

鉄筋コンクリート造超高層住宅の 強風時の居住性に関する設計法

北 堀 隆 司*

概 要 近年、高さ 60 m を超える鉄筋コンクリート造の超高層住宅が多く建設されるようになってきた。我が国において、鉄筋コンクリート造建築物における主要構造部材の構造設計は主に耐震設計により決定される。しかし、超高層住宅は強風時の風揺れに対する居住性の問題が重要となっている。特に、高さ 150 m 程度を超える建物に対しては、強風時の居住性が、構造設計上大きな影響を持つてくる。

ここでは、強風時の居住性に関する限界状態設計法の内容を紹介し、その計算方法を詳細に解説することによって、鉄筋コンクリート造超高層住宅の設計者に役立ててもらうことを目的とする。

キーワード：居住性、鉄筋コンクリート造超高層住宅、風応答、限界状態設計法

1. はじめに

高層建築物が強風に遭遇すると風による揺れが生じる。鉄骨造の建築物などは、特に臨海部など、強風が発生する可能性の高い地域に 100 m を超えるような超高層建築物を計画した場合、風荷重が構造安全性に関して重要な要因となる場合がある。まれに、風荷重が地震荷重を上回る可能性も考えられる。また建築物の構造種別にかかわらず、この風揺れ現象は、構造安全性上問題がないとしても、居住者が揺れを感じ、不快、不安感を引き起こすことがある。この揺れを防止することを主な目的として近年、制振装置を導入して風揺れを軽減する試みが増えてきている。

集合住宅としての一形態として超高層住宅が多く建設されている。超高層住宅は数々の要因から鉄筋コンクリート構造や鉄骨鉄筋コンクリート構造で計画される場合が多い。超高層住宅において建物高さが 90 m 程度であれば強風時の風揺れに対して居住性が特に問題になることはなかった。しかし、建物高さが更に増し 150 m を超えるようになると強風時の風揺れに対する居住性の問題に対して設計上慎重に取り組む必要があることが考えられる。これに関して日本建築学会の「建築物の振動に関する居住性能評価指針・同解説」¹⁾（以下、「居住性指針」という）では風揺れに対する居住性の評価方法が示されている。居住性指針では、建物の水平振動において使用用途における居住性能のランクを規定しているが、いかなるランクにするのかは設計者の判断に委ねられている。現在では、居住性評価においてこの手法が一般に認知され評価法として用いられている。

一方、信頼性理論による限界状態設計法の中で風揺れ

による居住性能を使用限界状態に位置づけることによって居住性を評価するという試みも見られる^{2),3)}。限界状態設計法は、理論的背景に確率的な概念を多用しているため、今まで確定的な手法によって行われてきた感のある構造設計において少なからず抵抗感を感じる設計者も多い。しかしながらこの手法を用いて居住性を評価することにより、年間に揺れを知覚する確率はどれくらいなのか、また、建築物を品質の観点から見た場合、グレードの設定を明確にできる。最近では、鉄筋コンクリート造の超高層住宅の設計において限界状態設計法を用いて風揺れによる居住性に関してクライテリアを設けている場合もある（都市基盤整備公団等）。本報告では主に限界状態設計法に基づいた風揺れによる居住性の評価方法について解説するものである。

2. 風揺れによる居住性に関する限界状態設計法概説

風揺れによる居住性の評価に限界状態設計法を適用するに当たって、明確にすべきパラメータは、揺れに対する居住者の振動知覚と強風によって生じる建物の振動である。今、両者の検討量を加速度とし、風揺れによる居住性に関して信頼性理論を適用すると（1）式のように表せる。

$$R = P - A \quad (1)$$

つまり、振動を知覚する加速度（知覚閾） P が建物の応答加速度 A よりも小さければ、居住者が揺れを感じることになる。すなわち $R < 0$ となる確率を計算することによって振動知覚確率を求めることができる。 P 、 A 共に数々の不確定要素をもつ確率量であり、これらの特性を明確にする必要がある。

2.1 知 覚 閾

居住性を考える場合、まず居住者はどの程度の揺れで

* きたほり・たかし／（）都市整備プランニング構造・技術部 技術開発課（正会員）

揺れを感じるか、すなわち知覚閾の情報が必要となる。超高層住宅の風揺れを対象とする場合には1 Hz以下の振動における知覚閾が主になる。風揺れに対する知覚閾に関しては国内において1970年頃から積極的に研究され、主に振動台等の実験装置を用いて人工的に揺れを発生させて検討を行ってきた^{2)~7)}。ほとんどの実験は正弦波を用いたものである。これらの研究成果によれば、知覚閾には次のような傾向があるようである。①振動数が高くなるほど振動を知覚する加速度振幅は低くなり、その傾向は概ね両対数上で線形傾向にある。②知覚閾は概ね1~10 galの範囲にある。③男性よりも女性の方が敏感である。④壮年より青年が、青年より少年が敏感である。⑤座位より腰掛位が、腰掛位よりも立位の方が敏感である。⑥前後向きの方振動の方が左右方向より敏感である。以上のほか、視覚、聴覚、振動の継続時間等、知覚

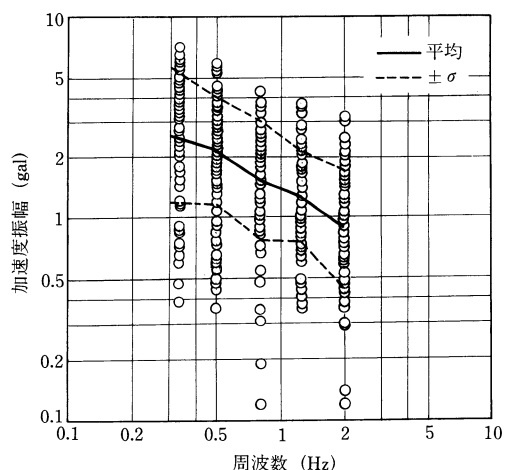


図-1 座位の順方向知覚閾³⁾

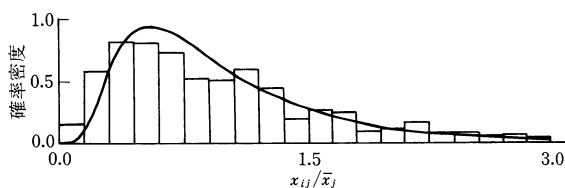


図-2 座位知覚閾の確率密度分布³⁾

閾に影響する要因は多い。試験結果の一例として座位の場合の知覚閾試験結果を図-1示す³⁾。図が示すとおり、知覚閾の平均値、標準偏差は両対数上で概ね線形関係が見られるが、各周波数とも被試験者の知覚閾は大きくばらついている。知覚閾の分布を頻度分布で示すと図-2のようになり、知覚閾のばらつきは概ね対数正規分布に従うことが分かる。ここでは振動知覚の平均値の算定式として(2)式を用いる³⁾。なお、居住性の検討では揺れの振動数 f は後述するように建物の1次振動数と考えてよい。

