

3.11 (2011年東北地方太平洋沖)地震に励起された高層ビルの固有振動
動画から読み取った高層建物群の地震動特性と
常時微動による地震動特性との比較

中村 豊

株式会社システムアンドデータリサーチ

東京工業大学大学院総合理工学研究科人間環境システム専攻連携教授

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震(以下3.11地震という)では、大きな断層がずれ動いたため長周期の地震動が発生して超高層ビルなど固有周期の長い構造物が目に見えて揺れた。このため、多くの場所で揺れる建物が撮影され、YouTubeなどに投稿されている。そこで、これらの動画から撮影された建物の揺れる周期や振幅を読み取り、建物の階数、軒高、事前の常時微動測定結果、地震後の常時微動測定結果などと比較して、固有周期-高さ関係、地震動による固有振動数の変化などについて検討した。

2. 使用した資料と読み取り方法

2.1 使用した資料

使用した資料は、YouTubeに投稿された動画の中から、視点が安定していて、音声を含む映像から周期や振幅が読みとれるものを選び出した。これらの資料を基に慎重に周期や振幅を読み取った。なお、これらの映像資料はある程度地震動が大きくなってから撮られ始めていると思われるが、首都圏での様々な動画資料の中で時計が写り込んでいるものをみると、14時50分前後を記録しており、概ねその主要な振動部分は記録されているものと考えている。

高層ビルの高さなどの諸元や地震前の特性調査結果などは、日本建築学会・荷重運営委員会 減衰資料作成小委員会が2000年10月にまとめた「実測減衰データベース」の一般建物に掲げられた特性表(以下、特性表という)やネット上に公開されている建物資料によった。なお、この特性表ではビルの名前が伏せられているので、階数や軒高、竣工年などを手がかりにしてビル名を特定した。動画資料についても、データとして取り上げたものはすべて建物名称を特定して特性表などと対応させ、その構造諸元をできるだけ把握した。

2.2 周期や振幅の読み取り方法

(1) 直接法

撮影された動画から目的とする建物の動きを読み取るには、それと比較できる対象物が一緒に映っている必要がある。比較対象物が不動点とみなせるものである場合には、目的の建物の振動周

期や振幅は比較的簡単に読みとれる。ここでは、できるだけ遠方の構造物などを比較対象物とし、それが無い場合には、隣接建物を比較対象としている。隣接建物を比較対照とする場合には、相対変位は両者の振動特性が合成されることになる。両者の周期や振幅が類似すると唸りが生じる。唸りの周期は、両者の振動数差の逆数であり、みかけの周期は両者の平均振動数の逆数となることに注意すれば両者の固有周期を確定することが出来る。長周期の建物であるため、唸りの周期はかなり長くなり、正確に把握することは難しい。そこで、両者の内、読み取りやすい方の固有周期をまず確定し、両者の相対変動から読み取ったみかけの周期と先の確定周期とからもう一方の建物の周期を推定した。

振幅については、動画内の最大振動時と思われる振幅を大まかに 10cm 単位で読み取った。

(2) 間接法

映像中の建物の振動は、非常に微細であり、これを定量的に把握することは困難である場合が少なくなかった。こうした場合、何度も動画を再生して注意深く観察し、周期判別に役立つと思われる現象を見出して計測した。例えば、建物の周期的な振動音、ビル壁面ガラスの反射、ビル壁面に映った隣接ビルの挙動、可動収納棚の振動、ドアの開閉、などである。これらの手がかりでは、振幅を明らかにするのは難しいが、周期についてはかなり正確に見積もることができたと考えている。

3. 動画から読み取った固有周期と振幅

動画から周期などを読み取った建物は 7 階建から 53 階建までの全 41 棟である。少なくとも 1 方向ないしは全体としての揺れの周期を計測している。2 方向に付いて読み取った建物もあるので、データ数は 41 を越えている。以下、これらのデータについて検討を加える。

3.1 固有周期

(1) 地震の前後での固有周期測定結果の比較

今回対象とした建物の内、超高層ビル 4 棟（新宿 C ビル、新宿 N ビル、新宿 S ビル、および都庁第 1 庁舎の南北展望室）について、地震後の 2011 年 10 月 19 日午後 17 時から 18 時半頃に掛けて常時微動を測定した。これらの建物の地震前の常時微動測定結果を特性表から得て、地震前後の変化を調べた。図 1 はその結果を示したもので、地震前の方がやや固有周期が長くなっているが、概ね同程度であり、地震前後で固有振動周期は大きく変動しなかったものと考えられる。

