

参 考 資 料

第十九卷第三號 昭和八年三月

技術家に必要なる地震學

(Engineering Seismology, Notes on American Lectures, By Dr.)
Kyoji Suyehiro, Proceedings of A. S. C. E., May, 1932.

本文は米國土木學會に於ける故末廣博士の講演概要である。先づ日本に於ける地震學發達の歴史を講述し、關東、丹後、北伊豆の地震に關する研究を述べ、次に地震學の土木建築工學方面への應用を述べ、更に地震時に於ける建築物の振動に就て論ぜられてゐる。此處には後の二項に就きその概略を示す事とする。

應用地震學

地質物理學者も構造技術家も地震に關する正確なる資料を求めて居る點は異ならないが、地質物理學者は地震波の進行速度や地殻を構成せる地層の性質を研究する爲に、震源地の位置、地震波の形狀、位相等を知らうとし、之に對し技術家の知らうとするものは破壊的地震の強度と其性質とである。此處に地震観測上自ら相異があり、通常物理學者達の用ひ居るが如き感度高き不安定なる地震計は構造技術家の研究には應用出來ぬもので、従つて此處に強震を記録し得るが如き地震計或は加速度計が必要となる。

普通の地震計は其固有振動が實際の地震の振動の週期に比し極めて長い爲、地震の振動夫れ自身を記録するに適して居るが、加速度計は其固有振動が地震の振動の週期より短く、振動の加速度を直接記録し得る點が利點である。従來は斯様な強震用地震計或は加速度計が備へられてゐなかつた爲に過去に於ける地震にて加速度の大きさと唱へてゐる値は大抵墓石の顛倒、移動、其他の現象から推測したもので此値は明らかに不正確なものであるは勿論、應々にして次の如き理由より間違へた結果を導き出してゐる事がある。即ち或る物體が地震の如き複雑な振動を受けた際、其測定に當り、先づ其物體の摩擦を求むる事其事が困難な事であり、其上近くの淺き震源地から波及する破壊的な地震の振動は急激に傳達され、従つて地震計が運動を開始するまでに、其記録機構の摩擦に打ち勝つて之を急激に自由なる状態とならしむる爲運動が幾分粗雑となり、振動の初期が多少急激に現はれる事は避けられない。此事は1925年の但馬の地震に明らかに見る事が出来る。即ち此地方の小學校教師の觀察に依れば、兒童達が錫の罐の中に貯金して置いた銅貨が地震の開始した瞬間に罐の蓋を投げ出して罐外に飛び出たのを觀察し、而も其罐は元の位置に立つてゐたとの事である。此現象は地震の初期に於て垂直加速度が g 以上であつた事を明らかに物語つてゐる。此木造二階建の小學校の建物が地震に依り多少の被害を蒙つたけれども崩壊しなかつた事を見れば、斯様に鎗で打つた如き急激な運動を興へた場合、小さな剛體には移動、轉覆等を起す事はあるが、建物の如く多少なりとも撓性あるものには被害を及ぼさないものである事を知る。結局以上の如き方法で觀察せる激震の強度なるものは地震の初期に於ける強度であつて、技術家に必要なる資料とはならぬ。此處に適當な地震計に依る正確な値より科學的に之を導き出す必要が生ずる。

1. 強震用地震計

此處には従來強震を記録せる地震計は如何なる種類のものであつたか、又之がどの程度まで實際に役立つものなるかを述べ、將來此種の器械を如何に設計すべきかを考究しやう。

(1) 型 式

従來は Ewing 教授の紹介した水平振子型のものが最も廣く使用されてゐた。此器械は其原理は確に長所とするが、強度大なる地震の觀測には多少不備な點がある。即ち描針の動く方向に直角な水平動の強い加速度を受けた際之を其儘記録する事が出来ぬ。今此地震針の自己振動の式を與へて見ると次の如くである（第一圖参照）。

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} + Mg\phi l \theta = 0$$

- 茲に
- I : 重錘（附屬物を含む）の廻轉軸 AC の廻りの慣性モーメント
 - M : 重錘の重量
 - l : 廻轉軸と重心との距離
 - ϕ : 廻轉軸の垂直に對する傾斜角
 - θ : 中心面 CD の平衡の位置 CE よりの振れの角

この地震計が水平に即ち第一圖の h の方向に最大加速度 α 、圓周振動數 p なる正弦運動を受けた際の振子の運動式は

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \left\{ p_0 + p_1(e^{2t\tau} + e^{-2t\tau}) \right\} \theta = 0$$

但し

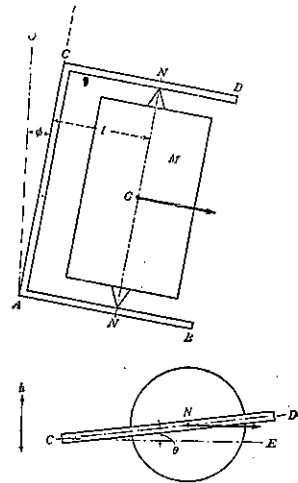
$$\tau = \frac{p}{2} t, \quad p_0 = \frac{Mg\phi l}{I \left(\frac{p}{2}\right)^2}, \quad p_1 = \frac{1}{2} \frac{M\alpha l}{I \left(\frac{p}{2}\right)^2}, \quad i = \sqrt{-1}$$

にて表はされ、之を解くと結局次の結論が得られる。即ち加速度 α が大となれば水平振子はその安定度を失ひ、此影響は特に縦の運動の振動數が器械の固有振動數の半分となつた時に著しく、斯かる場合の記録は明らかに信頼し難きものである。Ewing 水平振子の此性質は普通の地震觀測には特に考慮する必要はないが、強震用地震計の製作に當つては極めて重要な事である。此水平振子の缺點を除去する最も簡単な方法は安定度を適當なる範圍内に保ち、而も器械の固有週期を大にする。此相反せる二性質を同時に満足せしむる唯一の方法は器械を充分大にする事である。然し此外に私が考案した稍複雑ではあるが實際に製作し易い方法を示すと、2 個の同型の Ewing 水平振子を隣り合せて並らべ、反對の方向を向かせて互に平行に置きその重錘を吊す桿を 1 個の連結用リンクで繋ぎ、丁度重錘の受軸の所で連結する如くす（第二圖参照）。斯くせば、水平に加速度を受けて振子の何れか一方が安定を失ふ場合にも他の一方が安定を増加して之を補ひ結局前の如き缺點を防止する事が出来る。

