

1985年9月19日メキシコ地震に関する研究 I

—地盤震動特性と被害との関係について—

正 木 和 明

Research on the Mexico Earthquake of September 19, 1985. I

—Relation between Seismic Characteristics of Soils and Damages—

Kazuaki MASAKI

The damage in Mexico city during the Mexico Earthquake of September 19, 1985 was studied in relation to seismic characteristics of soils in Mexico Valley. Mexico city is nowadays one of the biggest cities in the world with population of about 18 million. A sudden increase in population since 1940 caused a rapid expansion of urban area to the Lake Zone composed of extremely soft sediments of Lake Texcoco. Damages during the earthquake concentrated in this area.

Microtremor measurements and spectrum analysis of strong motion records were carried out. The results obtained suggest that predominant periods in highly damaged area are from 1 to 2.5 seconds, which are the same as natural periods of buildings having 9 to 17 floors. It means that sever damages of buildings are easily caused by resonance with soil motions. It is one of the reasons that caused damages in Mexico city.

The questionnaire survey to the citizens of Mexico city was performed to estimate seismic intensity during the earthquake of 1985. The result shows that seismic intensity was very high in the damaged area. This is the reason why comparatively low houses were also damaged.

1. はじめに

1985年9月19日午前7時19分(現地時間)メキシコ太平洋岸に $M_s=8.1$ のメキシコ地震が発生した。メキシコ国内では震源地の州名を採用してミチョアカン地震とも呼ばれている。この地震によってメキシコ市を中心とし、死者1万人、損害総額40億ドルの被害が生じた。

今回の地震による被害は確かに甚大ではあったが、死者が数千人を越える地震災害は世界的にみれば必ずしもめづらしい事ではない。1976年トルコのチャルドランの地震(死者1万人)、同年中国唐山の地震(同25万人)、同グアテマラ市の地震(同2万3千人)、1978年イランの地震(同2万5千人)、1988年アルメニアの地震(同2万5千人)など記憶に新

らしい。それにもかかわらず今回のメキシコ地震が世界の地震工学者の強い関心を集めている理由は何であろうか。

日本からは地震発生後少なくとも14の調査団が現地調査を行っている。非公式の調査団、個人レベルでの調査を含めれば数は更に多いと予想される。これらの調査団による成果は学会報告、各自の報告書、シンポジウム、研究会を通じて広く公表されている。また、メキシコ、アメリカ両国は1986、1987の両年にメキシコ地震に関するワークショップを開催しているが、日本もオブザーバーとしてこの会議に参加している。

これらの研究成果の公表をまとめてみると、世界の地震工学者がこの地震に強い関心を示した理由が

明らかとなってくる。

- (1) 今回の地震はプレート沈降に起因して発生した海の巨大地震である。これは、従来の大被害地震が内陸の浅い地震（いわゆる直下地震）であった点と大いに異なる。海の巨大地震によってこれまで多くの被害を被った日本としては特に関心を持たなければならない地震であった。
- (2) メキシコ市は中高層ビル、地下鉄、各種ライフラインなど近代的構造物をもつ人口1800万人の世界第3位の大都市である。このような大都市を襲った地震例はあまりない。
- (3) メキシコには著名な地震工学者も多く、地震工学のレベルは決して低くない。耐震設計基準も決められており、十分とは言えないまでもこの基準に基づいて都市建設が行われていた。それにもかかわらず、中高層の近代的ビルの被害が著るしかった。
- (4) メキシコ市はテスココ湖に堆積した湖成超軟弱地盤（含水比が500%にも達する粘性土も存在する）上に拡大発展した都市である。この地盤の震動特性が大被害を生じた原因のひとつである。特に周期1～5秒の地震波の卓越と継続時間の長さが中高層ビルの被害を多くしたと考えられる。
- (5) このような大被害地震の例としてはめずらしく、市内10地点において良好なデジタル強震記録が得られた。この強震記録は、地盤の震動特性の解明、構造物の地震応答解析を行う上で極めて有用であった。
- (6) 大被害を生じたにもかかわらず都市機能は完全に保たれており、地震直後の調査研究は容易であった。また地震直後のメキシコ側の態度も好意的であり、このことも地震直後の調査研究を進める上で役立った。

その他いくつかの理由が考えられるが、総じて、軟弱地盤上の世界的近代都市が海の巨大地震によって大被害を受け、かつ、良好な各種研究データが得られたことが、世界の地震工学者がこの地震に強い関心を寄せた理由である。軟弱地盤上に大都市をかかえている日本としては特にこの地震に関心を持たざるを得ないし、またこの地震から多くの教訓を得られるであろうことも確かである。

地震発生後3年が経過した。地震直後には未整理であったデータもかなりまとめられている。またその後重要なデータも追加されている。本研究では、

表1 世界の大都市人口（1980年ごろ、単位：千人）¹⁾

1	ニューヨーク・ニュージャージー	20,383
2	東京・横浜	20,045
3	メキシコ	15,032
4	サンパウロ	13,541
5	上海	13,410
6	ロスアンジェルス・ロングビーチ	11,676
7	北京	10,736
8	リオデジャネイロ	10,653
9	ロンドン	10,209
10	ブエノスアイレス	10,084

これらのデータを整理し、メキシコ地震の特徴を明らかにすることとする。

2. メキシコ市の発展経過

1985メキシコ地震が注目されている理由のひとつとして、この地震が世界的大都市であるメキシコ市を襲ったことが挙げられる。表1は国連調査による世界の大都市圏人口ランキングであるが、メキシコ市は、ニューヨーク大都市圏、東京首都圏に次ぐ世界第3位の大都市圏としてランクされている。このような大都市を襲った近年の地震としては、1971サンフェルナンド地震（ロス・アンジェルス）があるが、死者は65人であり今回の地震とは比較できない。1923関東地震は死者14万人という大被害地震であったが、現在の都市構造は関東地震時に比べ全く異ったものに変化している。したがって、日米を中心とする地震工学者が今回の地震に強い関心を示したのは、膨張を続ける世界の大都市における地震災害を考える上で、今回のメキシコ市の被害は貴重な被災例となったためである。

