

文章编号: 1000-7598-(2009) 增刊 2-0382-05

邻近基坑开挖的运营地铁车站结构安全度分析

李新星

(上海市隧道工程轨道交通设计研究院, 上海 200070)

摘 要: 为保证既有地铁车站的正常运营和地下车站结构的安全, 在邻近基坑开挖过程中就需要严格控制运营地铁车站结构的变形。结合上海某邻近基坑开挖的运营地铁车站, 运用叠加原理, 采用有限元荷载结构法和强制位移法, 分别按照裂缝控制和强度控制来对车站标准段结构的稳定性及其允许变形进行分析和反算, 为基坑施工提供车站结构变形的控制标准。

关 键 词: 地铁车站; 结构; 强制位移法; 变形控制

中图分类号: U 231.4

文献标识码: A

Security analysis of running metro station structure adjacent to foundation excavation

LI Xin-xing

(Shanghai Tunnel Engineering and Rail Transit Design & Research Institute, Shanghai 200070, China)

Abstract: Structure displacement of the running metro station caused by adjacent foundation construction should be controlled strictly so as to keep the normal operation of the existing metro station and guarantee the security of the existing station structure. Based on the running metro station adjacent to foundation excavation in Shanghai, by superposition principle and load-structure method of FEM and forced displacement method, the stability and permissible deformation of the standard station structure are analyzed and back-calculated according to the mode of fracture control and strength control separately. The result can be used to the standard for deformation control of station structure on foundation pit construction.

Key words: metro station; structure; forced displacement method; deformation control

1 引 言

随着城市地下空间的大规模开发利用以及各大城市轨道交通的快速建设, 使越来越多的基坑工程在已有的运营地铁车站周边或邻近点施工, 甚至穿越运营地铁车站, 这是一项难度较高的工程。由于基坑开挖会引起应力重分布, 从而会打破邻近地铁车站原有的平衡, 引起地铁车站发生变形。为了不影响地铁车站的正常使用的安全, 在基坑施工过程中就需要严格控制运营地铁车站结构的变形, 并对其结构的安全度进行分析, 结果可提供基坑施工时车站变形的控制标准。因此, 对基坑工程施工过程中邻近地铁车站的变形控制和相互影响的研究具有重要意义。

国内许多学者对此问题进行了研究, 并取得了一些重要成果。文献[1]为保证既有地铁的正常运营

和结构的安全, 对北京地铁某新建线区间下穿既有地铁车站结构的力学特征进行分析, 并对其安全性作出评价; 文献[2]以紧贴上海某地铁车站的基坑工程为背景, 建立三维数值模型模拟基坑开挖过程, 将计算结果与监测数据进行比较, 讨论了影响车站变形的主要施工措施; 文献[3]分析了深基坑开挖对共用连续墙的既有车站结构内力的影响, 讨论了基坑开挖对既有车站共用墙体和车站顶、中、底板的内力影响等; 文献[4]利用 FLAC 程序进行数值模拟, 分析在车站和基坑间距不同的情况下, 基坑周围土层的变形特点、变形规律, 并与没有地铁车站时的位移场进行了比较; 文献[5]通过三维模型预测了拟建隧道上穿已建成的地铁车站施工期间引起的结构变形, 并用叠加法计算出结构内力, 以及结构各部位的承载能力, 将两者进行比较, 来评估既有车站的结构安全性等。

收稿日期: 2009-05-30

第一作者简介: 李新星, 女, 1978 年生, 博士, 工程师, 主要从事地下隧道工程和岩土工程数值模拟的研究工作。E-mail: lxxinyue@163.com

本文结合上海某邻近基坑开挖的运营地铁车站, 运用叠加原理, 采用有限元荷载结构法和强制位移法, 分别按照裂缝控制和强度控制来对车站标准段结构的稳定性以及变形控制进行分析和计算, 以确保车站的正常运营与使用, 并为基坑施工提供车站变形的控制标准。

2 计算方法与步骤

2.1 方法概述

基坑开挖施工将引起邻近既有运营地铁车站的附加变形, 由此引起既有车站结构的附加内力。因此, 评估既有车站结构在邻近基坑施工期间的安全性和稳定性, 主要看其内力的变化。

采用荷载结构法对车站标准段进行整体的内力计算, 确定其内力分布图及内力极值。依照基坑开挖深度确定可能对车站产生的最大侧向变形位置, 采用强制位移法进行附加变形引起的内力及其分布。

