

土 木 研 究 所 資 料

第 1 1 4 4 号

米国開拓局におけるコンクリートダム地震解析
(Auburn Damの解析例)

昭和 51 年 6 月

建設省土木研究所

Auburn Dam は、現在アメリカのダム技術力を結集して取組んでいるといっても過言でない大型で、技術的レベルの高いダムである。米国開拓局では1956年に工事着手を決定し、1974年に準備工事を本格的に開始した。1976年からコンクリートの打込みが開始され、完成は1977年の予定である。

ダムの設計、解析に当っては、従来の開拓局で築造したダムで蓄積された技術をフルに活用するとともに、いくつかの新しい考え方や手法が採用されている。そのうち主たるものは地震力の解析と基礎岩盤の改良、処理である。

米国開拓局は1974年に新しいコンクリートダムの設計基準を定めており、そのうち地震力に関する頃からの抜粋はつぎの通りである。

地 震 力

基本的な考え方——コンクリートアーチダムは、地震力を受けたときにそれに応じて挙動する弾性構造物である。地震力が生じたときのアーチダムに加わる荷重を得るためにふたつの段階が必要である。最初の段階はダムが受ける可能性のある地震の強さと位置を知り、その結果生ずるダムサイトの岩の挙動を決定することである。第2段階は、応答スペクトルあるいは時間——経歴法によってダムの地震応答を定めることである。

基本的な挙動をあらわす代表的な設計地震を決定する方法は目下研究がすすめられている。これらの研究ではつぎのような事項を検討する必要がある。(1)大きさと発生頻度の関係を得るための歴史的記録、(2)構造物の一般的寿命、(3)構造物の寿命の中で、大きさの異なる地震の発生確立を知るための統計的手法。これらの方法が将来進歩したときは、基準の中に適切な安全率をとり入れることになるだろう。

最大可能地震——ほとんどの地震は、断層に沿った地殻の動きの結果である。断層の位置、最近の発生時期、長さの検討を行なうために、一帯の地質調査を行なわなくてはならない。ダムサイトに影響すると思われる記録にあるすべての地震の大きさおよび位置を定めるために、一帯の地震活動の記録の研究も必要である。これらの地質的、歴史的資料をもとに、一般的に歴史的に生じた地震よりも大きい規模の仮想の地震を定め、それによって一帯のすべての活断層を検討する。このように仮定した地震は断層と関連して最も厳しいものと考え、またダムサイトの最も近い断層上の点で起ると見なす。これをダムサイトのリヒター地震力および距離について“最大可能地震”と定義する。

地震工学の分野では目下盛んに研究が行なわれ、大きな進歩をとげている。つぎに述べる基準は、コンクリートアーチダムにかかる地震力を求めるために、開拓局で用いている現在の概念をあらわしている。

基準——ダムは“最大可能地震”で以って解析しなければならない。

- (1) 応答スペクトル——ダムサイトの応答スペクトルは各“最大可能地震”について求めなければならない。このとき、参考文献〔9〕の見出しDで規定している3つの方法を総て用いる3種のスペクトルの合成を設計応答スペクトルとする。
- (2) 時間経歴——必要な加速度図は即応の加速度図、または人工的に作り出した加速度図を適切に修正して作成する。修正加速度図から計算した応答スペクトルは、上で定義した設計応答スペクトルに作り直さなければならない。
- (3) 構造物地震応答——自然周期、モードおよび構造物地震応答を計算するために用いる解析方法は、開拓局の他の出版物の中で規定している。参考文献〔1〕。

荷重の組合せ

基本的な考え方——アーチダムは適切な荷重の組合せで、それぞれについて適切な安全率を用いて設計しなければならない。一時的な荷重の組合せは、それらはある時点での発生頻度は非常に低くまた同時に起る可能性も低いので、所定の荷重組合せには考慮しなくてよい。水位変動や温度変化が大きい場合には、可能性のある異った荷重組合せに関する応力の釣合について設計上の配慮が必要である。

基準——アーチダムは、この論文の“安全率”の項で述べている安全率を用いて、可能性のある荷重組合せについて設計しなければならない。考えられる荷重組合せはつぎの通りである。

- (1) 通常荷重組合せ——(a) 最小通常コンクリート温度の影響、最も通常な貯水池水位および適切な自重、下流放水位、氷圧、泥圧。
(b) 最大通常コンクリート温度の影響、最も通常な貯水池水位および適切な自重、下流放水位、泥圧。
(c) 常時満水位、通常コンクリート温度の影響および適切な自重、下流放水位、氷圧、泥圧。
(d) 最低設計水位、コンクリート温度の影響および適切な自重、下流放水位、氷圧、泥圧。
- (2) 異常荷重組合せ——最高設計水位、平均コンクリート温度の影響および適切な自重、下流放水位、泥圧。
- (3) 最大荷重組合せ——各通常荷重組合せに“最大可能地震”の影響を加える。
- (4) その他の荷重および調査——(a) 基礎岩盤安定の検討のために、上記の各荷重に基礎岩盤中の静水圧を加える。

(b) 自重

(c) 収縮継目を段階でグラウチングする場合には、建設とグラウチングの施工順序の影響を含めるために時間的載荷を考慮して上記の各荷重を検討する。

(d) 設計者の意見によって、とくべつなダム解析のために必要なその他の荷重組合せの考慮。

コンクリートダムにかかる荷重のひとつとして地震力を決定する場合には、つぎのような過程で行なうということである。

1. ダムが受ける可能性のある地震の強さと位置を知る。
2. それによるダム基礎地盤の挙動を定める。
3. それに基づいてダムの地震応答を定める。
4. それに基づいてダムの受ける地震力を決定する。

基準の中で言っているように、地震工学は現在盛んな研究の過程にあり、その進歩も著しい。したがって、解析方法も滞っているものではないが、開拓局では、現段階で合理的な手法として以上のように基準化しており、その具体的な適用がAuburn Damに示されているわけである。

我が国の手法と異っているところもあり、直接わが国のコンクリートダムの解析に適用されるものではないが、地震あるいは地震力、それに関わる断層について参考となることも発見されるものと思う。

参考としてAuburn Damの概要をつぎに掲げる。

Auburn Damは、薄肉、2心のコンクリートアーチダムで、その弧長はアーチダムとしては、従来の常識を大きく越えている。ダムの諸元等はつぎに示す。

型 式	薄肉コンクリート3心アーチダム
堤 高	214 m
堤 頂 長	1,266 m
ベ ー ス 厚	58 m
クレスト厚	12 m
堤 体 積	4,800,000 m ³
洪水吐容量	4,500 m ³ /s × 2
総貯水量	2,840,000,000 m ³
貯水池面積	40 km ²
発 電 量	750 mw

目

次

第1章	概 説	1
第2章	地震挙動を把握する方法	2
2.1	地震学および地質学	2
2.2	地盤挙動の把握	3
2.3	手 法	4
第3章	オーバンサイト——地震学および地質学	9
3.1	主たる調査結果	9
3.2	情報の源泉	10
3.3	地域の地質歴史および断層形態の検討	11
	参考文献	23
第4章	オーバンサイト——地盤挙動の予測	26
4.1	応答スペクトル	26
4.2	最大地盤加速度	31
4.3	強振動の持続	33
4.4	オーバンサイトへの提言	33
	参考文献	35
付 録	A. 震度階および震央震度とマグニチュードの関係	39
	B. 震度と加速度	42
	C. マグニチュードと震央距離からの地盤振動の値	44
	D. 応答スペクトル	52
	E. 加速度図の選択	62
	F. 地震のマグニチュードと表面断層活動および持続の関係	65
	G. 減衰と距離の関係	69
	H. 地震の発生ひん度	74

記 号 説 明

Q_0	=	震央最大地盤加速度
Q	=	サイトにおける最大地盤加速度
d	=	表面変位
D	=	震央距離
E	=	地震によるエネルギー開放, erg
f	=	振動数 サイクル/秒
g	=	重力加速度
h	=	震源深度
I	=	震度, 修正 Mercalli
M	=	マグニチュード
R	=	震源距離
S_a	=	弾性スペクトル応答, 加速度
S_d	=	弾性スペクトル応答, 変位
S_v	=	弾性スペクトル応答, 速度
S_I	=	スペクトル震度
T	=	周期, 秒 (振動数の逆)
V	=	速 度
β	=	減衰常数 %

なお, 文中の 1, 2, 等は参考文献をあらわす。

設計地震による岩の挙動を把握する方法

地震時の岩の挙動に関する
設計の研究チームの報告書

米国内務省開拓局
中央研究所
コロラド州 デンバー
1972年 4月
(1972年11月改訂)

第1章 概 説

“地震時の岩盤挙動を考慮した設計を研究するチーム”の目的はつぎの3つである。

1. 特定の場所における地震時岩盤挙動を把握するための方法に関すること。
2. 開拓局が使用するための、これら岩盤挙動を得るための方法を示すこと。
3. Auburn Dam 地点における岩盤挙動を把握するために提示された方法を使用すること。

この報告書は、構造物の耐震設計に際して、岩盤挙動を把握するために必要な調査および方法を簡潔にあらわしている。

チームは膨大な資料や情報を集めた。将来の研究に供することができるように、集められた知識の内容が保持されることが望まれる。したがって、岩盤挙動の把握に関連する事項の詳細な議論を付加える。

資料と情報は、基本的に2つの方法で集積された。

1. とくにつぎに記す機関等の技術論文の集積を行なった。

第3回および第4回世界地震工学会議事録

米国土木学会議事録

米国地震学会報告書

原子力委員会関連刊行物

技術計算室で、これら論文のまとめを行ない、技術的検討を行なった。さらに、Auburn Dam 地点に重要な北部カリフォルニア、北部ネバダの地質学的、地震学的考察を行なった。

2. チームのメンバーはつぎに記す関係機関の代表者と面談した。

California Department of Water Resources, Sacramento, California

California Division of Highways, Bridges Department, Sacramento, California

California

California Division of Mines and Geology, San Francisco and

Sacramento, California

California Institute of Technology, Pasadena, California

Environmental Research Corporation, Las Vegas, Nevada

National Center for Earthquake Research, U.S. Geological Survey,

Menlo Park, California

University of California at Berkeley

University of California at Los Angeles

University of Nevada at Reno

第2章 地震挙動を把握する方法

ある場所における地盤振動を把握するためには2つの全然異なった、継続した計算が必要である。最初はその位置に影響すると思われる地震の大きさ（マグニチュード）と位置（震央）を計算する必要性である。2番目は、計算された地震によって生ずるとされる地震振動の把握の必要性である。

2.1 地震学および地質学

ある場所の地震に対する地盤特性の把握は、場所の近傍、集込地域およびある場合には200マイルにも及ぶ地殻構造上の一区域の地震学と地質学との総合的な研究に基づいて行なわなくてはならない。一般的な工学的地質調査として欠くことのできないものは、活断層の野外調査と地震履歴の資料の収集である。地質学的、地震学的情報を完全にするために必要な事項は、計画の設計段階によって異なる。地震学および地質学の報告書、地図、技術論文の厳密な検討が必要である。その場所あるいはその地域の地震学および地質学の権威に未だ刊行されていない情報を得るために接触する必要がある。

資料の集積は計画の最も早い段階で始める必要がある。

利用できる資料を改良するための地質学的作図の方法は比較的大きな事業で行なわれる。その位置および比較的大きな事業の地域調査相のために地殻応力、強震および微震記録は重要である。

計画が出された原子力発電所位置の安定性評価に関して、委員会は基準となる基礎的な地震学的、地質学的判断をするための規定⁵を刊行している。比較的大きな安全性に関して危険性のある大きな構造物の地質学的、地震学的調査を行なう目安として利用するのに、この基準の即応した条項は適切である。その基準では、“基準発生地震”と“安全損壊地震”に関する設計基準を定めるために必要な調査を述べている。“基準発生地震”は構造物の機能を保った状態で生ずる地震の大きさおよび周期によって定義される。

“安全損壊地震”は原子力独特の概念によることばで、チームで最大可能地震として定義したものとほぼ同じである。最大可能地震はその場所における最大地盤振動の基となるものである。つぎに記すAEC基準からの抜粋は、最大可能地震の基本を規定している。

“その場所の周辺における地殻構造あるいは地殻構造上の区域と関連する最も大きな地震は、これらの地殻構造あるいは地殻構造上の区域と関連すると思われる歴史的記録のある地震を考察することによって定義する。また、その場所の周辺の断層が活断層であるならば、これらの断層と関連した最大可能地震は、断層の地質学的経緯を考慮して定められる。歴史的な資料は限られているので、これらの地殻構造あるいは地殻構造上の区域と関連する最も大きな地震は慣習的な方法で決定され、通常歴史的に記録された最大地震よりも大きい。そ

のため、その場所における地盤振動の設計上の基本は、震央あるいは震度の最も大きい位置は、その場所に最も近い地殻構造あるいは地殻構造上の区域の点にあると仮定する。”

断層で“活断層”という呼び方はとくに重要である。活動している断層について参考資料¹、²で地質学的、地震学的に明白にされている基準はひろく受け入れられているというものの、全く疑問のないものとするのは早計である。最終的な解析では何らかの地質学的判断は避けることはできない。

2.2 地盤挙動の把握

地盤振動を測定し、表現する最も一般的な方法は、つぎの通りである。

1. 修正Mercalli震度
2. 個々の地盤振動パラメーター
 - a. ピークあるいは最大加速度
 - b. 卓越周期
 - c. 強振動の持続時間
3. 応答スペクトル
4. 加速度図

歴史的に、震度の叙述は地盤振動の叙述における最初の試みのひとつである。西部合衆国における地震記録の歴史は18世紀に遡る。震度は個人面接と建物および構造物の損傷の叙述を基にしている。それらは主観的であり、地盤振動の直接的表示である。震度の叙述は今なお有益な過去の地震経験を示すものである。^{6, 23} (付録A, B)

個々の地盤振動パラメーターで最も一般的に引用されるのはピーク地盤加速度である。不幸なことには、この加速度はしばしば地盤振動のはげしさを完全に測定したものと見なされることである。この測定は地盤振動の周期および振動の持続時間を無視している。比較的高い加速度であっても、短い周期の非常に短時間の振動の場合には構造物の損傷はないことが多い。このことは構造物の自然応答の周期が高い加速度における周期と全く異っている場合にはとくに強くいうことができる。個々のパラメーターを持つ地盤振動を知るためには、最大加速度と同様、振動の周期と持続時間についても考える必要がある。

過去10年間に、これら3つのパラメーターを用いたその場所における岩盤挙動を把握するいくつかの方法がBlume, Newmark, Seedその他の研究者によって発表されている。^{8, 10, 13, 24, 37, 42} (付録C)。最近Seedその他は多くの研究者による資料を用いて、注目すべき技術的判断を行なっており、与えられたマグニチュードと震央距離によって、上記のパラメーターを計算する関係を編み出している。Seedは、これら個々のパラメーターを適合させるために記録にある加速度図を選択し、調整する方法を提言している。

地震によって引起された地盤振動とそれに対応する構造物の合成短期応答は、応答スペクトルの概念に導かれている。^{2, 8, 34, 37, 40} (付録D)。地盤振動を時系列に表示し、自由度1方式による即応の加速度、速度、変位の最大値のプロットが応答スペクトルである。パラメーターの最大値は自然期間および減衰の間数としてあらわされる。スペクトルの工学的な意味は、一旦地震のスペクトルが知れれば、その地震による自由度1の構造物に生ずる力が計算できるということである。複数自由度構造物の応答は自由度1の構造物の応答の重ね合わせによって計算できる。^{9, 34, 40} しかしながら、複数自由度構造物および非弾性挙動構造物の正確な解析には、加速度図を用いた時系列解析が必要である(付録E)。与えられた地震に関する応答スペクトルは、与えられた地震の大きさおよび距離から直接に、あるいは最大地盤加速度、速度および変位でいて、あるいは見積られた加速度図から間接的に作成することができる。震度のデータのみが使用できる場合にはそれに応ずるマグニチュードと震央距離を計算することが必要である。

時系列解析のために選択された加速度記録は、設計地震から生ずると考えられる地盤振動と比較できるものでなければならない。加速度、振動数、強震の持続は考慮する必要がある。加速度記録は、その応答スペクトルを設計スペクトルと比較することによって選択する。

対象構造物の自然振動数の範囲で応答スペクトルが設計スペクトルに近い場合には、時系列解析のための記録は有用である。

加速度図は歴史的記録、Jenningsが作ったような人工的加速度図³⁰、あるいは環境研究協会のようなコンサルタントから得ることができる。歴史的あるいは人工的な加速度記録によって十分な時系列記録が得られないときは、加速度の幅を出すための便宜として設計地震の最大地盤加速度を用いて調整することができる。いくつかのケースでは、設計スペクトルとしてより妥当なものを得るために、時間のスケールを調整することによる振動数の調整が必要な場合がある。加速度の減衰常数は加速度図のある部分の追加、繰返し、削除によって変えることができる。

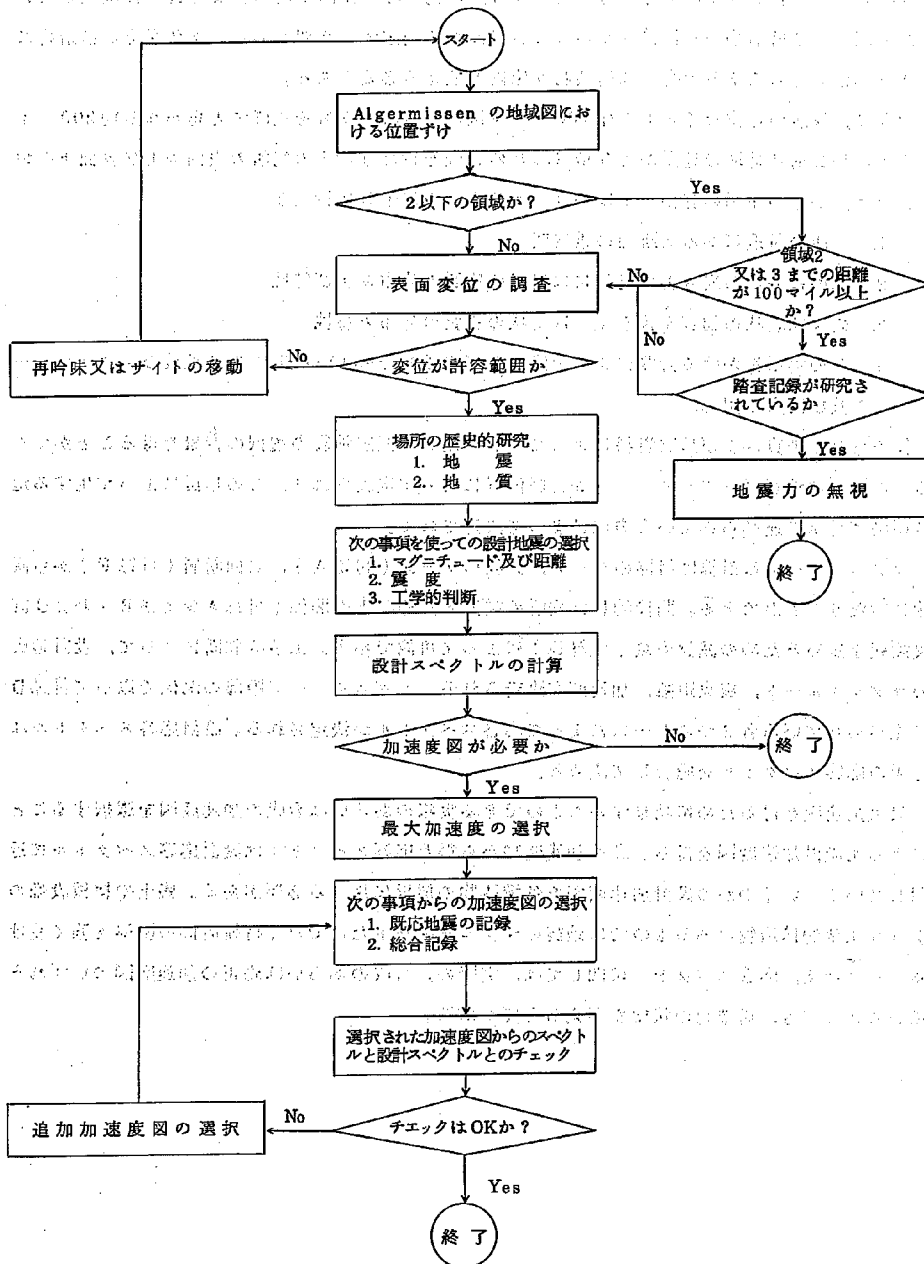
すべての可能性のある構造物応答を作り出す単一の加速度図を得ることはほとんど不可能なことである。それゆえ、いくつかの構造物の応答を定めて、それによっていくつかの入力用地震記録を選択する必要がある。Blumeは“完全な結果を得るためには少なくとも15個の人工的な地震が必要である”と云っている。⁸ 使わなければならない地震記録の数は、構造物の型式および重要度で変ってくる。

2.3 手法

ある場所における設計応答スペクトルおよび設計加速度図を定めるのに、つぎのような手法を示す。図2.1のフローチャートについては、次で述べられている。

まず最初にAlgermissenによる地震地図(図2.2, 2.3)にその場所を置いて見る。³ 地図には4つの地震ゾーンが示されている。場所がゾーン0又は1、およびゾーン2又は3から100マイル以上離れていて、踏査の情報がある場合には地震力は無視してよい。可能性又は基準設計の

表2.1 場所における地盤振動を決定するための手法



ために資料を得る必要がある場合、あるいは場所がゾーン2又は3の中にあるか、ゾーン2又は3から100マイル以内の場合はつぎのような調査を行なう必要がある。

活断層による表面変位の予備調査による地質的研究。場所が活断層の上又は近くに位置しているならば、その構造物が変位に耐えられるかどうかを判定する必要がある。永久変位が構造物に耐えられないものである場合には構造物は位置を換える必要がある。

つぎに、場所から少なくとも半径100マイル以内と場所に影響を及ぼすと思われる約200マイル以内の地質構造地域の地震および地質履歴の調査を行なう。その場所の表面および表面下の地質調査は、つぎの事項の詳細までではつきりさせるように十分に行なう。

1. 場所の付近にある活断層の重要度
2. 基礎における岩および動的には岩状の物質の分布および特性
3. 岩又は岩状の物質を覆う土又は土状の物質の分布と特性
4. その場所における計器による記録および修正Mercalli震度からの地震のマグニチュード及び震央の記録。

集められた地質および地震資料によって設計に用いる仮定地震の選択の背景を得ることができる。この仮定地震はマグニチュードおよび位置によって定義される。この地震によって生ずる地盤振動は付録で述べられている方法によって決定される。

マグニチュードの計算は計器のデータ、震度のデータ(付録A)、表面断層(付録F)から直接に行なうことができる。間接的には場所の震度と加速度との関係(付録AおよびB)および震央震度を定めるための減衰係数(付録G)によって可能である。工学的判断によって、設計地震のマグニチュード、震央距離、加速度が決定される。マグニチュード距離の関係で以って付録Dで述べられている各3つのケースによって応答スペクトルが決定される。設計応答スペクトルは上記の応答スペクトルを総合して決める。

最大加速度を得るために調整することのできる実際のあるいは合成の加速度図を選択することによって設計加速度図を得る。設計加速度図から得た応答スペクトルは設計応答スペクトルに近似している。いくつかの設計加速度図を各構造物の解析に用いる必要がある。盛土や機械設備のような工学的構造物のあるものでは地震のマグニチュードだけでなく持続時間の影響も強く受ける。それゆえ、応答スペクトルに関しては、実際の、合成のあるいは修正の加速度図のいずれを用いるにしても、構造物の状態を考える必要がある。

