



最近の研究紹介

久保慶三郎*

1. まえがき

地震工学の講座もいよいよ本章で終了することになった。今回は最近の研究紹介であるが、土木における地震工学について一言し、ついで研究の紹介をしようと思う。

建築の場合は地震によって家屋あるいはビルディングが倒壊すると、それに住みあるいは利用している人の生命の損傷に関係し、また建物の密集性により震害がきわ立ち、注目をあびるのであるが、土木構造物の場合は列車の転倒以外は、その震害は直接人命に関係しない。しかしながら、水道施設の震害は飲料水の供給をひどく不円滑にし、住民の生活をおびやかす、また消火用水の不足を導き、火災を必然的に大きくさせることになる。都市の近代化につれ、水道施設の耐震性はその重要性をますます大きくしてきていると思う。

つぎは交通路と震害との関係について述べる。橋梁の落下、道路の欠損、鉄道の不通などが発生すると、震災地への救援物資の輸送、再建物資の運搬をいちじるしく非効率化する。以上の震害のほか都市内では、倒壊家屋や落下した屋根瓦、倒れた電柱などによっても交通の機能はいちじるしく低下する。これらも土木構造物の震害が間接的に、住民の生命、生活に大きく影響している例ではないかと思う。

しかしながら土木構造物に建築物に比較して、点と線を形成して、面を形成することが少ないために、よほど大規模の地震でないと、数多くの橋梁の落下、交通路の不通などを招来することがなく、震害の脅威は建築物ほど切実でない。しかし土木構造物の耐震設計は十分研究され、地震時に安定な構造物を建設し、国民の福祉に貢

献することは重要かくべからざるものであることはいうまでもない。

耐震工法、すなわち地震時にも安定な構造物を建設することは金のかかるものであるという固定概念が存在していることは、否めない事実であり、また一面真実を表わしている。しかし、その考え方のよってきたところを考えると耐震設計は震度法のみであるという概念がその根源でないかと考える。筆者の考えでは、耐震設計の一つの方法として、地震の影響が震度という概念で便宜的に表わされているにすぎなく、自重に震度を乗じた力を水平、または垂直に構造物に作用せしめると、経験的に耐震性のある構造物が作られるということだと思う。震度法の教えるところによると、耐震的に丈夫な構造物を設計するためには大きい震度を取り、大きい地震力を作用させればよいことになり、その結果、必然的に構造物の断面が大きくなり、また基礎もより大きなものになるために、経費が余計に必要となる。逆にいうと、経費が十分でないときは、震度を下げて設計するよりほか仕方がないことになる。地盤から構造物へ地震動が伝達されてゆく過程を詳細にしらべると、構造物、地盤の地質、基礎の条件などにより、伝達のメカニズムが一定でなく、そこに震度法を批判する点が生れてくると考える。しかし現在はまだ、この方面の研究は十分ではない。

また震度法を用いた構造物で地震を受けたものから、経験的に、耐震性のある構造物を作るための震度の値を知ることができるが、技術の発展とともに石造から鉄筋コンクリート、プレストレストコンクリートなどに変化してゆくように、材料も変わり、また施工法、構造物の形式、規模もかわってゆくので、それらの新しいケースについては、震害の経験もとほしいので、震度の値を決定するのに、多くの研究を必要とする。

耐震設計の研究で困難な点は地震そのもの、特に土木構造物に震害を発生せしめるような大地震の地盤動の形が不明な点である。現在よく利用されているのは1940年5月8日に($M=7.1$)にEl Centroおける強震計で得られた記録(最大加速度=330 gals)で、今までにとれた記録のうちでは最大の加速度であるというので、地震動として著名なものである。しかし、この地震記録は例えば東京における地震記録と同じであるという証明がないかぎり、東京に建造される構造物に作用する地震を代表させて、解析を進めるわけにはゆかない。しかるべきかなる地震記録を耐震設計の解析を行なう場合に使うべきかということが問題になるが、これについては現在研究中の問題で定説はない。

つぎは大地震の場合と小地震の場合とで地震波形が異なるかどうかの問題がある。現在記録としてとられてい

カット写真：第6回地震工学研究発表会風景(38.10.21)

る地震はいわゆる大地震ではなく、また少なくとも多くの土木構造物に被害をおよぼす地震ではないので、大地震を対象に研究を進めてゆく場合に、両者の地震の相関関係が明らかでないこと、研究に非常な支障をきたすことになる。この問題も現在までのところでは、明瞭な結論はえておらず、研究者が推量している域をでていないと思われる。

