

橋梁設計の荷重

An aerial photograph of a long, curved cable-stayed bridge spanning a vast blue body of water. The bridge features two prominent white pylons with a dense network of blue cables supporting the deck. The bridge extends into the distance, curving along the coastline. In the background, a city with buildings and a port area is visible, along with distant mountains under a clear blue sky. Several ships are seen on the water, including a large white cargo ship in the foreground.

Dr. Hiroshi TANAKA
Yoshida-Gumi Co.Ltd

目次

- 死荷重
- 活荷重
- 風荷重
- 地震荷重

死荷重

- 死荷重とは橋梁構造物の自重であり、材料の単位重量を γ 、また部材断面積を A とすると、単位長さ当たりの死荷重強度 w_d は、

$$w_d = \gamma A \quad (2.1)$$

で与えられる。

- スパンが長大となると、所要断面積 A が大きくなり、したがって死荷重強度 w_d も増大する。そして、構造物の全荷重のうち死荷重の占める割合が増大し、ある限度以上の長大化が不可能になってしまう。このためには単位重量 γ が小さく、しかも高強度で部材断面積 A を小さくできるような材料を開発ことや、構造形式の合理化を行うことが重要な課題である。

- 一般に与えられた設計荷重に対して耐えうる支間長には、ある限界値 l_g が存在するといわれており、 σ_B を材料の破壊強度、また α を構造形式によって定まる係数とすれば

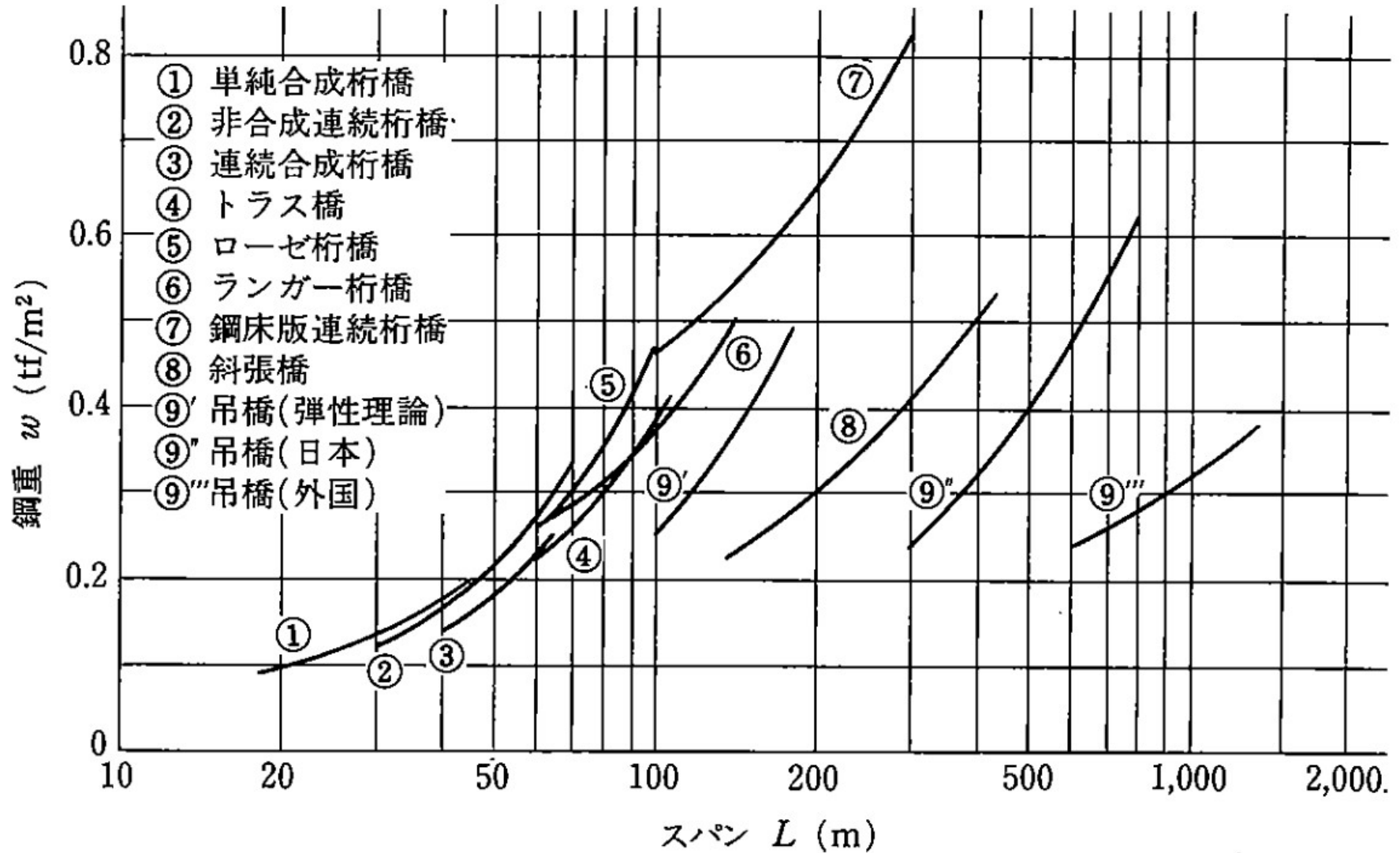
$$l_g = \alpha \frac{\sigma_B}{\gamma} \quad (2.2)$$

で与えられる^{2.1)}.

様々な材料の σ_B/γ 値

材料の種類	単位重量 $\gamma(\text{tf/m}^3)$	破壊強度 $\sigma_B(\text{kgf/cm}^2)$	σ_B/γ 値 (km)
鋼 SS 400	7.85	4,100	5.2.
鋼 SM 490	7.85	5,000	6.35
鋼 HT 80	7.85	8,000	10.0
アルミニウム合金	2.8	4,300	15.4
チタン合金	4.4	13,300	30.2
普通コンクリート	2.2	300	1.36
軽量コンクリート	1.8	300	1.67
ポリエステル	1.3	600	4.65

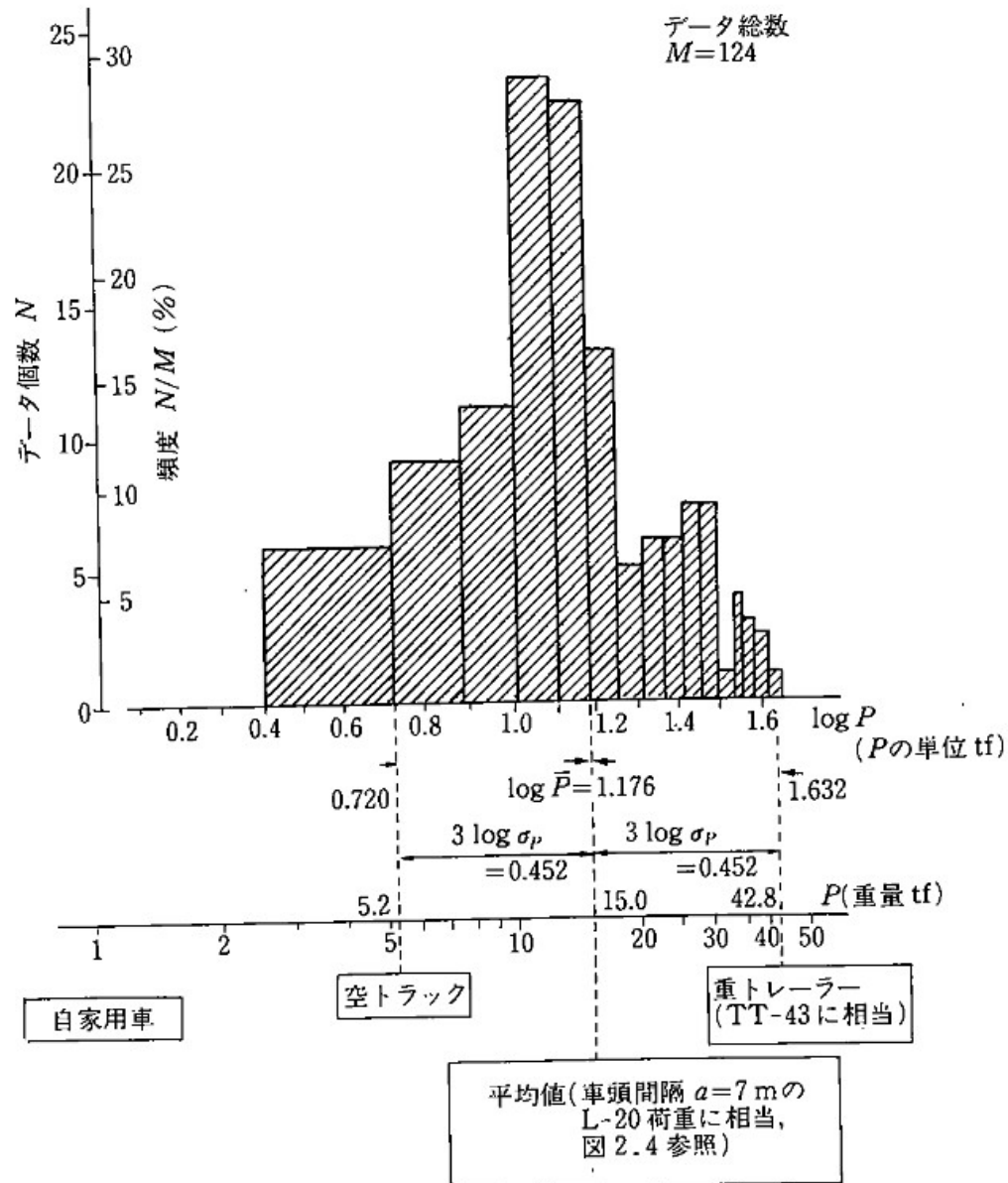
鋼重とスパンとの関係



活荷重

- T荷重・・・1台の自動車荷重を想定
床組設計の設計に使用する
- T-20・・・後輪(2x8tf)、前輪(2x2tf)
車軸間隔4m
- TT-43・・・臨海工業地帯に近い海岸道路

