

1985年メキシコ地震のメキシコ市における強震観測記録の分析と若干の解析

川瀬 博

(大崎研究室)

§ 1. はじめに

1985年9月19日午前7時17分過ぎ(現地時間)にメキシコ西岸で発生したマグニチュード8.1の大地震は、約370 km離れたメキシコ市に甚大な被害をもたらした。12月末日現在、未だ最終的な被害調査結果は報告されていないが、死者数千人、倒壊建物500棟以上といわれている。この地震の際、メキシコ市においてメキシコ国立自治大学(Universidad Nacional Autonoma de Mexico)の管理する強震計によって強震記録が得られた¹⁾⁻⁴⁾。その特性については、それらのレポートにおいて若干述べられているように極めて特徴あるものとなっている。特に軟弱地盤上で得られた記録は、従来見られなかった長大な継続時間を有する波形が観測されている。

そこで本報告では、これら第1報のレポートとして入手できた強震記録をデジタイズでデジタル化し、その特性について分析を行なうと同時に、その分析過程で明らかになったメキシコ市の表層地盤の影響について若干の解析的検討を行なった結果を報告する。その結果を基に今後より詳細な検討を加えていく予定である。

発生時刻	震源位置	マグニチュード
1985年9月19日 13:17:44 (GMT)	18.1°N 102.3°W 深さ33km	M=8.1

表-1 メキシコ地震の概要



図-1 メキシコ地震震央位置

なお、メキシコ地震の概要およびその被害調査結果については、既にいくつかの報告が日本の研究者によりなされているので⁵⁾⁻⁷⁾、参考にされたい。

§ 2. 強震記録のデジタル化

2.1 メキシコ市における強震記録

メキシコ地震の概要と、メキシコ市と震央の相対位置関係を表-1および図-1に示す。震央位置については当初、メキシコ自治大学が発表したものと NEIS の定めた値の2つが発表されているが、以下では NEIS の値を用いる。

震源近傍においては、メキシコ自治大学とカリフォルニア大学サンディエゴ校の共同強震観測網が敷かれており、岩盤上の記録が多数得られているが、これらに関する考察は本論の主旨と離れるのでここでは触れない。ただ、これらの記録から本地震がマルチプルショックであったことが指摘されており⁸⁾、メキシコ市における観測記録について考察するときにこのことを考慮に入れておく必要がある。

図-2に、メキシコ市内で強震記録の得られた地点を示す。記録は8地点計24成分得られているが、以下の検討においてはそのうちの3地点9成分の記録にしぼって分析を行なう。

まず、硬質地盤上で得られた記録の代表値として、メキシコ自治大学の敷地内のもののうち No 2 の CU01 と名付けられた記録を選択する。本記録は建物内の1階の記録であるが、継続時間が他の2地点に比べて長いので採用した。建物の影響については、後述するように対象とする周期域が長周期域なので無視できると考えられる。以下では、この地点の記録を UNAM と略記する。

次に、軟弱地盤上で得られた記録の代表値として通信運輸省 (la Secretaría de Comunicaciones y Transportes; 以下、SCT と略記) および中央青果市場 (Central



図-2 メキシコ市における強震観測点

地点	項目 方向	最大加速度 Gal ($\times 10^{-2} \text{m/s}^2$)	記録開始時刻 (GMT)	記録時間(s)	
				原波形	デジタル化後
SCT	NS	98	13:19:43	60	60
	EW	168			
	UD	36			
UNAM	NS	28	13:19:13	120	90
	EW	33			
	UD	22			
CDA	NS	69	(13:19:10.5)	300	150
	EW	80			
	UD	36			

表-2 強震記録の諸元

de Abastos; 以下, CDA と略記) の 2 地点を選択する。このうち, CDA では事務棟 (la oficina principal) 内 1 階と冷蔵庫棟前の地表 (frente al frigorífico) の 2 地点で得られているが, 継続時間が非常に長く波形も特徴ある波形となっている事務棟の記録を選択する。

これら 3 地点の記録の最大加速度, 記録開始時刻および記録時間を表-2 にまとめておく。なお, CDA の事務棟の記録においてはレポート中の記録開始時刻が全く不自然な値であるため, 1 km しか離れていない冷蔵庫棟前の記録の開始時刻と波形の相似性から推定した値を括弧書きで示した。

2.2 記録のデジタル化と一次処理

以上のように選択した強震記録 (加速度波形) を拡大し, デジタイザで読み取りデジタル化を行なう。サンプリングに際しては, 考察の対象とする周期領域 (数秒~1 秒) および読み取り精度から最終的なデータの時間間

隔を 0.05 秒とするため, 少なくとも時間軸は 0.05 秒間隔以下とし, かつ振幅の大きい部分については適宜より細かく読み取った。次に, 得られたデータを時間刻みをそろえるために最良近似多項式で補間し, さらに長周期および極短周期のノイズを除去するため, 0.1~10 Hz のデジタルバンドパスフィルタをかけて最終的なデジタル波形とした。

このようにして得られた 3 地点の加速度波形の NS・EW・UD 各成分を図-3~5 に示す。本波形に対して各レポート記載の原波形と等縮尺で比較した結果, ごく細部を除きよく一致していることを確認した。ただ, 最大加速度値については, 短周期成分のカットと零線のずれ等の影響により 1~2% 程度の差が生じている。なお記録の同時刻性の観点から, UNAM と CDA については初めの 30 秒間をカットしている。

これらの波形から以下のことが分かる。

i) SCT では約 2 秒, CDA では約 3~4 秒の波の顕著な卓越がある。

ii) SCT および CDA は, 波の振幅の時間的な変動が著しい。

iii) UNAM では, SCT や CDA ほどはっきりした卓越周期は見られないが, 水平方向成分において 1 秒前後の波が目立つ。

iv) UNAM においては, 水平成分と上下成分の最大加速度には大きな開きはないが, SCT および CDA においては水平成分の方がはるかに大きくなっている。

v) UNAM の記録においてマルチプルショックの影響はあまり明瞭には見られない。

さらに, これらの波形に対して 5% の加速度レスポンススペクトルと加速度フーリエスペクトルを求め, 図-6~8 に示す。なお, フーリエスペクトルの平滑化のための Hamming Window の回数 $n_w=20$ とした。

SCT では 2.5 秒および 2 秒に水平 2 成分において顕著なピークが見られ, 特に EW 成分では 2 秒で約 950 Gal (10^{-2}m/s^2) のレスポンスとなっていることが分かる。このほか, 1.2 秒あるいは 0.7 秒にも小さなピークが見られる。UNAM では, 硬質地盤上に置かれていることを反映して幅広い周期帯域に平均的に分布したスペクトル特性となっている。SCT や CDA と比べ約 1/10 のオーダーとなっているほか, 上下成分と水平成分が同程度のレベルとなっていることが特徴といえる。一方, CDA においては波形からも明らかだったように 3.5~4 秒に鋭いピークがあり, そのレスポンスは約 400 Gal (10^{-2}m/s^2) に達する。また, 1.4 秒および 0.8 秒にも明瞭なピークが認められ, これらの 3 つのピーク周期の間には 1:

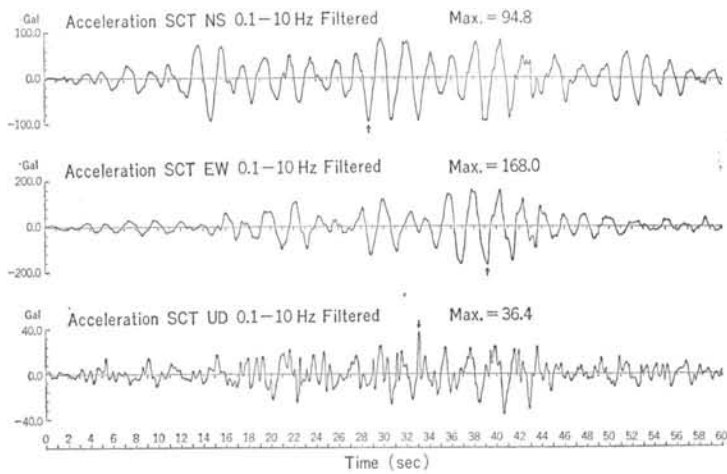


図-3 SCTにおける加速度波形 (0.1 Hz~10 Hz バンドパスフィルタード)

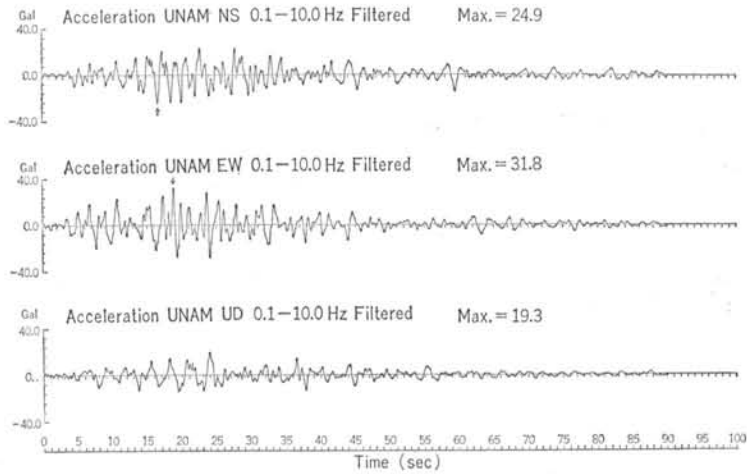


図-4 UNAMにおける加速度波形 (0.1 Hz~10 Hz バンドパスフィルタード)