以上が土木における地震工学の重要性、および困難さであるが、これらの問題は強震計の設置が進んでいる現状では、記録がとれ、かつそれが積上げられてゆくことによって、徐々に解決されてゆくのではないかと思う。

本号では国内研究でいまだ講座で紹介されなかったもの、および外国の研究について、以下に紹介しようと思う。その順序は材料、設計、構造の順序に述べてゆくつもりである。最後に昭和35年度から国鉄依託で行なってきた土木構造物耐震構造設計委員会の調査、研究事項について、本文を借りて発表させていただくことにする。

2. 材料の動的強度について

材料の中には土質力学も構造材料であるとしてふくめることにする。地震時に材料のうける力は短期間であること、およびその力はある載荷速度をもっている点が、他の設計法と異なる点であろう。しかしながら、材料の動的強度に関する研究は設計の根本になるので重要な問題であるにもかかわらずあまり研究されておらず、最近土質力学関係でさかんに研究されている以外は、電研の畑野博士のコンクリートの衝撃的荷重に対する変形および破壊時間などに関する研究がわずかに存するにとどまっていると思う。土質力学は振動時の土の力学的性質、偏心荷重を受ける支持力理論ならびに実験的研究、振動時の土圧などの問題は耐震設計の問題と直接的なつながりをもつものである。

振動時の土の力学的性質については、最上教授の振動時の動的せん断抵抗力に関する研究がある。この論文はこの種の研究のパイロット的研究でもあり、鉛直方向に振動する砂および粘土の挙動について研究したものであり、砂の場合は加速度が300 galを越えると、液状化しせん断強さがいちじるしく減少することを明らかにした。粘性土や関東ロームについてもその強さは振動加速度、また含水量によって影響があることを見出した。第2回世界地震工学会議論文中にはH.B. Seed博士、村山教授らの論文がふくまれている。前者の論文は粘土の振動応力に関して研究し、1回だけのパルスを与えた場合には粘土は強くなり、初めに載荷していた応力と、そのパルスによる応力との和は粘土の破壊応力を35%も越える。しかし、そのパルスも地震時のように何回も続くと、回数の影響が入り、もし大きな加速度をおこす振

動の回数が100回であると、強度が低下し粘土の地震時パルスによる応力と初応力との和は破壊応力に等しくなる。その後の白石俊多博士の研究によると、砂の動的せん断強度は加速度と同時に振幅の関数であることが明らかにされた。

偏心荷重を受ける支持力理論ならびに実験的研究は地震時構造物の安定に重要であり、この研究は、佐野、物部両博士にその源をもとめることができるが、岡本教授の振動時の支持力の実験的研究が発表されて以後、活発に研究が行なわれている。この研究は地盤の傾斜角を傾けた場合の静力学的変形機構に関する実験と、実際に砂地盤を振動せしめてその支持力を測定した実験とがある。砂をつめた箱を振動台上におき、砂の表面におかれた載荷板上に垂直または傾斜した荷重を加えた状態の支持力を測定し、支持力は最大加速度とともに減じ、300 galぐらいで砂の流動化をとまうので、結果はばらつきが多くなること、また傾斜角の大きいほど、支持力の減少がいちじるしいことなどが明らかにされた。このほか、この問題については、港湾局の篠原、立石、久保博士らの研究も、第2回世界地震工学会議に発表されている。

地震時土圧については物部博士以来、松尾博士の振動函に関する実験を経て、現在は多くの研究者によって発表され、また研究されつつある問題である。

物部博士の公式は $\tan^{-1}k$ (k は震度)だけの地震合成角だけ地盤を傾斜せしめ、あとはクーロンの土圧を用いるのであって、動力学的な問題を静力学的な問題におきかえて、解析している。しかし、実際地震時土圧の実体を究明しようとする、静力学的な取り扱いのみでは不十分であることが予想され、物部、松尾両博士が振動函を用いて世界で初めての実験をされた。初期の実験は、乾燥砂を用い、振動函も $40 \times 43 \times 110$ cmで、振動の方向に直角にさきえた垂直壁に作用する圧力を記録し、その時間的変化、砂の突き固めと土圧、土圧の大きさと壁の変形などについて明らかにしたが、その後、研究を進め、地震時の圧力分布の測定、飽和土の土圧、動水圧等についても研究を進めている。

