

文章编号: 1000-1301(2003)01-0095-08

近断层地震动作用下钢筋混凝土桥墩的抗震性能

王东升¹, 冯启民², 翟桐¹

(1. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 青岛海洋大学, 山东 青岛 266071)

摘要: 通过对满足规范延性要求的 12 根典型钢筋混凝土桥墩试件的线性和非线性地震反应分析, 指出在近断层地震动作用下满足延性需求与延性能力比小于 1.0 的桥墩仍可能发生严重破坏和倒塌, 若考虑桥墩的地震损伤性能, 允许的延性需求与延性能力比不宜超过 0.6~0.8。讨论了桥墩延性抗震设计中强度折减系数 R_{μ} 和设计基底剪力系数 BSC 取值问题。

关键词: 钢筋混凝土桥墩; 近断层地震动; 延性; 损伤指数; 地震动强度指标

中图分类号: P315.9

文献标识码: A

Performance of reinforced concrete bridge piers subjected to near-fault ground motions

WANG Dong-sheng¹, Feng Qi-min², ZHAI Tong¹

(1. Institute of Engineering Mechanics, China Seismological Bureau, Harbin 150080, China;

2. Qingdao University of Ocean, Qingdao 266071, China)

Abstract: Ductile behavior and damage performance of RC bridge piers designed by using Chinese Highway Engineering Seismic Design Code (JTJ004-89) are evaluated by elastic/inelastic time history analysis when they are subjected to near-fault ground motions. The ductility capacities of 12 piers included in the study all were test by quasi-static cyclic loading previously. It is found that piers with ductility demand/capacity ratio less than 1.0 may sustain heavy damage and even collapse. If damage performance is considered, the ductility demand/capacity ratio should not exceed the range in value from 0.6 to 0.8. The reduced coefficient and the design shear coefficient for ductile seismic design of RC bridge piers subjected to near-fault ground motions are also discussed.

Key words: reinforced concrete bridge piers; near-fault ground motions; ductility; damage index; ground motion intensity indices

1 引言

1999 年台湾集集地震造成大量的现代化桥梁结构损毁, 断层引起的地面错动和近断层地震动是其主要原因。上溯至 1995 年日本 Kobe 地震, 1994 年美国 Northridge 地震, 大量桥梁的破坏除结构本身的原因外, 近断层强烈地震动作用仍是重要的影响因素。其地震动特点表现为水平和竖向加速度峰值都很大, 在速度波形上可见明显的长周期脉冲波形, 特别是垂直断层破裂方向分量(图 1)。

鉴于上述震害经验, 近来关于近断层地震动及其对结构地震反应影响的研究工作明显增多^[1-4]。1989

收稿日期: 2002-11-12; 修回日期: 2003-01-10

基金项目: 地震科学联合基金资助(101056)

作者简介: 王东升(1974-), 男, 副研究员, 博士, 从事桥梁抗震研究。

年 Loma Prieta 地震之后,美联邦公路委员会(FHWA)与地震工程研究中心(MCEER)开展了合作研究项目“新建公路设施的地震易损性”,在研究地震竖向力对桥梁结构地震反应影响问题中考虑了结构与发震断层的距离^[5]。R. L. Mayes 等^[6]分析了按 Caltrans 桥梁抗震设计规范(建议稿)设计的钢筋混凝土桥墩在近断层地震动作用下的抗震性能,提出了若干需要注意的问题。P. K. Malhotra^[7]研究了具有速度脉冲波形的近断层地震动对建筑结构反应的影响,指出较高的峰值速度 PGV 与峰值加速度 PGA 比值延长了反应谱的加速度敏感区,从而提高了中高层结构的基底剪力需求、层间位移需求和延性需求,也降低了附加阻尼的减震效果。A. K. Chopra 等^[8]研究了近断层地震动的弹塑性谱,认为 Newmark 提出的弹塑性谱仍然适用,只是短周期、中长周期和长周期的界限不同。台湾学者廖文义等^[9]研究了近断层地震动作用下钢筋混凝土连续梁桥的地震反应,指出与远场地震动相比,它明显增大了桥墩的延性需求和强度需求。他们还研究了在近断层地震动作用下隔震支座桥梁的地震反应,认为 PGV/PGA 比值对隔震效果影响较明显^[10]。在规范方面,美国统一建筑规范(UBC97)针对近断层地震动问题进行了特殊规定,采用近断层调整系数来提高设计反应谱值。日本在其 1996 年颁布的桥梁抗震设计规范中规定了两类地震作用,其中第二类便考虑了类似 Kobe 地震的强震近场效应^[11]。

