

近断层竖向地震动 $P-\Delta$ 效应研究¹

范优铭¹⁾ 夏群²⁾

1) 常州工程职业技术学院, 江苏常州 213164

2) 常州大学, 江苏常州 213016

摘要 竖向效应是近断层地震动的主要特点, 竖向地震动对工程结构形成的 $P-\Delta$ 效应是造成结构破坏的主要原因。本文以单自由度体系为研究对象, 选取汶川地震的近断层强震数据进行研究, 分析竖向地震动所产生 $P-\Delta$ 效应的放大作用特征。分析结果表明汶川地震中, 相比于中远场区域, 近断层区域内竖向地震动作用所产生的 $P-\Delta$ 效应具有明显的放大作用, 且近断层内这种放大作用具有普遍性; 当自振周期一定时, 不同台站获得地震动的放大系数离散性较小, 主要分布于均值附近; 其分析结果符合地震动的一般规律, 分析结果合理。在此基础上建立了以均值为代表值的放大系数谱, 可以与抗震设计反应谱结合使用, 从而为活断层附近区域内的结构抗震设计问题提供量化参考依据。

关键词: 近断层 $P-\Delta$ 效应 放大系数 自振周期 放大系数谱

引言

对地震动特征规律的分析是地震工程学科研究的主要问题(刘启方等, 2006)。近几十年来国内外发生了多次破坏性地震, 对所获得地震动记录进行分析, 不难看出位于发震断层附近区域内的地震动具有许多独特性质, 例如竖向效应。竖向效应是指近断层区域内竖向地震作用远远超过规范所规定的值的现象, 国内外众多地震的强震记录显示竖向地震峰值是水平向的 $1/2-2/3$ (Ambraseys 等, 2003), 我国《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010) 规定竖向地震影响系数为水平向的 65% (中华人民共和国国家标准, 2010), 但在许多地震灾害中的近断层区域内出现了竖向地震动高于水平向地震动的现象(冉志杰等, 2012; 赵国辉等, 2008; 周锡元等, 2006; Niazi 等, 1991)。

中国大陆强震台网于 2008 年 3 月投入运行, 在 2008 年 5 月 12 日汶川特大地震中获得了丰富的近断层强震记录, 为相关问题的研究提供了重要的基础数据。通过对强震记录的分析发现近断层地震动竖向与水平分量之比最高达到了 1.4 (谢俊举等, 2010; 于海英等, 2008)。但是已有的对于竖向效应问题的研究主要集中于对地震动力特性的分析, 关于地震动对工程结构影响的分析较少, 尤其缺少对影响效应的定量分析。

本文基于此研究背景, 选取汶川地震近断层强震记录为基础数据, 以单自由度体系 $P-\Delta$

1 基金项目 常州市科技计划资助 (CJ20159009)

【收稿日期】 2016-06-07

【作者简介】 范优铭, 男, 生于 1968 年。高级工程师, 副教授。主要从事建筑与土木工程施工管理和教学。

E-mail: youming_fan68@163.com

效应为研究目标,对近断层竖向地震动所产生的 $P-\Delta$ 效应进行分析研究,对于工程结构的抗震问题具有一定的意义。

1 $P-\Delta$ 效应的计算方法

已有研究表明, $P-\Delta$ 效应产生的放大作用是竖向地震导致结构破坏的主要原因之一(贺秋梅等, 2014; 刘启方等, 2006)。根据结构抗震思想,大多数工程结构在进行抗震设计时都需要转化为等效的单自由度体系的叠加进行分析(胡聿贤, 2006; 李宏男, 2013; 梁炯平等, 2013),所以本文对单自由度体系竖向地震作用下的 $P-\Delta$ 效应进行分析。

1.1 $P-\Delta$ 效应概念描述

$P-\Delta$ 效应是指体系在动力荷载作用下,由于其竖向作用使体系结构产生动力附加弯矩的过程,相当于在体系上附加了一个水平地震作用,其原理如图 1 所示(胡聿贤, 2006; 袁一凡等, 2012)。图中 m 表示质量, $P(t)$ 表示体系在某一时刻承受的水平动力荷载, $F(t)$ 表示体系在某一时刻承受的竖向荷载,包括重力以及竖向动力荷载等。