$$\bar{P} = 1.5 \cdot f^{-0.6} \quad (2)$$

ここに、 $\bar{P}$: 振動知覚の平均値 (cm/s²)、 f : 揺れの振動数 (Hz) である。また、振動知覚の変動係数 (V_p) は、0.4とする³⁾。

2.2 強風時における建築物の応答

居住性を評価する場合、強風時の建物の振動性状は、狭域帯のランダム振動であり、振幅変調を伴う1次固有振動数が卓越したものとなる。2.1項で述べた知覚閾は正弦波試験に基づく知覚閾を調査したものであるが、両者における振動知覚閾はほぼ対応していると考えられる²⁾。しかし、建物の応答加速度の最大振幅を評価の対象とすると、かなり厳しい評価になる可能性がある。したがって、正弦波振動の知覚閾と等価なランダム振動の応答加速度はその標準偏差の2倍とする³⁾。これを等価応答加速度という。次に応答加速度の予測方法について述べる。

風揺れによる居住性を対象とする場合、建築物の応答としては、①風方向振動、②風直角方向振動、③ねじれ振動が考えられる。これらの応答加速度の予測方法としては、①理論的方法、②経験式による方法、③既存建物の実測結果を参考にする方法、④風洞実験による方法がある。ただし、風直角方向振動、ねじれ振動に関しては①の理論的方法は未だ確立していない。居住性が重要な要素となる建物については、最終的には、風洞実験による方法が望ましいが、設計上の初期の段階では①または②の方法によって検討する場合が多いと思われる。応答

Design method regarding the habitability of super high-rise reinforced concrete housings in high wind

By Takashi Kitahori

Concrete Journal, Vol. 38, No. 8, pp. 3~12, Aug., 2000

Synopsis In recent years, super high-rise reinforced concrete housings of over 60 m become to be built a lot. In our country, the structural design of the main structure department material in the reinforced concrete building is decided by the earthquake resistance design mainly. However, as for super high-rise reinforced concrete housings, the habitability problem to the wind-induced vibration for high wind is importance. Especially, the habitability for high wind brings about a big influence from the structure design about over 150 m of height buildings. This report introduces the contents of the limit state design method regarding the habitability for high wind, and explaining the calculation method in detail. The purpose is good use for designer of super high-rise reinforced concrete housings.

Keywords : the habitability, super high-rise reinforced concrete housings, wind response, limit state design method

の理論的、経験に基づく予測法としては、日本建築学会の居住性指針と「建築物荷重指針・同解説」⁹⁾（以降、「荷重指針」という）において示されている。風方向振動は、両者とも理論的方法によっている。風直角方向振動については、居住性指針では経験式に基づくカナダ指針を参考にし、荷重指針では、風洞実験結果をもとに提案された算定式が示されている。ねじれ振動に関しては、居住性指針には提案式はないが、荷重指針では、風直角方向と同様風洞実験結果をもとに提案された算定式が示されている。ここでは、強風時における建築物の応答の予測式として風方向、風直角方向について荷重指針の提案式を用いる。なお、建物の平面形状や構造特性によっては、ねじれ振動も考慮すべきであるが、一般的な超高層鉄筋コンクリート造住宅を考えると、ねじれ振動が顕著になることはないと考えられる。したがって、本検討においては、風方向と風直角方向に対して応答を考慮することにする。荷重指針には、壁面に正対して当たる風について風方向および風直角方向の応答加速度の標準偏差はそれぞれ（３）（４）式で与えられている。

① 風方向（荷重指針 p 288, (6.3.20) による）

$$\sigma_x = \frac{X_{\max}}{G_f} (2\pi n_0)^2 r_f \sqrt{R_L} \quad (3)$$

② 風直角方向（荷重指針 p 309, (6.6.15) による）

$$\sigma_y = (2\pi n_0)^2 \sigma_y = 3q_H C'_L \frac{B}{m} \frac{z}{H} \sqrt{R_L} \quad (4)$$

ここで、風方向の算定式で G_f はガスト影響係数といい、最大変位の平均変位に対する比で表すことができる。また、単位高さ方向の質量を一定とし、応答加速度を建物頂部で考えると（３）、（４）式は以下になる。

① 風方向

$$\sigma_x = \bar{X} \times (2\pi \times n_0)^2 \times r_f \times \sqrt{R_L} \quad (3')$$

ここに、 $\bar{X}$ は平均変位（m）、 n_0 は風方向の 1 次振動数（Hz）、 r_f は風速変動係数、 R_L は風方向振動の共振係数である。

② 風直角方向

$$\sigma_y = 3 \times q_H \times C'_L \times \frac{\sqrt{R_L}}{\rho b \times D} \quad (4')$$

ここに、 q_H は速度圧（Pa）、 C'_L は風直角方向の変動転倒モーメント係数、 R_L は風直角方向振動の共振係数、 ρb は建物の平均密度（kg/m³）、 D は建物の奥行き（m）

表-1 年最大風速の変動係数³⁾

建設地	V_V
札幌	0.13
仙台	0.16
東京	0.21
名古屋	0.29
大阪	0.33
広島	0.29
福岡	0.26

である。算定式の物理量およびパラメータは更に計算式が定められているが、詳細については 3 章で記す。

ところで、応答を予測する際、どのような風速を想定し検討するか問題になる。ここで対象とする風速値は、居住性評価に対して年間振動知覚確率を求めることを考慮して、年最大風速の期待値、すなわち再現期間 1 年の風速とした。

