

# 基于市政导则的水池震害评估模型研究

戴晨曦<sup>1</sup>, 郭恩栋<sup>1</sup>, 刘智<sup>2</sup>, 闫培雷<sup>1</sup>, 甘霖<sup>1</sup>

(1. 中国地震局工程力学研究所 地震工程与工程振动重点实验室; 地震灾害防治应急管理部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080;

2. 广东省地震局, 广东 广州 510070)

**摘要:** 历年以来, 国内外学者根据供水设施中的水池基础调查数据的不同, 提出了基于不同基础调查数据的地震破坏评估模型。在 2021 年住房和城乡建设部发布《市政设施承灾体普查技术导则 FXPC/ZJ G-01》以后, 调查得到的水池的基础数据发生了变化, 传统的生命线工程系统中水池的地震破坏评估方法所需的基础调查资料与现有的有所不同, 不能满足现有评估方法的需求。针对该问题, 本文基于水池历史震害资料, 结合水池基于震害资料的统计回归模型方法, 建立了新的基于市政导则调查数据的水池的震害评估模型, 并与实际震害结果和原模型进行比较判断其可靠性, 从而实现了对于技术导则对水池的地震破坏情况的评估。

**关键词:** 生命线工程; 水池; 地震灾害破坏风险评估; 导则模型

中图分类号: P315.9

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2023)02-0293-08

## Study on evaluation models of pool earthquake damage based on municipal guidelines

DAI Chenxi<sup>1</sup>, GUO Endong<sup>1</sup>, LIU Zhi<sup>2</sup>, YAN Peilei<sup>1</sup>, GAN Lin<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration; Key Laboratory of Earthquake Disaster Mitigation, Ministry of Emergency Management, Harbin, 150080, China; 2. Guangdong Provincial Seismological Bureau, Guangzhou 510070, China)

**Abstract:** Over the years, scholars at home and abroad have proposed various earthquake damage assessment models based on the differences in the basic data of the pools in the water supply facilities, providing important ideas and methods for the construction of lifeline systems. After the Ministry of Housing and Urban-Rural Development issued the "Technical Guidelines for the Census of Hazardous Objects in Municipal Facilities FXPC/ZJ G-01" in 2021, the basic data of the pool obtained by the survey changed. The basic survey data required for the seismic damage assessment method of the pool in the traditional lifeline engineering system are different from the existing ones, which cannot meet the needs of the existing assessment methods. In view of this problem, based on the historical earthquake damage data of the pool and the statistical regression model method based on the earthquake damage data of the pool, this paper establishes a new earthquake damage assessment model of the pool based on the survey data of the municipal guidelines, and compares it with the actual earthquake damage results and the original model to judge its reliability, so as to realize the assessment of the earthquake damage of the pool based on the technical guidelines.

**Key words:** lifeline engineering; pools; evaluation of earthquake damage; guideline models

城市供水系统在整个生命线工程中占有重要的地位, 水池又是城市供水系统中不可替代的组成部分。当地震发生时, 作为水源与用户间承担

着储水、净水等关键作用的水池, 往往遭受到不同程度的破坏, 影响社会正常的生产和生活秩序。根据汶川地震科学考察报告<sup>[1]</sup>、唐山地震震害资

收稿日期: 2022-07-11

修改稿日期: 2023-02-28

基金项目: 粤港澳大湾区地震灾害主动防御关键技术研究(U1901602); 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项资助项目(2021EEEVL0303)。

第一作者: 戴晨曦(1998—), 男, 硕士生, 主要从事生命线工程抗震研究。E-mail: chenxi2501@163.com

通信作者: 郭恩栋(1966—), 男, 研究员, 从事生命线工程抗震研究。E-mail: iemged@263.net

料<sup>[6]</sup>、海城地震震害资料<sup>[7]</sup>等震害调查,Ⅶ度区下的广元朝天区某清水池和Ⅷ度区下江油市旗山镇某清水池顶盖在震后塌落并导致地板失去功能,破坏等级被评定为毁坏,Ⅵ度区下绵阳市三台县某水厂内的滤池底部产生裂缝,破坏等级被评定为严重破坏。因此,分析水池的地震破坏特征并建立地震破坏评估模型,可以对不同地区水池抗震的风险与薄弱环节进行预测分析,从而采取有针对性的措施以降低供水设施的地震灾害风险。

