

超高層住宅の長周期振動に対する振動感覚の調査研究(1)(梗概)

超高層住宅振動限度委員会
代表 神田 順

第1章 研究の目的および意義

1. 1 研究の背景

わが国における超高層建築の導入は、1968年の三井霞ヶ関ビルに始まり、事務所ビルを中心に、数多く建設されてきている。ここ数年、超高層RC造住宅が開発されるようになり、構造設計の要求条件の明確化の中に、強風応答をどの程度のレベルにおさえるかの問題が、どちらかといえば従来の振動限度の対象としていたレベルより低いレベルにおいて、顕在化することが予想されるようになってきた。高層住宅やホテルにあって、どの程度の振動までを許容するかという問題は、社会的慣習による部分が極めて大きい。従って、それら、環境の変化にも比較的左右されにくい形での振動限度評価に対する成果が求められると言えよう。

1. 2 研究の目的

長周期知覚閾に関する研究は長い歴史を有しているが、最近の研究がどちらかというところ、感じ方の評価から振動限度に関する提案に向かっている傾向があるため、実際に人間の振動知覚閾がどの程度の精度にあるか、極めてあいまいである。

本研究は、長周期知覚閾における振動感覚のばらつきを定量的に把握し、超高層住宅の耐風設計における使用限界状態に関する客観的な指標設定にまで取りまとめることを目的とする。

1. 3 研究の方法

まず、いくつかのテーマについての文献調査を主とした現状分析を行う。また、実在の高層住宅を対象として、強風下での応答の計測、および住人に対するアンケート調査などを通して、振動に対する意識・知覚の程度について情報を収集する。次に、低振幅レベルにおいても、十分制御された波形を容易に再現できる振動シミュレータを製作する。振動感覚試験としては、性別、年齢、振動方向、姿勢、振動継続時間、振動波形の種類などを取り上げるとともに、予備的に対象振幅範囲を検討し、ばらつき評価に当たり、有意なデータが確保されるよう配慮する。さらには、実在建物内での感覚と本研究で用いたシミュレータ内での感覚との対応について検討することを目的とする形でのアンケート調査をあわせて実施する。

最終段階にあっては、耐風設計における使用限界状態設計法の具体的な提案を行う。特に超高層住宅の構造設計におけるその役割を検討する。また、耐震設計における同種の設計法の展開の可能性についても検討する。

第2章 関連分野における既往の研究

2. 1 高層建築物の風による応答実測

2. 1. 1 振動の波形

実測された強風時の振動変位のほとんどは、風の息と俗に言われる10~20秒の長周期の振動成分の上に建物の1次固有周期成分に近い短周期の振動成分が重なった現象を示している。高層建築物の居住性を問題とする場合、長周期成分は静的変位と同等に見なすことができ、短周期成分が適確に把握できていれば良いと考えられる。

2. 1. 2 振動の形態

(1) 曲げ変形と振れ変形

建築物は水平方向の併進運動だけでなく振れ振動を生じる。そして、この振れ成分がかなり大きいこと、15~30秒程度の間隔で振れと曲げが交互に卓越して現れることが報告されている文献〔1〕〔2〕〔3〕。建物端部における変位に対する振れの寄与分は3割程度〔1〕から5割程度〔4〕である。

(2) 風方向振動と風直角方向振動

塔状建物では、一般に低風速では風方向、高風速では風直角方向の振動が大きくなる〔5〕〔6〕。

(3) 振動モード

加速度波形では、振幅変調を伴った1次振動数成分の極めて狭帯域の振動となる。従って、いずれの実測例においてもパワースペクトル密度には1次固有振動数成分に鋭いピークが見られ、2次以上は明確でない。基本的には、曲げと振れの1次固有振動数のモードのみが卓越していると考えて良いであろう。

2. 1. 3 風速と振幅の関係

通常の高層建築物では、風速のほぼ2乗に比例して平均変位は増加する〔6〕。一方、変位や加速度の標準偏差は風方向成分、風直角方向成分、振れ成分とも平均風速の2.5~3.0乗に比例して増加し、平均変位よりは風速による増加のしかたが急である〔4〕。

2. 1. 4 応答の最大値

ピークファクタ〔(最大値-平均値)/標準偏差〕はいずれの実測例においても3~4付近にばらついている。

2. 1. 5 高層建築物の固有振動数と減衰定数

1次固有振動数 f は、建物高さ H によって $f=46/H$ (相関係数 $r=0.883$)で概ね予測でき、これに直交する方向の振動に対しては $f=58/H$ ($r=0.838$)、捩れに対しては $f=72/H$ ($r=0.657$)の式が示されている〔7〕。風速の増加によって固有振動数が減少する傾向も見られる〔8〕。減衰定数は振幅によって大きく変わることも、変動係数が大きいことも指摘されている〔9〕。

2. 2 長周期水平振動の知覚閾

2. 2. 1 はじめに

比較的頻度の高い強風下における振動の忍限度を検討するに当たっては、周期1秒前後に対する振動感覚の評価が、現状の高層建物、特に超高層住宅などにとっての優先課題であると言えよう。それは、振幅レベルを加速度で評価したとき、1 Hz ないし数 Hz 程度の振動に対して、人間が最も敏感であるとする報告が多いこと、従って、構造設計の立場からは、周期が1秒以上で振動に関して問題が発生することの懸念がある場合、剛性を増すことで振動振幅を減少させても、必ずしも振動感覚評価を減ずることにはならないという場合があり、1 Hz 前後での下限と見なせる加速度知覚閾の設定が、この種の検討に当たり、基本情報として不可欠であると考えられるからである。近年、確率統計論、信頼性をベースとした構造設計法の見直しを検討されており〔10〕、風荷重の統計量も整理され、確率分布の検討もなされて来ている

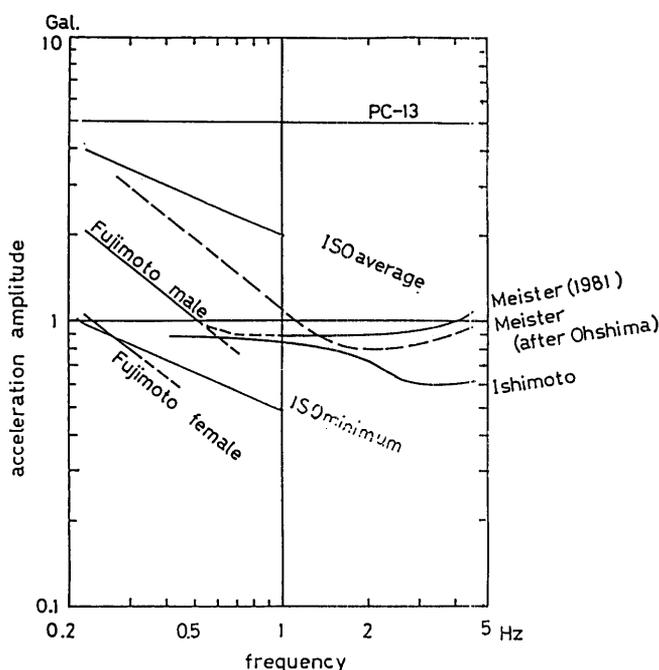


図1 既往の研究による振動の知覚閾

〔11〕。従って、知覚閾の確率分布評価が得られれば、忍限度を超過確率を基本にした評価規準で与える手法は、十分に実現の可能性を有していると言えよう。

2. 2. 2 周期1秒前後の知覚閾

既往の報告における、周期1秒前後の知覚閾を、周波数に対する加速度片振幅の形でプロットすると図1の如くなる。忍限度の最低レベルとして、Tall Building, PC-13では長周期水平振動に対して5 galを挙げている〔12〕。図にはこれも示したが、これが概略値としての知覚閾の上限と考えられる。また、工学的判断を加えた形で、周期に対する知覚閾の変化を考慮して取りまとめたものとしてISOの平均レベルと最低レベルの2本の線も示した〔13〕。

