

在地震波作用下地下连续墙的动力响应

薛松涛^{1,2}, 张茂雨¹, 谢丽宇¹, 陈 巍¹ 王远功¹

(1 同济大学结构工程与防灾研究所, 上海 200092; 2 日本近畿大学理工学部建筑学科, 日本大阪 577-8502)

摘要: 采用有限元—无限元耦合法分析在地震波作用下地下连续墙与场地土相互作用的动力响应。子结构法的应用有效地解决了有限元—无限元的耦合问题。通过实例分析了 El Centro 波作用下地下连续墙在场地土中的动力响应, 讨论了场地土层性质、厚度以及夹层属性对连续墙动力响应的影响, 对地下连续墙的抗震设计具有参考价值。

关键词: 地下连续墙; 地震波; 动力响应; 子结构法

中图分类号: TU352.11

文献标识码: A

文章编号: 1008-1933(2005)06-0134-03

1 引言

地下连续墙技术自 20 世纪 50 年代在西欧首先运用以来, 已在全世界得到了迅速推广。我国于 1958 年开始应用排桩式地下连续墙作为水库大坝的防渗墙。地下连续墙在实际工程的应用中尚存在诸多设计难点, 尤其是对地震作用下的动力响应的研究成果甚少, 而地下连续墙作为地下结构物永久性的维护措施已经并且将要广泛地应用于实际工程中。因此, 研究地下连续墙在地震作用下的动力响应和破坏机理十分重要, 对抗震设计具有实际意义。为此, 对回填土后的地下连续墙在振动引起的动应力作用下发生的破坏进行研究分析, 研究内容为无侧移、无液化土体中, 单独地下连续墙在 El Centro 波作用下的动力响应, 分析其应力分布状况。并通过具体算例讨论了场地土层性质、厚度以及夹层属性对连续墙动力响应的影响。本文中场地土采用横观各向同性层状场地模型, 考虑到地下连续墙结构属于平面应变问题, 因此, 采用半平面二维理论来分析。

2 模型分析与数值分析方法

2.1 子结构法

对于无限域问题, 运用有限元模型会遇到计算范围及边界条件这两个困难。而采用无限单元模拟无限域, 一方面将计算范围扩展到无限域; 另一方面边界条件自动满足。因此, 对于如图 1(a)所示的土—结构相互作用, 地震波由远场入射的问题, 采用有限元—无限元耦合法来解决, 即近场采用有限单元离散, 远场采用无限单元离散。子结构法能有效地解决有限元—无限元耦合问题, 其示意图如图 1。

到土—结构相互作用力 F_c 作用的结构(c)及受到入射地震波激振和 $-F_c$ 作用的余下部分(b)。再次, 将子结构(b)分为 2 个部分: 入射地震波激振的自由场地(d)和在界面处受到 $-F_c + F_c^f$ 作用的土体(e), 其中, F_c^f 为自由场地在地震波入射时, 土—结构界面处产生的内力。图(f)中的场地响应等于自由场地响应(d), 这一点可帮助理解第二次分解。

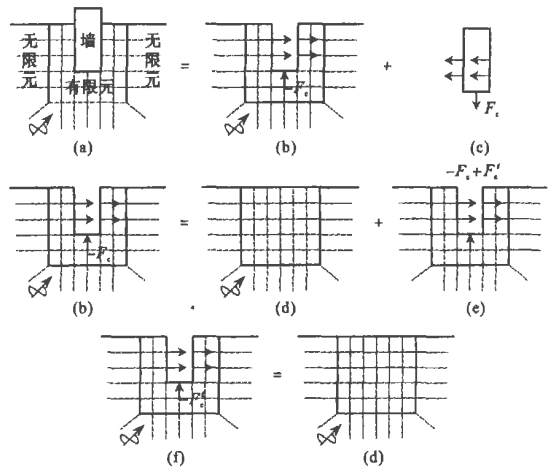


图 1 子结构法

2.2 有限元—无限元混合模型

2.2.1 有限元单元模型和无限元模型

墙体及周边土体用有限元法求解, 采用四结点等参单元, 每个结点有 2 个位移分量^[1]。

有限单元法不能真实地反映无限远场地边界条件, 尤其对于动力问题, 由于波的边界反射产生较大

收稿日期: 2005-03-11

作者简介: 薛松涛(1963—), 男, 江苏涟水人, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要从事结构健康监测研究。

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(59925820)

的误差, 又不能很好地反映远场能量弥散、辐射阻尼的特性。正是由于这样的不足, 因此采用无限元法, 用来数值模拟场地的无限域问题。远场无限域采用了四结点乘子型超参无限单元, 可与四结点等参有限元耦合。局部坐标系中的母单元和总体坐标系中的子单元进行坐标变换^[2], 和有限元不同的是, 在型函数中多了一个单元位移衰减函数 $f_i(\xi)$ 。

