

研究展望

地震工学・地震防災の研究と実務

EARTHQUAKE ENGINEERING RESEARCH AND ITS APPLICATION TO SEISMIC ANALYSIS AND SEISMIC DISASTER MITIGATION

—A REVIEW

片山 恒雄*
By Tsuneo KATAYAMA

1. 概 説

今日の活発な地震工学研究の一つの引き金は 1956 年にアメリカ合衆国パークレーで開かれた「世界地震工学会議」であったように思われる。この年の 6 月、1906 年サンフランシスコ地震の 50 周年を記念して、アメリカ合衆国の EERI (Earthquake Engineering Research Institute) とカリフォルニア大学の共催で開かれた会議には、開催国アメリカをはじめ日本・チリ・ニュージーランド・メキシコなどの 11 개국からの報告があり、それまであまり交流のなかった世界の地震工学研究者が初めて一堂に会した画期的な会議となった¹⁾。

1956 年の世界会議で発表された論文は 38 編であったが、この成功に勢いを得て 1960 年に日本で第 2 回世界地震工学会議が開かれ、世界各国から 120 編に及ぶ研究論文が提出された²⁾。その後の地震工学研究の発展は目覚ましい。第 3 回以降、世界地震工学会議はほぼ 4 年ごとにニュージーランド、チリ、イタリア、インド、トルコで開催され、回を追うごとに発表論文数は増大し、1984 年夏にアメリカ合衆国サンフランシスコで開かれる第 8 回会議には、1000 編に及ぶ論文の発表が予定されている。

わが国では、1962 年に地震工学国内シンポジウムが開かれ³⁾、46 編の論文が発表されてから、世界地震工学会議の中間年にあたる 1966 年、1970 年、1975 年、1978 年、1982 年に、土木学会・建築学会・土質工学会・地震学会・機械学会の共催で日本地震工学シンポジウムが開催されている⁴⁾。1982 年の第 6 回の発表論文は 266 編に達し、20 年間にほぼ 6 倍に増加した。図-1 は、1

回から 6 回までの発表論文を、第 6 回 (1982 年) シンポジウムの目次で分類されている内容別に分けて示したものである。目次の分類も変わってきているため、図-1 はあくまでも著者の主観的な判断によっている。第 1 回 (1962 年) および第 2 回 (1966 年) のシンポジウムでは、発表論文の半分以上が構造物・構造部材の耐震性や地震応答に関係したものであったが、これが段々広い分野に拡大してきた様子がうかがわれる。この傾向は、主として、地震動の性質と広い意味で土にかかわる研究論文が増加してきたことに特徴的に現われている。1982 年に開かれた第 6 回シンポジウムでも構造物・構造部材がらみの論文が最も多いが、地震動 (地震危険度を含む) と土に関係した論文がそれぞれ全体の 1/4 ほどを占めており、今日の地震工学研究の動向を示している。

図-2 は、日本地震工学シンポジウムに発表された論

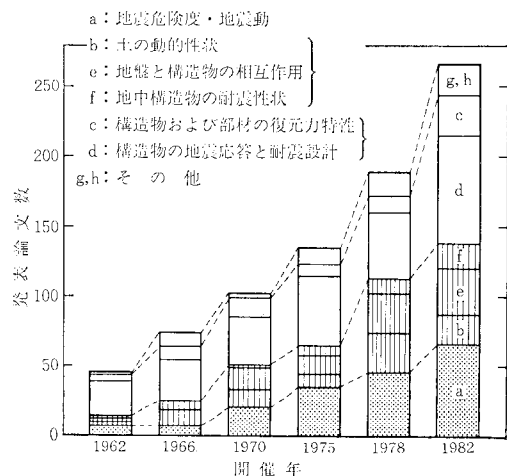


図-1 日本地震工学シンポジウム発表論文の内容による分類

* 正会員 Ph.D. 東京大学教授 生産技術研究所
(〒106 港区六本木 7-22-1)

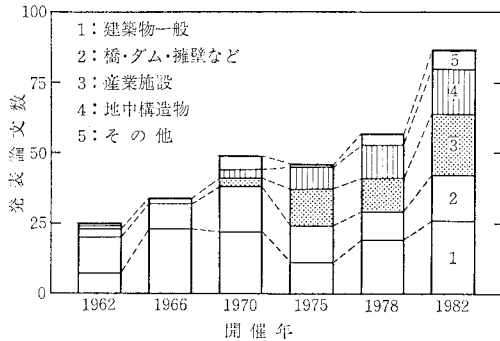


図-2 日本地震工学シンポジウム発表論文で扱われた構造物の内訳

文のうちで、特に構造物を対象としたものの内訳がどう変わってきたかを示したものである。この分類も著者の主観的判断によるところが多い。振動論一般にわたるもの、明らかに部材レベルの耐震性能にかかわるもの、特定の構造物を対象としないで地震時の土圧・相互作用・基礎などの問題を一般的に扱ったものは対象外とした。建築物一般および従来から土木構造物の主流であった橋・ダム・擁壁などの地震応答・耐震性に関する研究が多いのは、今も昔も変わらないが、1970年代に入ってから、各種産業施設（タンク・配管・機器・原子力施設など）や地中構造物（地下埋設管・沈埋トンネル・地下タンクなど）の耐震性の研究が大幅に増加してきている。基礎的情報が不十分なまま、ともかく構造物の耐震化を図るための調査研究が行われた1950年代から1960年代初めにかけての地震工学研究は、その後特に地震動の性質および土や地盤の地震時特性に関する分野を充実させながら発展し、現代社会の多様な要請に答えるため、対象構造物の範囲を広めながら今日に至っている。初期の研究の多くがきわめて直接的な必要に応じたものであったのに対し、研究範囲の拡大と分化および研究内容の深化に伴い、工学との直接のつながりが薄れてきた部分があることは否めない。

図-3は、L.S. Jacobsenにより1956年パークレー会議の総括報告で使われた図を少しきれいに書き直したものである⁹⁾。地震があり地震学があって初めて強い地震動、すなわち地震工学研究のための原動力（Prime Mover）が与えられる。Jacobsenは、それに続く部分を土質力学、構造力学、観察と実験の3つに分け、これらをまとめあげるべき構造力学をさらに3つに分けている。ここでの“Reconciliation”は、理論的な結果を入念な実験結果で裏付けるという意味である。この流れにそって設計^{注1)}が行われ、その結果が本当の地震で検証されるプロセスを繰り返してユートピアに至る。しかし、実務設計は必ずしも、この正統な流れにのったもの

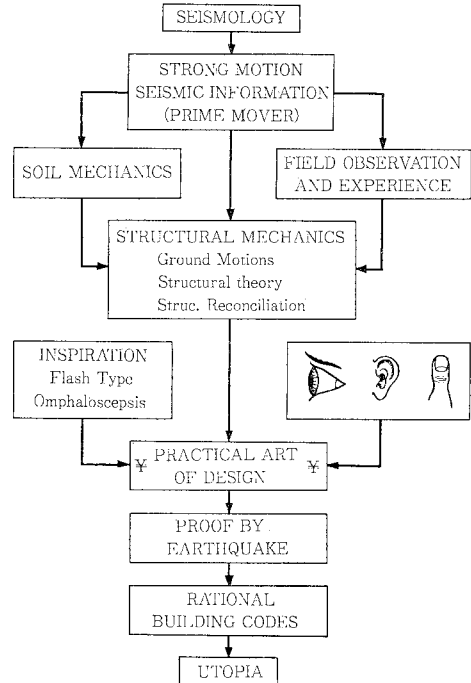


図-3 構造物耐震化の流れ⁹⁾

である必要はなく、「インスピレーション」や「経験」によるものであってもよい。インスピレーションのうちの1つは、「ひらめき」とでもいうべきもので、もう1つの“omphaloscepsis”はギリシャ語で「自分のへそをみながらじっくり考える」という意味だそうである。

1956年といえば、まだコンピューターによる動的解析もなく、有名なTurnerら⁹⁾による有限要素法の古典的論文が発表された年である。Jacobsenが、その後30年弱の期間における地震工学の発展をどこまで予想していたかはわからないが、図-3に示された耐震解析・耐震設計のとらえ方は、今日でもそのまま通用する。さらに、Jacobsenは「地震工学にかかわるそれぞれの分野の研究はlowbrowからhighbrow^{注2)}までがあるが、行きすぎるとhighbrowどころかbewildering（困惑させるよう）になることがある」と述べている。昨今の地震工学の一つの側面を表わしているようで、著者にとっても耳が痛い。