我国现行的《公路工程抗震设计规范》(JTJ004-89)仅针对发震断层提出了选择桥位的避让原则,同时说明“当桥位无法避开发震断层时,宜将全部墩台布置在断层的同一盘(最好是下盘)上”,并建议采用低墩小跨的简支梁桥方案。在计算分析方面,并未针对近断层地震动作出特殊规定。由此本文采用时程分析方法,研究了满足现行规范延性要求的钢筋混凝土桥墩在近断层地震动作用下的抗震性能,包括延性和地震损伤性能两个方面。

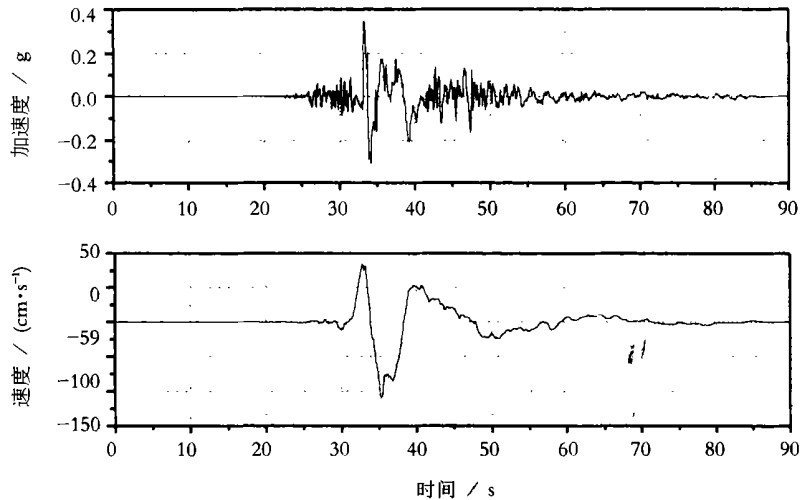


图1 典型的近断层地震记录

2 输入地震动和桥墩分析模型

2.1 输入地震动

输入地震动包括台湾集集地震(Ms7.6)中记录到的6条近断层地震动和4条依《公路工程抗震设计规范》(JTJ004-89)(以下简称规范)反应谱生成的人造地震动,输入地震动加速度峰值全部调整为0.3g。选择的近断层地震动全部为垂直于断层破裂方向分量(EW方向),场地卓越周期 $T=0.4\sim 0.6$ s,土层剪切波速 $\nu=180\text{m/s}\sim 360\text{m/s}$,近似符合我国规范规定的III类场地。表1给出了它们的峰值、到断层距离以及PGV/PGA比值等参数。

表1 输入近断层地震动

记录名称	峰值		到断层距离 /km	PGV/PGA /s	70%能量持时 /s
	PGA/g	PGV/(cm·s ⁻¹)			
TCU052	0.348	159.0	184.42	0.46	10.7
TCU054	0.148	59.4	59.42	0.40	15.0
TCU068	0.566	176.60	324.11	0.31	7.6
TCU075	0.333	88.3	86.45	0.27	20.0
TCU076	0.303	62.6	31.47	0.21	18.2
TCU102	0.298	112.4	89.19	0.38	11.9

人造地震动拟合反应谱按规范 III 类场地选取, 强度包线函数 $\phi(t)$ 按 $M_7.5$ 地震近断层附近并结合项海帆和陈国强提出的规范化的人造地震动考虑^[12,13]。人造地震动总持续时间 $t_3 = 30\text{s}$ (规范化的人造地震动建议取为 20s) 以兼顾实际记录 TCU075 和 TCU076 的 70% 能量持时接近 20s 情况。图 2 给出了 6 条实际地震动平均放大系数反应谱与规范 III 类场地谱的比较, 可以看出在长周期范围 ($T > 0.6\text{s}$), 近断层地震动反应谱衰减较缓慢, 并且谱值明显大于规范设计反应谱谱值。

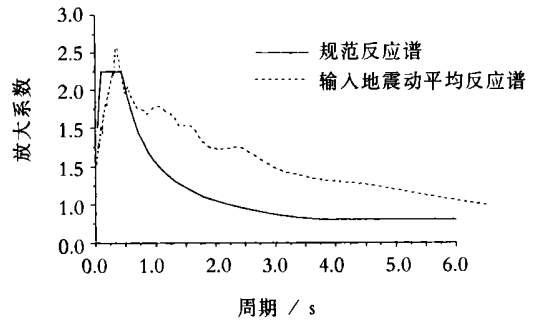


图 2 输入近断层地震动平均反应谱与规范反应谱

2.2 钢筋混凝土桥墩分析模型

卓卫东^[14]在公路钢筋混凝土桥梁柱式桥墩设计情况调查基础上, 选择混凝土标号、含箍率、纵筋配筋率和轴压比 4 个基本参数, 利用正交设计法设计了 16 根钢筋混凝土桥墩试件, 通过低周反复荷载试验评估了按现行规范要求设计的桥墩的延性性能, 认为延性系数 $\mu \geq 5$ 时才能与现行规范规定的延性设计水平 (以综合影响系数表示) 相当。本文主要是研究满足现行规范延性要求的钢筋混凝土桥墩在近断层地震动作用下的抗震性能, 6 因此选择卓卫东 16 根试件中延性系数 $\mu > 5$ 的 12 根试件进行分析, 具有一定的代表性和典型性。

