

退官記念講演

UDC 550.34.03 : 699.841 : 624.131.55.042.7



## 地中と土の構造物の耐震性について

On Earthquake Resistance of Underground Structure and Embankment Dam

田 村 重四郎\*  
Choshiro TAMURA

地中構造物の耐震性の研究が始まったのは40数年前のことであり、土構造物特にフィルダムの地震時安定性に関する本格的な研究が始まったのもまたこの40年前後である。筆者はこの25年間地中構造物特にトンネルの地震時挙動ならびにフィルダムの動的破壊機構の研究に従事してきた。両方の分野の研究で大きな進展があった。ここでは筆者が実施した地震観測、震害調査、模型振動実験、数値解析を総合して研究内容を概説し紹介する。

### 1. ま え が き

終戦を挟んで1944年東南海地震、1946年南海地震と大規模地震が相継ぎ、1948年には局地的ではあるが著しい被害を発生した福井地震、1949年には今市地震、1952年十勝沖地震が続いて、この分野の研究者の強い注意を惹いた。最初に総合的に統一された耐震工学の書「地震力を考えた構造物設計法」が岡本舜三名誉教授によって上梓されたのは1954年のことである。

1906年のサンフランシスコ地震の50周年を記念して1956年米国で開催された世界地震工学会議では総数40編の論文等の発表があり、日本から11名の出席者があった。この会議は高い関心と呼び4年後の1960年に東京・京都で2回目が開催され大幅に規模が拡大した。1964年3回目のニュージーランドの会議で国際地震工学会 (IAEE) が設立され、これを第3回世界地震工学会議とし、以後4年ごとに開催することがきまった。因に第9回は1988年日本で開催され、本年スペインで開催予定の第10回には2400編に及ぶ論文の発表申し込みがなされている。

所得倍増を旗印に1960年に池田内閣が登場し、地震活動の活発な本邦で、社会資本の充実が重要な課題になり大規模な構造物の建設が求められるようになった。科学・技術一般の著しい進歩があり、各種の計測機器の開発、測定技術の向上、電子計算機の進歩による解析技術の発展を背景に材料力学、動力学、土質工学等の進歩を基にして耐震工学は急激に発展し従来の静力学的立点から動力学的立点へと移っている。震害の分析、地震応答解析結果等に基づいて、1970年頃より橋梁、建築物、石油パイプライン、沈埋トンネル等の耐震設計法の制定、改訂が行われたことが、この事を示している。

著者は正にこの時期に本所において耐震工学の研究を始めて20数年間を過したのであるが、誠に幸運であった

\*東京大学名誉教授

と感じている。標題にもあるように、まとめてみると著者の主な研究範囲は土木工学の分野でも、地中構造物とダム特にフィルダムの地震時安定の課題になる。

地中構造物については、関東大地震震害調査報告 (土木学会) の下水道の部に「……地盤概ね軟弱なるため、地上構造物は一般に本市他地域のそれに比し被害大なりしに拘らず、下水管の蒙れる被害は比較的軽微にして概ね亀裂と称すべき……」と記されているように、その耐震性は一般の地上構造物に比べて高いとされ、また地中にあるため地上構造物のごとき動的挙動を示すことは考えられないなどのことから、常時荷重に対し静力的方法で構造設計がなされていれば充分強度があると考えられ、耐震設計の方法は特にきめられていなかった。フィルダムについては、アースダムでは同様に過去の実験より堤高を40m程度までとしていて、その安定性は通常の斜面の安定の評価に使用されている、いわゆる迂り面法を適用して静力学的に検討している。1950年代より高いロックフィルダムが築造されるようになったが、前述の迂り面法が適用されるのが普通であった。

以下この2つの課題について筆者が行った研究の概要を紹介する。

### 2. 地中構造物の耐震性について

地中構造物というと、現在では上下水道、交通・輸送のためのトンネル、エネルギー輸送や通信線のための管路、洞道、物資貯留のための空洞、地下街等多岐にわたっている。しかし、本邦に始めて地下鉄が建設されたのが1927年のことであり、地下構造物の建設整備が盛んに行われたのは1950年代からで、最近のことである。上野一浅草間の地下鉄道トンネルの建設に当って、当時欧州の地下鉄建設工事の諸条件に照して、関東地震後のこともあって地盤が軟弱であることが重要な技術課題であったということである。

比較的小口径の埋設管類の被害を別にすると、トンネル、暗渠等の被害が少ないことは前述のとおりであり、地盤の安定性、挙動に深く関わっていることが震害の調査から推論される。関東地震の際のトンネル被害は震央域にほとんど限られており、震央域より離れた地点で発生している被害は、多かれ少なかれ岩盤が風化することにより軟質に変化しているなどの状態が関与していると考えられている。また震央域でも断層がトンネルを切る場合は特別なものとして、地盤が軟質であったり山嘴地形であったり、土被が少なくトンネルの構造に靱性が少ないものである場合、あるいは坑口等の特殊な部位に限って被害が生じている。“地震力を考えた構造物設計法”では関東地震の際の東京市の水道管の被害分布が家屋の被害分布と一致せず、地盤状態が変化する領域で多発していることを指摘している。

上述のような被害状況は、その後の震害でもしばしば

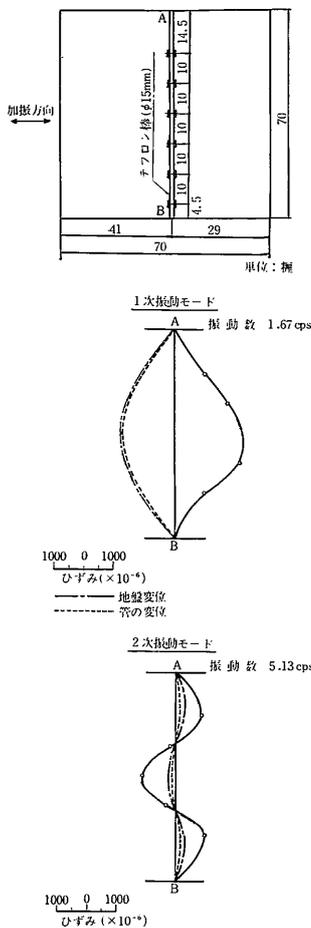


図-1 模型地盤（材料ゼラチンゲル）に埋設された直管（テフロン棒）の地盤加振時の挙動（図は平面図で、地盤と支台との間には水膜があり、相対運動に対する拘束はない）

見いだされているが、その解明のための実測が行われたのは昭和40年8月より続いた松代群発地震のときの管路の観測が始めである。長野市にある北信変電所に地震観測のために実際の管路を建設し測定が行われたのである。筆者が地中構造物の耐震性の研究に関与したのはこの時点で、地盤中の管路が地震時にどのように動くかを室内の模型実験で調査した。模型地盤材料としてはゼラチンゲルを使用し、管路には相似則を考慮して弾性係数の小さいプラスチックを用いた。ゼラチンゲルの利用は当時の加藤助手（現㈱東京測振）、森地助手（現理科大学）に負う所が大きい。当時地盤と構造物の相互作用を表わすモデルとしては、両者の間にバネを介在させるモデルが考えられていた。このモデルを最初から肯定していた筆者にとって、模型の振動実験の結果は全く予想に反するものであった。そこでバネ模型から推測される管体の自己振動を起すために種々の方策を試みたが努力は徒勞に終わった。結局地盤中の管路は地盤の変位に対応して変位するということを認識することになった。このことは前述の松代地震の地震観測でも示された。振り返ってみると1963年「地中の構造物に作用する地震力に関する研究」

