

震后单体建筑震害快速分析

土博 16 顾栋炼 2016310061

一、选题背景和目的

以往地震发生后，地震局系统在数小时内仅仅能给出震源深度、震中位置、地震烈度等地震固有信息。然而，与地震固有信息相比，这次地震对经济、社会等造成的损失等信息对于政府抢险救灾、发布灾情等显得更为重要。“Earthquakes don’t kill people, Buildings do”，结构损失和人员伤亡是地震损失中的两大部分，而大部分人员伤亡又是由结构损失引起的。因此，如何快速得到地震后建筑的震害结果，对于政府的抢险救灾工作和公众的信息需求来说都显得很有意义。

本作业基于以上背景，考虑在已获取震中附近台站的地震动数据后，实现对单体建筑震害结果的快速计算分析，为政府的抢险救灾工作和灾情发布工作提供一定的服务。

二、研究内容和技术路线

“巧妇难为无米之炊”，要实现地震后单体建筑震害结果的快速分析，首先要具备结构震害分析所需要的原材料，主要包括震中附近强震台站地震动数据和震中附近建筑相关模型。基于课题组原有的模型积累，以及课题组与中国地震局的合作关系，本作业考虑以上两点需求都已经得以满足。那么接下来的焦点在于：如何实现快速计算，即如何实现单体建筑有限元动力时程分析的自动化。

结构有限元动力时程分析的一般步骤是：(1) 将原始地震动数据转化为有限元分析需要的地震动时程数据；(2) 将地震动时程数据输入模型，形成计算所需要的计算文件，并进行有限元计算；(3) 有限元计算完成后，对计算结果进行提取和处理。因此，为了达到有限元分析自动化的目标，必须实现上述三个步骤的自动化。基于课题组原有的模型积累，本作业采用的有限元软件为 Msc. Marc 2007，本作业的技术路线如下：



