

文章编号: 1004- 4574(2010) 01- 0084- 04

城市高架道路系统抗震性能分析

陈玲俐, 叶志明

(上海大学 土木系, 上海 200072)

摘 要: 城市高架道路系统是城市交通系统的抗震薄弱环节, 其震害不仅影响其自身的通行能力, 通常还会影响高架道路下方的地面交通。对高架道路系统抗震性能的分析方法进行了系统阐述。采用系统分析方法对上海市内环高架道路系统进行了抗震性能分析, 得到了震后系统通行时间延长值, 而震后系统通行时间延长反映了系统通行能力的降低。

关键词: 高架道路系统; 震害率; 交通流

中图分类号: P315.9 文献标识码: A

Seismic performance analysis of urban elevated line system

CHEN Ling-li YE Zhi-ming

(Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract The urban elevated line system is a weak link of the urban traffic system in earthquake. The seismic damage of the elevated line bridges will decrease their own transportation capacity and the roads under them. The methods were presented in the paper to analyze the performance of the elevated line system in earthquake. A elevated line system in Shanghai was analyzed with systematic analysis method and passage time delay after earthquake was obtained which reflects decrease of passage capacity of the system.

Key words elevated system; seismic damage rate; traffic flow

近年来我国为解决城市发展与土地稀缺之间的矛盾, 建设城市高架道路成为缓解和改善城市交通需要的首选方案。在我国北京和上海等大都市, 高架道路和轨道交通已在整个城市交通网中占据重要的地位。由于城市高架道路多在地面交通上方修建, 所以高架道路的破坏不仅影响高架道路系统自身通行能力, 还会严重影响高架下方的地面交通。无法充分反映工程系统在地震等灾害作用下存在的系统性风险。

由于混凝土高架道路的结构形式多为 T 型和 II 型, 质量集中在上部, 桥墩的压强比远高于建筑结构中的柱、剪力墙等竖向承力构件, 这些结构特点导致混凝土高架道路的地震反应较建筑结构更为敏感。1994 年美国 Northridge 地震造成高架道路多处桥墩发生明显破坏。1995 年日本 Kobe 地震中采用 T 型排架结构的高架路段发生的震害更为严重, 地震不仅造成桥墩柱头出现混凝土压碎、鼓筋等破坏现象, 而且发生了落梁、倒塌等少见的严重破坏现象。混凝土高架道路的震害所引发的震后交通困难则比结构本身破坏造成更大经济损失^[1]。

目前基于力学原理的结构抗震分析方法只能反映单体结构或工程系统的直接地震损失。系统中单体结构震害所造成的系统性风险及系统间接损失则难以得到反映。生命线工程系统在地震中的系统性风险研究

收稿日期: 2008- 06- 15 修订日期: 2009- 06- 16

基金项目: 上海市科学技术委员会重点基础研究资助项目 (04JC14035)

作者简介: 陈玲俐 (1972-), 女, 副教授, 博士, 主要从事工程结构和工程系统抗震研究. E-mail: CLLZGY@Tom.com

起步很晚,目前采用的方法有系统故障树分析方法^[2]、系统拓扑结构分析方法(连通分析)^[3]、和系统功能分析方法^[4]几大类。系统故障树具有结构清晰、分析结果直观、便于系统管理人员利用等许多优点,对单元强耦合系统采用故障树分析方法较为合适,目前核电站风险分析多采用此方法。但是,生命线工程系统中的单元组织较松散,耦合关系也不明确,首先建立系统故障树较为困难。其次,不同系统由于拓扑结构差异、单元组织关系不同,一个系统的故障树不具有向其它差异系统推广再利用价值,其分析结论对不同系统是否具有参考价值存在争议。

系统拓扑结构分析方法是一种基于网络结构拓扑理论,通过单元风险直接确定系统风险大小的一种方法,可细分为系统冗余度分析、连通分析等。系统拓扑结构分析方法的数学推理严密,计算费用远低于其他两类方法。但是,系统拓扑结构分析方法只能反映系统的几何特征,不能充分反映系统的物理特征(如道路系统的拥挤度、电力系统的潮流变化、供水系统的水力损失等)。其次,目前的连通分析将单元破坏概率直接对应单元的物理连通状态^[3],这种做法缺少理论依据和现实支持。最后,连通分析不能用于一些高冗余度网络系统,如欧洲路网的震后系统风险多表现为通行能力降低,而非连通性降低。

