

1985年メキシコ地震調査報告

Report on 1985 Mexico Earthquake

岡田 恒 男*

Tsuneo OKADA

1985年メキシコ地震による災害の復旧に協力するために同年10月より5週間
メキシコ市に滞在した筆者の体験に基づき建築物の被害を主に報告する。

1. ま え が き

1985年9月19日メキシコ合衆国の太平洋沿岸で生じたマグニチュード8クラスの地震により多くの被害が生じた。震源に近いラサロカルデナス市などに被害が多かったことは、地震の規模からみれば、十分理解しうるものであったが、震源から約350kmも離れたメキシコ市において地震動が異常に増幅され、数百棟の近代建築が崩壊、または大破し、多数の死者を出したことは、震害としては極めて特殊な例と言って良いであろう。地震直後より、各国から救援隊、調査団、協力団などが多数派遣されたが、筆者も10月19日より5週間、日本政府の技術協力団の一員として、メキシコ市に滞在した。この協力団は、メキシコ地震復旧協力専門家チームと称し、メキシコ連邦区政府 (Departamento del Distrito Federal, 略称DDF) の要請により、外務省が国際協力事業団 (JICA) を通じて派遣したもので、建設省関係10名、大学関係4名、地方行政庁2名、民間建設会社関係6名、計22名で、筆者は学術顧問の立場で参加した。目的は、チームの名称のとおり、地震災害復旧に協力することで、具体的には、被害を受けた建物の被害度の判定および、補修・補強に関する基準案を提案することであった。

メキシコ市は、16世紀ごろより干拓された湖の跡に発展したもので、中心部の地盤は極めて軟弱である。このため、建築物の基礎の設計には、非常に注意しなければならない地域であると同時に、遠方に生じる大規模地震時に地震動が異常に増幅される特殊地域であることが過去の地震記録より知られているため、それに対する耐震設計はなされていた。しかしながら、今回メキシコ市で記録された地震動は、過去に記録された地震動をもとに想定されていた設計用地震動の3倍以上の強さであった。これが、大災害を生じせしめた最大の原因であるが、

被害建築物を注意深く観察すれば、耐震設計上学ぶべき点も多い。筆者の現地での体験に基づき、メキシコ市における建築物の被害に主眼をおいてメキシコ地震を報告したい。

2. 地震と地震動の性質

メキシコ合衆国は、わが国と同様、環太平洋地震帯に属し、古来太平洋沿岸に震源を持つ大地震を多く経験している(図1, 2)。図2に記入したように今回の地震の震央も太平洋岸のラサロカルデナス市付近であった。図中①は地震直後にメキシコ自治大学工学研究所 (Instituto de Ingenieria, UNAM) より発表された震央位置で、②はその後 National Earthquake Information Service により修正されたものである。地震の諸元も図中に記入されている。地表における強震観測結果の一部は、極めて迅速にメキシコ自治大学より発表された²⁻⁶⁾。文献6)によれば、震央に極めて近い Zacatura で記録された最大加速度は NS 271 gal, EW 182 gal, UD 145 gal であった。応答加速度スペクトルは、図3に示すように短周期の卓越したもので、減衰5%における最大応答加速度は約1gであった。

先に述べたように、震央距離約350kmのメキシコ市に多大の被害が生じたのが、今回の地震被害の大きな特徴であった。メキシコ市の中心部は干拓地に発展したもので、その後住宅地として開発された周辺の旧湖岸地域が硬質地盤(溶岩)であるのに対して、市の中心部の地盤は含水比300%にも及ぶ極めて軟弱なものである。したがって、メキシコ市における地震動の性質は地盤の性質に強く依存する。今回メキシコ市内8点において強震記録が得られている。図4にはメキシコ自治大学の観測点8点と、それぞれの地域(5ヶ所)で記録された水平最大加速度、最大速度、最大変位を示した。同大学のキャンパスには観測点1, 2, 3で示した3台の強震計が設置