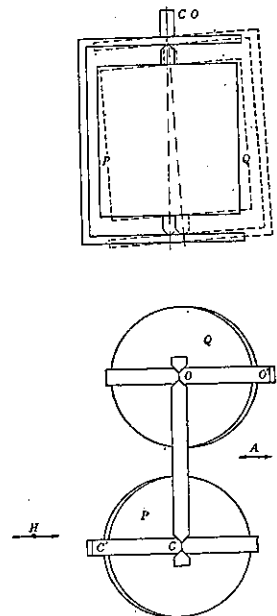
(2) 腕の長さ

普通の地震計では腕の長さは大して問題ではないが強震用地震計では之を看過する事は出来ぬ。腕の短い場合大なる振幅の振動を受けると、其運動は最早強制正弦運動の理論から導き出す事は出来ない。即ち地震の振幅が腕の長さと比較し得る程度に大となれば重錘は最早外力に依り不動である事は出来ぬ。之は數學式に依らずとも

第一圖 Ewing の水平振子のスケッチ



第二圖 Ewing 水平振子を連結せるもの



明らかなる問題である。故に腕は充分長く製作すべきであるが又あまり長いものを使用すれば地面の傾斜に對し極めて鋭敏となり、結果が良くない。約 1 m 程度が適當である。

(3) 此外に尙些細なる事項であるが極めて重要性ある注意を列挙すれば

1. 少くも 30 cm 以上の最大振幅を描き得る如くする。
2. 器械の各部は充分の強度と剛性を有せしむ。
3. 振動の記録は擴大せず寧ろ反對に 1/2 位に縮少する。
4. 重錘は描針其他摩擦部分の爲に器械の振動部分と同時に動かない様に充分重くする。
5. 振子の固有週期は長きものを用ふ。然し安定度を失はない程度に長くすべきであつて、若し此爲に安定度を悪くする如き場合は寧ろ安定度に重きを置く。
6. 重錘の軸の接續部が撃衝の爲に外れない様に注意して製作する。
7. 記録圓筒は地震が記録の初め或は終りに起つた際にも完全に記録し得る如く兩端に相當の餘裕を設く。
8. 制振装置をあまり精緻にする事は屢々故障の原因となるから注意する。
9. 記録圓筒の廻轉装置として時計仕掛を用ふるのは避くべきも、止むを得ず之を使用する際は適當なる調節器を用ひ、空氣制動は使用しない事。
10. 時間の刻みを入れるには其縮尺を大にする爲に記録圓筒の圓周速度を可及的大とし毎分 12 cm 程度とす。單に此爲にも電動機使用の廻轉装置がよい。勿論此電動機の電流は市内配給のものとは別にしなければならぬ。
11. 記録圓筒の廻轉の初めに用ふる制輪装置は最初に廻轉速度を加速度的に増加せしめ週期を不調とする。故に之を使用するには描針も同時に制輪装置で調節し得る如くする必要がある。
12. 時間を刻むに當つて描針を之に兼用してはならぬ。
13. 器械の底板は釘等を以て緊密に地面に固定せしむる。
14. 器械は物の破片等の爲に破壊されない様に充分保護して置く。

2. 1923 年の破壊的關東大地震の強度に就て

1923 年の關東大地震の諸種の記録を見るに何れも完全なものは無い。然し今村教授は之等の記録に依つて詳細研究の結果、其最大振幅は主要動の初期に於て 9 cm、週期 1.3 秒、從つて其加速度は g の 1/10 なる事を發表されたが、此記録は今村教授が大地震の直後半時間足らずして震源地及其性質を一般市民に示された程地質物理學者達には有用なものであつたが、技術家には左程重要な研究資料とはならなかつた。此地震計以上に強震観測に適せる地震計に於てすら尙その描針が圓筒の外に出て單に初期の振動を描いてゐるのみであるが、此初期動でも其一方の振幅は 17 cm に達してゐる(之は地盤の傾斜が多少記録の上に影響してゐる爲と推察されるが、此地震計の週期はかなり長いから急激な地震の場合は此影響は夫れ程大なるものではない)。今週期を 4.9 秒とし振動を正弦運動と見做して加速度を求むれば、此加速度は大體 15 gal (15 cm/sec²) である。然し實際はより大なる振幅の振動が續いて起つてゐたものと記憶する。最初多くの學者は斯様に大なる振幅の起り得る事に多少の疑義を懐いてゐたが實際に舊式の Ewing 地震計でも大なる振幅が描かれて居り、1930 年の伊豆地方の地震では最大振幅が 15 cm であつた事から見て、實際上記の如き振幅の起り得る事が確證せられた。Ewing 地震計の記録もやはり圓筒の外に出た部分があつて到底信頼するに足らないが、普通の方法で振幅と週期から加速度を求めると其合加速度は 120 gal 即ち 0.12 g であつた。斯様に最大加速度は一般に主要動の時に起るのではなく(特に激震の場合は)、之に二次振動が伴つた時及正弦運動をしない主要動が丁度一週期循環して來た時に起るもので普通