美国学者在生命线工程系统抗震研究中多采用系统功能分析方法。早在 1981 年,Shinozuka 采用供水管网水力分析模型模拟了城市供水系统震前震后的水压、流量分配状态的变化。系统单元在地震中破坏及破坏状态的随机性则采用 Monte Carlo 模拟来确定系统中各单元的工作状态。

1 交通系统抗震性能分析方法

系统的抗震性能由系统中单元状态、单元抗震性能、单元状态对系统功能影响模型等多个因素共同决定。在城市交通系统中系统单元包括路段、桥梁、隧道、地铁及交通指挥控制设施设备。

地震对城市交通系统的影响与系统单元震害状态存在直接关系,地震中单元的破坏状态越严重通行能力越差。2000 年 Hwang 等对混凝土高架道路和桥梁结构的破坏状态划分如表 1 所示:

表 1 钢筋混凝土高架道路和桥梁结构的破坏状态^[5]

Table 1 Destructive states of RC elevated line and bridge structures

状态	破坏形态描述
D_0 完好	结构无破坏
D_1 轻微破坏	桥台轻微开裂;桥台剪力键开裂;铰链轻微开裂;柱装饰面层有轻微剥落;桥面板轻微开裂
D_2 中等破坏	柱中等开裂、剥落,但是未出现结构抗力退化;桥台发生中等位移(5.08 cm);剪力键及连接件和转动栓严重开裂剥落;没有锚固的钢筋失效;转动支座失效或发生中等沉降
D_3 严重破坏	柱退化而未倒塌,抗剪失效,属于危险结构;接头处有明显残余变形;发生大的沉降;接头处不同支座的桥台垂直偏移;支座处的剪力键失效
D_4 完全倒塌	柱倒塌,上部结构失去支撑,导致桥面板立即坍塌;地基失效导致下部结构倾斜

单元抗震性能分析的目的是通过分析手段预测地震作用下单元结构处于何种状态,或者单元结构处于每种状态的概率。烈度为 I 的地震作用下,结构状态可以表示为:

$$\text{若 } D \leq D_{i1}, \text{ 单元处于完好状态 } D_0, \quad (1a)$$

$$\text{若 } D_{i1} < D \leq D_{i+1}, \quad i = 1 \sim 3 \text{ 单元为第 } D_i \text{ 种状态}, \quad (1b)$$

$$\text{若 } D > D_{i4}, \text{ 单元处于完全破坏状态 } D_4, \quad (1c)$$

其中, D_i 为结构破坏指标,是结构破坏状态的分界值,反映结构抗力的大小。 D 为单元结构的地震反应值,可以采用结构弹塑性时程反应分析法、Push-over 方法、能力谱法等非线性分析方法计算确定^[6]。

结构破坏指标有多种,分别反映结构承载能力、变形能力和耗能能力,对此的详细讨论可以参见文献^[7]。1997 年美国加州结构工程联合会 (SEAOC) 和美国的联邦危机管理委员会 (FEMA) 颁布的建筑物抗震维修规范中采用结构关键构件的极限层间转角作为结构破坏指标,见图 1。当关键构件的截面尺寸和材料确定时,选定合适的材料本构关系由条带法可以确定构件转角-荷载曲线。这种方法大大简化了结构破坏指标计算难度,适用于高架道路这种传力路径明确的结构形式。

