

## 土木工学における耐震研究のあゆみ

Developments in Earthquake Engineering Research on Civil Engineering Structures

久保 慶三郎\*

Keizaburo KUBO

## 1. ま え が き

土木工学が研究の対象としている構造物は多岐にわたっている。すなわちダム、橋梁を初めとして、鉄道・道路・港湾施設・上下水道および沈埋トンネルなどがある。これらの構造物の地震時の挙動はそれらを支持する地盤または周辺の地盤に強く影響されるので、これらの構造物の耐震設計または動的解析にあたっては、地盤を含めた構造系をモデル化しなければならない。この点で高層ビルとは異質のものである。高層ビルは地盤に埋込まれたはり（せん断振動が卓越している）として一般に解析される。

建築物はそれ自身は点的存在であるが、都市の構成要素としては面的存在であり、個々の振動特性は互いに相異していても、数が非常に多いので、統計的に震害をうまく調査することができる。このために地震の強さをあらゆる気象庁の震度階のⅦでは木造建物の倒壊率が30%以下の場合、またⅧでは木造建物の倒壊率が30%以上の場合と規定されており、地震の強さをあらゆるのに建物の倒壊率を尺度として用いている。

一方土木構造物の挙動、あるいは変形特性は相互にかなり異なっているし、その存在も点的または線的存在であり、数も少ないので統計調査をしても、地震の強さとよい対応を示すデータは求められにくい。1例を述べると、新潟地震で新潟市にあったケタ式橋梁の昭和大橋、八千代橋は大被害を受け、通行不能になったが、アーチ式橋梁の万代橋は小被害で、地震後も新潟駅と市の中心とを結ぶ主要道路として、大いに役立った。橋梁では新潟市の橋のように、橋の型式によって耐震強度が異なるが、同一型式の橋でも橋脚の高さ、地盤条件、橋の長さなどによって耐震強度が変化するので、統計資料を作ってもデータのバラツキの大きいものになってしまう。

上述のように土木工学における耐震研究で対象となる構造物は多岐多様にわたっていることも一因かと思うが、建築物の耐震研究の方が土木構造物のそれより進歩しているように思われる。すなわち地下埋設管の地震時挙動の研究および耐震設計法の開発は数年前に本格的に行われ始めた研究で、都市内のトンネルについても同様の状態である。高層ビルでは非線型挙動の解析がさかんに行

われているが、橋の動的解析では弾性挙動の解析が主たるもので、一部に非線型挙動の解析が進められているのが現状である。橋梁といっても昭和の大橋のようなケタ式の橋、万代橋のようなアーチ式の橋、若戸大橋、関門橋のような吊橋があり、アーチ式の橋にも鉄筋コンクリート製のものと、西海橋のような鋼製のものもあり、橋の長さ、大きさも個々別々であるので、固有振動数、固有モードを求めるのに弾性解析だけでも大変な作業であるため、現状では非線形解析にまでなかなか手がとどかないでいる。

過去においては、一般の関心は建物に集中していたように思われる。その理由としては、住は衣食につぐものであることと、建物の倒壊によって多くの人命が失われることが挙げられると思う。橋とか鉄道の震害は住の源である建物の震害に較べると軽視されても、致し方ないのかも知れない。サンフェルナンド地震で高架橋が落橋し、たまたまその下を通過しようとした車が押しつぶされ、車内の人が死亡する事故が起こったし、関東地震で発生した山津波が現在の東海道線の根府川駅付近で走行中の列車を海に追落とし、111人の生命が失われた事故が発生した。これらの例は特殊なもので、一般的には土木構造物の倒壊は直接的には人命の損失をとまなわれない。しかしながら近代の都市生活においては、水道・ガス・道路などの土木構造物は市民生活に大変深くかかわりあいをもってきている。すなわち上下水道施設が震害を受けると、現在の市民は飲料水の確保が困難になるし、水洗便所の使用は不可能になるので、市民生活が大変悪い状態におかれることになり、食あるいは住の一部がおびやかされることになる。道路・鉄道にしてもしかりであって、大量の物資が近代の大都市では消費されているので、輸送機関の機能が地震によって破壊されると、物資の供給が極端に悪くなり、復興の遅延をまねき、経済的混乱が起こる。

昨年の11月8日から12日まで、ライフライン系に重点をおいた地震工学の日米セミナーが開催された。このセミナーの題目となっているライフラインとは、電気・水道・ガスなどのエネルギー供給施設と道路・鉄道などの輸送施設を総称したものである。30人以上の日米の耐震研究者がライフラインの耐震問題を一堂に会して研究発表を行い、討議したことは画期的なことであると同時に、土木構造物の地震時安全の問題が次第に世界の人々によ

\* 東京大学生産技術研究所 第5部

て認識され始めていることを意味しているものである。

アメリカの土木学会の中にはライフライン系の構造物の地震工学的研究を促進させる特別委員会が設置され、今年で3年目になるが、わが国では水道・ガス・道路・鉄道などの耐震問題は土木工学の一分野としてすでに存在し、研究が続けられてきている。

建設省が昭和47年度から5年をかけて、耐震設計法のまとめ作業を行い、つい最近新耐震設計法なるものを発表した。これは示方書ではなく、示方書の基礎となる耐震設計法の考え方をまとめたものである。この中に従来の震度法、あるいは修正震度法とともに、変位法という新しい設計法が提案されている。建物・橋梁・ダム等のような構造物に及ぼす地震の影響は慣性力、あるいは静的水平荷重を作用させて評価され、地震荷重に対して、構造全体が安定（転倒または滑動しない）であるか否か、また構造の一部に応力が過大になっているか否かを調べ、耐震性の検討を行ってきた。しかしながら埋設管・沈埋トンネル・都市内のトンネル（地下鉄・コンコース等）のような構造物は構造物自身に作用する慣性力よりは地盤の強制変位による応力で地震の影響を評価する方がより合理的であると考えられるようになり、ここに変位法という新しい設計法が提案されたのである。エネルギー供給施設のほとんど全部は震度法で設計されるよりは変位法で設計しなければならない構造物であり、今まで設計手法を模索していたため地下埋設物の地震工学研究は建物・橋梁などの構造物の研究より遅れたと思われる。震度法は既に発明されてから、50年を経過しているのに反し、変位法は数年を経過しているのみで、その体系も完全に固まったものではない、完全な設計体系にするにはさらに多くの研究が積重ねられなければならないであろう。

