

現在の地震応答解析における重大な問題点

飯田昌弘

正会員 東京大学地震研究所 (113-0032 文京区弥生1-1-1)

地震応答系 (相互作用系) に入力地震動を作用させるという考え方には、大きな限界がある。メキシコ市で大地震によるビルの応答計算を実施し、現在の地震応答解析における重大な問題点を指摘する。メキシコ市では、軟弱地盤で表面波が卓越し、過去の地震においては軟弱地盤における中層ビルの被害が大きかった。このような条件下では、従来の地震応答解析 (相互作用解析) は適切に機能しない。入力地震動が物理的に正しい概念ではなく、表面波の性質を考慮できないからである。入力地震動のかわりに、波動場を使用する必要がある。

Key Words : *building response, soil-building interaction, input motion, serious defect, surface wave*

1. 序

メキシコ市で大地震によるビルの応答計算を実施し、現在の地震応答解析における重大な問題点を指摘する。基礎固定解析法と3次元相互作用解析法を使用する¹⁾。

基礎固定解析法は、簡便ではあるが3つの欠点がある。第1に、入力地震動をビルの上部構造全体に作用させるが、実際の地震動は上部構造には作用しない。これでは上部構造を剛体だと仮定しており、外力は過大評価である。第2に、地震エネルギーがビルと地盤の間を伝達できない。第3に、上部構造と基礎の間の相互作用を無視し、基礎を固定している。実際の基礎は地盤とともに振動する。また、これらの欠点のため、上部構造の減衰は物理的な意味をもたない。

相互作用解析法を使用すれば、上述の第2、第3の問題点は解決でき、第1の問題点も改善できる。けれども、入力地震動を相互作用系全体に作用させることは、相互作用系を剛体だと仮定している。実際の地震動は、上部構造には作用せず、浅い地盤では増幅する。また、地震動は、暗黙にS波 (厳密にはS波の扱いではない) と仮定して扱われるが、表面波が優勢なことも少なくない。

メキシコ市は、メキシコ盆地に位置する大都市であり、メキシコ盆地は、Hill 区域、Transition 区域、及び Lakebed 区域の3つの地質区域からなる。1985年のメキシコ地震 ($M=8.1$) は、メキシコ市の Lakebed 区域における中層ビル (5-15階建) に大被害を与え

た。他方、強震記録に長周期成分が卓越しているのに、高層ビルの被害はほとんどなかった。こうした被害の特徴は、十分に説明できていない。本研究では、上述の2つの解析法を使用して、3つの地質区域の4ボアホール強震観測点において、ビルの応答計算を実施する。なお、Chapultepec 観測点は Hill 区域に、Coyoacan 観測点は Transition 区域に、Roma-C 及び Zaragoza 観測点は Lakebed 区域に位置する²⁾。

2. 入力地震動

Guerrero 州で発生した1995年9月の地震 ($M=7.3$) の加速度記録が³⁾、上述の4ボアホール観測点において得られた。各観測点では、地表1台と地中2台の計3台の加速度計が設置され、浅い地盤構造は調査されている²⁾。減衰定数は全観測点で0.05を仮定する。

1985年のメキシコ地震当時、ボアホール観測がされていなかった。そのため、この地震と規模とメカニズムがほぼ等しい、仮想 Guerrero 地震に対するビルの応答計算を実施する。水平2成分の加速度波形を、上述の記録を経験的グリーン関数として、下側の地中加速度計の深さにおいて合成する³⁾ (図-1)。得られた地中合成加速度波を、2種類の応答解析の入力地震動として使用する。なお、高周波成分はほとんど含まれていない。