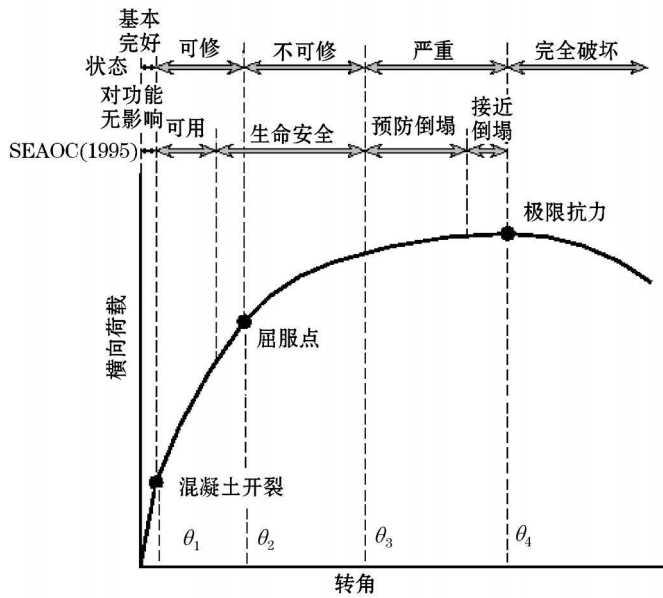


图 1 结构破坏状态与结构性能参数的对应关系^[8]

Fig 1 Corresponding relationship between destructive state and performance parameters of structure

对于高架道路而言,单元关键构件为桥墩。烈度为 I 的地震作用下,单元结构发生第 i 种或更严重破坏状态的概率称为单元震害率。高架道路单元的震害率为:

$$P(D_i|I) = \sum_{j=1}^i P(\theta_j) P(D \geq \theta_j), \quad i = 1 \sim 4 \quad (2)$$

由于工程系统中单元数目众多、结构形式多样,在工程系统抗震分析中除了个别关键单元或特殊单元外,单元破坏状态或震害率很少采用公式(1), (2),通过计算结构破坏指标和结构地震反应来确定。国内外针对建筑物、桥梁、管线、设备等各类单元提出了许多单元震害直接估算模型。多数模型基于实际震害统计数据^[9],还有一些是基于半经验半理论方法。由于选用的震害数据不同,目前在国际上存在多种混凝土高架道路和桥梁的震害率估算模型。本文在实例分析中采用了由实际震害调查数据统计得到的高架道路震害率曲线^[10],在下一节中结合分析实例给出。

计算单元破坏状态的目的是为了确定单元对系统性能的影响大小。2004年 Zhou,^[11] Seligson 等人均采用表 2 来反映路段单元破坏状态对路段通行速度的影响。

表 2 道路破坏状态与道路通行状态的关系^[11]

Tab 2 Relationship between destructive state and passage state of road

路段破坏状态	路段残余交通容量百分比 $\%$	车辆自由速度变化率 $\%$
无破坏	100	100
轻微破坏	100	75
中等破坏	75	50
严重破坏	50	50
倒塌	50	50

道路通行时间对震后消防和医疗救护的成效影响很大。在美国等发达国家,道路的通行时间被作为交通系统抗震性能的衡量指标。道路交通容量、车辆自由速度与道路实际交通负荷决定了道路的通行时间,

$$t_i = t_i^0 \left[1 + \alpha \left(\frac{x_i}{C_i} \right)^\beta \right] \quad (3)$$

上式中, t_i 为车辆通过 i 路段所花费的时间; t_i^0 为车辆以自由速度 V_0 通过 i 路段所花费的时间, $t_i^0 = l_i / V_0$; x_i 为 i 路段平均车流量,即道路交通负荷,采用路网的交通流分析可以估算出来; C_i 为该路段的交通流可容流量。 α β 为模型参数,文献[12]中取 $\alpha = 0.15$ $\beta = 4.0$ 意味着当路段流量达到路段可容流量时,交通时间延

长 15%。

至此, 城市交通系统抗震性能分析完整流程如下:

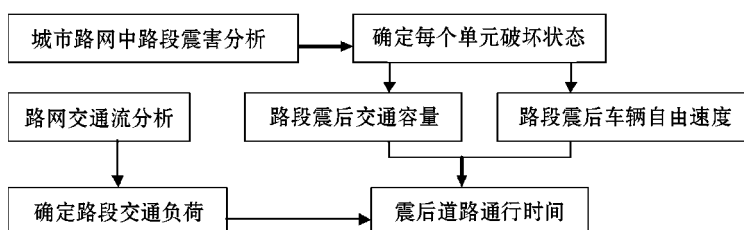


图 2 交通系统抗震性能分析流程图

Fig 2 Flow chart for earthquake resistance behavior analysis of traffic system

2 上海市高架道路系统抗震分析

高架道路单元震害率曲线可以用对数正态分布函数拟合, 方程为

$$P(D_i | PGA) = \Phi[\ln(PGA), C_i, \sigma_i], \quad (4)$$

式中: D_i 为第 i 种破坏状态; PGA 为地震峰值加速度 (g), C_i 为结构发生第 i 种或更严重破坏状态超越概率均值, σ_i 为对应破坏状态超越概率的标准差。按照常规设计的混凝土高架道路震害率曲线的参数 C_i 和 σ_i 取值见表 3。