いずれにしても、土木構造物あるいはライフライン系の地震工学的研究は今後かなりの速度で発展するものと思われるが、以下にその歴史的発展を特に当研究所の研究とのかかわりあいを中心にして述べたい。同時に今後の問題点についても付言するつもりである。

## 2. 耐震設計法の歴史的発展

ここでは主として最近10年間の地震工学的研究の発展を述べるのであるが、過去にさかのぼって、震度法の誕生から、最近の動的解析までの歴史を簡単にふり返っておくと、読者に便ではないかと考え、過去の発展過程を四つの段階にわけて、簡単に各段階の特徴を述べる。

四つの段階とは、

- (1) 1915年まで
- (2) 1915年より1948年まで
- (3) 1948年より1960年まで
- (4) 1960年以降

である。

1891年10月28日（明治24年）に濃尾地震がわが国の中部を中心に襲い、有名な根尾谷の断層が出現した。

これまで、欧米の技術の吸収に営々とした先輩は、わが国の構造物の設計には地震の影響を考慮する必要を痛感された。地震のほとんどない欧米の構造物の設計には地震の影響は全く考慮されていないが、大地震のしばしば発生するわが国の構造物は地震を念頭において設計しなければ大変なことになるというので、地震の研究、耐震構造物の設計法の研究がわが国において開始された。このために、まず震災予防調査会が設立され、1923年の関東地震の頃まで研究が同調査会を舞台に展開され、多くのすぐれた研究成果が挙げられた。それらのうちで耐震工学の分野で特記すべきものが、1915年（大正4年）に「震災予防調査会報告83号」の佐野利器先生の「家屋耐震構造論」であった。この論文は構造物を耐震的ならしめるために、震度法という画期的な方法を提案されたもので、この考え方は現在も構造物の耐震設計の主流をなしている世界的な発明であった。一般に地震の現象は複雑であり、構造物の地震時挙動も千差万別であるので、地震に強い構造物を設計する手法を発見するのは至難のことと思われるが、地震の構造物への影響を自重×設計震度で求められる力を構造物に水平に作用させて、構造物の安定、部材の強度をはかれば、耐震的な構造が設計できると考えたのが震度法である。しかしこの優れた方法も濃尾地震が発生してから発見されるまでに約4分の1世紀を要した。

つぎの段階は震度法が定着していった時代である。震度法が発見され、大正時代に設計された構造物のなかには、この考え方をういて設計された構造物もいくつかは存在するが、示方書などに明文化されたのは、関東地震を経て昭和の初めになってからである。示方書以前にあっては設計者の判断で設計震度を0.1～0.15として、耐震安全性を検討していた。1923年の関東大地震はわが国の中枢部を襲った大地震であり、社会経済的にも重要な地震であるが、耐震工学の分野においても、この地震を契機にして、震度法が各種構造物の示方書に採用され始めた点で画期的な地震といえると思う。

土木工学の分野でも、昭和の初めに、鉄道橋および道路橋の設計示方書に「地震の影響」あるいは「地震荷重」の項が設けられた。ついで港湾構造物・ダムなどの設計示方書にも震度法にもついで規定が採用された。この段階は震度法の定着と同時に、構造物の振動特性の理論的解明も行われ、ダムや橋梁の動特性についての多くの論文が発表された。また地震時土圧に関する実験的研究も内務省土木試験所（現在の建設省土木研究所に対応している）において、振動台上の砂箱を用い地震時土圧の実験的研究がなされると同時に、地震時土圧に関する有

名な物部公式が発表されている。

関東地震以後も1948年までに、つぎの地震がわが国を襲い、比較的大きい震害を発生せしめている。すなわち1927年の北丹後地震、1930年の北伊豆地震(この地震で丹那断層が当時建設中であった東海道線の丹那トンネルを横切り、トンネルがずれた)、1933年の三陸沖地震(岩手県の太平洋岸の多くの町が津波で大被害をうけた)、1935年の静岡地震、1943年の鳥取地震、1944年の東南海地震(名古屋付近がかなり大きい被害をうけた模様であるが、戦争中のため記録がほとんどない)および1946年の南海道地震である。

第3の段階の初まりの1948年は福井地震の発生した年であり、終わりの1960年は第2回世界地震工学会議が東京および京都で開催された年である。第2の段階の間に地震工学および土質力学は進歩し、研究者の層も次第に厚くなっていった。1948年の福井地震では、かつてなかったことが起こった。すなわち震害調査に日本学術会議は福井地震調査研究特別委員会を設置して、地震・建築・土木の各分野の専門家を大動員して、大和デパートの調査を初めとして、綿密な調査を実施したことであった。福井地震を契機として、耐震設計法が見直され、従来全国一律に同一の値の設計震度を用いていたのを改め、地域別係数、地盤別係数を基準の値に乘じたものを設計震度とすることになった。前者はわが国の地震活動度が地域によって異なり、例えば東京地方と北海道の稚内地方では、東京地方の方がより大地震に襲われる確率が高いので、両地方に同一の値の設計震度を用いて構造物を設計するのは経済的に不合理であると考え、設定したものである。後者は過去の多くの震害例を分析した結果、地盤の硬軟によって、震害の度合が異なっていることが明らかとなり、土木構造物では、地盤の軟い地域で被害がより大きくでることが結論されたので、同一都市あるいは同一地方内であっても、地盤の種別によって、設計震度を変えるべきであるとしたものである。