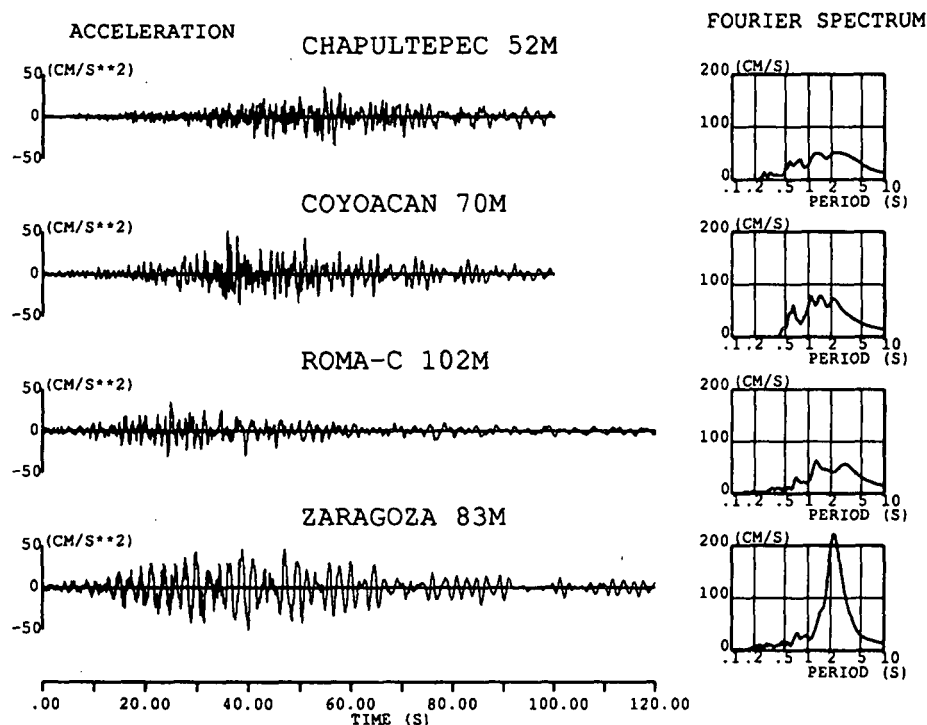


図-1 仮想ゲレロ地震による、地中合成加速度波 (EW 成分) とそのスペクトル。

3. 基礎固定解析

1985年以前の平均的な5種類の鉄筋コンクリートビルの応答計算を実施する。3階建、9階建、15階建、25階建、及び40階建のビルである。ビルの設計基準は、Lakebed 区域、Transition 区域、Hill 区域の順にきびしいが、メキシコ市のビルは柔らかい。上部構造は、単純なせん断型の集中質量モデルとする¹⁾。入力に使用する地表合成加速度波を、前述の地中合成加速度波から、1次元S波理論によって計算する。なお、4観測点の浅い地盤のS波の1次の理論卓越周期は、0.43秒 (Chapultepec)、0.70秒 (Coyoacan)、2.47秒 (Roma-C)、及び4.58秒 (Zaragoza) である。

表-1は、ビル1階の最大せん断力のせん断強度に対する比率を示す。2つの大きな矛盾を指摘できる。第1に、メキシコ地震で被害が小さかった Coyoacan 観測点の、3階建、9階建のビルのせん断力が大きすぎる。第2に、Chapultepec、Coyoacan 両観測点において、40階建のビルの応答計算が発散する。地盤の減衰定数を一定としたが、実際には硬質地盤のほうが減衰が小さい。従って、より適切な減衰を使用すれば、第1の矛盾はさらに拡大する。

2つの矛盾は基礎の固定が主原因である。低層ビルや

表-1 基礎固定解析による、ビル1階の最大せん断力のせん断強度に対する比率 (%) (EW 成分)。—は応答計算の発散を意味する。

	(A) Chap	(B) Coyo	(C) Roma	(D) Zara
40階建	—	—	62	95
25階建	52	73	67	192
15階建	56	94	175	203
9階建	54	154	162	127
3階建	114	347	113	89

ビルの低層階は過大な力を受け、高層ビルの応答は不安定になる。他方、メキシコ市のビルは柔らかいのに、上部構造を剛体だと仮定して外力を作用させている。この矛盾はビルが高いほど顕著になり、計算が不安定になる。

4. 相互作用解析

図-2に、有限要素法による3次元相互作用系を示す¹⁾。以前に使用³⁾した石原・三浦の相互作用系⁴⁾を、少し改良している。基礎固定解析で使ったビルの上部構造を、摩擦杭で支持される箱型剛基礎上に設置している。