钢筋混凝土桥墩采用以 Takeda 滞变模型描述恢复力 - 位移关系的梁柱单元模拟。墩顶集中质量按轴压比计算并加上 1/4 倍的桥墩质量。单元初始刚度 $K_1 = P_y / \delta_y$, P_y 为试件水平屈服力, δ_y 为水平屈服位移, 见文献 [14]; 屈服后刚度 $K_2 = 0.05K_1$ 。阻尼为瑞利阻尼, 阻尼比 $\xi = 0.05$ 。计算时直接对模型试件进行非线性地震反应分析, 依据地震模拟试验 (使用原型材料的人工质量模型) 相似律要求^[15], 按相似比换算原型桥墩的反应。在本文中假定模型长度相似比 $l_r = 1/5$, 即相当于原型桥墩高 5m , 截面尺寸为 $1\text{m} \times 1\text{m}$, 相应的时间相似比 $t_r = l_r^{0.5} = 0.4472$, 据此调整输入地震动的时间轴。延性系数 μ 和损伤指数 D 为无量纲参数, 相似比为 1.0。

表 2 给出了桥墩计算模型的参数。为讨论问题方便, 表 2 还给出了基底剪力系数 BSC (定义为水平屈服力 P_y 与墩顶集中重力 W 之比); 以及原型桥墩的有效周期 T_{eff} 和弹性周期 T_e , 前者由开裂截面刚度 K_1 计算, 后者由全截面弹性刚度计算。从表 2 可以看出, 分析桥墩对应的基底剪力系数 BSC 在 0.12 到 0.36 之间, 有效周期 T_{eff} 在 0.52s 到 0.85s 之间, 弹性周期 T_e 在 0.38s 到 0.60s 之间。另外, 所分析桥墩全部满足 7 度抗震设防要求 ($BSC \geq 0.10$), 除 11 号和 16 号桥墩外, 基本满足 8 度抗震设防要求 ($BSC \geq 0.17$)。

表 2 桥墩 (试件) 计算模型参数

桥墩编号	水平刚度 $K_1 / (\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1})$	墩顶集中质量 W / kN	基底剪力系数 (BSC)	有效周期 T_{eff} / s	弹性周期 T_e / s
1	3.05	78.6	0.23	0.72	0.38
2	5.15	117.4	0.17	0.68	0.47
3	5.44	156.2	0.17	0.76	0.56
4	5.44	195.0	0.17	0.85	0.60
5	5.18	145.8	0.15	0.75	0.54
7	5.32	73.4	0.36	0.53	0.38
8	5.77	109.6	0.22	0.62	0.47
11	5.05	166.0	0.12	0.81	0.54
12	5.85	111.0	0.19	0.62	0.42
13	5.72	136.6	0.23	0.69	0.47
14	5.22	91.4	0.26	0.59	0.38
16	6.15	181.8	0.12	0.77	0.56

3 钢筋混凝土桥墩抗震性能

3.1 钢筋混凝土桥墩的延性

(1) 延性需求 μ_d

延性需求 μ_d 定义为反应的墩顶最大位移 δ_m 与墩顶屈服位移 δ_y 之比。图 3 给出了延性需求 μ_d 随基底剪力系数 BSC 变化情况,其中 μ_d 分别取为 6 条近断层地震动和 4 条人造地震动计算结果的平均值(余下同)。

