長周期ねじれ振動が人体の視覚知覚に及ぼす影響

EFFECTS OF LONG PERIOD TORSIONAL MOTION
ON HUMAN VISUAL PERCEPTION

新藤 智*, 後藤 剛史**

Satoshi SHINDO and Takeshi GOTO

The authors have carried out studies about human visual perception for torsional motion. The crucial points in this approach are the visual perception of the torsional motion, the relation between the visual perception and the physical perception as well as the comparison of evaluation standards with the results of the experiments.

The authors come to a following conclusion:

1. Measuring the degree of motion with a scale in angular velocity, the human perception threshold appears to be independent of the frequency.
2. Average human perception of torsional motion is 0.79[mrad/s].
3. Visual perception is more sensitive than physical perception.
4. Visual perception threshold of the experiments are lower than the numerical values of standards.

Keywords: Long period motion, Torsional motion, Human perception of motion,

Visual perception, Physical perception, Visual simulator

長周期振動, ねじれ振動, 振動知覚, 視覚知覚, 体感知覚, 視覚シミュレーター

1 はじめに

これまでに行われてきた風揺れを対象とする高層建築物の居住性に関する研究は、動揺実験装置を用いた研究ばかりでなく、実際の建築物内で動揺発生時に行われたアンケート調査もあり、世界各国の振動基準ならびに指針を制定する際にデータとして活用されている。しかし、図1に示すように、それら人体の振動感覚に関する既往研究のほとんどは並進振動の体感知覚を対象としており、ねじれ振動および視覚負荷を伴った研究は極めて少ないのが現状である。

図1 既往研究と本研究の位置付け

しかし、実存高層建築物には並進振動とねじれ振動が同時に生じるのが一般的であり¹²⁾、海外で発生している動揺においては強風時に「揺れをはっきりと知覚することが出来、船のデッキにいるような感じで真っ直ぐ歩くには神経を集中する必要があった」とされ、特にねじれ振動はその動揺時に動揺する窓外景観を眺めていると居住者に大きな不安を与える等の支障が生じることが高層建築物に関する国際会議において報告されている¹³⁾。そのような指摘があるにも拘わらず、ISO6897-1984¹⁴⁾、日本建築学会¹⁵⁾においてはねじれ振動の要素は加味されていない。またヨーロッパ鋼構造連合(ECCS)による構造物に及ぼす風の影響の算定指針¹⁶⁾(以降 ECCS 指針と記す)におけるねじれ振動に対しての提示に関しても、その数値の人体への具体的な影響に関する記述は見られない。そこで、筆者らはねじれ振動における人体の振動知覚に関する研究に着手した。その主な対象は視覚知覚と体感知覚である。視覚知覚に関する建築物の振動時の窓外景観提示方法としては、撮影した原画像を編集し実験用映像とする視覚的振動負荷を採用することとした。本報告では振動知覚実験の結果についてについてまず報告を行う。

* 法政大学大学院工学研究科 大学院生・工修
** 法政大学工学部建築学科 教授・工博

Graduate Student, Graduate School, Construction Eng., Hosei Univ., M. Eng.
Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Eng., Hosei Univ., Dr. Eng.

さらに上記 ECCS 指針、N. Isyumov により提案されたねじれ振動に対する風外力による高層建築物に生じる振動の許容値評価指針¹⁷⁾ (以降 N. Isyumov の提案値と記す) ならびに本研究における実験結果との比較検討を行う。