また、応答予測値は振動知覚と同様ばらつきを有するものと考えられる。予測された応答加速度の変動係数 V_A は次式より算定する。

$$V_A = \sqrt{(2 \times V_V)^2 + (2 \times V_E)^2 + V_{V-A}^2} \quad (5)$$

ここに、 V_V は年最大風速の変動係数、 V_E は風速の鉛直分布係数の変動係数、 V_{V-A} は等価応答加速度振幅の変動係数である。年最大風速の変動係数は建設地によって異なり、主要な地域については表-1 で与えられている³⁾。風速の鉛直方向の変動係数は 0.1 とする³⁾。等価応答加速度振幅の変動係数は、予測式より等価応答加速度振幅を求めた場合は 0.4 とし、風洞実験結果から等価加速度振幅を予測した場合には変動係数を 0.2 とする³⁾。

風速値の他に、居住性について特に考慮すべきものとして建築物の構造特性とくに減衰定数と 1 次振動数の評価が重要となる。居住性を評価する場合には比較的小振幅の場合を対象にしている。したがって、耐力設計において大振幅を対象とした場合とは異なる取り扱いをしなければならないと考えられる。居住性の検討においては、減衰定数は耐力設計で用いるより小さ目の値とし、1 次振動数は大き目の値に想定した。ここでは鉄筋コンクリート構造に対して減衰定数を 0.015 とし、1 次振動数は耐力設計時の 1.25 倍とすることにする。なお、鉄骨造では、減衰定数は 0.01 とすることが多い。

2.3 限界状態設計法への適用

2.1 項では振動知覚閾の統計的性状を 2.2 項では風による建物の応答加速度の統計量について述べた。以降、限界状態設計法を適用して振動知覚確率の算定法について述べる。

（１）式（ $R=P-A$ ）において、 $R<0$ となる場合、振動を知覚することを意味する。知覚閾 P 、応答加速度 A とともに確率量であるから、 R も確率量である。 P と A の結合確率密度関数を $f_{P,A}(p,a)$ とすると、（１）式の振動知覚確率は、（６）式ようになる。

$$P_f = P(R < 0) = \iint_{R < 0} f_{P,A}(p,a) dp da \quad (6)$$

いま、応答値 A および知覚閾 P が互いに独立で、それぞれの確率分布が正規分布で表されると仮定すると、 R も正規分布となり、知覚確率 $P(R < 0)$ は（７）式のように表せる。

$$P_f = P(R < 0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_R} \int_{-\infty}^0 \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{r-\bar{R}}{\sigma_R}\right)^2\right) dr \quad (7)$$

すなわち、(7) 式は

$$P(R < 0) = \Phi(-\beta) = 1 - \Phi(\beta) \quad (8)$$

となる。ここに、 $\Phi(\cdot)$ は標準正規分布である。したがって、

$$\beta = \frac{\bar{R}}{\sigma_R} \quad (9)$$

の値が分かれば、知覚確率を求めることができる。この β の値によって知覚確率が変化することから、 β を振動知覚指標と呼ぶ。ところで、振動の知覚閾などは対数正規分布に従うため、 R を

$$R = \ln P - \ln A \quad (10)$$

と定義することによって、 R が正規分布となり、 β も (11) 式で定義でき、知覚確率が $\Phi(-\beta)$ によって求めることができる。

$$\beta = \frac{\bar{R}}{\sigma_R} = \frac{\lambda_P - \lambda_A}{\sqrt{\zeta_P^2 + \zeta_A^2}} \quad (11)$$

ここに、

λ_P : 振動知覚の対数平均値 ($\lambda_P = \ln \bar{P} - \zeta_P^2/2$)

λ_A : 応答加速度の対数平均値 ($\lambda_A = \ln \bar{A} - \zeta_A^2/2$)

ζ_P : 振動知覚の対数標準偏差 ($\zeta_P = \sqrt{\ln(1 + V_P^2)}$)

ζ_A : 応答加速度の対数標準偏差

($\zeta_A = \sqrt{\ln(1 + V_A^2)}$)

$\bar{P}$: 振動知覚の平均値 ((2) 式による)

V_P : 振動知覚の変動係数 (=0.4)

$\bar{A}$: 再現期間 1 年の風速時における等価最大応答加速度

V_A : $\bar{A}$ の変動係数 ((5) 式による)

3. 設計の詳細

ここでは、実際に限界状態設計法に基づき、建築物の

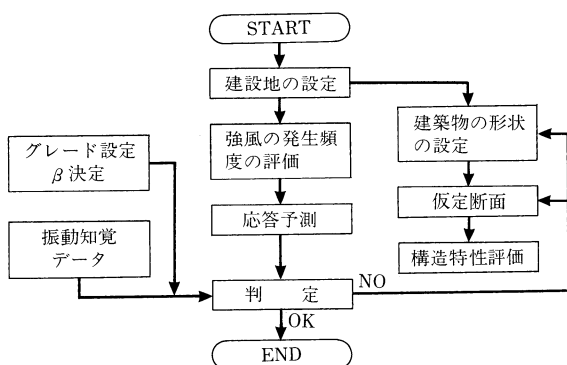
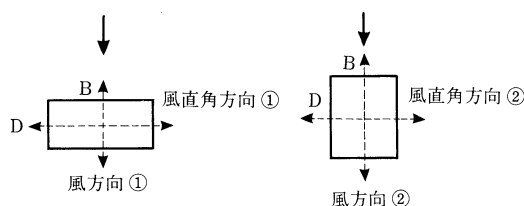


図-3 使用限界設計法を用いた居住性評価のフロー³⁾



注) 本検討では、風方向①と風方向②について検討する。

図-4 応答加速度の検討方向

強風時における居住性能の評価例を示す。図-3 に評価法のフローを示す³⁾。なお、応答予測については風方向と風直角方向について検討するが、建物の平面形が長方形の場合には図-4 に示すように全部で 4 つのパターンが考えられる。本来はこの 4 つに対して検討することが望ましいが、通常は、風方向は長辺に正対する方が、風直角方向は短辺に正対する方が大きくなる傾向がある。したがって、応答加速度の検討は以上の 2 つの場合について検討する。次に実際に算定を行う。

3.1 諸条件の設定

建物の概要を以下のとおり設定する。

① 建設地点 東京 地表面粗度区分Ⅲ (風速の鉛直分布のべき指数 $\alpha=0.2$, 境界層高さ $Z_G=450$ m)