前置きが長すぎたが、わが国の地震工学の現状をながめ、将来の展望にふれてみようというのが、この論文の目的である。このような企ては、結局のところ「主観的」にならざるを得ない。現状としては最近約10年間

注1) Jacobsenは設計はscienceではなくartであるといっている。これをどう日本語に移したらよいかよくわからないが、たとえばthe art of building (navigation)が建築(航海)術と訳されていることで、おおよその雰囲気はつかめよう。

を主対象とする。

2. 地震動の性質・地震危険度・設計用地震荷重

地震動の性質と地震危険度に関する研究は近年特に盛んであり、地震動の工学的意味合いが広い角度から明らかにされつつあるが、耐震設計という実学的な観点からみると、やや発散の方向に向かっているとの印象を受ける。本節で述べる分野の最近の研究に関しては、日本建築学会の振動分科会地震盤震動小委員会の10年間の活動報告としてまとめられた文献⁷⁾が参考になる。

地震動・地震危険度^{注3)}の研究が盛んである背景は以下のようにまとめられる：① 加速度強震計の記録を中心に地震記録が蓄積され、地震動特性の一般的な検討が可能となった、② 確率的・統計的な見方が広く行きわたり、これらが地震動・地震発生データの充実と結びついた、③ 耐震解析の対象となる構造物が多様化し、従来よりも多くの側面から地震動の性質を明らかにする必要があるが生じた、④ 断層モデルによる地震発生シミュレーションなど地震学上の知見が工学分野に導入されるようになった。

地震工学の目標は地震に対する安全な環境づくりであるから、耐震解析の実務に直接関係するのは動的解析に用いる地震動記録も含めて設計用地震荷重ということになり、この設定にはふつう以下の情報が必要となる：① 過去の地震発生の記録や活断層の分布など地震の発生にかかわる情報、② 地震そのもの、地震波の伝播経路や距離による減衰、対象地点の地盤条件などが地震動の特性に与える影響、③ 対象構造物の力学的特性、重要性、許容できる被害や地震危険度のレベル。

(1) 震源情報に関する研究

震源情報は多くの場合、地球物理学・地震学・地質学などの研究者から基礎資料が提供される。日本はアメリカなどに比べれば、古くからの地震発生資料がよく整理されている。最近の地震については、震源域での断層運動が推定されているものもあるが、ほとんどの場合、地震の発生時期、発生場所、マグニチュードの3つが、地震そのものを規定するパラメーターとして与えられているに過ぎない。工学的な設計地震動予測はこの3つを基礎資料にすることが多い。原子力発電施設の耐震解析では、当該地点に影響を及ぼす活断層データが地震荷重設

定の決め手となる場合もある⁸⁾。

地震発生情報に関する問題点は、① 古い時代の記録にもれが多いこと、② 震源位置とマグニチュードの信頼性、および③ ある地域の地震活動度に時間的変動があるか、の三点にまとめられる。

このうち①については、古文書などによる歴史地震の発掘の重要性が理解されつつある⁹⁾¹⁰⁾が、これは膨大な作業であり、なるべく短期間に有益なデータを蓄積するためには、「草の根」的な活動を広めてゆく必要がある。たとえば、重要土木構造物の建設が予定される場合、将来役に立つ古地震資料の収集整理を自発的に行うことなども考えられてよい。ある地域にあるマグニチュード以上の地震が最近50年に1回発生したという情報と過去50年に10回発生したという情報は、単純に計算した1年当たりの平均発生回数が同じであっても、確率的な地震危険度予測の信頼性がまるで違うのである¹¹⁾。

次に②についてであるが、いわゆる歴史地震とよばれるものの震源事項があやふやであることは仕方がないとしても、明治・大正時代の観測結果の精度も常に高いとはいえない¹²⁾。最近、1885年以降の日本付近のM6.0以上の地震および日本に被害をもたらした地震(M6.0未満も含む)を再調査した貴重な結果が発表されており¹²⁾¹⁴⁾、気象庁は1926~1960年における日本付近の主な地震約2万個の震源とマグニチュードを再決定し、新カタログを1982年に刊行している¹³⁾。

地震発生に強く関係する資料として活断層の情報がある。断層の分布や性質の資料は1920年代から漸次蓄積されてきていたが、精度の異なる活断層図のどれを信頼すべきかなど判断に迷うことがあった。1980年に、40人をこえる研究者からなる「活断層研究会」により、全国の活断層を同じ基準で認定した結果を20万分の1の地勢図上に示し、さらに一つ一つの活断層の諸性質の一覧表を加えたものがまとめられた¹⁵⁾。海底活断層については、このほかに、1983年に地質調査所から発行された300万分の1の海洋地質図がある¹⁷⁾。

活断層の一応の戸籍台帳はできているが、これを実際に地震荷重設定の参考にするには、まだ幾つもの問題点が残されている¹⁸⁾。文献16)の活断層は、「第四紀、つまり約200万年前から現在までの間に動いたとみなされる断層」と定義されている。また、活断層の性質に空欄が多く、特に工学的に重要な意味をもつ「確実度」と「活動度」に関する情報が不足している。「確実度」は活断層であることが確実なIから活断層の可能性のあるIIIまでの3種類に、「活動度」は1000年間の平均変位速度が1~10m, 0.1~1m, 0.01~0.1mの3種類に分類されている。しかし、過去200万年間のどの時期に活

注2) 「新英和辞典」(研究社)は形容詞“highbrow”に「インテリ、インテリ向きの」を与えている。

注3) ここでの地震危険度は、「ある地域にどれくらいの強さの地震動がどの程度の頻度で襲来するか」の意味で使う。英語では、地震の発生を含めて地質構造・地盤など自然環境から決まる危険度を Seismic Hazard とよび、自然環境内に都市・システム・構造物が存在するとき、それらに対する地震の危険度を Seismic Risk とよんで、区別することが多い。

動が激しかったか、最後にいつ動いたか、どれくらいの期間において繰り返し動くのか、1回の地震での変位量はどれくらいか、といった情報はごく一部の断層で知られているにすぎない。沖積平野基盤の断層や海底の断層の分布は十分わかっておらず、人口・産業が沖積平野に集中し、多くの被害地震が海底で起こっていることを考えると、地震防災の面からは心細い。これらの問題を含めて、先に述べた③については不明な点が多い。

(2) 地震動の性質に関する研究

地震発生に関するデータから、注目地点の地震動特性を推定するための情報は、強震記録とその解析結果の蓄積に伴って近年大幅に増加した。たとえば、地震動の最大振幅(変位・速度・加速度)をマグニチュードと距離から予測する経験式として、文献7)に挙げられているものだけでも19個にのぼる。この傾向は最大地動に限らず強震動の継続時間、地震動波形の包絡線の形状、さらに地震動の振動数特性の情報を含む応答スペクトルなど、広い対象にわたっている。これらの、いわゆる「地震動の工学的特性の統計解析」は、用いる地震記録の範囲、記録の補正方法、回帰式の仮定などを変えれば、幾つでも異なる結果を与える。実際、最近提案されている経験式は、ただ統計解析の条件が異なるだけで本質的な手法や目的がほとんど同じであるものが多く、応用にあたってどの式を使うべきか判断に迷うのが実状であろう。土木・建築の分野や地震計の管理母体の違いなどをこえて、現時点で最大・最良のデータベースをもとにした統計解析を公的機関が中心となって行うべき時機が来ている。もちろん、このような解析結果はある期間ごとに見直され改良されなければならないが、まず基本的に準拠すべき最善の経験式を設定し、その不満足な点を指摘する形で研究を進める方が効率的である。

