

振動から波動へ——震度法から脱却せよ

正会員 技術士,博士(工学) 福島啓一

1. 始めに

地震により破壊しない構造物をつくることは土木・建築の技術者にとって古来大きな課題である。佐野利器は構造物自重に地震係数を掛けた水平力を考えて設計すべきと主張しこれを震度法と名付けた。関東大震災の被害に強い衝撃を受けた眞島健三郎は振動学を研究し耐震には振動を考えるべき,共振を避けるため振動周期の長い柔構造を用いるべきと提案した。振動か静的水平力か,柔構造か剛構造か,二人の論争は建築学会を舞台に繰り広げられたが,道路や鉄道,建物などの構造物の設計基準はほとんどが震度法を採用し,論争は尻切れトンボに終わった。

2. 振動から波動へ

剛体に水平または鉛直の加速度が加わると,加速度×質量の力が剛体に加わる。これは墓石程度の大きさの物体ではなりたつ。しかし実際の構造物は遙かに大きく,撓みやすいので,耐震設計は不正確になる。建物基礎は地震力により運動し始めるが,建物天端までこの運動が伝わるにはかなりの時間を要する。震度法はこの時間や構造物の撓みを無視している解だからである。これは天体の運動などは力の伝達に要する時間を考えない力学でもほぼ正確に解くことが出来るが,運動速度が速い原子内の問題などは正確に解けないのと似ている。あるいは交流電気をオームの法則だけで論じるに似ている。そのため量子力学や波動力学,相対性原理が開発された。地震学では P 波,S 波,表面波を区別するのに,弾性波速度探査で地盤調査をするのに構造物設計だけが静的な震度法で止まっているは,時代遅れも甚だしい。

3. 波動の特性と事例

振動は復元力・慣性力や減衰力と地震の外力との釣り合いから生じる。式で表すと u :変位

$$m d^2 u / dt^2 + du / dt + ku = F(t) \quad (1)$$

波動方程式はつぎのようなる。

$$(\partial^2 u / \partial t^2) = v^2 (\partial^2 u / \partial x^2) \quad v: \text{波の進行速度} \quad (2)$$

波動の特性としては①ある速度で伝播する。速度
キーワード 耐震,波動,共振 *我孫子市久寺家 1-23-8

は P 波では $v_p = \sqrt{E / \rho}$ S 波 $v_s = \sqrt{G / \rho} = \sqrt{E / 2 \rho (1 + \nu)}$ となる。 v_s は v_p のより小さい。②異なる媒質の層境で反射,透過,屈折する。棒の終点(地表)では波は全反射する(固定端では変位=0,自由端では応力=0)。③進行波と反射波が衝突(鉢合わせ)した所では合計の振幅になる。④層境(ρ/E が変わるところ)での,P 波,S 波の透過率 B/A ,反射率 C/A は次のようになる。

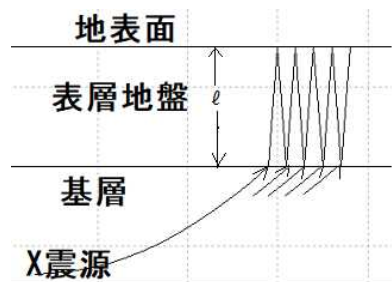
$$\text{透過 } B/A = \frac{2 \rho_1 v_1}{\rho_1 v_1 + \rho_2 v_2} \quad (3) \quad \text{反射 } C/A = \frac{\rho_1 v_1 - \rho_2 v_2}{\rho_1 v_1 + \rho_2 v_2} \quad (4)$$

寸法や形状が違う部材間でも似た様な現象が起きる。表面波では少し違うが似た現象が起きる。⑤その他回折,散乱,干渉,うなり,ドップラー効果などが起こる⑥短周期の波は減衰が激しい。⑦力や変形の伝達(地盤内,構造物内)等は ρ/E ,断面の変化部,継手部の構造により変わる。鉄筋コンクリートや鉄筋の圧接部,継手部,沓部,等では更に複雑な現象が起きる。

4. 振動や波動を考えないと理解できない現象

(1)地震による振動は震源から遠くなるほど小さくなる。式で表すと A_m :振幅(マイクロ) Δ :震央距離 km $\log_{10} A_m = M - 1.73 \log_{10} \Delta + 0.83$ (M :マグニチュード) (5)しかし震源から遠くても狭い範囲で被害が集中する場所がある。これは次のような波動の性質による。震源から基盤(沖積層)を伝わってきた波動は地表近くで厚さ L の沖積層に伝わる時,層境で一部反射し,一部は通過して地表にいたる。地表では全反射して層境に戻り,一部はそこを通過して基層に戻るが,残りは又反射して沖積層を通り再び地表にいたり……という現象を起こす。しかし卓越周期になるような軟弱層厚さ L のときは,層境での反射波と震源から来た次の波との位相が一致し,両者の和の波が沖積層に入る……このような現象が震源での破壊が続く間何回も繰り返して継続する。(2次,3次……s次振動も含めると $T = 4L / (1 + 2s) / V$)。こうして震源での破壊時間が続くほど地表での振動は大きくなる。主要動の継続時間は $M=8$ では 40s, $M=7$ で 25s 程度とされている。メキシコ地震($M=8.1$)では震央から約 400km

