

DOI: 10.11779/CJGE2015S1027

地铁地下结构横断面简化抗震设计方法对比

陈韧韧^{1, 2}, 张建民^{1, 2}

(1. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084; 2. 清华大学土木水利学院岩土工程研究所, 北京 100084)

摘 要: 国内外不少学者提出了地下结构横断面抗震设计的相关理论和简化设计方法, 中国有关抗震设计规范引入了地震系数法、自由场变形法、反应位移法和等效水平加速度法作为地下结构抗震的设计方法, 但目前尚缺少对其有效性和适用性的充分论证。对现有的地下结构简化抗震计算方法进行分析, 对比了各种方法的假设条件、优缺点、主要影响参数和适用条件。通过与动力时程分析方法的结果进行对比, 表明简化方法对饱和土层有显著震动弱化或液化发生的情形适用性较差, 且差异性随地震作用强度的增加而明显增大。

关键词: 地下结构; 抗震设计; 可液化土层

中图分类号: TU475

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)S1-0134-08

作者简介: 陈韧韧(1990-), 男, 博士研究生, 主要从事地下结构抗震方面的研究。E-mail: crr13@mails.tsinghua.edu.cn。

Comparison of simplified seismic design methods for cross-section of underground structures of subway

CHEN Ren-ren^{1, 2}, ZHANG Jian-min^{1, 2}

(1. State Key Laboratory of Hydrosience & Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Several simplified design methods for seismic design of cross-section of underground structures of subway have been proposed in the past decades, such as seismic coefficient method, free field deformation method, response displacement method and response acceleration method. These methods have been introduced into some seismic design codes in China, but there is lack of sufficient confirmation of their effectiveness and applicability. A comprehensive investigation of these simplified methods is made through a comparison of their assumptions, applicable conditions, parameters and others. Also their applicability is further explored by comparing them with dynamic response analysis of effective stress through simulation of underground structures of subway built in liquefiable soil deposits. It is shown that there still exists large discrepancies between the predicted capabilities of the two kinds of methods, and the applicability of the simplified methods is quite limited.

Key words: underground structure; aseismic design; liquefiable soil

0 引言

地铁以其快速、高效、清洁的特点, 在国内一二线城市客运交通中发挥着越来越重要的作用, 而且地铁地下结构已经逐步和地下商业街、停车场、地下综合管廊以及人防工程相结合, 形成复杂的多功能大规模地下建筑群。同时, 全球地下结构震害屡见不鲜(见表1), 地下结构抗震设计问题亟待解决。然而, 国内目前还没有专门针对城市地下结构抗震设计的规范, 对地下结构抗震设计主要以地震系数法^[1]、反应位移法^[2]、等效水平加速度法^[3]和自由场变形法^[4-10]为设计方法(见表2), 此外, 国内外学者还提出了土-结构相互作用系数法^[11-15]、反应应力法^[3]、整体式反应位移法^[16-17]、地下结构 Pushover 分析方法^[18]等简化抗震设计方法。与此同时, 有学者对简化方法的原理和适

用性进行了评述^[19-24], 但主要是在弹性假定的基础上进行计算对比研究^[3, 15-18, 25-26], 对于土体发生震动弱化时的适用性少有深入探讨。

本文通过理论分析结合数值模拟, 对目前主要的地下结构横断面简化抗震设计方法进行对比研究, 详细分析了各方法侧重考虑的因素及存在的主要问题, 并探讨了它们在地震时有显著弱化或液化土层中的适用性。

1 地下结构简化抗震设计方法^[18-23, 34]

目前的地下结构横断面简化设计方法从求解对象

基金项目: 国家自然科学基金项目(51038007)

收稿日期: 2015-03-26

分为 3 类: ①波动解法, 以波动方程为基础求解地下结构与周围地基介质统一的波动场和应力场; ②相互作用法, 以结构运动方程为基础, 将自由场的震动响应作为荷载, 以弹簧和阻尼等效地基土层的约束作用, 进而对结构进行受力分析; ③有限元土-结构整体求解法, 将自由场的震动响应作为荷载施加在模型中, 求解土-结构有限元模型的静力平衡方程。各种简化设计方法都是在上述思路的基础上发展起来的, 下面将对主要的方法进行对比研究。

表 1 强震导致的地下结构破坏表

Table 1 Destruction of underground structures caused by violent earthquakes		
时间	地震名与震级	破坏的地下结构
1906	美国旧金山 8.3 级地震	输水隧道、运输隧道
1923	日本关东 7.9 级地震	铁路隧道
1930	日本伊豆 7.0 级地震	输水隧洞
1933	日本东京 8.3 级地震	公路隧道、铁路隧道
1952	美国克恩 7.7 级地震	铁路隧道
1971	美国圣法南度 6.4 级地震	铁路隧道、地下管线
1976	中国唐山 7.8 级地震	煤矿巷道、人防工程
1985	墨西哥 8.1 级地震	地铁站
1995	日本阪神 7.2 级地震	地铁站、地下停车场、地下商场
1999	中国台湾集集 7.3 级地震	铁路、公路隧道
2008	中国汶川 8.0 级地震	铁路、公路隧道

