

## 耐振・制振設計における振動解析簡易化手法について

— 振動レベルの略算、加振力の評価の試み —

三祐コンサルタンツ	正会員	富樫 豊
首都高速道路公団	正会員	植木 博
三祐コンサルタンツ	正会員	黒見 太
名城大学理工学部	正会員	桐山忠雄

1. はじめに 人工振動に対して居住環境の改善や機械・構造物の安全性を確保するために、振動源に対し構造物・機械の耐振・制振設計が行われている<sup>6</sup>。しかしながら振動源から受信構造物までが一環として扱われていないために、居住環境のより一層の快適化に関してあるいは機械の大型化による加振力の増大に関して“耐振・制振”に対応できない面が多々現れてきている。例えば、交通振動の場合であれば、振動源と受信側は各々独立して防振・制振化が図られているが、より一層の“制振”については不十分な感がする。また大型機械の場合については、機械自身の機能維持のため高い“制振”が望まれているものの、現状では満足のいく“制振”はおろか“耐振”についても問題のあることも多い（当然この場合、耐振・制振設計の基準すらない）。以上のように耐振・制振設計については、振動源から受信側までを一環系とすることが必要である。しかし問題は単純でなく、振動源の加振力評価や振動レベルの評価が難しいのに加えて構造物と振動源の相互作用、機械系の倍振動・非線形振動の問題がある。また構造物の設計には振動問題がフィードバックすることも問題をより複雑にしている。よって現状では耐振・制振設計としては、系の共振現象を回避することに加えて構造物の保有耐力を増すことが第一とされ、データの蓄積が進むとともに解析法のレベルが著しく向上したが、依然として研究課題も多い。このうち特に重要な課題の一つには一次設計に際して振動問題を検討する場合、あるいは既存構造物の振動問題をパイロット的に検討する場合、振動現象を如何に簡易に把握するかである。ここでは、一次設計に関する振動評価簡易論を提案し、制振の方策について考察する。具体的には構造物の各部材系の固有振動数の算定について簡略表現式を提案し、ついで1質点系力学・1次元波動論にもとづいて加振力及び振動レベルの評価法を提案し、これらの論理により得られる“制振”の方策について若干の検討を加えることにする。

2. 構造物系の固有振動数の略算2. 1 部材系

構造部材として梁・柱・壁を対象として曲げ・せん断・伸縮モードに対する固有振動数の算定式を部材の位相速度 $V$ により表してみる。前提条件としては、部材には機械が搭載するとし、柱は壁と同一のものとする。また機械の質量 $M'$ 、部材の質量密度 $\rho$ 、体積 $V$ 、質量 $M$ 、剛性 $K$ 、梁背 $h$ 、梁長さ・壁高さ $H$ とする。構造力学によれば、上述各運動モードに対する部材の合成には、せん断弾性係数 $G$ 、ヤング率 $E$ 、二次モーメント $I$ 等で表される。部材の固有振動数 $f$ は、1質点力学により、 $f = (1/2\pi) \sqrt{K / (M + M')}$  である。ここで、 $\rho$ と $G$ 、 $E$ とを組にして位相速度( $V_p$ 、 $V_s$ ; P波、S波の $V$ )で置き換えると、各運動モード毎に部材の固有振動数が次のように定まる。

$$\text{曲げ系; } f = (1/2\pi) (h/H^{**2}) V_p \alpha / \beta$$

$$\text{伸縮系; } f = (1/2\pi) (1/H) V_p / \beta$$

$$\text{せん断系; } f = (1/2\pi) (1/H) V_s / \beta$$

ここに、 $\beta^{**2} = M' / M$  であり、 $\alpha$ は両端固定端支持の梁のせん断剛性を基準にしたときの梁の曲げ剛性の比の二乗である。両端固定の梁では $\beta = 16$ 、両端住の梁では $\beta = 4$ である。上式群の表現のメリットは、構造物の物性である $V$ が既知であることから、振動数 $f$ を部材の形状パラメーターである $H$ 、 $h$ のみから決めることができることにある。また機械質量を考慮して振動数を算定することが簡単であることも、上式群の表現の特徴である。なお、道路橋の場合、柱脚下地盤の逸散減衰 $d$ が期待でき、振動数算定の場合には、 $f = f * d$  として $f$ を補正することが必要となる。

2. 2 全体系

構造物全体の固有振動数を算定する機会は部材系のそれに比して際だって多くはないが、この場合には全体振動に関する耐振・制振設計を行うために全体系の振動性状が問題となり、全体系のモデ

ル化が必要となる。その一方では、上述の部材系を組み合わせる振動数を略算することも可能である。この場合、エネルギー法の適用により部材系の固有振動数を部材群の連結状況に応じて直列・並列適に加算することになる。

