第 35 卷 第 1 期 2013 年 3 月

循环往复加载的地下结构 Pushover 分析方法 及其在地震损伤分析中的应用。

刘晶波,王文晖,赵冬冬,张小波

(清华大学,北京 100084)

摘 要:考虑到地震作用下地下结构往往受到双向往复荷载作用,本文提出了循环往复加载的地下 结构 Pushover 分析方法。介绍了该方法的实施步骤、基本功能与特点。该方法考虑了地震作用下 地下结构双向受力的特点,利用多点位移控制的推覆分析算法进行地震作用下正向加载——卸载— 反向再加载的全过程分析。该方法将一次循环加载过程近似看作一次地震作用过程,提出了基于 循环往复加载 Pushover 分析的损伤模型,避免了对土—结构整体模型进行复杂的动力相互作用分 析;通过一次循环往复加载的 Pushover 分析,根据结构构件刚度的改变对结构损伤进行有效评估。 结合实际工程进行算例分析初步验证了循环往复加载 Pushover 分析及地震损伤模型的有效性。 关键词:地下结构;抗震分析; 土-结构相互作用; 静力弹塑性分析; 往复加载; 地震损伤分析 中图分类号: TU311.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2013)01-0021-08 DOI:10.3969/j. issn. 1000-0844.2013.01.0021

Pushover Analysis Method of Underground Structures under Reversal load and Its Application in Seismic Damage Analysis

LIU Jing-bo, WANG Wen-hui, ZHAO Dong-dong, ZHANG Xiao-bo (Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Although response history analysis is the most rigorous procedure to compute seismic demand, pushover analysis is more common in practice with its advantage of conceptual simplicity and computational attractiveness. A pushover analysis procedure with monotonically increasing effective earthquake forces following an invariant depth-wise distribution is introduced in the paper. Considering the reversal directions of seismic load, which is not included in the traditional pushover analysis with monotonically increasing forces in one direction, a cyclic reversal loading pattern is proposed in this paper. With the algorithm based on multiple point constraints, the implementation procedure, basic functions and special features of pushover analysis model is imposed with the effective earthquake forces in the positive direction and unloaded when the target displacement is reached. Then the model is imposed with the reversed forces and unloaded when the opposite target displacement is reached. With the proposed procedure, we can estimate the structural capacity during earthquake more reasonably by considering the double direction stress of the underground structures. Subsequently, a damage model based on the pushover analysis with the cyclic reversal loading pattern is proposed by approximately viewing one cycle of reversal load as

 ① 收稿日期:2013-02-18
 基金项目:国家 973 项目(2011CB013602);北京市自然科学基金重点项目(8111001);国家自然科学基金重大研究计划项目 (91215301)

作者简介:刘晶波(1979-)男(汉族),博士生导师,教授,主要从事结构抗震与防灾减料研究.

an earthquake event. With the proposed model, the complicated analysis of dynamic soil-structure system can be avoid and the damage assessment of underground structures can be conducted with the structural stiffness before and after one reversal load pushover analysis. Finally, the validity of the reversal load pushover analysis procedure and seismic damage analysis model are verified by the case study of the Chongwenmen subway station in Beijing. The research in this paper shows that the proposed pushover analysis procedure with cyclic reversal loading pattern can be effectively applied to seismic analysis and damage assessment of underground structures.

Key words: Underground structure; Seismic analysis; Soil-structure interaction; Pushover analysis; Reversal load; Seismic damage analysis

0 引言

Pushover 分析方法也称为静力弹塑性分析方法,是一种进行结构地震反应分析的简化方法,在一定条件下可以较为准确、简便地评估结构的抗震性能,在地上建筑结构抗震分析与设计中得到了广泛应用^[1-5]。在地下结构领域,文献[6-7]在借鉴地上结构 Pushover 分析方法思想的基础上,结合地下结构在地震作用下存在土一结构相互作用的特点,提出了一种适用于地铁等地下结构抗震分析的 Pushover 分析方法。

