

唐山地区基岩地震动峰值衰减特征研究¹

孙丽娜¹⁾ 齐玉妍¹⁾ 吕国军¹⁾ 彭远黔¹⁾ 郭秋娜¹⁾ 田丽²⁾

1) 河北省地震局, 石家庄 050021

2) 石家庄建设集团有限公司, 石家庄 050021

摘要 基于搜集的唐山地区的强震记录数据, 采用考虑地震动峰值加速度、近距离和震级的三种衰减模型, 然后利用数理统计回归的方法对这些模型的结果进行了对比和分析, 获得了唐山地区基岩场地峰值加速度衰减关系。并用2012年5月28日的唐山4.8级地震对此衰减关系进行了验证。

关键词: 峰值加速度 回归分析 衰减关系

引言

众所周知, 地震动衰减关系在地震危险性评价等工作中起着非常重要的作用, 也是编制地震动区划图的关键一环。地震动参数衰减规律为重大工程结构抗震设计提供了科学合理的抗震设防参数, 对工程建设具有十分重要的意义(金星等, 2008)。目前, 国内外采用两种方法得到地震动衰减关系:

一种是地震动参数统计法, 它适用于强震资料比较丰富的地区, 如美国西部、日本。20世纪70—80年代, 一些学者已经从地震动参数(峰值参数 a_{pg} , v_{pg} , d_{pg} , 反应谱)的统计衰减规律、场地条件对地震动参数的影响、衰减模型以及回归分析方法等几个方面, 对地震动的衰减关系进行了深入的研究(Trifunca, 1976; Mcguire等, 1980)。近年来, 随着全球强震观测台网的迅速扩大, 强地震动参数衰减的研究发展到考虑多因素影响的综合分析, 如区分发震断层类型(Sadigh等, 1997)、上下盘效应(Somerville等, 1997)等, 这些研究成果大大丰富了人们对地震动参数衰减规律物理本质的认识。

另一种是烈度地震动换算法, 它适用缺乏强震观测资料地区的地震动参数的估计, 如胡聿贤(1988)的烈度震级法和田启文等(1986)的烈度距离法。

由于地震动参数衰减规律与区域的地震地质构造特征有密切关系, 不同地区的地震动特征及其衰减规律通常是不同的。国内外的研究表明, 不同国家或地区的地震动特征都有一定的差别(郭玉学等, 1990)。所以, 研究某一地区的地震动衰减规律, 力求反映该地区的区域特征就显得特别重要。

自唐山地区发生1976年大地震后, 至今地震不断, 是地震多发区, 现今地震记载丰富,

1 基金项目 河北科技支撑计划项目(编号11276905D)资助

[收稿日期] 2012-12-07

[作者简介] 孙丽娜, 女, 生于1982年。硕士。主要从事地震危险性研究。E-mail: sunlina20082008@126.com

而其强震记录也比较丰富, 这为充分利用现有的地震资料研究本地区的地震动衰减规律创造了条件。本文通过对唐山及周边地区强震台记录的唐山地区强震的强地面运动数据的分析, 利用数理统计回归法得到了唐山地区地震动衰减关系。

1 地震动衰减模型的确立

地震动衰减经验关系的建立需要以大量的观测资料为基础。受震源特性、传播路径及场地条件等因素的影响, 地震动衰减关系呈现出较强的地区差异性, 有必要针对不同的区域建立不同的地震动衰减关系。

本文选用三种衰减模型, 分别进行了回归统计分析。这三种模型为:

$$(1) \lg Y = C_1 + C_2 M + C_3 R \quad (\text{胡聿贤, 2006}) \quad (1)$$

式中, Y 为峰值加速度; M 为地震震级; R 为震中距 (km); C_1 — C_3 为待求的系数。

$$(2) \lg Y = C_1 + C_2 M + C_3 M \lg(R + R_0) + C_4 \lg(R + R_0) \quad (\text{崔建文, 2006}) \quad (2)$$

式中, Y 为峰值加速度; M 为地震震级; R 为震中距 (km); R_0 为近场饱和因子; C_1 — C_4 为回归的系数。

$$(3) \lg Y = C_1 + C_2 M + C_3 M^2 + C_4 \lg[R + R_0(M)] + C_7 R \quad (3)$$

$$R_0(M) = C_5 \exp(C_6 M) \quad (\text{卢寿德, 2006}) \quad (4)$$

式(3)和式(4)中, Y 为峰值加速度; M 为地震震级; R 为震中距 (km); $R_0(M)$ 为近场饱和因子; C_1 — C_7 为待求的系数。对式(3)进行统计回归时, 采用二次回归的方法进行统计, 式(4)中 $R_0(M)$ 简称 R_0 。

首先, 对同一个地震活动区而言, 只要发生相同震级的地震, 就把它视为同一次地震。在震级相同的情况下, $(C_1 + C_2 M + C_3 M^2)$ 和 R_0 为常数, 利用多元线性回归法进行回归, 在回归过程中对 R_0 做一个简单的搜索, 即当回归方差最小时, 就可得到同一次地震的 R_0 值, 这样对多次地震就可以得到一组和震级相对应的 $R_0(n)$ 、 $M(n)$ (张振斌等, 2010), 然后将式(4)线性变换为:

$$\ln(R_0) = C_6 M + \ln(C_5) \quad (5)$$

再用线性回归法, 利用式(5)回归出系数 C_5 和 C_6 。确定了 C_5 和 C_6 后, 将其带入式(3)中, 多元线性回归统计出系数 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_7 。

