

仮想ゲレロ地震による、メキシコ市の超軟弱地盤での 3次元構造物-地盤系の非線形解析

飯田昌弘

正会員 工博 東京大学地震研究所 (〒113 文京区弥生1-1-1)

1985年に太平洋で発生したミチョアカン地震 ($M=8.1$) により、震央距離が400km近く離れていたメキシコ市の大被害は、Lakebed区域における中層の建物で発生した。本研究では、仮想ゲレロ地震に対して、低層から高層までの建物に対して、3次元構造物-地盤系の非線形応答解析を実施し、1985年の地震による被害の原因の解明に努める。入力地震動や超軟弱地盤も適切に評価する。3次元構造物-地盤系の非線形解析は、被害の特徴をよく説明するが、他の解析ではできない。地震震源から建物の上部構造までのすべてのファクターを考慮する必要がある。

Key Words: 3-D nonlinear response analysis, soil-building interaction, lakebed zone, Mexico City, hypothetical Guerrero earthquake.

1. 序

1985年に太平洋で発生したミチョアカン地震 ($M=8.1$) により、震央距離が400km近く離れていたメキシコ市の大被害は、Lakebed区域における中層(7階から15階建)の建物で発生した。それ以外の地域や構造物では、被害は比較的小さかった。被害地域の地盤の卓越周期は1.5秒から2.5秒くらいであり、被害を受けた建物の固有周期とは合わない。このことは、構造物と地盤の動的相互作用、構造物や土の非線形挙動、地盤沈下等の影響を示唆する。本研究では、入力地震動や超軟弱地盤を適切に評価し、3次元構造物-地盤系の非線形応答解析により、被害の原因を定量的に説明する。なお、メキシコでは、本格的な応答解析はなされていない。

2. 方法

石原・三浦¹⁾の、有限要素法を用いた3次元構造物-地盤系の非線形地震応答解析法に基づく(図-1)。上部構造・杭・地盤の非線形性と、地盤の圧密による応力も考慮できる。他方、地盤データ・強震記録のあるボ

アホール観測点の適切な深さで、飯田・伯野²⁾の、経験的グリーン関数法を用いて、大地震に対する入力地震動(加速度)を合成し、構造物-地盤系に下方から入力する。経験的グリーン関数法によって、地震震源、太平洋岸からメキシコ盆地に至る長い伝播経路、メキシコ盆地、Lakebed区域の超軟弱地盤、の効果が組み込まれる。強震動は、地表近くでは、地盤の非線形性の影響を受けるが、ある程度以上の深さでは、そうした影響を受けない。

3. 解析

1985年の地震による被害が大きく、地盤データ・強震記録が存在する、Lakebed区域の、メキシコ国立防災センターのRoma-Cボアホール観測点で解析を実施する。同地点の地下構造(図-2)は、4.4m以深が砂地盤、4.4m以浅が粘土地盤である。とりわけ3.3m以浅は超軟弱地盤で、きわめて低いS波速度と水に近い低い密度が特徴である。仮想ゲレロ地震($M=8.1$)(図-3)を想定し、1995年9月の地震