メキシコ市の起源は1521年スペインに滅ぼされたアステカ帝国の都テノチティランである。このテノチティランの廃虚跡にスペイン副王領新スペインの首都が建設された。1821年のメキシコ独立後もその首都としてメキシコ市は発展してきた。

図1は1800年以降のメキシコ市総人口の経年変化を示している¹⁾。独立後もうち続く戦乱、内乱、革命でメキシコ市の人口は20万人前後にとどまっていた。メキシコ経済が安定し、本格的工業化がはじまった1940年代より、田舎から多量の人口が流入し、

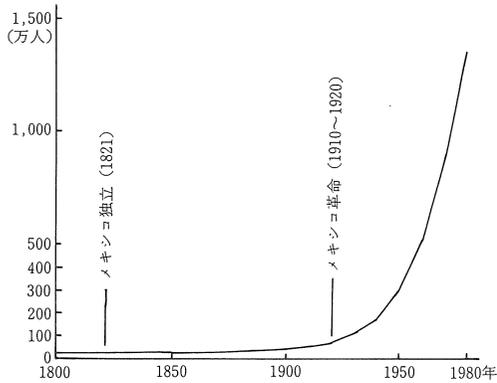


図1 メキシコ市大都市圏の人口¹⁾

人口の爆発的膨張が開始した。人口増加率は年5%に達し、1980年には1355万人の大都市となった。1985年の地震発生当時の人口は1800万人と言われている。

ところで、上述の人口は行政区画としての市の人口ではない。1970年以前のメキシコ市は現在の都心4区(クワウテモック区、イダルゴ区、ファレス区、カランサ区)が市域であった。1970年新しい連邦地区区庁設置法が制定され、連邦地区(Distrito Federal, 通称DF)は、メキシコ市と12の区(delegación)から構成されることとなった。しかし、現在都市域はDFの境界を越えDFの隣のメキシコ州の諸都市(municipio, アメリカのカウンティにあたる)に拡大している。この行政区画をこえて広がる大都市圏をさし示す用語としてメキシコ市大都市圏(zona metropolitana de la ciudad de México. ZMCM)が使用されるようになった。図1に示された人口はZMCMの総人口である。

図2は上述のZMCMと市街化地域を示している。比較のために、名古屋都市圏を同縮尺で示しておく。現在のメキシコ市大都市圏ZMCMは矢作川以西の愛知県と同規模の区域であることがわかる。DFの東部と南部は標高差500m~1000mの山地で囲まれているために市街地は北部および東部へと拡大しており、これにともなってZMCMは今後も急速に広がっていくと予測される。

ところで、今回の地震における被害は旧メキシコ市(現在の都心4区)域に集中した。日本における地震被害例の多くからの経験では、旧都心部での被害は小さく周辺地域に被害が集中するのが一般的で

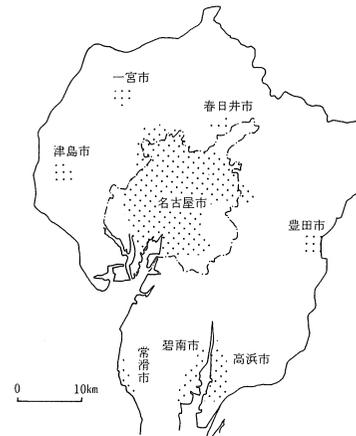
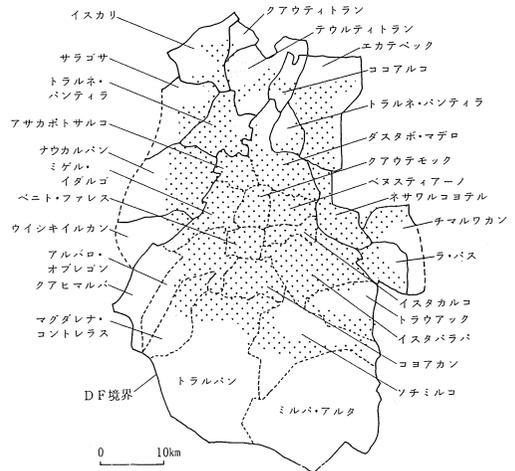


図2 メキシコ市、名古屋都市市街化地域

ある。これは、日本の諸都市が人口の急激な増加にともなって周辺の悪質な地盤に拡大していった事に起因している。

図3にメキシコ市街地域における建築物の分類を示す。20階以上の高層ビルは都心4区に集中している。また、インスルヘンテス大通り沿には3階以上の建物が集中している。低所得層住民の粗悪な建物は市の中心部から東方、テスココ湖干拓地域へと分布している。

3. メキシコ市の地盤

メキシコ市は東西40km、西北60kmのメキシコ谷(Valle de México)の南西に位置している。このメキシコ谷は北から南に流下し、クエルナバカ盆地に続いていた。第三紀から第四紀のはじめにメキシコ谷の南端で活発な火山活動があり、その噴出岩は

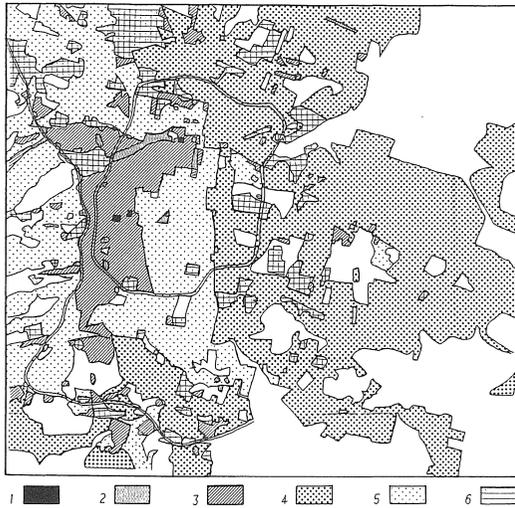


図3 メキシコ市中心域の建物種別分布図
 1. 40階以上 2. 20階以上
 3. 3階以上 4. 1～2階低所得層住宅
 5. 1～2階中・高所得層住宅
 6. 工場・大型構造物