Pushover 分析方法通过对分析模型施加一定 分布的水平单调递增荷载,将结构推至目标位移或 者使结构成为机构,来分析结构的薄弱部位及其非 线性行为^[1-2]。在传统的 Pushover 分析过程中,水 平侧向荷载一般是单方向单调递增的。但在地震作 用下,结构受到的是往复振动作用,单方向的加载方 式无法准确地模拟地震作用下结构和构件的真实受 力情况[2.8-9]。特别地,对于非对称结构,水平侧向荷 载的输入方向将对分析结果产生较大影响[6]。通过 循环往复加载的方式对结构进行 Pushover 分析,一 方面可以模拟地震荷载的往复振动作用,另一方面 对于非对称结构也可以依次在正、反两个方向进行 水平荷载的输入。在地震过程中,结构将产生一定 的变形,引起能量消耗、造成结构损伤。通过损伤分 析进行结构抗震性能评估的方法也受到重视^[10]。 本文采用循环往复加载的方式对地下结构进行 Pushover 分析,将一次循环加载过程近似看作为一 次地震作用的过程,通过结构遭受地震前后的刚度 之比来建立损伤模型,初步给出判断地下结构损伤 程度的方法。同时,以北京市地铁5号线崇文门站 为背景进行计算,对地铁车站结构进行循环往复加 载的 Pushover 分析,对不同强度地震作用下结构的 地震损伤进行分析。

1 地下结构抗震分析的 Pushover 分析方法

进行地下结构 Pushover 分析时,建立带有附加 自由场的土一结构分析模型,如图 1 所示^[6-7]。模型 底面采用固定边界条件,侧面采用混合边界条件,附 加自由场模型边界条件与土一结构有限元模型边界 条件相同。混合边界条件可通过对自由场模型进行 分析获得:建立柱状土自由场模型,底面采用固定边 界,侧面节点水平向位移固定,计算在自重作用下自 由场模型侧面节点竖向位移与水平支座反力,以此 作为 Pushover 分析时土一结构模型与附加自由场 模型的侧面边界条件。



Fig. 1 Analysis model of soil-structure interaction system with additional free field.

采用静力分析方法计算土一结构模型与附加自 由场模型在自重作用下的静力反应。在此基础上, 在土一结构模型与附加自由场上施加水平分布荷 载,按比例进行单调递增加载,直至目标位移。在 Pushover分析达到目标位移之后,可根据需要继续 加载至地下结构完全破坏,这样可以获得地下结构 完整的能力曲线。

由于受到周围地基约束,地下结构的地震反应 不同于地上结构,因此,对地下结构进行 Pushover 分析时,水平荷载分布形式和目标位移的确定也与 第35卷第1期

23

地上结构不同。

1.1 水平荷载分布形式

对土一地下结构系统进行 Pushover 分析时,水 平荷载一方面需要体现出地下结构与各土层惯性力 的分布特征,另一方面应使所求得的位移能大体真 实地反映出地下结构与各土层的位移状况^[6-7]。因 此,可对地下结构和各土层按照其所在的位置施加 相应的水平等效惯性加速度。水平惯性加速度建议 采用如下三种分布形式^[6-7]:

(1)采用在输入地震波作用下,自由场各土层的绝对峰值加速度分布。

(2)采用地下结构对应的土层发生最大变形时刻的有效惯性加速度分布。其中第 i 层土的水平有效惯性加速度可表示为

$$a_i \frac{\tau_i - \tau_{i-1}}{\rho_i h_i} \tag{1}$$

式中: a_i 为第i 层土单元水平有效惯性加速度; τ_{i-1} , τ_i 分别为地下结构对应土层发生最大变形时刻,第i层土单元顶部与底部的剪应力,当i=1时, $\tau_0=0$; ρ_i 、 h_i 分别为第i 层土单元的密度与厚度。

(3)借鉴地上结构 Pushover 分析方法,采用倒 三角形或倒梯形水平惯性加速度分布形式。

对于以上三种荷载分布形式,第二种所得分析 结果精度较高,而第三种最为简便。

1.2 目标位移的确定

自由场反应中地面与基岩间的峰值相对位移称 为地面峰值相对位移(PGRD)^[11]。研究表明,相对 于设计基本地震加速度 PGA,PGRD 是更适合作为 地下结构抗震分析与设计使用的设计地震动参 数^[11]。因此在对土一地下结构系统进行 Pushover 分析时采用 PGRD 作为 Pushover 分析的目标位 移。

