

## S波と地盤

(有) タカイ地盤計測 木村 伸一

## 地盤の弾性波

地盤調査には弾性波を利用する調査方法が多い。

地盤の弾性波としては主に以下のものがある。

P波（縦波）・・・進行方向と同じ方向に揺れる（水中も伝播）

S波（横波）・・・進行方向の直交方向に揺れる（水中は伝播しない）

表面波 ……物体の表面を伝播する

その発見者の名からレイリー波とラブ波がある

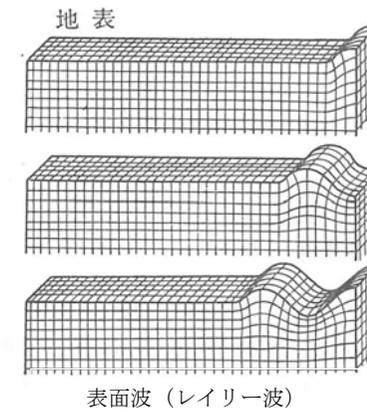
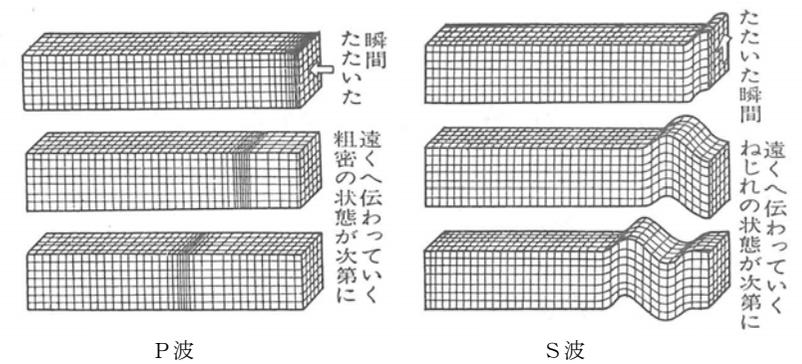


図 弾性波の伝わり方

## P波を利用する

### 1. P波を測定して何がわかるか？

P波速度から地盤状況が推定できる。

P波速度が遅いことから想定される事

- ・岩盤では割れ目が多い、割れ目が開いている。
- ・軟質である。
- ・軟岩あるいは破碎・風化等により軟質化している。
- ・地下水が無い。  
(不飽和である。地盤中の空隙が地下水で満たされていない)

P波速度が速いことから想定される事

- ・割れ目が少ない、割れ目が密着している。
- ・硬質である。
- ・飽和状態である。  
(ただし、軟弱地盤でも飽和土の場合は1.5km/sを示す事が多い)

### 2. P波速度を何に使うか？

- ・ P波速度・S波速度・密度より弾性定数を求める。  
ポアソン比、ヤング率、剛性率、体積弾性率
- ・ 岩盤中のゆるみ区間を推定する。  
(岩盤がゆるむと割れ目が開きP波速度が遅くなる)
- ・ 岩盤分類を行う際の1指標とする。  
たとえば、トンネル地山分類  
たとえば、道路切土の岩盤区分

## S波を利用する

P波速度同様、S波速度は地盤が良いと速くなり、悪いと遅くなる。

S波は、P波と異なり水中は伝播しないので、地下水位以下の土砂地盤においても速度の変化が認められる。

S波速度を何に使うか？

- ・ P波速度・S波速度・密度より弾性定数を求める。  
ポアソン比、ヤング率、剛性率、体積弾性率
- ・ S波速度より工学的基盤を決定する。

(工学的基盤を地震動解析の際の基盤とし、地盤種別や表層での卓越周期、地盤増幅特性等を求める。)