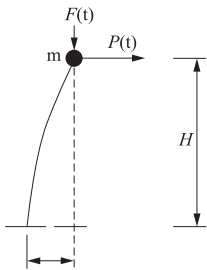


图 1 单自由度体系示意图

Fig. 1 Graph of system of single degree freedom

根据其基本原理,对于地震作用下的单自由度体系,在考虑了竖向地震作用后就变成了具有 2 个方向自由度的双自由度体系。由于地震所产生的运动以水平运动为主,故本文分析时不考虑竖向地震作用造成的竖向相对运动,因此该体系在某一时刻承受的竖向荷载作用为重力与竖向地震作用引起的惯性力。

强震仪所获得的地震加速度以 $a_v(t)$ 表示,同时竖直方向以加速度向上为正、向下为负,根据其基本原理 $P-\Delta$ 效应等效出的水平地震作用如下式(1)所示:

$$P_0(t) = m[g + a_v(t)] \cdot \frac{u(t)}{H} \quad (1)$$

式中, $u(t)$ 为体系在某时刻的位移大小, H 为体系高度, $P_0(t)$ 为与竖向地震作用等效的水平地震作用。

1.2 $P-\Delta$ 效应的计算方法

将 $P-\Delta$ 效应所产生的附加水平动力作用带入动平衡方程,则得到考虑 $P-\Delta$ 效应的动力平衡方程,表达如下:

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = m \cdot [g + a_v(t)] \cdot \frac{u(t)}{H} + ma_h(t) \quad (2)$$

式中, c 是单自由度体系阻尼系数, k 是回复力系数, $a_h(t)$ 是水平地震加速度。

式(2)可以根据杜哈密积分进行简化求解,进而求得考虑 $P-\Delta$ 效应的单自由度体系的地震反应,从而进一步求得 $P-\Delta$ 效应的放大作用,具体方法为:

(1) 按照地震动力时间步利用杜哈密积分求得每一时间步时刻的水平地震作用动力反应,即得到 $u(t_i)$ 与 $\ddot{u}(t_i)$;

(2) 根据每一时间步的水平位移按照公式(3)计算竖向荷载所产生的等效水平地震作用,利用杜哈密积分求解等效水平地震作用所产生的附加地震反应 $\ddot{u}_0(t_i)$:

$$\ddot{u}_0(t_i) = [g + a_v(t)] \cdot \frac{u(t)}{H} \quad (3)$$

(3) 据所计算出的水平地震反应 $\ddot{u}(t)$ 与附加地震反应 $\ddot{u}_0(t)$, 按照公式 (4) 计算 $P-\Delta$ 效应所产生的放大作用, 式中 β 为效应放大系数, 越大表征所产生放大作用越强。

$$\beta = \frac{\ddot{u}(t) + \ddot{u}_0(t)}{\ddot{u}(t)} \quad (4)$$

2 竖向地震动 $P-\Delta$ 效应放大作用的分析

为分析近断层竖向地震动 $P-\Delta$ 效应放大作用的特点, 本文分别选取汶川地震中近断层与中远场强震记录, 按上述方法分析计算实际地震动所产生 $P-\Delta$ 效应的放大系数, 并与中远程强震记录对比分析。

2.1 强震数据的选取

接近断层定义, 本文先选取汶川地震中发震断层附近 20 个强震台站的强震记录, 台站的断层距小于 60km, 具体信息见表 1。再选取位于中远场的 20 个强震台站的强震记录, 台站的断层距大于 100km, 具体信息见表 2。强震记录来源于中国地震局工程力学研究所下属的中国强震台网中心数据库。

表 1 所选取强震记录的近场台站信息

Table 1 The information of near-site stations selected in the study

编号	51MZQ	51JYH	51PXZ	51AXT	51JYD	51SFB	51MXN	51WCW	51MXT	51JYC
断层距/km	7.17	13.6	21.05	25.89	26.43	26.73	27.09	27.72	27.77	30.54
编号	51DXY	51DYB	51LXT	51QLY	51LXM	51PWM	51LXS	51GYZ	51BXZ	51XJD
断层距/km	31.19	34.33	46.4	49.17	49.18	51.28	51.58	55.15	57.75	59.09