利用叠加法原理, 将结构整体受力后的内力与强制位移计算的附加内力进行叠加, 来确定整个车站结构的控制截面。同时, 根据既有车站结构的材料强度、结构尺寸及所配钢筋, 通过裂缝控制及强度控制, 计算车站结构所能承受的最大内力, 即允许内力。

将车站结构内力值与允许内力相比较, 即可判断车站结构的工作状态; 将两内力差值按强制位移得到的附加内力均分, 可得到车站结构允许的变形量, 即可确定基坑施工时车站变形的控制标准, 进而评估车站结构的安全性。

2.2 计算步骤

(1) 整体结构内力计算

将整个车站结构作为一个整体, 作用所有外部荷载, 计算整体车站结构的内力 M' 。目的是将内力值与原始设计计算时的内力标准值 M 进行比较, 如果两者结果相近, 则可确定为整体结构的内力分布。

(2) 计算单位强制位移产生的附加内力

依据实际情况, 确定可能产生最大侧向位移的位置 P 。利用叠加原理, 在边界条件不变的情况下, 仅在此位置 P 处施加一个侧向的单位强制位移, 计算在单位强制位移的作用下车站整体结构的内力附加值 ΔM 以及内力分布。

(3) 确定结构的控制截面

将上述两步计算得到的内力分布图进行对比叠加, 弯矩显著增加的部位都为控制截面, 相互消减

弯矩的部位基本都为安全截面, 由此可以确定整个结构控制变形的控制截面。

(4) 按裂缝控制计算允许内力和变形量

对于每个控制截面, 根据结构的材料强度、结构尺寸及所配钢筋, 按裂缝控制 (取 $\delta=0.3\text{ mm}$) 可反算求得结构所能承受的允许内力 M_f , 以及 P 点允许的变形量 $d_f=(M_f-M)/\Delta M$ 。

(5) 按强度控制计算允许内力和变形量

对于每个控制截面, 根据结构的材料强度、结构尺寸及所配钢筋, 按强度控制 (实际配筋量 Q) 可反算求得结构所能承受的允许内力 M_q , 以及 P 点允许的变形量 $d_q=(M_q-M)/\Delta M$ 。

(6) 确定允许变形量

将按步骤 (4) 和 (5) 求出的各个变形量进行比较, 取 P 点对应各个截面中 d_f 和 d_q 中的最小值; 为确保结构的安全, 可同时满足裂缝控制和强度控制的要求, 可取 $d=\min\{d_{f\min}, d_{q\min}\}$ 作为结构的允许变形量。

3 工程模型及参数

上海某地铁车站, 车站结构长大约为 243 m, 宽约为 17.7 m, 为地下两层结构, 施工方式采用顺筑法, 围护结构采用 0.6 m 厚的地下连续墙, 其长度约为 26 m, 内衬墙厚 0.45 m, 基坑深度约为 14 m。该车站目前处于正常运营状态。

由于该地铁车站设计及建成时间较早, 材料强度参数的选取、设计计算方法均是按照《钢筋混凝土结构设计规范》(TJ 10-74)^[6]。本次计算在评价车站结构承载能力与安全度分析时, 也按照上述规范选取标准段车站结构进行计算。

3.1 车站标准段结构

该车站标准段的结构如图 1 所示。地下连续墙厚为 0.6 m, 长为 25.7 m, 内部结构底板厚为 1.05 m, 中板厚 0.6 m, 顶板中部厚 0.5 m, 两侧厚 0.5~0.95 m, 内衬墙厚度为 0.45 m, 其中基坑开挖深度约为 14 m, 并在基坑底部设有倒滤层。

3.2 计算模型

本次计算针对车站标准段结构建立有限元模型, 墙、板等构件均采用梁单元来模拟。结构所受恒荷载为自重与土压力, 活荷载为地面超载, 取 20 kPa。底板下侧及地墙下侧采用弹簧连接来模拟土压力作用, 地墙两端竖向用弹簧连接, 水平向施加位移约束。具体荷载及条件参见下述计算工况。