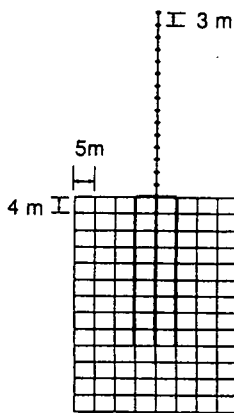


図-1 3次元構造物-地盤系解析のモデル (15階建の例)。

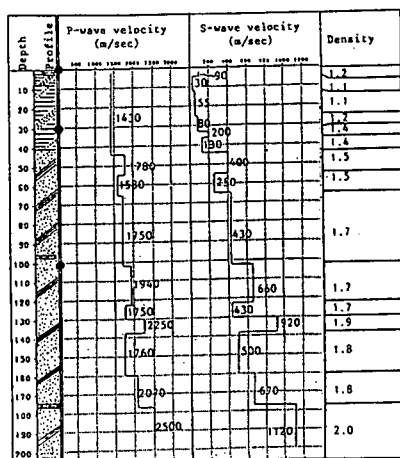


図-2 Roma-Cボアホール強震観測点における地下構造。加速度強震計は黒丸で表示されており、地表と30 m, 102mの深さに設置されている。

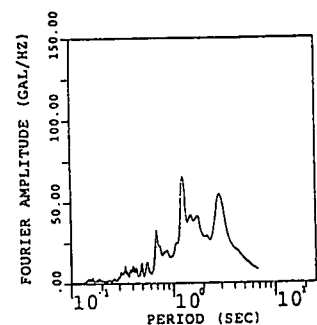
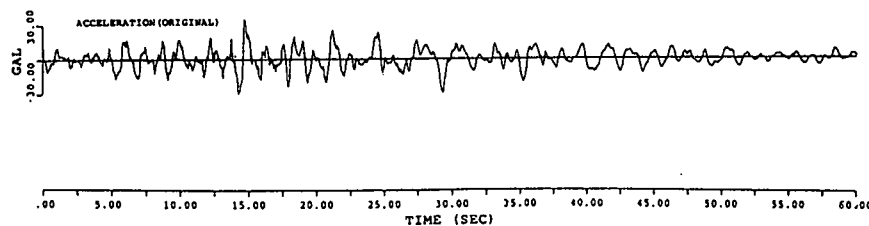


図-4 102mの深さにおいて合成された、加速度波形とそのフーリエスペクトル (EW成分)。

($M=7.3$) (図-3) の記録をグリーン関数として、強震計が設置されている102mの深さで地震動 (水平2成分) を合成する。仮想ゲレロ地震は、地震の規模やメカニズムが1985年の地震に似ている。地表での強

震記録の卓越周期は2.0秒から2.5秒であり、地下構造から計算される2.5秒とほぼ一致する。

同地点において、低層 (3階建・固有周期 $T=0.41$ 秒)、被害を受けた中層 (9階建・ $T=$

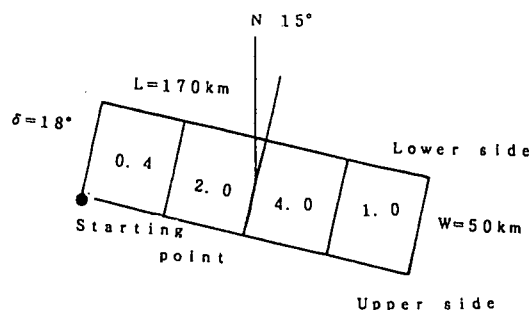
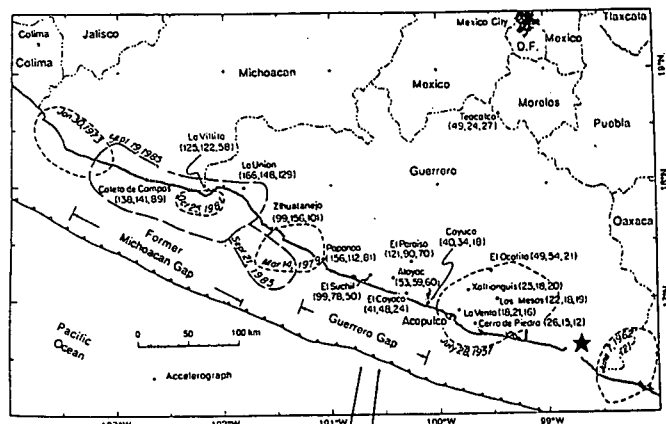


図-3 メキシコ太平洋岸における、1951年以降の大地震の余震域³⁾と仮想ゲレロ地震のモデル化。断層上端の深さは約20 km, 断層の破壊速度は3.5 km/秒である。断層面上の数字は、1995年9月14日の地震 (星印) に対する、各断層要素の地震モーメントの比を示す。

