

建（构）筑物的变形控制指标

吴锋波^{1,2}

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所 工程地质力学重点实验室 北京 100029; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:城市轨道交通和其他市政地下工程建设难免造成周边建（构）筑物的变形, 确定建（构）筑物的变形控制指标是进行安全监测和控制的基础。总结目前建（构）筑物控制的各类变形参数, 对其量化研究成果进行归纳, 根据收集的大量变形监测资料, 划分建（构）筑物的变形损坏等级, 对其沉降、差异沉降和倾斜等常规监测项目进行重点分析, 并研究了建筑尺寸和变形量、损坏等级的关系。研究表明, 砂土地层独立柱基的建筑易于产生变形破坏, 应防止建筑过量沉降引起的其他变形损坏; 建（构）筑物的角变量小于 0.002 时一般未出现较大影响; 建筑尺寸影响变形的大小, 应密切关注易于出现变形损坏的多层、高层建筑。

关键词: 地下工程; 建（构）筑物; 变形控制指标

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Deformation controlling indices of buildings and structures

WU Feng-bo^{1,2}

(1. Key Laboratory of Engineering Geomechanics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2. Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The urban rail transit and other municipal construction projects may inevitably lead the surrounding buildings and structures to deform. The deformation controlling index is the foundation of safety monitoring and controlling. The various types of deformation parameters and its quantitative research results are summarized. According to large information of deformation monitoring data, the damage grade is determined. The regular monitoring items of settlement, differential settlement and tilt are analyzed; and the relationship between building size, deformation value and damage grade is studied. The result shows that the buildings with independent plinth on sand soil are easy to deform and damage. The excessive settlement should be limited to keep building safe from damage caused by other deformations. The buildings are safe under angular variable of 0.002. The building size affects the deformation; and the easily damaged multistory and high-rise buildings should be paid more attentions.

Key words: underground engineering; building and structure; deformation controlling index

1 引言

随着城市轨道交通与其他市政地下工程建设的兴起, 浅埋隧道、基坑临近或下穿建（构）筑物的现象逐渐增多。工程建设不可避免会对周边地层产生扰动, 引起地表沉降或隆起, 从而引发建（构）筑物的沉降、差异沉降、倾斜等变形, 过量时可导致其使用功能和承载能力的受损, 危及人民生命财产安全。工程建设必须对周边建（构）筑物进行安全风险评估和控制, 以确切的变形控制指标为标准进行监控。

目前, 由于问题的特殊性和复杂性, 对建（构）

筑物可承受新建工程附加变形的研究很多, 但实际制定的控制指标数值一般较为保守。建（构）筑物由于结构形式、基础类型、建筑尺寸、修建年代、使用功能、荷载情况、重要程度等的不同, 对变形的控制要求也不同, 有必要对其变形控制指标进行系统的研究, 确定科学适宜的数值, 进行有针对性的监控, 防止盲目控制下的资金浪费。

2 城市地下工程施工对建（构）筑物的影响

城市新建基坑、隧道等地下工程施工可引起的建（构）筑物危害主要表现为地面不均匀沉降带来

的建(构)筑物差异沉降、倾斜(或局部倾斜)等。一般损害主要有以下几方面。

(1) 地表沉降损害 地表的均匀沉降可使建(构)筑物产生整体的均匀下沉, 对其上部结构影响不大, 稳定性和使用条件不会产生太大影响。但沉降量过大时, 可能造成室内地坪低于室外, 引起雨水倒灌、管道断裂等问题。沉降量过大也往往产生不均匀沉降, 建(构)筑物的差异沉降常常导致结构构件受剪扭曲而破坏, 尤其框架结构对沉降差值较为敏感。

(2) 地表倾斜损害 地层不均匀沉降导致地表倾斜对于底面积小、高度大的建筑物影响较大, 使其重心偏斜, 也导致结构应力发生变化而引起破坏。普通楼房即使结构未受较大损害, 过量倾斜也会使其使用功能受损。某些建筑内的精密仪器对倾斜更为敏感。

(3) 地表曲率损害 地表变形形成曲面, 建(构)筑物处于地表相对下凹的负曲率时, 基础犹如两端受支承的梁, 中间悬空, 上部受压、下部受拉, 墙体易产生正 8 字和水平裂缝, 建(构)筑物长度过大时可在重力作用下出现底部断裂; 处于地表相对上凸的正曲率时, 基础两端部分悬空, 上部受拉、下部受压, 墙体易产生倒 8 字裂缝, 严重时出现屋架或梁的端部从墙体或柱内抽出, 造成倒塌。

(4) 地表水平变形损害 地表水平变形指地表的拉伸和压缩, 位于地表拉伸区的建(构)筑物基础底受外向摩擦力作用, 很小的拉伸变形足以使其开裂, 尤其是砌体房屋。一般的建(构)筑物对压缩抗力较大, 但压缩变形过大同样也可使其在结构薄弱处发生挤碎性破坏, 损坏程度比拉伸更为严重^[1]。

3 建(构)筑物变形控制指标

目前国内外学者主要采取定量参数评价的方法, 根据实际监测数据与变形控制指标的比较评定工程建设带来的建(构)筑物损坏程度, 确定是否进行加固、改造等控制措施。有关建(构)筑物变形控制指标的研究已经积累了一些研究成果和工程评价标准, 变形控制指标主要包括沉降量、差异沉降量、倾斜量(角变量)、裂缝宽度等。