の地震計では斯様な加速度や週期を求める事は、たとへ不可能事でないにしても頗る困難な問題である。結局技術家の地震観測には特別に設計した加速度計が必要なのであつて、以上の如き地震計から得られる値を直ちに構造物設計の基礎となす事は相當考慮を拂はねばならぬ問題である。大森博士が1894年6月20日の東京に於ける半環的地震（之は過去に屬する地震のうち最も重要なものとされてゐる）の記録から推定した最大加速度の値は山手方面で0.05 g、下町方面で0.1 gである。即ち一般に下町は山手の約1.5~2.0倍の強さを有してゐる。故に1923年の大地震の山手方面の最大加速度を知る爲に、當時此方面の家屋倒壊率を1894年の半環的地震の下町方面の被害と比較して見ると、前者は後者に比し其被害稍大なる點より考察して、最大加速度は大體0.15 g程度のものと考へられる。私が本郷で此地震に遭遇したが、其時の感じは丁度悪い舗装の上を適當の速さで走る自動車に乗つてゐる時の感じであつた。斯様な感じを與へる振動はどの程度のものであるかを観測して見ると丁度0.15~0.20 gなる結果が得られた。以上の如く1923年の大地震の加速度は器械の不備の爲正確な値を知る事が出来なかつたが、此程度の大地震に耐ふる爲の耐震構造としての設計には大體の標準として0.15 g或は夫れ以上の値を採用すればよいものと思ふ。唯此値は被害の比較的少なかつた東京地方に適應するもので、震源地方のものとしては之以上更に大なる加速度の作用してゐた事は其證據となるべき事實が各所に見受けられてゐる事から知れる。下町方面（此地方は比較的近代式石工高層建築の多い地方である）の強度を知るべき記録の無いのは誠に遺憾とするが、大地震當時、研究所が東京の各地にて測定した揺れ返し動の結果を見るに山手、下町の週期並に振幅の比は特に一定せる比無く、結局下町方面は山手方面より加速度が約50~100%だけ強い事を知り得た。石本教授の最近の研究に依れば、山手と下町に於ける加速度の比は地震の性質に依りて異なる。例へば緩動地震なれば其比1.5~3倍、急激地震なれば1乃至1以上となる。斯様に關東地震では下町は山手より加速度の大なる事は一般に確認された事實であつたがその正確な比を求める事が出来なかつた。然し此比は普通の地震の場合と大した相違のあるべき筈のものでない事は實際に木造家屋の倒壊状態の比が前述の法則に殆んど一致せる事實に鑑みても明らかである。故に沖積層たる下町方面に於ける大地震の加速度は（山手、下町の比を最も控え目に1.5に取つて）0.2 g或は夫以上には達してゐる。故にその震源地と見做されてゐる相模灣地方では恐らく0.3 g以上に達してゐたものと推察する。

3. 地震の強さと其記録

以上の0.3 gと言ふが如き大なる加速度に耐へる構造物を設計し、而も充分なる強度を保たしむる事は不可能事でないにしても甚だ困難な問題とすべきである。而も最も劇しい地震國でさへ構造物とその壽命年間に破壊的大地震に遭遇する回数は一度か二度であるから構造物を極度に頑強に設計するのも不經濟と云はねばならぬ。關東大地震にて振動の最も劇しくなかつた東京地方では0.15 g位の水平加速度にて設計されてゐた建築物は總て安全であつた。故に我々は破壊的地震の週期、強度等を科學的に正確に知り得るまでは寧ろ以上の如き不完全な前提の下に假定した値で設計する方が無難である。實際の問題として0.1 gとして設計した建築物が完全に耐震的であつた事實が雄辯に之を物語つてゐる。鐵筋鐵骨構造の建築物で地震學の創設以來激震に遭遇せる例はサン・フランシスコの地震と東京の地震の2回を算するのみである。故に實際の設計に當つては此兩地震を根據として設計するの外はない。斯様に記録を正確に求めるべき必要に迫られた爲に、我々は強震用地震計及加速度計を我國の各地に設備する事にした。

4. 加速度計

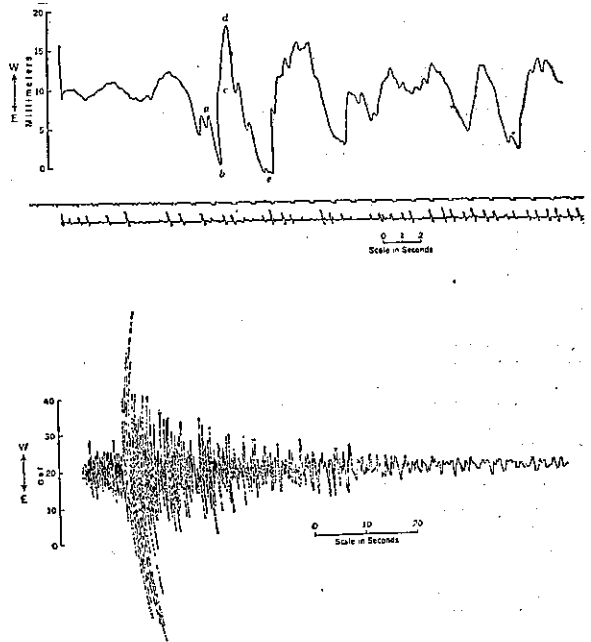
地震波は震源近くに於ては單純な正弦運動を爲さない。故に普通使用する 加速度 = 振幅 $\times (2\pi/\text{週期})^2$ なる公式は之を以て加速度を求める爲の資料とするは殆んど意味のないものであり、時としては波形の波打ちの爲に振幅や週期を決定する事自身さへ不可能となる。又最大加速度の生ずるのは比較的小振幅で短週期の二次振動に依つて起る事が屢々あり、之が又主要動と殆んど區別がつかなくなつてゐる。従つて加速度を求むるに當つては、直接加速度計を用ひて之を測定せねば駄目だと云ふ事になる。東京帝國大學で用ひてゐる石本氏加速度計は此目的の爲に製作せられたもので、現今では激震を記録するに $1\text{ cm} = 50\text{ cm/sec}^2$ の比に描けるものがある。此地震計を研究所に備へつけたのは 1923 年の大地震の後で未だ日は浅いが、現今までに二つの激震の記録を取つてゐる。その一つは 1931 年 6 月 17 日の激震で、震源地は東京を去る北方 40km の地點である。石本氏加速度計に依つて得られた其振動圖は第三圖である。之に依ると最大加速度を起した運動は圖の *bcde* の如き主要動ではなく、寧ろ *ab* の如き二次振動或は *bc* の如き二次振動の加つた主要動の一部に依るものである。此最大加速度は南北に 43 gal、週期は 0.4 秒である。