2. 実験概要

2.1 実験環境

現実の居住空間では人体の様々な感覚機構で複合的に振動を知覚するが¹⁸⁾、本研究では視覚ならびに体感を対象として、それぞれ独立させて実験を行った。本研究における視覚知覚とは網膜に映りこんだ映像の動揺を感知する能力を指し、体感知覚とは人間がもつ感覚のうち身体の傾きや回転などを受容する平衡感覚により振動を知覚する能力として扱う。視覚知覚実験においては被験者が滞在する実験家屋 (図 2) 自体は一切振動させずに、すなわち体感刺激を一切与えずに透過スクリーンに投影される実験映像のみを動揺要素として被験者に与えて実験を行った。また、体感実験では実験家屋のみを振動させ、透過スクリーンには原画像を未編集のまま投影した。未編集映像は $0.00417[\text{deg/s}]$ の等速運動の映像となっており、視覚知覚実験で使用した動揺に比べ、無視できる程度の変位である。被験者の動揺に対しての知覚状況を知るために曝露後に 4 段階 (動いていない、気がする程度、かすかに感じる、はっきりと感じる) のアンケートの回答を求め、被験者の知覚度の検討を行った。また、実験に使用した映像は 2 種類で、遠くまで見渡せる窓外景観を遠景の映像 (写真 1)、視界の一部に近景の建物が入る窓外景観を遠近混合の映像 (写真 2)、とした。

図 2 実験状況

2.2 実験映像の作成について

実験用映像は、超高層建築物最上階からの景観について、ビデオカメラを超低速で等速回転運動させながら撮影し、その原画像を編集加工することにより速度変化を持たせた映像を作成する手法を用いた。それにより、任意周期、任意振幅の実験用映像を自在に提

写真 1 遠景映像

写真 2 遠近混合映像

示することが可能となっている¹⁹⁾。視覚知覚実験で用いた実験映像を作成するフローチャートを図 3 に示す。

図 3 映像編集フロー

2.3 実験方法

実験は 3 ヶ年に渡り、被験者人数は 96 年：男 18、女 27 人、97 年：男 28、女 10 人、98 年：男 23、女 19 人、実験時間はそれぞれ

の条件で曝露時間 1 分、アンケート記入時間 1 分の計 2 分間とし、被験者の疲労を考慮に入れ約 30 分間の実験後 30 分間の休憩をとり実験を行った。振動数 0.076~0.606[Hz]の長周期振動を実験対象とし、視覚知覚実験では 1.0[mrad/s]を中心に 0.40~6.40[mrad/s]の間の 6~7 条件、また体感知覚実験では振動装置の作動限界上、各振動数とも角度変位 0.1、0.2[deg]の 2 条件で実験を行った。また実験動揺条件の順序は、予備実験の結果から規則性があると揺れを予測する事ができてしまい正確なアンケート結果が得られないため、ランダムな 2 パターンを設定した。

3. 知覚閾実験結果並びに考察

3.1 視覚知覚実験結果

遠景の視覚知覚実験における被験者回答を知覚程度別 (D=動いていない、C=気がする程度、B=かすかに感じる、A=はっきりと感じる) に集計し、動揺条件ごとに母数(上記の A+B+C+D)に対する知覚あり (A+B) の回答数の割合を知覚割合として百分率で求め、その結果をワイブル曲線で回帰したものを図 4 に、曲線より求められる知覚値を表 1 に示す。なお、実験室実験であり被験者の反応が過敏な状況下の結果であることを考慮し、「知覚あり (A+B)」に「C=気がする程度」を含めていない。これは本研究室における従来の並進振動実験における考察手法と同様の処置である。

図 4 遠景視覚知覚実験結果 (角速度)

表 1 ねじれ振動遠景視覚知覚値

振動数 [Hz]	0.076	0.101	0.121	0.152
50%知覚値	0.83*	0.84*	0.67*	0.84*
振動数 [Hz]	0.202	0.303	0.606	
50%知覚値	0.61*	0.90*	0.83*	

*角速度最大値 [mrad/s]

図 4 に注目すると全ての振動数条件において回帰曲線がまとまっ

ており、動揺条件にかかわらずほぼ同じ傾向を示している。さらに上記ワイブル回帰曲線のデータより予想される 50%知覚値 (表 1) をもとに解析を進める。独立変数 (説明変数) を 50%知覚値、従属変数 (目的変数) を振動数、帰無仮説を「50%知覚値は振動数の変化に依存しない」とし単回帰を行った結果ならびに同回帰の 95%信頼区間も合わせて図 5 に示す。