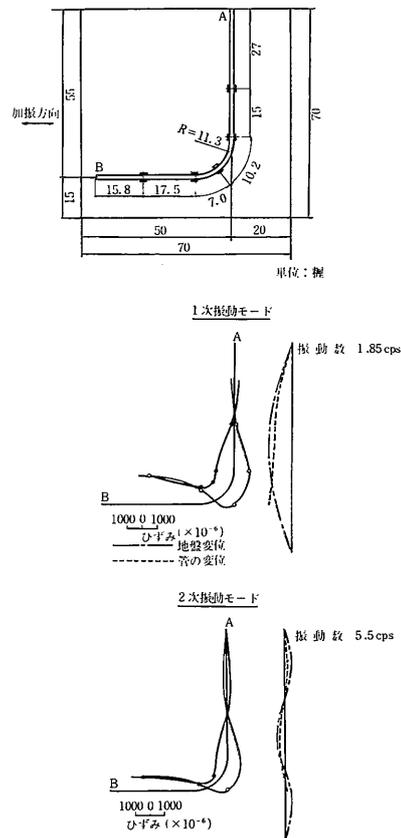


図-2 模型地盤（材料ゼラチンゲル）に埋設された曲管（テフロン棒）の地盤加振時の挙動

(岡本, 加藤, 伯野), 1964年 "Earthquake Design Criteria for Subways" (T.R. Kuesel) ですでに変位を外力として作用する考え方が提案されていたのである。前者は地中の杭を弾性床(地盤)上の梁として取り扱い, 後者はBARTトンネルに同様に表面波の波形を加えて長手方向の耐震性を検討している。

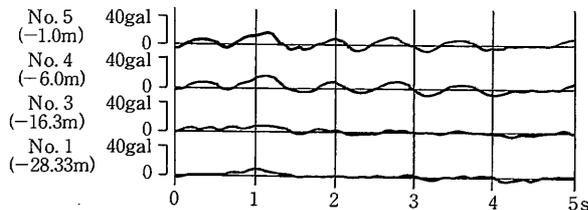
ここに到って, 深さ方向も含めた広い領域における地盤の地震動の性状を知ることが重要になる。岡本研究室では国鉄東北本線の荒川橋梁の付近の河川敷において厚さ約28mの沖積地盤で地震観測を実施して, 1964年の新潟地震の地震動を記録していた。沖積層の下にはN=50以上のいわゆる東京砂礫層があり, 地震記録はこの沖積層の剪断一次振動が卓越してあらわれることを明瞭に示している。またほかの地震の記録から比較的小規模な地震の場合, 2次, 3次の剪断振動が励起されることが認められた。

1966~1967年江東区砂町で沖積地盤中に建設された東京電力(株)の地中送電線のシールドトンネル内および地表で地震観測を行った。これはトンネル軸方向に並んだ測点とこれにほぼ対応した地表の測点で同時測定してい

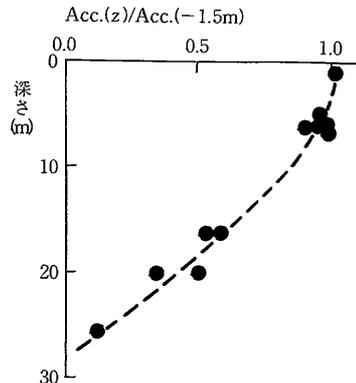
て, 観測の結果, 地中から地表に向う剪断波の伝播速度は130~140m程度であり, トンネル軸方向の速度は1,000m以上であることがわかった。また1966~1968年に荒川河口近傍にある東京電力(株)江東変電所において500mの測線上で行われたアレー観測の結果でも地表面を1,000m以上の速度で地震波動が伝播することが認められている。

これらのことから地表部分を対象として耐震設計を行う場合, 地震基盤あるいは設計基盤を地表に平行に伝播する波が地表の方向に拡がり伝播して行くことが推測される。また表面に向って伝播する波により, 表面層で局部的な震動が発生するであろうことは容易に推測される。局地的振動の存在については安芸博士(1958)によって研究されている。

1969年から委託を受けて扇島沈埋トンネルの模型振動実験を行った。これは川崎と扇島を結ぶ長さ約660mのRCの矩形断面の物質輸送を主としたトンネルで, 本邦で実験を行った最初のものである。初期の頃この実験に当たったのは岡崎孝夫氏(大成建設(株))で, 後には浜田政則氏(現東海大学)であった。長さ約2mの3次元模型の振動実験からは, さきの埋設管の実験で測定されたよう



(a) 1964年新潟地震において荒川観測点で得た加速度記録



(b) 卓越振動 (T=0.8sec.) の加速度振幅と深さ

図-3 1964年新潟地震の際, 国有鉄道東北本線荒川橋梁附近の河川敷で得られた加速度記録および, その卓越振動の加速度振幅と深さとの関係

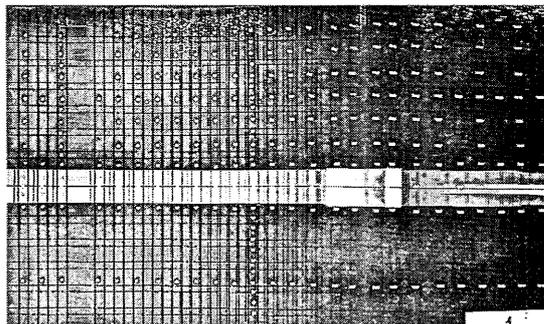
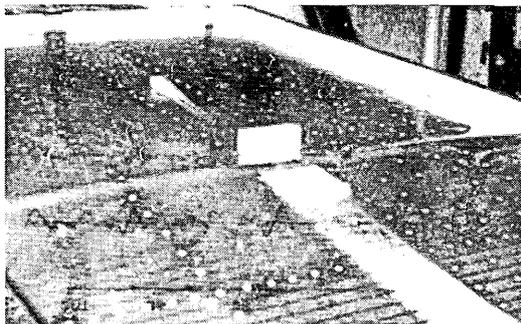


写真-1 扇島沈埋トンネルの3次元模型と共振状態の例  
(平面図, 丸い点は動かないことを, 短い線は点が振動したことをそれぞれ示している。)

に、トンネルが周辺地盤の変位に対応して挙動することが確かめられた。

1965年には本邦最初の本格的な沈埋トンネルである国鉄京葉線多摩川トンネルが完成して、4月から地震観測を開始した。このトンネルは多摩川河口を横断する480mの鋼殻式トンネルで、長さ80mのエレメント6函からなりエレメントは剛結されており、河床部表面は約40mの $N=0\sim 2$ の軟質なシルト質の沖積層である。測定項目は測定が比較的容易な加速度と、この分野で測定例のない、トンネル軸方向の地震により生ずる歪とした。歪の測定の困難さが予想され、長期間安定した高感度のセンサーが必要となり、岡本教授、加藤助手、小野技官と4名で検討した。このセンサーの原型はその後のセンサーの基本となっている。測定に参加したのは大学院学生であった中川良隆君(現大成建設(株))で、幸運にも測定装置設置後間もなく地震を記録することに成功した。観測は現在も続けられているが、表層の軟質な沖積層の低次の卓越剪断振動の周期で変位、変形することがわかり、またトンネルの軸方向の歪を定量的にも推測できるほどの資料を得ている。近くの川崎港沈埋トンネルの観測結果ともかなりよく類似していることも認められた。

1972年の八丈島近海地震、1978年伊豆大島近海地震、1984年長野県西部地震では7秒前後の表面波に対する挙動の記録が得られている。

1976年より帝都高速度交通営団の委託を受けて、当初地下鉄道トンネルの4地点、後には6地点で、トンネル内、その周辺地盤中およびその地点の地表から東京砂礫層まで数点で同時観測を行って、現在も続けている。RCの2線式箱形トンネル、シールドトンネルの2型式について加速度および、トンネル躯体ではトンネル軸方向の変形と断面形状の変化を測定している。断面は地盤の固有振動が励起されている場合剪断変形し、また表面波に対しては鉛直・水平に変形することが認められている。断面の変形に関しては大学院生小笠原正治(現関西電力(株))、石井光裕(現四国総合研究所)の両君が協力してくれた。

1975年これらの地震観測、模型実験、数値解析結果を総合して、地中構造物が埋設されている地盤の地震時の変位に応じて挙動することを確信し、生研報告24巻16号に“Dynamic Behavior of Submerged Tunnel During Earthquakes”として報告した。この中で地震応答解析のための実用的な数学モデルを提案した。