他の記録は 1931 年 9 月 21 日の東京の西北 60 km の地にある秩父地方の地震のものである。此半壊的地震に依り洪積層の地方にて 16 人の人命を失ひ 76 戸の家屋が倒壊した。然し古生層からなる震源地方に於ては何等被害を蒙らなかつた。此地震の加速度は東西に

70 gal、週期は 0.4 秒であつたが、地震計で測定し得た結果は主要動にて 3.5 cm の地盤の移動を知り得たのみである。此他の方向の加速度が 60 gal であつた事からその合加速度は少くも $70 \sim 92 (= \sqrt{70^2 + 60^2})$ gal である。故に若し此値にして正しいとすれば此地震は極めて甚大な災害を及ぼしてゐた筈であるが、實際がさうでなかつた事は技術地震學者の特に注意すべき點である。

以上述べた地震のみならず、總て既往の地震の加速度の週期は地震計に現はれた實際の振動週期とは一致してゐない。之は既に述べた主要動と二次振動との關係より明らかである。一般に地震の強度を表はすには最も顯著なる振動の振幅と週期を以てするが、斯様な振動は最大加速度を惹起するものではなく加速度計に最大の値を與へる事は殆んど稀である。尙東京山手方面の觀測に依ると地震波の週期は其主要動に於て廣い範圍に變化するものであるが、加速度の週期に於ては總て 0.3~0.4 秒の間に限られてゐる。此關係は第三圖に明らかであるが、今平素微振動をなす東京本郷方面の記録をとるに、此地方は週期約 0.3 秒の微振動が最も多く、而も此週期が最も大なる加速度を有してゐる。其他の地方に此法則が適用され得るや否やを調査する爲石本氏加速度計を地震後九ノ

第三圖 1931 年 6 月 17 日の地震加速度の圖



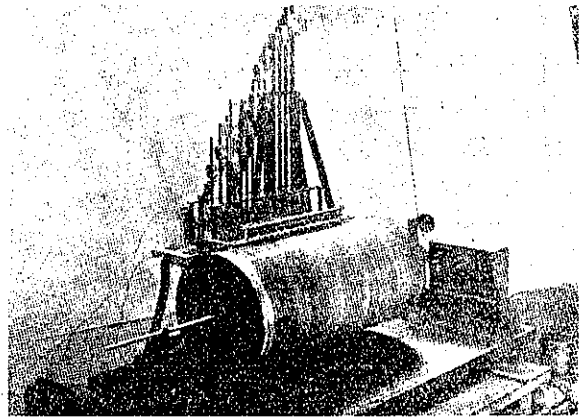
内に据え付けて調査を行つたが、未だ記録不充分の爲正確な結論を得るに至らない。然し山手方面に於ける調査に依つて得た結果を否定するが如き事の現はれないことは明らかである。唯最も重要な事は下町に於ては弱震以上の地震の加速度週期は 0.7 秒に達する事は稀ではなく、微震程度のものでは一般に 0.2~0.4 秒である。此種々異つた週期の得られるのは地盤の常時の運動と密接な關係がある。斯く我々の最近の経験から考ふると、我々の地震運動に對する從來の見解を根本的に改良せねばならなくなる。

以上述べた如く結局技術家には地震計より加速度計の方が有用であり、之により直接加速度を求める事を必要とする。たゞ加速度計も 0.15 秒位の適當な週期のものを用ひねば、其必要な振動の記録は不必要な急激振動の爲に不明にされる憂がある。

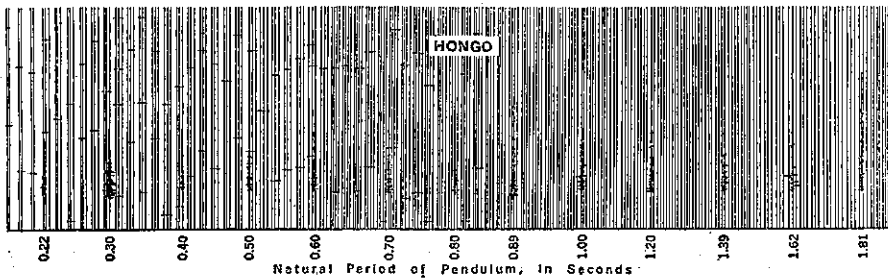
5. 地盤固有振動の週期

建築其他の構造物が地震により破壊的影響を蒙るのは地震運動の週期、嚴格には加速度の週期に負ふ所大である。故に平時、地震時に拘らず或る土地に常住する一定せる週期運動があれば之を調査し置く事が必要である。然し地表及地下に無限に擴がつてゐる地盤に於ては工學的に其週期を求める事は出来ないものとされてゐたが、東京の如く沈澱せる地層よりなる地方には特有の週期振動のある事は地層が數層よりなる事より容易に推察される問題で、此事に關し妹澤教授は數學的に説明を與へられてゐる。此或る土地の卓越固有週期を測定する方法としてハートマン氏舌型振動計の原理を應用せる地震動分解器を考察したが、之は 0.2 秒より 1.8 秒に至る各種の固有振動を有する複振子を第四圖の如く記録圓筒の横に配列せるもので各振子は水にて制振され得る如くなつてゐる。東京本郷方面の記録は第五圖に示す如くであるが、之に見れば 0.3 秒の週期のものが最も強く共鳴して居り、描針圖も正弦運動の形に最も近いものである。之は地震強度、震源地よりの距離等に無關係な値であつて、此地方の固有地震振動の特質を示すものである。之と同時に本郷の北方に於て水銀チューブ微振動計を以て其振動を測定

第四圖 末廣式地震振動分解器



第五圖 末廣式地震振動分解器に依る本郷方面の記録



せる結果を示したものが第六圖であるが、之に見ても尙 0.3 秒の週期が最も卓越せる事を知る事が出来る。故に本郷方面は平時、地震時に拘らず 0.3 秒の週期の振動が定常し、地震時に於て最も屢々起る加速度は此振動に依つ