图 1 技术路线

需要说明的是，由于 Marc 与 Python 有良好的接口，故前两个步骤采用 Fortran 实现，而结果处理程序采用 Python 实现。

三、研究成果

3.1 快速处理地震动程序

强震台站记录到的地震动数据，经过地震局处理后，一般如图 2(a)所示：

<pre> 06HUC160121011313 2016-01-21 1:13:13 BTM 0160121011313 2016-01-21 1:13:13 BTM MENYUAN EARTHQUAKE, MENYUAN, CHN EPICENTER 37.680N 101.620E DEPTH 10 KM MAGNITUDE 6.4 (Ms) STATION: 62HUC 37.9N 101.8E SITE CONDITION: SOIL INSTRUMENT TYPE: ETNA/SLJ-100 OBSERVING POINT: GROUND COMP. NS UNCORRECTED ACCELERATION UNIT: CM/SEC/SEC NO. OF POINTS: 16000 EQUALLY SPACED INTERVALS OF: 0.005 SEC PEAK VALUE: 63.585 AT 25.97 SEC DURATION: 80 SEC PRE-EVENT TIME: 20 SEC RECORDER TIME: 2016-01-21 1:12:58.000 BTM CSMNC -8.098041E-3 -1.305025E-2 1.454860E-2 6.596390E-3 -2.287358E-2 7.531945E-3 5.193058E-3 -2.661579E-2 -9.775814E-3 -2.291378E-3 4.630264E-3 -2.291378E-3 4.750863E-5 -2.291378E-3 4.750863E-5 -5.098041E-3 -2.100247E-2 -6.501373E-3 1.454860E-2 -8.840259E-2 1.725952E-2 1.454860E-2 -8.840259E-2 -1.959914E-2 1.688749E-2 2.854903E-3 -1.355823E-3 4.725281E-3 -1.351803E-2 -1.258248E-2 -5.098041E-3 1.918618E-3 -1.024359E-2 -5.098041E-3 -2.291378E-3 -1.024359E-2 -5.098041E-3 5.606836E-3 -1.819580E-2 -7.436196E-3 2.109748E-2 -3.694709E-3 -1.538914E-3 5.606836E-3 4.257504E-3 -2.291378E-3 -1.355823E-3 1.450840E-3 -8.098041E-3 5.152859E-4 4.257504E-3 -1.445359E-2 -4.202686E-3 8.467493E-3 -2.147024E-2 -7.436196E-3 1.408083E-2 -6.501373E-3 -6.033596E-3 5.606836E-3 1.918618E-3 3.321949E-3 -7.904705E-3 -1.445359E-2 -6.501373E-3 -1.164692E-2 -6.596390E-3 -3.226932E-3 -7.436196E-3 -1.354903E-2 7.999722E-3 -1.258248E-2 -1.445359E-2 -2.291378E-3 3.321949E-3 7.531945E-3 -1.632470E-2 2.854903E-3 -6.501373E-3 -8.372482E-3 4.725281E-3 -2.287358E-2 -4.162487E-3 4.257504E-3 -1.211470E-2 -7.904705E-3 -6.501373E-3 5.660836E-3 -1.585692E-2 -1.024359E-2 7.064167E-3 -4.630264E-3 1.267823E-2 -7.904705E-3 -6.033596E-3 1.450840E-3 -1.164692E-2 -7.904705E-3 -1.398581E-2 1.450840E-3 1.512859E-4 2.854903E-3 4.750863E-5 7.531945E-3 -5.098041E-3 -6.969150E-3 -4.630264E-3 5.152859E-4 6.128613E-3 -1.538914E-2 -6.033596E-3 -1.355823E-3 -4.162487E-3 5.193058E-3 -2.291378E-3 -8.804593E-4 -2.759155E-3 -7.999722E-3 2.016193E-2 9.830631E-4 -4.162487E-3 5.193058E-3 -7.904705E-3 1.408083E-2 -2.291378E-3 -1.918618E-3 -1.823600E-3 4.725281E-3 -7.904705E-3 3.321949E-3 3.789727E-3 -2.291378E-3 1.314527E-2 -5.098041E-3 -5.098041E-3 -1.211470E-2 2.854903E-3 1.548416E-2 -1.024359E-2 -4.202686E-4 3.321949E-3 1.918618E-3 </pre>	<table border="1"> <tr><td>0.000</td><td>-0.37609E+01</td></tr> <tr><td>0.010</td><td>-0.74521E+01</td></tr> <tr><td>0.020</td><td>-0.11776E+02</td></tr> <tr><td>0.030</td><td>-0.10539E+02</td></tr> <tr><td>0.040</td><td>-0.78493E+01</td></tr> <tr><td>0.050</td><td>-0.42881E+01</td></tr> <tr><td>0.060</td><td>-0.94627E+00</td></tr> <tr><td>0.070</td><td>0.17944E+01</td></tr> <tr><td>0.080</td><td>0.58800E+01</td></tr> <tr><td>0.090</td><td>0.79780E+01</td></tr> <tr><td>0.100</td><td>0.70097E+01</td></tr> <tr><td>0.110</td><td>0.86797E+01</td></tr> <tr><td>0.120</td><td>0.10581E+02</td></tr> <tr><td>0.130</td><td>0.89977E+01</td></tr> <tr><td>0.140</td><td>0.11549E+02</td></tr> <tr><td>0.150</td><td>0.11000E+02</td></tr> <tr><td>0.160</td><td>0.10163E+02</td></tr> <tr><td>0.170</td><td>0.97780E+01</td></tr> <tr><td>0.180</td><td>0.59586E+01</td></tr> <tr><td>0.190</td><td>0.44673E+01</td></tr> <tr><td>0.200</td><td>0.54155E+01</td></tr> <tr><td>0.210</td><td>0.40346E+01</td></tr> <tr><td>0.220</td><td>0.16845E+01</td></tr> </table>	0.000	-0.37609E+01	0.010	-0.74521E+01	0.020	-0.11776E+02	0.030	-0.10539E+02	0.040	-0.78493E+01	0.050	-0.42881E+01	0.060	-0.94627E+00	0.070	0.17944E+01	0.080	0.58800E+01	0.090	0.79780E+01	0.100	0.70097E+01	0.110	0.86797E+01	0.120	0.10581E+02	0.130	0.89977E+01	0.140	0.11549E+02	0.150	0.11000E+02	0.160	0.10163E+02	0.170	0.97780E+01	0.180	0.59586E+01	0.190	0.44673E+01	0.200	0.54155E+01	0.210	0.40346E+01	0.220	0.16845E+01
0.000	-0.37609E+01																																														
0.010	-0.74521E+01																																														
0.020	-0.11776E+02																																														
0.030	-0.10539E+02																																														
0.040	-0.78493E+01																																														
0.050	-0.42881E+01																																														
0.060	-0.94627E+00																																														
0.070	0.17944E+01																																														
0.080	0.58800E+01																																														
0.090	0.79780E+01																																														
0.100	0.70097E+01																																														
0.110	0.86797E+01																																														
0.120	0.10581E+02																																														
0.130	0.89977E+01																																														
0.140	0.11549E+02																																														
0.150	0.11000E+02																																														
0.160	0.10163E+02																																														
0.170	0.97780E+01																																														
0.180	0.59586E+01																																														
0.190	0.44673E+01																																														
0.200	0.54155E+01																																														
0.210	0.40346E+01																																														
0.220	0.16845E+01																																														