標高3900mの山地を形成した。この火山活動の最後の噴火は2000年前であり、現在のメキシコ国立自治大学はこの時の熔岩台地上に在る。せき止められたメキシコ谷は湖となり、火山噴出物が湖に流入し、メキシコ地盤の特徴と言える湖成層を形成した。その後の堆積によって湖は分割され、テスココ湖、ソチミルコ湖、チャルコ湖などのいくつかの小湖となった。テスココ湖の小島にアステカの都テノチティランが建設された。

テノチティランに通じる間道が湖を何本か横切っていたが、その1本はチャブルテベックに通じていた。ティノチティランが破壊され、その後にソカロ（中央広場）とカテドラル（大寺院）が建設され、チャブルテベックに通じる間道沿いに新しい都市が建設された。現在のレフォルマ大通がこの位置にあたる。1985地震による被害はこの地域に集中して発生した。

建設当時のメキシコ市は水の都であり、水路が縦横に走っていた。しかし、水害に弱く、1604年、1607年の水害を機として、大運河の建設とメキシコ谷北部の山地下を穿ち抜くトンネルの掘削が行われ、テスココ湖の排水が開始された。この排水によってテスココ湖の干拓が進み、都市域は旧湖底域へと拡大した。テスココ湖からの排水はその後進み、現在

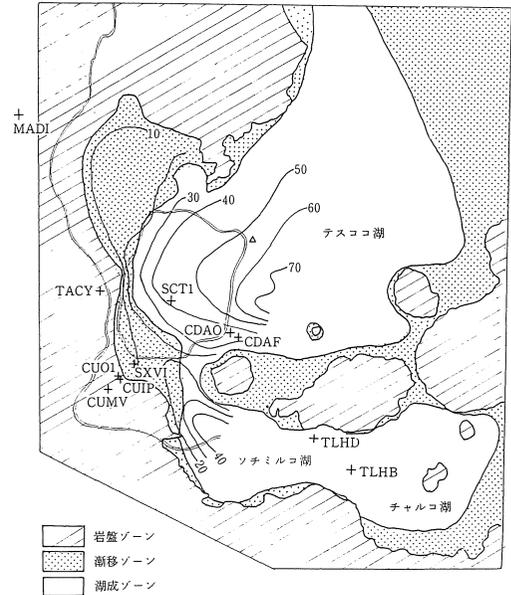


図4 メキシコ地盤区分と軟弱層厚(m)²⁾

ではテスココ湖は完全に消滅した。メキシコ空港東部には現在もテスココ湖の干あがった湖底の原地盤が存在するが、エカテペック、ネサワルコヨテルといった衛星都市が急速に形成されつつある。また、ソチミルコ湖も完全に干拓され、DFの新興住宅街として急速に市街化されている。幸い、これらの地域の構造物は低層なものが多く、1985年地震では大きな被害は生じなかったが、十分な注意を払いながら都市建設が進められるべきであろう。

図4にメキシコ市の地盤区分を示す²⁾。この区分図はメキシコの地盤震動特性を論じる際には重要であり、また耐震設計を行う際のベースシャー係数はこの地盤区分によって与えられている。岩盤ゾーンIは、第三紀および熔岩が露頭する地域であり、湖成ゾーンIIIは軟弱な湖成層が厚く堆積する地域である。漸移ゾーンIIはその中間地域である。各ゾーンの境界は必ずしも明確でなく、これまでいくつかの提案がなされている³⁾。同図には、軟弱粘土層厚が記入されている²⁾。ここで軟弱粘土層厚とは、後述する表土、上部粘土層、硬蓋層、下部粘土層の合計層厚である。つまり、深部堆積層と呼ばれるやや硬い層の上位に堆積する湖成の層を指している。なお、メキシコの軟弱層として、上述のように下部粘土層まで含む場合と、上部粘土層のみ（つまり、硬蓋層を

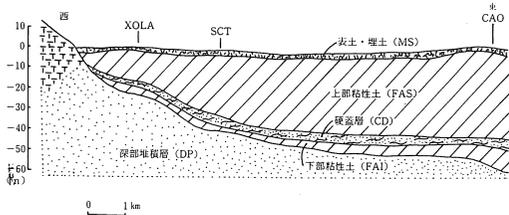


図5 メキシコ地盤南部の東西地質断面⁴⁾

基盤と考える)の場合とふたつの考え方があって注意しておかねばならない。また、テスココ湖の中に、火山性の噴出岩がダイク状に存在する場合もある。メキシコ空港北のペニョン・デ・ロス・バニョスの丘、テスココ湖の中心にあるサン・ミゲルの丘などはその一例である。

図5はメキシコ地盤の東西断面⁴⁾を示している。表2には、各地層名と物理的、力学的性質を示している⁵⁾。MS層は、地下水位の低下、乾燥によって生じた層であり、通常はかなり硬い層であり、S波速度も100m/s~200m/sとかなり速い。これに対し、上部粘土層FASは、含水比が500%にも達し、S波速度も40m/s~50m/sと極めて遅く、火山性噴出物が湖底に堆積した層としてメキシコ地盤に特有なものである。CD層は、その層厚はせいぜい5m程度であるが、構造物建設の場合の基礎地盤として設定されることもある。下部粘土層FAIもFAS層と同じ火山灰質粘土であるがより堅く、S波速度も100m/s~200m/sと速い。深部堆積層DPは礫、砂、粘土の互層であり、S波速度は400m/s以上である。FAS層とDP層とのS波速度の差は10倍にも達し、鮮明なコントラストを作っている。日本の地盤の場合、このような強いインピーダンス比を持つ地盤構成はあまりみられない。このインピーダンス比がメキシコ地盤の震動特性を論じる上で重要となる。つまり、メキシコ地盤のようにインピーダンス比が極めて高