て起されるものと考へられる。私は又東京の下町、丸ノ内にも同様の観測を行つたが、此結果は本郷に於けるが如く簡単な結果は得られなかつた。即ち地震振動分解器に依る地震時の卓越週期は 0.7~0.9 秒のものであり、微振動計に依る平時の卓越週期は地震時の約半數 0.4~0.45 秒のものであつた。其他に振幅のより小にして週期の 0.2~0.3 秒の振動が混じてゐるが、之は特に東京の下町では地震加速度の週期が此地方特有の一次の 2~3 倍の二次或は三次振動に依り影響せられるものである事を示してゐる。然し之は地盤を彈性と考へての數學的解法では説明が出来ぬが、唯此地方は元沼地たりしものが今も泥化して半液體と見做し得る程度になつてゐるから、東京の如く地表及地下層の不規則な場所ではタンクの中の水の如く殆んど正弦運動に類する倍週期性を示すものと考へられる。私の考へでは一次振動は 0.8 秒の週期を有してゐるものと思ふ。而して此週期は極めて長い爲に貨物自動車其他に依る小振動には殆んど刺戟を受けず 0.8 秒に近い週期の時にのみ判然と區別し得るものである。

要之、何れの地方にも其土地定常の固有振動のある事を充分注意すべきである。

6. 地震に依る建築物の歪の測定

建築其他の構造物が地震より受ける強度を計算するに際し如何なる方法を採用するも、其應力及歪の程度を正確に計算する事は困難である。特に斜材、隔壁等を有する構造物に於ては尙更の事である。其上實際問題としては構造物の自己週期と加速度の週期との關係、振動に對する制動作用、構造物の基礎と地盤の相互作用等重要なる問題までも考慮せねばならぬから、斯様な問題までも考慮するとせば強度の計算は實際には不可能と云つて差支へない。

従つて此種の研究に僅に助けとなるものは模型を造つて實驗して見る事で、木造家屋の模型にはパラフィンを以て模型を造る。然し鐵筋コンクリートや鐵骨煉瓦構造の如き混合構造物には模型で實驗しても成功の望はない。従つて地震國でのみ實行し得る方法としては標準の建物に數個の歪測定器を備へて加速度計を用ひて念入りに其記録を取る。

観測せる歪が彈性範圍内にあれば加速度を測定する事に依り或る加速度の下に於ける應力を知る事が出来る。加速度週期は如何なる場所でも工學的に一定せる値を有するものと考へられるから、如何程の強度の地震に際し部材が彈性限度を越え（鋼構造に對し）又龜裂が入るか（石工構造に對し）を知る事が出来る。然し鋼構造の破壊強度を知る事が不可能なる事が明らかなる場合は従つて此計算も又不可能である。

地震に依る建築物の振動

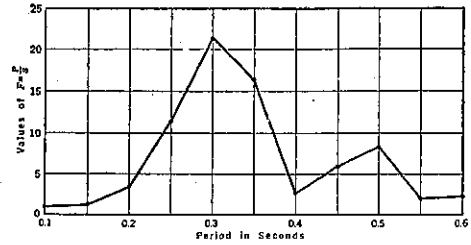
1. 自由振動の週期

地震に依る建築物の振動を研究するに先だち、先づ建築物の自由振動の週期を知らねばならぬ。之は地震に依る建築物の振動は其建築物の固有週期と強制振動の週期との比に關係する所が大であり、又固有週期に關係ある振動の減衰作用に關する所も頗る大なるが爲である。

2. 剛建築物の振動

先づ剛建築物がどの程度まで地盤の振動の影響を受けるか、而して之等建築物が地震の爲に如何なる性質の振動

第六圖 各種微振動週期の分布割合の圖表



F: 回数 P: 週期

S: 0.3 秒の標準週期

をなすかを研究する爲に鐵骨鐵筋コンクリート構造の我が地震研究所の建物に就き其振動を觀測した。平時に於ける此建物の振動の性質は石本教授が詳しく研究されてゐるが、之に依ると約 0.3 秒の週期を以て絶えず前後に振動してをり、建物の各所に於ける振動は彈性體としての振動と見るべきものなく、地盤上の剛性體としての明らかなる振動を示してゐる。故に此剛建築物の振動と地盤の振動を比較する爲に同じ構造の二つの水平振り型地震計を一つは屋上の小屋の床の上に、他の一つは研究所の近くに假小屋を造つて、其中の地面上に於て振動を觀測した。1930 年 11 月 26 日の伊豆地震の時にとつた唯一の記録は第七圖に示す如くであるが、之に依れば次の二つの重要な事實を知る事が出来る。即ち第一に普通の地震の振動であれば我が研究所の如く頑強に造られた建築物の附近の地盤と全く同じ振動を爲し、第二に地盤の振動が 0.1 秒と云ふが如き小なる週期のものである場合には建物は何等影響を蒙らない事である。

第七圖 1930 年 11 月 26 日伊豆地震に於ける研究所屋上及地表上の記録の比較圖

此事實より頑強に建造された剛建築物に生ずる地震に依る動應力は地震動の水平加速度に建築物の質量を乗じた大きさの靜荷重がかゝつた場合に生ずる靜應力に等しい事が認められる。而して其振動の週期が 0.1 秒より小なる小週期のものなれば前述の如く極めて急激なる振動を受けた場合に極めて大なる加速度が働くが、上の如き剛建築物ならば其蒙むる影響は極めて小である。