表 2 规范采用的简化设计方法

Table 2 Simplified design methods in design codes	
简化方法	应用规范
地震系数法	① ② ③ ④ ⑤ ⑦
自由场变形法	⑥ ⑦
反应位移法	③ ④ ⑤ ⑧ ⑨
等效水平加速度法	③ ④ ⑤ ⑨

注: ①铁路工程抗震设计规范 (GB 50111—06); ②公路工程抗震规范 (TGB02—2013); ③地铁设计规范 (GB 50157—2013); ④建筑抗震设计规范 (GB 50011—2010); ⑤地下铁道建筑结构设计规范 (DG/TJ08-2064—2009); ⑥水工建筑物抗震设计规范 (DL 5073—2000); ⑦室外给水排水和燃气热力工程抗震设计规范 (GB 50032—2003); ⑧核电厂抗震设计规范 (GB 50267—97); ⑨城市轨道交通结构抗震设计规范 (GB50909—2014)。

1.1 地震系数法^[1]

地震系数法将地震荷载主要归结为地下结构和土体的惯性力和地震引起的主动侧压力增量。其各类荷载包括: 结构惯性力 F_1 、结构上方土体惯性力 F_2 、结构一侧土体的主动侧压力增量 Δe 、结构另一侧土体提

供的抵抗地震荷载的抵抗力 P (见图 1)。惯性力通过不同烈度地震对应的地震系数确定, 主动侧土压力增量基于主动土压力公式, 根据不同地震烈度对应的地震角 θ 进行修正得到, 另一侧抗力则在确定荷载分布下, 根据结构水平受力平衡求得。但由于地下结构的地震响应与地面结构不同, 其主要受与土体之间的运动相互作用控制, 而惯性作用对其影响较小, 且地下结构的地震响应往往随着结构埋深的减小而增大, 而地震系数法的结构受力模式与此相违背, 这是该方法在机理上存在的认识误区。

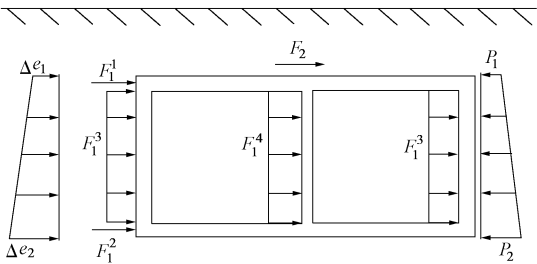


图 1 地震系数法受力简图

Fig. 1 Simplified drawing of seismic coefficient method

此外, 地震系数法在运用中还存在以下问题:

(1) 以单一的地震系数 K_c 计算结构惯性力, 对结构应力计算结果有很大影响。因为 K_c 表征结构在地震作用下的加速度响应, 它与结构与土体相对刚度、场地条件以及地震动特性均有密切关系, 而且不同结构形式与结构不同部位的加速度响应有所区别, 故以单一参数 K_c 反映结构惯性力易产生很大误差。

(2) 水平地震系数 K_h 表征结构上方土体在地震作用下惯性力的大小, 对于不同的场地条件和结构形式, 仅通过参考烈度分区而确定, 而未考虑土体与结构之间的接触摩擦和土拱效应, 在结构埋深较大时与实际受力差别明显。

(3) 地震角 θ 对于计算土体主动侧压力增量体现了摩擦强度折减而侧向压力增加的思想, 仅依据地震峰值加速度确定, 而不考虑不同地基土的动力特性, 在计算主动侧压力增量时将带来很大误差。

1.2 自由场变形法^[4-10]

自由场变形法是一种波动解法 (见图 2), 假定地下结构变形完全受控于地基变形, 该方法由福季耶娃^[4]、Newmark^[5]和 Kuesel^[6]在 20 世纪 60 年代提出, 并在 20 世纪 60 年代末美国修建旧金山海湾地区地铁运输系统中得以运用 (BART 法)。该方法通过波动方程推导得出弹性自由场介质中地下结构所在位置的波动场、应力场, 再以无限介质中的孔口问题研究支护结构应力状态。在 20 世纪 80 年代, 有学者进一步发展

了 Shukla 法^[7]和 ST.John 法^[8]以及 SCETD 法,可求解简谐地震波引起的沿轴向的二维自由场变形,但这类方法在评价结构安全性能上通常偏于保守。20 世纪 90 年代,Power 等^[9]进一步引入弹性梁模型以及参数 R (圆形隧道半径或者矩形隧道高度的一半)、隧道衬砌材料的泊松比,直接计算不同 R 的结构变形;Wang^[10]提出了垂直于轴线的入射波引起隧道横断面变形的计算方法,并且建议在分析平面应变的横断面变形时,对于结构底部作简支,同时在结构顶部逐级施加水平集中力或者在侧壁逐级施加水平倒三角分布力,直到结构变形达到自由场变形,从而得到地震作用下结构的应力。