表 3 混凝土高架道路震害率曲线的参数^[13]

Table 3 Parameters of earthquake damage curve of RC elevated line

均值和标准差	轻微破坏 D_1	中等破坏 D_2	严重破坏 D_3	倒塌 D_4
C_i	0.64	0.80	1.25	2.55
σ_i	0.70	0.70	0.70	0.70

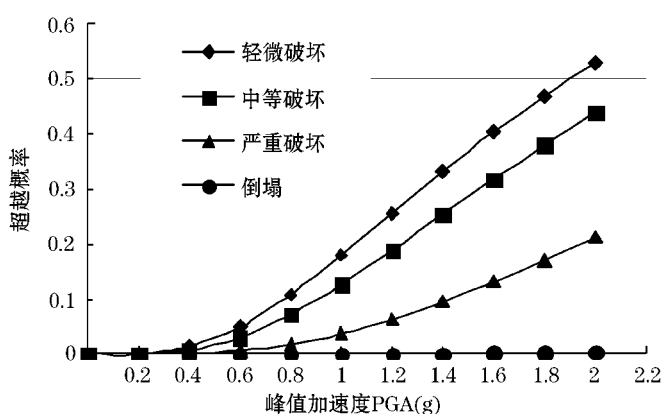


图 3 混凝土高架路段震害率曲线

Fig 3 Earthquake damage curves of RC elevated section

在路网中从一个节点到相邻下一个节点的路段一般由 n 个高架道路结构组成。路段在地震作用下的破坏概率为

$$P_f(D_i) = 1 - e^{-R_{R_i} \cdot n}, \quad (5)$$

式中, n 为组成高架路段的结构单元数量, 对标准路段 n 等于路段长度除标准跨度; R_{R_i} 为结构对应 D_i 状态的概率,

$$R_{R_i} = P(D_i | PGA) - P(D_{i+1} | PGA), \quad i = 1, 2, 3 \quad (6a)$$

$$R_{R4} = P(D_4 | PGA). \quad (6b)$$

由式 (4)和图 3得,高架道路结构在 $PGA = 0.2g$ 时 $R_{R1} = 0.000367$; $R_{R2} = 0.000267$; $R_{R3} = 0.000022$; $R_{R4} \approx 0$ 。 $PGA = 0.4g$ 时 $R_{R1} = 0.006$; $R_{R2} = 0.0061$; $R_{R3} = 0.000985$; $R_{R4} \approx 0$ 。将单体结构震害率代入式 (5)得到一定烈度下各路段的破坏概率。

由表 2可以得到震后各路段通行能力为:

$$C_E = C_R \cdot [1 - 0.25 \cdot P_f(D_2) - 0.5 \cdot P_f(D_3) - P_f(D_4)] \quad (7)$$

震后各路段自由通行速度为

$$V_{OE} = V_0 \cdot [1 - 0.25 \cdot P_f(D_1) - 0.5 \cdot P_f(D_2) - 0.5 \cdot P_f(D_3) - P_f(D_4)] \quad (8)$$

其中, C_R 为道路通行能力, V_0 为道路设计车速。对于上海市内环区域高架道路系统 C_R 和 V_0 的值见表 4。路网拓扑结构及各路段长度和平均交通负荷流量见图 4。由于地震不会改变城市交通方式,假定震后道路交通负荷不变,震后各路段通行时间变化情况见表 5。

表 4 上海市内环区域高架道路系统概况^[14]

Table 4 General situation of elevated Line system in inner endless area of Shanghai Municipality

分类	内环高架	南北高架	延安东路高架	延安中路高架	延安西路高架	逸仙路高架	沪闵高架
设计车速 V_0 (km/h)	80	60	60	80	80	80	80
单向通行能力 (pcu/h)	3 000	4 200	4 200	4 200	4 500	4 500	4 500

