建築構造物の減衰性能と生体の生理反応

—その2 座位・立位での振動暴露に対する手掌部発汗—

DAMPING RATIO OF STRUCTURES TO PHYSIOLOGICAL RESPONSES

—Part 2 On the perspiration of palms due to exposure
to vibration in sitting and standing postures—

小竹 潤一郎*, 塚 越 勇**

Junichirou KOTAKE and Isamu TSUKAGOSHI

The purpose of this study was to examine experimentally the effect of damping ratio on the physiological response in vibration exposure. The study measured palms for mental perspiration at the time when human bodies are stimulated by vibration of shaking table. The vibration was obtained from the dynamical responses analysis of buildings disturbed by earth quake motions. The shape and amplitude of response waves depend on the damping ratio of the building.

The result confirmed the relation between mental perspiration and damping ratio. At least the damping ratio of 30 percent is necessary to make buildings comfortable.

Keywords : vibration exposure , physiological response , mental-perspiration , random vibration
damped free vibration , minimum damping ratio

振動暴露, 生理反応, 精神性発汗, 非定常振動, 減衰自由振動, 最小減衰率

1. 序論

建築構造物に制振構法等の耐振技術を施した場合、振動抑制性能は最大加速度の低減や減衰率の向上で評価される。構造力学的に評価される諸数値の変化が構造物内に居住する人体の感覚や生理を対象とした快適性の評価と同等であるかの判断基準はない。筆者らは既往の研究^{1)~6)}で、その諸数値の一つである減衰率に着目し、これを単なる物理量としてではなく人体の備える感覚や生理に基準をおいた量として扱うため、また構造物の減衰性能の最適・最小値を上記規準により定めるため数種類の振動暴露実験を行った。これによれば、建物の減衰率の必要最小値は 0.3 であり、そしてこの最小値とは人体の生理反応である精神性発汗の諸量は減衰率の増加と共に減少するが、上記諸量が変動しない値としている。しかし、この結果は仰臥位の人体のみを対象としたものであるため、多種多様な人体の生活姿勢すべてを包括するものではなく、振動に対する人体の影響は一姿勢のみでは判断できない部分が多々ある。

そこで本論は、代表的な生活姿勢である座位・立位を被験者の姿勢として同様の振動暴露実験を試み、仰臥位での実験結果と合わせて、減衰率の下限を提案するものである。これにより、建物内で人体が示す生活姿勢のほとんどを包括した必要最小減衰率が決定され、

構造力学的に評価されてきた減衰率を人体の感覚や生理から定量的に評価することが可能であると考えられる。

2. 実験概要

座位、立位の人体を対象として減衰自由振動波形及び建物の地震時応答波形を用いた振動暴露実験を行い、生理反応と減衰性能の関係を手掌部に現れる発汗反応から調査分析した。実験は前報¹⁾で行った仰臥位での実験結果と比較検討するため同様の方法を採用し、平成8年8月から平成9年1月の間に実施した。

人体への振動入力是一次元振動台を使用し、実験環境を整えるため被験者を乗せる補助ベットの台上に固定し、周囲には人工気候室を設置した。生理反応の計測はカプセル換気法を用いた連続発汗計測装置により手掌部の発汗反応を計測した。この手掌部の発汗反応は、温熱環境に依存せず精神的衝動やストレス等の精神刺激により起こり精神性発汗と呼ばれている。この精神性発汗は、手掌、足掌部及び腋窩部に現れ、単に発汗反応を評価するだけではなく自律神経系や交感神経系の機能まで評価できるとされている。^{7),8)}

本論の一部は参考文献3), 4)に発表している。

* 中部大学大学院工学研究科建設工学専攻 大学院生・工修

** 中部大学工学部建築学科 教授・工博

Graduate Student, Graduate School of Engineering, Chubu Univ., M. Eng.
Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Chubu Univ., Dr. Eng.

被験者の姿勢は以下の姿勢を基準姿勢として定めた。

○座位 …… 補助ベット上に設置した椅子に座位をとらせ、足は肩幅に開き補助ベットに軽く接触させ、両手を膝上に置き、背もたれに軽くもたれた状態で背筋を伸ばし顔を正面に向けた。使用した椅子（和s569129）は、スチールパイプ22φを曲げ、座台、背もたれは合板（ $t=6\text{mm}$ ）が使用されている。椅子はベットへ固定しておらず、接触部は硬質のゴムである。

○立位 …… 補助ベット上に立位をとらせ、足は肩幅に開き腕は自然に垂れ下った状態で、背筋を伸ばし顔を正面に向けた。

また、座位・立位ともに靴の着用（靴下有）で、開眼を指示した。

振動台が水平1次元であるため人体への振動入力方向は一方のみとなるが、身体を入れ替えることにより図1に示すX（背-腹方向）、Y（左-右方向）、Z（頭-足方向）の3種類の加振方向を対象とした。⁹⁾

