

近断层地震动作用下高耸补压塔地震反应分析

崔丙会¹, 王亮², 翟亚飞³, 毕仲辉³

(1. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098; 2. 安徽理工大学 土木建筑学院, 安徽 淮南 232001; 3. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 由于近场脉冲地震中含有幅值较大的速度脉冲,其表现出的基本特征通常不同于远场地震。为研究近断层地震和地基刚度对补压塔结构动力响应的影响,以某拟建补压塔为研究对象,考虑流固耦合和地基辐射阻尼,建立水体-结构-基础三维有限元模型,采用时程分析方法研究不同地基刚度、不同地震动类型对结构动力的响应规律。利用1999年集集地震的3组不同类型的地震动记录,即远场、近场无脉冲和近场脉冲型,采用精度较高的波动输入方法和黏弹性人工边界对构筑物进行动力分析。研究表明:不同的地震动特性和土-结构相互作用效应对补压塔的结构响应有显著影响,在地基刚度不大时,近场脉冲型地震位移响应是远场地震的2.5倍以上,鞭梢效应更为明显。近场脉冲型地震对结构响应影响程度与结构第一周期有显著的相关性。研究结果可为近场区域高耸水工结构设计提供理论依据。

关键词: 近断层地震动; 补压塔结构; 结构-地基动力相互作用; 地震反应; 数值分析

中图分类号:TV33

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2021)05-0181-07

Seismic response of a high pressure regulating tower to near-fault earthquakes

CUI Binghui¹, WANG Liang², ZHAI Yafei³, BI Zhonghui³

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Impulsive near-field earthquakes often exhibit different characteristics from far-field earthquakes due to the larger velocity pulses they produce. In order to study the effects of near-fault ground motions and foundation stiffness on the structural dynamic response of the pressure regulating towers, taking a proposed pressure regulating tower project as the research object, we established a three-dimensional finite element model of water-structure-foundation using ABAQUS with the consideration of fluid-solid coupling and foundation radiation damping. Three different types of seismic records from the 1999 Chi-Chi earthquake, namely, far-field, non-impulsive near-field and impulsive near-field earthquakes, were introduced to the model for the dynamic analysis of the structure using a fluctuating input method with high accuracy and a viscoelastic artificial boundary. The study shows that the input ground motion characteristics and soil-structure interaction have significant effects on the structural response of the pressure regulating tower, and the displacement response of the impulsive near-field earthquakes is more than 2.5 times larger than that of the far-field earthquakes when the foundation stiffness is small, and the whiplash effect is more obvious. The effects of impulsive near-field earthquakes on the structure is highly correlated with the first period of the structure. The results of the study can provide a theoretical basis for the design of high hydraulic structures in the near-field region.

Key words: near-fault ground motion; pressure regulating tower structure; structure-foundation dynamic interaction; seismic response; numerical analysis

收稿日期:2021-04-07; 修回日期:2021-07-27

基金项目:安徽省自然科学基金项目(2008085QE244); 中国博士后基金项目(2020M681988)

作者简介:崔丙会(1990-),男,山东菏泽人,博士研究生,研究方向为水工结构抗震。

通讯作者:王亮(1991-),男,安徽淮北人,博士,讲师,研究方向为土木工程材料及模拟仿真。

1 研究背景

Housner 和 Hudson 通过对 1957 年美国 Port Hueneme 地震现场记录综合分析,首次发现近断层地震动中蕴藏着较大的速度脉冲,即使在里氏震级较小($M_w 4.7$)、峰值地面加速度较低(0.78 m/s^2)的情况下仍具有较强的破坏力。随后大量的现场地质数据及相关文献研究表明^[1-4],由于近断层地震动常常包含峰值较大的单个或多个速度脉冲,其基本特性与远场地震动呈现出明显的差异。在初期极短时间内,高振幅速度脉冲中大量的能量被结构吸收,从而引起结构的严重破坏。我国地域广阔,随着活断层的探查发现,华北、西南、东南沿海大部分地区均在近断层的潜在威胁下^[5]。因此,近场脉冲地震的特性和其对工程结构的影响已经逐渐成为地震学家和工程师重点关注的一个课题^[6-8]。