地域別係数を決めるのに有力な資料として用いられたのが河角広先生の震度期待地図で、この地図は599年以後の343個の地震の加速度分布を計算し、これから統計的に求めたものである。国鉄の土木構造物の設計基準、ダム設計基準などは、上述の震度期待地図を修正し、全国を2~3地区に区分し、それぞれの地区の係数を定めているが、「水道施設の耐震工法」で規定されている水道施設用の地域別係数は河角先生の震度期待地図の分布をそのまま採用している。地域別係数を決めるわが国における最大加速度分布図、あるいは最大速度分布図については、その後数個の論文がでて、建設省の新耐震設計法で述べられている地域別係数を定める基礎データとなっている。設計震度を決めるのに過去の統計的資料にのみとづいて、地震地殻構造学の成果が採り入れられてい

ないことは、地震の再現期間が長く、統計資料が再現期間より短いときに問題があるようにも考えられるが、設計震度の値があまり不確定な要素でしばしば変更されるのも耐震設計上好ましくないであろう。

地域別係数や地盤別係数のほかに、構造物の固有周期の関数として設計震度を定める考え方も第3の段階で実用に供せられている。このようにして、福井地震以後に震度法が地域・地盤・構造物の振動特性、構造物の重要度などを考慮し、より合理的なものへ改善されていったのが第3の段階であった。しかし本来動力学的な地震の影響を静力学的な荷重に置き換えているのであるから、いかに多くの要因を採り入れても、しょせんは完璧な答えはえられないものではない。

構造物の地震時挙動を振動学的に解析せんとする論文は震災予防調査会の時代以降数多く発表されているし、地震のような不規則の入力の作用するときの1質点系の応答は古くからDuhamelの積分として知られている。しかしながらこの積分は正弦波入力以外の入力に対しては手計算時代は不可能であったので、地震時の構造物の応答のような問題は解かれていなかった。1945年にA.Biotが電子計算機を用いて、不規則な入力が作用したときの応答計算を行うことに成功し、ついで米国で地震入力が作用したときの応答計算が試みられ、1960年の第2回世界地震工学会議の席上でこの種の計算結果が発表され、それ以後わが国の耐震工学の方向も大きく軌道修正されることになる。かくして耐震工学も第4の段階に入り、動的解析の時代となる。静的震度法が発明されてから、約半世紀を経て、動的計算にもとづいて、耐震設計を行う方法が実用化せんとしているわけで、すぐれた手法が編み出されるには長い時間を必要とするのは、構造力学の理論にしても然りであって、正に「ローマは1日にして成らず」ではないかと思う。

本文では最近の10年間の耐震研究の発展を述べることになっているので、時期的には第4の段階での研究が主として述べられる。以下に対象別に研究の展開を紹介したいと思う。

### 3. 橋 梁

橋梁の動的解析を論ずるときは、高速道路調査会の高橋脚耐震設計分科会を第一に挙げなければならない。昭和39年に日本道路公団の中央道の境川橋の設計において橋脚の高さが約40mを越えることになり、このような高い橋脚は地震の経験は皆無というので、従来道路橋の耐震計算に用いられていた手法をそのまま適用するのは問題があるということで、前記の分科会が発足し、動的解析の手法を用いて、境川橋の地震時挙動を解明し、あわせて高い橋脚の耐震設計法を得るべく研究が始められた。本所からも筆者ほか2,3の教官がこの研究に参加した。

振動解析には岡本舜三先生の動的4モーメント法が用いられ、ケタと橋脚を含む全橋をモデル化し、固有振動数、固有振動モードの解析を行い、エルセントロで1940年記録された地震波を最大加速度値200ガルに下げた入力波形として、ケタの変位、橋脚中の最大応力を計算した。この結果、静的震度法で設計された配筋量では、計算された最大応力は許容応力を若干超過することが判明し、鉄筋量を増加させ、境川橋は完成を見た。

一般に高い橋脚を設計する場合に境川橋と同様な問題の発生が予想されたので、高橋脚耐震設計分科会では、3径間の連続橋の橋脚の高さを種々に変化させたモデルについて動的解析をさらに進め、地震の入力波形もエルセントロの記録波以外のものを用い、主としてケタおよび橋脚の曲げ応力を求めた。この結果は従来の道路橋の示方書では危険側に出ることとなり、高さが25mを越える橋脚は高さによる設計震度の割り増しを考慮するように日本道路公団に提案し、同公団の高橋脚に対する耐震設計の示方書が定められた。

構造物の動的解析に際しては、モデルの妥当性と減衰常数の評価が問題となる。高い橋脚で行った動的解析においても、この二つの問題は重要であり、かつ実橋によって確かめられなければならない問題であった。中央道の底沢橋と東名高速道の酒匂川橋の橋脚の振動実験が昭和42年、43年に行われた。上部構造を含む全体系の減衰特性を求めめるためには、橋脚独自の減衰特性、弾性定数を知る必要があると考え、この種の実験が行われたが、この実験も高橋脚耐震設計分科会が大いに関与した。特に酒匂川の橋脚は60mを越すものがあり、この振動実験の振動源としては、底沢橋の橋脚で開発し、実験済であったロケットの推力が用いられた。これらの実験から求められた橋脚独自の減衰常数は微小変位の値ではあったが2%程度のもので、期待した値よりはかなり低かった。

