

南宁圆砾地层 m 值位移反分析研究*

杨磊^{1,2}, 谢雄耀^{1,2}

(1. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;
2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要:随着南宁市轨道交通的建设及城市的发展,大量的圆砾地层深基坑工程将涌现。圆砾地层具有鲜明的地域性、特殊性,圆砾地层的力学参数问题将会成为基坑围护结构设计计算的关键,其中最重要的就是 m 值的选取。国内现有的规程规范及基坑工程经验并没有专门针对于圆砾地层 m 值的研究。本文将基于弹性地基梁法,结合最优化理论,根据南宁大量的基坑围护墙体变形实测数据,利用位移反分析方法研究确定圆砾地层 m 值的合理参考范围,为圆砾地层基坑围护结构设计计算提供一定的指导。

关键词:圆砾地层;弹性地基反力法; m 值;最优化理论;位移反分析

中图分类号: TU470.3 文献标识码: A 文章编号: 1673-0836(2011)增2-1667-06

Back-analysis Based on Displacement and Research on the m Value of Gravel Ground in Nanning

Yang Lei^{1,2}, Xie Xiongyao^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: With the construction of Nanning urban rail transit and the city's development, a large number of deep excavations in gravel ground will be carried out. The gravel ground has distinctly regional and special character. The mechanic parameters will be the key issues to the design and calculation of excavation retaining structures in gravel ground, one of the most important parameters is the " m " value. However, there is no specific research about it according to domestic existing standards or regulations and excavation engineering experience. This paper, based on the elastic subgrade beam method with combining the optimization theory, applied the back-analysis method to confirm the reasonable range about the " m " value of gravel ground, according to a large number of excavation retaining wall displacement monitoring data in Nanning. The result will provide some guidance for the design and calculation of excavation retaining wall in gravel ground.

Keywords: gravel ground; elastic subgrade reaction method; m value; optimization theory; displacement based back-analysis

1 引言

随着南宁市轨道交通的启动、东盟商贸区及北部湾经济区的发展,南宁市的城市建设将处于

更大规模的建设时期。南宁盆地是典型的二元结构,圆砾地层分布广、层厚深,大规模的轨道交通建设及其它城市建设将产生大量的圆砾层地区基坑工程。圆砾地层具有独特的土层特性,颗

* 收稿日期: 2011-07-15 (修改稿)

作者简介: 杨磊 (1983-), 男, 湖南溆浦人, 硕士生, 主要从事隧道及地下工程等领域的工作。

E-mail: aleiyang2001@163.com

粒较粗,级配极不均匀,强度介于岩石和土之间,且具有强透水性。圆砾地层的这些特点决定了基坑围护结构的计算具有地方性、特殊性,而国内尚未存在专门针对圆砾地区基坑工程的规程规范和相关研究,圆砾地层基坑围护结构设计计算关键参数的选取尚停留在有限的经验阶段,其中之一就是圆砾地层的地基水平基床系数比例系数,即 m 值。目前基坑设计计算时,圆砾地层 m 值的取值只能按现有基坑规范中的砂性土凭经验进行取值,这对圆砾地层基坑计算的影响无疑会产生较大的误差。

m 值是一个比较难于确定的参数,与土体的类别、物理性质、结构水平位移、埋深、应力水平及应力状态等有关。目前确定 m 值的主要方法有两种,一种方法是现场单桩水平荷载试验,但专门为某特定工程进行试验的机会较少,该方法采用的桩顶位移不合理,特别是对于多道支撑的基坑,坑底水平位移一般比桩顶位移大,另外,该方法未能分层确定 m 值。

另一种方法是经验公式计算法:

$$m_i = \frac{1}{\Delta} (0.2\varphi_i^2 - \varphi_i + c_i) \quad (1)$$

式中: Δ 为坑底处位移量(mm),按地区经验确定,无经验时取 10 mm。该法把土性量化为抗剪强度指标,减少了 m 值的随意性,但 Δ 无经验时取 10 mm 仍较难准确把握^[1]。

