

基于子结构法的地铁车站地震反应分析

庄海洋¹, 陈国兴¹, 张菁莉²

(1. 南京工业大学 岩土工程研究所, 南京 210009; 2. 浙江科技学院 土木系, 杭州 310000)

摘 要: 对 1995 年日本阪神地震中地铁车站的破坏情况进行了调查, 深入分析了地铁车站的地震破坏机理。采用二维子结构分析方法 (SASSI2000) 分别对水平向和竖向地震动作用下神户大开地铁车站的地震反应进行了数值模拟分析。在建模时把地铁车站上方的土体作为车站的附属结构, 首先采用 SHAKE91 程序计算自由场土体的动剪切模量和阻尼比, 在 SASSI2000 中不再考虑土体的非线性。将计算结果与 1995 年阪神地震中该车站的震害进行了详细地对比分析发现所得的地震反应规律与其震害完全吻合, 其计算结果能够合理的解释神户大开地铁车站的各种震害现象。因此, 对地下车站的抗震设计具有一定的参考价值和指导意义。

关 键 词: 地铁车站; 子结构法; 抗震设计; 地震反应

中图分类号: P 315 **文献标识码:** A

Analysis of earthquake response of subway station based on substructuring subtraction methods

ZHUANG Hai-yang¹, CHEN Guo-xing¹, ZHANG Jing-li²

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China;
2. Department of Civil Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hanzhou 310000, China)

Abstract: The damages to Dakai subway station in 1995 Hyogoken-nanbu earthquake are analyzed in detail. The earthquake response of Dakai subway station is modeled by the 2-D substructuring methods (program SASSI2000, developed by John Lysmer et al.) with ground motions inputted in different directions. In this method, the dynamic soil-structure interaction is considered; and the effect of soil nonlinear dynamic property is considered by equivalent linearization model (program SHAKE91, developed by Schnabel et al.). The soils above the subway are considered as an affiliated structure of subway. The results prove that the model used is validation and the collapse of the columns in Dakai station was induced by both of the horizontal and vertical vibrations. The dynamic response of Dakai subway station calculated in this paper accorded well to all kinds of damages caused by the 1995 Hyogoken-nanbu earthquake.

Key words: subway station; substructuring subtraction methods; aseismic design; earthquake response

1 前 言

以往人们普遍认为, 地下结构具有较好的抗震性能, 但全球范围内多次地震震害的破坏现象显示, 在地震作用下现有的地下结构并不安全, 有时甚至会发生严重的破坏, 特别值得指出的是 1995 年 7.2 级日本“阪神地震”, 对神户市内地下结构造成了有史以来最严重的破坏, 铁路、停车场、隧道、商业街等大量地下工程均发生严重破坏, 其最引人

注意的是地铁车站的破坏最为严重, 在这次地震中, 共有 5 个车站和约 3 km 的地铁区间隧道发生破坏, 其中大开车站最为严重, 一半以上的中柱完全坍塌, 导致顶板坍塌破坏和上覆土层的沉降, 最大沉降量达 2.5 m 之多。据神户高速铁路公司报道, 不计高架桥结构破坏造成的损失约为 300 亿日元, 修复大开站需要 100 亿日元, 修复隧道约 180 亿日元。

目前关于地下结构抗震设计的主要方法为反应位移法, 该方法由 20 世纪 70 年代日本学者提出^[1],

该方法假定地下结构和周围地层之间通过各种弹簧连接,把由地震荷载引起的自由场变形直接通过文克尔土体弹簧作用于地下结构,把土体质点位移以正弦曲线的形式给出。这种简化模型的确给地下结构的抗震设计带来了很大的方便。但是,由于土体在地震作用下的动力特性非常复杂,又存在地区的差异性,因此很难准确地确定这种土体弹簧在地震荷载作用下的弹簧系数。同时,该方法没有考虑结构本身的惯性力,采用了拟静力计算方法,因此很难真实地反应地震时地下结构的响应。

随后,有许多学者在反应位移法的基础上提出改进或类似的方法,如 Shukla D.K, Rizzo P.C(1980 年)提出了 Shukla 法^[2], John P.W, Zahrah T F (1987 年)提出了 ST. John 法^[3]。

相比而言,动力有限元分析方法考虑的更为全面,在 Zienkiewicz 等提出了动力有限元法后, Newmark (1959 年)、Wilson (1973 年)等分别提出的逐步积分法更是为动力有限元法的发展和应用提供了动力。近几年,Jun Seong Choi (2002 年)等^[4]基于大型有限元软件 ANSYS 的计算平台,考虑结构与土体之间的分离和相对滑动,采用二维有限元整体分析方法对非线性土体-地下结构的动力相互作用进行了数值模拟,给出了矩形地下结构内由地震荷载引起的动内力分布图;Hongbin Huo (2003 年)等^[5]基于 ABAQUS 有限元软件计算平台,考虑竖向地震和水平地震的共同作用,用无限元与有限元的耦合来考虑由有限空间代替无限半空间而引起的边界问题。