本文对以上三种模型, 采用多元线性回归拟合得到地震动的峰值加速度随震级和震中距变化的规律。上述式中距离项系数与震级有关, 表示不同震级的衰减率会有所差异, 代表了不同震级时地震波几何扩散和非弹性衰减的综合影响。

2 数据基础

以强震观测资料为基础确定地震动参数的衰减规律是强震记录的重要应用之一, 是估计地震动参数的直接方法。为满足课题研究需求, 广泛收集了京津冀地区强震台站及其强震记录资料。本文选取1976年至今的有强震记录的唐山地区的地震数据, 主要以1976年唐山地震序列的强震记录为依据, 资料中包括三个方向。在选取加速度峰值参数时, 取两个水平向的矢量合成值作为水平向峰值, 垂直向峰值即垂直向的记录值。

在进行数据分析拟合之前, 对数据进行了初步分析和优化。按照表1的震级分档, 线性

拟合震中距和峰值的关系, 舍弃对线性结果有影响的数据。通过对唐山强震资料的筛选, 选择线性关系比较好且可靠的数据。依据这样的原则, 选取基岩水平向记录 169 条, 基岩垂直向记录 168 条。表 2 中列出了本文所用的强震数据。

表 1 震级分档表

Table 1 Classification of earthquakes with magnitude

震级范围	震级	震级范围	震级
≤1.5	1	4.6—5.5	5
1.6—2.5	2	5.6—6.5	6
2.6—3.5	3	6.6—7.5	7
3.6—4.5	4	7.6—8.5	8

表 2 唐山地区强震记录资料

Table 2 Strong motion records data in Tangshan area

时间	震中位置	震级	台站名称	震中距 (km)	EW(cm/s ²)	NS(cm/s ²)	UD(cm/s ²)
1976-7-28	唐山	7.8	红山	391.25	15.004	7.235	4.71
1976-8-2	唐山余震	4.6	迁安滦河桥	10.91	13.332	19.780	8.142
1976-8-3	唐山余震	4.2	迁安滦河桥	13.85	42.815	59.316	14.846
1976-8-3	唐山余震	4.8	迁安滦河桥	8.20	20.671	21.836	7.913
1976-8-5	唐山余震	4.2	迁安滦河桥	13.37	12.406	18.705	6.69
1976-8-7	唐山余震	4.1	迁安滦河桥	11.05	22.115	21.314	6.493
1976-8-8	唐山余震	5.5	唐山水泥厂	33.96	12.932	19.901	12.325
1976-8-8	唐山余震	5.5	迁安滦河桥	26.37	41.859	54.856	17.98
1976-8-8	唐山余震	5.5	昌黎凤凰山	48.61	9.751	9.067	9.116
1976-8-9	唐山余震	5.7	昌黎凤凰山	31.14	29.215	33.692	26.5
1976-8-9	唐山余震	5.7	唐山水泥厂	63.82	4.710	4.098	3.201
1976-8-9	唐山余震	5.7	迁安滦河桥	3.84	150.393	158.621	79.044
1976-8-14	唐山余震	4.1	迁安滦河桥	7.95	28.181	66.004	15.419
1976-8-14	唐山余震	4.6	迁安滦河桥	10.66	26.369	29.877	16.196
1976-8-14	唐山余震	4.5	迁安滦河桥	8.12	63.818	87.980	27.331
1976-8-15	唐山余震	5	迁安滦河桥	12.20	39.665	55.912	33.226
1976-8-15	唐山余震	4.8	唐山水泥厂	15.42	21.240	12.570	11.252
1976-8-15	唐山余震	4.8	唐山水泥厂	21.56	16.049	18.511	7.307
1976-8-16	唐山余震	4.8	迁安滦河桥	15.94	36.193	25.359	13.549
1976-8-18	唐山余震	4.4	唐山水泥厂	42.61	28.547	22.813	9.213
1976-8-23	唐山余震	3.6	迁安滦河桥	8.07	30.904	61.057	15.377
1976-8-26	唐山余震	4.9	唐山水泥厂	2.01	50.984	71.415	无记录