(2) 地震で励起された固有周期と地震前後の固有周期測定結果の比較

図 2 は地震前に常時微動を用いて測定した固有周期と 3.11 地震で励起された固有周期を比較したものである。これによると、横浜 LT ビル以外のすべての建物で、地震時に固有周期は伸びていることが判る。若干の剛性低下が生じているものと推測される。

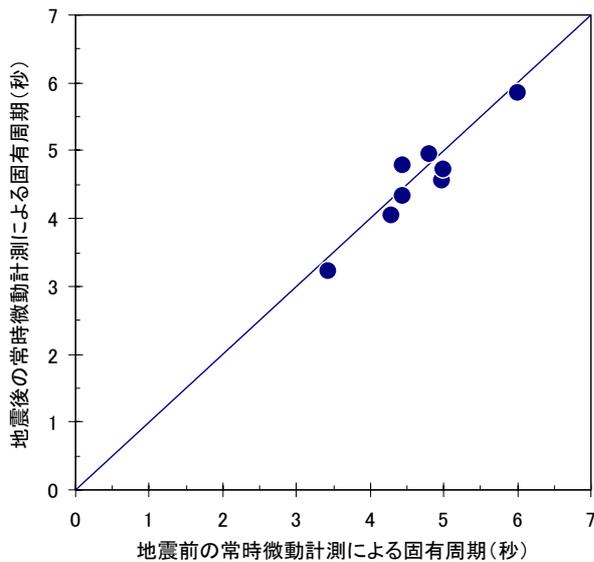


図1 地震の前後での固有周期の変化

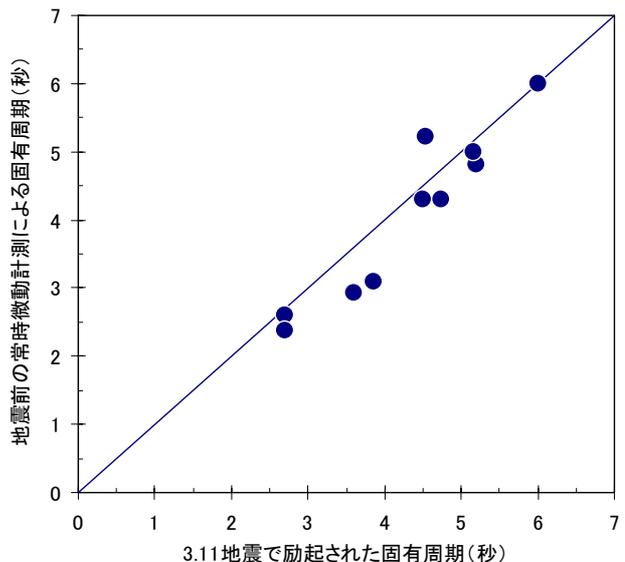


図2 地震で励起された固有周期と地震前の固有周期の比較

横浜 LT ビルは、3.11 地震の前の常時微動による固有周期は 5.22 秒であるが、制震装置 HMD が装備されており風応答時の固有周期として、4.6 秒前後の値が得られている。3.11 地震時に励起された固有周期は動画から 4.54 秒と推定されるが、これは風応答時の固有周期と対応しており、3.11 地震で HMD が機能したことを示していると考えられる。

その他の建物は概ね 10%程度以下の周期変化であるが都庁第 2 庁舎と新宿 K ビルは 20%近く伸びている。測定誤差の可能性もあるので今後確認する必要があるものと考えている。

図 3 は、地震後計測された常時微動による固有周期と 3.11 地震により励起された固有周期を比較したもので、地震後、固有周期が短くなっている。地震荷重により低下した剛性が回復していることを示しているのかもしれない。