目前,在近场脉冲地震及其对工程结构安全的影响方面,国内外学者已经做了大量的相关课题研究。Tian 等^[9]采用增量动力(incremental dynamic analyses, IDAs)方法,选取 20 条近断层地震动,研究了输电塔的倒塌机理。李扬等^[10]分别采用拟合近场脉冲地震和现场实际近断层地震动对铅芯橡胶支座(lead rubber bearing, LRB)隔震储罐进行动力学计算,研究了近场脉冲地震对隔震储罐动力响应的影响。以上研究有一个共同的特点,即忽略了地基刚度对结构动力响应的影响。Akköse 等^[11]在近断层地震作用下,考虑库水压力,对混凝土重力坝进行非线性动力响应分析,系统探讨了近场脉冲型地震对大坝动力响应的影响规律。Zou 等^[12]利用自主开发的近断层地震动力模拟程序对坝体整体稳定性进行分析,结果表明近场脉冲型地震对堆石坝的滑移有显著的不利影响。脉冲型近断层地震动往往被认为是结构所承受的最严重和最具破坏性的地震荷载^[13-14]。

然而,目前的水工抗震设计也是基于远场地震动,并未考虑近断层脉冲地震的影响^[15-16],对水工建筑物近断层地震动研究主要聚焦在坝体抗震性能和坝体安全方面,对补压塔、进水塔等高耸水工建筑物的研究鲜有报道。近场脉冲地震中存在周期较长的高幅值的速度和位移脉冲,可能会对高耸结构抗震性能和结构安全带来不利影响,特别是在近断层地震的作用下高耸结构的地震反应特征、地震响应、影响因素还不明确,需要深入研究和分析。因此,深入了解近断层脉冲型地震动作用下补压塔的动力响

应具有重要的现实意义。

补压塔一般为空间筒状钢筋混凝土高耸结构,塔体长期处于高水位储水状态,其地震安全性对整个输水系统的正常运行至关重要。地震情况下,补压塔筒内水体产生动水压力对结构动力响应的影响不可忽视^[17]。对于位于断层附近,近场脉冲地震对结构动力响应有明显的不利影响^[18-19]。除了近断层地震的影响,考虑地基刚度对结构的影响也十分有必要,由于地基柔性的存在,改变了结构系统的振动频率和模态。另外,由于地基空间的无限性使系统中的部分能量以波的形式向无限地基发生散逸,有限范围的地基模拟会放大结构的动力响应^[20]。因此,在地震动分析中,大多数的工程结构都存在土(地基)-结构动力相互作用(soil-structure interaction, SSI),尤其是较高的水工建筑物。

为了更全面地研究 SSI 和近断层地震动对补压塔动力响应的影响,本文选取 15 条实测地震动记录,按照远场、近场无脉冲和近场脉冲型 3 组不同类型的地震动分别输入不同地基刚度模型进行数值计算。在多组数值分析的基础上,提出不同地震动下 SSI 对结构的放大因子,用以量化 SSI 对补压塔动力响应的影响,为高耸水工建筑物工程的规划和初步设计提供理论依据。

2 近断层脉冲地震动选取

通常,大部分学者会将断层距小于 20 km 的场地视为断层区域。1999 年 9 月 21 日中国台湾的集集地区发生 7.6 级地震,其中记录到有速度脉冲的地震信息。地震动的频谱特性通常由地面峰值速度(peak ground velocity, PGV)与地面峰值加速度(peak ground acceleration, PGA)的比值来反映。对近场脉冲型地震动选取原则为:断层距 20 km 以内,有明显的速度脉冲, PGV/PGA 大于 0.2 s,且脉冲持时大于 1 s。以此为标准,在本文的研究中,从美国太平洋地震工程研究中心(Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER)地震动数据库中选取 15 条集集 7.6 级地震实测地震动记录,按照地震动类型的不同分 3 组进行地震动输入,所选取的近场脉冲型地震动记录未区分方向性效应和断层效应。15 条集集地震实测地震波的动特性参数见表 1。

为避免受加速度幅值的影响,本文对所选的 15 条实测地震波以加速度峰值 $0.2g$ 进行调幅。为简化计算,分析中只考虑地震动的水平分量。图 1 给出了调幅以后远场、近场无脉冲和近场脉冲型地震

3 组地震动在 7% 阻尼比下的加速度及速度反应谱。由图 1 可看出,远场、近场无脉冲和近场脉冲型 3 组地震动记录的加速度谱分别在周期 0.24、0.33 和 0.73 s 出现最大值 0.473g、0.483g 和 0.411g。远场、近场无脉冲和近场脉冲型 3 组地震动记录的速度谱分别在周期 2.17、5.71 和 6.00 s 出现最大值 46.72、94.94 和 109.72 cm/s。对比图 1(a) 与图 1(b) 可知,近场无脉冲地震动平均加速度最大,远场地震动次之,近场脉冲型地震动最小,而近场脉冲型地震动记录对应的特征周期和长周期段反应谱较大。