地震動の特性について、今後進展するであろう研究の幾つかを挙げておく。

従来の地震工学の地震動研究は加速度地震計の記録に偏重していた。図-4は、1968年十勝沖地震の室蘭における変位記録を示したものであり、上は気象庁1倍変位強震計によるもの、下は加速度地震計記録を2回積分して求めた変位波形である。観測点は同じではなく、時刻も共通ではないから、細かい議論は意味がないが、大きな地震は従来の加速度記録が示すよりもずっと長い継続時間にわたり、長周期の変位地震動を生じさせていることがわかる。1964年新潟地震で問題となった大型タンク内の液面動揺(スロッシング)の周期や長大構造物の固有周期は数秒をこえ十数秒に至るものもあり、長周期地震動の工学的特性の解明が重要となりつつある¹⁸⁾。実測記録に基づく長周期地震動特性に関する研究の数は少なく^{19)~21)}、さらに定量的な調査研究が望まれる。

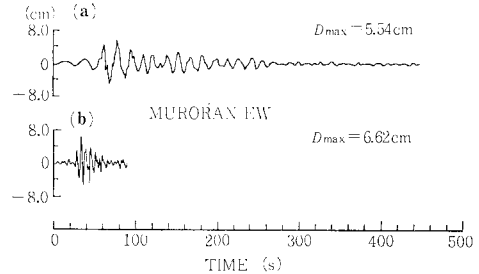


図-4 (a)気象庁1倍変位強震計記録と(b)加速度計記録の積分から求めた変位記録²¹⁾(1968年十勝沖地震の室蘭の記録)

やはり主として地震動の長周期成分にかかわる研究として、断層モデルによる地震動予測がある²²⁾。従来の理学分野における研究は、震源パラメーターの巨視的な推定を目標としたものが多かったが、数秒から数十秒という(理学から考えれば、むしろ短周期に属する)地震動の特性の予測手法として応用するには、これからの研究に待つところが多い。このためには、実測結果から対象周期帯域の振動特性を定量化することが重要であり、断層モデルを用いたシミュレーション解析と実測による特性の両面からのアプローチが相互に補完する形で進められなければならない。

これまでの観測は1点の地震動記録を与えるもので、地震波の伝播特性や地震による地盤の相対変位などの情報を得ることは難しい。特に平面的に大きな広がりをもつ構造物や地中埋設管などの耐震解析では、多点同時観測による地震動特性の解明が大切であり、地震動のアレ-観測が盛んになってきている⁷⁾。たとえば、地震波の伝播により地下埋設管に発生するひずみの予測には、地震波のどんな周期の成分がどんな波長で伝播しているかを知ることが必要であるが、このような情報は不十分であり²³⁾、今後の研究が待たれる。

工学における地震動特性の研究は、結局、地盤や構造物に及ぼす地震の影響を評価することが目的である。この意味で解析によらず実測や震害調査から地震の影響を直接的に評価する研究がもっと盛

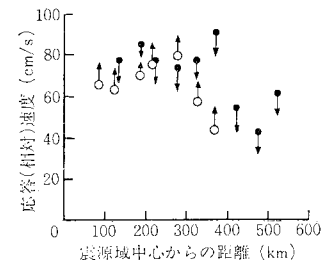


図-5 プールの溢水から推定した1983年日本海中部地震の長周期強度²⁰⁾(1050校対象のアンケート調査結果)

んに行われてもよい。このような研究の例としては、古くから木造家屋を対象としたものがあり、近年液状化に注目したもの²⁴⁾や埋設管ひずみに注目したもの²⁵⁾などがある。図-5は、日本海中部地震の際にプールの水が溢

れたかどうか注目したアンケート調査の結果をまとめたものである²⁰⁾。

(3) 設計用地震荷重の評価に関する研究

地震発生と地震動特性の情報を総合して、地震危険度を評価する研究の数は多いが、危険度の高低の全国的な分布性状は互いによく似ている。地震危険度の地域分布図は、地域別補正係数として、設計震度決定の重要なパラメーターとなるが、研究成果と実際の基準の補正係数は必ずしも整合していない。1977年に「新耐震設計法(案)²¹⁾」が提案されて、土木・建築構造物の主な耐震規定の地域区分図(図-6)は同じものとなりつつあるが、土木分野では地域区分A, B, Cの補正係数が1:0.85:0.7であるのに対し、建築分野では1:0.9:0.8である。また、「高圧ガス設備等耐震設計基準²⁸⁾」は、A地域を特AおよびAに二分し、特AからCまでの4つの地域別補正係数を1.0:0.8:0.6:0.4としている。これらの補正係数が種々の構造物に対して同じである必要はない。地震発生データと地震動のアテニュエーション式⁴⁾を組み合わせて予測した将来のある期間内に来襲する最大地震動の期待値の分布図などをみると、最大が最小の数倍であるのが普通である。また、このような危険度分布図は、構造物周期によって異なるべきものである²⁹⁾。しかしながら現状では、いろいろな基準・指針における地域別補正係数がなぜ異なるのかを統一的に説明する根拠が薄弱である。地震危険度解析の研究と並行して、「耐震基準における地震外力はどんな考え方のもと

に定めてゆくべきか」を、一般的に検討する必要がある。

構造物の重要性、地震被害が及ぼす影響、構造物の地震応答と壊れ方などがどの程度明らかにされているかは、設計用地震荷重の設定に密接にかかわってくる。また、その構造物の耐用年数をどの程度厳密に考えるかも、地震荷重レベルに影響を及ぼす。たとえば、ある地点が1年間に200gal(=200cm/s²)以上の最大加速度の地震動に襲われる確率が $q=0.005$ と求められたとする。このとき、この地点に耐用年数 $T=20$ 年の構造物を建設することを考えると、この構造物が耐用年数内に200gal以上の地震動にさらされる確率は $p=0.10$ となる^{注5)}。 $T=50$ 年なら $p=0.22$ となり、 $T=100$ 年なら $p=0.39$ となる。従来、土木構造物の多くは、半永久的な構造物であるという暗黙の了解があるだけで、耐用年数が厳密に議論されることは少なかった。また、構造物が耐用年数内に生みだす利益も十分定量的に評価されてきたとは思えない。地震発生や地震動の性質に関する情報そのものがあやふやなのだから、方法論ばかりを理論的に構築しても意味がないと考える人もあろう。しかし、将来の地震工学の新しい展開を設計の実務に矛盾なく取り入れてゆくためには、合理的な方法論が重要である。このような方法論をもつことにより、構造物の耐震化とそれに必要な費用などに注目した研究が将来の課題として浮かび上がってこよう³⁰⁾。

最後になったが、重要性は高い二点を指摘しておく。

地震荷重の合理的な設定のためには、地震カタログ、活断層データ、強震記録およびその数値化データなど基本情報のデータバンク化が積極的に促進されるべきである³¹⁾。また、構造物のひずみ・応力レベルが弾性範囲内におさまるべき地震荷重と、部分的な塑性化や破損を許容する地震荷重の2つのレベルを設定した耐震設計法への移行も積極的に検討すべきである³²⁾。

3. 土・地盤・土構造物・地中構造物

1923年関東地震の経験を生かし、わが国では重要な土木・建築構造物の建設にあたって、建設地点の地盤条件を詳細に調査し、地盤が不良なところでは、基礎工を入念に設計・施工するなどの対処がなされてきた。しかし、鋼やコンクリートに比べて、

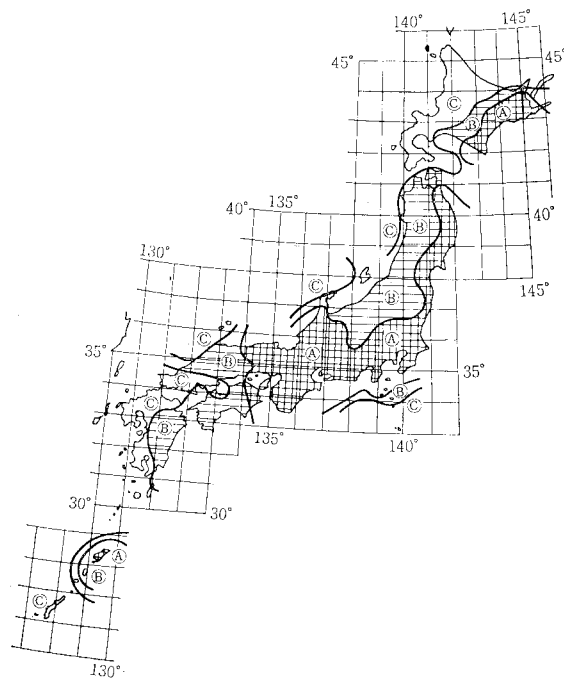


図-6 「新耐震設計法(案)」で提案された地域区分²¹⁾

注4) Attenuvation (減衰、徐々に減少してゆくこと) という言葉は、最大加速度のような地震動特性が距離により減少することを表わすが、地震工学の分野では、たとえば地震動の強さ、地震のマグニチュード、距離などの諸量を結びつける関係式を、アテニュエーション式と総称することが多い。