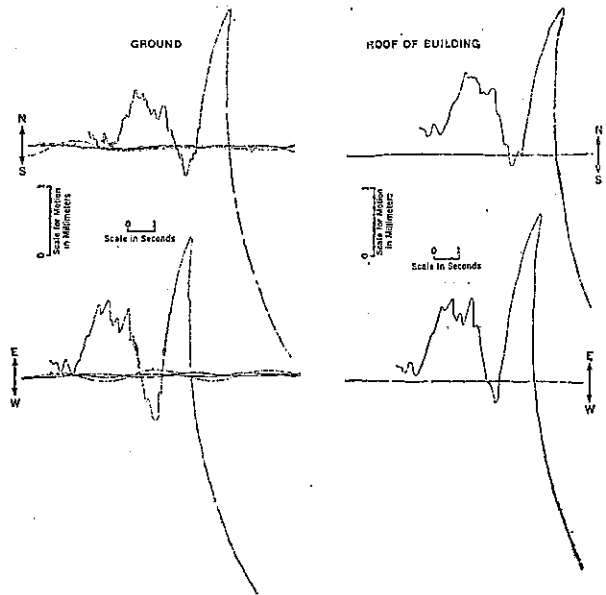
3. 建築物基礎の振動

上の事實は建物の固有週期が 0.1 秒より大なる事より考ふれば自ら明らかなる事であるが、之のみがその實證となるものではない。今村教授が建築中の議事堂で其振動を測定した時も基礎は地盤と同じ運動をなしてゐたが、週期 0.1 秒位の急激な微動は認められなかつたと云ふ例もある。

此處に石本教授の地盤上を波及する振動波の速度に關する研究が極めて重要である。之に依れば研究所のある地方の地表面では P 相波の速度は 120 m/sec, S 相波は 65 m/sec であるから、0.1 秒の週期を以て波及する振動波の波長は 6.5~12 m である。此長さは建物の長さより小なる爲軟弱なる地盤上の建築は上記の如き急激な短い波動には感受性がないものと考へられる。従つて此現象は或る程度まで短週期の地震動の振幅が深さと共に減少するが如き軟弱地盤の振動に依るものとも考へる事が出来る。故に地表からあまり深くない基礎は急激な地震動に依り殆んど影響を受けないものと考へられる。

4. 普通の剛性を有する建築物の振動

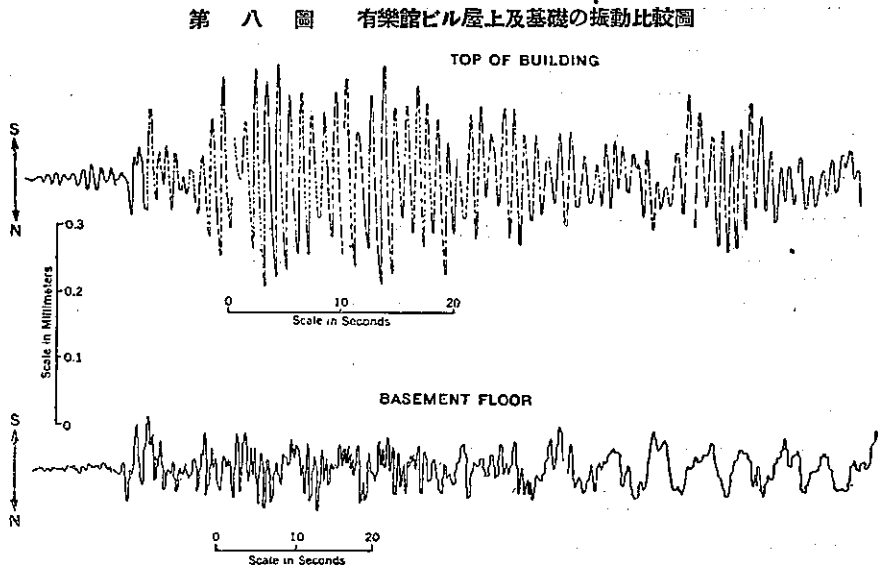
改築後の丸ノ内ビルは剛と柔の間にある普通剛性の建築物の例としては最も適してゐる。此丸ノ内ビルの立つてゐる地は東京の商業街なる爲に附近に地震計を設置する空地無く、爲に一つは基礎の床の上に、他は八階の床に置き觀測を行つた。此結果は週期が普通 0.7 秒位にして、之より小なる週期の振動は二次のものである。斯



く強制振動の週期は一般に基礎の床の上で行つた爲 上述の如き正確な比較を爲す事は不可能であるが、唯屋上の振動と基礎の振動は其週期、位相及波形に於ては殆んど同一であり、其振幅のみは屋上の方が振動の性質に依り 30~70% だけ基礎の夫れより大である。尙屋上の運動には 0.5 秒の週期を有する二次振動が所々に見受けられたが、之は多分建築物の自己振動であらうと思はれる。

5. 柔建築物の振動

柔建築物としては有樂館ビルを擧げる。現今では之は丸ノ内ビルと同程度に補強されてゐるが、記録をとつた當時は未だ 0.81 秒の週期を有する柔建築物であつた。觀測は (4) と同様屋上及基礎の床の上で行つた。第八圖は此記録を比較せるものであるが、地震時の此建物の振動性質は前述の剛及普通建築の夫れとは餘程異つてゐる。附近の地盤の運動と大差なき基礎床の運動は極めて不規則にして、其振動週期は 0.7 秒より 0.1 秒の間を變動して



ゐる。然るに屋上では之の 2~3 倍の振幅を示し、主として 1.0 秒の一定せる週期で振動してゐる。斯様に建築物はたとへ頑丈に建造されてゐても充分なる剛性を有せざれば制振作用が小なる爲結局自分の固有振動が地震の不規則なる振動に打ち勝ち、其固有振動を以て振動をする事となる。

以上を要するに剛建築は附近の地盤と同様の運動を爲し、柔建築は其固有週期を以て振動を爲し、而して之等の中間のものは前二者の間の振動を爲すものである。

6. 煉瓦建築に関する故大森教授の研究に就て

此處に前述の諸問題に關する故大森教授の研究を擧げ參考とする。教授は煉瓦建築に就き其剛度の充分なるもの、中なるもの及不充分なるもの、三者に分ち、之等三者に就き地震時の振動を詳細に研究した。其結果次の例を擧げ説明を爲してゐるが、剛度の悪きものとして博物館、中なるものとして東京帝國大學工學部建築、良きものとして三菱銀行を夫々撰擇してゐる。剛度悪き建築では壁の振動は其頂部にて基礎部の數倍の振動を爲し、普通の建築では激震の時にのみ壁が基礎より激しく振動する。而して剛度充分なる建築物では如何なる地震に際しても壁は地盤と同様の運動を爲す。三菱銀行の如き煉瓦建築は地震の際建築物全體が一體として振動を爲し、地震に

