

都市構造物の耐震強度の調査研究概要

Outline of Studies on the Aseismicity of Urban Structures

久 保 慶 三 郎*

Keizaburo KUBO

1. ま え が き

都市施設は作業現場の事故、火災など、いわゆる人災によって破壊または損傷を受けるが、わが国では都市施設の大規模な破損は台風などによる風水害または大地震によって発生するのが一般である。したがって、都市構造物の破壊についてはこれによる都市機能の低下を考えると、天災による破壊を研究することが重要なことである。風による特殊な破壊例としては1940年11月に風速19 m/secの風で完成後4月を出ずして落橋したタコマ橋(スパン840 mの吊橋)の例がある。また最近の水害例としては、名古屋市を襲った伊勢湾台風がある。

天災に対する都市構造物の強度向上の問題を究明してゆく場合、本所では既に数年前から耐震構造学の研究センターが発足しており、本所内の耐震工学研究者のグループ活動が開始されていたので、ここで都市施設の防災問題を研究する場合は天災のうち特に地震を取りあげて研究するのが自然であり、また研究の成果も挙げやすいと考えた。

最近の大都市の様相を見ると戦前の様相、あるいは過去に大地震に襲われた当時の様相とは全く変わっており、高速道路用高架橋や、超高層ビルや、網目状に発達した地下鉄道トンネル、送電管、通信ケーブル管など地震の経験をもたない重要構造物が数多く建設され、また規模も昔とは比べものにならない位大きくなっている。明治24年(1891年)の濃美地震以来非常な勢で発達してきた地震工学も地震を未経験の長大重要構造物の耐震性の判定、耐震設計手法の確立にはいささか力不足の感があり、地震時の地盤振動と埋設管の挙動、鉄筋コンクリート構造物の動的破壊強度、変形能力に関する研究などを原点に立返って見直さなければならなくなってきた。特に1971年の米国 San Fernando 地震は、近代的高速道路用高架橋、ガス水道などの埋設管、新しい病院の破壊などの大震害が発生して、近代都市が地震に弱いことを露呈し、都市構造物の耐震強度の研究の重要性が再認識された。都市構造物の震害は都市機能を失わしめるばかりでなく、国民的資産である人命、財産の莫大な損失をとまうので、投資規模が飛躍的に増大した近代都市で震害の可能性のあるものでは、耐震強度の判定基準や耐震設計法の確立などが強く要望されてきた。

都市施設の種類は多く、木造建築、低層の住宅、道路橋や歩道橋、河川堤防、工場設備などがある。この種の構造物の耐震強度の研究とは別に火災延焼や避難計画に関する研究がある。本研究においてはすべてをカバーした研究は事実上困難であったので、次の三つのテーマを選んで研究することとした。

- 1) 埋設管の耐震強度に関する研究
- 2) 構造物の動的強度に関する研究
- 3) 振動減衰装置に関する研究

以下に選定の理由と研究目的について述べる。

2. 各研究テーマの概要

通常地上に建設される構造物の耐震設計法は静的震度法で行われる。すなわち構造物の自重に設計震度(通常は0.2の値が用いられる)を乗じたものを水平力として構造物に作用させ、安定性および耐力を判定する方法が用いられている。静的震度法を埋設管の耐震設計法とすると、埋設管とその内容物の重さに設計震度を乗じた力および周囲の土の地震時土圧とを水平に管に作用させて、土の抵抗土圧と比較して、埋設管の地震時の安定を判断することになる。このような判定方法では新潟地震時におけるような管の沈下、浮上または一般の大地震時における管の抜けなどのような震害を説明することはできない。またこのような方法を用いた場合は、軟弱地盤により多くの震害が発生することになるが、この傾向は過去の震害の性質と反するものである。埋設管の耐震強度判定に静的震度法を適用しようとする、上述のような矛盾がある。したがって埋設管、地下鉄のトンネルなどのような地下の筒状構造物の耐震設計には従来一般に用いられてきた設計法と異なる新しい設計法を開発しなければならない。都市構造物の耐震強度の調査研究においては、第一に、以上の現状をふまえて、埋設管の耐震強度に関する研究を取りあげた次第である。