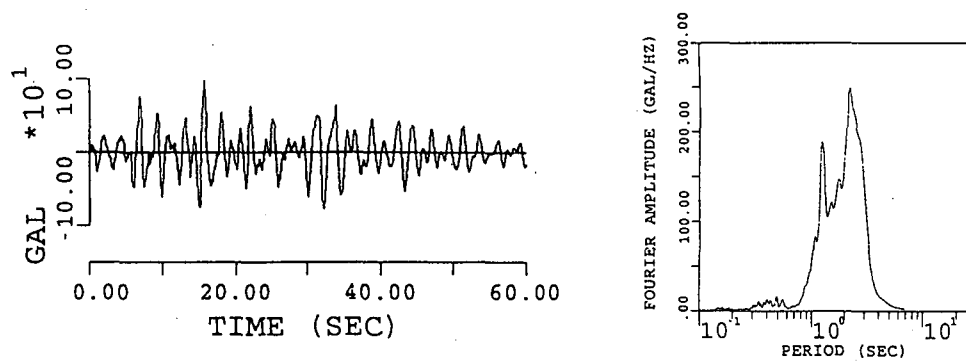


図-5 地盤の非線形性を考慮した場合の、地表における加速度波形とそのフーリエスペクトル (EW成分)。

0.95秒、15階建・ $T=1.41$ 秒)、高層(25階建・ $T=2.05$ 秒、40階建・ 2.84 秒)、の5種類のビルの応答解析を実施する。比較のために、

- (1) 構造物-地盤系の非線形(上部構造・杭・地盤とも)解析(地盤の圧密による応力も考慮する)、
- (2) 構造物-地盤系の線形解析、(3) 基礎固定の非線形(上部構造のみ)解析、(4) 基礎固定の線形解析、を実施する。

4. 結果

図-4は、Roma-Cボアホール観測点の102mの深さにおいて合成された、1分間の加速度波形とそのフーリエスペクトル(EW成分)である。最大振幅は約30ガル、卓越周期は1.0秒から2.0秒、主要動の継続時間は約40秒である。

図-5は、地盤の非線形性(地盤の圧密も)を考慮した場合の、地表における加速度波形とそのフーリエスペクトル(EW成分)である。地表では、最大振幅は100ガル程度になり、卓越周期は2.0秒から2.5秒である。地盤が線形の場合とはほぼ同じであるが、線形の場合に比較して、振幅は少し小さくなり卓越周期は明確でなくなる。

図-6に、構造物-地盤系の非線形解析における、5種類の建物の最上階の加速度波形(EW成分)を示す。一般に、構造物-地盤系の解析は、基礎固定の解析より応答周期は長くなる。9階建の応答が最も大きくなる。3階建の建物は、建物の固有周期ではなく、地盤の卓越周期である2.5秒で振動している。

図-7に、最上階での最大加速度と建物階数の関係(EW成分)を示す。解析方法により、結果は大きく異なる。基礎固定の解析(40階建以外は、上部構造は線形領域にある)では、高い建物ほど応答加速度が大きくなる。構造物-地盤系の線形解析では、動的相互作用によって固有周期が延びた25階建の建物が、地盤と共振

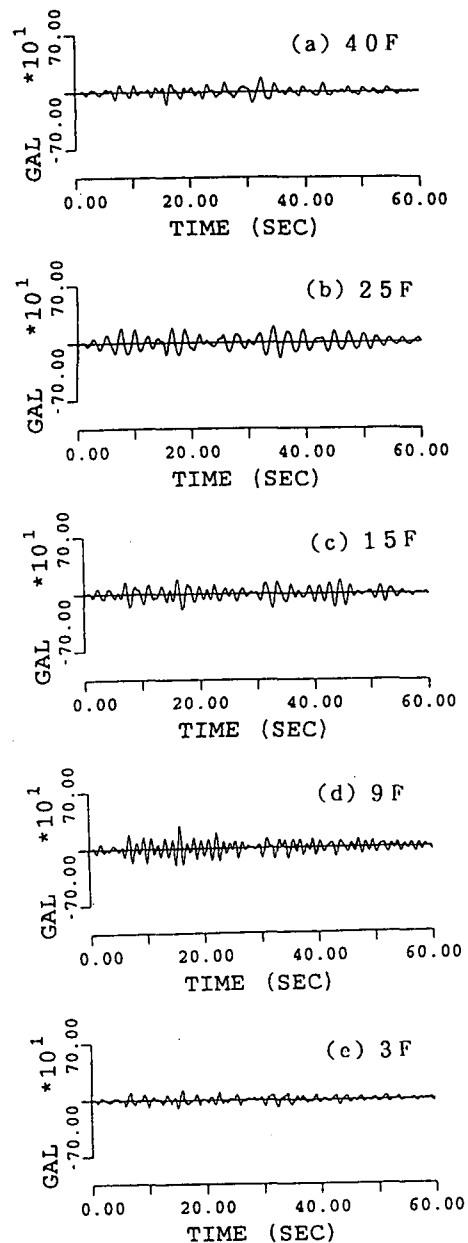


図-6 構造物-地盤系の非線形解析における、5種類の建物の最上階における加速度波形 (EW成分)

