

周欢, 刘鑫. 基于灰色理论模型的综合管廊分支口管道震动响应数值模拟[J]. 灾害学, 2020, 35(4): 197–201. [LI Qian and LIU Xin. Numerical Simulation of the Vibration Response of the Branch Pipe of the Comprehensive Pipe Gallery Based on the Grey Theory Model[J]. Journal of Catastrophology, 2020, 35(4): 197–201. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2020.04.036.]

基于灰色理论模型的综合管廊分支口管道震动响应数值模拟^{*}

周欢¹, 刘鑫²

(1. 西安建筑科技大学 管理学院, 陕西 西安, 710055; 2. 北京师范大学 政府管理学院, 北京 100875)

摘要: 综合管廊分支口管道容易受到地震等外来作用力影响, 形成管道泄漏, 引发安全事故, 为此基于灰色理论模型数值模拟综合管廊分支口管道震动响应。根据综合管廊分支口的结构形式及分支口管道震害特性, 建立基于灰色理论的 GM(1, 1) 等维新信息模型, 通过在 GM(1, 1) 模型中增添最新数据, 使自身具备较高预测精准度, 实现综合管廊分支口管道变形预测。模拟结果显示: 该模型可以有效预测综合管廊分支口管道顶底板位移变形, 具备较高预测精准度; 不同方向的输入地震波对管道有效应力的影响大小顺序为 Z 轴 > X 轴 > Y 轴; 当地震烈度上升到 IX 等级时, 对综合管廊分支口管道的破坏性特别大。表明该模型可有效模拟不同输入方向地震波、不同地震烈度等级对综合管廊分支口管道的震动响应。

关键词: 灰色理论模型; 综合管廊; 分支口; 管道; 震动响应; 有效应力

中图分类号: TD325.4; X43; X915.5; P315 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2020)04-0197-05
doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2020.04.036

综合管廊是集电力、燃气、热力、给排水以及通信等各类市政管道于一体的城市隧道空间^[1-2]。城市综合管廊是解决城市地下管网问题的一种有效方式, 可提升城市地下空间利用率, 大力改善城市环境, 增强城市抗灾防洪水平的同时极大程度缩减后期运营及维护成本, 已逐渐发展成为一个城市发展的必然选择^[3]。随着自然灾害频发, 地震带给人们的危害逐步加重, 地震作用下, 对城市综合管廊会造成极强的破坏性, 尤其是对综合管廊分支口管道的影响^[4-5]。综合管廊分支口管道的应力分布较为复杂, 是整个综合管廊的设计及施工重点, 若分支口管道焊接缺陷或者裂缝, 一旦受到外力影响, 极易造成管道泄漏, 形成安全事故, 并易引发次生灾害, 严重影响人们生产生活^[6]。因此为保证综合管廊安全使用, 必须对综合管廊分支口管道受外力产生的震动响应数值进行模拟, 确保综合管廊分支口管道正常运行^[7]。

由于综合管廊分支口管道受外力影响而形成的震动响应情况十分复杂, 既包含已知因素也包含未知因素, 所以这种复杂的影响因素具备灰色特性的作用特点, 既处于已知(白色)和未知(黑色)之间的灰色特性^[8]。为此本文选用基于灰色理论的具备高预测精准度的 GM(1, 1) 等维新信息模型, 预测综合管廊分支口管道受外力影响的应力情况, 并通过实验模拟分支口管道的震动响应数值。为综合管廊分支口管道维护方案确立提供理

论依据^[9]。

1 基于灰色理论的综合管廊分支口管道变形预测

1.1 综合管廊分支口结构及管道震害特性

1.1.1 综合管廊分支口结构形式

综合管廊分支口是综合管廊内部管线与外部直埋线的连接部位(即架空管道与埋地管道连接部位), 该部位又被称为管线接出口和管线引出口^[10-11]。综合管廊的分支口位置是根据综合管廊的总体规划进行的合理设置, 一般位于道路的交叉口。为了综合管廊管道出线合理, 管线分支口的布设应遵循间隔 150~200 m 的要求。综合管廊分支口形式多样, 如单舱单管线单/多侧引出、单舱多管线单/多侧引出、多舱多管线单/多侧引出等, 依据管线分支位置可将综合管廊分支口形式划分为舱内/舱外管线分支口^[12]。因此应充分考虑分支口内部管线转弯半径尺寸, 明确管线分支口空间大小, 选择合适的综合管廊分支口形式。