② 建物の諸条件

・構造種別 RC

・形状 高さ $H=190.00$ m

長辺 $L_1=51.2$ m

短辺 $L_2=32.5$ m

全質量 $M=123\,400 \times 10^3$ kg

③ 構造特性

1 次固有周期 耐力設計用 $T=3.96$ sec (長, 短辺方向とも)

減衰定数 $\eta_f=0.015$

これらの情報より、居住性検討用の 1 次振動数と建物平均密度は以下のとおりになる。

居住性検討用 $T_0=0.8 \times T=3.168$ sec ($n_0=0.316$ Hz)

建物平均密度 ρb

$$\rho b = \frac{W}{L_1 \times L_2 \times H} = \frac{123\,400 \times 10^3}{32.5 \times 51.2 \times 190.0} = 390.3 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

3.2 検討風速の算定

再現期間 1 年の風速を東京管区気象台の再現期間 1 年の風速値を基に建物頂部の風速を算定する。東京管区気象台における風速、測定高さ、粗度区分を以下に示す。

風速 15.4 m/s, 高さ 74.6 m, 粗度区分 V (風速の鉛直分布のべき指数 $\alpha=0.35$, 境界層高さ $Z_G=650$ m)

頂部高さにおける風速 U_H は、上記の気象台の情報に、建設地の周辺状況を加味して算定する。つまり、気象台と建設地の粗度区分が異なるため、建設地のべき指数 ($\alpha=0.2$), 境界層高さ ($Z_G=450$ m) を用いて補正する。すなわち U_H は、

$$U_H = 15.4 \times (650/74.6)^{0.35} \times (190/450)^{0.2} = 27.65 \text{ m/s}$$

となる。よって速度圧 q_H は以下のとおりとなる。

$$q_H = \frac{1}{2} \rho U_H^2 = \frac{1.225 \times 27.65^2}{2} = 468.3 \text{ Pa}$$

3.3 再現期間 1 年の応答加速度

(1) 風方向の応答加速度標準偏差の算定

長辺に正対する方向について検討する。すなわち、見

附幅 $B=L_1$, 奥行き $D=L_2$ とする。応答加速度標準偏差は下式 ((3') 式) より求める。

$$\sigma_{\bar{x}} = \bar{X} \times (2 \times \pi \times n_0)^2 \times \gamma_f \times \sqrt{R_f}$$

平均変位 $\bar{X}$ (m) は下式より求められる。

$$\bar{X} = \frac{3q_H C_D B H}{(2\pi n_0)^2 M}$$

ここに, C_D は平均抗力係数で,

$$C_D = \begin{cases} D/B \leq 1 : 1.4/(2\alpha+2) \\ D/B > 1 : 1.2/(2\alpha+2) \end{cases}$$

で表される。ここで, α はべき指数である。

$D/B=31.6/51.2=0.62$ より, $D/B \leq 1$ であるから C_D は, $C_D=1.4/(2 \times 0.20+2)=0.58$ となる。

よって建物頂部における平均変位は, 以下のとおりになる。

$$\begin{aligned} \bar{X} &= \frac{3 \times 486.3 \times 0.58 \times 51.2 \times 190.0}{(2 \times 3.14 \times 0.316)^2 \times 123\,400 \times 10^3} \\ &= 1.69 \times 10^{-2} \text{ (m)} \end{aligned}$$

風速変動係数 γ_f は風の乱れ強さに関する係数で下式より求める。

$$\gamma_f = \frac{3+3\alpha}{2+\alpha} I_H$$

ここで, I_H は建物高さにおける乱れ強さで下式で求める。 $\alpha=0.20$ より,

$$I_H = 0.1 \times \left(\frac{H}{Z_G} \right)^{-\alpha-0.05} = 0.1 \times \left(\frac{190.0}{450} \right)^{-0.25} = 0.124$$

よって, γ_f は以下のとおりになる。

$$\gamma_f = \frac{3+3 \times 0.20}{2+0.2} \times 0.124 = 0.203$$

共振係数 R_f は, 建築物の変動変位の固有振動数成分を表す係数で下式より求める。

$$R_f = \frac{\pi}{4\eta_f} S_f F$$

ここで, S_f は規模係数といい, 建築物の規模による乱れの影響の低下を表す係数であり, F は風力スペクトルといい, 建築物の風方向の1次固有振動数における風速変動のパワーを表す係数であり, それぞれ下式で与えられている。

$$S_f = \frac{0.84}{\{1+2.1(n_0 H/U_H)\} \{1+2.1(n_0 B/U_H)\}}$$

$$F = \frac{4(n_0 L_H/U_H)}{\{1+71(n_0 L_H/U_H)^{2/5}\}^{5/6}}$$

L_H は建物高さにおける乱れのスケール (m) で下式で求める。

$$L_H = 100 \times (H/30)^{0.5} = 100 \times (190/30)^{0.5} = 251.7 \text{ m}$$

よって, S_f , F は,

$$\begin{aligned} S_f &= \frac{0.84}{\{1+2.1(0.316 \times 190/27.7)\} \{1+2.1(0.316 \times 51.2/27.7)\}} \\ &= 6.80 \times 10^{-2} \end{aligned}$$

$$F = \frac{4 \times (0.316 \times 251.7/27.7)}{\{1+71 \times (0.316 \times 251.7/27.7)^{2/5}\}^{5/6}} = 5.67 \times 10^{-2}$$

よって, R_f は以下のとおりになる。

$$R_f = \frac{3.14}{4 \times 0.015} \times 6.80 \times 10^{-2} \times 5.67 \times 10^{-2} = 0.20$$

したがって, $\bar{X}=1.69 \times 10^{-2}$ (m), $\gamma_f=0.203$, $R_f=0.20$ と求められたので, 風方向の応答加速度の標準偏差 $\sigma_{\bar{x}}$ は,

$$\begin{aligned} \sigma_{\bar{x}} &= \bar{X} \times (2 \times \pi \times n_0)^2 \times \gamma_f \times \sqrt{R_f} \\ &= 1.69 \times 10^{-2} \times (2 \times 3.14 \times 0.316)^2 \times 0.203 \times \sqrt{0.20} \\ &= 6.04 \times 10^{-3} \text{ (m/s}^2\text{)} \rightarrow 0.60 \text{ (cm/s}^2\text{)} \end{aligned}$$