道路橋示方書 S波速度 300m/s 以上

建築基準 S波速度 400m/s 以上

原子力等の重要構造物 S波速度 700m/s 以上

- ・ S波速度分布より地下構造を推定する。

S波速度は、N値との相関が良く道路橋示方書ではN値からS波速度 ( $V_s$ ) を求める式として次式が提唱されている。

$$V_s = 80 N^{1/3} \quad (\text{砂質土 } 1 \leq N \leq 50)$$

$$V_s = 100 N^{1/3} \quad (\text{粘性土 } 1 \leq N \leq 25)$$

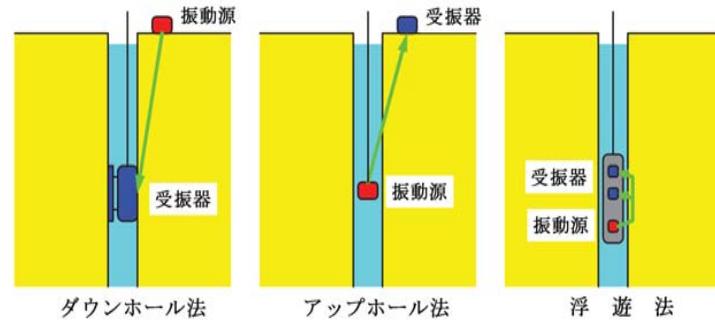
ここで、 $V_s$  : S波速度 (m/s)

$N$  : N値 (回)

## ボーリング孔を利用した弾性波の測定

### PS検層

測定方法として3方法ある。



(日本物理探鉱株式会社パンフレットより)

ダウンホール法が最も一般的であり、地表で起振し受振器の深度を変えながら測定する方法である。

アップホール法は、振動源の深度を変えながら測定する方法であり、振動源としてスパーカ、電気雷管等が用いられる。

浮遊法は、応用地質製のサスペンションが最も有名であり、振動源と受振器が一体となった測定装置を孔内水内で浮遊させながら測定する方法である。

### ダウンホール法

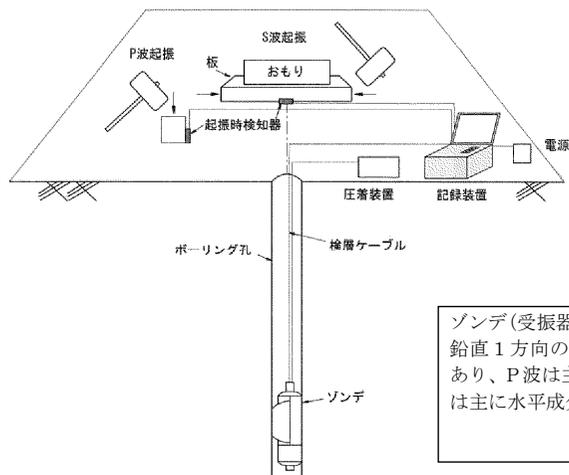
最も一般的な方法であり、孔内に受振器を挿入し、地表部で起振し孔内受振器で一定深度間隔毎に波形記録を取得する方法である。

起振は、P波ではカケヤによる地表打撃やモンケン落としが用いられ、深度が深くなるとドロップヒッターやダイナマイト等による発破が用いられる。

S波の起振は、地表に設置した板をカケヤ等で人力により打撃する板叩き法が一般的である。深度が深くなるとウィンチや重機等でモンケンを持ち上げ、板に打撃する方法等が行われる。