注5) 一般に $p=1-(1-q)^T$ なる関係が成り立つ。

土の力学的特性はとらえどころのない難しさがあり、科学的な目で土や地盤を研究する分野の重要性が認められたのは遅かった。関東地震直後に物部長穂と岡部三郎がほぼ同時に提案した、震度法に基づく「地震時土圧式」が耐震検討のほとんど唯一の手段であった時代が長く続いた。

近年、土にかかわる分野の地震工学的な研究が盛んになってきた理由は、以下のようにまとめられる：① 1964年新潟地震の際の液状化による被害が工学分野に大きなインパクトを与えた、② 電子計算機や有限要素法解析の普及により、解析的研究の可能性が広がった、③ フィルダム・沈埋トンネル・地下タンクなどの土・地中構造物の重要性が高まり、軟弱な地盤に巨大な基礎をもつ長大橋などが建設されるようになった、④ 土や地盤の実験・実測技術が進んだ。

これらの要因は互いに複雑に関係しあっており、個々の問題を独立に議論することは難しい。以下では、特に重要と思われる問題の幾つかを少し詳しく眺めてみる。

(1) 砂質地盤の液状化

新潟地震以降、液状化はなぜ発生するのか、サイトの液状化はどれくらい確実に予測できるか、などがまず精力的に研究された。たとえば建設省土木研究所が中心となった研究の成果は³³⁾、原位置および室内の各種試験の結果を組み込んで詳細に液状化を予測する方法として実務的に使われるとともに、簡易な液状化予測手法としてまとめられている^{34), 35)}。

しかし、実務レベルでみた場合、液状化の問題にはまだ幾つもの課題が残されている：①室内の実験から得られた、ある定義のもとでの液状化を現実のサイトの液状化とどう関係づけるか、②液状化が現実の構造物に及ぼす影響をどう評価するか、③液状化の可能性の高いサイトに建設される構造物の液状化対策をどう考えるか。

土木工学の分野で広く使われている簡易予測法が密な砂に対して過大な液状化の可能性を与えることが最近指摘されている。この予測法は、実験室内の比較的緩詰めサンプルの実験結果に基づくものであり、その適切な応用範囲は限られている³⁶⁾。きわめて強い地震動を対象に簡易予測手法を使うと、過去の震害事例から考えて液状化しそうな地点までが液状化することになり、地域防災の関係者を困惑させている。室内実験の結果から、相対密度が80%を超えるあたりから、液状化に対する抵抗が急激に増加することが示唆されており³⁷⁾(図-7)、大地震による液状化事例の検討からも同様の傾向が認められている³⁸⁾。液状化可能性があまり

に過大に予測されていると、埋設管などの被害予測への影響は大きく、初めから対応のしようがないとの印象を与えてしまうことになる。

サンプルの室内動的実験によるミクロな研究に対し、最もマクロな調査の結果は図-8に示したとおりである³⁹⁾。わが国における液状化事例の綿密な調査²⁴⁾に基づいて最初に作成されて以来、1つ2つとプロットを増やしながら充実されてきた貴重なグラフである。この図で下限を与える経験式は、かなり大規模な液状化を発生させる最小マグニチュードと最大震央距離の組合せを示すもので、いわば液状化の危険度を最も過大に見積った関係式である。実現象としての液状化は、ミクロな研究とマクロな研究の間に複雑に分布しており、地震防災の目的は、広いスペクトラムをもつ液状化現象のどこまでがどんな構造物の耐震安全性に対して重要であるかを

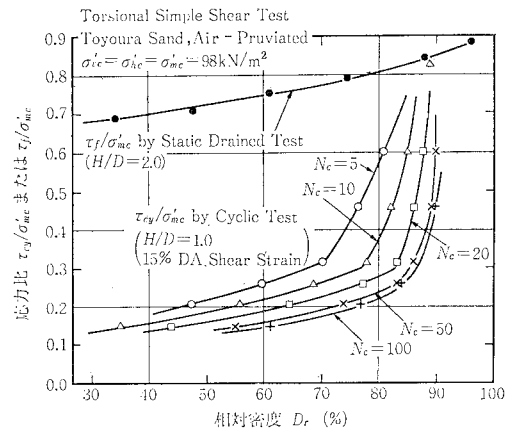


図-7 相対密度の増加に伴う液状化強度の急激な増大³⁷⁾(液状化は繰返し回数 N_c で両振幅15%のひずみを生じさせる応力比で定義; 供試体は空中落下法で作成した等方圧密の豊浦砂)

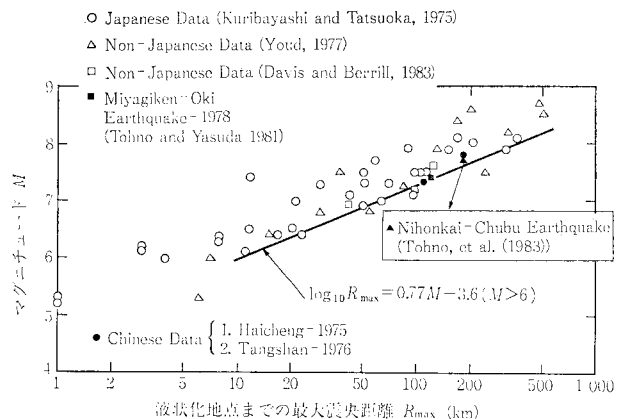


図-8 液状化地点までの最大震央距離とマグニチュードの関係³⁹⁾

きりさせることである。

液状化が構造物に与える影響には、まだわかっていない部分が多く、このことが液状化をおそれすぎる傾向を助長しているようである。構造物を作る立場からは、「液状化おそるにたらず」を見きわめるための調査研究が今後特に大切である。新潟地震の経験からも、液状化しない深さまで杭支持された建物の被害が一般に軽微であったことが確認されている⁴⁰⁾。1983年日本海中部地震の被害調査からも、しっかりした杭基礎をもつ橋台や建物が液状化に対してほとんど被害を受けなかったことがわかっている^{41)・42)}。また、小さな模型による振動台実験の結果も、このような特性を裏付けている^{43)・44)}。

しかしながら、盛土や埋設管のように、特に液状化の影響が大きいことが予想される構造物に関しては、「液状化はこわい」という漠然としたコンセンサスのみが突出している。液状化しやすく作られた模型の振動台実験から得られた定性的な結果が、現在の耐震工学を支配しすぎている。1975年の第4回日本地震工学シンポジウムで吉見吉昭(東京工業大学)が「液状化の研究は予測から対策の時代へ入りつつある」といったのが、著者にはきわめて印象深かったのだが、その後の発展は必ずしも速いとはいえない。「液状化を正しくおそれる」ための研究が強く望まれる。

(2) 力による設計・変位による設計

関東地震による擁壁や岸壁の被害を教訓にして提案された物部・岡部の地震時土圧式は、その設計計算法としての簡単さのゆえに、土に接する構造物の耐震解析のほとんど唯一の手法として広く使われてきた。橋台・岸壁・擁壁などのように、実際の状態が土圧式の誘導で仮定された条件に比較的良好に合致している構造物を対象としていた限りは、少なくとも設計計算法としては合理的であり、物部・岡部の土圧式がこれら構造物の耐震安全性の向上に寄与してきたところは大きい。

1970年前後から、従来にない多様な地下構造物の建設が計画されるにつれて、これらの耐震性の検討には地震時土圧式では対応しきれない問題が現われてきた。土圧式では土圧の分布は静水圧と同じように考えるが、数十mの深さをもつシールド立坑の解析では、これは不合理と考えられる。石油パイプラインや沈埋トンネルのように延長の長い構造物では、その長手方向の地震時挙動の解析が重要となってきた。また、大型地下タンクなどは剛体とみなすことはできず、また仮に地震時土圧式で解析するとしても、タンクの前後左右からどんな形で土圧を作用させるべきかの判断が難しい。