(a) 原始地震动数据格式

(b) Marc 所需地震动格式

图 2 地震动数据格式转换

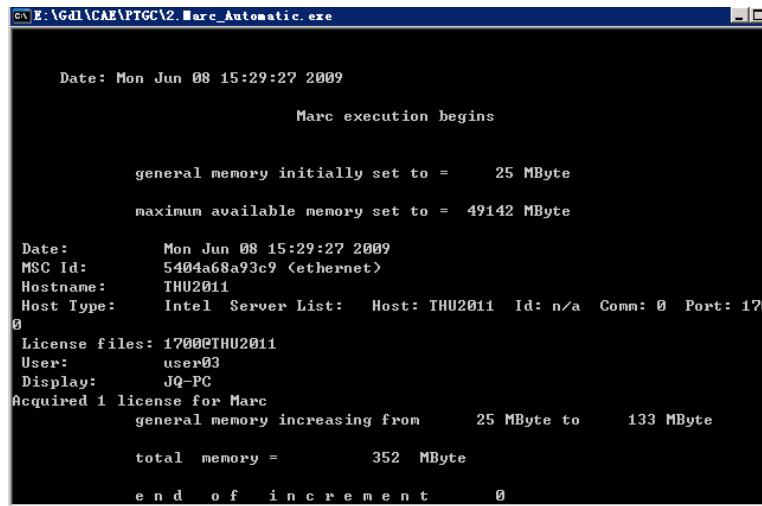
原始的地震动数据信息含量较多，前面几行为地震动的基本信息，主要包括：台站信息、地震动数据单位、时间间隔、峰值、持续时间、记录时刻等；后面几行数字为地震动时程数据，一般为地面加速度数据。Marc 计算所需的地震动格式比较简单直接，如图 2(b)所示，左边一列为时间，右边一列为加速度数据。

实现地震动数据转换的程序为“1.Read_Ground_Motion_Record.F90”，本程序在将原始地震动程序转化成 Marc 计算所需地震动格式时，还将依据用户自己设定的阈值比例，去除原始地震动数据中前面一段和末尾一段加速度几乎为 0 的数据，选出有效的地震动时程数据，避免有限元中不必要的计算。另外，此程序还可依据用户需求，微调输出格式，并能输出不同时间间隔的地震动数据。

3.2 快速提交算例程序

有了地震动数据，需要将地震动数据输入 Marc 模型，生成计算文件进行计算。这一步骤如果采用人工输入，需要更改 Marc 软件中多个选项卡，操作较繁琐且耗时、易出错。因此，采用“2.Marc_Automatic.F90”程序实现这一操作，程序主要思路为解析 Marc 计算文件格式，替换计算文件模板中的地震动数据，形成新的地震动计算文件，并调用 Marc 进行计