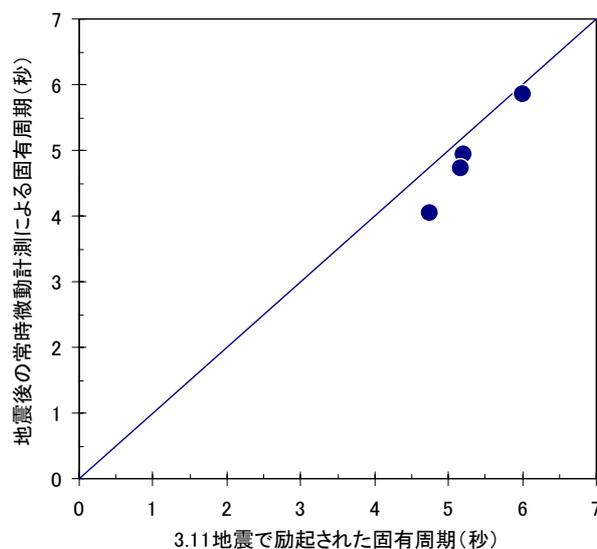


図3 地震後計測された常時微動による固有周期と 3.11 地震により励起された固有周期の比較

(3) 固有周期と建物高さや階数との関係

図4は、ここで対象としている建物の地震前の固有周期 T (秒)を特性表から抽出して、軒高 H (m) に対して示したものである。概ね、次式の係数 k は 0.02 を中心に 0.015 から 0.03 の間にばらついていることがわかる。

$$T = k \times H$$

図5は、3.11地震で励起された固有周期 T と建物高さ H の関係を示したものである。地震前の周期と建物高さの関係と同様、係数 k は、 $0.015 \sim 0.03$ の間に概ね収まり、大部分のものは、 $0.02 \sim 0.03$ の間にある。しかし、大きく逸脱する建物もいくつかある。それは概ね赤く表示されている。赤い表示は、次節でみるように、最大振動振幅の概数を読み取った結果と軒高から算定される平均的なせん断変形角度（せん断歪み）が概ね $1/180$ を越える大きな変形が生じたと推定される建物である。動画からの振幅読み取り精度はそれほど高くはなく、低い建物では誤差が大きくなっていると思われる。映像的にみて、周囲の建物にくらべて相対的に大きく揺れている建物であることは明らかであるので、赤く記されていない低い建物も大きく変形していた可能性があることを注意しておきたい。

図6は 3.11 地震で励起された固有周期 T と階数 N の関係を見たものである。概ね、 $T=0.06 \times N$ で与えられる周期よりも、長い固有周期となっている。多くは、 $T=0.1 \times N$ で与えられる固有周期よりも長くなっており、この中に大きく変形したと推測される建物が入っているのは興味深い。図7はここで、対象とした建物の軒高 H と階数 N の関係を示したものである。図中の直線は、次式を示したものであり、対象建物の内20階を下回るものについては軒高の情報が無いものが多かったが、この式を用いて軒高を推定した。

$$H = 4.0 \times N$$

3.2 動画から読み取られた地震動振幅

図8は、振動振幅の最大値（概数）を動画から読みとって軒高に対して示したものである。読み取り誤差が大きいと思われるので、あくまでも参考値として掲げる。ここでは、 $1/180$ より大きなせん断変形が生じたと推測される建物を赤いマークで示している。左端付近にある低い建物では、 10cm の増減で大きく異なる結果となる。左端下部の建物は赤くなっていないが、動画では明らかに偏心振動をしていたので、注意が必要である。

図9は、この振幅概数値を励起された固有周期に対応させて示したものである。これによると、長周期ほど大きな変位振幅となっていることが判る。また、この図は変位応答スペクトルに対応する図とも見ることができる。そこで、次節では近傍で観測された強震記録を用いて変位応答スペクトルを算定して、比較することとする。