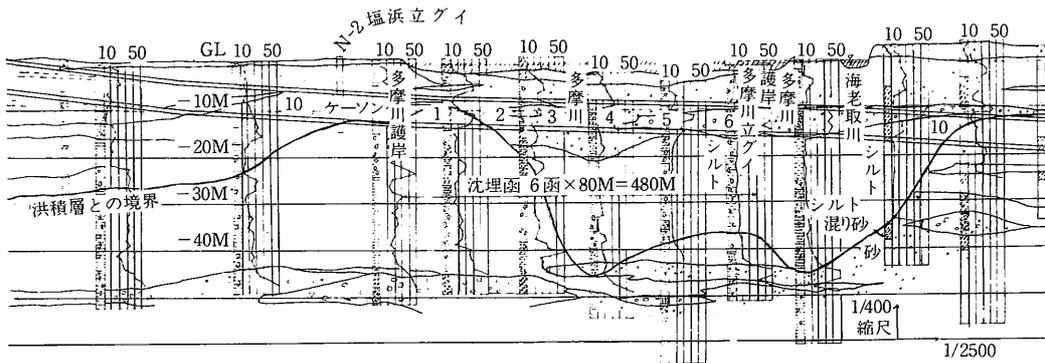


図-4 国有鉄道京葉線多摩川トンネル(沈埋式)と縦断面上の地盤状態

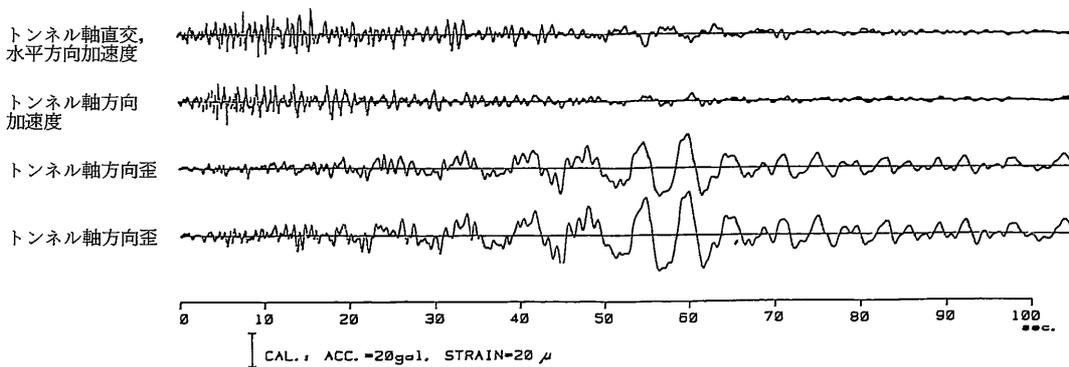


図-5 1978年伊豆大島近海地震の際、国有鉄道京葉線多摩川トンネルで記録した地震波形

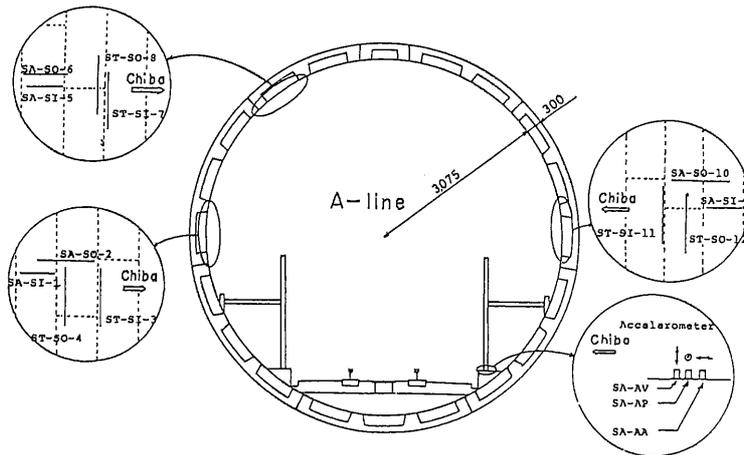


図-6 帝都高速度交通営団東西線東陽町駅付近の観測点における地震計の設置状況 (シールドトンネル)

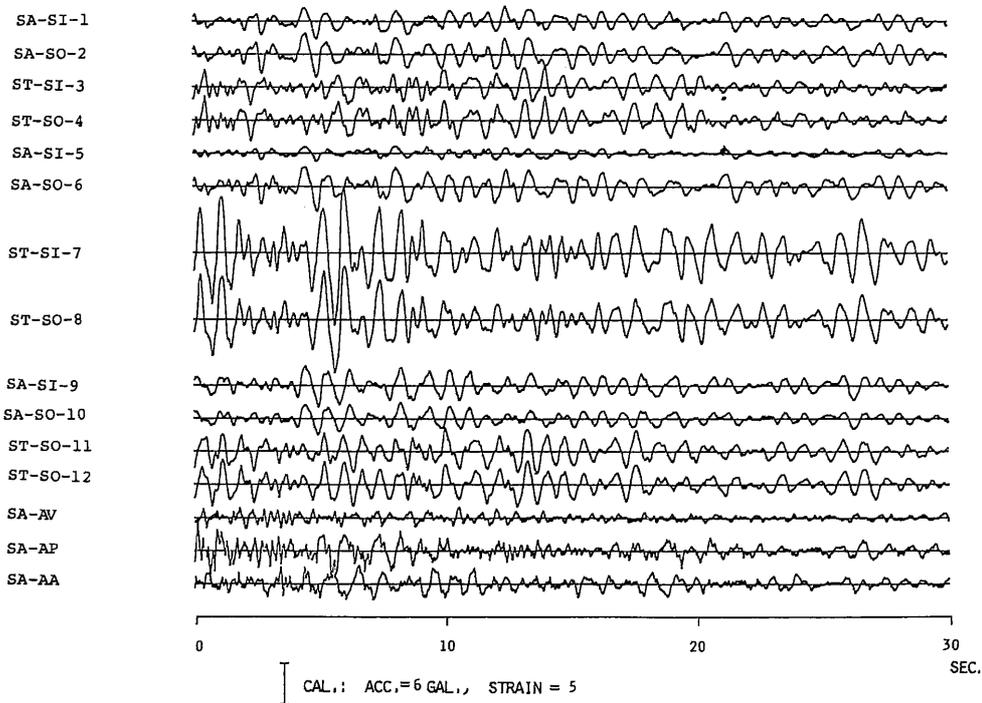


図-7 図-6 に示す観測点で得た地震記録で波形の記号は図-6 に対応している. 上の12ヶは歪波形で下の3ヶは加速度波形である. ST-SI-7, ST-SO-8の2つで大きな歪が生じているのがわかる.

以上により地中構造物と地盤との相互作用が原理的に把握されたため、この事から演繹される挙動、特性さらに基本となる構造物周辺の広域の地盤の3次元的挙動の検討に進んだ。地盤が軟質で、長大構造物の軸方向の剛性が高い場合、最も大きな歪が構造物に発生する地盤の変位波長は非常に長く、一方小口径の管類では数mから数10mになって短く、したがって小口径埋設管では地盤

