

1985年のメキシコ地震による、 メキシコ市の被害の全体像

飯田昌弘

正会員 工博 東京大学地震研究所 (113-0032 文京区弥生1-1-1)

1985年のメキシコ地震の、メキシコ市の軟弱地盤の中層ビルに集中した被害を解釈する。メキシコ市の異なる地質区域で、低層から高層ビルの3次元非線形相互作用解析を実施する。S波を仮定して地中で強震動を合成し、相互作用系に下方より入力する。軟弱地盤での中層ビルの応答加速度は、高層ビルよりも大きく、低層ビルが最も小さい。他方、周期2秒以上では表面波の割合が増加するが、表面波は、深い地下構造を反映して波長が長いので、被害とは直接関係しない。従って、実際の高層ビルは応答解析ほどは振動せず、被害をよく説明できる。表層地盤への入射波に1秒以上の周期が多く、軟弱地盤の2次の卓越周期が1~2秒であることも、中層ビルの被害と関係している。硬質地盤では、強震動がほぼ表面波なので被害が少なかった。

Key words: Soft deposits, Soil-building interaction, 3-D nonlinear analysis, S waves, Surface waves.

1. 序

わが国の大都市の多くは、沖積平野の軟弱地盤に位置している。従って、軟弱地盤における地震被害を理解することは、きわめて重要である。最も参考になるのは、1985年のメキシコ地震 ($M=8.1$) による、メキシコ市における被害であると思う。建物の見地からの被害の解釈は、すでにいくつかの研究においてなされているが^{例えば1)}、地震直後は強震動や地盤の情報が十分ではなかった。これらの情報がいくらか蓄積された現在、被害を総合的・定量的に考察する。

2. メキシコ市の被害の全体像

メキシコ市は、メキシコ盆地内に位置し、Hill 区域、Transition 区域、Lakebed 区域の3つの地質区分からなる(図-1)。メキシコ市の被害は、図-1の曲線で示されるように、軟弱地盤の一部地域の中層ビル(5~15階建)に集中し¹⁾、他の建物や地域では小さかった。なお、中高層ビルのほとんどは、Roma-C 強震観測点(図-1)の南西側に位置する。被害地域の地盤の(1次の)卓越周期(図-1)は、1.5~3.0秒であった²⁾。

3. 相互作用モデル^{3), 4)}

基礎固定モデルでは、相互作用の影響が大きいと考えられる、軟弱地盤の中高層ビルの応答を、十分には表現できないと考えられる。ビルの下部構造に発生する被害の説明に加え、暗黙にS波を仮定しているため、表面波への対応ができない。そこで、図-2の3次元非線形相互作用モデルを使用する。モデルでは、上部構造・杭・土の非線形性が同時に考慮できる。応答解析は、重力が作用した状態で実施される。なお、メキシコでは、Romoによる2次元線形解析⁵⁾を除き、これまでに本格的な相互作用解析がなされていない。4 ボアホール強震観測点(図-1)において、低層から高層の4種類(Roma-C 地点のみ40階建を含む5種類)のビルの応答解析を実施する。解析に使用するビルの階数と固有周期は、表-1に示されている。解析地点の地盤のS波の卓越周期を、浅い構造⁶⁾から計算して表-2にまとめた。なお、浅い構造の1例(Roma-C 地点)を表-3に示す。比較のために、3次元線形相互作用モデルと、基礎固定モデル(非線形及び線形の2種類、ただし Roma-C 地点のみ)を加えた、計4種類の解析モデルにより計算を実施する。