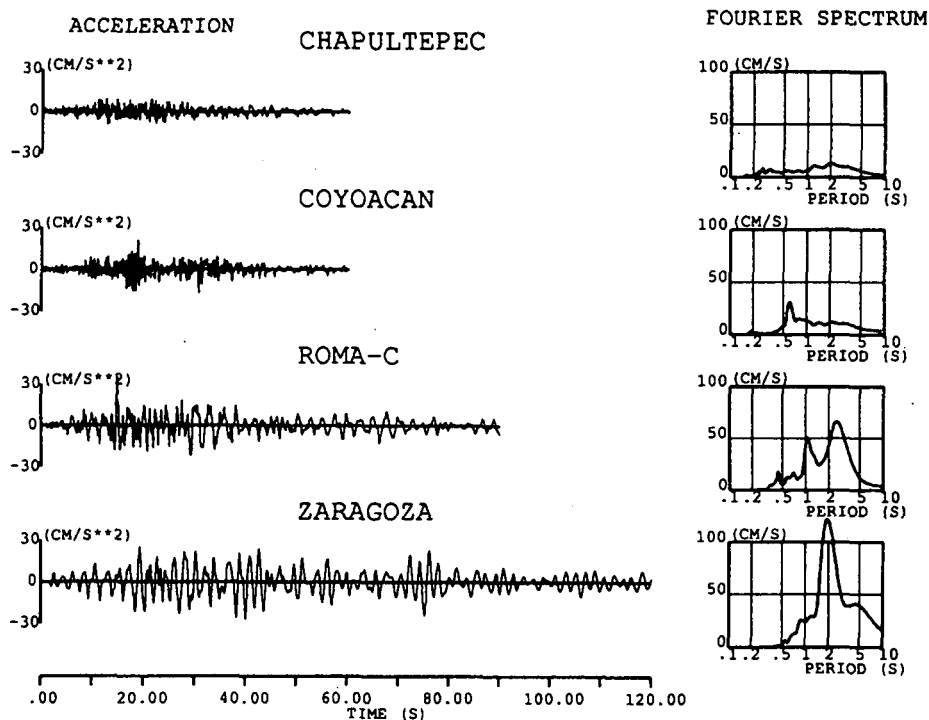


図-3 1995年の地震の地中記録から計算される、地表加速度波 (EW 成分) とそのスペクトル。

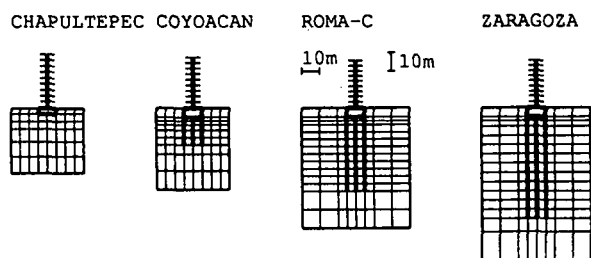


図-2 3次元ビル-基礎-杭-地盤系。9階建のビルの例。

杭は梁要素から、地盤は3次元直方体要素からなる。外力の効果を明確にするため、すべて線形材料を使用する。動的解析に先立ち、重力による初期応力を評価する。解析では、群杭効果を考慮して何本かの杭を1本にまとめ、ビルによらず9本の杭を使用する。Hill 区域のビルまたは3階建のビルでは、杭を使用しない。相互作用系底面における入力地震動を、前述の地中合成加速度波から、1次元S波理論によって計算する。

表-2は、ビル1階の最大せん断力のせん断強度に対する比率を示す。2つの大きな矛盾を指摘できる。第1に、メキシコ地震で被害が大きかった Roma-C 観測点の、9階建のビルのせん断力が小さすぎる。第2に、再び Coyoacan 観測点において、3階建のビルのせん断

表-2 相互作用解析による、ビル1階の最大せん断力のせん断強度に対する比率 (%) <EW 成分>。

	(A) Chap	(B) Coyo	(C) Roma	(D) Zara
40階建	2	15	28	25
25階建	22	29	42	86
15階建	30	46	203	128
9階建	42	64	79	220
3階建	67	264	72	85

力が大きすぎる。地盤の減衰定数を一定としたので、より適切な減衰を使用すれば矛盾はさらに拡大する。

ボアホール観測点の地表と地下の強震記録を使用して、地盤応答の再現性を調べる。3次元相互作用系からビルを除去して、1次元地盤応答解析を実施する。初期応力は考慮しない。入力地震動は、下側の地中加速度計で得られた、1995年の地震の記録から1次元S波理論によって計算する。計算された地表加速度波 (図-3) を地表記録 (図-4) と比較する。計算波は、硬質地盤の2観測点では記録とよく一致するが、軟弱地盤の2観測点では記録とかなり異なる。地盤の減衰定数を一定としたので、実際の矛盾はさらに大きい。