して応答がきわめて大きくなる。被害の大きかった9階建の応答もやや大きい。構造物-地盤系の非線形解析では、25階建の建物は共振せず、応答は大いに減少し、9階建の応答が最も大きくなり、1985年の大地震による被害と整合的である。

また、地盤の圧密により、杭が沈下して大きな力がかかる。振動により、地盤は少し非線形領域にはいり、杭は大きな力を受けて大いに非線形領域にはいるが、上部構造は線形領域にある。

5. まとめ

構造物-地盤系の非線形解析は、1985年の大地震による被害をよく説明する。他の解析では説明できない。上部構造や地盤は線形範囲にあるけれども、地盤の圧密や振動により、杭にはきわめて大きな力がかかる。震源から構造物にいたるすべての要因を考慮する必要があると思う。

謝辞： 住友重機械工業（株）・総合技術研究所の古本吉倫には、計算結果の処理を担当していただきました。日本国土開発（株）・技術開発研究所の石原哲哉氏と国際連合・地域開発センターの谷口仁士氏には、お世話になりました。国際協力事業団とメキシコプロジェクト委員会観測部会には、ご支援いただきました。また、文部省国際学術研究及び鹿児島学術振興財団（いずれも研究代表者・望月利男）より、ご援助いただきました。

3-DIMENSIONAL NONLINEAR SOIL-BUILDING INTERACTION ANALYSIS IN THE LAKEBED ZONE OF MEXICO CITY DURING THE HYPOTHETICAL GUERRERO EARTHQUAKE

Masahiro IIDA

The 1985 Michoacan earthquake (M=8.1) caused very severe damage in middle-rise buildings in the lakebed zone of Mexico City, which is approximately 400 km from the epicenter in the Pacific ocean. In the present study, we perform a 3-dimensional nonlinear soil-building interaction analysis for several types of low- to high-rise buildings during the hypothetical Guerrero earthquake, and try to understand the real cause of heavy damage during the 1985 earthquake. We make reasonable estimations for the input earthquake motions and the local site effects. The nonlinear soil-building interaction analysis well explains the damage situation during the 1985 earthquake, although other analyses do not. All factors from the earthquake source to the building upper structure must be considered.

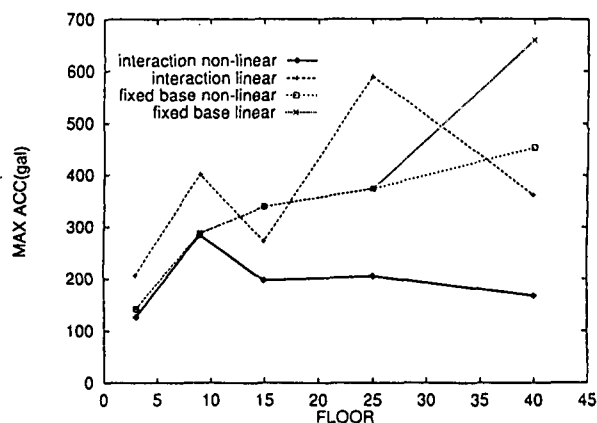


図-7 最上階での最大加速度と建物階数の関係（EW成分）。

参考文献

- 1) 石原哲哉・三浦秀紀 (1993). 3次元構造物-地盤系の非線形地震応答解析、土木学会論文集、465(I-23), 144-154.
- 2) Iida, M. and M. Hakuno (1984). Study on complexity of large earthquakes, Proc. Japan Soc. Civil Engineering, 350(I-2), 47-57.
- 3) Anderson, J.G. et al. (1986). Strong ground motion from the Michoacan, Mexico, earthquake, Science, 233, 1043-1049.