* 東京大学生産技術研究所 第1部

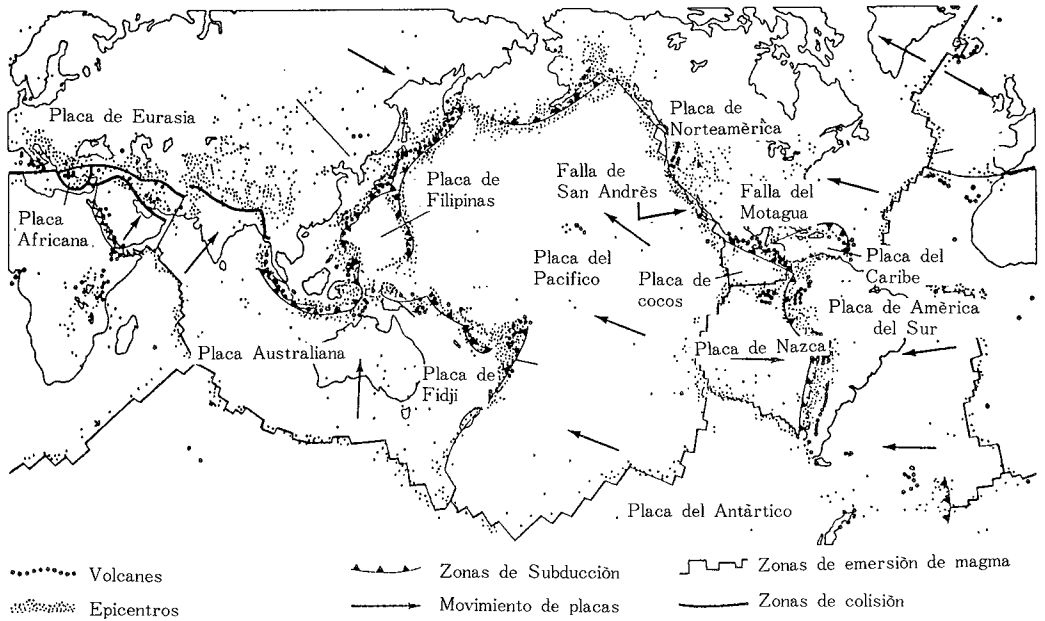
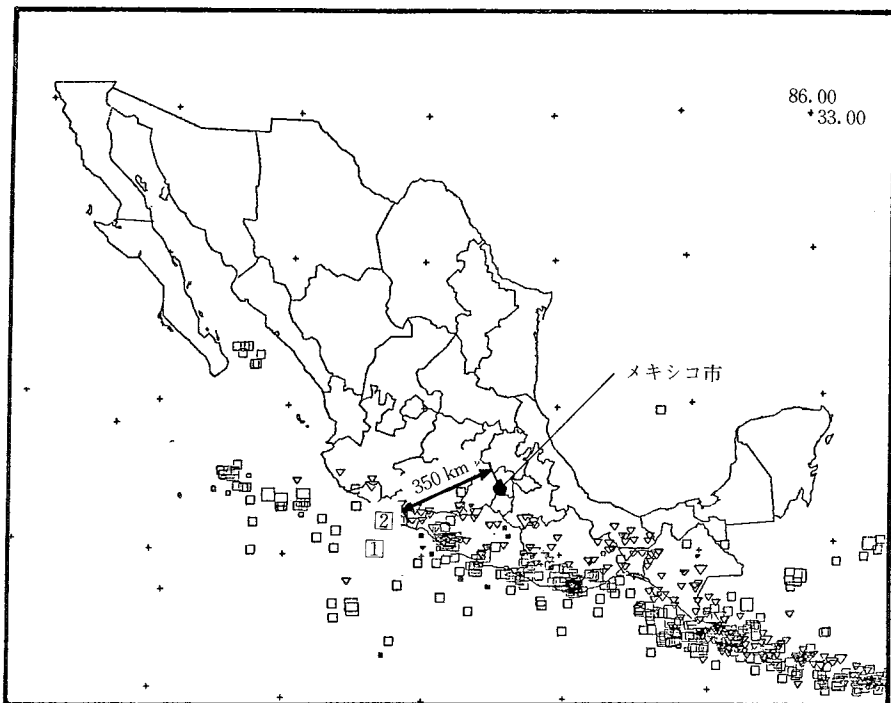


図1 世界地震帯図¹⁾



深さ60 km 以内
 ○ M < 4
 □ 4 < M < 5
 □ 5 < M < 6
 □ 6 < M

深さ60 km 以上
 ▽ M < 4
 ▽ 4 < M < 5
 ▽ 5 < M < 6
 ▽ 6 < M

1985.9.19 (07, 11, 44) 地震諸元
 震央位置: □ I de I ▣ NEIS
 17.680° N 18.100° N
 102.470° W 102.300° W
 規模: Mc=7.8 Ms=8.1
 深さ: 33 km