算。由于 Marc 支持并行计算，且单核算例和并行算例的计算文件格式存在差别，因此此程序目前有两个版本，一个适用于单核算例，一个适用于并行算例。图 3 为运行程序后，Marc 开始计算的 Dos 窗口。



```
File E:\GDI\CAF\PTGC\2. Marc_Automatic.exe

Date: Mon Jun 08 15:29:27 2009
Marc execution begins

general memory initially set to = 25 MByte
maximum available memory set to = 49142 MByte

Date: Mon Jun 08 15:29:27 2009
MSC Id: 5404a68a93c9 (ethernet)
Hostname: THU2011
Host Type: Intel Server List: Host: THU2011 Id: n/a Comm: 0 Port: 170
0
License files: 1700@THU2011
User: user@3
Display: JQ-PC
Acquired 1 license for Marc
    general memory increasing from 25 MByte to 133 MByte
    total memory = 352 MByte
    end of increment 0
```

图 3 Marc 后台计算的 Dos 窗口显示

3.3 快速提取结果程序

Marc 的结果文件为 t16 文件，可用记事本打开，里面包含模型中计算者所选中的计算结果类别（如节点的位移、速度、加速度、反力；单元的应力、应变等）的所有时程信息。本作业考虑展示的震害结果主要以建筑的层间位移角和楼面加速度为主，这些均为节点的结果信息。实现此功能的程序为“3.Get_node_scalar_label.py”和“3.Node_Results_XY.py”。由于在 Marc 模型中，倘若两个不同的计算者所选中的需要输出的计算结果类别不是完全一样的，那么即使是相同结果类别（如均为节点位移），其在两个计算得到的 t16 文件中的编号也是不一样的。因此，需要先用“3.Get_node_scalar_label.py”程序来找出每个计算结果类别在 t16 文件中的相应编号，再在“3.Node_Results_XY.py”程序中修改对应编号，并运行得到可用于展示的结果文件。

目前程序主要实现了对节点结果信息（位移、速度、加速度、反力）的提取，并能依据提取出的位移数据自动计算层间位移。图 4 展示了对某 t16 文件提取的加速度结果。图 4 中，第一行用于显示提取的计算结果类别—每层的 X 方向加速度时程，第一列为时程分析增量步计数，第二列为时间，其余每列分别对应每个所提取节点的加速度时程数据，时程数据的单位与模型单位一致。