表 1 研究选取的中国台湾集集地震 15 条实测地震波动的特性参数

地震动类型 分组	地震波 编号	震级	台站	断层距/ km	PGA / 9.8(m·s ⁻²)	PGV / (cm·s ⁻¹)	PGD / cm	PGV/PGA / s
远场地震	1	7.6	CHY022	64.1	0.04	5.3	6.5	0.14
	2	7.6	CHY023	81.3	0.06	8.4	11.5	0.14
	3	7.6	NST	38.4	0.40	30.8	16.9	0.08
	4	7.6	TCU033	40.9	0.19	24.0	19.0	0.13
	5	7.6	TCU047	35.0	0.41	34.4	25.3	0.09
近场无脉冲地震	6	7.6	CHY035	12.6	0.25	43.6	11.3	0.18
	7	7.6	TCU078	8.2	0.44	85.5	223.8	0.18
	8	7.6	TCU079	10.9	0.59	64.5	173.2	0.11
	9	7.6	TCU089	8.3	0.35	45.4	194.6	0.13
	10	6.2	TCU070	14.7	0.43	59.8	43.3	0.14
近场脉冲型地震	11	7.6	TCU051	6.9	0.16	51.5	124.5	0.27
	12	7.6	TCU049	3.8	0.24	62.3	49.5	0.27
	13	7.6	TCU054	4.6	0.15	45.7	121.5	0.32
	14	7.6	TCU068	0.3	0.37	264.1	421.7	0.73
	15	7.6	TCU102	1.5	0.17	66.4	50.7	0.40

注:地震数据来源于 <http://ngawest2.berkley.edu>, NGA - WEST2 地震数据库中的地震波已经进行了基线校正和滤波。

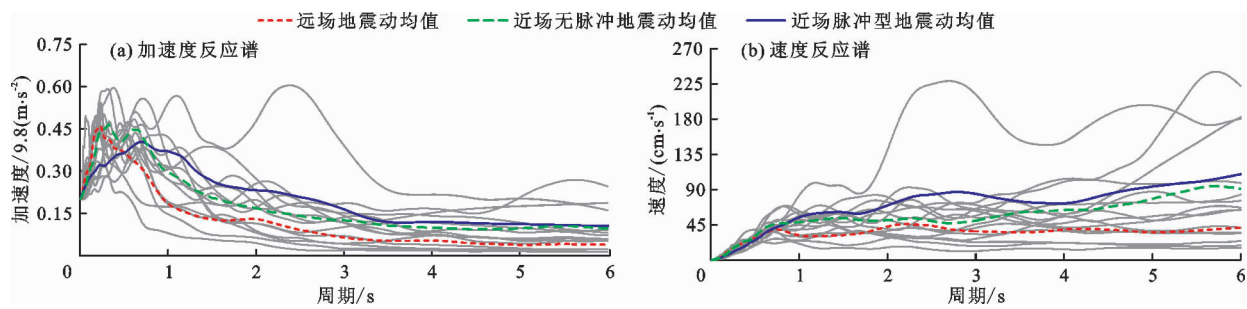


图 1 3 组地震动阻尼比为 7% 时的加速度和速度反应谱

3 近断层地震动下补压塔结构动力响应分析

3.1 工程概况及有限元模型

以浙江省某拟建补压塔结构为研究对象,建立 ABAQUS 三维有限元模型,补压塔是由储水钢罐、内外钢筋混凝土筒、楼板等组成的高耸塔式结构,塔体结构高 44 m,塔底高程为 -1.5 m,正常蓄水位高度为 35 m。补压塔结构有限元模型如图 2 所示,模型

基础范围水平、深度方向分别取 2.5 倍及 1.5 倍的塔体高度。由于补压塔结构中有钢筋布置且分布极为复杂,难以准确模拟出钢筋与混凝土之间的力学作用。因此,本文采取整体式建模,将钢筋与混凝土等效为一种材料,计算中采用的等效混凝土参数:动态弹性模量为 41.25 GPa,密度为 2 500 kg/m³,泊松比为 0.15。为了精确模拟水体与结构之间的相互作用,水体采用 ABAQUS 声学单元模拟。为了研究地基刚度对结构的影响,计算模型中选取了硬岩