図2 メキシコ合衆国震央図¹⁾

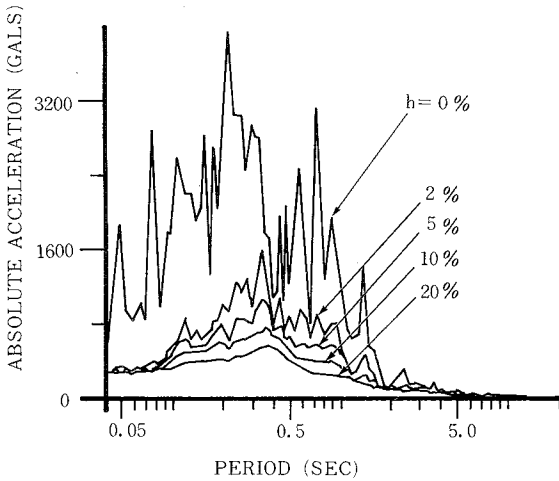


図3 Zacatura 記録の応答加速度スペクトル(NS)^①

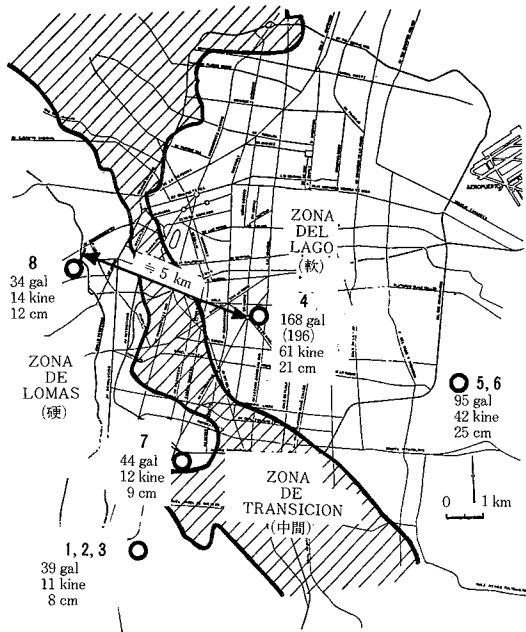


図4 メキシコ市における強震計記録最大値 (文献 12) の図に数値を記入したもの

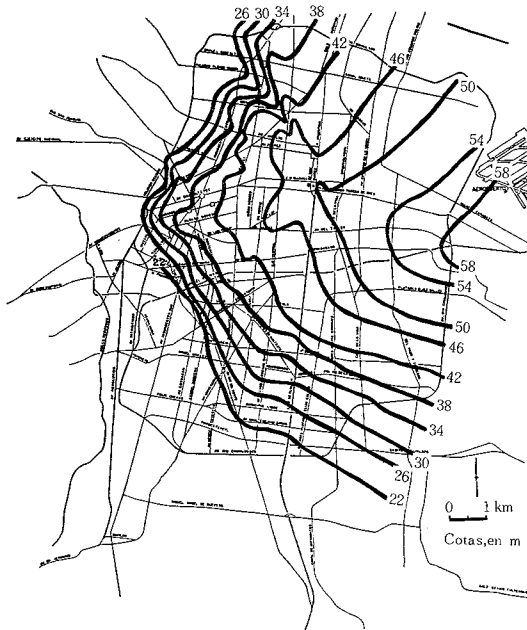


図5 メキシコ市における軟弱層の深さ^① (単位:m)

されていたが、図4に記入した値はそれらの内最大のものである。観測点5,6についても同様に最大値のみ示している。図4には、地盤の硬, 軟, 中間の3種の区分も示してあるが、メキシコ市内の軟弱層の深度を示した図5も参照すると地動と地盤との相関が極めて顕著であることがわかる。硬質地盤の旧湖岸地域では最大加速度が30~40 gal であるのに対して、たとえば、観測点8よりわずか5 km 程度しか離れていない観測点4では168 gal, 方向補正を行った主軸方向の成分では196 gal が記録されている。また、図6には観測点4の記録の応答加速度スペクトルを示したが、約2.5 sec にピークを持つ

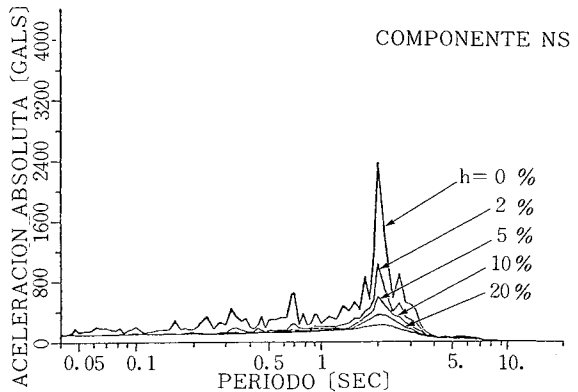


図6 メキシコ市における強震計記録応答加速度スペクトル^①

極めて特異な性質である。

3. メキシコにおける耐震設計

メキシコにおいては、耐震設計規準は各行政単位ごとに定められており、このほか、学校あるいは発電所などの用途別に全国レベルでの規準がある。しかしながら、個々の規準をみると、実質的内容はかなり全国的に統一されており、米国の事情と極めて良く似たシステムである。

設計用せん断力係数の定めかたについて簡単に紹介すると以下のとおりである。



図7 メキシコ合衆国地震危険度区分図¹⁾

表1 メキシコ合衆国学校建築用地震係数 C の最大値 (CAPFCE 1980)

地域区分	地盤種別	C	
		一般用	学校用
A	I	0.08	0.10
	II	0.12	0.16
	III	0.16	0.21
B	I	0.16	0.21
	II	0.20	0.26
	III	0.24	0.31
C	I	0.24	0.31
	II	0.30	0.39
	III	0.36	0.47
D	I	0.48	0.62
	II	0.55	0.72
	III	0.64	0.83

地盤種別 I : 硬質, II : 中間, III : 軟質

原則として、ベースシア係数 C は、応答震度 (応答加速度/重力加速度) に対応する地震係数 C を、じん性係数 Q で除して

$$C = C/Q$$

で与えられている。この C の値はわが国における耐震診断基準での耐震指標 E_0 あるいは、建築基準法施行令第2次設計用標準せん断力係数 $C_0 (=1.0)$ と同じ概念である。

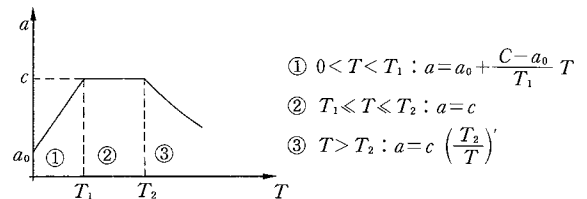
この地震係数 C は、地震危険度、構造種別、地盤条件、建物重要度などを考慮して定められる。