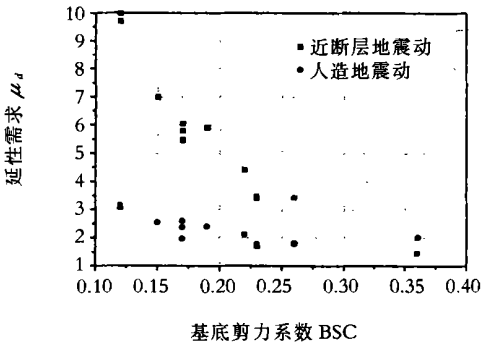


图 3 延性需求与基底剪力系数关系

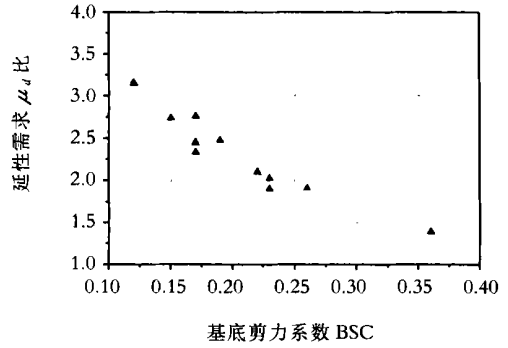


图 4 近断层地震动和人造地震动延性需求比

近断层地震动作用显著提高了桥墩的延性需求,特别是在基底剪力系数较小情况下。随基底剪力系数的增加,桥墩地震反应延性需求降低,近断层地震动作用下情况更为明显,并且逐步与人工地震动作用下的延性需求趋于一致。图 4 给出了近断层地震动和人工地震动作用下延性需求 μ_d 的比值随基底剪力系数 BSC 变化情况,比值约在 1.5~3.0 之间,随基底剪力系数 BSC 增加,几乎呈线性降低。

图 5 给出了延性需求 μ_d 随桥墩有效周期 T_{eff} 变化情况,与基底剪力系数 BSC 相比, T_{eff} 对延性需求影响规律不明显,总体上看似乎随 T_{eff} 增长,延性需求有所提高。图 6 给出了近断层地震动和人工地震动作用下延性需求 μ_d 的比值随桥墩有效周期 T_{eff} 变化情况。需说明的是在本文的研究中,桥墩有效周期 T_{eff} 提高是通过增加墩顶集中质量 W 来实现的,这在一定周期范围内显然会增加桥墩的延性需求,增加桥墩高度情况会怎样还需要进一步分析。

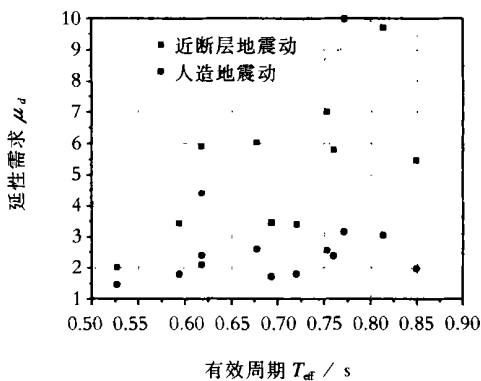


图 5 延性需求与桥墩有效周期关系

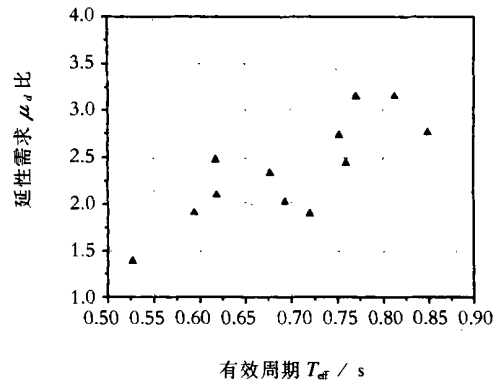


图 6 近断层地震动和人造地震动延性需求比

(2) 延性需求与延性能力比 (μ_d/μ_c)

延性能力 μ_c 取为文献[14]试验结果。图 7 给出了桥墩延性需求与延性能力比随基底剪力系数 BSC 变化情况。

在人工地震动作用下,延性需求与延性能力比最大为 0.5 左右,随基底剪力系数增加而逐步降低;在近断层地震动作用下,延性需求与延性能力比最大为 1.8 左右,随基底剪力系数增加而显著降低并与人工地震动作用时情况相当。当基底剪力系数 $BSC \geq 0.17$,即桥墩满足 8 度抗震设防时,在加速度峰值为 0.3g 的近

断层地震动作用下,桥墩延性需求与延性能力比 < 1.0, 认为满足延性抗震要求。最后强调的是基底剪力系数 BSC 实际上反映了钢筋混凝土桥墩的强度抗震设防要求,在近断层地震动作用下使桥墩具备一定的强度储备是合理的,可一定程度上降低显著提高的延性需求。

(3) 强度折减系数 R_μ

设由弹性地震反应分析算得的地震力为 F_e , 则弹塑性地震力 F_p 可表示为:

$$F_p = \frac{F_e}{R_\mu} \quad (1)$$

式中, R_μ 称为强度折减系数, 反映了结构的延性抗震能力。

依 Newmark 和 Hall 的研究^[16], R_μ 可写成下式:

$$\begin{cases} 1 & T < T_a \\ \sqrt{2\mu - 1.0} & T_b < T < T_c' \\ \mu & T > T_c \end{cases} \quad (2)$$

式中, $T_c' = (\sqrt{2\mu - 1.0}/\mu) \cdot T_c$; μ 为结构的延性系数; T 为结构弹性周期; T_a, T_b, T_c 分别对应于短周期结构、中长周期结构和长周期结构。式中后两者就是实际中较常应用的等能量准则和等位移准则。