は最も耐久性あるものであるとの結論を爲したが、1923年の破壊的大地震の結果は大森教授の結論とよく一致してゐる。即ち三菱銀行は完全に原形を維持し、工學部の建物は瓦、塔、笠石等に多少の被害があり、博物館は壁のみ其儘にして他は非常なる被害を蒙つてゐた。此結果は石工建築の耐震性に關する研究に大いに貢獻する所があると思ふ。

7. 建築物強度と固有週期

桁の横振動の固有週期は断面二次率の平方に逆比例し、應力と撓度は断面二次率に逆比例す。故に同種類の同建築ならば固有週期を短くすれば地震に對し共鳴しなくなり、従つて強度を増加する事が出来る。實際に建築物の固有週期は其剛度を増す事に依り減少する事は丸ノ内ビルの例により明らかである。即ち此建築は初め空洞煉瓦の一枚或は一枚半の壁を有する極めて輕き鐵骨構造であつた。柱も同様空洞煉瓦にて覆ひ床は鐵筋コンクリート造であつたが、柱との連結が頑強でなかつた爲に大震1箇年前の1923年の半壞的地震で相當の被害を蒙り、二階三階の壁には龜裂が入つた。依つて次の如き簡單な補強を加へた。先づ内外の柱の大部分を鐵筋コンクリートで覆ひ、鐵筋コンクリート造の斜材を新たに挿入し、主なる隔壁は鐵筋コンクリート造と改造した。之に依り最初0.9秒の固有週期のものが0.7秒の週期となつた。斯くして更に第二回目の完全なる修理を加へその重量は都合約20%の増加を見、此二回目の補強に依り固有週期は更に0.5秒に減少した。此實例は建物の強度及剛度が如何に振動の固有週期に關係するかを示すもので、斯く同構造の而も殆んど同型の建築ならば短い固有週期を有する建築物は長き固有週期のものより剛度は大にして地震に對しよりよく制振し得るものなる事を示してゐる。即ち建築物は若し其固有週期が地震の夫れと一致せなければ固有週期の短い建築の方が長きものより耐震的であると云ふ事が出来る。

8. 可撓建築の振動

以上の考察を直ちに可撓性材料を以て造られた建築物に應用する事は出来ない。相當の注意を以て建造された木造建築或は石工壁を有しない鐵骨構造建築は決して地震に弱いものと斷定を下す事は出来ぬ。之は材料強度が其密度に比し極めて大であり、又之等材料の延性も煉瓦及鐵筋コンクリートの夫れに比し相當大なるが爲である。従つて木造建築や單なる鐵材構造は一般に地震に對し柔かなる石工構造と同様其固有週期を以て振動するからである。此事實を數學式より導き出せば、部材の振動の減衰する割合は $e^{-\gamma t}$ を以て表される。 γ は減振率と稱し振動の減衰の大小に關する係數である。此減振率を種々の物に就き詳細に實驗して求めて見るとコンクリート構造にて17、木造構造にて2、鐵骨構造にて10である。之は各部材の高さを一定と見做せる場合の値で頗る都合よき假定の下に求めたものであるが、鐵骨構造或は木造建築の減振の割合は同じ耐震強度を有する石工建築の夫れに比し確に小なる事がわかる。即ち鐵骨構造及木造建築は地震振動を受けた際、其固有週期にて激しく振動するけれど、地震にはよく耐へ得るものである。故に此種の建造物に對しては地震振動を受けた際其固有週期で振動すると云ふ事が必ずしも弱い構造だと云ふ證據にはならない。

9. 振幅と自由振動の週期との關係

此關係は建築物が地震に依つて如何なる運動をなすかを検討するに必要である。先づ鐵骨或は木造建築の自由振動は普通時にも地震時にも差異のない事を知り置く必要がある。例へば議會の建物は0.75秒、木造家屋は0.5秒と云ふが如くである。斯様に輕構造の振動は主に純弾性の性質を有してゐるに反し、石工構造では例へば有樂館ビルの如きは地震時に1.0秒、普通時に0.8秒と云ふが如き異つた値を示す。此事は大森教授の日本銀行附屬

家屋に就き調査せる結果と略同様である。即ち有樂館ビル程の差異は認められないが地震時に於て縦に 0.5 秒、横に 0.46 秒のものが普通時に於て縦に 0.48 秒、横に 0.43 秒となつてゐる。尙平素自分が低層鐵筋コンクリート建築の微振動を觀測してゐた際に、微振動の週期が幾分此微振動の振幅に左右され振幅が大となれば週期も長くなる事を認めたが、之は我が地震研究所の建物にても觀察してゐる事である。

10. 地盤の沈下

石工建築の振動性質が斯様な擬似正弦運動を爲す一部の理由は建築材料が不完全なる彈性體なる事に依るが、此影響は小振動にては考慮しなくてもよい位小である。此主なる原因は石工建築の如き重き基礎が振動する爲地盤が多少沈下するが爲である。既に述べたるが如く一體となれる低層建築が普通時にも微かな振動を爲すのは地盤或は基礎の下に搦き固めた石材が沈下する爲であつて、地震波が極めて速かに波及し來る場合、此振動を建築物に傳へる事の出来ないのも一部は此沈下の影響に依るものである。其他細長き高層建築の基礎に於ける地震の記録には丁度幅廣き軟弱建築物の屋上の振動に見受けられるが如き建築自身の自由振動が混入してゐるのも、高層建築の基礎が棒の如く地中深く固定されず幾分自由な状態となつて建てられてゐるが爲である。斯様に石工建築の場合には地盤が地震に對してクッションの如き働きをなすが爲、地震の破壊作用を幾分緩和する事が出来る。關東大地震では下町の沖積層に於ては此作用が山手洪積層に於けるより大であつた爲、家屋の倒壊數は木造建築では下町の方に多く、石工建築等では反對に山手の方が多かつた。Milne 教授も 1857 年のナポリの地震に就き同様の結論を與へてゐる。此外、北武蔵野地方の地震では普通の木造家屋の被害は沖積層に多く、山手の古生層には比較的少なかつた。之と反對に土藏の如き剛建築では其壁に生じた龜裂は古生層の方が遙に多かつた。