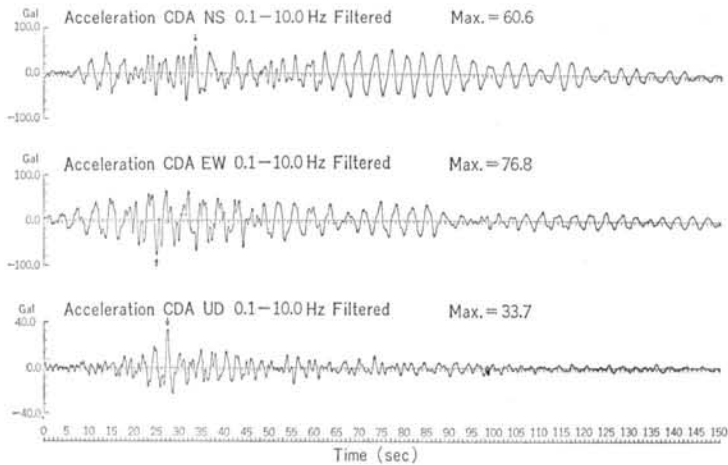
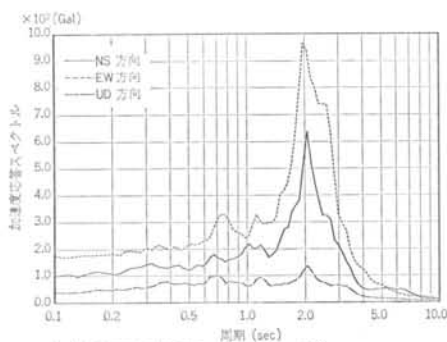
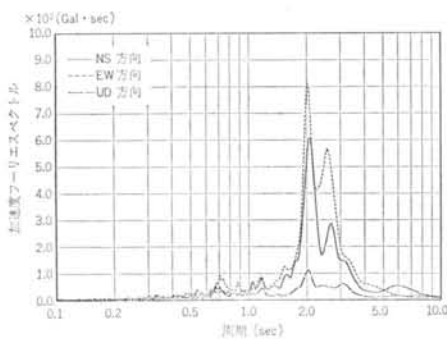


図-5 CDAにおける加速度波形 (0.1 Hz~10 Hz バンドパスフィルタード)

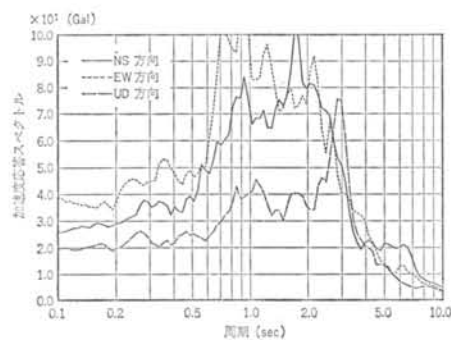


(a) 加速度レスポンススペクトル (h = 5%)

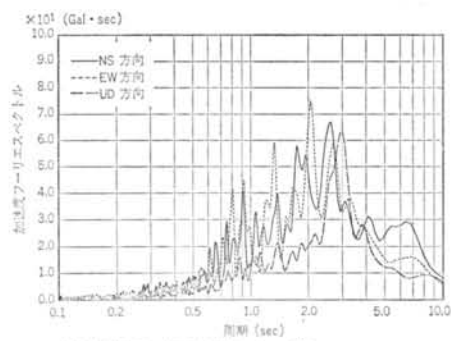


(b) 加速度フーリエスペクトル (n_s = 20)

図-6 SCT のスペクトル特性

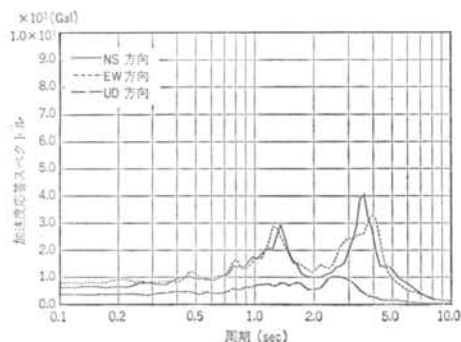


(a) 加速度レスポンススペクトル (h = 5%)

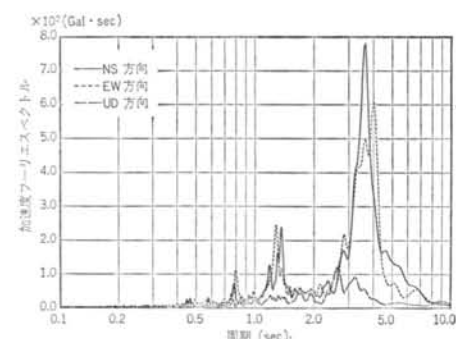


(b) 加速度フーリエスペクトル (n_s = 20)

図-7 UNAM のスペクトル特性



(a) 加速度レスポンススペクトル (h = 5%)



(b) 加速度フーリエスペクトル (n_s = 20)

図-8 CDA のスペクトル特性

1/3: 1/5 の関係があることから、これらのピークは表層部分の共振現象によるものと考えられる。

§ 3. 強震記録の分析

3.1 入射方位の同定

異なった地点で得られた地震波相互を比較したり、大きなスケールで地形の影響を考慮したりする場合には、地震動の入射方向が非常に重要となる。それは、二次元波動場では波は SH 波場と P-SV 波場に分離され、各々異なった挙動を示すからである。

ところで、前節で見てきたように SCT においては約 2 秒が、CDA においては約 3.5 秒が卓越周期となっており、これは表層地盤の一次共振周期と考えられる。そこで以下の分析においては、まずこの卓越周期近傍の周期帯域的に絞りを、入射方位を同定することを考える。

はじめに、卓越周期近傍の周期成分のみを通す狭帯域デジタルフィルタを作用させる。そのフィルタ定数は、SCT および UNAM に対しては 3 秒～1.5 秒、CDA に対しては 5 秒～3 秒とした。こうして得られた波形を図-9～11 に示す。

これらの図より、SCT の水平 2 成分においては特に

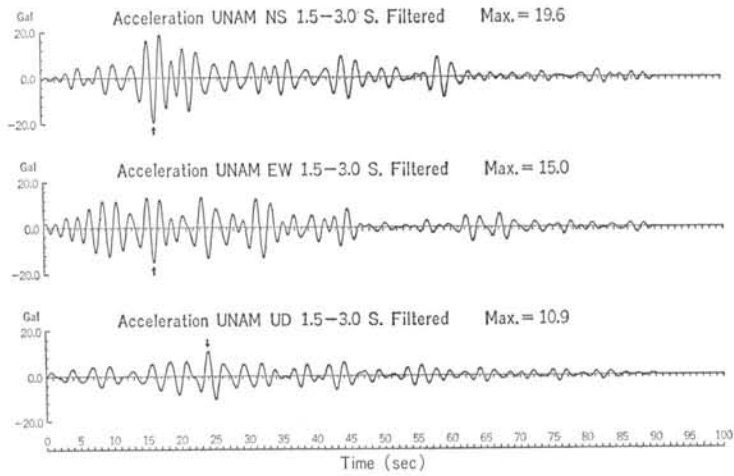


図-9 SCT における狭帯域フィルタード波形 (3秒~1.5秒)

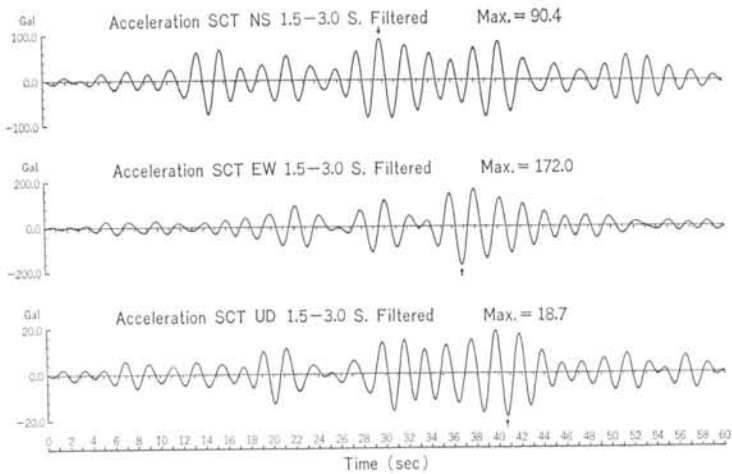


図-10 UNAM における狭帯域フィルタード波形 (3秒~1.5秒)

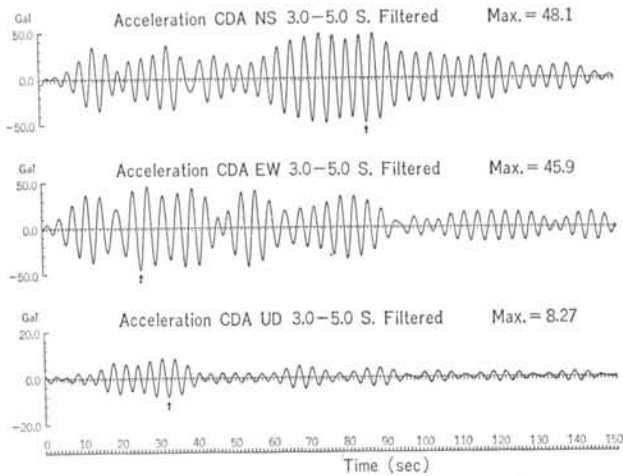


図-11 CDA における狭帯域フィルタード波形 (5秒~3秒)