(A)、软岩(B)、坚土(C)和软土(D)4 种不同类型的土体,土体性质根据 ATC-40 选取,各参数如表 2 所示。图 3 给出了不同类型地基下结构的系统频率。由图 3 可以看出,系统频率第 1 和第 2 阶模态的频率基本是相同的,主要是因为结构的质量和刚度在两轴上都是对称的,并且结构的系统频率随着地基弹性模量的减小而增大。本文采取 Rayleigh 阻尼模拟补压塔结构的阻尼,定义为:

$$C = \alpha M + \beta K \quad (1)$$

式中: C 为阻尼矩阵; M 、 K 分别为质量矩阵、刚度矩阵; α 、 β 为阻尼常数。

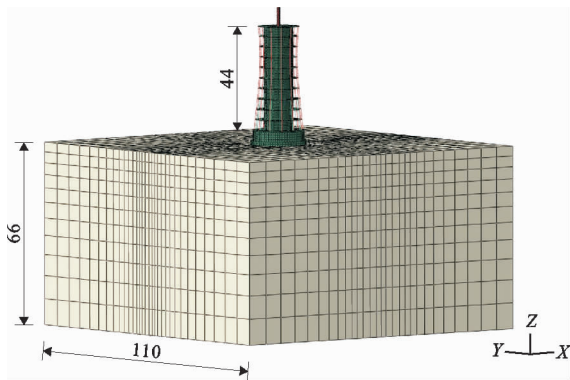


图 2 实例工程补压塔结构有限元模型(单位:m)

3.2 结构地震响应分析

在对工程抗震分析中,地震动输入的正确性和地基辐射阻尼模拟的合理性均对结构的动力响应有很大的影响。黏弹性人工边界由于其概念清晰,适于编程,广泛应用于地基-结构相互作用的地震模

拟中^[21-22]。本文基于 ABAQUS 软件平台,通过 Fortran 程序语言编写 inp 文件的方式对计算区域批量施加人工边界和等效结点力,从而实现模型的黏弹性人工边界。

表 2 模型选取的 4 种不同类型土体的材料参数(ATC-40)

土体类型	弹性模量 E/MPa	泊松比	剪切模量 G/MPa	剪切波速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
硬岩(A)	13000	0.25	5210	1524
软岩(B)	2067	0.30	795	564
坚土(C)	188	0.43	65	183
软土(D)	80	0.45	23	98

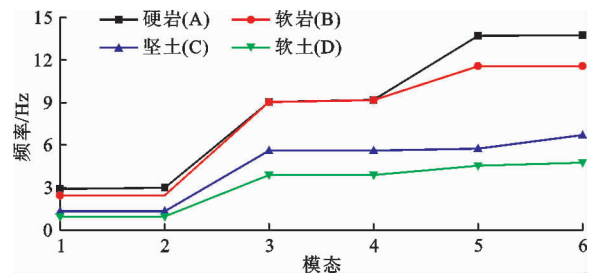


图 3 4 种不同类型地基下结构各模态的系统频率

3.2.1 位移响应 通过对 3 组地震动输入和 4 种类型地基的数值计算,得到补压塔结构顶部相对于底部的最大水平向地震响应。其中远场和近场脉冲型地震动在软岩(B)和坚土(C)两种类型地基条件下典型的塔顶水平位移时程曲线见图 4,图 5 为 3 组地震动在各类型地基下的塔顶最大水平位移平均值,根据图 5 可评估 3 组输入地震动和不同地基刚度对补压塔结构动力响应的影响。