たとえば、学校建築委員会 (CAPFSE) の定めた学校建築の耐震規準⁷⁾によれば、まず、図7に示したように全国をA, B, C, Dの4つのZoneに大別し、それぞれについて C の最大値が表1に示すように定められており、Dゾーンの値が最も大きい。これは、図2に示した地震

表2 1977年規準による一般建築用地震係数 $C^1)$

地域区分	地盤種別	C	a_0	T_1	T_2	r
A	I	0.08	0.03	0.30	0.8	1/2
	II	0.12	0.045	0.55	2.0	2/3
	III	0.16	0.06	0.75	3.3	1
B	I	0.16	0.03	0.30	0.8	1/2
	II	0.20	0.045	0.50	2.0	2/3
	III	0.24	0.06	0.80	3.3	1
C	I	0.24	0.05	0.25	0.67	1/2
	II	0.30	0.08	0.45	1.6	2/3
	III	0.36	0.10	0.60	2.9	1
D	I	0.48	0.09	0.15	0.55	1/2
	II	0.56	0.14	0.30	1.4	2/3
	III	0.64	0.18	0.45	2.7	1

注: 公共建築等には1.3倍



記号 a_0 : $T=0$ のときの C の値
 C : 地震係数
 r : 式③の係数
 T : 建物の固有周期(sec)
 T_1, T_2 : 地震係数を変化させる点の周期

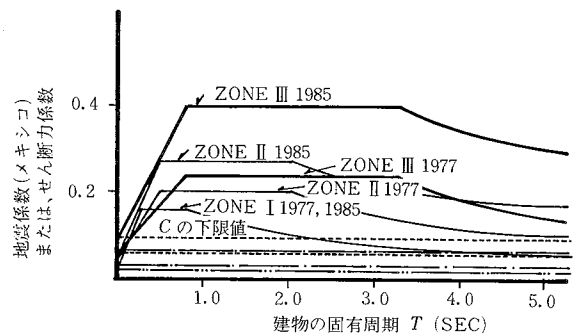


図8 メキシコ市耐震規準 (1977) および、緊急規準 (1985) による一般建築用地震係数 C の値

危険度を考慮したものと考えられる⁸⁾。

メキシコ市においては、今回の地震被害を考慮して、地震発生1ヶ月後の10月18日に大統領名で緊急耐震規準が公布され⁸⁾、耐震設計のレベルが一挙に2倍以上に引き上げられたが、1977年に定められたこれまでの地震係数 C は次のように定められていた。

表2は、全国レベルで一般建築用に提案されたもので

注) 文献1)によれば、このZoning Mapは発電所の耐震設計用に提案されたものとのことである。

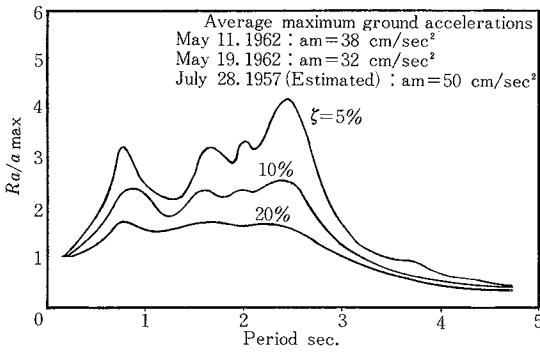


図9 メキシコ市の軟弱地盤における地震記録の加速度応答倍率スペクトルの包絡線¹⁰⁾

表3 1985年緊急規準による地震係数 C (メキシコ市一般建築用)

地盤種別	C	a_0	T_1	T_2	r
I	0.16	0.03	0.30	0.8	1/2
II	0.271	0.0541	0.50	2.0	2/3
III	0.40	0.101	0.80	3.3	1

あるが、メキシコ市の耐震規定は、この表の B ゾーンの値を用いることとなっていた。図 8 にはこれを図示した。メキシコ市における軟弱地盤での C の最大値は一般建築の場合には 0.24 で、公共建築では、これに重要度係数 1.3 を乗じて 0.31 となる。また、この値は建物の固有周期により表 2 に示したとおり変化させるが、他の国の基準に較べると、軟弱地盤上の長周期建物に対して厳しい点に特色がある。これは、たとえば図 9 に示した過去の地震記録の特殊性を考慮して定められたものである。図 9 の縦軸は加速度応答倍率、横軸は建物の固有周期を表した、いわゆる加速度応答倍率スペクトルで、1962 年 5 月 11 日、同年 5 月 19 日および、1957 年 7 月 28 日の地震におけるメキシコ市での記録より作成されたものである。図 8 の形状の地震係数 C を採用することの妥当性が理解できる。また、C 値の最大値 0.24 については、過去の地震時の最大加速度が 50 gal (0.05 g) 程度であったことより、これに応答倍率 4~5 を乗じて定められたものと推定される。

今回の地震の特性は図 6 にも示したように、周期特性をみるかぎり過去に記録された地震記録と極めて類似のもので、従来の耐震規準の理念そのものは正しかったといえよう。しかしながら、今回の地震においては軟弱地盤上で約 200 gal の最大加速度が観測され、これは過去の地震に基づき想定した設計用地震動の 3~4 倍であった。これが大惨事を生じた主要な原因であると言ってよい。これらの点を考慮して、緊急耐震設計規準において