となる。

(2) 風直角向の応答加速度標準偏差の算定

短辺に正対する方向について検討する。すなわち, 見附幅 $B=L_2$, 奥行き $D=L_1$ とする。応答加速度標準偏差は下式 ((4') 式) より求める。

$$\sigma_{\bar{y}} = 3 \times q_H \times C'_L \times \frac{\sqrt{R_L}}{\rho b \times D}$$

C'_L は変動転倒モーメント係数で下式より求める。

$$C'_L = 0.0082(D/B)^3 - 0.071(D/B)^2 + 0.22(D/B)$$

$D/B=51.2/32.5=1.58$ より

$$\begin{aligned} C'_L &= 0.0082 \times (1.58)^3 - 0.071 \times (1.58)^2 + 0.22 \times 1.58 \\ &= 0.20 \end{aligned}$$

風直角方向振動の共振係数 R_L は下式より求める。

$$R_L = \frac{\pi \times F_L}{4 \times \eta_f}$$

ここで, F_L は風直角方向の風力スペクトルで次式より求められる。

$$F_L = \sum_{j=1}^m \frac{4\kappa_j(1+0.6\beta_j)\beta_j}{\pi} \frac{(n_0/n_{sj})^2}{\{1-(n_0/n_{sj})^2\}^2 + 4\beta_j^2(n_0/n_{sj})^2}$$

ここに,

$$\kappa_1=0.85$$

$$\kappa_2=0.02$$

$$m = \begin{cases} 1 : D/B < 3 \\ 2 : D/B \geq 3 \end{cases}$$

$$n_{s1} = \frac{0.12}{\{1+0.38 \times (D/B)^2\}^{0.89}} \frac{U_H}{B}$$

$$n_{s2} = \frac{0.56}{(D/B)^{0.85}} \frac{U_H}{B}$$

$$\beta_1 = \frac{(D/B)^4}{1.2 \times (D/B)^4 - 1.7 \times (D/B)^2 + 21} + \frac{0.12}{(D/B)}$$

$$\beta_2 = 0.28 \times (D/B)^{-0.34}$$

である。

$D/B=1.58 < 3$ より $m=1$ となるので, n_{s1} , β_1 を求める。

$$n_{s1} = \frac{0.12}{\{1+0.38 \times (1.58)^2\}^{0.89}} \frac{27.7}{32.5} = 5.65 \times 10^{-2}$$

$$\beta_1 = \frac{1.58^4}{1.2 \times (1.58)^4 - 1.7 \times (1.58)^2 + 21} + \frac{0.12}{1.58}$$

$$= 0.33$$

$$n_0/n_{s1} = 0.316/0.0565 = 5.59$$

以上より F_L は、

$$F_L = \frac{4 \times 0.85 \times (1 + 0.6 \times 0.33) \times 0.33 \times (5.59)^2}{3.14 \times \{(1 - 5.59^2)^2 + 4 \times 0.33^2 \times (5.59)^2\}}$$

$$= 1.44 \times 10^{-2}$$

となる。

したがって R_L は、

$$R_L = \frac{3.14 \times 1.44 \times 10^{-2}}{4 \times 0.015} = 0.75$$

よって、 $q_H = 468.3 \text{ Pa}$ 、 $C'_L = 0.20$ 、 $R_L = 0.75$ 、 $\rho b = 390.3 \text{ kg/m}^3$ 、 $D = 51.2 \text{ m}$ より風直角方向の応答加速度 $\sigma_{\bar{y}}$ は、

$$\sigma_{\bar{y}} = 3 \times q_H \times C'_L \times \frac{\sqrt{R_L}}{\rho b \times D}$$

$$= 3 \times 468.3 \times 0.20 \times \frac{\sqrt{0.75}}{390.3 \times 51.2}$$

$$= 1.22 \times 10^{-2} \text{ (m/s}^2\text{)} \rightarrow 1.22 \text{ (cm/s}^2\text{)}$$

3.4 等価応答加速度の算定

前項より風直角方向の応答が風方向を上回る。したがって、等価最大応答加速度は標準偏差を2倍して、

$$\bar{A} = 2 \times 1.22 = 2.44 \text{ (cm/s}^2\text{)}$$

となる。

3.5 居住性能評価

知覚振動指標は下式で算定する。

$$\beta = \frac{\lambda_P - \lambda_A}{\sqrt{\zeta_P^2 + \zeta_A^2}}$$

振動知覚閾の対数標準偏差 ζ_P は、 $V_P^2 = 0.4$ より、

$$\zeta_P = \sqrt{\ln(1 + V_P^2)} = \sqrt{\ln(1 + 0.4^2)} = \sqrt{0.148}$$

応答加速度の対数標準偏差 ζ_A は、 $V_V = 0.21$ (表-1)、

$V_E = 0.1$ 、 $V_{V-A} = 0.4$ より、

$$\zeta_A = \sqrt{\ln(1 + V_A^2)}$$

$$= \sqrt{\ln(1 + (2 \times V_V)^2 + (2 \times V_E)^2 + (V_{V-A})^2)}$$

$$= \sqrt{\ln(1 + (2 \times 0.21)^2 + (2 \times 0.1)^2 + 0.4^2)}$$

$$= \sqrt{0.319}$$

振動知覚閾の対数平均値 λ_P は、 $\bar{P} = 1.5 \times n_0^{-0.6} = 1.5 \times 0.316^{-0.6} = 2.99 \text{ cm/s}^2$ ((2) 式)、 $\zeta_P^2 = 0.148$ より、

$$\lambda_P = \ln \bar{P} - 0.5 \zeta_P^2 = \ln(2.99) - 0.5 \times 0.148 = 1.021$$

応答加速度の対数平均値 λ_A は、 $\bar{A} = 2.44 \text{ cm/s}^2$ 、 $\zeta_A^2 = 0.319$ より、

$$\lambda_A = \ln(2.44) - 0.5 \times 0.319 = 0.732$$

よって、振動知覚指標 β は、

$$\beta = \frac{1.021 - 0.732}{\sqrt{0.148 + 0.319}} = 0.42$$

となる。また、

$$P = 1 - \Phi(\beta) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{0.42} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx = 0.30$$