在进行地下结构 Pushover 分析时,为了实现 PGRD 作为目标位移,需要建立带有附加自由场的 土一结构相互作用分析模型,对土一结构分析模型 和附加自由场模型同时进行 Pushover 分析。此时 可以方便地记录附加自由场地表与基岩间的相对位 移,当其达到目标位移 PGRD 时,土一结构模型的 Pushover 分析即可结束。

在对带有附加自由场的土一结构模型同时进行 Pushover 分析时,相当于目标位移已预先确定,这 是地下结构 Pushover 分析方法与地上结构 Pushover 分析方法不同之处^[6]。

2 循环往复加载的 Pushover 分析方法

由于地震荷载的作用方向是往复的,一般在达 到地震波波峰之前结构将经历一段时间的往复地震 作用,引起结构变形,同时产生耗能,对结构造成损 伤。而传统 Pushover 分析方法仅对结构进行一次 单方向的单调加载,无法准确地模拟真实的地震作 用。目前针对地上建筑结构,已提出了循环往复加 载的 Pushover 分析方法,更为精确地模拟了地震作 用的实际发展过程^[89]。

对于地下结构 Pushover 分析方法,当采用循环 往复的加载方式时,首先对土一地下结构系统进行 正向加载,逐步增加水平等效惯性加速度,直至附加 自由场模型达到预定水平的目标位移 PGRD;接着 完全卸载,对土一地下结构系统进行反向单调加载, 直至附加自由场模型达到反向的目标位移 PGRD; 然后再完全卸载,此时即为完成一次循环。重复以 上过程,可根据需要进行多次循环往复加载分析。 在循环往复加载结束,附加自由场模型达到预定水 平的目标位移之后,可继续单方向单调加载至地下 结构完全破坏,获得对应于地下结构经历地震作用 后完整的能力曲线。

循环往复的加载方式和单向单调加载的加载方 式存在很大区别,前者一方面可以得到整个循环过 程中结构构件的内力、变形的变化、塑性铰位置和节 点转角等,同时又考虑了构件双向受力的影响,从而 更合理地模拟了地震作用的往复特征。

为了方便地对地下结构进行循环往复加载的 Pushover分析,可采用基于多点位移控制的推覆分 析算法^[12]。通过控制附加自由场模型的顶点水平 位移进行往复加载至正、负方向目标位移,即可完成 地下结构循环往复加载的 Pushover 分析。

3 基于循环加载 Pushover 分析的损伤模型

建筑结构地震损伤评估大多采用基于强度的损 伤模型和基于反应的损伤模型^[13]。地震作用下,结 构刚度随之降低,损伤程度随之加大,因此可根据地 震过程中结构刚度的退化来定义结构的损伤模 型^[10,13]。Ghobarah等^[14]直接以刚度比的形式建立 结构损伤模型。这种损伤模型是对结构进行两次 Pushover分析,一次是结构经历地震作用前,一次 是结构经历地震作用后。结构总的损伤值以及各构 件的损伤值可由结构经历地震作用前后的刚度比来 表示。结构的刚度损伤模型可用下式来定义:

$$D = 1 - (K_{\text{final}} / K_{\text{initial}}) \tag{4}$$

式中:D为结构的损伤指数;K_{initial}、K_{final}分别为结构

经历地震作用前、后,采用 Pushover 分析得到的基 底剪力一顶部位移关系图中的初始斜率。

同理,单个构件的刚度损伤模型用下式来表示:

$$D^{i} = 1 - \left(K_{\text{final}}^{i} / K_{\text{initial}}^{i}\right) \tag{5}$$

式中: D^i 为i构件的损伤指数; $K^i_{initial}$ 和 K^i_{final} 分别为 结构经历地震作用前、后,采用 Pushover 分析得到 的i构件杆端力一位移关系图中的初始斜率。