2. 2. 3 知覚閾のばらつき

藤本ら〔14〕は、男性に対しては周波数領域0.1~0.5 Hzで、女性に対しては周波数領域0.07~0.7 Hzで知覚閾を取りまとめている。分布としては対数正規分布によく適合し、変動係数は50~60%程度と見なすことができる。ただし、周波数を限定した個々の場合については、変動係数はその1/2程度の値となることが示されている〔14〕。また、0.35 Hzにおける知覚閾として青年男女16人に対して、平均4.3 gal、標準偏差1.55 gal (変動係数36%)を示しているもの〔15〕もある。いずれにせよ1 Hz 前後の周波数領域での知覚閾のばらつきおよび分布形については十分な知見が得られているとは言い難く、その推定のためのデータ収集を行う必要性の高いことが指摘できよう。

2. 2. 4 知覚閾のばらつきの要因について

知覚閾のばらつきを与える要因として、文献〔12〕では、次の10項目を挙げて、簡単な説明を付している。

(1) 個体差 (Individual difference)

実験手法としての差、研究者間の差として同じ平均知覚閾の表現でも、3倍~4倍程度の差を生ずることがある。また、同一実験内における個体差として、累積分布10%~90%の範囲で4倍~5倍程度の差が生ずるとしている。

(2) 性別 (Sex)

概して、女性の方が約2倍ほど敏感であり、その差は0.1 Hz から1 Hz になるとやや拡大する傾向にある。

(3) 年齢別 (Age)

少年が青年より、青年が壮年より敏感であるという指摘がされている。

(4) 体型 (Body type)

あまり影響しない。

(5) 姿勢 (Body posture)

床からの頭の距離によって概ね感度が高まり、距離が大きくなるにつれて2~2.5倍まで増幅されると考えられているが、低周波数領域では立位の方が座位よりも鈍

感との結果もあり〔16〕、一概には言えない。

(6) 振動方向 (Body orientation)

回転的なものが直線的振動より敏感で、また前後方向の方が左右方向より1～2割程度敏感となるとされている。

(7) 予見 (Expectancy and experience)

先行知識や体験により、2倍程度の感度上昇のあることが示されている。1.0Hz以下の周波数領域において、振幅を固定したとき、揺れを感じ始める上昇系の方が、感じなくなる周波数を求める下降系より若干敏感になるという報告〔14〕や、周波数を固定して、振幅の上昇や下降による知覚限界にあまり差のないという報告〔17〕もある。

(8) 運動 (Body movement)

静止時の方が運動時よりも振動に対しては敏感であるとされており、歩行時は静止時に比して、閾値が1.2～2倍程度上昇し、鈍感になることが示されている。

(9) 視覚要因 (Visual cues)

視覚や聴覚が手掛かりとなって、振動に対する予見を与え、振動を感じさせることがよくある。そのため、外部と全く遮断した実験室よりも、窓を通じた景色の動き、電灯などの揺れ、建具、取り付け部材からの発生音などの存在する実建物の場合の方が敏感になるとされている。

2. 3 振動感覚に基づく振動の恕限度

2. 3. 1 研究者により提案された振動恕限度

Hansenら〔18〕は、建物の揺れと居住者の苦情との定量的関係を統計的に把握し、また、建物所有者に対しては、許容し得る居住者の苦情率を明らかにしている。これに基づき、振動恕限度に関する暫定的なガイドラインを提示している。それによれば、6年に1回許容できる振動強さとして建物最上階における水平応答加速度（標準偏差）が0.005G（G：重力加速度）であるとしている。

Robertson〔19〕は、居住者の評価尺度として、強風時許容最大加速度の平均知覚閾に対する比、すなわち有感度を用いることを提案している。Davenport〔20〕はこの有感度の考え方をHansenらの研究成果に基づいて展開し、苦情率2%と10%の場合の有感度と強風頻度との関係を明らかにしている。Vickeryら〔21〕はこれらの研究成果をまとめて、居住性に関するガイドラインを提案している。Irwin〔22〕は、既往の仮想居住空間での実験結果、およびHansenらのアンケートの結果を勘案し、対象構造物の種類に対応させたガイドラインの提案を行っている。彼は、周波数が離れた振動が複合する場合、別々に振動を評価すればよいこと、また揺れを伴う場合は許容値が小さくなることを指摘している。

大築〔23〕は周波数2 Hz以下の振動感覚の限界値を既

往の研究成果から外挿して求め、加加速度で25cm/sec³（加速度にして0.004TG，T：周期(sec)）程度と推定している。また藤本ら〔24〕は、既往の資料に基づいて、有感限界（知覚閾）と恕限度（許容できる振動感覚の限界値）を次式のように定めている。

有感限界 $a/T^3=0.01$

（加速度にして0.0004TG）

恕限度 $a/T^3=0.1$

（加速度にして0.004TG）

ここで、a：振幅(cm)とする。

彼らは、これにDavenport〔25〕の風方向振動の予測理論を組み合わせ、再現期間2年および10年の強風について、当時の超高層建築物の振動の強さを考察し、再現期間10年では恕限度を超えてしまう建築物が存在することを指摘している。その後、藤本らは超高層事務所ビル（鉄骨造、高さ115m）を対象として1972年台風20号が来襲しな際の揺れに関するアンケート調査を実施し、その結果と仮想居住空間での実験結果〔26〕とを組み合わせ考察し、再現期間10年の許容加速度を提案している〔27〕。長周期振動に対する振動感覚のこれまでの研究成果を要約すれば、図2のようになる。

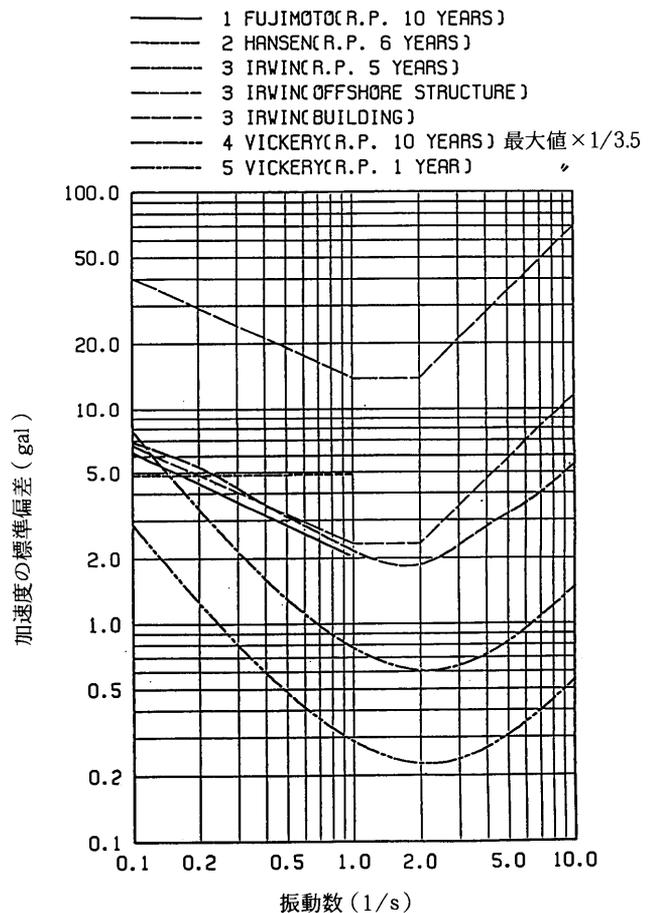


図2 振動の恕限度(研究者による提案)