续表

时 间	震中位置	震级	台站名称	震中距 (km)	EW(cm/s ²)	NS(cm/s ²)	UD(cm/s ²)
1976-8-26	唐山余震	3.5	迁安滦河桥	12.75	23.844	27.632	14.767
1976-8-28	唐山余震	4.2	迁安滦河桥	25.24	25.414	23.815	7.706
1976-8-28	唐山余震	5	迁安滦河桥	12.67	27.803	64.810	9.723
1976-8-31	唐山余震	5.8	迁安滦河桥	14.13	97.356	132.392	50.493
1976-8-31	唐山余震	5.8	昌黎凤凰山	22.11	26.412	33.244	25.746
1976-8-31	唐山余震	5.7	迁安滦河桥	11.32	118.909	113.391	59.121
1976-8-31	唐山余震	5.7	昌黎凤凰山	19.29	26.443	24.637	26.027
1976-8-31	唐山余震	5.1	迁安滦河桥	16.30	25.269	45.966	18.25
1976-8-31	唐山余震	4.2	迁安滦河桥	8.38	11.879	17.985	5.612
1976-8-31	唐山余震	4.3	迁安滦河桥	8.12	19.205	17.7	8.448
1976-9-2	唐山余震	5	迁安滦河桥	16.16	42.484	43.176	19.324
1976-9-7	唐山余震	5	迁安滦河桥	19.38	26.451	29.74	11.129
1976-9-7	唐山余震	4.5	迁安滦河桥	23.44	16.255	18.756	7.335
1976-9-25	唐山余震	5.4	迁安滦河桥	40.62	38.476	33.533	16.592
1976-9-29	唐山余震	5.3	迁安滦河桥	22.39	22.994	32.136	12.51
1976-10-1	唐山余震	5	迁安滦河桥	15.94	34.101	37.955	13.108
1994-9-3	陡河	1.6	井下台阵	28.46	5.010	6.398	6.15
1994-10-2	卢龙	3.6	井下台阵	24.78	7.366	8.131	3.963
1994-10-4	滦县	3.3	井下台阵	12.42	17.942	21.438	10.02
1994-10-24	滦县	2.5	井下台阵	2.80	18.443	13.155	36.193
1994-10-24	古冶	4	井下台阵	26.08	6.929	4.039	9.895
1994-12-17	滦县	2.7	井下台阵	11.75	1.509	1.480	3.264
1994-12-29	沙河驿	2.7	井下台阵	15.28	5.472	8.311	12.847
1995-1-8	沙河驿	2.3	井下台阵	16.39	1.656	2.627	1.69
1995-1-11	沙河驿	2.3	井下台阵	16.81	2.255	1.771	1.749
1995-2-7	古冶东	2.7	井下台阵	12.88	20.492	13.673	10.689
1995-3-2	沙河驿	2.7	井下台阵	19.66	2.571	1.724	1.94
1995-3-30	滦县	2.2	井下台阵	16.18	4.103	2.882	2.8
1995-5-6	滦县	2.3	井下台阵	13.59	8.088	3.669	4.366
1995-5-13	滦县	1.7	井下台阵	14.18	2.630	2.371	3.087
1995-5-20	滦县	2	井下台阵	7.17	1.330	1.645	3.03
1995-6-23	古冶	3.5	井下台阵	29.67	2.603	3.854	2.869
1995-6-27	古冶	3	井下台阵	24.67	4.065	3.491	2.128
1995-6-27	卢龙	1.6	井下台阵	20.90	3.833	2.297	7.301

续表

时 间	震中位置	震级	台站名称	震中距 (km)	EW(cm/s ²)	NS(cm/s ²)	UD(cm/s ²)
1995-7-2	滦县	2.9	井下台阵	6.74	30.367	16.142	21.368
1995-7-5	滦县	2.3	井下台阵	8.68	3.126	2.767	3.705
1995-8-31	滦县	2.4	井下台阵	14.18	5.390	11.746	11.38
1995-9-13	滦县	2.2	井下台阵	9.81	3.152	5.049	3.219
1995-9-19	陡河	2.9	井下台阵	16.00	2.262	2.411	2.198
1995-9-20	滦县	3.8	井下台阵	29.55	6.575	6.412	7.492
1995-10-3	卢龙	2.9	井下台阵	19.28	5.114	4.977	3.377
1995-10-6	陡河东	5.9	井下台阵	25.05	47.932	37.622	61.08
1995-11-13	滦县西	3	井下台阵	11.72	7.716	8.746	17.97
1995-12-17	沙河驿	2.8	井下台阵	30.90	1.509	1.480	3.264
1996-2-25	滦县	1.8	井下台阵	11.75	5.362	2.309	2.119
1996-3-9	滦县	2.4	井下台阵	17.27	4.813	4.952	4.735
1996-3-14	滦县	2.1	井下台阵	10.22	1.292	1.318	1.207
1996-3-24	滦县	3	井下台阵	6.04	4.018	5.498	4.851
1996-3-25	卢龙	2.1	井下台阵	18.14	1.512	2.702	7.998
1996-4-4	滦县	2.1	井下台阵	9.04	3.170	3.758	4.769
1996-4-8	滦县	4.9	井下台阵	17.21	16.846	15.015	18.327
1996-4-9	滦县	3	井下台阵	11.39	9.619	11.050	30.805
1996-6-3	滦县	2.5	井下台阵	14.31	4.251	5.598	16.474
1996-6-23	滦县	2.4	井下台阵	5.75	1.697	1.470	1.369
1997-3-31	滦县	2.2	井下台阵	21.11	3.342	3.608	1.935
1998-10-5	滦县	2.7	井下台阵	4.49	35.560	27.825	26.616
1998-10-8	沙河驿	2.5	井下台阵	26.61	8.997	5.921	5.318
1998-10-10	滦县	2.3	井下台阵	16.81	7.174	5.854	7.004
1999-1-9	滦县	4.4	井下台阵	12.99	55.224	33.600	29.322
1999-1-9	滦县	2.6	井下台阵	6.53	10.194	6.007	4.215
1999-1-12	卢龙	2	井下台阵	19.12	7.176	2.738	4.131
1999-3-29	滦县	2.3	井下台阵	9.40	7.361	4.798	4.203
1999-9-7	滦县	2.1	井下台阵	13.68	2.878	2.568	2.372
1999-9-8	卢龙	1.4	井下台阵	30.07	4.162	3.975	3.431
1999-9-13	滦县	2.4	井下台阵	11.45	4.485	2.878	2.763
1999-12-21	滦县	3.2	井下台阵	14.24	5.200	6.049	2.826
2003-3-25	河北滦县	2.3	迁西	52.89	0.41	0.24	0.25
2003-4-15	河北唐山丰润	2	陡河	11.21	0.25	0.19	0.22