1.1.2 综合管廊分支口管道震害特性

综合管廊分支口管道在受到地震等外力作用时会产生如下破坏特性:

(1) 综合管廊内架空管道脱落导致管体开裂。地震等外力作用产生的强大惯力致使架空管道挣

* 收稿日期: 2020-01-17

修回日期: 2020-05-07

基金项目: 国家自然科学基金“西北地区农村聚居单元绿色建构研究”(51678481)

第一作者简介: 周欢(1995-), 女, 四川广安人, 硕士研究生, 主要从事建筑经济与管理研究. E-mail: 13572495520@163.com

脱综合管廊的管架束缚,脱离管架,导致在综合管廊分支口管道上形成的强大弯矩力弄弯曲甚至折断管体。

(2)综合管廊内管道节点破坏。地震等外力作用下,由于综合管廊中包括架空管道和埋地管道,两者的约束条件和振动频率有所差异,因此综合管廊内部的管道节点会受到来自于架空管道和埋地管道具备显著差异的集中作用力,造成节点产生法兰螺栓松动、焊接处及法兰盘开裂等应力破坏。

(3)综合管廊分支口防水套管漏水。地震等外力作用下,会使综合管廊分支口管道两端受到不同程度的约束力,致使管体发生变形,产生综合管廊分支口防水套管松动现象,造成漏水、漏沙等不良后果,有甚者还会导致综合管廊主体结构混凝土脱落。

1.2 基于 GM (1, 1) 等维新信息模型管道变形预测

由于综合管廊分支口管道的一部分架空管道的形式存在于综合管廊内,另一部分被埋与地下,因此综合管廊分支口管道存在于两种差异性显著的约束条件下^[13]。基于综合管廊分支口结构形式及综合管廊分支口管道震害特性建立基于灰色理论的 GM (1, 1) 等维新信息模型。

1.2.1 GM(1, 1) 模型构建

GM(1, 1) 是有由邓聚龙教授所提出的灰色理论预测模型,该模型是灰色理论预测模型中应用最广泛的模型,其构建的步骤如下:

步骤 1: 设定 $F^{(0)} = (F^{(0)}(1), F^{(0)}(2), \dots, F^{(0)}(n))$ 为原始数列,采用累加生成法叠加原始数列,减小数据随机性, $F^{(1)} = (F^{(1)}(1), F^{(1)}(2), \dots, F^{(1)}(n))$ 为叠加一次形成的数列,其中存在:

$$F^{(1)}(t) = \sum_{i=1}^t F^{(0)}(i), (t = 0.1, \dots, n)。 \quad (1)$$

步骤 2: 构建 GM(1, 1) 模型,构建的灰色微分方程如下:

$$\frac{dF^{(1)}(t)}{dt} + pF^{(1)}(t) = w。 \quad (2)$$

将 $\hat{p} = [p, w]^T$ 视为参数列,利用最小二乘法计算参数列 \hat{p} , 可得:

$$\hat{p} = (H^T H)^{-1} H^T Y_N。 \quad (3)$$

式中:

$$H = \begin{bmatrix} -0.5(F^{(1)}(1), F^{(1)}(2)) & 1 \\ -0.5(F^{(1)}(2), F^{(1)}(3)) & 1 \\ \dots\dots\dots & \dots\dots\dots \\ -0.5(F^{(1)}(n-1), F^{(1)}(n)) & 1 \end{bmatrix}; \quad (4)$$

$$Y_N = (F^{(0)}(2), F^{(0)}(3), \dots, F^{(0)}(n))。 \quad (5)$$

步骤 3: 在时间函数中引入灰参数 p , 则有:

$$\hat{F}^{(1)}(t+1) = [F^{(0)}(1) - \frac{w}{p}]e^{-pt} + \frac{w}{p}, (t=0, 1, \dots, n)。 \quad (6)$$

累计还原 $\hat{F}^{(1)}(t)$ 获取原始数列模拟值如下:

$$\hat{F}^{(0)}(t+1) = \hat{F}^{(1)}(t+1) - \hat{F}^{(1)}(t)。 \quad (7)$$

1.2.2 GM(1, 1) 等维新信息模型构建

GM (1, 1) 等维新信息模型的构建步骤为: 在 GM (1, 1) 模型的已知数列中添加一个最新数据, 并淘汰掉一个最旧的数据, 更新已知数列的同时

维持数列等维^[14]; 继续构建新的 GM (1, 1) 模型, 对下一个值进行预测, 将获取的预测结果添加到原始数列中, 与此同时, 淘汰掉当前最旧的数据, 以此类推, 逐个数据预测, 直至符合精度要求或实现预测目标。