鉴于以上两种方法的局限性,近些年来,一种基于实测数据的反分析方法得以发展。该方法在大量文献及研究^[1~18]中得以验证,但该方法尚存在一定的缺陷,且这些文献及研究中大多只针对某一特定工程或工况进行了分析,并未对某一特定地层进行大量的统计并给出建议参考范围。本文将在总结对比各种反分析方法的基础上,选择较简单且高效的方法,并采取一定的措施进行改进,结合南宁多个基坑案例的实测数据反分析确定南宁圆砾地层 m 值的合理范围,以便为地层相近或附近地区的设计提供更可靠的参考和依据。

2 反分析方法

当前,基坑工程运用实测数据进行土体力学参数反分析的方法较多。从实测数据的利用上来看,

有墙体弯矩反分析^[2]、支护桩顶位移反分析^[3]、支撑轴力反分析^[4]、地表沉降反分析^[5],但由于围护墙体的变形监测是基坑工程中必测的项目之一,所以应用最多的是位移反分析^[1,6~17]法。从反分析参数来看,有反分析土体弹性模量及泊松比^[6~8]的,有反分析土体强度指标^[3,4,8,9]的,有反分析土压力分布形态^[2]的,有反分析土体 m 值^[1,10]的。反分析参数一方面是由分析研究的目的决定,另一方面多与基坑的计算手段有关。一般情况下会选取影响计算的最关键土体参数,采用数值模拟时,弹性模量及泊松比是土体本构模型的关键参数;采用弹性地基反力法计算时,土体强度指标、土压力分布形态及 m 值等是基坑围护墙体计算的关键参数。

通过位移反分析技术可以得到符合实际的 m 值,它不仅能反映开挖侧土体本身的性质,而且也是整个支挡结构体系某些未知因素的体现。通过位移反分析 m 值的意义主要有两方面,一方面是在某个工程中可以利用已完成工况的位移实测信息反分析 m 值并以此来预测下一个工况的位移,实现动态优化设计;另一方面可以通过地层条件等相似的大量工程的反分析来给出这类条件下的 m 值,用以指导工程实践^[10]。本文的意义在于第二方面,将基于南宁多个圆砾地层基坑案例的墙体水平位移实测数据,结合弹性地基反力法,反分析圆砾地层的 m 值。

3 m 值位移反分析法

在基坑围护结构计算中,弹性地基反力法能同时模拟和计算基坑工程中围护结构的内力和变形,并具有计算模式明确、计算过程简单的优点,因而备受工程设计人员的欢迎,其中 m 法由于较符合基坑工程的实际而被广泛应用。

3.1 目标函数

反分析的目的是实现反分析参数 m 值控制的弹性地基反力法墙体水平位移计算值与实测值的最优逼近。

首先,根据反分析的需要及实际土层与围护墙体的关系,选择一个或多个土层的 m 值作为反分析参数 m_1, m_2, \dots, m_k, k 为反分析参数的个数。

然后,根据实际工程情况及实测数据的情况,确定反分析的工况数 M ,一般各工况将对应土体开挖至每道锚撑设置前的基坑状况。

确定反分析参数 m_k 及工况数 M 后,基于弹性地基反力法有限元程序计算每工况下的墙体变形值为 $u_i(f)$,即第 i 个测点在工况 j 下的变形值,则 $u_i(j)$ 为反分析参数 m_k 的函数,即 $u_i(f) = f(m_2, m_2, \dots, m_k)$ 。然后,建立实测数据 $u'_i(f)$ 与计算数据差平方和函数 $\sum_{i=1}^N [u_i(j) - u'_i(j)]^2$ 。

最后,考虑逐工况动态施工影响,对所有工况进行累积,建立如下目标函数^[10]:

$$F = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N [u_i(j) - u'_i(j)]^2 \quad (2)$$