续表

时 间	震中位置	震级	台站名称	震中距 (km)	EW(cm/s ²)	NS(cm/s ²)	UD(cm/s ²)
2003-5-8	河北滦县	2.1	桃林口	51.23	0.16	0.22	0.13
2003-6-10	河北唐山	3	陡河	24.00	4.42	7.03	2.72
2003-6-11	河北迁安	2.2	桃林口	85.43	0.51	0.48	0.52
2003-6-14	河北迁安	2.2	迁西	52.90	0.44	0.33	0.12
2003-8-23	河北滦县	2.2	昌黎	29.15	0.23	0.11	0.16
2003-8-23	河北滦县	2.3	昌黎	34.75	0.28	0.82	0.51
2003-9-13	河北滦县	2.4	迁西	80.61	0.35	0.28	0.15
2003-9-21	河北滦县	2	迁西	78.00	0.15	0.14	0.09
2003-11-19	河北陡河	2.1	陡河	6.95	1.1	1.14	0.57
2003-11-30	河北陡河	2.2	陡河	7.21	0.37	0.35	0.28
2003-12-1	河北唐山	2.5	陡河	8.83	1.86	1.61	0.74
2003-12-29	河北唐山	2	迁西	61.23	0.09	0.06	0.05
2004-1-8	河北唐山	2.7	陡河	8.64	0.99	1.58	1.3
2004-1-20	河北滦县	2.4	昌黎	29.68	0.85	0.63	0.55
2004-1-20	河北滦县	2.1	昌黎	29.68	0.54	0.29	0.28
2004-2-5	河北滦县	2.5	斋堂	250.97	无记录	0.56	0.18
2004-3-13	河北丰南	2	陡河	9.99	0.19	0.36	0.12
2004-3-13	河北唐山	2.2	陡河	6.12	0.37	1.35	0.49
2004-3-15	河北陡河	3.3	陡河	7.47	9.3	5.21	4.41
2004-5-31	河北迁西	2	迁西	10.87	1.98	0.91	0.39
2004-6-2	河北唐山	2.6	陡河	14.99	1.61	1.18	0.85
2004-6-5	河北卢龙	2.4	昌黎	21.04	0.49	0.42	0.38
2004-7-3	河北滦县	2	陡河	21.20	0.18	0.2	0.11
2004-7-8	河北唐山	2	陡河	10.35	0.29	0.24	0.21
2004-7-12	河北滦县	2.6	昌黎	52.22	0.27	0.29	0.58
2004-7-30	河北滦县	2.2	昌黎	38.14	0.13	0.14	0.07
2004-8-2	河北陡河	2.3	陡河	8.64	1.23	0.86	0.49
2004-10-4	河北滦县	2.4	昌黎	31.72	0.24	0.23	0.39
2004-11-3	河北卢龙	2.1	迁西	49.60	0.13	0.17	0.08
2004-11-12	河北唐山	2.2	陡河	28.32	0.19	0.14	0.09
2005-1-14	天津宝坻	2.7	张家口	263.22	0.11	0.08	0.1
2005-1-25	河北滦县	2.2	昌黎	30.00	0.29	0.21	0.18
2005-1-29	河北唐山	3.4	陡河	8.19	2.72	5.52	2.04
2005-3-14	河北唐山	3.5	陡河	11.66	5.45	2.79	2.34

续表

时 间	震中位置	震级	台站名称	震中距 (km)	EW(cm/s ²)	NS(cm/s ²)	UD(cm/s ²)
2005-4-15	河北滦县	2.8	陡河	12.91	0.66	0.83	0.45
2005-4-29	河北滦县	2.3	昌黎	34.10	0.22	0.38	0.32
2005-5-12	河北滦县	2.1	昌黎	26.85	0.06	0.63	0.06
2005-5-21	河北滦县	2.8	陡河	11.63	1.16	2.01	1.01
2005-5-23	河北陡河	2	陡河	8.86	0.54	0.69	0.2
2005-5-25	河北滦县	2.3	昌黎	35.44	0.14	0.18	0.12
2005-6-24	滦县	1.2	滦县台	9.43	6.551	7.367	1.942
2005-6-24	河北滦县	2	昌黎	31.74	0.11	0.11	0.11
2005-6-25	河北陡河	2.8	陡河	7.02	0.63	0.5	0.48
2005-6-28	河北滦县	2.6	昌黎	34.46	0.28	0.68	0.55
2005-7-14	河北滦县	2	陡河	36.29	0.14	0.17	0.05
2005-8-15	滦县	1.2	滦县台	3.42	22.819	12.77	15.636
2005-8-16	河北唐山	2.2	陡河	33.17	0.07	0.09	0.07
2005-8-24	河北滦县	2	陡河	15.03	0.3	0.25	0.19
2005-8-30	滦县	1.2	滦县台	9.84	1.596	1.156	1.402
2005-8-30	河北滦县	2	昌黎	30.08	0.17	0.46	0.55
2005-9-22	河北唐山	2.1	陡河	9.66	0.18	0.18	0.19
2005-9-22	河北唐山	2.1	陡河	9.66	0.19	0.18	0.18
2005-10-4	卢龙	1.8	滦县台	19.12	8.464	16.806	8.046
2005-11-23	河北卢龙	1.9	昌黎	22.79	0.11	0.05	0.1
2006-1-4	滦县	1.4	滦县台	8.64	1.762	1.515	1.416
2006-2-15	滦县	0.6	滦县台	3.34	1.350	2.194	1.651
2006-4-16	河北唐山	2.3	陡河	6.17	0.47	0.83	0.56
2006-5-10	河北唐山	2.2	陡河	12.00	0.87	1.51	1.9
2006-5-14	河北滦县	2.4	陡河	18.03	0.29	0.39	0.41
2006-6-10	河北滦县	2.4	昌黎	37.87	0.18	0.27	0.3
2006-7-6	河北唐山	1.9	陡河	6.00	0.31	0.57	0.42
2006-8-18	河北青龙	2.5	迁西	66.28	0.13	0.25	0.27
2006-9-25	河北唐山	2.1	陡河	23.86	0.24	0.21	0.34
2006-11-12	滦县	3.1	滦县台	20.33	4.249	5.413	5.444
2006-12-27	河北唐山	2.4	陡河	6.12	0.9	1.6	2.14
2007-1-23	河北唐山	3.2	陡河	8.19	3.15	8.67	5.65
2007-2-7	河北宽城	2.9	宽城	27.06	3.17	4.13	3.16
2007-5-19	河北迁安	2.2	桃林口	16.45	0.73	1.74	1.57