A. K. Chopra 等^[8]通过对各 15 条近断层地震动和远场地震动的统计分析,发现式(2)仍适合于近断层地震动作用情况,只是 T_a, T_b, T_c 取值不同。他们建议对远场地震动 T_a, T_b 和 T_c 分别取为 0.025s, 0.22s 和 0.42s, 而对近断层地震动 T_a, T_b 和 T_c 则分别取为 0.04s, 0.35s 和 0.79s, 比较明显的变化是扩大了等能量准则的适用周期范围。下面利用计算的桥墩反应对上述结论作一验证。

图 8 给出了桥墩非线性反应的墩顶最大位移 δ_m 与弹性反应的墩顶最大位移 δ_e 之比随有效周期 T_{eff} 变化情况。对人造地震动作用情况,桥墩有效周期 T_{eff} 在 0.50s 到 0.85s 之间时, δ_m/δ_e 很接近 1.0, 即等位移准则成立。从这点上讲, 本文研究采用的人造地震动很大程度上代表了远场地震动情况, 尽管在合成时考虑了 M7.5 近断层附近这一地震因素。对近断层地震动情况, δ_m/δ_e 仅有一座桥墩 ($T_{eff} = 0.53s$) 近似为 1.0, 其它全部 > 1.0, 最大接近 2.0, 数据亦相当离散。

注意到所分析桥墩的有效周期 T_{eff} 在 0.50s 到 0.85s 之间, 依 A. K. Chopra 的研究, 在近断层地震动作用下等能量准则成立, 则:

$$\frac{\delta_m}{\delta_e} = \frac{\mu}{R_\mu} \quad (3)$$

式中, R_μ 为强度折减系数, $R_\mu = \sqrt{2\mu - 1.0}$ 。

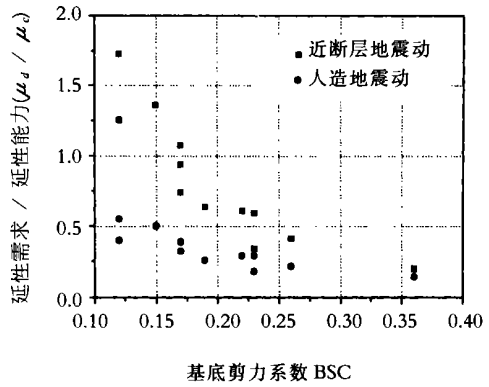


图 7 延性需求与延性能力之比与基底剪力系数的关系

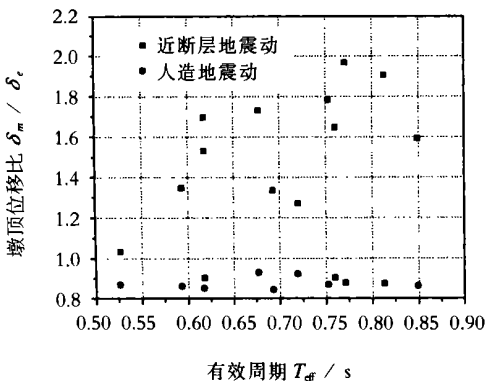


图 8 桥墩非线性与弹性地震反应墩顶最大位移比

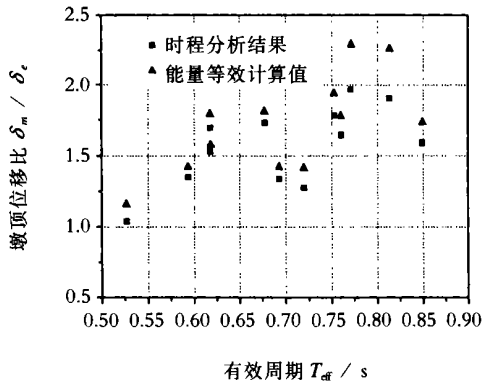


图 9 能量等效计算结果与时程分析比较

图 9 给出了近断层地震动作用下由时程分析得到的 δ_m/δ_e 与按式(3)计算的 δ_m/δ_e 随有效周期 T_{eff} 变化

情况,可以看出二者基本一致,并且按能量等效计算结果偏于安全,说明周期 T_{eff} 在 0.50s 到 0.85s 范围内,对近断层地震动作用等能量准则适用。

卓卫东通过试验,认为钢筋混凝土桥墩位移延性系数 μ 至少应为 5 才能与现行规范规定的综合影响系数取值相适应^[14]。这样的话若考虑近断层地震动效应,其设计强度应提高到原来的 $\frac{\mu}{\sqrt{2\mu-1.0}} = 1.6$ 倍才可以与现行规范要求相一致。

3.2 钢筋混凝土桥墩地震损伤性能

以上分析表明大多数桥墩(9座)在近断层地震动作用下延性需求 μ_d 小于延性能力 μ_c ,即满足延性抗震要求。下面进一步分析其地震损伤性能,采用作者提出的改进的 Park - Ang 双参数地震损伤模型计算^[17]。