3.1 沉降控制指标

建(构)筑物沉降控制指标主要包括沉降量和差异沉降量, 分别指建(构)筑物的整体沉降变形值、不同沉降点的差异变形值。沉降量和差异沉降量最早被用作建(构)筑物的变形控制参数, 表 1

为不同文献建议的建(构)筑物允许最大沉降量和差异沉降量^[2-10]。

表 1 建(构)筑物的允许沉降和差异沉降量
Table 1 The permitted settlement and differential settlement

基础、结构	主要地层	最大沉降量 /cm	差异沉降量 /cm	文献来源
钢筋混凝土结构独立基础	砂土	2.5	2.0	Terzaghi & Peck ^[2]
		5.0*	3.0*	Skempton & MacDonald ^[3] *
		3.0		日本建筑学会 ^[4]
	黏土	7.5		Skempton & MacDonald ^[3] *
钢筋混凝土结构筏板基础	砂土	10.5		日本建筑学会 ^[4]
		5.0	2.0	Terzaghi & Peck ^[2]
		5.0~7.5	3.0	Skempton & MacDonald ^[3] *
		6.0~8.0		日本建筑学会 ^[4]
	黏土		3.0	Grant et al. ^[5] *
		7.5~12.5	4.5	Skempton & MacDonald ^[3]
		20.0~30.0		日本建筑学会 ^[4]
			5.6	Grant et al. ^[5] *
桩基础天然地基		5.0~7.5		Rankin ^[6]
		1.0		《广州地区建筑基坑支护技术规范》 ^[7]
		3.0		
		2.0~6.0		《基坑工程施工监测规程》 ^[8] **
		1.0~6.0		《建筑基坑工程监测技术规范》 ^[9] **
		2.5~4.5		易小明, 张顶立等 ^[10]

注: *对应角变量为 1/300; **位移变化速率 1~3 mm/d 时应报警。

由表 1 可知, 除日本建筑学会外, 其他研究成果规定的最大沉降量和差异沉降量相差不大。黏土类地层使建(构)筑物沉降速率较为缓慢, 其可逐渐调整应力状态, 允许值较大, 而砂土类地层局部沉降可能性较高, 允许值相对较小。

国内地基基础设计类规范对建(构)筑物的地基变形允许值也进行了具体的规定, 主要指建(构)筑物使用期限内(一般 50 年)长期稳定状态下的沉降与差异沉降允许值, 由于基础、结构、地层等条件的不同, 取值由 2 cm 至 40 cm 不等^[11]。城市新建地下工程对周边建(构)筑物的附加变形只是其允许变形值的一部分, 一般建(构)筑物的已有变形、工程附加变形及其后续使用期限内变形值的总和才是地基基础设计允许变形值。基坑类规范给出了变形监测的允许范围值, 实际应用时则需要根据具体工程特点进行考虑。

3.2 倾斜控制指标

建(构)筑物的倾斜控制指标主要是指其角变量。角变量或相对倾角量是指两参考点之间连线相对于倾斜倾角的变化量, 即考虑倾角的影响, 一般

适用于筏式或连续基础。独立基础等存在个别倾斜量时一般不考虑倾角, 定义为差异沉降量与两点间距离的比值。角变量也是目前普遍采用的建(构)筑物变形控制参数。

Skempton 和 MacDonald 根据 98 栋建筑物的损坏调查结果认为, 角变量大于 0.003 时承重墙及框架式建筑物的隔墙可能发生开裂, 大于 0.006 时可能发生结构性破坏, 建议以 0.002 作为角变量的控制指标^[3]; Bjerrum 建议采用 0.006、0.002 作为一般框架结构建筑物结构性破坏与墙体出现裂缝的控制指标^[12]; Grant 等^[5]进一步研究认为 0.003 可作为建筑物出现裂缝的极限指标。国内外对建(构)筑物允许角变量的研究成果见表 2 和图 1^[1, 4-6, 11-17]。

表 2 建(构)筑物的允许角变量
Table 2 Permissible angular variables

文献来源	结构出现损坏	墙体出现开裂	备注
Skempton, MacDonald ^[4]	0.006	0.003	建议 0.002
Meyerhof ^[13]	0.004	0.002	
Polshin, Tokar ^[14]	0.005	0.002	
Bjerrum ^[12]	0.006	0.002	
Grant, 等 ^[5]		0.003	
Breth, Chambosse ^[1]	0.002 2		法兰克福 3~5 层建筑, 无损害
Rankin ^[6]	0.002~0.005		框架结构、独立或桩基础, 轻微破坏、视觉损害
陈惠珠 ^[15]	0.006	0.002	
美国基础工程手册 ^[1]	0.002		不允许开裂的房屋
德国 ^[1]	0.000 5~0.003		机械基础
前苏联 ^[1]	0.004~0.006		
波兰建筑物破坏等级 ^{[11]*}	0.002 5~0.005		仔细保护, 允许易修理裂缝
煤炭开采规程 ^{[16]*}	0.003~0.006		需小型修缮
《建筑地基基础设计规范》 ^[11]	0.004~0.002 0.008~0.002		多层、高层建筑整体倾斜 高耸结构基础的倾斜