自動車自重と発生頻度



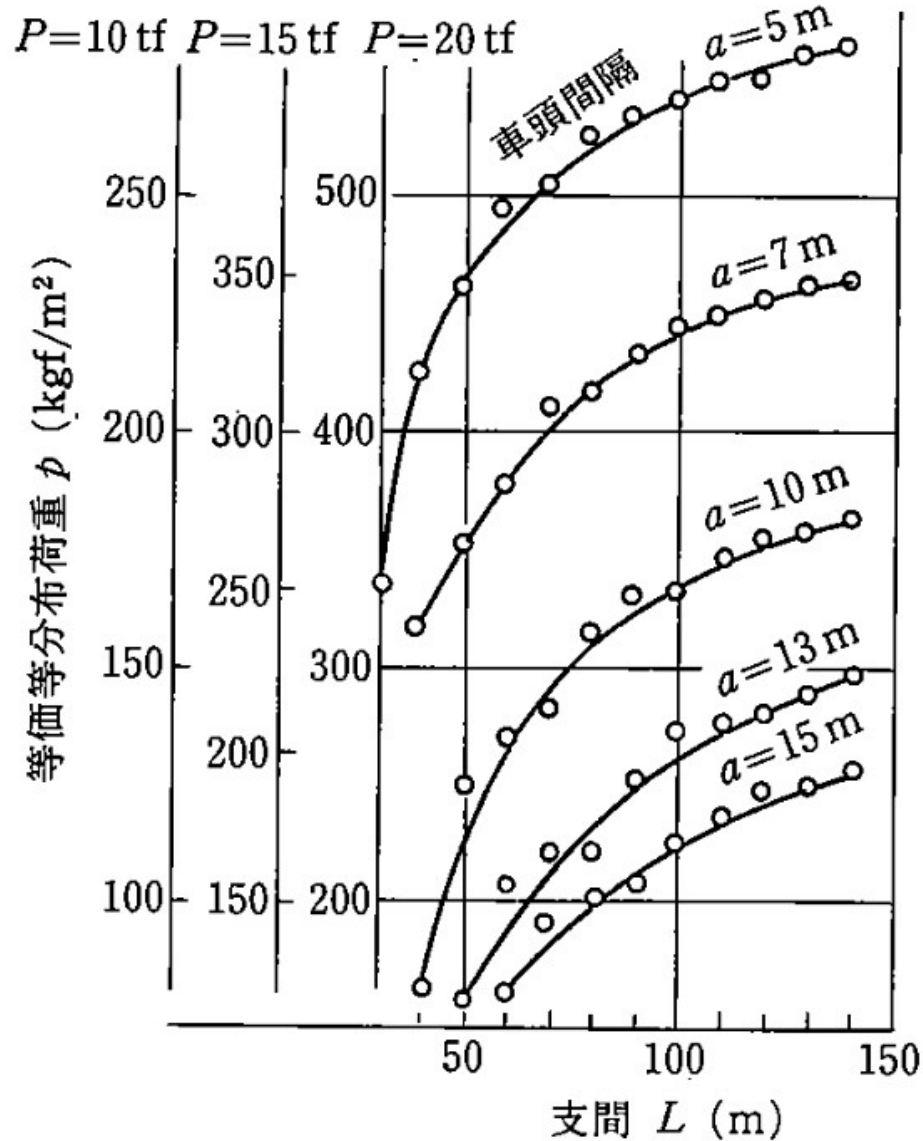
TT-43の根拠

- $\text{Log } P = 1.176$ (前図参照)
- $P = 10^{1.176} = 15.0 \text{ tf}$
- 標準偏差 $\text{Log} \sigma_p = 0.151$
- $\text{Log} P + 3 \text{ Log} \sigma_p = 1.528$
- これより、起こりうる最大荷重 $= 10^{1.528}$
 $= 42.8 = 43 \text{ tf}$ となる

L荷重

- L荷重は単純な荷重系で置き換えられる
- $P = 15\text{tf}$ $p = 350\text{kgf/m}^2$
- 車頭間隔 7mの時の上限値

等価等分布荷重



実際の交通量調査

- 1tf 以下の荷重が多いので低減できる
- 2車線(5.5m以下)には、L荷重を100%
それ以外には50%を載荷

活荷重 $L > 500\text{m}$

$$\left. \begin{aligned} P &= np \\ p &= 1,600 \left(0.32 + \frac{170}{200 + l} \right) \end{aligned} \right\} (2.3)_{1\sim 2}$$

ここに、

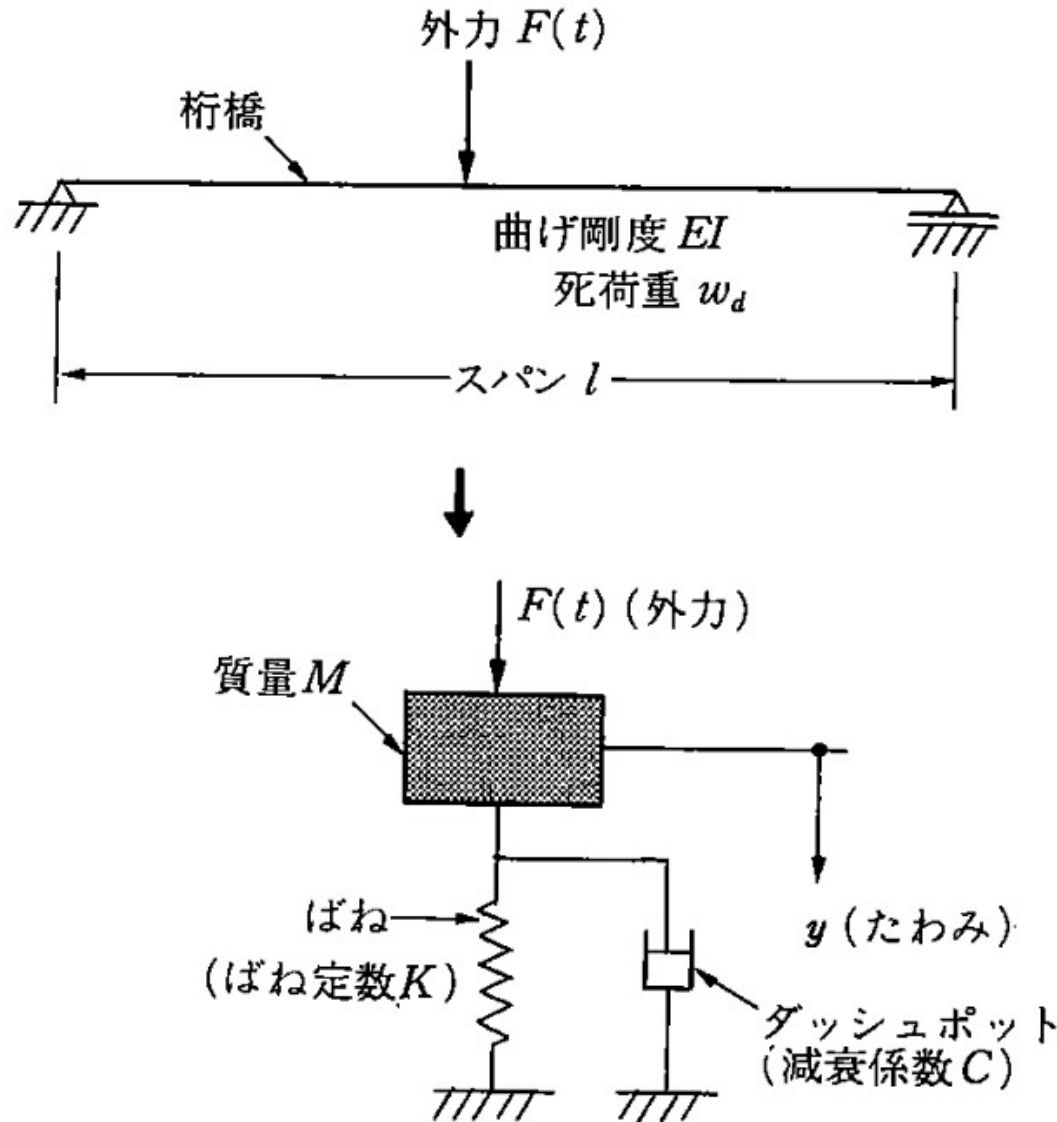
P : 単位橋長さ当たりの活荷重 (kgf/m)

n : 車線数 (ただし、 $n > 4$)

p : 1車線当たりの活荷重 (kgf/m/車線)

l : 支間長 (m)

活荷重の動的効果



$$\ddot{y} + 2ph\dot{y} + p^2y = \frac{F(t)}{M}$$

で示される($\dot{} = d/dt$ ここに、

$$p = \sqrt{\frac{K}{M}}, \quad h = \frac{C}{2Mp} \quad (2.5)_{1-2}$$

であり、 p を固有円振動数(rad/sec)、また h を減衰定数(無次元量)と呼んでいる^{2.6)~2.8)}。たとえば、単純桁の場合で、曲げ剛度を EI 、単位長さ当たりの死荷重強度を w_d 、そしてスパンを l とすれば、Rayleighの方法によると、質量 M は、

$$M = \frac{17 w_d l}{35 g} \quad (2.6)$$

である。また、ばね定数 K は

$$K = \frac{48 EI}{l^3} \quad (2.7)$$

であるので、固有円振動数 p としては、

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad 2\pi f = p = 9.941 \sqrt{\frac{EIg}{w_d l^4}} \quad (\text{rad}/S) \quad (2.8)$$