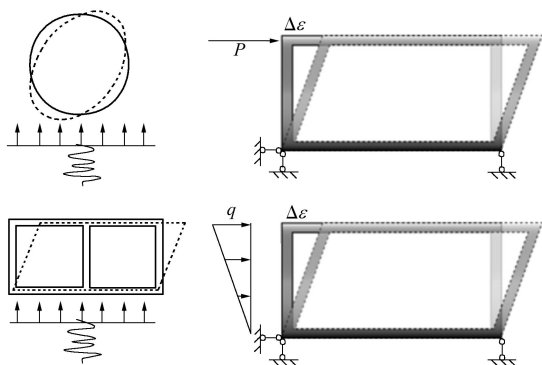


图 2 自由场变形法受力简图

Fig. 2 Simplified drawing of free field deformation method

自由场变形法在运用中存在以下问题:①将地基简化为均匀的弹性自由场地,场地适用范围很受限制,对成层地基则误差更大;②对非简谐波荷载,需要傅里叶变换将其在频域内进行求解,再通过逆变换到时域内,过程较复杂;③忽略地震中结构自身对于地基土层变形的影响,与地铁地下结构的工程实际有较大差异。

1.3 相互作用系数法^[11-15]

相互作用系数法是在自由场变形法的基础上发展起来的拟静力计算方法。该方法假定结构变形与场地变形相似,通过建立柔度系数与相互作用系数之间的关系,进而得到地震作用下结构的变形,并以此结构变形为目标,对深埋结构顶角施以水平集中力、浅埋结构侧壁施以倒三角分布力来完成加载^[10](见图 3)。后续有学者对相互作用系数的影响因素进行了分析,引入多参数来确定相互作用系数的取值。刘智勇等^[14]提出的剪应变传递率方法实质上是一种相互作用系数法,通过拟合相对刚度与剪应变传递率的关系来取代原方法的柔度系数与相互作用系数的关系。

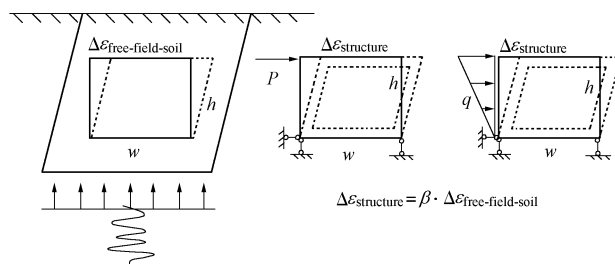


图 3 相互作用系数法受力简图

Fig. 3 Simplified drawing of interaction coefficient method

龚成林等^[15]基于相互作用系数法的原理,提出了一种考虑地震荷载分布形式的土-结构相互作用系数法,探讨了柔度比、结构埋深、断面尺寸变化的影响,其受力简图见图 4。该方法实质上是通过对结构-土的柔度比来确定荷载分布 (p_1/p_2 与 q/p_2),在确定地震引起的场地变形方面与前述的相互作用系数法一致。

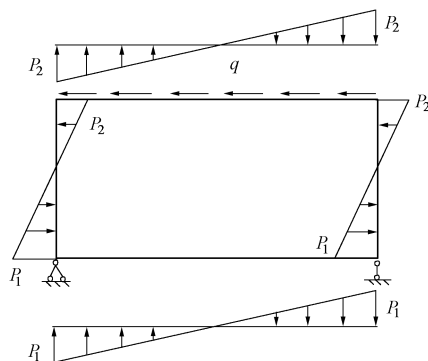


图 4 考虑变荷载分布的相互作用系数法受力简图

Fig. 4 Simplified drawing of interaction coefficient method

considering distribution of variable load

相互作用系数法在运用中存在以下问题:①该方法对地下结构形式有一定限制,只针对简单矩形、圆形结构断面和均质地基建立柔度系数与相互作用系数的关系,对于含弧形顶板的其他断面形式过于简化。②相互作用系数是反映地震作用的关键参数,该参数受到地基土特性、结构埋深、结构断面尺寸以及结构形式的影响,此方法未能系统地考虑上述因素对结构-土的柔度系数的影响,尤其是对于软硬交替的成层地基土,容易带来很大误差。

1.4 反应位移法^[2, 16-17]

反应位移法由日本学者在 20 世纪 70 年代提出。该方法将地震作用引发的变形通过与结构相连的地基弹簧作用于结构边壁,用以反映土体与结构动力相互作用的影响,荷载包括(见图 5):地震作用力 $p(z)$ 、结构惯性力 F_i 、土体对结构边界的剪切力 τ 、静土压力 e 、静水压力 e_w (若结构穿过地下水位线)。

