

建築物の実測固有周期について

金 多 潔

ON THE NATURAL PERIODS OF VIBRATION OF STRUCTURES MEASURED FROM FIELD SURVEY

by Dr. Eng. Kiyoshi KANETA

Synopsis:

For the earthquake-resistant design of structures, building code regulations in many countries specify various criteria of finding the value of design lateral forces. Now, the Japanese building code is also going to require base shear coefficients for high rise structures, appropriately determined by a formulae which is a function of the natural period of vibration of the structure to be designed.

Under these circumstances, an adequate guess or estimation of the natural period of vibration is an important step in the earthquake-resistant design of structures, but it is in general difficult to obtain a good approximation. Data of the natural periods of vibration recorded for actual buildings are plenty, but pretty little has been known for a number of factors affecting the value of the natural period.

Some considerations are therefore given in this paper in which a historical summary of previous studies in this field is also presented.

1. 序

地震時における建築物の挙動がその建築物の動力学的特性、なかんずく建築物の基本振動周期に関係することから、耐震設計においても設計用水平力の大きさを定めるのに、設計せんとする建築物の基本振動周期を予想して算出する方法が推奨され、現在欧米各国の耐震規定に採り入れられている¹⁾。その発端は1948年4月2日に組織された米国土木学会サンフランシスコ支部と北カリフォルニア州構造技術者協会の両会員より成る Joint Committee が地震時や強風時に建築物に作用する水平力を正しく評価するために、当時までに行なわれていた研究、調査の結果を集成して1951年4月に“Lateral Forces of Earthquake and Wind”という題名の論文を Proc. ASCE に寄稿したことによって²⁾、その後この委員会の勧告案が米国サンフランシスコ市の耐震設計条令にいち早く採り入れられている。

Joint Committee の勧告案は地震に対する構造物の設計用水平力をその建築物の重量で除した、いわゆる base shear coefficient の値を定める際に建築物の固有振動周期（基本振動型）がある範囲内でその固有周期の値に逆比例するものとする、いい換えれば、より長い固有周期をもつ建築物はより小さい base shear 係数で設計してよいという意味をもつものであって、このように base shear 係数の値が建築物の固有振動周期の関数として表現される耐震設計基準の方式はその後メキシコ、インド、ニュージーランド、ソ連邦、ユーゴスラビヤ、その他の国々に踏襲されるに至った³⁾。また今日では米国においても、単にサンフランシスコ

コのみならず、全米の各都市においても、サンフランシスコ市条令の耐震設計規準を多少修正した SEAOC 委員会勧告案 (Recommended Lateral Force Requirements, Seismology Committee Structural Engineers Association of California, July 1959) が全面的に採用される機運になっている⁴⁾。

一方、わが国では軌近の建築技術の進歩発達に伴ない、将来の都市の合理的発展のために、これまで建築基準法第57条に「建築物の高さは、住居地域内においては20メートルを、住居地域外においては31メートルをこえてはならない。後略」⁵⁾と定められていたものを、新たに指定される容積地区内に限って建築物の高さ制限を撤廃する運びとなってきた⁶⁾。このことは都市の各種容積地区内では法に定められた建物延床面積と従来のものより多少改正された斜線制限を超えなければ、相当の高さの建築物が建てられるということであり、したがって、それに伴う高層建築物の耐震・耐風計算の進め方もかなり大幅に変えられようとしているのである。

その中で主に建築物の耐震計算法について考えて見ると、従来までは震度という概念、あるいは設計震度という説明ですべての建築物に対してはその振動性状に一応無関係に一定の設計用地震力の大きさが定められ、ただ建築物の主要構造材料やその建築物が建てられる場所によって、その地域の seismicity や地盤の良否に因る若干の修正がなされていたものが、今後はそれらの諸因子のみならず、設計せんとする建物の固有振動周期その他の動的性状を考慮に入れた高層建築物の設計がなされるという方向に進路が定められたように見受けられる。

