桩的侧限摩擦阻力的加权平均为 $q_{si} = 60 \text{ kN/m}^2$ 。防渗按一级抗裂缝设计(注:不考虑桩的自重)。

需设计的参数有桩径、桩长、单桩承载力设计值及桩的配筋等。

2.2.1 荷载条件

(1)依据勘察报告,一~三号楼基础埋深12.0 m左右,水头差:

$$h = 49 - (51.9 - 12) = 9.1 \text{ m}$$

(2)浮力荷载

基础埋深12.0 m,基底位于④层粉砂及⑤层重粉质粘土之上,根据有关地下建筑浮力的研究成果,结构所受浮力可以在静水压力的基础上乘以折减系数0.6~0.8不等,此处为安全考虑取 $\xi = 0.8$ 。

$$N_{A总} = 0.8\gamma_w hS_A - 3cS_A$$

$$= 0.8 \times 10 \times 9.1 \times 840 - 3 \times 20 \times 840$$

$$= 10752 \text{ kN}$$

$$N_{B总} = 0.8\gamma_w hS_B - 3cS_B$$

$$= 0.8 \times 10 \times 9.1 \times 2005 - 3 \times 20 \times 2005$$

$$= 25664 \text{ kN}$$

(3)总设计荷载(总标准荷载×荷载分项系数

× 建筑物重要系数)

$$\begin{aligned} N_{A总设} &= N_{A总} \times 1.25 \times 1.1 \\ &= 10752 \times 1.25 \times 1.1 \\ &= 14784 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N_{B总设} &= N_{B总} \times 1.25 \times 1.1 \\ &= 25664 \times 1.25 \times 1.1 \\ &= 35288 \text{ kN} \end{aligned}$$

2.2.2 单桩承载力设计值计算

2.2.2.1 单桩承载力设计值

选桩径 $d=400$ mm, 有效桩长 $l=6$ m

$$\begin{aligned} R_k &= \frac{U_p \sum_{n=1}^{i-1} q_{si} h_i}{k_1} \cdot k_2 \\ &= \frac{\pi d \times 60 \times 6}{1.7} \times 0.8 \\ &= \frac{3.14 \times 0.4 \times 60 \times 6}{1.7} \times 0.8 \\ &= 212.78 \text{ kN} \end{aligned}$$

式中: k_1 ——桩的安全系数, 取 1.7; k_2 ——抗拔桩的折减系数, 按规范取 0.8; R_k ——单桩抗拔力特征值, kN; q_{si} ——第 i 层土侧摩阻力标准值(根据地勘报告加权取值), kPa; U_p ——桩周长; h_i ——第 i 层土层厚, m。

2.2.2.2 总桩数

$$N_A = \frac{N_{A总设}}{R_k} = \frac{14784}{212.78} = 70 \text{ 根}$$

$$N_B = \frac{N_{B总设}}{R_k} = \frac{35288}{212.78} = 166 \text{ 根}$$

采用正方形网格状布桩, 实际桩间距为 3.9 m × 3.9 m。

2.2.3 抗拔桩桩身结构设计

钢绞线承受拉力, 当轴心受拉构件破坏时, 在裂缝截面处混凝土已退出工作, 全部拉力由钢绞线承受, 即:

$$R_k \leq n f_{ptk} A_s$$

式中: n ——所需钢绞线数; f_{ptk} ——预应力钢绞线抗拉强度标准值, 选用 $\phi^s 15.2$, $f_{ptk} = 1860$ MPa; A_s ——每束钢绞线的截面面积。

$$n = \frac{R_k}{f_{ptk} A_s} = \frac{212.78}{337} \approx 1 \text{ 根}$$

但为满足灌注桩的最小配筋率及构造要求, 最终选用主筋 $3\phi 12 + 3\phi^s 15.2$ 的钢绞线(图 3), $A_s = 544 \text{ mm}^2$ 。