2. 3. 2 規・基準類に示されている振動許限度

規・基準類に関しては国際的に最も普及しつつあるものとしてISO2631〔28〕を挙げることができる。まず、1～80Hzの振動に対して検討され、各暴露時間ごとの許容限界を以下のように分類して与えている。①疲労能率減退境界（作業効率の確保）、②暴露限界（安全・健康の確保：①の2倍としている）、③快適性減退境界（快適性の確保：①の1/3.15としている）。また、ISO2631を実際面で適用するために、国際規格ISO/DIS2631/2〔29〕が提案されている。水平振動に対する基本曲線については、加速度でみると1～2 Hzで最小値0.5gal（rms値の $\sqrt{2}$ 倍）が設定されている。ISO6897〔13〕は、0.063～1 Hzの周波数範囲の構造物の水平振動に対する人々の反応に関するものである。ここでは、まず基本弁別閾の最小値および平均値を定め、これに、苦情レベルに関する支障、驚きや不安、行動に対する妨げ等を考慮した上で振動許限度を規定している。ISO/DIS2631/2を考え合わせると、加速度から評価すれば1～2 Hzで最小の値となる。この規格の基本的な考え方は、一般用途の建築物についての評価は、再現期間が5年に対応する強風時における10分間の発生振動に関し、苦情率が2%を超えないものという点にある。日本建築学会は昭和34年に2 Hz以上の振動に対して設計規準値案〔30〕を発表している。この提案値はMeisterの感覚曲線が適切であることを認め、Meisterの感覚限界とよく感じる範囲の下限値との間に位置している。ヨーロッパ鋼構造連合（ECCS）〔31〕の指針は、風向方向と風直角方向の曲げ振動、および振れ振動について1年に2回許容できる基準を別々に定めている。振れ振動については、わずかな動きも窓に映る景色の変化によって容易に知覚されるとして、回転速度の許容限界を $\theta=0.001\text{rad/sec}$ としている。カナダ規準〔32〕は、Davenport〔33〕の「建物居住者が振動を知覚する機会は10年に1回以下でなければならない」という提案に基づき、許容できる応答加速度の振幅0.01 Gを規定している。またオーストラリア規準〔34〕では、Vickeryの私見として「Davenportの提案は条件が厳し過ぎ、10年に1回の振動としては加速度振幅で0.02Gなる値が適切である」としている。振動許限度に関する規・基準類をまとめると図3のようになる。

2. 4 生理学、心理学的観点からの感応度評価尺度

2. 4. 1 評価尺度

心理学反応（感覚）の尺度として、感覚の大きさ ϕ は刺激の物理量Iのべき関数 $\phi=kI^n$ で表わされるとするStevensの法則が知られている。Stevens〔35〕によると、「被験者が自分の感覚についての数量的判断が可能であるという立場から」、感覚尺度として「比例尺度」、「距離分割尺度（距離尺度）」をいくつかの方法を用いて定義している。

2. 4. 2 評価例について

三木ら〔36〕は、0.2Hz～2Hzの低周波数鉛直振動における生理的反応と心理的評価を行っているが、生理的反応についてははっきりした傾向は現われていない。三輪〔37〕は、「労働環境に於て環境評価を行う目的には、振動の生理反応は適当ではなく、心理反応の方が定量性や反応のダイナミックレンジの広さで優れている」としており、20Hzの基準振動に対する0.5～300Hzの全身振動の等感覚曲線、および閾値を得ている。さらに三輪は比率尺度を求め、距離等分法を用いた距離尺度から振動感覚の大きさと振動レベルについて評価しているが、Stevensのベキ法則とよく合致している。加藤ら〔38〕は0.02～1 Hzの低周波数鉛直振動においてマグニチュード推定法を用い、実験の範囲でStevensのベキ法則がよく当てはまることを示唆しており、実験結果から主観的等感覚曲線を導いている。また、Meister〔39〕、大島〔40〕ではカテゴリ一評価法を用いて1 Hz～100Hz程度の範囲で全身振動の振動感覚と、振動レベルの関係を実験的に得ている。

以上から、我々が扱おうとしている1 Hz近辺のランダム波に対しても心理尺度を用いればStevensのベキ法則に合致することが予想され、同周波数付近での振動感覚の定量化が可能となると期待される。しかし、文献

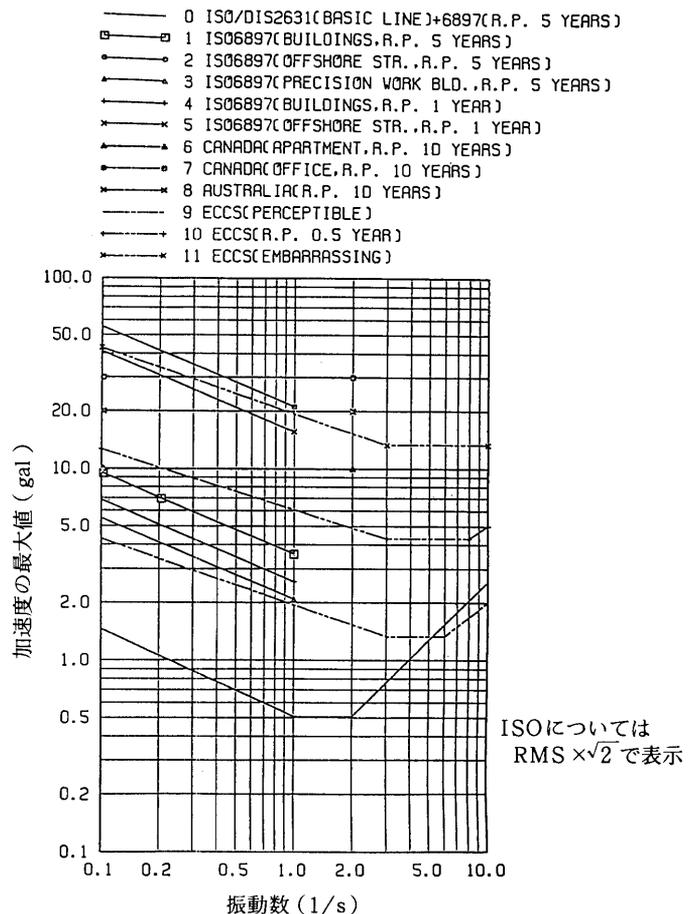


図3 振動の許限度(各国規・基準)

〔37〕において三輪は衝撃振動と持続時間の関係を示しており、閾値付近におけるランダム波では、閾値を超える持続時間、閾値以下の持続時間の関係が変化することが予測される。従って、評価方法には十分留意することが必要であろう。