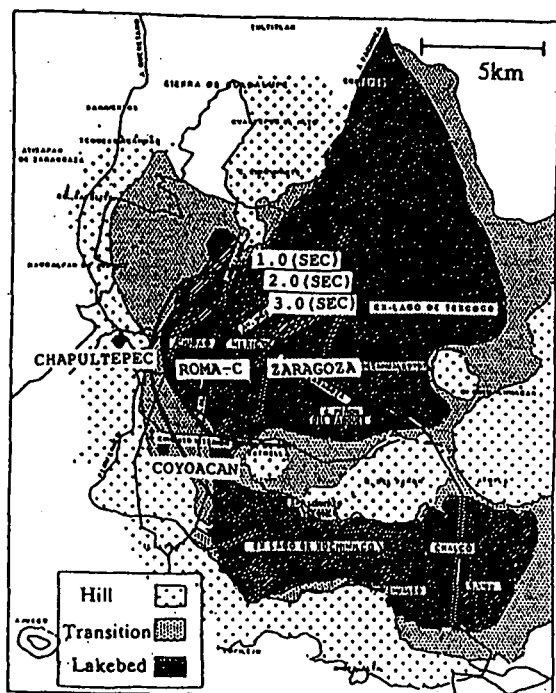


図-1 メキシコ市の地質区分、被害地域と地盤の卓越周期。

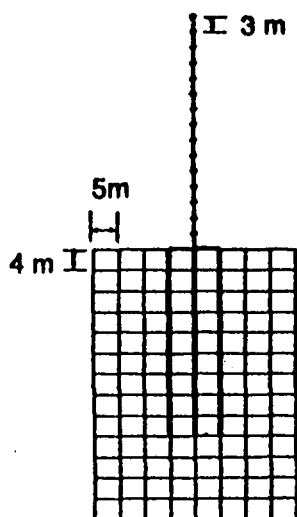


図-2 3次元非線形相互作用モデル（15階建の例）。

表-1 解析に使用する5種類のビル。

No.	階数	固有周期 (秒)
1	3	0.41
2	9	0.95
3	15	1.41
4	25	2.04
5	40	2.84

表-2 地盤のS波の卓越周期。

地点	1次 (秒)	2次 (秒)
Chapultepec	0.43	0.18
Coyoacan	0.70	0.33
Roma-C	2.47	1.08
Zaragoza	4.58	1.74

表-3 Roma-C 地点の浅い構造。

深さ (m)	P波速度 (m/s)	S波速度 (m/s)	密度 (gr/cm ³)
3-5	1430	90	1.2
5-12	1430	30	1.1
12-25	1430	55	1.1
25-33	1430	80	1.2
33-36	1430	200	1.4
36-44	1430	130	1.4
44-55	1780	400	1.5
55-65	1580	250	1.5
65-102	1750	430	1.7

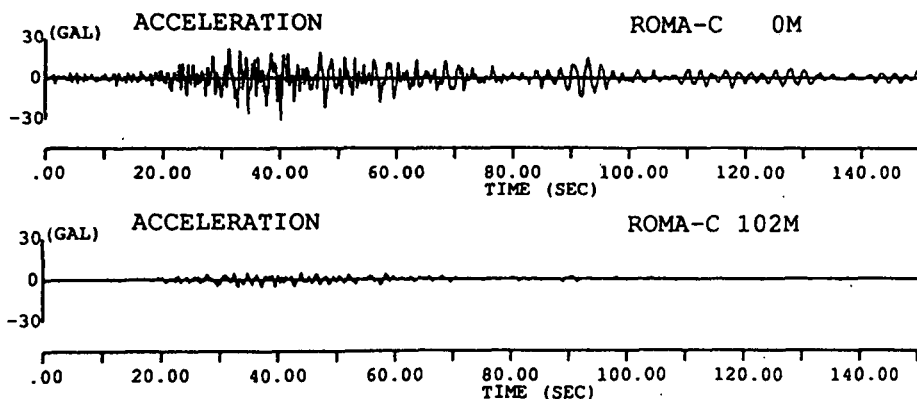


図-3 Roma-C 地点の地表と地中（102m）の強震記録（NS成分）。

表-4 Roma-C 地点の深い構造。

深さ (m)	P波速度 (m/s)	S波速度 (m/s)	密度 (gr/cm ³)
0-65	1500	200	1.3
65-177	1900	600	1.8
177-1100	2600	1120	2.0
1100-1900	3300	2600	2.3
1900-3800	4500	3000	2.5
>3800	5600	3700	2.7