本文基于 John Lysmer 等^[6]提出的分析土与结构动力相互作用的子结构法(美国伯克利大学开发的通用 SASSI2000 程序),在建模上进行创新,分别考虑竖向地震和水平向地震作用下,对在 1995 年日本阪神地震中破坏最为严重的大开地铁车站进行了地震反应分析,对其震害作了深入的分析和探讨。

2 计算原理

结构分析的子结构法最早是为解决飞机结构这类大型和复杂结构的有限元分析问题而建立起来的,而后才被用于共同作用分析^[7]。用子结构法计算土与结构的动力相互作用问题是一个非常简便的方法。在这个方法中,把线性的土与结构相互作用问题分解成一系列简单的子问题,对每个子问题分别求解,最后利用叠加原理把分析的结果建立联系,得出问题的最终整体解。

处理土与结构之间相互作用的方法有很多,根据对土与结构接触面上结点自由度处理方法的不同,主要使用以下 4 种分析方法:(1)刚性边界方法;(2)柔性边界方法;(3)柔性体法;(4)子结构缩减法。John Lysmer 等^[6]提出的分析土与结构动力相互作用的子结构法(SASSI2000)主要采用柔性体法和子结构缩减法,该方法主要适用于上部结构基础与土体的动力相互作用问题(见图 1,图中 i 表为土与结构接触面上的相互作用节点号, w 为开挖区域内部的节点号; s 为上部结构的节点号; g 为土体的结点号)。

本文采用子结构缩减法处理土与结构的动力相互作用,其基本概念如图 1 所示,其中图 1(a)为整个土与结构相互作用体系;图 1(b)为子结构 I,也就是自由场;图 1(c)为子结构 II,即为开挖土部分,这部分在开挖后由基础所取代;图 1(d)为子结构 III,即上部结构部分。将 3 个子结构组合起来就形成了整个相互作用体系。在这个体系中,假定自由场与开挖土部分的相互作用仅发生在二者的接触节点上。图 1(b)、图 1(c)、图 1(d)表示出了子结构法求解土与结构相互作用问题的基本概念。

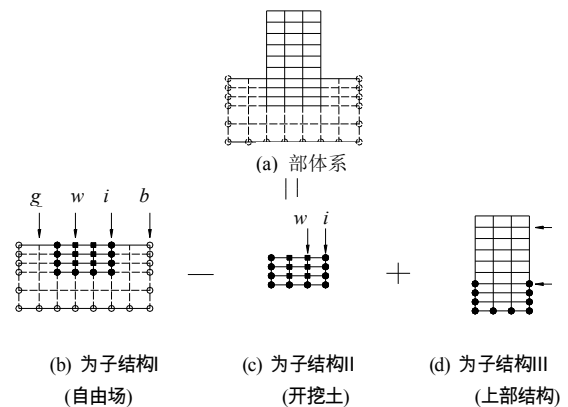


图 1 子结构缩减法计算土与结构相互作用问题的基本原理图
Fig.1 Substructures in the substructure subtraction method

结构动力问题的基本运动方程如下:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{\dot{u}\} = 0 \quad (1)$$

式中 $[M]$ 和 $[K]$ 分别为结构的质量矩阵和刚度矩阵。

将式(1)运用于土与结构相互作用问题中,则可得土与结构相互作用问题的基本运动方程:

$$[M]\{\ddot{U}\} + [K]\{\dot{U}\} = \{\hat{Q}\} \quad (2)$$

式中 $[M]$ 为总质量矩阵; $[K]$ 为总刚度矩阵; $\{U\}$

程序计算中不再考虑其非线性，具体的计算模型如

图 4 所示。

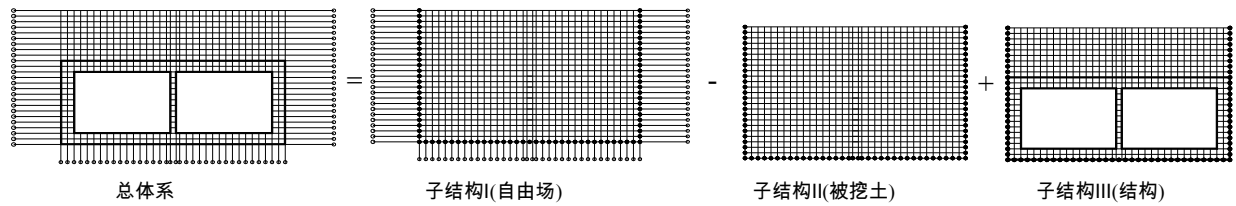


图 4 子结构缩减法计算土与地铁车站相互作用问题的基本原理图

Fig.4 Substructures in the substructure subtraction method

4 计算结果与分析

为了说明大开地铁车站的地震反应规律，利用 SURFER7 后处理软件分别对水平向地震和竖向地震作用下引起的地铁车站水平向正应力、剪切应力和竖向正应力计算结果进行整理，得出如图 5 所示的结果云图，对地铁车站在水平和竖向地震作用下的反应规律具体分析如下：