このような背景のもとに、まず石油パイプライン⁴⁵⁾、沈埋トンネル⁴⁶⁾を対象に、「応答変位法」による耐震計算法が導入された。応答変位法は、地震時の地盤変形が

構造物に伝達されると考えて、構造物の断面力などを算出する耐震計算法であり、この考え方の基本的正当性は室内模型実験⁴⁷⁾や実構造物の地震観測⁴⁸⁾から裏付けられている。また、地下タンクの実測地震時挙動が、応答変位法的な考え方で解釈されることも示されている⁴⁹⁾。初めは長大地中構造物の耐震計算法として提案された応答変位法は、最近では地下タンクの設計⁵⁰⁾や、さらに地盤の鉛直方向の変位分布を考慮して沈埋トンネルなどの横断面の耐震計算にも使われるようになってきた⁵¹⁾。大局的には、今後の地中構造物の耐震計算は、力としての土圧に基づくものから周辺地盤の相対変位に基づくものへ移行してゆくと考えられる。

「周辺地盤の変形が地中構造物の地震時挙動を支配する」という基本的な考え方は間違いないが、地中構造物の破壊現象はこの考えの単純な延長上ではとらえられない。振動台実験は地盤の弾性体モデルによるものであるし、実構造物の地震観測は破壊には程遠い低いレベルの地震動によるものである。沈埋トンネル・地下タンクなど新しい構造物は、まだ強い地震動を受けた経験がないが、過去の地震による埋設管の被害の多くは、地震波動によって地中に生じたひずみによるよりは、地割れ・すべり・沈下など地震後に残る地盤の永久変形に関係している。地震工学研究の成果としてわかった一般的な現象と、実際の破壊過程の間にはへだたりがある。応答変位法を耐震計算法として意味あるものとするためには、破壊に対する安全率を適切に与えるような地震外力の設定が重要である。

地震により地表層に生ずる永久変形の予測はきわめて難しい。液状化に伴う盛土や地盤の沈下量を推定するための研究も行われている^{52)・53)}が、液状化を抜きにしても、どんな条件のときに地盤にどれくらいの割れ目が生じるかなど、現時点では定量的に予測できない。現実の地盤は、土の性質・地表に現われた微地形・地中の様子などが千差万別であり、実用に役立つ解析的予測法を得ることは困難と思われる。同じ理由で、経験的な関係を導くことも容易ではないが、既往地震による斜面や盛土の震害事例をもとに、多少粗っぽくても、被害特性を定量的に検討することは有用である⁵⁴⁾。この意味から、地震直後の地割れの大きさやその地域的分布などの克明な調査結果を残す努力がなされるべきである。日本海中部地震のあとで、地元研究者により能代市を中心に行われた調査などは高く評価すべきである⁵⁵⁾。

(3) 実験・実測・解析

土・地盤・土構造物・地中構造物にかかわる実験的な研究は以下のように分けられよう：①土や岩の物性に関する実験、②パイプなど構造部材の性能確認実験、③ダムなど構造物模型の振動台実験、④実構造物の起

振実験および常時微動観測。これらに加えて、実地震による構造物や地盤の応答観測があり、他方、解析的研究の代表として集中質量モデルや有限要素法を用いた数値シミュレーションがある。

土はもともと実験用サンプルの作り方からして難しく、実験結果の信頼性は実験条件や実験技術の優劣に支配される。新しい試験機器の開発や実験技術の進歩により、近年、精度の高い物性データが蓄積されつつある⁵⁹⁾。しかしながら、実際の耐震計算に使われる地盤パラメーターと最新の土の物性データの間には大きなギャップがある。通常の有限要素法解析で使われる地盤パラメーターは、単位体積重量・弾性係数・ポアソン比くらいであり、必要に応じて側圧係数を仮定したり、計算された応力から安全性を検査するときに粘着力・摩擦角・引張強度が使われたりするにすぎない。これでも結構多いと思われるかもしれないが、この程度であると、土質実験の最新の知見を取り入れる余地はほとんど零に等しい。

多くの場合、くい・ケーソン・地下埋設管などの耐震検討には、土と構造物を適当なばね定数をもつ仮想のばねでつないだモデルが使われる。このときのばね定数の適切な値のとり方に関しては、ここ十年間くらいほとんど研究の進展がみられない。ばね定数は単に土の物性だけから決まるものではなく、構造物の特性や土と構造物の相互の関係などに依存するシステム・パラメーターである。一方では精密な土質実験が行われているにもかかわらず、実用的耐震解析に必要なパラメーターに関する知見が欠けていることは、実務レベルからみて、最も不満足な点である。

1960年代の後半から、有限要素法による耐震解析が、土にかかわる分野でも盛んになり、土と構造物の複雑な問題を扱う人たちにとって、将来がバラ色にみえた時期があった。しかし、比較的説明しやすい現象の説明が終わり、数値解析プログラムが各所で一応整備された今日、実務的応用の立場からは、むしろその限界がみえはじめてきた。より現実的な数値解析を行うために、土を引張りに耐えない材料と仮定したり⁵⁷⁾、⁵⁸⁾土材料のせん断破壊現象を組み込んだり⁵⁸⁾、土と構造物間のすべりを考えたり⁵⁹⁾する解析法の研究開発が進められてきた。しかし、他方では、数値解析プログラムが実用に供されるようになったがため、高度の判断が必要とされる問題であっても、なんとか既存のプログラム群だけで済ませようという傾向もみられる。また、個々の地盤や構造物の動的応答解析結果が増え続けているのに、それらを鳥瞰して情報を総合

化する努力があまりなされていない。計算法や計算条件の違いが結果に与える影響についても、さらに組織的な検討がなされるべきである。

土構造物・地中構造物の耐震解析が建築・機械などの構造物と異なって特に難しい理由の1つは、実物に近い状態での確認試験がほとんど不可能なことである。したがって、目的をしぼった室内実験や野外実験とその結果の解析的な解釈が大きな重みをもつことになる。振動台実験や起振実験の数は多いが、実験方法・実験技術・結果の解釈などすべてが高いレベルをもつものは一部にすぎない⁶⁰⁾。また、ある考え方のもとに、幾つかの異なる機関でなされた実験結果を横並びに眺める形の研究も重要である⁶¹⁾。いずれにせよ、模型実験・地震観測と破壊的な地震時の挙動の間にはギャップがあることを承知の上で、現象の本質を見失わずに実験結果を解釈し、多少巨視的であってもよいから、解析的手法が現象を合理的に説明できるかどうかを判断してゆく必要がある。

4. 地震防災——ソフトな対策の重視⁶²⁾、⁶³⁾

ここでいう「ハードな対策」は、構造物そのものの耐震化を指し、「ソフトな対策」は、複数の構造物からなるシステム全体の地震時の信頼性を向上させたり、各種の事前・事後対応や復旧の最適化をはかって震害の影響を最小化するための対策を指す。図-9に、これら2つの対策を概念的に示した。従来の地震工学研究の大部分は、ハードな対策、すなわち図-9の①→②の流れを対象にしたものであった。土木・建築などの各種構造物の耐震性が向上してくるにつれ、地震災害の中でも地震後の都市機能のマヒや生活環境の悪化などの面があまりかえりみられていなかったことが注目されはじめた。

ソフトな地震防災の重要性を広く認識させるきっかけは、アメリカ合衆国では1971年サンフェルナンド地震であり、日本では地方公共団体の防災会議による震害予測の調査⁶⁴⁾や、さらに直接的には1978年宮城県沖地震による仙台市の被害であった⁶⁵⁾。その一つの現われが、1970年代の中頃から主に日米両国で盛んとなった「ラ