注*为地表变形倾斜值。

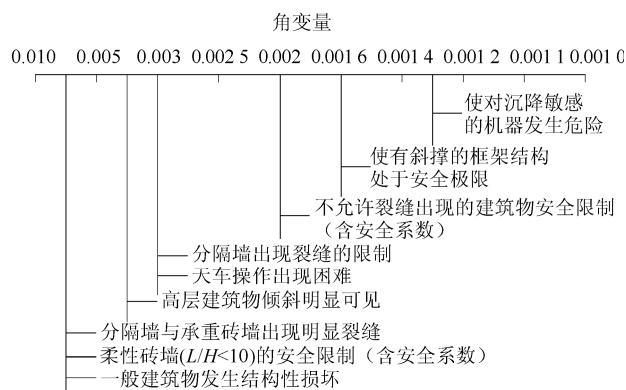


图 1 不同角变量下建(构)筑物的变形^[12, 17]
Fig.1 Deformations of different angular variables^[12, 17]

由表 2、图 1 可知, 一般建(构)筑物的角变量小于 0.002 时, 不会有损坏出现, 可认为其未受较大影响; 大于 0.006 时, 结构出现可能出现损坏, 使用功能和承载能力都会受到影响。

3.3 裂缝控制指标

裂缝宽度是评估建(构)筑物破坏情况的重要参数之一。根据差异沉降等造成的裂缝分布情况可判断工程建设对建(构)筑物的损坏程度, 确定其承载结构是否受到损坏, 使用功能、承载能力是否受到较大影响。Burland 等^[18]根据裂缝宽度将建筑物损坏程度分为 6 级(表 3), 认为裂缝宽度小于 5 mm 时, 建(构)筑物受到的影响程度为轻微。

表 3 建(构)筑物的破坏程度分级
Table 3 The damage grading

破坏程度	典型破坏症状描述	裂缝宽度/mm
无损坏	毛细裂缝	<0.1
极轻微	裂缝可轻易装修处理, 建筑物可能存在单独的轻微裂缝, 外部墙体可近距离发现小裂缝	0.1~1.0
轻微	裂缝可轻易填补, 内墙上出现数条裂缝, 外墙裂缝可见且需嵌缝以防风雨, 门窗开启稍受影响	1.0~5.0
中度	裂缝需要清理并修补, 重新生成的裂缝可以用适当的衬材遮盖, 外部砖墙可能需要重砌, 门窗卡住, 公共服务设施可能中断, 需经常修补漏水	5.0~15.0, 或数条小于等于 3.0
严重	需大规模修补建筑物, 包括拆除或置换部分墙体(尤其门窗之上), 门窗外框扭曲, 楼板显著倾斜, 管道断裂	15.0~25.0, 并与裂缝数量有关
极严重	建筑物需部分或全部重建, 梁支端端松脱, 墙倾斜严重并需要加支承, 窗户因扭曲而破坏, 结构有失稳的危险	>25.0, 并与裂缝数量有关

《民用建筑可靠性鉴定标准》^[19]规定: 5.0 mm 为砌体结构构件的裂缝极限值, 柱、板等主要承载结构的裂缝宽度不应大于 1.5 mm。《危险房屋鉴定标准》^[20]规定: 砌体结构受压墙、柱出现大于 2.0 mm 裂缝或支撑梁或屋架端部的墙、柱出现多条超过 1.0 mm 裂缝, 混凝土结构构件出现 0.4~1.0 mm 裂缝时房屋可能存在危险。《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程》^[16]规定: 建筑物出现少量小于 4.0 mm 的裂缝时, 可不进行修缮; 墙壁出现 4.0~15.0 mm 裂缝时则需小修。《建筑基坑工程监测技术规范》^[9]规定的建筑裂缝容许值为 1.5~3.0 mm。

工程建设之前, 应查明建(构)筑物的已有裂缝, 根据裂缝发育情况判断安全现状。当工程建设

过程中出现 1.0~3.0 mm 的新裂缝时, 应进行建(构)筑物安全状态的动态评定, 确定是否采取必要的加固措施。笔者对北京地铁国际机场线实测结果表明建筑物墙体出现宽 34.9~50.0 mm 的裂缝时, 其承重结构出现开裂, 影响建筑安全, 应严格防止裂缝的出现和过量扩展。

3.4 挠度控制指标

挠度控制指标主要是指建(构)筑物的挠度比。建(构)筑物的相对挠度 Δ 是指相对于相距 L 两点连线的位移量, 挠度比 Δ/L 是指相对挠度与两点间距离的比值。最大挠度比一般适用于砌体结构, Polshin 和 Tokar^[14] 考虑了建筑物长高比 (L/H) 和土层种类分别建议了极限值, 见表 4。

表 4 砌体结构允许挠度比
Table 4 Permissible deflection ratios

曲率	Meyerhof ^[13]	Polshin, Tokar ^[14]	Burland, Worth ^[18]
		$L/H < 3$	
地表负曲率	1/2 500	1/3 500(砂土)~1/2 500(黏土)	$L/H=1$ 1/2 500 $L/H=5$ 1/1 250
		$L/H > 5$	
		1/2 000(砂土)~1/1 500(黏土)	
地表正曲率			$L/H=1$ 1/5 000 $L/H=5$ 1/2 500

砌体结构容许挠度比约为 1/5 000~1/1 500, 随建筑物长高比 (L/H) 的减小而降低。一般建(构)筑物处于地表负曲率区时的允许挠度比约为地表正曲率区时的 2 倍。