底沢橋は5径間の橋梁(全長327.653m=61.005+85.421+61.009+59.009+59.009)で、最高の橋脚は53.5mであった。この橋は上部構造のトラスの架設後、起振機による振動実験が行われた。解析を行い固有振動数および固有振動モードの実験値と計算値との比較を行い、ケタ端部の支持条件はピンとするのがよいことが明らかにされたほか、減衰常数は2%前後の値にとどまっていることが判明した。

その後も広島大橋、大島大橋(山口県)など特殊な橋については振動実験が行われ、計算値と実験値の比較が継続して行われ、資料の蓄積がはかられている。またこれらの調査研究は外国において少なく、わが国での研究は高く評価されている。

橋梁の動的解析は以上の分科会での調査研究に先立って、本所においては昭和29年から日本道路公団からの依頼を受けて、若戸大橋(北九州市)の動的挙動の解析と

動的設計法の開発の研究を行っていた。100分の1のモデルを製作し、同位相および異なった位相で振動する2台の振動台の上にモデルを設置し、振動特性の把握、理論値の検討、異なった位相で吊橋の両端が運動する場合の応答変位、ケーブル内の応力などを究明した。動的解析には到らなかったが、吊橋を動的なものとして設計する手法を提案した。これらの研究成果を考慮し、地震時に橋脚天端が50cm変位しても安全のように設計されており、この値は動的検討結果算出された値であった。この場合も減衰常数の値は計算結果に密接に関係するが、大スパンの吊橋の実測結果が少なかったため、わが国の100m以上の吊橋5橋について振動実験を自らの手で行った結果としては、吊橋の減衰常数は他の橋梁のそれより1桁小さく、0.2~0.6%であることを明らかにした。最近では本州四国連絡橋用の吊橋の架設が現実問題となり、土木学会内の委員会などで解析モデル、解析に使われるインプット、および解析結果と耐震設計などについて、長い年月議論され、動的解析の手法が本四連絡橋の計算に用いられている。

高い橋脚や吊橋のような地震の洗礼を受けていない構造物については、動的解析を行い、なるべく多くの種類の入力波形について応答計算をし、地震時挙動を推定するよりはかに適当な方法がない。地震を経験していない構造物としては取付道路(橋脚の高さが順々に変化し、平面線形は曲線)が挙げられる。また長大のプレストレストコンクリート橋(例えば浦戸大橋、彦島大橋、浜名大橋など)も同様で、これらについても動的解析が行われている。

以上のような特殊な型式、大きさの橋梁では固有振動数、振動モードが重要視される結果、ほとんどの場合弾性応答(構造物が弾性変形する範囲での応答計算)が行われ、非線形応答あるいは弾塑性応答までは解析が進んでいない。しかし耐震設計で重要なことは、構造物が弾性範囲にとどまることではなく、弾塑性状態にあっても、致命的な被害からまぬかれていることであるし、また弾塑性状態から破壊まで研究しておかないと、真の意味での構造物の耐震強度を明確化しえたいとはいえない。筆者の研究室で1970年に鋼製モデルの弾塑性領域での挙動を明らかにするための実験を行った。

表-1 実験した模型ラーメンの諸元

模型名	主 桁		主 柱	固有振動数 (Hz)
	I (cm <sup>4</sup> )	W (kg)		
A 1	7.43	33	0.0278	7.36
A 2	7.43	66	0.0278	5.55
A 3	7.43	110	0.0278	4.25
B	7.43	110	0.0556	5.89
C	7.43	110	0.0834	7.10

実験モデルは剛体ばりを2本の柱で支持した構造を用い、表-1に示す柱の剛性、ケタの重さをもつ5種類について振動台による加振実験を行った。図-1は実験結果の代表的な例を示す。横軸には振動台の加速度と質

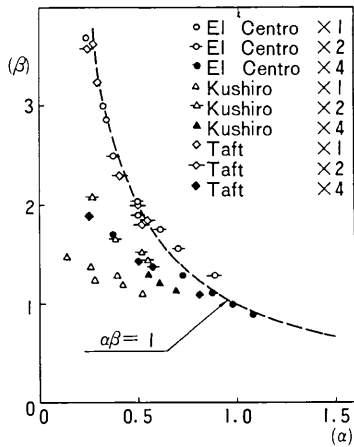


図-1 ランダム波加振における加速度応答倍率と $\alpha$ の関係

量の積に対する試験片を降伏させるに必要な力の比を、縦軸には応答加速度倍率をとってある。振動台の加速度の小さい間、換言すれば、試験片がまだ弾性を保持している間は、応答倍率は入力波形の周波数特性によって大きく変化する(図-1の左側のパラツキ参照)。しかしながら振動台の加速度が大きくなり、塑性状態がかなり進んでくると、減衰常数も大きくなり、応答倍率は入力波形の差による影響はほとんど受けなくなる。すなわち如何なる特性の入力波形を用いても応答倍率は同じになる。このことは弾塑性応答計算によっても検証されている。したがって降伏を生ぜしめるような大きい応答倍率を与える地震入力とその応答を問題にする限り、入力波形の特性は重要な研究テーマとはいいい難いことが判明したわけである。

橋梁を如何にして耐震的ならしめるかという命題は耐震設計の窮極の目的であろう。静的震度法も動的解析も実験的研究も地震に強い橋をつくるために行われてきたのであるが、どの項目が橋梁の耐震強度と直接関係をもっているかという調査も、耐震的橋を作る上にはより直接的な調査研究ではないかと思う。幸いにして、数量化理論という便利な方法があるので、過去の震害をうけた橋梁を標本にして、各要因の重み係数を出すことにより、各要因の橋梁の耐震性向上への寄与率を求めることができた。詳細は本年の3月号の「生産研究」に報告されているので、ここでは概要のみ記すことにする。