実際の地震動は浅い地盤では増幅するので、外力を過小評価している。加速度記録の主な波動は、深さ数 km

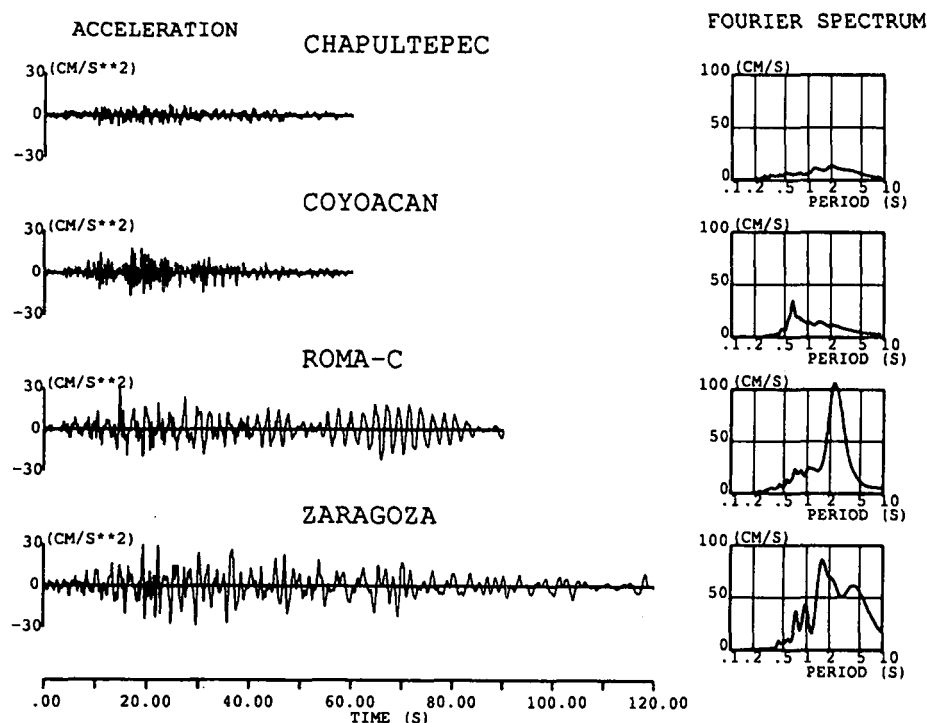


図-4 1995年の地震の地表加速度記録 (EW 成分) とそのスペクトル。

のメキシコ火山帯により励起される表面波 (基本モードラブ波) である²⁾。相互作用解析では、表面波の増幅を適切に考慮できない。Roma-C 観測点での第1の矛盾はこうして説明できる。他方、実際の地震動はビルの上部構造には作用しない。従って、上部構造に外力を作用させれば過大な振動が発生する。Coyoacan 観測点での第2の矛盾はこうして説明できる。

5. 新しい応答解析法

以上のように、地震応答系に入力地震動を作用させるという考え方には、大きな限界がある。これを克服するため、相互作用系内に「波動場」を構築し、「波動場」において相互作用解析の実施を試みている⁵⁾。すなわち、入力地震動を使用せず、弾性波動論に基づいて、相互作用系内にS波と表面波を伝播させている。入力地震動では、外力、従ってビルの応答が使用する相互作用系に依存してしまうのに対し、「波動場」では、それらは使用する系に依存しない。

謝辞： メキシコ国防災センターの R. Quaas 氏には強震記録を、同センターの O. Lopez 氏と R. Duran 氏にはビルの構造情報を、それぞれ提供いただきました。

参考文献

- 1) Iida, M. : Serious defects in current seismic building response methods, J. Eng. Mechanics, ASCE (in preparation).
- 2) Iida, M. : Excitation of high-frequency surface waves with long duration in the Valley of Mexico, J. Geophys. Res., Vol. 104, No. B4, pp. 7329-7345, 1999.
- 3) Iida, M. : Three-dimensional non-linear soil-building interaction analysis in the lakebed zone of Mexico City during the hypothetical Guerrero earthquake, Earthq. Eng. Struct. Dyn., Vol. 27, pp. 1483-1502, 1998.
- 4) 石原哲哉・三浦房紀 : 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, No. 465, pp.145-154, 1993.
- 5) Iida, M. : Three-dimensional soil-building interaction method on the basis of seismic wavefield, Earthq. Eng. Struct. Dyn. (in preparation).