此外, 对于建(构)筑物的结构构件也有相关的挠度要求。一般楼(屋)主梁或桁架的容许挠度为 $L_0/250 \sim L_0/350$, 平台板为 $L_0/150$, 支柱为 $L_0/400$, 砌体墙的横梁为 $L_0/300$ (L_0 为受弯构件跨度)。《危险房屋鉴定标准》^[20] 规定, 混凝土结构构件梁板挠度大于 $L_0/150$ 或屋架挠度大于 $L_0/200$, 钢结构梁板等构件挠度大于 $L_0/250$ (或大于 45 mm) 或屋架挠度大于 $L_0/250$ (或大于 40 mm) 时, 房屋可能存在危险。

3.5 应变控制指标

为研究建筑物发生损坏的机制、原因及影响因素, Burland 和 Wroth 将建筑物简化为长 L 高 H 的简支梁模型, 变形产生挠度后简支梁可能因弯矩而出现挠曲应变或因剪力而出现斜拉应变, 当拉应变大于材料极限拉应变 ε_{lim} 时, 开始出现开裂。简支梁出现裂缝的极限挠度与建筑物长高比 L/H 、弹性模量 E 和剪切模量 G 有关。根据弹性力学, 单位厚度简支梁承受作用于中点的集中荷载 P 时, 中点处

相对挠度 Δ 为

$$\Delta = \frac{P L^3}{48 EI} \left(1 + \frac{18}{L^2} \frac{I}{H G} \right) \quad (1)$$

式中: I 为截面惯性矩, $I = H^3/12$ 。

若式 (1) 以最大挠曲应变 ε_{bmax} 表示, 可写为

$$\frac{\Delta_{lim}}{L} = \varepsilon_{bmax} \frac{L}{6H} \left(1 + \frac{18}{L^2} \frac{I}{H G} \right) \quad (2)$$

式中: Δ_{lim} 为梁的极限挠度。

若式 (1) 以最大斜拉应变 ε_{dmax} 表示, 可写为

$$\frac{\Delta_{lim}}{L} = \varepsilon_{dmax} \left(1 + \frac{L^2}{18} \frac{H G}{I E} \right) \quad (3)$$

令 $\varepsilon_{bmax} = \varepsilon_{lim}$, $\varepsilon_{dmax} = \varepsilon_{lim}$, 即可分别求出简支梁由挠曲应变和斜拉应变开始产生裂缝的极限挠度比 (Δ_{lim}/L)。由式 (2)、(3) 可知, ε_{lim} 为已知时, 极限挠度比与 L/H 、 E/G 和中立轴的位置 (I 的大小) 有关。

Burland 和 Wroth^[18] 认为, 砌体结构和钢筋混凝土结构发生裂缝的 ε_{lim} 分别为 0.05%~0.10% 和 0.03%~0.05%。Cording et al^[21] 认为, 砖石承重墙结构的极限应变为 0.10%、填充式框架结构为 0.15%。Burland^[22] 认为, 一般砌体结构极限拉应变小于 0.15% 时不会导致建筑功能的丧失, 达到 0.15~0.30% 时应进行加固措施。S.J.Boone^[23] 认为, 剪应变为 0.10% 时能够导致明显裂缝, 临界剪应变大概是临界拉应变的 2 倍。国内外对建(构)筑物允许应变的研究成果见表 5^[1]。

表 5 建(构)筑物的允许应变值
Table 5 Permissible strains

国别	压缩 /(mm/m)	拉伸 /(mm/m)	备注
中国		2.0	
英国	1.0	1.0	30 m 长建筑
德国	0.6	0.6	
波兰	1.5	1.5	
	0.5	0.5	混凝土基础
日本	1.0	1.0	木板房
	5.0	5.0	污水池
前苏联	2.0	2.0	顿巴斯
	4.0	4.0	卡拉干达
美国	0.8	0.4	

3.6 水平变形控制指标

水平变形控制指标主要包括水平位移与水平应变, 水平位移是指建筑物在水平方向的变化量, 水

平应变是指水平位移差值与两点距离的比值。新建工程对建(构)筑物水平变形影响的研究较少,英国煤矿协会(1975年)提出了建筑物损坏程度与长度、水平应变的关系。根据建筑物长度变化系数将建筑物的破坏分为5级,见表6和图2)^[24]。

表6 建(构)筑物水平变形损坏等级
Table 6 The damage grades of horizontal deformation

建筑物长度变化量/m	损坏等级	典型损坏描述
<0.03	极轻微	建筑物抹灰有细裂纹
0.03~0.06	轻微	建筑物内有若干小裂缝,门窗启闭有轻微不灵活感
0.06~0.12	中度	能够在建筑物外见到小裂缝(或1条大裂缝),门窗卡紧,上下水管道可能断裂
0.12~0.18	严重	管道断裂,结构物开裂后透风,需要修补;门窗框变形,地板明显倾斜,墙壁明显歪斜或鼓起,梁失去若干支承,受压缩时屋顶隆起,墙砌体产生水平裂缝而隆起
>0.18	极严重	破坏更严重,需部分或全部翻修,屋顶和地板梁脱离支座,需加支撑,窗户变形折断,受压缩时屋顶和墙壁严重弯曲和隆起

图2只考虑了水平应变单独发生的情况,未考虑水平和垂直应变的共同作用。水平应变会减少建(构)筑物对垂直应变的抵抗力,因此 Boscardin 和 Cording 进一步依据简支梁模型研究了水平应变对砌体结构建筑的影响,得出极限角变量 β_{lim} 计算公式为

$$\beta_{lim} = \frac{3A_{lim}}{L} \left(\frac{1+4\frac{E}{G}\frac{H^2}{L^2}}{1+6\frac{E}{G}\frac{H^2}{L^2}} \right) \quad (4)$$