2秒前後の波が全区間にわたって卓越しているため、フィルタをかけても全体の波形はほとんど変化しないことが分かる。また、UNAM では短周期成分が多く含まれているため、もとの波形と比べ差が大きいが、それでも50%程度の最大加速度となっている。

CDA においても最大加速度は約半分となっているものの、NS成分の後半60秒以降の部分について

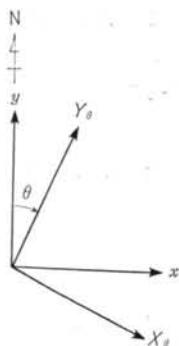


図-12 方位の変換

はほとんど差が生じていない。一方、3地点とも水平成分に比べ上下成分ではフィルタによる影響は大きく、もとの波形に短周期成分が相対的に多く含まれていることを物語っている。いかえると、水平動の卓越周期成分は上下動を伴っていないことを意味している。このことは、水平成分の卓越周期は表層の増幅効果により生じたものであることを示唆している。

以上のように得られた3地点のフィルタード波形に対して、相互相関係数を用いて波の入射方向についての情報を得ることを考える。すなわち、いま得られている波形のEW成分(N90E成分)をx成分に、NS成分(N00E成分)をy成分にとり、N方向よりtheta度時計回りに回転させた新座標系(X_theta, Y_theta)に変換する(図-12参照)。

$$\left. \begin{aligned} X_\theta &= x \cos \theta - y \sin \theta \\ Y_\theta &= x \sin \theta + y \cos \theta \end{aligned} \right\} \dots\dots(1)$$

こうして得られた座標変換された水平2成分 X_theta(t), Y_theta(t) に対して同時刻の相互相関係数 R_XY(theta) を求める。

$$R_{XY}(\theta) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n X_\theta(n\Delta t) \cdot Y_\theta(n\Delta t) \quad \dots\dots(2)$$

Delta t: 時間刻み

この R_XY(theta) を theta=0度~90度まで順次変化させて計算し、3地点についてプロットする。

こうして得られたのが図-13である。横軸は変換方位 theta(度)、縦軸は相互相関係数 R_XY(theta) で、適当にスケールリングしてある。この図から SCT については約63度、UNAM については約45度、CDA については約53度で相関が0となることが分かる。

また、図-14, 15には SCT と CDA について X_theta 成分と Y_theta 成分の最大加速度と最小加速度(負の最大加速度)の theta による変化を示す。SCT の場合、theta=63度付近で Y_theta 成分の振幅は最大となり、X_theta 成分の振幅は最小となる事が分かる。CDA の場合にも、X_theta 成分の振幅はやはり theta=63度付近で最大となっている。UNAM については、theta によって最大・最小加速度はほとんど変化しない

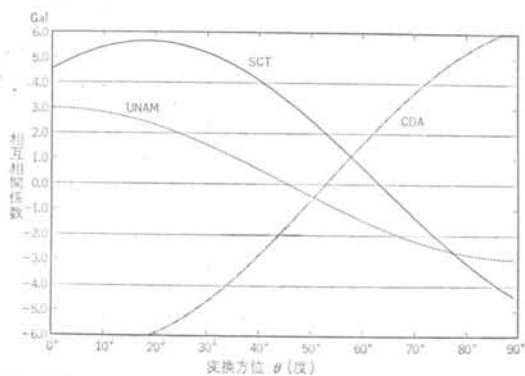


図-13 水平2成分の相関係数の変化

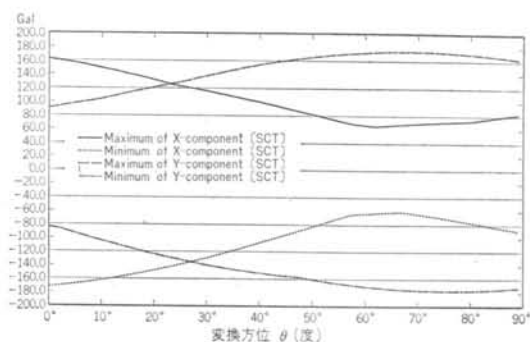


図-14 方位による最大加速度・最小加速度の変化 (SCT)

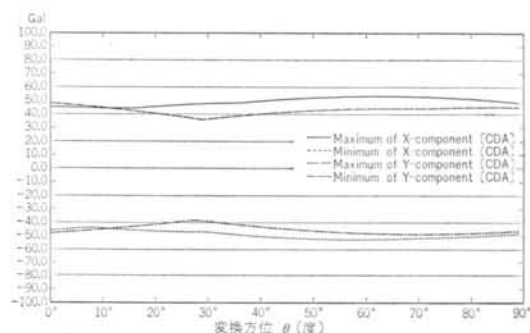


図-15 方位による最大加速度・最小加速度の変化 (CDA) ので図は割愛する。

UNAM の波形は顕著な卓越周期がなく、相互相関から得られた入射方位の信頼性は相対的に低いことから、これを除外して考えると、メキシコ市において地震波は N53E~N63E の方向に向かって入射したものと思われる。

そこで各観測点と震源との方位を求めてみると、N 66.7E~N67.5E という値が得られる。破壊が北から南へ進行していったことを考えると、初めN67Eの方向に位置したメキシコ市も、破壊の後半ではN50E程度の方向となったと考えられる。

以上のことを総合的に判断し、ここでは地震波の平均的な到来方向をN63Eであったと仮定し、N63Eの方向およびそれと直交する方向に主軸をとることにする。したがって、以下の解析では軸方向成分(Radial Component)としてN63E方向成分を、直交方向成分(Transverse Component)としてN27W成分を用いる。

なお、このような相関分析は三次元空間で上下成分も含めて行なうのがより合理的といえようが、軟弱地盤上の地震波の入射角はほぼ 0° (鉛直入射)と考えられることと、実際にSCTやCDAの上下成分と水平2成分との相互相関はほぼ0となっていることから、方位角についてのみの分析を行なった。

3.2 変換後の波形とスペクトル

図-16~18にはSCT, UNAM, CDAの軸方向成分、直交方向成分および上下成分の時刻歴波形を示す。SCTでは軸方向成分の最大加速度は $190.5 \text{ Gal}(10^{-2} \text{ m/s}^2)$ に増大したのに対して、直交方向成分では $84.7 \text{ Gal}(10^{-2} \text{ m/s}^2)$ に減少している。

図-19~21には、これら変換後の3成分の5%の応答スペクトルとフーリエスペクトルを示す。スペクトル特性としては変換前のそれと大きな差は見られないが、傾向として軸方向成分の方が直交方向成分を上回っているといえよう。

3.3 加速度ベクトルのオービット

以上のように得られた3成分に対して、再び3.1と同様のフィルタ処理を行ない、得られた加速度ベクトルのオービットを平面上に投影して表示し、考察を加える。なお、一般的には変位ベクトルのオービットを書かせることが多いが、今回の波の場合卓越周期が長いのでどちらもよく似た軌跡となっており、同様の考察が可能であった。

図-23~25にはSCT, UNAM, CDAのオービットを(a)N63E-N27W平面、(b)N63E-UD平面および(c)N27W-UD平面について示す(図-22参照)。また、時間はSCTとUNAMにおいては開始(GMTで13:19:43)より30秒~40秒および40秒~50秒の2区間を、CDAにおいては同じく20秒~40秒および40秒~60秒の2区間をここでは選択した。

これらの図より以下のことが分かる。

- i) SCTとUNAMでは全体に軸方向成分が卓越する時間が長い。CDAでは軸方向が卓越する時間と直交方向が卓越する時間が分離される傾向にある。
- ii) 軸方向成分と上下方向成分はきれいな相関関係を

見せており、これを直交方向成分と上下成分のオービットと比較したとき、両者の相関度には有意な差が認められる。この傾向は、特にSCTとUNAMについて顕著である。この事實は、面内水平動に伴って上下成分が生じていることを意味しており、N63E方向が軸方向として妥当なものであることを裏付けているといえよう。しかし、このことからRayleigh波の混在を結論づけるのは(上下/水平)の振幅比が小さいことからみて、早急すぎるように思われる。

3.4 非定常性に対する検討

時刻歴波形を見ると、特にSCTやCDAでは時刻によってかなり異なった様相を呈していることが分かる。この波の非定常性を調べるために、位相差分 t_{gr} を求め周波数毎にプロットしてみる。 t_{gr} は波をフーリエ変換したときの位相の傾きであり、ある振動数成分の時間軸上における重心位置を表わしている⁹⁾¹⁰⁾。その結果、図-26に示したSCTの軸方向成分を除いて明瞭な分散性の傾向は見出せなかった。図-26では、約15秒後の0.25 Hzの点から約50秒後の0.6 Hzに至る比較的是っきりした t_{gr} の連続的な推移がみられる。この傾向は、ランニングフーリエスペクトルによる検討においても、SCTの軸方向成分のみ見出された。しかし、その原因が表面波によるものか、あるいは別の理由に起因するのか現時点では断定できない。

3.5 UNAMに対するSCT, CDAのフーリエスペクトル比

SCTやCDAのある辺りの地盤は40~50 mの軟弱な沖積層を有しており¹¹⁾、当然表層地盤による増幅が考えられるが、一方UNAMは市南西部の比較的堅固な地盤上にあって、表層軟弱層による増幅はあまり考えられない。そこで、入力地震動のスペクトル特性を差し引き、SCTやCDAでの表層地盤の増幅特性を抽出するため、UNAMに対するSCTおよびCDAのフーリエスペクトル比を求め考察する。