の動特性の変化の影響を受けやすいことが推測される。また地盤の動特性の急激な変化の影響の程度・範囲も構造物の力学特性と、地盤の変形の剛性によって異なることになる。

急激に表層地盤の厚さが変化している場合、通過するトンネルの挙動と、立坑とトンネルとの取付部分の挙動を実験的に調査したのが久保田直樹、河田博之の両氏(国

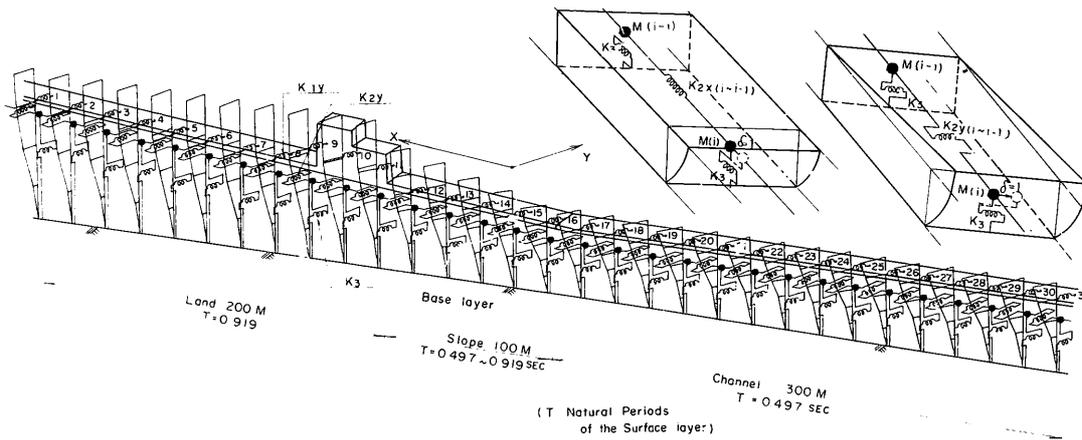


図-8 沈埋トンネルの地震応答解析のための数学モデル

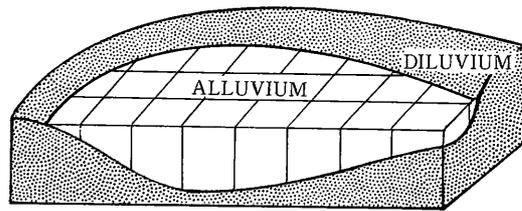
鉄)であり、ガス管等の小口径管路を対象としたのが、西尾宣明、塚本克良の両氏(東京ガス株)である。後者では千葉実験所の振動台が使用され、写真掛の協力を得て実験は映画に記録された。

急激な表面層の変化はトンネル軸を軸として断面に振り変形を発生させることになるが、木戸義和(㈱熊谷組)と大学院生湯山和利(現運輸省)の両氏が3次元数値解析と模型振動実験でこのことを実証した。

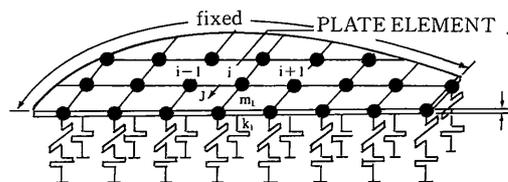
トンネル断面の変形については、すでに前出の“地中の構造物に働く地震力に関する研究”で解析が行われているが、単純化されたモデルを用いて、トンネルのライニングに継手を設けた場合の影響、周辺地盤の安定性についてそれぞれ大学院生であった辻和勝(現NTT)および鈴木雅夫(現NTT)の両氏が検討した。

1952~53年に久保慶三郎教授(現名誉教授)、片山恒雄助教授(現教授)によって埋設管路の被害と地盤状態との関係が被害の統計的処理により求められたが、大学院生であった川上英二君(現埼玉大学)は始めてモンテカルロ法を利用して管路網の地震時機能の安定性を解析している。

さきに地盤の地震応答解析のための2次元モデルを提案したが、地盤構造が複雑な場合や、対象領域が広く、複雑な形状をしているような場合3次元モデルが必要になる。しかし、地盤が力学的に線形の挙動をするとしても任意の領域を対象にして、地震時の挙動を3次元的に正確に求めることは不可能と考えられる。耐震工学上支配的な要素を見だし、これに基づいて主たる耐震設計上の諸量を算定することが適切な対応であろう。地中構造物の挙動が埋設地盤の変位挙動に支配されることから、対象地盤の地震時の変位応答が要素になる。しかし歪すなわち相対的な変位に注目すれば速度の次元になる。いずれにしても加速度の次元にくらべて、地震応答スペクトル図からも明らかのように、振動数の変化に対し安定



(a) 相対的に硬い地盤に囲まれた沖積地盤の模式図



(b) 沖積地盤の擬似3次元モデル

図-9 擬似3次元モデル

したスペクトルを示し、周期に対する応答の鋭敏性が減っているから、取り扱いが容易になる。このような視点より応答変位に卓越する低次の地盤の卓越振動を検討対象としたのである。また低次の固有振動は大規模で強い地震の場合に卓越して励起されると考えられるからである。3次元地盤モデルの試みは、地盤を土柱の集まりとしそれぞれの土柱を、基盤とせん断バネで結ばれた1質点に置きかえ、さらに質点を相互にバネで結んだ立体的な振動系である。これには院生の鈴木篤君(現建設省)が当った。このモデルには質点間をバネで結ぶことで異方性を生ずるという欠点があるが、これを補正したのが擬似3次元モデルである。ここでは対象とする表層地盤を、基盤と自由表面を表裏とする版として取り扱って、質点間のバネを算出して、いわゆるハイブリッドシステムになる。このモデルは模型振動実験によって妥当性が検証された。これには鈴木猛康、稲森光洋の両氏(㈱熊谷組)が当った。

1983年より始まった東京電力(株)の潮田線における地震観測より、送電用に建設されたシールドトンネルの変形と地盤との関係ならびに溺谷地形にある沖積地盤の地震時の挙動に基本的な資料が得られた。本トンネルは横浜市北部にあり、沖積地盤を横切る部分を対象としてトンネル軸線上5点でトンネルの変形および加速度を、またトンネルに近接した2点では地盤の加速度を観測している。溺谷地形に堆積している表層地盤が、地震時には地形に対応して方向性をもった3次元の卓越振動を示すこと、トンネル軸に沿う軸方向歪の分布は実体波と表面波とは異なること、擬似3次元モデルによりかなり良く近似できること、リングジョイントの変形とセグメントの変形との関係等が明らかになった。この表層地盤については3次元模型振動実験が実施され、擬似3次元モデルによる解析結果との比較が行われている。この研究には桑原弘昌、竹内信次、富所達哉、後藤和生の各氏(東京電力(株))ならびに田部井雅弘、鈴木猛康、稲森光洋、野口利雄の各氏(熊谷組)が共同して当たっている。

上述のように擬似3次元モデルは地盤の1次の剪断振動を対象としているから、非常に局所的な動きを表現す

るには不便であり、また地盤がきわめて急激に変化した、さらに地盤状態が複雑である場合、十分な精度が得られるかどうか明瞭でない。これらの場合に対し、深さ方向および水平1方向の2次元地盤を用いて、3次元擬似モデルの手法を適用して数値解析を行い、適合性を調査した。これには小長井一男助教授が当たっていて、本モデルを表層地盤中の剛性基礎の動特性の解析に適用し、田治見宏博士の解析結果とよく一致することを示すと共に、極端に変化する地盤条件にこのモデルを適用する場合の手法を提案している。

### 3. フィルダムの耐震性について

本節ではフィルダムの耐震性について行った研究をまとめることにする。

本邦で1925年までに建設された堤高15m以上のアースダムは約800あるが、その内99%は30m未満である。高いダムが建設されるようになったのは戦後のことであり、1957年に完成した石淵ダム(RC表面遮水壁型ロックフィルダム、堤高53m)が一つの時期を画している。最近建設されるダムの内およそ半数はロックフィルダムで、この型式のダムの堤高は176mの高瀬ダムを筆頭にして平均で60mを超えていて、この30年間で広く建設され大型化している。

アースダムの耐震性の研究は1930年代初期の松村孫治博士の荒木田で作った2次元模型の振動試験と解析を嚆矢としている。しかしその後、戦後まで研究に大きな前進はなされなかったようである。

戦後の復興、開発が進行するに伴い、エネルギーの創出、各種用水の確保のため大規模なダムの建設が必要となり、地震活動の活発な本邦では、ダムの耐震性の研究が強く求められることになった。前記石淵ダムの設計で、地震時の安定性をどのように評価し、設計するか当時のダム技術者が模索している。その困難さは、この型式のダムが建設地点で取得しうる自然の土石を材料としたマッシブな構造体であるため、強度の評価が通常のコンクリートや鋼からなる構造体とは異なり、荷重、応力、変形、強度の関係が複雑であることにある。材料の力学的特性は施工方法、施工管理にも影響を受けるから、国、地域、ダムサイト、時代を背景にした技術的諸条件が関連してくるのである。

現在多用されている斜面の安定評価方法はいわゆる切り面法といわれている方法で、斜面にそって円弧または他の形状の切り面を想定し、滑動土塊に作用する力に対する切り面における抵抗力の比を求め、この比が最小になるよう切り面を繰り返し設定し、最小の比が規定の値以上になるかどうかで評価している。