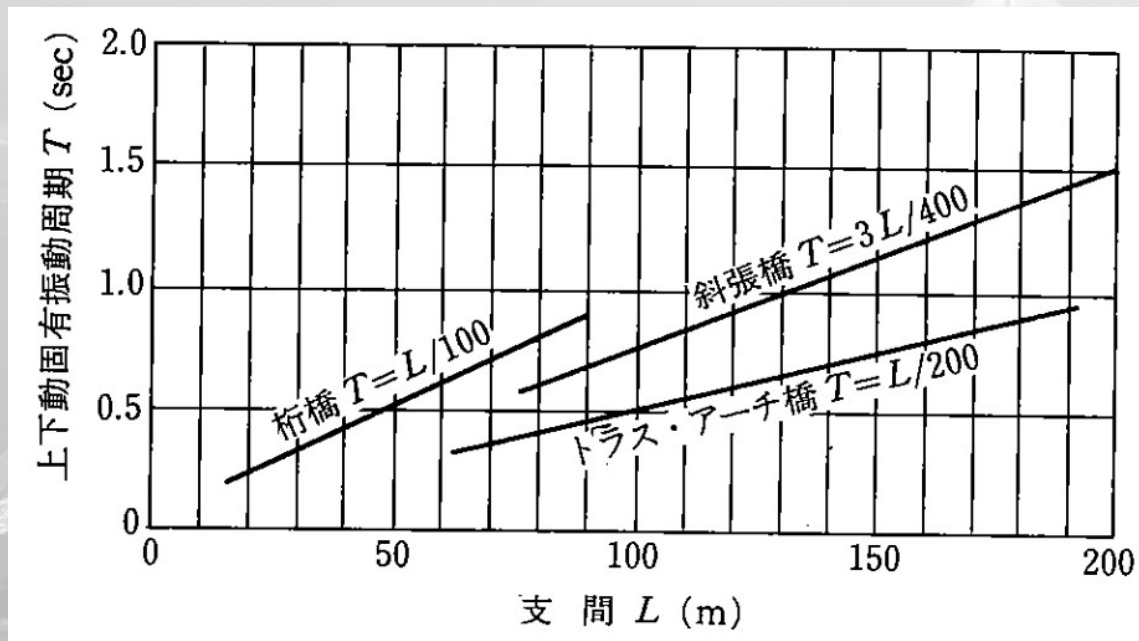
が得られる。ここに、 $g=980\text{cm}/\text{sec}^2$ (重力加速度)である。

各種橋梁の固有振動周期

- この p を用い、次式で求められるものを固有振動周期 T (sec)と呼んでおり、構造物の振動特性を知る重要な手がかりを与える。

$$T = 2\pi/p \quad (2.9)$$

- 図2.6は代表的な橋梁についての固有振動周期 T の概略値を示したものである。



- 橋梁に作用する強制力 $F(t)$ の代表的な場合として、

$$F(t) = F_0 \sin \omega t \quad (2.10)$$

なる周期力(円振動数 ω (rad/sec)で強度 F_0)が作用する場合について動的たわみ $|y| = y_d$ 求め、これと静的たわみ $y_{st} = F_0 / K$ との比を動的倍率DAF(Dynamic Amplification Factor)、すなわち静的たわみに乗すべき係数として示せば、次のように書くことが出来る。

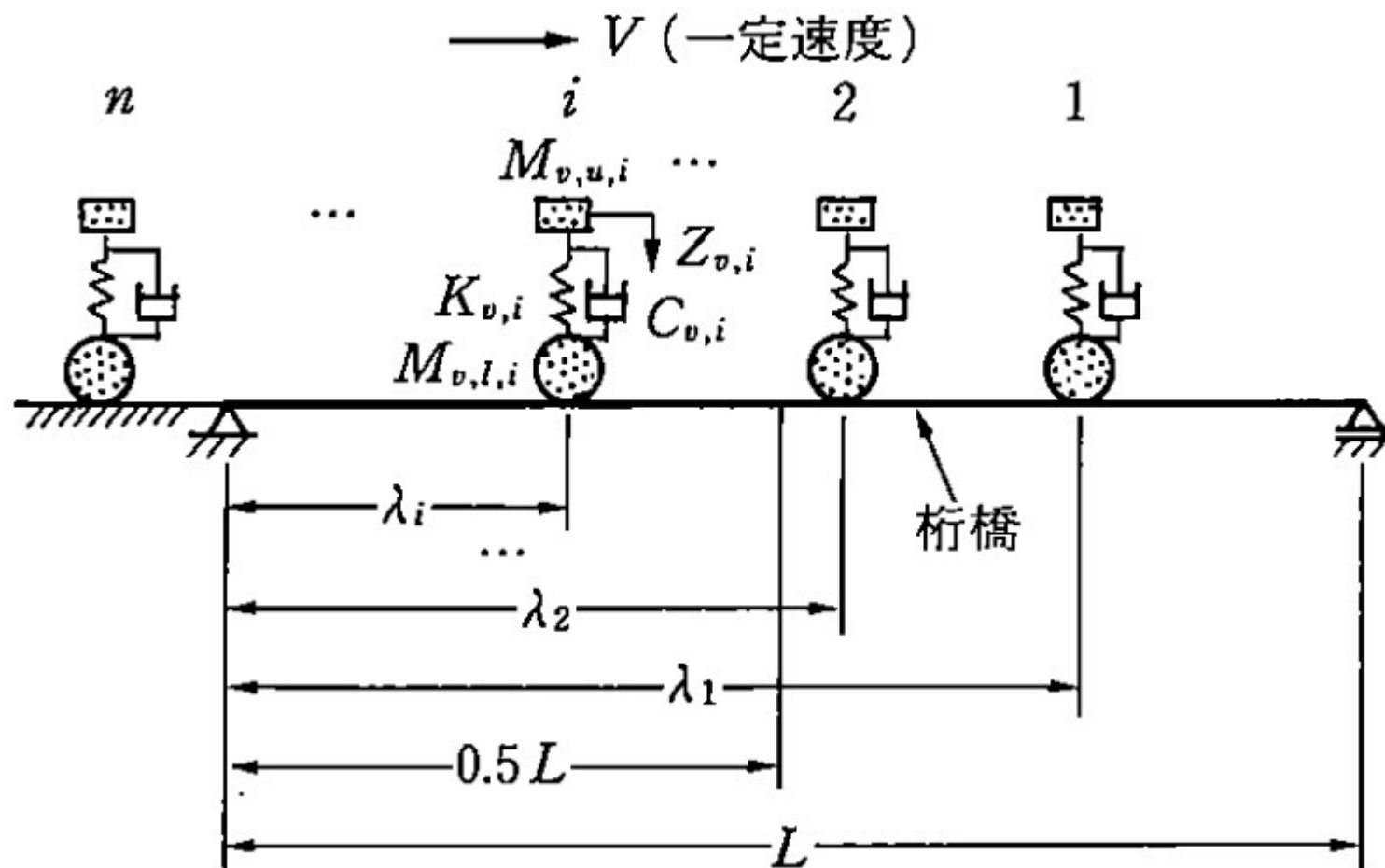
$$DAF = \frac{1}{\sqrt{(1 - \omega^2/p^2)^2 + (2h\omega/p)^2}} \quad (2.11)$$