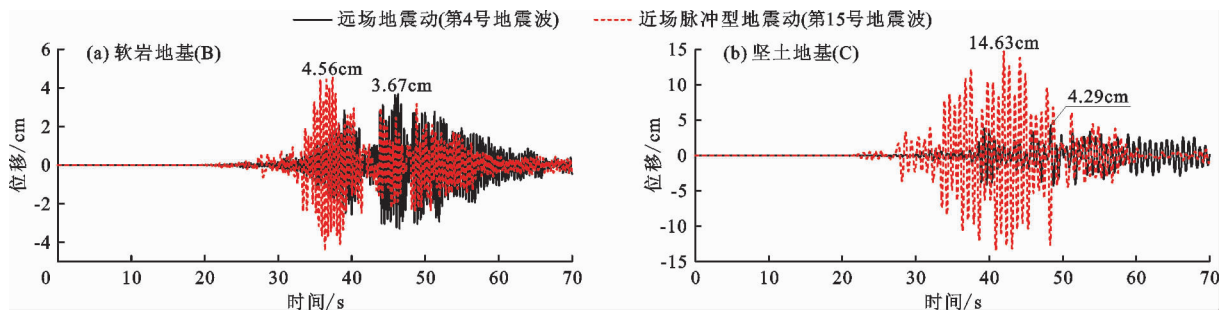


图 4 不同地震动和地基类型下典型的塔顶水平位移时程曲线

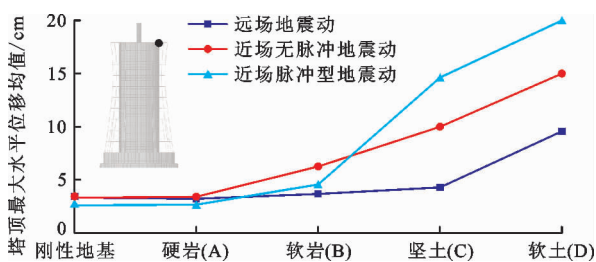


图 5 3 组地震动作用在各类型地基下的塔顶最大水平位移平均值

由图 5 可知,对于刚性地基和硬岩(A)、软岩(B)、坚土(C)、软土(D)地基,由脉冲型近场地震动产生的位移分别为远场地震动的 0.78、0.78、1.24、3.40 和 2.09 倍。在柔性地基下,近场脉冲型地震动引起的塔顶最大水平位移远大于远场地震动。主要原因是随着地基变软,结构的系统频率降低,周期变长,近场脉冲型地震动的加速度谱值和速

度谱值的振幅大于远场地震。

刚性地基和硬岩(A)地基的塔顶位移响应结果还表明,无论地震动输入的类型如何,该两种地基条件下结构的响应几乎相同。其原因是由于坚硬岩石刚度大,这种类型地基与周围土体之间的相对位移并不显著,因此,硬岩地基的结构响应更接近于刚性地基。图5中的结果还表明,当地基刚度降低时,SSI效应会增加结构的位移响应,近场脉冲型地震动作用在硬岩(A)、软岩(B)、坚土(C)和软土(D)

地基条件下产生的塔顶最大水平位移平均值分别是刚性地基的1.02、1.76、5.63和7.70倍,说明地基的刚度越低,结构的水平位移就越大,在近场脉冲型地震动作用下更加明显,近场无脉冲地震动次之,远场地震动最小。

3.2.2 加速度响应 为了观察结构在不同地基刚度、不同类型地震动作用下的加速度响应规律,沿补压塔高度选取10个观测点,计算得出补压塔响应的最大加速度平均值见图6。