表 2 所选取强震记录的中远场台站信息

Table 2 The information of remote stations selected in the study

编号	51HSD	51CXQ	51YAS	51JZB	62SHW	51JZZ	51TQL	51HYQ	51HYJ	51LDD
断层距/km	104.5	104.7	111.1	114.2	121.1	125.4	137.2	155.4	163	177.1
编号	51SMW	51LDL	62TSH	51SMM	51MBD	51YXX	51YXZ	51SMC	51LDS	51MNL
断层距/km	188.7	190.9	191.4	211.5	222.2	249.2	262.2	272.9	278.5	300.4

为充分表达研究目的, 给出了汶川地震发震断层与所选取近断层强震台站的空间分布, 如图 2 所示。

2.2 $P-\Delta$ 效应放大系数计算结果

对于任意台站, 所获得强震记录分为水平向 (EW、NS) 与竖向向 (UD), 所以任意台站可以获得 2 个 $P-\Delta$ 效应放大系数。分别计算所选取近断层与中远场强震台站记录的放大系数, 并将计算结果绘制成频率直方图, 如图 3 所示。计算中, 结合大多数工程结构的动力特点, 其单自由度体系阻尼比选择为 0.05, 自振周期分别取 1s、2s 与 3s。

对比近断层与中远场强震台站记录所计算出的放大系数, 从整体上可以看出: 对于近断层所获得的强震记录其 $P-\Delta$ 效应放大系数值较大, 而中远场的 $P-\Delta$ 效应放大系数值较小; 对于中远场地震动, 其地震作用的水平分量本身就较弱, 故其竖向地震动所产生的 $P-\Delta$ 效应可以忽略。因此竖向地震动所产生 $P-\Delta$ 效应的放大作用是近断层地震动所产生动力作用的主