図 5 振動数と遠景視覚 50%知覚値の関係

単純直線回帰の結果²⁰⁾ p 値は 0.4227 となり帰無仮説を棄却することが出来ないことから振動数と知覚値との間に相関はなく、また単回帰を行ったグラフの傾きがほぼ水平であることより、ねじれ振動における遠景視覚知覚では、振動数が変化しても同一値 (0.75mrad/s) 近傍で 50%知覚値に達すると予測できる。この傾向は振動の大きさを角速度で表した場合に見られる。図 6 に見られるように角度を用いた場合、50%知覚値と振動数の関係ではグラフの傾きが右上がりとなり、角加速度ではそれらの関係は反比例となる。したがって、ねじれ振動視覚知覚では振動の大きさを弁別するパラメーターとしては角度あるいは角加速度ではなく、角速度がもっとも相応しいと考える。

図 6 尺度の違いによる知覚割合の変化

次に遠近混合実験の結果も遠景実験と同様に解析を進める。アンケート集計をもとにワイブル回帰を行った結果を図7に、さらに知覚値を表2示す。

図7 遠近混合視覚知覚実験結果（角速度）

表2 ねじれ振動遠近混合視覚知覚値

振動数 [Hz]	0.076	0.101	0.121	0.152
50%知覚値	0.95°	0.97°	0.71°	0.77°
振動数 [Hz]	0.202	0.303	0.606	
50%知覚値	0.68°	0.71°	0.77°	

°角速度最大値 [mrad/s]

図7に着目すると、回帰曲線は遠景実験とほぼ同じ傾向を示している。さらに遠景実験と同様にワイブル回帰より算出される振動数毎の50%知覚値を単回帰したものを図8に示す。

図8 振動数と50%知覚値の関係（遠近混合）

単純直線回帰の結果、p値は0.6519となり、帰無仮説を棄却することが出来ない。したがって、振動数と知覚値との間に相関関係はないこととなる。さらに単回帰を行ったグラフの傾きは遠景実験ほどではないにしろ、ほぼ水平に位置付けられている。したがって、ねじれ振動における遠近混合視覚知覚でも、振動数が変化しただけ

でもほぼ同一値近傍で50%知覚値に達する傾向は同じといえる。

次に参考までに遠景と遠近混合実験の知覚割合の比較を行うために、図4、7におけるワイブル曲線を振動数毎に縦軸を知覚割合[%]、横軸を角速度[mrad/s]とし、まとめたものを図9示す。

縦軸：知覚割合[%]

横軸：角速度最大値[mrad/s]

図9 ねじれ振動における遠景と遠近混合の比較

全ての振動数条件毎に回帰曲線を比較しても極端な違いはみられない。したがって、ねじれ振動視覚知覚においては視界の一部に近景の視対象物が入っても知覚割合に差異はみられない。

3.2 ねじれ振動体感知覚と視覚知覚の比較

体感知覚実験における知覚反応に関する各振動数としての実験条件は3点（対象実験を含む）のみであり、ワイブル回帰を行うことなく、各結果を遠景実験のワイブル回帰曲線図にプロットする形で検討を進める。遠景視覚並びに体感の両実験の結果を振動数毎に示したものが図10である。体感実験の条件を角速度表記で行うと値が幅広くなるためにグラフの横軸の値を図ごとに変えている。

全ての振動数の結果において、視覚知覚の回帰曲線よりも、体感実験結果のほうが低い値となっている。また、その傾向は振動数の増加に伴い顕著な傾向を示している。したがって、ねじれ振動においては体感知覚よりも視覚知覚の方が敏感であると言える。

図 10 体感知覚と視覚知覚の比較

3.3 ECCCS 指針ならびに N. Isyumov の提案値との比較

本研究で求められた知覚値のうち、遠くまで見渡せる窓外景観である遠景実験の結果と、ECCS 指針並びに N. Isyumov の提案値 (表 3) との比較検討を行う。N. Isyumov の提案値とは L. G. Griffin²¹⁾ が求めた角度表記によるねじれ振動に対しての知覚閾値を基に提案された指針となっており、再現期間を 1 年・10 年の 2 つに設定し許容できる応答角速度値を定めているものである。