3.3 计算参数

按照《钢筋混凝土结构设计规范》(TJ 10-74),

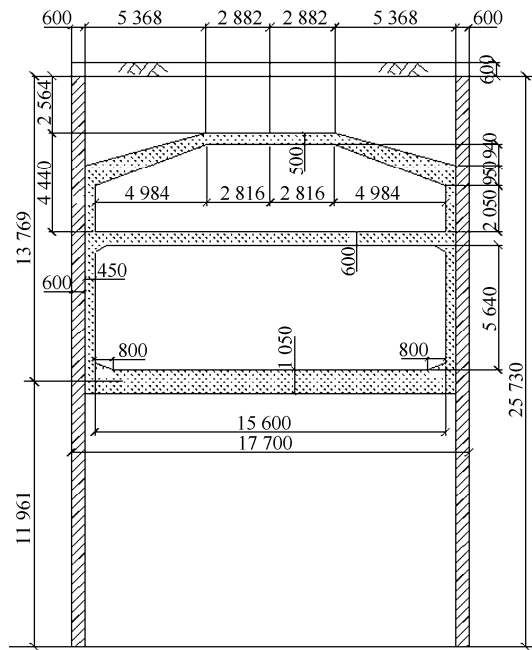


图 1 车站标准段结构图 (单位: mm)
Fig.1 Structure of standard station(unit: mm)

地下连续墙混凝土标号为 C25, 其弹性模量为 2.85×10^7 kPa, 重度为 25 kN/m^3 , 泊松比取 0.2; 内衬墙、板的混凝土标号为 C30, 其弹性模量为 3.0×10^7 kPa, 重度为 25 kN/m^3 , 泊松比取 0.2; 结构的侧向土压力系数按后期土压力系数 0.8 计算, 土体的重度取为 18 kN/m^3 ; 土抗力系数 K 取 10 000 kN/m^3 , 地下墙底端抗力系数取 80 000 kN/m^3 。

4 计算结果及分析

4.1 整体结构内力计算

车站结构的地墙两侧受土压力作用, 计算公式为 $P = k(18h + 20)$, k 为侧压力系数, 取 0.8, h 为地墙的埋深, 至基坑底; 底板由于倒滤层的存在, 不受水反力作用, 只受底板土反力作用; 中楼板考虑 20 cm 铺装层和活荷载作用共 8.4 kPa; 顶板作用覆土压力和超载详见图 2, 其弯矩分布见图 3 所示, 其中的主要截面的数值已在图中标出, 其中 I 、 J 表示的数据为主要截面单元两个端点处的弯矩值。

将计算所得的结构内力较大的关键部位与原设计计算书中结构内力进行比较, 其对比结果见表 1。将内力值 M' 与原始设计计算值 M 进行比较, 结果相差不大, 偏差率均在 $\pm 5\%$ 范围内, 则可确定整体结构关键部位的内力分布图与本次计算结果一致。

4.2 施加强制位移

由于该车站为地下车站, 在附近进行基坑开挖, 会引起车站的变形, 由于开挖基坑深度在 12 m 左右, 故可认为对附近车站引起的变形是以车站顶部

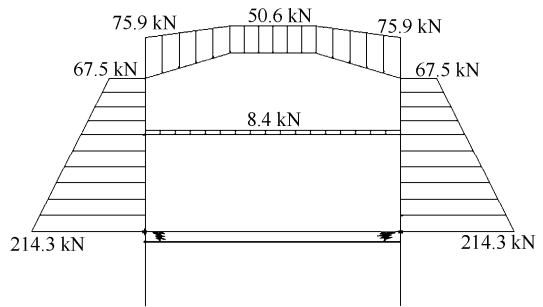


图 2 车站结构计算简图
Fig.2 Calculation sketch of station structure

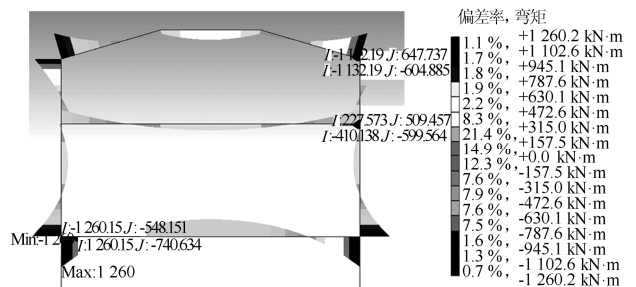


图 3 车站结构弯矩分布
Fig.3 Bending moment diagram of station structure

表 1 结构内力计算对照表
Table 1 Result contrast of bending moment

结构	部位	原内力值 M (/kN·m)	计算值 M' (/kN·m)	偏差率 /%
顶板	外侧 (近地墙)	875	873.5	-0.2
中板	上侧 (近地墙)	545	549.9	0.9
底板	下侧 (近地墙)	1014	1003.7	-1.0
复合地墙	内侧 (近中板)	315	322.1	2.3
复合地墙	外侧 (近顶板)	995	994.4	-0.1
复合地墙	外侧 (近底板)	995	1037.5	4.3