要特点，对于近断层地震动应分析其所产生的 $P-\Delta$ 效应。

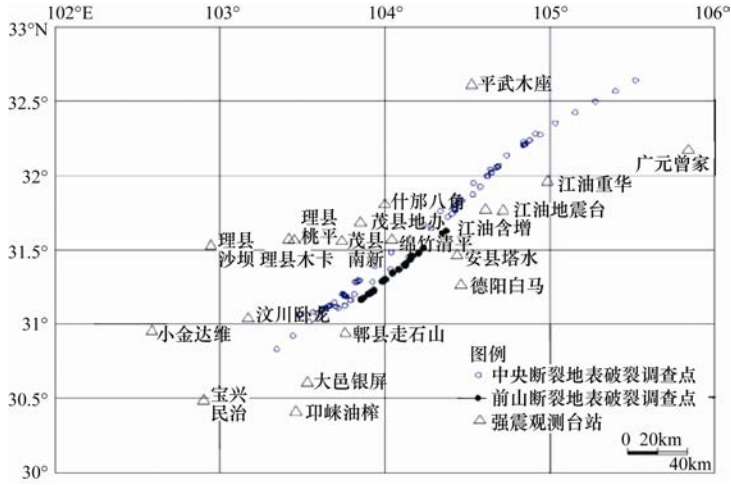


图2 断层与台站分布图

Fig. 2 Distribution of faults and stations

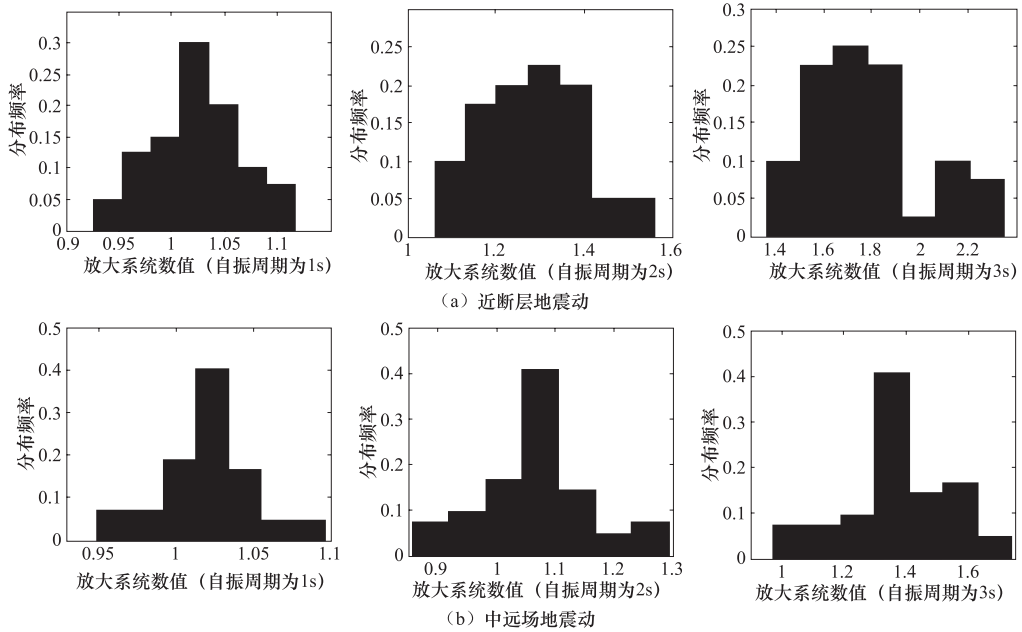


图3 不同自振周期 $P-\Delta$ 效应的放大系数

Fig. 3 Amplification factor for $P-\Delta$ effect of different natural period

2.3 放大系数的统计分析

地震动具有很强的不确定性 (Niazi 等, 1991), 为对建筑抗震设计提供具体参考, 在完成对所选取强震记录初步分析后, 应对多条强震记录的初步分析结果进行统计规律分析。

基于所得到的 20 个近断层台站获得的强震记录, 计算得到不同自振周期条件下 $P-\Delta$ 效应的放大系数。利用概率图工具分析放大系数服从的概率分布, 如图 4 所示 (自振周期为 1s)。

根据分析, 放大系数服从正态分布。进一步计算不同自振周期单自由度体系放大系数的统计参数, 计算结果如表 3 所示。

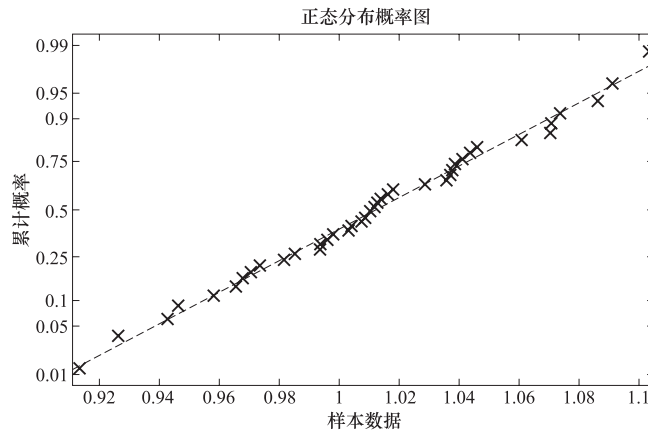


图 4 放大系数正态分布概率图

Fig.4 Normal probability plot of amplification factor

表 3 放大系数的统计参数

Table 3 Statistical parameter of amplification factor

自振周期/s	1	2	3
均值	1.012	1.229	1.701
方差	0.002	0.014	0.063

从表 3 可以看出, 对于同一自振周期的单自由度体系, 其放大系数的离散性较小, 放大系数主要分布于均值附近, 且主要受单自由度体系自振周期的影响, 自振周期越大, 其 $P-\Delta$ 效应放大系数越高。为此, 可以认为, 在近断层区域内, 竖向地震动所产生 $P-\Delta$ 效应的放大作用具有普遍性, 其放大作用主要受自振周期大小的影响。