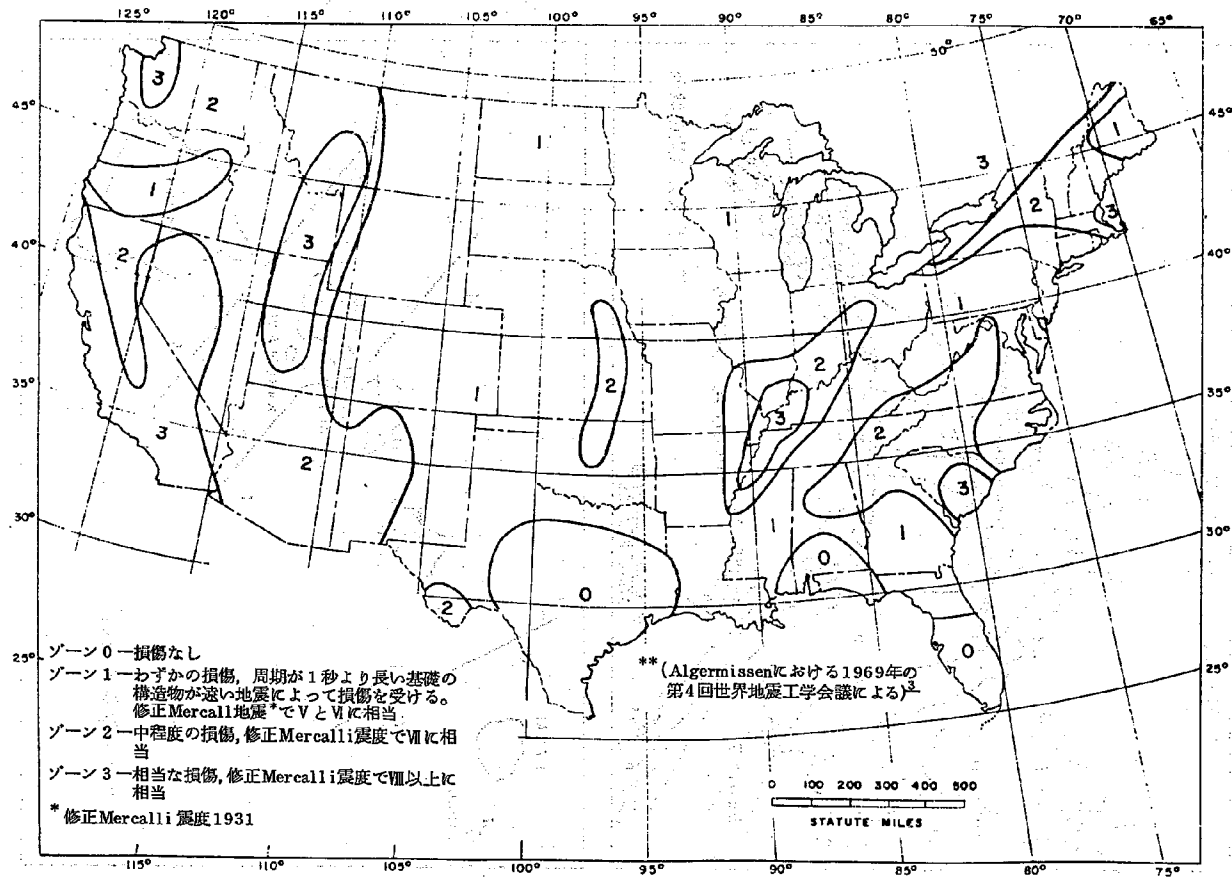


図 2.2 合衆国地震区域図**

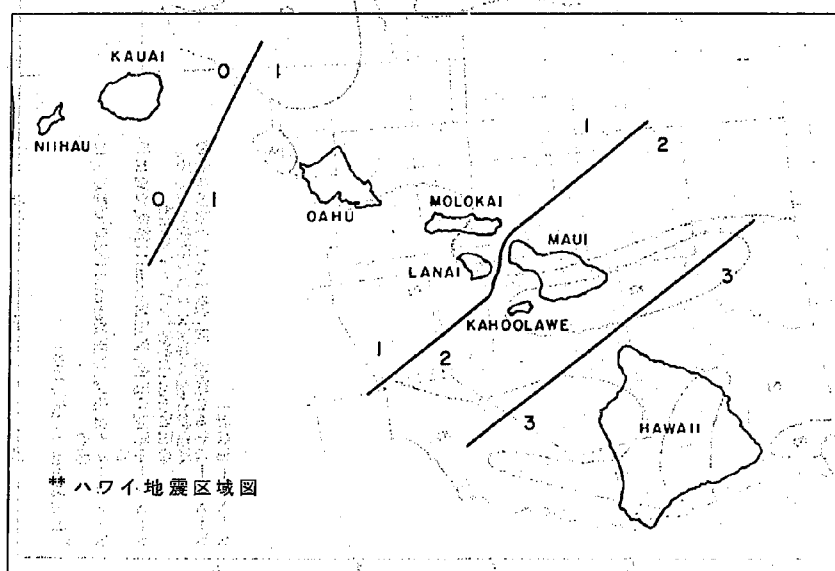
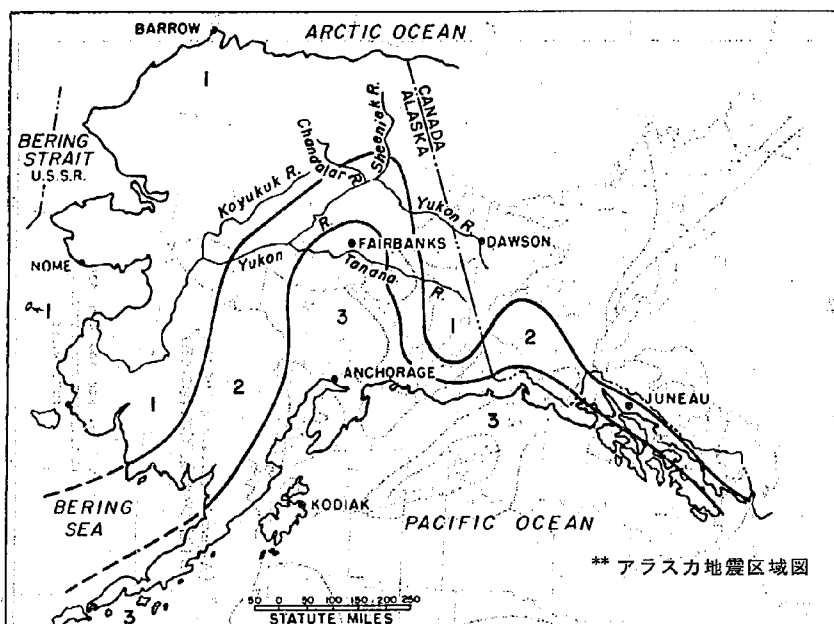


図 23

第3章 オーバンサイト—地震学および地質学

場所に影響すると思われる仮の地震の設計に当って、必要な地震学的、地質学的情報を得るために、オーバン地区および200マイル範囲の北カリフォルニア及びネバダ地域が研究対象となった。対象範囲は大きく、また最も地質学的、地震学的に調査された範囲のひとつであることをあらわしている。これから後に述べられていることは、最も信頼性がある事項に限られている。最初に主たる調査結果を示している。それから、節3.2では、これらの調査結果が基となっている基礎的情報の概略が記されている。節3.3では、この地質構造域の地域的地質歴史および地震系を示している。その際、とくにこの地域内の各所における最大可能地震を決定することに関する考え方を強調している。

3.1 主たる調査結果

a. 最大可能地震を定めるために示される地域的地震学、地盤学および仮定地震

オーバンは、地質構造的に安定し、地震的に穏やかなシェラネバダ地帯の北部に位置する。しかしながら、全体的に見て中央および西側の小高い部分は新世代後期の断層の影響を受けていないが、将来の小規模な地震を引き起す基になる恐れのある第4紀の動きの小さな徴候はある。

Sierra Nevada 山脈の東側の The Basin and Range 地方および西側の Coast Range 地方は、地質構造的に活動的で、よく知られた大断層を伴う強地震地域である。オーバンサイトに影響する地震動はこの地域から生ずるものである。この地域における顕著な地質構造は、The Basin and Range 地方の西側境界に沿った断層群と Coast Range 地方にある San Andreas 裂隙である。

最大可能地震の決定に際して用いられる仮定地震は下表の通りである。

地質的地域分類	大きさ (マグニチュード)	焦点深度 (マイル)	震央距離 (マイル)
Sierra Nevada 山脈	5 ½	10	15
The Basin and Range	8	10	50
San Andreas 裂隙	8 ½	10	100

b. サイトの地質

ダム基礎岩盤は相当硬質な変成岩で、主として角閃片岩から成り、アバットの上位標高で一部風化が見られるが、他は概ね堅硬である。新鮮な角閃片岩は弾性波速度が 10000~12000 ft/s, 比重は 2.9~3.0 である。

基礎岩盤の断層および破碎ゾーンとその他多くの部分は少なくとも1億年以上前の中世代に形成された。その後、新世代に動いた明らかな形跡はない。現在の地質状態の下での再変動や将来

数世紀にわたっての再変動の明白は証拠や徴候はない。

c. オープン地区における歴史的、将来的地震学

サイトの10マイル以内では、過去100年間に震度Ⅵ以上の地震は起っていない。また震度Ⅵの地震は1872年のOwens Valley地震が唯一度である。震度Ⅴの地震は同じ期間に20年に一度の割合で生じている。これらの地震は西側のCoast Range地域又は、東側のBasin and Range地域の60マイルかそれ以上離れたところが震源の強い地震($M \geq 6$)によるものである。例えばオープンで感じられた2つの強度の地震は、ひとつは1906年のSan Francisco地震で震央が110マイル、ひとつは1966年のTruckee地震で震央が65マイル離れている。

過去100年間あるいは多分150年間に震度ⅦとⅧの地震を経験していないといっても、Basin and Range地質構造地帯では今後数世紀の間に強い地震が発生することが予想される。一方、震度Ⅸあるいは、それ以上の地震は現在の地質状態の下では起り得ない。

知られている最も近い震央は、北におよそ25マイルのGrass Valley地域で起ったマグニチュード2の孤立した地震とSierra Nevada地域の東縁近くの南西約43マイルで起ったマグニチュード4の地震である。マグニチュード5以上の地震の震央はBasin and Range地域の西縁にあるタホ湖の北から南に通っているSierra Nevada断層崖に沿った50マイル以上離れた地点である。

3.2. 情報の源泉

Sierra Nevada及びカリフォルニア州とネバダ州におけるその隣接地域の過去数十年における開拓局が行なった莫大な工学的地質調査によって、現在の研究に必要な地域の地質学に関する十分な資料が得られる。

岩盤の断層や他の異相等について開拓局の基礎調査によって綿密に調べられており、それによって、オープンサイトの地質は詳細に知られている。更に、運河、橋、道路、建物等の地質調査や実際の建設によって、それ以外の広い範囲についても地質的によく知られている。

カリフォルニア州における1961年以前の地震歴史はカリフォルニア水資源局の報告書¹で総合的に網羅されている。そこでは1934年から28年間の $M \geq 4$ のすべての地震についてその震央位置と大きさ(マグニチュード)を掲載している。地震をプロットしたカリフォルニアの地図の中で“……顕著な不活性断層および知られた活断層”を示しているが、これはとくに価値が高い。1961年以前の地震の比較図も年代順になっており、地質的な注釈があつて、ネバダ州における震央図として有用である。^{14, 15} National Ocean Survey (以前はCoast and Geodetic Survey)の合衆国地震年報もよく利用された。

1965~1969年間の北部、中部カリフォルニア州の地震はカリフォルニア大学の最近の論文によって詳細に検討された。⁶ サンフランシスコ湾南部地域における1969~1970年の2年間の地震については、他の最近の出版物で以って検討されている。⁹

ネバダ州立大学地震研究所の報告¹¹も貴重な資料である。最近までに10ステーション設置され

たその地震計測網は東部カリフォルニアの Basin and Range 地帯とそれに続く Sierra Nevada 地域の地震についてよくカバーしている。図 3.5 を作成する上で、1965 年 10 月から 1970 年 12 月に至る 15 カ月間の拡大された観察網の最初の結果を用いている。

ネバダ州立大の California Division of Mines and Geology, NCER of the U. S. Geological Survey, その他の地質学者及び地震学者との話し合いによって、印刷されていない情報を得ている。それらの価値は高い。

3.3 地域の地質歴史および断層形態の検討

a. 地震の特性による 3 つの地域区分

オープンサイトのある Sierra Nevada 山岳地帯の北部は 2 つの大きな地震帯の間にある。その地震帯は西カリフォルニアの沿岸地域にあるサンアンドレアス裂隙と東部カリフォルニア及び西部ネバダにある Basin and Range の大断層地帯である。サンアンドレアス裂隙はよく知られており、カリフォルニア州における地震工学上の支配的要素となっている。オープンからサンアンドレアス裂隙に最も近いのは東部 Bay Area で 100 マイルの距離である。1906 年のサンフランシスコ地震の震央は約 110 マイルの距離である。Basin and Range の西部地震帯は約 100 マイルの中があり、Sierra Nevada 山脈の東縁を形成する断層崖に沿った最も近い点で 50 マイルの距離である。

図 3.1, 図 3.2 は 3 つの地質区分およびその地震特性とオープンとの関係をあらわす一般的な図として読者にはなじみのあるものと思われる。図 3.1 は、地域区分と 1942~1966 年の間の $M \geq 5$ の地震の震央を示している。この図ではオープンサイトにおける地盤振動に関する我々の解析での 3 つの仮定震央も示している。図 3-2 は北カリフォルニアの主たる断層と 1965~1969 年の間の $M \geq 3.5$ の地震の震央をもっと単純化してあらわしている。

オープンとは Sierra Nevada 山脈の北部、Yuba 及び Toulumne 川流域の中間の概略長さ 150 マイル、巾 75 マイルの山岳地形の中に位置する。この地域は地震に関しては低いレベルであり、それに対応して数百年間は断層に基づく変位、また少なくとも数十万年はしゅう曲や傾斜を受けたことがなく、地殻は非常に安定している。この地域は Tertiary 砂礫層と火山堆積物が広がってきた花崗岩及び変成岩の巨大な岩体として現在の位置での傾きになっている。この傾きは盆地の東にある断層崖が形成されたときの長期間の断層形成期の最後の段階で生じた。この期間には Sierran Block に入れることができる。

Sierra Nevada 地域以外の 3 つの地域は考慮すべき地域として 200 マイル以内にあるが、オープンサイトにはそれ程重大な意味はないと思われる。それらは (1) The Central Valley (2) Sierra Nevada 山脈が Cascade 地域に入っている Yuba 川の北方の活動性を増している火山地域 (3) 南 Sierra Nevada 山脈。Sierran Block を形成する同様の固い岩体は Central Valley の新世代沖積層の下に緩やかに傾斜している。この安定した基盤によって Valley の東部は地震

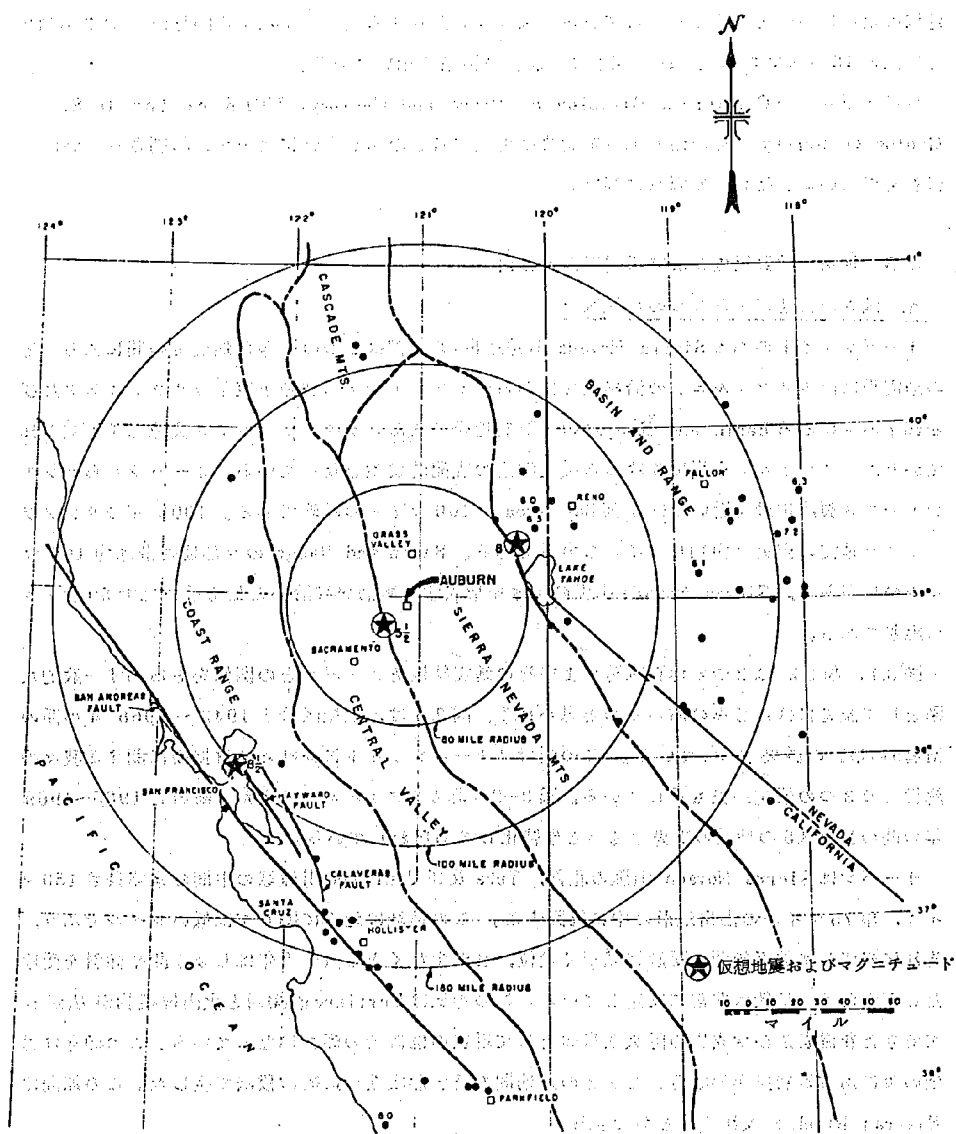


図3.1 仮想地震、地質区分、194~1966年間の震央における $M \geq 5$ の地震

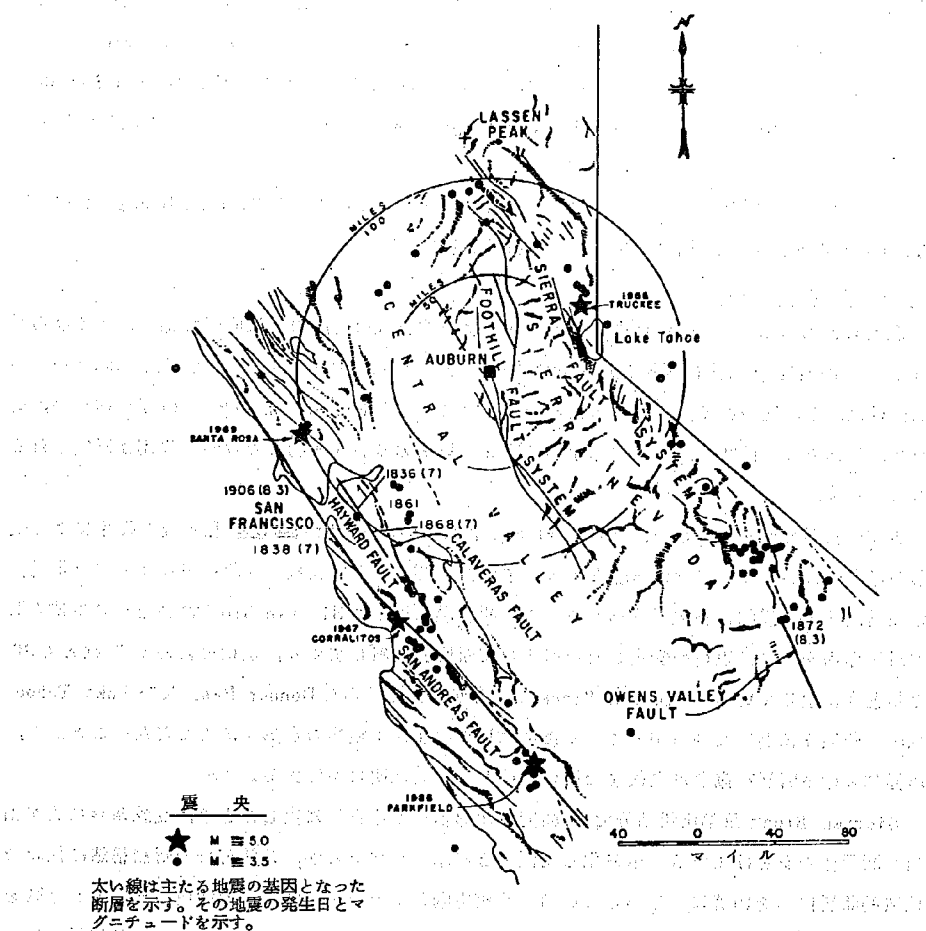


図3.2 北カリフォルニアの1965~1969年間の地震
および単純化された断層図

的に低いレベルであり、明らかに広い盆地の残りの多くの部分も Sierran Block に比肩し得る。Yuba 川流域の北部の普通程度の地震地域は震央分布のひろがり方、新世代の断層及び連続している火山活動からわかるように地殻のひずみによって特徴づけられる。この地域は Basin and Range 地方と一諸になり、北西方向の活火山 Mt. Lassen に向っている。南部 Sierra Nevada 山脈では地形的に明らかな変化があり、Tehachapi range も近くなって地震活動が活発化している。

つぎに 3 つの重要な地域について記す。最初はオーバンの位置する Sierran Block。2 番目は Basin and Range、3 番目は Coast Range 地震帯である。

b. Sierran Block

Sierran Block は、団結した均質な古生代および中世代の変成岩、深成岩であり、広くひろがっている Tertiary 火山砂礫及び河川砂礫堆積物が不整合に覆っている。また東部では、地域性の洪積世氷河期の堆積物で、とんがった部分ができている。Sierran Block 中の断層作用の顕著な姿、それとこの研究で最も重要な事項は第 3 紀以前の基礎構成物にだけ断層作用が限定されることである。

西側の斜面境界を深く覆っている Tertiary 層は広い範囲で断層作用や積重なり作用による変形の影響はない。オーバンから約 50 マイル離れた末側の境界は大規模な断層崖によって地形的、地殻構造的、地震的に特徴づけられる。この断層崖に沿って Sierran Block はひとつの単位として断層作用を受け、現在の安定した位置として西側に傾斜しており、洪積世初期（少なくとも 30 万年前）に生じている。Sierran Block のとんがった部分から Donner Pass 及び Lake Tahoe 地区の断層崖にかけてひろがっている後期洪積世の氷河堆積物の変形がほとんどないことから、境界における断層の動きは現代まで続いていないことは明らかである。