损伤指数从 0 到 1 变化,取决于结构所经历的 损伤累积。当 D=0 时,代表结构(构件)没有发生 损伤;当 D>0.8 时,则对应结构倒塌(构件失效)。 各损伤等级对应的损伤指数范围如表 1 所示^[14]。

表 1	不同损	伤程度的	损伤变量	┟值 ^{[14}
-----	-----	------	------	-------------------

Table 1 Damage index variation with damage degrees

损伤程度	损伤指数 D
轻微破坏	0~0.15
中等破坏(可修)	0.15~0.30
严重破坏(不可修)	0.30~0.80
倒塌	>0.80

针对地下结构,可以借鉴上述方法进行损伤分析。然而,根据文献[14]的损伤模型计算步骤,在完成第一次 Pushover 分析后,需要先对土一地下结构系统进行地震作用下的动力分析,在此基础上确定地震反应并进行第二次 Pushover 分析。由于土一地下结构系统的非线性动力分析将增加分析问题的复杂性,且工作量大、耗时多,而 Pushover 分析方法的主要优点就是避免了非线性动力分析的繁琐。为克服上述不足,可基于本文提出的循环往复加载的地下结构 Pushover 分析方法进行地震损伤分析。



图 2 循环往复加载过程中的能力曲线

Fig. 2 Capacity spectrum of Pushover analysis under reversal load.

由于通过循环往复的加载方式对土一地下结构 系统进行 Pushover 分析时,可将以此循环加载过程 近似看做为一次地震作用的过程^[8•9],因此可取循环 往复加载过程中的结构(构件)能力曲线进行分析, 如图 2 所示。取第一次循环加载过程中的能力曲线 初始斜率 $K_1^{(i)}$ 作为结构(构件)经历地震前的初始 刚度 $K_{initial}^{(i)}$,取循环加载结束后的能力曲线初始斜率 $K_2^{(i)}$ 作为结构(构件)经历地震后的初始刚度 $K_{inal}^{(i)}$ 。 这样便可以更为简便有效的计算损伤指数,进而进 行损伤程度的判断。

4 算例分析

为了便于分析比较,选取文献[6]中的崇文门地 铁车站进行计算,如图 3 所示。图中 A₁、A₂、B₁、B₂ 为控制截面。此车站为钢筋混凝土拱形结构,结构 与周围土层的材料参数按文献[6]取值。建立有限 元分析模型如图 4 所示,图中左侧为土一结构相互 作用分析模型,右侧为附加自由场模型。



图 3 崇文门站标准断面(单位:m) Fig. 3 Typical cross section of Chongwenmen

station (unit: m).



additional free field (unit: m).

在上覆土层重力和水平地震综合作用下,结构 侧墙及中柱将承受压弯作用。为了较好的模拟钢筋 混凝土压弯构件的非线性特性,本文采用 THUFI-BER 纤维模型^[15],其中,混凝土及钢筋应力一应变 曲线如图 5 所示。为了模拟土体的非线性特性,采 用各向同性硬化的弹塑性模型,应力一应变关系如 图 6 所示,屈服准则采用抛物线型莫尔一库仑准 则^[6,16]。

文献[15-16]已证明,采用本文建议的材料模型





Fig. 5 Fiber model of reinforced concrete members with flexure and compression and material constitutive models.





Fig. 6 Elasto-plastic stress-strain curve of soils.

进行土一结构相互作用分析,可以较好地模拟土体的软化及地下结构在压弯条件下的非线性行为。

4.1 循环往复加载的 Pushover 分析

由于倒三角形加速度分布形式简单,易于在 土一结构模型中施加,并且具有较好的计算精度^[6], 本文选择该水平荷载分布形式进行 Pushover 分析。 根据文献^[6],目标位移取 Loma Prieta 波、El Centro 波和 Kobe 波在相同 PGA 条件下 PGRD 的平均值, 对应于不同 PGA 的目标位移 PGRD 如表 2 所示。 选择表 2 中的目标位移 PGRD 进行循环往复加载 的 Pushover 分析。结果表明,图 3 所示的 4 个控制 截面中 A_1 、 B_2 较早进入屈服状态,下面采用这两个 截面进行比较分析^[6]。