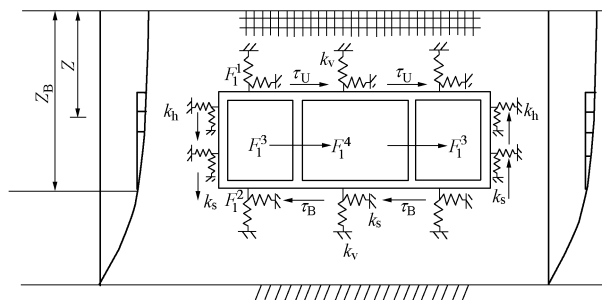


图 5 反应位移法受力简图

Fig. 5 Simplified drawing of response deformation method

近年来, 有很多学者对反应位移法进行了修正与推广。最初, 反应位移通过经验公式确定, 取决于土层特性决定的基岩面速度反应谱, 并未考虑地震波动特性的影响, 后来发展为考虑不同地震波计算得到的场地地表最大位移。刘晶波等^[16]对比了《城市轨道交通结构抗震设计规范》和《建筑抗震设计规范》推荐的受力模式下的结构弯矩和层间位移角以及不同弹簧系数取法的计算结果, 可以看到在方法的细节方面存在优化的空间。刘晶波等^[17]基于反应位移法提出了一种避免计算弹簧系数的整体式反应位移法, 该方法通过有限元方法对自由场进行动力计算, 以自由场变形反力作为地震荷载施加于结构, 进而对结构作受力分析, 这相当于将传统的反应位移法的求解弹簧系数与施加地层变形合并为有限元求解自由场地层变形反力, 但对作用于复杂结构上的力仍通过自由场变形反力来近似, 很难准确地反应地震动土压力^[27]。

反应位移法在运用中存在以下问题: ①弹簧系数的取值对于地震荷载影响很大, 很多学者对其取法提出了不同的见解, 但还没有一套兼具广泛适用性和特殊针对性的取值方法。同样, 土对结构的剪切力也存在类似的问题。②土体等效弹簧本身相互之间不存在关联, 其对于结构的约束方式与土体对于结构的约束有很大区别, 尤其是对于结构角点部位的复杂荷载缺乏考虑。③反应位移法在一定程度上可考虑成层地基的影响, 但大都通过参数加权平均或只考虑场地地表最大水平位移的方式处理, 反应位移仍为余弦分布, 难以反映结构在地震中实际受力状态。

1.5 有限元反应加速度法^[3]

反应加速度法本质上是一种忽略阻尼力, 考虑惯性力与土体对结构静力约束作用的拟静力分析方法, 该方法通过一维场地分析确定结构物所在土层最大变形时刻对应的水平反应加速度, 进而对各土层和地下结构施加其所在位置的水平反应加速度, 作为有限元计算模型中地震产生的水平惯性质量力, 以此来模拟土-结构体系的动力相互作用, 受力简图见图 6。

该方法考虑了地震作用下结构的侧向荷载分布对于结构横断面受力的影响, 通过自由场的惯性力分布

来反映地震作用下结构的荷载分布, 这种方式一方面能够在确定土体水平惯性力的时候考虑成层地基的影响, 但是另一方面忽略了结构自身对于土层变形和反应加速度的影响。此外, 该方法能够较好地反映土对结构的静力约束作用, 尤其是对于结构角点的约束, 同时避免了计算等效弹簧系数, 相比于反应位移法有一定进步。

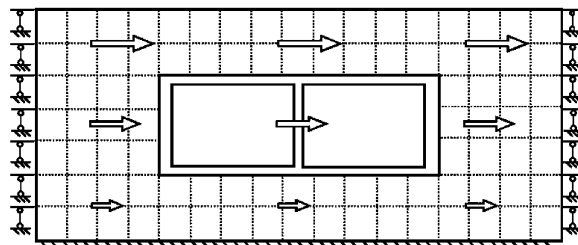


图 6 反应加速度法受力简图

Fig. 6 Simplified drawing of response acceleration method

有限元反应加速度法在运用中存在以下问题: ①该方法需要先进行自由场地动力反应分析, 若基于等效线性动黏弹性模型计算 (如 SHAKE91、EERA 等), 则要求对土层的剪切模量和阻尼比有较为准确的确定, 否则对后续施加的惯性力荷载有很大影响^[28-30]。②施加在土与结构上的惯性力取决于自由场土层地震加速度反应, 未考虑结构的存在对场地反应加速度的影响。③假定了最大变形时刻对应的惯性力项能直接反映质点位移, 忽略了阻尼力的影响。不考虑土与结构的动力相互作用, 仅在计算中考虑土与结构在静力条件下的变形协调。

1.6 有限元反应应力法^[3]

刘如山等^[3]对有限元反应加速度法进行改进, 提出了有限元反应应力法, 该方法通过土层最大变形时刻的剪应力转化的水平分布力来体现土层的受力状态, 可反映惯性力与阻尼力的作用。

该方法相比反应加速度法有所优化, 但忽略了土体动应变的滞后性和结构存在对于土体变形的影响, 尤其是在复杂成层地基中, 结构对于结构周围土体变形的影响不可忽略。

1.7 地下结构 Pushover 有限元分析方法^[18]

地下结构 Pushover 有限元分析方法是一种考虑目标位移为设计控制因素的拟静力设计方法 (见图 7)。该方法由刘晶波等在结合的地下结构静力分析方法与地上结构 Pushover 分析方法的基础上提出, 需要合理建立系统的地面峰值相对位移与地震动峰值加速度之间的关系来选择目标位移, 作为地下结构的地震动响应的变形控制条件。该方法以自由场分析得到的惯性力分布或倒三角分布荷载逐级施加在含附加土柱的土-结构有限元模型上, 直到附加土柱达到动力计算或统