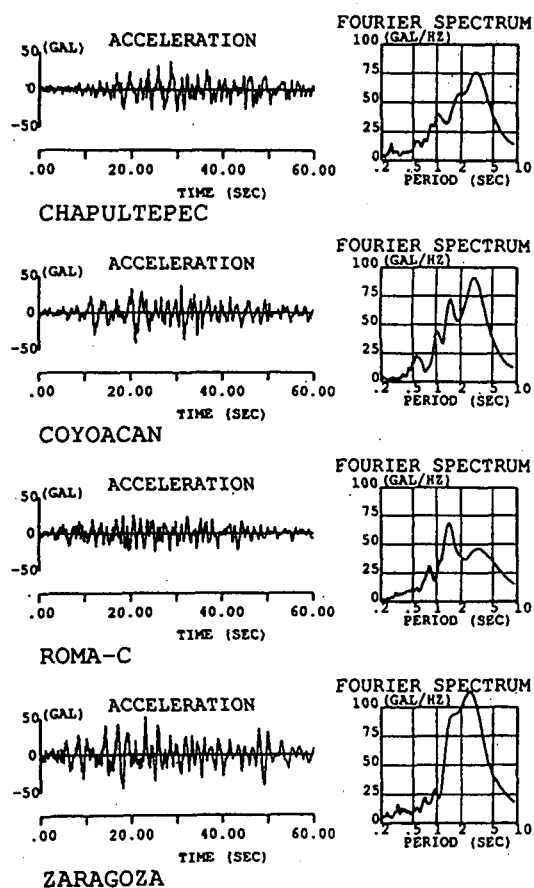


図-4 4解析地点での、ボアホール強震計の深さにおける合成波 (NS成分) とそのフーリエスペクトル。

4. S波と表面波の識別⁷⁾

4 ボアホール強震観測点において、1995年9月の地震 (M=7.3) による強震記録が得られた。このうち、Roma-C 強震観測点の水平成分 (図-3) の相互相関解析によると、周期2秒以下ではS波が優勢、周期3秒以上ではほぼ表面波、強震動の卓越周期を含む周期2~3秒では両波が混在している。また、同観測点には、地表のトリパタイト強震アレイが存在するが、その記録

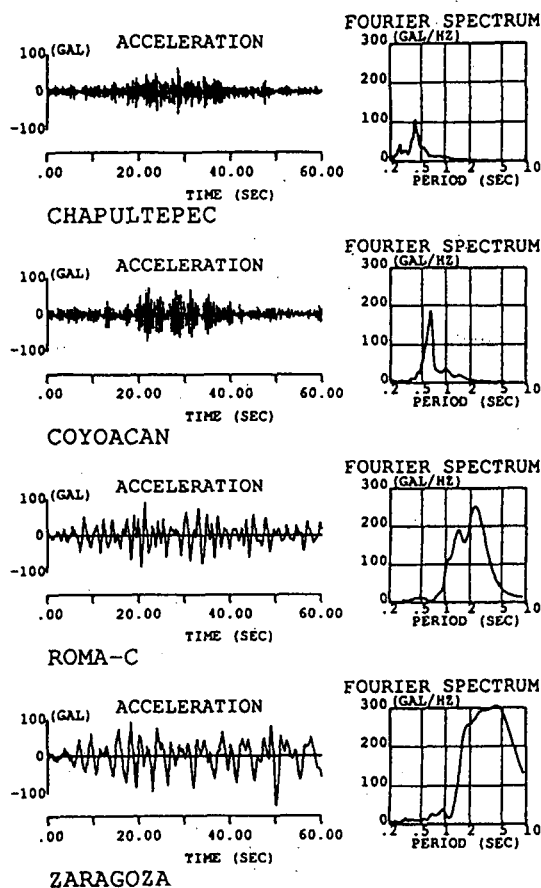


図-5 4解析地点での、地表地震波 (NS成分) とそのフーリエスペクトル。

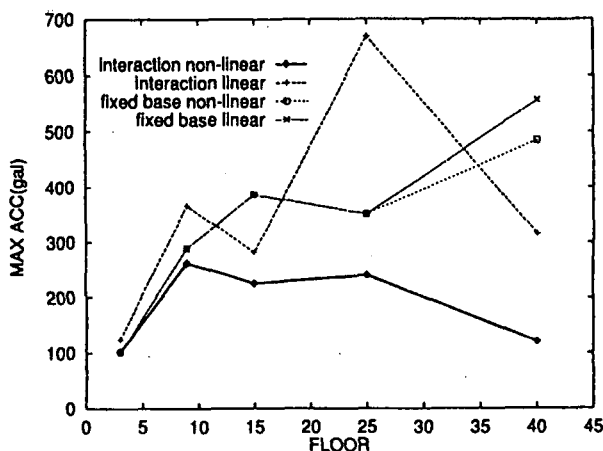


図-6 Roma-C 地点での、4種類の解析モデルによる、5種類のビルの最上階の最大応答加速度 (NS成分) の比較。

の表面波部分の解析によると伝播速度は数百m/秒以上である。従って、その波長は1km (2秒x数百m/秒) 以上になるので、表面波はビルの被害には直接関係ないと考えられる。

5. メキシコ盆地内の波動の性質⁶⁾

4 ボアホール強震観測点の水平成分の相互相関解析によると、Hill 区域と Transition 区域の強震動はほとんど表面波であり、Lakebed 区域の強震動は、前半は主にS波だが後半はほぼ表面波である。他方、浅い構造と深い構造に対する表面波の理論振幅を計算する。なお、深い構造の1例 (Roma-C 地点) を表-4に示す。表面波は、メキシコ盆地を含む深い構造 (深さ数 km のメキシコ火山帯⁸⁾ に対応) を反映した、基本モードラブ波であると解釈できる。