1_Acceleration_X.txt														
1	inc	time	Acceleration X of each story											
2	1	0.00	0.000000e+000	0.000000e+000	0.000000e+000	0.000000e+000	0.000000e+000	0.000000e+000	0.000000e+000	0.000000e+000	0.000000e+000	0.000000e+000	0.000000e+000	0.000000e+000
3	2	0.00	0.000000e+000	0.000000e+000	0.000000e+000	0.000000e+000	0.000000e+000	0.000000e+000	0.000000e+000	0.000000e+000	0.000000e+000	0.000000e+000	0.000000e+000	0.000000e+000
4	3	0.02	4.344599e-005	9.267644e-005	1.319350e-004	1.650142e-004	1.866068e-004	2.014589e-004	2.083735e-004	2.120087e-004	2.143967e-004	2.120087e-004	2.143967e-004	2.120087e-004
5	4	0.04	-1.017103e-005	-4.966696e-006	1.473172e-005	4.051943e-005	6.503905e-005	8.789673e-005	1.025176e-004	1.157665e-004	1.279077e-004	1.279077e-004	1.279077e-004	1.279077e-004
6	5	0.06	-1.088495e-005	-1.969365e-005	-2.061432e-005	-1.528702e-005	-2.641835e-006	1.325716e-005	2.596146e-005	4.254966e-005	6.029826e-005	4.254966e-005	6.029826e-005	4.254966e-005
7	6	0.08	5.461737e-006	9.353163e-006	9.891998e-006	1.105784e-005	1.680010e-005	2.452698e-005	3.164704e-005	4.411291e-005	5.950386e-005	5.950386e-005	5.950386e-005	5.950386e-005
8	7	0.10	-3.344270e-006	-6.506640e-005	-1.005884e-005	-1.308966e-005	-1.285601e-005	-1.095210e-005	-7.992000e-005	-7.072813e-007	9.999281e-006	9.999281e-006	9.999281e-006	9.999281e-006
9	8	0.12	6.577773e-006	1.242753e-005	1.499200e-005	1.645246e-005	1.730055e-005	1.844806e-005	2.014152e-005	2.415609e-005	3.101128e-005	3.101128e-005	3.101128e-005	3.101128e-005
10	9	0.14	8.783386e-005	1.900762e-004	2.706170e-004	3.400306e-004	3.865384e-004	4.188330e-004	4.346966e-004	4.469161e-004	4.577021e-004	4.577021e-004	4.577021e-004	4.577021e-004
11	10	0.16	-3.260877e-005	-3.482191e-005	-3.722419e-005	4.120821e-005	8.947482e-005	1.359937e-004	1.669810e-004	1.985082e-004	2.390303e-004	2.390303e-004	2.390303e-004	2.390303e-004
12	11	0.18	-6.151878e-005	-1.288105e-004	-1.704993e-004	-1.948551e-004	-1.933992e-004	-1.764443e-004	-1.557364e-004	-1.243118e-004	-8.650276e-005	-8.650276e-005	-8.650276e-005	-8.650276e-005
13	12	0.20	8.330319e-005	1.571461e-004	1.954165e-004	2.214948e-004	2.385059e-004	2.529337e-004	2.644833e-004	2.832725e-004	3.089937e-004	3.089937e-004	3.089937e-004	3.089937e-004
14	13	0.22	-5.930666e-006	1.003752e-005	3.733388e-005	5.945431e-005	1.200064e-004	1.365503e-004	1.572694e-004	1.821746e-004	2.000640e-004	2.317159e-005	2.317159e-005	2.317159e-005
15	14	0.24	-8.5463534e-005	-1.765387e-004	-2.374736e-004	-2.815022e-004	-2.988941e-004	-3.025624e-004	-2.754865e-004	-2.783008e-004	-2.535126e-004	-2.535126e-004	-2.535126e-004	-2.535126e-004
16	15	0.26	1.459551e-006	-2.649893e-005	-7.318731e-005	-1.237221e-004	-1.643487e-004	-1.935424e-004	-2.054863e-004	-2.080937e-004	-2.016119e-004	-2.016119e-004	-2.016119e-004	-2.016119e-004
17	16	0.28	3.944556e-005	7.330885e-005	8.313824e-005	8.026644e-005	6.462580e-005	4.502562e-005	3.105430e-005	1.763063e-005	7.467303e-006	7.467303e-006	7.467303e-006	7.467303e-006
18	17	0.30	3.089687e-005	7.738527e-005	1.206797e-004	1.588785e-004	1.805527e-004	1.919219e-004	1.943184e-004	1.910922e-004	1.844743e-004	1.844743e-004	1.844743e-004	1.844743e-004
19	18	0.32	-3.444271e-005	-5.563617e-005	-5.227334e-005	-3.827400e-005	-3.888626e-005	-1.601497e-006	1.565488e-005	2.801438e-005	3.721595e-005	3.721595e-005	3.721595e-005	3.721595e-005
20	19	0.34	-2.629547e-005	-5.992420e-005	-8.414654e-005	-1.006512e-004	-1.040714e-004	-9.891941e-005	-9.046064e-005	-7.783090e-005	-6.389469e-005	-6.389469e-005	-6.389469e-005	-6.389469e-005
21	20	0.36	-3.803780e-005	-9.203565e-005	-1.436328e-004	-1.920309e-004	-2.256529e-004	-2.478236e-004	-2.562891e-004	-2.582100e-004	-2.554651e-004	-2.554651e-004	-2.554651e-004	-2.554651e-004
22	21	0.38	1.006841e-004	1.965389e-004	2.497877e-004	2.826391e-004	2.914426e-004	2.876795e-004	2.797467e-004	2.685917e-004	2.568926e-004	2.568926e-004	2.568926e-004	2.568926e-004
23	22	0.40	2.596349e-005	8.553761e-005	1.541531e-004	2.213222e-004	2.701566e-004	3.037816e-004	3.181885e-004	3.245770e-004	3.245086e-004	3.245086e-004	3.245086e-004	3.245086e-004
24	23	0.42	-3.799326e-005	-5.917866e-005	-4.892446e-005	-2.353357e-005	1.124359e-005	4.779322e-005	7.298431e-005	9.749435e-005	1.186346e-004	1.186346e-004	1.186346e-004	1.186346e-004
25	24	0.44	-4.356250e-006	-1.392961e-005	-1.960244e-005	-1.892694e-005	-7.347420e-006	1.126447e-005	2.871684e-005	5.200209e-005	7.793283e-005	7.793283e-005	7.793283e-005	7.793283e-005
26	25	0.46	-1.010508e-005	-2.548202e-005	-4.203126e-005	-5.683243e-005	-6.391660e-005	-6.459143e-005	-6.025321e-005	-4.865539e-005	-3.136140e-005	-3.136140e-005	-3.136140e-005	-3.136140e-005
27	26	0.48	-6.055133e-005	-1.369165e-004	-2.047505e-004	-2.671020e-004	-3.120318e-004	-3.437845e-004	-3.578962e-004	-3.615799e-004	-3.636036e-004	-3.636036e-004	-3.636036e-004	-3.636036e-004
28	27	0.50	-3.023516e-005	-9.276446e-005	-1.689680e-004	-2.499071e-004	-3.206690e-004	-3.799151e-004	-4.138014e-004	-4.421401e-004	-4.633703e-004	-4.633703e-004	-4.633703e-004	-4.633703e-004
29	28	0.52	5.432120e-005	9.244815e-005	9.431815e-005	7.666896e-005	4.008520e-005	-3.467743e-006	-3.656782e-005	-7.479444e-005	-1.133837e-004	-1.133837e-004	-1.133837e-004	-1.133837e-004
30	29	0.54	-2.125755e-006	7.025467e-005	2.035198e-005	2.976528e-005	1.333491e-005	1.105739e-005	-2.568421e-005	-5.736833e-005	-	-	-	-