上式より明らかなように、構造物と外力との振動数が一致する $\omega = p$ の場合、共振現象が起こり、

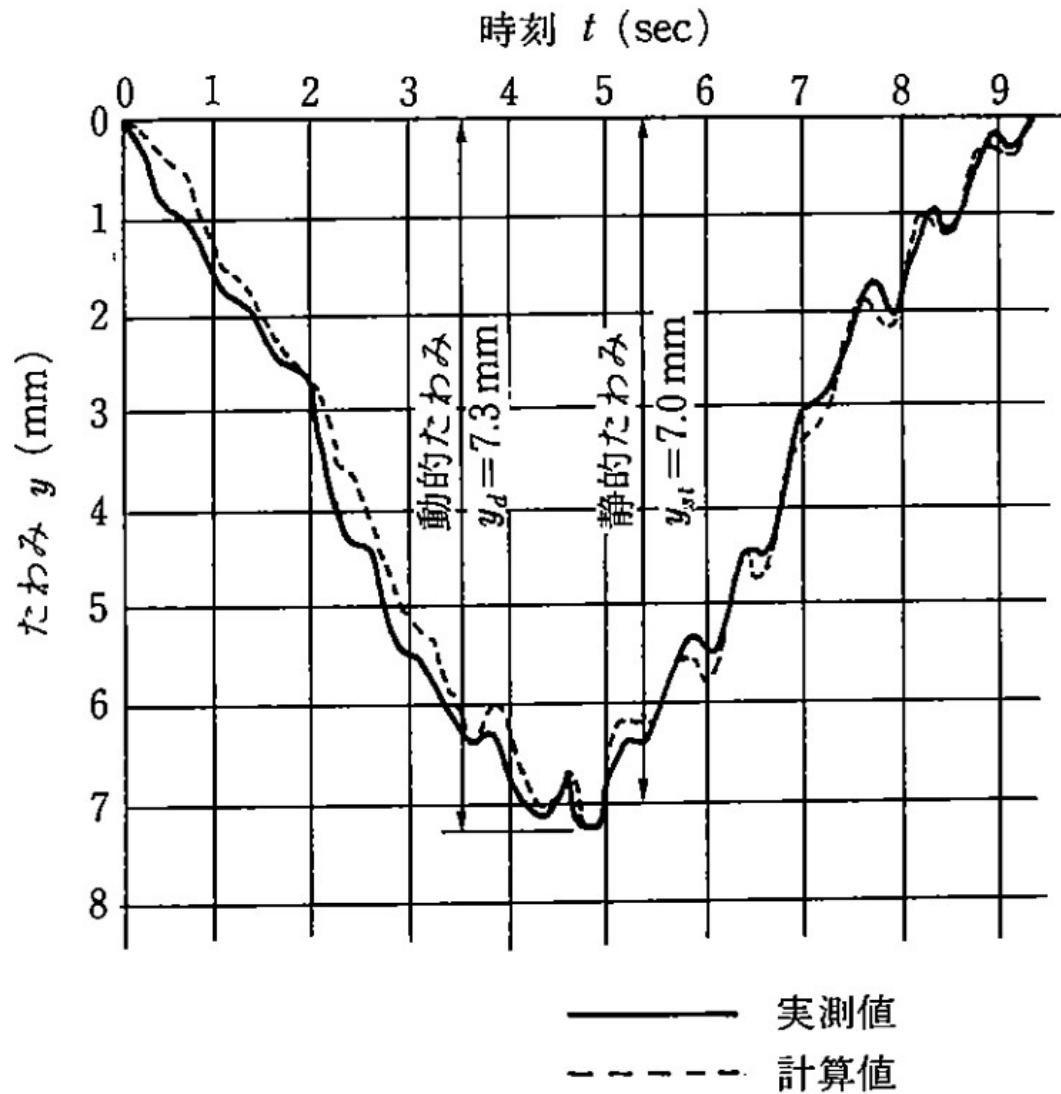
$$DAF = \frac{1}{2h} \quad (2.12)$$

となるから、減衰定数 h が小さいほどDAFが大きくなることがわかる。

振動解析のための連行荷重



桁橋の動的たわみの一例



- このような理論的解析によって、道路橋仕方書では、DAFを、

$$DAF = 1 + \frac{20}{50 + L} = 1 + i_m \quad (L: \text{スパン (m)})$$

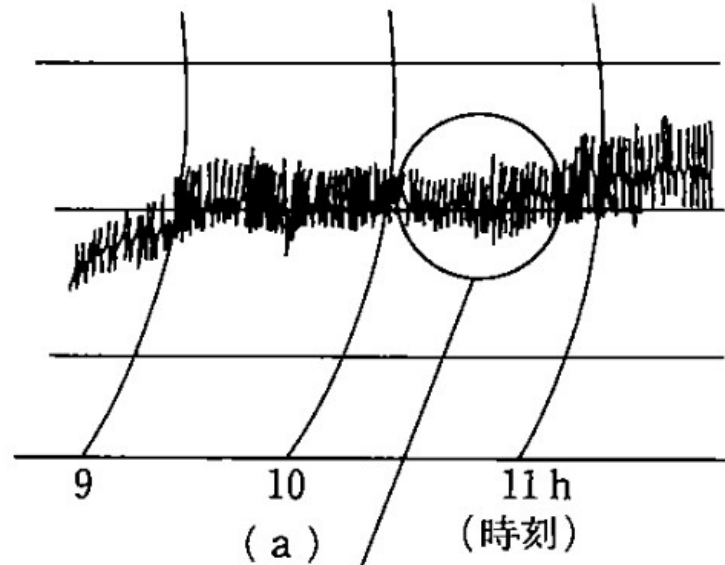
と定めている。ここに、 i_m は衝撃係数と呼ばれている。従って、動的効果を含めた応力は、活荷重を静的に載荷した場合の応力に、係数 $(1+i_m)$ を乗じて求めることになっている。ここに、スパン L は構造形式に応じてとることになっている。しかし、一般に、スパン L が大になると $(1+i_m) \cong 1$ にあるので、長大橋では、活荷重の動的効果が小さいと考えてよい。

風荷重

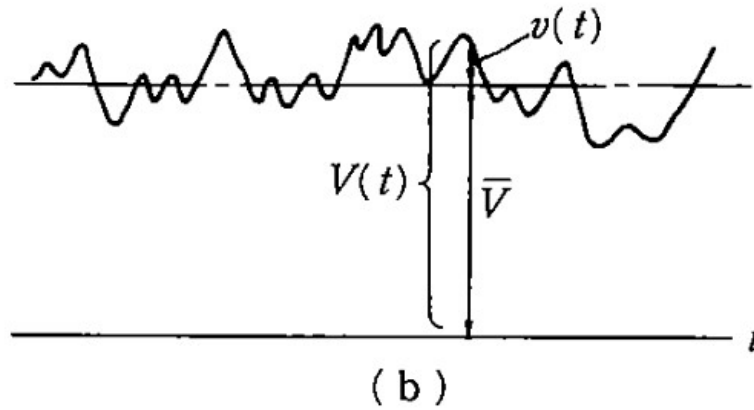
- 風は風向と風速によって決まる
- 時間的・空間的に変動する
- 風は、平均値と変動値の和として下記となる

$$V(t) = \bar{V} + v(t)$$

風速の時刻変化



拡大



風荷重の強度

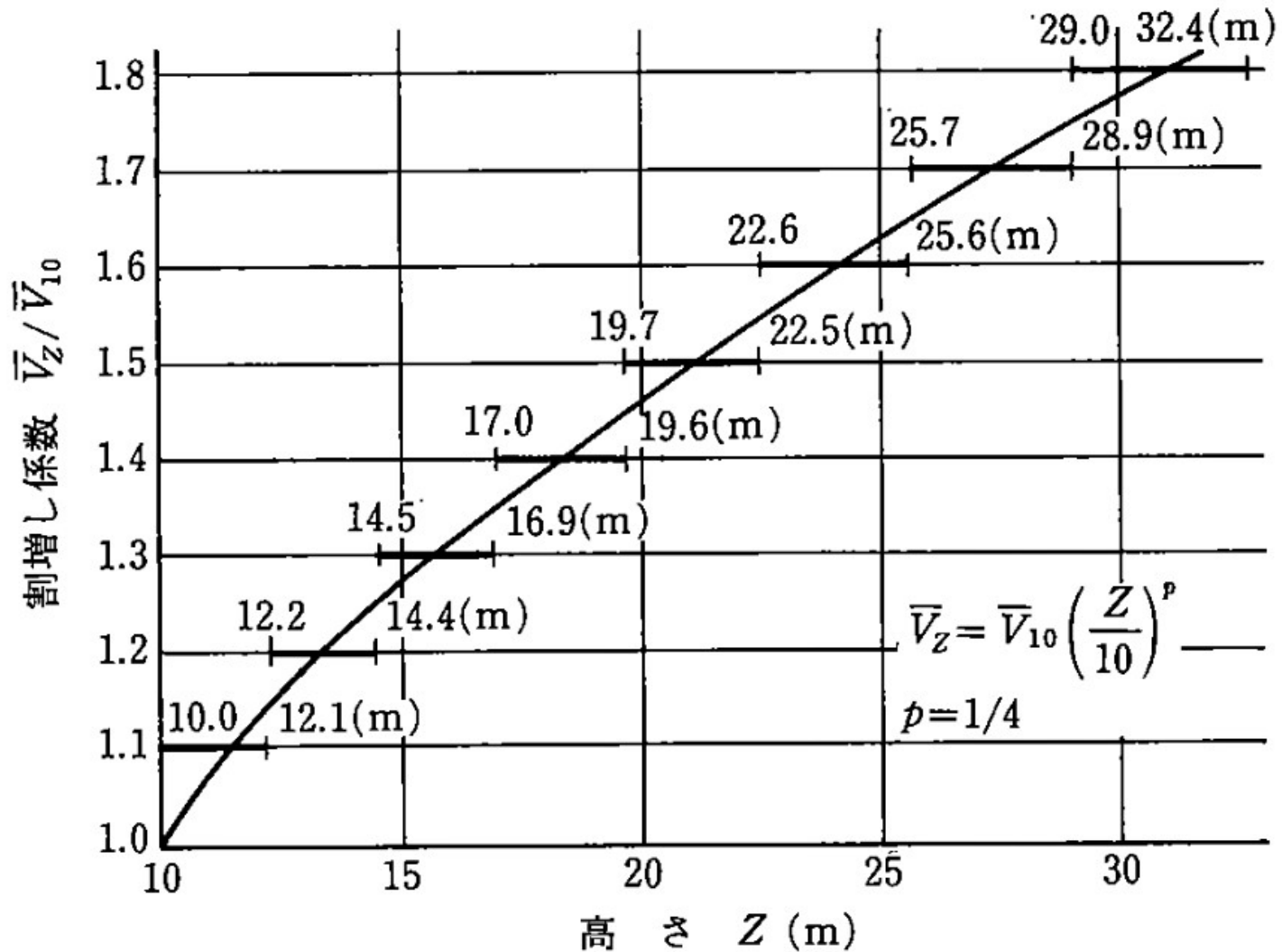
$$\left. \begin{aligned} \bar{V}_z &= \bar{V}_{10} \left(\frac{Z}{10} \right)^p & (10 \text{ m} < Z \leq 240 \text{ m}) \\ &= \bar{V}_{10} & (Z \leq 10 \text{ m}) \end{aligned} \right\} (2.15)_{1-2}$$

- \bar{V}_{10} 及び \bar{V}_z :それぞれ地上10m、及びZ(m)のところにおける平均風速である。

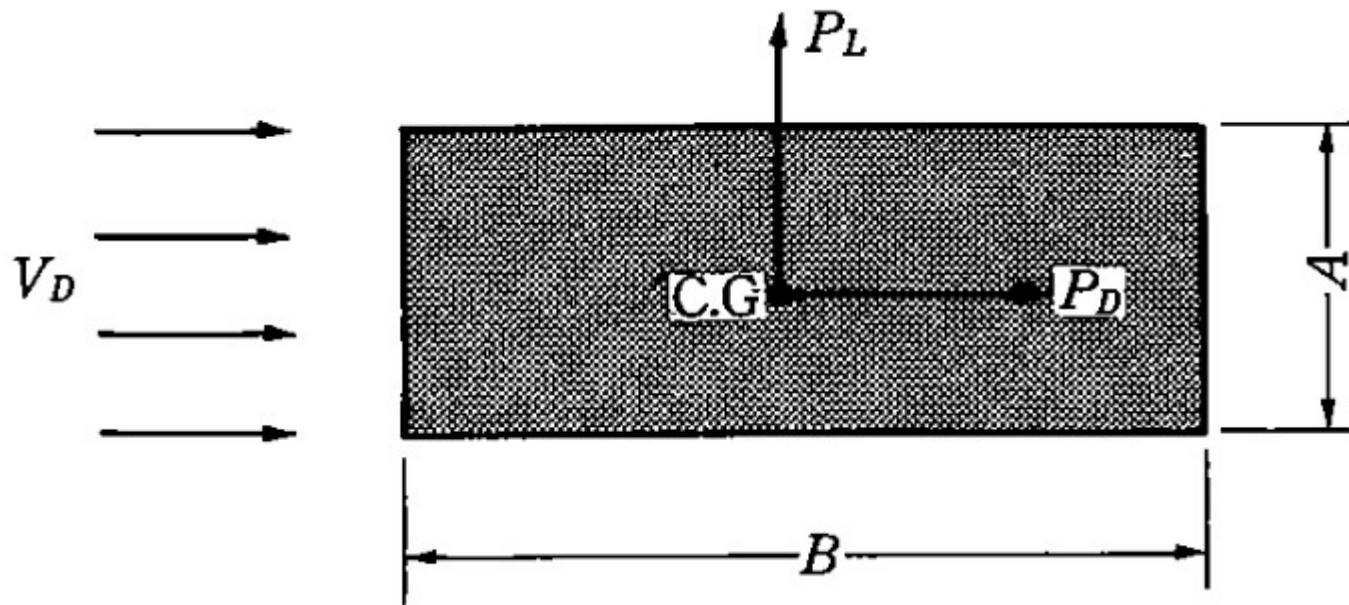
地表の凹凸による指数p値

地表の状況	p 値
開けた水平	1/7
開けた平地	1/6
森林地帯	1/35
市街地	1/25

高さによる割り増し係数



抗力係数 P_D と揚力係数 P_L



抗力係数 P_D と揚力係数 P_L

$$\left. \begin{aligned} P_D &= (1/2) \rho V_D^2 C_D A \\ P_L &= (1/2) \rho V_D^2 C_L B \end{aligned} \right\}$$