续表

时 间	震中位置	震级	台站名称	震中距 (km)	EW(cm/s ²)	NS(cm/s ²)	UD(cm/s ²)
2007-9-30	河北迁安	2	桃林口	11.64	2.54	4.8	6.84
2007-10-2	河北卢龙	2.4	昌黎	16.51	1.12	1	1.06
2010-3-6	滦县	4.2	滦县台	20.35	3.500	0.800	2
2010-3-6	滦县	4.3	滦县台	21.17	9.468	11.274	7.393
2010-3-6	滦县	3	滦县台	20.33	2.388	2.388	1.656
2010-3-7	滦县	4.3	滦县台	113.76	9.468	11.274	7.393
2012-5-28	河北省唐山市市辖区、滦县交界	4.8	下营	107.16	11.100	9.700	3.5
2012-5-28	河北省唐山市市辖区、滦县交界	4.8	昌平下庄	193.79	1.46	3.41	4.92
2012-5-28	河北省唐山市市辖区、滦县交界	4.8	丰台航天医院	200.91	0.89	0.88	1.06
2012-5-28	河北省唐山市市辖区、滦县交界	4.8	凤凰岭救援基地台	211.06	1.6	3.32	4.4
2012-5-28	河北省唐山市市辖区、滦县交界	4.8	门头沟付家台	231.22	0.69	1.08	1.2

图 1 给出了本文所选用的基岩数据的震级 M_S 与震中距 R 的分布图。从图 1 中可以看出,震级和距离间存在明显的相关性,在中小地震时由于记录到的台站较少,只能在近场获取记录,而由于余震序列及强震台站布设时间的限制,记录到的强震记录多为 6 级以下地震。6 级以上的强震比较少,且多在远场,这样有时会造成近场记录的缺乏。因此在分析地震动衰减关系时考虑这种相关性的影响是必要的。

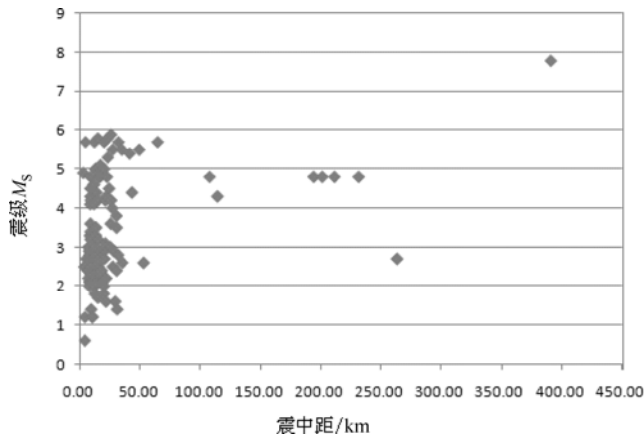


图 1 基岩场地地震(震级/震中距)分布图

Fig. 1 Plot of magnitude vs. epicenter distance from rock site

3 基岩地震动参数衰减关系的确定

对选用的基岩水平向峰值加速度记录数据和垂直向峰值加速度数据进行统计回归计算。

以下衰减关系式中 Y 为峰值加速度； M 为震级； R 为震中距； δ 为方差均值。

(1) 基岩水平向峰值加速度衰减关系

采用衰减模型式 (1)，计算得到基岩水平向峰值加速度衰减关系式为：

$$\lg Y = -0.6962 + 0.4898M - 0.0063R, \delta = 0.2627, R \text{ 复相关系数} = 0.7739$$

采用衰减模型式 (2)，确定 R_0 的取值，取方差最小时 R_0 的取值，通过统计结果比较，确定 R_0 取 2。计算得到基岩水平向峰值加速度衰减关系式为：

$$\lg Y = 0.6382 + 0.4689M + 0.0122M \lg(R+2) - 1.1458 \lg(R+2), \delta = 0.2175, R \text{ 复相关系数} = 0.8173$$