1923 年の關東大地震の強度は剛建築に被害の僅少であつた下町の方が却つて大であつた様な逆現象の起るのは全然とは考へられぬが、或る程度までは地盤が柔かなりし爲だと考へられる。然して沼地の沖積層は比較的粘性ある洪積層より建築物に力を傳達する事が小で、其上基礎が柔い地盤中に充分固定されてゐない場合には、彈性振動のエネルギーは速に消失する爲、下町では地震強度が大なれば大なる程平衡が保たれる事となる。實際に軟弱地盤上の建築で杭打工をせず單に搦き固めた石の上へ一つの版より構成された基礎を置いた建築は、深い杭打工をなし其上に獨立せる基礎を置いたものより遙に地震に對し安全に耐へてゐた。又周圍を剛建築で取りまかれた軟弱地盤が地震の作用を受けて一面に浮上つてゐる所が見受けられたが、之は周圍の地盤の移動せる際にも建物の基礎が移動しなかつた事を雄辯に物語るもので、之等の事實は技術家及建築家の特に注意を喚起したい點である。

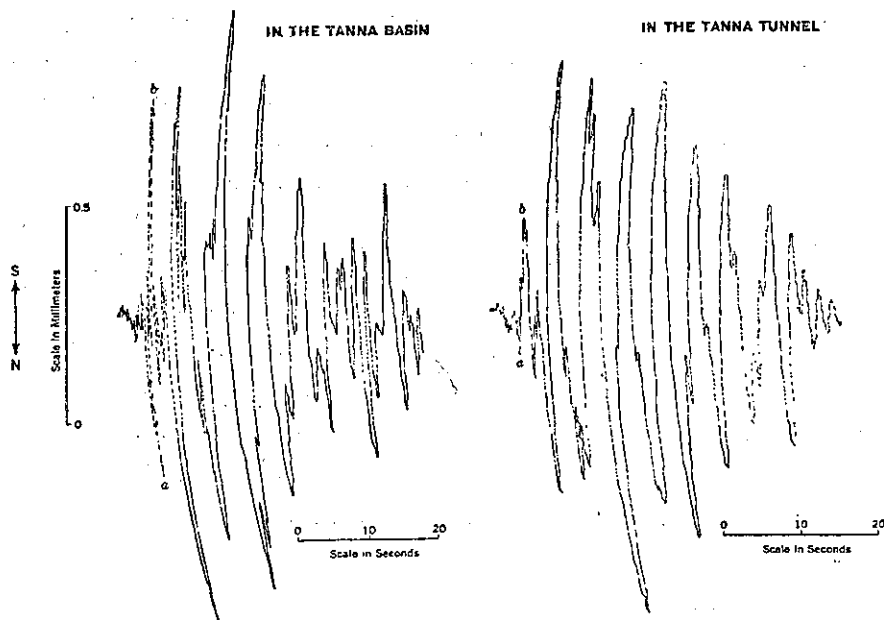
11. 地震に依る最も破壊的な部分

關東大地震の振動に關する資料にして信頼するに足るものは少く、又建築物の振動に關するものも一層不明瞭である。依つて數個のビルディングに就きその振動を觀測せる興味ある結果を述べてみる。之は各階の電球の壊れた % を示したもので、丸ノ内ビルを除いた他のビルディングは最高及最低の階に最も少く、中程に於て最も多い。之は建築の中央部が最も激く振動せる事を示すもので、其外高層建築で龜裂等多少の被害を蒙つた場所は二階及三階である。斯く被害は普通層突に起るが如く下から少し上の所に生じるのは固有週期が激震中最も破壊的な部分の週期より長い爲であつて、此現象は前に述べた如く其最大加速度が一般に二次振動に依り生ずるものであると云ふ考へを裏書きしてゐる。

12. 地下に於ける地震振動

地下に於ける地震振動は深く築造せる基礎の運動の考察に重要な關係がある。地震學者及技術家の中には地震の強度は地下へ行く程減少するものと考へてゐる人が多いが、多分之は Milne 教授の觀測せる結果を見て云つて居るものと思はれるが、彼に依ると地下 3 m の所では地震の振幅並に週期は地表の夫れに比し各々 1:3.4 及 1:0.65 となつてゐる。従つて最大加速度の比は 1:8.1 であると云ふのであるが、大學で行つた實驗に依ると地表と地下に於ては多少の差異はあつたが彼の觀測せる程の大なる差異は認められなかつた。即ち短週期の場合には相當著しい差異、即ち例へば週期 0.2 秒のものでは地下及地表の振幅の比は 1:1.5、0.4 秒のもので 1~1.3 倍程度の差異はあるが、普通或は長き週期の振動(0.8 秒以上)の際には普通の地震計の精度を以てしては地表及地下の振幅の差異は殆んど認められない位小さなものである。大地震後丹那盆地の地表と夫處より約 157 m の地下にある丹那隧道の 2 箇所に二つの同型の地震計を据え、其振動の比を觀測した。其圖は第九圖の如くであるが、此結果は短週期の振動は地表に現はれるものが地下には現はれず、而して比較的著しい振動の場合にのみ兩方に現はれてゐる。

第九圖 丹那盆地及丹那隧道振動比較圖



那須氏は多くの記録より地表と地下の振幅の比と週期の關係を求め $a = a_0 e^{-\frac{K}{T}}$ なる式を導き出した。此處に a 及 a_0 は地下及地表の振幅、 T は週期、 e は自然對數の底、 K は常數である。振幅の比と深さとの關係は未だ其資料なく求められてゐないが、此函數式より考へて K は深さに比例すると假定しても強ち無理な假定ではない。若し此假定が正しいものとすれば、地下の振幅の減少は夫れ程大なるものではない。従つて固有週期の長き高層建築に深い基礎を設くる事は一部の技術家の考へてゐるが如く左程有利なものではなく、唯短い固有週期を有する低層建築にのみ有利である。

(五十嵐醇三 抄譯)