Sierran Block 西部丘状部分では、極度な変形構造が中世代に生じたとき、変成基盤物質が相当な断層作用を受けている。単純化して図 3.2 に示されているが、丘状部分の断層構造は往時の地域的断層作用を顕著にあらわしている。北西方向にブランチして、その断層はオーバン地区を通り、そこで北方にのびている。オーバндаム基礎の断層及びシャーゾーンはこの地域断層構造の間で生じた岩体の変形の地域的なあらわれである。上に断層作用を受けていない Tertiary 層が堆積しており、この断層作用は Tertiary 層の侵蝕を受けた表面が形成される後期中世代のずっと以前に起った岩体中の応力の応答をあらわしている。他のいい方をする、丘状部分の断層構造はジュラ紀又は白亜紀初期、数億年又はそれ以上前から不活性であるということである。

傾斜しているので Sierran Block 中の古い断層に沿って、整合し難いことを示すより若い物質を伴う短かくて、変位量の小さいほんのわずかの孤立した断層の形跡がある。^{e, h} Foothill 地域におけるその最も近い明確な例としてオーバンの南 80 マイルの New Melones ダムサイトの近くにある約 900 万年前の鮮新世の熔岩流がある。中央地震研究所 (USGS, Menlo Park) は、陸軍工兵隊と共同して貯水池によって地震が生起する可能性について原因を探るためにこの地区

での微小地震および地殻ひずみの観測研究を今年から開始した。New Melones ダムが湛水する前に Foothill 断層構造に関連する地震（例えそれが低レベルの最小限地震としても）を調べるための観察する機会は数年である。しかしながら、現段階では、この調査は情報を得るために十分進行しているとはいえない。

もっと直接的にわれわれの研究に意義のあると思われるのは洪積世の水河堆積物に段を作っているように見えるオーバンの西南15マイルの断層と思われるもの（Possible fault）である。西北の方向性をもち直線的な断層活動を示すような形をしているが、直切断面、その他の地形的特徴のない地質構造について、California Division of Mines and Geology の Section 18, 20, Township 10N, Range 7E で地質図に示されている。¹ この Possible fault が再び動く可能性は遠いというものの、安全サイドの見方にたてば、この形は“活”断層をあらわす第4紀後期の地質構造現象である。

したがって、この断層は最大可能地震を定める際に考慮する仮の地震のひとつについて、その基礎になるものとして用いた。付録Fの図F1によつて、断層が3マイルであることから、マグニチュード5.5の発生源の可能性があるものとした。カリフォルニアにおける一般的な経験を基にして震源の深さを10マイルとされた。

Sierran Blockの地震記録で特徴的なことは震央が著しく少ない（カリフォルニアで）ことである。これは新世代以降の地質学的安定性とよく対応するものである。1942～1966の24年間の $M \geq 5$ の地震を表示した図3.1、1965～1969の間の $M \geq 3.5$ の地震を表示した図3.2を見ても点のないことがわかる。Sierran断層崖に達するまでは震央はひとつもない。

1934年以降の地震記録を調べると、オーバンに最も近い位置での地震は25マイル離れたGrass Vally近くが震央のマグニチュード2～3のものであると思われる。² そのつぎに近い地震は南東に約43マイル離れたタホ湖の南、Sierra断層近くの震央のものである。¹¹ マグニチュード5以上の地震で震央が最も近いものは、北東に50マイルより少しはなれた位置で、1875年のMohawk Vally地震に伴う表面断層活動の近くの、Sierran Blockの東縁を形成する断層地帯である。（図3.4）

この地域の120年間の沈下に対する地震振動の影響の計器観測でない観察は震度報告としてなされているが、それは隣接したBasin and Range およびもっと離れたCoast Range地震帯の地震歴史を反映している。^{k2} 想像されるように、カリフォルニアのDownievilleのように東縁の断層崖に近いところはSierran Blockの多くの部分よりも影響を数多く、またはげしく受けている。オーバンでは強さVIの振動を1872年のOwens Vally地震のときに一度経験している。^g 強さVの振動は、この同じ期間におよそ20年に1回の割合で、数回受けている。中程度の地震から強い地震（ $M \geq 6$ ）は、西側ではCoast Range地域、東側ではBasin and Range地域で60マイル、あるいはそれ以上離れて起っている。例えば、オーバンで強さVとして感じられたふたつの地震は、そのひとつは1906年のサンフランシスコ地震で、震央は110マイルの距離であり、

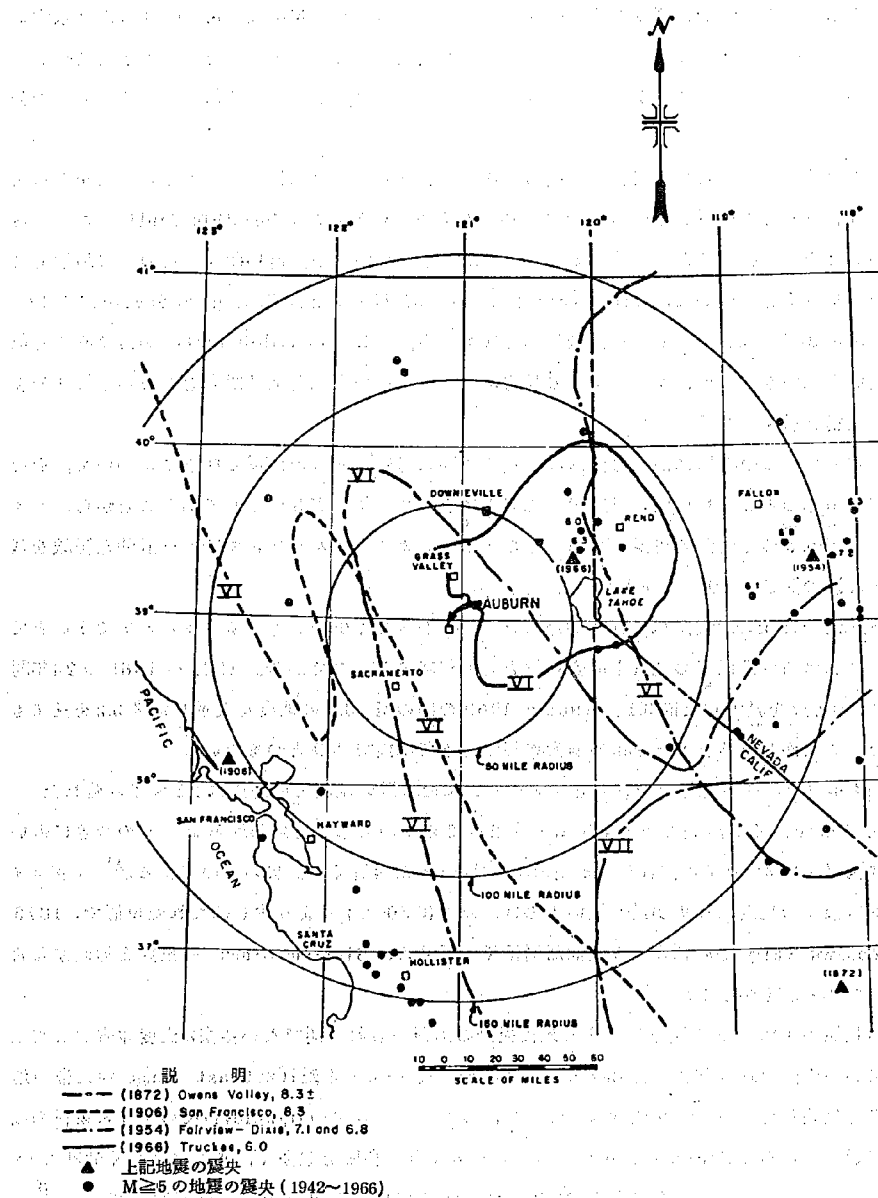


図3.3 オーバンサイトに影響する選択された地震の等震図

もうひとつは1966年のTruckee地震で、震央は65マイルの距離である。

図3.3は、1872年のOwens Vally地震 ($M = 8.3 \pm$)、1906年のSan Francisco地震 ($M = 8.3$)、1954年のFairview-Dixie地震 ($M = 7.1$ 及び 6.8) および相当小さいが震央が65マイルしか離れていない1966年のTruckee地震 ($M \geq 6.0$) の強さⅥの振動の等震線をあらわしている。1872年のOwens Vally地震はカリフォルニアで起った最大級の地震のひとつであり、オーバン地区で強さⅥを経験した唯一の歴史にある地震と思われる。1966年のTruckee地震ではオーバンから約10マイルのところで強さⅥがおこり、1906年のSan Francisco地震では約20マイルのところで強さⅥが報告されていることは注目すべきである。

強さⅦおよびⅧの振動が過去100年間、あるいは多分150年間に経験していないといっても、今後数百年もたたない間にBasin and Range地質構造地域では起る可能性はある。しかしながら、強さⅧあるいはそれ以上のものは生じること考えられない。この地域における今日の地質状態は、数千年にわたって地球の殻部分の変位を制御してきている。今後数百年にわたってそのような状態がつづくと考えてよい。

c. Basin and Range 地震帯

現在なお地震と対応して生じている断層作用は、Basin and Range 地域の構造的展開及び地形を左右する地質的活動である。

この断層作用は鮮新世中期か、それより少し前、数千万年前かそれより少し前から始った地殻の拡張作用のひとつのあらわれである。それによって、北西方向の堆積した谷の部分(地溝、グラベン)と基岩の山地部分(地壘、ホルスト)を形成することになり、これは引張力に基因する垂直断層で境界される。

歴史的な地震活動は、この地域の両サイドの2つの巾広い帯に沿って集中している。² Sierra断層崖から中央ネバダにかけて東部に巾150マイル以上にひろがっているサイトから、西側の帯はオーバンに影響する地震源として重要である。オーバンの緯度で、この地震帯は更に区分することができ、それはより地震活動のはげしい外側50マイル巾と、地震活動のゆるやかな中央50マイル巾である。2つの活動のはげしい地震帯は南部のOwens Valley地区で一諸になっている。Sierran Blockの縁に沿って、カリフォルニアとネバダの州境をたどることができる。そこにはMono Lake, Lake Tahoe, Carson盆地, Truckee盆地, Mohank盆地, Grizzly盆地があり、温泉と最近の火山活動が伴っている。もう一方は中央ネバダを運って北東に延びているが、そこでは1915~1954年間にかなりの表面断層作用を伴った5つの大地震 ($M = 6.8 \sim 7.6$) を経験している。図3.4¹¹

1951~1960の10年間の影響ある地区の地震発生頻度の解析がこの研究の一部として行なわれ、工学的地震学の統計、確率的手法のひとつの例として付録Hに示されている。

この地域では、とくに中央ネバダブランチに卓越して、1869年から12回の断層作用を伴った地震が生じている。^{21, 22, 11, 11} これらの地震は図3.4に挙げられている。この図では歴史的

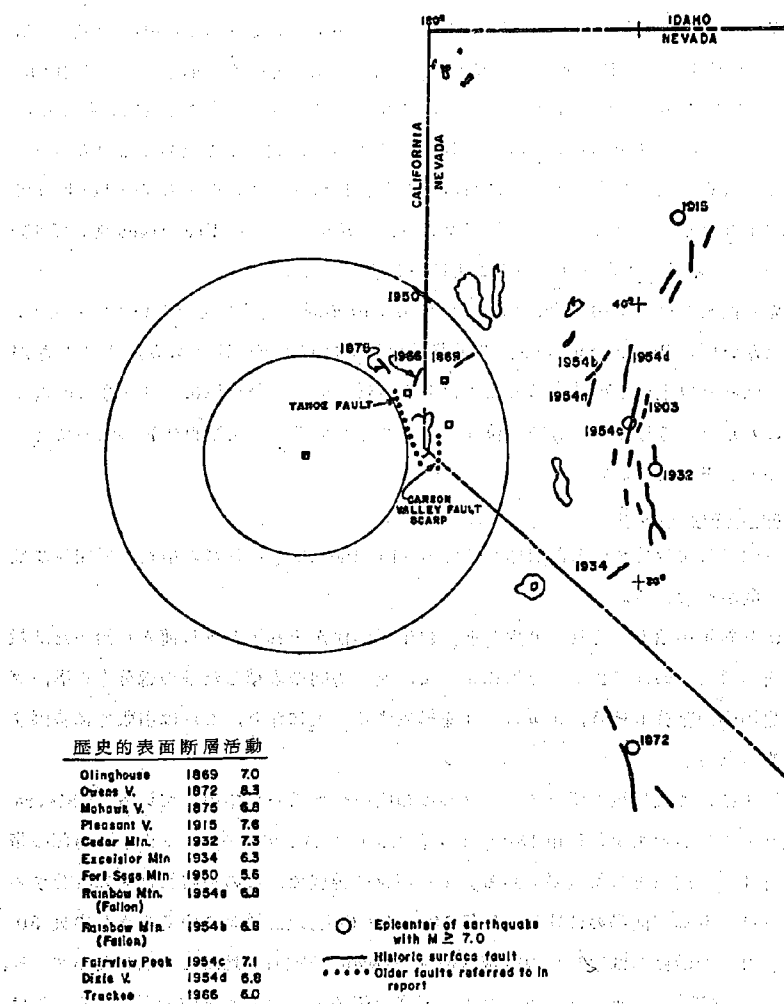


図3.4 東部カリフォルニアおよびネバダの歴史的表面断層, $M \geq 7.0$ の地震の震央, Tahoe and Carson Valley 断層

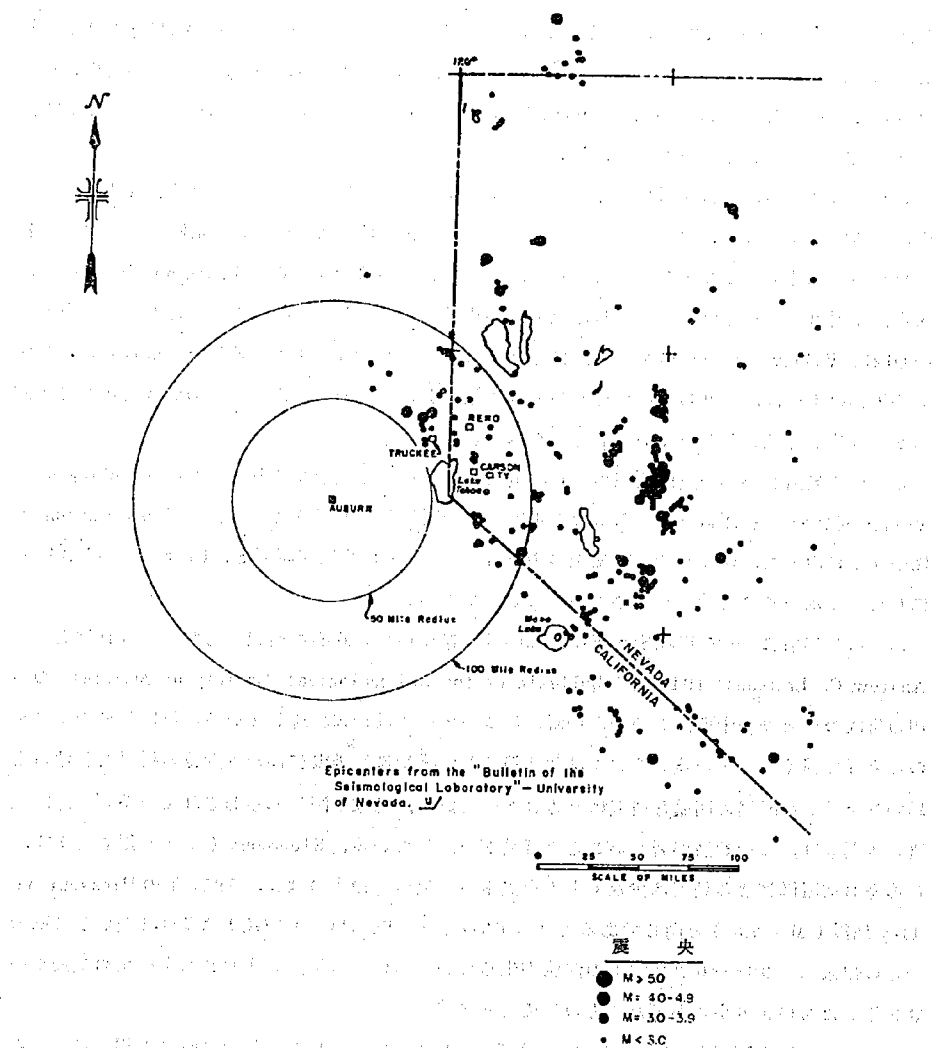


図35 1969年10月24日~1970年12月31日間の西部
ネバダ地域の地震

な断層と $M \geq 7.0$ の地震の震央も示している。それ以外に Tahoe と Carlson Valley の 2 つの断層が示されており、これらは直接的には歴史的な地震とは結びつかないが、ここでの解析に重要なものである。図 3.5 では 1969 年 10 月 24 日から 1970 年 12 月 31 日の 15 カ月間の同じ地区における地震の震央があらわされている。

これらの歴史的な地表面裂図は、そのすべては、もともと存在した断層と本質的になぞっているか、あるいは非常に深い関連をもっており、これらは A E C の基準による“活断層”と見なされる断層の一部分であることを示している。オーバンから 200 マイル内の Basin and Range では新世代後期の物質に違いを生じさせている数百の断層がある。中央ネバダにおける 1954 年の Dixie Valley 地震や他の強い地震に伴う断層のような数マイルの延長をもつ重要な地質構造的規模のものは、これらの断層のうちでは少数である。しかしながら、この大きさの多くの断層がより広い地域にわたっていると考えられる。

年代が相当新しいが歴史時代以前の比較的大きい規模の断層活動は谷の西側にある Carson Valley 断層である (図 3.4)。ここでは古くからの断層により形成された山岳である Carson 地域のすそに沿って、かなり新しい様相の 30~40 フィートの垂直切断面を、15 マイルかそれ以上にわたってはっきりと連続して跡を追うことができる。

ほんの数年前に 1906 年の San Francisco 地震について公式的な研究を行なった地質学者 Andrew C. Lawson は 1912 年に Bulletin of the Seismological Society of America の当初の出版のひとつの中で、この垂直切断面について一番最初に叙述している。彼はその中でつぎのことばで締めくくっている。“我々はそう遠くない将来に大地震に伴う変位の再発を受けると思われる”この断層の明確な研究はなされていないが、地域地図にあらわされている。⁹ 地震地質の専門家は、この断層が新しいことで意見が一致している。Slemmons (ネバダ州立大) は、この垂直切断面による地震は少なくとも中央ネバダ地震で最大の地震、1915 年の Pleasant Valley 地震 ($M = 7.6$) と同じであると言っている。¹³ Bonilla (USGS) は多分 2 ないし 3 回の一連の出来事で 30~40 フィートの変位が生じており、個々の地震の大きさはすべての変動が一度に生じたものより小さかったことの証拠をあげている。

図 3.4 および 3.5 に戻ると、中央 Nevada Branch における 1954 年地震の断層の周辺には明らかに震央が集中している。この分布は、Pyall (ネバダ州立大) によると時間的にしばらく連続する余震形態をあらわしているとのことである。¹² 西側には、わずか 15 カ月期間の形態がばらばらなものであるが、群発しているのと静かな空白部分の両方を示している。Pyall は大きな地表面断層を伴う強い地震を経験していない地域である。

震央群発に関するいくつかの“騒々しい”空白部分は、いわゆる前振動期間を示しているものと仮定している。Truckee の北部地域および Stamped Reservoir の周辺地域はそのような地域であると勧告している。この同じ地域における 1942~1966 年間の $M \geq 5$ の地震と 1965~1969 年間の $M \geq 5$ の地震は図 3.1、図 3.2 に示されている。

Basin and Range 地域での最も最近の強い地震である 1966 年の Truckee 地震によって 10 マイル離れたオーバンに強さ VI のゆれが生じた (図 3.3, 図 3.4)。* f2, g, k1, m, r3

Truckee の北側地区に比して, Lake Tahoe の南側周辺に近い地区は静かであり, とくに西部 Sierra 断層崖側は静かである。^{c, v} 図 3.4 に示されている Tahoe 断層は湖の西側でもぐついていると考えられている。Sierran Block の揚圧力及び傾斜に関する検討で当初から知られているように, この断層を覆う氷河堆積物は変形を受けておらず, 新世代の後半及び現代では動きがないことを示している。しかしながら, Tahoe 断層の北端は 1875 年に移動したと考えられている Mohawk Valley 断層と交叉している。

Basin and Range 地域における地震および地質の考案についての結論は, 節 3.1 の主たる調査結果で示されている。M=8 の地震をオーバンから 50 マイルの距離に選択したことは安全側ではあるが, オーバンから 200 マイル以内の地質構造地域の部分から予想される最大の地震の可能性を反映して実際のと思われる。1872 年の Owens Valley 地震の大きさを決定する際に, 地震の地質的配置を行なった。

オーバンに最も近い地質構造地域における潜在地震断層の長さは, 60 マイル離れたところで生じた断層作用による 1872 年の裂断よりも相当短いという証拠は強い。^{g, t2} 選択したマグニチュードは, オーバンから 200 マイル以内で起った Basin and Range 地域の歴史的震央マグニチュードよりも大きいものである。

d. Coast Range 地震帯

Coast Range における地震は圧倒的に San Andreas 断層系によるものである。カリフォルニア大地震で最もよく知られている 1906 年の San Francisco 大地震 (M=8.3) は, オーバンから凡そ 110 マイルの海岸にその震央がある。

1857 年の Fort Tejon 地震, これも San Andreas 断層上であるが, その震央は 300 マイル以上南の Tehachapi Mountains にある。つぎの世紀にこの裂け目で同じ程度か, それ以上の地震が再発し, かつその動きは 1906 年の動きかそれ以下であることの可能性は疑問の余地がない。^v San Andreas 断層系よりも幾分オーバンに近い San Andreas 断層系の 2 つのブランチの北限は Hayward と Calaveras 断層である。これらの断層上での顕著な微小地震が, とくに Calaveras 断層の北端で 1969~1970 の間に記録されている。^e

* Prosser Greek Dam は, この地震で若干の被害を受けたが, 震央からたった 4 マイルしか離れていない。表面にあらわれた影響は明白な変位のない小規模の破砕に限定されているので, 表面断層を伴った地震 (図 3.4) に関してここに含んでいることに疑問があるかもしれない。しかしながら, 地表の破損が見られる巾の広い一条が, 断層と見られるものを伴って, はっきりとした方向と長さをもって存在しており, これは, すでに Stampede Dam 建設のための空中写真及び地表調査から図化されている。

San Andreas 破砕系と Central Valley の間の Coast Range は大きな圧縮力による第3紀後半の強い変形を受けており、そのため折重なりや衝上による断層作用がこの地域の地質構造を特徴づけている。圧縮による変形は第4紀を通じて続いており、測地学的調査による地殻ひずみ測定によると今なお進行している。この研究に関連する沿岸地域における洪積世及び現代の物質の変位は主として曲動と傾斜によるものであり、San Andreas 破砕帯に沿う広い範囲の移動に応じて、圧縮力は相当弱ってきていることがわかっていく。破砕帯の東側の Coast Range を特徴づける普通程度の地震は、このことに対応するものである。しかしながら、オーバンに影響するこの地域で、もう強い地震が起らないということは云い過ぎであり、San Andreas 破砕系で相当強い地震が起ることが十分想像されるというのが我々の意見である。したがって、San Andreas 破砕系に関連する地質構造域では仮定地震の大きさを $M = 8.5$ とした。