2.2.2 衰减函数及数值分析方法

为了满足无限远处位移为零的边界条件, 引入了衰减函数。波动问题的衰减函数为

$$f_i(\xi) = e^{-(\alpha+\beta)\xi} \quad (1)$$

式中 α 为单元在局部坐标系中的位移幅值衰减系数; β 为单元在局部坐标系中的名义波数, 反映了波的传播特性。

通过转换可以得到整体坐标系中的衰减函数:

$$f_i(\xi) = e^{-(\alpha+\beta)\frac{x-x_1}{\Delta x_1}} = e^{-(\alpha_G+\beta_G)(x-x_1)} \quad (2)$$

式中 x 表示结点在整体坐标系中 x 方向的坐标值; x_1 表示单元中结点 1 在整体坐标系中 x 方向的坐标值; Δx_1 表示单元中结点 1 和结点 4 在整体坐标系中 x 方向的坐标值之差。

$$\alpha_G = \frac{\alpha}{\Delta x_1} \quad \beta_G = \frac{\beta}{\Delta x_1} \quad (3)$$

式中 α_G, β_G 分别表示单元在整体坐标系中的实际振幅衰减系数和实际波数。

为了简化实际应用, 采用赵崇斌(1988)提出的一种简单方法^[3]来确定幅值衰减系数 α_G , 将其应用到有限元-无限元混合模型中, 可用下面给出的近似公式表示:

$$\alpha \approx \ln \frac{D_F}{D_F + \Delta D_F} \quad (4)$$

式中 D_F 为有限元所模拟的最大半径; ΔD_F 为无限元边结点距端结点的平均距离。

计算无限元的质量、刚度矩阵时, 有限域上的积分采用 Gauss-Legendre 数值积分方法, 对无限域上的数值积分, 采用由 Bettess 和 Zienkiewicz(1977)提出修正的 Newton-Cotes 数值积分方法。

3 地下连续墙算例分析

本部分将通过算例具体讨论分析受 El Centro 波作用的地下连续墙的动力响应。分析之前, 首先给出墙体-土相互作用模型的一些假设:

(1)算例中连续墙为回填土后的状态, 无上部结构, 墙体、土变形均限定在线弹性范围内;

(2)墙体和土之间粘结良好, 变形协调一致, 不

发生相对滑移和脱离;

(3)墙体底部为自由端, 不受约束。

算例中, 地震波形式采用 El Centro 波, 其时程一加速度如图 2 所示, 计算时取前 20 s 历程。

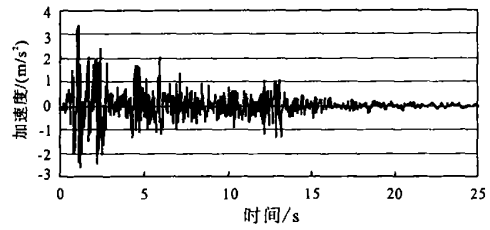


图 2 El Centro 波时程

3.1 单一介质中的连续墙

自由场地为基岩上的单一覆盖层, 层厚 30 m, 基岩、覆盖层参数如表 1 所示。墙体深度为 20 m, 厚度为 0.6 m, 弹性模量 3×10^{10} Pa, 泊松比 $\nu = 0.25$, 墙体密度 $\rho = 2500$ kg/m³。

表 1 场地土的物理参数

	ρ /(kg/m ³)	E /Pa	ν
土层	1800	1×10^7	0.30
基岩	2500	8×10^8	0.25

图 3 为 El Centro 波作用下墙体的最大主应力包络图, 呈抛物线状。墙体最大主应力出现在墙体 1/2 偏下处。可见, 在地震波作用下墙体的动力响应最危险处在墙体中部附近。

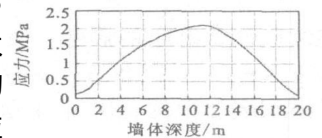


图 3 单层介质中墙体的最大主应力包络图

上例中, 若墙体深度为 30 m, 墙体直达基岩持力层, 其最大主应力包络图见图 4。可以看到, 在墙体中部附近同样有极大值, 同样呈抛物线状。但在墙体底部应力发生突变, 比墙体中部的极大值还要偏大, 这主要是由于土体的不连续性引起的。实际上还未达到最大值, 墙体周围土体就已破坏, 墙体同基岩发生相对滑移, 在计算时假设墙体与土之间无相对滑移, 因而计算结果偏大。