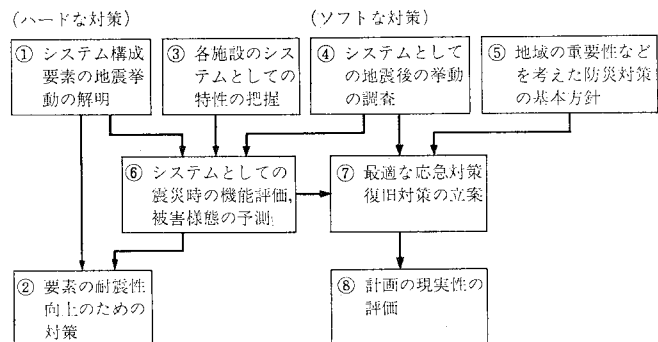


図-9 地震防災のハードな対策とソフトな対策

ライフライン「地震工学」である。すなわち、電気・上下水道・ガス・電話・交通網などの都市供給処理施設が地震によりどんな影響を受け、それが都市機能や都市生活にどう波及するか、波及を面的・時間的に最小限にするにはどうしたらよいか、などが地震工学の分野で研究されはじめたのである。サンフェルナンド地震を契機として始まったアメリカの研究が、主として、水道網などネットワークの地震時信頼性の解析⁶⁶⁾に向かったのに対し、日本の研究は初めのうち、システム構成要素の既往の震害調査⁶⁷⁾や、実際の地震後における水道などの対応と復旧の詳細な調査へ向けられた^{65), 68)}。これらの調査研究を通じて、ライフライン「地震工学」においては、① 地震によるシステムの機能低下の評価、② 地震後の応急対策・復旧対策の検討、③ 以上の二点を考慮した事前対策の立案、が重要課題であることがわかってきた。

(1) ライフラインの震後機能の解析

ライフラインの典型例として水道システムを考えてみよう。水道システムはダムなどの貯水・取水施設から始まり需要家の給水栓まで水が流れてその機能を発揮している。しかし、多数の需要家までを含めたモデル化は難しい。通常、取水施設・浄水場・配水池・ポンプ場など重要な核施設を節点とし、これらをつなぐ幹線を枝とするネットワークを考える。たとえば、隣接する節点を結び1つの枝の被害確率が、地震動強さ・管の種類・埋設条件・地盤条件などから0.03と評価されたとしよう。もちろん、この確率はそれぞれの節点や枝で異なる。この値から判断する限り、次の地震でこの部分が切れる可能性は低い、次の地震でこの枝が生きるか死ぬかは確定的にはいえない。そこでつぼの中に赤玉3個と白玉97個を入れ、勝手に抜き出してみる。赤なら破壊である。この操作をネットワーク内のすべての節点と枝に対して繰り返すと1つの被災ネットワークが得られる。この状態で、水が行く地域と行かない地域を評価する。このようなシミュレーション(モンテカルロ・シミュレーション)を計算機を使って100回行くと、たとえば、90回水が得られる地域や、50回しか水が得られない地域などの分布がわかる(図-10)。

初期のシミュレーション解析では、需要節点が浄水場のどれかひとつつながっていれば、その節点で水は得られると考えてい

た^{69), 70)}。しかし、たとえば水道の場合、管径や水圧によって、連結性だけでは供給の可否が決まらないことから、水理的条件をなんらかの方法で取り入れることが考えられた^{71), 72)}。さらに、重要施設が被災して、水の絶対量が不足したときなどには、物理的には水の送れる候補地域が幾つかあっても、それらのいずれかを選んで配水しなければならないこともある。また、管路の分岐部におけるバルブ配置をなるべく実際に則してモデル化しなければ、現実的な予測はできない⁷³⁾。

このように、ネットワーク・システムとしてのライフラインの地震時信頼性の研究は徐々に現実味をおびたものとなりつつあるが、実際の地震防災対策に有効に活かされるまでには至っていない。その理由は、最近の研究の動向そのものが、現場技術者によく知られていないことであろうが、水道施設に限っても、以下のようなさらに具体的な原因がある: ① 節点や枝などシステム要素の被害確率そのものの評価が難しく、必ずしも信頼性が高いとはいえない、② 解析モデルの多くは机上のモデルまたはきわめて単純化したモデルであり、現実のネットワークの複雑さを十分取り入れていない、③ 予測結果は平均的な状況を示すだけで、次の1回を予測するものではないことが、実務に縁遠いものとの印象を与えている。

①の問題点の1つに、核施設の被害確率の評価がある。幸いにして取水施設、浄水施設などは最近の地震ではほとんど被害を受けていないが、大規模な水道ネットワークに地震後の停電が重なったりすることを考えると、節点の機能低下の意味は大きい。2つ以上のライフライン・システムの被害の相互干渉については、まだ本

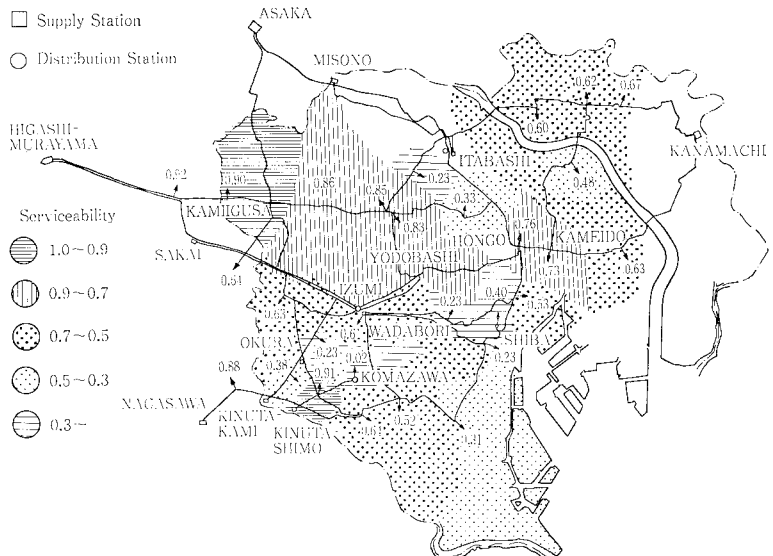


図-10 東京都23区水道システムの地震時供給信頼性⁷²⁾
(関東地震の東京よりもかなり強い揺れを想定)

格的な研究成果はない。現時点では、このような問題をあまり複雑に考えるより、あとで述べるが、震害全体のイメージをもっとマクロにとらえることの方が大切であろう。②の問題には地震工学や数値シミュレーションの専門家と、実際にシステムを管理運営している技術者の共同作業が効果的である。③については、個々のシステム要素の耐震化も重要だが、システム全体の機能予測も重要であること、この種の問題は確率的に扱わざるを得ないことが、広く理解される必要がある。

(2) ライフラインの震害調査

構造物の耐震性に関する知見が、実際の地震被害の検討から始まったように、ライフラインの地震問題においても、震災の調査が基本となるべきである。しかし、従来、システム要素の一部の被害が主として定性的に論じられたことはあったが、地震後の対応や復旧の検討となると、新潟地震のガスや水道に関するものに、やや萌芽的な内容がみられた程度であった。今日でも、構造物の地震対策における耐震設計に匹敵するものが、ライフラインの地震防災においては震前・震後のソフトな対応であることは、思ったほどは理解されていない。日本においてさえ、大災害をもたらす地震が同一地域を襲うのは、100年とか200年に1回のことであり、いったん災害が発生すると、ライフライン関係者は、ほとんど経験のない状態で、応急対策や復旧活動という時間との戦いを始めなければならない。従来の地震工学には、このような場合に必要とされる経験や知識をまとめる努力が欠けていた。この点に積極的に注目した調査が最初に行われたのは宮城県沖地震であったとあってよく⁶⁵⁾、その後、新潟地震の経験を見直すこともされている⁶⁶⁾。日本海中部地震の被害地域にあった都市の規模は小さいとはいえ、ライフラインの応急対策・復旧対策に注目した調査が幾つか行われつつある。1981年から5か年計画で実施中の建設省総合技術開発プロジェクト「震害構造物の復旧技術の開発」の目標の1つもこの辺に定められている。都市供給処理施設の関係者にとって、地震被害発生後に行う応急対策・復旧対策に具体的に役立つマニュアルが作成されるならば、それは構造物の耐震設計基準にあたるものとして実務的な価値を発揮することになる。

(3) 防災行政・防災投資

このタイトルをみて、「土木の地震工学がここまで考える必要があるのだろうか」と疑問に思う人も多いであろう。しかし、地震工学の研究は具体的な防災行政に生かされなければ無意味であり、そのためには投資が必要となる。したがって、防災行政・防災投資は地震防災の根幹にかかわる問題であり、問題が重要である以上、土木工学からも積極的に関与してゆくべき分野である。実