计方法得到的不同地震下场地目标位移，它能够较好地考虑成层土对结构的弹塑性静力作用。

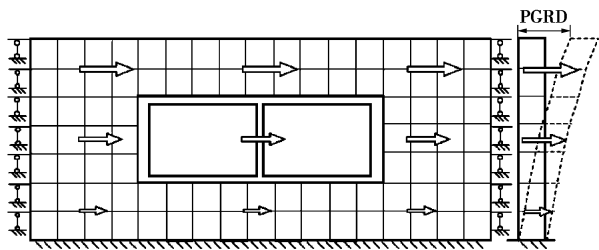


图 7 地下结构 Pushover 分析方法受力简图
Fig. 7 Simplified drawing of pushover method

地下结构 Pushover 有限元分析方法在运用中存在以下问题：①以自由场地震反应的加速度分布或倒三角分布作为荷载分布形式，忽略了结构的存在对于周围土层加速度反应的影响，对反映复杂地基中不同土层的相对运动对结构的非线性荷载作用的能力有限。②该方法在实际运用中，建立地面峰值相对位移与地震动加速度之间的关系非常重要，直接影响到结构最终的受力状态，但是尚未系统地建立起不同场地条件、地震动特性、结构形式以及不同基岩深度下，地震动加速度与目标位移的定量对应关系。

2 可液化地基中计算方法对比

2.1 模型与参数

本文以图 8 所示的地铁车站为算例进行数值模拟，结构处于可液化砂土地基中，基岩深度 26 m，结构断面宽 22 m，高 8 m，埋深 6 m。

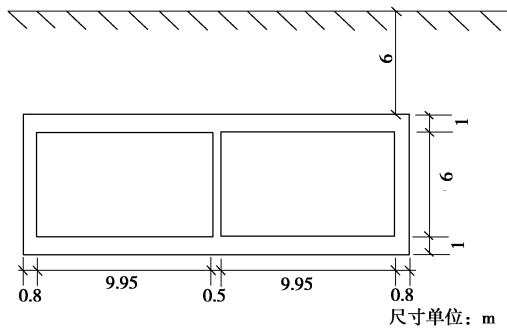


图 8 地铁车站断面图
Fig. 8 Cross section of subway station

运用有限元软件 OpenSees 进行计算，在动力分析中，地基土采用四节点流固耦合单元，以三维砂土液化大变形本构模型进行模拟^[31-32]，模型参数： $M_{fc}=1.46$ ， $G_0=125$ ， $\kappa=0.006$ ， $h=1.2$ ， $M_{dc}=0.5$ ， $d_{re,1}=0.4$ ， $d_{re,2}=1200$ ， $d_{ir}=0.88$ ， $\alpha=200$ ， $\gamma_{dr}=0.05$ ， $e_{in}=0.724$ ， $\rho=1.923$ 。混凝土结构采用四节点固体单元，以线弹性模型模拟， $E_{结构}$ 取 25 GPa， $\nu_{结构}$ 取 0.2。采用水平滑移人工边界，在基岩面上进行加速度输入。

地震波采用阪神地震的 Kobe 波，峰值为变化为 0.1g 到 0.6g。在拟静力方法计算中，先进行自由场地分析，得到自由场变形，以及反应加速度法和反应应力法所需的反应加速度和剪应力分布，在二维有限元模型中施加各方法相应约束条件及计算得到的地震荷载，进而得到结构地震反应。

2.2 结果对比

经过计算，得到结构顶底板相对位移差如表 3 所示。从表 3 中可以看出，各简化方法在不同的地震动振幅中，均高估了可液化地基中地下结构顶底板相对位移，且差异随着地震动峰值的增大而增大。其中，地下结构 Pushover 有限元分析方法在此工况下的变形计算显得相对准确，但与动力时程方法的计算结果仍有很大差别。观察不同峰值加速度下动力计算过程，均发现结构底部和顶角区域的土体在震动中超静孔压比接近 1（图 9，结构顶底板发生最大相对位移时刻），发生明显的震动弱化或液化，周围土体对结构的动力效应和约束效应发生剧烈调整，与远离结构的土体动力响应不同，结构虽然没有产生较大的水平位移差，但结构明显上浮（图 10），非已有简化方法所能考虑。

表 3 各方法计算结果

Table 3 Results of different methods

计算方法	峰值加速度					
	0.1g	0.2g	0.3g	0.4g	0.5g	0.6g
地震系数法	3.10	4.76	6.42	8.08	9.74	11.40
自由场变形法	4.01	8.02	12.03	16.04	20.05	24.06
土-结构相互作用系数法	1.80	3.61	5.41	7.22	9.02	10.83
反应位移法	2.62	4.37	6.12	7.87	9.62	11.37
反应加速度法	2.61	5.75	8.88	12.01	15.14	18.28
反应应力法	2.36	5.24	8.12	11.00	13.88	16.76
地下结构 Pushover 方法	1.35	3.22	5.08	6.95	8.82	10.68
动力时程分析	1.01	2.02	3.12	4.36	5.71	7.04