このような情勢に対応して日本建築学会では構造設計上の要項をその内部組織である構造標準委員会がとりまとめることとなり、耐震計算関係は構造標準委員会振動分科会が1963年5月以来原案作成を担当してきた。そして現在までにはほぼまとまった大綱方針としては、地上高さ45mをこえる通常の高層建築の耐震計算は

第1次設計——設計用地震水平力の大きさおよび建物各層に対する分布を仮定して大凡の断面および接合部の設計を行なう。

第2次設計——このようにして得られた各部材断面および接合部(第1次近似値)に基づいて建物各層の剛性と降伏時の強度、変形ならびに降伏後の性状を評価する。そして想定した地震波に対する建物の応答を動的解析によって推算し、各層の変形量、ductility factor、転倒モーメント等を算出し、これらを検討する。要すれば修正設計を行ない応答計算をくり返して適切な構造物とする。

という順序で行なわれることになる模様である⁶⁾。この場合、第1次設計において設計用地震水平力はつぎのように与えられる。

設計用ベースシャー係数 C_B (建築物に加わる全地震力と建築物の全重量との比) を算定するに際して、この値が建築物の周期の増大に伴なって減少する値をとることから、下式が提案されている。

$$C_B = \frac{0.18}{T} \sim \frac{0.36}{T} \quad (1)$$

ただし $0.2 \geq C_B \geq 0.05$ とする。(Fig. 1)

ここに T = 建築物の1次固有周期 (sec)

T の算出に下式を用いることができる。

$$T = (0.07 \sim 0.11) N \quad (2)$$

N = 建物全層数 (地下階あるときはこれを含む)

(1)式は振動分科会委員の工学的判断に基づいて提案されたものであって、地震計記録が得られている既往の地震動に対する抽象化された構造物の応答の若干の結果がいずれも多少のバラツキを有し、また現実の建築物に採用されている構造材料、構造形式、その他内装材や地盤の条件などが実に多種多様であるところから、設計用ベースシャー係数の値にかなりの幅をもたせようという意図を含んでいる。したがって $C_B =$

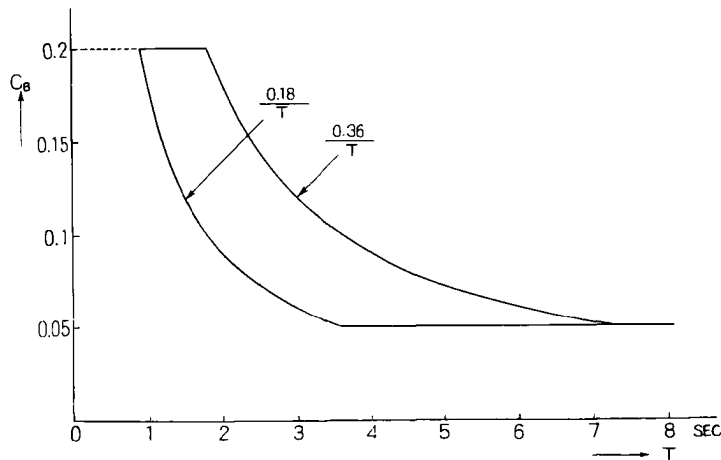


Fig. 1 Lateral Force Coefficients for Buildings.

$0.18/T$ は構造骨組が純鉄骨造に近く、大地震の際に骨組内にある程度の塑性変形が生じても建築物が全体として崩壊することはないと見做され得る場合に対応するものであって、一般に設計用ベースシャー係数を大きくとって骨組の降伏点を高めると同じ地震波に対しては骨組の塑性変形量が小さく表われるような応答が得られるから、大きな靱性が期待できない構造物にあっては C_B の値を大きくとることが推奨されている。 $C_B=0.2$ という値は従来の規定にはば該当する。