また、この問題は現在の運輸省港湾技術研究所においても盛んに研究されている。石井博士、林博士らの研究がある。両博士らの研究によって、残留土圧分布は深さに比例した分布で、これがまた物部公式に近いこと、その他振動中の土圧の大きさと位相差、壁の変形と土圧との関係、その他が明らかにされた。前述のように土の問題は最近活発に研究されてきた問題で多くの論文を紹介しなければならないが、設計、構造などのかね合いもあるので、これ以上の紹介は割愛させていただく。

3. 耐震設計について

設計には従来と同じく現在でも、その簡潔性のために震度法、すなわち地震力の効果を自重に震度を乗じたものと考え、その力を静力学的に構造物に作用させ、構造物の安定、応力計算を行なうという方法が各国とも使用されている。

最近では動的設計法というか、動的解析法というか、新しい方法が発達してきて、現在は流行のようになっている観さえある。この根本原理を簡単に紹介し、のちに各研究者の研究の紹介をしたいと思う。

構造物は一般には多くの固有周期をもつ多自由度（厳密には無限であるが、工学的には有限と考えてよいと思う）の振動系であるが、そのうちのある周期に注目すれば、1自由度系と考えられる。簡単にいえば、ある質量がバネで吊り上げられ、そのバネの支点がある形で振動するときの質点の動きの解析と同じに取り扱える。ここで、その質点を m 、バネの強さを k 、粘性減衰係数を c 、バネの支点の変位（強制振動の場合）を z 、質点の支点との相対変位を y とすると

$$m \frac{d^2}{dt^2} (y+z) + c \frac{dy}{dt} + ky = 0$$

という式が成り立つことは、どこの教科書にも書いてあることである。構造物の減衰には、固体摩擦による減衰と、変形の数に比例するような粘性減衰の2つの形がある。その原因はそれぞれ複雑なものであって、その説明は他の教科書にゆづらざるをえないが、固体摩擦のほうは計算の取り扱いがめんどうであるので、一般には粘性減衰で減衰を代表させて問題を解いてしまう。

上式において、 $c/2m = n$ 、 $p = \sqrt{k/m}$ 、 $\omega^2 = p^2 + n^2 \equiv p'^2$ とおけば、質点の変位 y は

$$y = -\frac{1}{\omega} \int_0^t \frac{d^2 z(\tau)}{d\tau^2} e^{-n(t-\tau)} \sin \omega(t-\tau) d\tau$$

で与えられる。

そこで $d^2 z(t)/dt^2 = \ddot{z}$ と書き直し、つぎの記号を用いて、上式を書き直すと

$$y = -\frac{T_0}{2\pi} \sqrt{2\bar{E}} \sin(\omega t + \alpha)$$

$$\text{ただし } E = \frac{1}{2} (A^2 + B^2) \left(1 + \frac{n^2}{\omega^2} \right)$$

$$\text{ここに } A = \int_0^t \ddot{z} e^{-n(t-\tau)} \cos \omega\tau d\tau$$

$$B = \int_0^t \ddot{z} e^{-n(t-\tau)} \sin \omega\tau d\tau$$

そこで、構造物を振動させる地盤の振動波形を表わす $z(t)$ がわかると、構造物の変形が計算されることになる。 $\bar{E} = 1/2(A^2 + B^2)$ で定義される \bar{E} を用いると、地震時の最大の変位は $\sqrt{2\bar{E}}/\omega$ 、最大速度は $\sqrt{2\bar{E}}$ 、最大の加速度は $\omega\sqrt{2\bar{E}}$ で表わされることになる。構造物の周期を T_0 とすると、 $\omega = 2\pi/T_0$ であるから、地

震時の構造物の最大加速度は $2\pi\sqrt{2\bar{E}}/T_0$ で与えられる。すなわち最大加速度は構造物の周期に送比例している。また最大速度は構造物の周期に無関係である。このことを最初に地震記録を用いて計算し、発表したのは Biot 博士である。その後米国の地震の第1人者である Housner 教授が米国でとれた5個の強震記録を平均して、平均応答曲線を提案した。また、わが国においても、この種の計算を多質点系の構造物の振動に応用したり、構造物の変形が弾塑性である場合などに応用し、いわゆる非線形振動の応答の研究などが研究されている。東京工業大学小林博士らの考え方は、このようにして非線形振動をする構造物の地震時応答を求め、それと同じ断面をもつために必要な地震時荷重を自重で割ったものを設計震度としている（1962年国内シンポジウム論文参照）。このような考え方の一例を述べると、最大地震動が700~800 gal程度でも、設計震度は100~150 gal程度でよいようである。もっとも、この値は各種の構造物について計算してみないと、この値をどの形の構造物にそのまま応用してはいけない性質のものであるが、地震時の地盤の最大加速度と、構造物の設計に用いる設計震度とは、自ら異なる値であることをあらわしているものと考えられる。