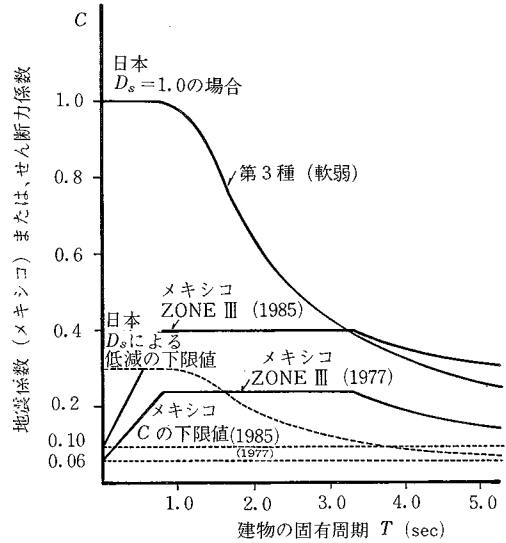


図 10 設計用せん断力係数の比較 (鉄筋コンクリート)

は、地震係数 C を表 3 に示したように約 1.7 倍に引き上げることとなった。また、従来 1~6 の範囲であったじん性係数 Q を 1~4 に低減し、重要度係数を 1.3 から 1.5 に引き上げ、さらに、曲げ・圧縮を受ける鉄筋コンクリート造柱の強度低減係数を 0.85 から 0.5 に引き下げるなどの改正も同時になされたことを考慮すれば、実質的に 3 倍近い耐震設計レベルの引き上げがなされることになった。図 10 はメキシコ市における旧基準、緊急規準の地震係数および、日本の規準の標準せん断力係数を軟弱地盤の場合に限って比較したものである。

4. メキシコ市における建築構造の特色

メキシコ市中心部には、43 階建の LATINO・AMERICANA 始め、数棟の超高層建築を始めとして、中・高層の近代建築物が多く建設されている。構造形式をみると超高層建築は鉄骨造、中・高層建築物のほとんどは鉄筋コンクリート造である。一般住宅には 3 階建以下の組積造も多い。学校校舎は 4 階建以下であるが、大半は鉄筋コンクリート造で、鉄骨骨組に間仕切りとしてレンガまたはコンクリートブロック造壁を用いたものもある。

現在、メキシコにおいては学校校舎の標準化が行われつつあり、文献 7) に示した校舎の建築および、設備に関する標準設計用の規準・仕様書が学校建築委員会 (CAPFSE) より 1980 年に出されている。これには、教室の平面、仕上げ、構造、設備、机・椅子その他の備品、などの標準仕様が詳細に規定されている。文献 7) の一部しか入手できていないので、不詳の点もあるが、1, 2 階建の構造に関しては、構造種別、階数ごとに材料強度、部材寸法、配筋まで標準化されている。3 階建以上については構造標準図は入手できていないが、最近建設され

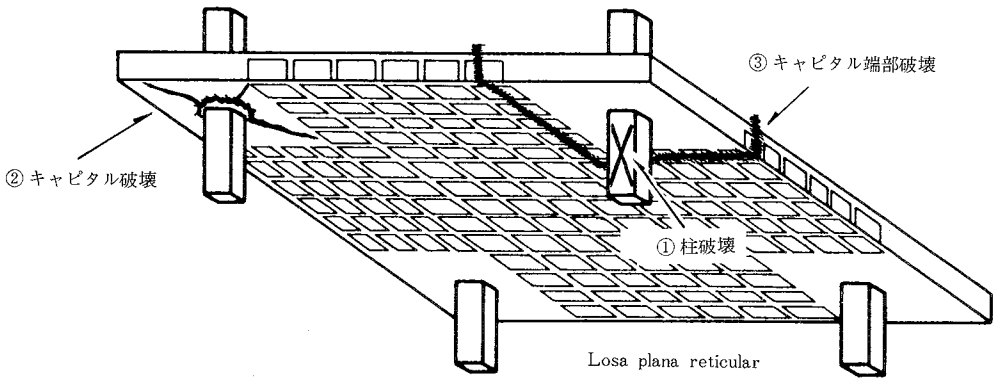


図11 平板構造概念図¹⁾

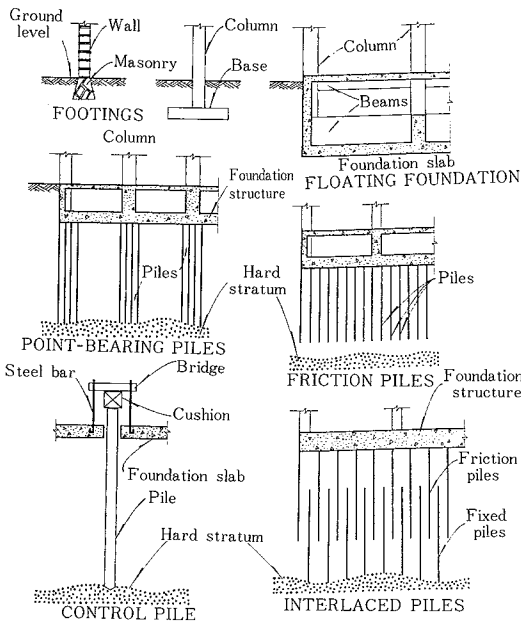


図12 メキシコ市における基礎構造の例¹⁾

た3, 4階建校舎の例では、平面計画、構造とも、2階建標準設計とほとんど同じであったことから推測すれば、別に3, 4階建についても標準設計図が存在する可能性がある。ただし、文献7)には、一般的な耐震設計法も詳細に述べられているので、これに従って1, 2階建に準じて個別に耐震設計を行っている可能性もある。