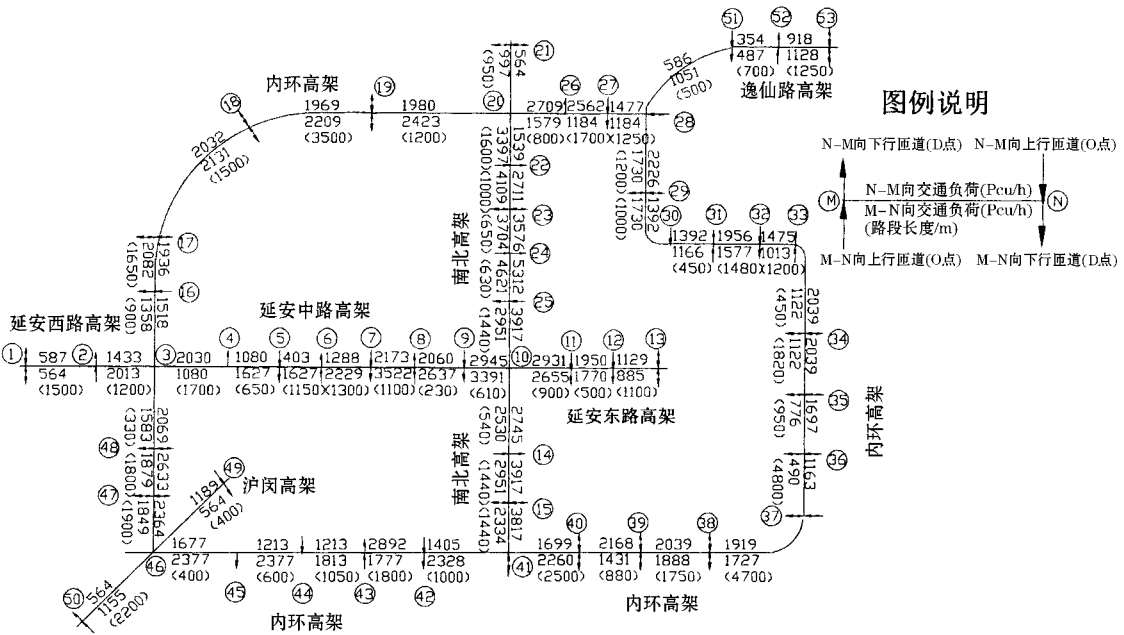


图 4 上海市内环区域高架道路系统图

Fig 4 Elevated line system drawing for inner endless area of Shanghai Municipality

将表 5 中各路段通行时间变化值除以道路长度可以发现震后各路段单位长度通行时间变化值差异很大,与路段破坏概率、实际交通负荷、路段设计速度、设计容量均有关系。

震前该高架道路系统通行时间均值为 61s/km, 标准差 9.6s/km; $PGA = 0.2g$ 时,系统通行时间均值为 65.4s/km, 标准差 10.1s/km; $PGA = 0.4g$ 时,系统通行时间均值为 81.2s/km, 标准差 19.7s/km。由于道路左右两个方向交通负荷有所差异,将一段道路分成左行、右行分别统计时,系统道路左行、右行通行时间差别很小。

从实例分析结果中可见 $PGA = 0.2g$ 时,系统单位长度平均通行时间增加 7.2%; $PGA = 0.4g$ 时,系统单位长度平均通行时间增加 33.1%。系统通行时间的标准差反映了系统各部分通行状态是否协调一致。标准差越大说明系统各部分通行状态的协调性越差,越难形成稳定的交通流。上面的分析结果说明地震不仅导致系统通行时间增加,而且破坏系统交通流的稳定性。

表 5 震后上海市内环区域高架道路系统通行时间增加值

Table 5 Passage time increment of elevated line system in inner endless of Shanghai Municipality after earthquake