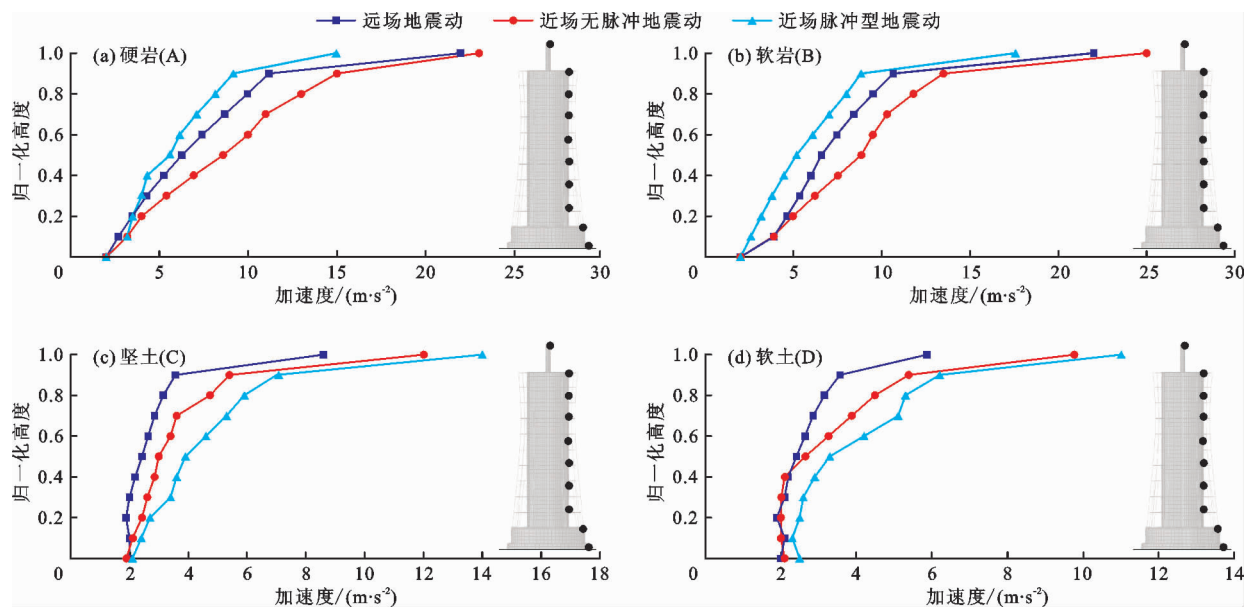


图6 3组地震动作用在各类型地基下补压塔沿高度最大加速度平均值

由图6可看出,考虑SSI效应,地基的刚度影响着结构的加速度响应,随着地基变软,结构的加速度响应也变小。在地基为硬岩(A)和软岩(B)条件下,近场脉冲型地震动作用下的加速度响应最小,随着地基刚度的变小,在地基为坚土(C)和软土(D)条件下,近场脉冲型地震动作用下的加速度响应最大,近场无脉冲地震动次之,远场地震动最小。表明在地基较软时,近场脉冲型地震动对补压塔结构的地震反应有显著影响,近场脉冲型地震动作用下的结构加速度响应明显大于远场地震动相应值。然而,在地基刚度较大时,近场脉冲型地震动作用下的结构加速度响应要小于远场地震动相应值,说明并不是存在近场地震动时,结构的加速度响应就越大,这与前面的位移响应规律类似。有研究表明,结构的加速度反应与地震动的PGA有较强的相关性。在加速度反应谱中短周期段内(约小于0.8s),与在硬岩(A)和软岩(B)基础下系统的第一周期相近,近场脉冲型地震动的PGA最小;在长周期段内

(约大于1.0s),近场脉冲型地震动的PGA大于其他两个类型的PGA,近场脉冲型地震动对结构响应影响程度与系统第一周期有很大的相关性。

在全部的3组地震动作用下,高于混凝土部分的储水钢筒加速度峰值均大幅度提高,由于其刚度相对于混凝土发生了骤变,储水钢筒呈现出十分明显的鞭梢效应。因此,定义补压塔储水钢筒加速度放大系数=补压塔储水钢筒顶加速度/补压塔顶部加速度,图6可以直观地看出,地基较软时,近场脉冲型地震动的鞭梢效应是远场地震动结果的2倍,该结果与文献[23]的研究成果相似。因而在考虑近场地震动的高耸结构设计中,还要考虑鞭梢效应的放大系数。

3.2.3 SSI放大系数 土-结构相互作用的模型一般单元数较多,计算量大,计算成本较高。因此,对于位于特定土体类型地基和地震区的补压塔结构,确定补压塔SSI效应是非常有必要的。为了更直观地显示这两种因素的影响程度,本文引入了

SSI 放大因子,其计算式为:

$$\text{SAF}(i,j) = \begin{bmatrix} \text{saf}_{1,1} & \text{saf}_{1,2} & \text{saf}_{1,3} \\ \text{saf}_{2,1} & \text{saf}_{2,2} & \text{saf}_{2,3} \\ \text{saf}_{3,1} & \text{saf}_{3,2} & \text{saf}_{3,3} \end{bmatrix} \quad (2)$$

SAF(i,j) 中每个元素被定义如下:

$$\text{saf}_{i,j} = \frac{\sum_{n=1}^5 \text{Max} |\lambda_{i,j}(n,t)|}{5(\sum_{n=1}^5 \text{Max} |\psi_{i,0}(n,t)|)}$$

$$i = \begin{cases} 1 & (\text{远场地震动}) \\ 2 & (\text{近场无脉冲}), j = \begin{cases} 1 & (\text{基础 A}) \\ 2 & (\text{基础 B}) \\ 3 & (\text{基础 C}) \end{cases} \\ 3 & (\text{近场有脉冲}) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\psi_{i,0}(n,t)$ 为第 n 条地震波在刚性地基下的时域内响应; $\lambda_{i,j}(n,t)$ 为地基基础材料为 j 、输入第 n 条地震波时结构在时域下的响应。本文 SSI 放大系数只考虑硬岩(A)、软岩(B)和坚土(C)基础,在实际工程中,对于软土(D)地基一般使用桩基础或进行地基处理,地震响应会减小,SSI 放大系数不可靠。