变形为最大。在上述整体结构计算模式上, 取消所有外部荷载, 在边界条件不变的情况下, 在车站顶部 P 处仅施加一个 1 mm 的水平强制位移, 见图 4 所示, 计算得出在单位强制位移的作用下引起车站整体结构的内力值 ΔM 以及内力分布。

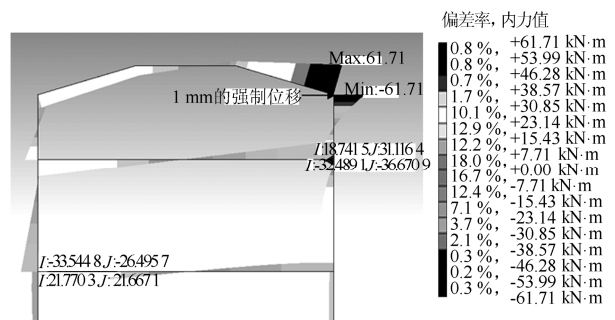


图 4 施加强制位移后结构内力分布
Fig.4 Bending moment diagram in forced displacement method

4.3 确定控制截面

将上述两步计算得到的整体结构内力分布图与施加强制位移后所得内力分布图进行对比叠加，同方向相加，反方向相减，得到弯矩显著增加的控制截面共有 6 个，分别为顶板顶面 1 号截面、中板上侧 2 号截面、底板下侧 3 号截面、复合地墙内侧 4 号截面、复合地墙外侧 5 号截面、复合地墙外侧 6 号截面，具体部位见图 5 所示。

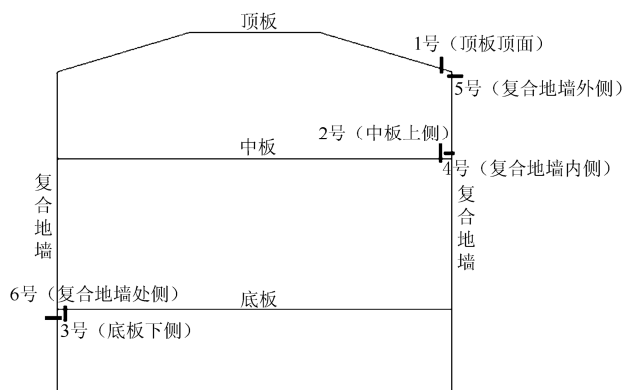


图 5 控制截面示意图
Fig.5 Control Sections

4.4 按裂缝控制计算变形量

对各个控制截面，按裂缝控制（取 $\delta=0.3\text{ mm}$ ）来反算结构所能承受的允许内力 M_f 和顶板处允许的变形量 d_f ，具体计算值列入表 2 所示。

4.5 按强度控制计算变形量

对各个控制截面，按强度控制（实际配筋量 Q ）反算结构所能承受的允许内力 M_q 和顶板处允许的变形量 d_q ，具体计算值列入表 3。

表 2 按裂缝控制计算的变形量
Table 2 Displacement by fracture control

截面	结构	部位	M /(kN·m)	实际配筋量 Q/mm^2	M_f /(kN·m)	ΔM /(kN·m)	d_f /mm
1	顶板	外侧 (近地墙)	875	7 420	1 330	61.7	7.4
				($\phi 32@150+$ $\phi 28@300$)			
2	中板	上侧 (近地墙)	545	5 388	720	36.7	4.8
				($\phi 32@150$)			
3	底板	下侧 (近地墙)	1 014	5 388	1 110	21.7	4.4
				($\phi 32@150$)			
4	复合地墙	内侧 (近中板)	315	2 547	486	31.1	5.5
				($\phi 22@150$)			
5	复合地墙	外侧 (近顶板)	995	9 514	2 020	61.7	16.6
				($\phi 32@150+$ $\phi 28@150$)			
6	复合地墙	外侧 (近底板)	995	9 514	2 020	33.5	30.6
				($\phi 32@150+$ $\phi 28@150$)			