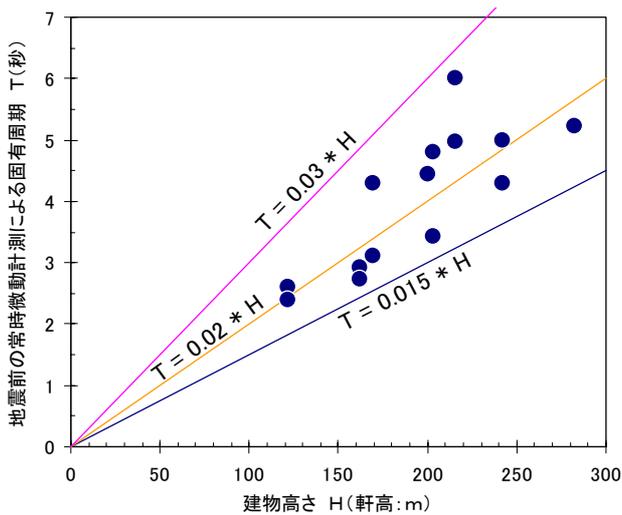


図4 地震前の常時微動計測による1次固有周期と建物高さの関係

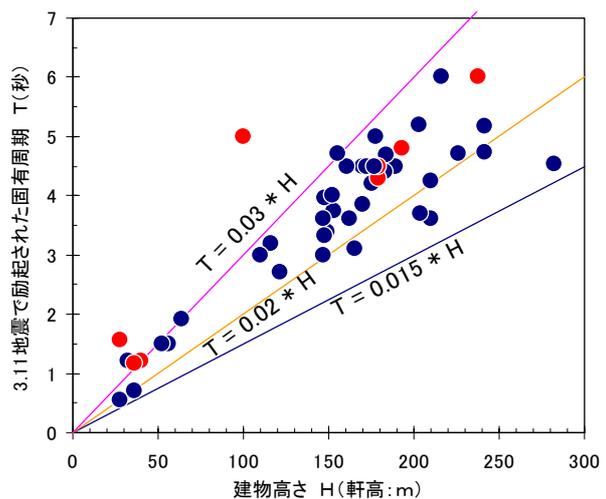


図5 地震で励起された1次固有周期と建物高さの関係

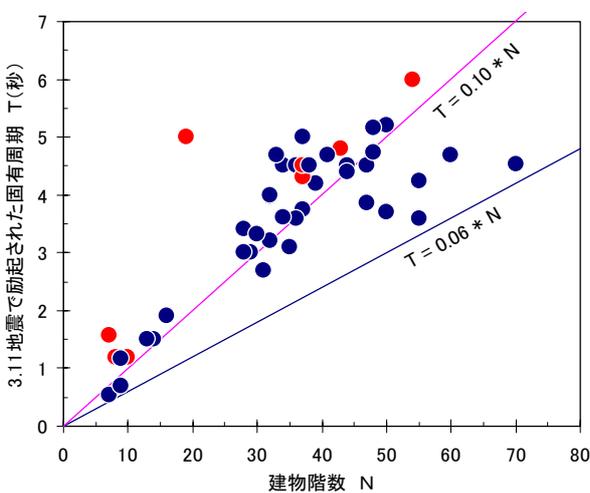


図6 地震で励起された1次固有周期と建物階数の関係

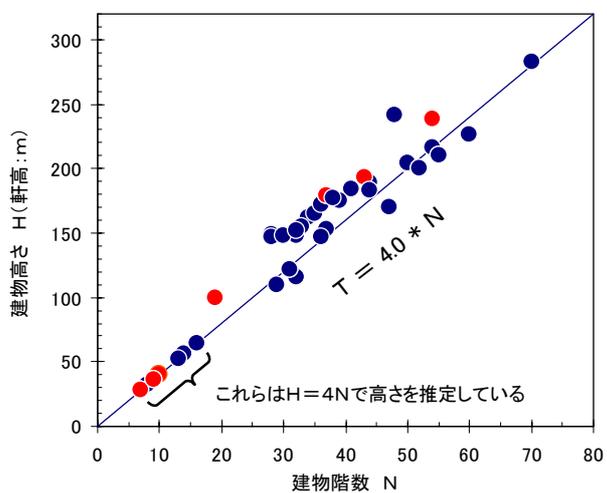


図7 対象建物群の高さと階数の関係

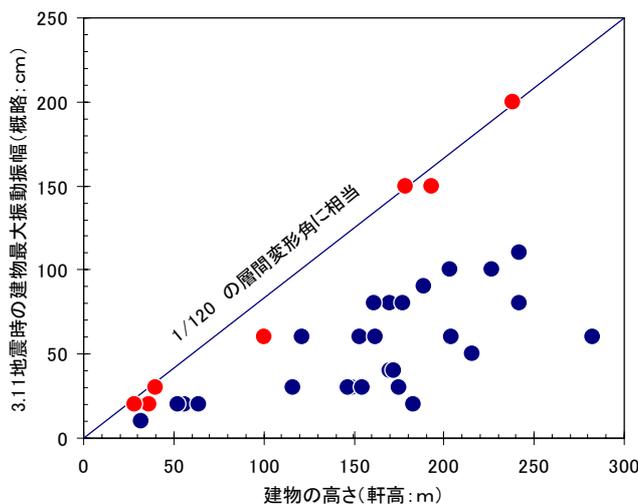


図8 地震による建物の最大振幅概略値と建物高さの関係

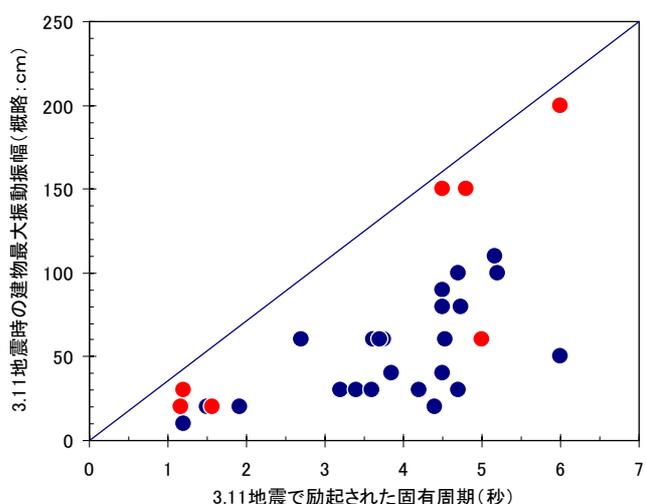


図9 地震による建物の最大振幅概略値と固有周期の関係

4. 強震記録を用いた変位応答スペクトル

動画から読み取った変形から判断すると、3.11 地震では、1/120 の変形に達するものがあつたと推定される。かなり危険な状態だつたと思われるが、読み取られた変形の大きさの妥当性を検証するため、3.11 地震の強震観測記録を用いて、当該周期の変位応答スペクトルを算定した。ここで検討した建物群は、新宿、池袋、六本木、赤坂、神田、品川、横浜などに点在している。建物に近い S、I、M、J、U、N、Y 地点の強震記録について、減衰定数 1% の応答変位スペクトルを算定した。