基于本文研究结果,计算出的塔顶最大水平位移和底部剪力两种动力响应的 SSI 放大系数为:

$$|\text{SAF}(i,j)|_{\text{塔顶位移}} = \begin{bmatrix} 1.00 & 1.10 & 1.31 \\ 1.10 & 1.31 & 2.32 \\ 1.21 & 1.70 & 3.90 \end{bmatrix}$$

$$|\text{SAF}(i,j)|_{\text{底部剪力}} = \begin{bmatrix} 1.00 & 0.90 & 0.89 \\ 1.11 & 0.91 & 0.90 \\ 1.13 & 0.95 & 0.92 \end{bmatrix}$$

对于指定的输入地震类型(i)和地基类型(j), $\text{saf}_{i,j}$ 为补压塔在 SSI 影响下的动力响应与刚性地基下的比率。由 SSI 放大系数计算结果更能直观地发现:随着地基变软,地震作用下的位移响应增大,底部剪力减小。表明近场地震动随着地基变软对结构影响程度增大,因此对于软土地基或长周期结构,应考虑近场地震动对结构响应的影响。

4 结 论

本文建立补压塔结构-地基-水体三维有限元模型,进行地震反应的数值分析,探究土-结构相互作用及近场地震动对结构的影响。利用 1999 年集集地震中的远场、近场无脉冲和近场脉冲型 3 组不同类型的地震动记录,对 4 种不同类型地基下的结构进行地震动输入,根据结构顶部位移和加速度及基础剪力的变化,获得了补压塔结构的地震响应,得

出以下结论:

(1)不同的地震动特性和地基刚度对补压塔结构的动力响应有较大影响。随着地基刚度变小,近场脉冲型地震动作用引起的地震响应大于远场地震动,近场脉冲型地震动对结构动力响应影响程度与系统第一周期有很大的相关性。

(2)考虑近场脉冲型地震,地基刚度会改变系统的频率,当地面加速度峰值(PGA)相同时,地震作用会使系统自振周期较长的结构产生较大的动力响应。

(3)在近场地震动作用下,补压塔加速度沿高度的增加而增大,地基较软时,储水钢筒的鞭梢效应更明显,加速度数值可增大至 2 倍以上,该部分结构的抗震设计更应予以重视。

SSI 放大系数只能作为近场地震动作用下补压塔实际响应的初步估计和预测,结构设计中应进行完整的结构分析。本文中的 SSI 放大系数基于特定输入地震动记录和特定的结构,进一步研究对于不同几何结构、不同地震动的通用 SSI 放大系数是有必要的。

参考文献:

- [1] 贾俊峰,杜修力,韩强.近断层地震动特征及其对工程结构影响的研究进展[J].建筑结构学报,2015,36(1):1-12.
- [2] 郭明珠,陈志伟,缪逸飞,等.近断层地震动作用下工程结构地震响应的研究进展[J].防灾科技学院学报,2017,19(2):17-25.
- [3] 江辉,李新乐,窦慧娟.近断层长周期脉冲型地震动对竖向反应谱的影响研究[J].振动与冲击,2012,31(16):56-61.
- [4] 王博,代慧娟,吴涛,等.近场与远场长周期地震动对高层结构作用机理比较分析[J].振动与冲击,2018,37(12):123-130.
- [5] 铁瑞,郭明珠,何喆,等.活断层设防分析[J].世界地震工程,2009,25(3):181-186.
- [6] 董尧荣,成羽,白国良.近断层地震动反应谱特性与强度指标分析[J].工业建筑,2015,45(7):102-107+83.
- [7] 李旭,VENTURA C E,何敏娟.近断层地震动对高层建筑结构抗震性能的影响[J].同济大学学报(自然科学版),2012,40(1):14-21.
- [8] 耿方方,丁幼亮,谢辉,等.近断层地震动作用下长周期结构的地震动强度指标[J].东南大学学报:自然科学版,2013,43(1):203-208.
- [9] TIAN Li, PAN Haiyang, MA Ruisheng, et al. Collapse simulations of a long span transmission tower-line system