以上、地震時の構造物の応答解析の方法とその応用の例を少し述べたが、このような方法を動的設計法または動的解析法とよんでいる。土木においても京大の小西教授らが吊橋の振動に応用しているなどの例が多くある。しかし、この方法で最も大きい問題は、構造物を振動させるべき地震時の地盤の振動（上式中では $z(t)$ ）をいかなる形のものを用いるかという問題であり、これは本章の初めに述べた。

4. 耐震工法について

つぎに耐震工法に関する研究の紹介をする。この分野の研究は震度のとり方、動的解析法などに関する研究と同じく重要なものであるが、現在のところ非常に立ちおくれた未熟な研究分野である。この分野はいかにして構造物を耐震的に設計するかという問題をふくんでおるので、研究面を担当している者より、設計面に働いている人々の入りやすいものではないかと思う。理論計算で不明な点を技術的に解決する、また新しい設計技術の導入とか、多くの新しい、かつ重要な問題が山積している。

首都高速道路公団の上前技師の Oil damper を用いた工法はこの分野の大きい功績の研究だと思う。簡単に紹介すると、Oil damper を橋脚と連続桁との間にとりつけ、地震時に連続桁の荷重が各橋脚（固定端はない）に等分に近く分配されるようにし、さらに Oil damper の作用により減衰も大きくし、地震時の応答変形を少な

くしたものである(本号ロータリー参照)。

5. 国鉄依託の研究の概要

最後に国鉄から土木学会に依託されている、構造物耐震設計方法の研究についての概要を説明する。本研究は昭和34年度に始まり、3カ年継続後、昭和37年度から、研究もさらに具体化して耐震構造設計に関して、37年度、38年度と研究してきた。

昭和34年度の研究の方針としては、過去の耐震設計、震害の考察などとらわれずに、白紙的な立場から、震害例の統計的調査を行ない、震害の実体を把握し、震害と震度法との関係、耐震学上からみた構造物の弱点の解明を行なうことにした。また研究すべき土木構造物としては主として橋台、および橋脚に限定して考察することにした。その理由は橋台、橋脚の耐震研究によって、擁壁その他の土木構造物の耐震設計も付随的に明らかにされると考えたからである。また研究の対象とすべき過去の地震としては、地震記録が比較的整備されている関東($M=7.9$)、南海道($M=8.1$)、今市($M=6.5$)、十勝沖($M=8.2$)、および福井($M=7.2$)の5地震とした。

震害を調査カードにより調査し、橋の震害とその地方の震度とを調べた結果は

(1) 中央気象台震度Ⅲ(加速度=8~25 gals)では全然震害が起こらない。震度Ⅳ(加速度=25~80 gals)の地域では震害がまれに発生し、震度Ⅴ(加速度=80~253 gals)以上の地域では、橋脚のクラック、アンカーボルトの切断、さらには桁の落下が見られるようになる。

(2) 地盤の種類はよくいわれているように、震害の大小に関係し、一般に沖積地は震害も多く、かつ大きい。昭和34年度の研究においてはさらに震害の構造別調査も行なった。その結果の要点のみ略記すると、つぎのようである。

1) 桁自身の震害は非常にまれで、落下防止を第一義的に考えるべきである。

2) 桁相互の連結、桁と下部構造との連結は震害を小さくするうえに必要である。

3) 橋脚の震害率は鉄道橋について調べた結果、橋脚の高さが高いと大きくなっている。

4) パイルバント式で、パイルの頭を水平につないだ形式の橋脚は、頭部にきれつが発生ししやすい。同様に2本のウェルにまたがったアーチ式の橋脚の震害例も多い。

5) もりこぼし橋台は比較的震害率が小さい。

昭和35年度においては、前年度に引き続いて、震害と震度法との相関関係、模型実験、実在橋脚の振動性状

の調査を行なった。その目的とするところは、震害と震度法との結びつきを調べることによって、震度法の適用範囲を明らかにすると同時に、振動的な面も、模型実験ならびに橋脚の振動周期などの実験結果を集めることにより調査研究しようとしたものである。