2. 5 長周期振動による人体振動暴露試験方法

三木ら〔36〕は1 Hz未満の低周波数の振動感覚についてのデータをとり、評価する目的で実験を行っている。振動実験装置は、モータを動力とし、減速機を組み合わせ、周波数0.2～2 Hz、片振幅2～10mm、加速度1.0～120galの正弦波振動を出せるものである。山崎〔41〕は、全身振動の生理的・心理的影響を調査する実験において、振動台から発生する騒音の影響を無視することができないものが多く、生理的影響のデータについては、今後更に検討する必要があると述べている。また、実験技術上の課題として、従来のデータはすべて一方向の振動の負荷による人体の反応をみたものであるが、今後は多軸の振動を負荷した実験を行う必要性を説いている。加藤〔38〕らは、低周波数鉛直振動による人体の主観的等感曲線作成のための実験を行っている。それに用いられた動揺シミュレータは、モータ駆動の台にモデルハウスを取付けたものである。モデルハウスの大きさは、平面1.8m×1.8m、高さ2.1mで被験者1人が極端な狭さを感じない規模のスペースをつくっている。また、被験者はその小室の窓を通じて外界（コンクリート壁の部屋で、装飾なし）をみることができる。また、モータの音による心理的影響を消去するため、全実験中、ヘッドホンを着用し、室温を21°～27℃の居室温度の範囲としている。試験周波数は0.03～0.2Hzの範囲である。

以上の人体の振動暴露試験の問題点、および注意事項はおおよそ次のように要約される。

- ①被験者数が少ないとデータに偏りが生じる。
- ②生理反応を測定することは相当難しい。
- ③試験中の騒音（特にモータ、振動台が発生するノイズ）は無視できない。
- ④一方向、および正弦波の振動実験が大部分である。
- ⑤振動台にのせる被験者に実験装置による心理的圧迫を与えないような配慮が必要である。

第3章 高層住宅における振動感覚予備調査

3. 1 調査建物の概要

調査建物は、葛西クリーンタウン1-6号棟（23階建、SRC造）である。この建物で振動実測およびアンケート調査を行った。葛西クリーンタウンは超高層、高層、中層住宅が混在した団地である。調査建物は超高層住宅3棟のうち最も南側の建物である。1-6号棟は、ほぼ立方体の建物であり、長辺44.4m、短辺18.1m、高さ63.3m（RF）となっており、長辺方向は南北軸に一致している。塔屋は長辺側幅9.3m、短辺側幅8.25mで、高さはRF上

10.1mであり、建物中央に位置している。当該建物については、建設時に固有値解析、および強制振動試験が行われており、1次固有振動数は短辺方向1.19Hz（実測値1.20Hz）、長辺方向1.50Hz（実測値1.53Hz）であり、1次減衰定数は短辺方向9.3%（実測値7.1%）、長辺方向5%（実測値8.6%）である。

3. 2 振動実測

3. 2. 1 実測項目および実測方法

風向・風速は、塔屋上5 m（G.L. +78.4m）に設置した超音波風向風速計によって測定した。RFレベルの建物ほぼ中央位置に、ムービングコイル型振動計、およびサーボ型加速度計を各2台、長辺、および短辺方向に設置した。データレコーダによって記録を取得した。実測は昭和61年3月10日、17日および20日に6ないし8時間行なった。

3. 2. 2 実測結果

実測日のうち最も高風速となった20日について見ると、風向は北北西で一定しており、14時30分10秒に最大瞬間風速28m/sとなっている。この時の短辺方向の振動速度振幅は0.04cm/sである。これに対し、14時13分10秒の瞬間風速は24m/s程度であるが、短辺方向の振動速度振幅は最大で0.06cm/s（加速度換算0.5gal）となっている。長辺方向の振動速度は最大でも0.02cm/s程度である。

3. 3 揺れに関するアンケート調査

3. 3. 1 調査概要

対象住戸は葛西クリーンタウン1-6号棟の19階から23階の40戸中の31戸（未入居9戸）である。アンケート用紙配布は昭和61年3月27日に行い、調査対象日は振動実測実施日と同じ昭和61年3月17、20、23日とした。

3. 3. 2 アンケート結果

アンケートを回収したのは31戸中の19戸（各戸1名）で、回収率は61%である。その結果をまとめると次のとおりである。

入居時期により相異はあるものの約75%の人が過去に地震により揺れを感じており、入居後5ヵ月以上の人は全員揺れを感じている。これに対し、風による揺れを感じているのは1名のみであった。調査日（3月17、20、23日）については、1名が各日とも「椅子に腰掛けて」いる時に「音を聞いて」「小刻みで直線的な」揺れに気付いている。その揺れは、「5分以内」であるが「不快」でかつ「不安」であったとしている。調査日に手すり・サッシュからの風の音を聞いた人は約半数であるが、揺れによる音を聞いた人はいない。これは、前述の「音を聞いて」揺れを感じたのと矛盾している。

調査建物の固有振動数は1.2Hzである。第5章の知覚閾試験によると、1.25Hzでは約1.2galで半数の人が揺れを知覚するが、実測された最大加速度と同じ0.5galで

は約5%の人が揺れを知覚する。調査日に揺れに気付いた人は19名中1名(約5%)で試験結果と一致している。しかしながら、実際の建物の風による揺れとその知覚や感覚の関連を明らかにするには、データ不足であり、次年度でより固有周期の長い建物の振動実測および揺れのアンケート調査を行う予定である。

第4章 振動感覚試験装置の開発

4.1 装置の基本計画

知覚閾を対象とした微振動レベルでは、基本試験波以外の様々な外乱による振動成分に被験者が感応することによる誤差を生じることが十分考えられる。実験に当たって、当初耐震試験用大型振動台上に試験室を設けることを計画したが、振動台の性能テストを行った結果、1 Hz前後の周波数における加速度振幅1 gal以下のレベルではアクチュエータのフリクション等が影響し、コントロールすることができず、また0.5 Hz以下の周波数範囲における数 gal程度の低レベルでは高調波ノイズが発生し、波形の精度が極めて悪いことが判明したため、専用の試験装置を新たに製作することにした。

4.1.1 試験装置の仕様

試験装置の開発についての主な検討項目として、試験波の種類、試験範囲、波形精度、騒音の影響、試験室の条件等が挙げられる。加振する試験波の種類としては、実建物の応答加速度に対する反応を調べることが目的であるため、ランダム波を出力することが必要である。

試験室はできるだけ実際に居住している状態に近い状態で試験を行うことが望ましいことから、試験空間は2 m角平面以上のユニットハウス程度のものを前提に考えることにした。

最も波形歪みの少ない加振方法の一つとして考えられるのは、独立した振動系を間接的に強制振動させる方法である。この方法では共振点付近での制御が困難であることや、使用できる周波数範囲が狭い等の欠点が考えられるが、装置が比較的単純であり、励振装置として電磁励振機や振動台等を用いればランダム波加振も可能であり、実現性が高い。

4.1.2 モデル実験および応答解析

以上から、スプリングを介して振り子を加振する方式について、モデル実験、および応答解析を行い波形精度、および制御方法について検討を行った。モデル実験では質量500 kgの鋼材をワイヤーで4点吊りし、既製の電磁励振機により対向する2枚の板バネを介して加振した。

モデル実験結果から、加速度振幅で高調波ノイズレベルは加振周波数が共振周波数以下で-20 db、共振周波数以上で-30 db以下であり、人が乗った状態でも急激な動きをしなければ波形がほとんど乱されないことが確かめられた。

4.2 試験装置概要

4.2.1 装置の設計

スプリング・振り子系モデル実験の結果が良好であったことにより、実機の製作を決定し、本装置の名称をSpring Pendulum Shaking Simulator (S. P. S. S.)とした。