- subjected to near-fault ground motions[J]. Earthquake and Structures, 2017, 13(2): 211–220.
- [10] 李扬,李自力. 近断层地震动作用下 LRB 隔震储罐地震反应特征研究[J]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(3): 215–224.
- [11] AKKÖSE M, ŞİMŞEK E. Non-linear seismic response of concrete gravity dams to near-fault ground motions including dam–water–sediment–foundation interaction[J]. Applied Mathematical Modelling, 2010, 34(11): 3685–3700.
- [12] ZOU Degao, HAN Huichao, LING H I, et al. An approach for the real-time slip deformation coupled with strain softening of a high rockfill dam subjected to pulse-like ground motions[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 117: 30–46.
- [13] 谢俊举,李小军,温增平. 日本熊本 M_w 7.0 地震的长周期地震动[J]. 地球物理学报, 2017, 60(11): 4431–4446.
- [14] 黄景琦,杜修力,赵密,等. 近场数值波动分析中地震波输入的一种简化方法[J]. 振动与冲击, 2015, 34(3): 77–82.
- [15] 史俊飞,张燎军,马天晓,等. 考虑强震能量持时的混凝土重力坝损伤累积效应研究[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(6): 174–179.
- [16] 张剑峰,宋志强,王飞,等. 上–下部结构相互作用对水电站厂房地震响应的影响研究[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(6): 186–193.
- [17] 李守义,吕汶蔚. 河床式水电站厂房结构流固耦合振动特性研究[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(3): 205–209.
- [18] 耿萍,曾冠雄,郭翔宇,等. 近场脉冲地震作用下穿越断层带隧道地震响应[J]. 中国公路学报, 2020, 33(5): 122–131.
- [19] 李宁,李骞,任堂,等. 汶川地震紫坪铺进水塔的动态响应研究[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(5): 1127–1134.
- [20] 章小龙,李小军,陈国兴,等. 黏弹性人工边界等效荷载计算的改进方法[J]. 力学学报, 2016, 48(5): 1126–1135.
- [21] 陈宝魁,王东升,成虎. 粘弹性人工边界在地震工程中应用研究综述[J]. 地震研究, 2016, 39(1): 137–142 + 182.
- [22] 章小龙,李小军,陈国兴,等. 黏弹性人工边界等效荷载计算的改进方法[J]. 力学学报, 2016, 48(5): 1126–1135.
- [23] 陈曦,刘云贺,周邵鹏. 近断层地震动作用下进水塔的地震反应分析[J]. 西安理工大学学报, 2020, 36(1): 122–128.

(上接第 180 页)

- [13] 张林华. 基于静载试验的预应力混凝土连续梁桥承载能力研究[J]. 公路工程, 2019, 44(2): 205–210.
- [14] 张茵涛. 在役预应力混凝土梁桥静载试验[J]. 铁道建筑, 2018, 58(3): 28–30 + 38.
- [15] 吴建奇,郑晓,张婷婷. 桥梁检测中的静载试验研究[J]. 铁道建筑, 2011(2): 42–44.
- [16] 王凌波,蒋培文,马印平. 桥梁静载试验校验系数及优化评定方法研究[J]. 公路交通科技, 2015, 32(6): 62–68.
- [17] 张玉民. 高墩大跨连续刚构叠箱渡槽充水试验与建模分析[J]. 施工技术, 2017, 46(14): 108–111.
- [18] 陈晓光. 南水北调中线工程沙河渡槽充水试验研究[J]. 人民黄河, 2015, 37(8): 126–128.
- [19] 孙翔,李扬,郝继锋,等. 湍河渡槽充水试验监测与分析[J]. 水电能源科学, 2015, 33(10): 100–103 + 21.
- [20] 杜亚楠,覃振洲. 龙场渡槽充水试验监测分析研究[J]. 广东水利水电, 2017(5): 51–55.
- [21] 柯敏勇. 克孜河渡槽槽身结构现场检测与安全评价[R]. 南京水利科学研究院, 2019.
- [22] 薛伟辰,胡于明,王巍. 预应力混凝土梁徐变性能试验[J]. 中国公路学报, 2008, 21(4): 61–66.
- [23] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥梁承载能力检测评定规程: JTG/T J21—2011 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [24] 赵顺波,张利梅,李树瑶,等. 大型预应力混凝土渡槽结构受力性能试验研究[J]. 水力发电学报, 2003(1): 44–54.
- [25] 中华人民共和国水利部. 水工混凝土结构设计规范: SL 191—2008 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.