研究方法としては過去における埋設管の震害の定量的ならびに定性的調査、沈埋トンネルにおける地盤加速度およびトンネル内のひずみ、加速度との比較、沈埋トンネルの実験室内の模型実験、埋設管のシミュレーションモデルの数値解析などが考えられた。このほか地盤動変位を加速度記録から計算する手法の開発ならびに地盤動変位の大きさに関する研究があるが、この研究は種々の解析手法を応用して研究したが、まだ難点があり、完成

* 東京大学生産技術研究所 第5部

するに到っていない。

建築物の地震時挙動の解析および耐震設計法の研究はここ数十年、超高層ビルが主たる対象になっているようであるが、土と構造物の相互作用の研究や、鉄筋コンクリート構造に関する研究なども一方において進展した研究である。特に中低層の鉄筋コンクリート建物の研究は超高層建物の蔭にかくれた感があるが、1968年の十勝沖地震でかなりの学校建築物が震害を受けたし、市役所や図書館などの鉄筋コンクリート建物も同様であったことから、地震時の破壊に到るまでの鉄筋コンクリート構造物の挙動の研究の重要性が指摘され、研究の成果がではじめたときに、本研究が企画されたこともあったので構造物の動的強度に関する研究が本研究のサブテーマとなった。すなわち真の耐震設計法を確立せんがためには、地震時の構造物の破壊に至るまでの動的挙動、各部材の応力を明かにする必要があると考えた。

本研究には鉄筋コンクリートの動的挙動の基礎的研究と同時に鋼構造の動的安定の問題も採りあげられた。この研究を行う手法はいろいろ考えられる。第一にはなるべく実物に近い模型構造物を巨大な振動台の上に載荷して、振動破壊試験を行い、その特性を調査する方法が考えられる。この方法には非常に大規模な振動台を必要とするので、米国でも現在経済的に不可能とされている。振動台の規模を小さくして小型の模型構造物を用いると、部材寸法は細くなり過ぎ、鉄筋は針金同然のものとなるので実物と模型との相似律が成立しにくく、完全な実験的研究はきわめて困難である。

これらの欠点を除いて研究するためには構造物の動的破壊装置が必要であるので、この試作から始め、研究の第2年度には柱または梁の振動実験を行った。これと同時に地震時の軸力曲げモーメントを構造物の弾塑性挙動に応じて試験機の入力としなければならない。このためには地震応答を試験している部材の弾塑性に応じて計算できる入出力データ解析装置が必要で、これを試作し、昭和49年度に実験を開始することができた。このような基礎的研究を積重ねることによって、構造物のより合理的な耐震設計法を確立せんとするもので、建築学会における最近の重要なテーマの一つでもある。

第3のサブテーマとして、振動減衰機構の開発研究を採りあげた。構造物の振動減衰性が構造物の地震応答を減じさせ、構造物をより耐震的にしていることは衆知の事実であるが、構造物の内部減衰とか、地下への逸散減衰でなく、人工的に構造物の減衰係数を大きくして、地震応答特性をよくすることは発明されてはいるが、実用化はしていない。本研究においては構造物の解析に詳しい土木建築の構造力学者と減衰の機構学に通じている機械工学の専門家とが協同して研究することが発案され、本研究所の優れた1面である各分野の協同研究の一

つとしても有意義であるとの観点から、企画されたものである。

この研究では、構造物の振動減衰性を積極的に高めるための減衰装置を試作開発し、その地震時における特性と効果を明かにしようとした。減衰装置としては、摩擦を主としたものも考えられたが、オイルダンパーを構造物内に組込んで減衰を大きくする方法が実験の対象になり、減衰のメカニズム、定量的解析が行われた。結果として油の摩擦よりは油の質量が減衰性の増加に大きい役割を果していることが明かになり、振動防止にも大いに利用されるかも知れない。