式中: N 为测点数量。

一般情况下,由于反分析参数除了圆砾地层的 m 值外,还有可能包括其它粘性土、砂性土,这些土层的 m 值在国内已形成了可靠的经验,可根据经验范围对这些土层反分析参数进行限定,所以目标函数会有如下约束条件:

$$m_{kmin} \leq m_k \leq m_{kmax} \quad (3)$$

式中: m_{kmin} 、 m_{kmax} 分别为可靠经验范围的下、上限值。对目标函数增加该约束条件可以确保有可靠经验的土层 m 值在合理范围之内,使后面的搜索求解更加可靠。

3.2 求解方法

当前,目标函数最优解求解的实现可基于传统最优化理论^[14~17]、人工神经网络方法^[8,9,12]或遗传进化方法^[13]。基于人工神经网络的位移反分析方法,当解空间稍大时便难以收敛到所需要的精度,且训练结果不具有唯一性,因而很难获得与实际岩土相吻合的反演结果。基于遗传进化的位移反分析方法,需对搜索过程进行大量经验性干预才能搜索到最优解^[11]。基于最优化理论的位移反分析方法,计算简单明了,可操作性强,但其解的稳定性较差,易陷入局部极小,反演参数较多时收敛速度较慢,且难以搜索到最优解。本文将采取应用较广的传统最优化理论,并进行一定的改进,实现最优解的求解过程。

传统的最优化求解方法有单纯形法、步长加速法、共轭方向法、共轭梯度法等。由于目标函数为一有约束的非线性最优化问题,不容易直接求得其导数函数,可采用单纯形法进行搜索求解,并按以下操作步骤进行:

(1) 对每个反分析参数设定初始值。初始值组数尽量多,在约束条件内尽量大范围设置,减小搜索落入局部收敛的可能;

(2) 从多组初始值中选定三组较优点构成初始搜索三角形;

(3) 按常规单纯形法进行第一次搜索,直至收敛或有反分析参数超限;

(4) 有反分析参数超限时,固定该参数在限值上,继续对其它反分析参数进行搜索直至收敛;

(5) 第一次搜索收敛后,固定有可靠经验的各土层参数,在收敛点附近继续对圆砾地层等无可靠经验的土层参数进行第二次搜索。初始值可在第一次收敛点及其各变化方向上选取较优点,第一次收敛点的变化方向个数一般为 $2n$ 个, n 为保留继续进行搜索的参数个数。

(6) 按常规单纯形法进行第二次搜索直至收敛,收敛点即为最优点。

经验表明,初始值的选取将很大程度上决定了搜索过程落入局部最优的可能性,通过以上操作步骤选定初始值,并采用二次搜索的方法,可减小搜索过程落入局部最优的可能。

4 基础资料

为了反分析研究南宁圆砾地层的 m 值,在本文之前,对南宁圆砾地层进行了围护墙体水平位移监测的深基坑工程案例进行了资料收集。本次分析研究将围绕三个工程案例进行,它们是地铁 1 号线广西大学站车站基坑、南湖名都深基坑及永凯现代城深基坑,总选择 7 组地下连续墙测斜孔实测数据,该 7 组反分析对象的围护形式、开挖深度、反分析参数的选取及反分析工况数分别如表 1 所示。