鉄筋コンクリート造については、通常のフレーム構造のほか、Losas Planasと呼ばれる平板構造が多い(図11参照)。学校校舎の標準もこの構造形式が主である。耐震壁は一般にあまり用いられておらず、間仕切り壁は、レンガ、レンガブロック、コンクリートブロックなどである。地盤が軟弱なため、重量軽減をはかる必要があるのも理由の一つであろう。試算例では、校舎の単位床面積

当りの重量は1t/m²以下であった。基礎は、ほとんどの建物が杭を用いている。軟弱層が厚いので、支持杭の場合には30m以上の長さが必要である。このため、摩擦杭も多く用いられている。また、地下水位が高いので(1m~1.5m)地下室の浮力を利用した、いわゆる Floating 基礎と摩擦杭を併用する例が多い。このほか、不同沈下の調整を目的として、杭頭部の高さの調整をしようとする Control Pile も試みられている(図12)。

5. メキシコ市における建築物の被害

先に述べた地震動の性質より想像できるように、メキシコ市における被害は地盤の軟弱な地域に集中していた。図13は、1957年、1979年および、今回の地震により被害が多く生じた地域を示したものであるが、いずれの地震においても市の中心部10km四方程度の狭い範囲に被害が集中していることは興味深い。

被害ゾーンにおける震度階は日本の気象庁震度階でV~VIと推定されるが、わずか数km離れた硬質地盤の周辺では震度階III程度という、地域により極端に差のある被害であった。したがって、自宅で震度階III程度の地震を感じて、中心部にあるOfficeへ出勤したところ建物が崩壊していたので驚いたといった体験談も聞かされた。被害統計に関しては、いまだ、なお確定されていないが、1985年9月25日の主都圏緊急事態委員会の公式発表では、死者4,000人以上、負傷者約10,000人、被災者約33,000人以上となっているが、死者は、10,000人を超えたであろうというのが一般の推定である。同じく、建物については、被害建物総数1,132(連邦区の建物数に対して、0.075%)全壊および、取り壊しを要するもの417(同じく0.028%)となっているが、地震後1週間の調査結果であるから、実数は恐らくこれより多いものと思われる。また、被害が集中した地域だけに限れば、大破率は10%を超える。

表4には文献12)による構造、階数、年代別の崩壊・

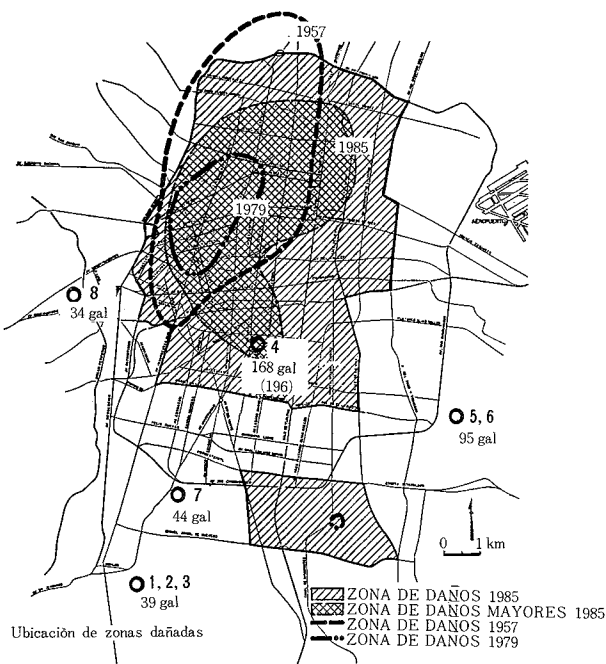


図 13 メキシコ市において、建物被害の集中した地域 (文献 12) の図に各地で観測された加速度の最大値を記入したもの

大破棟数を示しておく。鉄筋コンクリート造で 10 階建以下の被害が多いことおよび、フラットスラブ構造の被害が多いのが特徴である。なお、鉄骨造は、超高層以外あまり多く用いられていないのが現状である。

鉄筋コンクリート造建物の被害パターンをみると、フラットスラブ構造が完全に崩壊し、床スラブのみが積み重なって残った、いわゆるパンケーキ状に崩壊した例がまざり目につく(写真 1)。学校校舎についても同様である

(写真 2)。この破壊が生じた原因としては、①柱のせん断あるいは曲げ・せん断破壊、②キャピタル部分でのスラブのパンチングシア破壊、③キャピタル端での小梁の破壊の 3 種が観察された(図 11)。柱のせん断あるいは曲げ・せん断破壊は断面寸法不足、フープ量の不足が主たる原因で、このほか、たばね太径鉄筋の使用、ねじり鉄筋の使用などが被害を助長したものと思われる。コンクリートの品質はさして悪いとは思えなかった。鉄筋コンクリートラーメン構造で、梁崩壊の破壊形式もみられた。極端な例では、梁筋が切断されていた(写真 3)。