模型橋脚の振動試験は石膏珪藻土の橋脚と錘をボルトで固定した木製桁で作られたもので行なった。橋脚のフーチング下面幅は30.0 cm、接着剤で振動台に固定された。橋脚の幅は6.0 cmと12.0 cmの2種類と、桁の支持条件は、ローラー端、ヒンジ端、固定端とあり、上述の桁の重量との変化などを組み合わせ、計10個の試験を行なった。その結果として

(1) 橋脚で分担される荷重は、ヒンジ端では振幅の小さい間は固定端と同じである。しかしローラー端は摩擦係数が小さいので、桁に働く水平荷重をほとんど分担しない。

(2) 橋脚が共振しないときは、橋脚の動的ひずみは振動台の加速度に比例する。

(3) 橋脚が共振する場合は昭和35年度には実験できなかった。

(4) すべりシューの場合は、桁および橋脚の重量に水平震度を乗じた力が、水平荷重として静的に作用するとした計算方法で、橋脚のひずみは説明されるが、ローラーシューの場合は静的ひずみを動的ひずみとは完全な一致を示してはいない。これについてはさらに研究を進める。

また震度法を検討する方法として、鉄道技研報告および速報に発表されている、橋脚の静的引倒し試験結果のデータを集め、目地の強さ、破断の性状などについても調べた。この結果

(1) 破断面の位置は縁引張応力 σ_t が最大になる断面の位置をほぼ一致しているため、この付近で特に弱い目地で破断する。

(2) σ_t を計算してみると、レンガ目地の強度は、2.3 kg/cm²あるいは3.4 kg/cm²となった。しかし、三浦一郎氏のレンガの曲げ引張試験結果報告によると、 σ_t は最小2 kg/cm²で最大28 kg/cm²、平均13 kg/cm²となっている。

震度法で断面、根入れなどの資料の整った橋台、橋脚の応力、安全度を計算した。結論はつぎのようである。

(1) 24本の橋脚と4個の橋台について震度=0.3として、応力度、転倒安全度、および先端反力を計算した結果、転倒安全度の計算値は1に近いが、1より小さい場合が非常に多いこと、しかし地震により転倒した例はそれほど多くない。

(2) 橋台の転倒、滑動安全度は計算上橋脚の安全度より低いことが、震害はむしろ橋脚より少ない。特に滑動安

全度は0.8以下であった。これは調査した橋台がいずれも前面にもりこぼし土があって、これが地震時の滑り出しに抵抗したのではないかと考えられる。

(3) 震度=0.3とした場合、切断面における橋脚の曲げ引張応力は平均値で 3.1 kg/cm^2 であった。

(4) 同一橋梁でも、九頭竜川橋梁(福井地震)、馬入川橋梁(関東地震)の例に見られるように、計算値と震害との結びつきが不明確になっている場合がある。これは地盤調査結果と対比すると、震害の少ない場合は地盤がよいことが明らかであった。これらの例から、地盤の影響が震害と当然密接に結びつくので、この影響を計算に折込む方法が重要なことであると考えられる。

つぎに橋脚、橋台の地震時応答を計算機で求める場合、地震時の地盤動、構造物の振動周期、減衰定数の3つの要素が必要になる。これらの3要素中、第1の地震時の地盤動として、どの形の波をとるかは問題であるが第2と第3の要素については、実験結果があるので、鉄研報告の橋脚の振動試験報告のうちから、起振器による振動試験結果の報告について調べた。

その結果

(1) 岩盤上に設置され、根入れの小さい橋脚の減衰定数は0.03~0.08ぐらいである。

(2) これに反し、砂および砂利の基礎に5.6mの根入れのある橋脚では減衰定数が大きく0.2~0.3ぐらいであった。

(3) 固有周期は最も大きい値で0.2~0.3秒で、高次の振動も入っている。

昭和35年には前年度と同じく統計的考察も行なった。この年度では福井地震で報告されていた、北陸本線の駅間の橋梁総数と震害橋梁数との比と家屋の倒潰率との関係を求めてみたのである。定性的なことを述べると、