表 3 ECCCS 指針ならびに N. Isyumov の提案値

	再現期間	基準値
ECCS 指針	記述なし	1.0[mrad/s]
N. Isyumov の 提案値	1 年	1.5[mrad/s]
	10 年	3.0[mrad/s]

横軸を振動数、縦軸を角速度値とし、本研究のねじれ振動視覚 50% 知覚値 (遠景) と上記の両値をプロットしたものを以下の図 11 に示す。

振動数変化に着目すると、ECCS 指針並びに N. Isyumov の提案値

図 11 ねじれ 50% 知覚値と両値との比較

はいずれも建築物の固有振動数にかかわらず同一値が適用されている。このことは、本研究における結果とも一致しており、並進振動に関する体感知覚を対象とした加速度対応の指針に対し、視覚知覚特有の角速度対応であることを示していることになる。

角速度の値に着目すると、全ての値が本研究の 50% 知覚値を上回っており、最も低い値を設定している ECCS 指針程度の動揺を実験室で発生させた場合でも、被験者の半数以上が動揺を知覚する可能性があることが示唆される。また、本研究における 95% 知覚値 (遠景) の平均値は 1.63[mrad/s] となっており、N. Isyumov が提案している再現期間 1 年の値程度の動揺ではほとんどの被験者が視覚的に振動を知覚する結果となっている。ただし、実験室での知覚値は一般の居住状況に比べ被験者が「鋭敏な」状態であり、直ちに等価対応が図られるべきではない。しかし、同提案における再現期間 5 年の値は実験値といえども全条件の 99.9% の知覚値を超えており、実在高層建築物の上層階における居住者のほとんどが窓外景観の動きを視認することが推測される。

4. 結論

ねじれ振動視覚知覚における、本研究で得られた知見を以下に列挙する。

- ① ねじれ振動の視覚知覚では動揺の大きさを角速度で表記した場合、振動数が変化しても 50% 知覚値はほぼ一定値となる。
- ② 遠くまで見渡せる窓外景観と視界の一部に近景の視対象物が入っている窓外景観を比較した場合、両者の知覚割合にほとんど差異は見られない (両者とも 50% 知覚値平均: 0.79[mrad/s] 近傍)。
- ③ 視覚知覚と体感知覚を比較すると、視覚知覚の方が鋭敏である。
- ④ ECCS 指針並びに N. Isyumov の提案値ともに全ての振動数で同一の値を採用しており上記①の結論と一致している。
- ⑤ ECCS 指針程度の動揺を実験室で発生させた場合、被験者のほ

ば半数以上が動揺を視覚的に知覚する。

- ⑥ N. Isyumov の再現期間 1 年の提案値を動揺条件として実験を行った場合、ほとんどの被験者が振動を視知覚することになる。
- ⑦ N. Isyumov の提案値における再現期間 10 年の値が実際の高層建築物で発生した場合、居住者のほとんどが窓外景観の動きにより視覚的に振動を知覚する可能性もある。

5. おわりに

建築物の振動特性はさまざまであり、さらに居住者の状態変化にともなう知覚値の変動等を考えると十分な考察を果たしたとはいえない。しかし、日本国内の建築物においても、強風時にねじれ振動が発生し居住者が動揺を知覚している可能性も考えられる。快適な居住空間を創造するにあたり、日本においても早急にねじれ振動に対しての指針を検討する必要があると判断される。そこで、①本研究により求められた知覚値をさらに詳細に検討②日本国内ならびに世界各国の超高層建築物の振動実測値との比較検討③居住者の状態変化による知覚値の変化、の 3 点を考慮に入れより完成度の高い研究に昇華させて行くことが今後の課題であると考え。