路段 左右 节点	时延				路段 左右 节点	时延				路段 左右 节点	时延			
	PGA = 0.2g		PGA = 0.4g			PGA = 0.2g		PGA = 0.4g			PGA = 0.2g		PGA = 0.4g	
	左行	右行	左行	右行		左行	右行	左行	右行		左行	右行	左行	右行
W 1-2	7	7	26	26	10-14	1	1	5	4	20-26	3	2	10	8
2-3	5	5	21	19	14-15	10	8	42	36	26-27	11	9	49	38
3-4	9	11	38	46	15-41	8	7	35	27	27-28	5	5	21	20
4-5	1	2	5	6	41-42	5	4	18	15	28-29	6	5	22	20
5-6	4	5	14	18	42-43	16	13	74	56	29-30	3	4	13	14
6-7	6	7	22	27	43-44	5	4	18	15	30-31	1	1	2	2
7-8	5	6	19	23	44-45	2	1	6	5	31-32	8	8	33	31
8-9	0	0	1	1	45-46	1	1	3	2	32-33	5	5	19	18
9-10	2	2	6	7	46-47	14	16	65	74	33-34	1	1	3	2
10-11	5	5	19	18	47-48	13	15	58	70	34-35	12	11	52	44
11-12	1	1	5	4	48-3	0	0	2	2	35-36	3	3	12	10
12-13	5	5	20	19	49-46	1	1	2	2	36-37	64	58	415	363
21-20	3	3	10	11	50-46	14	15	60	67	37-38	66	68	439	456
20-22	9	12	37	51	3-16	3	3	11	10	38-39	11	11	46	48
22-23	4	5	17	21	16-17	10	10	42	41	39-40	3	3	10	11
23-24	2	2	8	8	17-18	8	8	34	35	40-41	21	23	99	109
24-25	2	2	10	9	18-19	40	42	225	235	51-28	1	1	3	3
10-25	1	1	5	4	19-20	5	6	21	23	52-51	2	2	5	5
										53-52	5	5	20	19

由于地面交通系统道路等级低于高架道路,地面交通通过高架道路的下行匝道影响高架道路交通流。为了简化分析,以上分析结果没有考虑地面交通系统对高架道路系统的不利影响,系统实际通行时间长于以上分析结果。

参考文献:

[1] Shinozuka M, et al Performance of highway network systems under earthquake damage[C] // Proceedings of the Second International Workshop on Mitigation of Seismic Effects on Transportation Structures Taiwan, Sep. 13- 15, 2000 303- 317.

[2] Johnson P. Fault tree analysis of bridge failure due to scour and channel instability[J]. ASCE, Journal of Infrastructure Systems 1999 5(1): 35 - 41

[3] 何军. 生命线工程网络系统抗震可靠度分析方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2002

[4] Wemer S D, et al A risk - based methodology for assessing the seismic performance of highway systems[R]. Report MCEER- 00- 0014, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, University at Buffalo, 2000, Dec. 31

[5] Hwang H, et al Seismic fragility analysis of highway bridges[R]. Technical Report Center for Earthquake Research and Information, University of Memphis Memphis TN, 2000.

[6] Howard H, et al Evaluation of seismic damage to Memphis bridges and highway systems[J]. Journal of Bridge Engineering 2000 5(4): 322- 330

[7] 楼思展, 叶志明, 陈伶俐. 框架结构房屋地震灾害风险评估[J]. 自然灾害学报, 2005, 5(5): 99- 105

[8] Vision 2000 Committee Performance based seismic engineering of buildings[R]. Structural Engineers Association of California (SEAOC). Sacramento California USA. 1995

[9] Basoz N, Kreneljian AS Evaluation of bridge damage data from the Loma Prieta and Northridge California earthquake[C] // Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Technical Report MCEER- 98- 0004. State University of New York, Buffalo, NY, U SA. 1998

[10] Fajfar P, Gaspercic P. The N2 method for the seismic damage analysis of RC buildings[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 1996 25(1): 31- 46

[11] Zhou Youwei et al Seismic risk assessment of retrofitted transportation systems[M] // 13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver B C., Canada Aug 1- 6 2004 Paper No 1128

[12] Ortuzar J D, Williamson L G. Modeling Transport Second Ch 10 Assignment[M]. John Wiley and Sons Chichester, England 1999 287- 321

[13] Shinozuka et al Fragility analysis for transportation network systems under earthquake damage[M] // Second MIT Conferences on Fluid and Solid Mechanics Cambridge MA, USA. June 17- 20 2003

[14] 上海市人民政府. 上海市城市交通白皮书[M]. 上海: 上海人民出版社, 2002