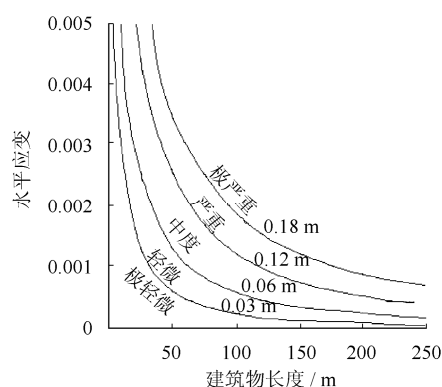


图2 建(构)筑物损坏程度与长度变化量、水平应变的关系

Fig.2 Relationships between damage grade, length variation and horizontal deformation

Boscardin 等^[25]考虑中立轴位于梁下端,并且 $L/H = 1$,由式(4)建议砌体结构承重墙损坏程度与水平应变、角变量的关系如图3所示。

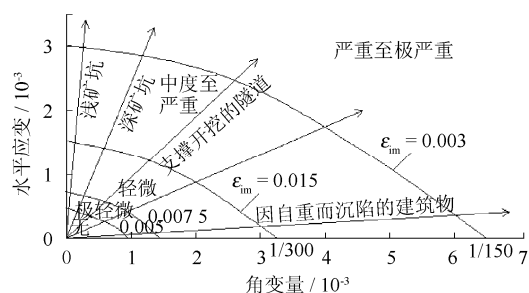


图3 砌体房屋承重墙损坏程度与水平位移、角变量的关系
Fig.3 Relationships masonry bearing wall damage, horizontal deformation and angular variable

此外,韩焯、Jamie R Standing 等^[26]对城市轨道交通地下工程建设造成的建(构)筑物扭曲变形进行了初步研究,扭曲变形即基础平面变形前后两个角度变化之差与两个对边距离的比值,其以伦敦伊丽莎白大厦为例,研究表明最大正扭曲为 $0.014 \times 10^{-3}/m$,最大负扭曲 $-0.023 \times 10^{-3}/m$ 时未发现建筑结构有明显损坏。

4 建(构)筑物变形案例分析

目前,对建(构)筑物变形控制指标的研究方法包括监测案例统计分析、工程结构力学计算、数值模拟分析等。由于研究问题的复杂性,结构力学计算、数值模拟分析等方法的研究结果与工程实际有一定差距,基于实际工程的调查统计可以反映建(构)筑物的实际变形情况,可为该项研究的深入开展提供基础性资料。

为研究城市轨道交通及其他市政地下工程建设对周边建(构)筑物变形的影响,笔者收集了所参与的北京地铁建(构)筑物监测资料及其他发表刊物、书籍中的国内外相关监测资料。根据表3的损坏等级对建(构)筑物受影响程度进行等级划分,并根据地层情况将黏性土、砂类土为主的地层统称为黏土和砂土两大类,包含基础形式、结构类型以及沉降、差异沉降、倾斜等详细资料的建(构)筑物共130栋(图4),其他基础资料有欠缺的监测结果则根据研究内容的不同参与相关的统计和分析。由于工程建设以前建(构)筑物已有变形资料较少,对于新建建筑来说分析结果偏于保守。分析表明,建筑时间大于30年的旧建筑一般易于损坏,而小于10年的新近建筑则未发现较大损坏。

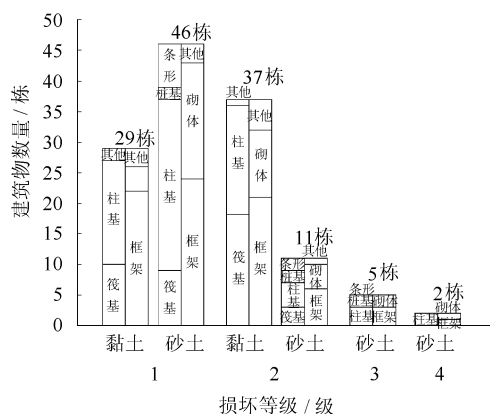


图4 资料较详细的建(构)筑物统计分布图
Fig.4 The content of construction (structures) with detailed information

由图4可知,黏土地层上的建(构)筑物受影响程度主要为无损坏或极轻微损坏,而砂土地层各类损坏均有。有轻微或中度影响需修缮的建(构)筑物基础形式主要为独立柱基,相对于其他基础来说,该类基础容易产生差异沉降,受地层变形也较为敏感。

4.1 沉降和损坏等级的关系

建(构)筑物沉降量、差异沉降量和损坏等级的对应关系如图5所示。

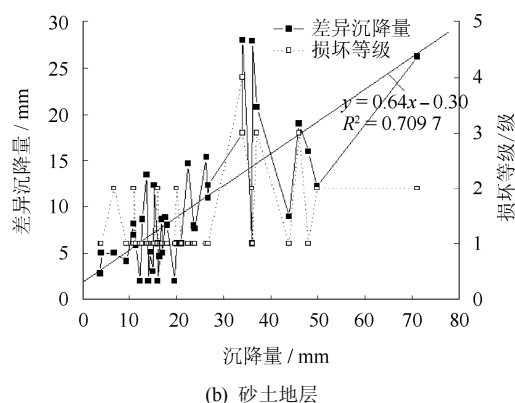
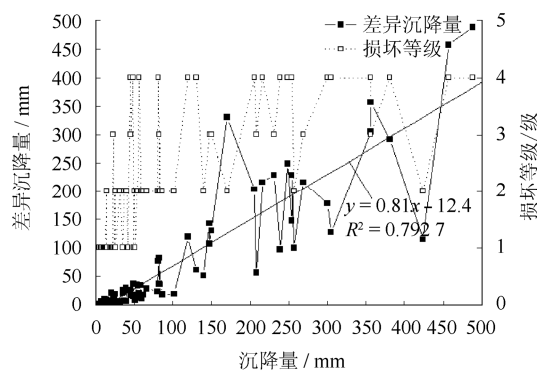