现有研究对水池在不同基础数据条件下提出了供不同条件下所需要的不同的地震破坏评估模型。水池分为清水池和水处理池两大类,针对水池的震害预测与评估提出的模型分为经验统计回归模型<sup>[2]</sup>和震害综合评估模型两种。将水池的调查基础数据由粗疏到精细分为三个层次,分别为必要数据、标准数据和完备数据,清水池的经验统计回归模型一种是基于调查数据得到的关于显著影响因子的分类数量较少,且这些调查数据是水池结构的结构形式、结构材料、半径、容量、高度等基本特征,根据必要的回归数据得到的模型,高霖等<sup>[4]</sup>就是根据必要数据建立了方便快速评估的模型;另一种是基础调查数据为必要数据、标准数据和完备数据,在考虑了必要数据的前提下考虑了施工质量、配筋信息、钢筋混凝土强度等标准数据和设防烈度、场地类别、场地液化、建造年代、震陷等完备数据,根据这些数据重新确定影响因子的建议系数取值,郭恩栋等<sup>[10]</sup>在考虑液化和震陷的基础上建立了地震破坏综合评估模型,使得收集调查数据包括必要数据、标准数据和完备数据的基础上水池的预测破坏等级更加精确,水处理池基本采用考虑所有层次调查基础数据的地震破坏综合评估模型。清水池与水处理池的地震破坏综合评估模型建立在现场调查到水池的必要数据、标准数据和完备数据的基础上,当仅能通过调查当地水池建造图纸来确定水池的配筋信息,调查基础数据只包含必要数据和标准数据,所以需要基于配筋信息进行壁板裂缝宽度计算进而评估水池的破坏等级,这种震害模型也属于震害综合评估模型的一种。于天洋等<sup>[3]</sup>考虑到池壁受拉钢筋应力过大,超过自身屈服应力后采用水池的快速评估模型计算,地震破坏综合模型计算结果将与实际不符,因此对震害综合评估模型进行改良,将水池的两种震害评估模型结合提出了清水池震害综合预测方法。

为了规范灾害风险调查和重点隐患排查工程

的实施,中华人民共和国住房和城乡建设部发布了《市政设施承灾体普查技术导则 FXPC/ZJ G-01》,以往的经验统计回归模型都是基于不同精度程度的基础调查数据进行评估分析,而新颁布实施的导则所规定调查的基础数据与以往方法采用的基础数据均有差异,清水池增添了占地面积、设计使用年限、服役时间和外观检查四项影响因子,水处理池调查数据专项调查了水池类别的分类,使得现有各方法不能直接基于导则基础数据进行评估分析。本文根据市政导则所规定调查的基础数据,将水处理池的类别、设计安全等级、设计使用年限、外观检查以及半地下式的结构形式这些新的影响因子考虑到水池地震破坏经验统计回归模型中,基于历史震害资料进行回归分析,确立新的回归建议系数,从而建立新的水池震害经验统计回归模型。并通过与现有评估模型评估结果以及实际震害的对比分析,初步验证了本文水池地震破坏评估模型的可靠性。

## 1 水池地震破坏评估模型

据袁一凡<sup>[2]</sup>提出的基于土坝结构的震害评估经验统计模型和高霖<sup>[4]</sup>修正简化后的清水池经验统计回归方法,结合《市政设施承灾体普查技术导则 FXPC/ZJ G-01》中清水池与水处理池不同的震害影响因素,将影响因素的系数作为自变量,震害指数作为因变量,清水池和水处理池各自结构特征参数和记录参数的建议系数便会通过对数函数形式的多元线性回归方程得到,公式如下。

$$DI_i = \prod_{j=1}^J \prod_{k=1}^K b_{ijk}^{\delta_{ijk}} \quad (1)$$

对公式(1)两边同时取对数,可将公式(1)转化为多元线性回归方程形式,如公式(2)所示。

$$\ln DI_i = \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \delta_{ijk} \ln b_{jk} \quad (2)$$

式中:  $DI_i$  为第  $i$  个水池的震害指数;  $b_{jk}$  为乘积项中第  $j$  项目第  $k$  类别因素的建议系数;  $\delta_{ijk}$  为克拉奈特记号,为第  $i$  水池对乘积项因子的选择,当有第  $j$  项目第  $k$  类别因素时取 1, 否则取 0。

## 2 基于市政导则调查数据的地震破坏评估模型

《市政设施承灾体普查技术导则 FXPC/ZJ G-01》中针对水池的基础数据调查要求分清水池和水处理池两种,具体的数据内容如表 1、表 2 所示。

表 1 基于市政导则的清水池数据内容  
Tab. 1 Clean water tank data content based on the municipal guidelines

指标	备注
水池编码	/
场地类别	I、II类，III、IV类
有效容积	单位 m <sup>3</sup>
占地面积	单位 m <sup>2</sup>
设计使用年限	50a，100a，无法查明
服役时间(年)	/
抗震设防烈度	6 度，7 度，8 度，9 度，无法查明
结构形式	地下式，半地下式，地上式，其他
外观检查	钢筋外露，明显裂缝，无明显异常，其他