標本の橋としては大被害から小被害までの震害橋30橋をえらび、項目としては、地盤の良否、液状化の有無、上部構造の形式(ケタ式かアーチ式か)、支承条件、橋脚の高さ、径間数、橋脚の天端幅、架橋地点での地震の

強さ、基礎工の形式について、カテゴリー別の係数を計算した。この結果、橋の落橋に強い影響をもつ項目として、地震の強さ、上部構造の形式が指摘され、ついで液状化の有無があげられ、地盤の種類、基礎工の種類などは橋の耐震設計上あまり重要な影響をもつものでないことが示された。なお標本により、各カテゴリーの重み係数は変化するので、異なった標本の橋についても計算する必要がある。またこの結果を利用すると、橋の震害の判定基準にもなりうるものと思われる。

統計解析で地震の強さが最も重要なかわりあいをもっていることが明らかになったのと平行して、地震入力の特性が地震の規模、地盤条件、震央距離でどのように変化するかについて、片山助教授が解析し、地震のマグニチュードが大きいときには震源付近では加速度倍率も大きくなると同時に、加速度倍率が大きくなっている振動数帯域も広くなり、多くの構造物の被害を大きくする要素が他の条件の地震より強いことを明らかにした。

橋梁の耐震強度の研究も現在までのところ穴だらけで今後研究を強化拡充してゆく必要がある。特に動的破壊の研究はぜひとも必要と思われる。現在でも数多くの橋とその付近の地盤で強震観測の事業が続けられており、大地震時の橋の挙動の解明のためのデータを得ようとしている。

#### 4. ダ ム

建設技術の進歩により橋梁が長大化してきたが、ダムの高さもまた容積もしだいに大きくなると同時に一時代のコンクリートダムに代って、最近の高いフィルタイプのダムが世界的にも数多く建設されつつある。大学における研究もコンクリートダム、アーチダムの地震時挙動から、フィルタイプのダムの動的挙動、動的破壊へと移行しているようである。

コンクリート重力ダムはインドのコイナダムで震害をうけ、水平の亀裂が数多く発生したが、転倒には到らなかった。一般的にはこの種のダムは研究室での研究対象からはづれており、主として実ダムについて地震観測が行われているのが現状である。地震観測の項目としては、ダムに作用する地震時動水圧、各エレベーションにおける加速度分布などがあり、三次元的挙動も注目されている研究題目であろう。

コンクリートアーチダムはわが国においては戦後初めて建設されたもので、模型実験が設計の段階で実施され解析モデルの選定や、安全率の検討資料となってきた。研究の初期にあつては石膏・珪藻土の混合材が模型材料として使用されてきたが、模型の特徴としては、ダム本体と同時に周辺の岩盤も含まれた系の模型が製作されていた点で、ダムと周辺地盤との相互作用が、アーチダムでは重要欠くべからざるテーマである。このような模型

は岩盤を含んでいるので大型モデルとなり振動台で加振実験を行うことはかなり困難であった。したがってアーチダムの模型も小さく、かつ模型材料としてヤング係数の低い、強度の弱いものを使用せざるを得なかった。しかし岡本舜三先生が当研究所におられたときに、以下に述べる加振装置を考案され、それにより、やや大きいモデルでしかもコンクリートのダムの振動試験が行えるようになり、アーチダムの地震時挙動の解明に大変貢献した。

地盤の変位を $z$ 、ダムの相対変位を $u$ 、ダム表面の $A$ なる面積をもつ水平の角柱の質量を $m$ とすると $m$ についての運動方程式は

$$m \frac{d^2 u}{dt^2} + (k_1 + ik_2)u = m \frac{d^2 z}{dt^2}$$

となる。ここに $k_1$ 、 $ik_2$ は複素バネの実数部および虚部をあらわしている。右辺の項は $m$ に働く地震外力であるので、振動台の台加速度を $d^2z/dt^2$ としても、この力は得られるが、 $u$ に無関係で $m d^2z/dt^2$ を外力として $m$ に作用させても得られる。この方式によると岩盤を振動させる必要はなく、 $m$ あるいはアーチダムのみに上記の外力を作用させれば、振動台の加振実験と同じ実験をしていることになるというものである。質量 $m$ に作用させる力は $u$ に無関係でなければならず、ダムの変位によって変化するものであってはならないので、実験では動コイルの線輪に $m d^2z/dt^2$ に比例した電流を流し、電磁片をダムの模型に埋込んで、所定の外力を作用させることに成功し、アーチダムの振動解析に新しい有益な方法を開拓した。

フィルタイプのダムは現在最も多く建設され、また高さも200 mに近いものまでになっている。この種のダムは、動的破壊機構、換言すればすべり破壊の機構の解明と耐震性向上のための対策が必要であろう。田村研究室では大型振動台(長さ10 m、高さ4 m、幅2 m)を用いてアースダムおよびロックフィルダムの地震時挙動と破壊機構の解析をここ10年以上にわたって実施してきた。すべり線の実験的研究、有限要素法を用いた内部応力の解析などを行っているが、同時に実ダムについても地震観測を行い、論文としてまとめ発表している。

最近建設されたフィルタイプのダムには加速度計(水平および上下成分)、間隙水圧計などが埋込まれ、大地震時にいかなる挙動を示すかを把握しようと、各方面での努力が続けられているが、現在までに被害と直接結びつく挙動に関するデータは得られていない。

## 5. 沈埋トンネル

港の入口や河口を横断して道路、鉄道を建設する場合、昔は橋が架設されたが、現今では数ヶ所で橋に代って、軟弱地盤の所で沈埋トンネルが建設されている。沈埋トンネルの主なものとして、多摩川を羽田の所で横断する