按规范要求抗拔桩通长配筋, 并保证主筋锚入底板 $30d$, 纵向钢筋、钢绞线沿桩身均匀布置, 为了防止钢筋钢绞线笼腐蚀, 钢筋钢绞线笼保护层厚为

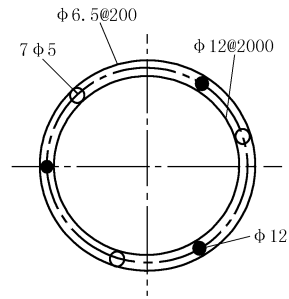


图 3 钢筋钢绞线笼截面图

50 mm, 底端为 0.5 m, 加桩顶 0.5 m 保护桩, 总桩长为 7 m, 有效桩长为 6 m。

箍筋采用 $\phi 6.5@200$ mm, 并采用螺旋式缠绕, 在桩顶 $(3 \sim 5)d$ 范围箍筋适当加密, 钢筋钢绞线笼每隔 2 m 设一道 $\phi 12$ mm 焊接加强箍筋。

配筋为 $\phi 300$ mm 笼子的下端做成一个锥形, 将钢绞线用一个 U(22) 型卡锁死, 钢绞线下端 1.5 m 范围内与混凝土粘结, 其余段钢绞线与混凝土非粘结; 钢绞线上端锁定在底板上, 单根钢绞线的张拉控制应力控制在 $0.75 f_{ptk}$, 桩顶进入底板 100 mm。桩身结构见图 4。

抗拔桩部位的防水按有关要求执行(在桩顶及四周刷水泥渗透剂, 然后在桩的四周做一圈止水带)。

桩基材料的受拉承载力为:

$$\lambda_0 R_k \leq f_i A + n f_{ptk} A_s$$

式中: λ_0 ——建筑物重要系数; 取 1.1; f_i ——混凝土抗拉强度设计值, C25 混凝土取 1.78 MPa; A_s ——混凝土有效面积, 扣除保护层厚度。

代入公式得:

$$1.1 \times 212.78 \times 10^3 \leq 1.78 \times \frac{\pi}{4} \times 400^2 + 1860 \times 137$$

$$234058 \leq 223568 + 254820 = 478388$$

即单桩抗拔承载力远小于钢筋钢绞线混凝土桩抗拉承载力, 保证了抗拔桩不出现混凝土裂缝。

2.2.4 群桩地基整体稳定性验算

将桩和桩间土一起结为实体基础, 其整体的稳定性应满足整个桩和桩间土构成的实体所受的总的摩阻力和浮重力大于总的设计荷载。

即满足:

$$R_{gk} + G_s' \geq N_{A总设} + N_{B总设}$$

式中: $R_k = \sum_{n=1}^{i-1} \lambda_i (q_{si} l_i) \times u_i$, 为群桩呈整体破坏时的抗拔承载力标准值; G_s' ——桩间土的浮重力, $G_s' = \gamma' V$; λ_i ——抗拔系数, 取 0.75; V ——桩间土的体积; u_i ——A、B区的周长, 通过从桩基平面图上计