图 7、8 给出了不同目标位移预期下,进行一次 循环往复加载 Pushover 分析过程中,控制截面弯矩 与地面峰值相对位移的关系曲线,其中竖向虚线表示对应的目标位移 PGRD。

表 2	不同 PGA	、对应的目	标位移	PGRD	单位:m)
-----	--------	-------	-----	------	------	---

Table 2 Target displacement PGRDs of different

PGAs	(unit •	m
I UAS	unnu:	

PGA/g l	Loma Prieta 波	El Centro 波	Kobe 波	PGRD
0.1	0.006 6	0.006 2	0.007 5	0.006 8
0.2	0.013 4	0.012 5	0.015 3	0.013 7
0.4	0.027 2	0.025 0	0.032 5	0.028 2
0.8	0.053 2	0.050 0	0.073 3	0.058 8
1.0	0.064 2	0.062 9	0.093 8	0.073 6
1.6	0.103 6	0.1007	0.183 0	0.129 1

从图中可以看出,完成一次循环往复加载后,结构(构件)发生损伤,使得同样变形量的荷载值逐渐减小,强度发生退化,同时结构的刚度也随着减小。

对比不同目标位移预期下的关系曲线可以看出,随着目标位移 PGRD 的增大,结构(构件)损伤 越严重。当 PGRD=0.006 8 m(PGA=0.1 g)时, 由于结构(构件)基本上仍处于弹性阶段,此时进行 往复加载的 Pushover 分析,截面弯矩与地面峰值相 对位移的关系曲线变化不大;当 PGRD=0.058 8 m (PGA=0.8 g)时,由于结构(构件)开始部分进入塑 性,此时完成一次循环往复加载后,截面弯矩与地面 峰值相对位移的关系曲线与单向加载时存在明显区 别。

对比控制截面 A₁、B₂ 可以看出,两个截面的滞 回环捏拢,耗能能力较差。通过分析发现,这是由于 在上覆土层重力作用下,地下结构中柱与侧墙产生 较大轴压力,高轴压比使得压弯构件耗能能力较差。

图 9 给出了目标位移 PGRD=0.073 6 m(PGA = 1.0 g)时,进行 2 次循环往复加载的 Pushover 完整能力曲线与传统 Pushover 分析的比较。

从图 9 中可以看出,进行循环往复加载 Pushover 分析后,控制截面能力曲线在达到对应目标位 移 PGRD 前与传统 Pushover 分析存在明显区别, 这主要是由于在地震作用下,结构承受往复荷载,产 生塑性变形,结构刚度减小,再次加载时承受荷载能 力减弱。而在达到目标位移 PGRD 后,与传统 Pushover 分析结果相比,循环往复加载 Pushover 分析给出的能力曲线存在一定的刚度退化和强度退 化。

4.2 地震损伤分析

根据第3节中定义的损伤模型,以目标位移 PGRD=0.0736m(PGA=1.0g)为例进行地震损 伤分析。传统 Pushover 分析和1次循环往复加载



Fig. 8 Moment-PGRD curves of control cross section B_2 .

后的 Pushover 分析得到的力一位移曲线如图 10 所示。

由图 10 可计算两次 Pushover 分析得到的关系 曲线的初始斜率,并根据式(5)即可计算对应构件的 损伤指数 D,结果见表 3。

同样地,对应于表 2 中不同的目标位移 PGRD, 可计算经历相应水平地震作用后的损伤指数如表 4 所示。

表 3 构件损伤指数计算

Table 3 Calculation of damage indexes

界面	$K_{ m initial}^{(i)}$	$K_{ ext{final}}^{(i)}$	D
A_1	873 61 kNm/m	565 44 kNm/m	0.353
B_2	319 89 kNm/m ²	272 31 kNm/m^2	0.149

参照表 2 进行分析,截面 A₁ 对应的结构中柱, 当 PGA 在 0.1~0.4 g 范围内,损伤指数 D<0.15, 属于轻微破坏;当 PGA=0.8 g 时,属于中等破坏可