图5 建(构)筑物沉降量、差异沉降量和损坏等级的关系
Fig.5 Relationship between settlement, differential settlement and damage grade

建(构)筑物的差异沉降量一般随着沉降量的增加而增大,相应的损坏程度也逐渐增大。黏土地层建(构)筑物整体沉降量大于20 cm时,可产生大于15 cm的差异沉降,主要为轻微和中度损坏,建筑物需要进行修缮。黏土地层建(构)筑物对沉降的可调节性较强,但其整体沉降也应该控制在20 cm以内。

砂土地层建(构)筑物很小的沉降便可引发较大的变形,整体沉降量小于3 cm时影响程度极轻微,大于3 cm时可出现轻微和中度的变形。砂土地层建(构)筑物对沉降变形相对敏感,应严格控制其沉降变形。

黏土地层建(构)筑物沉降量、差异沉降量对应关系如图6所示。

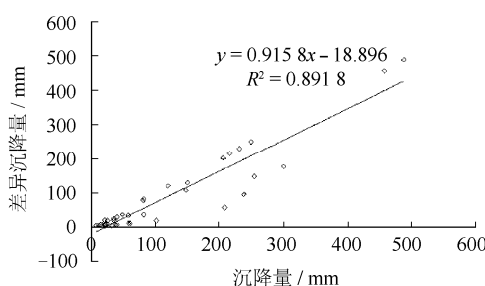
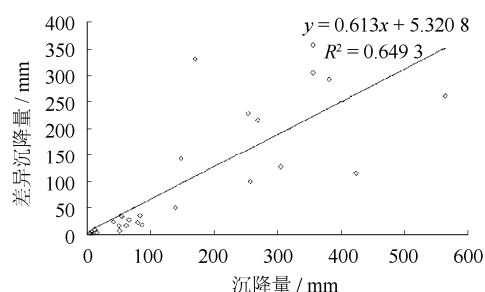


图6 黏土地层建(构)筑物沉降量和差异沉降量的关系
Fig.6 Relationship between settlement, differential settlement on clay

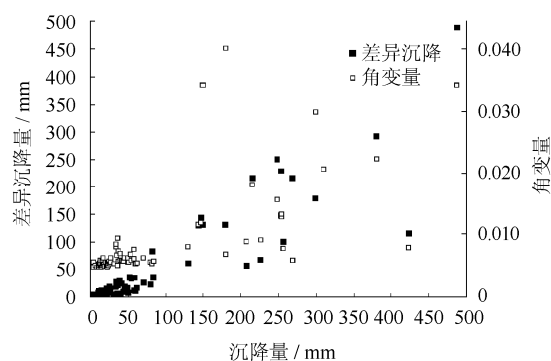
黏土地层筏板基础的沉降和差异沉降的对应关系较为离散,而独立柱基差异沉降量与沉降量有很好的线性关系,说明黏土地层上的独立柱基建筑容易随着整体沉降量的增加而出现较大的差异沉降。因此,应严格控制黏土地层上的独立柱基建筑的整体沉降,防止过量差异沉降的出现。

4.2 沉降和倾斜的关系

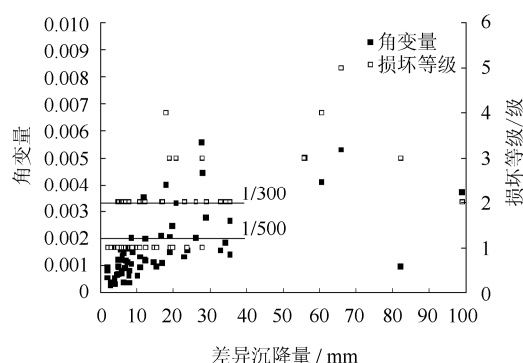
建(构)筑物沉降量、差异沉降量和倾斜量(角变量)的对应关系如图7所示。

随着建(构)筑物沉降量的增大,差异沉降和倾斜量(角变量)均相应增大。差异沉降是造成建

筑倾斜的重要因素, 差异沉降小于 10 mm 时角变量一般小于 0.002, 建(构)筑物未受到损坏; 差异沉降大于 10 mm 时则可能出现较大的角变量。角变量在 0.002~0.003 时, 一般建(构)筑物的损坏轻微, 大于 0.003 则出现中度或严重的损坏。因此, 应将一般建筑的倾斜控制在 0.003 以内, 考虑安全系数时(后续建筑的使用)可将其控制指标定为 0.002。