表 2 基于市政导则的水处理池数据内容  
Tab. 2 Processing pool data content based on the municipal guidelines

指标	备注
水池编码	/
场地类别	I、II类，III、IV类
水处理池类别	滤池，沉砂池，絮凝池，沉淀池，澄清池，反应池，其他
占地面积	单位 m <sup>2</sup>
设计使用年限	50a，100a，无法查明
服役时间(年)	/
抗震设防烈度	6 度，7 度，8 度，9 度，无法查明
结构形式	地下式，半地下式，地上式，其他
外观检查	钢筋外露，明显裂缝，无明显异常，其他

本文统计归纳了 2008 年汶川地震震害考察报告<sup>[1]</sup>、2010 年玉树地震考察报告<sup>[8]</sup>、1975 年海城地震震害资料<sup>[5]</sup>、1976 年唐山大地震震害资料<sup>[6]</sup>、1996 年包头西地震震害资料<sup>[7]</sup>中 164 座清水池和 124 座水处理池的基础数据、震害情况以及破坏等级，并根据市政导则的基础数据调查要求，分别对清水池和水处理池的基础数据进行了归纳和整理，以便采用式 1.2 并进行编程，从而进行多元回归分析，由于以往的样本大多数在震害之后搜集，或年代久远，或破坏严重，使得设防烈度、形状、直径以及外观检查等数据有较多缺失，未处理缺

省值回归将导致已有数据的作用过度放大而产生很大误差，市政导则要求的基础数据又相对全面，据此本文在处理缺失数据时采用同时考虑缺失影响因子中所有分类情况进行回归分析，即将缺省值的每个分类都进行考虑进行回归，再一一判断真实性和可行性，从而减少了缺省值对计算结果产生的误差，同时也突出了已有的确定的数值对水池破坏程度的影响。但在采用该缺省值处理方法的时候，编入了清水池和水处理池共计 3566 条数据，该缺省值的处理方式因为大量缺省值分类的添加会弱化缺少数据较多的影响因素的作用，本文将数据缺少多的建造年代、结构形式、设防烈度单独提取出来，与地震烈度合并，分别在清水池和水处理池内提取有用的数据进行回归，因为同时与地震烈度数据比较，且地震烈度数据全面，所以可将得到的建议值与处理过缺省值的回归建议值比较，误差在 0.5 以内时采用第一次回归建议值，误差在 0.5 以上时采用第二次回归建议值。本文在对历史震害资料进行分析处理的时候，发现建造年代缺省值较多，此处缺省值均按照地震发生时间前取，由于 2002 年颁布《给水排水工程构筑物结构设计规范》(GB50069—2002)和《给水排水工程钢筋混凝土水池结构设计规程》(CECS138—2002)以后，水池不再有砖砌材料，所以服役时间小于 20a 且结构材料为砖砌的水池的缺省值处理均不考虑，10a 以内没有水池样本，故 10a 以内的服役时间分类将不考虑。样本中缺少 9 度的设防烈度，且实际情况中很少用到 9 度的抗震设防烈度，处理缺省值时 9 度的抗震设防烈度分类也不纳入考虑范围内。从历史震害资料中处理后供市政导则地震破坏评估模型建立的含缺省值样本数据如表 3、表 4 所示，破坏等级按基本完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏以及毁坏来对应式(2)中 DI 的取值 1、2、3、4、5。

表 3 清水池基础数据  
Tab. 3 Basic data of clear water pool

序号	水池名称	数量	场地类别	容量/t	占地面积/m <sup>2</sup>	建造年代	结构形式	外观检查	设防烈度/度	地震烈度/度	破坏等级
1	成都市水厂(9)	1	/	/	/	/	半地下式	无明显异常	/	6	基本完好
2	三台县二水厂	1	/	300	/	/	/	无明显异常	/	6	基本完好
3	三台县一水厂	2	/	/	/	1984	/	有明显裂缝	6	6	轻微破坏
4	鞍山给水厂	2	II	1 000	707	/	地下式	无明显异常	/	7	基本完好
5	鞍山给水厂	2	II	200	178	/	半地下式	无明显异常	/	7	基本完好