表 3 按强度控制计算的变形量
Table 3 Displacement by strength control

截面	结构	部位	M /(kN·m)	实际配筋量 Q/mm^2	强度安全系数 K	M_d /(kN·m)	ΔM /(kN·m)	d_q /mm
1	顶板	外侧 (近地墙)	875	7 420	1.4	1 380	61.7	8.2
				($\phi 32@150+$ $\phi 28@300$)				
2	中板	上侧 (近地墙)	545	5 388	1.4	600	36.7	1.5
				($\phi 32@150$)				
3	底板	下侧 (近地墙)	1 014	5 388	1.4	1 150	21.7	6.3
				($\phi 32@150$)				
4	复合地墙	内侧 (近中板)	315	2 547	1.4	590	31.1	8.8
				($\phi 22@150$)				
5	复合地墙	外侧 (近顶板)	995	9 514	1.4	1 940	61.7	15.3
				($\phi 32@150+$ $\phi 28@150$)				
6	复合地墙	外侧 (近底板)	995	9 514	1.4	1 940	33.5	28.2
				($\phi 32@150+$ $\phi 28@150$)				

4.6 确定允许变形量

将表 2 和表 3 的结果进行对比分析，选取各表中计算结果的最小值作为相应的允许变形量。按裂缝控制时，结构达到最大允许内力时在顶板处的最大允许变形量为 4.4 mm，对应于底板下侧（3 号截面）；按强度控制时，在顶板处的最大允许变形量为 1.5 mm，对应于中板上侧（2 号截面）。

在设计计算中，出于安全考虑结构均是按照存弯构件进行计算的，同时考虑到钢筋混凝土材料有一定的塑性，当局部强度不满足时，局部应力集中部位会出现塑性铰，发生应力重分布，从而改善其受力状态。因此，如按裂缝控制，变形量取 4.0 mm，对于中板将会发生应力重分布，可将端部的多余内力转移到中板中心部位的下侧。

经过计算，中板转移弯矩为 91.8 kN·m，中板下侧承受的总弯矩为 361.6 kN·m。按照强度控制反算，中板下侧能承受的最大弯矩为 380 kN·m，按照裂缝 0.3 mm 控制反算，中板下侧能承受的最大弯矩为 410 kN·m。应力重分布后，中板下侧承受的内力 361.6 kN·m 均满足强度和裂缝控制的要求，故可判定中板是安全的。

故可得出，按照顶板处允许变形量为 4.0 mm 时，中板通过内力重分布能够满足强度和裂缝的控制要求，同时其他部位也都能满足强度和裂缝的控制要求。因此，本次计算就将顶板处允许变形量定为 4.0 mm。

5 结 论

(1) 采用荷载结构法和叠加原理，对正常运营

阶段的车站,按照临近基坑开挖深度确定在车站顶板与地下墙连接处设为最大侧移变形发生点,分别按裂缝控制和强度控制进行了最大承载能力验算和允许变形控制分析。

(2) 按裂缝控制计算得到车站顶板处允许的最大变形量为 4.4 mm;按强度控制计算得到车站顶板处允许的最大变形量为 1.5 mm。

(3) 如考虑中板在两端局部应力集中后出现塑性铰,内力发生重分布,在同时满足裂缝和强度控制的要求下,车站结构允许的最大变形量为 4.0 mm。

参考文献

- [1] 贾永刚,王明年,任世林. 地铁区间下穿既有地铁车站结构安全力学分析[J]. 铁道学报, 2007, 29(6): 89—94.
- [2] 高盟,高广运,冯世进,等. 基坑开挖引起紧贴运营地铁车站的变形控制研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(6): 818—823.
- [3] 姚燕明,孙巍. 深基坑开挖对共用连续墙的既有车站结构内力影响的空间分析[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(增刊): 1411—1414.
- [4] 谢秀栋,刘国彬,李志高,等. 邻近运营地铁车站基坑开挖土层位移特性分析[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(4): 742—757.
- [5] 陶连金,唐四海,金亮. 隧道上穿既有车站结构的变形预测及安全评估[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(3): 442—447.
- [6] 中华人民共和国建设部. TJ 10—74 钢筋混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1988.