学校校舎については、メキシコ市の学校(小, 中, 専門中)総数 2,614 校の内何らかの地震の影響を受けたのは、1,623 校とのことで(メキシコ市有力筋よりの情報)、9 月 24 日メキシコ市の発表によれば 116 棟が全壊あるいは取り壊しを要するとされている。ただし、筆者の印象では、1,623 校の大半は軽微な被害(写真 4)で、全壊あるいは取り壊しを要すとされた 100 棟余りの中には、補修あるいは補強により再使用可能なものも含まれているものと思われた。

しばしば述べたように、メキシコ市の中心部の地盤は極めて軟弱であるため、従来、技術者は、常時あるいは地震時の不同沈下対策には腐心してきた。今回の地震においても、地盤沈下による傾斜を生じたものも多数見られた(写真 5)。また、今回の被害のもう一つの特徴は、外壁などの非構造壁の被害であった(写真 6)。耐震設計規準では、構造骨組より剛性の高い非構造壁については、構造骨組との縁切りを行うことが明記されているが、実際には詳細設計、あるいは施工が困難なため、縁切りが不十分で非構造壁が破壊した例、あるいは非構造壁により構造骨組が悪影響を受けた例も多く見られた。

表 4 建物の被害統計¹²⁾

構造種別	被害	建設年度			階数				合計
		← 1957	57-76	1976 →	≤ 5	6-10	11-15	>15	
コンクリートフレーム	崩壊および大破	35	59	13	36	62	9	0	107
		9	19	7	8	23	4	1	36
鉄骨フレーム	崩壊および大破	5	4	0	4	2	1	2	9
		1	0	0	0	0	1	0	1
平板構造	崩壊および大破	3	35	12	23	23	4	0	50
		5	20	11	9	18	8	0	35
組積造	崩壊および大破	7	4	1	10	2	0	0	12
		2	3	0	4	1	0	0	5
その他	崩壊および大破	0	1	1	1	1	0	0	2
		2	4	2	6	2	0	0	8
合計	崩壊および大破	69	149	47	101	134	27	3	265

6. 地震後の対策

地震直後、メキシコ市においては、首都圏緊急事態委員会を始めとする各組織により被害状況の把握、被災者の救出、保護、被災度の判定、応急復旧などの復旧活動が行われた。被災度の判定については、約 200 人（後に約 400 人に増大）の技術者を指名し、各建物の危険度の判定を行い応急復旧に努めた。しかし、被災建物の数が多いため、作業は容易ではなかった。メキシコ市が、筆者も加わった JICA 技術協力チームの派遣を日本政府に要請した背景の一つもここにあった。筆者がメキシコ市に到着した 10 月 19 日の時点で、約 6,000 棟の被災度判定が一応終わっていたが、それらの内約 1,700 棟については詳細な調査に基づく判定が要求されている段階であった。JICA チームでは、日本ですでに開発されている被災度の判定法および、補修・補強法を、メキシコにおける建築物に適用するためのスタディを行い、必要な修正を行った後、適用例も含めてメキシコ市に提案した。メキシコ市ではこれを参考とし、新たな規準を作成し、判定・補強を行うこととなっている。

また、すべに述べたように、耐震設計規準については緊急規準を公布し、これから新築するもの、工事中のものおよび、今回の被災建物で補修・補強を行い再使用するものすべてに適用することとした。このようなメキシコ政府、メキシコ市当局の対応、技術者の協力および、2. で述べたようにメキシコ自治大学を中心とした地震記録の解析公表、ならびに被害状況の把握などが極めて短期間に行われたことは評価されるべきであろう。

7. あとがき

以上、メキシコ地震の概要についてまとめを行った。若干、主観に過ぎる点もあろうかと思うが、他の報告書も参照のうえ、メキシコ地震および、その被害をご理解いただければと考える。なお、現地で収集した資料に基づき、メキシコ市における建築物の耐震性についてさらに詳細な解析を行っており、機会を見て報告する予定である。最後に、筆者の参加した JICA 技術協力団の派遣にご尽力いただいた外務省、建設省、文部省、国際協力事業団始め多くの機関、現地でご協力いただいたメキシコ日本大使館、在メキシコ JICA 事務所、メキシコ市、メキシコ自治大学、コンサルタントの関係各位、筆者と行

動を共にし、ご協力いただいた石川哲久建設省住宅局建設専門官を団長とする JICA チームおよび、通訳・渉外の労をとられたメキシコ在住の邦人諸氏に謝意を表したい。
(1986年2月3日受理)