い層境界がある場合、この境界の上にある軟弱地盤に原因するある周期の波の増幅が著しくなる。後述するように、今回の地震では、2~4秒の継続時間の長い地震動の存在が目されたが、その原因はこのように高いインピーダンス比の境界が存在するからである。

高含水比(500%にも達する)のメキシコ地盤がかかえる問題のひとつに地盤沈下問題がある。人口の爆発的膨張は飲料水の供給不足をもたらした。揚水による飲料水の確保は、他方で最大7mにも達する地盤沈下をひき起し、不等沈下による構造物の被害防止は、耐震問題とともに重要な2つのテーマとなった。耐震性の高い支持くいは不等沈下に対し構造物の抜け上りをひき起すために、現在ではまきつぐが多く使用されている。しかし、地震時には、構造物の沈下、傾斜をひき起し、地震災害を大きくしたとの意見も多く存在している。

しかし、地下鉄について言えば、高含水比地盤からの浮きあがり防止上、トンネル重量を重くすることは、耐震的には強化の方向であり、事実地下鉄の被害は皆無に等しかった。また、地盤沈下に対する対策から、ガス管は埋設されておらず、各建築物へ個別にプロパンガスが供給されていたことは、火災等の被害を最小限にいとめられた原因である。

4. 震度分布

1985年9月19日午前7時19分に発生した地震についてメキシコ国立自治大学工学研究所は、震央は北緯18.141°西経102.707°、深度は16km、表面波マグニチュードは $M_s=8.1$ と発表した⁶⁾。また同研究所は、141地点におけるアンケート調査から、修正メルカリスケールによる震度分布を求めた⁷⁾。図6に1985メキシコ地震の震度分布(ただし気象庁震度階に換算してある)と、同規模の1944年東南海地震(気象庁

表2 メキシコ地盤の地質名とその特性⁵⁾

地質時代	記号	現地地質名	(著者記)	層厚, m	N値	含水比, %	Vs, m/s
第四紀	MS	Mamto Superficial	表土・埋土	~10	2~20	20~100	100~200
	FAS	Formacion Arcillosa Superior	上部粘性土層	10~35	2~35	100~500	40~50
第四紀	CD	Capa Dura	硬蓋層	~5	15~50	20~40	200
第三紀	FAI	Formacion Arcillosa Inferior	下部粘性土層	~15	2~35	100~250	100~200
	DP	Depositos Profundos	深部堆積層	—	25~50	—	400~

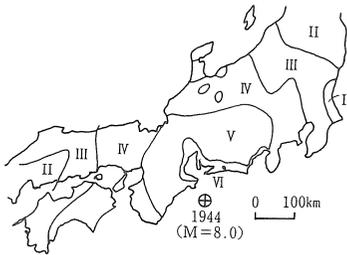
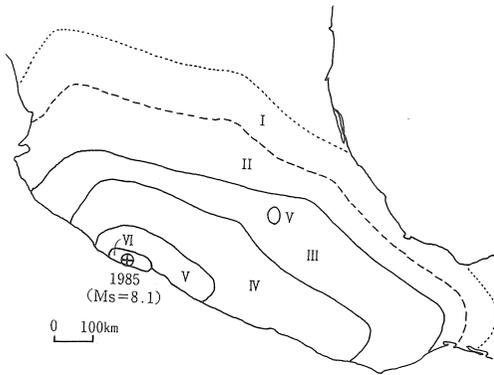


図6 1985メキシコ地震⁷⁾と1944東南海地震⁸⁾の震度分布(気象庁震度階による)

マグニチュードは8.0)の震度分布⁸⁾を示す。図の縮尺は等しくしてある。メキシコ地震の震源域となったミチョアカンにおける修正メルカリ震度は9と発表されている。これは気象庁震度の5の上と6全体

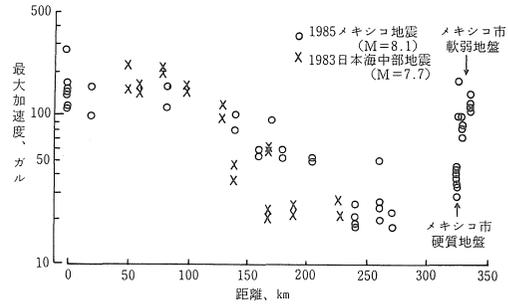


図7 震源地の端からの距離と最大加速度との関係⁹⁾

を含む震度に相当するが図では震度6として示した。ミチョアカンにおける被害はラサロ・カルデナス市に多くみられたが、あまり大きな被害は発生していない。東南海地震では、静岡・愛知・三重の3県下で大きな被害が生じた。地盤の違い、構造物の違いがあるにせよ、両地震には大きな差がある。震度5の地域も東南海地震の方が大きいようである。

注目すべき点はメキシコ市の震度が5(修正メルカリ震度8~9と発表されている)となっている点である。周辺地域は震度3であるから、メキシコ市の震度は異常に大きいと言える。