装置の設計に当たって、加振用電磁励振機の特徴(最大加振力1900 N, 最大加振ストローク±12.5 mm)や装置のバランス等から、振り子長さを $l = 4$ m(固有振動数0.25 Hz)に設定し、最大応答振幅を±100 mmとした。懸架方式では、横方向振動や揺れ振動の固有振動数を試験波の周波数から遠ざける必要があるため、剛体レバー2組による4点吊りとして、横方向の剛性を高め、動きを拘束した。図4に試験装置の概要を示す。伝達スプリングは回転トルクの発生や偏芯による偏向力の発生を防ぐため、スペイサーで両端を固定した2枚の板バネを用い、板バネの中央をそれぞれ振り子系と励振機に連結する構造とした。図5に伝達スプリングの概要を示す。装置の固有振動数を0.4 Hz付近に設定するため、伝達スプリングのバネ定数を11,920 N/mとした。

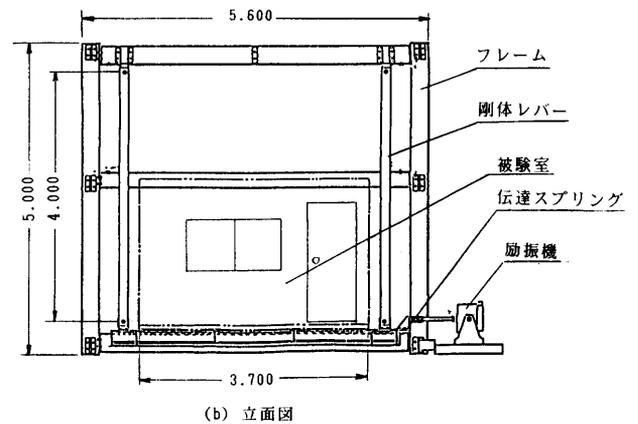


図4 試験装置の概要(立面図)

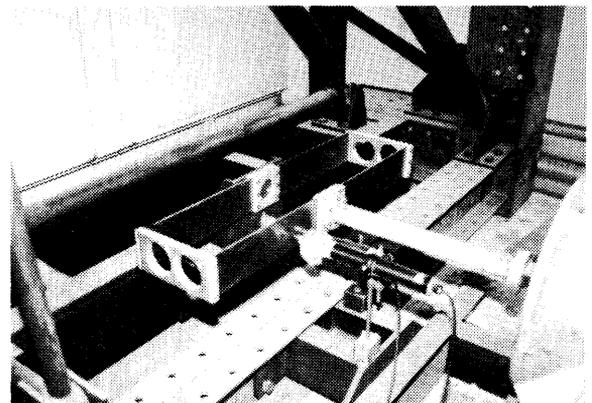


図5 振動シミュレータの加振機構

4. 2. 2 試験室の設計

試験室として、幅2.4m、長さ3.7m、高さ2.4mのユニットハウスを振り子のベースフレーム上に設置した。試験室内中央に90cm角のテーブルを置き、両側にそれぞれ加振方向、直交方向を向いた被験者2名を椅子に座らせることとした(図6)。両側面および奥の窓は外部が見えないように、写真、パネル、曇りガラス等によって目隠しを施し、冷暖房用設備、加速度計、試験室との相互通話ができるインターフォンおよびBGM用のラジオカセットを設置した。

4. 3 性能試験結果

装置の性能試験のための応答測定結果によれば、無人時の装置の固有振動数は、 $f_0=0.442\text{Hz}$ 、有効質量2268kg、減衰定数 $\xi=0.04$ となった(図7)。加振方向のノイズレベルは5 Hz以下の範囲で各加振周波数に対し-30dbとなった。直交方向の振動は固有振動数が5 Hz程度であり、外乱による振動が存在する場合がある。

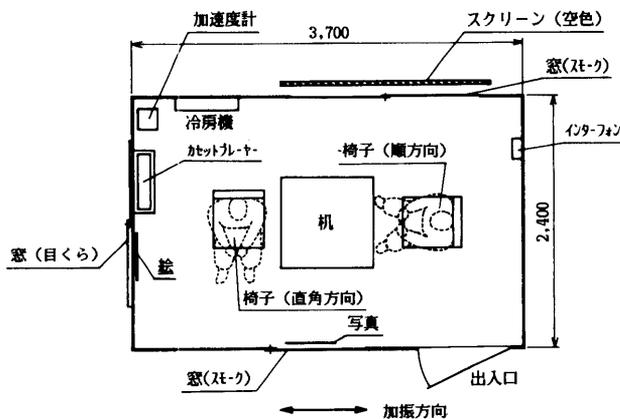


図6 試験室什器配置図

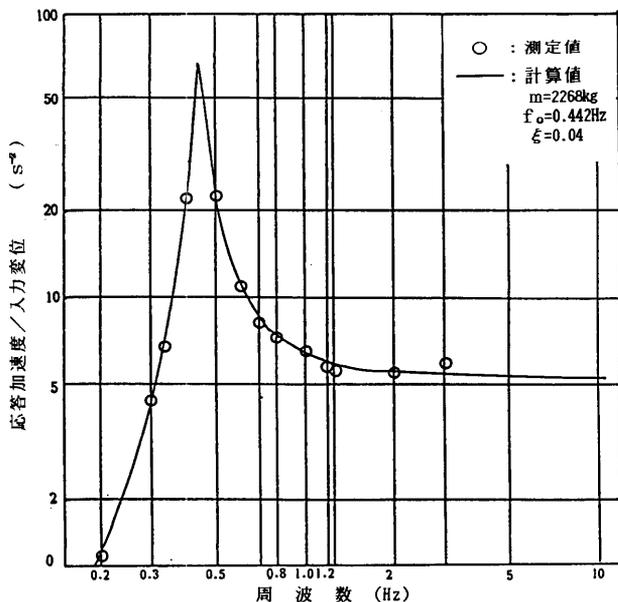


図7 試験装置の応答特性

第5章 知覚閾試験

5. 1 試験の概要

既往の研究やISOとの整合をとる意味合いで、最初の段階 (phase 1) では一方向の正弦波による椅子に座った姿勢 (座位) についての十分なデータ取得を行い、確率的評価を行った上で、次の段階 (phase 2) として正弦波の知覚閾とランダム波の知覚閾との対応、座位と立位、臥位との比較を行ってゆくこととした。また、今後10年位の範囲では周期1秒 (1 Hz) ~ 4秒 (0.25Hz) 程度の建物が增加することが予想されること、2 Hz以上の実験例は比較的多く信頼性が高いこと、およびS. P. S. S.の性能から、試験周波数は0.333Hzから5分の1オクターブピッチで2 Hzまでの5段階とすること、加振加速度振幅はISO基準値の最小値および平均値を参考に0.2Hzで8 gal、2 Hzで3 galを結ぶラインを最大として以下1オクターブを試験範囲とした。試験範囲を図8に示す。

試験を行う前段階として予備試験を実施し、試験装置の特性の把握、知覚閾の概略の把握を通じて基本方針の確認、試験方法の確立を行った。予備試験では延べ20名の人間に、試験波の継続時間、被験者の拘束時間、スイッチの押し方、周波数の変化のさせ方、騒音の問題、アンケートの回収方法などについて様々な方法で試験を行い、試験波、感応レベル、被験者の心理的反応等について有用な知見を得た。また知覚閾については延べ14名の