(2)式は谷口忠博¹⁾をはじめ多くの研究者によってなされた実在建築物の固有周期の測定結果を参照して、一般の N 階建の建築物の固有周期を推定するための式として提案されたものであり、 $T=0.11N$ は純鉄骨構造に該当し、鉄筋コンクリート構造の併用程度が増すに従って T は減少するものとされている。

高層建築物の耐震計算に当って最終的には動的解析によって検討を加えるという線が明示されたことは耐震設計法の合理化という点からいえば確かに望ましいことであるけれども、そのために要求されることは第1次設計の結果求められる各部材の断面や接合部の大きさ(第1次近似値)はなるべく最終結果に近いものが望ましい。動的解析をくり返すことは恰かも Iteration の演算を行なうことに似て、第1次近似値が真の値に近ければ近い程その収斂は急速であり、それに要する計算量も少なくなる。最近の電子計算機の急速な発達を上記の耐震計算に伴う人為的な計算労力を著しく軽減し、所要時間を大幅に短縮することが可能となったけれども、計算機自身のコストが極めて高いために、多額の計算料金を考えておかなければならないという現状である。結論的に云えば、耐震設計における第1次計算値の重要性ということにもなるであろうが、(1)式および(2)式を用いて、真に近い設計用ベースシャー係数を求めることは現在の段階では非常に難しい仕事であるといわなければならないであろう。

すなわち仮定された、ある値の固有周期 T を用いて(1)式から C_B を求める際、選び得る C_B の値は $0.18/T$ の1倍から2倍まで存在し、また周期の想定に際しても約40%の開きが存在し得るということであるが、このように広い範囲から妥当な C_B の値を選ぶことは構造設計者の経験と判断に基づくべきものとは云え、それは工学的な意味からは程遠いものとなるであろう。

このような意味で構造物の周期をなるべく正確に予想する手段、あるいは実験式が強く望まれているのである。もちろんこの要求は従来からなされてきたもので、とくに目新しいものではない。ただわが国従来の耐震計算法が建築物の固有周期と直接結びつくものではなかったために、一般には、ともすれば身近な問題と考えられていなかったに過ぎない。

2. 建築物の固有周期推定に関する従来の研究

わが国には従来、建築物の固有周期を推定するのに谷口式という略算式があった。それは建築物の基礎が地中深く築造されていて、これを大略固定と見做し得る場合、建物の周期を T 、層数を N とすれば

$$T = N \times \left(\frac{7}{100} \sim \frac{9}{100} \right) \quad (\text{sec}) \quad (3)$$

になるというものである⁷⁾。正しくは1929年東京で開かれた万国工業会議に提出された論文で、谷口忠博士は高層建築の周期がその階数 N に対して、 $(0.07 \sim 0.09) N \text{ sec}$ であれば関東大地震程度の地震に対して安全であるということに関東大地震に辛うじて残った3階建より9階建建築物の柱、はりを調べ、そしてその柱・はりをもつ建築物の周期を博士自身の架構周期の算定公式に基づいて求め発表せられたものといわれているが⁸⁾、この記述からいえば(3)式は、たとえば妹沢博士の「振動学」⁹⁾に見られるような大森房吉、斉田時太郎、今村明恒、堀越三郎、末広恭二その他の博士によって1920年代から観測せられた高層建築の振動周期の測定結果を集めて、それから実験式として提示されたものではなくて、むしろ建築物の耐震設計上もしくは耐震的安全という面において谷口博士が N 階建の建築物に対して望ましい固有周期の範囲として呈示されたものといわなければならない。