離れたメキシコ市で大きな被害が発生したが(5)式



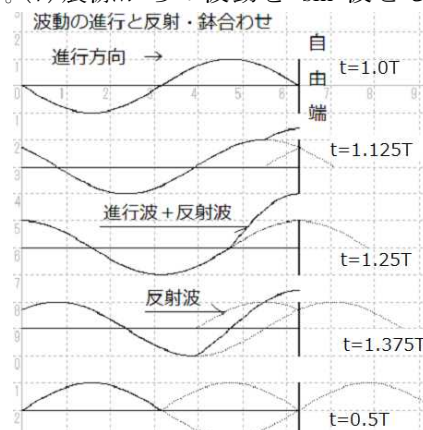
で計算すると
26.8mm になる筈の
振動が,実測値は水平
動 4 ~ 25cm,とな
っていて,10 倍程度
増幅されている。石
本巳四雄¹⁾は地震の

度に周辺より被害が大きい出羽村ではこの様な現象
が起きていると予測しここに地震計を設置し卓越周
期の研究をし,この現象を明らかにした。卓越周期に
ほぼ一致する固有周期の建造物がそこにあれば共振
して激しい震害を受ける。「中川低地において,震度
7 の地域は,草加町北部から新田村,出羽村南部(現
越谷市)の綾瀬川沿いの地域……である。震源により
近い東京市で最も全潰率が大きい本所区でも震度 6
強の被害であり,この地域の地震動が如何に強かつ
たかが分かる」²⁾とこれを裏付ける別の報告もある。

(2) 地盤振動と構造物振動の共振

地盤の卓越周期と地表構造物の固有周期が一致する
と構造物に強い振動が生じる(共振)。固有周期は RC
建築ではほぼ $T=0.021H(S造) \sim 0.015H(RC造)$,木造
家屋は 0.1 ~ 0.5 秒である。メキシコ地震(1985.9.19)
では「軟弱地盤の固有周期(2 ~ 3 秒)が卓越したた
め,同一周期の波が繰り返し作用し,この周期に近い
建物(10 ~ 20 階程度)では非常に大きな応答加速度
(10g 程度)が生じ,被害が大きくなったものと考えら
れる。地盤上の最大加速度は 0.2g 程度だったにもか
かわらず 20 階を超す超高層建物(一次周期は 4s 以
上)は全く被害を受けていない」³⁾。14 階のビルはほ
ぼ 100 %壊れたのに 8 階以下と 16 階以上のビルは
無傷だった。別資料によると破壊地域の沖積層厚さ
は一定値範囲内にあり卓越周期と共振したと考えら
れる。神戸その他でも震災の帯が見られるが同じ理
由と考えられる。(3)「見るかげもなくこわれたもの
から無傷までの同種あるいは類似構造物が狭い地域
に同居する」例は各地地震で見られる。地盤も構造物
も振動周期はいろいろであり共振するかどうかで明
暗が分かれる。松代群発地震では加速度は大きい
(500gal 以上)継続時間は短く(1~2sec)被害は小さ
かった(壁に亀裂)。共振が小さい為である。宮城県沖地
震と東日本大震災の最大加速度(仙台)はほぼ同じで

あったが被害は差がある。継続時間が 2 倍程度違
ったから(4)中間高さでの破壊一波は,天端で変位が最
大になるが,歪みや応力は天端から L/4 附近で最大
になる。波動がここで鉢合わせをするからである。多
くの建物で中間階が潰れたのもこのためである。高
架橋の場合,橋脚天端まで行った波は橋桁を伝わり
次のスパンの橋脚に伝わりそこから下に向かい橋脚
の途中高さで鉢合わせする。ほとんど同じ高さで壊
れた高架橋の例が沢山見られたのはこのためであ
る。鋼管柱で中間高さで提灯座屈したものも多く見
られた。(5)東北震災では震源から 700km あまり離
れた大阪の咲州庁舎は周期 6.5 秒の揺れに共振して
構造物本体に被害はなかったが内装材他に大きな被
害が生じた。部分的に振動周期が違いそこだけ共振
したためである。(6)航海中の船が激しい振動(海震)
で被害を受ける例がある。海水と地震の上下動が共
振したものである。(7)震源からの波動を sin 波とし
てシュミレーションした鉢合わせ
の例を図に示す。進行波と反射波
の合成波では反射波の先端で変
形線が屈曲しているの
で,ここに強い応力が発生
し,破壊が生じたと推定される。



5.おわりに 震度法が日本の耐震技術界を支配して
いる。しかし震度法一辺倒では進歩はない。振動や波
動を考えるべきである。共振を避けるためには卓越
周期を調査し,それと共振しない構造(建物高さ,ヒ
ンジ他)を考え工夫する必要がある(シュウ,配管,仕
上げ材なども)。今こそ震度法から脱却し,波動を考
えた耐震工学への飛躍が必要である。力や変形,波動
の伝達や反射も従来の理論と違って来る。宇宙,航空,
造船その他の衝撃工学の知見にも学ぶべきである。

1) 石本巳四雄: 出羽村及び濱松町における地震動卓越周期の観測 地震研彙報 14(1936)

2) 武村雅之, 諸井孝文: 地質調査所データに基づく 1923 年関東地震の詳細震度分布 その 2. 埼玉県, 日本地震工学会論文集, 第 2 巻 第 2 号, 2002 年

3) 岩崎敏男: メキシコ地震報告(概報), 土木学会誌, 1985.12