図7に最大加速度と震央距離の関係を示す⁹⁾。震源域に1番近かったサカツーラでは最大加速度277ガルを記録している。比較のため日本海中部地震

表3 メキシコ市内における最大地動および最大応答値 (h = 5%)¹⁰⁾

観測点	最大加速度 (cm/s ²)			最大速度 (cm/s)			最大変位 (cm)			応答加速度 (cm/s ²)			応答速度 (cm/s)			応答変位 (cm)		
	NS	EW	UD	NS	EW	UD	NS	EW	UD	NS	EW	UD	NS	EW	UD	NS	EW	UD
CUO1	28	33	22	10.2	9.4	8.2	5.5	7.2	6.7	107	133	79	32	33	38	23	26	22
CUIP	32	35	22	10.3	9.4	8.0	6.2	7.7	6.6	118	126	76	35	29	37	21	27	21
CUMV	37	39	20	9.2	11.0	8.4	5.7	4.5	4.6	109	120	81	35	26	39	21	19	18
MADI	10	8	6	1.7	1.5	1.2	0.7	0.5	0.4	35	20	20	5	5	4	2	2	2
TACY	34	33	19	14.3	9.8	8.3	12.0	8.6	7.6	114	99	72	33	32	36	29	26	22
SXVI	44	42	18	11.5	12.2	5.8	6.6	7.5	7.0	167	159	65	37	44	31	26	28	20
SCT1	98	168	37	38.7	60.5	9.0	19.1	21.9	7.6	594	978	127	179	315	41	60	123	24
CDAO	69	80	36	35.0	41.9	11.3	25.0	24.7	7.7	415	340	107	238	220	47	136	137	22
CDAF	81	95	27	24.9	37.6	8.9	15.0	18.9	8.2	326	421	90	104	204	45	47	96	20
TLHD	118	112	59	34.9	36.1	17.0	20.8	22.1	6.9	444	287	244	142	148	56	69	85	22
TLHB	136	107	24	64.1	44.6	9.4	36.6	39.3	6.8	729	425	134	230	237	49	144	202	29

($M=7.7$)の記録も記入してある。図からも明らかに、メキシコ市での最大加速度は異常に高い。硬質地盤(岩盤ゾーン)で30~50ガルとなっているが、硬質地盤において既に数倍の地震波増巾が行われている。軟弱地盤では、さらに数倍の増巾が行われ、湖成ゾーンのSCT(通信運輸省)の強震記録EW成分は最大加速度168ガルとなっている。

表3にメキシコ市内における強震記録一覧を示す¹⁰⁾。観測地点は図4に示されている。観測点MADIはメキシコ市の西方の第三紀の岩盤上の地点にあるが、その最大加速度は5~10ガル程度にしかすぎない。メキシコ大学は地盤区分上は岩盤ゾーンに属するが、その最大加速度は22~35ガルになっており、既に地震波増巾が行われていることを示している。これは、メキシコ大学の建つ玄武岩質熔岩下に堆積層が存在することと対応している。強震動問題に関する多くの論文は、メキシコ大学での記録を岩盤上での記録として扱っているものが多いが、上述のように少し注意が必要である。漸移ゾーンに位置するSVX1で40ガル、湖成ゾーンの5地点で100ガル程度であるが、これはそれぞれ日本の震度階で4、5の下に相当する。メキシコ市で多くの被害が発生したが、強震記録でみる限り、加速度はこの大被害を説明するには小さい値のように思われる。日本における記録としては、1968年十勝沖地震八戸港235ガル、1978年宮城県沖地震仙台七十七銀行294ガル、1983年日本海中部地震不老不死224ガルなどが知られているが、メキシコ地震のような大被害は生じていない。

5. 常時微動測定

メキシコ市内で記録された強震波形を図8に示す(EW成分のみ)⁹⁾。地震後、多くの研究者の注目をひいたのは、湖成ゾーンの強震記録(SCT1, CDAO, TLHB, TLHD)の周期が2~4秒と長いこと、またこの周期の波が長く継続することであった(CDAFの記録は途中までしかとられていない)。このような地盤震動の特徴は既に指摘されていたことではあるが、今回の記録で再確認され、その原因がメキシコ市の超軟弱地盤の存在にあると考えられた。

地震後、日本建築学会調査団、東工大社会開発工学科、応用地質株式会社により、メキシコ地盤の常時微動が測定された。その結果、メキシコ地盤にお

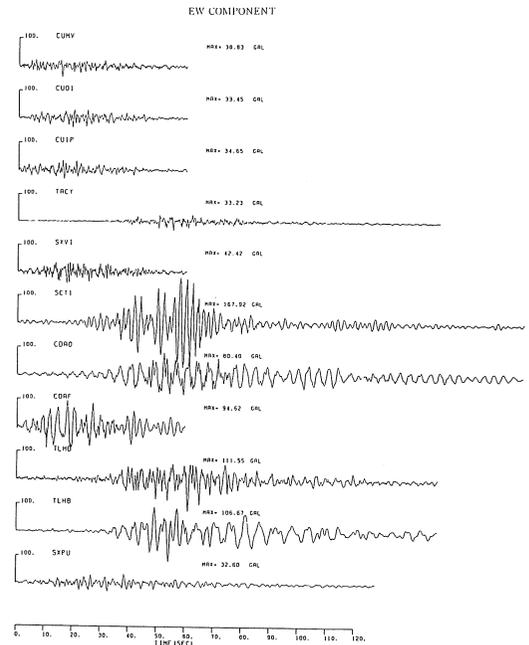


図8 メキシコ市内で記録された強震波形(東西成分)⁹⁾

ける卓越周期は漸移ゾーンで1.0秒以下、湖成ゾーンでは1.0~4.0秒であることが明らかとなった。このことから、SCT1, CDAO, TLHBの強震記録にみられた周期2~4秒の後続相が長く続く現象は、メキシコの表層地盤の影響を強く受けたものであることが再確認された。

その後、メキシコ大学工学研究所は、メキシコ市内での微動観測を再度実施した¹¹⁾。また、著者は5測線上で密度の高い測定を実施した¹²⁾。この5測線はテスココ湖、ソチミルコ湖を横断するよう設定されている。

上述の各グループによって結局約300地点での微動が測定された。また、1988年2月には、ミチョアカンで発生した $M_s=5.8$ の強震記録が市内26地点で得られ、CUIPにおける記録とのスペクトル比から各強震計地点での卓越周期が求められた¹³⁾。常時微動、強震記録から得られたメキシコ地盤の卓越周期分布を図9に示す。

卓越周期は図4に示した堆積層厚と強い相関を持っていることがわかる。1/4波長則を用いて卓越周期からS波速度を逆算してみると約60m/sとなる。メキシコ地盤のS波速度はメキシコ大学のJaime等⁴⁾によって測定されている(表2参照)。FAS, CD,