采用衰减模型式 (3)，计算得到基岩水平向峰值加速度衰减关系式为：

$$\lg Y = 1.9268 + 0.5898M - 0.0081M^2 - 1.9944 \lg(R + e^{2.3159 + 0.1237M}) + 0.0023R, \delta = 0.2175, R \text{ 复相关系数} = 0.8174。$$

(2) 基岩垂直向峰值加速度衰减关系统计结果

采用衰减模型式 (1)，得到基岩垂直向峰值加速度衰减关系式为：

$$\lg Y = -0.8151 + 0.4314M - 0.0057R, \delta = 0.3028, R \text{ 复相关系数} = 0.7069$$

采用衰减模型式 (2)，根据水平向衰减关系计算时 R_0 的取值，计算垂直向时 R_0 取 2。计算得到基岩垂直向峰值加速度衰减关系式为：

$$\lg Y = 0.6591 + 0.3493M + 0.0598M \lg(R+2) - 1.2415 \lg(R+2), \delta = 0.2597, R \text{ 复相关系数} = 0.7556$$

采用衰减模型式 (3)，计算得到基岩垂直向峰值加速度衰减关系式为：

$$\lg Y = 2.3451 + 0.5771M - 0.014M^2 - 2.305 \lg(R + e^{2.6966 + 0.0962M}) + 0.0035R, \delta = 0.2607, R \text{ 复相关系数} = 0.7544$$

4 三种衰减模型的对比分析与检验

通过三种模型的统计回归计算，得出相应的系数见表 3。

表 3 基岩衰减关系回归系数及标准差

Table 3 Regression coefficient and standard deviation of bedrock attenuation relationship

衰减关系		回 归 系 数							标准差	复相关系数	备注
		C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7			
模型 1	水平向	-0.6962	0.4898	-0.0063					0.2627	0.7739	
	垂直向	-0.8151	0.4314	-0.0057					0.3028	0.7069	
模型 2	水平向	0.6382	0.4689	0.0122	-1.1458				0.2175	0.8173	$R_0=2$
	垂直向	0.6591	0.3493	0.0598	-1.2415				0.2597	0.7556	
模型 3	水平向	1.9268	0.5898	-0.0081	-1.9944	$e^{2.3159}$	0.1237	0.0023	0.2175	0.8174	
	垂直向	2.3451	0.5771	-0.014	-2.305	$e^{2.6966}$	0.0962	0.0035	0.2607	0.7544	

从表 3 可以看出，这三种模型在水平向上，从模型 1 到模型 3 复相关系数是依次递增。在垂直向上，模型 2 的相关系数最高。

下面采用线性关系的 F 检验 (孙立宏, 2011)，对三种衰减模型统计回归的方程进行显著性检验。

线性关系的检验是检验自变量 X 与因变量 Y 之间的线性关系是否显著, 变量之间的关系能否用线性数学模型来表示。进行线性关系检验的步骤是:

(1) 建立原假设

H_0 : 线性关系不显著 (或 $\beta_1=\beta_2=\dots=\beta_n=0$)

可证明在原假设成立的情况下, F 统计量服从自由度为 1 和 $n-2$ 的分布, 即 $F \sim F(1, n-2)$ 。若有 K 个自变量 X , 则 F 统计量服从自由度为 k 和 $n-2$ 的分布, 即 $F \sim F(k, n-2)$ 。

确定显著性水平 α 和临界值 F_α : 一般取 0.05(0.01), 根据两个自由度查 F 分布表, 得出相应的临界值 F_α 。

(2) 检验结果

若 $F > F_\alpha$, 则拒绝 H_0 , 说明变量之间的线性关系显著性高; 若 $F \leq F_\alpha$ 则接受原假设, 说明变量之间的线性关系不显著。

对以上三种回归的衰减关系进行抽样检验, 分别对三种模型的水平向和垂直向的全部数据拟合的衰减关系式进行 F 检验。

(3) 建立原假设 H_0

两变量之间的线性关系不显著。取显著性水平 $\alpha=0.05$, 水平向合成峰值的数据样本量 $n=169$, 垂直向峰值的数据样本量 $n=168$ 。衰减模型 1 水平向的自由度为 (2, 169), 衰减模型 1 垂直向的自由度为 (2, 168); 衰减模型 2 水平向的自由度为 (3, 169), 衰减模型 2 垂直向的自由度为 (3, 168); 衰减模型 3 水平向的自由度为 (4, 169), 衰减模型 3 垂直向的自由度为 (4, 168)。查 F 分布表得临界值 F_α 。得到的检验统计对比见表 4。

表 4 三种模型的 F 检验对比表

Table 4 The F-test results of the three models

衰减关系		计算统计量 F	查 F 分布表得临界值 F_α
模型 1	水平向	123.9439	3
	垂直向	82.3806	3
模型 2	水平向	110.6315	2.6
	垂直向	72.7213	2.6
模型 3	水平向	82.4375	2.37
	垂直向	53.8296	2.37

从表 4 可以看出, 三种模型的水平向和垂直向的计算统计量 F 均大于 F 分布表临界值 F_α , 拒绝 H_0 , 说明这三种模型所对应的变量之间的线性关系是显著的, 即这三种模型的统计回归方程成立。

5 回归结果与实际结果比较分析

根据表 1 的震级分档, $M > 6$ 的记录只有 1 条, 记录太少, 无法做分析。所以, 图 2 和图 3 分别是这三种模型按照 $M=4$ 、 $M=5$ 和 $M=6$ 的震级分档, 将水平向和垂直向的峰值加速度实际资料与拟合的回归结果的对比情况。