鉄道トンネル、川崎市と扇島とを結ぶ扇島トンネル、東京湾の湾岸道路と東京港への航路との交わる点に作られた首都高速道路公園のトンネル、愛知県の衣浦港を横断する港湾局の衣浦港トンネルなどがある。また東京湾の横断道路の一部に沈埋トンネルが計画されている。

これらのトンネルはいずれも地震工学上問題の多い軟弱な地盤に設置されるもので、表層掘削し、平坦化した上に鋼製あるいは鉄筋コンクリート製のトンネル(全長を数区間に分割したもの)を設置し、相互に圧接し建設してゆくもので、トンネルの側方および上部は液状化のおそれのない土で被ってしまう構造である。地震時のときいかなる挙動をこの沈埋トンネルが示すかは、トンネルの耐震性の検討からも重要であるが、特に沈埋トンネルは地震を全く経験していない点からも、沈埋トンネルの地震時挙動はその表現に不可欠の研究問題であった。

多摩川のトンネル初め扇島トンネル、衣浦港トンネルとも完成後、加速度計やひずみ計が設置され、地震時挙動の観測が行われている。特に多摩川の鉄道トンネルは岡本・田村両先生の研究室で長年月観測が続けられており、最もデータが多くとれているトンネルである。過去の観測記録によると、トンネルのひずみ波形は加速度記録とはよい一致を示さず、むしろ地盤の変位とよい対応があること、一般にはトンネル軸方向のひずみが曲げひずみより卓越して出現しているが、地震波の特性によっては曲げひずみを無視できない例もあることが明らかにされ、これらの観測データと室内の模型実験結果にもとづいて、沈埋トンネルのシミュレーションモデルを作り、地震時発生応力の計算方式を提案している。土木学会内に沈埋トンネルの耐震設計研究小委員会が発足し、岡本先生を委員長に、田村先生を幹事長にお願いし、筆者らも参加し、沈埋トンネルの耐震設計法の規準を提案した。この規準は英訳され、世界の耐震規定集にも発表、出版されている。

シミュレーションモデルではトンネル周辺地盤の地震時の応答変位の計算、地盤変位によるトンネルの変形、応力の計算が主たるものであり、これらの計算はトンネル軸方向とトンネル軸直角方向の2方向について行われる。地盤の変位とトンネルとを結ぶ地盤のバネは有限要素法モデルで計算され、トンネルは軸方向および軸直角方向にそれぞれ剛性をもつものとして計算が行われる。

解析結果によると、換気用立坑(地盤中に深く根入れしてあるので、剛性が沈埋トンネルに比して大である)と沈埋トンネルとは剛性が異なるために、地震時応答変位も異なり、その結果立坑とトンネルとの接合部付近には他のトンネル部分より大きく曲げ応力が発生することが指摘されている。この応力集中を除去するために、立坑とトンネルとの接合部にヒンジを挿入する案があり、実用にも供されている。

これらの解析結果の検証を行うため、他の土木構造物と同じく、地震観測が行われ、計算値との比較がなされたが、現在までのところ観測データが少ないので早急な結論を下すことは大変であるが、解析計算は観測値に近い値を示しているため、沈埋トンネルの耐震計算法はそれほど大きい誤りは犯していないものと考えられる。

## 6. 地下埋設管

沈埋トンネル、地下埋設管などは地震時に作用する慣性力によって破壊されると仮定すると、震害の実体がうまく説明できなく、むしろ逆の結果にもなる。この点では、ダム・橋梁などは異質の構造物である。したがって、その耐震設計法も橋梁などに用いられている震度法では正鵠を射たものとはならず、別の耐震設計法を開発しなければならない。

地下埋設管の地震工学的研究では、研究の当初から動的挙動の解析や耐震規準の策定が始まったわけではなく、震害の実体の究明から始まり、ついで模型パイプの振動実験が各関係機関で実施され、変位法と名付けられた耐震設計法が提案された。

震害の実体調査の第一は関東地震による東京市の水道の震害調査で、この中で岡本先生は水道管の被害の激しかった地域分布は、家屋のそれと異なる事実を指摘し、両者の震害発生原因が異なることを示唆された。筆者らも同じ資料を用い、1 kmメッシュ内の水道管の震害係数(震害の発生件数を有効面積と人口密度とで除した値)と地盤種別および地表層による振動倍率との関係を調査した。この調査においては水道管の震害率(単位長さ当たりの震害個数)に関するデータがあれば最も都合がよかったが、関東地震当時のメッシュ内の延長料は不明であったので、埋設長は人口密度に比例するものと仮定して、震害率の代りに上述の震害係数を震害の程度を示すインデックスとした。地盤は関東ローム、溺れ谷の地質、

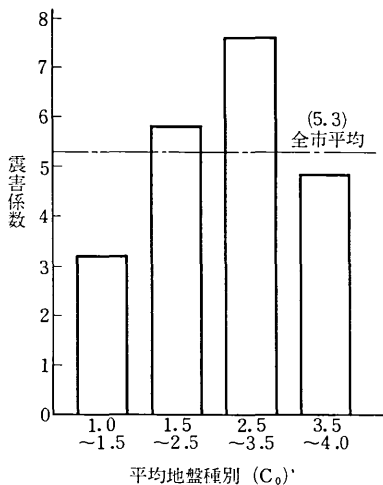


図-2 地盤と水道管の震害との関係

中間深さの沖積層、下町の厚い沖積層の4種にわけ、各メッシュ内の地盤を1~4で数値化し、数値化された地盤と震害係数との関係、メッシュ内の地表層の増幅率と震害係数との関係などを調査した。特筆すべき結論は、震害係数は厚い沖積層地域(家屋の震害率は最も高い地域)ではなく、むしろ厚い沖積層から硬い地盤に移行する地域で最大となっている点である。この調査結果は上述の家屋と水道管との震害特性と矛盾するものではない。