(2.16)_{1~2}

• ここに、







ρ : 空気密度(=0.125kgf · sec²/m⁴)

A : 構造物単位長さ当たりの鉛直投影面積(m²/m)

B : 構造物の幅(m)

C_D, C_L : それぞれ抗力、及び揚力係数

単一部材の C_D と C_L の値(ASCEによる)

断面形状	C_D	C_L
→ 	2.03	0
→	1.96 2.01	0
→ I	2.04	0
→ T	1.81	0
→ L	2.0	0.3
→ 	1.83	2.07
→ 	1.99	-0.09
→ 	1.62	-0.48
→ T	2.01	0
→ 	1.99	-1.19
→ 	2.19	0

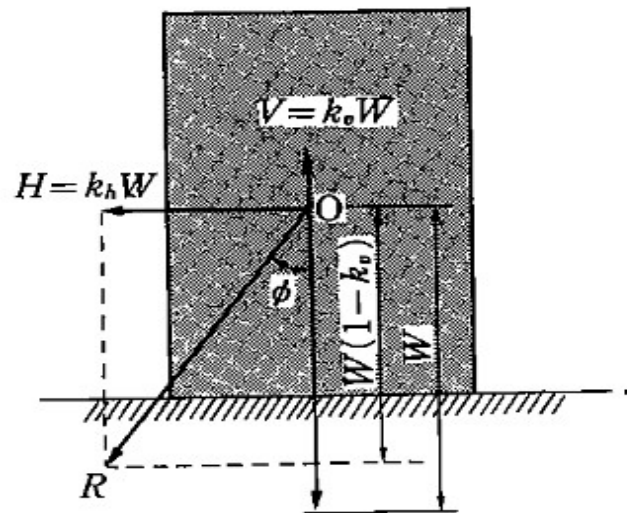
地震荷重

- 地震による振動は工学的に水平加速度 \ddot{z}_v 、鉛直加速度 \ddot{z}_h によって評価できる。いま、これを重力加速度 $g(980\text{cm}/\text{sec}^2)$ で無次元化し、

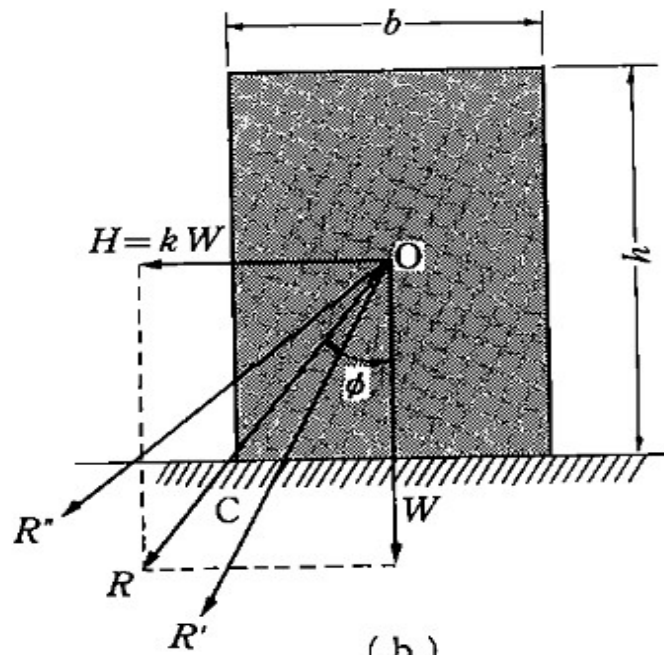
$$\left. \begin{aligned} k_h &= \ddot{z}_h / g \\ k_v &= \ddot{z}_v / g \end{aligned} \right\}$$

(2.19)_{1~2}

とする。



(a)

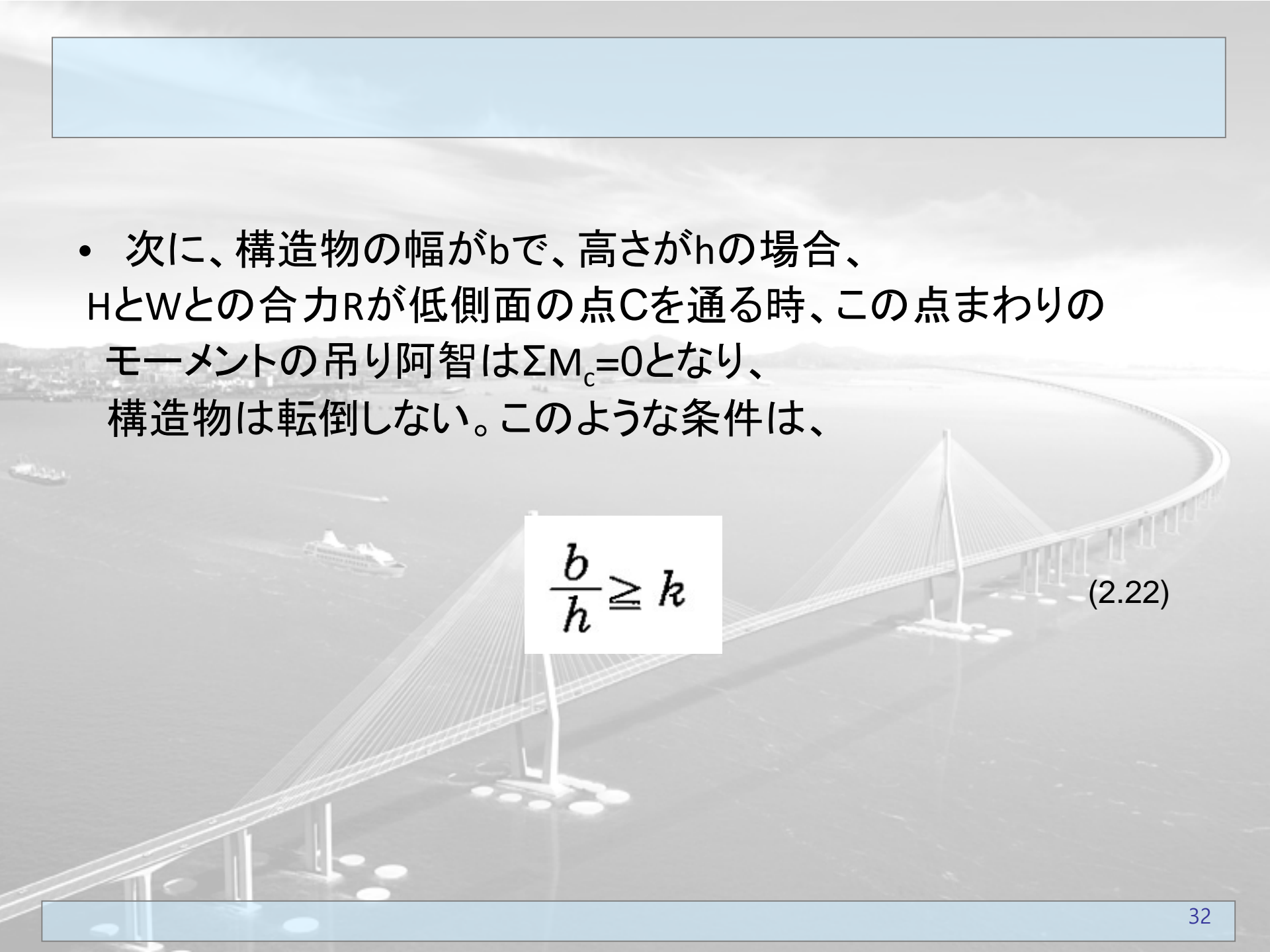


(b)

- 合力Rと鉛直軸とのなす角 ϕ を求めると、

$$\tan \phi = \frac{k_h W}{(1 - k_v) W} = \frac{k_h}{1 - k_v} = k \quad (2.20)$$

となる。ここで、上式のkを合震度という。

- 
- 次に、構造物の幅が b で、高さが h の場合、 H と W との合力 R が低側面の点 C を通る時、この点まわりのモーメントの釣り合いは $\sum M_c = 0$ となり、構造物は転倒しない。このような条件は、

$$\frac{b}{h} \geq k$$

(2.22)

震度法（日本道路橋示方書・耐震設計編）

- 基本水平振度 k_h を次式によって求めることになっている。

$$k_h = c_L c_G c_I k_0 \quad (2.23)$$

ここに、

$k_0 = 0.2$: 標準設計震度

c_L ; 地域別補正係数

c_G ; 地盤別補正係数

c_I ; 重要度別補正係数

地域補正係数 C_L

- 地域別補正係数 C_L は過去の地震記録を分類して全国をA、B及びCの3個のブロックに分け、それぞれに対し1.00、0.85及び0.70の係数を考えている。また、重要度別補正係数 C_I は国土と主要地方道のようなものに対して1.0、他は0.8をとっている。