通过上述步骤构建的 GM (1, 1) 等维新信息模型具备两点优势, 其一, 可以及时补充并更新信息, 增强灰度区间白化程度; 其二, 每进行一次预测, 就整改一次模型参数, 可以及时修复模型构建过程中产生的问题。这两点优势使得模型具备较高预测精准度^[15]。在此基础上, 利用残差大小检验法检验模型精准度, 过程如下:

将 $F^{(0)}(t)$ 视为原始数据, $\hat{F}^{(0)}(t)$ 视为预测值, 则相对误差为:

$$\Delta t = \frac{|F^{(0)}(t) - \hat{F}^{(0)}(t)|}{F^{(0)}(t)}。 \quad (8)$$

2 综合管廊分支口管道震动响应数值模拟

通过模拟某地区一综合管廊分支口供水管道在遇到 Northridge 地震波时的振动响应数值数据变化情况, 验证本文模型应用效果。该综合管廊分支口供水管道的材料为冷轧无缝钢管, 供水管道弹性模量为 2.2×10^{11} Pa, 密度为 7850 kg/m^3 , 泊松比为 0.3。供水主管道长 6 m、外直径长 0.65 m、管壁厚度为 0.021 m; 供水支管道埋土段长度为 7 m, 非埋土段长度为 3 m, 外直径长 0.55 m, 管壁厚度为 0.019 m。土体材料为粉质黏土, 大小为 $7.5 \text{ m} \times 8.5 \text{ m} \times 8.5 \text{ m}$, 弹性模量为 5.8×10^9 Pa, 密度为 1890 kg/m^3 , 粘聚力为 3.7×10^4 Pa, 摩擦角为 9° , 泊松比为 0.43。

在本文模型上加载 Northridge 地震波, 地震波加载时程图见图 1。在模拟综合管廊分支口管道震动形影数值时, 分别加载中立荷载与地震波荷载, 加载顺利为第 1 s 加载重力荷载, 第 2 s 加载地震波荷载, 以此类推, 加载时间总计 15s。

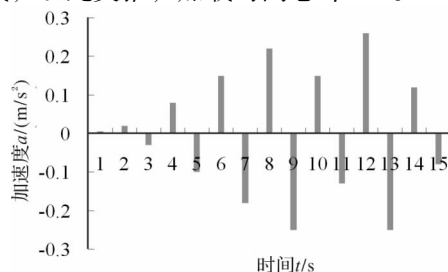


图 1 地震加速度时程图

2.1 综合管廊分支口管道受力变形预测

由于不同维数(或长度)的序列所构建的模型预测性能不同, 因此为获取较高预测精度的模型, 需选择最合适的维数。这里选用 3~8 维数的顶底板序列构建 GM(1, 1) 模型和 GM(1, 1) 等维新信息模型, 结果如表 1、表 2 所示。分析表 1、表 2 数据可知, 随着地震波强度的增加, GM (1, 1) 模型的管道顶底板预测误差变大, 结果表明: GM (1, 1) 模型不能准确预测高强度地震情况下的管道位移情况。

表 1 GM (1, 1) 模型顶底板位移预测比较

维数	p	w	地震烈度为Ⅵ度时的顶底板位移量		地震烈度为Ⅶ度时的顶底板位移量	
			预测值/mm	相对误差/%	预测值/mm	相对误差/%
3	-0.2556	16.7487	103.82	68.48	133.59	81.28
4	-0.2151	18.4762	85.05	52.76	105.05	62.58
5	-0.1791	20.4514	72.42	30.44	86.31	48.56
6	-0.1488	22.4906	64.12	15.14	74.15	26.36
7	-0.1325	24.4514	61.02	13.18	61.85	24.85
8	-0.1147	27.4286	58.74	12.08	54.25	20.28