図9 常時微動および強震記録から求められた地盤卓越周期分布(秒)

FAI各層の V_s はそれぞれ、40~50m/s、200m/s、100~200m/sであるから、堆積層の平均 V_s は60m/s程度と推察される。この値は微動卓越周期から求めた値と一致する。換言すれば、メキシコ地盤に広く分布するFAS、CD、FAI各層の存在によって、メキシコ地盤の震動特性は強く支配されていると言える。今回の地震における激甚被害域の周期は、1.0~2.5秒と考えられる。メキシコの建築物の1次固有周期 T と階数 N との関係は

$$T = (0.11 \sim 0.09)N$$

で与えられる¹⁴⁾¹⁵⁾。したがって、1.0~2.5秒の地盤震動は10~25階の建築物の共振震動を励起したと思われる。破壊の進行にともなって、建築物の固有周期は長くなるので、実際には、より低層の建築物においても共振現象は生じたものと思われる。図10に示すように建築学会による調査では9階~17階の建築物の被害率が高く、上述の現象が生じた可能性は高い¹⁶⁾。

6. アンケートによる微細震度分布調査

今回の地震の被害は旧メキシコ市、現在の都心4区(クワウテモック、イダルゴ、ファレス、カランサ)とその周辺地域に集中したのが特徴である。既

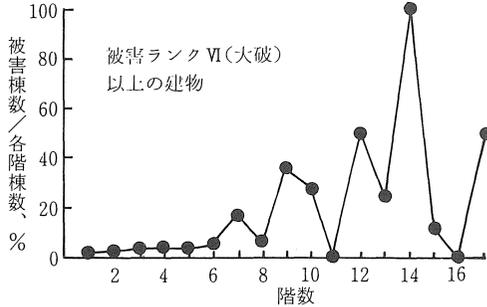
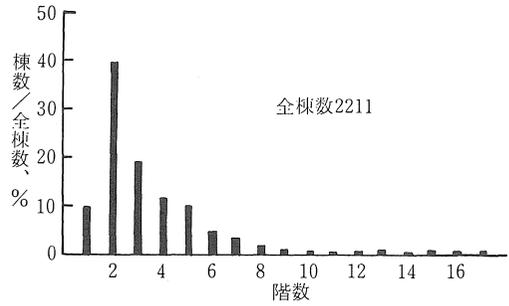


図10 メキシコ市の建物被害¹⁶⁾

に述べたように、被害集中域の南端に位置するSCT1では水平2成分の合成最大加速度は200ガルに達する。残念ながら、被害の著しいソカロからローマ地区にかけては強震計の記録が得られていないためどの程度の地震動強度であったか不明である。

そこでメキシコ市全域に多量のアンケート用紙を配布し、微細な震度分布を決定することとした。用いた用紙は北大方式、または太田方式と呼ばれるものである。アンケート用紙は9,915枚配布され、5,444枚(うち有効回答は3,320枚)が回収された。

図11は得られた震度の頻度分布を示している。得られた震度は3.0~6.0の間に分布している。平均震度は男4.21、女4.44、総合4.28となった(震度は以下気象庁震度階である)。図12は得られた震度のメキシコ市内における分布を示している。ここで注目すべきことは、図中中央部に描かれた環状線の内部、その北西方面に震度4.5以上の地域があり、一部5.0以上の地域もあることである。

7. 震害と震動特性との関係

1985地震の後、強震計観測の重要性が指摘され、1987年末までに市内約60地点にデジタル強震計が設

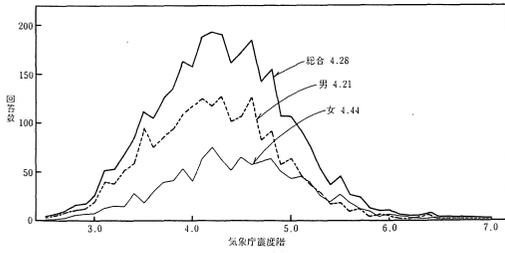


図11 アンケート方式によって決定されたメキシコ市内の震度の頻度分布

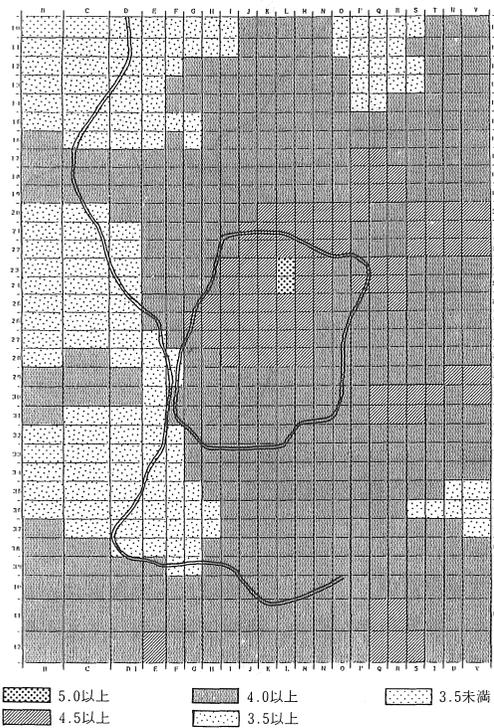


図12 アンケート調査により推定された震度分布 (各メッシュ毎に求められた震度をスムージングしてある)

置された¹⁷⁾。1988年2月8日ミチョアカン州に発生したM=5.8の地震の強震記録が多量にこの強震観測網によって得られた¹³⁾。ただし、最大加速度は20ガル程度であった。

図13は各観測地点での最大加速度を示している。図中の丸印は最大加速度の大きさを表わし、ハッチをほどこした地域はアンケート調査によって震度4.5以上が得られた地域を示している。さらに、岩盤ゾーン、漸移ゾーン、湖成ゾーンの境界、内環状線が記入されている。破線で囲まれた2つの地域は、