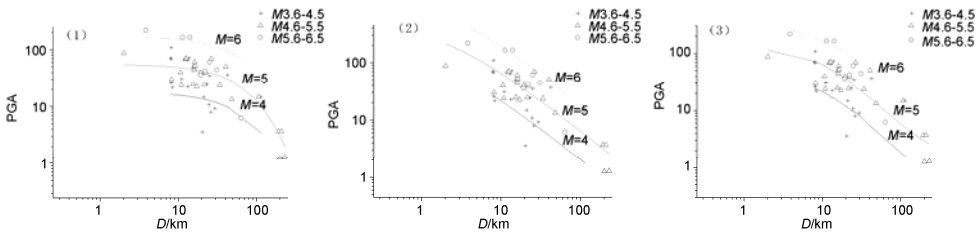


图 2 三种衰减模型水平向基岩回归与实际结果对比图

Fig. 2 The comparison of actual records (horizontal PGA) and calculated from horizontal bedrock regression with three attenuation models

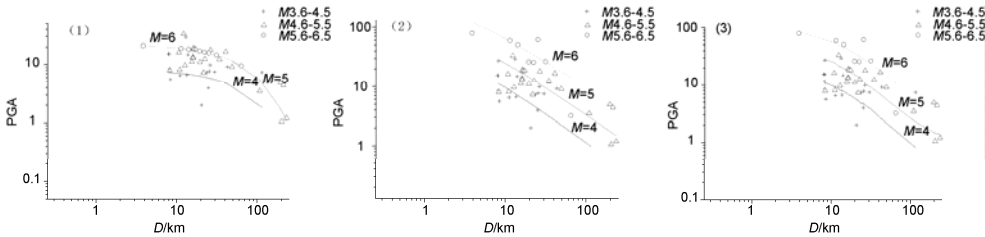


图 3 三种衰减模型垂直向基岩回归与实际结果对比图

Fig. 3 The comparison of actual records (vertical PGA) and calculated from horizontal bedrock regression with three attenuation models

图 2 和图 3 是将强震记录的实际观测资料的峰值加速值和三种衰减模型回归的衰减关系式计算的峰值绘制在一张图上进行对比分析。从图 2 和图 3 三种模型两个方向的对比图来看，模型 3 的结果对比图最好，记录结果与观测结果的衰减规律比较吻合。在此基础上，再结合计算三种模型关系式时的相关系数和标准差的对比情况和唐山地区的实际发震情况，本文认为衰减模型 3 比较切合实际，曲线和点的位置方向大致相同，且大部分点落在曲线间。因此建议唐山地区用衰减模型 3 回归计算出的衰减关系。

6 基岩水平加速度衰减关系的检验分析

(1) 唐山 4.8 级地震对本区衰减关系的检验

根据国家强震台网中心公布的 2012 年 5 月 28 日发生在河北省唐山市市辖区、滦县交界的 4.8 级地震的强震记录（国家强震台网中心，2012），提取水平向和垂直向峰值加速度。对这些数据进行线性分析后取本次地震获取的 87 组三分量加速度记录进行检验，而这次地震的震中距多集中在 51—263km。将这些强震数据与本文所建议的衰减关系曲线进行对比，结果如图 4 所示。

从图 4 中可以看出，衰减模型 3 曲线计算值与原始记录数据相比较衰减趋势一致，可以认为由衰减模型 3 得到的衰减关系具有很强的实用性。

(2) 本区基岩水平峰值加速度衰减关系与其他衰减关系的对比

本文将研究所得的唐山地区基岩水平峰值加速度衰减关系与地球物理研究所在山东海阳核电站场址地震安全评价报告（1998）中给出的华北地区地震动基岩水平加速度衰减关系（表 5）进行对比，结果如图 5 所示。

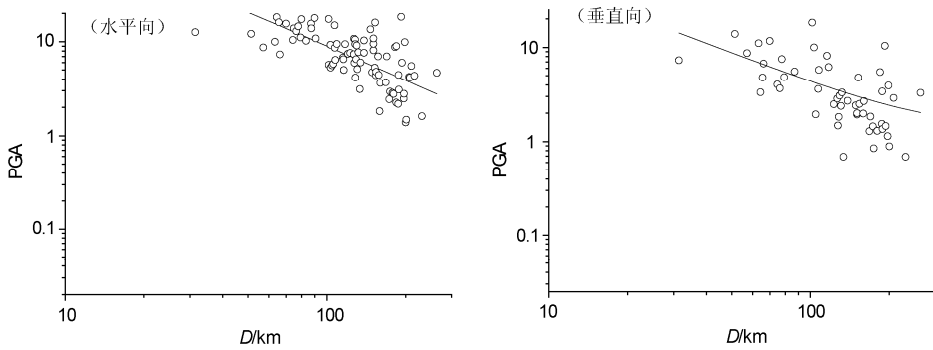


图 4 衰减模型 3 计算结果 (线) 与原始记录值 (点) 对比

Fig. 4 The contrast between calculated results from Attenuation model (line) to real record values (point)

表 5 华北地区基岩水平峰值加速度衰减关系式及系数

Table 5 The coefficient and relationship of bedrock horizontal peak acceleration attenuation in North China

$$\text{衰减关系式: } \lg Y = C_1 + C_2 M + C_3 M^2 + C_4 \lg [R + R_0(M)]$$

C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	备注
0.317	0.968	-0.026	-1.980	0.311	0.643	长轴
-0.319	0.923	-0.024	-1.677	0.094	0.732	短轴