**3. 加振力の評価** 人工振動は動的現象であるので、時刻歴解析の必要性はみとめられるが、簡易法のねらいによれば、力は振度を介して静的力におきなおし、この力を作用方向、着力位置を考慮して作用させなければならない。**3.1 大きさ** 加振力があらかじめ与えられていて振動レベルを算定するのが通常のアプローチであるが、一般に加振力を機械力学から評価することは難しい。このため走行機械等の機械振動の実測から逆に加振力を求めることが必要となってくる。ここでは振動レベルから加振力を算定することを試みる。1質点力学により加振力Pは、uを変位、 $\alpha$ を加速度として、 $P = Ku + (M + M') \alpha$  である。変位uを増幅関数  $T = 1 / (1 - f / f_0)^{**2}$  と加速度 $\alpha$ で表すと、 $P = (1 + \beta^{**2}) M \alpha (f_0 / f)^{**2} / T$  を得る。ここに、 $f_0$ は系の固有振動数、 $f$ は外力の振動数であり、各々は各運動モード系で与えられるとする。当然加振力Pも各運動モード毎のものとなる。ここで、地震動の設計震度と同じように系の自重に対して振度kを定義すると、 $k = (1 + \beta^{**2}) (\alpha / g) (f_0 / f)^{**2} / T$  を得る。次に波動論的に加振力を求める。部材を1次元連続系とし、部材一端を固定、他端に加振源があるとして波動方程式を解くと加振力は、 $2\pi f H / V$  が小さいとして  $P = (1 + \beta^{**2}) (M V^{**2}) \alpha / (2\pi f h)^{**2}$

となる。このときも振度kを定義すると、 $k = (1 + \beta^{**2}) (V^{**2}) (\alpha / g) (2\pi f h)^{**2}$  となる。ただし上式には増幅関数が入っていないことに留意されたい。算定例を示す。コンクリート構造物における機械の加振力について  $H = 10\text{m}$ 、 $M = 60\text{t}$ 、 $f_0 = 50\text{Hz}$ 、 $f = 10\text{Hz}$ 、 $\alpha = 100\text{gal}$  (最大加速度) に対して1質点力学により定めた振度kを求めると0.5を得る。この例では人工振動の源のパワーが大きいと強震以上の慣性力が生じることもあり、耐振・制振設計にはこの点を十分留意しておくことが必要である。

**3.2 加振力の作用方向・着力領域** 道路橋路面に走行機械がある場合、加振力の着力位置と力の作用方向は自明である。しかし、工場では構造物が機械の一部にとりこまれる場合や複数の機械がある場合もある。前者の場合では、加振力が構造物の一部に着力し、また後者の場合では各振動源の力に位相差を考慮することが必要となる。

**4. 振動レベルの略算** 加振力Pが定まる場合、構造部材の振動レベルを略算する式を導く。まず水平重力法の定式化によると、加振力により生じる変位uは  $u = k g / (2\pi f h)^{**2}$ 、位相速度Vで変位uを表すと、 $u = k / (g V^{**2} * \eta)$  となる。ただし、 $\eta$ は形状係数として曲げ系の場合  $\eta = h / H^{**2}$ 、せん断・伸縮系の場合  $\eta = 1 / H$  である。上式の表現のメリットは、振度kと部材の位相速度、形状係数により振動レベルを略算できるところにある。

**5. 制振設計方策** 振動レベルを如何に低下させるかが(耐振設計を含めて)制振設計の肝である。制振設計の方策について、簡略理論から導かれるものをいくつか挙げて考察する。(1)機械系と構造系の固有振動数を一致させない。これについては部材系の固有振動数fを部材形状より制御する。(2)機械のベッドマスの重量を増す。これはみかけ上機械のみの加振力を低下させることになる。実際にはベッドマスにより機械振動を減衰させるねらいのほかに、ベッドの重量増は周辺構造物の死荷重を増かさせるので、耐振的な配慮から系の剛性が増す。これによって制振効果が結果的に現れることになる。(3)地盤の逸散減衰を期待する。これについては道路橋の場合、地盤の逸散減衰により振動レベルが低下する。工場の場合でもマスコンクリートの躯体がみかけ上逸散減衰の担い手(媒体)となる。(4)振動レベルの制御。これについては部材の固有振動数を変えて、変位量を低下させる。増幅関数が1付近の値とすると、固有振動数を高めれば変位レベルが低下する。また部材系の改善として例えば梁系については、梁中央位置に柱の増設する場合、振動レベルは低下する。これは前述式で簡単にかつ量的に評価できる。

(注)ただしこれらは試算定法であるので、詳細法による検討、実測による検討が必要。