续表 3

序号	水池名称	数量	场地类别	容量/t	占地面积/m <sup>2</sup>	建造年代	结构形式	外观检查	设防烈度/度	地震烈度/度	破坏等级
6	盘山自来水公司	3	Ⅲ	1 400	178	/	半地下式	无明显异常	/	7	基本完好
7	鞍山某公司	5	Ⅱ	400	/	/	半地下式	无明显异常	/	7	基本完好
8	鞍山某公司	5	Ⅱ	2 500	/	/	半地下式	无明显异常	/	7	基本完好
9	鞍山给水厂(15)	5	Ⅱ	1 800	/	/	地下式	无明显异常	/	7	基本完好
10	鞍山给水厂(75)	5	Ⅱ	5 000	/	/	地下式	无明显异常	/	7	基本完好
11	大洼化肥厂	1	Ⅲ	/	200	/	地上式	有明显裂缝	/	7	轻微破坏
12	大洼化肥厂/砖	1	Ⅲ	/	90	/	地上式	无明显异常	/	7	基本完好
13	成都市金堂县	2	/	/	/	1975	/	无明显异常	8	7	基本完好
14	朝天区水厂	1	/	/	/	/	地下式	无明显异常	/	7	轻微破坏
15	绵阳市二水厂	2	/	/	/	1982	/	无明显异常	6	7	轻微破坏
16	老边中板厂	1	Ⅱ	1 000	531	/	半地下式	无明显异常	/	8	基本完好
17	营口市某公司	1	Ⅲ	2 000	346	/	半地下式	有明显裂缝	/	8	严重破坏
18	台桥俱乐部/砖	4	Ⅲ	1 500	269	/	地下式	有明显裂缝	/	8	中等破坏
19	营口市纺织厂	1	Ⅲ	/	4 500	/	地下式	有明显裂缝	/	8	中等破坏
20	营口市纺织厂	1	Ⅲ	/	500	/	半地下式	无明显异常	/	8	轻微破坏
21	海城滑石矿水池	1	I	/	28	/	地下式	无明显异常	/	8	基本完好
22	江油市一水厂	2	/	/	1 000	1970	/	有明显裂缝	7	8	中等破坏
23	江油市城南水厂	2	/	/	/	2006	/	有明显裂缝	7	8	中等破坏
24	某矿水池/石	5	I	300	201	/	半地下式	有明显裂缝	/	9	中等破坏
25	某矿金家堡水池	1	I	500	165	/	半地下式	有明显裂缝	/	9	轻微破坏
26	华子峪某水池/砖	1	I	400	79	/	地下式	有明显裂缝	/	9	轻微破坏
27	海城县自来水厂	1	Ⅱ	600	/	/	半地下式	有明显裂缝	/	9	轻微破坏
28	营口市磷肥厂	1	I	/	450	/	半地下式	有明显裂缝	/	9	轻微破坏
29	某矿空压站	2	Ⅱ	75	25	/	半地下式	有明显裂缝	/	9	轻微破坏
30	某矿空压站	5	Ⅱ	30	10	/	地上式	有明显裂缝	/	9	严重破坏
31	唐山市北郊水厂	6	Ⅱ	4 000	1 018	/	半地下式	有明显裂缝	/	10	严重破坏
32	安县某水厂	3	/	/	500	1980	/	有明显裂缝	/	10	严重破坏

表 4 水处理池基本数据

Tab. 4 Basic data of water treatment tank

序号	水池名称	数量	场地类别	容量/t	水处理池类别	建造年代	结构形式	外观检查	设防烈度/度	地震烈度/度	破坏等级
1	成都市水二厂	1	/	/	沉淀池	1955	/	无明显异常	/	6	轻微破坏
2	成都市水厂(22)	1	/	/	滤池	/	/	无明显异常	/	6	基本完好
3	成都市水厂(10)	1	/	/	沉淀池	/	/	无明显异常	/	6	基本完好
4	成都市水厂(11)	1	/	/	絮凝池	/	/	无明显异常	/	6	基本完好
5	成都市水厂(13)	1	/	/	沉砂池	/	/	无明显异常	/	6	基本完好
6	成都市水厂(1)	1	/	/	澄清池	/	/	无明显异常	/	6	基本完好
7	成都市水厂(1)	1	/	/	反应池	/	/	无明显异常	/	6	基本完好
8	成都市水六厂	3	/	/	沉淀池	1990	/	无明显异常	/	6	轻微破坏
9	三台县一水厂	1	/	/	滤池	1984	/	有明显裂缝	6	6	轻微破坏
10	三台县一水厂	2	/	/	沉淀池	1984	/	无明显异常	6	6	基本完好
11	黄河净水厂	1	Ⅱ	/	澄清池	/	半地下式	有明显裂缝	6	7	中等破坏
12	黄河净水厂	1	Ⅱ	1 088	反应池	/	半地下式	有明显裂缝	6	7	中等破坏
13	阿尔丁净化厂/砖	1	Ⅱ	1 008	反应池	/	地上式	有明显裂缝	6	7	中等破坏
14	绵阳市三水厂	2	/	/	沉淀池	1996	/	有明显裂缝	6	7	中等破坏
15	绵阳市三水厂(3)	5	/	/	滤池	1996	/	无明显异常	6	7	基本完好