したがってたとえば超高層建築の要求が増大してきた場合に(3)式の周期で安全であると断言し得るか否か疑問が生じた結果、1962年には谷口博士はつぎのような式を提案されている。すなわち、そこでは曲げ振動成分とせん断振動成分とが共存して第1次振動系が直線をなす N 階建高層建築の周期 T_N は1階建の周期 T_1 に対して

$$T_N = T_1 \left(\frac{2N+1}{3} \right)^m \quad (\text{sec}) \quad (4)$$

の関係で示される。さらに同博士は(4)式において $m=1$ 、 $T_1 = \left(-\frac{3}{2} \right) Z$ とおき

$$T_N = Z(N+0.5) \quad (5)$$

となることを導いている。この式は有壁 ラーメンの建築物に対するものであるといわれ¹⁰⁾、 Z は複雑な剛度の関数であるとされている。

Rayleigh の方法を単純な振動系に対するものから一般的な構造物の固有周期を求める形にもってきたものとして Geiger の重力式がある。これは

$$T = \frac{\sqrt{\eta}}{c} \quad (6)$$

で表わされ、ここに

η = 建築物に水平重力を作用させたときの頂部の水平たわみを cm で測ったもの

C = 定数、5～6

である。武藤清博士はその著書「耐震設計法」¹¹⁾において建築物各階柱の横力分布係数値を利用して、この重力式により固有周期を算出する方法を採っている。

谷口式を多少 modify したものに田治米の式^{12)、13)}があり、また Rayleigh の方法から発展せるものとして建築物を支持している地盤の変形の影響まで考慮した大築氏の式も知られている¹⁴⁾。

これから設計すべき建築物の固有周期を推定するのに、その建物と規模、形状、構造、その他の諸条件が比較的類似せる他の幾つかの建築物の固有振動周期が実測されておれば、それらの結果を比較して、かなり妥当な判断を下し得るから、周期推定の一つの足掛りになるという立場から USCGS (United States Coast and Geodetic Survey) は建築物やその他の構造物の固有周期を計測して発表したことがある¹⁵⁾。その中では総計212の建築物についてそれぞれの名称、規模、階数、地盤の状態、基礎の状況、ならびに建物

の骨組、外壁、間仕切壁、および床の構造材料を記述した後、平進および捩れ振動の実測周期が明記されている。

USCGS の周期計測活動は1936年以降も続けられ、1949年7月当時までには建築物430件について1,600以上の計測が、また高架水槽42件について150の計測、橋梁など特殊構造物に対して250以上の測定がなされたといわれている²⁾。

San Francisco の Joint Committee²⁾はこれらの資料の中から任意にその代表的な実測周期値(200個以上)を抽出して、その値を縦軸にとり、また計測された建築物の高さ H と振動方向の幅 b とから HP/b なる量を算定してこれを横軸にとってプロットしたのである。その結果は **Fig. 2** に示されるが、この結果は必ずしも満足すべきものではなかった。この図から平均曲線が一応

$$T = 0.06 \sqrt{\frac{H^2}{b}} \quad (7)$$

であると思ふことができるので、さらにこれをより安全側に

$$T = 0.05 \sqrt{\frac{H^2}{b}} \quad (8)$$

にとれば、かなり大まかな周期の推定がなされ得るものと考えられている。(8)式は、より直接的な、またはより正確な周期の算定がなされないときに用いる1次固有周期推定式として現行の米国耐震規定の中に採り入れられている。しかし第2図を見れば(8)式の曲線(図中の点線)を境

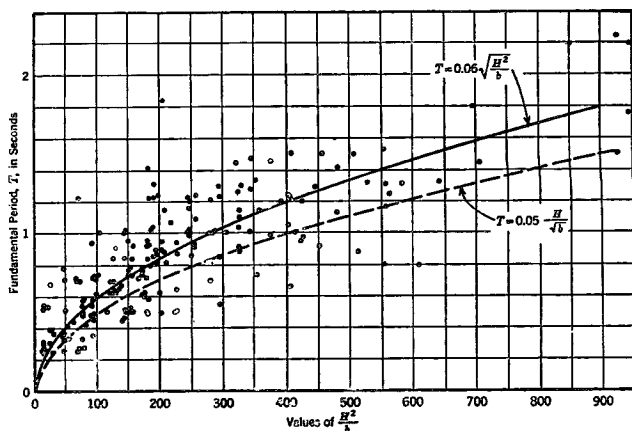


Fig. 2 Fundamental Period of Buildings

として、プロットされた実測周期の約80%が曲線より上側にあり、このことは設計用ベースシャー係数が周期の長い建物程その値を低減して良いことから安全側にあると考えてもよいが、他の10%は誤差25%以内の範囲で危険側になり、さらに残りの10%に対しては25%ないし40%の誤差をもつことが明らかにされている。