1961年に完成した御母衣ダム(傾斜コア型ロックフィルダム、堤高131m)は完成直後の1961年8月、ダムより

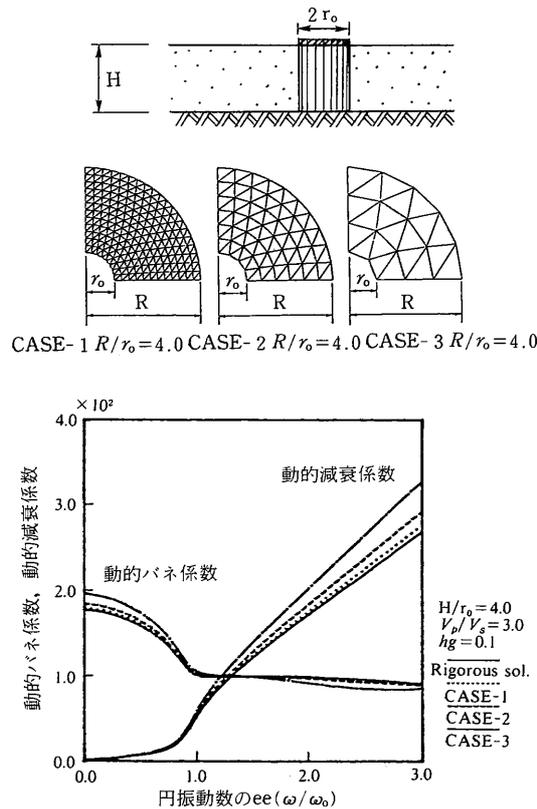


図-10 一様な厚さの表面の沖積地盤に建設されているウェル基礎の動特性

10数kmの点に震央をもつ北美濃地震 ( $M=7.0$ ) の烈しい地震動を受けた。しかし堤体は堤頂で5cm沈下し、下流側へ3cm変位したにとどまった。1961年のことであり残念ながら地震記録はとれていないが、設計震度0.12から直接的に算定される120ガルの最大加速度に比して、かなり大きい加速度の地震動が作用していることは推測でき、高い耐震性をもっていることが実証されたわけである。

同様のことが、1970年秋田県南部の地震 ( $M=6.2$ ) のとき震央距離12~13kmの相野々ダム(アースダム、堤高40.8m)、1984年長野県西部地震 ( $M=6.8$ ) の際震央域にあった牧尾ダム(中央コア型ロックフィルダム、堤高148m)、1985年メキシコ地震 ( $M=8.1$ ) の震央域にあったLa Villitaダム(中央コア型ロックフィルダム、堤高60m)、震央域の極く近傍にあったEl Infernilloダム(中央コア型ロックフィルダム、堤高148m)、1989年ロマプリータ地震 ( $M=7.1$ ) で断層から1~2kmに位置していたAustrianダム(ゾーン型アースダム、堤高56m)、その近傍にあったLexintonダム(アースダム、堤高62m)、さらに最近では1990年フィリピン地震で断層からおおよそ10数kmの点にあったAmbuklaoダム(ロックフィルダム、堤高129m)、Bingaダム(ロックフィルダム、堤高107m)に見られる。震央域あるいは近くにあつて設計震度に比して2~3倍程度の加速度の地震動に対しても重大な被害は生じていない。これらの例から、ダムの基礎条件、材料の強度、設計方法、設計震度、施工方法・管理とが総合して耐震性の評価を適切に行つてきているといふことができる。一方実際の条件に対して耐震強度の合理的な評価を行うことは今後の耐震設計の発展に対し重要である。

実ダムの地震時の挙動を知るため地震観測が始まったのは1963年のことである。盛岡市南々西約20kmにある山王海ダムで、このダムは高さ37mのゾーン型アースダムであつて、岡本研究室では堤体ならびに岩盤、取水塔に加速度計を設置して地震観測を開始した。1964年新潟

地震の記録が得られていて、その挙動は1965年第3回世界地震工学会議に最初の実ダムの地震応答の資料として報告された(岡本、伯野、加藤、河上)。観測は現在も継続しているが、得られた主な成果としては1) 固有振動をもつこと、2) 基盤の入力地震動に対する堤体の応答の倍率は加速度の増加と共に減少し非線形的である、3) 水平堤軸直交方向の基本振動モードおよび2次振動モードは堤体内部で材料の剛性が増加することを推測させる、4) 水平堤軸方向の卓越振動数は堤軸直交方向のそれよりわずかに高いなどである。

この地震観測結果をよりよく理解するために1/330の模型を寒天で製作し共振実験を行った。これにより堤体の振動は剪断振動が主体であること、堤体断面中心部と上下流面とは振中に相異があり堤体内で引張、圧縮歪が生じていること、上下流法面には引張、圧縮変形ならびに、剪断変形が発生すること、堤軸方向、堤軸直交方向、鉛直方向にそれぞれ卓越振動があり、堤体は基礎、兩岸の岩盤の影響により3次的に振動することなどがわかつた。この山王海ダムの実験結果はのちにW.O. Keightleyにより3次元FEMで解析され、低次振動でよく一致する結果が報告されている。なお振動状態は写真