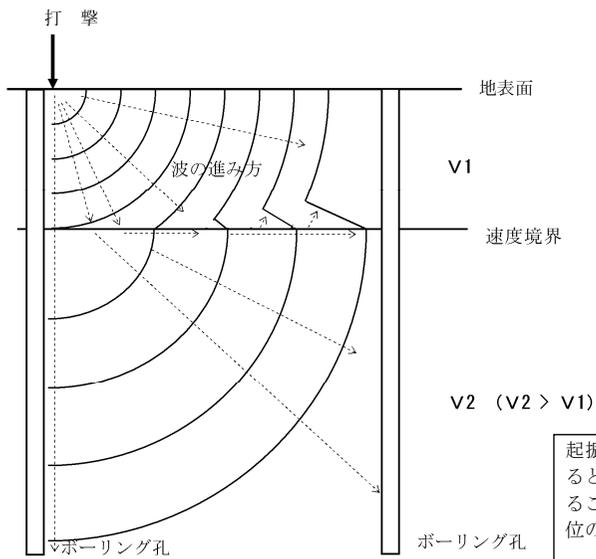
特徴として以下のことが挙げられる。

- ・深度が深くなると減衰により波形のSN比が悪くなるため、より大きな起振エネルギーのある装置が必要となる。
- ・多連の受振器での測定が可能であり、一度に複数の深度の測定が出来る。
- ・孔内の受振器の測定間隔は任意に設定でき、大深度の場合は5m間隔や10m間隔での測定が可能である。
- ・孔内水が無くても測定出来る。



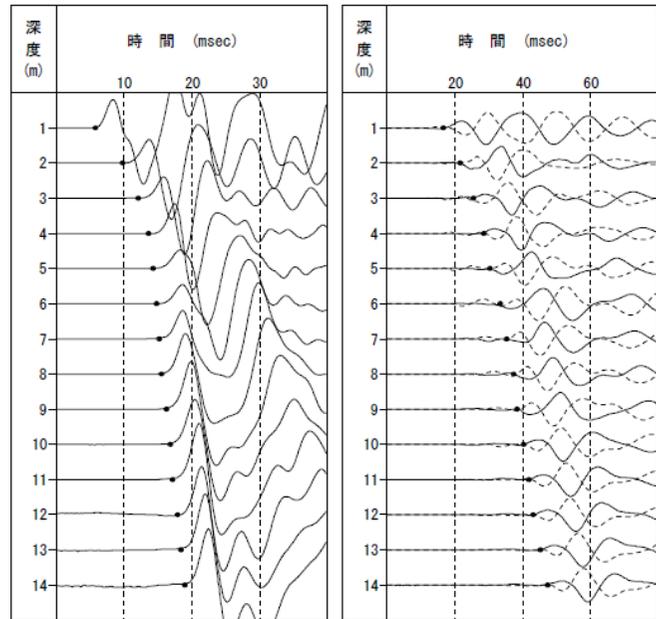
ゾンデ(受振器)には水平2成分、鉛直1方向の3成分の振動計があり、P波は主に鉛直成分、S波は主に水平成分で検出する。

ダウンホール法の測定状況



起振がボーリング位置より離れたと、波が斜め横方向より伝播することになり、場合によっては下位の波が早く到達する。

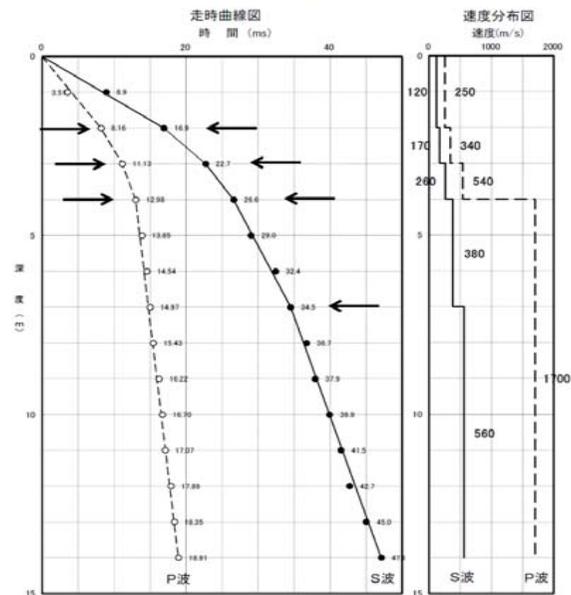
ダウンホール法の伝播イメージ



P波波形記録

S波波形記録

PS検層結果図



P S 検層結果解析例 (ダウンホール法)