しかし建設省建築研究所の久田俊彦、中川恭次の両博士は日本および米国の建築物の構造や積載荷重の載荷状況、とくに地盤の性状の差異によって彼らが行なった若干の計測結果と(8)式とが一致せぬこと、そして大地震の際建築物が大きな振幅で振動する場合には周辺地盤の局部的な降伏も伴って、実測周期が(8)式の2倍以上にも(時には3倍)なることを強調して¹⁰⁾、その結果

$$T = (0.09 \sim 0.13) \frac{H}{\sqrt{b}} \quad (9)$$

なる実験式を提案した。参考までに建築研究所員が行なった関東ローム(赤土)上の各種建築物の微小振動周期に対する大振幅振動時の周期の伸びる百分比で表わすとつぎのようである(Table 1)¹⁰⁾。

G. W. Housner 教授は最近、抽象化された構造物の固有周期を求めるために理論的な解析を行ない、若干の複雑な場合について電子計算機を用いて得られた結果について考察を試みているが¹⁷⁾、その理論的な根拠から前記の米国カリフォルニア州の耐震規定に採用されている式、(8)式、は正当ではないと主張している。そして南カリフォルニアで近年施工された新しい形式の鉄骨骨組をもつ高層建築の実測固有周期の値を参考にして、Housner 教授は周期推定式として

$$T = a \sqrt{N} - b \quad (10)$$

Table 1.

Type of construction	Percentage period elongation
Concrete block	140 to 230
Brick masonry	180
Reinforced concrete	200
Prefabricated reinforced concrete	300

なる形を提示している。ここに a, b は定数であり、 N は建物の階数であるが、同教授の理論解析結果は

$$T=0.49\sqrt{N}-0.20 \quad (11)$$

であり、実測値からは

$$T=0.5\sqrt{N}-0.4 \quad (12)$$

なる関係が存在するように見受けられると述べている。

3. 結

建築物の固有周期を推定する問題は以上のように従来から多くの研究者によって手掛けられ、ここに挙げた以外にも数多くの略算式が導かれている。最近大築志夫氏はこれらのどの式もそれぞれその形に到達するまでに各々の image をもっていると表現した。すなわち

たとえば

①構造計算をする時の設計荷重下の状態を頭において、その時に到達するであろう周期を計算する式、あるいは

②微振動時の構造物の固有周期を推算する式

③前記①、②の何れの場合にも、地盤の変形を考えるもの、および考えないもの

などである。この中で、実際の建築物において、振動測定などで実際に計測し得るものは③で、地盤の変形を考慮したもののみである。……」

このような観点から前章の各周期推算式を見直すことは非常に興味のあるところであろう。しかし、たとえば②で地盤の変形を含む資料から得られた Joint Committee の式、(8)式にしても、あるいは Housner 教授の(四)式にしても image の異なる観点から眺めればそれぞれ不満な点や問題点が残されているに違いない。①の分類に入るべき性格をもつものは強いて挙げるならば谷口博士の(4)式であり、また構造物の大振幅振動時を考えた久田、中川両博士の(9)式もそうであるといって差支えない。けれども、このいずれの式についても、種々の構造形式の相異せる一連の建築物を対象とする場合には各式の右辺の係数の想定にある程度の補足的資料ないしは経験が必要とするであろう。