被験者は健康状態が良好な男女を実験の1条件当たり約8名以上で延べ504人（予備実験を含む）であり、その平均年齢・平均身長・平均体重を表1に示す。また、被験者の最高年齢は27才（男性）で、最低年齢が17才（女性）である。

予備実験や前報の実験結果から男女間に発汗反応量の有意な差は確認されなかったため、性別で区別する必要はないと判断した。また、年齢差による区別も、被験者の約80%以上が21才か22才でその差が少ないため区別する必要がないと判断した。

なお、各実験方法や装置の詳細は前報¹⁾に示してある。

図1 加振方向

表1 被験者諸元

	男性	女性
身長	172.7 cm	159.5 cm
体重	64.8 kg	49.3 kg
年齢	21.1 歳	20.5 歳

3. 人体の振動特性

人体の各姿勢・加振方向における振動特性を把握するため正弦波入力実験を行った。実験は被験者に最大加速度50galの正弦波を与え、被験者の頭部（額）の応答加速度及び振動台上の入力加速度を計測した。被験者に取り付けた加速度計は額に両面テープで固定し、その上から布を巻き保護した。被験者は、表1で示した平均値に近い値を持つ者とし、身長172.8cm、体重58.2kg、年齢23歳の男子学生7名を用いた。計測された応答波形と振動台の駆動波形から、加速度倍率と駆動振動数の関係を求めた。その結果と考察を各姿勢に分類し、図2、図3に平均値を示す。なお、前報で対象とした仰臥位についての結果も図4に示す。

○座位：

図2 応答加速度倍率と駆動振動数の関係（座位）

Y方向加振の場合、共振振動数は1.0Hzと3.0Hz付近である。2.5Hz付近では頭部の横振り（Y方向）が現れた。X方向加振の場合では、頭部の共振振動数は1.8Hz付近である。1.7Hzで上半身の大きな揺れが現れはじめ、2.5Hzでは顎が上下するうなずき運動が現れた。4.0Hz以上では体全体の揺れは少ないが、全身の筋肉や皮下脂肪の部分振動が現れた。立位や仰臥位に比べ体全体の揺れが大きく、頭部の応答倍率は他の姿勢に比べ大きい。目視では、体全体が周期的に大きくゆれていた。

○立位：

図3 応答加速度倍率と駆動振動数の関係（立位）

Y方向加振の場合、共振振動数は1.0Hz付近である。X方向加振の場合、共振振動数は0.5Hzから1.0Hz付近である。3.0Hzでうなずき運動が現れ始め、5.0Hz以上ではうなずき運動は確認されなかった。頭部の揺れは少ないものの、0.4Hzから1.0Hzの低振動数域ではバランスを崩すことがしばしば見られた。また、頭部の応答倍率が他の姿勢に比べ小さいが、これは下半身の屈曲性によって振動を制御する機構が働き、上半身への応答量が減少したことによる。

○仰臥位：

図4 応答加速度倍率と駆動振動数の関係（仰臥位）

Y方向加振の場合、共振振動数は6.0Hz付近である。Z方向加振の場合、共振振動数は5.0Hz付近である。3.0Hzでうなずき運動が現れ、4.0Hzからは振動台と頭部の位相が逆になった。全体的な体の揺れはないが、うなずき運動や首振り現象により応答倍率は大きくなっている。

以上の結果から、今回対象とした平均的な身長体重を持つ被験者では共振振動数や加速度応答倍率等の特性は姿勢の変化に大きく影響され、立位、仰臥位において加振方向に対してはあまり影響されないことが分かる。

また、この正弦波入力実験で発汗反応の計測は行っていないが、振動数と人体の生理反応（発汗、心拍）との関係については、現在調査中である。

4. 減衰自由振動波形による振動暴露実験

4.1 実験概要

風力による建物の揺れに代表されるような、定常・周期的な振動における減衰率を人体の生理反応から評価するため、減衰自由振動波形を用いた振動暴露実験を行い、減衰率と発汗反応量の関係を調査した。実験に用いた加振波形は、10階の鋼構造物を想定した固有周期 1.0秒、減衰率 0.01・0.05・0.1・0.3・0.5の5種類の減衰自由振動波形で最大加速度は300galである。この5種類の加振波形の加振順序が実験結果に与える影響を考慮し、実験結果の対象となる加振波形の前に数回の振動負荷を与え、被験者ごとに加振順序を変更した。また、疲労感を覚えない程度に十分な加振間隔を空けた。