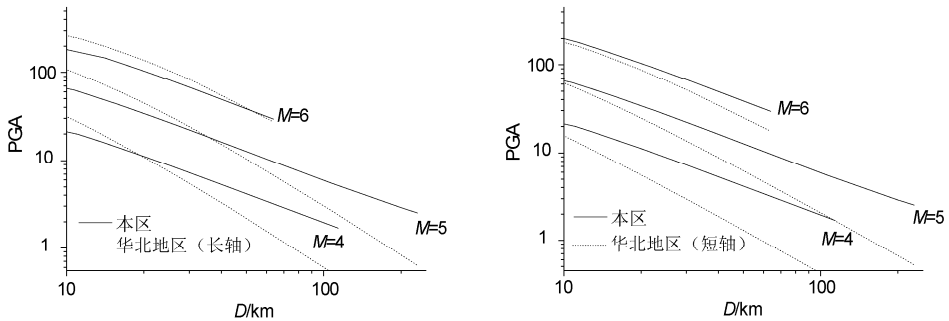


图 5 本区衰减关系与华北地区衰减关系的对比

Fig. 5 The Contrast of attenuation relationship of this study area and that of North China

从图 5 可以看出, 本区峰值加速度衰减曲线比华北地区短轴的偏高。华北地区长轴衰减曲线在震中距 $R > 20\text{km}$, 震级档 $M=4$ 和 $R > 30\text{km}$, 震级档 $M=5$ 时, 本区的比华北地区的偏高; 震级档 $M=6$ 时, 华北地区偏高。

7 结论

本文利用数理统计回归法对三种衰减模型进行了计算分析, 给出了比较适合唐山地区的基岩场地的加速度衰减关系。由于影响地震动参数的因素很多, 如强震资料的影响, 异常值的出现是难免的。但是, 本文通过对资料的分析 and 筛选, 所给出的水平加速度衰减规律, 在

已发生地震的强震数据验证下,与观测结果的衰减规律是一致的。因此,本文基于强震观测记录给出的唐山地区的地震动参数衰减规律,用于预测该地区的地震动参数是适宜的。

但是,由于本区所记录到的 6 级以上大震资料比较少,可能对统计的衰减关系有一定的影响,因此在今后的研究中,还需要进一步研究大震对唐山地区基岩峰值地震动衰减关系的影响。

参考文献

- 崔建文,李世成等,2006.云南分区地震动衰减关系.地震研究,29(4):386—391.
- 郭玉学,王国新,1990.华北地区基岩场地水平加速度的衰减规律.地震工程与工程地震,10(1):41—50.
- 国家强震台网中心,2012.<http://www.csmnc.net/selnewxj1.asp?id=778>.
- 胡事贤,1988.地震工程学.北京:地震出版社.
- 胡聿贤,2006.地震工程学(第二版).北京:地震出版社,110—111.
- 金星,康兰池,欧益萍,2008.福建地区中小地震地震动峰值衰减规律研究.地震学报,30(3):279—291.
- 卢寿德,2006.《工程场地地震安全性评价》宣贯教材.北京:中国标准出版社,57—58.
- 孙立宏,2011.回归数学模型的建立及其应用.职大学报,2:56—58.
- 田启文,廖振鹏,孙平善,1986.根据烈度资料估算我国地震动参数衰减规律.地震工程与工程振动,6(1):21—36.
- 张振斌,唐丽华,2010.新疆南天山地区土层场地地震动.中国地震,26(4):401—406.
- Mcguire R.K., Hanks T., 1980. RMS accelerations and spectral amplitudes of strong ground motion during the San Fernando, California earthquake. Bull. Seism. Soc. Amer., 7(5): 1907—1919.
- Sadigh K., Chang C.Y., Egan J.A., Makdisi F., Youngs R.R., 1997. Attenuation relationships for shallow crustal earthquakes based on California strong motion data. Seism. Res. Lett., 68(1): 180—189.
- Somerville P.G., Graves R., 1997. Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity. Seism. Res. Lett., 68: 199—222.
- Trifunca M.D., 1976. Preliminary analysis of the peaks of strong earthquake ground motion dependence of peaks on earthquake magnitude, epicentral distance and recording site conditions. Bull. Seism. Soc. Amer., 66(4): 1343—1373.

A Study on Bedrock Ground Motion Attenuation Relation in Tangshan Region, China

Sun Lina¹⁾, Qin Yuyan¹⁾, Lu Guojun¹⁾, Peng Yuanqian¹⁾, Guo Qiuna¹⁾ and Tian Li²⁾

1) Earthquake Administration of Hebei Province, Shijiazhuang 050021, China

2) Construction Group Limited Company of Shijiazhuang, Shijiazhuang 050021, China

Abstract Based on the collected data of strong motion records in Tangshan region, we apply three attenuation models that considered ground acceleration, close range and magnitude, then use the mathematical statistical regression method to compare and analyze the results of these models, to obtain a new attenuation relationship of peak ground acceleration on bedrock site is established in Tangshan region. The results of our study is good consistent with the observations from the May 28, 2012, *M*4.8 Tangshan earthquake,

Key words: Peak ground acceleration; Regression analysis; Attenuation relation