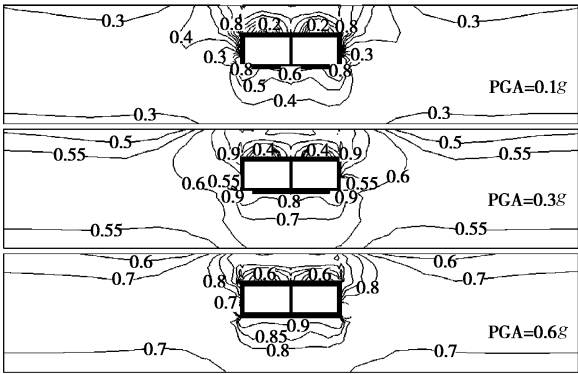


图 9 超静孔压比分布图

Fig. 9 Contours of excess pore water pressure ratio

表 4 地下结构横断面简化设计方法特点

Table 4 Characteristics of simplified design methods for cross-section of underground structures

分析方法	假定条件	主要影响参数	适用范围
地震系数法 (f)	①土体与结构均为各向同性的线弹性体; ②忽略土体与结构之间的相互作用; ③平面应变问题 (下列各方法均有此假设)	结构地震系数 K_e 土体地震系数 K_h 地震角 θ	埋深很浅、结构与周围土体刚度差异大、变形小、结构重量大于周围土体
自由场变形法 (d)	①结构为线弹性体; ②忽略土体与结构之间的动力相互作用; ③忽略结构惯性力; ④自由场变形即为结构变形; ⑤地震荷载简化为集中力或倒三角分布力	— 弹性模量 E 泊松比 ν 地震波入射角 ϕ —	结构刚度与周围地基刚度相近, 结构断面简单, 均质场地
相互作用系数法 (d)	①场地为均质的各向同性弹性体; ②相互作用系数与柔度系数为抛物线关系; ③地震荷载简化为集中力或倒三角分布力	结构-土体柔度比 F 相互作用系数 β	结构刚度远大于周围地基刚度, 埋深浅, 矩形、圆形断面
反应位移法 (d) & (f)	①土体与结构均为各向同性的线弹性体; ②忽略土体之间的相互影响; ③结构受到惯性力作用; ④土体位移、摩擦力按深度呈抛物线分布; ⑤结构侧壁摩擦力线性分布	结构地震系数 K_e 土-结构水平弹簧刚度系数 k_h 土-结构竖直弹簧刚度系数 k_v 土-结构剪切弹簧刚度系数 k_{vs} 反应位移幅值 u_{max}	结构埋深浅, 且场地剪切波速较小, 场地土质较为均匀
有限元反应加速度法 (f)	①结构为线弹性体; ②忽略结构存在对场地反应加速度的影响; ③结构和自由场的反应加速度一致; ④自由场水平位移沿深度同时达到峰值; ⑤忽略阻尼力的影响	— 土层剪切模量 G 土体阻尼比 λ —	结构刚度与周围地基刚度、密度相近, 场地土质较为均匀, 场地阻尼较小
有限元反应应力法 (f)	①结构为线弹性体; ②忽略结构存在对场地剪应力场的影响; ③结构和土体受到相同分布的地震体体积;	— 土层剪切模量 G 土体阻尼比 λ	结构刚度与周围地基刚度、密度相近, 场地土质较为均匀
地下结构 Pushover 分析法 (d)	①PGRD 与地震峰值加速度存在一定保证率的对应关系; ②地震荷载分布为自由场反应加速度分布或倒三角分布	地面与基岩间峰值 相对位移PGRD	需建立完备的 PGRD 与地震峰值加速度的对应关系, 场地土质较为均匀

注: f 表示需确定地震动作用下的受力, d 表示需确定地震动作用下的变形。

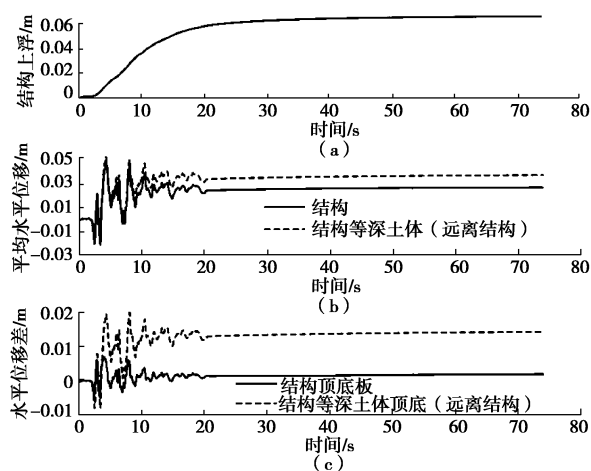


图 10 动力计算结构位移时程图 (PGA=0.6g)

Fig. 10 Structural displacements by dynamic computation

3 结 论

已有的地下结构简化抗震设计方法根据对地震作用的不同处理, 可以分为两类: 一是将地震作用简化

为地震力 (f), 再以地震力为荷载施加在不同的简化计算模型中, 可称为基于受力控制的简化抗震设计方法; 二是将地震作用简化为地震变形 (d), 再以假定的荷载分布逐级施加至简化计算模型达到此变形, 可称为基于位移控制的简化抗震设计方法。两者的关键分别是如何合理地建立地震动输入、场地条件、结构形式与地震力或地震变形的大小和分布的定量关系。已有简化方法不能在强震下土体发生震动弱化时合理地考虑上述因素的影响, 因此其适用性受到限制 (见表 4)。