3. 研究結果の概要

(1) 埋設物の耐震強度に関する研究

地下埋設物のうち、資料の豊富な水道管について主として研究した。最初に過去の地震と水道管の被害との関係を調査し、震害の実体を究明することにした。久保・片山は関東地震(1923)における秦野町水道、東京市水道、十勝沖地震(1968)による青森市、函館市および八戸市、サレフェルナンド地震によるロスアンゼルス市水道などの被害分布を定量的に調査した。震源地の近かった福井市およびロスアンゼルス水道被害には、共通性があり、いずれも南北方向(震源地に北方5~10km)が東西方向の被害率より高かった。また後者の地震においては加速度分布も明確であったこと、被害分布が配管図に記載されていたので、単位長さ当りの水道管の被害率と加速度の強さとの関係を求めることができた。この結果は次の研究報告で詳述するが、福井市の水道が関東地震の東京の水道より単位長さ当りの被害率が高かった現象も加速度の差から定量的に説明できることが判明した。

東京市の水道については、地盤種別と被害率との関係、地盤の卓越振動数との関係も統計的に調査し、地盤種別の複雑な地区では被害率の高いこと、沖積層が厚くても単一地層では被害率の低くなることを明かにした。これについても次の研究報告で述べる。

水道管の震害の統計的調査の結果、青森市および東京市の水道管の震害などに見られるように、平面的に硬さの相異なる2種の地盤が存在する場合、両者を貫通する管は地震時の地盤の変位振幅が異なる(確かに地盤の方が振幅が小さい)ために軸方向に強制的ひずみが発生し、これが管の抜けの主原因であることが結論された。この軸方向ひずみに注目して、地震入力表面層の下に存在する基盤から与えられるとしたときのシミュレーション解析を行った。モデルの作り方および地盤の常数のとり方などについては文献2に詳述されているので、ここでは主な結論を紹介することにする。軸力の分布は硬軟の境界面近くで最大となり、境界面から離れるにつれて軸

力は減少している。軟い地層の弾性係数を変化させて軸力を計算した結果では、地盤の弾性係数が小さくなるほど大きい軸力が発生することが解析された。

以下は水道管ガス管などのように断面の小さい管についての調査であるが、都市における埋設物でもう一つ重要なものに地下鉄トンネルや沈埋トンネル（東京港口に現在建設中）がある。これらの特徴は比較的弱い地盤中に建設されていることであり、この点では岩盤中に建設される山岳トンネルとは似て非なるものであろう。地下鉄トンネルについては現在までのところ、それほど進んだ研究はなされておらず、沈埋トンネルについてもその重要性から、本所の田村が模型実験や実物における地震動の実測を行っている。また田村は地盤と沈埋トンネルとの相互作用を考慮したシミュレーションモデルによる地震応答解析を行った。以上の研究により、沈埋トンネルでは軸方向にひずみの方が曲げひずみより卓越していること、軸方向ひずみは地盤動の変位振幅とよい対応を示している、地盤動の加速度とはよい対応を示していないこと、モデル解析によると、軸方向ひずみもかなり大きくなり、降伏ひずみに近い値を大地震時に示すことなどを明かにした。これらの研究は沈埋トンネルの耐震設計基準に大小にとり入れられ、この方面で高く評価されている。

過去の震害の調査あるいはモデルを用いた数理解析によると、埋設管の震害の大部分は管自身でなく、継手部または弁などに発生している。各種継手の動的および静的強度に関する研究は柴田が担当して行った。この研究においては、機械継手、フランジ継手、溶接継手など各種の継手をもつ鋼管にあらかじめ中圧ガス管程度の内圧をかけて、軸圧と繰返し曲げを作用させ、動的強度および破壊特性を調査した。この種の調査は過去において皆無といってもよく、機械継手では結合方法が強度に関係があること、フランジ継手のフランジ隅角部には応力集中があるため、動的強度の低下が避けられないことなど、継手の耐震設計を確立するための有益な知見をうることができた。

以上要するに、地下埋設管の耐震性の研究は満足後目が浅く、他の構造物のように耐震設計法が確立されているわけでもなく、暗中模索的に研究が行われてきた。本所の研究はこのような現実をふまえ、地下埋設管、都市内のトンネルなどの耐震設計基準を作製してゆく上の重要な資料とその手法を求めて行われた。まだ解決してゆかなければならない問題も多いが、一つづつ実物の設計施工に生かされており、この点に光明があるわけである。臨時事業の研究期間が終了しても、埋設物の耐震強度の研究は継続され、発展させてゆくつもりである。