(図-2参照)

以上のほか、新潟地震による新潟市の水道管およびガス管の十勝沖地震における青森市の水道管の震害、外国における水道管・オイルパイプなどの震害が調査された。これらの調査によると、地下埋設管の震害率は地盤の動きに支配されることおよび、管の継手が管路の弱点になっていることが明らかにされた。

最初の地下埋設管の振動実験は電力中央研究所、東京電力KKおよび中部電力KKの研究グループによって行われた。加振源としては、当時群発地震を起こしていた松代地震が利用され、松代変電所構内に設置されたパイプのひずみ、加速度の分布および地盤内の加速度分布が測定され、埋設されたパイプでは軸ひずみの方が曲げひずみより優越して現れること、パイプの変形は地盤の変形に類似しており、地盤の加速度とはよい対応を示さないことなどが明らかにされた。その後、日本鋼管KKや港湾技術研究所などが板たたき法で作られたせん断波あるいはダイナマイトによる発破などを用いた実験を行い、地下埋設管の挙動は地盤の変位挙動と密接な関係があることを述べた。港湾技術研究所の実験の目的は沈埋トンネルの地震時挙動を明らかにすることにあり、モデルとして塩化ビニール管が用いられたので、説明の都合上本節で紹介したものである。

地下埋設管の震害調査や模型実験が行われ、研究が活発化している間に、石油をパイプラインで輸送する気運が高まってきて、1971年のサンフェルナンド地震によるガス管・石油パイプラインの震害に加速され、石油パイプラインの耐震設計の規準を制定する会議が政府内に設けられ、精力的に審議し昭和48年には石油パイプライン事業法に関する規準として発表された。告示の中に石油パイプラインの耐震設計法が述べられており、地盤は正弦波的運動をするものと仮定し、その振幅、波長の計算式およびパイプ(地盤バネで支持された弾性床上のはりのモデル)の応力算定式が提案された。この方法は地盤の変位とそれを入力とする弾性床上のはり内の軸方向応力、曲げ応力が求められるので、最近の用語では「変位法」と呼んでいる。変位法は橋梁や建築物の耐震設計に用いられている慣性力にもつづいた震度法あるいは修正震度法に対応し、特に地下構造物の耐震設計に用いられる方法で、これにより永年模索していた地下埋設管の耐

震設計の手法が開発されたことになった。しかしながらこの計算式は平行な層構造の地盤中のパイプラインについての計算式であって平面的に軟弱地盤と硬い地盤とが存在する地域を通過している地下埋設管は別の考え方で設計しなければならない。このような特殊な場合に対する計算式は今後の研究課題であり、地震動の変位振幅と地盤との関係を説明する必要がある。

筆者らが平面的に硬軟の地盤が存在し、両地盤を貫通しているパイプラインについて、シミュレーションモデルを用いて計算した例がある。硬い地盤としては土層程度の地盤を考え、軟弱な地盤はせん断波速度で $60\text{m/sec}$ から $200\text{m/sec}$ までの4種類の地盤を想定し、地震層の厚さ $25\text{m}$ と仮定して計算を行った。地盤は計算を簡便にするため弾性と仮定した。計算の結果、1)パイプの軸力は硬軟地盤の境界付近に発生すること、2)パイプの軸力は軟弱地盤のせん断波速度が小さいほど、換言すれば地盤が軟らかくなればなるほど大きくなることなどが判明した。震害をシミュレーションモデルで説明するためには、地盤の弾塑性領域について、上記のような計算をする必要があると考えられる。

最後に水道管の震害率を地震動との関係について述べる。関東地震による東京市の水道管の破損箇所は水道管の延長 $1\text{km}$ につき $0.22$ ヶ所であった。漏水箇所はこれよりはるかに多い数字である。しからば東京が関東地震より強い地震に襲われたら、震害はどのくらい増加するであろうか。この疑問に答えるには地震動の強さと水道管の震害率との関係が明らかにされなければならないが、過去においては強い地震に対しては、地震計がスケールアウトしてしまい、まず地震動の強さの記録はとれていなかった。このため強震計が開発され、わが国だけでも

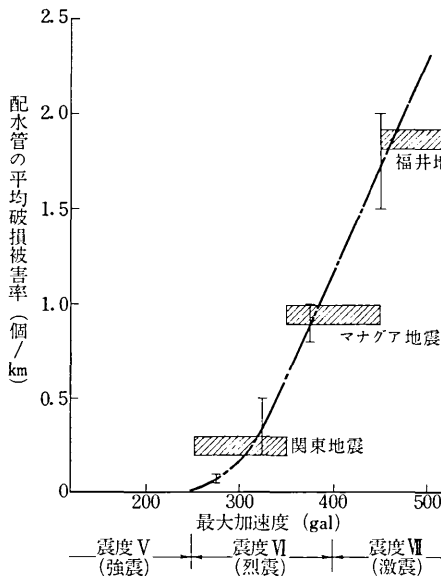


図-3 水道管の震害と地震動との関係

既に $1,000$ 以上の強震計が設置されているし、米国でも1940年のエルセントロの記録以来、数多くの強震記録がえられている。ユネスコも強震計を標準化し、世界の地震地域に広く強震計を設置するべく努力している。これらの努力が結実したのが1971年のサンフェルナンド地震であった。ロスアンゼルス市役所には、詳細な水道管の被害箇所図があり、これに加えて、強震計が数多く設置されていたので、震害の激しかった地域の地震動加速度を推定することができ、水道管の震害率と地盤の加速度との関係を明らかにすることができた。これらの解析は筆者の研究室で行ったものである。解析結果のみを示したのが図-3である。結果の概要を述べると、1)地盤加速度が $250$ ガル以下では水道管の震害率(1kmの破損箇所数)は零である。2)地盤の加速度が大きくなると、震害率は急激に増加する。3)ロスアンゼルス市の震害調査から得られた結果を、東京・福井・マナグアでの震害率と比較してみると、図に示すように、これらの市の震害率も同一の曲線上にあることが判明し、ロスアンゼルス市での調査結果が一般性をもっていることが明らかとなった。