参 考 文 献

- a. Bateman, P. C. and Wahrhaftig, C., "Geology of Sierra Nevada," Geology of Northern California, Bulletin 190, California Division of Mines and Geology, 1966, pp 144-149
- b. Bolt, B. A. and Miller, R. D., "Seismicity of Northern and Central California, 1965-1969," Bulletin Seism. Society of America, Vol. 61, 1971, pp 1831-1847
- c1. Bonilla, M. G., "Surface Faulting and Related Effects," Earthquake Engineering, Wiegel, R. L., Editor, 1966, pp 47-74
- c2. Bonilla, M. G., Historic Surface Faulting in Continental U. S. and Adjacent Parts of Mexico, 36 pp (A contribution of the National Center for Earthquake Research, U.S.G.S.), 1967
- c3. Bonilla, M. G., verbal communication, 1/1972
- d. Burnett, J. L., "Geology of the Lake Tahoe Basin," Annual Field Trip Guidebook of the Geological Society of Sacramento, 1968, pp 1-26 and map
- e. Brown, R. D. and Lee, W. D. K., Active Faults and Preliminary Earthquake Epicenters (1969-1970) in the Southern Parts of San Francisco Bay Region, Map MF-307 with text, 1971
- f1. California Department of Water Resources, Crustal Strain and Fault Movement Investigations - Faults and Earthquake Epicenters in California, Bulletin No. 116-2, 1964
- f2. California Department of Water Resources, "Eastern California Earthquake of September 12, 1966," Earthquake Engineering Memorandum No. 43, 1967
- g. Cloud, W. K. and von Hake, C., U.S. Earthquakes 1966, Annual Report of Environmental Science Services Administration, Department of Commerce, 1968, pp-51-58
- h. Durrell, C., "Tertiary and Quaternary Geology of the Northern Sierra Nevada," Geology of Northern California, Bulletin 190, California Division of Mines and Geology, 1966, pp 193-195
- i. Eaton, J. P., verbal communication, 1/1972

- j. Gumper, F. J. and Scholz, C., "Microseismicity and Tectonics of Nevada Seismic Zone," Bulletin Seism. Society of America, Vol. 61, 1971, pp 1413-1432
- k1. Greensfelder, R. W., "Aftershocks of Truckee, California Earthquake of September 12, 1968," Bulletin Seism. Society of America, Vol. 56, 1966, pp 1607-1620
- k2. Greensfelder, R. W., "Preliminary Map of Maximum Expectable Earthquake Damage in California," with remarks on preparation and intended use, unpublished advance information, California Division of Mines and Geology, 1/1972
- l. Jennings, C. and Aune, Q., written and verbal communication, 1/1972
- m. Kachadoorian, R., Yerkes, R. F., and Waananan, A., "Effects of the Truckee, California, Earthquake of September 12, 1966," Circular 537, Department of Interior, Geological Survey, 1967
- n. Lawson, Andrew C., "The Recent Fault Scarps at Genoa," Bulletin Seism. Society of America, 1912, pp 193-200
- o. Moore, J. C., "Geology and Mineral Deposits of Lyon, Douglas, and Ormsby Counties, Nevada," Nevada Bureau of Mines, Geological Map Plate 1, Bulletin 75, 1969, pp 16-17
- p. Niazi, M., "Seismicity of Northern California and Western Nevada," Bulletin Seism. Society of America, Vol. 54, 1964, pp 845-850
- q. Oakeschott, G. B., Greensfelder, R. W., and Kahle, J. E., "One Hundred Years Later," California Geology, Vol. 25, No. 3 (p. 60, Isoseismal Map of Owens Valley Earthquake of 1872, compiled by R. W. Greensfelder), 1972, pp 55-61
- r1. Ryall, A. D., Slemmons, D. B., and Gedney, L., "Seismicity Tectonism, and Surface Faulting in the Western U.S. during Historic Time," Bulletin Seism. Society of America, Vol. 56, pp 1105-1135
- r2. Ryall A. D., verbal communication, 1/1972
- r3. Ryall, A. D., Van Wormer, J. D., and Jones, A. E., "Triggering of Microearthquakes by Earth Tides and Other Features of the Truckee, California, Earthquake Sequence of September, 1966," Bulletin Seism. Society of America, Vol. 58, No. 1, February 1968, pp 215, 248

- s. Scholz, C. H., Barazangi, M., and Sbar, M. L., "Late Cenozoic Evolution of the Great Basin, Western United States as an Ensisalic Inter-arc Basin," *Bulletin Geol. Society of America*, 1971, pp 2979-2990
- t1. Slemmons, D. B. "Pliocene and Quaternary Crustal Movements of the Basin and Range Province, U.S.A.," *Journal of Geosciences*, Osaka City University, Vol. 10, 1967, pp 91-103, (11th Pacific Science Congress, 1966, Tokyo)
- t2. Slemmons, D. B., "Map of Owens Valley between Olancha and Big Pine, Showing Faults Activated During 1872 Earthquake," *California Geology*, Vol. 25, No. 3, March 1972, pp 52-53
- t3. Slemmons, D. B., verbal communication, 1/72
- t4. Slemmons, D. B., et al., "Earthquake Epicenter Map of Nevada," Nevada Bureau of Mines, Map 29, University of Nevada, 1965
- t5. Slemmons, D. B., Jones, A. E., and Gimleth, J. I., "Catalog of Nevada Earthquakes, 1852-1960," *Bulletin Seism. Society of America*, Vol. 55, 1965, pp 537-583
- u. University of Nevada, *Bulletins of Seismological Laboratory* for the period October 24, 1969, to March 31, 1970, April 1 to June 30, 1970; July 1 to September 30, 1970; October 1 to December 13, 1970
- v. Wallace, R. E., "Earthquake Recurrence Intervals in the San Andreas Fault," *Bulletin Geol. Society of America*, Vol. 81, 1970, pp 2875-2890
- w. Wolfe, J. E., "Earthquake History near Lake Tahoe," *Annual Field Trip Guidebook of the Geological Society of Sacramento*, 1968, pp 27-36

第4章 オーバンサイト—地盤挙動の予測

オーバン地区及びその周辺地域の地震学および地質学の相互的な研究に基づいて、オーバンサイトに3つの最大可能地震を定めた。これらの地震の大きさと震央距離はつぎの通りである。

1. マグニチュード 5.5 15 マイル
2. マグニチュード 8 50 マイル
3. マグニチュード 8.5 100 マイル

図 2.1 に示したフローチャートにあるように、これらの地震はそれから生じる地盤振動を計算するのに用いた。地盤振動はスペクトル、最大加速度、持続時間によって考える。これらの事項は時系列解析での加速度図の選択及び修正のための指標として用いる。

これらの地震の応答スペクトルは、付録 D で述べられているように Spectra Scaling (Housner), Newmark, Environmental Research Corporation の方法を用いて作成する。各方法によって作成した包絡スペクトルは十分納得のいくものである。図 4.4 に示すように設計スペクトルは3つの方法の合成によって作成した。

上記の各地震の最大地盤加速度は付録 C で述べている Seed, Newmark, Blume, Wiggins の方法を用いて計算した。時系列研究のための加速度図記録の選択および調整の指標として用いる妥当な値として、最大加速度は 0.12 g と決定した。

非弾性的挙動を示す構造物あるいは振動の持続に対して敏感な構造物の設計に用いるために振動の持続時間を計算した。付録 F で示す Housner によるデータによると強い振動は凡そ 20~35 秒続くことを示している。

4.1 応答スペクトル

a. Spectra Scaling Method

付録 D に述べられているように、応答スペクトルはマグニチュードと震央距離によって Housner の平均スペクトルを目盛ることによって得ることができる。震央距離 15 マイルの M=5.5 の地震についてのスケールファクターを定めるために類似の大きさ、震央距離の 5 つの地震を選択した。それらはゼロパーセント減衰におけるスペクトル強度に従って表 4.1 に示されている。(SI₀)

表 4.1 スケールファクターの選択に用いた地震 (15 マイル地震でのマグニチュード 5.5)

地 震 名	マグニチュード	震央距離(マイル)	SI ₀
Vernon 10-2-33	5.3	17	1.65
Hollister 3-9-49	5.3	10	2.44
Hollister 3-9-49	5.3	10	2.29
Santa Barbara 6-30-41	5.9	15	3.15
San Francisco, Golden Gate 3-22-57	5.3	8	1.04
Average	5.4	12	2.1

表4.2 オーバンサイト応答スペクトル (2%減衰)
(スペクトルスケール方法)

周 期 (sec)	M = 5.5	D = 15 mi	n = 8.0	D = 50 mi	n = 3.5	M = 8.5	D = 100 mi	n = 4.0
	S _a (ft/sec ²)	*S _v (in/sec)	減衰係数 (percent)	S _a (ft/sec ²)	*S _v (in/sec)	減衰係数 (percent)	S _a (ft/sec ²)	*S _v (in/sec)
0.1	6.0	1.5	15	3.2	0.8	2	0.5	0.1
0.2	8.5	3.6	25	7.5	3.2	7	2.4	1.0
0.3	9.0	5.4	31	9.8	5.9	12	4.3	2.6
0.4	8.6	6.7	36	10.8	8.4	16	5.5	4.3
0.5	7.8	7.4	41	11.2	10.6	20	6.1	5.8
0.6	7.0	8.0	44	10.8	12.3	22	6.2	7.0
0.8	5.5	8.7	48	9.2	14.6	26	5.9	9.4
1.0	4.6	9.0	50	8.1	15.8	28	5.2	10.1
1.2	3.9	9.2	52	7.1	16.7	30	4.7	11.0
1.6	3.0	9.5	53	5.6	17.7	32	3.8	12.1
2.0	2.4	9.9	54	4.5	18.7	34	3.3	13.5
2.5	2.0	10.1	55	3.9	19.5	36	2.8	14.5

M: マグニチュード
D: 震央距離 (マイル)
n: スケールファクター
S_a: 加速度
S_v: 速度

* 図4.1の曲線はスペクトル速度値を用いてプロットされている。図4.1の加速度値は $\frac{2\pi}{T} \cdot \frac{S_v}{32.2}$ と同じである。これらの加速度は、周期が0.3秒以下については上記の表の値よりも若干大きい。上記の表の値はHousnerの加速度スペクトルから計算したものである。

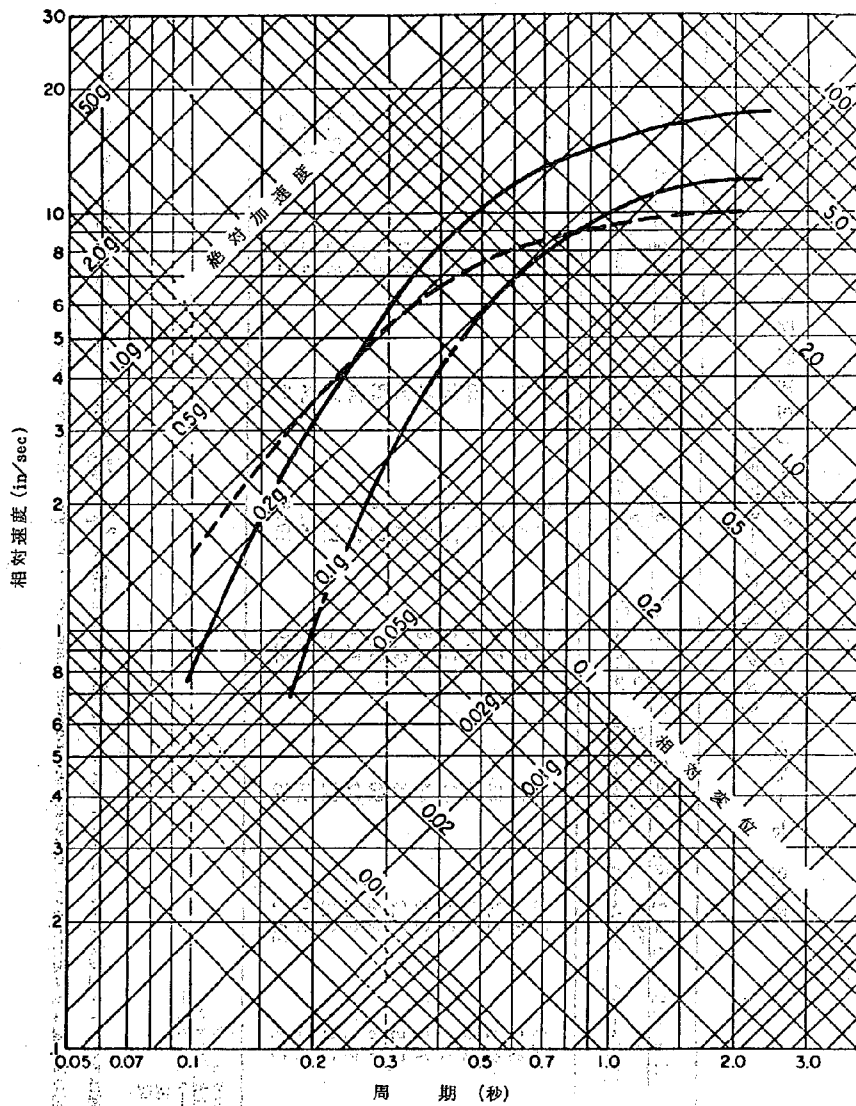


図4.1 スペクトルスケール方法 (Housner)
(2% 減衰)

- 15マイル地点でのマグニチュード 5.5
- 50マイル地点でのマグニチュード 8.0
- · - · - 100マイル地点でのマグニチュード 8.5

これらの記録の平均はだいたいオーバンスイトに最も近い震央距離とその大きさを示している。付録Dからの常数3.1で割ったゼロパーセント減衰における平均スペクトル強度は拡大率0.7を示している。この値は付録Dの図D.7の直線のやや下である。

マグニチュード8あるいはそれ以上の地震に関して利用できる記録が無いから、2つのより大きい地震については同じ手法を使うことはできない。しかしながら、California Department of Water Resources (CDWR) の Consulting Board は "San Andreas 断層上の大地震に対しては"スケールファクターとして4を用いることを勧告している。このファクターも又、付録Dの図-D.7にプロットされている。したがって、Housnerのスペクトルに関するスケールファクターは付録Dの図D.7の直線から選択した。それらの値はマグニチュード5.5, 8.0, 8.5 に対してそれぞれ1.0, 3.5, 4.0である。

Housnerの曲線は平均震央距離30マイルの地震から決められており、そのため距離と周期に応じて小さくすることに決定した。Benioff, Gutenberg-Richter, Blume, Cloud (付録G.)の減少係数は用いることができた。図-G.2にあるように、周期に対応した減少の変動を考慮に入れることができる有利性があるので、Benioffの係数を用いた。小さな地震に対しては減少に関する係数は用いなかった。一方、減少に関する係数は、周期がそれぞれ0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.6, 2.0, 2.5秒の震央距離が12マイルから50マイル、12マイルから100マイルを基礎としている。スケールファクター方法によって、減少値 Housnerのなめらかな加速度及び速度スペクトルについて、3つの応答スペクトルの値を計算し、表4.2に掲げている。制御速度値は図4.1にプロットしている。

震央距離50マイル、マグニチュード8.0の地震は0.1秒および0.2秒の期間を除いて総ての期間で最大の応答になっている。0.1秒および0.2秒の周期では小地震の値が大きくなっている。これは、高い振動数が、低い振動数よりも高い率で減少するということで、ありそうに思えることである。

b. New Mark の方法

この方法によってスペクトルを作成する場合、まず最初に必要なことは付録Cで述べられているNewmark式を用いた地震加速度、速度、変位の最大値を計算することである。これらの式を用いて、各地震について計算した最大値は表4.3に示される。

表4.3 オーバンスイト応答スペクトル(2%減衰) (Newmarkの方法)

マグニチュード	震央距離		加速度 "g"		速度 (in/sec)		変位 (in.)	
	マイル	km	a	Sa	v	Sv	d	Sd
5.5	15	24	0.035	0.15	3.75	10.5	56.0	101
8.0	50	80	0.067	0.29	6.93	19.4	55.3	99
8.5	100	160	0.033	0.14	4.01	11.2	25.5	46

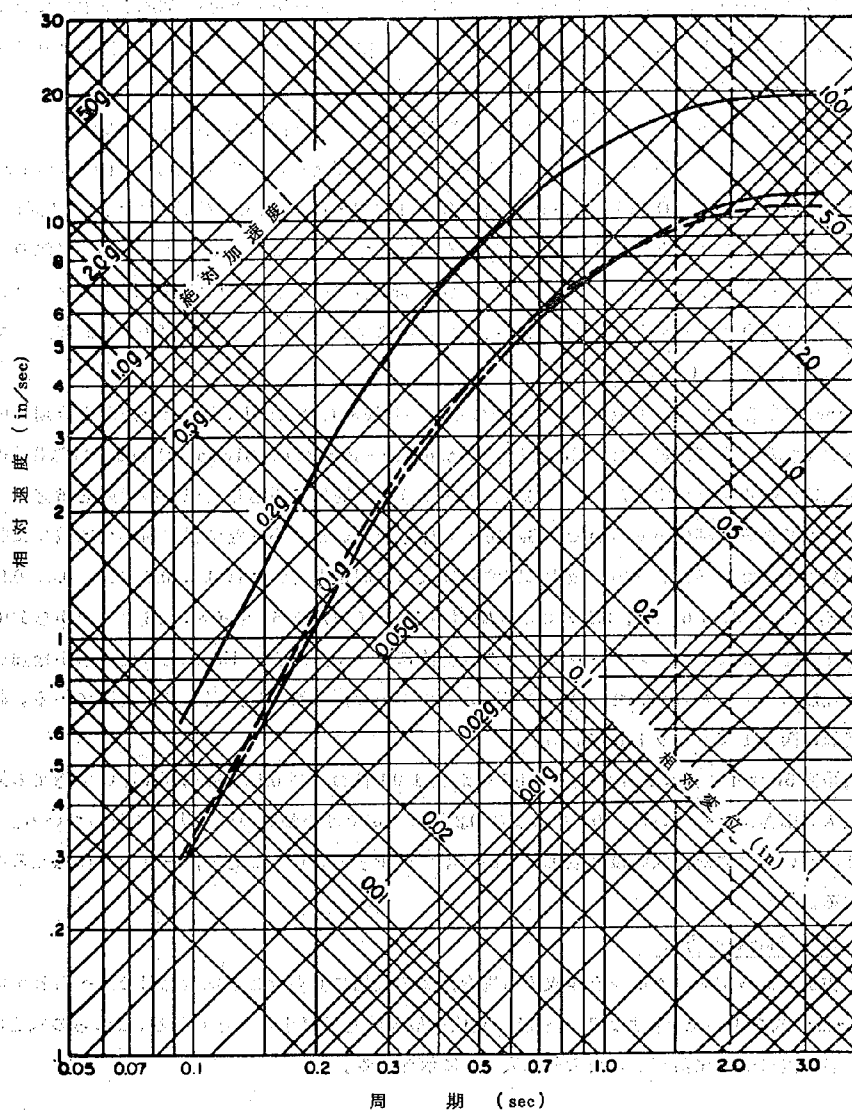


図4.2 Newmarkの方法(2%減衰)
(2%減衰)

- 15マイル地点でのマグニチュード5.5
- 50マイル地点でのマグニチュード8.0
- 100マイル地点でのマグニチュード8.5

最大地盤振動値 (a, v, d) に各々 4.3, 2.8, 1.8 を掛けたときに, 2% の限界減衰の場合にスペクトル値 (Sa, Sv, Sd) の上限値を与える。(付録 D) 最大スペクトル値 0.29 g, 19.4 in/sec, 101 インチが生じ, 表 4.3 に示される。最終応答スペクトルは図-4.2 に示される。

c. Environmental Research Corporation の方法

Environmental Research Corporation (ERC) の式は各地震についてのスペクトルを与える。(付録 D)。各スペクトル上の 3 点のみが使用できる (0.203, 0.499, 1.004 の周期)。しかしながら, 各地震の全スペクトルは ERC とのコンサルタントサービス契約を通じて得ることができる。又, 式の検証業務も含めることができる。ERC から得た式は 5% の限界減衰であった。計算された値は 2% の限界減衰を基礎とした平均疑似相対速度 (PSRV) を得るために修正した。その結果は表 4.4 に示される。

表 4.4 オーバースイト応答スペクトル (減衰 2%)
(ERC の方法)
疑似相対速度 (in/sec)

マグニチュード M	震 央 距 離		周 期 (秒)		
	マイル	km	1.004	0.499	0.203
5.5	15	24	3.66	4.06	2.71
8.0	50	80	19.25	12.08	3.30
8.5	100	160	20.92	10.39	2.24

これらの周期の中では大きな地震は最も低い振動数 (最大の周期) で支配し, 比較的高い振動数における動きは, マグニチュード 8 の地震によって支配される。図 4.3 は, PSRV 応答スペクトルの計算結果を示し, それはよくある周期の中ではなめらかな曲線と見なされる。

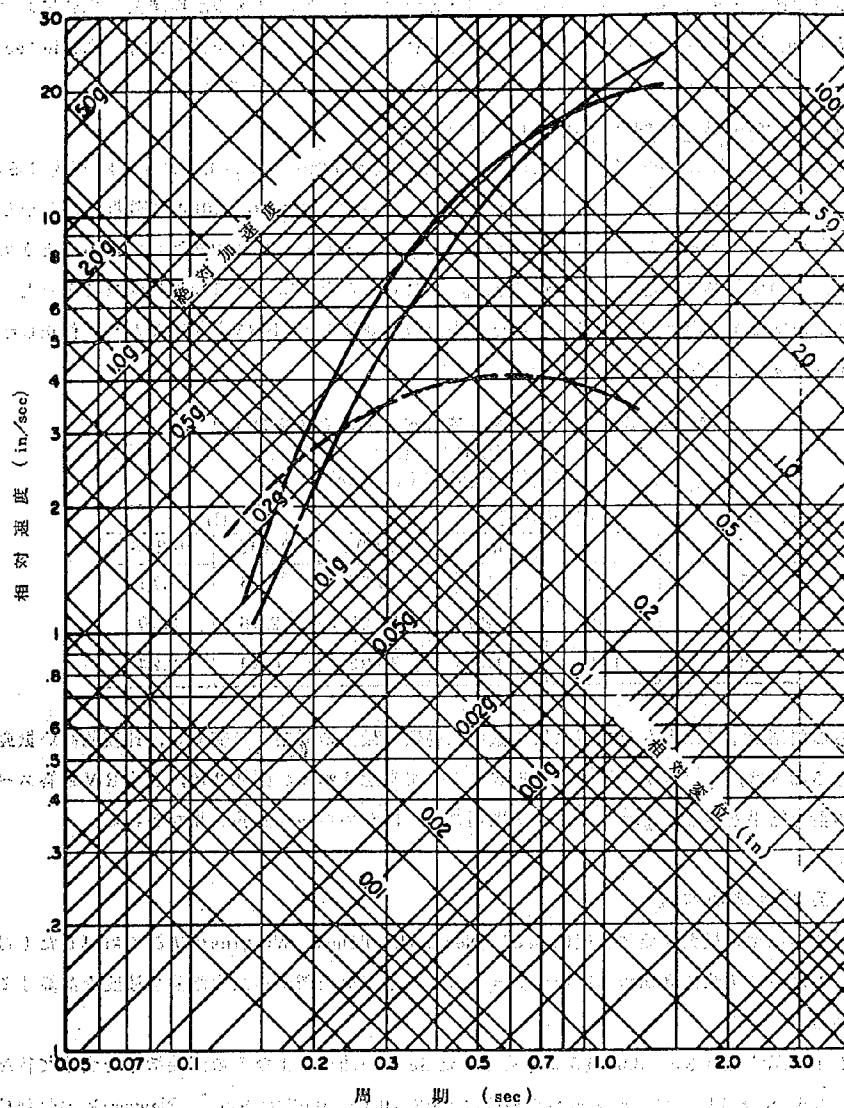
4.2 最大地盤加速度

各地震についての最大地盤加速度は Seed, Newmark, Blume, Wiggins の方法で計算した (付録 C)。これらの方法は既知の地震のマグニチュードと震央距離から最大地盤加速度を計算するものである。