図-27, 28にSCT/UNAMおよびCDA/UNAMのフーリエスペクトル比を図示する。各図には軸方向、直交方向、それに上下方向各成分が重ねて書いてある。平滑化は、従来同様Hamming Window 20回である。

これらの図から以下のことが分かる。

- i) SCTでは2秒、1~1.1秒および0.7秒に卓越周期があり、特に2秒のピークは軸方向で約18倍、直交方向で約12倍の大きな増幅率となっている。また、0.4秒にもはっきりしたピークがあるが、時刻刻みから見て信頼

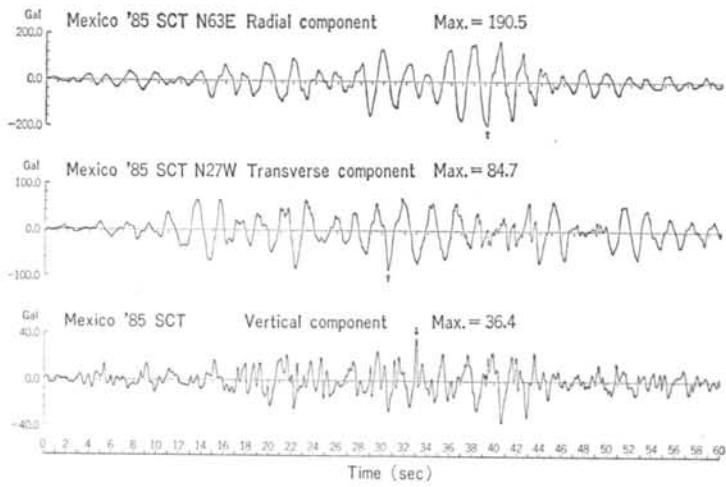


図-16 方位変換後の加速度波形 (SCT)

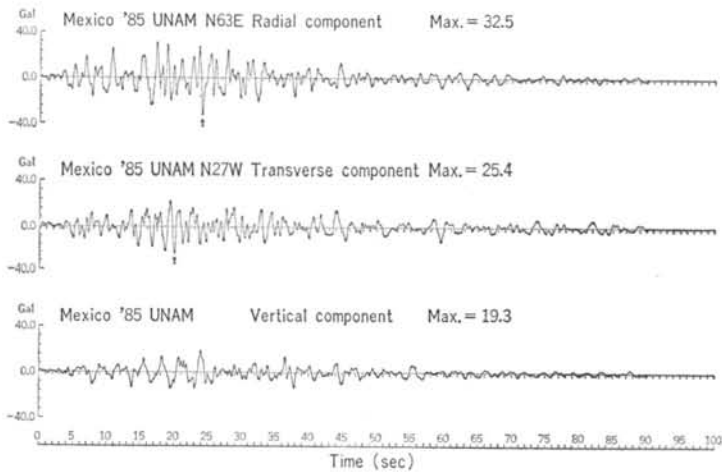


図-17 方位変換後の加速度波形 (UNAM)

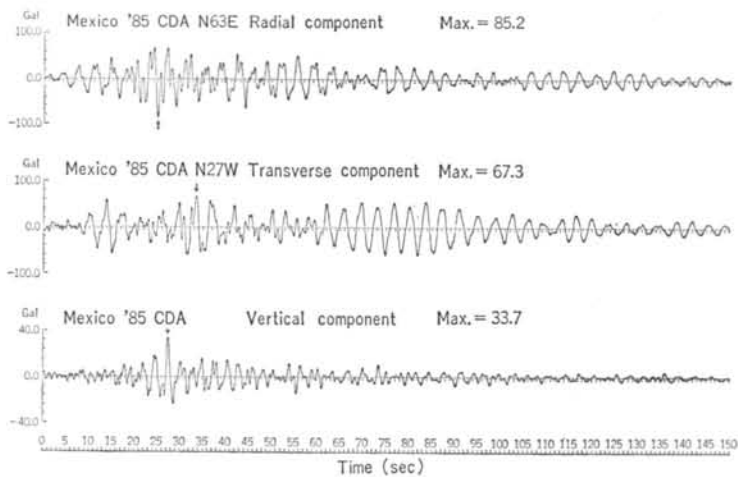
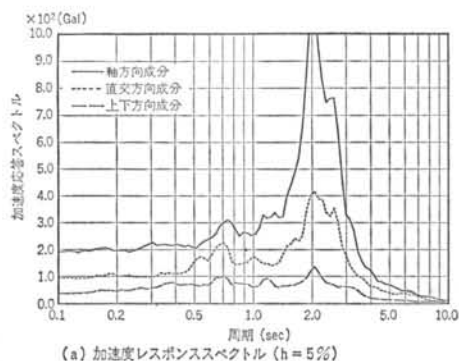
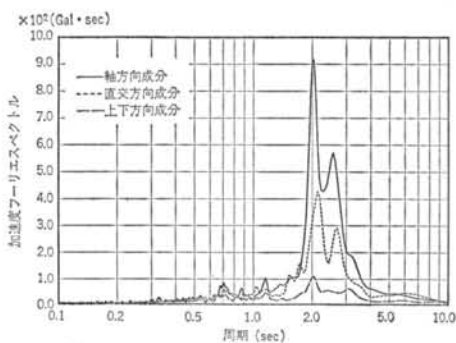


図-18 方位変換後の加速度波形 (CDA)

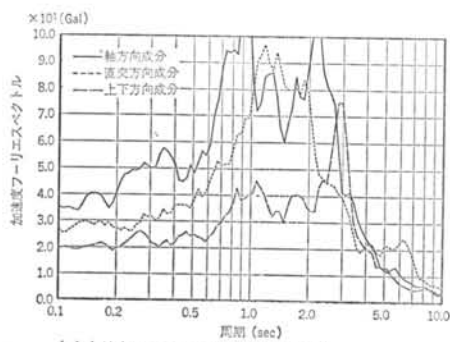


(a) 加速度レスポンススペクトル ($h = 5\%$)

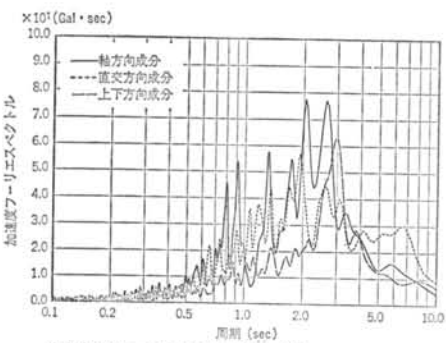


(b) 加速度フーリエスペクトル ($n_w = 20$)

図-19 SCT のスペクトル特性

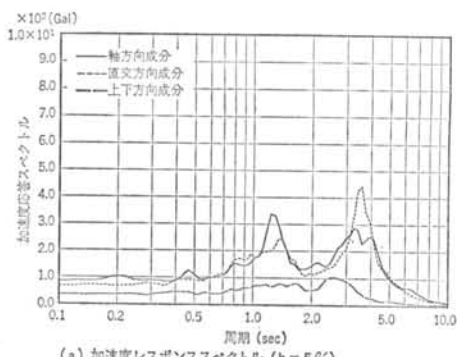


(a) 加速度レスポンススペクトル ($h = 5\%$)

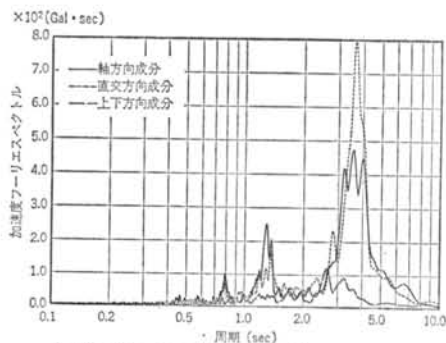


(b) 加速度フーリエスペクトル ($n_w = 20$)

図-20 UNAM のスペクトル特性



(a) 加速度レスポンススペクトル ($h = 5\%$)



(b) 加速度フーリエスペクトル ($n_w = 20$)

図-21 CDA のスペクトル特性

性に乏しい周期域なので今後の検討が必要である。ただ、2秒を1次モードとすると、0.7秒および0.4秒は2次・3次モードに対応する。

ii) CDA では3.5秒、1.2~1.5秒、0.8秒にピークがあり、3.5秒の増幅率は軸方向で約15倍、直交方向で約36倍となっている。3.5秒を1次とすると、やはり2次・3次に対応した周期の比となっている。

iii) SCT の上下成分において水平動と同様の2秒、1秒、0.7秒付近でピークがみられ、特に2秒と0.7秒では増幅率が高い。これらのピークがP波の重複反射に伴うものとは考えられず、またその規則性から Rayleigh 波によるものと思われないので、斜め入射のP波、SV波に起因するピークである可能性が高い。

ところで、このスペクトル比は全継続時間に対するものであるが、図-16~18を見比べれば分かるように、SCT および CDA の波形における振幅の変化の様相は UNAM のそれとはかなり異なっており、両者の間の伝達関数が時間的に変動していることは明らかである。これを把握するため、記録開始から一定時間区間の波形を切り出し、対応する時間区間の2波に対してスペクトル比を求め、伝達関数の時間的変動を見てみよう。これを以下では時分割フーリエスペクトル比と呼ぶ。