表 2 GM (1, 1) 等维新信息模型顶底板位移预测比较

维数	p	w	地震烈度为Ⅵ度时的顶底板位移量		地震烈度为Ⅶ度时的顶底板位移量	
			预测值/mm	相对误差/%	预测值/mm	相对误差/%
3	-0.0834	39.0829	57.18	1.45	60.99	1.52
4	-0.1049	33.3467	58.09	2.68	64.44	3.01
5	-0.1267	27.5413	60.37	3.97	66.71	4.03
6	-0.1488	22.4996	63.12	4.85	73.15	4.77
7	-0.1645	28.4624	65.85	6.23	76.32	6.05
8	-0.1882	32.2845	69.42	6.88	79.41	6.97

GM (1, 1) 等维新信息模型的顶底板位移预测相对误差显著小于 GM (1, 1) 模型, 且随着地震烈度增加 GM (1, 1) 等维新信息模型的预测误差基本未发生变化, 表明该模型的预测稳定性较强。从维度角度出发, 伴随维数增加, GM (1, 1) 等维新信息模型的预测误差变大, 因此利用 GM (1, 1) 等维新信息模型预测管道顶底板位移变化时, 应选择较小维数, 可提升模型预测精准度。同等维度的两种模型相比, GM (1, 1) 等维新信息模型的预测误差显著低于 GM (1, 1) 模型。其根本原因在于 GM (1, 1) 等维新信息模型在不断更新数据, 有效融合当前综合管廊分支口管道受地震波影响的响应数值变化情况, 提升了预测精准度。因此本文模型具备较高综合管廊分支口管道顶底板位移变形预测精准度。

2.2 模拟地震波输入方向对管道有效应力的影响

为研究地震波输入方向对综合管廊分支口管道有效应力的影响, 沿着 X、Y、Z 方向输入地震波, 观察三个方向的输入地震波的综合管廊分支口管道有效应力最高点的时程图像(图 2)。

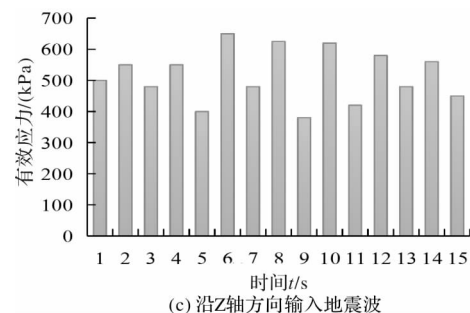
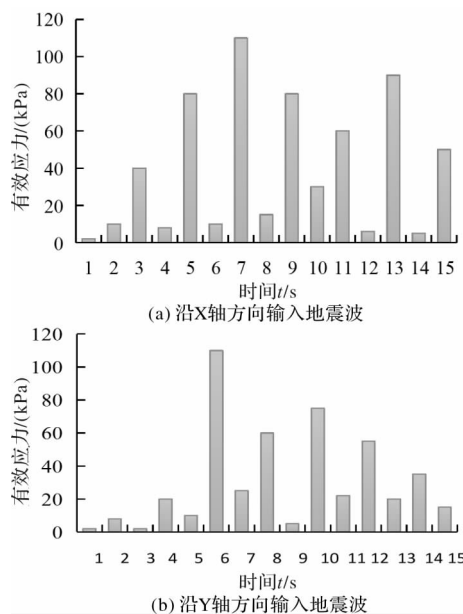


图 2 不同输入方向地震波作用下的管道有效应力最大点时程图

根据图 2 所示的综合管廊分支口管道有效应力最高点的时程图像以及本文模型计算结果, 获取综合管廊分支口管道有效应力峰值及最大变形(表 3)。

表 3 综合管廊分支口管道有效应力峰值和变形值

地震波输入方向	X 轴	Y 轴	Z 轴
最大有效应力/(kPa)	176	110	652
最大变形/($\times 10^{-5}$)	0.988	1.172	4.552
时间/s	6.51		
地震加速度/g	0.23485		

依据图 2 和表 3 数据可得出如下结论:

(1) 综合管廊分支口管道受不同方向的输入波的震动影响程度大小依次为: Z 轴 > X 轴 > Y 轴。土体在 Z 轴方向上的承载力较小, 因此在地震等外力作用下的土体易产生沿 Z 轴方向的变形, 该部分变形的土体作用于埋土管道上会造成管道产生变形并形成较大有效应力。土体在 X 轴和 Y 轴方向上的承载力较大, 在地震等外力作用下的土体较难产生大规模变形, 所以 Z 轴输入方向上的管道有效应力大于 X 轴和 Y 轴。