図-C1 に示す M=8.5, 8.0, 5.5 を外そうした Seed の曲線およびその直接指導を受けて行なうと M=5.5, 8, 8.5 に対する最大地盤加速度は 0.06, 0.15, 0.07 である。* Newmark の付録 C にある地盤加速度に関する式を用いると, それぞれ 0.03, 0.07, 0.03 となる。

ふたつの方法は密度及びせん断波の速さを考慮した基礎の性状の影響を入れる試みがなされて

* 4.2 に関連して, アメリカ西部における地震時の岩盤加速度に関する最近 (1972) の研究のいくつかが述べられている。付録 C の図-C1.a はいろいろなマグニチュード, 原因となる断層からの距離による最大加速度を示している。



いる。

付録Cで述べられているBlumeの方法はオープンサイトのデータとしてつぎのようなことを必要とする。

1. 岩盤の密度 ($P=3.0$)

2. 岩盤のせん波の速度 ($V_s=10,000\text{fps}$)

これらのデータを基にして、マグニチュードと距離の組合せで各々の最大加速度は0.01, 0.02, 0.006 g である。Wigginsは、地震によって開放される総運動エネルギーであるインピーダンス $V_s\rho$ および震源距離をパラメーターとして含む加速度を得る関係式を発表している。オープンサイトにおけるこれらのパラメーターからの最大加速度は、図-C.3から求め、マグニチュード5.5, 8, 8.5に対してそれぞれ0.015, 0.03, 0.015 g であった。

SeedおよびNewmarkの方法による最大加速度はBlumeおよびWigginsによるものより高い。マグニチュードと加速度の関係を示す付録Bによると、0.05 g の加速度は震度VIと対応する。震度VIIおよびVIIIの振動は最大可能地震から起るものと思われる。約0.12 g の最大加速度はSeedとNewmarkの方法および震度と加速度の関係から選ばれたものである。

4.3 強振動の持続

地震の際の強い振動の持続は地震の大きさ(マグニチュード)に関連する。このことはよく知られたことであり、付録Fの図F.3に示されている。各地震のマグニチュードに応じてそれぞれの地震についてオープンにおける振動の減衰が生ずると考えてよい。図F.3からマグニチュード8の地震で生ずる強い振動は少なくとも20秒持続し、最大35秒持続することがわかる。

4.4 オープンサイトへの提言

前述の解析方法に基づきオープンサイトの設計スペクトルと最大加速度が提言される。図4.1, 4.2, 4.3で示されるSpectra Scaling (Housner), Newmark, ERC 曲線から得た複合曲線である。

提言された最大加速度は約0.12 g である。この値は構造物応答の時系列研究で使用する加速度図を選択し、調整するための指標として用いられる。

実際の、あるいは合成加速度図は最大加速度近辺の値に基づいてスケールを合わせることができる。しかしながら、解析のための加速度図を用いる前に、記録が相応のスペクトル値を示しているかどうかを確認するために、記録のための応答スペクトルを提言された設計スペクトルと比較する必要がある。このことは自然周期の構造物が設計される地域では、とくに必要である。オープンサイトにおける設計では少なくとも3つの適切な加速度図を地盤振動として用いる必要がある。

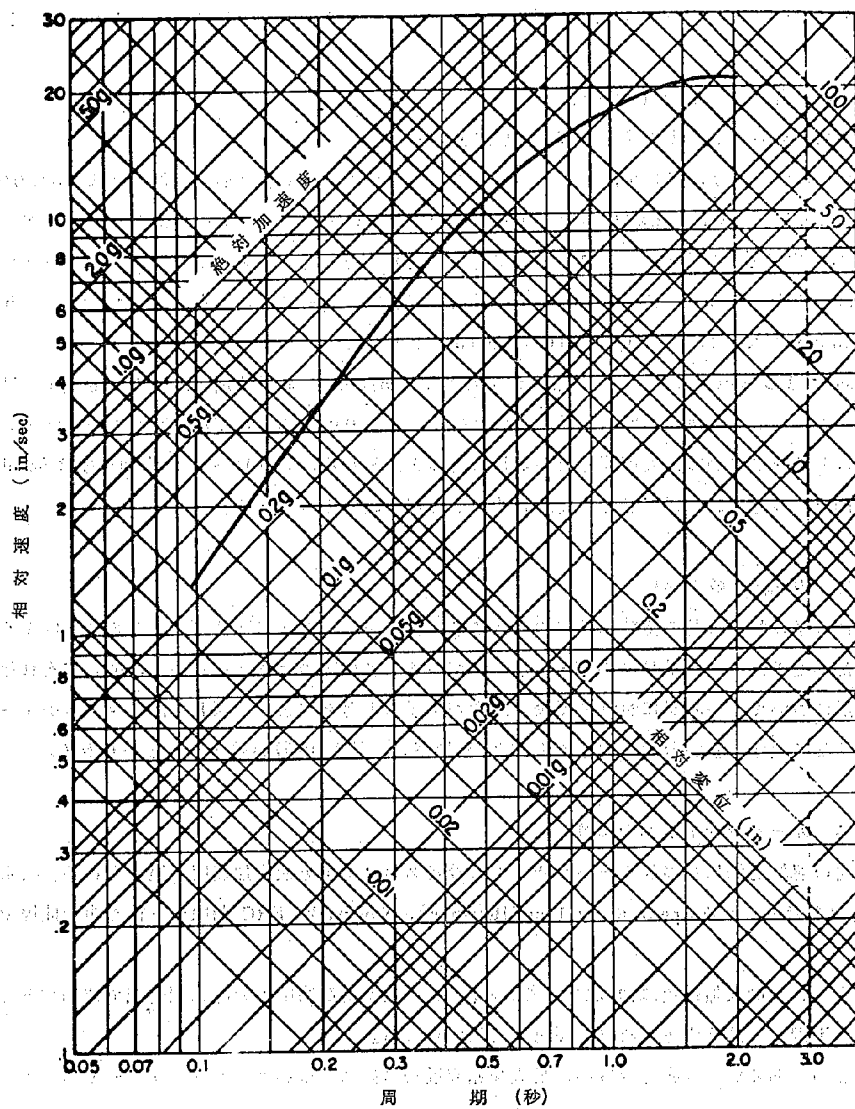


図4.4 オープンサイトに提言された設計スペクトル
(2 % 減衰)

参 考 文 献

1. Albee, Arden L., and Smith, Jay L., "Earthquake Characteristics and Fault Activity in Southern California," Special Publication of the Association of Engineering Geologists, Engineering Geology in Southern California, October 1966, pp 9-33
2. Alford, J. L., Housner, G. W., and Martel, R. R., "Spectrum Analysis of Strong Motion Earthquakes," First Technical Report under Office of Naval Research, Contract No. NONGV-244, Task Order 25, Project Designation NR-081-095, California Institute of Technology, Pasadena, California, August 1951
3. Algermissen, S. T., "Seismic Risk Studies in the United States," Proceedings, Fourth World Conference on Earthquake Engineering, Santiago, Chile, Vol. I, 1969
4. Ambroseys, N. N., and Sarma, S. K., "The Response of Earth Dams to strong Earthquakes," Geotechnique, Vol. XVII, No. 3, September 1967, pp 181-213
5. Atomic Energy Commission, "Nuclear Power Plants, Seismic and Geologic Siting Criteria," AEC Regulations 10CFR, Part 100, 1971 (EERC Lib. No. 115.032)
6. Barosh, P. J., "Use of Seismic Intensity Data to Predict the Effects of Earthquakes and Underground Nuclear Explosions in Various Geologic Settings," Department of Interior, Geological Survey, Bulletin 1279, 1969 (EERC Lib. No. QL 75.058b)
7. Benioff, Hugo, Unpublished Report to A. R. Golze, Chief Engineer, Department of Water Resources, Sacramento, California, by Department of Water Resources Consulting Board for Earthquake Analysis, November 1962
8. Blume, John A. and Associates, "Engineering for Nuclear Reactor Facilities," 1971, (EERC Lib. No. TH4581.B658)
9. Blume, J. A., Newmark, N. M., and Corning, L. H., "Design of Multistory Reinforced Concrete Buildings for Earthquake Motions," Portland Cement Association, Chicago, Illinois, 1961 (EERC Lib. No. TH 1095.B658)
10. Blume, J., "Earthquake Ground Motion and Engineering Procedures for Important Installations near Active Faults," Proceedings, Third World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, Vol. III, 1965

11. Bonilla, M. G., and Buchanan, J., "Interim Report on Worldwide Historic Surface Faulting," Department of Interior, Geological Survey, 1970
12. Bonilla, M. G., "Historic Surface Faulting in Continental United States and Adjacent Parts of Mexico," Department of Interior, Geological Survey, 1967
13. Campbell, R. B., and Dodd, J. S., "Estimated Rock Stresses at Morrow Point Underground Powerplant from Earthquake and Underground Nuclear Blasts," Paper presented at Ninth Symposium on Rock Mechanics, Golden, Colorado, April 17-19, 1967
14. Cloud, W. K., and Perez, V., "Strong Motion Records and Accelerations," Proceedings, Fourth World Conference on Earthquake Engineering, Santiago, Chile, Vol. I, 1969
15. Evernden, J. F., "Study of Regional Seismicity and Associated Problems," Bulletin Seism. Society of America, Vol. 60, No. 2, April 1970, pp 393-446
16. Figueroa, J. J., "Some Considerations about the Effect of Mexican Earthquakes," Proceedings, Second World Conference on Earthquake Engineering, Japan, Vol. III, 1960
17. Greensfelder, R., Preliminary Map of Expectable Damage in California, with Remarks on Preparation and Intended Use (Unpublished), California Division of Mines and Geology, 1971
18. Gumeny, D. B., "Earthquake and Earthquake-Resistant Design," American Civil Engineering Practice (Edited by R. W. Abbett), Vol. III, J. Wiley and Sons, Chapter 34, 1957
19. Gutenberg, B., "Effects of Ground Shaking in Earthquakes," Transactions, American Geophysical Union, Vol. 37, No. 6, December 1956
20. Gutenberg, B., "Effects of Ground on Earthquake Motion," Bulletin Seism. Society of America, Vol. 47, No. 3, July 1957
21. Gutenberg, B., and Richter, C. F., "Earthquake Magnitude, Intensity, Energy and Acceleration," Bulletin Seism. Society of America, Vol. 32, No. 3, April 1942, pp 163-191
22. Gutenberg, B., and Richter, C. F., "Earthquake Magnitude, Intensity, Energy and Acceleration" (Second Paper), Bulletin Seism. Society of America, Vol. 46, No. 2, April 1956

23. Hansen, Robert, "Seismic Design for Nuclear Power Plants,"
M.I.T. Press, 1970 (E&RC Lib. No. TH 4581.S462)
24. Hershberger, John, "A Comparison of Earthquake Acceleration with
Intensity Ratings," Bulletin Seism. Society of America, Vol. 46,
No. 4, October 1956, pp 317-320
25. Housner, G. W., "Engineering Estimates of Ground Shaking and
Maximum Earthquake Magnitude," Proceedings, Fourth World
Conference on Earthquake Engineering, Santiago, Chile, Vol. I,
1969
26. Housner, G. W., "Intensity of Earthquake Ground Shaking near
the Causative Fault," Proceedings, Third World Conference
on Earthquake Engineering, New Zealand, Vol. I, 1965
27. Housner, G. W., "Spectrum Intensities of Strong-Motion
Earthquakes," Proceedings of Symposium - Earthquake and Blast
Effects on Structures, Earthquake Engineering Research Institute,
University of California, Los Angeles, California, June 1952
28. Hudson, D. E., Brady, A. G., and Trifunac, M. D., "Strong
Motion Earthquake Accelerogram, Digitized and Plotted Data,
Vol. 1, Parts A, B, and C," Earthquake Engineering Research
Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena,
California, July 1969
29. Hudson, D. E., "Strong Motion Instrumental Data on the
San Fernando Earthquake of February 9, 1971," Earthquake
Engineering Research Laboratory, California Institute of
Technology, Pasadena, California, September 1971
30. Jennings, P. C., Housner, G. W., and Tsai, N. C., "Simulated
Earthquake Motions," Earthquake Engineering Research Laboratory,
California Institute of Technology, Pasadena, California,
April 1968
31. Kishimoto, Yoshimichi, "Investigation on the Origin Mechanism of
Earthquakes by the Fourier Analysis of Seismic Body Waves,"
Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University,
Kyoto, Japan, Bulletin No. 67, March 1964
32. Martel, R. R., "Effect of Foundation on Earthquake Motion,"
Civil Engineering, Vol. 10, No. 1, January 1940

33. Neumann, Frank, "Some Generalized Concepts of Earthquake Motion,"
Proceedings of Symposium - Earthquake and Blast Effects on
Structures, Earthquake Engineering Research Institute, University
of California, Los Angeles, California, June 1952
34. Newmark, N. M., and Rosenblueth, E., "Fundamentals of Earthquake
Engineering," Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New
Jersey, 1971 (E&RC Lib. No. TA654.6.N556)
35. Richter, C. F., "Elementary Seismology," W. H. Freeman and Co.,
San Francisco, California, 1958 (E&RC Lib. No. OE 534.R535)
36. Seed, H. Bolton, and Idriss, I. M., "Rock Motion Accelerograms for
High Magnitude Earthquakes," Earthquake Engineering Research Center,
Berkeley, California, Report EERC-69-7, April 1969
37. Seed, H. Bolton, Idriss, I. M., and Kiefer, Fred W., "Characteristics
of Rock Motions During Earthquakes," Journal of the Soil
Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 95, No. SM5,
September 1969, pp 1199-1218
38. Tocher, Don, "Earthquake Energy and Ground Breakage," Bulletin
Seism. Society of America, Vol. 48, April 1958,
pp 147-153
39. U.S. Department of Commerce, Earthquake History of the United
States, Part I, Exclusive of California and Western Nevada;
Part II, Stronger Earthquakes of California and Western Nevada,
1966
40. Wiegel, R. L., "Earthquake Engineering," Prentice-Hall, Inc.,
Englewood Cliffs, New Jersey, 1970 (E&RC Lib. No. TH1095.W645)
41. Wiggins, John H., "Effect of Site Conditions on Earthquake
Intensity," Journal of the Structural Division, Vol. 90, No. ST2,
ASCE, 1964, pp 279-313
42. Schnabel, Per B. and Seed, H. Bolton, "Accelerations in Rock for
Earthquakes in the Western United States," Earthquake Engineering
Research Center, Report No. EERC-72-2, University of California,
Berkeley, California, August 1972

附 録

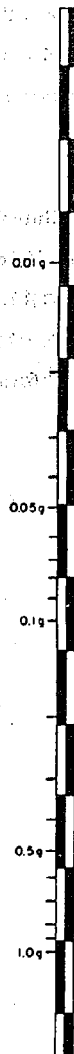
付録A 震度階および震央震度とマグニチュードの関係

図A.1は元のRossi - Forel 震度階と対比した修正Mercalli 震度階を示している。³⁵ また、Gumensky によって一般化された震度、マグニチュード、最大加速度の凡その関係もあらわしている。¹⁸ それらすべての情報を使用するに当っては、学識のある工学的判断に基づき行なう必要がある。

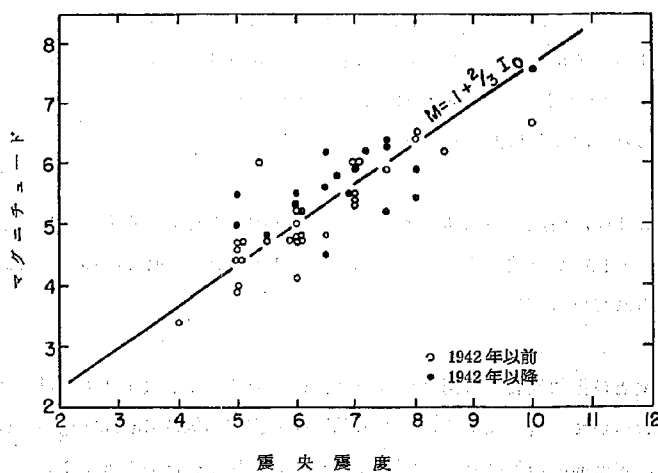
図A.2はGutenberg と Richterによって提案された震央震度(I_0)とマグニチュードとの関係式($M = 1 + \frac{1}{2} \log I_0$)の曲線を示す。それは、この式によるマグニチュードと震央震度との関係に関する凡その性質を示すデータのプロットでもある。同じ出版物での表20は“大都市中心部における通常な地盤状態”からのデータに基づく南カリフォルニアの地震に関する震央震度とマグニチュードの関係である。

Rossi - Forel 震度階 (1883)	修正 Mercalli 震度階 35
	I 感じない。大きな地震の離れた場所および長い時間経過後の影響。
I 継続ある観測者には感じられるゆれ。	II 静かにしている人、建物の上にいる人、あるいは野合に居た人に感じられる。
II いくつかの地震計用紙に記録され、静かにしている僅く少数の人に感じられる。	III 室内で感じる。ぶら下がっているものがゆれる。軽トラックが通過したごとくに振動する。持続時間がわかる。地震とわからないときがある。
III 休息している何人かの人には感じる。方向あるいは持続時間がわかる程に十分強い。	IV ぶらさがっているものがわかる。重量トラックが通過したように振動する。止っている自動車がゆれる。窓、皿、扉ががたがたする。コップが鳴る。戸の上の板では、木の隙や床がギーギーいう。
IV 動いている人に感じる。固定されていない物、ドア、窓ががたがたする。天井にわれ目が入る。	V 戸外で感じる。方向を計れる。寝ている人が目を覚ます。窓が揺らぐ。ドアが閉閉する。シャッターや絵が動く。振子時計が止まったり、動き出したり。振子のふれが変わったりする。
V 通常寝ての人が感じる。家具、ベッドが動いたりする。ベルが鳴り出したりする。	VI 起つての人に感じる。多くの人が驚き、戸外にかけ出す。しっかりと歩けない。窓、皿、ガラス食器がわかる。本が棚から落ちる。壁が揺らぐ。家具が移動したり転倒したりする。強いしっくいやアドビレンガにひびが入る。小さなベルが鳴る。
VI 固定されていないものが割れる。しっくい壁が落ちる。建物に大きな破壊はないがパニクが生ずる。	VII 立っているのが困難である。自動車を運転している人が揺る。しっくい、しっかりとしていないレンガ、タイル等が落ちる。石造建築にひびわれができる。池が溢れ、水が溢る。砂や砂利の堤防に少しのすべりや崩れが起る。大きな路がなる。コンクリート製の水利設備が破損する。
VII 煙突が倒れる。建物の壁にクラックが入る。	VIII 自動車の運転に影響が出る。石造建造物が損傷を受け、一部で崩壊する。煙突、記念碑、タンクが倒れたり傾いたりする。ボルト止めされていない特殊の家が移動する。枝が破折する。土倉や井戸に変化が起る。脆弱状態の地面や急斜面にクラックが入る。
VIII 建物の一部、又は全部が倒壊する。	K 通常パニクが生ずる。弱い石造建築は倒壊し、強い石造建築はかなりの破損を受ける。ボルト止めされていない枠組建築は基礎から離れる。枠組が切れそうになる。貯水池にかなりの破損が出る。灌漑管が破損する。地盤が地盤になる。砂や泥が噴出する。火山噴、火山砂が噴出する。
X 地層の隆起、くい違い等の大災害。地面のきれつ。岩石の落下。地すべり等。	X ほとんどの石造建築及び枠組建築が基礎から破壊する。泥土に甚大な損傷が出る。大きな地すべり。運河、川、湖等で水が溢れる。レーンがわずかに曲る。
	XI レーンがかなり曲る。灌漑管は完全に使いものにならない。
	XII ほとんど全面的に倒壊を受ける。大きな岩塊が移動する。規模及び水平移動が大きい。対象物が空中に投出される。

最大加速度 (g で表示)



図A.1 概略の関係；震度，加速度，マグニチュード



マグニチュード M と震央震度 I_0 との関係
(Gutenberg and Richter ²²)

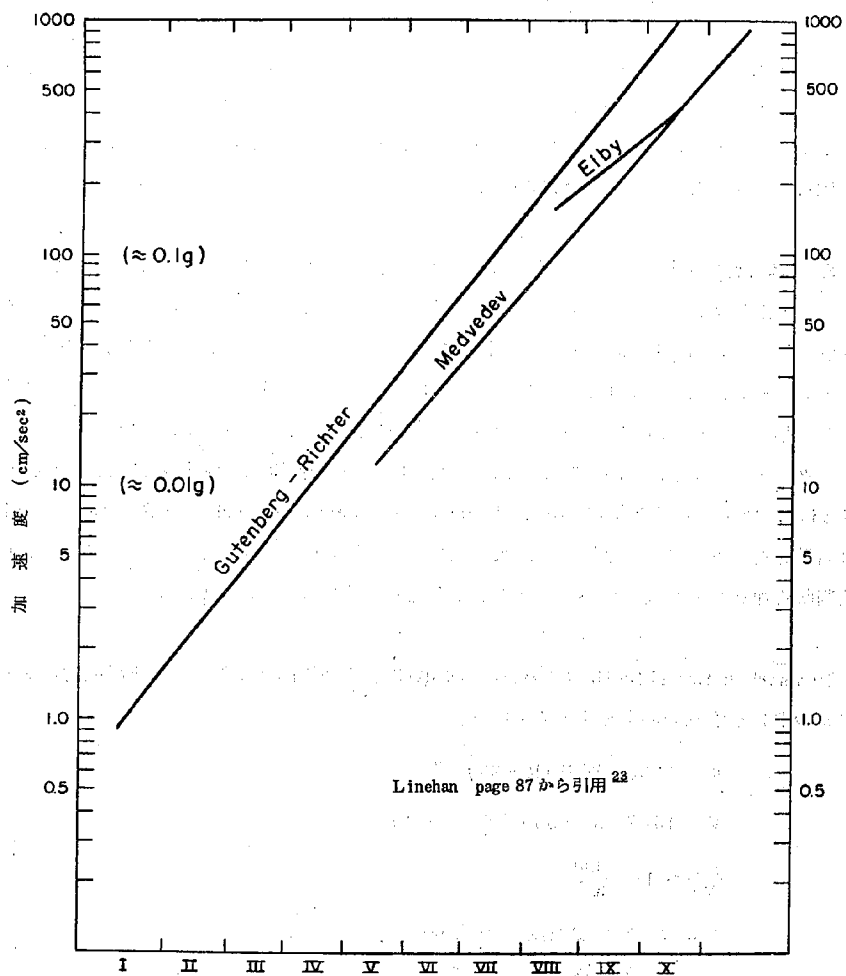
付録 B 震 度 と 加 速 度

主観的で、計器を使用しない、観察が主体となる方法である震度階は、最大加速度や、その他の地盤振動パラメーターを計算するために、この種の情報を量的なものとして使用するには相当な判断を必要とする。地盤振動の予測、とくに最大加速度パラメーターとして震度の使用の見直しは Barosh によってなされた。⁵ Barosh は、ロシア、日本、ニュージーランド、アメリカの地震学者が行なった業績の見直しを行った。

図 A.1 (付録 A) は、震度と最大加速度との間の一般的な関係をあらわしている。

図 B.1 は、3 つの提案した曲線を示している。アメリカでは、Gutenberg と Richter の曲線が最も広く用いられている。²²

Neuman は震度と最大加速度との関係について、被震期間および負荷と岩盤状態との関係において地盤の影響について調査している。³³ この加速度—震度曲線は Gutenberg—Richter 曲線によく似ているが、Neuman の調べたことは余り広く用いられていないようである。