(1) 在水平地震作用下，大开地铁车站的中柱上端和下端产生很大的剪切应力，很可能发生剪切破坏，尤其是中柱下端发生剪切破坏的可能性更大，如图 5(a)；在地铁车站的顶板和侧墙连接部位的附

近产生很大的拉压应力，这些部位很容易发生拉压破坏，如图 5(a)，图 5(c)；在各构件的连接处附近应力集中现象非常明显。

(2) 在竖向地震作用下，地铁车站的最大应力反应与水平荷载作用下的结果明显不同，具体表现为：中柱的轴向压应力值明显大于其它部位的反应，中柱很可能发生压碎破坏，如图 5(f)；在中柱两侧附近的顶板和底板处产生很大的剪切应力，在这些部位很可能发生剪切破坏，如图 5(e)；在侧墙内侧产生很大的压应力，在该部位容易发生压碎破坏，如图 5(f)。

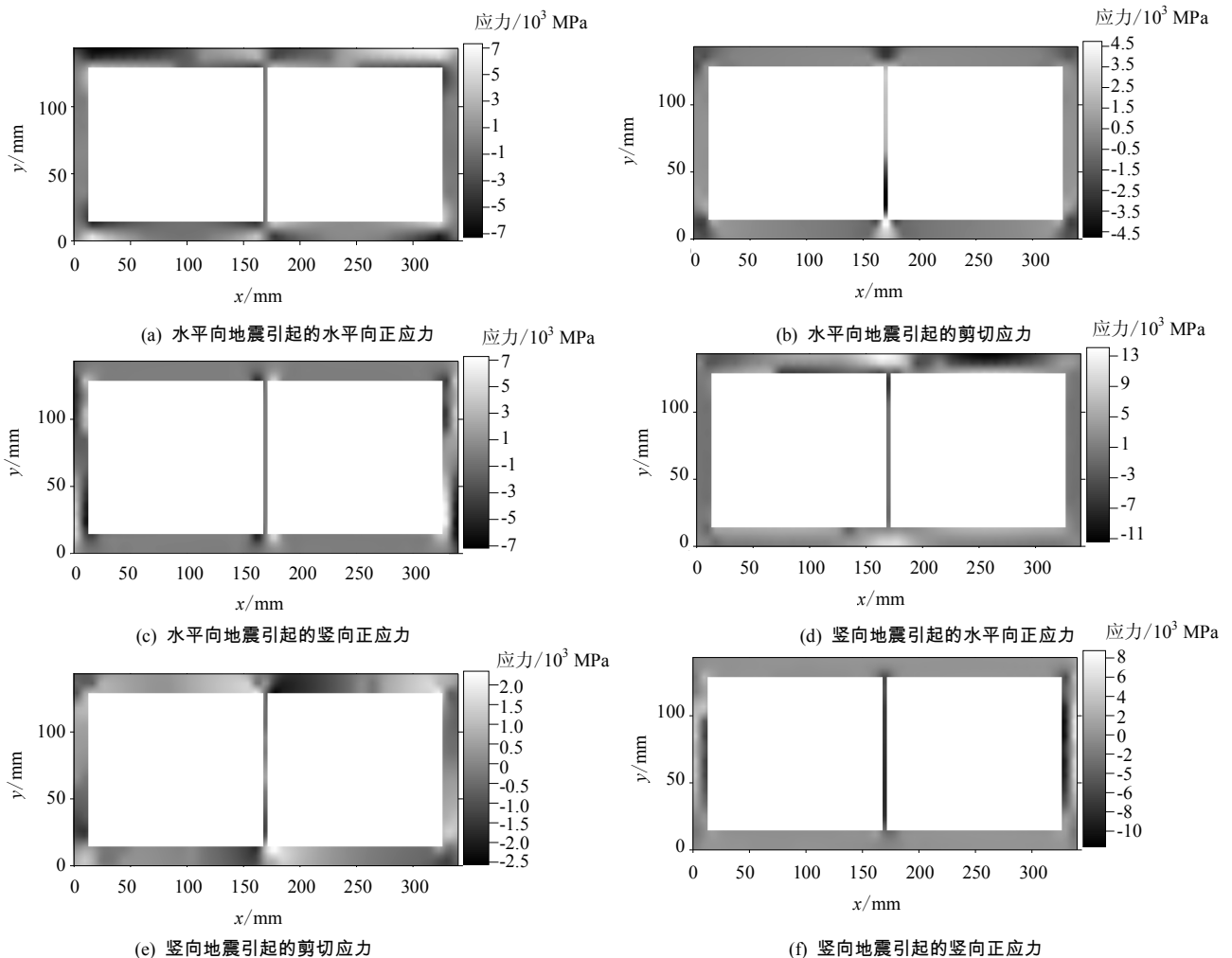


图5 在不同地震荷载作用下大开地铁车站地震反应内力分布图

Fig.5 Dynamic stress induced by different ground motions

把本文分析所得的地铁车站在水平向和竖向地震作用下的反应规律与大开地铁车站的震害现象进行对比分析, 本文所得的结果与大开地铁车站的震害非常的吻合。在 1995 年阪神地震中, 大开车站的中柱大部分发生混凝土压碎破坏, 破坏形式如图 6 (b)所示。在顶板和顶板中线两侧 2 m 内产生很宽的纵向裂缝, 这些裂缝由剪切应力产生的; 在侧壁内侧主钢筋出现弯曲, 从而侧墙稍稍向内鼓出, 这种破坏形式主要是由内墙的压应力过大而引起的, 以上的震害现象与本文竖向地震作用下地铁车站的响应规律极其相似, 这说明大开地铁车站的震害主要是由竖向地震作用引起的。同时, 在 1995 年阪神地震中大开车站部分中柱发生了剪切破坏, 破坏形式如图 6(a)所示, 在侧墙上部加腋部位混凝土也出现压碎剥落现象, 这些现象与在水平向地震作用下地铁车站的响应规律相吻合, 这就说明大开地震车站同时受到水平向地震的破坏作用。



(a) 剪切破坏



(b) 压碎破坏

图6 大开地铁车站中柱主要破坏形式

Fig.6 Damage of central columns in Dakai subway station

5 结 语

John Lysmer 等提出考虑土与结构动力相互作用的子结构法 (SASSI2000) 主要是用于求解上部结构与土体动力相互作用。本文基于该方法的建立

了合理的计算模型, 把地铁车站顶板正上方的土体当作地铁车站的附属结构, 对大开地铁车站的地震反应进行了数值模拟计算, 计算结果与 1995 年日本阪神地震中大开地铁车站的震害现象进行对比, 验证了本文计算所得的大开地铁车站地震反应规律是可靠的, 这些规律对地下结构的抗震设计具有一定的指导意义和参考价值。

参 考 文 献

- [1] 川岛一彦. 地下结构の耐震设计[M]. 日本: 鹿岛出版社, 1994. 15 - 48.
- [2] Shukla D K, Rizzo P C, Stephenson D E. Earthquake load analysis of tunnels and shafts[A]. **Proceedings of the Seventh World Conference on Earthquake Engineering** [C]. [s.l.]: [s.n.], 1980. 20 - 28.