(1) 家屋倒潰率は震源地近くで高く、ある距離はなれると急激に減少する。

(2) これに反し橋梁の駅間震害率は震源地付近ではたしかに大きい、震害率は震央距離の簡単な関数では表わしえないものである。

(3) (2)の事実を大きく支配しているものは、橋台、橋脚の高さ、地盤の影響などではないかと考えられる。これらの影響が震央距離による影響よりも大きくであった場合が福井地震における結果ではないかと思われる。特に福井駅と北福井駅との間に震央距離から4~8kmの区間であり、橋梁総数18に対して震害率0であった点は、さらに研究すべきものではないかと思う。

依頼された研究の第3年度の昭和36年に、一応過去の調査研究結果をまとめることを考えた。示方書の体裁ではなく耐震設計の考え方、解析されたことを要項の形

にし、耐震設計の一資料として利用されんことを意図した。

昭和36年度は一面において、従来と同じ方向で調査研究するとともに、他面においては過去の調査研究事項を整理することにし、つぎのこを行なった。

(1) 石膏珪藻土の模型橋脚振動実験を継続して行なう。

(2) 震害と地盤との関係は重要であるので、過去に震害のいちじるしかった地点の地質図の収集、または新たにボーリング試験を依頼して、資料を作る。

(3) 異なった地盤構造をもち、比較的接近している2点に地震計を設置し、地震時の地盤動と地盤構造との関係を明らかにし、地盤と震害との相関関係解析の資料を求める。

(4) 震害を受けた橋脚の震度法による計算をさらに進める。

(5) 文献調査をする。特に水中橋脚の耐震設計法について研究する。

(6) 耐震設計要項を作製する。

昭和35年度報告書は8章および付録から成り立っている。第1章は総括的なことを記述したにとどめ、細部はすべて各章で述べている。第2章は設計震度のとり方とその背景ともなるべき諸要素について述べ、特に新しい動的設計法の考え方、方法などについて各種の文献を紹介しながら説明した。第3章は地震時土圧について土質力学の研究成果を取り入れて、従来の土圧公式を説明した。

第4章は、桁および支承の設計方法、設計上注意すべき点などを述べた。第5章では橋脚、橋台の耐震について述べるとともに、水中橋脚について、従来の研究ならびに実例について説明した。しかし水中橋脚の耐震設計方法については、数回討議したが、よい解決がえられなかったので、述べていない。第6章ではフーチング基礎、杭基礎、井筒、ケーソンなどについて記述した。第7章では耐震性をますための構造設計上の諸提案が説明されている。構造物の耐震設計は震度の方面のみから規定してゆくことは当を得たものとはいいがたく、構造上からの弱点をなくすか、補強してやれば、大震害を受けずにすむ場合も起こりうるし、また、小さい設計震度で設計することも可能になるわけである。また本章で提案しているように耐震設計にも極限設計の考え方を導入することは今後の進み方の一方向を示したものと思われる。第8章は震害の種類と判定方法および補修の実例などを述べたものである。

なお付録として、模型橋梁の振動実験結果、東海道本線馬入川橋梁地点地質調査結果と、東北本線荒川橋梁地点震動測定結果などを述べた。

6. 委員会の調査研究事項

本文のうちのおもな研究結果は研究紹介で取り扱ったので、つぎに委員会の調査研究事項について報告する。

模型橋梁の振動試験は前年度に引き継いで行なわれたもので、今年度は非共振の実験のやり直しと、共振時について特に実験した。非共振の場合は昨年度えた研究結果を再び確認することができた。すなわちすべり支承では摩擦係数×反力分しか水平荷重の分担力がないため、摩擦が切れると、固定支承をもつ橋脚が、水平荷重の増加分を受け持つことになる。共振の場合は、振動台の振動加速度を増加させてゆくと、常に桁の両端の支承の分担力はほぼ等しく増加してゆき、すべり支承ですべりが発生し始めても、両支承における分担力にはほとんど差が認められない。これはすべり始めると、すべり支承は摩擦力以上は分担できないという直観と矛盾するものであるが、実験結果は上述のようであった。またヒンジ支承とすべり支承における加速度を比較した場合、滑動前はほぼ等しいが、滑動後すべり支承には自励振動と思われる激しい振動が起こる。

関東地震の際の東海道本線馬入川橋梁は、つぎの諸点において、特記すべき震害を受けたようであるので、地盤と震害との相関関係をさらにこの橋についても調査するためにボーリングを行なった。

(1) 各橋脚とも、構造的には根入れ、断面積、橋脚高さなどがあまり変わっていないにもかかわらず、東京方 1~4P は転倒していないのに反し、小田原方である 14~23P は上下線ともすべて転倒している。