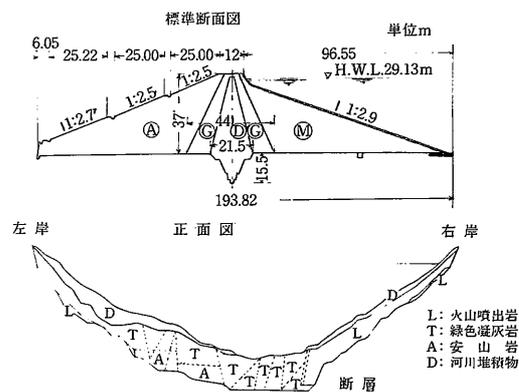


図-11 山王海ダムの一般図

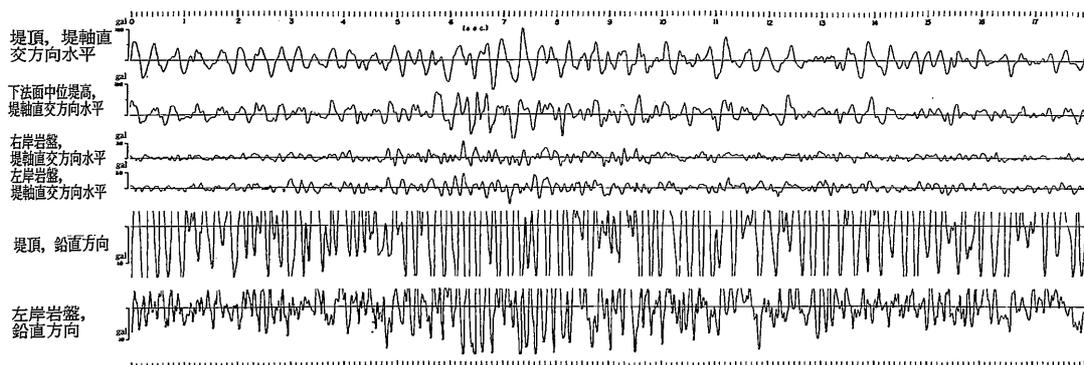


図-12 山王海ダムで記録した新潟地震の加速度波形

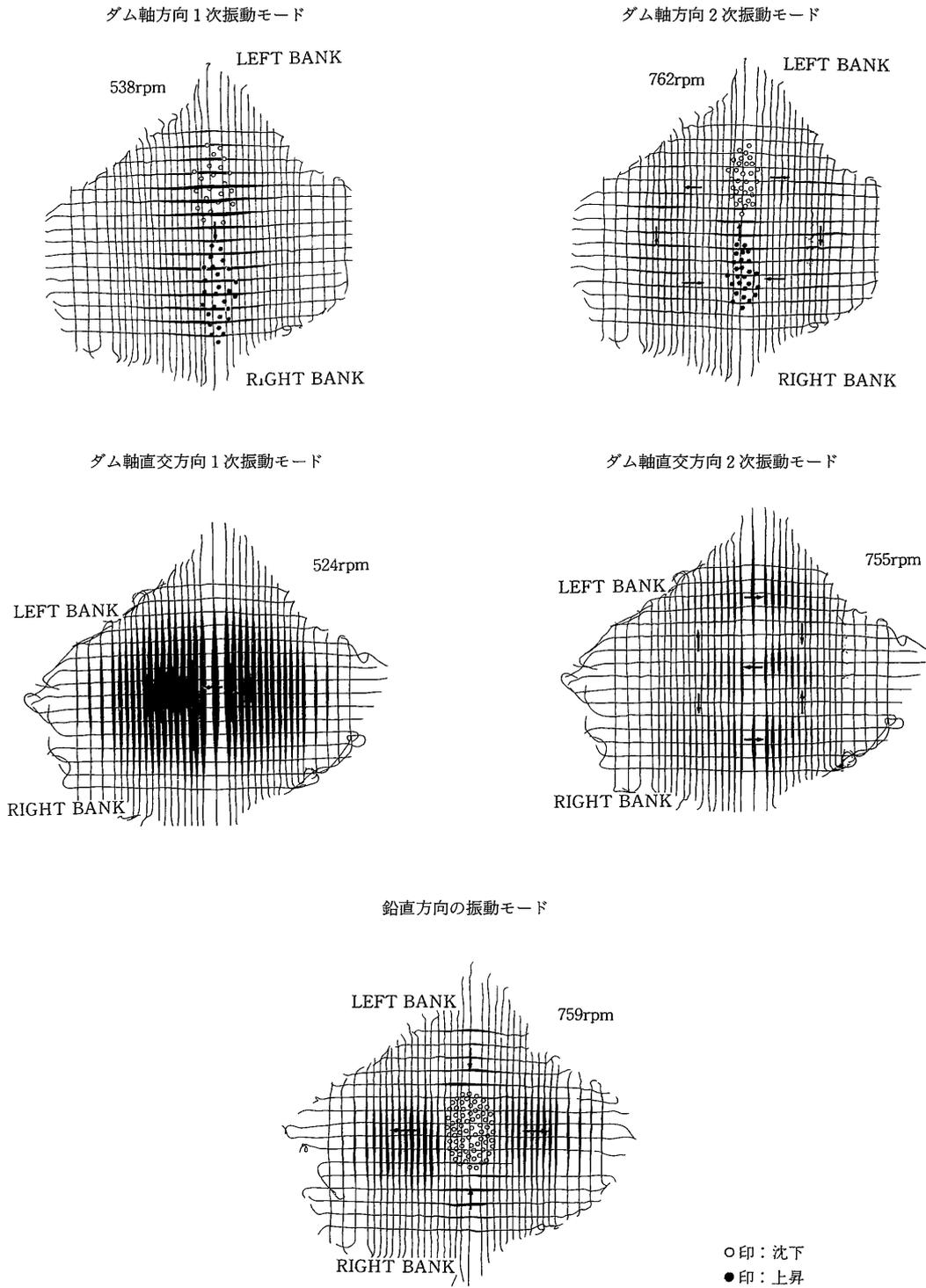


図-13 山王海ダム模型の振動モード (平面図)

掛の安田良平, 岡宮誠一両氏の協力で高速カメラで記録された。ダム断面を楔形として, 基礎から入射する波動に対する応答の解析結果と, 地震観測と模型振動実験の結果と併せて生研報告16巻4号に発表された。

前述のように本邦においてもロックフィルダムが大型化しつつあることから, その耐震性の究明のため, 1967年千葉実験所に設置された大型振動台を用いて, ロックフィルダムの2次模型の振動破壊実験を行った。粘着性のないロックフィルダムがいかなる強度を持ち, どのような破壊性状を示すかを調べることにあった。研究対象は当時計画中であった本邦最高のロックフィルダムである高瀬ダムである。ロックフィルダムの模型振動実験については, R.E. Davis(1952年), J.J. Bustamante(1965年)の衝撃を利用した実験, 三国英四郎氏他の小粒径の碎石を用いた実験(1967年)があるのみで, 10mm程度の碎石から2cm~6cmの砂利, 径10cm前後の玉石, さらにφ30cmの玉石を材料とし, 高さ1.4~1.6mの大型モデルを使った振動実験の例はなかった。全く手探りで始めたわけである。加藤助手, 小野技官および研究生であった片山英雄氏が労を惜しまず協力してくれた。数回の実験で破壊過程に高い再現性があることを見だし, 加振振動数, 模型の法面勾配, 材料の粒径をパラメータにして実験を繰り返し, それらの破壊性状との関係を求めて行った。振動実験の結果, 材料の粒径により, 安息角や破壊時の加速度が変わり, 巨視的にみた堤体の挙動が構成する材料の粒径により強く影響されることがわかり, 物理模型に必要な相似則を作ることがきわめて困難であることが判明した。このため模型は解析モデルとして位置付けた。

図-14に示したのはφ2~6cmの利根川産玉砂利で築造した模型の斜面表面が雪崩状に崩落するときの振動台

加速度と斜面の勾配の関係である。この場合, 勾配が1:2.5以上緩やかになると崩壊時の加速度はそれほど増加しなくなることがわかる。また図-15は材料の粒径をパラメータとして斜面の崩壊時の加速度を示したもので, 粒径の増加と共に崩壊時の加速度が増すことを読み取ることができる。

また模型を築造するに当たり, 斜面を木板で軽く叩いた場合表面部分はあたかも粒子間に粘着力があるかのごとくに一体になったように挙動することが認められた。今

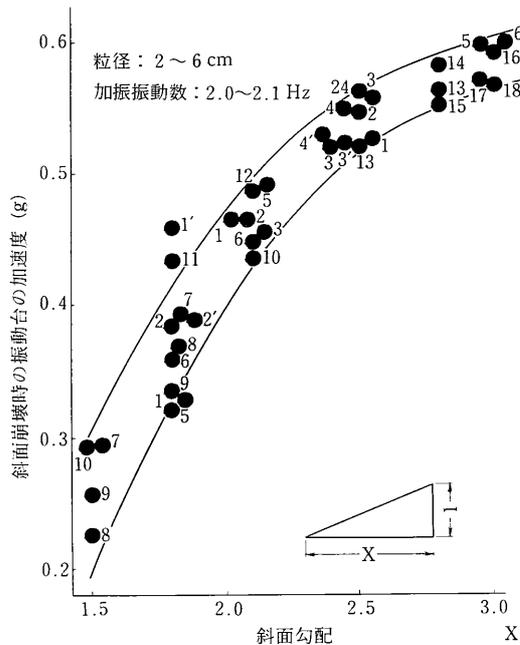


図-14 斜面勾配と斜面崩壊時の振動台の加速度との関係

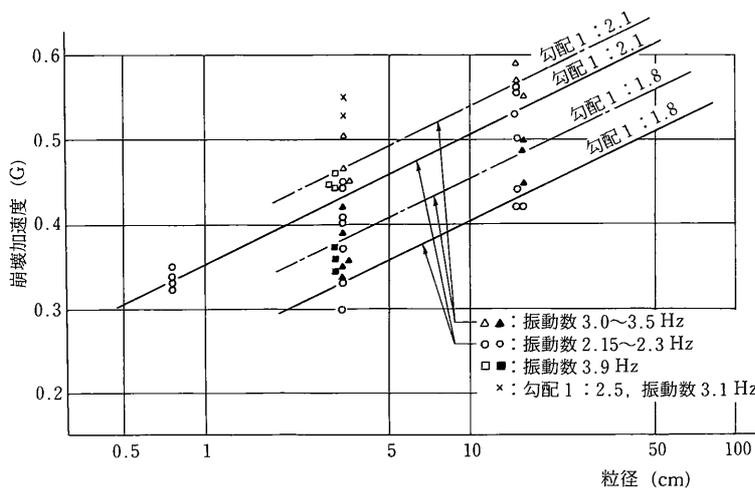


図-15 斜面の勾配と加振振動数とをパラメータとした斜面の崩壊加速度と粒径の関係

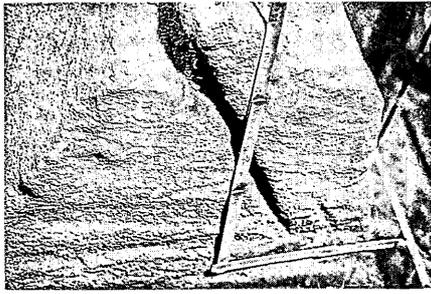


写真-2

後検討しなければならないが、粒状材料の締め固めの効果を示すものではないかと考えている。

写真-2は、コアを砂質シルトでシェル部を碎石を用いて築造したモデルを振動破壊させた後、コアを取り出しコアに発生した亀裂を示したものである。コアの右側シェルの法面が左側に比べて急傾斜になっているため、右側が滑落・沈下しコアの右側の面の一部が露出し、左側シェル部の荷重をうけることになった。またコア部の剛性がシェル部の剛性に比べて非常に高い場合、コア部に引張亀裂が入りやすいことも解析から推測されている。