以上述べたごとく、地下埋設管の地震工学的研究の発足はそれほど古いものではないが、サンフェルナンド地震で都市施設が破壊され、市民生活がおびやかされたことなどを契機に急速に発展してきた。しかし地盤加速度の大きいところで、より大きく、より多く震害が発生することを考えると、非線形の地盤を対象にした理論的研究、あるいは振動台を利用した模型実験(地震波を入力とした)などが開発されなければならないであろう。特に後者については、過去にいくつかの試みはあるが、埋設管の地震時挙動を忠実に再現しているとはいえないので、格別の努力をする必要がある。

## 7. 盛 土

盛土の耐震設計の研究は地下埋設管よりさらに遅れている研究であろう。その原因として、1)盛土の復旧は比較的容易であること、2)地震による盛土の崩壊で列車や自動車が転覆した例は過去にはなかったこと、3)盛土を耐震的にしようとする、法面(斜面と同じ)の勾配がゆるくなり(ソ連では $1:2$ を用いている例もある)、用地幅が大変広くなるので、用地費が増大することなどが考えられる。

しかしながら、最近では列車の本数も増加しているし、通過する自動車の台数も非常に多いので、今後大地震が発生し、盛土が崩壊した場合にも、今まで同様、車の被害が零であるか否かは疑問となってきたり、盛土高も大変高くなってきているので、盛土の地震工学的研究の必要性は大変高くなってきていると思われる。特に新潟地震の際に、砂質盛土が底面近くで飽和しているため、液



伏化現象が起り、羽越線の出戸—西目間の盛土が流出し、100 m近くすべった例もあり、盛土の研究を要望する声が高まってきた。1968年の十勝沖地震以後には、国鉄が盛土の耐震研究委員会を発足させ、この方面の系統的研究の開拓者となった。

研究は十勝沖地震による東北本線の盛土の震害調査から開始され、多くの土質試験が行われた。震害調査から盛土の震害のパターンとして、次の四つに分類することが提案され、実被害との対応、原因の究明が行われた。

- 1) 法面のみすべり
- 2) 盛土内部を通る円弧面に沿ってのすべり
- 3) 盛土の縦割れ
- 4) 盛土の沈下

盛土の法面に比して、盛土の内部は機械的に十分に締め固めうるが、法面に沿う浅い層はうまく締め固めることができないこと、雨水が滞留している可能性の高いことから、法面に平行な層のみがすべってしまう型の震害が起りやすい。この型が第1のパターンである。

盛土でも斜面でも、円弧面に沿ってすべる、いわゆる円弧すべりが過去に数多く発生している。地震時においてもこの円弧すべりが発生する。盛土を支えている地盤(基盤)が硬いときは、円弧は盛土の内部(円弧の最下点は基盤に接している例が多い)を通るが、基盤が軟弱なときには円弧は盛土から基盤を通過してしまう。後者の場合は円弧の半径も大きくなり、すべる土量も大きくなる。この場合の安定計算法は、円弧を仮定し、すべる土の重量に設計震度を乗じ、この水平力と円弧面にそう土の摩擦力、内部粘性による抵抗力との比を計算し、この比が最も小さくなる円弧面を求め、この円弧面に対する上記の比が1.2以上になるように、盛土の材料、盛土の断面をきめる手順で行われる。

盛土本体が硬く、盛土と基盤との境界付近が軟らかくすべり易いときには、盛土の長手方向に縦割れを生じ、地震がさらに大きいと、左右の土塊は外側に動き、縦割れの幅は増大する。この崩壊の型が第3のパターンであ

る。以上の三つのパターンは観察できるが、次のパターンは測量によって発見されることが多い。一般に地震により地盤がゆれ込むことが多く、特に基盤が軟弱なときに大きくゆれ込む。盛土本体も縮まる例も多く、盛土の上面が下がる。これが第4のパターンであり、鉄道の場合はレール面を上げなければならない。

以上の震害パターンを大型振動台を用いた再現試験を行い、原因の究明と同時に対策を提案し、これの有効性を振動実験により確かめることまで国鉄の技術研究所で行った。

盛土で最も起りやすく、またしばしば経験するのが、橋台と接する盛土の沈下で、日本でもアメリカでも盛土の重要な震害となっている。この原因としては、この部分の盛土は法面近くと同様、締め固め工事が困難なこと、剛な橋台によって、この部分の盛土は大きい応力をうけることが考えられる。橋台裏の沈下対策(常時および地震時)としては、長さが10 m前後の鉄筋コンクリート床版を作り、十分に締め固まっていな盛土部分を橋で渡ってしまう方式が考えられ、日本道路公団などでは既の実施した例が多くある。

## 8. あとがき

以上橋梁から盛土までの土木構造物の地震学的研究を概説したが、この他の項目としては、杭基礎・地下道・河川・護岸・港湾構造物・発電施設など、土木構造物として研究しなければならないものが多いが、ここでは本所の教官が多く関係した構造物をとりあげて解説した。もっとも杭基礎は千葉実験所の大型振動台を用いて、模型実験を行ったものではあるが、あまり多くの内容もっているので別の機会にゆずることにした。

近代都市生活の保持のためには、エネルギー供給施設・輸送施設はその重要性をましてくるし、地震時の安全性はますます高めなければならない。今後急速にこの方面の研究が進展するものと思われる。

(1977年3月23日受理)