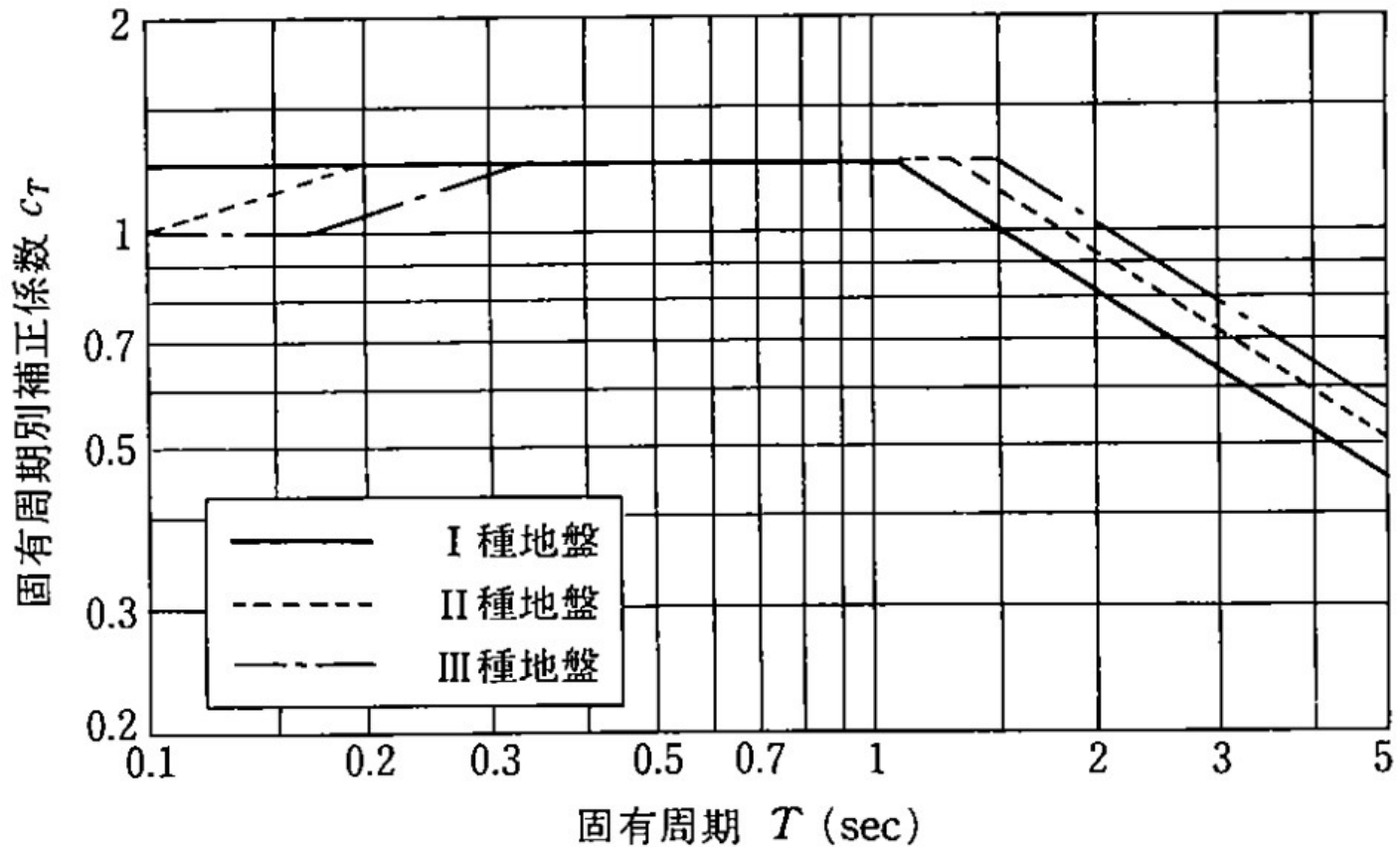
地盤補正係数 C_G

地盤種別	岩盤	地盤の特性値 T_G (sec)	係数 C_G
I 種	岩盤	$T_G < 0.2$	0.8
II 種	I 種及びIII種地盤に属さない洪積、及び沖積地盤	$0.2 \leq T_G < 0.6$	1.0
III 種	沖積地盤のうち軟弱地盤	$0.6 \leq T_G$	1.2

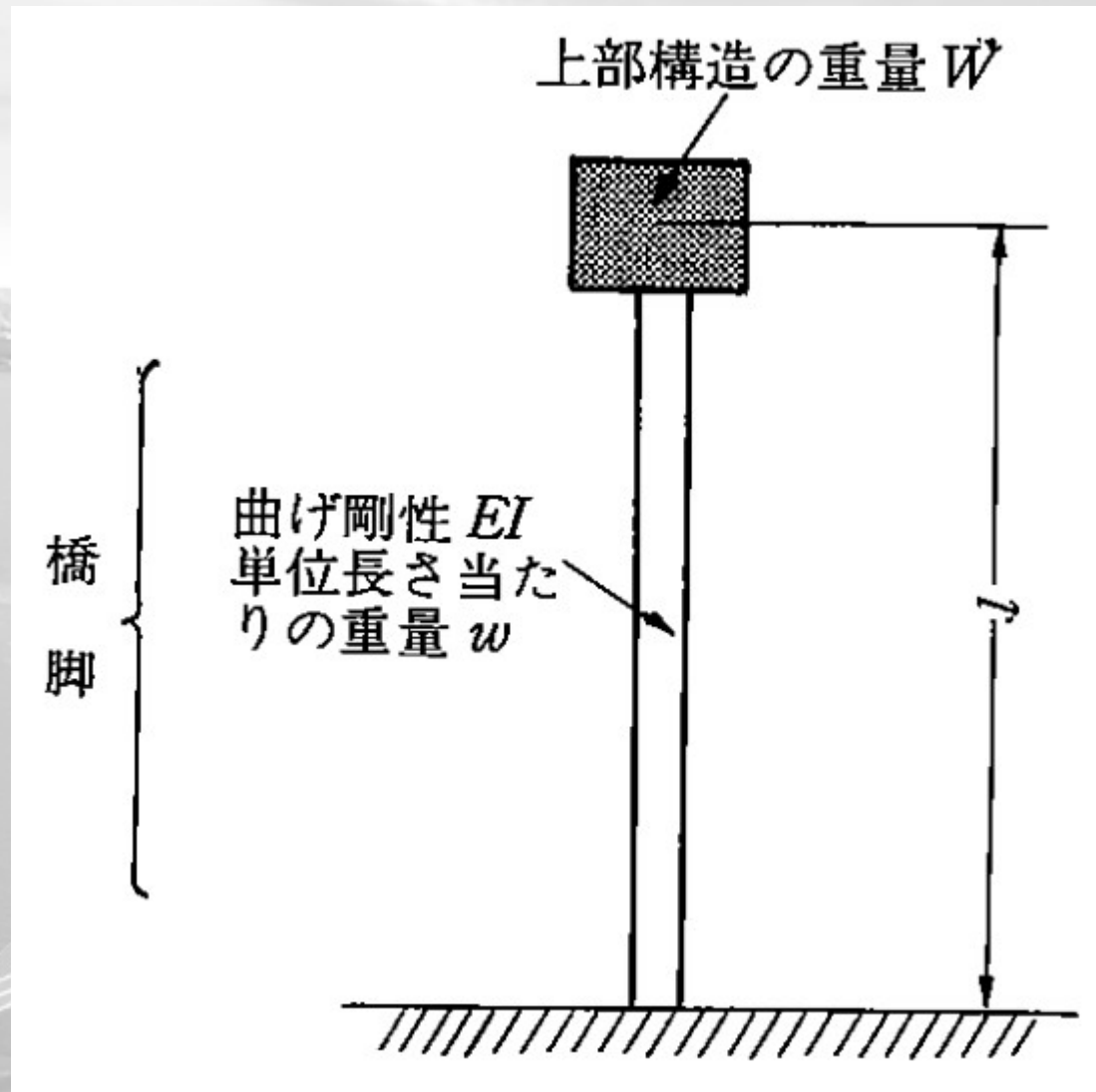
地盤補正係数 C_G

- 設計震度 k はきほん水平振動 k_h に構造物の動的特性を考慮して、次の式によって算定することになっている。

$$k = c_T k_h \quad (2.24)$$



橋脚の振動モデル



- Rayleightの方法によって固有振動周期T(sec)を求める次のようになる。

$$T = 2 \pi \sqrt{\frac{W + (33/140)wl}{3EIg}} l^3 \quad (2.25)$$

可動橋台 (A_L) :

$$H_{AL} = R_{AL} f_{AL}, \text{ ただし } H_{AL} \leq \frac{1}{2} k_A W_A$$

橋脚 (P_L) :

$$H_{AR} = k_A W_A, \text{ または } \frac{1}{2} k_A W_A - R_{AL} f_{AL} + R_{BL} f_{BL}$$

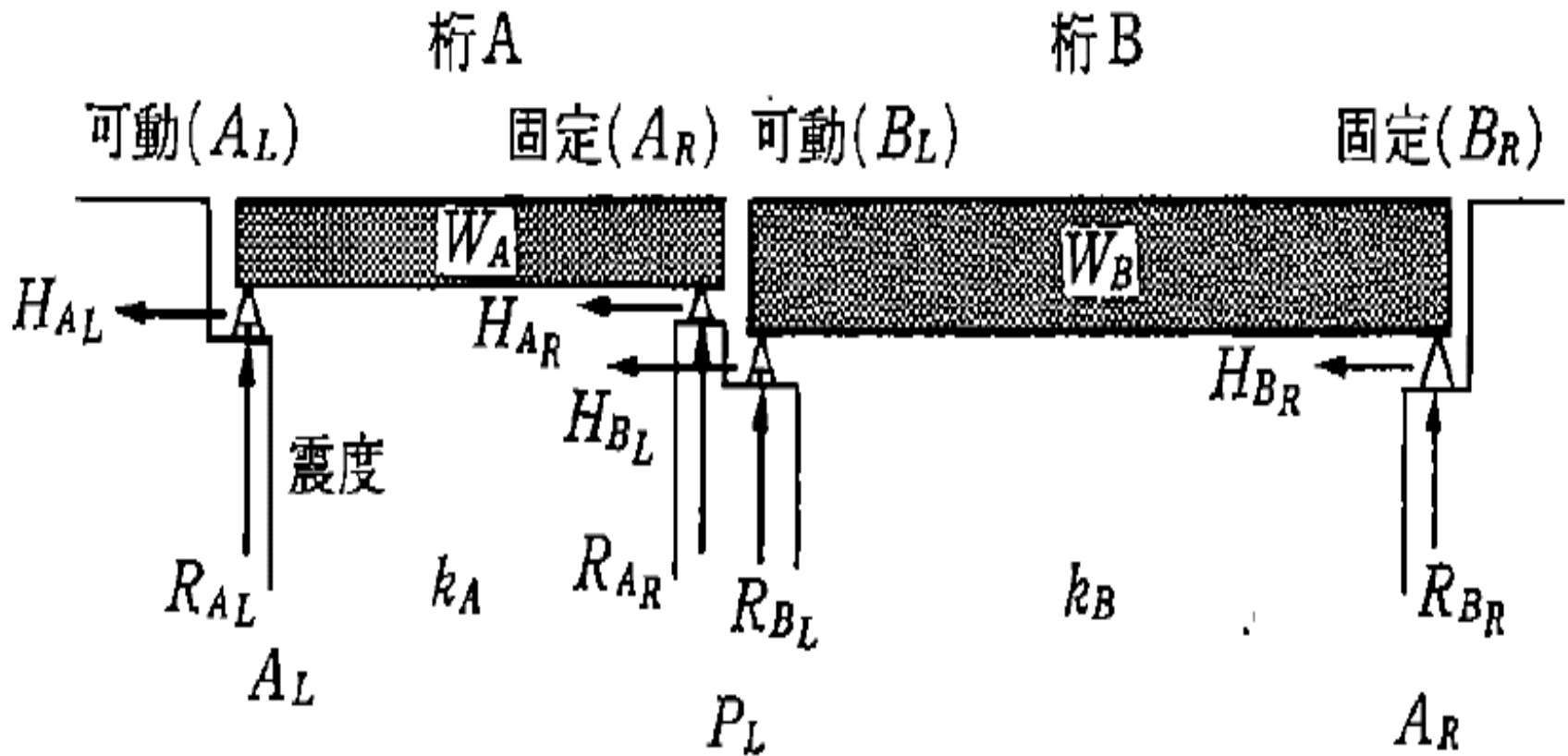
$$\text{ただし } R_{BL} f_{BL} \leq \frac{1}{2} k_B W_B$$