震 度 と 加 速 度 と の 関 係

図B.1

付録 C マグニチュードと震央距離からの地盤振動の値

多くの研究者が、マグニチュードと震央距離がわかっている地震について、地盤の加速度、速度、変位を知るための方法を著している。^{8, 13, 18, 34, 37}

この付録では、それらのうち Seed, Newmark, Rosenblueih, Wiggins, Blume, Gutenberg と Richter の方法について簡潔にのべている。

Seed は岩盤中の振動に関する問題について研究し、図 C. 1 に示されているのに類似した最大地盤加速度とマグニチュードおよび震央距離との関係を出した。³⁷ Seed と直接会って検討した結果、図 C. 1 は Seed が最新に著した曲線を再評価し、外そうしたものである。曲線におけるマグニチュードの値は 1/2 だけ下げられている。即ち、著書での $M=7$ の曲線は、ここでは凡そ $M=6.5$ の曲線である。Seed は改訂された曲線はこの夏 (1972 年) 出る予定といている。^{*}

マグニチュード (5.5), (8.0), (8.5) の曲線は Seed の曲線から外そうして出したものである。Seed は、幾人かの研究者 (Estera-Rosenblueih, Kanai, Gutenberg-Richter, Benioff) の結果を重みを考慮して平均し、最大岩盤加速度の総合的平均値を定めるために、かなりの技術的判断を加味して集成している。幾人かの研究者の結果の比較は図 C. 2 に示される。

Newmark と Rosenblueih は Estera (1969) による理論的な波動の考慮と経験的なデータから得たつぎに示す式の使用をすすめている。

$$a = 1,230 \cdot e^{0.8M} (R + 25)^{-2}$$

$$V = 15 \cdot e^M (R + 0.17 \cdot e^{0.59M})^{-1.7}$$

$$\frac{ad}{V^2} = 1 + \frac{400}{R^{0.5}}$$

ここで a = 加速度 cm/sec^2

V = 速度 cm/sec

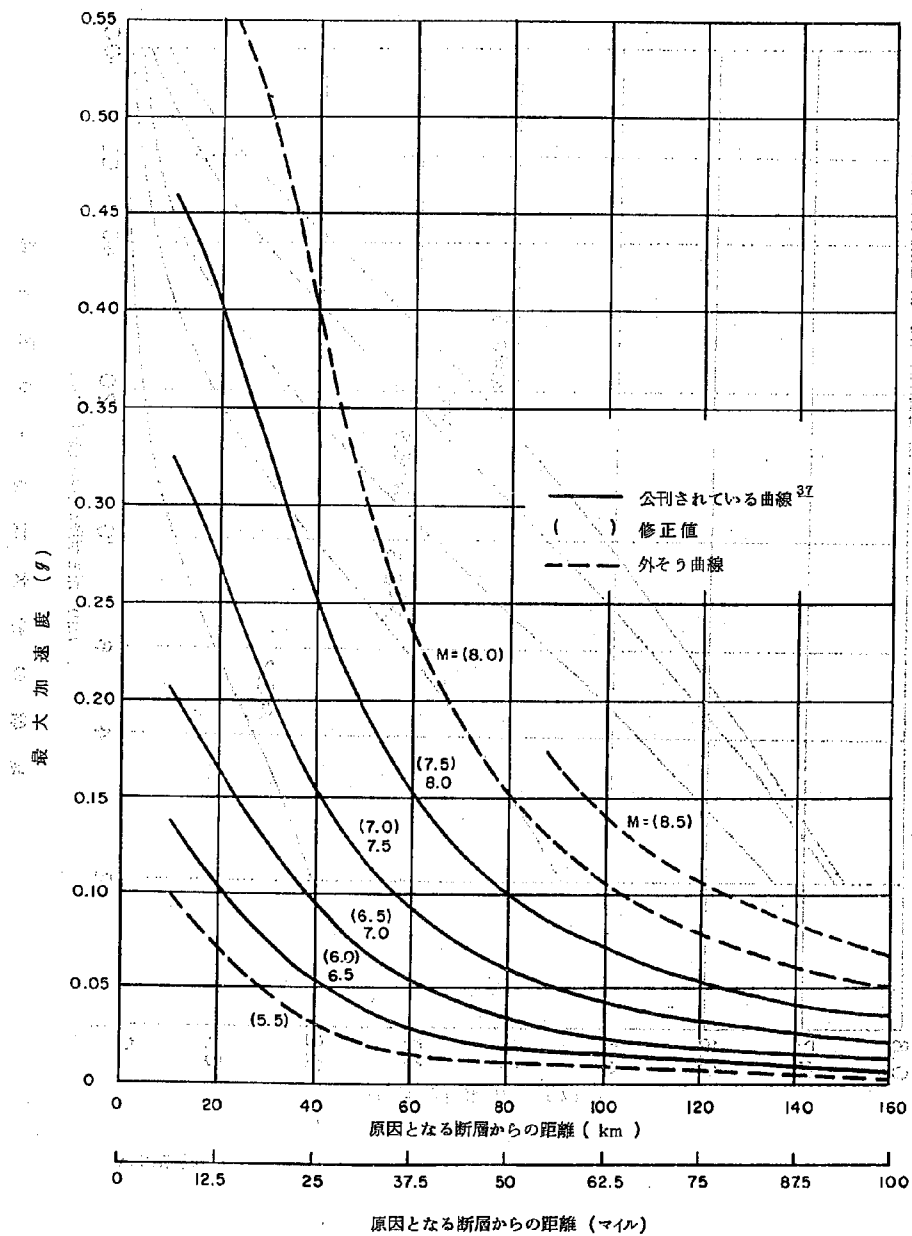
d = 変位 cm

M = マグニチュード

R = 震源距離 Km

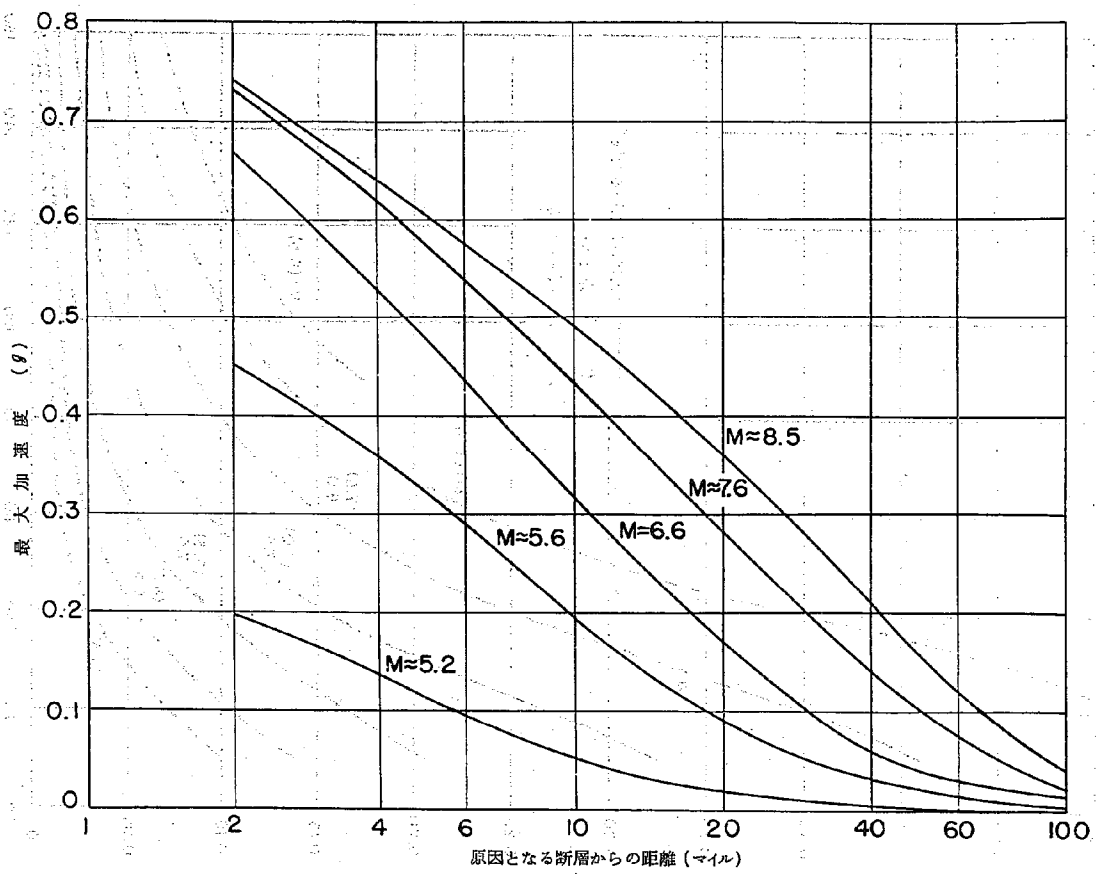
Wiggins の方法はつぎのことを基礎としている。(1) 100 以上の強い振動のあった加速度記録の研究および解釈と 5 % 限界減衰における疑似速度応答 (2) 他の研究者の報告とも総合して計算

^{*} EERC 72-2, 1972 年 8 月。⁴² 図 C. 1. 3 はこの報告書から再構成されたものである。

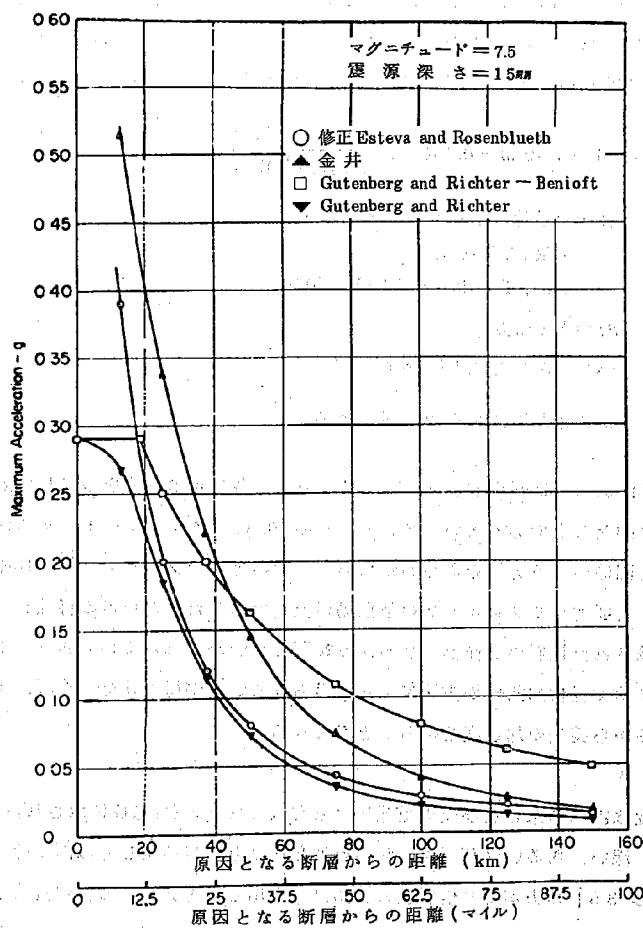


図C.1 マグニチュードおよび地震の原因となる断層からの距離と最大加速度の関係

図 C.1.a



岩盤の最大加速度の平均値



距離に応じて減衰する最大加速度に関する種々の提言³⁷

図C.2

した当該場所の物性の推定 (3)報告されている震央距離とマグニチュード, (4)一定あるいは線型変化の物性を持つ境界内弾性媒体に適用される波のセオリー (5)基礎の地震せん断波速度に対する密度の倍数として定義されるその位置のインピーダンスファクター。これらの研究によって、その位置における σ で表示される最大加速度 a はつぎのように導かれる。

$$a = (82.6 - 7.59 M - 0.036 R) \frac{1.14 \times 10^{-6} e^{1/3}}{(\rho_s V_s)^{1/2} R^{1.37}}$$

ここで E = 総運動エネルギー (エルグ)。

文献 22 に記載。

$$\log_{10} E = -9.4 + 2.14 M - 0.054 M^2$$

ρ_s = 土の密度

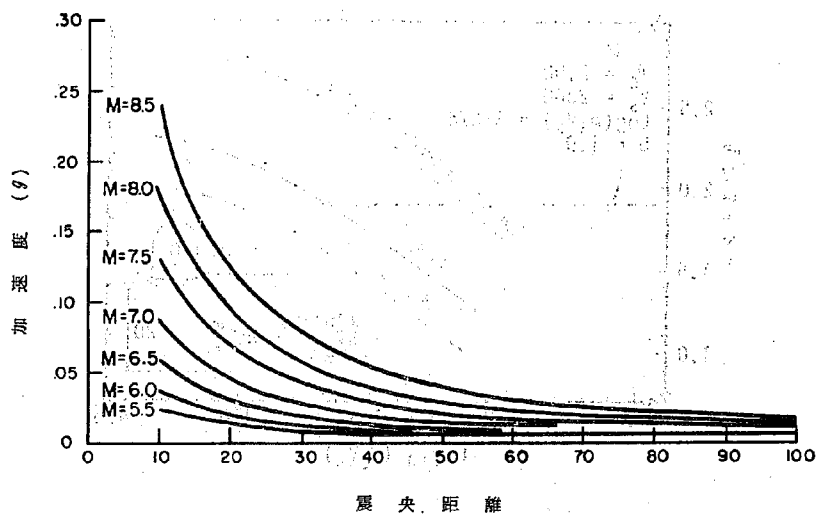
V_s = せん断速度 (ft/sec)

最大加速度を得るための曲線は図 C.3 に示される。

Blume は、一般的あるいは平均的データによるよりも、各地点の状態を基にして振動の特性を定めることが本質的なことであるといっている。その方法はマグニチュード、その地点の加速度、その地点の特性を関係づける方法をあらわしている。その地点のファクター $\bar{b}$ は Gutenberg-Richter データおよび南カリフォルニアの強振動研究所で出したその地点の特性を基にして最小平均、最大の記録された状態の無作為のひろがりに関して定められたものである。この方法によると $\bar{b}$ は図 C.4 に示す経験的曲線の方法によって得られる。 $\bar{b}$ が得られたならば、マグニチュードで以って図 C.5 から震央の加速度を得ることができる。

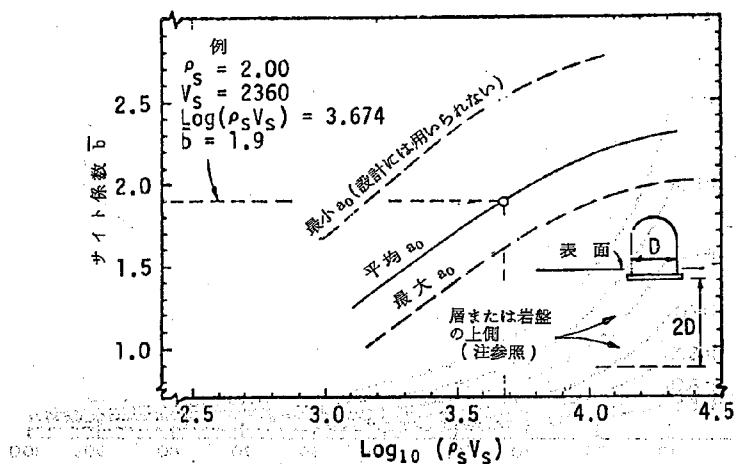
この震央加速度は震源の深さ及び震央距離によって減じられる (付録 G に示される)。Blume は、軟かい物質、深い、あるいは何層にもなった沖積層よりも岩盤もしくは固く締った物質 $\{\log_{10}(\rho_s V_s) \geq 3.5\}$ の方がより信頼性のある結果が出ると考えている。軟質な地盤の場合には、得られた加速度は見なおす必要があり、通常でない地盤状態の場合には修正することも必要であるといっている。

図 C.3 のように震央の加速度は震源の深さ及び震央距離によって減じられる。



マグニチュードおよび震央距離と加速度
(Wiggins の式による)

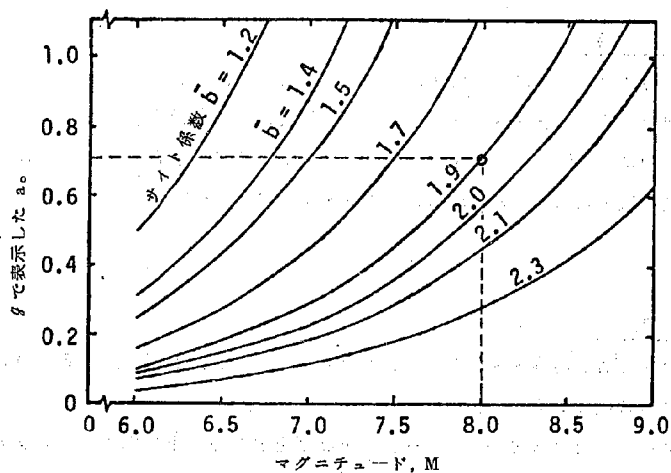
図C.3



注 ρ_s および V_s は上層、あるいは表面が岩の場合は岩の上の部分 (2D 前後) の平均値又は重みをつけた平均値。D から 2D までの値よりも D までの値に重みをつける。

サイト係数 b の決定 (Blume による)

図 C.4



注: $\text{Log } a_0 = -(\bar{b}+3) + 0.81M - 0.027M^2$
(Gutenberg and Richter の式, 修正)

場所の状態を実際に近いものに仮定しての a_0 である。

図C.5 震央加速度の決定(Blumeによる)

付録 D 応答スペクトル

D.1 定義

ひとつの応答スペクトルは自由度 1 における最大応答の図式表示であり、一定の限界減衰をもち、励起に関連する。応答スペクトルは加速度、速度、変位の最大値をあらわすグラフといつてよい。地盤振動に関連する自由度 1 の変位のスペクトル値は表示 S_d によってあらわされる。同様に、地盤振動に関連する速度のスペクトル値は S_v であり、絶対加速度のスペクトル値は S_a である。

D.2 例

いろいろな研究者が応答スペクトルを描くため数多くの方法を用いている。つぎの例は最もよく使われる 2 つの例である。

- a. 線型スケールで、パラメーターと周期との関係で単純応答をプロットする。

これは Housner (第 4 章、関連 ⁴⁰) によって一般化されたかたちである。1940 年の EL Centro 地震の N-S 成分は図 D. 1, D. 2 にあらわされている。最初の図は加速度に関するものであり、2 番目の図は速度に関するものである。曲線は減衰常数 B が 0, 2, 5, 10 % のものである。

- b. 3 つの応答パラメーターの対数表示でプロットされた図表

最大相対変位、スペクトル速度、スペクトル加速度間の相互関係があることから、スペクトルは、しばしば対数 3 者関係紙にプロットされる。ひとつの例は図 D. 3 に示す。

これも又、1940 年の EI Centro 地震の N-S 成分をあらわしており、減衰常数 B が 0, 2, 10, 20 % の曲線である。

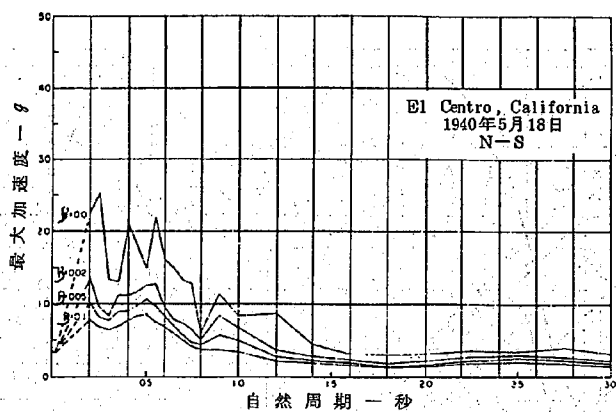
D.3 決定

応答スペクトルをきめる方法はつぎの 2 つの基本的手法にわけることができる。(1) 加速度図あるいは、その他の地震特性をあらわす地盤振動パラメーターから得る応答スペクトル (2) 予期される地震のマグニチュードと震央距離から直接に得る応答スペクトル。

- a. 地盤振動評価からの応答スペクトル

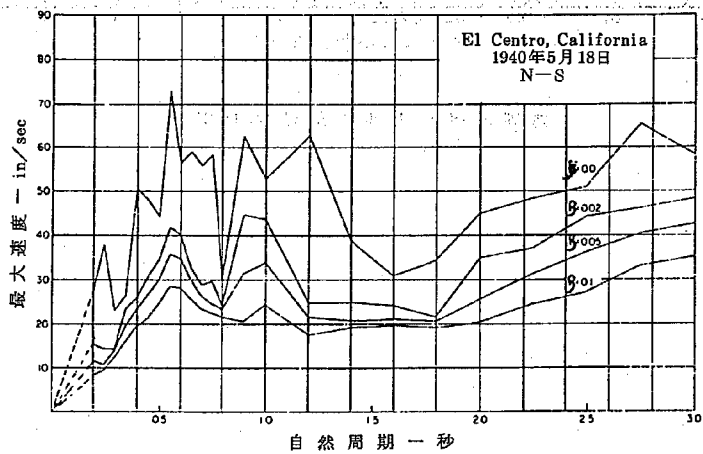
応答スペクトルは、すでに確立されている手法を用いて既往又は人工的な加速度図の記録から直接計算することができる。その手法については ^{27, 34, 40} に述べられており使用することができる。3 成分の対数プロットを描いて、応答スペクトルを最大地盤振動加速度 (Q)、速度 (V)、変位 (d) から出ることでもある。

異った入力データでプロットされたスペクトルの間で少々の違いがあるというものの、それらはすべて概ねつぎのような一般的な特性を示す。



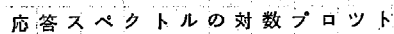
応答スペクトルの線型プロット

図D.1



応答スペクトルの線型プロット

図D.2



- 54 -

1. 減衰ゼロのスペクトルは、かなり異常なとがったピークをもった振動を示す。
2. 振幅は一般的に減衰常数が増すにつれて減少する。
3. 非常に短い周期ではスペクトル加速度値は最大地盤加速度と等しいマグニチュードに近づく。
4. 相当長い周期では最大スペクトル変位は最大地盤変位に近づく。
5. 中程度の周期では、最大スペクトル速度は減衰常数ゼロでの最大地盤速度の4倍から減衰常数20%での最大地盤速度の1.1倍の範囲の幅をもつ。表D.1,²⁴ はいろいろな減衰常数に関する最大応答スペクトルを作り出すための地盤振動値に適用するための拡大率を与えるものである。

Newmark と Rosenbleuth²⁴ は対数表示の a , v , d の線が減衰常数 25 % のスムーズなスペクトルと一致するという仮定にたつた方法を示し、縦座標は平均で $(1 + \pi \beta f s)^{-1/2}$ に比例するという仮定にたつて他の減衰常数のスペクトルを計算した。ここで β は減衰常数のパーセント、 f は自然振動数である。定数 s は単位時間当たり一定の強さをもつ地盤振動の持続時間である。この値は普通程度あるいは強い地震の感知される振動の持続時間の約半分が、西部アメリカ沿岸で記録された強い地震の平均では 12.5 秒である。

Newmark は付録Cで示されている式から a , v , d を計算することをすすめている。表D.1 は各種の減衰常数での応答スペクトルの最大値を得るための地盤振動値に適用される増幅率を与えている。Blume の曲線図D.4はスムーズな応答スペクトルの例を示している。²⁴

b. 予期している地震に関して直接計算された応答スペクトル

Housner の方法 (第5章⁴⁰) におけるスムーズな平均スペクトルは地震設計に関して優れた特質をもっている。Housner は4つの強い地盤振動 (EI Centro 1934, EI Centro 1940, Olympia 1949, Tehachapi 1952) について8成分の標準化されたスペクトルを予約すれば、非常になめらかな曲線が得られることを発見した。図D.5に示される強い地盤振動に対する平均速度スペクトルと、それに対応する図D.6に示される平均加速度スペクトルは4つの振動の平均を基本にしている。Housner は、これらの曲線形は大きな地震の中央部に近いところで普通程度に測定された地盤振動に典型的なものだといっている。