6. 重力下の軟弱地盤の応答⁹⁾

ビルの被害に関係するのはS波である。そこでまず、軟弱地盤 (Roma-C と Zaragoza の2地点) におけるS波の増幅と伝播を、重力下の3次元非線形解析により調べる。この解析により、1次元線形解析では説明できない、S波の増幅と伝播時間を説明できる。重力による地盤沈下により、地盤の卓越周期は変化しないが、増幅特性が変化し、伝播時間が少し減少する。

7. ビルの応答^{3), 4)}

1985年のメキシコ地震に規模が匹敵し、近い将来に発生が予想される仮想ゲレロ地震を対象とする。S波を仮定して、ボアホール強震計の深さで経験的グリーン関数法により強震動 (水平成分) を合成し、相互作用モデルに下面より入力する。合成波の波形とスペクトル (図-4) は互いによく似ており、1~4秒の周期成分が多く含まれている。他方、浅い構造を反映して、地表での波形とスペクトル (図-5) は地点毎に大いに異なる。図-6に、Roma-C 地点における、4種類の解析モデルによる、ビルの最上階の最大応答加速度の比較を示す。非線形相互作用モデルのみ、中層ビルの最大応答加速度が、高層ビルのそれよりも大きくなる。

8. 考察

軟弱地盤の強震記録の2~3秒の周期帯では表面波が混在し、3秒以上の周期帯ではほぼ表面波のみである。従って、実際の高層ビルは、応答解析ほど大きくは揺れないと考えられる。つまり、1985年の地震の軟弱地盤の中層ビルの被害が適切に解釈できる。他方、ボアホール強震記録に1秒弱以上の周期成分が多く含まれていること、地盤の2次の卓越周期が1秒以上であること⁴⁾が、中層ビルの被害と大いに関係している。また、応答解析から、もし Zaragoza 地域に中高層ビルが存在

すれば、Roma-C 地域以上の大きな被害を受けたものと想像される。

謝辞： 防災科学技術研究所の木下繁夫氏には、ボアホール記録の解析の、日本国土開発技術開発研究所の石原哲哉氏には、相互作用解析の指導をいただきました。岐阜大学工学部の古本吉倫氏には、相互作用解析のポスト処理をしていただきました。理化学研究所 (三木) の谷口仁士氏、国際協力事業団 (JICA) とJICAメキシコプロジェクト委員会には、長きにわたるご支援をいただきました。ここに謝意を示します。

参考文献

- 1) Meli, R. and Avila, J.A.: The Mexico earthquake of September 19, 1985 — analysis of building response, *Earthquake Spectra*, Vol. 5, pp. 1-17, 1989.
- 2) Kobayashi, K. et al.: Measurements of microtremors in and around Mexico, D.F., Report on Seismic Microzoning studies of the Mexico Earthquake of September 19, 1985, Tokyo Institute of Technology, 1986.
- 3) Iida, M.: Three-dimensional non-linear soil-building interaction analysis in the lakebed zone of Mexico City during the hypothetical Guerrero earthquake, *Earthquake Engng. Struct. Dyn.*, Vol. 27, pp. 1483-1502, 1998.
- 4) Iida, M.: Seismic building response in Mexico City by 3-D nonlinear interaction analysis, *Earthquake Spectra* (submitted for publication).
- 5) Romo, M.P.: Clay behavior, ground response and soil-structure studies in Mexico City, Proc. 3rd Int. Conf. Recent Advances Geotechnical Engng. Soil Dynamics, pp. 25-42, 1995.
- 6) Iida, M.: Excitation of high-frequency surface waves with long duration in the Valley of Mexico, *J. Geophys. Res.*, Vol. 104, No. B4, pp. 7329-7425, 1999.
- 7) Iida, M. and Kinoshita, S.: A systematic method for analyzing borehole recordings to estimate wavefield in the lakebed zone of Mexico City, *Bull. Seism. Soc. Am.* (submitted for publication).
- 8) Shapiro, N.M. et al.: Surface-wave propagation across the Mexican Volcanic Belt and the origin of the long-period seismic-wave amplification in the Valley of Mexico, *Geophys. J. Int.*, Vol. 128, pp. 151-166, 1997.
- 9) Iida, M.: Three-dimensional analysis of S-wave propagation in soft deposits, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, American Soc. Civil Eng. (in print).