り、年間振動知覚確率は30%となる。

この算定法によって、都市基盤整備公団が建設した60m以上の超高層住宅77棟について東京の臨海部に建設されたものと想定して振動知覚指標 β を試算したものを図-5に示す。図より $\beta=0$ を下回るものはない。振動知覚指標 $\beta=0$ を超える既存の公団超高層住宅については、これまで風揺れに関するクレームがないことや、SRC造37階建公団賃貸住宅の入居者に対する台風時(平成3年9月27日台風19号および、同年10月13日台風21号)の建物の揺れの調査結果⁹⁾を踏まえて公団では、 $\beta=0$ を下回らないことをクライテリアとしている。

4. 居住性評価のための算定シートの提示

本解説において示した居住性評価法について算定シートの形式として図-6に示した。今後、風揺れによる居住性の評価について限界状態設計法によって検討する場合に利用していただければ幸いである。

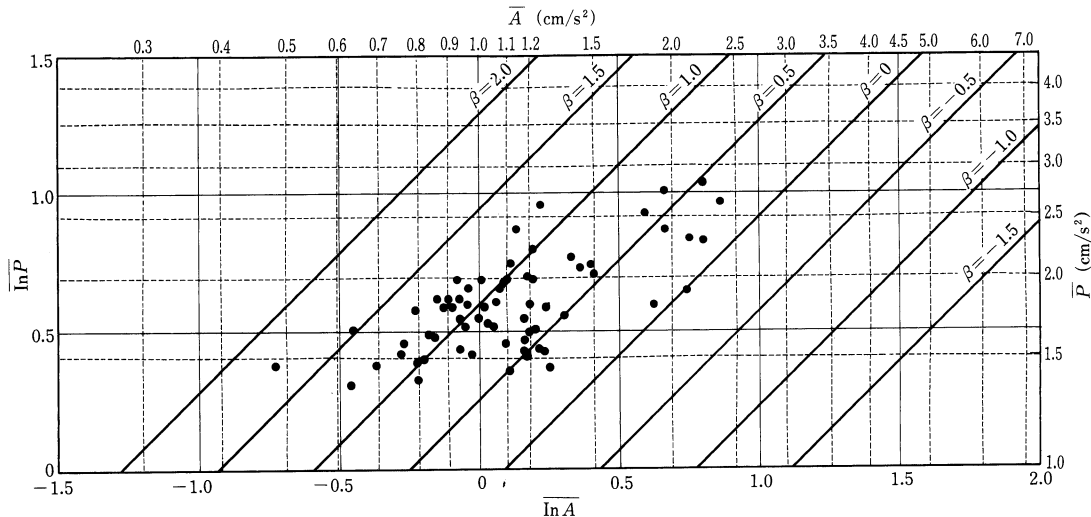


図-5 既存の超高層住宅の振動知覚指標 β

1. 諸条件の設定

1.1 建設地周辺の状況

建設地_____, 地表面粗度区分_____ (べき指数 $\alpha =$ _____ *1 境界層高さ $Z_G =$ _____ *1 m) *1 下表を参照

表 - 地表面粗度区分*1)

地表面粗度区分	べき指数 α	境界層高さ Z_G (m)	周辺地域の地表面の状況
I	0.10	250	海上のようなほとんど障害物のない平坦地
II	0.15	350	田園地帯や草原のような、農作物程度の障害物がある平坦地、樹木・低層建築物が散在している平坦地
III	0.20	450	樹木・低層建築物が密集する地域、あるいは中層建築物（4～9階）が散在している地域
IV	0.27	550	中層建築物（4～9階）が主となる市街地
V	0.35	650	高層建築物（10階以上）が密集する地域

*1) 建築物荷重指針・同解説（日本建築学会，1993）より引用

1.2 建築物の諸条件

① 構造種別 _____ ② 形状：高さ $H =$ _____ m，長辺方向 $L_1 =$ _____ m，短辺方向 $L_2 =$ _____ m，全質量 $M =$ _____ kg

1.3 構造特性

① 耐力設計用一次固有周期：長辺方向 $T_{L1} =$ _____ sec，短辺方向 $T_{L2} =$ _____ sec

② 居住性検討用一次固有周期：長辺方向 $T_{L1} = 0.8 \times T_{L1}$ _____ sec，短辺方向 $T_{L2} = 0.8 \times T_{L2} =$ _____ sec

③ (居住性検討用一次振動数：長辺方向 $n_{L1} = 1/T_{L1} =$ _____ Hz，短辺方向 $n_{L2} = 1/T_{L2} =$ _____ Hz)

④ 減衰定数 $\eta_f = 0.015$

④ 建物平均密度の算定

$$\rho b = M / (L_1 \times L_2 \times H) = \text{_____} / (\text{_____} \times \text{_____} \times \text{_____}) = \text{_____} \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

2. 再現期間1年の風速算定

風速 $U_H = V_1 \times (Z_{GR}/H_{ref})^{\alpha_{ref}} \times (H/Z_G)^{\alpha} = \text{_____} \times (\text{_____} / \text{_____})^{\text{_____}} \times (\text{_____} / \text{_____})^{\text{_____}} = \text{_____} \text{ (m/s)}$

速度圧 $q_H = 1/2 \rho U_H^2 = 1/2 \times 1.225 \times \text{_____}^2 = \text{_____} \text{ (pa)}$

表 - 気象観測所の再現期間1年の風速と地表面粗度区分の例*2)

気象観測所	風速計高さ H_{ref} (m)	風速 V_1 (m/s)	粗度区分	(べき指数 α_{ref})	境界層高さ Z_{GR} (m)
札幌管区気象台	19.9	11.7	IV	0.27	550
仙台管区気象台	52.1	18.7	III	0.20	450
東京管区気象台	74.6	15.4	V	0.35	650
名古屋管区気象台	18.0	14.6	III	0.20	450
大阪管区気象台	53.0	15.4	IV	0.27	550
広島管区気象台	19.5	13.9	IV	0.27	550
福岡管区気象台	24.5	14.5	II	0.15	350

*2) 風速計高さ、風速は「建築物振動に関する居住性能評価指針・同解説（日本建築学会，1991）」より引用，粗度区分、べき指数、境界層高さは「建築物荷重指針より同解説（日本建築学会，1993）」より引用。その他の気象観測所については上記の文献を参照してください。