参考文献

- 1) Meli, R. P. "Diseño Estructural", Editorial Limusa, S. A., Mexico, D. F., 1985
- 2) Prince, J. et al. "Acelerogramas en Ciudad Universitaria del Sismo del 19 de Septiembre de 1985", Instituto de Ingenieria, UNAM, Informe IPS-10A, Sept. 20, 1985
- 3) Mena, E. et al. "Acelerograma en El Centro Scop de la Secretaria de Comunicaciones y Transportes Sismo del 19 de Septiembre de 1985", I de I, UNAM, Informe IPS-10B, Sept. 21, 1985
- 4) Quaas, R. et al. "Los Dos Acelerogramas del Sismo de Septiembre 19 de 1985, Obtenidos en la Central de Abastos en Mexico D. F.", I de I, UNAM, Informe IPS-10C, Sept. 23, 1985
- 5) Prince, J. et al "Espectros de las Componentes Horizontales Resistradas por los Acelerografos Digitales de Mexico D. F. Sismo del 19 de Septiembre de 1985. Acelerogramas en Viveros y en Tacubaya.", I de I, UNAM, Informe IPS-10D, Octubre 1, 1985
- 6) Mena, E. et al. "Analysis del Acelerograma "Zacatula" del Sismo del 19 de Septiembre de 1985", I de I, UNAM, Informe IPS-10E, Octubre, 1985
- 7) Comite Administrador del Programa Federal de Construccion de Escuelas (CAPFCE) "Normas y Especificaciones para Estudios Proyectos Construccion e Instalaciones", 1980
- 8) Departamento del Distrito Federal "Decreto por el que se Establccen las Normas de Emergencia en Materia de Construccion para el Distrito Federal", 1986. 10. 18
- 9) "Provision for Earthquake Resistant Design in Mexico, 1977", Earthquake Resistant Design World List
- 10) Zeebaert, L. "Foundation Engineering for Difficult Subsoil Conditions", Van Nostrand Reinhold Co., New York, 1972
- 11) Marsal, R. J. "The Lacustrine Clays of the Valley of Mexico", Contribution of the Instituto de Ingenieria to the 1975 International Clay Conference, UNAM, July, 1975
- 12) "El Temblor del 19 de Septiembre de 1985 y Sus Efectos en Las Construcciones de La Ciudad de Mexico", I de I, UNAM, Sept. 30 de 1985



写真 1 パンケーキ破壊を生じた 8 階建の衣類工場
(鉄筋コンクリート平板構造)

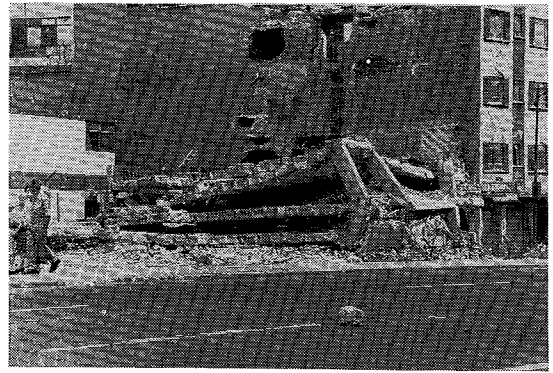


写真 2 崩壊した 4 階建学校校舎
(鉄筋コンクリート平板構造)

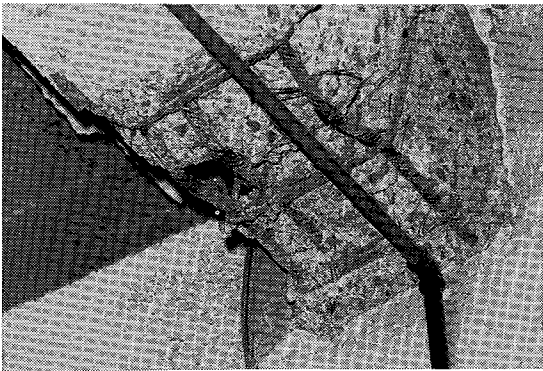


写真 3 梁崩壊形被害の例
(9 階建銀行建物の 3 階床梁, 鉄筋が切断)

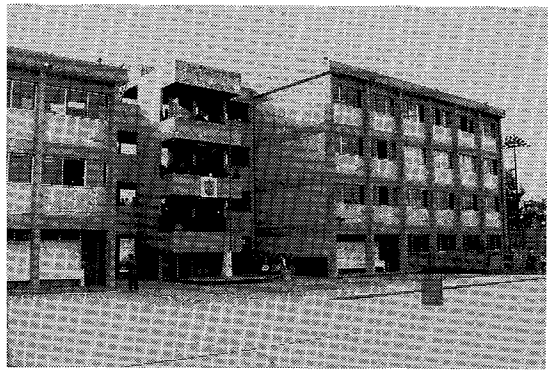


写真 4 無被害の学校校舎
(標準設計校舎 1980 年代初期に建設された)



写真 5 完全に転倒した 11 階建アパート

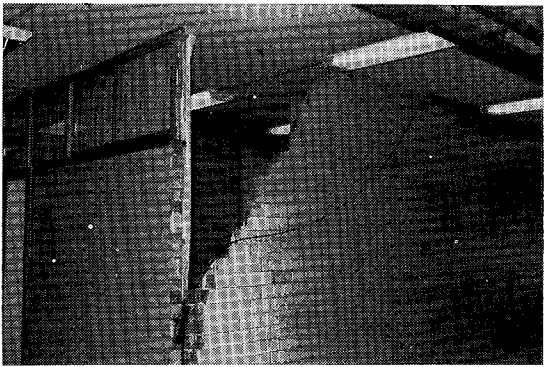


写真 6 レンガブロック非構造壁の被害
(4 階建学校校舎の内部)