本文算例表明, 简化方法对于土与结构相互作用的机理描述能力有限, 尤其在计算强震时可液化地基中结构变形方面往往过于保守, 而且不能合理地考虑可液化地基中结构可能出现的危险受荷工况: 水平方向有液化引起的非同向动土压力对结构的水平剪切作用; 竖直方向有结构周边土液化对结构的浮托作用, 这在三维情况下对地下结构震动变形的影响尤为突出^[33]。

本文算例考虑的结构处于可液化饱和砂土地基中, 震动时结构周边土体出现大范围弱化或液化区域, 将结构完全包裹其中, 未出现水平异向运动, 故结构

顶底板水平位移差较小。然而, 实际弱化或液化区域与结构的相对位置对地下结构的动力响应具体形式有很大的影响, 还有待进一步研究。

鉴于中国严峻的地震形势和对地下工程建设的迫切需求, 在深入认识地铁地下结构抗震性能的基础上, 应加大力度发展可适用于复杂成层地基和震动弱化地基、多种组合结构形式以及多向地震动作用的地下结构实用抗震设计方法。

参考文献:

- [1] 施仲衡. 地下铁道设计与施工[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997. (SHI Zhong-heng. Design and construction of metro[M]. Xi'an: Shaanxi Scientific and Technical Publishers, 1997. (in Chinese))
- [2] 川岛一彦. 地下构筑物的耐震设计[M]. 日本: 鹿岛出版会, 1994. (KAZUHIKO Kawashima. Seismic design of underground structures[M]. Japan: Kashima Publishing Company, 1994. (in Japanese))
- [3] 刘如山, 胡少卿, 石宏彬. 地下结构抗震计算中拟静力法的地震荷载施加方法研究[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(2): 237 - 242. (LIU Ru-shan, HU Shao-qing, SHI Hong-bin, Study on seismic loading of pseudo-static approach used in the seismic design of underground structure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(2): 237 - 242. (in Chinese))
- [4] 福季耶娃. 地震区地下结构支护的计算[M]. 北京: 煤炭出版社, 1986. (FOTI Isinbayeva. The calculation of underground structures in earthquake area[M]. Beijing: China Coal Publishing House, 1986. (in Chinese))
- [5] NEWMARK N M. Problems in wave propagation in soil and rock[C]// Civil Engineering Classic. ASCE, 1967: 703 - 722.
- [6] KUESEL T R. Earthquake design criteria for subways[J]. Journal of the Structural Division, 1969, **36**(1): 152 - 160.
- [7] SHUKLA D K, RIZZO P C, STEPHENSON D E. Earthquake load analysis of tunnels and shafts[C]// Proceeding of the Seventh World Conference on Earthquake Engineering. Michigan, 1980: 20 - 28.
- [8] St JOHN C M, ZAHRAH T F. Aseismic design of underground structures[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1987, **2**(2): 165 - 197.
- [9] POWER M S, ROSIDI D, KANESHIRO J. Vol. III Strawman: screening, evaluation, and retrofit design of tunnels[R]. New York: National Center for Earthquake Engineering Research, 1996.
- [10] WANG J N. Seismic design of tunnels: a simple state-of-the-art design approach[M]. New York: Parsons Brinckerhoff, 1993.
- [11] HASHASH Y, HOOK J J, SCHMIDT B. Seismic design and analysis of underground structures[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2001, **16**(4): 247 - 293.
- [12] PAKBAZ M C, YAREEVAND A. 2-D analysis of circular tunnel against earthquake loading[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2005, **20**(5): 411 - 417.
- [13] GIL L M, HERNANDEZ E, DE LA FUENTE P. Simplified transverse seismic analysis of buried structures[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2001, **21**(8): 735 - 740.
- [14] 刘智勇, 郑永来. 矩形断面地下结构抗震设计简化方法探索[J]. 结构工程师, 2008, **24**(2): 6 - 10. (LIU Zhi-yong, ZHENG Yong-lai, Exploration on simplified method for seismic design of underground structures with rectangular section[J]. Structural Engineers, 2008, **24**(2): 6 - 10. (in Chinese))
- [15] 龚成林, 宋二祥, 刘光磊. 地下结构横断面地震反应简化计算方法探讨[J]. 地下空间与工程学报, 2009, **5**(4). (GONG Cheng-lin, SONG Er-xiang, LIU Guang-lei. Simplified seismic analysis methods for underground structures with rectangular cross section[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, **5**(4). (in Chinese))
- [16] 刘晶波, 王文晖, 张小波, 等. 地下结构横断面地震反应分析的反应位移法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(1): 161 - 167. (LIU Jing-bo, WANG Wen-hui, ZHANG Xiao-bo, et al. Research on response deformation method in seismic analysis of underground structure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(1): 161 - 167. (in Chinese))
- [17] 刘晶波, 王文晖, 赵冬冬, 等. 复杂断面地下结构地震反应分析的整体式反应位移法[J]. 土木工程学报, 2014, **47**(1): 134 - 142. (LIU Jing-bo, WANG Wen-hui, ZHAO Dong-dong, et al. Integral response deformation method in seismic analysis of complex section underground structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, **47**(1): 134 - 142. (in Chinese))
- [18] 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. (in Chinese))