固定橋台 (A_R) :

$$H_{BR} = k_B W_B$$

(2.26)_{1~3}

地震力の載荷方法

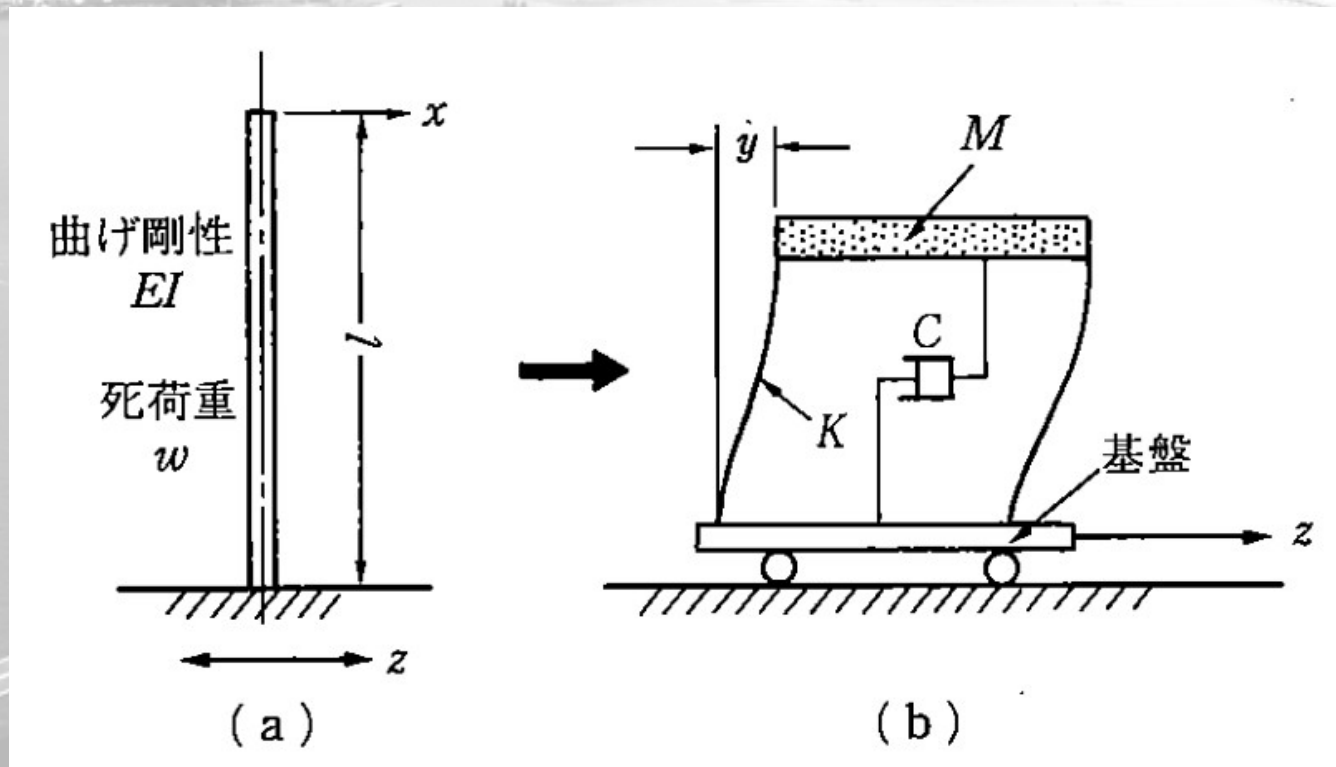


可動支沓の摩擦係数

摩擦機構	支承の種類	摩擦係数
ころがり摩擦	ローラー及びロッカー支承	0.05
すべり摩擦	ブッ素樹脂支承板支承	0.10
	高力黄銅鑄物支承板支承	0.15
	鑄鉄の線支承	0.20
	鋼の線支承	0.25

動的耐震設計法

- 図2.17(a)に示す構造物の固定端が、水平方向の振動 z を受けた場合を考えた。この構造物は近似的に図2.17(b)に示すように、質量 $M(=33wl/140g)$ 、ばね定数 $K(=3EI/l^3)$ 、及び減衰係数 C をもつ振動体に置換できる。

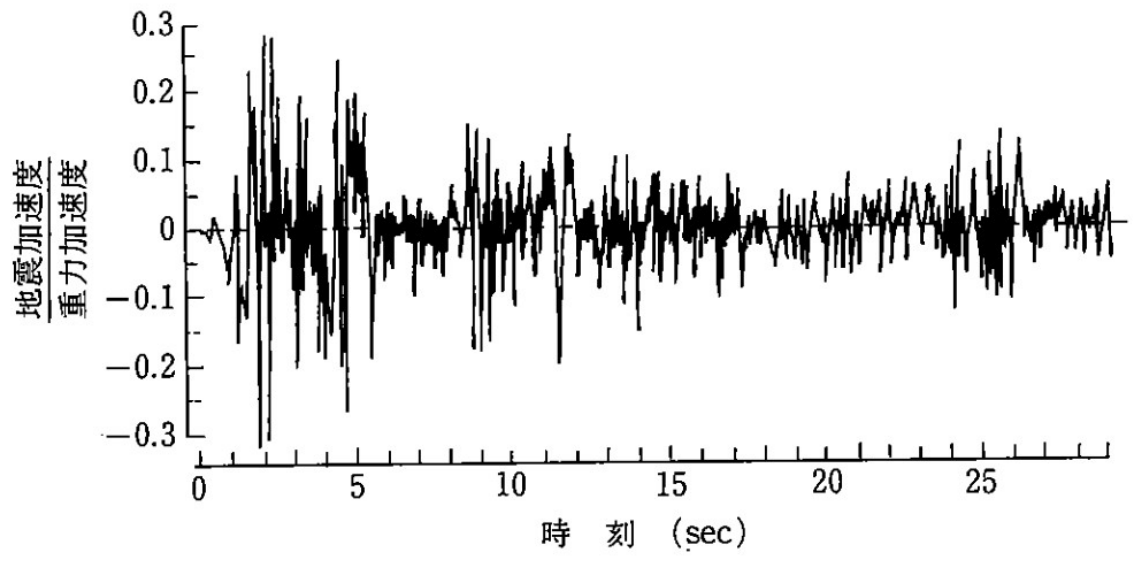


- 上端における変位 x に関する運動方程式をd'Alembertの原理より導くと、 $M\ddot{x} + C(\dot{x} - \dot{z}) + K(x - z) = 0$ となる。

ここで、変位 x と振動 z との差、すなわち $y = x - z$ なる相対変位で示し、式(2.5)の記号を用いて整理すれば、

$$\ddot{y} + 2ph\dot{y} + p^2y = -\ddot{z} \quad (2.27)$$

と示すことができる。



$$y = -\frac{T}{2\pi} \int_0^t \ddot{z}(\tau) e^{-\frac{2\pi}{T}h(t-\tau)} \sin\left\{\frac{2\pi}{T}(t-\tau)\right\} d\tau \quad (2.28)_1$$

- 上記式の積分の最大値、すなわち

$$S_v = \left[\int_0^t \ddot{z}(\tau) e^{-\frac{2\pi}{T}h(t-\tau)} \sin\left\{\frac{2\pi}{T}(t-\tau)\right\} d\tau \right]_{\max} \quad (2.28)_2$$

を求めると、 S_v は速度の次元をもち、地震の最大加速度 \ddot{z}_{\max} 、
構造物の固有振動周期 T 、及び減衰定数 h の関数として与えられる。
そのため、その S_v を地震の応答速度スペクトルと呼んでいる。

- すると、相対変位 y の最大値と絶対加速度 $\ddot{x} = \ddot{z} + \ddot{y}$
最大値は応答速度スペクトル s_v を用いて、次のように示される。