(2) 構造物の動的強度に関する研究

従来この種の研究は構造物が地震時にうける力あるいは

変位を静的に作用させて破壊に到らしめるか、あるいは振動台に小型の構造物模型を載せ振動破壊せしめるかの方法によっていた。前者は実物で試験できる利点はあるが、静的強度であるので、地下の逸散減衰や質量の直接的影響を加味することができない欠点をもっていた。後者では動的な挙動はやや明かにしうるが、供試体構造物の大きさが振動台の容量で決まるため、それほど大きい模型が使用できない欠点があり、これは相似律が満足できない欠点にもつながってゆく。いずれにしても構造物の動的強度を解明する手段とはなっていないというのが現状である。

本研究においてはまず試験方法の開発から研究を進め構造物（部材）動的破壊試験装置、応答発生装置、入出力データ解析装置の3種を組合せることにより、構造物の地震時の動的破壊現象を再現し、各種構造物の破壊時の破壊に至るまでの挙動を明かにせんとした。最終的には応答発生装置から得られる力または変位を入出力データ解析装置で供試体に適応した相似律で変換し、これを動的破壊装置の入力とし、この装置で保られた変位-力特性を応答発生装置の情報として利用し、これを繰返すことにより実物に近い部材の動的破壊試験を行えることを考えていた。しかし、これには種々の未解決の問題があるので、動的破壊試験装置と入出力データ解析装置とをオンラインで結ぶことは最小限必要なこととし、応答発生装置の実験結果はオフラインで動的破壊実験結果と比較する便法を考えて、本研究を企画、実施した。以上の機械のほか、部材の動的破壊実験を行うための実験床と装置の反力をとる耐力壁とからなる実験台をプレストレストコンクリート構造で建造した。床の面積は5m×10mで、50t/m²の耐力があるし、耐力壁は高さ6mで、曲げ耐力は450t・mである。

現在までのところ、これらの装置を用いて、鉄骨部材および鉄筋コンクリート部材の激振時の復元力特性ならびに動的耐力に関する実験が行われた。詳細については後の研究報告で述べられるので、ここではそれらの概要を簡述する。

鉄骨部材の研究は降伏時の変形の数倍までの変形が可能であるとされ、この考え方が塑性率の概念で建物の耐震設計の基本となっている。この考え方の背景としては、部材が大きい変形を起しても座屈などの現象は起らないことが前提となっている。また鋼材の方からは弾性限を超えた応力状態では剛性の低下があるので、座屈しやすくなるという性質もでてくる。この点を考え、第5部の田中・高梨は鋼材部の繰返し載荷時の挙動に関する実験的研究を行った。曲げ試験結果を用いて実験の概要を述べると次のごとくである。

繰返し載荷実験の加力の制御方法としては変位制御と荷重制御の2つが可能であったが、実験が塑性状態に入

ってから容易である変位制御を用いた。変位は供試体の断面が全塑性モーメントになるときの荷重点の変位の倍数とし、各段階の繰返し数は 10 であった。一方向の単調載荷実験も動的試験と静的試験とを比較する意味でも行われ、過度の横座屈変形が生じると、その後の繰返し載荷に対して安定な履歴ループが得られないことが明らかになった。また繰返し試験においては、ある振幅までは履歴ループは安定であるが、限界を越えた試験では安定な履歴ループが得られなくなる。これは座屈崩壊が発生しているため、部材の剛性の低下が誘発される。この座屈崩壊の限界は単調載荷による座屈限界の 1/2 以下であることが実験的に明かにされ、耐震強度判定上重要な資料を得たことになる。現在、地震波のような不規則な外力または強制変位を得けた場合についても研究が行われつつあり、この結果も耐震工学上非常に有益な資料となるであろう。