图 4 加速度时程结果

3.4 成果总结

本作业通过“1.Read_Ground_Motion_Record.F90”程序实现对地震动数据的处理；通过“2.Marc_Automatic.F90”程序实现 Marc 计算文件的快速生成和计算；通过“3.Get_node_scalar_label.py”和“3.Node_Results_XY.py”程序实现计算结果（主要是节点的计算结果）的快速提取。这样，可以把有限元分析处理模型的时间降至最低。再搭配 Marc 的并行计算功能，对于一个 20 层框架剪力墙高层的精细有限元模型，测试结果显示：10 核并行计算下，1 小时内可以给出该高层震害结果。

四、心得体会和对课程的建议

在跟着胡老师和林助教学习了一学期 CAE 课程后，我收获颇丰。虽然本门课程名字是“土木与建筑工程 CAE”，但学到的知识绝不仅仅限于土木与建筑工程，胡老师和林助教还带我们了解了其他如人工智能、深度学习等计算机前沿领域，让我对这些领域的基本知识有了一定的了解。以下是我对课程的几点建议：

- (1) 胡老师一直说我们这一届是课堂氛围最沉闷的一届，我建议胡老师可以适当增加小组讨论这种上课形式，虽然咱们课堂人比较少，但分成两组还是能够办到的。对于一个问题，采用小组讨论后再由代表发言，甚至可以就一个话题展开两个小组间的辩论，这样也许能让课堂氛围活跃一些；
- (2) 大作业除了选题汇报和最终汇报，可以考虑增加中期汇报，这样可以督促同学们尽早开展大作业工作，也能及时了解同学们大作业选题方向的变动（这一项主要是看热闹不嫌事大，反正我不用中期汇报了，请谨慎采纳）；
- (3) 因为本课程上课人数比较少，可以考虑换一个小一点的教室，譬如在基地 200B 或者系馆其他会议室上课，这样课堂氛围也许会好些，且同学们上课也方便些。

最后，谢谢胡老师和林助教的零食和水果！