## ダウンホール法の解析

解析方法の概要を以下に示す。

- i) P波およびS波毎に各深度の初動走時を読み取る。
- ii) 地表に設置したモニター受振器の波形より、各深度の初動走時における起振時の時間のずれを補正する。次に、起振点がボーリング孔口にあるような走時曲線にするために、次式により初動走時の起振点補正（深度補正）を行う。

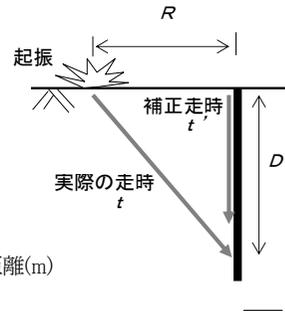
$$t' = t \times \left( D / \sqrt{R^2 + D^2} \right)$$

ここに  $t$  : 読み取った走時 (s)

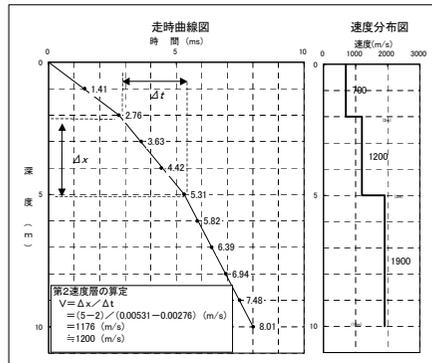
$t'$  : 補正後の走時 (s)

$D$  : 測定深度 (m)

$R$  : 振源と孔口間の水平距離(m)



- iii) 以上により得られた補正走時を横軸に、測定深度を縦軸にとり走時曲線を作成する。走時曲線の勾配が一定とみられる区間について、その区間の両端を通る直線を引き、次式を用い、その傾きから速度を、またその折れ曲がり点から速度層境界深度を決定する。



$$V = \Delta X / \Delta T$$

ここに  $V$  : 弾性波速度 (m/s)

$\Delta X$  : 速度層厚 (m)

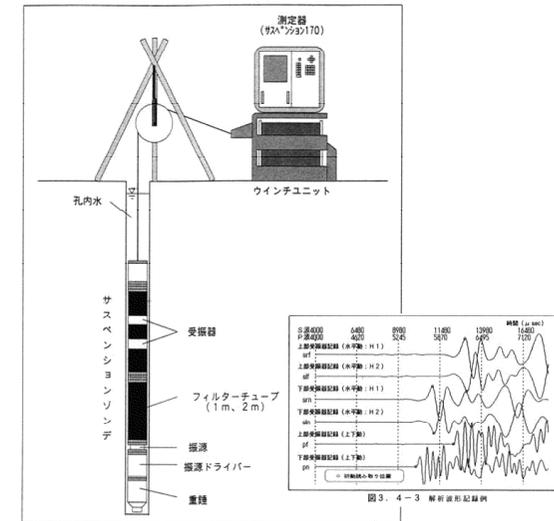
$\Delta T$  : 走時曲線の直線部分  
の走時差 (s)

## サスペンション式PS検層

サスペンション法は孔内につり下げられたゾンデの下部にある発振器で起振しその上部にある1m間隔の受振器により得られた波形の時間差からP波およびS波速度を決定する方法である。

特徴として以下のことが挙げられる。

- ・起振器と受振器が一体となっており、深い深度でも測定可能である。
- ・1m間の区間速度が得られるため、ダウンホール法よりも詳細な記録を得る事が出来る。
- ・水中での浮遊式ゾンデであり、孔内水が無いと測定出来ない。
- ・ゾンデが約6m程度と長く、余掘りが4～5m程度必要である。
- ・受振器が1m間隔であり、測定も1m間隔で行う。
- ・孔径が大きくなると、起振波形のエネルギーが減衰し、波形が不良になることがある。