续表 4

序号	水池名称	数量	场地类别	容量/t	水处理池类别	建造年代	结构形式	外观检查	设防烈度/度	地震烈度/度	破坏等级
16	绵阳市二水厂	2	/	/	沉淀池	1996	/	无明显异常	6	7	基本完好
17	绵阳市二水厂	4	/	/	澄清池	1996	/	无明显异常	6	7	基本完好
18	绵阳市二水厂	1	/	/	沉砂池	1996	/	无明显异常	6	7	基本完好
19	安县一水厂	1	/	/	沉砂池	/	/	无明显异常	7	7	基本完好
20	安县一水厂	1	/	/	絮凝池	/	/	无明显异常	7	7	基本完好
21	长岭村水厂	2	/	200	滤池	/	地上式	有明显裂缝	6	7	中等破坏
22	长岭村水厂/砖	2	/	800	沉淀池	/	地下式	无明显异常	8	7	基本完好
23	广元朝天区水厂	1	/	/	滤池	1998	/	有明显裂缝	/	7	轻微破坏
24	广元朝天区水厂	1	/	/	沉淀池	1998	/	有明显裂缝	/	7	轻微破坏
25	广元朝天区水厂	1	/	/	反应池	1998	/	有明显裂缝	/	7	轻微破坏
26	广元元坝区水厂	1	/	/	滤池	1996	/	无明显异常	/	7	基本完好
27	广元元坝区水厂	1	/	/	沉淀池	1996	/	无明显异常	/	7	基本完好
28	天津市造纸厂	1	Ⅲ	3 000	沉淀池	/	半地下式	有明显裂缝	/	8	中等破坏
29	塘沽河水厂/砖	1	Ⅲ	8 000	沉淀池	/	半地下式	其他	/	8	毁坏
30	江油市一水厂	1	/	/	沉淀池	1970	/	钢筋外露	7	8	严重破坏
31	江油市城南水厂	1	/	/	沉淀池	2006	/	有明显裂缝	7	8	中等破坏
32	江油市城南水厂	1	/	/	滤池	2006	/	钢筋外露	7	8	严重破坏
33	江油市马角水厂	1	/	/	沉淀池	1980	/	钢筋外露	7	8	严重破坏
34	剑阁县水厂(4)	1	/	/	滤池	/	/	无明显异常	8	8	基本完好
35	剑阁县水厂(4)	1	/	/	沉淀池	/	/	无明显异常	8	8	基本完好
36	都江堰市一水厂	5	/	/	沉淀池	/	/	有明显裂缝	/	9	严重破坏
37	广元青川县水厂	5	/	/	滤池	2001	/	有明显裂缝	/	9	严重破坏

在处理完缺省值之后，水池的回归分析中影响因子的分类与市政导则得到基础调查数据直接相关或间接相关，所以有必要对地震破坏评估模型的影响因子进行分类确认。市政导则中是否存在不良地质和是否处于浅部砂层中这两种调查基础数据没有相关的震害资料数据支撑，而场地类别作为影响水池震后破坏严重情况的重要因素并未被市政导则纳入，场地类别与等效剪切波速和覆盖层厚度相关，读者基于浙江省某地水池现场调查报告发现，现场调查报告包含了对水池当地场地类别的记录，故将场地类别作为清水池和水处理池的影响因子之一，由当地根据市政导则的调查结果确定场地类别后来对清水池和水处理池的震害风险进行评估。市政导则在管理信息里提及建成年月，建成清水池和水处理池的时间与当时图纸的抗震设防等级相关，而没有考虑到水池建完后的结构变形、老化等情况，故服役时间是针对清水池和水处理池从建成年月到调查时年月的总使用时间作为清水池和水处理池市政导则评估模型的影响因素之一。

本文对影响因子确认完、缺省值处理结束后，对回归分析中遇到的问题也进行了分析和处理，以保证数据的准确性和可行性。对于数量过多的

水池，适当减少水池的误差来避免该类型水池在回归分析中过多的影响。对市政中多处无法查明和其他的影响因素，均按照水池破坏影响最严重的影响因素取值或不考虑该指标对水池震害的影响。

根据高霖<sup>[4]</sup>在研究简化评估模型中提出的依据我国给水工程水池更新时间分划的 4 个时间段，将服役时间划分为 10a 以下、11~20a、21~38a 和 39a 以上四个阶段，由于近 10 年没有具体的水池震害破坏资料，而因为国家规范的更新水池结构抗震性能进一步提升，根据该实际情况 10 年以下建议值取为 0.9。市政导则的外观检查一项中，跟钢筋外露描述相关的水处理池震害资料过少，且根据震害资料和实际情况钢筋外露等现象水池基本丧失功能，破坏严重等级大于有裂缝的水池，且实际震害中有明显裂缝情况下水池均为轻微破坏以上，在规定的水池破坏震害现象中钢筋外漏或其他等已属于开裂且结构破坏，在水池除外观检查均为有利因素的情况下将钢筋外露的影响建议系数调整为单独能影响水池发生中等破坏。对于水处理池的分析，市政导则针对水处理池的工艺流程进行了详细调查，在与震害资料数据对比后归纳了震害资料中主要的水处理池类别，对于