表 4 不同目标位移 PGRD 作用下的损伤指数

Table 4	Damage index	es of different	PGRDs
PGA/g	PGRD/m	A_1	B_2
0.1	0.006 8	0.015	0.003
0.2	0.013 7	0.035	0.022
0.4	0.028 2	0.080	0.132
0.8	0.058 8	0.215	0.140
1.0	0.073 6	0.353	0.149
1.6	0.129 1	0.732	0.250







修;当 PGA 继续增大时,构件发生严重破坏不可修、甚至失效。而截面 B_2 对应的结构侧墙,当 PGA 不大于 1.0 g时,损伤指数 D < 0.15,属于轻微破坏;当 PGA=1.6 g时,构件发生可修的中等破坏。 分析以上结论,相对于中柱,在整个受力过程中结构 周围土体对侧墙提供了支撑作用,一定程度上提高 了其构件承载力。

为验证本文采用的损伤模型计算结果的合理 性,图 11 给出了结构在 PGRD 分别为 0.028 2 m、 0.058 8 m、0.073 6 m 和 0.129 1 m 时的变形以及 结构塑性铰发展示意图。○、⊗、●分别代表塑性 铰的不同发展阶段,且为依次增强顺序,为了方便比



从图 11 可以看出,当 PGRD 为 0.028 2 m 时, 结构大部分构件开裂,但未出现塑性铰,属于轻微破 坏;当 PGRD 为 0.058 8 m 时,中柱顶、底部逐渐出 现塑性铰,此时为中等破坏、可修,侧墙塑性铰初步 发展,可认为仍属于轻微破坏;当 PGRD 超过 0.073 6 m 后,中柱塑性铰发展较为严重,为严重破坏,侧 墙为中等破坏且破坏程度逐渐加强。由此可以看 出,本文提出的损伤模型可以对结构的损伤状态给 出有效的评估。

5 结论

结合地震作用特点,本文提出了一种循环往复 加载的地下结构 Pushover 分析方法,并在传统结构 损伤分析的基础上提出了基于循环加载 Pushover 分析的损伤模型。通过本文研究可以发现,循环往 复加载的地下结构 Pushover 分析方法具有以下特 点与功能:

(1)模拟了地下结构在地震作用下正向加载一 卸载一反向再加载的过程,考虑了地下结构在地震 作用下双向受力的特点,更为合理地模拟了地震作 用的实际发展过程。一次循环往复加载过程可近似 等效为一次地震作用。

(2)基于循环加载 Pushover 分析的损伤模型, 避免了复杂的非线性动力分析,方法操作简便。结 合基于多点位移控制的 Pushover 分析方法对目标 位移进行控制,形式简单,具有较好的计算精度。

(3)可以模拟在整个循环往复过程中结构构件 内力、变形的变化,并预测塑性铰的发展及结构的薄 弱环节等。结合结构构件刚度的变化实现对结构损 伤的评估。

本文提出了循环往复加载的地下结构 Pushover 分析方法及与之相适应的地下结构地震损伤 分析方法的整体框架,通过算例初步验证了方法的 有效性。这一方法尚存在有待改进之处,同时,方法 的计算精度亦需进一步验证。

[参考文献]

- [1] 汪梦甫,周锡元.高层建筑结构抗震弹塑性分析方法及抗震性能评估的研究[J].土木工程学报,2003,36(11):44-49.
 WANG Meng-fu, ZHOU Xi-yuan. Modified Pushover Analysis and Seismic Performance Evaluation for Tall Building[J].
 China Civil Engineering Journal,2003,20(4):45-49.
- [2] 尹华伟,汪梦甫,周锡元.结构静力弹塑性分析方法的研究和 改进[J]. 工程力学,2003,20(4):45-49.
 YIN Hua-wei, WANG Meng-fu, ZHOU Xi-yuan. Studies and Improvements on Structural Static Pushover Analysis Method
 [J] Engineering Mechanics,2003,20(4):45-49.
- [3] 杨志勇,何若全. 高层钢结构弹塑性抗震分析静动力综合法
 [J]. 建筑结构学报,2003,24(3):25-32.
 YANG Zhi-yong, HE Ruo-quan. Inelastic Static-dynamic Analysis Method of High-rise Steel Structure under Earthquake Action[J] Journal of Building Structures,2003, 24(3):25-32.
- [4] Elnashai A S. Advanced inelastic static (pushover) analysis for earthquake applications [J]. Structural Engineering and Mechanics, 2001, 12(1): 51-69.
- [5] Chung-Che Chou, Chia-Ming Uang. A procedure for evaluating seismic energy demand of framed structures[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2003, 32(2): 229-

244.