図-29、30はこうして求めた SCT の時分割スペクトル

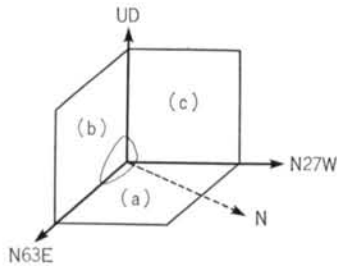
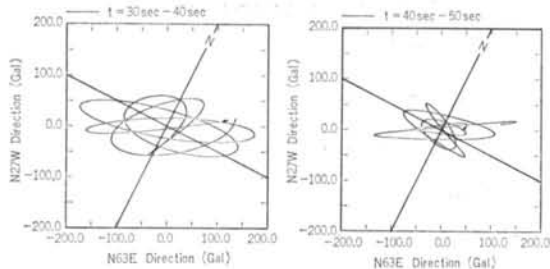
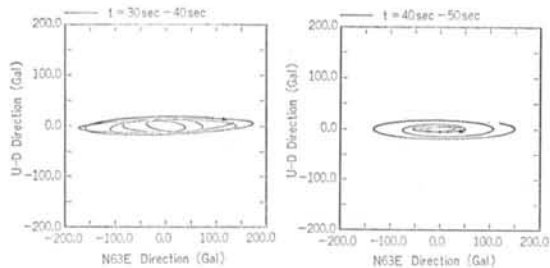


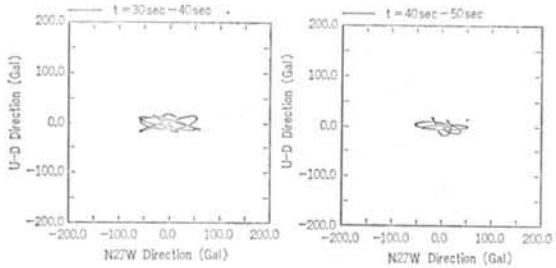
図-22 オービットの投影平面



(a)N63E-N27W平面



(b)N63E-UD平面

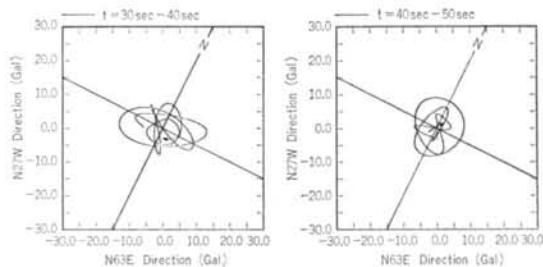


(c)N27W-UD平面

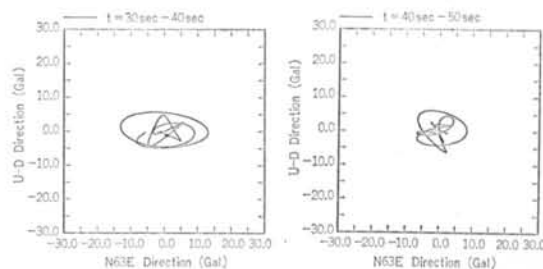
図-23 SCT の加速度ベクトルのオービット

比であり、図-29が軸方向成分、図-30が直交方向成分である(上下成分は割愛)。以下では Hamming Window は5回としている。1区間は30秒とし、15秒ずつずらしている。

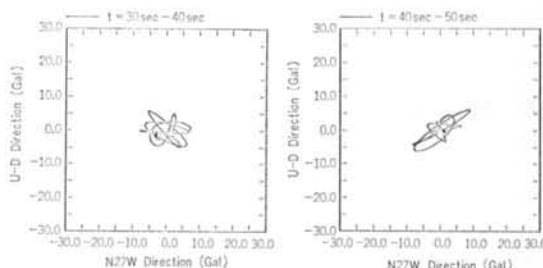
これらの図から、伝達特性の時間的変動がいかに顕著かがよく分かる。特に、軸方向成分においては $t=30$ 秒~60秒の区間で1次ピークの増幅率は60倍以上となっている。また、区間が後になるほどピーク周期が長周期側



(a)N63E-N27W平面



(b)N63E-UD平面



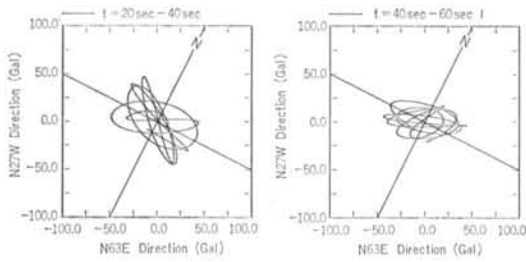
(c)N27W-UD平面

図-24 UNAM の加速度ベクトルのオービット

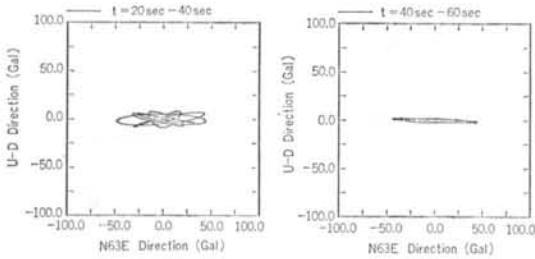
にシフトしていく様子をはっきりと現われている。しかし、その原因が地盤の非線形性によるものか、波動の伝播特性に起因するのかわ現時点では判断し難い。ただ、メキシコ市の地盤の性状および最大加速度から考えて、SCT においてはかなりの程度非線形領域に入っていたであろうことは否定できない。

図-31, 32には、同じくCDAのUNAMに対する時分割スペクトル比を示す。1区間30秒で、15秒ずつずらすことはSCTと同様であるが、90秒後まで5区間について求めた。

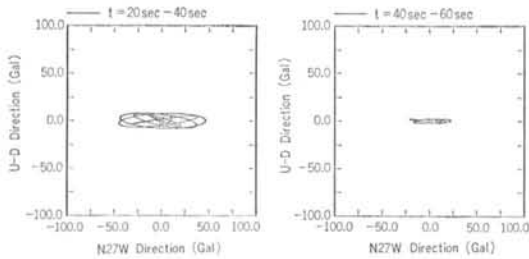
まず、図-31の軸方向成分について見ると、1次のピークレベルが12倍から20倍へと増大していくとともに、3秒付近であった周期が3.5~3.6秒へと推移していつていることが分かる。ピーク周期の推移は2次のピークにも明瞭に表われている。なお、5秒以上にみられるピークは時間区間の両端部の打ち切りに伴う見掛けのピークと考えられる。



(a)N63E-N27W平面



(b)N63E-UD平面



(c)N27W-UD平面

図-25 CDA の加速度ベクトルのオービット

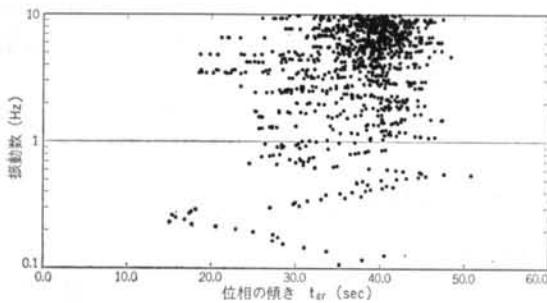


図-26 SCT の軸方向成分の位相の傾き t_{qr} の分布

一方、直交方向成分においては少し様相が異なり、前半部では1次卓越周期は4秒でレベルが10~16倍の間で変動しているが、後半ではピークレベルが20~30倍へと増大するのに伴い、周期は逆に3.6~3.5秒へと変化していている。

いずれにしても、SCT、CDA の UNAM に対する伝達特性はかなり強い非正常性を帯びており、単純な地盤

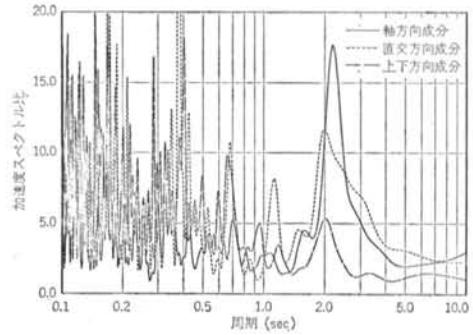


図-27 UNAM に対する SCT のフーリエスペクトル比

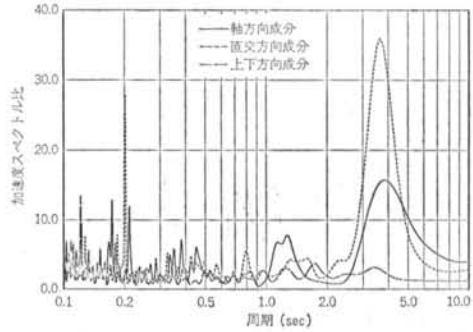


図-28 UNAM に対する CDA のフーリエスペクトル比

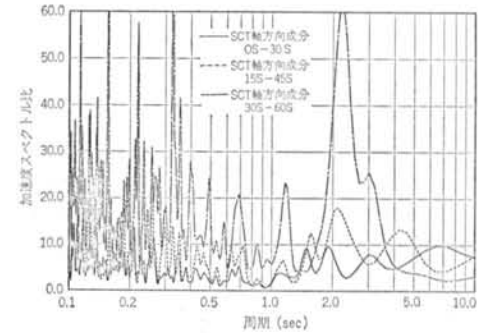


図-29 SCT/UNAM の時分割フーリエスペクトル比 (軸方向成分)