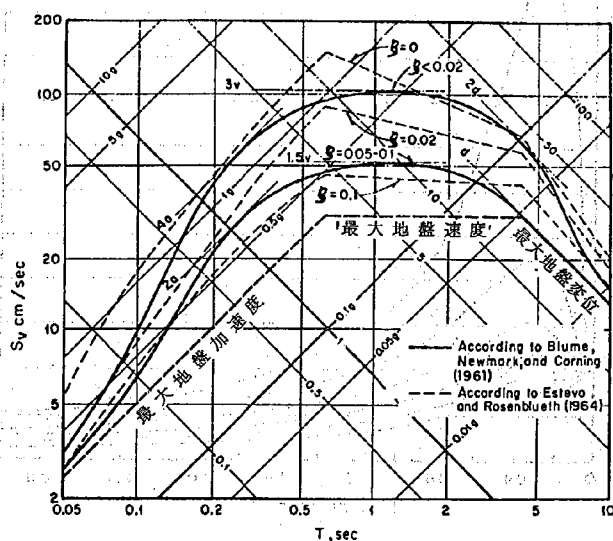
図D.5とD.6の縦軸はつぎに示す記録された地盤振動と合うようにするためにつぎのような係数を掛ける必要がある。

	係数	マグニチュード	D マイル	Sio avg
1. El Centro, 1940年 5月18日	2.7	6.7	30	8.35
2. El Centro, 1934年12月30日	1.9	6.5	35	5.88
3. Olympia, 1949年 4月13日	1.9	7.1	45	5.82
4. Taft 1952年 7月21日	1.6	7.7	40	4.69
5. Vernon 1933年 3月10日	1.5	6.3	28	4.62

表D.1

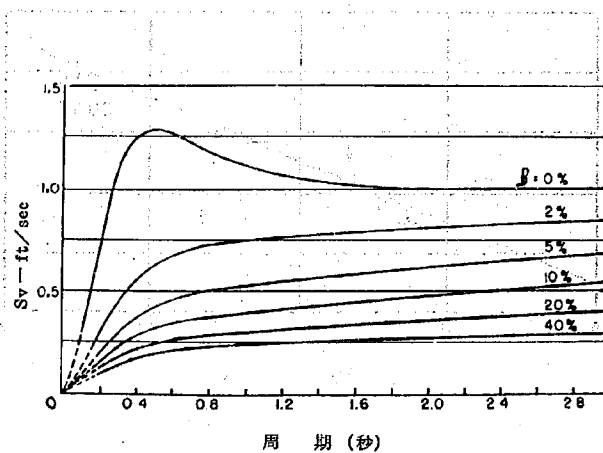
スペクトル拡大値

減衰 B (%)	拡大係数		
	加 速 度	速 度	変 位
0	6.4	4.0	2.5
0.5	5.8	3.6	2.2
1	5.2	3.2	2.0
2	4.3	2.8	1.8
5	2.6	1.9	1.4
7	1.9	1.5	1.2
10	1.5	1.3	1.1
20	1.2	1.1	1.0



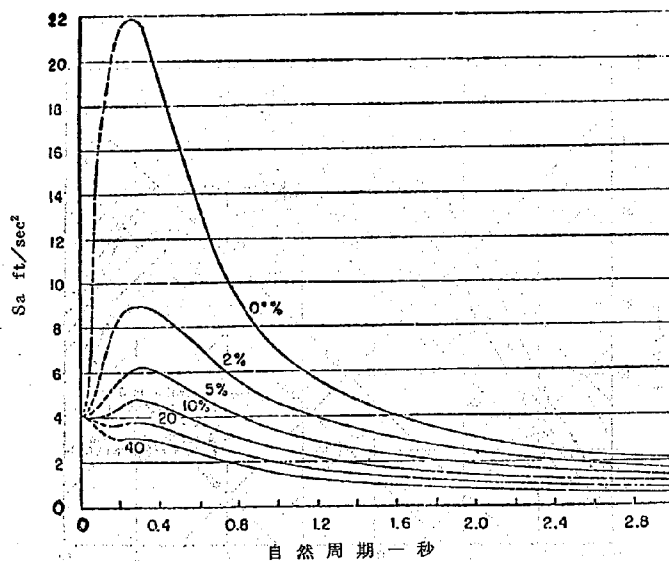
予期応答スペクトル

図D.4



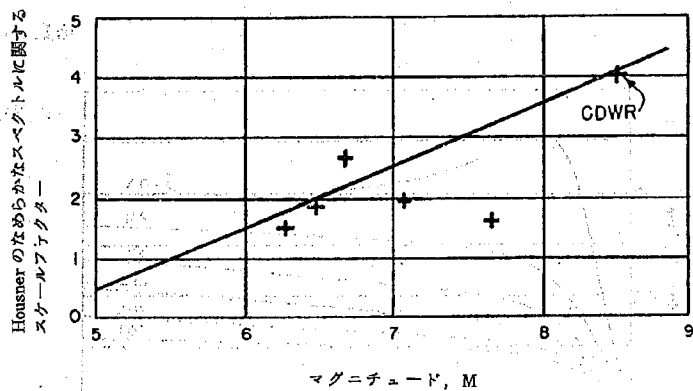
平均速度スペクトル曲線

図D.5



平均加速度スペクトル曲線

図D.6



Housner のスケールファクターとマグニチュードの関係

図D.7

上記の係数は既往の地震の減衰されない速度スペクトル強さ (S_{10}) の約 3.1 の値を持つ Housner の平均速度スペクトル曲線の、 S_{10} に対する比率である。

図 D. 7 に示される直線は約 30 マイル離れた与えられたマグニチュードの地震に関する係数を得るためのものである。マグニチュード 8.5 に対する係数 4.0 はカリフォルニア 水資源局 (CDWR) の公刊されていない報告書でいわれている数字である。²

Environmental Research Corporation (ERC), Las Vegas, Nevada はサイトにおける擬似相関速度 (PSRV) 応答スペクトルを知る方法を確立している。基本的には、資料を収集する作業は原子力実験をモニターしてエネルギーの伝播を測定し、Atomic Energy Commission で地盤応答を検討した。ERC では Los Angeles の University of California 及び National Oceanic and Atmospheric Administration 等のいくつかの機関の San Fernando 地震及びその余震のデータによって作業を行なった。

サイトにおける応答スペクトルを知るために 20 の既往地震記録の各成分について、減衰常数 5 % の擬似相関速度応答スペクトルを計算した。応答は対数目盛での同じ間隔で、0.05 秒から 2.5 秒の間で 40 周期が見られた。表 D. 2 は用いた地震 20 個のリストである。40 記録からの応答スペクトルで以って $PSPV_i = K_i 10^{b_i} M_i^{c_i} \log(16D)$ 式における常数 k , b , c を定めるために、最小二乗多変数回帰方法が用いられた。PSPV_i は c/sec で表示した周期に関する擬似相関速度である。M はマグニチュードで、D はマイルで表示した震央距離である。これらの式によって、マグニチュードと震央距離が知られたときの減衰常数 5 % のときの平均値を与える。減衰常数 2 % のときの PSPV について、ERC は $\frac{1}{3}$ を掛けて結果を出している。回帰から信頼係数はシグマ値を定めるために得られる。この信頼係数 S_i はシグマ値に関して S_i^n として用いられる。例えば、2 つのシグマ値は 2 つの n の値として各々の値をもつ。表 D. 3 は ERC から得られた 3 つの周期に関する代表値を示す。これらの周期間の値は計算することができる。

表D.2

ERC で用いる地震記録

ステーション	日 時	地 震	マグニチュード
1. El Centro	5-18-40	Imperial Valley	7.1
2. Ferndale	10- 7-51	Northwest California	6.0
3. Pasadena	7-21-52	Kern County	7.7
4. Taft	7-21-52	Kern County	7.7
5. Santa Barbara	7-21-52	Kern County	7.7
6. Hollywood Storage, basement	7-21-52	Kern County	7.7
7. Hollywood Storage, PE lot	7-21-52	Kern County	7.7
8. Eureka	12-21-54	Eureka	6.6
9. Ferndale	12-21-54	Eureka	6.6
10. San Jose, Bank of America, basement	9- 4-55	San Jose	5.8
11. El Centro	2- 9-56 0633 pst	Baja	6.8
12. El Centro	2- 9-56 0725 pst	Baja	6.1
13. San Francisco S. P. Building, basement	3-22-57	San Francisco	5.3
14. San Francisco Alex. Building, basement	3-22-57	San Francisco	5.3
15. Golden Gate Park	3-22-57	San Francisco	5.3
16. San Francisco State Building	3-22-57	San Francisco	5.3
17. Oakland City Hall, basement	3-22-57	San Francisco	5.3
18. Hollister	4- 8-61	Hollister	5.6
19. El Centro	4- 8-68	Borrego Mountain	6.5
20. San Diego Light and Power	4- 8-68	Borrego Mountain	6.5

表D.3

5%減衰に関するERC式の常数の値

Period	k	b	c	s
0.203	5.527	0.231	-0.942	1.731
0.499	1.084	0.360	-0.816	1.854
1.004	0.2427	0.403	-0.549	2.178

付録 E 加 速 度 図 の 選 択

加速度図に支配される構造物に関連する応答時系列の計算は、一般に電子計算機を使用する大量で複雑な過程の計算を必要とする。応答を得るためのデジタルコンピューターの使用には加速度図を数値化する必要がある。

数値化された加速度図は多くの資料から作成することができる。California Institute of Technologyは55の基地で記録された既往地震を記録している3つの報告書を発行している。²⁸ これらの記録の最初の20コ(付録Dの表D.2参照)は擬似相関速度式を定めるうえで Environmental Research Corporation (ERC) が使用した。

The Structural Behavior and Analysis Section は Alford, Housner, Martel による“強振動地震のスペクトル解析”において14の地震記録について数値化している。(表E.1参照)² The Polymer Concrete and Structural Section はイリノイ州 Urbana のイリノイ州立大の Civil Engineering Department から得た加速度図資料からコピーをとっている。それらは El Centro 地震 1934, El Centro 地震 1940, Olympia 地震 1949, Tatt 地震 1952, の記録である。

合成あるいは人工地震は Jennings, Housner, Tasai, ERC, その他によって作成されている。そのうち Jennings の2つの人工地震(A-1, A-2)は Polymer Concrete and Structural Section から得たものである。それらは Jennings の記録で述べられている8つのうちで2つの最も厳しい記録である。ERC は予め決定された応答スペクトルと一致するスペクトルの加速度図を作成できるアナログコンピューターを持っている。その計算機は更にパルスの作成あるいはふるい分けをすることによって、記録中の振動数を調整することができる。ERC は十分な持続時間の振動数が変わる加速度図を作り出すことができ、十分な振動数領域をカバーする設計スペクトルに非常に近いスペクトルを作り出すために、既存の記録を調整することができる。

The California Institute of Technology は San Fernando 地震からの多くの記録を数値化している最中である。“1971年2月9日の San Fernando 地震に関する強振動の計器記録”の21ページから37ページにリストアップされている基地から得た記録は有用であり、あるいは近い将来においても有用となろう。

応答時系列に使用する加速度図の良否の基準は、構造物の自然振動数の範囲の中で、設計スペクトルと応答スペクトルとが、どれ程よく一致するかということである。最大加速度及び振動の持続時間は、適切な応答スペクトルを作り出すための加速度図を選択するひとつの目安となる。

設計スペクトルに近接する加速度図は限界振動数範囲によく一致するように調整することができる。加速度はスペクトルを線型に上げたり下げたりして大きくしたり小さくしたりすることができる。振動数のわずかな変化は記録の時間スケールを線型に変えることによって行なうことができる。振動の持続は記録にある量を削ったり、繰返えしたり、加えたりして変えることができる。しかしながら、加速度図の振動数と一般的な形が相応の地震を表わしているかどうかを明確にするために、得られた加速度図を見直す必要がある。

動的解析のために選択した加速度図は、構造物に生ずると思われるすべての応答が時系列にあらわすのに十分な数でなければならない。それゆえ、多くの加速度図を使えば使う程、すべての可能性を網羅することになる。必要な加速度図の最少数は構造物の性質と使用可能な加速度図の特性による。経済的に可能であれば数多くのケースをやるべきで、少なくとも3ケース以上の時系列を使用する必要がある。

表 E.1

解折に用いた観測ステーション

ステーション

日 時

Vernon, California

3-10-33

Los Angeles Subway Terminal, California

3-10-33

Vernon, California

10- 2-33

Los Angeles Subway Terminal, California

10- 2-33

El Centro, California

12-30-34

Helena, Montana

10-31-35

Ferndale, California

9-11-38

El Centro, California

5-18-40

Ferndale, California

2- 9-41

Santa Barbara, California

6-30-41

Ferndale, California

10- 3-41

Hollister, California

3- 9-49

Olympia, Washington

4-13-49

Seattle, Washington

4-13-49

西部アメリカにおける地震に関連する表面断層活動は数多くの地震学者、地質学者、技術者によって研究されている。Tocherは北部カリフォルニアあるいはネバダに震央を持つマグニチュード 6.5 以上の 1906 年以降のすべての地震は何らかの地表面の地割れを伴っているといっている。そのような影響をもつ最小の地震で観察されているのは $M = 5.75$ である。

断層滑動構造は地震として地殻を通して運ばれ、たまっているひずみエネルギーの解放によって生ずるものである。地震のマグニチュードは解放されたエネルギーの量であり、地震の大きさを計るもとである。マグニチュードとエネルギーの関係はつぎの通りである。

$$\text{Log}_{10} E = 11.8 + 1.5M$$

ここで、E は erg で表示されるエネルギーである。

付人かの研究者は地震のマグニチュードと断層の動きとの相関関係を述べている。相関関係はマグニチュードと断層長さ (L) (図 F.1), マグニチュードと変位 (d), M 対 Ld, M 対 Ld² (図 F.2)。プロットされたデータに沿った数は¹²の表, あるいは⁴⁰の表 3.1 を基にしたものである。Tochter はナンバー 2, 14~16, 21 および 25~29 の 10 の地震を用いた。Seed はデータの工学的適応を行なっているようである。³⁷ Housner は $M > 6.5$ について Bonilla のデータを用いている。Housner の曲線の $M < 6.5$ に関する部分は、比較的小さな振動については滑動領域の垂直及び水平量は概略同じであるという考えを入れている。

データのばらつきはいい相関関係をあらわさないが、一般にマグニチュードが大きくなれば断層沿いの破砕の量は大きくなる。図 1, 図 2 は断層破砕の予想ではないが、観察とだいたいに一致する理想化されたものである。これらのデータは断層から起る可能性のある地震を検討するのに使用することができる。関連地域の地質学的、地震学的調査は生ずる可能性のある断層長さと変位を定めるのに重要なことである。この方法で定められたマグニチュードはサイトに影響する地震を予期する上での総合的な問題とからんで違った値を考慮する必要があることもある。

振動の継続もマグニチュードに関係する。というのは振動は少なくとも断層作用が起っている間は続きそうだからである。Housner はスリップの伝播速度は毎秒 2 マイルのオーダーであると計算している。²⁵ Housner は図 F.3 に示すようにマグニチュードと強い振動の持続を関係づけている。

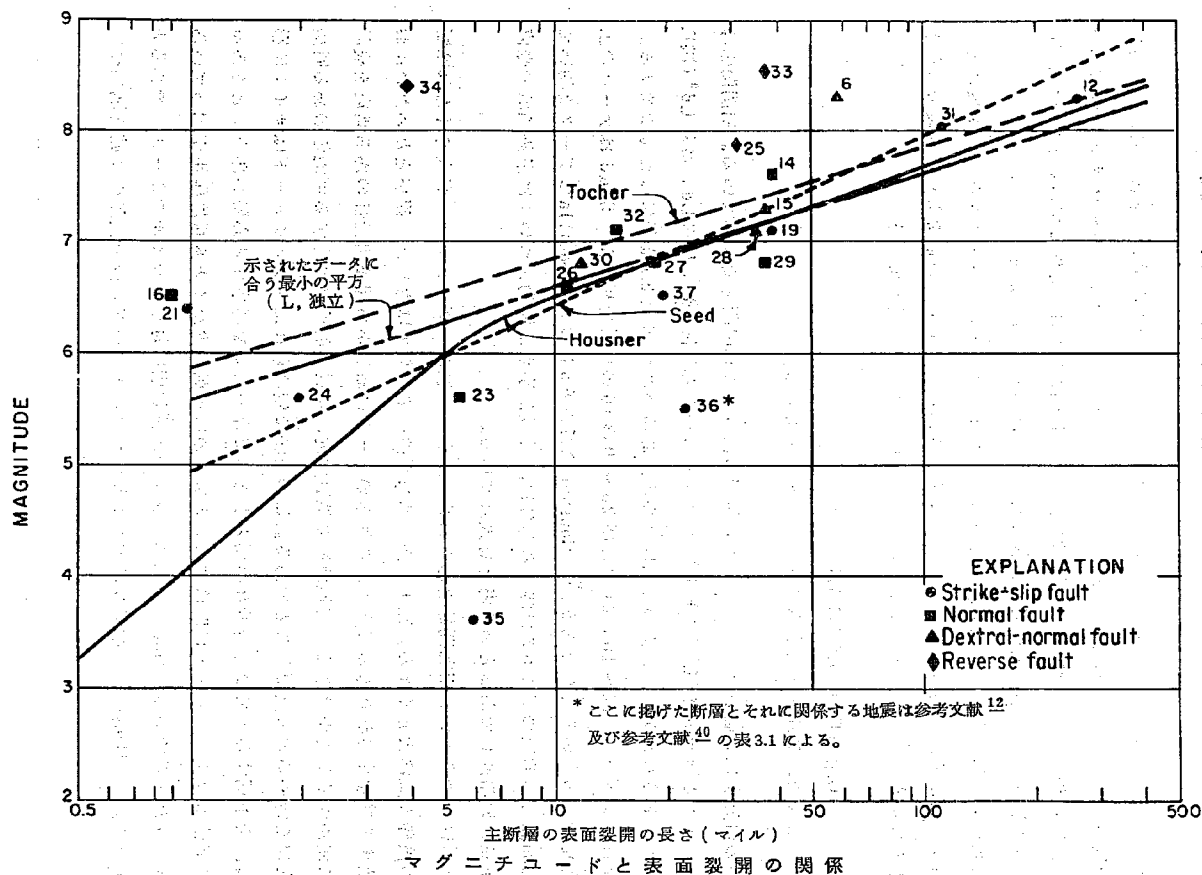
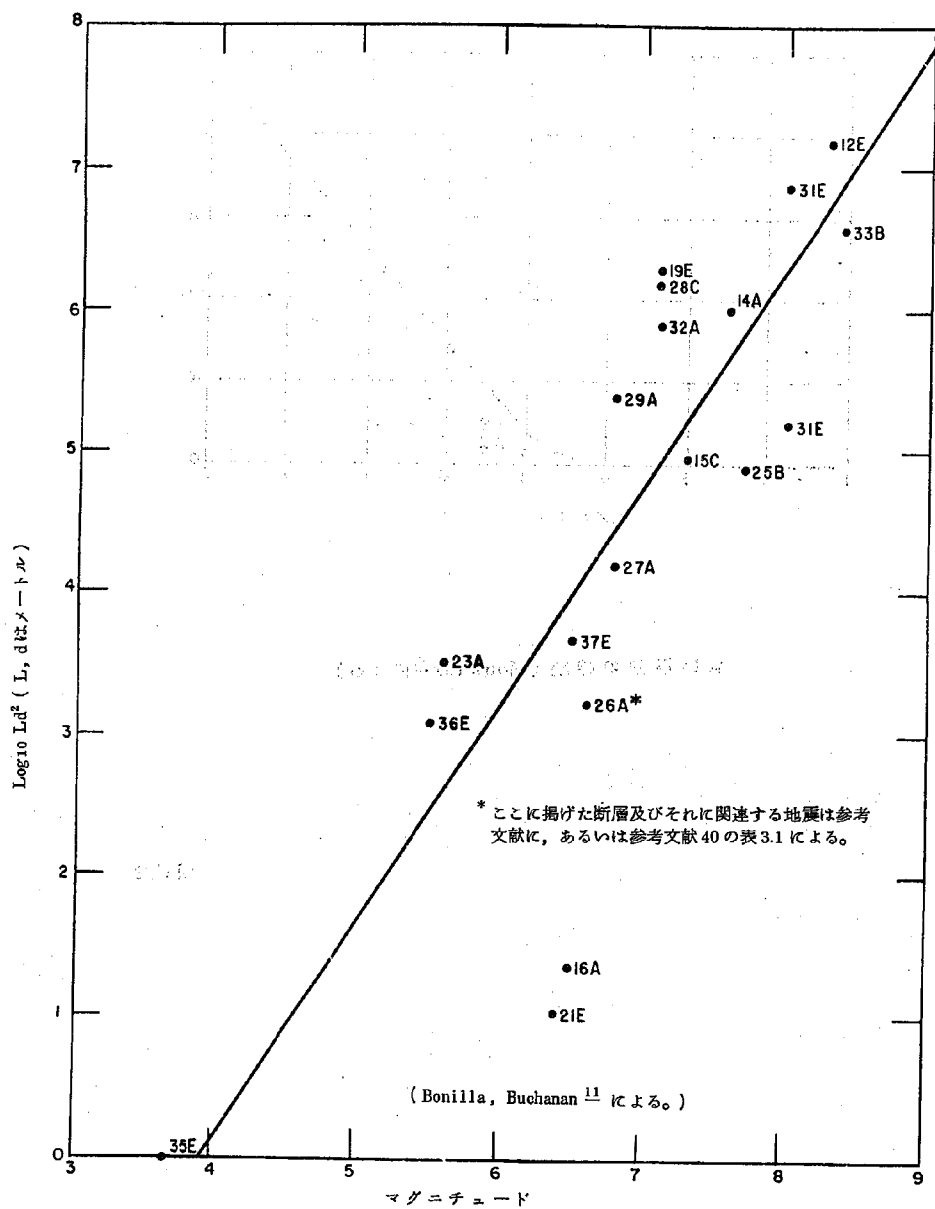
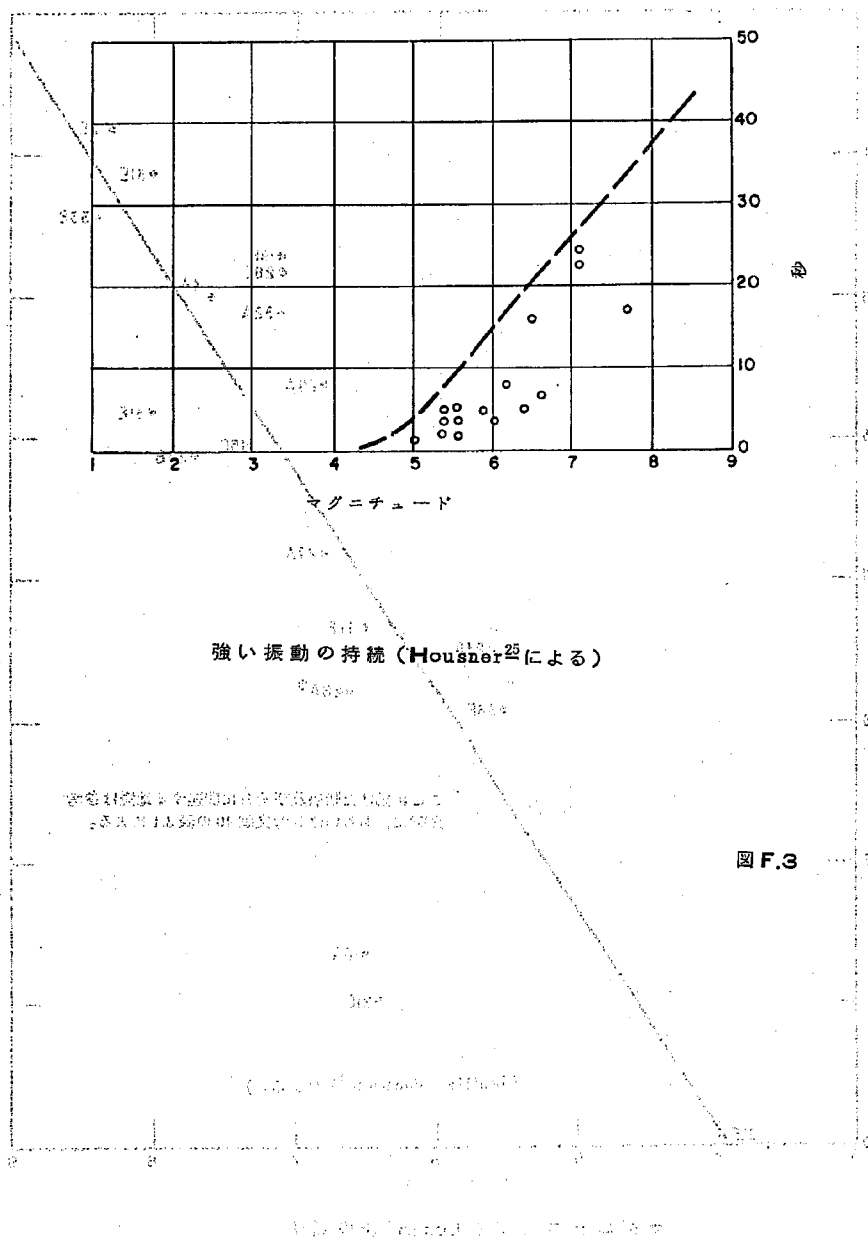