- [19] 林 皋. 地下结构抗震分析综述 (上)[J]. 世界地震工程, 1990, 6(2): 1 - 9. (LIN Gao. Review of underground structure seismic analysis(I)[J]. World Earthquake Engineering, 1990, 6(2): 1 - 9. (in Chinese))
- [20] 于 翔, 陈启亮, 赵跃堂, 等. 地下结构抗震研究方法及其现状[J]. 解放军理工大学学报 (自然科学版), 2000, 1(5): 63 - 69. (YU Xiang, CHEN Qi-liang, ZHAO Yue-tang, et al. The status quo and methods of antiseismic research of underground structure[J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2000, 1(5): 63 - 69. (in Chinese))
- [21] 李子豪. 地铁地下结构横截面震动变形的实用评价方法[D]. 北京: 清华大学, 2006. (LI Zi-hao, Practical methods for evaluating seismic deformation in cross section of metro underground structures[D] Beijing: Tsinghua University, 2006. (in Chinese))
- [22] HASHASH Y M A, KARINA K, KOUTSOFTAS D, et al. Seismic design considerations for underground box structures[C]// Earth Retention Conference. 2010: 1 - 4.
- [23] 刘晶波, 王文晖, 赵冬冬. 地下结构横截面抗震设计分析方法综述[J]. 施工技术, 2010(6): 91 - 95. (LIU Jing-bo, WANG Wen-hui, ZHAO dong-dong. Review of methods for seismic design and analysis of underground structure cross-section[J]. Construction Technology, 2010(6): 91 - 95. (in Chinese))
- [24] 耿 萍, 何 川, 晏启祥. 隧道结构抗震分析方法现状与进展[J]. 土木工程学报, 2013, 46(1). (GENG Ping, HE chuan, YAN Qi-xiang. The current situation and prospect of seismic analysis methods for tunnel structure[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(1). (in Chinese))
- [25] 刘晶波, 王文晖, 赵冬冬. 地下结构横截面地震反应拟静力计算方法对比研究[J]. 工程力学, 2013, 30(1): 105 - 111. (LIU Jing-bo, WANG Wen-hui, ZHAO Dong-dong. Comparison of the pseudo-static methods for seismic analysis of the underground structures[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(1): 105 - 111. (in Chinese))
- [26] 付鹏程, 王 刚, 张建民. 地铁地下结构在轴向传播剪切波作用下反应的简化计算方法[J]. 地震工程与工程振动, 2004, 24(3): 44 - 50. (FU Peng-cheng, WANG Gang, ZHANG Jian-min. A simplified analysis method for dynamic response of subway tunnel subjected to longitudinally propagating shear waves[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2004, 24(3): 44 - 50. (in Chinese))
- [27] 车爱兰, 岩檐敞广, 葛修润. 关于地铁地震响应的模型振动试验及数值分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(8): 1293 - 1298. (CHE Ai-lan, IWATATE T, GE Xiu-run. Dynamic behaviors of subway structure subjected to strong earthquake motions using shaking table tests and dynamic analyses[J]. Rock and Soil Mechanics 2006, 27(8): 1293 - 1298. (in Chinese))
- [28] SEED H B, WONG R T, IDRIS I M, et al. Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 112(11): 1016 - 1032.
- [29] 胡聿贤, 孙平善, 章在塘, 等. 场地条件对震害和地震动的影响[J]. 地震工程与工程振动, 1980, 1(1): 41 - 54. (HU Yu-xian, SUN Ping-shan, ZHANG Zai-yong, et al. Effects of site conditions on earthquake damage and ground motion[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1980, 1(1): 41 - 54. (in Chinese))
- [30] 苏 栋, 李相崧, 明海燕. 材料模型参数对自由场地震响应的影响[J]. 岩土力学, 2007, 28(增刊): 703 - 708. (SU Dong, LI Xiang-song, MING Hai-yan. Effects of material model parameters on seismic free ground response[J]. Rocks and Soil Mechanics, 2007, 28(S0): 703 - 708. (in Chinese))
- [31] ZHANG J M, WANG G. Large post-liquefaction deformation of sand, part I: physical mechanism, constitutive description and numerical algorithm[J]. Acta Geotechnica, 2012, 7(2): 69 - 113.
- [32] WANG R, ZHANG J M, WANG G. A unified plasticity model for large post-liquefaction shear deformation of sand[J]. Computers and Geotechnics, 2014, 59: 54 - 66.
- [33] CHEN R, YAO Y, WANG R, et al. Three-dimensional finite element analysis of underground structures' dynamic response in liquefiable soil[C]// Advances in Soil Dynamics and Foundation Engineering. ASCE, 572 - 578.
- [34] 清华大学, 北京市勘察设计研究院有限公司, 北京城建设计研究总院有限责任公司, 等. 地铁地下结构抗震理论及关键技术研究与应用[R]. 北京: 清华大学, 北京市勘察设计研究院有限公司, 等. 2014. (Research and application of seismic theory and key technology of subway structure: Published papers set(1)[M]. Beijing: Tsinghua University, Beijing Engineering Consultants Ltd. Beijing Urban Engineering Design & Research Institute Co., Ltd. Beijing Seismological Bureau of Earthquake Prevention and Earthquake Engineering Research Institute, et al. 2014. (in Chinese))