表 1 反分析对象基础资料
Table 1 Basic data of back-analysis objects

序号	测斜孔名称	围护墙形式	开挖深度	反分析参数 m_k (单位:MN/m ⁴)				工况数 M
1	广西大学站 Z51 槽幅	地下连续墙 + 3 道内支撑	16.08 m	可塑粉粘 ($4 \leq m_1 \leq 6$)	稍密粉土 ($4 \leq m_2 \leq 6$)	稍密砾砂 (m_3)	中密圆砾 (m_4)	3
2	广西大学站 Y51 槽幅			松散细砂 ($2 \leq m_1 \leq 4$)	中密圆砾 (m_2)	/	/	3
3	广西大学站 Z59 槽幅			稍密粉土 ($4 \leq m_1 \leq 6$)	中密砾砂 (m_2)	中密圆砾 (m_3)	/	3
4	广西大学站 Y59 槽幅			可塑粉粘 ($4 \leq m_1 \leq 6$)	中密砾砂 (m_2)	中密圆砾 (m_3)	/	3
5	南湖名都 13 号测斜孔	地下连续墙 + 4 道内支撑	18.1 m	硬塑粉粘 ($6 \leq m_1 \leq 10$)	稍密粉土 ($2 \leq m_2 \leq 5$)	可塑粉粘 ($4 \leq m_3 \leq 6$)	中密圆砾 (m_4)	1
6	永凯现代城 CX4 测斜孔	地下连续墙 +4 道地下 室结构板	18.45 m	硬塑粘土 ($6 \leq m_1 \leq 10$)	硬塑粉粘 ($4 \leq m_2 \leq 8$)	稍密粉土 ($2 \leq m_3 \leq 5$)	中密圆砾 (m_4)	4
7	永凯现代城 CX16 测斜孔			硬塑粘土 ($6 \leq m_1 \leq 10$)	硬塑粉粘 ($6 \leq m_2 \leq 10$)	稍密粉土 ($2 \leq m_3 \leq 5$)	中密圆砾 (m_4)	4

5 反分析结果

分别对 7 组反分析对象按照前面的最优化问题求解步骤进行求解,按大范围布点的方法设定初始值,采用弹性地基反力法软件正演每一组参数对应的墙体变形值,再通过代入目标函数进行比较,从中选取三组较优点构成初始搜索三角形,并去掉

最坏点,按一定方向产生一组新的参数,如此不断迭代搜索直至收敛或有参数不满足约束条件,固定不满足约束条件的参数继续搜索或进行二次搜索直至获得最优点。

7 组反分析对象的搜索情况及最优点分别如表 2 所示。

表 2 反分析对象最优解
Table 2 Optimization solution of back-analysis objects

序号	测斜孔名称	反分析参数 m_k 最优解 (单位:MN/m ⁴)				搜索次数
1	广西大学站 Z51 槽幅	$m_1 = 5$	$m_2 = 4$	$m_3 = 4.917\ 2$	$m_4 = 12.333\ 2$	38
2	广西大学站 Y51 槽幅	$m_1 = 4$	$m_2 = 15.067\ 4$	/	/	20
3	广西大学站 Z59 槽幅	$m_1 = 6$	$m_2 = 5.790\ 3$	$m_3 = 12.5381$	/	34
4	广西大学站 Y59 槽幅	$m_1 = 4.857\ 3$	$m_2 = 7.1427$	$m_3 = 10.142\ 7$	/	40
5	南湖名都 13 号测斜孔	$m_1 = 10$	$m_2 = 5$	$m_3 = 6$	$m_4 = 10.553\ 4$	29
6	永凯现代城 CX4 测斜孔	$m_1 = 9.210\ 0$	$m_2 = 4.680\ 0$	$m_3 = 5$	$m_4 = 15.800\ 0$	56
7	永凯现代城 CX16 测斜孔	$m_1 = 6$	$m_2 = 8.5$	$m_3 = 2.3$	$m_4 = 12.7$	48