非減衰周期は、0.5 秒、0.7 秒、1.0 秒、1.5 秒、2.0 秒、2.5 秒、3.0 秒、4.0 秒、5.0 秒、6.0 秒とした。図 10 にその結果を示す。これによると、長周期ほど応答変位は増大しており、周期 4 秒で 30cm~60cm、周期 5 秒で 40cm~80cm、周期 6 秒で 50cm~70cm と読み取った振幅値とオーダー的に一致している。また、この変位応答スペクトルをみると、全体的な傾向は全地点で概ね一致しているものの、地点毎の特徴も現れており、長周期特性についても地域特性を考慮する必要があることを示唆している。

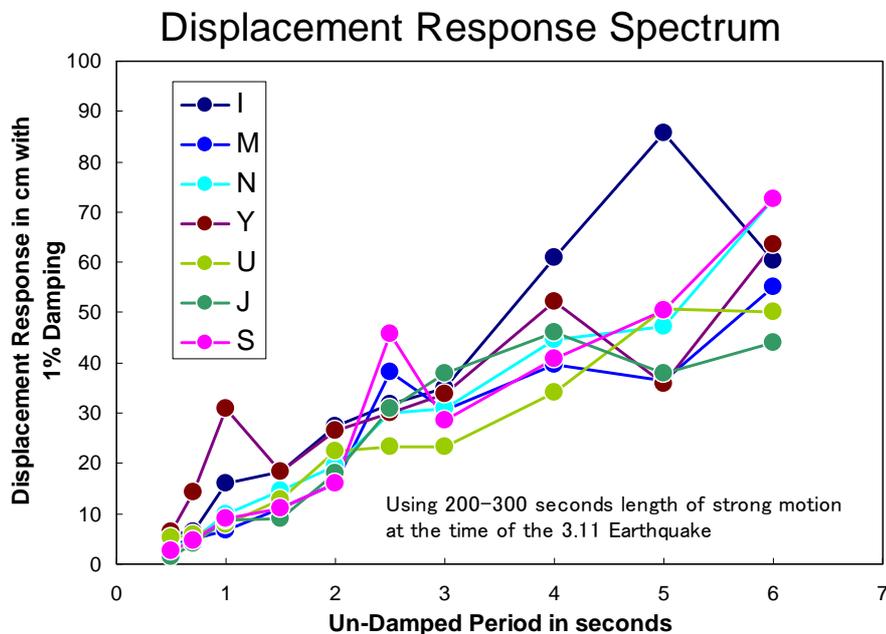


図 10 減衰定数 1% の応答変位スペクトル

5. おわりに

ここでは、公表された動画を分析して、3.11 地震で揺れる高層ビルの地震動特性を把握することを試みた。その結果、かなりの確に周期や振幅を把握することができ、固有周期と軒高の関係、固有周期と階数の関係などを、明確に把握することができた。相対的に固有周期の長い建物ほど被害に繋がるような大きな変形になりやすいことは大まかには言えるが、固有周期だけでは建物の危険性を把握することが難しいこともわかった。また、常時微動と今回程度の地震動とでは得られる地震動特性に大きな違いがないこともわかった。今後、建物の増幅特性などについても検討を加えるなど、さらに検討を深めていきたいと考えている。

以上