サスペンションP S 検層測定概念図

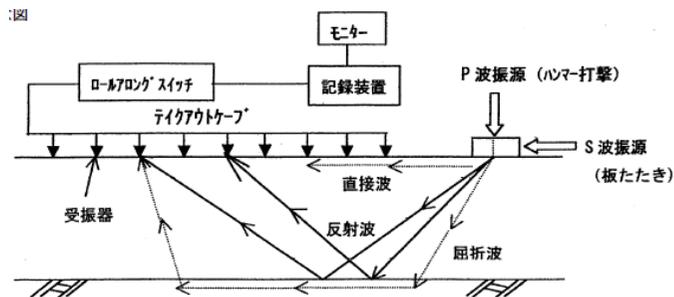
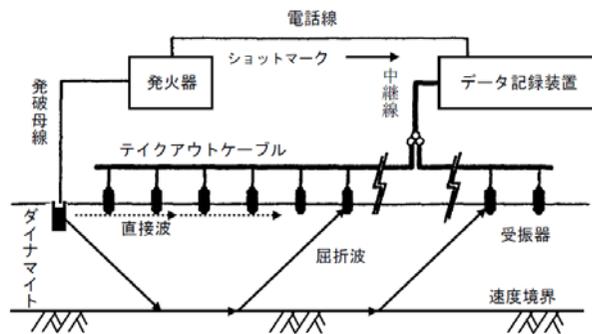
## ボーリング孔を利用しない探査方法

### 弾性波探査

ボーリング孔を利用せずP波・S波速度構造を求める方法として弾性波探査がある。

地表に受振器をならべ、地表を起振して得られた波形から地下構造を推定する方法である。

屈折波を利用する屈折法、反射波を利用する反射法がある。前者は土木構造物施工前の地山状況の把握を目的として行われ、後者は地下構造や断層調査等に用いられる。

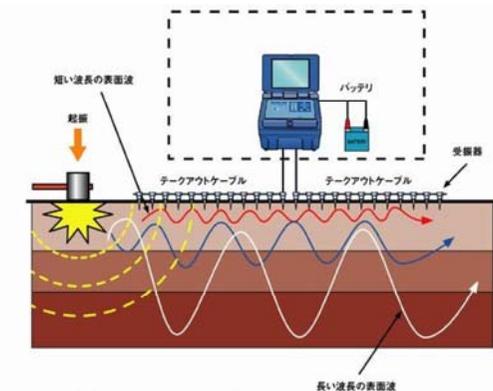


## 表面波探査

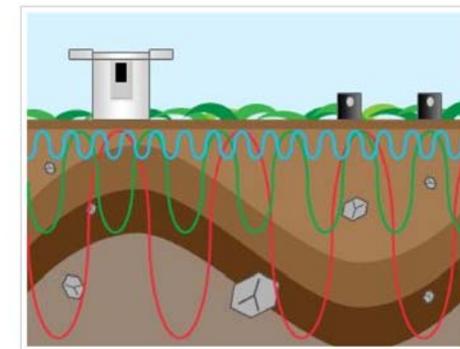
弾性波探査と同じように地表に受振器をならべ、地表を打撃することにより、表面波（レイリー波）を発生させ、S波速度を解析する方法である。弾性波探査同様にS波構造が2次元の断面状に解析される。

起振機を用い2つの受振器により波形を解析する方法もあり、この場合は鉛直方法のS波速度構造が得られる。

表面波は、長い波長ほど深部を通るため波長により伝播速度が異なる。この各波長毎の速度を求めることにより深度方向の速度分布を知ることになる。



表面波探査のイメージ 応用地質(株)のパフレットより



表面波探査のイメージ (起振機を用いた例)