第 1 部の岡田は鉄筋コンクリート部材の復元力特性について調査研究した。鉄筋コンクリート構造の基本である応力ひずみ曲線まで遡って解析し、鉄筋コンクリート部材の非線形領域における特性、ひいては同部材の耐震性能を評価し、耐震設計法の改善に資せんとして行われた研究である。鉄筋コンクリート部材は鉄筋とコンクリートで構成され、その特性は両者の構成、特性により複雑に影響される。ここでは鉄筋とコンクリートのそれぞれの非線形領域での応力ひずみ関係を明かにし、これにもとづく復元性の数値解析と断面の曲げモーメント曲率との実験結果とを比較し、両者がよく一致することを確認した。ここで重要なことは、大きい荷重の繰返し試験では、数回の繰返し載荷により鉄筋とコンクリートとが分離してしまうことで、フープ鉄筋の弱い十勝沖地震における函館大学の柱などは典型的なもので、この実験によってもフープ鉄筋の役割、換言すれば鉄筋とコンクリートとの分離を防止することが如何に重要であるかが明かであろう。

以上のほか、久保・片山は歩道橋のモデルの強制振動実験を行った。地震による歩道橋の落橋は地震時の交通制御と相互作用をもつ研究であるが、実験の開始もおそく、臨時事業の研究の発足当時には計画になかった研究でもあるので、ここでは構造物の動的強度に関する研究の中に歩道橋の実験もあったことを述べるに止めることにした。

(3) 振動減衰機構の開発研究

振動減衰機構を積極的に構造物内に組み込んで、人工的に構造物の耐震性能を改善しようとする方法は過去にも種々考えられたが、詳細に実験的ならびに理論的解析は行われていなかった。本研究では減衰機構として耐震ダンパーを選び、これによる振動エネルギーの吸収能力、構造物の地震応答の低減を究明した。耐震ダンパーはス

テンレス製のベローズの両端を鉄板のダイヤフラムで閉じつつみ形とし、これをパイプで連結したものである。パイプで連結した 1 対のダンパーの 1 つは圧縮変形を、他の 1 つはのび変形になるようになっているので、ある方向の構造物の変位によって、ダンパー内の油はパイプを通して他のダンパーに移送される。つぎに構造物が逆の方向に変位すると、パイプ内の油が逆流する。ダイヤフラムには小さい内孔（オリフィス）があり、これにパイプが連結されているので、パイプ内の油は、ダイヤフラムの面積はオリフィスの面積に比して著しく大きいため、かなりの速度になる。

スパン 1,500 mm、高さ 1,000 mm の鉄骨フレームに内径 170 mm、外径 210 mm のベローズに 8 mm、15 mm のオリフィスからなる耐震ダンパーが取りつけて、実験された。液体としては水と油が用いられた。水による実験は粘性抵抗のない単純な解析上有利な条件をもつために行われたものである。実験結果によると非常に有効な減衰作用が耐震ダンパーにあることが判明したが、その主たる原因は研究担当者の第 5 部の川股が明らかにしたようにパイプ中の液体の質量、あるいは運動量であることは注目すべき解析結果であった。まず鉄骨フレームの固有振動数についていうと、耐震ダンパーのないときに 25.4 Hz であったものが、耐震ダンパーをつけると 1.5~4.0 Hz になった。見掛けの減衰もダンパーのないときの 1% から 8.7~11.5% まで上昇することが判り、耐震ダンパーを設置することにより減衰定数の増加ばかりでなく、固有振動数の低減もはかれることになった。

耐震ダンパーが耐震性向上に有効なのは、質量効果理論から考えても、あまり大規模の建物ではなく、鉄骨フレーム構造ではないかと思われる。この構造は室内操場や工場建築に見られるように質量はそれほど大きくないし、過去の大地震でもしばしば筋違い部材の破損などの震害を受けた構造であるので、固有振動数を低下させ、地震荷重を小さくし、かつ見掛けの減衰を大きくできると、地震時の応答変位も小さくなく、地震に耐える構造になることが考えられる。

また機械基礎の振動に應用しても有効な利用法が見つけられるであろう。機械基礎の防震への耐震ダンパー（本研究で開発した）の應用については、設計計算式までできており、あとは実用性の実証をまつばかりである。