改进的 Park - Ang 双参数地震损伤模型为:

$$D = (1.0 - \beta) \frac{\delta_m - \delta_y}{\delta_u - \delta_y} + \beta \frac{\sum \beta_i E_i}{Q_y (\delta_u - \delta_y)} \quad (4)$$

式中, D 为损伤指数; δ_m 为地震作用下构件的最大变形; δ_u 为单调荷载作用下构件的极限变形; δ_y 为构件的屈服位移; Q_y 为构件屈服强度; β 为组合参数; E_i 为第 i 个滞回圈所包围的面积(即滞回耗能); β_i 为能量项加权因子,由下式计算:

$$\beta_i = \begin{cases} \gamma_E & \mu_i \leq \mu_0 \\ \gamma_E + \frac{\mu_i - \mu_0}{\mu_p - \mu_0} (1.0 - \gamma_E) & \mu_i > \mu_0 \end{cases} \quad (5)$$

式中, γ_E 为能量等效系数,可取一小值(如 0.1 或更小); μ_i 为构件当前时刻最大位移对应的“延性系数”; μ_0 为临界位移延性系数; μ_p 为单调荷载作用下构件的位移延性系数。本文分析时临界位移延性系数 μ_0 取为 1.5,能量等效系数 γ_E 取为 0.10,组合参数 β 取为 0.20,单调荷载作用下的位移延性系数 μ_p 取为文献[14]试验结果的 1.2 倍。

表 3 给出了在人造地震动和近断层地震动作用下桥墩破坏等级的统计结果。在人造地震动作用下,大多数桥墩发生轻微到中等的可修复破坏,未发生严重破坏或倒塌;而在近断层地震动作用下,桥墩 3 座严重破坏,5 座倒塌,占分析数量的 2/3。表 3 的统计数据说明一个问题:即按现行规范设计满足延性要求的钢筋混凝土桥墩,在遭遇到与设防烈度一致的“远场”地震动作用时能够保证处于“中震可修”破坏状态,但在近断层地震动作用下部分桥墩可能处于严重或倒塌破坏状态。

表 3 钢筋混凝土桥墩破坏情况统计

输入地震动	破坏等级					合计
	完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	倒塌	
人造地震动	4(33%)	5(42%)	3(25%)	0(0%)	0(0%)	12(100%)
近断层地震动	1(8%)	1(8%)	2(17%)	3(25%)	5(42%)	12(100%)

单位:座

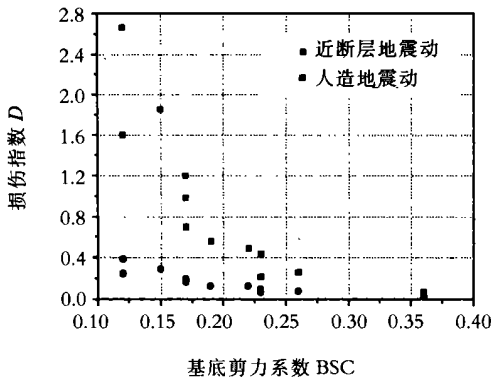


图 10 损伤指数与基底剪力系数关系

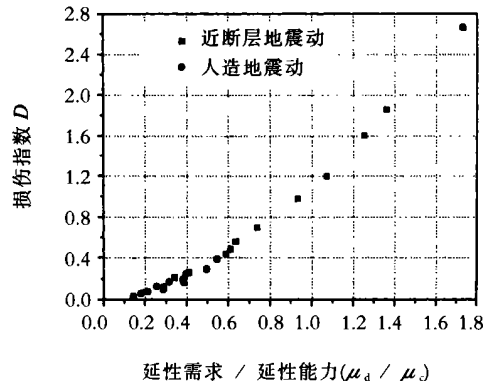


图 11 损伤指数与延性需求 / 延性能力的关系

图 10 给出了计算的损伤指数随基底剪力系数 BSC 变化的情况, 同样可以看出损伤指数随基底剪力系数 BSC 增加而降低, 近断层地震动作用下降低更为显著。图 11 给出了计算的损伤指数随延性需求与延性能力(μ_d/μ_c)比变化情况, 近断层地震动和人造地震动作用情况似乎没有差别。当损伤指数 $D=0.4$ 时, 桥墩接近发生不可修复破坏, 此时 $\mu_d/\mu_c \approx 0.6$; 当损伤指数 $D=0.8$ 时, 桥墩接近倒塌, 此时 $\mu_d/\mu_c = 0.8$ 。这说明桥墩抗震设计延性需求 μ_d 不宜超过 $0.6 \sim 0.8$ 倍的延性能力 μ_c , 若延性能力 $\mu_c = 5.0$, 则允许延性需求 $\mu_d \approx 3.0 \sim 4.0$ 。