- [3] John C M S, Zahrah T F. A seismic design of underground structures[J]. **Tunneling and Underground Space Technology**, 1987, 21(1): 65 - 197.
- [4] Jun Seong Choi, Jong She Lee, Jae Min Kim. Nonlinear earthquake response analysis of 2-D underground structures with soil-structure interaction including separation and sliding at interface[A]. **15th ASCE Engineering Mechanics Conference**[C]. New York: Columbia University, 2002.
- [5] Hongbin Huo, Antonio Bobet. Seismic design of cut and cover rectangular tunnels-evaluation of observed behavior of Dakai station during Kobe earthquake[A]. 1995. **Proceedings of 1st World Forum of Chinese Scholars in Geotechnical Engineering**[C]. Shanghai: Tongji University, 2003. 456 - 466.
- [6] John Lysmer, Farhang Ostadan, Chih Cheng Chin. A System for Analysis of Soil-structure Interaction[M]. Berkeley: Geotechnical Engineering Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, 2000.
- [7] 宰金珉, 宰金璋. 高层建筑基础分析与设计[M]. 中国: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [8] Schnabel, Lysmer, Seed. A Computer Program for Conducting Equivalent Linear Seismic Response Analyses of Horizontally Layered Soil Deposits[M]. [s.l.]: [s.n.],

1992. 1 - 15.

- [9] 罗奇峰, 那向谦. 1995 年日本阪神地震近场强地面运动的特征[J]. 西北地震学报, 1997, (3): 52 - 55.