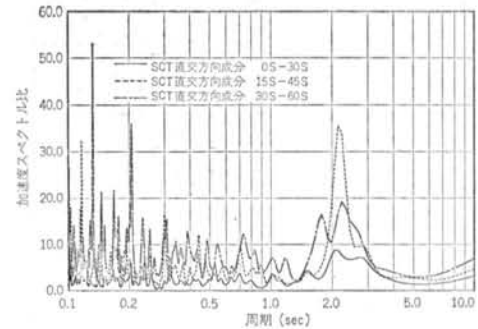


図-30 SCT/UNAM の時分割フーリエスペクトル比 (直交方向成分)

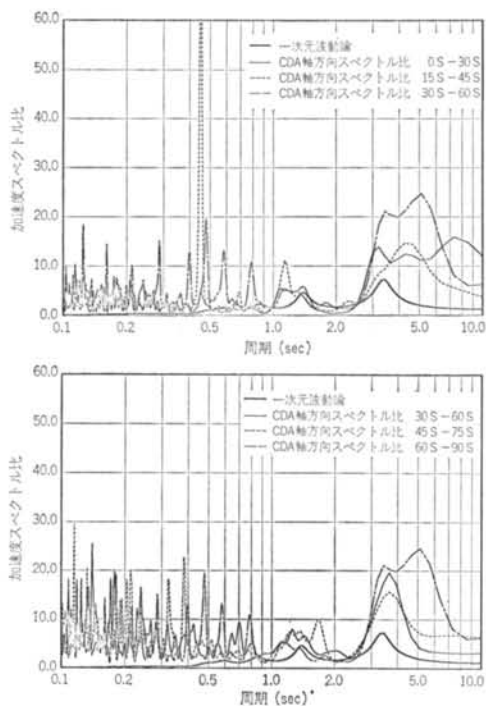


図-31 CDA/UNAMの時分割フーリエスペクトル比
(軸方向成分)

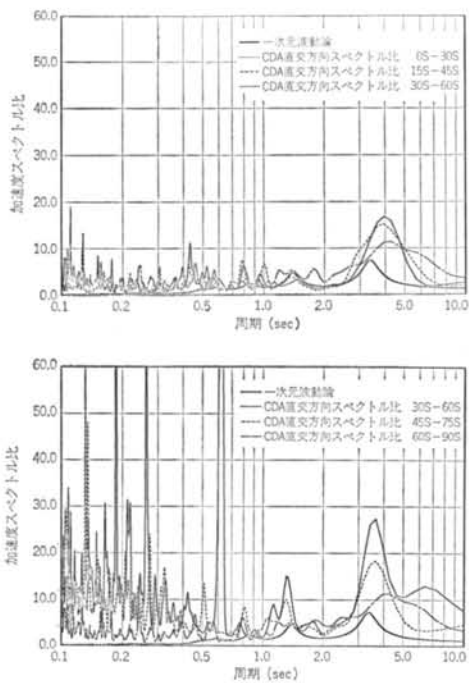


図-32 CDA/UNAMの時分割フーリエスペクトル比
(直交方向成分)



図-33 16世紀初頭の湖岸線¹²⁾

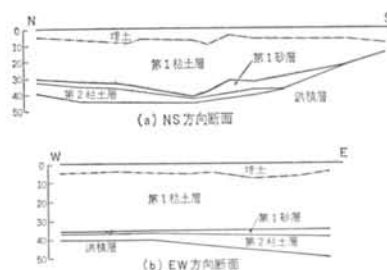


図-34 メキシコ市の地質断面図¹³⁾

モデルでは説明のできない時間的変動があることが明らかとなった。このような伝達特性の時間依存性を把握するために、時分割スペクトル比を計算することは非常に有効な手段であるといえる。

§ 4. 沖積層地盤の増幅特性

4.1 メキシコ市の地盤概要

メキシコ市はよく知られているように、元来湖であった盆地を排水・干拓して形成された都市である。図-33には16世紀初頭の湖岸線を示す¹²⁾。このため、沖積層は湖成の堆積層となっている。

メキシコ市の地質データとしては、ボーリング結果のデータ(土質, N値, 含水率など)は比較的豊富に得られている。一例として、図-34に市中心部のNS方向およびEW方向の地質断面図を示す¹³⁾。断面にほぼ対応する通りの位置を図-2に記入してある。これを見ると

減衰定数	せん断波速度		単位体積重量	
	(提案値)	(初期値)		
$h = 5.36\%$	$V_s = 51 \text{ m/s}$	$V_s = 34 \text{ m/s}$	$\gamma = 1.23 \text{ t/m}^3$	11m
$h = 5.36\%$	$V_s = 90 \text{ m/s}$	$V_s = 60 \text{ m/s}$	$\gamma = 1.25 \text{ t/m}^3$	23.5m
$h = 5.36\%$	$V_s = 105.5 \text{ m/s}$	$V_s = 70 \text{ m/s}$	$\gamma = 1.37 \text{ t/m}^3$	11.5m
$h = 5.36\%$	$V_s = 134 \text{ m/s}$	$V_s = 90 \text{ m/s}$	$\gamma = 1.75 \text{ t/m}^3$	24m
$h = 5.36\%$	$V_s = 1050 \text{ m/s}$	←	$\gamma = 1.76 \text{ t/m}^3$	430m
$h = 0\%$	$V_s = 2800 \text{ m/s}$	←	$\gamma = 2.50 \text{ t/m}^3$	Rock

図-35 アラメダパークの地盤モデル(文献17)に加筆)

硬い砂層までの表層厚は市中心部で40~45mで、南あるいは北に遠ざかるにつれて円弧状に浅くなっていること、また東西にはあまり変化はないが東ほど深くなっていること、および粘土層を2分する薄い砂層が連続的に広がっていることが分かる。第1粘土層は非常に軟弱であり、N値はほとんど0、含水比は200~400%といわれる。このため、市中心部では地盤沈下が激しく、年平均5~20cmの沈下があると報告されており¹⁴⁾、地盤沈下と建物被害との相関が指摘されている¹⁴⁾¹⁵⁾。

4.2 沖積地盤のモデル

このように、第1粘土層と第1砂層および第2粘土層は市全域にわたって連続的に存在しているので、第1粘土層レベルと第2粘土層、すなわち全沖積層レベルの等深度線が作成されている¹⁶⁾。これに基づきSCTの第1粘土層厚を読み取ると約30m強、沖積層厚は約42mとなる。また、CDAにおいてはそれぞれ約40m弱と約52mとなる。

一方、その沖積層部分のせん断波速度 V_s に関するデータは非常に少なく、Herrera et al.¹⁷⁾ および Faccioli et al.¹⁸⁾による値ぐらいしか見当たらない。後者では、市中心部のアラメダセントラルパークとノノアルコートラテロルコ団地の地盤定数を提示している。図-35に文献17)中のアラメダパークの地盤定数を示す。図で、 V_s の欄に初期値とあるのは実験から求められた当初の値であり、提案値とあるのはアラメダパークでの地震観測記録と対応させるため沖積層部分の初期値を1.5倍した

Herrera et al. の提案値である。第1層と第2層を加えた層厚は34.5mとなり、これは文献16)の第1粘土層厚に対応する。また第3層までの層厚は46mであり、同じく沖積層厚に対応する。したがって、SCT および CDAの地盤モデルとしてメキシコ市全域にわたって層が連続しているものと仮定すれば、このアラメダパークの定数を参考に定数を設定できる。以下では、SCT と CDAに対して Herrera et al. の提案値と文献16)の第1粘土層厚、沖積層厚を基に上部3層の定数と層厚を決定し、基本モデル(モデルNo1)とする。

次に洪積層のせん断波速度であるが、Herrera et al. は表-3に示したように上層を $V_s = 134 \text{ m/s}$ 、厚さ24m、下層を $V_s = 1050 \text{ m/s}$ 、厚さ430mと仮定している。一方、Faccioli は上層の V_s として245~287 m/sという値を仮定している¹⁷⁾。Herrera らの上層の $V_s = 134 \text{ m/s}$ という値は、それより上部の試験結果を外挿して求めたものであり、この層の生成年代とN値50以上の砂層であることから考えると信頼できるものとはいえない。以上のことから、洪積層上層のせん断波速度を243 m/sと仮定する。

さらに、下層についても再検討する。文献16)の $V_s = 1050 \text{ m/s}$ という値は砂質土の実験値から推測したもので、特に具体的な根拠のある数字ではない。その後、市中心から東北東方向のTexcoco湖側において弾性波探査が行なわれ、深い部分のP波速度構造が明らかにされた¹⁸⁾。これによると、洪積層の V_p は1550~1800 m/sとされており、この値から見て $V_s = 1050 \text{ m/s}$ という値は大きすぎると考えられる。いま、洪積砂層の一般的な値としてポアソン比0.43を仮定すると $V_s = 600 \text{ m/s}$ となる。非常に大胆ではあるが、以下ではこの値の層を最下層と仮定する。

以上で V_s 値と層厚が決められたが、減衰定数についてはHerrera らの値しか見当たらないのでそれを採用することとし、最下層については弾性体とする。単位体積重量については最下層以外はHerrera らの値とし、最下層については文献18)から 2.5 t/m^3 ($2.45 \times 10^4 \text{ N/m}^3$)とする。また、Herrera らの V_s 値が初期値を1.5倍した値であることから、 V_s 値をSCTについては $\times 0.9$ (モデルNo2)、 $\times 0.8$ (モデルNo3)倍したもの、CDAについては $\times 0.8$ (モデルNo2)、 $\times 0.64$ (モデルNo3)倍したモデルを考え、計3地盤モデルについて解析し観測結果と比較検討する。