ファインテック(株)のホームページより

## 地盤構造と地震およびS波

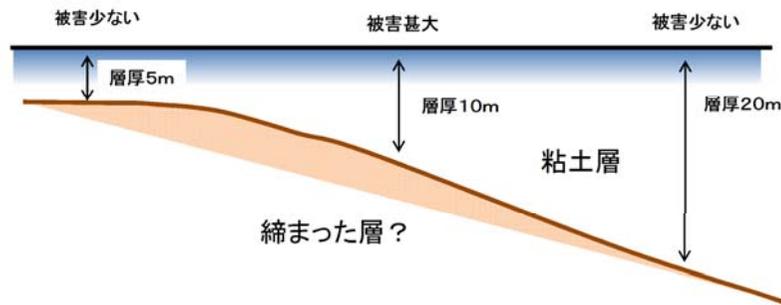
先日、NHKの番組で地盤リスクを特集した番組があった。

それによると、

熊本地震において益城町の一部で木造家屋がほとんど倒壊した区域があったが、それと百数十m離れた地域では建物被害が微少であった。

この被害の違いの原因として表層部に分布する軟弱層を挙げていた。

被害が大きい地域は表層の軟弱な粘土層が層厚 10m 程度であるが、層厚 20m や層厚 5m のところでは被害が少ないという傾向がみられた。



粘土層の厚さと住宅の地震被害

これは、地下からの地震動が地表の粘土層によって増幅され、その振幅が粘土層層厚 10m の地域で特に大きくなった。

この増幅された地震の波の周期が地表の住宅建物の固有周期に近いため被害が大きくなった。

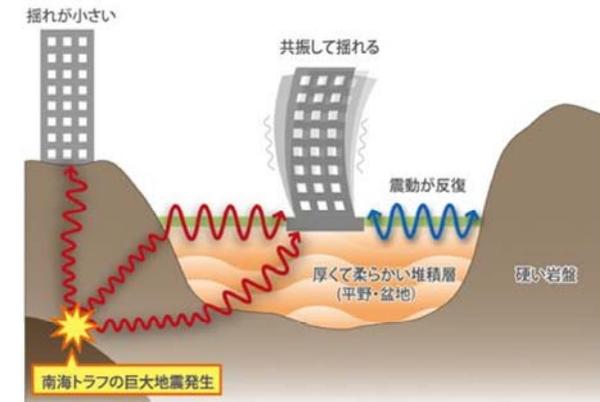
ということであった。

以前から、地震の被害は地盤と地表の建物の相互関係で異なる事が知られている。

たとえば、関東大震災では下町では木造家屋の倒壊が多く、山手では土蔵の倒壊が多かったと言われている。(一部で反論もあるらしい)

下町では、地盤が軟弱なため地震の揺れの周期が長くなり固有周期が長い木造建物に被害が多く、山手では地盤が良いため地震の周期が短くなり固有周期が短い土蔵の被害が多くなったという。

1985年に起きたメキシコ地震では、震源より 400km 離れたメキシコシティで被害が大きくなった。メキシコシティがあるメキシコシティ盆地はもと湖であり硬い岩盤の上に軟弱地盤が堆積しており、地震の波がこの軟弱地盤に入射して増幅され、さらに反射を繰り返して地震動が大きくなったと言われている。この地震動の周期は約 2 秒であり、14 階前後の建物に大きな被害をもたらしている。



地震の揺れおよび被害のイメージ 鹿島建設ホームページより

なお、このメキシコ地震で認められた周期約 2 秒の地震動は、「長周期地震動」といわれ、近年注目されているものである。長周期地震動は、S波ではなくその後で現れる表面波が主体であると言われている。