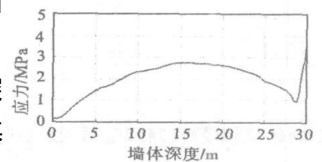


图 4 单层介质中墙体直达持力层时的最大主应力包络图

3.2 置于 2 层介质中的连续墙

仍以上例中的墙体为算例, 墙体深度为 20 m, 所不同的是场地覆盖层条件: 自地面而下, 土层 1 厚

15 m, 土层 2 厚 15 m, 场地土层物理参数如表 2 所示。

表 2 场地土的物理参数

	$\rho / (\text{kg} / \text{m}^3)$	E / Pa	ν
土层 1	1800	1×10^7	0.3
土层 2	2200	2×10^8	0.25
基岩	2500	8×10^8	0.25

墙体最大主应力包络图见图 5。总体上此时的应力与单层介质时的应力保持同样的趋势, 但由于双层介质存在不连续性, 应力最大值出现在两土层

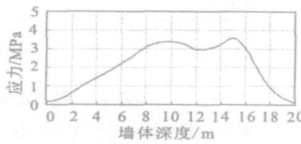


图 5 双层介质中墙体的最大主应力包络图

相邻界面附近(墙体深度为 15m 附近)。与图 3 中的应力相比, 应力值有明显的增加。墙体为了达到与场地协调运动, 在该位置产生较大的主应力, 同时两土层性质差异越大, 应力值也越大。

3.3 夹层对墙体动力响应的影响

在实际工程中常常会遇到地下某一深处夹有硬土层或软土层, 这里将分别讨论硬夹层与软夹层对连续墙动力响应的影响。在 3.1 的算例中, 假设在地下 8~14 m 存在有一夹层, 夹层上下 2 层的土体性质与表 2 中的土层 1、土层 2 相同, 夹层的物理参数见表 3。

表 3 夹层土的物理参数

	$\rho / (\text{kg} / \text{m}^3)$	E / Pa	ν
硬夹层	2200	5×10^8	0.25
软夹层	1800	2×10^6	0.35

最大主应力包络图见图 6, 7。图形明显呈双峰状, 可见, 无论是硬土夹层还是软土夹层, 墙体在土层界面处附近都会产生很大的应力(如图中墙体深度为 8m 和 14m 附近的应力值), 和图 3 相比, 应力增大了好几倍。同时, 夹层和原土层的性质差异越大, 应力峰值也越大。在夹有硬夹层的场地中, 动力响应值的增大更加明显, 相比较而言, 硬夹层的存在对地下连续墙动力响应的影响更大。

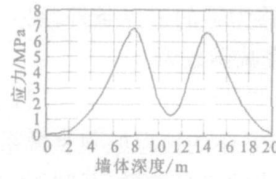


图 6 有硬夹层时墙体的最大主应力包络图

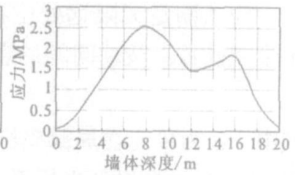


图 7 有软夹层时墙体的最大主应力包络图

4 结论

本文采用了有限元—无限元混合模型, 结合子结构法, 完成了无限地基中无上部结构地下连续墙对地震波的动力响应分析, 得到以下结论:

(1) 对于单一介质中的连续墙, 墙体最大主应力的位置在墙体中部附近;

(2) 连续墙位于多层土体介质中时, 墙体最大主应力发生在土体性质的不连续处, 无论是软土层, 还是硬土层。而且, 相邻介质的差异越大, 响应值越大。

参 考 文 献:

[1] 王勳成, 邵 敏. 有限单元法基本原理和数值方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.

[2] 应隆安. 无限元方法[M]. 北京: 北京大学出版社, 1992.

[3] 赵崇斌, 张楚汉. 用映射动力无穷元求解地基中的三维波动问题[J]. 中国科学(A 辑)[C]. 1988, (10): 1109-1119.

The dynamic responses of the slurry wall subjected to earthquake waves

XUE Song-tao^{1, 2}, ZHANG Mao-yu¹, XIE Li-yu¹, CHEN Rong¹, WANG Yuan-gong¹

(1. Research Institution of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Architecture School of Science and Engineering, Kinki University, Osaka 577-8502, Japan)

Abstract: This paper analyses the dynamic responses of the interaction of the slurry wall and the soil, which are subjected to the earthquake waves, by using the method of finite element and infinite element. The application of the substructure method efficiently solves the combination of finite element and infinite element. The paper discusses the effects on the responses caused by the feature and thickness of inclusion soil layer. The conclusion can provide the theoretical basis for the design of slurry wall for the earthquake resistance.

Key words: slurry wall; earthquake waves; dynamic response; substructure method