際、この問題は、工学・理学・社会科学のすべてに関係する学際的な課題であり、さらに研究と実務の接点に位置するという複雑さをもつ。

これまでのところ、研究上の成果といえるようなものではなく、問題をどう取り扱うかという方法論もないが、ともかく、どんなことが重要になりそうかを順不同に羅列しておくことにしたい。

① 災害は震害だけではない。風水害・火災・その他の災害と比べたとき、震災軽減に対してどれほどの投資が適切かを考える必要がある。

② 地震に対して必要以上に強い構造物を作る必要はない。宮城県沖地震の道路橋下部構造の被害⁷⁴⁾や日本海中部地震の干拓堤防の被害⁴⁴⁾は、あれくらいの強さの地震動に対しては当然起こってよい被害であったのか、などが議論されなければならない。

③ 地震が地域社会に与えたインパクトの実際的な調査が必要である。停電が何日、断水が何日、被害額がいくらというレベルではなく、もっと本質に迫った検討があるはずである。

④ 都市の震災予測は、巨視的でもよいから、もっと総合化されたものでなければならない。個々のシステムの被害想定を重ね合わせに終わらず、具体的かつ統一化されたイメージが浮かぶものである必要がある。

5. あとがき

本報文は、地震工学のある部分に注目して、その現状と将来を主観的に概観したものである。なるべく、地震防災の実務面から現在の研究に欠けているところを指摘するつもりであったが、当初の目的はとも達成できなかった。また、引用文献も不十分で、かなり偏っているが、あくまでも1つの見方とご理解いただきたい。

日本の地震工学が1960年代から急激に発展した背景には、①社会的な要請が増大し、②しかも金があり、③強震記録・コンピューターなど新しい武器が手に入った、という恵まれすぎた環境があった。その結果、成果の出やすい分野の研究は出そろい、応用しやすい技術は導入しつくされた感がある。「研究が実構造物の解析のためにあり、解析が設計・施工のためにあった」よい時代が過ぎ、「研究は研究のため、解析も解析のため」という傾向がみえはじめた。研究も実務的解析も、有用性・実用性の面から見直す時機が来ているように思う。

なお、土や地盤に関する部分については、龍岡文夫(東京大学生産技術研究所)との議論が非常に参考になった。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Proc. of the World Conference on Earthquake Engineering (WCEE), Berkeley, California, June, 1956.

- 2) Proc. of the 2nd WCEE, Tokyo and Kyoto, Japan, July, 1960*.
Proc. of the 3rd WCEE, Auckland and Wellington, New Zealand, Jan.-Feb., 1965.
Proc. of the 4th WCEE, Santiago, Chile, Jan., 1969.
Proc. of the 5th WCEE, Rome, Italy, June, 1973.
Proc. of the 6th WCEE, New Delhi, India, Jan., 1977.
Proc. of the 7th WCEE, Istanbul, Turkey, 1980.
* 会議開催の年月であり, Proc. 発行のものとは異なる.
- 3) 地震工学国内シンポジウム (1962年) 講演集.
- 4) 日本地震工学シンポジウム (1966) 講演集.
第3回日本地震工学シンポジウム (1970) 講演集.
第4回日本地震工学シンポジウム (1975) 講演集.
第5回日本地震工学シンポジウム (1978) 講演集.
第6回日本地震工学シンポジウム (1982) 講演集.
- 5) Jacobsen, L.S.: Summary of Our Present Knowledge of Earthquake Engineering and Some Thoughts on Future Research, 前出 1).
- 6) Turner, M.J., Clough, R.W., Martin, H.C. and Topp, L.C.: Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures, J. Aero. Sci., Vol. 23, No. 9, Sept., 1956.
- 7) 日本建築学会: 地震動と地盤—地盤振動シンポジウム10年の歩み—, 1983年7月.
- 8) 原子力安全委員会: 発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針, 1981年7月.
- 9) 宇佐美龍夫: 東京地震地図, 新潮社, 1983年7月.
- 10) 萩原尊禮 (編著): 古地震—歴史資料と活断層からさぐる, 東京大学出版会, 1982年11月.
- 11) 片山恒雄: 地震活動度・危険度の確率論的な考え方, 生産研究, Vol. 27, No. 5, 1975年5月.
- 12) 宇津徳治: 1885年~1925年の日本の地震活動—M6以上の地震および被害地震の再調査—, 地震研究所彙報, Vol. 54, Part 2, 1979.
- 13) 宇津徳治: 1885年~1925年の日本の地震活動 (訂正と補遺), 地震研究所彙報, Vol. 57, Part 1, 1982.
- 14) 宇津徳治: 日本付近の M6.0以上の地震および被害地震の表: 1885年~1980年, 地震研究所彙報, Vol. 57, Part 3, 1982.
- 15) 気象庁: 改訂日本付近の主要地震の表 (1926年~1960年), 地震月報別冊 6, 1982.
- 16) 活断層研究会 (編): 日本の活断層—分布図と資料, 東京大学出版会, 1980年2月.
- 17) 地質調査所: 日本周辺海底地震図, 海洋地震図 23, 1983.
- 18) 土木学会: 屋外貯蔵タンクの耐震安全性検討のための入力地震波の変位特性に関する調査報告書, 1982年12月.
- 19) Kobayashi, Y. and Fujiwara T.: Ground Motions of Longer Periods in Strong Earthquakes, 前出 4) の第5回.
- 20) 田中貞二・吉沢静代・大沢 胖: やや長周期帯域における地震動の特性—東京で観測された M6以上の地震, 前出 4) の第5回.
- 21) Katayama, T. and Shino I.: An Engineering Study of Long-Period Strong Motion Using Displacement Seismograph Records, 第8回 WCEE (1984) に発表予定.
- 22) 井上涼介・藤野陽三・松原勝己・伯野元彦: 断層震源モデルを適用した周期10秒前後の地震動評価の試み, 土木学会論文報告集, No. 317, 1982年1月.
- 23) 土岐憲三: 構造物の耐震解析, 新体系土木工学 11, 技報堂出版, 1981年4月, p. 63 参照.
- 24) 栗林栄一・龍岡文夫・吉田精一: 明治以降の本邦の地盤液状化履歴, 土木研究所彙報, No. 30, 1974年12月.
- 25) 中村正博: 地中構造物の実測ひずみに基づく地震時地盤ひずみの定量的解析, 前出 4) の第6回.
- 26) 篠 泉・片山恒雄: スロッシング現象に基づく長周期地震動強度の推定, 生産研究 (投稿中).
- 27) 建設省土木研究所: 新耐震設計法 (案), 土研資料, No. 1185, 1977年3月.
- 28) 高圧ガス設備等耐震設計基準, 通商産業省告示第515号, 1981年10月.
- 29) Katayama, T.: An Engineering Prediction Model of Acceleration Response Spectra and Its Application to Seismic Hazard Mapping, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 10, No. 1, 1982.
- 30) 野中昌明・猪熊康夫・片山恒雄: 道路橋の地震被害率と設計震度選択に関する基礎的検討, 土木学会論文報告集, No. 340, 1983年12月.
- 31) 山田恭平・亀田弘行・杉戸真太・後藤尚男: 耐震工学データベース構築の試み—SERM データベースシステムの作成—, 第17回地震工学研究発表会講演概要, 1983年7月.
- 32) 荒川直士・川島一彦・田村敬一: 確率手法に基づく動的解析用入力地震動波形の設定法, 土研資料, No. 1992, 1983年3月.
- 33) 土質工学会: 実例による土質調査, 第8章 液状化対策調査—本州四国連絡橋, 番の州高架橋—, 1983年5月.
- 34) 岩崎敏男・龍岡文夫・常田賢一・安田 進: 地震時地盤液状化の程度の予測について, 土と基礎, Vol. 28, No. 4, 1980年4月.
- 35) たとえば, 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, V 耐震設計編, 1980年5月.
- 36) Tatsuoka, F., Iwasaki, T., Tokida, T., Yasuda, S., Hirose, M., Imai, T. and Kon-no, M.: A Method for Estimating Undrained Cyclic Strength of Sandy Soils Using Standard Penetration Resistances, Soils and Foundations, Vol. 18, No. 3, 1978年9月.
- 37) Tatsuoka, F., Muramatsu, M. and Sasaki, T.: Cyclic Undrained Stress-Strain Behavior of Dense Sands by Torsional Simple Shear Test, Soils and Foundations, Vol. 22, No. 2, June, 1982.
- 38) Tokimatsu, K. and Yoshimi, Y.: Field Correlation of Soil Liquefaction with SPT and Grain Size, Proc. Intern. Conf. on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Univ. of Missouri-Rolla, April, 1981.
- 39) Fu Shengcong and Tatsuoka, F.: Soil Liquefaction during Haicheng and Tangshan Earthquakes in China, 唐山地震を含む最近の中国の地震被害の耐震工学的解釈に関する日中共同研究報告書 (その1), 田村重四郎・片山恒雄・龍岡文夫共編, 東京大学生産技術研究所, 1983年11月.
- 40) 吉見吉昭: 砂地盤の液状化, 技報堂, 1980.
- 41) 佐々木康・川島一彦・宇多高明: 日本海中部地震被害調査速報, 土木技術資料, Vol. 25, No. 7, 1983年7月.
- 42) 国生剛治・沢田義博・石田勝彦・西 好一・当麻純一・平田和太・石田 毅・田中幸久: 日本海中部地震被害現地調査報告, 電力中央研究所報告・調査報告 383024, 1983年9月.
- 43) Hakuno, M., Iwasaki, T. and Tatsuoka, F.: Effects of Soil Liquefaction on Dynamic Behavior of Pile Foundations, Proc. of the Specialty Session 10, 9th Intern. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Eng., July, 1977.
- 44) Tatsuoka, F., Tokida, K., Yoshida S. and Maruyama, I.: Shake Table Tests on Dynamic Behaviors of Pile