3.3 钢筋混凝土桥墩反应与地震动强度指标

如何合理地确定地震动强度指标(ground motion intensity indices)以定量表示地震动对结构的破坏能力一直是地震学者和工程师们努力解决的问题。对近断层地震动, 学者们倾向于采用峰值速度 PGV 和峰值加速度 PGA 之比作为地震动强度指标。

本文以延性需求 μ_d 和损伤指数 D 作为钢筋混凝土桥墩地震反应的量化描述, 定性分析它们与地震动强度指标的相关性。地震动强度指标选择 PGV/PGA 和 Housner(1952)提出的谱烈度 SI, 对后者近来一些研究表明 SI 与中周期结构的最大位移反应、结构地震输入能和结构滞回耗能具有较好的相关关系^[18,19]。谱烈度 SI 的定义为:

$$SI = \int_{0.1}^{2.5} S_v(T, \xi) dT \tag{6}$$

式中, S_v 是阻尼比为 ξ (取为 0.05)的单质点体系的相对速度反应谱; T 为周期。

图 12 和图 13 分别给出了在 6 条近断层地震动输入下, 钢筋混凝土桥墩的延性需求 μ_d 和损伤指数 D 与 PGV/PGA 的关系, 可以看出它们之间具有一定的相关趋势。

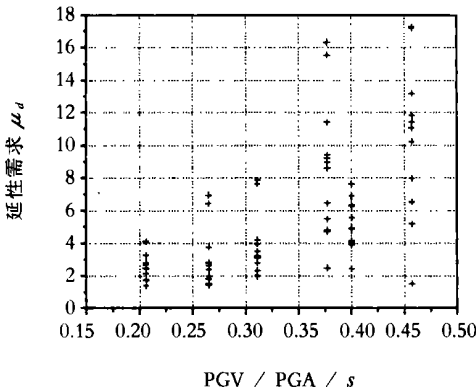


图 12 桥墩延性需求与 PGV / PGA 关系

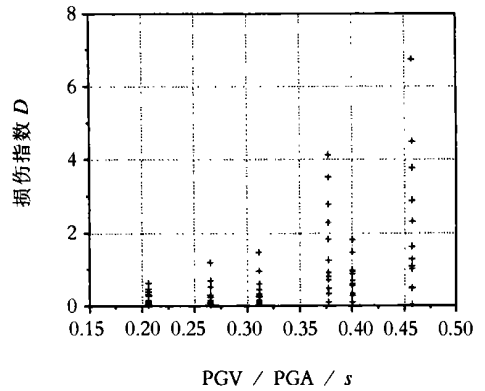


图 13 桥墩损伤指数与 PGV / PGA 关系

图 14 和图 15 分别给出了在 6 条近断层地震动输入下, 钢筋混凝土桥墩的延性需求 μ_d 和损伤指数 D 与 SI 的关系, 可以看出 SI 与桥墩反应亦具有相关趋势, 但弱于 PGV/PGA。

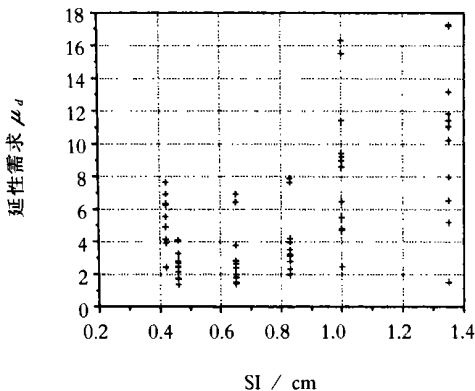


图 14 桥墩延性需求与 SI 的关系

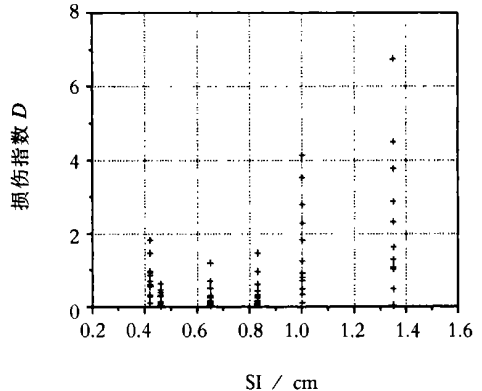


图 15 桥墩损伤指数与 SI 的关系

4 结论

通过对满足规范延性要求的 12 根典型钢筋混凝土桥墩试件的线性和非线性地震反应分析,研究了在近断层地震动作用下钢筋混凝土桥墩的延性和地震损伤性能。限于分析工作中的诸多局限性,初步获得如下认识:

(1) 近断层地震动作用显著提高了桥墩的延性需求,可以通过提高设计基底剪力系数 BSC 来降低其延性需求。

(2) 近断层地震动作用下有效周期 T_{eff} 在 0.50s 到 0.85s 之间的桥墩,线性和非线性墩顶最大位移反应满足等能量准则,而不是等位移准则。这就意味着在同等延性条件下,近断层地震动作用会提高桥墩的强度需求。对延性系数 $\mu = 5$,其强度需求将提高到“远场”地震动作用下的 1.6 倍。

(3) 在近断层地震动作用下满足延性需求与延性能力比小于 1.0 的桥墩仍可能发生严重破坏和倒塌,若考虑桥墩的地震损伤性能,容许的延性需求与延性能力比不宜超过 0.6~0.8。

(4) 可以采用峰值速度 PGV 和峰值加速度 PGA 之比作为近断层地震动强度指标。

参考文献:

- [1] Chopra A K, C Chintanapakdee. Drift Spectrum vs. Modal Analysis of Structural Response to Near - Fault Ground Motion[J]. Earthquake Spectra, 2001,17(2):221 - 234.
- [2] Filiatrault A, Tremblay R, Wanitkorkul A. Performance Evaluation of Passive Damping Systems for the Seismic Retrofit of Steel Moment - Resisting Frames Subjected to Near-Field Ground Motions[J]. Earthquake Spectra, 2001,17(3):427 - 452.
- [3] Macrae G A, Morrow D V, Roeder C. Near-Fault Ground Motion Effects on Simple Structures[J]. Journal of Structure Engineering, ASCE, 2001,127(9):996 - 1004.
- [4] Jangid R S, Kelly J M. Base Isolation for Near-Fault Motions[J]. Earthquake Eng. Stru. Dyn. 2001, 30: 691 - 707.
- [5] C. Rojahn, R. Mayes, D. G. Anderson, et al. Impact Assessment of Selected MCEER Highway Project Research on the Seismic Design of Highway Structures[R]. University at Buffalo, State University of New York, MCEER Report: 99 - 0009.
- [6] Mayes R L, Shaw A. The Effects of Near - Fault Ground Motions on Bridge Columns[R]. University at Buffalo, State University of New York, NCEER Report: 96 - 0010, pages 319 - 340.
- [7] Malhotra P K. Response of Building to Near - Field Pulse-Like Ground Motions[J]. Earthquake Eng. Stru. Dyn. 1999,28:1309 - 1326.
- [8] Chopra A K, Chintanapakdee C. Comparing Response of SDF System to Near-fault and Far - Fault Earthquake Motions in the Context of Spectra Regions[J]. Earthquake Eng. Stru. Dyn. 2001, 30:1769 - 1789.
- [9] Wen - I Liao, Chin-Hsiung Loh, Shiu-an Wan, et al. Dynamic Response of Bridge Subjected to Near - Fault Ground Motions[J]. Journal of the Chinese Institute of Engineers, 2000,23(4):455 - 464.
- [10] 廖文义, 罗俊雄, 万绚. 隔震桥梁承受近断层地震之反应分析[J]. 地震工程与工程振动(国际结构控制与健康诊断专辑), 2001, 21(4):95 - 102.
- [11] 范立础, 王君杰. 桥梁抗震设计规范的现状与发展趋势[J]. 地震工程与工程振动, 2001, 21(2):70 - 77.
- [12] 胡聿贤. 地震安全性评价技术教程[M]. 北京:地震出版社, 1999.
- [13] 项海帆, 陈国强. 规范化的人工地震动[J]. 同济大学学报, 1985, (4):1 - 11
- [14] 卓卫东. 桥梁延性抗震设计研究[D]. 上海:同济大学, 2000.
- [15] 张敏政. 地震模拟试验中相似律应用的若干问题[J]. 地震工程与工程振动, 1997, 17(2):52 - 58.
- [16] Newmark N M, Hall W J. Earthquake Spectra and Design[R]. EERI, Berkeley, 1982.
- [17] 王东升. 钢筋混凝土梁式桥地震破坏研究[D][博士论文]. 中国地震局工程力学研究所, 2002(9).
- [18] Takeshi K, Yoshito I. Correlation between Nonlinear Response of Bridge Piers and Natural Period Dependent Spectrum Intensity[A]. 12WCEE [C], New Zealand, 2000, Reference NO. 0806.
- [19] Riddell R, Garcia J E. Hysteretic Energy Spectrum and Damage Control[J]. Earthquake Eng. Stru. Dyn. 2001,30:1791 - 1816.
- [20] 叶献国. 地震强度指标有效性的客观评价方法[A]. 第五届全国地震工程会议论文集[C], 北京, 1998.
- [21] JTJ004 - 89 公路工程抗震设计规范[S].