(2) 三种地震波输入方向的管道有效应力最大点均为分支口管道埋土段于非埋土段的交面的垂直方向下方。原因在于地震波作用于土体使其产生变形, 对分支口管道埋土段形成应力, 而该分

支口管道会受到综合管廊主管道约束，两种力同时作用于分支口管道使其在交面产生最大有效应力。

2.3 研究地震烈度对管道有效应力的影响

地震烈度即地表以及工程建筑物受地震影响的强弱程度。通过查阅大量地震灾害资料得出，地下结构也会受到地震烈度的强烈影响，地震作用下的地面运动加速度可有效衡量地震烈度。当抗震设防标准是将地震烈度作为基础时，需根据地震烈度提出对应的峰值加速度，《GB/T 17742-2009 中国地震烈度表》显示：需按照水平方向震动参数、建筑震害程度、人的震后感觉以及其它相关镇害现象评判地震烈度，并将地震烈度划分成 12 个级别。结合中国地震烈度表，缩放处理加载在本文模型上的地震荷载峰值加速度所对应的地震烈度，结果如表 4 所示。这里仅研究 VI、VII、VIII、IX、X 五种等级的地震烈度对综合管廊分支口管道的有效应力以及变形的影响。图 3 为所研究五种地震烈度等级下的综合管廊分支口管道的最大有效应力图像。表 5 为五种地震烈度等级对应的综合管廊分支口管道有效应力峰值和变形值。分析图 3 及表 5 数据可知，综合管廊分支口管道所产生的有效应力及变形伴随地震烈度的增加而变大。当地震烈度等级处于 VI、VII、VIII 范围内时，管道的有效应力及峰值加速度增长变化呈线性，当地震烈度等级处于 IX、X 范围时，管道的有效应力增长幅度显著提升，地震烈度等级为 IX、X 时的管道有效应力分别约为地震烈度等级为 VIII 的 6 倍、10 倍。结果表明，本文模型的数值模拟结果显示地震烈度上升到 IX 等级时，对综合管廊分支口管道的破坏性特别大。

表 4 地震烈度以及对用峰值加速度

地震烈度等级	峰值加速度/(m/s ²)
VI	0.64
VII	1.26
VIII	2.51
IX	5.05
X	10.05

表 5 不同地震烈度下的管道有效应力峰值和变形值

地震烈度	VI	VII	VIII	IX	X
峰值加速度/(m/s ²)	0.64	1.26	2.51	5.01	10.01
最大有效应力/(kPa)	917	1275	1938	11165	18114
垂直变形/(×10 ⁻⁵ m)	6.475	9.042	14.511	121.423	194.842
时间/s	6.5	9.3	6.5	10.6	6.4
地震加速度/g	0.2248488	0.255377	0.2248488	0.1483349	0.8098419

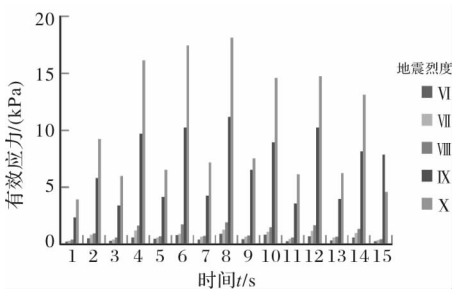


图 3 不同地震烈度下的管道的最大有效应力时程

3 结论

本文利用灰色理论模型对综合管廊分支口管道展开了一系列的震动响应数值模拟，主要得出以下结论：

(1)本文提出的 GM(1, 1)等维新信息模型通过不断引入全新影响数据，具备较高预测精准度，可良好反映综合管廊分支口管道受力变形客观发展态势。

(2)通过模拟地震波输入方向对综合管廊分支口管道有效应力影响得出，管道受 Z 轴方向的地震波影响最为显著。

(3)通过模拟地震烈度对管道有效应力的影响得出，管道的有效应力和变形随着地震烈度增加而变大，当地震烈度等级大于 IX，对管道影响剧增。

参考文献：

[1] 孙瑞雪, 姚斌. 细水雾在城市地下综合管廊内灭火特性的数值模拟研究[J]. 火灾科学, 2019, 28(1): 28-34.

[2] 徐亮, 张高爽, 龙艳, 等. 特高压管廊 GIL 热特性的数值模拟[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(7): 177-184.

[3] 王洋, 王良俊, 何祖勇, 等. 城市综合管廊开发驱动力实证研究[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(6): 1444-1451.