- Foundation Model in Liquefying Sand Layers, 前出 4) の第 5 回。
- 45) 石油パイプライン事業の事業用施設の技術上の基準の細目を定める告示, 通商産業省・運輸省・建設省・自治省告示第 1 号, 1973 年 9 月。
- 46) 土木学会: 沈埋トンネル耐震設計指針 (案), 1975 年 3 月。
- 47) Tamura, C., Okamoto, S. and Hamada, M.: Dynamic Behavior of a Submerged Tunnel during Earthquakes, 東京大学生産技術研究所報告, Vol. 24, No. 5, 1975 年 3 月。
- 48) たとえば, 中山茂雄・清宮 理: 衣浦港海底トンネルにおける地震応答観測, 前出 4) の第 4 回, 矢作 枢・西山啓伸・浜田政則・泉 博允: 沈埋トンネルの地震観測と数値解析, 前出 4) の第 5 回。
- 49) 浜田政則: 大型地下タンクの地震時挙動の観測と解析, 土木学会論文報告集, No. 273, 1978 年 5 月。
- 50) 土木学会: 地下貯油施設技術指針 (案), 1980 年 5 月。
- 51) 柴林栄一・川島一彦・柴田松雄・宮田忠明: 応答変位法による地中構造物横断面の耐震設計法 および最終耐力に関する研究, 土木研究所資料, No. 1253, 1977 年 4 月。
- 52) 佐々木康・松尾 修・館山 悟: 盛土の地震による変形量の解析手法, 第 17 回土質工学研究発表会, 1982 年 6 月。
- 53) Tatsuoka, F., Sasaki, T. and Yamada S.: Settlement in Saturated Sand Induced by Cyclic Undrained Simple Shear, 第 8 回 WCEE (1984) に発表予定。
- 54) 殿内啓司・金子史夫: 盛土構造物の地震被害一被害率と沈下量について, 第 17 回地震工学研究発表会講演概要, 1983 年 7 月。
- 55) 藤本幸雄 (能代北高等学校) の私信による。
- 56) 龍岡文夫・山田真一: 土の動的性質 および 実験法 (第 2 回)―講義と実習一, 生研セミナーテキスト, コース 89, (財) 生産技術研究奨励会 (主催)・東京大学生産技術研究所 (協力), 1983 年 10 月。
- 57) 田村重四郎・岡本舜三・加藤勝行・大町達夫: ロックフィルダムの模型の振動破壊実験による 動的破壊機構の研究, 前出 4) の第 4 回。
- 58) 川井忠彦: 物理モデルによる 連続体力学諸問題の解析 (第 3 回), 生研セミナーテキスト, コース 57, 生産技術研究奨励会 (主催)・東京大学生産技術研究所 (協力), 1980 年 10 月。
- 59) 三浦房紀: 強震時における剛構造物の耐震安定性の評価, 前出 4) の第 6 回。
- 60) たとえば, 土岐憲三・小松昭雄: 井筒基礎の地震応答解析に関する研究, 土木学会論文報告集, No. 281, 1979 年 1 月。
田村重四郎・韓 国城・加藤勝行: フィルダム 砂模型の振動破壊機構に関する研究, 前出 4) の第 6 回, 平田和太・塩見 哲・上島照幸・渡辺啓行: 基礎起振実験による岩盤の弾性および減衰特性の評価 (その 1) 実験結果とその半無限弾性解に関する検討, 前出 4) の第 6 回, 上島照幸・塩見 哲・平田和太・花田和史・渡辺啓行: 基礎起振実験による 岩盤の弾性および減衰特性の評価 (その 2) 有限要素法による 動的相互作用の検討, 前出 4) の第 6 回。
- 61) 原田隆典・久保慶三郎・片山恒雄・広瀬利光: 地中円筒剛体基礎の動的ばね係数と減衰係数, 土木学会論文報告集, No. 339, 1983 年 11 月。
- 62) 片山恒雄: 供給施設の地震被害と地震防災, 日本機械学会誌, Vol. 79, No. 689, 1976 年 4 月。
- 63) 片山恒雄・磯山龍二: ライフラインの地震防災一考え方と現状報告, 生産研究, Vol. 32, No. 6, 1980 年 6 月。
- 64) たとえば, 東京都防災会議: 東京区部における地震被害の想定に関する報告書, 1978 年 5 月。
- 65) 片山恒雄・増井由春・磯山龍二: 1978 年宮城県沖地震による都市供給施設の被害と復旧一都市ガス施設一, ほか 5 編, 生産研究, Vol. 31, Nos. 2, 4, 6, 7, 8, 1979 年 2 月, 4 月, 6 月, 7 月, 8 月。
- 66) たとえば, Panoussis, G.: Seismic Reliability of Lifeline Networks, SDDA-Report No. 15, MIT-CE R 74-57, Sept. 1974, Taleb-Agha, G.: Seismic Risk Analysis of Networks, SDDA-Report No. 22, MIT-CE R 75-43, Nov., 1975, Shinozuka, M., Takada, S. and Ishikawa, H.: Some Aspects of Seismic Analysis of Underground Lifeline Systems, Journal of Pressure Vessel Technology, ASME, Vol. 101, No. 1, Feb., 1979。
- 67) 久保慶三郎・片山恒雄・佐藤暢彦: 地下埋設管震害の定量的解析, 前出 4) の第 4 回。
- 68) 片山恒雄・増井由春: 1964 年新潟地震による新潟市の上水道およびガス施設の震災復旧 (その 1), (その 2), 生産研究, Vol. 33, Nos. 1 および 2, 1981 年 1 月および 2 月。
- 69) 前出 66) の Shinozuka らによる論文。
- 70) 田村重四郎・川上英二: ライフラインのネットワークシステムの耐震性の一評価方法について, 生産研究, Vol. 30, No. 7, 1978 年 7 月。
- 71) Shinozuka, M. and TanR, .Y.: Estimation and Optimization of the Serviceability of Underground Water Transmission Network Systems under Seismic Risk, Proc. of Review Meeting of U.S.-Japan Cooperative Research on Seismic Risk Analysis and Its Application to Reliability-Based Design of Lifeline Systems, Gakujutsu Bunken Fukyu-kai, Jan., 1981。
- 72) 磯山龍二・片山恒雄: 大規模水道システムの地震時信頼度評価法, 土木学会論文報告集, No. 321, 1982 年 5 月。
- 73) Kameda, H., Goto, H., Sugito, M. and Asaoka, K.: Seismic Risk and Performance of Water Lifelines, Probabilistic Methods in Structural Engineering (co-edited by M. Shinozuka and J.T.P. Yao), ASCE, Oct., 1981。
- 74) 日本道路協会: 宮城県沖地震による 道路橋の被害ならびに 支承部の耐震性に関する調査報告書, 1980 年 3 月。
(1983.12.16 受付)