図 F.1



マグニチュードと $\text{Log}_{10} Ld^2$ の関係

図 F.2



付録 G 減衰と距離の関係

地震の減衰は震源におけるエネルギーと震央から離れたところでのエネルギーとの関係である。それは一般に減衰係数としてあらわされ、サイトにおける加速度を震央における加速度で割ったものである。

Gutenberg と Richter はカリフォルニアでの地震について震央加速度のパーセントとして平均減衰をあらわしている。図-G.1 は減衰係数とマイルであらわした震央からの距離の間の関係の曲線を示している。²¹

Blume は減衰のデータを収集し、幾人かの研究者の方法を研究してつぎのような式をあらわした。

$$a = \frac{a_0}{1 + (\Delta/h)^2}$$

ここで a = サイトでの加速度
 a_0 = 震央での加速度
 Δ = 震央距離 マイル
 h = 震源深さ マイル

震源深さ 10 マイルでの減衰係数として計算された加速度の Blume の関係は図 G.1 に示される。Blume の曲線は Gutenberg-Richter の曲線とよく一致している。両方とも震央から 20 マイル以上離れている場合の減衰が著しいことを示している。

Cloud は距離に応じての加速度の変化の 2 つの関係式をあらわしている。それらの式はマグニチュードが 4.8 ~ 8.3 の地震の最大加速度を基礎にしている。最初の式は種々の距離において記録された加速度の上限をあらわしている。

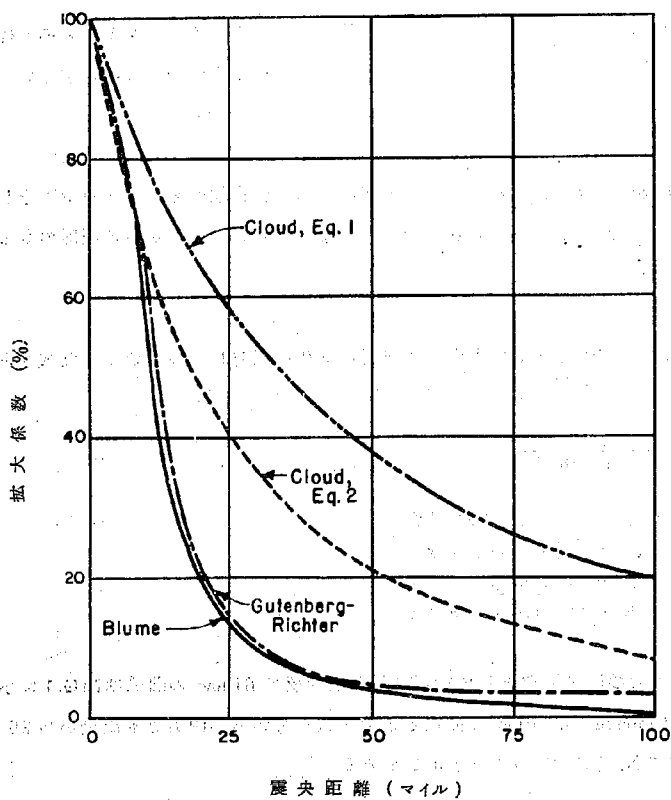
$$\log(a/g) = 3.5 - 2 \log(D + 80) \dots\dots\dots \text{式 1}$$

ここで D = マイルで表示された断層への至近距離あるいは、断層活動が発見されないときは震央までの距離

Cloud の 2 番目の式は震央距離が 8 マイル以上の場合で、最初の式より低い加速度をもたらす。

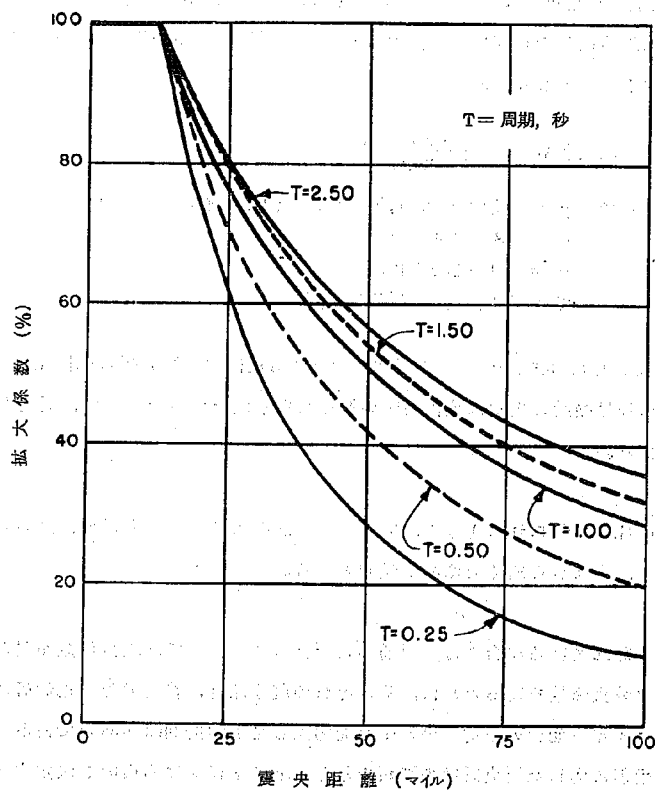
$$\log(a/g) = 3.0 - 2 \log(D + 43) \dots\dots\dots \text{式 2}$$

これらの式は、減衰係数を求めるために再度見直された。係数は図 G.1 にプロットされ、他の 2 つの曲線より、より漸变的な減衰をあらわしている。Cloud の曲線は土の堆積の増幅する影響を反映している。



拡大係数と距離の関係

図G.1



拡大係数と距離の問題 (Benioff による)

図 G.2

Benioff⁷ は、断層の両側の凡そ 12 マイル以内では地盤振動は均一と仮定している。断層から 12 マイル以上離れた点では、4 秒以下の周期の地盤振動は距離に応じて減衰すると仮定している。減衰率は地盤振動の短周期の成分程大きい。震源における平均スペクトル曲線の縦軸には適切な減衰係数を掛ける必要がある。

$$\text{減衰係数} = \left(\frac{1.25}{1 + y/y_0} \right)^n$$

ここで y = 断層からの距離 マイル (12 マイルより大)

y_0 = 48 マイル

n = $(1 + 1/2.5 T)$

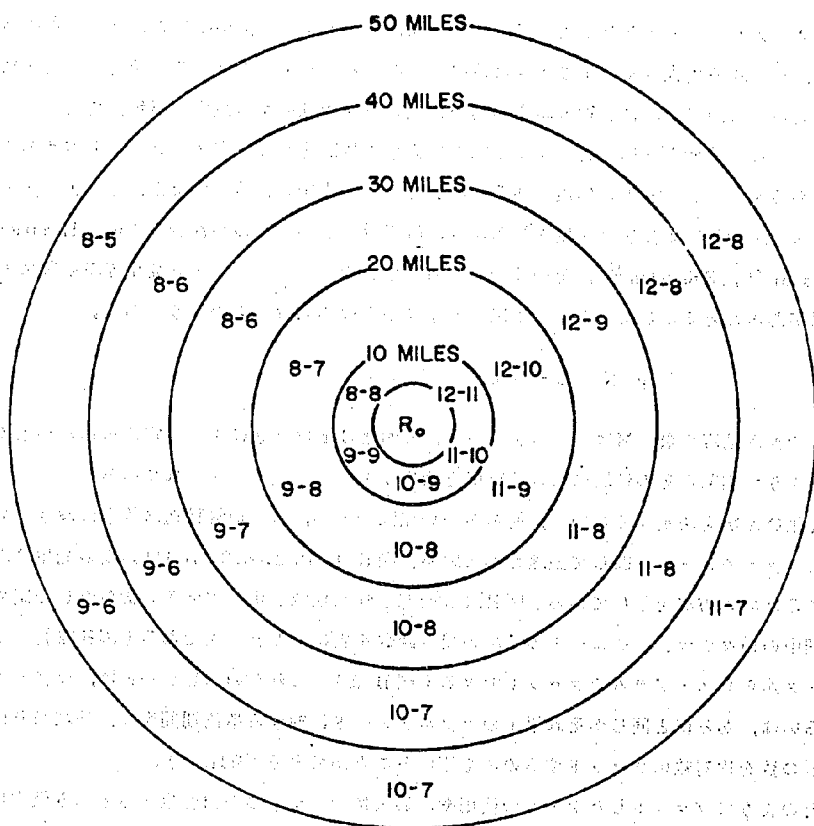
T = 考慮している周期 秒

周期 2.5, 1.5, 1.0, 0.5, 0.25 秒の周期について Benioff の減衰係数は図 G.2 にプロットされている。この地盤振動の表示は比較的厚い沖積層を基礎とするサイトで、周期が 4 秒以上のものについてである。

図 G.1 および G.2 で見られるように、いろいろな研究者による減衰係数は最初の 20 マイルでは早い減衰が生じ、それから速くでは漸変傾向となる。

震央から遠く離れている場合には、似通ったマグニチュードでは減衰係数が変わらないことがある。適用すべき減衰係数を得るために、それぞれの震源深さ、普通でない地殻構造、震央から放射方向でのエネルギー配分の不均一等の影響を考慮して工学的判断が必要である。

等震線図は距離に応じた震央震度の減衰を示し、サイトにおける震度を決定するのに用いることができる。そのようなデータが予定しているときは、震央距離に応じた震度の減衰を示す同心円を用いて人工的地図 (図 G.3)²³ を作成することができる。



説 明 ; 11-7 = 40 から 50 マイルの距離 (最外環) に生じた震央震度 11 の地震は R_0 では震度 7 と観察される。²³

震 度 拡 大 ス ケ ー ル

図 G.3

付録 H 地震の発生ひん度

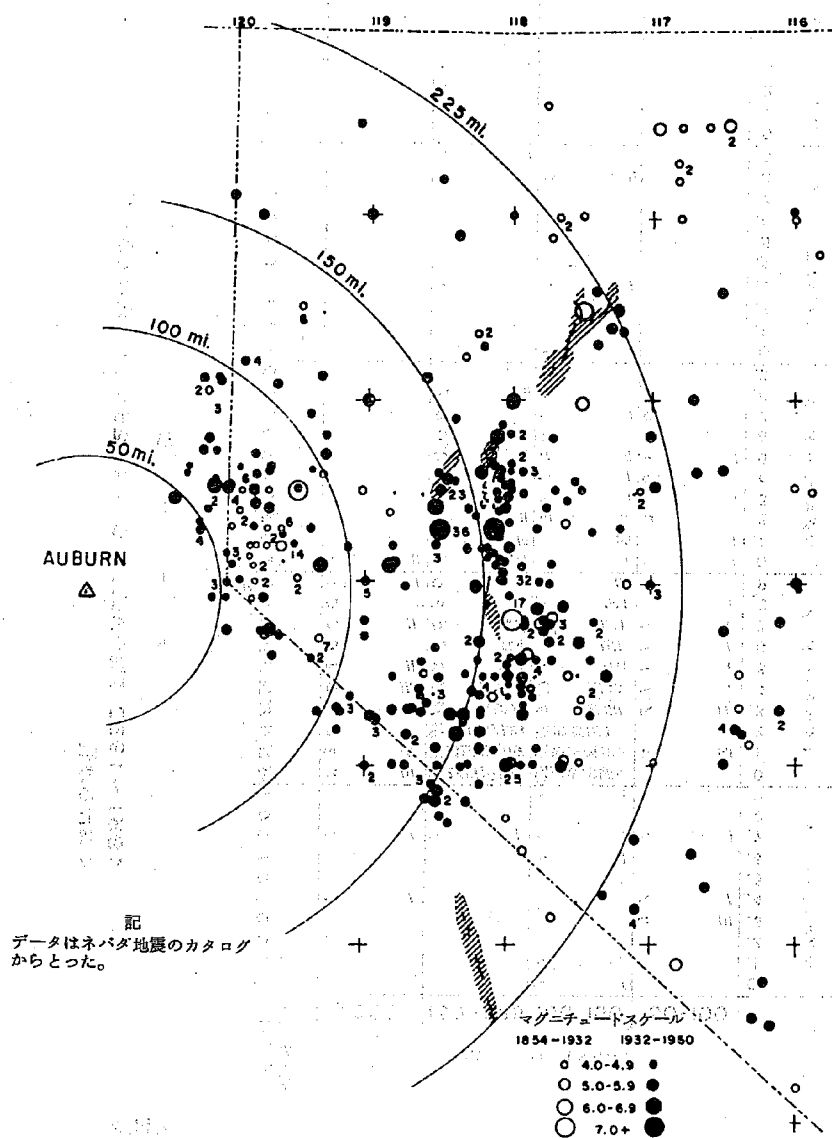
カリフォルニアのような地震の多発地域では、毎年数千の地震が生じる。2～3百の地震が人体に減じられる程大きく、より大きな地震が人々に相当な影響を与える。設計者は構造物の地震設計を考える際には、構造物の耐用期間中に生じる可能性のある最大可能地震を検討する必要がある。更に、設計者は構造物の耐用期間中に必らず数回生じる地震についても考慮する必要がある。あるマグニチュードの地震、あるいはあらかじめ決定した値と同等か、それより大きいマグニチュードの地震の発生ひん度を知るには、確率手法を用いるのが都合がよい。Richter³⁵, Housner²⁵, Evernden¹⁵, その他の研究者は地震のマグニチュードと発生確率の間に観察的な関係があることを示している。この関係を示すひとつの式はつぎのようである。

$$\text{Log } N = a - bM$$

ここでNは地震の数、Mはマグニチュード、aおよびbは観察によって定められた常数である。同じような相関がその地域における震度と発生ひん度との間でもなされている。

発生ひん度を決定するために、何らかの地域区分(州、郡、地質構造域等)における発生ひん度とマグニチュードに関して整理されている。図H.1, H.2, H.3, H.4は地震の発生ひん度を決定するための方法を示している。図H.1は研究された地域を示している。あらかじめ定められた期間中の種々のマグニチュードの地震の発生回数を表にしたデータである(図H.2)。これらのデータからヒストグラムをプロットできる(図H.3)。これらの同じデータは、マグニチュードあるいは、ある値と同じかそれ以上のマグニチュードに対する単位期間当り、地域当りに生ずる地震の数を片対数にプロットするのにも用いることができる(図H.4)。

そのようにプロットしたデータの使用や、過去に起ったものが再度生ずるという仮定によって構造設計に意味のある地震の発生ひん度の検討を行なうことができる。



西ネバダ州の地震

図H.1

図 H.2

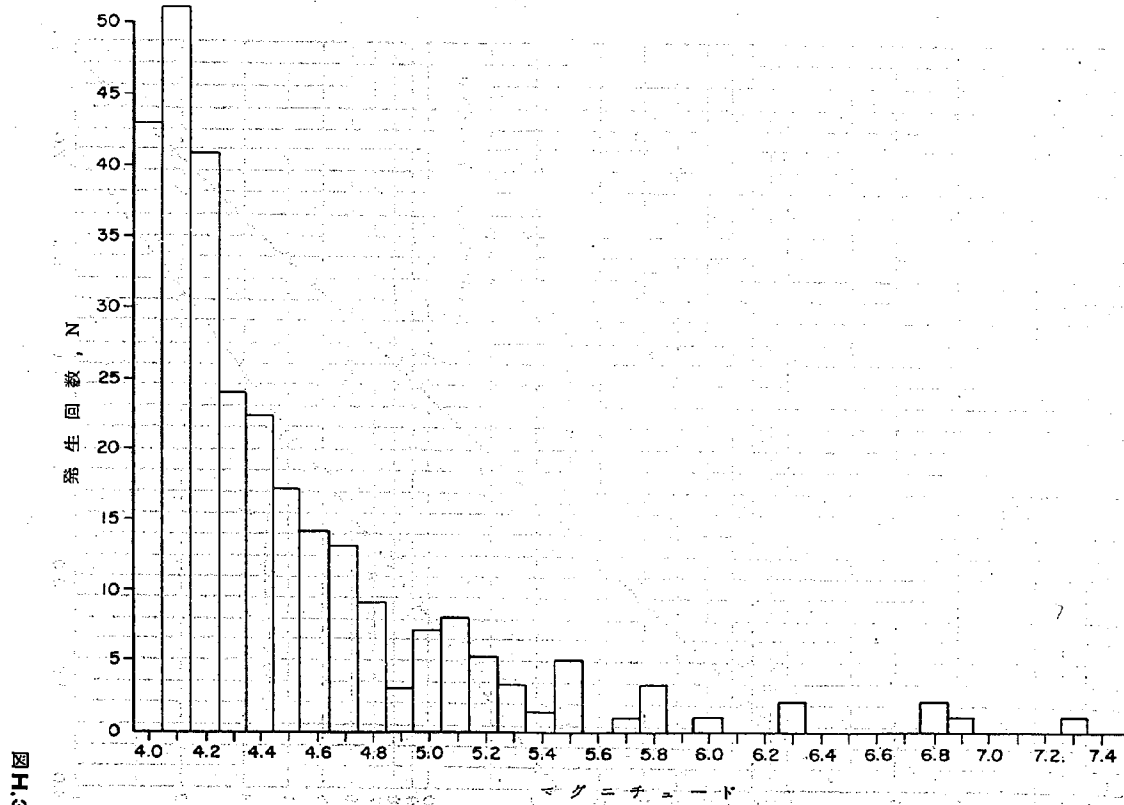
距離 (マイル)	4マグニチュード 3										4マグニチュード 4										4マグニチュード 5										4マグニチュード 6										マグニチュード 7			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3										
< 50																																												
50-100				///	/																																							
100-150	/	/		3	/				/																																			
150-225	/	/																																										
> 225																																												
合計																																												

< 225マイル
の合計

1 1 0 3 1 0 1 3 0 1 4 3 5 1 4 2 2 1 7 4 1 3 9 3 7 8 5 3 1 5 0 1 3 0 1 0 0 2 0 0 0 0 2 1 0 0 0 1

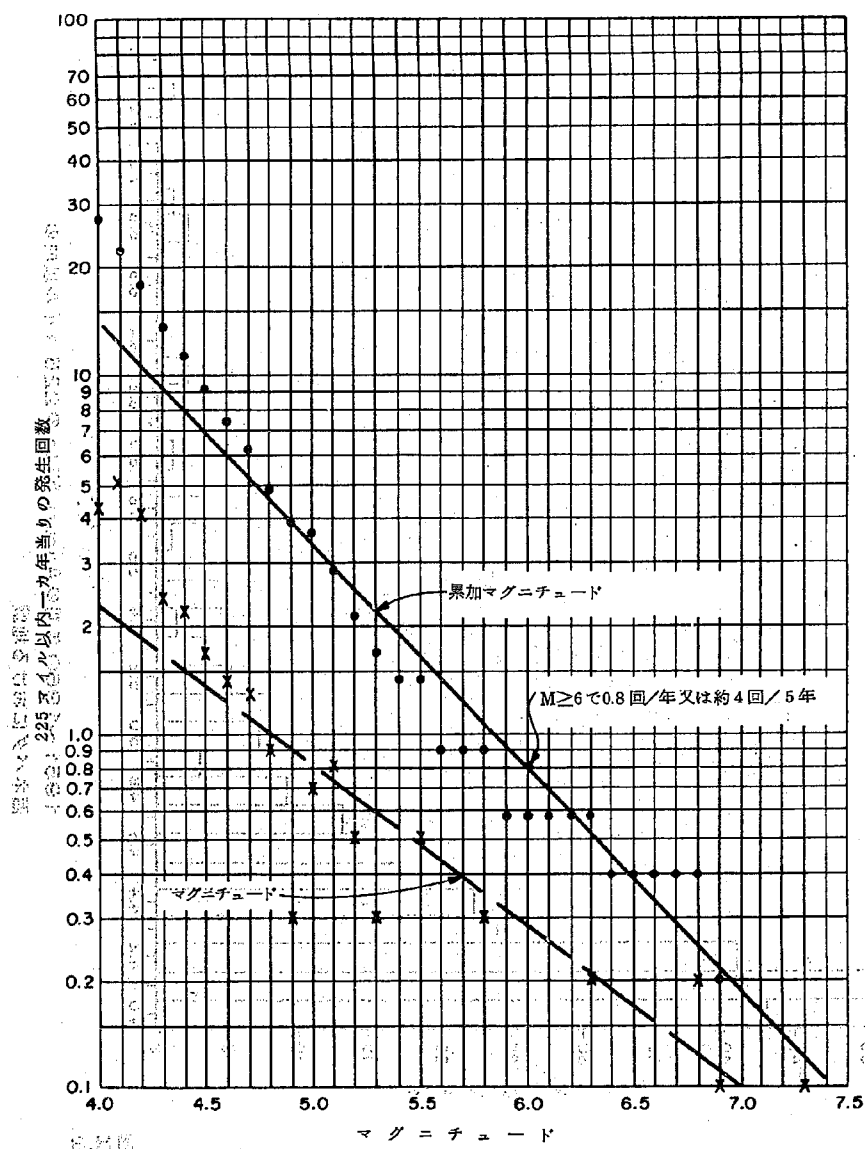
デ - タ 表

1951～1960 年間の Auburn Dam の 225 マイル以内の西ネバダ
における地震



図H.13

1951～1960年間のAuburn Siteの225マイル以内の
西ネバダにおける地震



1951～1960年間のAuburn Siteの225マイル以内の
西ネバダにおける地震

図H.4