3 $P-\Delta$ 效应放大系数谱的建立

3.1 放大系数谱的建立思路

在近断层范围内竖向地震引起的 $P-\Delta$ 效应会产生普遍放大作用, 其放大系数主要受自振周期的影响, 因此可以参考地震动反应谱的基本思想建立 $P-\Delta$ 效应放大系数谱, 以获得竖向地震动 $P-\Delta$ 效应的放大作用与体系自振周期的关系。以上分析可知, 当体系自振周期一定时 $P-\Delta$ 效应放大系数的离散性较小, 所以可以用自振周期为一定时不同台站强震记录放大系数的均值作为 $P-\Delta$ 效应放大系数的代表值, 从而建立放大系数谱, 建立步骤如下:

(1) 设定不同的自振周期, 分别为 $T_k=0.02 \times k$ ($k=1, 2, \dots, 200$)。

(2) 对于所设定的不同的自振周期, 分别计算每个台站地震记录的 $P-\Delta$ 效应放大系数, 即得到 $\beta_i(T_k)$, 其表示第 i 个台站的强震记录在自振周期为 T_k 时的 $P-\Delta$ 效应放大系数。

(3) 当体系自振周期为 T_k 时, 求得不同台站强震记录放大系数的均值, 即 $u[\beta(T_k)]$, 进而求得不同自振周期条件下, 其放大系数的均值 $u[\beta(T_k)]$ 。

(4) 绘制放大系数曲线, 横坐标为 T_k , 纵坐标为 $u[\beta(T_k)]$, 基于所得曲线利用最小二乘法拟合, 得到规范化后的放大系数谱。

3.2 放大系数谱的建立

建立近断层竖向地震 $P-\Delta$ 效应的放大系数谱, 需先求得 $T_k-u[\beta(T_k)]$ 曲线, 然后进行最小二乘拟合。为了方便工程应用, 拟合函数选用线性函数进行。从 $T_k-u[\beta(T_k)]$ 曲线中可以看出, 在自振周期 $T_k < 2s$ 时放大系数几乎都小于 1.1, 曲线趋近于一条斜率为零的直线, 在自振周期 $T_k > 2s$ 时放大系数 $\beta > 1.1$, $P-\Delta$ 效应具有明显的放大作用, β 随 T_k 的变化趋近于单调上升的线性函数曲线, 所以对放大系数规范谱曲线以 $T_k=2s$ 为分界点进行分段拟合。利用最小二乘法进行分段拟合并经过简化处理得到规范化后的放大系数谱, 如图 5 所示。

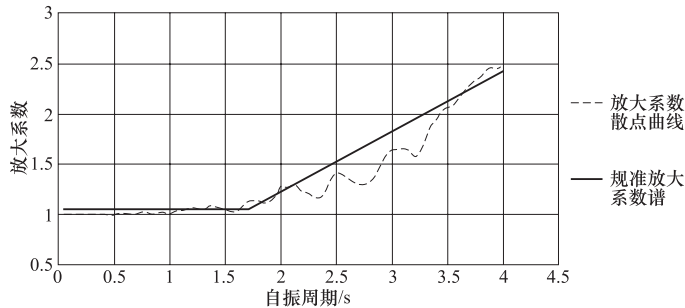


图 5 竖向地震动 $P-\Delta$ 效应的放大系数谱

Fig. 5 Amplification spectra of $P-\Delta$ effect for vertical ground motion

进一步拟合放大系数谱的数学关系, 其关系表达式为式 (5):

$$\beta = \begin{cases} 1.05, & 0s < T_k \leq 1.7s \\ 0.6 \times T_k + 0.03, & 1.7s < T_k \leq 4s \end{cases} \quad (5)$$

此公式可为近断层区域内抗震设计问题中考虑竖向地震作用 $P-\Delta$ 效应的参考公式, 在结构抗震设计中可以与反应谱结合使用。

4 结语

本文以汶川大地震近断层的强震数据为基础, 对近断层竖向地震动所产生的 $P-\Delta$ 效应进行分析, 结果如下:

(1) 汶川地震中相比于中远场区域, 近断层区域内竖向地震作用所产生的 $P-\Delta$ 效应具有明显的放大作用, 并且具有普遍性。 $P-\Delta$ 效应放大系数主要受体系自振周期的影响, 当自振周期一定时, 不同地震动的放大系数服从正态分布并且离散性较小, 主要分布于均值附近。