其他未提及的水处理池类别,考虑到回归后发现水处理池类别对水池破坏等级的影响很低,将未提及的水处理池的建议系数设为 1. 设防烈度为 9 度时缺少实际震害数据,结合实际情况取建议值为 0.9. 水处理池震害资料中缺少 10 度地震烈度下水池的破坏情况,根据 9 度和 10 度下清水池地震烈度影响系数取值,对水处理池的 10 度地震烈度建议值进行取值,且同时满足 10 度地震烈度下均为有利因素的水处理池至少也达到中等破坏的破坏等级以满足实际震害情况. 所有增加的水池数量如表 3、表 4 水池名称表列中括号内数字所示.

由于不同指标对水池震害影响的不确定性,将回归后的影响系数中的有利系数取为 1.00 来表示该因素相对地对水池震害破坏没有影响,将其余的不利系数与该系数对比从而直观地描述不利因素对水池震害破坏影响的大小. 结合实际情况考虑设计安全等级、设计使用年限以及 9 度设防对水池震害的影响,给出影响因素相应的建议系数. 清水池和水处理池的评估模型建议系数如表 5、表 6 所示.

表 5 清水池震害影响因子分类及建议系数取值  
Tab. 5 Classification of factors affecting Qingshui Pond earthquake damage and suggested coefficient values

影响因子	分类	分项	建议值
场地土类型	1	I 类和 II 类	1.00
	2	III 类和 IV 类	1.11
容量	1	小于 2 000 t	1.00
	2	大于等于 2 000 t	1.05
占地面积	1	小于 500 m <sup>2</sup>	1.00
	2	大于等于 500 m <sup>2</sup>	1.04
设计安全等级	1	一级	0.90
	2	二级	0.95
	3	三级和无法查明	1.00
服役时间	1	39a 及以上	1.24
	2	21~38a	1.07
	3	11~220a	1.00
	4	10a 及以下	0.90
结构形式	1	地下式	1.08
	2	半地下式	1.00
	3	地上式	1.20
	4	其他	1.00
设计使用年限	1	50a 或无法查明	1.00
	2	100a	0.90
外观检查	1	无明显异常	1.00
	2	有明显裂缝	1.97
	3	钢筋外露或其他	2.72

续表 5

影响因子	分类	分项	建议值
设防烈度	1	6 度设防	1.08
	2	7 度设防	1.03
	3	8 度设防	1.00
	4	9 度设防	0.95
	5	无法查明	1.00
影响烈度	1	Ⅵ度	0.75
	2	Ⅶ度	0.96
	3	Ⅷ度	1.19
	4	Ⅸ度	1.32
	5	Ⅹ度	1.63

表 6 水处理池震害影响因子分类及建议系数取值  
Tab. 6 Classification of factors affecting earthquake damage in water treatment tank and suggested coefficient values

影响因子	分类	分项	建议值
场地土类型	1	I 类和 II 类	1.00
	2	III 类和 IV 类	1.02
水处理池类别	1	滤池	1.01
	2	沉淀池	1.09
	3	絮凝池	1.04
	4	沉砂池	1.03
	5	澄清池	1.00
	6	反应池	1.06
	7	其他	1.00
容量	1	小于 2 000 t	1.00
	2	大于等于 2 000 t	1.02
设计安全等级	1	一级	0.90
	2	二级	0.95
	3	三级或无法查明	1.00
服役时间	1	39a 及以上	1.12
	2	21~38a	1.04
	3	11~20a	1.00
	4	10a 及以下	0.90
结构形式	1	地下式	1.03
	2	半地下式	1.03
	3	地上式	1.00
	4	其他	1.00
设计使用年限	1	50a 或无法查明	1.00
	2	100a	0.90
外观检查	1	无明显异常	1.00
	2	有明显裂缝	2.03
	3	钢筋外露或其他	3.05
设防烈度	1	6 度设防	1.22
	2	7 度设防	1.03
	3	8 度设防	1.00
	4	9 度设防	0.95
	5	无法查明	1.00
影响烈度	1	Ⅵ度	0.60
	2	Ⅶ度	0.84
	3	Ⅷ度	1.12
	4	Ⅸ度	1.45
	5	Ⅹ度	1.79