また斜面表面部が滑落する加速度よりも低い加速度において、表面よりかなり深い部位に微小な変位を示す面があらわれ、この面の両側で相対運動が生じている事なども測定された。ただしこの面における相対運動は、加速度を増しても発達しないなどのことがわかった。

1966年より、この研究に大学院生の大町達夫氏（現東京工業大学）が加わった。大型模型で加振加速度があるレベルを超えると法面に引張り状態すなわち圧力が0になる現象があらわれるが、特殊の接触計を開発してこの事を確認した。また小型模型を静的に傾斜させたときの崩落性状が低振動数で加振したときの大型模型のそれに類似していること、衝撃的力が作用したときの斜面の崩壊が速度の次元に関連していること、円柱材を積み上げた梯形構造の振動破壊性状などが明らかになった。数値解析により、模型の法面表層の挙動を摩擦系の運動としてあらわし表層の崩落を力学的に説明できることを示した。この成果はその後のロックフィルダムの地震応答結果の評価方法の基礎となり、耐震設計法の発展に貢献している。

鋼、アルミニウム、プラスチックのφ6～10mmの丸棒を梯形に積み上げ、振動破壊実験を系統的に実施したのが大学院生の福原明氏（現電源開発㈱）である。破壊は振動数が相対的に低い場合は加速度で、高い振動数では速度の大きさによることを見だし、さらに小名浜砂で築造した小型模型の振動破壊状況を映画に記録し、表層の滑落の過程を明らかにした。砂の含水比を調節することにより、種々の破壊状態が生じたことから、破壊性状

に及ぼす粘着力の影響が大きいことも確認された。

1983年より千葉実験所に“自然地震による構造物の破壊機構解析設備”が作動した。設備された中型の2次元振動台を用いて、小名浜砂で築造した3次元模型を水平および鉛直2方向から加振し破壊した。フィルダムの安定には重力の影響が大きいことすなわち鉛直方向加速度の影響が大きいと考えられるからであり、地震観測の結果は震央に近い場合、しばしば水平方向の加速度と同程度の大きさの鉛直方向加速度があることを示しているからである。実験の結果、鉛直方向加速度の破壊に及ぼす影響は水平方向にくらべて小さく、この場合は $\pm 1/3$ であることが明らかになった。これにはモデルダムの応答解析を大学院生の岡本晋君（現大成建設㈱）、2方向加振の場合の位相関係の影響を森田道比呂君（現住宅開発公団）、ダムの形状の影響については平井秀輝君（現建設省）が夫々当たり、董軍君（研究生）はこの実験を系統的に行っている。

1980年フィルダムの耐震性研究のため、中国大連工學院（現理工大学）の韓国城副教授が第2回目の中国政府派遣研究員の1人として来所した。かなりの労力を要するため、稍沈滞気味であった大型模型振動実験はこれを機に再び活発に行われるようになった。模型の動的挙動を理解するため模型内を伝播する波動の測定を実施し、高さ1.4mの模型であるにもかかわらず、法面表面より模型内部に進むほど材料の剛性が増加していることが見いだされた。因に実際のロックフィルダムでもこのことが確認されていて、地震応答を解析する上に基本条件となっている。

前述のようにロックフィルは摩擦を主とした力学系と考えられ、取り扱いやすいと考えていたが、すでにかんがりの基本的性質を定性的に把握しており、その知見に基づいて、思い切ってより複雑な現象を示すであろう粘性をもつ砂を材料とした模型を研究することに方向を転回した。このことは結果的には成功したように思われる。龍岡研究室の協力を得て、使用した小名浜砂の土質試験を行い振動破壊過程の解析を定量的に行うことができたからである。現象を解析する際、砂の粘性を要素の1つに採用することで、むしろ理解しやすくなったのである。韓副教授は材料の剪断強度を用いて振動破壊の過程を解析し法面の崩落が、模型の上部および法尻付近に発生する不安定領域（破壊可能領域）が加振力の増加と共に発達し両者がつながるとき起るものとした。この研究は同副教授の論文にまとめられたが、後述する研究でもこのことは確認された。破壊過程の究明には大学院生の董軍君（前出）と大連理工大学講師孔憲京氏（現副教授）が活躍した。模型の挙動の解析のため、きわめて低い拘束圧下の材料の力学的諸性質が必要であり、龍岡文夫教授の指導と協力を受けて両君は土質試験を行った。振動実

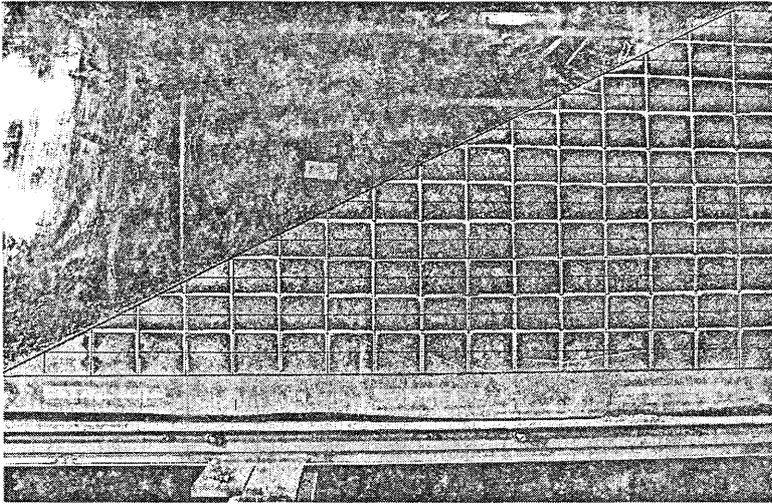
験では、現象を単純化し、記録しやすくするために、模型の固有振動数に比してきわめて低い振動数で加振し、その振動状態から破壊に至る過程をビデオ、または高速カメラで記録している。この結果、法尻近傍と堤体上部でまず剪断変形が生じ、法尻の剪断変形は法面に沿い発達・上昇し、堤体上部の変形は斜め下方に向って法面を切るように発達し、加振加速度の増加と共に、両者はつながり、法面全体が崩壊するに至ることが認められた(図-15)。FEMによる解析でもこの崩壊を推測させる結果を得ている。この破壊過程は模型の形状、粘着性によって変わり、また加振振動数と固有振動数との関係によっても変化することが予想されるが、破壊機構のモデル自体はそう変化しないものと考えている。破壊の発生

に当って、いわゆる滑动面の下端の形状の説明は困難な課題の1つであるが、材料の性質の異方性が関連しているとの結果を得ている。董君の論文は材料の異方性とその影響を中心に研究をまとめたものである。以上の一連の研究活動で孔副教授の協力はきわめて大きいものであったことを特に記したい。