一方、UNAMについては軟弱な表層地盤はほとんどなく、また層の連続性も期待できないので層序の推定はかなり難しい。ここでは、第1層としてSCTやCDAの第3層と同等のせん断波速度をもつ層を考え、その層厚

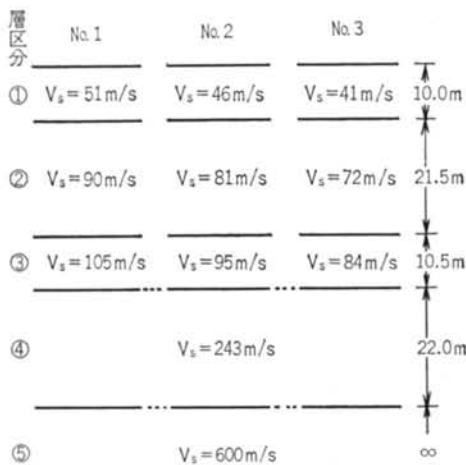


図-36 SCTの地盤モデル

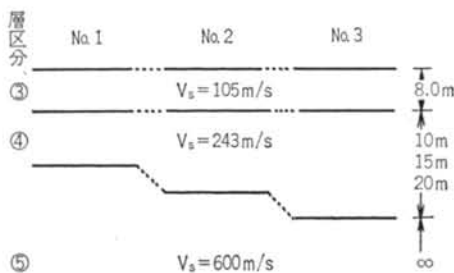


図-37 UNAMの地盤モデル

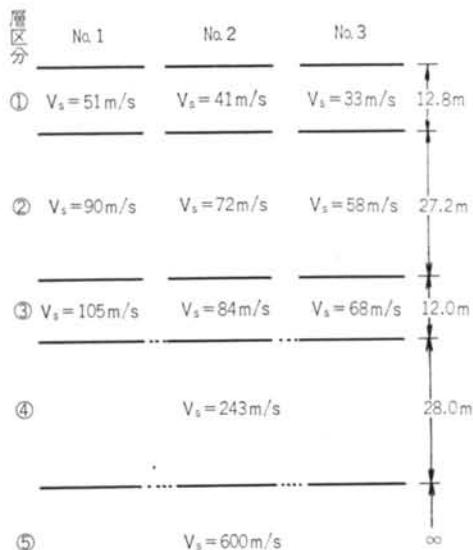


図-38 CDAの地盤モデル

8mはUNAMの観測点近傍のボーリング結果¹⁹⁾から推定した。第2層は洪積層上層とするが、その層厚は全くデータがないので10m, 15m, 20mの3種を仮定し、そ

項目	①	②	③	④	⑤
単位体積重量 $\gamma(\text{t/m}^3)$	1.23	1.25	1.37	1.75	2.50
履歴減衰定数 h	5.4	5.4	5.4	5.4	0.0

表-3 地盤モデルの定数

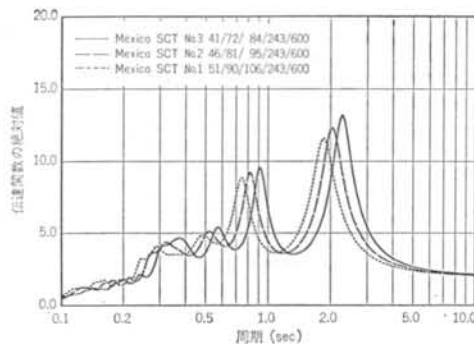


図-39 SCTの一次元波動論による伝達関数(絶対値)

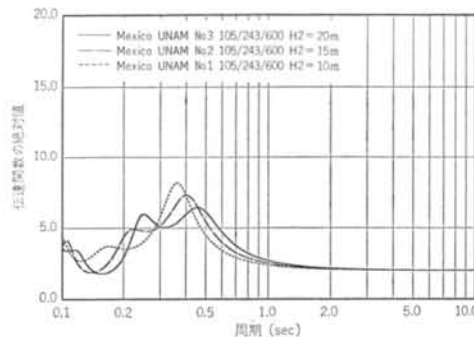


図-40 UNAMの一次元波動論による伝達関数(絶対値)

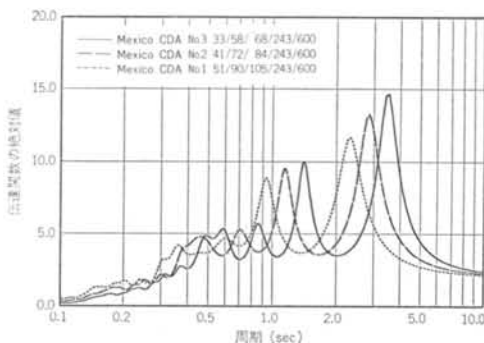


図-41 CDAの一次元波動論による伝達関数(絶対値)

それぞれモデルNo.1, No.2, No.3とする。

以上のように設定されたSCT, UNAMおよびCDAの地盤モデルを図-36~38に示す。また、単位体積重量と減衰定数を表-3にまとめておく。

4.3 一次元波動論による解析

この地盤モデルを用いて、一次元波動論にもとづき沖積層地盤の増幅特性を求める。

まず、図-39~41にSCT, UNAM およびCDAの基盤 ($V_s=600$ m/sの洪積層下層)の入射振幅を1としたときの地表面の伝達関数を示す。縦軸が絶対値で、横軸は周期である。

SCTの伝達関数では、1次ピークが約1.8秒~2.2秒で12~14倍の増幅率となっている。観測記録の1次卓越周期は約2秒であったことから、おおむねよく対応した結果といえる。

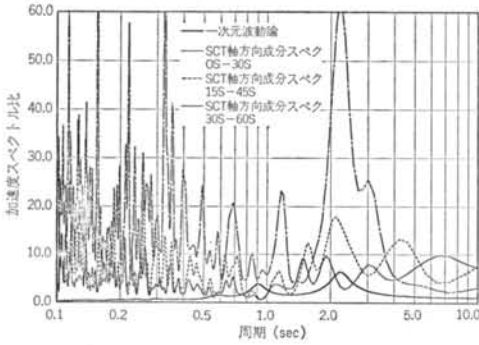


図-42 クロス伝達関数と時分割スペクトル比との比較 (SCT, 軸方向成分)

一方, UNAM では1秒以上の長周期域ではほぼフラットとなり, 硬質地盤としての性状を示している。第2層(洪積層上層)の層厚によって1次ピークの周期が0.35秒~0.5秒の間を推移しているが, その差は小さい。

また, CDAにおいては1次ピーク周期が沖積層の V_s の変化により2.2秒~3.5秒へと変化し, それに伴って増幅率も12倍~15倍へと増大している。観測記録の1次卓越周期は約3.5秒であったことから, この中ではモデルNo.3 ($\times 0.64$ 倍)が最もよく適合したモデルといえる。

これらの結果から, 以下ではSCTおよびCDAについてはNo.3モデルを, UNAMについてはNo.1モデルを

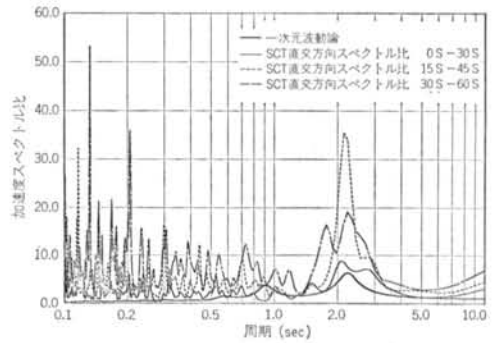


図-43 クロス伝達関数と時分割スペクトル比との比較 (SCT, 直交方向成分)

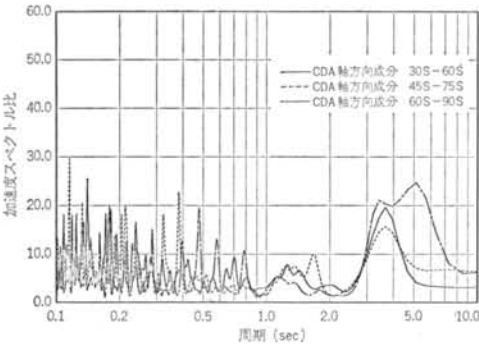
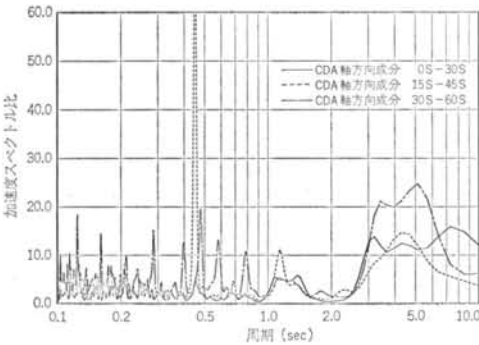


図-44 クロス伝達関数と時分割スペクトル比との比較 (CDA, 軸方向成分)

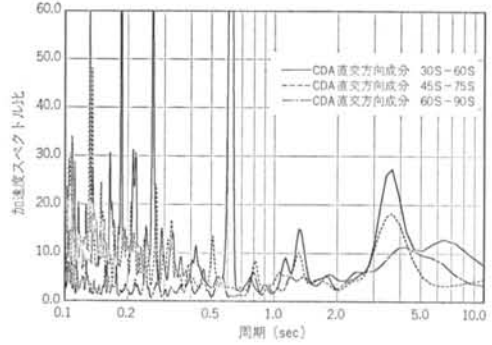
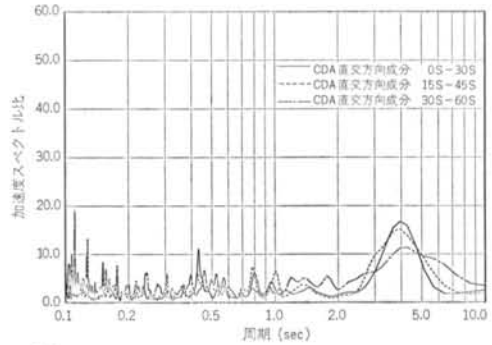