(a) 沉降、差异沉降与倾斜



(b) 差异沉降与倾斜

图 7 建(构)筑物沉降和倾斜的关系

Fig.7 Relationships between settlement and angular variable

4.3 建(构)筑物的尺寸效应

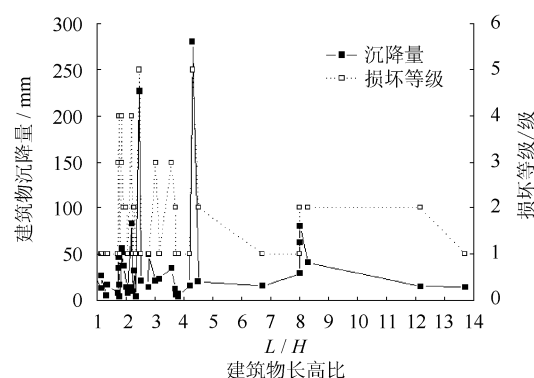
(1) 建筑尺寸与沉降的关系

建(构)筑物的长、宽、高三维尺寸不同时, 受工程影响产生的变形也有一定的区别。建(构)筑物长高比(L/H)、长宽比(L/W)与沉降量、损坏等级之间的关系如图 8 所示。

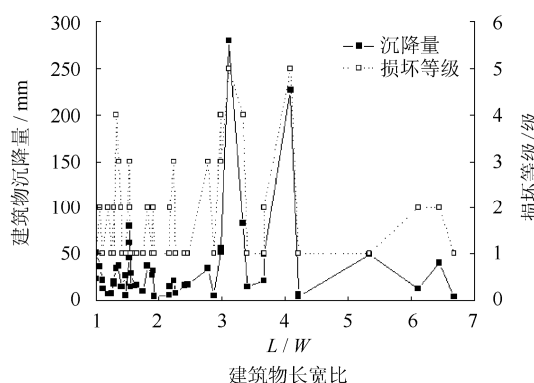
建(构)筑物长高比很小时, 一般为高层、超高层建筑, 属于重大环境风险, 受重视程度较高, 工程施工控制严格, 相应出现的建筑沉降较小, 建筑受影响程度较小; 长高比较大时, 建(构)筑物高度相应减小, 建筑规模、自身荷载较小, 也不易出现很大的沉降和损坏。长高比约为 1.5~5.0 的一般建筑容易出现较大的变形和损坏。

建(构)筑物长宽比较小时, 基础四边长度分布较均匀, 其整体稳定性较好; 随着长宽比的增加

基础趋向于条形, 受地层变形较为敏感, 建筑可出现的较大的沉降和较严重的变形损坏; 而长宽比较大时, 工程建设的关注度相应提高, 出现的建筑沉降减小, 变形控制效果较好。一般建筑长宽比约为 2.5~4.5 时容易出现较大沉降和变形损坏。



(a) 长高比



(b) 长宽比

图 8 建筑尺寸与沉降量、损坏等级的关系

Fig.8 Relationships between building size, settlement and damage grade

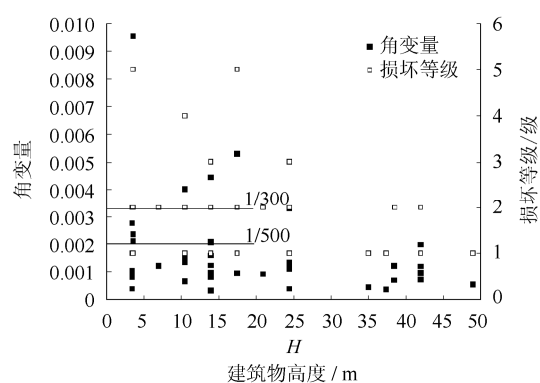
(2) 建筑尺寸与倾斜的关系

建(构)筑物高度、高宽比(H/W)与倾斜量(角变量)、损坏等级之间的关系如图 9 所示。

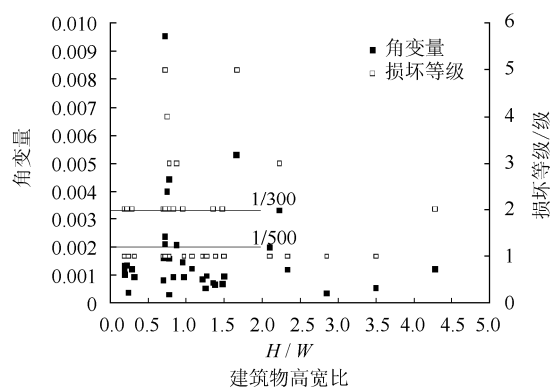
随着建(构)筑物高度的增大, 实际监测的倾斜量(角变量)出现减小, 主要是由于高层、超高层建筑一般为重大环境风险, 工程控制较为严格。而单层或一般小于 25 m 的多层建筑则出现了较大倾斜变形。

建(构)筑物的倾斜受高度和宽度的影响较大, 一般高度较小, 宽度较大的建筑整体稳定性较好。高宽比较大(大于 2.5)时, 建筑高度成为决定因素, 工程控制严格, 未出现较大倾斜; 高宽比较小(小于 0.5)时, 建筑基础宽度较大, 整体稳定性较好, 也不易出现较大的倾斜变形; 一般高宽比为 0.5~2.5 的建(构)筑物易出现较大得倾斜变形和损坏,

实际工程中应予以注意。



(a) 建筑高度



(b) 高宽比

图9 建筑尺寸与角变量、损坏等级的关系

Fig.9 Relationships between building size, angular variable and damage grade

5 结 论

(1) 建(构)筑物变形控制参数一般包括沉降、差异沉降、倾斜(角变量)、裂缝、挠度、应变、水平变形等。控制指标具体数值受修建年代、基础形式、结构类型、地质条件等因素的影响。工程制定的各项控制指标应考虑其已有变形和后续使用年限内的变形,附加变形较大时应进行加固等必要的控制措施。