(2) 震源地に近いことにもよるが、関東地震で長大鉄道橋のうけた震害のなかで最大であった。

ボーリング地点は転倒した橋脚区間と、転倒しない橋脚区間のうちの 2 地点を選んだ。ボーリングの結果、東京方で砂礫層が厚く、砂礫層の下にある砂層の N 値も東京方のほうが沼津方より大きいことが判明し、結局、東京方の地盤の方が強固であったことが推定された。また井筒の底面の位置が、東京方の橋脚は N 値 50 の地盤に 5~6m 入っているにもかかわらず、17P, 18P は N 値 30 ぐらいのところの底面がおかれている。15~20P は杭打ち基礎で、この杭の先端は他の橋脚の井筒底面より浅く、また杭下端の N 値も 30 ぐらいであった。

東北本線荒川橋梁も関東地震で震害をうけた橋梁であるが、その躯体は複線一体の構造で川下側の半分は杭基礎で、川上側の半分は杭がない。地震により橋脚は杭のない川上方に傾斜し、かつ沈下した。沈下量は上野方が大きく、大宮方は僅少であった。地盤の柱状図から判断すると、馬入川橋梁ほどは明確な差はなく、しいて差を

見出すと、粘土層の上の砂層の浅いほうが沈下が大きい傾向であった。これらの相関関係を解明するために、現在線の下流側橋脚 11P (上野方)、21P (川口方) 付近で、40cm 下流の地点に石本式地震計(幾何倍率 200 倍)を 1 台ずつすえた。地震計は橋軸直角方向の加速度が測定されるようにした。地震計の起動はスターターによった。

幸いにして、昭和 37 年 2 月 6 日早朝、多摩川上流付近、深さ 100 km に地震が起こり、東京で震度Ⅲの地震を感じ、その地震記録を荒川地点の 2 地点でとることができた。その結果は震害の推定に好都合なものであって、最大加速度は上野方 21.5 gal、大宮方 13 gal であった。この測定は昭和 37 年度も引き継がれている。前年度解析しなかった地震記録、および 2 月 6 日の地震記録の計算機による波形の解析が行なわれた。自己相関関数およびパワー スペクトルなどを 2 月の地震記録について求めてみると、上野方で 0.56~0.76 秒の波と、0.15 秒前後の波とが検出されるが、大宮方は 0.6~0.8 秒の波はそれほど顕著でなく、0.15 秒のみが顕著にあらわれていることが明らかになった。パワー スペクトルについて述べると、上野方には 0.7 秒ぐらいに大きい卓越周期があるが、大宮方は 0.7 秒、0.3 秒、0.15 秒などの成分が入っているが、パワーはそれほど大きくないことが判明した。これらの差は地震それ自身の差ではなく、やはり地盤の性質による差であると考えられる。

これらの卓越周期と常時微動計による記録との関係を調査すると、上野方の常時微動記録には 0.3~0.4 秒の波が多く、両者には、1 対 1 の対応があるとは認めがたいが、大宮方では常時微動記録中に 0.24 秒前後の周期と、0.7 秒の波の潜在が認められ、地震記録の卓越周期と一致している。結論的にいえば、両者には明白な対応が存在するかどうかは即断できないと考えられる。

同様な研究は首都高速道路公団でもすでに調査していた事項で、委員会として、同公団で行なわれた測定結果を説明願ひ、研究の参考にさせてもらった。同公団では早くから、地表と構造物上の地震記録を同時に測定しておく。すでに 10 個の地震動記録がとれている。結論のみ述べると測定した構造物上の地震動の最大加速度は同じ地震による地表面上の同方向の最大加速度の 2~3 倍(平均値)である。また常時微動測定による卓越周期は地震動記録の卓越周期と一致するかどうか疑問であるなどである。

構造物の振動試験結果を収集し、構造物の振動時の性状を明らかにする資料とした。すなわち前年度の地盤の振動の研究に積重ねる意味で、構造物の振動の問題をとりあげたものである。ここに述べる結果は鉄道技術研究所で行なったものである。横山高架橋について EI.