3. 応答加速度の算定

3.1 風方向の応答加速度

$B = L_1 =$ _____ m， $D = L_2 =$ _____ m とする。

$D/B =$ _____

$D/B \leq 1$ の時 $C_D = 1.4 / (2\alpha + 2) = 1.4 / (2 \times \text{_____} + 2) = \text{_____}$ ， $D/B > 1$ の時 $C_D = 1.2 / (2\alpha + 2) = 1.2 / (2 \times \text{_____} + 2) = \text{_____}$

① 平均変位 $\bar{X}$ の計算

$$\bar{X} = \frac{3q_H C_D B H}{(2\pi n_{L2})^2 M} = \frac{3 \times \text{_____} \times \text{_____} \times \text{_____} \times \text{_____}}{(2 \times 3.14 \times \text{_____})^2 \times \text{_____}} = \text{_____} \text{ (m)} \Rightarrow \text{_____} \text{ (cm)}$$

② 風速変動係数 r_f の算定

$$I_H = 0.1 \times (H/Z_G)^{-\alpha - 0.05} = 0.1 \times (\text{_____} / \text{_____})^{\text{_____} - 0.05}$$

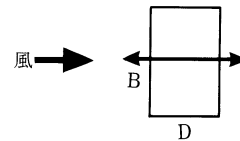


図-6(1) 強風時における居住性算定シート

$$r_f = \frac{3+3\alpha}{2+\alpha} I_H = \frac{3+3 \times \quad}{2+\quad} \times \quad = \quad$$

③ 共振係数 R_f の算定

$$n_{L2} H / U_H = \quad \times \quad / \quad = \quad, \quad n_{L2} B / U_H = \quad \times \quad / \quad = \quad$$

$$L_H = 100 (H/30)^{0.5} = 100 \times (\quad / 30)^{0.5} = \quad m$$

$$S_f = \frac{0.84}{\{1+2.1(n_{L2} H / U_H)\} \{1+2.1(n_{L2} B / U_H)\}} = \frac{0.84}{\{1+2.1(\quad)\} \{1+2.1(\quad)\}} = \quad$$

$$F = \frac{4(n_{L2} L_H / U_H)}{\{1+71(n_{L2} L_H / U_H)^2\}^{5/6}} = \frac{4 \times (\quad)}{\{1+71 \times (\quad)^2\}^{5/6}} = \quad$$

以上より

$$R_f = \frac{\pi}{4\eta_f} S_f F = \frac{3.14}{4 \times 0.015} \times \quad \times \quad = \quad$$

よって、風方向の応答加速度の標準偏差は

$$\sigma_{\ddot{x}} = \bar{X} \times (2 \times \pi \times n_{L2})^2 \times r_f \times \sqrt{R_f} = \quad \times (2 \times 3.14 \times \quad)^2 \times \quad \times \sqrt{\quad} = \quad m/s^2 \Rightarrow \quad cm/s^2$$

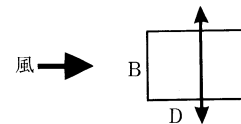
3.2 風直角方向の応答加速度

$$B = L2 = \quad m, \quad D = L1 = \quad m \text{ とする。}$$

変動転倒モーメント係数の算定

$$D/B = \quad / \quad = \quad \text{より,}$$

$$C_L' = 0.0082 (D/B)^3 - 0.071 (D/B)^2 + 0.22 (D/B) = 0.0082 (\quad)^3 - 0.071 (\quad)^2 + 0.22 (\quad) = \quad$$



② 共振係数 R_L の算定

$$D/B = \quad, \quad D/B < 3 \text{ のとき } m=1, \quad D/B \geq 3 \text{ のとき } m=2$$

$m=1$ の場合

$$n_{s1} = \frac{0.12}{\{1+0.38 \times (D/B)^2\}^{0.89}} \frac{U_H}{B} = \frac{0.12}{\{1+0.38 \times (\quad)^2\}^{0.89}} \times \frac{\quad}{\quad} = \quad$$

$$\beta_1 = \frac{(D/B)^4}{1.2 \times (D/B)^4 - 1.7 \times (D/B)^2 + 21} + \frac{0.12}{(D/B)} = \frac{(\quad)^4}{1.2 \times (\quad)^4 - 1.7 \times (\quad)^2 + 21} + \frac{\quad}{(\quad)} = \quad$$

$$n_{L2} / n_{s1} = \quad / \quad = \quad$$

$$F_L = \frac{4 \times 0.85 \times (1+0.6\beta_1) \beta_1}{\pi} \times \frac{(n_{L2} / n_{s1})^2}{\{(1 - (n_{L2} / n_{s1})^2)^2 + 4\beta_1^2 (n_{L2} / n_{s1})^2\}}$$

$$= \frac{4 \times 0.85 \times (1+0.6 \times \quad) \times \quad}{3.14} \times \frac{(\quad)^2}{\{(1 - (\quad)^2)^2 + 4 \times \quad^2 \times (\quad)^2\}} = \quad$$

以上より

$$R_L = \frac{\pi \times F_L}{4 \times \eta_f} = \frac{3.14 \times \quad}{4 \times 0.015} = \quad$$

$m=2$ の場合

$$n_{s1} = \frac{0.12}{\{1+0.38 \times (D/B)^2\}^{0.89}} \frac{U_H}{B} = \frac{0.12}{\{1+0.38 \times (\quad)^2\}^{0.89}} \times \frac{\quad}{\quad} = \quad$$

図-6(2) 強風時における居住性算定シート

$$n_{s2} = \frac{0.56}{(D/B)^{0.85}} \times \frac{U_H}{B} = \frac{0.56}{(\quad)^{0.85}} \times \frac{\quad}{\quad} = \quad$$

$$\beta_1 = \frac{(D/B)^4}{1.2 \times (D/B)^4 - 1.7 \times (D/B)^2 + 21} + \frac{0.12}{(D/B)} = \frac{(\quad)^4}{1.2 \times (\quad)^4 - 1.7 \times (\quad)^2 + 21} + \frac{\quad}{(\quad)} = \quad$$

$$\beta_2 = 0.28 \times (D/B)^{-0.34} = 0.28 \times (\quad)^{-0.34} = \quad$$

$$n_{L2}/n_{s1} = \quad / \quad = \quad$$

$$n_{L2}/n_{s2} = \quad / \quad = \quad$$

$$F_{L1} = \frac{4 \times 0.85 \times (1 + 0.6\beta_1)\beta_1}{\pi} \times \frac{(n_{L2}/n_{s1})^2}{\{(1 - (n_{L2}/n_{s1})^2)^2 + 4\beta_1^2(n_{L2}/n_{s1})^2\}}$$