京都大学防災研究所の小堀教授は建築物の構造種別により、あるいは構造形式に応じて弾性限層変形 δ_e (cm) の値は変化し、それに対応して周期の値が変わることから、 δ_e を周期式に含むことが望ましいとして、新しく

$$T=(0.08-0.04)\delta_e \times N \quad (\text{sec}) \quad (13)$$

ただし N ＝層数

なる形の周期算定式を提案しておられるが、これは従来の式に比べて一段と進歩的な考察から出発した合理的なものであると考えられる。

大築氏の指摘せられるごとく、建物の地盤の性状が周期値に及ぼす影響をもし加味することが可能なら

ば、上の算定式は更に優劣性を倍加するに違いない。またこの他に建築物の周期に大幅に影響する要因があるとすればそれを見出し、それを適切な形で表現するにはどうすればよいかという事柄も今後に残された大きな課題であるように思われる。

本文はこのような難解でありかつ大きな課題を対象として、その問題点の所在を知り、先人の諸研究の足跡をたどることから始まり、文字通り literature study に終始した結果となっているが、この問題を筆者なりの別の角度から、多少とも精度の高い周期算定式を求めるための研究の第一報としたいと考える。

最後に終始御指導を賜わっている棚橋、小堀、石崎各教授に厚く御礼申し上げ、併せて今後一層の御鞭達をお願いする次第であります。

参 考 文 献

- 1) "Earthquake Resistant Regulations of the World. 1968" Compiled by the Organizing Committee, Second World Conference on Earthquake Engineering, June 1960.
- 2) Joint Committee of the San Francisco, California, Section, ASCE, and the Structural Engineers Association of Northern California, "Lateral Forces of Earthquake and Wind", Proc. ASCE, Vol. 77, April 1951.
- 3) "Earthquake Resistant Regulations a Word List 1963" Compiled by the International Association for Earthquake Engineering, May 1963.
- 4) John A. Blume, Nathan M. Newmark and Leo H. Corning, "Design of Multistory Reinforced Concrete Buildings for Earthquake Motions", Portland Cement Association, 33 West Grand Avenue, Chicago 10, Illinois, 1961. pp. 186-295.
- 5) 建設省住宅局編：建築基準法令集，日本建築学会，1960
- 6) 高層建築に関する技術的諸問題，建築雑誌，Vol. 78, No.930, pp.509-528, 1963年9月
- 7) 佐野利器，谷口忠：耐震構造汎論，岩波書店，p. 61.
- 8) 谷口忠：高層建築設計震度式と週期式，Proc. Japan National Symposium on Earthquake Engineering, 1962. pp.111~116, および同表題で日本建築学会論文報告集第79号，昭和37年11月，pp. 1~5.
- 9) 妹沢克惟：振動学，岩波書店，1932, pp. 631~633.
- 10) Tadashi Taniguchi : Seismic Wall Effect in Framed Structure in Relation to the Period of Tall Buildings, Proc. 2nd World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo & Kyoto, Japan, July 1960.
- 11) 武藤清：耐震設計法，耐震設計シリーズ1，丸善株式会社，1963年4月，pp. 333-334.
- 12) 田治米辰雄：重層建築物を質点系に置き換える場合の各層のバネ常数比に関する研究（その1），日本建築学会論文報告集第57号，昭和32年7月.
- 13) 田治米辰雄，岩下恒雄：剛度と密度が共に変化する塔状建造物の自由振動，日本建築学会論文報告集，第66号，昭和35年10月.
- 14) "Earthquake Investigations in California 1934-35", Special Publication No. 201, United States Department of Commerce, Washington, D.C., 1936.
- 15) Joint Committee of the San Francisco, Calif., Section, ASCE, and the Structural Engineers Association of Northern California: Lateral Forces of Earthquake and Wind", Transactions ASCE, Vol. 117, 1952, pp. 755-764, Discussions.
- 16) G. W. Housner and A.G. Brady: Natural Periods of Vibration of Buildings, Proc. ASCE. Engineering Mechanics Division, August 1963, pp. 31-65.