4.2 結果及び考察

座位のX方向で行った振動暴露実験で得られた発汗波形及び加振波形の計測例を図5に示す。

図5 発汗波形の計測例（座位，X方向）

実験から得られた発汗波形を発汗反応量として定量的に評価するため、以下に示す3項目で分析した。

- a：瞬間最大発汗量 …… 居住環境における驚き等の精神的衝撃の評価，図6に示すa
- b：総発汗量 …… 居住環境における精神的快適性の総合的評価，図6に示すb（発汗波形と0軸の囲む面積）
- c：発汗波形が安定するまでに要する回復時間 …… 人体が持つ治癒機能に居住環境が及ぼす影響の評価，図6に示すc

図6 分析方法

分析により得られた各値を被験者毎に評価するのではなく、平均値を用いることがその傾向を単純明確に示すと考え、標準偏差や標準誤差、有意差検定等の統計学的検定を行い、その統計的な妥当性が確認されたため、以下の検討では各加振波形毎に被験者8人の平均値を用いる。また本論では、各分析値の内最も総合的評価が出来る、他の分析値を包括している総発汗量で評価する。

発汗波形を分析して得られた総発汗量と減衰率の関係を座位、立位に分類し、それぞれを図7に示す。

図7 減衰自由振動実験における総発汗量と減衰率の関係

座位、立位のいずれも減衰率の増加に伴い総発汗量は減少を示す傾向にある。この減少傾向において減衰率が0.1以上では値が極めて低く、それ以上での減少傾向はない。また、姿勢の違いにより総発汗量は異なり、座位の状態では振動刺激を受けた場合が立位よりも多くなっている。この相異は正弦波入力実験で明らかとなった振動に対する人体の応答特性や応答量が姿勢により変化することが影響していると考えられる。つまり、立位では下半身の屈曲性によって上半身への応答量が小さくなることから総発汗量は少なくなり、座位では応答加速度が他の姿勢に比べて大きいことで総発汗量は多くなったと考えられる。各加振方向で総発汗量は若干異なるが、この差異について有意差検定を行ったが、統計学的な有意差は確認されなかった。

5. 地震応答波形による振動暴露実験

5.1 実験概要

地震時の建物の揺れは非定常な振動であり、制振構法での減衰効果が最も期待される振動である。そこで、この地震時の建物の揺れを加振波形として振動暴露実験を行い、総発汗量と減衰率との関係を調査した。

実験は、15階建ての鋼構造物（固有周期2.9秒）の地震時を想定し、その建物の減衰率（全階同一）を0.01・0.05・0.1・0.3・0.5と変化させ

応答解析を行い地震応答波形を作成した。このうち15階・10階・5階の応答波形を加振波形とした。応答解析に用いた入力地震波はEl centro, NS波（最大加速度326gal）とTaft, EW波（最大加速度147gal）の2種類である。実験に用いた加振波形は合計で30種類である。

5.2 結果及び考察

立位での地震応答実験から得られた発汗波形の計測例を図8に示す。これらの発汗波形を4.2で示した方法で分析し、減衰率との関係を求めた。El centro, NS波を入力地震波とした場合の総発汗量と減衰率の関係を図9に示す。

図8 発汗波形 (El centro, NS, 10階, 座位)

図9 地震応答実験における総発汗量と減衰率の関係

総発汗量は減衰率の増加により減少する傾向にある。また、減衰率が0.3以上の値は極めて少なく、0.3以上の増加に対しては減少傾向が緩慢である。

定常的な振動である減衰自由振動波形と非定常な地震応答波形とで総発汗量の減少傾向は同様であったが、総発汗量の値が極めて低くなる減衰率は減衰自由振動波形の減衰率0.1に対し、地震応答波形では減衰率が0.3となり、より大きな減衰率である。また、図7と図9を比べると最大加速度の大小に関わらず減衰自由振動波形による総発汗量が極めて少ないが、これにより人体にとって定常的な振動に比べ、非定常な振動がより不快であるとも考えることができそうだ。なお、姿勢、加振方向の相違については減衰自由振動実験と同様の結果が得られた。

6. アンケート調査による不快レベルと減衰率の関係

6.1 アンケート調査概要

振動負荷に対する人体の不快感や不安感を定量的に評価するため生理反応の一つである発汗反応から検討してきたが、この発汗反応が不快感を正確に表現しているかの確認や、各分析値がどの程度の不快感を示しているのかを検討するためアンケート調査を行った。このアンケート調査では、各実験終了後速やかに用紙を配布し、加振波形ごとにその不快感の程度を記入してもらった。この不快感の程度は、予備実験で実施したアンケートの結果や被験者の意見を参考として、次の4段階の不快レベルとして表した。

不快感なし		不快レベル1
ほとんど不快感なし		不快レベル2
少し不快感あり		不快レベル3
不快感あり		不快レベル4

被験者にはこの4レベルの不快レベルで回答を求めており、以下の結果は被験者8人で平均した値である。

6.2 結果及び考察

地震応答波実験でのアンケート調査から得られた不快レベルと減衰率の関係を図10に示す。

図10 平均不快レベルと減衰率の関係 (対象階10階)