运用公式(1)和(2)并采用表 5 和表 6 中清水池

和水处理池的震害因子影响建议系数对清水池样本和水处理池样本进行回判分析，计算得出震害指数。根据《生命线工程地震破坏等级划分 GB/T 24336—2009》<sup>[9]</sup>，将水池地震破坏分为五个等级，各破坏等级与震害指数的对应关系如表 7 所示。当计算得出的震害指数在破坏等级划分区间的两个端点左右 0.1 以内时，将该破坏等级按与实际破坏等级相符处理。经计算，175 座清水池样本中有 14、15、17、26 和 30 号水池共计 10 座破坏等级相差 1 级，回判成功率为 94.29%，128 座水处理池样本中有 1、8、30 和 33 号水池共计 6 座破坏等级相差 1 级，回判成功率为 95.31%。

3 算例分析

本章将建立的基于市政导则的水池地震破坏

评估模型用于未被采取为分析样本的水池震害资料中，计算结果与实际震害指数对比，并将基于市政导则的地震破坏评估模型与郭恩栋等提出的原有模型<sup>[10]</sup>相比较，从而判断导则模型是否可靠。相关样本分析和模型对比如表 8 所示。

表 7 水池破坏等级与震害指数对应表

Tab. 7 Correspondence table of pool damage level and earthquake damage index

破坏等级	震害指数
基本完好	$\leq 1.5$
轻微破坏	$1.5 < DI \leq 2.5$
中等破坏	$2.5 < DI \leq 3.5$
严重破坏	$3.5 < DI \leq 4.5$
毁坏	$> 4.5$

表 8 导则模型与未收纳震害资料结果对比

Tab. 8 Comparison of the results of the guide model and the unconnected earthquake damage data

编号	水池	结构形式	占地面积/m <sup>2</sup>	有效容积/m <sup>3</sup>	建成年月/年	实际地震烈度	实际破坏等级	原震害指数	原模型破坏等级	导则震害指数	导则模型破坏等级
1	清水池	地下式	$\geq 500$	$\geq 2\,000$	2006	Ⅵ	基本完好	0.70	基本完好	0.89	基本完好
2	清水池	地上式	$\geq 500$	$\geq 2\,000$	1998	Ⅶ	基本完好	1.27	基本完好	1.47	基本完好
3	清水池	地上式	$\geq 500$	$\geq 2\,000$	1998	Ⅷ	轻微破坏	2.26	轻微破坏	1.82	轻微破坏
4	滤池	半地下式	$< 500$	$< 2\,000$	1990	Ⅷ	基本完好	1.50	基本完好	1.25	基本完好
5	沉淀池	半地下式	$< 500$	$< 2\,000$	1990	Ⅹ	严重破坏	3.90	严重破坏	4.43	严重破坏
6	澄清池	地下式	$\geq 500$	$\geq 2\,000$	2006	Ⅶ	基本完好	0.84	基本完好	0.91	基本完好
7	反应池	半地下式	$\geq 500$	$\geq 2\,000$	2006	Ⅸ	中等破坏	2.98	中等破坏	3.19	中等破坏

表 8 中水池的结构材料均为钢混，液化程度和震陷程度均为无，设计使用年限均为 50a，抗震设防烈度均为 7 度，场地类别均为Ⅱ类，5 号和 7 号水池外观检查发现明显裂缝。

从算例分析结果可以发现，不同烈度影响下 7 个水池分别采用原模型和导则模型的预测结果一致，且评估结果与实际破坏等级一致，因此导则模型的可靠性得到了初步的验证。从评估结果可以发现，水池在Ⅵ度、Ⅶ度下基本完好，在Ⅷ度下发生轻微破坏，而烈度达到Ⅸ度时，水池开始趋向于发生中等破坏，达到Ⅹ度时，水池基本是严重破坏或毁坏的状态，基本功能丧失。

当市政导则中收集调查数据不满足该模型基础数据条件时，仍按原模型进行评估。由于市政导则的参考因素较多，且市政导则参考的实际震害破坏等级对应的 DI 值与原模型仍然相同，模型建立后将建立的导则模型建议值与原模型对比发现，同样的分类中有利因素与不利因素均是相同的，且地震烈度对水池的破坏等级评估均有较大

的影响。水处理池的导则模型建立后可以发现，水处理池的分类本身对地震破坏的影响不大，主要还是受到了样本大量沉淀池和滤池的影响，今后可以假定水处理池类别对地震破坏没有影响。较原模型两种结构形式的分类，导则模型在引入半地下式的结构形式分类后可以发现对清水池没有太大影响，而对于水处理池而言地上式、半地下式和地下式三种结构形式对水池破坏的影响大幅度减少，这可能是水处理池考虑到化学药剂的添加而对地上式、半地下式的结构做出了更多的保护措施和抗震措施。