図-45 クロス伝達関数と時分割スペクトル比との比較 (CDA, 直交方向成分)

それぞれ最適モデルとして解析を進める。

次に SCT と CDA の、この最適モデルの伝達関数の UNAM に対するクロス伝達関数を計算し、観測結果のフーリエスペクトル比と比較する。

図-42, 43 が SCT の、図-44, 45 が CDA の時分割フーリエスペクトル比と解析結果のクロス伝達関数を比較したものであるが、これらから明らかなように全体に解析結果の増幅率は少なめとなっており、特に後半となるほどその差が増大する傾向にある。

このことを波形で確かめるために、このクロス伝達関数に UNAM のフーリエスペクトルをかけて逆変換し、時刻歴波形のシミュレーションを行なった。その結果が図-46, 47で、図-46が SCT の、図-47が CDA のものである。図中で実線は計算波形、点線は実測波形である。なお、2点間の伝達時間を考慮し横軸は適当にずらしてある。

これらの時刻歴波形のシミュレーション結果から以下のことが分かる。計算波形は、前半部 0~30秒から35秒の間においては実測波形と非常によく一致しており、とても7~10kmも離れた2点間の記録から計算したとは思えない。しかし、後半部においては計算波形は実測値をかなり下回る傾向にあり、特に SCT の軸方向成分の最大加速度を示す相が全く表現できない。地盤定数を変更すれば後半部の振幅を増大させることは可能であるが、今度は前半部が過大評価となる。このことは一次元波動論に基づくシミュレーションの限界と考えられ、二次元あるいは三次元的な波動の伝播を考えた解析の必要性を示唆している。

§ 5. 結論

メキシコ地震の際にメキシコ市で得られた強震記録を3地点についてデジタル化し分析したうえで、現時点で入手できたデータから最も適切と思われる地盤モデルを設定し、一次元波動論によってシミュレーションすることを試みた。得られた知見をまとめると、以下のとおりである。

(1)SCT では約2秒、CDA では約3.5~4秒に顕著な卓越周期があり、これは沖積層の1次共振周期と考えら

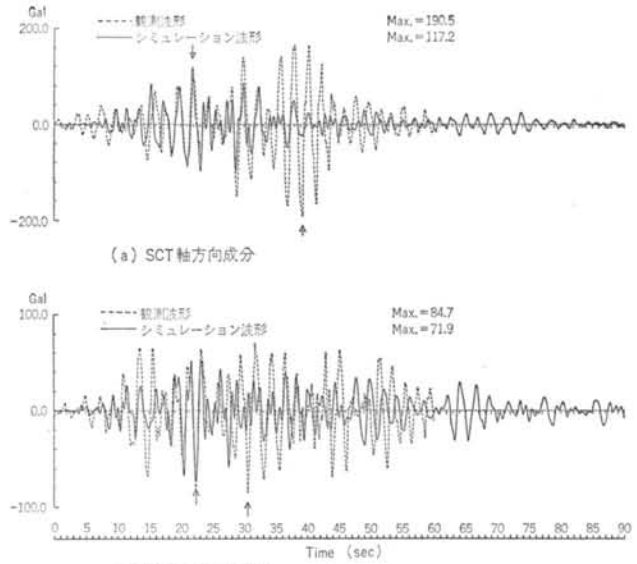


図-46 シミュレーション波形と観測波形との比較

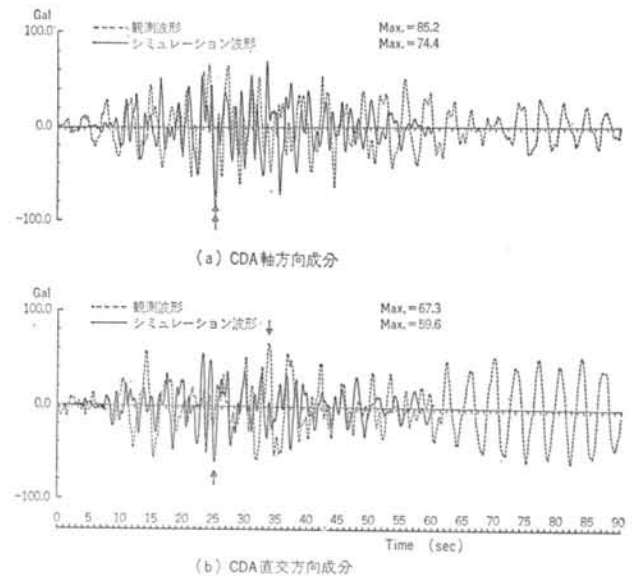


図-47 シミュレーション波形と観測波形との比較

れる。

(2)卓越周期近傍の波動は、おおむね震源方向から到来したものと推定される。

(3)加速度ベクトルのオービットおよび SCT/UNAM, CDA/UNAM のスペクトル比の上下成分などからみて観測記録には Rayleigh 波成分は少なく、上下成分は斜め入射のP波およびSV波によって大半が生じている可能性が高い。

(4)入手できたデータを総合的に用いることによって、

観測された地震波に見られる卓越周期をうまく説明できる地盤モデルを提案することができた。しかし、SCT/UNAM, CDA/UNAM のスペクトル比の時間的変動は激しく、提案地盤モデルでは前半はよく一致した波形が得られるのに対し、後半では実測値より振幅が小さく、うまくシミュレートできないことが分かった。

今後の検討課題として、SCT および CDA の後半の相を説明できるような地盤モデルを模索していくことが必要であろう。その地盤モデルが、メキシコ市の被害の集中現象をも説明できればさらに望ましい。また、今回

対象としなかった強震記録についても分析を進め、それらを合わせ多角的な検討も行なっていきたいと考えている。

謝辞 本論文をまとめるに当たり、資料の収集に関して大崎研究室 田村和夫・福島美光・三田彰の各氏および技術研究所 片岡俊一氏には多大なご協力を頂いた。また、検討内容に関し大崎研究室の佐藤俊明氏はじめ数多くの研究員の方々に貴重なご助言を頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

〈参考文献〉

- 1) J. Prince et al.: "Acelerograma en Ciudad Universitaria del sismo del 19 de septiembre de 1985" Instituto de Ingenieria UNAM, Informe IPS-10 A (1985)
- 2) E. Mena et al.: "Acelerograma en el Centro SCOP de la Secretaria de Comunicaciones y Transportes. Sismo del 19 de septiembre de 1985" Instituto de Ingenieria, UNAM, Informe IPS-10 B (1985)
- 3) R. Quaas et al.: "Los dos Acelerogramas del sismo de septiembre 19 de 1985, Obtenidos en la Central de Abastos en Mexico D.F." Instituto de Ingenieria, Informe IPS-10 C (1985)
- 4) J. Prince et al.: "Espectros de las Componentes Horizontales Registradas por los Acelerografos Digitales de Mexico, D.F., sismo del 19 de septiembre de 1985, Acelerogramas en Viveros y en Tacubaya" Instituto de Ingenieria, UNAM, Informe IPS-10 D (1985)
- 5) 渡部 丹: "メキシコ地震災害調査速報" 建築研究振興協会 (1985年)
- 6) 守屋喜久夫: "震源から離れた軟弱地盤で中高層ビルに被害が集中" 日経アーキテクチュア 11月4日号 (1985年)
- 7) 岩崎敏男: "メキシコ地震報告(概報)" 土木学会誌 12月号 (1985年)
- 8) E. Mena et al.: "Analysis del Acelerograma "Zacatula" del sismo del 19 de septiembre de 1985" Instituto de Ingenieria, UNAM, Informe IPS-10 E (1985)
- 9) Y. Ohsaki: "On the Significance of Phase Content in Earthquake Ground Motions" Earthq. Eng. & Struct. Dyn., Vol. 7 (1979)
- 10) 和泉正哲他: "地震動の位相情報に関する基礎的研究" 日本建築学会論文報告集 (昭和58年5月)
- 11) Instituto de Ingenieria, UNAM: "El Temblor del 19 de septiembre de 1985 y sus Efectos en las Construcciones de la Ciudad de Mexico" Instituto de Ingenieria, UNAM (1985)
- 12) R.C. Muris: "Ciudad de Mexico (El Subsuelo y la Ingenieria de Cimentaciones en el Area Urbana del Valle de Mexico, Simposio 10 de marzo de 1978)" SMMS (1978)
- 13) 前出11)
- 14) C.M. Duke: "Soil Conditions and Damage in the Mexico Earthquake of July 28, 1957" Bull. Seismo. Soc. Am., Vol. 49, No. 2 (1959)
- 15) 前出11)
- 16) 前出12)
- 17) I. Herrera et al.: "Earthquake Spectrum Prediction for the Valley of Mexico" 3rd WCEE (1965)
- 18) E. Faccioli: "Respuestas Sismicas Maximas Probables en las Aricillas de la Ciudad de Mexico" Instituto de Ingenieria, UNAM (1975)
- 19) J.R. Marsal et al.: "The Subsoil of Lake Texcoco (The Subsidence of Mexico City and Texcoco Project)" Secretaria de Hacienda y Credito Publico, Mexico (1969)
- 20) 前出12)