(2) 建立了放大系数随体系自振周期变化的放大系数谱, 从而为结构抗震设计提供了参考依据; 认为在可能发生强烈地震的活断层附近区域内, 结构抗震设计过程中应该考虑竖向地震动所产生 $P-\Delta$ 效应引起的放大作用, 放大系数按照规范后的放大系数谱曲线确定, 在结构抗震设计中, 放大系数谱可以与反应谱结合使用。

(3) 由于中国大陆地区强震记录数量的限制, 本文仅仅选择了汶川地震的近断层强震记录; 随着近断层强震数据的增多, 应根据发震断层与地质构造特点, 建立适用于不同区域、不同地质场地条件的放大系数谱, 从而使其在工程应用中日益完善。

参考文献

- 贺秋梅, 李小军, 张江伟等, 2014. 某高温气冷堆核电站结构地震反应分析. 震灾防御技术, **9** (3): 454—461.
- 胡聿贤, 2006. 地震工程学. 北京: 地震出版社.
- 李宏男, 2013. 地震工程学. 北京: 机械工业出版社.
- 梁炯丰, 王俭宝, 顾连胜等, 2013. 直接基于位移的钢框架结构抗震设计. 四川建筑科学研究, **39** (3): 148—151.
- 刘启方, 袁一凡, 金星等, 2006. 近断层地震动的基本特征. 地震工程与工程振动, **26** (1): 1—10.
- 冉志杰, 杨歧焱, 周月玲, 孙丽娜等, 2012. 唐山丰南 $M4.1$ 级地震强震记录分析. 震灾防御技术, **7** (4): 367—376.
- 吴泽玉, 张清晓, 2012. 考虑竖向地震作用的高桥墩 P - Δ 效应分析. 工程抗震与加固改造, **34** (3): 40—43.
- 谢俊举, 温增平, 高孟谭等, 2010. 2008 年汶川地震近断层竖向与水平向地震动特征. 地球物理学报, **53** (8): 1796—1805.
- 于海英, 王栋, 杨永强, 卢大伟等, 2008. 汶川 8.0 级地震强震动特征初步分析. 震灾防御技术, **3** (4): 321—336.
- 袁一凡, 田启文, 2012. 工程地震学. 北京: 地震出版社.
- 赵国辉, 刘健新, 2008. 汶川地震桥梁震害分析及抗震设计启示. 震灾防御技术, **3** (4): 363—369.
- 中华人民共和国国家标准, 2010. 建筑抗震设计规范 (GB 50011—2010). 北京: 中国建筑工业出版社.
- 周锡元, 徐平, 王国权, 闫维明, 2006. 1999 年台湾集集地震近断层竖向与水平反应谱比值的研究. 地震地质, **28** (3): 325—335.
- Ambraseys N. N., Douglas J., 2003. Near-field horizontal and vertical earthquake ground motions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **23**(1): 1—18.
- Niazi M., Bozorgnia Y., 1991. Behavior of near-source peak horizontal and vertical ground motions over SMART - 1 array, Taiwan. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **81**(3): 715—732.

The Study about P - Δ Effect of Vertical Ground Motion in Near-fault

Fan Youming¹⁾ and Xia Qun²⁾

1) Changzhou Vocational Institute of Engineering, Changzhou 213164, China

2) Changzhou University, Changzhou 213016, China

Abstract Vertical effect is the main characteristic of ground motion in near fault, and the P - Δ effect caused by vertical ground motions is the main reason for the failure of engineering structures. In this paper, taking the single degree of freedom system as the object, strong motion datum of Wenchuan earthquake in near fault region were selected to study the amplification characteristics of P - Δ effect for vertical seismic action. Our results show that P - Δ effect caused by vertical ground motions had the obvious amplification which were universal in near-fault region of the Wenchuan earthquake. In comparing with the region of medium-field and far-field, amplification of ground motions obtained from different stations did not discrete very much and distributed near mean values. The analytic results accord with the general law of ground motion. Based on this, the amplification spectra which can be applied in seismic response spectra were built, and the quantitative criterion for structural seismic design in near-fault region was put forward.

Key words: Near-fault; P - Δ effect; Amplification; Natural period; Amplification spectra