4 结语

本文基于住房和城乡建设部发布的《市政设施承灾体普查技术导则 FXPC/ZJ G-01》<sup>[11]</sup>，根据市政导则调查基础数据与原先模型所需基础数据的差异性，通过对数回归建立了基于市政导则基础调查数据的清水池和水处理池的地震破坏评估模型，给出了两种模型各自的影响因子建议值，并

通过对未收纳进回归集的实际震例进行评估对导则模型的可靠性进行了初步验证。清水池市政导则地震破坏评估模型证实了地震烈度与结构形式仍占主导因素,但也发现了设计安全等级、外观检查两个显著因素的影响。水处理池市政导则地震破坏评估模型的建立,结合水处理池的特殊性,结构形式不再作为显著影响因子,水处理池的分类也并不会直接影响不同烈度下水处理池地震破坏结果。导则模型的建立,为今后各地大范围开展水池震害预测和地震灾害风险评估奠定了基础。

## 参考文献 References

- [1] 中国地震局研究所. 汶川地震工程震害科学考察总结报告[R]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2009.  
Institute of China Earthquake Administration. Summary report on scientific investigation of earthquake damage in Wenchuan earthquake engineering[R]. Harbin. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2009.
- [2] 袁一凡. 岩土工程结构震害预测方法研究[R]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2000;3-22.  
YUAN Yifan. Research on prediction method of earthquake damage of geotechnical engineering structures [R]. Harbin. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration,2000;3-22.
- [3] 于天洋,郭恩栋,李倩,等. 清水池震害综合预测方法[J]. 震灾防御技术,2018,13(2):353-362.  
YU Tianyang, GUO Endong, LI Qian, et al. Comprehensive prediction method of earthquake damage in Qingshui Pond [J]. Earthquake Disaster Prevention Technology, 2018,13(2):353-362.
- [4] 高霖,郭恩栋,刘智,等. 清水池震害评估模型研究[J]. 广西大学学报(自然科学版),2013,38(01):48-54.  
GAO Lin, GUO Endong, LIU Zhi, et al. Study on evaluation model of earthquake damage to clean water tank[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition),2013,38(1):48-54.
- [5] 中国科学院工程力学研究所. 海城地震震害[M]. 北京:地震出版社,1979.  
Institute of Engineering Mechanics, Chinese Academy of Sciences. Haicheng earthquake damage[M]. Beijing: Earthquake Press, 1979.
- [6] 刘恢先. 唐山大地震震害(三)[M]. 北京:地震出版社,1986.  
LIU Huixian. Earthquake damage of tangshan earthquake(3)[M]. Beijing: Earthquake Press, 1986.
- [7] 孙柏涛,孙福梁,李树帧,等. 包头西6.4级地震震害[M]. 北京:中国科学技术出版社,2000.  
SUN Baitao, SUN Fuliang, LI Shuzhen, et al. Baotouxi M6.4 earthquake damage[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2000.
- [8] 郭恩栋,刘爱文,刘贵位. 玉树地震生命线工程科学考察报告[R]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2010.  
GUO Endong, LIU Aiwen, LIU Guiwei. Scientific investigation report on Yushu earthquake lifeline project [R]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2010.
- [9] 郭恩栋,刘如山,孙柏涛. 地下管线工程地震破坏等级划分标准[J]. 自然灾害学报,2007,16(4):86-90.  
GUO Endong, LIU Rushan, SUN Baitao. Classification standard for earthquake damage grades of underground pipeline engineering [J]. Journal of Natural Disasters, 2007,16(4):86-90.
- [10] 郭恩栋,刘如山,毛晨曦,等. 生命线工程系统地震破坏及损失评估方法研究[R]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2016.  
GUO Endong, LIU Rushan, MAO Chenxi, et al. Research on earthquake damage and loss assessment method of lifeline engineering system[R]. Harbin. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2016.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 市政设施承灾普查技术导则 FXPC/ZJ G-01[z]. 2021,10(8): [https://www.mohurd.gov.cn/ztbd/1zrzhfxc/1zrzhfxc\\_jspx/202108/20210810\\_761596.html](https://www.mohurd.gov.cn/ztbd/1zrzhfxc/1zrzhfxc_jspx/202108/20210810_761596.html).  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, Technical Guidelines for the Census of Hazardous Objects in Municipal Facilities FXPC/ZJ G-01 [z]. 2021, 10(8): [https://www.mohurd.gov.cn/ztbd/1zrzhfxc/1zrzhfxc\\_jspx/202108/20210810\\_761596.html](https://www.mohurd.gov.cn/ztbd/1zrzhfxc/1zrzhfxc_jspx/202108/20210810_761596.html).

(编辑 桂智刚)