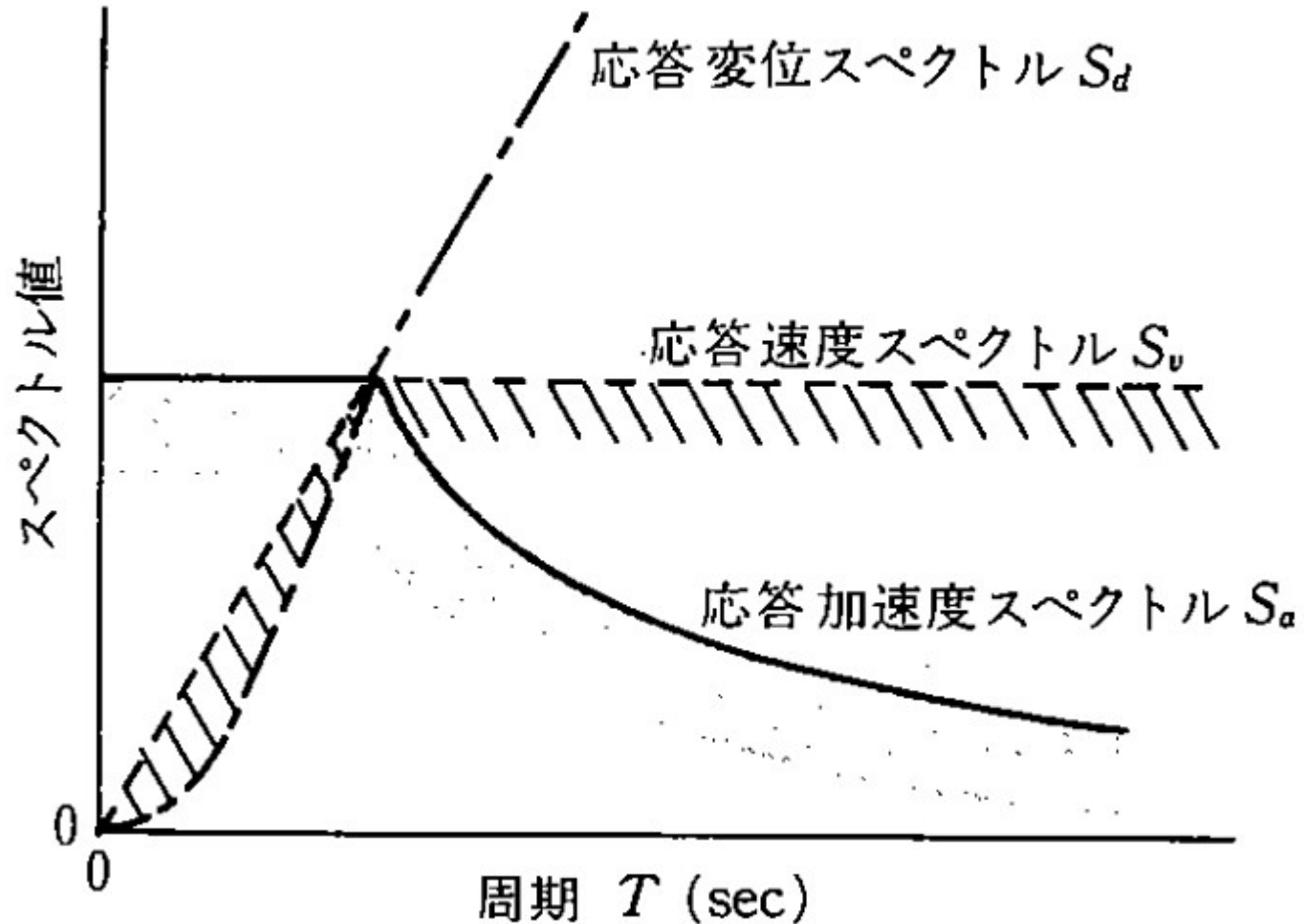
$$\left. \begin{array}{l} \text{応答変位スペクトル} \quad : S_d = \frac{T}{2\pi} S_v \\ \text{応答加速度スペクトル} : S_a = \frac{2\pi}{T} S_v \end{array} \right\} \quad (2.29)_{1-2}$$

したがって、構造物に作用する地震力は、

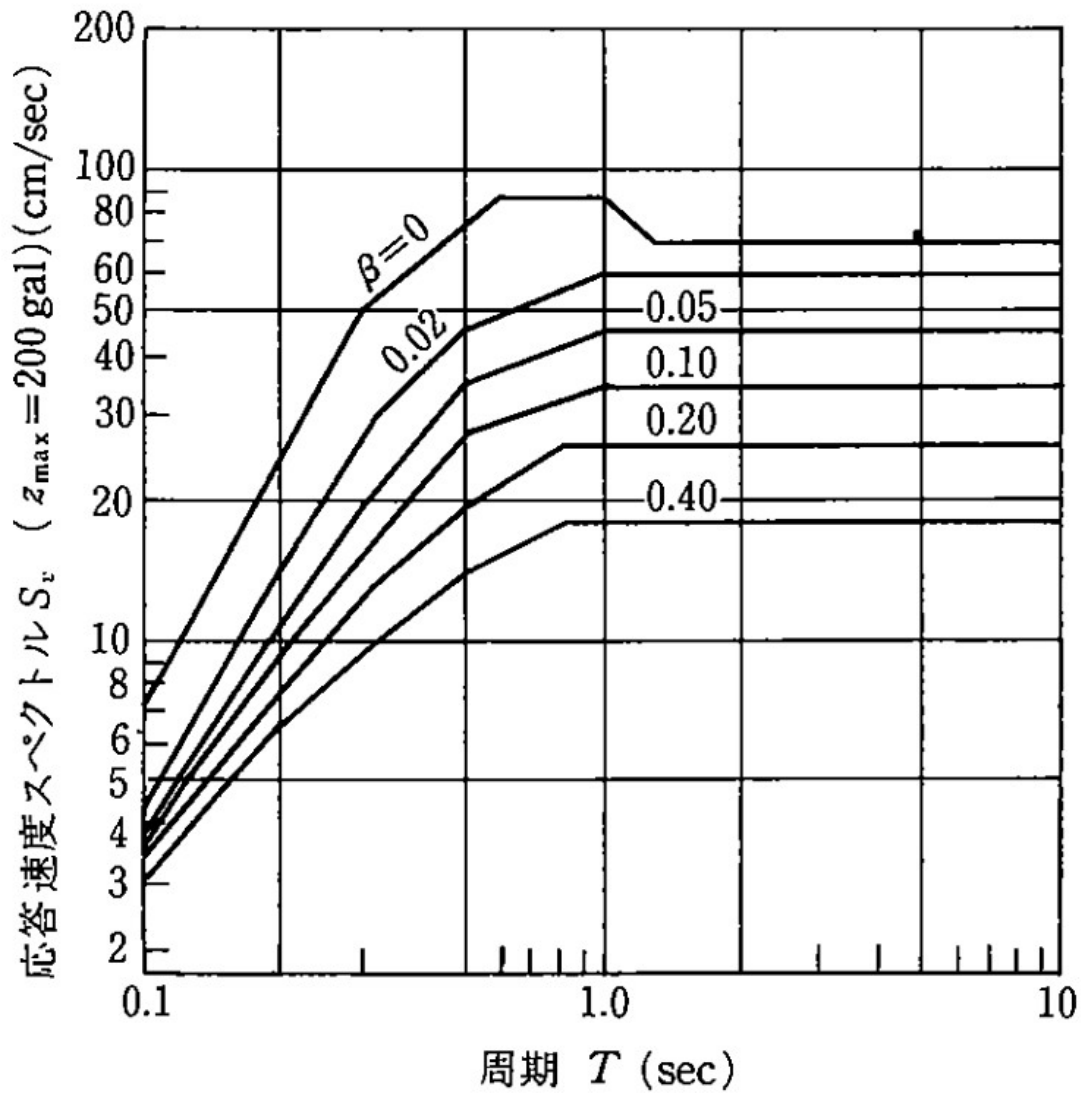
$$F_{\max} = MS_a \quad (2.30)$$

より算出できる。次の図には s_v 、 s_d 、および s_a と周期 T との模式的な関係を示す。

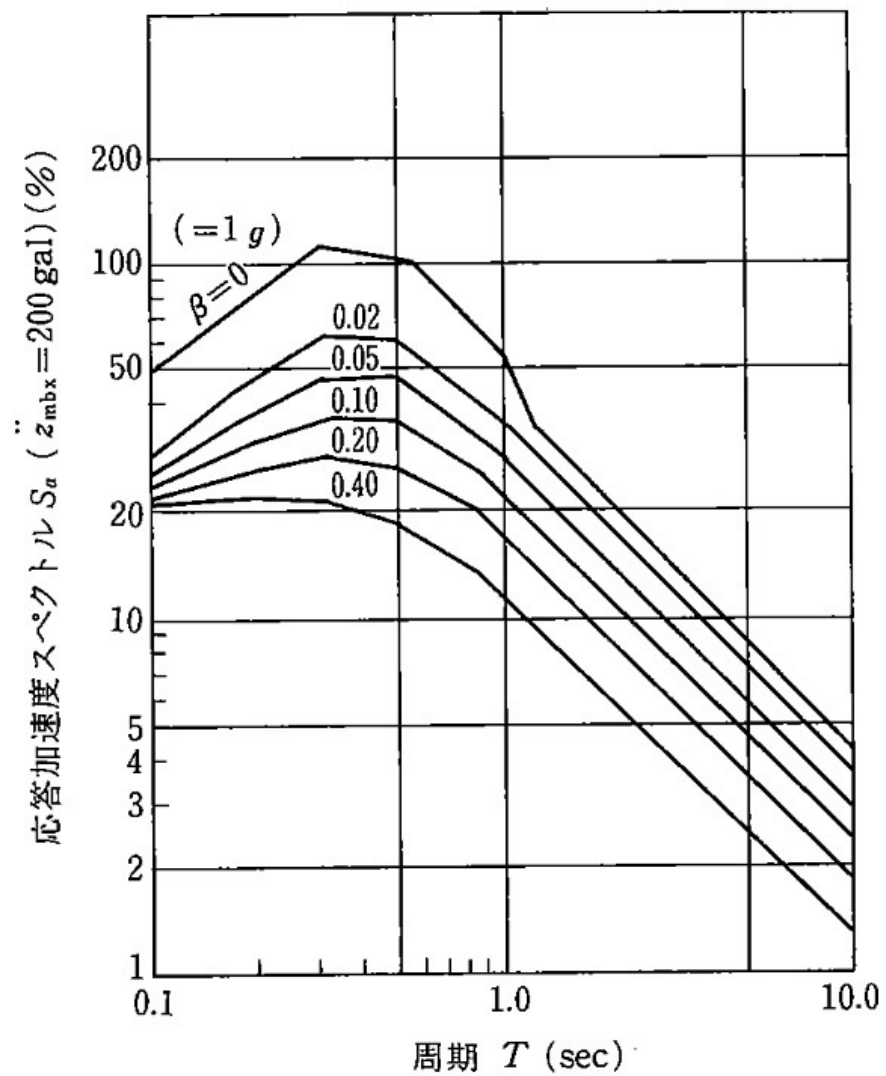
各スペクトルの特性



応答速度スペクトル



応答加速度スペクトル



結 論

- 設計に使用する荷重がどのように定められたか知ること
- 時代と共に活荷重は、交通手段と共に変化する
- 風荷重も、非常に大きな台風が来ると変更することがある
- 地震荷重も、同様に、前代見聞の地震が来て被害を受ければ改定される
- (例: 阪神大震災 中国: 四川大地震)

An aerial photograph of a large cable-stayed bridge spanning a wide body of water. The bridge features two prominent white pylon towers with numerous stay cables. In the background, a city skyline is visible under a cloudy sky. Several ships are seen on the water. The text 'Thank You Very Much !!' is overlaid in the center in a colorful, stylized font.

Thank You Very Much !!