$$= \frac{4 \times 0.85 \times (1 + 0.6 \times \quad) \times \quad}{3.14} \times \frac{(\quad)^2}{\{(1 - (\quad)^2)^2 + 4 \times \quad^2 \times (\quad)^2\}} = \quad$$

$$F_{L2} = \frac{4 \times 0.02 \times (1 + 0.6\beta_2)\beta_2}{\pi} \times \frac{(n_{L2}/n_{s2})^2}{\{(1 - (n_{L2}/n_{s2})^2)^2 + 4\beta_2^2(n_{L2}/n_{s2})^2\}}$$

$$= \frac{4 \times 0.02 \times (1 + 0.6 \times \quad) \times \quad}{3.14} \times \frac{(\quad)^2}{\{(1 - (\quad)^2)^2 + 4 \times \quad^2 \times (\quad)^2\}} = \quad$$

$$F_L = F_{L1} + F_{L2} = \quad + \quad = \quad$$

以上より

$$R_L = \frac{\pi \times F_L}{4 \times \eta_f} = \frac{3.14 \times \quad}{4 \times 0.015} = \quad$$

風直角方向の応答加速度の標準偏差は

$$\sigma_{\ddot{y}} = 3 \times q_H \times C_L' \times \frac{\sqrt{R_L}}{\rho b \times D} = 3 \times \quad \times \quad \times \frac{\sqrt{\quad}}{\quad \times \quad} = \quad m/s^2 \Rightarrow \quad cm/s^2$$

3.4 等価応答加速度の算定

風方向および風直角方向の応答加速度標準偏差のうち大きい値の方を用いる。

等価応答加速度は、

$$\bar{A} = 2 \times \quad = \quad (cm/s^2)$$

4. 居住性能の評価（振動知覚指標 β の算定）

$$\zeta_P^2 = \ln(1 + V_P^2) = (1 + \quad^2) = \quad$$

$$\zeta_A^2 = \ln(1 + V_A^2) = \ln(1 + (2 \times V_V)^2 + (2 \times V_E)^2 + (V_{V-A})^2) = \ln(1 + (2 \times \quad)^2 + (2 \times \quad)^2 + (\quad)^2) = \quad$$

$$\bar{P} = 1.5 \times n_{L2}^{-0.6} = 1.5 \times \quad^{-0.6} = \quad$$

$$\lambda_P = \ln(\bar{P}) - 0.5\zeta_P^2 = \ln(\quad) - 0.5 \times \quad = \quad$$

$$\lambda_P = \ln(\bar{A}) - 0.5\zeta_A^2 = \ln(\quad) - 0.5 \times \quad = \quad$$

よって振動知覚指標 β は

$$\beta = \frac{\lambda_P - \lambda_A}{\sqrt{\zeta_P^2 + \zeta_A^2}} = \frac{\quad - \quad}{\sqrt{\quad + \quad}} = \quad$$

となる。

図-6(3) 強風時における居住性算定シート

5. 終わりに

本報告では、鉄筋コンクリート造超高層住宅において限界状態設計法を用いた風揺れに対する居住性の評価法について報告した。限界状態設計法は、今後建築設計において重要な位置を占めてくると思われる。本解説が特に若い設計者に興味をもていただければ幸いである。なお、本報告を執筆するにあたり、貴重なご意見、資料等を提供していただいた都市基盤整備公団技術センター石橋龍吉氏に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 日本建築学会，建築物の振動に関する居住性能評価指針同解説，1991.4
- 2) 神田 順・田村幸雄・佐野行雄・崔 恒・田村哲郎・大築民夫：
超高層住宅の長周期振動に対する振動感覚の調査研究（その2），
（住）住宅総合研究財団，1992
- 3) 田村幸雄・中村 修・藤井邦夫・大築民夫・塩谷真夫：超高層住宅における「ゆれ」「振動」が居住者に与える影響に関する研究報告集，住宅都市整備公団（国土開発技術センター），1989.3
- 4) 後藤剛史：居住性に観点を置いた高層建物に生じる振動の評価に関する研究（その1），日本建築学会論文報告集，237号，昭和50年11月
- 5) 藤本盛久・大熊武司・天野輝久・高野雅夫：長周期水平振動を受ける居住者の振動に関する研究—その2. 知覚閾—，日本建築学会大会学術講演講演梗概集（関東），昭和54年9月
- 6) 藤本盛久・大熊武司・天野輝久・高野雅夫：長周期水平振動を受ける居住者の振動に関する研究—その3. 振動感覚の強さ—，日本建築学会大会学術講演講演梗概集（関東），昭和54年9月
- 7) 藤本盛久・大熊武司・天野輝久・田村哲郎・加藤玲子：強風時における高層建築物の居住者に関する基礎的研究—長周期水平振動の継続時間が振動感覚に及ぼす影響—日本建築学会大会学術講演講演梗概集（東北），昭和57年10月
- 8) 日本建築学会，建築物荷重指針・同解説，1993.6
- 9) 住宅・都市整備公団，臨海地区に建設された超高層住宅の強風応答に関する研究報告書，1992.3

国際会議ニュース

鉄とコンクリートの接合に関する国際シンポジウム

‘Connections between Steel and Concrete’, Symposium

日 時：2001年9月9日～12日
場 所：Stuttgart (Germany)
主 催：RILEM, *fib*, University of Stuttgart, ACI, IABSE
内 容：The Technical Program will consist of several sessions featuring invited speakers and contributors selected from the response to the “Call for Papers”. The official language of the Symposium and the Proceedings is English.
Papers may be submitted within a broad spectrum related to the following technical categories：
◆ Test methods
◆ Behavior and design
◆ Dynamic loading： shock, earthquake, fatigue
◆ Durability

- ◆ Response to fire
- ◆ Exceptional structures, e. g. airports; power-plants...
- ◆ Related topics, e. g. anchorage to masonry...

Papers based on experimental and/or numerical investigations are welcome.

論文申込：2000年9月30日

連絡先：Symposium Secretariat

c/o IWB University of Stuttgart
Pfaffenwaldring 4
70550 Stuttgart
Germany

Email：contact@iwb.uni-stuttgart.de

Internet：http://www.iwb.uni-stuttgart.de