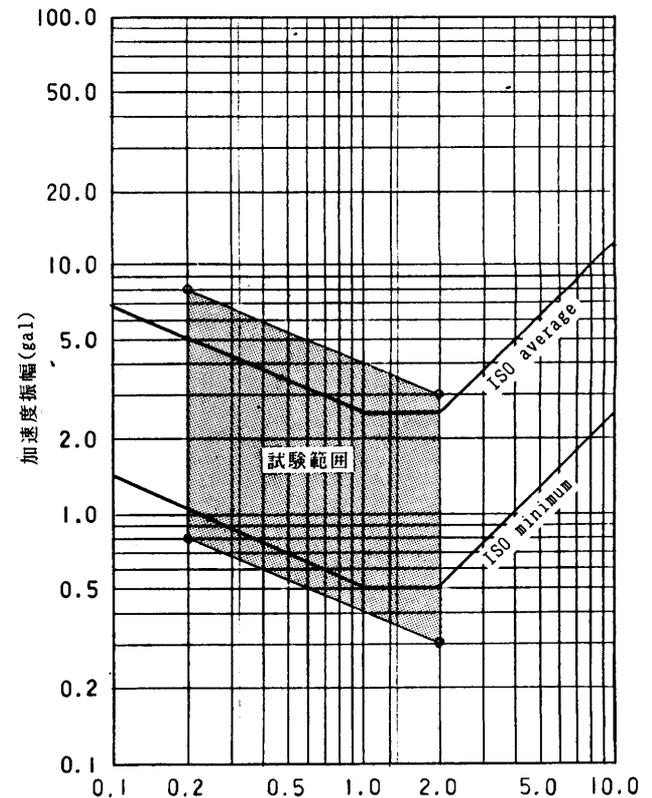


図8 知覚閾試験範囲

被験者に対する一連の試験から、ほぼISOに準ずる勾配が認められ、頻度分布では対数正規分布に従う傾向が得られた。

以上の予備試験の結果に基づいて、最終的に次節に述べるような試験方法を採用することにした。

5. 2 試験方法

基本計画、予備実験結果などから本研究における最初の段階 (phase 1) として行う振動知覚閾試験の方法を以下のように決定した。

被験者は、10代~60代の男女を対象とし、1回2名ずつ試験を行い、年齢層に偏りのないよう合計で100名以上行う。姿勢は椅子に腰掛けた座位で、加振方向は被験者の体の前後方向 (順方向)、および左右方向 (直交方向) の2方向とする。感応検出は、被験者にパイロットランプ付きホールド式スイッチを手持ちさせ、振動を感じている時ON (ランプ点灯)、感じていないときOFF (ランプ消灯) の操作による。スイッチを操作するべき感応レベルは、「加振方向の振動を感じた時」とし、振幅増加時に振動を感じ始めた時 (UP)、および振幅減少時に振動を感じなくなった時 (DOWN) とする。試験波は一方方向正弦波とし、周波数固定で振幅変化とする (図9)。試験周波数は、0.333Hz、0.5Hz、0.8Hz、1.25Hz、2.0Hzの5種類とする。振幅の変化は、試験範囲の最大値の10分の1オクターブごとに増加しとゆき、最大値に達したら、次に同様のピッチで減少する階段状の波形とし、変移部分は滑らかに連続することとする。5種類の周波数の各試験波をそれぞれ1サイクルとし、加振方向2方向の2サイクルで、1被験者に対して合計10回の加振を行う。周波数の変化順序はランダムとする。試験開始前に試験の主旨、方法、振動方向の説明を行い、試験波確認のためのトレーニングを0.5Hz、1.25Hzの2種類で行う。加振開始時、および終了時はアナウンスによって知らせる。また試験開始前に感応したり、明らかに外乱ノイズによって感応した場合は被験者に知らせることとする。被験者の大きな動き、急激な動きは禁止する。ただし会話程度は波形への影響がないので許容することとする。試験中は壁、机に触らないようにする。緊張をしていると試験回数により、疲労によって反応が変化する恐れがあるため、気分をリラックスして試験に臨む。以上の点を試験開始前に被験者に指示する。被験者の気分を和らげるため、およびスイッチ操作音を隠蔽するためBGMを流す。試験開始前に被験者の層別のためのアンケート1の記入、各回の試験終了時に試験波の認識のチェックと気分をリラックスさせるためにアンケート2の記入を行う。試験前の説明、指示、アンケート記入時間を含めて全試験時間 (被験者拘束時間) は約80分である。

なお、試験方法の違い、試験実施者の指示、説明のしかた、雰囲気の違い等による被験者の心理的反応のばら

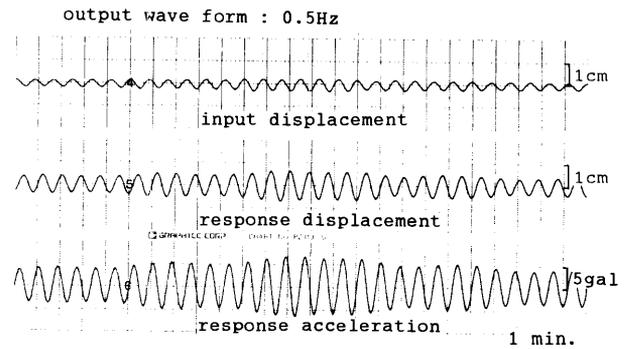


図9 振動シミュレータの波形

表1 被験者の性別および年齢別の構成

| 年 令 | 男 | 女 | 計 |
|-------|----|----|-----|
| ~ 20代 | 24 | 20 | 44 |
| 30代 | 31 | 9 | 40 |
| 40代 ~ | 25 | 10 | 35 |
| 計 | 80 | 39 | 119 |

つきを防ぐため、試験に際してはマニュアルを作成し、なるべく同一の条件で試験を実行できるようにした。

5. 3 試験結果

今回の試験に参加した人は男女合わせて119名であり、性別および年齢別の構成を表1に示す。

5. 3. 1 アンケート結果の分析

揺れを感じた原因 (発端) としては、ほとんどの人が体全体および椅子と接触している部分で振動を感じており、その他の原因で感じたという答えは、全体の29%程度である。この傾向は加振方向、周波数によらない。振動の揺れ方に対する設問については、各方向ともに $f=0.333\text{Hz}$ の場合が最もゆっくりした揺れ方を感じているが、周波数が高くなるにつれて回答の頻度分布が変化し、 $f=2.0\text{Hz}$ では短周期の揺れ方を感じた人が多くなっている。振動を感じ始めた時の振動の方向に関しては、順方向の場合には各周波数とも前後方向の答えが70%程度を、直交方向の場合には左右方向の答が60~80%程度を占めている。また、回転方向の答えが10%程度であった。振動の感じ方の程度については“あまり問題になる程度ではない”と答えた人が全体の約50%程度であるが、その他の人は低い加速度であるにもかかわらず、“やや不快”あるいは“不快”と答えた。また「高層住宅においてこのような振動を感じたときどのように思うか?」の設問に対して、 $f=0.333\text{Hz}$ の場合、“不安に思う”と答えた人と、“なんとも感じない”あるいは“慣れれば平気”と答えた人はほぼ半分ずつであるが、周波数が高くなると順・直交方向とも不安に思う人が多くなることが分かった。被験者が試験のとき実際に感じた最大振幅に関しては、平均すると実際の最大振幅の10~150倍程度にも大きく感じており、試験結果にばらつきが大