謝辞

ご多忙のところ実験に協力いただいた多くの被験者の方々に感謝します。さらに、実験及び解析の際に協力頂いた当研究室の卒業生に記して感謝の意を表します。

注

本論文は 1999 年度日本建築学会大会（中国）において発表した内容「高層建築物における長周期ねじれ振動が振動知覚に及ぼす影響、梗概集 D-1 分冊、p. 311」に加筆修正したものである。

参考文献

- 1) J. W. Reed: Wind-Induced Motion and Human Discomfort in Tall Buildings, Department of Civil Eng. Research Report R71-42, Massachusetts Institute of Technology, Nov. 1971
- 2) P. W. Chen and L. E. Robertson: Human Perception Thresholds of Horizontal Motion, J. Str. Div. ASCE, Vol.98, No.8, Aug. 1972, pp1681-1695
- 3) 後藤剛史: 強風時における超高層ビルの揺れに対する居住者の反応について、日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）環境、1980 年 9 月
- 4) 藤本盛久、大熊武司ほか: 7920 号台風時の建物風圧力および建築振動についての実測結果 その 5. 建物振動の居住者への影響、日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）構造、1980 年 9 月
- 5) 後藤剛史: 居住性に観点をいたした高層建築物の振動に関する研究、学位論文、1975 年
- 6) 藤本盛久ほか: 長周期水平振動を受ける居住者の振動感覚に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）構造、1979 年 9 月
- 7) 神田順ほか: 長周期水平振動の知覚閾に関する基礎的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集（環境工学）、1989 年 10 月
- 8) 井上二郎、後藤剛史ほか: 長周期振動における窓外景観窓外景観が振動感覚に及ぼす影響に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集（環境工学）、1994 年 10 月
- 9) 石川孝重ほか: 視覚が水平振動感覚に及ぼす影響、日本建築学会大会学術講演梗概集（環境工学）、1999 年 9 月
- 10) 新藤智ほか: 高層建築物における長周期ねじれ振動が振動知覚に及ぼす影響、日本建築学会大会学術講演梗概集（環境工学）、1999 年 9 月
- 11) S. Shindo, T. Goto: Effect of Window View on the Human Perception to Tall Building's Wind-Induced Torsional Motion, The 1999 International Conference on Tall Buildings & Urban Habitat, Kuala Lumpur, Malaysia, 1999
- 12) 嶋田健司ほか: 高層建築物の風によるねじれ振動、風工学シンポジウム論文集、No.38、1990 年
- 13) Section, Wind Loading and Wind Effects: COUNCIL ON TALL BUILDINGS AND URBAN HABITAT, 67th Regional Conference In conjunction with ASCE Structures Congress XIV, Chicago, Illinois USA, 1996.4
- 14) ISO6897-1984: Guidelines for the evaluation of the response of occupants of fixed structures, especially buildings and off-shore structures, to low frequency horizontal motion (0.063 to 1Hz), 1984
- 15) 日本建築学会: 建築物の振動に関する居住性能指針・同解説、1991 年
- 16) European Convention for Constructional Steel works: Recommendations for the Calculation of wind Effects on Buildings and Structures, Tech. Comm. T12, 1987
- 17) N. Isyumov: Criteria for Acceptable Wind-induced Motion of Tall Buildings, International Conference on Tall Buildings and Urban Habitat, Rio de Janeiro, 1993.5
- 18) 3)と同じ
- 19) S. Satoshi, T. Goto: A Method to Edit Movies for A Visual Simulator and the Effects of the Torsional Motion of High-rise Buildings on Human Perception, Sixth International IBPSA Conference, Building Simulation '99, Kyoto, 1999.9
- 20) 佐藤敏彦、小西宏明: Stat View 4.0 日本語版、株式会社ビー・エヌ・エヌ、1994 年
- 21) L. G. Griffin: Serviceability Limit States Under Wind Action, Engineering Journal, American Institute of Steel Construction, First Quarter, 1993

(2001年6月7日原稿受理、2001年10月23日採用決定)