図10から不快レベルは減衰率の増加に伴い減少する傾向があり、これは総発汗量の減少傾向とほぼ一致する結果である。

前述した各実験から得られた総発汗量がどの程度の不快感を表しているかを判断するため、不快レベルを用いて総発汗量と不快感との関係について調査した。不快レベルと総発汗量の関係を座位、立位に分類し図11に示す。

図11 不快レベルと総発汗量の関係

不快レベルと総発汗量の関係に曲線的な相関関係が見られる。これは人体が示す不快感を生理反応である総発汗量が良く表していることであり、居住部の揺れに対する人体の感覚を発汗反応を用いて定量的に扱えることが確認された。

これらの結果により、図7や図9に示した総発汗量を不快レベルで評価することが可能となり、減衰率の増加によって減少する総発汗量を人体が感じる不快感の変化として考察することができる。そこで、地震応答波実験（座位, El centro, NS, 10階）での総発汗量を、不快レベルで評価したのが図12である。

図12 不快レベルで評価した減衰率と総発汗量の関係

図12から、減衰率の増加に伴い減少する総発汗量の減少傾向は、不快レベルの低下を促しており、先に述べた減少傾向の変化がみられる減衰率0.3以上では、最も不快感の少ない不快レベル1以下に位置することがわかる。

7. 結論

構造物の減衰性能を人体の生理反応から評価することを目的として座位・立位の人体を対象に、減衰自由振動及び地震応答波形による振動暴露実験を行い、減衰率と精神性発汗反応の関係を調査した。その結果、以下の知見が得られた。

- 1) 振動負荷時に受ける不快感は、振動を受ける方向によってさほど変わらないが、姿勢の違いに対しては敏感である。この姿勢による不快感の相違は、人体の応答加速度が異なることが要因と考えられ、対象姿勢のうち座位が最も振動に対して敏感である。
- 2) 減衰率の増加により、精神的な不快感を示す総発汗量は減少する傾向にある。また、減衰自由振動実験においては減衰率 0.1以上、地震応答波実験では減衰率0.3以上では総発汗量が極めて少なく、減少傾向も緩慢である。
- 3) 人体の感覚的な不快感を示す不快レベルは、減衰率の増加に伴い低下する。この不快レベルで総発汗量を評価すると、減衰率が0.3以上では最も不快感の少ない不快レベル1以下である。
- 4) 構造物の減衰性能の向上は快適な居住空間を構築し、必要最小減衰率は非定常的な地震波を対象とするのであれば0.3であり、風力による自由振動のような定常的な振動を対象とするならば0.1である。

謝辞

御多忙のところ実験に御協力いただいた被験者の方々に厚くお礼を申し上げます。実験及びデータの解析には、中部大学工学部建築学科平成8年度卒業研究生 四宮 希美子 君、平成10年度卒業研究生 鈴木 康弘 君のご協力をいただいた。記して感謝を表します。

参考文献

- 1) 塚越勇他：建築構造物の減衰性能と生体の生理反応—仰臥位での振動暴露に対する手掌部発汗と減衰性能 日本建築学会構造系論文集 NO.497 1997.7
- 2) 小竹潤一郎他：構造物の減衰と生体の生理反応 日本建築学会大会学術講演梗概集 pp811~pp812 1995.8
- 3) 小竹潤一郎他：構造物の減衰と生体の生理反応（その2：15層鋼構造物の地震加速度応答波形による振動暴露実験）日本建築学会大会学術講演梗概集 pp829~pp830 1996.9
- 4) 小竹潤一郎他：建築構造物の減衰性能と生体の生理反応（その3：座位・立位での振動暴露に対する精神性発汗）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.919~pp.920、1997.9
- 5) 塚越勇他：構造物の減衰性能と生体の生理反応 中部大学工学部紀要 第32巻 pp85~pp93 1996.12
- 6) 塚越勇他：鈍感な建物の地震時における挙動 中部大学工学部紀要 第27巻 pp93~pp101 1991.12
- 7) YAS KUNO: Human perspiration. Thomas, Springfield, ILL 1956
- 8) SUGENOYA, J.: Characteristic of central sudomotor mechanism estimated by frequency of sweat expulsion. Jap. J. physiol., 35-783, 1985
- 9) ISO2631: Evaluation of human exposure to whole-body vibration. Part2: Evaluation of human exposure to vibration and shock in building (1 to 80 Hz).
- 10) ISO6897: "Guidelines for the evaluation of the response of occupants of fixed structures, especially buildings and off-shore structure, to low frequency horizontal motion (0.063 to 1Hz)"
- 11) 科学技術庁（資源調査所）：人間-環境系(上巻) 人間と技術社
- 12) 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 日本建築学会 1991.4

(1998年3月9日原稿受理, 1998年8月21日採用決定)