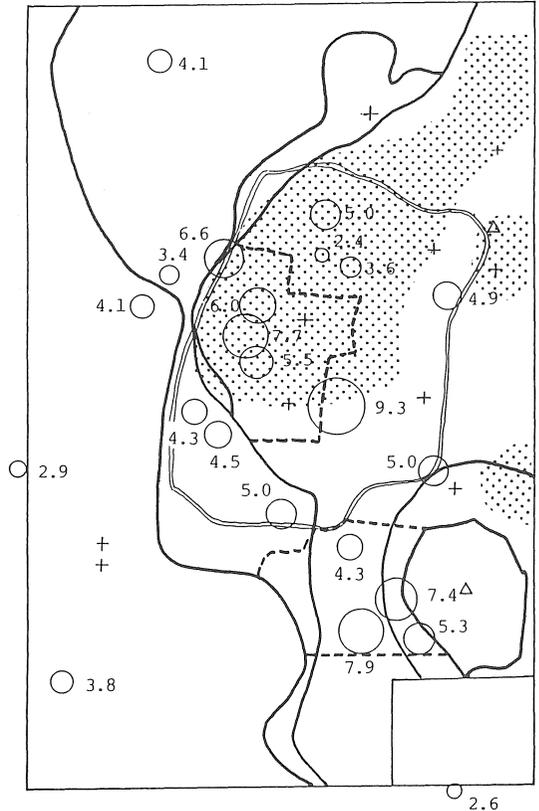


図13 1983年2月8日の地震における最大加速度(ガル)¹³⁾

イグレスシア¹⁸⁾によって強震地域と定義された地域を示している。

図14はメキシコ市当局 (DDF)¹⁹⁾が12,000戸の4階以下の被害家屋から求めた被害率である。また、図15はメキシコ大学²⁰⁾による大きな被害を受けた建築構造物の分布を示している。ここでは265棟の被害が報告されている。

最も被害が集中したのは都心4区を中心とした地域である。この地域では、4階以下の低層の建築物の害も多く、また4階以上の特に9階から17階の建築物の被害も多かった。この地域におけるアンケート調査から、地震時の震度は4.5以上と高かった。また強震計から求めた最大加速度も大きい。つまり、この地域ではかなり大きな地震力が構造物に加わったと推察される。周期2~3秒の地盤固有震動は中高層ビルの共振現象を励起させ、さらに被害を増したと推察される。

ソカロから環状線の北西部にかけてはむしろ4階

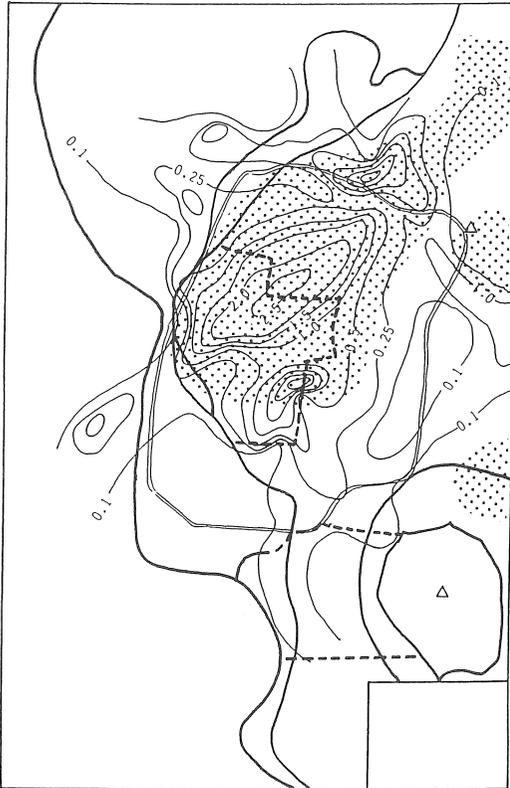


図14 4階以下の建物の被害率 (DDFによる)¹⁹⁾



図15 メキシコ大学の調査による大被害を受けた建築構造物被害²⁰⁾

以下の低層の建築物の被害が著しい。この地域は社会的に低層に属する人々の住む地域であり、建築物も粗雑なものが多い。被害を受けた建築物の多くはこれらの建築物であったと考えられる。

環状線南部からエストレージャ丘とココアカン熔岩台地間の地峡部のあたりは、低層階の建築物の被害が少ないにもかかわらず、図15に示されるように倒壊を含む大被害ビルが存在する。イグレスシアもこの地域を地震後「強震地域」と定義付けている。図13に示した最大加速度も異常に大きい。アンケート調査では必ずしも高い震度にはならなかった。微動測定からはこの地域の地盤固有周期は1秒から2秒と比較的短い周期であることがわかっている。本稿では触れていないが、微動のスペクトルは卓越周期付近でシャープな形をしており、このことが中高層ビルの被害と関連しているかも知れない。低階層の被害が少なかったのは、この地域には生活水準が高く、昔風のコロニアル建築物に住む人が多いのではないかと思われる。アンケートから求めた震度には

環状線東南域、ソチミルコ地域にも高震度域が存在する。地盤条件が悪く、高震度域となっても不思議ではない地域であるが、被害はあまり生じなかった。ただし、中高層ビルは、この地域にはあまり存在しない。

8. まとめ

本論文は次のように要約できる。

(1) メキシコ市の人口は毎年5%の増加率で爆発的に膨張し、1985年地震当時は1800万人に達していた。このような急激な人口膨張が、社会的階層性、貧困層を生み、耐震性の弱い近代的大都市を形成していった。

(2) メキシコ地盤は、N値5以下、含水比500%、S波速度50m/sの極めて軟弱な地盤からなり、地震時に周期1～5秒の周期の長い継続時間の長い地盤震動を生じさせた。地震波増幅率は数倍から数10倍になったと推察される。

(3) 軟弱地盤がひき起す地盤沈下に処するために

構造物の耐震性は犠牲になっていた。一方、地下鉄壁は厚く作られていたために逆に耐震性はあった。ガス埋設管の不設置は、安全側に働いた。

(4) メキシコ市の周辺地域での震度は3程度であったにもかかわらず、メキシコ市内では震度4以上、旧都心4区では5になった。しかし、日本の耐震工学からみれば、必ずしも今回のような大被害を生じる震度ではなかった。