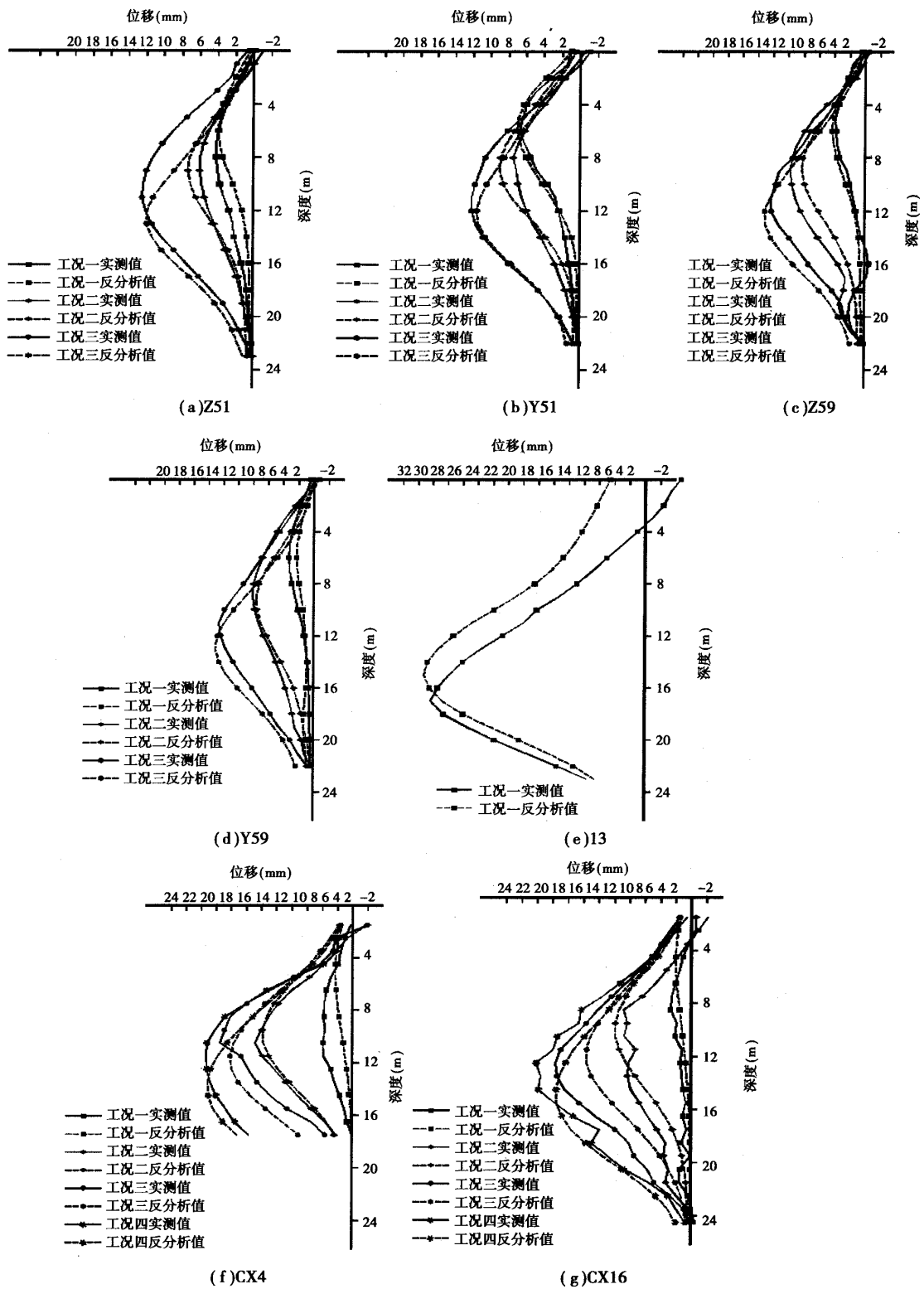


图 1 各反分析对象计算值与实测值对比图

Fig. 1 Comparison diagram of calculation value and monitoring value

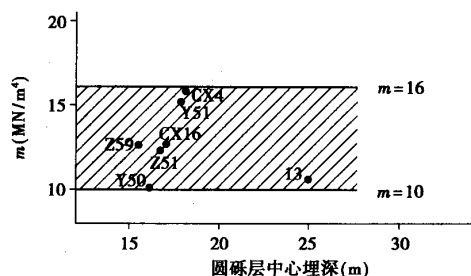


图2 南宁中密圆砾地层 m 值分布范围

Fig. 2 Distribution range of the ' m ' value of medium dense gravel ground in Nanning