4. あとがき

本研究は昭和 46 年度から 48 年度までの 3 年に行われたものであるが、計画がまとめられたのが昭和 45 年で、当初の計画にはなかったものも本研究と平行して実施された。第 3 節で簡単に紹介した歩道橋の耐震強度に関する研究や、タンクの地震時挙動の研究や、化学プラ

ントの耐震基準の調査研究などは、臨時事業としての都市構造物の耐震強度の調査研究には表面上含めていないが、本研究の担当者が行ったものであり、また本研究に密接に関連のある研究でもあった。

本研究の発足当時は埋設管の耐震設計と称して、静的震度法で計算し、地震時発生する応力が微々たるものであるから、地震時安定であるという計算書がいくつか眼にとまったが、埋設物の耐震強度の研究結果およびこれと相前後して発表された他の論文などによって一般が啓発されたためか、今日では 3~4 年前に見られた静的耐震法の計算は見られなくなった。しからば本研究でも明らかにされた、設計上最も重要な情報である地盤動の変位振幅については既に明かにされたであろうか。本研究でもこの問題の解明を企画し、加速度波形のドリフトの除去に努力し、応答発生装置を利用し、振動台の加速度波形と変位波形を同時に記録し、加速度波形から変位波形を求める手法の良否、計算の誤差などについて研究したが、現在のところ用いた数種の方法とも精度が悪く、研究は暗礁に乗りあげた形となっている。

沈埋トンネルについては地震動を多摩川川口の沈埋トンネルで実測中であるほか、数理解析も抽象化したモデルについて 2,3 行われてきたし、今後もこの研究の積重ねが行われるであろうが、久保・田村は土木学会内の沈埋トンネル耐震設計委員会（建設省からの依頼）の委員として、耐震設計基準の作製のために働いている。

通産省の依頼でできている化学プラント耐震設計基準の作製にも、柴田・佐藤・久保などが委員会活動を通して、協力している。

構造物の動的強度の研究では当初の計画通りに、比較的大形の構造物部材の実験を、地震時の条件を再現しながら実施することはできなかったが、計算機で計算しながら部材の復元力に対応した特性を入れながら強制振動試験を行い、非線形領域の研究をすることは可能になったし、すでに不規則外力を入れた応答実験が始められ

た。これにより鉄筋コンクリート構造、鉄骨構造の力学的特性、特に塑性状態における座屈の問題、破壊の問題などが解明されるものと期待される、本研究による成果は既に一部建築学会の鉄筋コンクリート構造物の耐震設計基準の改訂に役立っている。

振動減衰機構の開発研究は耐震ダンパーの質量効果を発見できたという輝かしい成果をえたが、これを鉄骨フレーム構造の耐震性向上か、機械基礎の防振に利用できる見通しがついて、あとは実際への応用をまつばかりである。

臨時事業の研究として、都市交通公害対策研究グループとの関連は道路を横断している歩道橋の耐震強度の研究が少しは関連があるかと思われるが、都市構造物の耐震強度のグループの研究も歩道橋については十分進んでいないため、十分相互に関連して研究を進めることはできなかった。また都市廃棄物対策のグループとも、廃棄物の貯蔵方法と地震対策というテーマでは相互に結びつきえたと思うが、都市構造物の耐震強度のグループに粉体、液体の地震時安定の問題が含まれていなかったため、両グループが相互に情報を交換して研究を進めることはなかったが、都市における災害の公害の防除に関する研究により、必要な時期にはいつでも相互に協力して、研究成果を feed back して研究が進められる基礎はおかれたと考えている。

本研究は研究担当者はもちろんのこと、本所の耐震構造学センターの皆様にも御尽力を戴いた。筆を擱くにあたり研究担当者ならびに研究室の皆様、耐震構造学センターの皆様には深甚に謝意を表すものである。

(1974年8月27日受理)

文 献

- 1) 「都市構造物の耐震強度の調査研究」昭和 47 年 3 月, 生産研究 24 巻 3 号
- 2) 「鋼構造の弾塑性特性に関する研究」昭和 49 年 7 月, 土木学会第 13 回地震工学研究発表会講演集