[4] 徐占伟, 李建勋, 林权, 等. 城市综合管廊天然气管道敷设[J]. 煤气与热力, 2018, 38(6): 31-35.

[5] 刘中宪, 王治坤, 张欢欢, 等. 燃气爆炸作用下地下综合管廊动力响应模拟[J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(4): 624-632.

[6] 施有志, 孙爱琴, 林树枝, 等. Rayleigh 波作用下地下综合管廊动力响应三维数值分析[J]. 世界地震工程, 2017, 33(4): 196-210.

[7] 李骏飞, 杨磊三, 周炜峙, 等. 新城区综合管廊建设污水管道入廊案例分析[J]. 中国给水排水, 2017, 33(24): 44-47.

[8] 孙健飞, 李岩松, 韩东, 等. 基于多重网格技术的含蜡原油管道析蜡速率三维数值模拟研究[J]. 工程热物理学报, 2019, 40(8): 1913-1920.

[9] 谢立栋, 东兆星, 齐燕军, 等. 基于模型试验的台阶爆破近中区边坡震动效应数值模拟[J]. 矿业研究与开发, 2019, 39(4): 77-81.

[10] 胡少培. 基于多层次灰色理论的培训项目成熟度评价模型[J]. 统计与决策, 2018, 34(16): 177-180.

[11] 俞树荣, 韩竣羽, 李淑欣. 利用灰色马尔可夫模型预测腐蚀

- 管道寿命[J]. 机械强度, 2016, 38(4): 850–856.
- [12] 戚豹, 陶祥令. 基于 MGM(1, N) 模型的浅埋暗挖下穿道路隧道实测规律分析[J]. 施工技术, 2017, 46(22): 108–111, 136.
- [13] 罗小虎. 基于 IAHP 和模糊灰色理论的土壤腐蚀等级评价[J]. 材料保护, 2019, 52(7): 54–59.
- [14] 黄雪驰, 马贵阳, 王锡钰, 等. 基于稳定风场的埋地天然气管道泄漏数值模拟[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(1): 96–101.
- [15] 韩连生, 宋光仁. 基于灰色理论的露天矿边坡位移预测预警研究[J]. 化工矿物与加工, 2018, 47(5): 48–52.

Numerical Simulation of the Vibration Response of the Branch Pipe of the Comprehensive Pipe Gallery based on the Grey Theory Model

ZHOU Huan¹ and LIU Xin²

(1. School of Management, Xian University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. School of Government, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The pipeline at the branch of the comprehensive pipe gallery is easy to be affected by external forces such as earthquake, resulting in pipeline leakage and safety accidents. Therefore, the vibration response of the pipeline at the branch of the comprehensive pipe gallery is simulated based on the grey theory model. According to the structural form and seismic damage characteristics of the branch of the comprehensive pipe gallery, a GM(1, 1) and other new information model based on the grey theory is established. By adding the latest data to the GM(1, 1) model, the prediction accuracy of the branch of the comprehensive pipe gallery is high, and the deformation prediction of the branch of the comprehensive pipe gallery is realized. The simulation results show that the model can effectively predict the displacement deformation of the top and bottom plate of the branch pipe of the comprehensive pipe gallery, with high prediction accuracy; the order of the influence of the input seismic wave in different directions on the effective stress of the pipeline is Z axis > X axis > Y axis; when the seismic intensity rises to IX level, the damage to the branch pipe of the comprehensive pipe gallery is particularly large. The results show that the model can effectively simulate the response of seismic waves in different input directions and different seismic intensity levels to the pipeline at the branch of the comprehensive pipe gallery.

Key words: grey theory model; comprehensive pipe gallery; branch opening; pipeline; vibration response; effective stress

(上接第 196 页)

Classification and Typing System of Emergency Resource in the United States and its Enlightenment to China's Emergency Management

MA Lisiwen¹, CHEN Hong¹, WANG Wei¹ and QU Minhao²

(1. National Institute of Natural Hazards, MEMC, Beijing 100085, China;

2. National Earthquake Response Support Service, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on the analysis of the shortcomings of China's emergency resource management system, we study framework and methods of the classification and typing of emergency resources in the United States, and specifically analyze its certification process and qualification management of emergency personnel. The classification and typing of emergency resources are put forward to provide a reference for emergency resource management in China.

Key words: United States; emergency; resource management; classification; typing; enlightenment