さい。

5. 3. 2 知覚閾試験結果

今回の試験結果を方向および周波数ごとに整理し、各方向における周波数別データの平均的傾向を知るため、回帰分析を行った。また方向、周波数およびUP、DOWN別データの確率分布の決定のため、データより求められた頻度分布を確率密度分布に置き換えて、対数正規分布との比較検討を行った。

各方向におけるUP、DOWNのデータに対する回帰分析の結果を図10～13に示す。これらの結果より、平均知覚閾はUP、DOWNとも、順方向と直交方向の違いによる著しい差は認められない。また、平均知覚閾はDOWNの方がUPよりもやや低い。標準偏差も、UPの場合は直交方向の結果が $f=0.333\text{Hz}$ と $f=0.5\text{Hz}$ で若干大きくなっており、DOWNの場合は直交方向の結果が全周波数に対して順方向よりも小さくなっているが、著しい差はない。

方向、周波数およびUP、DOWN別のデータの確率密度分布と対数正規分布との比較結果によれば、全体的にばらつきが大きく対数正規分布との対応はあまり良くなかった。そのグループ全体の平均値 \bar{X} で標準化(X_{ij}/\bar{X}_i ; データ番号, j ; 周波数)されたデータ全体に対する確率密度分布と対数正規分布とを比較して図14と図15に示す。UP、DOWNとも、この結果は周波数ごとのデータよりも対数正規分布との一致が良いが、今後十分多数のデータに関して検討する必要があると思われる。更に、加振方向、周波数およびUP、DOWN別のデータにおいて性別、年齢別の影響を調べるため、男女別に20代、30代および40代以上にデータを分けて整理を行い、知覚閾の回帰分析を行った。その結果をみると、各方向とも平均知覚閾の周波数増加に伴う低下勾配が20代の男性の

場合が最も急であるが、30代、40代以上の場合と比較し、その差は著しいものではなかった。女性の場合は、30代の場合が周波数の増加による平均知覚閾の低下勾配が最も急であった。

第6章 まとめ

予備試験および基本的条件下での知覚閾試験データの収集・整理により、知覚閾の確率分布として、概ね対数正規分布により表現でき、また、平均値の周波数に対する傾向としては、ISO基準の線に整合するものであり、変動係数として40～50%のオーダーであることが明らかとなった。

本報告書としては、知覚閾試験の前半を終了した段階であり、十分に検討された結論を導くに至ってはいないが、当初の研究の基本的な位置付けを改めて確認し、人間の感覚の確率統計的扱いの可能性について、一定程度の肯定的評価という形で成果を得ることができたと考えている。今後は、定量化に伴う問題点、設計への応用における既往の概念とのすりあわせに関する問題点などについて、十分配慮した上で、所期の目的を達成したいと考えている。

謝辞

本研究の実施に当たり関係各位の多大なるご協力を得たのでここに深く感謝の意を表します。特に実際の超高層住宅のアンケート調査では、葛西クリンタウン1-6号棟の皆様には大変お手数をおかけしたにもかかわらず、快くご回答いただきました。また、振動シミュレータで被験者になっていただいた方には長時間の拘束にもかかわらずご協力いただきました。ここに厚く御礼を申し上げます。

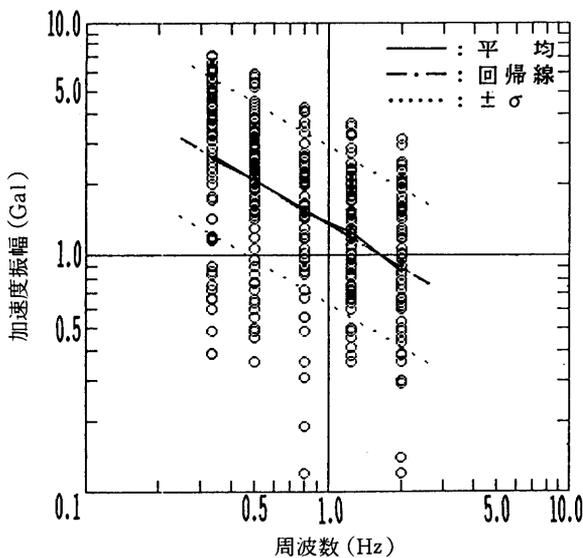


図10 順方向の知覚閾(感じ始め:UP)

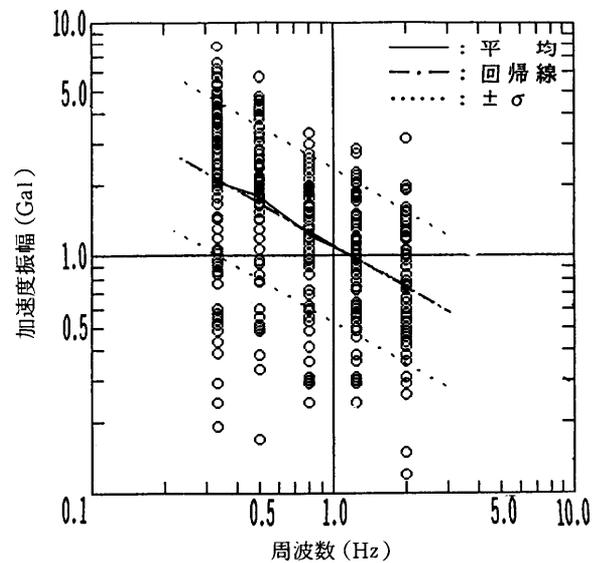
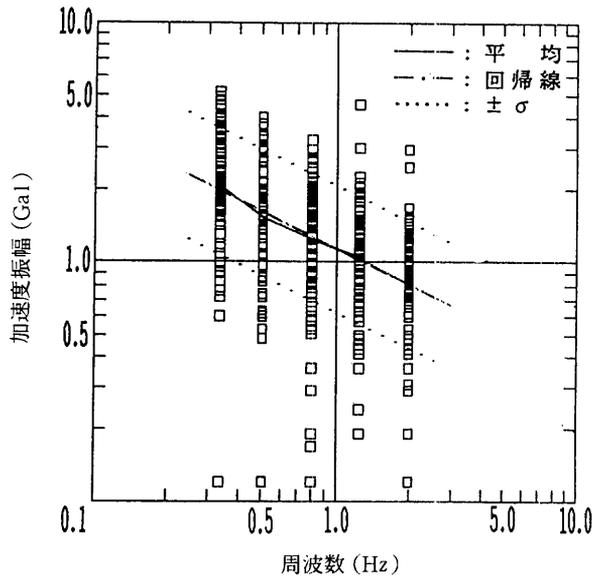
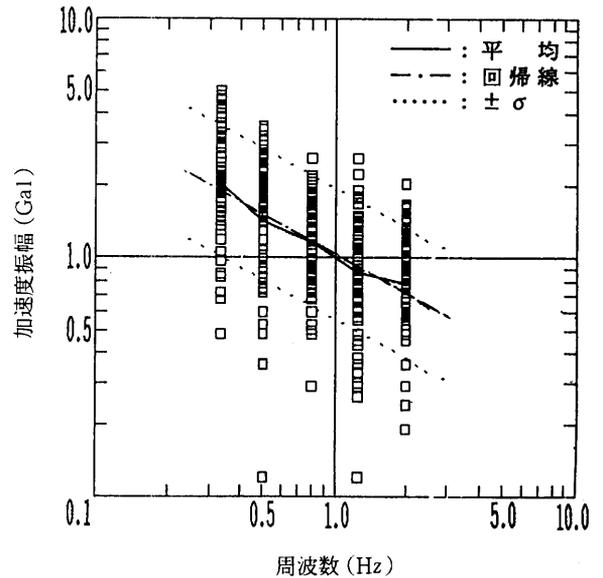