各反分析对象在最优解下的墙体变形值与实测值的对比分别见图1所示。

通过对比,各反分析对象的墙体变形计算值与实测值吻合较好,说明位移反分析用于确定不确定土层的 m 值是可行的。通过大量的案例实测数据反分析,能较好地对土体不确定力学参数进行统计分析。根据本次反分析研究的结果,南宁中密圆砾地层的 m 值主要分布范围如图2所示,根据分布南宁中密圆砾地层的 m 值建议范围可取 $10 \sim 16 \text{ MN/m}^2$,此范围可为近似地层基坑围护结构设计计算的 m 值取值提供一定的指导。

6 结 论

(1)通过位移反分析的方法,可有效地对土层的某些关键参数进行反分析研究。

(2)经反分析研究,南宁中密圆砾地层的 m 值的参考范围可取 $10 \sim 16 \text{ MN/m}^2$,可根据此范围指导类似地层的基坑设计计算。

(3)由于南宁有墙体变形监测资料的工程案例并不多,随着城市建设的发展,下一步可在收集更多实测资料的基础上进一步对圆砾地层的 m 值进行反分析及统计,更有效地指导类似地层的基坑工程设计计算。

参考文献 (References)

[1] 王强,刘松玉,童立元,等. 多支撑地下连续墙动态开挖过程中的 m 值反分析[J]. 东南大学学报,2011, 41(2):352-358.

- [2] 张钦喜,樊绍峰,周予启. 深基坑桩锚支护侧土压力反分析及数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报,2009, 28(增1):3 214-3 220.
- [3] 余颖慧,刘明玉. 粉煤灰基坑支护结构的反演分析与实测研究[J]. 地下空间与工程学报, 2009,(增): 1 336-1 339.
- [4] 汪中卫,叶萌. 根据反馈对基坑围护结构内力与变形的反分析[J]. 大坝观测与土工测试,1998,22(6): 14-17.
- [5] 高冰,周健. 广中路基坑工程的反演分析[J]. 低温建筑技术,2010,(9):92-93.
- [6] 赵振寰,朱振华,李华. 反分析法在基坑开挖数值分析中的应用[J]. 工程勘察,1996,(4):1-4.
- [7] 韩玉林,王云燕,孙世永. 反分析在深基坑支护及预测中的应用[J]. 低温建筑技术,2006,(6):109-110.
- [8] 周瑞忠,邱高翔. 基于BP网络的深基坑支护位移反分析[J]. 土木工程学报,2001,34(6):60-62.
- [9] 邓子胜. 基于径向神经网络的深基坑非线性位移反分析[J]. 岩土工程学报,2005,27(5):554-557.
- [10] 杨敏,熊巨华,冯又全. 基坑工程中的位移反分析技术与应用[J]. 工业建筑,1998,28(9):1-6.
- [11] 彭军龙,张学民,阳军生,等. 地铁深基坑支护的遗传神经网络位移反分析[J]. 岩土力学,2007,28(10):2 118-2 122.
- [12] 杨素珍,何容,万林海,等. 基于粒子群算法的深基坑岩土力学参数反分析[J]. 华北水利水电学院学报,2006,27(1):94-96.
- [13] 何广杰,徐光辉,高辉. 基于克隆选择算法的基坑工程位移反分析[J]. 成都理工大学学报,2009,36(2):205-209.
- [14] 张吾渝,褚健,曲鹏展. 弹性地基梁法及参数反分析计算程序[J]. 青海科技,2000,7(3):14-16.
- [15] 冯俊福,俞建霖,龚晓南. 反分析技术在基坑开挖及预测中的应用[J]. 建筑技术,2004,3(5):346-347.
- [16] 王旭东,黄力平,阮永平,等. 基坑工程中地土水平抗力比例系数 m 值的反分析[J]. 南京建筑工程学院学报,1998,45(2):48-54.
- [17] 焦远俊,邵化用,秦建设. 位移反分析法在基坑开挖分析中的应用[J]. 建筑施工,2005,27(2):15-17.