(5) 旧メキシコ市の都心4区では、低層、高層いずれにおいても被害が多かった。特に9階から17階の建築構造物の被害が多かったのは、地盤との共振によるものと考えられる。この地域の北西地域ではむしろ4階以下の低層建物の被害が著るしかった。アンケートによる調査からもこの地域の震度が高かったことが確められた。南部地域では、中高層建築物の被害のみがあった。この地域の強震記録が高倍率を示していることと関連する可能性がある。

以上、1985メキシコ地震の特徴について述べたが、今回触れなかった問題について補足しておく。メキシコがかかえる政治的社会的特異性、政治の腐敗、犯罪の横行、インフレーション、貧困の差、教育レベルの大きな差。これらの問題は、メキシコ市の耐震性を論じる時無視できない。既に指摘されているように、被害の原因が施行時の手抜きによるものも多いと考えられる。当局の管理にも問題が多い。メキシコの耐震基準が守られておれば、このような大被害にならなかったと考えられる。

しかし、こういった問題は、メキシコであるが故にあいまいなまま放置される可能性が強く、まして、外国人にはわかりにくい。今後、良心的地震工学者に期待したい。

メキシコ市は発達途上国の大都市としては、近代であり、また耐震的配慮もなされている。それにもかかわらず今回の様な大災害が生じた。メキシコ市以上に耐震的に無防備な発達途上国の大都市はこれから増加する一方であろう。日米の研究者の関心は、自国の耐震問題についてはもちろんであるが、これら発達途上国の大都市の問題についても大いにあったのではないかと推察される。

本研究にあたり、La Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de IngenieríaのEsteva教授、Rosenblueth教授、Rodriguez N. 教

授、Lermo J. 研究員の諸先生方にご指導を願った。感謝の意を表す。

本研究の1部は、石田財団研究助成No.63-423によるものである。

参考文献

- 1) 山崎春成：世界の大都市3，メキシコ・シティ，東京大学出版会，東京，1987。
- 2) Jaime A.: Geotecnia y Sismicidad en el Valle de México, Series del Instituto de Ingeniería, No. D-29, 1-44. Mexico University, 1988.
- 3) Sociedad Mexicana de Mecanica de Suelos: El Subsuelo y la Ingeniería de Cimentaciones en el Area Urbana del Valle de Mexico, 1978.
- 4) Jaime A.: Caracteristicas Dinamicas de la Arcilla del Valle de México, 博士論文, メキシコ国立自治大学工学部, 1987.
- 5) Jaime A. and Romo P.: Caracteristicas del Suelo, Instituto de Ingeniería, UNAM, 1987.
- 6) UNAM seismological Group, The September 1985, Michoacan, Mexico Earthquakes, Some seismological aspects, preprint, 1985.
- 7) Martínez A. and Javier C.; Isosistas del Macrosismo del 19 de Septiembre de 1985, Series del Instituto de Ingeniería, No. 504, Mexico University, 1-69, 1987.
- 8) 飯田汲事：昭和19年12月7日東南海地震の震害と震度分布，愛知県防災会議，1-120, 1977.
- 9) 工藤一嘉：震源域での地震動，1985年メキシコ地震災害調査報告，日本建築学会，80-85, 1987.
- 10) Mena E. et al.: Catálogo de Acelerogramas Procesados del Sismo del 19 de Septiembre de 1985, Series del Instituto de Ingeniería, No. 497, Mexico University, 1-157, 1986.
- 11) Lermo J., Rodriguez M. and Singh S. K.: The Mexico Earthquake of September 19, 1985—Natural Period of Sites in the Valley of Mexico from Microtremor Measurements and strong Motion Data, Earthquake Spectra, 4 (4), 805-814, 1988.
- 12) 正木和明, Lermo J.: メキシコにおける常時微動観測，昭和63年度地震学会秋季大会講演予稿集，178, 1988.

- 13) Singh S. K. et al : The Mexico Earthquake of September 19, 1985—A Study of Amplification of Seismic Waves in the Valley of Mexico with Respect to a Hill Zone Site, Earthquake Spectra, 4 (4), 653-673, 1988.
- 14) 南 忠夫 : メキシコ市の建築物の振動特性, 1985メキシコ地震災害調査報告, 日本建築学会, 113-124, 1987.
- 15) 小林哲美, 瀬尾和夫, 翠川三郎 : Mexico 市内における建築物の被害分布, 強震計の記録と地盤の常時微動の関係, 東京工業大学総合理工研究科社会開発工学科報告, 1-34, 1986.
- 16) 太田外気晴 : 工学的立場から, 1985年メキシコ地震の被害と地盤振動, 第14回地盤振動シンポジウム, 7-16, 1986.
- 17) Prince J., Otero J. A. and Reyes A. : The role of Fundacion ICA, A.C. in the Construction of a New Strong Motion Accelerograph Array in Mexico City, 2nd U.S.—Mexico Workshop on 1985 Mexico Earthquake Research, November 5-7, Mexico City, 1987.
- 18) Iglesias J. : Intensity Map for the Earthquake of September 19, 1985, 2nd U.S.—Mexico Workshop on 1985 Mexico Earthquake Research, November 5-7, Mexico City, 1987.
- 19) DDF, Secretaria General de Obras : Intensidad de Daños en Inmuebles en el Distrito Federal Ocasionados por Los Sismos de Septiembre de 1985, Primer Simposium Internacional los Sismos y sus Efectos en las Ciudades, Septiembre de 1986, Mexico, 1986.
- 20) Instituto de Ingeniería de la UNAM : El Temblor del 19 de Septiembre de 1985 y sus Efectos en las Construcciones de la Ciudad de México, Sept. 30, 1985.

(受理 平成元年1月25日)