Centroの地震記録を入力地震動とした場合の応答を計算した。また連続桁の固有振動数の実測結果が、鷺の巣川橋梁、吉井川橋梁、鬼怒川橋梁、富士川橋梁、天竜川橋梁、新神通川橋梁などについてのものが示され、橋を分けて1次の振動数が1.5~1.8のグループと3.0~3.7のグループとにわけられるようである。吉井川橋梁では変形曲線も実測されており、その結果によると、1次の振動数の場合は橋脚必ずしも振動の節にはならないことが明らかにされ、連続桁振動の複雑性を明らかにした。

構造物の地震時応答の問題という意味で、水中橋脚の振動とその耐震設計の問題をとりあげて討議した。しかし本年度の研究では、いまだ耐震設計法(耐震法にもとづく)の確立にはいたらず、水中橋脚の付加質量の研究に終わった。非定常地盤動に対する応答の計算、実物の水中橋脚における振動実測などが必要とされるように思われる。

昭和37年度においては、東海道線馬入川橋梁地点と、常盤線利根川橋梁地点とを選び、それぞれ震害、地盤を異にしているの2地点に石本式地震計を置いて、前年度東北本線荒川橋梁地点で行なったと同様な測定を行なった。また同時に荒川橋梁地点では、地層別の地中地

震動の特性および地表における地震動の特性を下のほうからの地震動からも解析しようとする目的で、地中地震計を設置し、観測を行なった。地中地震計はボーリング孔の中に設置され、その位置は地表(深度=1m)、粘土混り砂層と粘土層の境界(深度=6m)、粘土層中央部(深度=16m)、粘土層と砂層との境界(深度=20m)、沖積層と洪積層との境界(深度=23m)の5点と、ボーリング地点から約50m流心に向かった地点の地表(深度=1m)の計6点である。

使用した地震計は東大生研の岡本研究室で考案したもので、ストレインゲージを貼付した加速度計振子をシリコン油を満した金属ケース内に封入したもので、増幅器を用いなくて記録させることができるので、地震記録をとるには好都合の器械である。

[筆者: 正員 東京大学教授 生産技術研究所]

【付記】5月より7回にわたって掲載した地震工学講座も本号をもって終ります。本文とりまとめにあられた執筆者はじめ関係各位に対し厚くお礼申し上げます。

なお、今回は1月より「岩盤力学講座」と題して6回にわたって掲載する予定です。

【編集部】

書 評

耐震計算法

武藤 清著 丸善KK刊

東大名誉教授 武藤 清博士が全5巻よりなる耐震設計シリーズの第1巻として、耐震計算法を著わされた。内容は総論、せん断力分布係数、ラーメンの計算、水平力をうける一様な多層ラーメンの曲げモーメントの特性、水平力をうける多層ラーメンの変形と剛性、変断面材をもつラーメン、壁式ラーメン、耐震壁の変形の特性、開口のある耐震壁、耐震壁と境界効果、床版変形の横力分布におよぼす影響、耐震計算規準、応力計算例の13章および付録3編よりなっている。

武藤博士は建築構造学の泰斗であり、とくに耐震建築については世界的権威として現在国際地震工学会会長の要職に在られるが、本書は著者が永年教職にあって研究された事項を両整理し現在の知識によって統一をとりながらまとめられたものである。したがって問題は建築架構に限られているが、このただ一つの構造形式を対象とするその耐震性のあらゆる面からの検討、すなわち振動学的観点からの検討、複雑な振動現象を簡明に把握するような巧みな静力学的検討等が行なわれており、なお単に力学的検討にとどまらず、構造の耐震化についての考察が行なわれていることは土木関係の構造技術者にとっても多くの示唆を与えるものがある。

このうち耐震壁に関する記述、また耐震壁がまだ土木構造物にはあまり応用されていないということから、また第1章に示された武藤研究室の研究によるアナコンSERACの超高層建築耐震設計への利用に関する記述は、長大橋もまた超高層建築と相似た点が多いという意味において、ともに土木技術者にとっても有用な内容であると思う。なお特筆すべきことは本書が教科書的に学問の全分野を紹介したのではなく、優れた一構造学徒の研究生活の記録であるということである。したがって研究生活を送る人々にとっては内容自身よりも、いかに問題がとりあげられ、解決されてきたか、いかなる曲折をへて著者の思想がここまで生長発展してきたかをこの書によってうかがうことは、自からの今後の歩みに対する指針としてきわめて有用なものを与えられるであろう。このことは全巻が完結されたときなお一層夥り多きものとなるであろうと思はれる。

著者: 工博 鹿島建設KK副社長
体裁: A5判 390ページ 定価 1800円 1963.7.刊
丸善KK: 東京都中央区日本橋通 2の6

電 (271) 2351・振替東京 5 番
【東京大学 岡本舜三・記】