- [6] 刘晶波,刘祥庆,李彬. 地下结构抗震分析与设计的 Pushover 分析方法[J]. 土木工程学报, 2008, 41(4): 73-80.
 LIU Jing-bo, LIU Xiang-qing, LI Bin. A Pushover Analysis Method for Seismic Analysis and Design of Underground Structures[J]. China Civil Engineering Journal 2008, 41(4): 73-80.
 - [7] 李彬. 地铁地下结构抗震理论分析与应用研究[D]. 北京:清 华大学,2005.
 LI Bin. Theoretical Analysis of Seismic Response of Underground Subway Structures and Its Application[D]. Beijing: Tsinghua University,2005.
 - [8] 叶献国,种迅,李康宁,等. Pushover 方法与循环往复加载分析的研究[J]. 合肥工业大学学报,2001,24(6):1019-1024. YE Xian-guo, ZHONG Xun, LI Kang-ning, et al. Study of Pushover Analysis Procedure and Reversal Load Pattern[J]. Journal of Hefei University of Technology,2001,24(6):1019-1024.
 - [9] 侯爱波,汪梦甫. 循环往复加载的 pushover 分析方法及其应用[J]. 湖南大学学报,2003,30(3):145-152.
 HOU Ai-bo, WANG Meng-fu. Analysis Method and Application of Pushover Loading in Circles[J]. Journal of Hunan University,2003,30(3):145-152.
 - [10] 王振宇,刘晶波.建筑结构地震损伤评估的研究进展[J].世界地震工程,2001,17(3):43-48.
 WANG Zhen-yu, LIU Jing-bo. The Advances of Studies on Seismic Damage Assessment of Building Structures [J]. World Information on Earthquake Engineering,2001,17(3):43-48.
 - [11] 李彬,刘皛波,刘祥庆. 地铁车站的强地震反应分析及设计 地震动参数研究[J]. 地震工程与工程振动,2008,28(1): 10-15.
 LI Bin, LIU Jing-bo, LIU Xiang-qing. Study on Seismic Re-

sponses of a Subway Station and Design Parameters of Ground Motions[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 28(1): 10-15.

- [12] 黄羽立,陆新征,叶列平,等. 基于多点位移控制的推覆分析算法[J]. 工程力学, 2011, 28(2): 18-23.
 HUANG Yu-li, LU Xin-zheng, YE Lie-ping, et al. A Pushover Analysis Algorithm Based on Multiple Point Consitraints
 [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(2): 18-23.
- [13] 潘龙,孙利民,范立础. 基于推倒分析的桥梁地震损伤评估 模型与方法[J].同济大学学报,2001,29(1):11-14. PAN Long, SUN Li-min, FAN Li-chu. Seismic Damage Assessment Model and Method Based on Pushover Analysis for Bridge[J]. Journal of Tongji University,2001,29(1):11-14.
- Ghobarah A, Abou-elfath H, Ashraf B. Response-based damage assessment of structures[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1999, 28: 79-104.
- [15] 陆新征,缪志伟,江见鲸,等.静力和动力荷载作用下混凝 土高层结构的倒塌模拟[J].山西地震,2006,(2):7-11. LU Xin-zheng, LIU Zhi-wei, JIANG Jian-jing, et al. Collapse Simulation of High-Rise Structure of Concrete under the Action of Static and Dynamic Load[J]. Earthquake Research in Shanxi,2006,(2):7-11.
- [16] 刘祥庆. 地铁地下结构地震反应分析方法与试验研究[D]. 北京:清华大学,2008.
 LIU Xiang-qing. Analytical Approach and Test Research on Seismic Response of Underground Structure[D]. Beijing:Tsinghua University,2008.