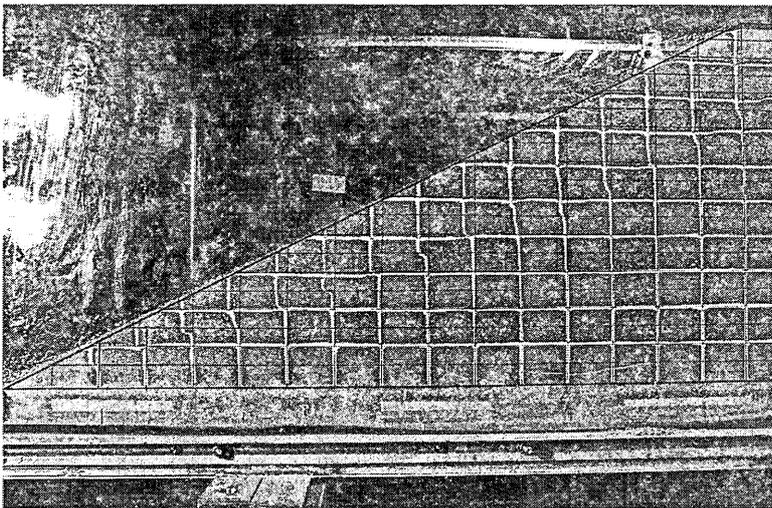
ロックフィルの地震時の安定性は最終的には岩塊間の相互の動力学的関係に帰せられるであろう。既述のように円柱体を積み上げた梯形体の振動実験を行ったが、これはモデル化された限られた条件のものである。これに対し、小長井助教授と協力して開発した、レーザー光シートを用いて粒状材料の挙動を光学的に調査・記録する実験方法は、この基礎的課題の研究に有力な手段になると考えている。

前述のように、韓副教授の来所が機会になり、ERSグループと中国の耐震研究者との関係が深まり、1981年より3ケ年にわたり、共同研究が行われたが、上述のように大連理工大学との研究上の交流が盛んになり、学術交流協定が結ばれている。この協定の下に田村・小長井研究室と大連理工大学土木工系の韓教授を筆頭とするフィルダム耐震性研究グループとの間で、関門山ダムの動特性の共同研究が行われている。このダムは高さ58mのRC表面遮水壁型式のロックフィルダムであるが、本邦ではこの型式のダムは耐震性の課題を残しているとの理由で現在作られていない。施工技術が向上したこともあって、最近では諸外国で建設されるようになってきている。すでにこのダムで灌水前、後の2回、動特性の測定を行ったが、本邦では得難い成果を得ることができた。

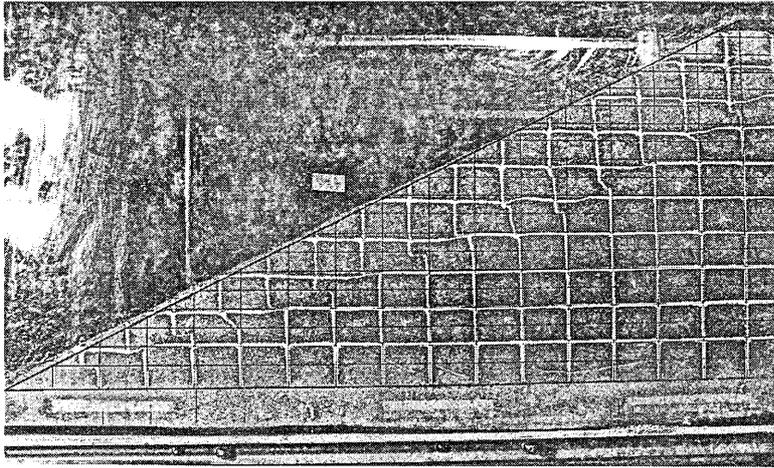
以上今まで実施してきたフィルダムの耐震性の研究の概要を紹介したが、フィルダムの斜面の破壊機構に関しては、攻城にたとえれば、外濠・内濠を埋め、本丸の攻撃も中盤に入っているのではないかと考えている。実際面との対応と云う大きな重い



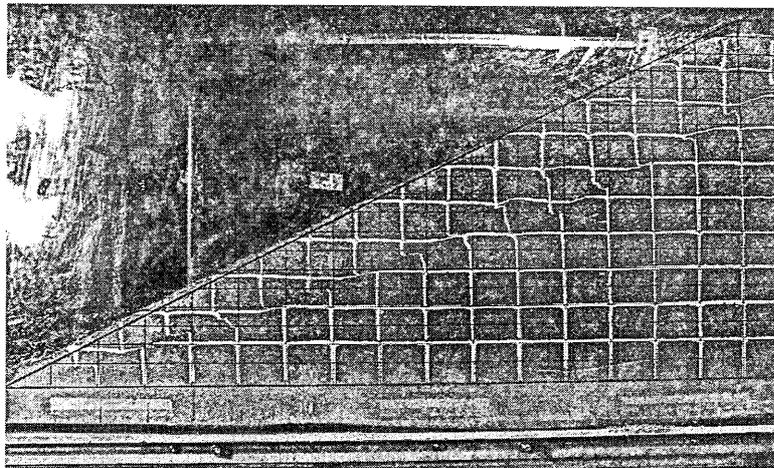
(a) 加振前静止状態



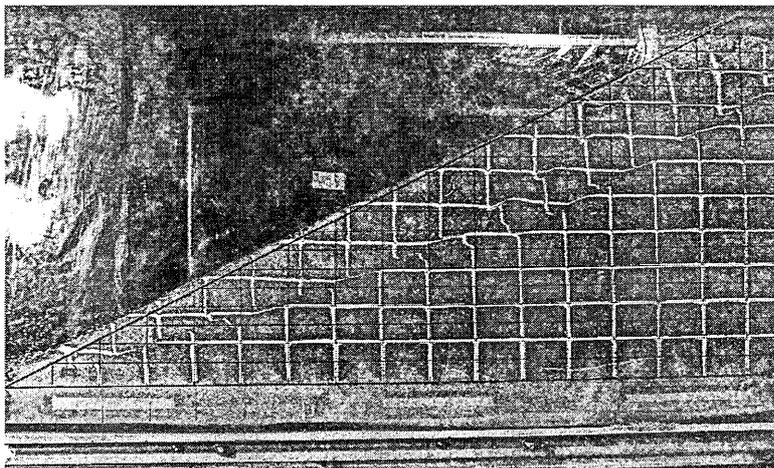
(b) 加振後の時点1：下半分の斜面に沿って切り面が発生し、又上部の約40%にも切り面が発生しつつある。



(c) 加振後の時点 2 : 法尻から発達した沁り面と上部で発達した沁り面とが中位の高さの部分で行き違っているのがわかる。



(d) 加振後の時点 3 : 上, 下 2 つの沁り面は更に発達し, 表面部分の沈下が進んでいる。



(e) 加振後の時点 4 : 下方から発達した沁り面の上端部はそれ程発達せず, 上部から伸びた沁り面の下端部とつながり, 全面的な沁り線を形成する。

写真-3 砂で築造したフィルグムの 2 次元模型の振動破壊過程

課題が残されているのは言うまでもない。

#### おわりに

生産技術研究所に設置された工学部分校に入学したのが1951年のことであるから, 途中数年間抜けているものの今日まで約40年を経たこととなります。諸先輩の努力により, 設立当初の問題たとえば部間, 研究室間の壁は取り除かれ, 自由な研究を行う態勢が確立し, 研究者相互の研究上の情報のみならず個人的な交流も盛んに行われる気風ができ, さらに今まで培ってきた試作工場, 計算機室, 映像技術室等の直接的な研究支援, 事務部の一体となった研究支援・促進態勢は, 研究を行うために自ら作り上げてきた研究所であると改めて感じさせるものです。

冒頭に述べたように, 筆者にとっては時期にも恵まれておりましたが, すぐれた恩師である岡本舜三名誉教授の御指導, 御助言をいただいたことは, この上ない幸いであり感謝しています。1967年から始まったERSグループは耐震工学の研究を活発に続ける上で大きな支柱になり, 千葉実験所の存在は1つの精神的な拠り所でもありました。

このような恵まれた環境の中にあつて, 多くのよき先輩, 同輩, 仲間に囲まれ, 協力を享けて25年間研究・教育に没頭できたことは大きな喜びです。この期間終始協力を受けた加藤勝行助手ならびに荒川常昭, 小野公一郎, 安田義雄, 片桐俊彦, 鈴木琢弥の各技官に対しここに記して謝意を表します。

(1992年2月5日受理)