図11 直角方向の知覚閾(感じ始め:UP)



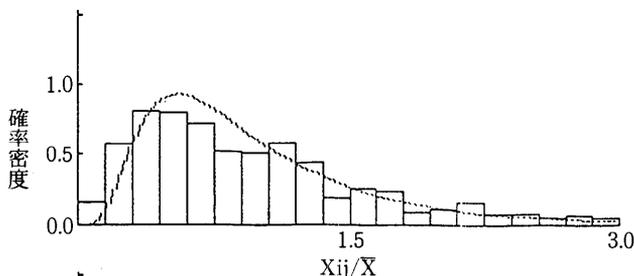
(c) 順方向 DOWN

図12 順方向の知覚閾(感じ終わり:DOWN)

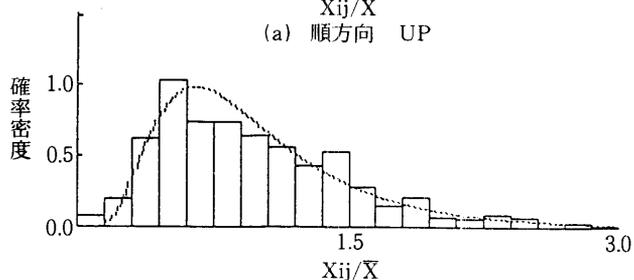


(d) 直角方向 DOWN

図13 直角方向の知覚閾(感じ終わり:DOWN)

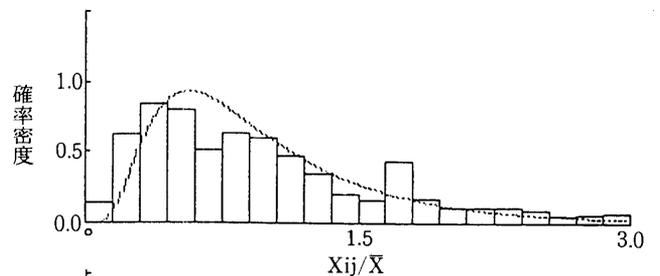


(a) 順方向 UP

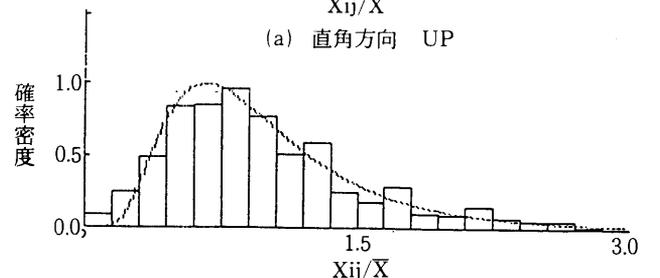


(b) 順方向 DOWN

図14 知覚閾の確率密度分布(全資料, 順方向)



(a) 直角方向 UP



(b) 直角方向 DOWN

図15 知覚閾の確率密度分布(全資料, 直角方向)

<参考文献>

- 1) 竹内・松井ほか, 構造物の耐風性に関する第1回シンポジウム論文集, 1970-5
- 2) 松井・田村ほか, JSSC 日本鋼構造協会誌, Vol. 14, No. 155, 1978-11・12
- 3) Kolnusek, Pirner, Proceedings of the Fourth International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures, HEATHROW, 1975
- 4) 藤本・大熊ほか, 第6回風工学シンポジウム論文集, 1980-11
- 5) 大築・鷺津ほか, 構造物の耐風性に関する第1回シンポジウム論文集, 1970-5
- 6) 川口・本間・武田, 第6回風工学シンポジウム論文集, 1980-11
- 7) Jeary, Ellis, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 13 Nos. 1-3, 1983-12
- 8) Dalgliesh, Cooper, Templin, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 13, Nos. 1-3, 1983-12
- 9) Davenport, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 13, Nos. 1-3, 1983-12
- 10) 鋼構造荷重・耐力係数設計法試案, 日本建築学会鋼構造分

- 科会, 1986-3
- 11) 春原・神田, 日本建築学会学術講演梗概集, 構造1, 昭60-10
- 12) Tall Building Criteria and Loading, PC-13, Robertson et al. Council on Tall Buildings and Urban Habitat, 1980
- 13) ISO 6897, Aug, 1984
- 14) 藤本・大熊ほか, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 昭54-9
- 15) 実験資料, 竹中工務店 技術研究所, 1975
- 16) 人間一環境系(上), 人間機能データブック, Roth, Chamber (佐々木, 山崎訳), 科学技術庁資源調査所, 1972
- 17) Ishimoto, Ootsuka, 東京大学地震研彙報No. 11-1, 1983-3
- 18) Hansen, Reed, et al, Proc. ASCE, St7, 1973-7
- 19) Robertson, Proc. Australian Conf. on Planning and Design of Tall Build., Univ. of Sydney, 1972
- 20) Davenport, Construction in Southern Africa, 1975-12
- 21) Vickery, et al, Architectural Science Series, Applied Science Publishers, 1977
- 22) Irwin, The Structural Engineer, Vol. 56A, No. 9, 1978.9
- 23) 大築, 鋼構造物の耐風設計講習会テキストNo. 10-2, 日本鋼構造協会, 昭42

- 24) 藤本ほか, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 昭45
- 25) Davenport, J. Struct. div., ASCE, 1967-6
- 26) 藤本・大熊ほか, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (構造系), 昭53-9
- 27) 藤本・大熊ほか, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (構造系), 昭56-9
- 28) ISO 2631 Second edition, 1978-01-15
- 29) ISO/DIS2631/2, 1985-08-14
- 30) 建築物の振動障害防止に関する規準 (案), 日本建築学会, 建築雑誌, 昭34
- 31) ECCS ; Recommendations for the Calculation of Wind Effects on Buildings and Structures, Tech. Comm. T12, 1978
- 32) National Building Code of Canada, 1980, Part 4 Design 4. 1. 8, A World List Supplement 1982, 学術文献普及会
- 33) Melbourne (Editor) : Criteria and Loading, Monograph on Planning and Design of Tall Buildings, ASCE, 1980
- 34) Australian Standard Rules for Minimum Design Loads on Struct., Part2, 1975, Wind Forces
- 35) 講座心理学 第4巻, 知覚, 東京大学出版会 1976
- 36) 三木・吉田・町田, 人間工学, Vol. 17, No. Suppl. 1981
- 37) 三輪, バイオメカニズム学術講演会論文集, Vol. 4, 1983
- 38) 加藤・渡部・三瓶, 人間工学, Vol. 17, 1981
- 39) Meister, Zeitschrift für Lärmbekämpfung, 30, 1983
- 40) 大島, バイオメカニズム学会誌, Vol. 8, No. 3, 1984
- 41) 山崎, バイオメカニズム学会誌, Vol. 8, No. 3, 1984

<研究組織>

- | | | |
|-----|------|-----------------|
| 主 査 | 神田 順 | 東京大学助教授 |
| 委 員 | 田村幸雄 | 東京工芸大学助教授 |
| | 佐野行雄 | 住宅都市整備公団主任研究員 |
| | 藤井邦雄 | 清水建設技術研究所環境技術部長 |
| | 崔 恒 | 東京大学大学院生 |
| | 田村哲郎 | 大崎総合研究所研究員 |
| | 大築民夫 | 清水建設技術研究所研究員 |