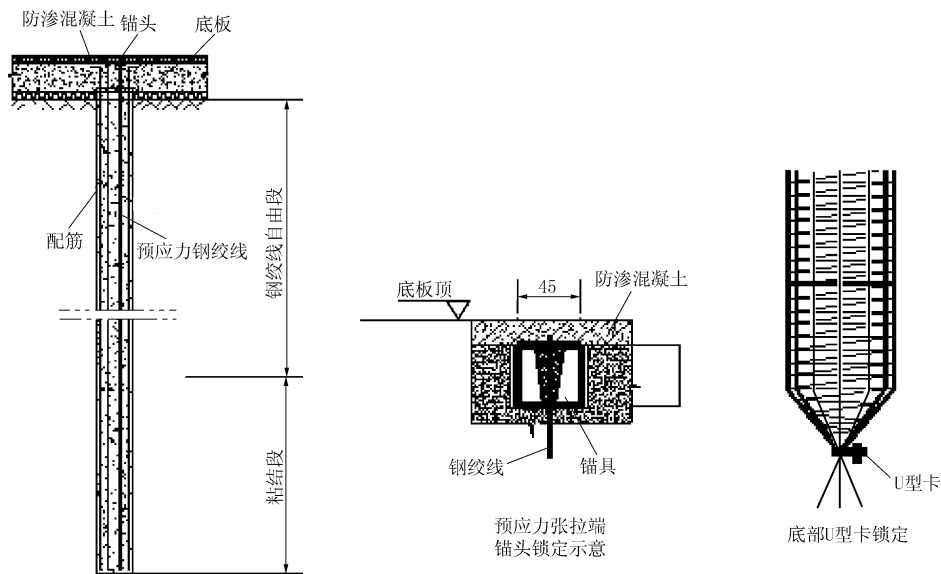


图4 部分粘结预应力抗拔桩结构

算,A、B区的周长为359 m。

$$R_{gk} = 0.75 \times 60 \times 6 \times 359 = 96930 \text{ kN}$$

$$G_s' = \gamma' V$$

$$= (20 - 10) \times 2845 \times 6$$

$$= 170700 \text{ kN}$$

$$\text{由 } R_{gk} + G_s' N_{A\text{总设}} + N_{B\text{总设}}, \text{得: } 96930 + 170700 \\ = 267630 \text{ kN} > 14784 + 35288 = 50072 \text{ kN}.$$

即群桩地基抗拔稳定性满足整体稳定性的要求。

经过对原方案优化设计,桩长可缩短为原桩长(9 m)的2/3,桩的数量A区由191根减为70根,B区由553根减为166根,大大降低了工程量,节省了财力物力。

3 抗拔桩施工

抗浮工程桩采用长螺旋钻机成孔,放置钢筋钢绞线笼灌注混凝土成桩的工艺,必须时采用了先压灌混凝土后插入钢筋钢绞线笼的方式成桩。预应力抗拔(浮)桩施工简便,桩底的预应力钢绞线用U型锁卡锁在一起,部分粘结段的钢绞线也有有效的保证了桩底钢绞线的锁定牢固,使桩底混凝土自身成为很好的预应力承载体。平均每台钻机每天可成桩30根。

4 结语

部分粘结预应力抗拔桩既不同于普通抗拔桩也不同于一般的预应力抗拔桩,部分粘结预应力抗拔桩既方便实施,又接近理想的应力分布情况。

部分粘结预应力抗拔(浮)桩利用事先施加的预应力,因而能够改变桩体受力状态和改善桩体受力路径,充分合理发挥桩体与土体之间的侧阻力,提高桩的抗拔力,并能控制结构物上拔位移量。

参考文献:

- [1] 朱世平,杜高恒,何世鸣,等. 抗拔(浮)桩的发展历程和研究方向[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2007,34(5):5-7.
- [2] 何世鸣,李江,杜高恒,等. 部分粘结预应力抗拔(浮)桩试验研究及应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2007,34(S1):191-196.
- [3] 赵乐华,朱世平,杜高恒,等. 部分粘接预应力抗拔桩静荷载实验下的桩身受力分析[J]. 西部探矿工程,2008,(3):10-13.
- [4] 孙保卫,徐宏声,张在明. 孔隙水压力测试与建筑抗浮水压力的确定[J]. 工程勘察,1998,(3):31-35.
- [5] 张洁,尚岳全,林旭武. 考虑上拔力作用点位置影响的抗拔桩变形分析[J]. 土木工程学报,2005,38(7):102-106.
- [6] 李篁,李峰. 抗拔桩设计方法[J]. 中国煤田地质,2003,15(1):48-50.
- [7] 李镜培,孙文杰. 地下结构的浮力计算与抗拔桩设计方法研究[J]. 结构工程师,2007,23(2):80-84.