## S波速度から推定できる地盤特性について

### ① 地盤の固有周期

地盤の固有周期はS波速度分布から概略指定でき、基盤上の表層地盤の固有周期は次式の「1/4波長則」により算定出来る。

$$T = 4H / V_s$$

多層地盤の場合は次式で近似出来る。

$$T = \sum (4Hi / V_{si})$$

ここで

$T$  : 地盤の固有周期

$H$  : 地層厚

$V_s$  : S波速度

$Hi$  :  $i$ 層の地層厚

$V_{si}$  :  $i$ 層のS波速度

### ② 増幅特性

硬質地盤から軟らかい地盤に入射した弾性波の増幅は、弾性波速度( $V$ )と密度( $\rho$ )の積( $\rho V$ )の比によって決まる。

$$\alpha = (\rho V)_{\text{上層}} / (\rho V)_{\text{下層}}$$

$\alpha$ が小さいほど、すなわち下層に比べて上層が軟らかいほど波が大きく増幅する。

## 1/4波長則による固有周期の計算例

### 例1)

表層～深度 2m	層厚 2m	S波速度 120m/s
深度 2～3m	層厚 1m	S波速度 170m/s
深度 3～4m	層厚 1m	S波速度 260m/s
深度 4～7m	層厚 3m	S波速度 380m/s
深度 7m 以深		S波速度 560m/s (基盤)

固有周期  $T = 0.13$  秒

### 例2)

表層～深度 8m	層厚 8m	S波速度 110m/s
深度 8～10m	層厚 2m	S波速度 160m/s
深度 10～14m	層厚 4m	S波速度 110m/s
深度 14～16m	層厚 2m	S波速度 160m/s
深度 16～18m	層厚 2m	S波速度 200m/s
深度 18～20m	層厚 2m	S波速度 260m/s
深度 20m 以深		S波速度 430m/s (基盤)

固有周期  $T = 0.61$  秒

## 建物の固有周期について

建物の固有周期は概ね次の式で表されると言われている。

固有周期を  $T$  (秒)、建物の高さを  $H$  (m) とすると

$$T = 0.02 H \quad (\text{鉄骨造})$$

$$T = 0.015 H \quad (\text{鉄筋コンクリート・鉄骨鉄筋コンクリート造})$$

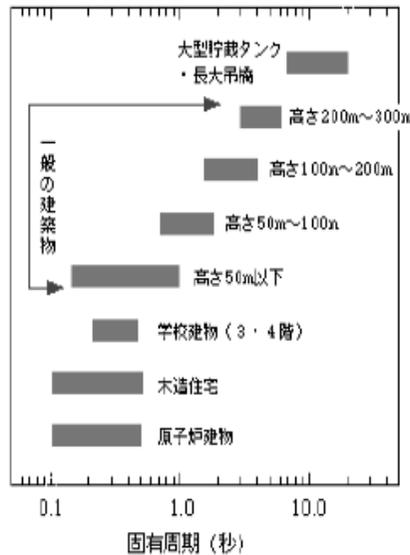
建物の階高を 3~4m とすると、階数を  $N$  として

$$T = 0.06 \sim 0.08 N \quad (\text{鉄骨造})$$

$$T = 0.045 \sim 0.06 N \quad (\text{鉄筋コンクリート・鉄骨鉄筋コンクリート造})$$

となる。

木造住宅では、0.1 秒から 0.5 秒の範囲にあり、平均的には、新しい二階建てが 0.2 秒前後、古い二階建てが 0.3 秒前後、平屋の場合はこれよりもやや短周期と考えれば良いといわれている。



構造物の固有周期の分布 地震学会ホームページより

1/4 波長則で求めた例 1 の地盤の固有周期 0.13 秒は、建物の固有周期では鉄骨造 2 階建てのアパートの固有周期とほぼ一致する。

例 2 の 0.6 秒は 10~13 階程度の鉄骨鉄筋コンクリート造のマンションの固有周期と一致する。

実際の地震の際は、強震動を受けた建物は一部に破損を受けてしまい固有周期が変わり、強震を受けた後、建物の固有周期は当初の 1.2~1.5 倍に延びるようである。メキシコ地震の建物の被害も 2 秒という長周期地震動よりも短い固有周期を持っている 14 階の建物に被害が多くなっているのはこのためである。阪神淡路大震災でも神戸の強震動は 1 秒の周期が卓越していたが 0.2~0.3 秒の固有周期である木造住宅に大きな被害がでている。