(2) 沉降、差异沉降、倾斜(角变量)、裂缝等是目前工程建设进行的主要变形监测项目。随着建筑整体沉降的发展,差异沉降、倾斜(角变量)、裂缝等变形容易产生和发展,从而对建筑带来损坏。

(3) 黏土地层建筑整体沉降不应大于 20 cm,砂土地层出现 3 cm 整体沉降时应关注其他变形情况。砂土地层上建(构)筑物抵抗变形能力较黏土地层要小,尤其应防止砂土地层上独立柱基建筑过量变形。

(4) 倾斜量未超过 1/500 时,建筑一般受工程

建设影响较小,可以其为控制指标。对于高层、超高层建筑可适当提高风险控制要求。

(5) 建(构)筑物尺寸与各项变形有很大的关系,应加大对易出现损坏的多层、高层建筑的关注度,防止过量变形带来的严重影响。

参 考 文 献

- [1] 阳军生, 刘宝琛. 城市隧道施工引起的地表移动及变形[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2002.
- [2] TERZAGHI K, PECK B P. Soil mechanics in engineering practice[M]. New York: John Wiley and Son, 1948.
- [3] SKEMPTON A W, MACDONALD D H. Allowable settlement of buildings[C]//Proceedings Institute of Civil Engineers. [S.l.]:[s.n.], 1956, (1): 727—768.
- [4] 日本建筑学会. 建筑基础构造设计指针[S]. 日本: [出版者不详], 1988.
- [5] GRANT R., CHRISTIAN JT, VANMARCKE EH. Differential Settlement of buildings[J]. **Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE**, 1974, 100(9): 973—911.
- [6] RANKIN W J. Ground movement resulting from urban tunnelling[J]. **Predictions and Effects. Eng. Geol. of Underground Movements**, 1988, (1): 79—92.
- [7] 广州市建设委员会. GJB02—98 广州地区建筑基坑支护技术规定[S]. 广州: [出版者不详], 1998.
- [8] 上海市建设委员会. DG/TJ08—2001—2006 基坑工程施工监测规程[S]. 上海: [出版者不详], 2006.
- [9] 中华人民共和国建设部. GB 50497—2009 建筑基坑工程监测技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2009.
- [10] 易小明, 张顶立, 李鹏飞. 隧道下穿时地表房屋变形开裂的定量评估[J]. **岩石力学与工程学报**, 2008, 27(11): 2288—2294.
- [11] 中华人民共和国建设部. GB50007—2002 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [12] BJERRUM I. Allowable settlement of structures[C]//

- Proceedings European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Weisbaden, Germany: [s. n.]. 1963: 135—137.
- [13] 颜东利, 张桂才. 建筑物允许沉降量之探讨[J]. 地工技术, 1991, 34(6): 78—96.
- YAN Dong-li, ZHANG Gui-cai. A study on tolerable settlement of building[J]. **Sino-Geotechnics**, 1991, 34(6): 78—96.
- [14] POLSHIN D E, TOKAR R A. Maximum allowable nonuniform settlement of structures[C]//Proceedings of the 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. [S. l.]: [s. n.], 1957: 402—406.
- [15] 陈惠珠. 在软弱地层中采用盾构法施工及对地层、建筑物影响的探讨[J]. 隧道建设, 1990, (2): 29—38.
- CHEN Hui-zhu. The discussion of shield construction in soft ground and the affect to stratum and building[J]. **Tunnel Construction**, 1990, (2): 29—38.
- [16] 国家煤炭工业局. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程[S]. 北京: 煤炭工业出版社, 2000.
- [17] 上海市建设委员会. DBJ—61—97 上海市基坑工程设计规程[S]. 上海: [出版者不详]. 1997.
- [18] BURLAND J.B, WROTH C.P. Settlement of buildings and associated damage[C]//Proceedings of a Conference on Settlement of Structures. Cambridge: [s. n.]. 1974: 611—654.
- [19] 四川省建设委员会. GB 50292—1999 民用建筑可靠性鉴定标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- [20] 重庆市土地房屋管理局. JGJ 125—99 危险房屋鉴定标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- [21] CORDING E J, O'ROURKE T D, BOSCARDLN M D. Ground movements and damage to structures[J]. **Evaluation and Prediction of Subsidence, Florida**, 1978: 516—537.
- [22] BURLAND J B. Assessment of risk of damage to buildings due to tuunelling and excavations[C]//1st Intemational Conference on Earthquake Geotechnical Engineering. Tokyo: [s. n.]. 1995.
- [23] BOONE S J. Assessing construction and settlement -indueed building damage:a return to fundamental principles[C]//Proeedings, Underground Construction, Institute of Mining and Metalurgy. London: [s. n.]. 2001: 559—570.
- [24] GEDDES J D. Structural design and ground movement[J]. **Ground Movements and Their Effects on Structures**. 1984: 243—267.
- [25] BOSEARDIN M D, CORDING E J. Building response to exeavation-Indueed settlement[J]. **ASCE Journal of Geotechnical Engineering**. 1989, 115: 1—21.
- [26] 韩焯, JamieR Standing, 李宁. 地铁施工引起的建筑物扭曲变形分析[J]. 土木工程学报, 2010, 43(1): 82—88.
- HAN Xuan, JAMIE R Standing, LI Ning. Analysis of tunnelling-induced twist deformation of buildings[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2010, 43(1): 82—88.